

12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

Desenvolvimento de um controle Fuzzy para a regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica

JOÃO VITOR DAMAS LINO¹, TIAGO SOARES VITOR²

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, jv.lino@hotmail.com.

² Prof. Dr. de Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, tiagosvitor@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.02-9 Transmissão da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica

RESUMO: A crescente complexidade dos sistemas elétricos de distribuição, decorrente do aumento gradativo dos recursos energéticos distribuídos (DERs), pode levar a problemas na conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica. Estes níveis são estabelecidos por órgãos reguladores e objetivam garantir a qualidade do produto energia elétrica. Neste contexto, este trabalho propõe uma estratégia de controle de tensão inteligente, baseado em lógica Fuzzy, a fim de executar a regulação de tensão no transformador da subestação de sistemas de distribuição de modo a garantir os níveis de tensão adequados em todo o sistema. Para isso, o software OpenDSS será empregado, como ferramenta para modelagem do sistema e realização dos cálculos de fluxo de potência, com interface a scripts em Python que implementarão o controle automático inteligente proposto. Testes foram feitos usando o sistema IEEE 13 barras para validação da proposta. Os resultados obtidos demonstraram que o controlador Fuzzy projetado é eficiente na regulação de tensão, apresentando uma capacidade de controle de tensão superior aos controladores convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de distribuição; lógica fuzzy; regulação de tensão; qualidade de energia.

Development of a Fuzzy control for voltage regulation in electric power distribution substations

ABSTRACT: The growing complexity of the electrical distribution systems, resulting from the gradual increase in distributed energy resources (DERs), can lead to voltage problems which violate the permitted voltage levels. These levels are established by regulatory agencies and aim to ensure the electrical power quality. In this context, this work proposes an intelligent voltage control strategy, based on Fuzzy logic, to perform the voltage regulation in the substation transformer in order to meet the adequate voltage levels throughout the distribution system. For this, the OpenDSS software will be used as a tool for modeling the system and performing power flow calculations, with an interface to Python scripts to execute the proposed intelligent automatic control. Tests were carried by using the IEEE 13 bus for validation of the proposal. The results demonstrated that the Fuzzy control designed is efficient in the voltage regulation, presenting capacity of voltage control superior to that of conventional voltage regulation.

KEYWORDS: Distribution systems; fuzzy logic; voltage regulation; power quality.

INTRODUÇÃO

A melhoria na qualidade do fornecimento de energia elétrica tem sido motivada, ao longo das décadas, pelo aumento das exigências de qualidade e continuidade por parte de consumidores e agentes reguladores, e pelo mercado competitivo de energia elétrica, levando ao aperfeiçoamento deste setor.

A ANEEL, órgão regulador e fiscalizador do setor elétrico nacional, estabelece as disposições relativas às conformidades dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente através do

Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021). Em redes de distribuição, metodologias capazes de manter o nível de tensão das linhas de distribuição dentro dos limites adequados são fundamentais para garantir a qualidade da energia elétrica. Entretanto, gradativamente os sistemas estão ficando mais complexos, devido à penetração de recursos energéticos, tais como geradores baseados em fontes renováveis (fotovoltaica e eólica), tornando a tarefa de controlar a tensão mais difícil (MELLO *et al.*, 2017).

Tradicionalmente, os controles de tensão das redes de distribuição são feitos usando controladores autônomos que usam medições locais de grandezas elétricas a fim de compensar a queda de tensão ao longo da rede. Na subestação, os TAPs do transformador são usados para manter a tensão na barra secundária dentro dos níveis desejados, enquanto ao longo do alimentador da rede, reguladores e capacitores são instalados para auxiliar no controle da tensão (LIANG *et al.*, 2003).

Atualmente, devido ao avanço tecnológico dos sistemas de comunicação, controle e processamento, a utilização de técnicas avançadas de regulação de tensão tem se tornado viáveis (MIRANDA, 2007). Portanto, neste contexto da necessidade de melhoria do perfil de tensão e viabilidade de integração de sistemas inteligentes à regulação de tensão, propõem-se neste trabalho um controle Fuzzy que implemente estratégias eficientes de correção dos problemas de violação de tensão.

MATERIAL E MÉTODOS

As tensões nas redes de distribuição devem permanecer dentro dos limites de segurança e qualidade para que os equipamentos elétricos presentes na rede possam operar adequadamente, evitando a redução da vida útil. Essa restrição é apresentada pela equação abaixo:

$$V_{min}^{lim} \leq V_{i,\phi} \leq V_{max}^{lim} \quad (1)$$

onde $V_{i,\phi}$ é a tensão em cada fase ϕ da barra i que deve se encontrar entre os limites V_{min}^{lim} e V_{max}^{lim} definidos por 0,95 p.u e 1,05 p.u, respectivamente, segundo a ANSI Standard C84.1-2011 (ANSI, 2011).

A técnica responsável por atender à equação (1) chama-se regulação de tensão. Com esse objetivo, este trabalho utiliza a integração entre dois softwares, sendo eles: o OpenDSS®, que é responsável pela modelagem do sistema elétrico da rede de distribuição e pelos cálculos de fluxo de potência, e o ambiente de programação em Python™, que recebe os resultados de simulação do OpenDSS® (i.e., informações de medição de potência, tensão, corrente, etc.) para, em seguida, processar essas informações e propor ajustes de controle (i.e., as correções dos TAPs do transformador na subestação) baseados em estratégia inteligentes a fim de melhorar o perfil de tensão do sistema. A Figura 1 ilustra a integração entre os softwares OpenDSS® e Python™ através da interface COM.

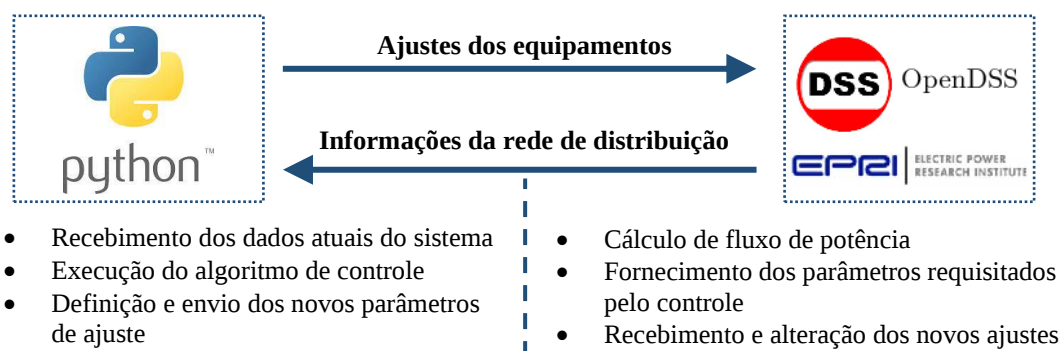


FIGURA 1. Integração entre Python™ e OpenDSS®.

A Figura 2 apresenta a proposta do fluxograma do algoritmo de controle. Inicialmente é identificado o nó com maior desvio de tensão; depois é verificado se a tensão deste nó violou ou não os limites permitidos. Caso não exista violação de tensão, não é necessária comutação dos TAPs de controle do regulador de tensão na subestação. Caso haja violação de tensão, o controle então identifica o TAP mais adequado e realiza o seu ajuste, atuando no sistema. Em seguida, o fluxo de potência é recalculado e um novo ciclo se reinicia até obter a melhoria no perfil de tensão.

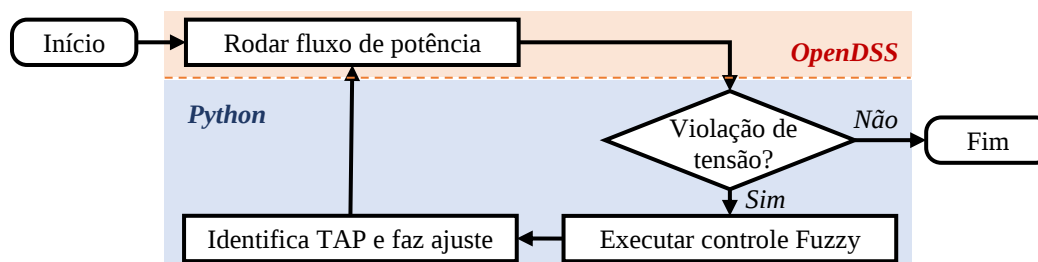


FIGURA 2. Fluxograma do algoritmo de controle fuzzy proposto.

Para implementar a estratégia da Figura 2, um controlador Fuzzy é projetado. Foram consideradas como variáveis de entrada a pior tensão do sistema e a posição atual do tap, sendo elas representadas pelas variáveis *Tensão* e *Tap*, respectivamente, nas Figuras 3a e 3b. A variável de saída é dada pelo ajuste necessário a ser feito na posição do tap, elevando-a ou reduzindo-a, conforme a variável *Ajuste* na Figura 3c. As funções de pertinência de todas as variáveis estão detalhadas na Figura 3.

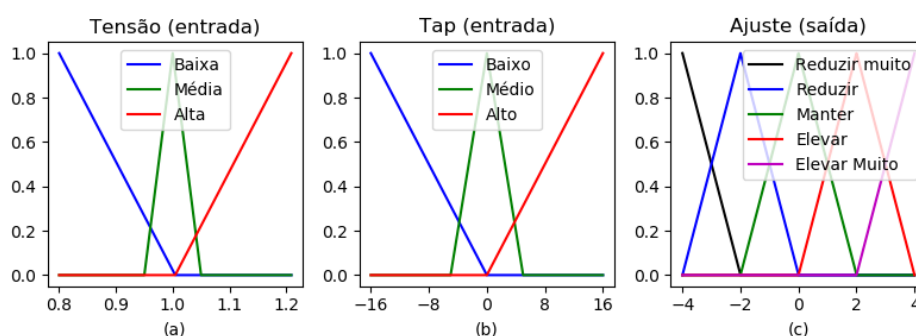


FIGURA 3. Fluxograma do algoritmo de controle fuzzy proposto.

A base de conhecimento do sistema de controle proposto se encontra armazenada nas regras fuzzy *Se-Então* na Tabela 1. Em geral, se a pior tensão do sistema estiver baixa, a posição do tap deve ser elevada. Se a pior tensão estiver alta, logo, a posição do tap deve ser reduzida. Por fim, se a pior tensão estiver dentro dos limites permitidos (cujos valores estão modelados pela função de pertinência Média), a posição do tap deve se manter. Entretanto, o ajuste dos taps deve ainda considerar os limites operativos do regulador de tensão, i.e., conforme a posição atual do tap, ele poderá ser ajustado em menores ou maiores passos a fim de não ultrapassar seus limites. O processo de inferência adotado no sistema fuzzy foi o max-min, tendo-se como método de defuzzificação de saída o centro de área.

TABELA 1. Regras Fuzzy para a regulação de tensão.

	Tensão		Tap		Ajuste
Se	Baixa	e	Baixo	Então	Elevar muito
Se	Baixa	e	Médio	Então	Elevar muito
Se	Baixa	e	Alto	Então	Elevar
Se	Média	-	-	Então	Manter
Se	Alta	e	Baixo	Então	Reduzir
Se	Alta	e	Médio	Então	Reduzir muito
Se	Alta	e	Alto	Então	Reduzir muito

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de teste IEEE 13 barras (IEEE, 1992) foi utilizado para a validação da proposta deste trabalho. Apesar da baixa complexidade, ele possui todos os elementos de um sistema de distribuição tradicional, como: linhas bifásicas e trifásicas, cargas concentradas e distribuídas, transformadores e capacitores. A Figura 4 mostra o diagrama unifilar do sistema. Foi considerado um regulador de tensão em cada fase do transformador da subestação a fim de garantir capacidade de controle dos níveis de tensão secundária que alimentarão cargas do sistema.

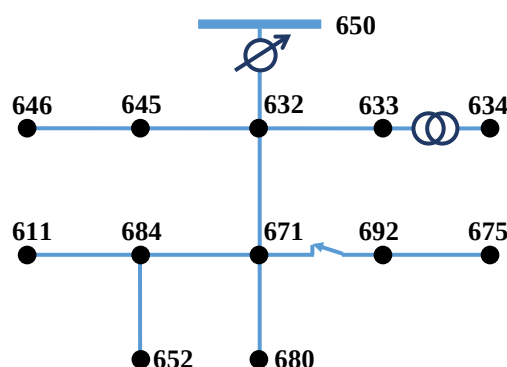


FIGURA 4. Diagrama unifilar do sistema IEEE 13 barras.

Com o objetivo de ilustrar os problemas de queda de tensão no sistema ao longo de um dia de operação, as cargas serão consideradas variando de 0,3 p.u a 1,5 p.u.. Com isso, é possível avaliar a efetividade do controle de tensão e a sua capacidade máxima. Para efeitos de comparação, 3 (três) casos serão implementados:

- C_{BASE} : caso base (sem a controle de tensão);
- C_{CONV} : operação com o controle convencional;
- C_{FUZZY} : operação com o controle fuzzy.

A Figura 5 apresenta os resultados de cada caso. Quando o circuito está sem controle automático da tensão (C_{BASE}), a tensão máxima do sistema permanece dentro do limite, mas a tensão mínima ultrapassa o valor mínimo permitido a partir de uma carga de 0,8 p.u. (80% de carregamento), o que é prejudicial para o funcionamento adequado de equipamentos dos consumidores. No entanto, quando o controle convencional de tensão é implementado (C_{CONV}), este eleva o valor da tensão no transformador da subestação para compensar a queda da tensão acentuada ao longo do alimentador. Agora, o regulador de tensão permite aumentar a capacidade para lidar com mais carregamento no sistema (numericamente, violações de tensão aparecem somente quando a carga ultrapassa 1,1 p.u.). Isso evidencia a importância de se implementar a regulação automática de tensão. A Figura 5 ainda apresenta os resultados do controlador Fuzzy proposto (C_{FUZZY}). Esta estratégia apresenta uma capacidade superior para operar o sistema, uma vez que cargas adicionais podem ser consideradas sem que haja violações de tensão. Em termos numéricos, mesmo que o carregamento alcance 1,3 p.u., o controle fuzzy ainda é capaz de melhorar o perfil de tensão, mantendo-o dentro dos padrões de qualidade.

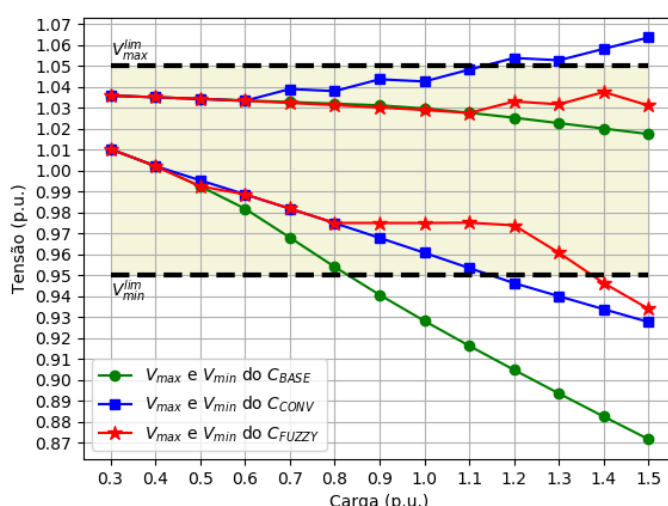


FIGURA 5. Resultados das tensões máximas e mínimas em função da carga para cada caso.

A Figura 6 mostra resultados das tensões para carga de 1,3 p.u. em cada caso. Naturalmente, existe uma queda de tensão à medida que as cargas se afastam da subestação. Quando não existe controle (C_{BASE}), vários nós apresentam violações no limite inferior de tensão (Figura 6a). Quando o controle

convencional é considerado, este tenta compensar a queda da tensão, mas alguns nós mais distantes ainda apresentam violações de tensão (Figura 6b). Finalmente, no caso do controle fuzzy proposto, nenhuma violação de tensão é observada, confirmando a efetividade da regulação de tensão (Figura 6c).

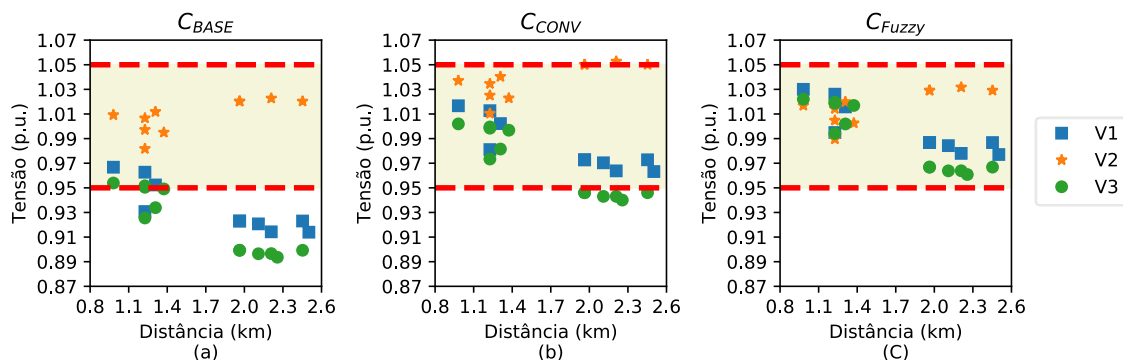


FIGURA 6. Perfil de tensão para carga de 1,3 p.u. para cada caso.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, demonstrou-se que a regulação de tensão é uma técnica fundamental para que a operação do sistema elétrico de distribuição atenda aos padrões de qualidade dos níveis de tensão. Embora o controle convencional, normalmente utilizado pelas concessionárias, seja eficiente na regulação automática de tensão até um certo carregamento do sistema, o controle fuzzy desenvolvido neste projeto, apresentou desempenho superior, garantindo uma capacidade maior de controle para lidar com sobrecargas do sistema. Devido a constante expectativa de crescimento da carga elétrica do sistema de distribuição, o método proposto neste trabalho é promissor, permitindo adiar investimentos no aumento de capacidade da rede. Para a implementação do método, pressupõe-se que o sistema de distribuição tenha um controle centralizado com toda infraestrutura de medição e comunicação necessária. Trabalhos futuros incluem testes em sistemas mais complexos e o aprimoramento do controle fuzzy para lidar com a coordenação de vários reguladores de tensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo apoio e suporte durante essa caminhada, principalmente nos momentos mais difíceis, os quais quase me fizeram desistir.

A minha avó, que esteve presente em minha criação, me incentivou aos estudos e me fez ser quem sou hoje. Gostaria que estivesse aqui hoje para poder me ver finalizar esta jornada.

Agradeço também ao meu professor e orientador Dr. Prof. Tiago Soares Vitor pelas ideias, orientação, discussões e demais auxílios na elaboração deste trabalho.

E por fim, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, seu corpo docente e demais colaboradores pela excelente educação pública, gratuita e de qualidade.

REFERÊNCIAS

ANEEL. PRODIST – MÓDULO 8. [S. l.], 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 08 julho 2021.

ANSI C84.1-2011 For Electric Power Systems and Equipment— Voltage Ratings (60 Hertz). [S. l.], 2011.

IEEE. RESOURCES. [S. l.], 1992. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 6 maio 2021.

LIANG, Ruey-Hsun; WANG, Yung-Shuen. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 610-618, 2003.

MELLO, Ana Paula Carboni de; PFITSCHER, Luciano Lopes; BERNARDON, Daniel Pinheiro. Coordinated Volt/var control for realtime operation of smart distribution grids. *Electric Power Systems Research*, v. 151, p. 233-242, 2017.

MIRANDA, Vladimiro; MOREIRA, André; PEREIRA, Jorge. An improved fuzzy inference system for voltage/VAR control. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 4, p. 2013-2020, 2007.