

Melhoria da Qualidade de Energia em Redes Ramificadas Através de Controle Inteligente de Tensão

Tema: Tecnologias Emergentes

Autores: Lucas Coelho de Lima; Felipe Vilaça Marchezini

Co-Autores:

Empresa: TSEA energia

Resumo

O presente artigo descreve um dispositivo controlador de tensão através de um método para determinação do ponto de operação otimizado e um sistema de controle de tensão para redes de distribuição de energia elétrica ramificadas. O sistema utiliza comunicação no padrão LPWA (Low Power Wide Area) para coletar dados de medidores de tensão instalados em pontos estratégicos da rede. O controlador de tensão processa esses dados e ajusta a tensão de saída dos reguladores de tensão para manter a qualidade do fornecimento de energia dentro dos limites especificados pela regulamentação. A inovação reside na capacidade de comunicação remota, no uso de algoritmos de inteligência artificial para otimização e na compatibilidade com equipamentos legados.

1. Introdução

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é um desafio constante para as distribuidoras, especialmente em redes de distribuição ramificadas. Tradicionalmente, Reguladores de Tensão Monofásicos (RTs) são utilizados para manter a tensão dentro dos limites aceitáveis em pontos específicos da rede de distribuição ou em subestações. No entanto, a topologia das redes de distribuição evoluiu, tornando-se mais complexa e ramificada. Além disso, a introdução de recursos energéticos distribuídos (DER) exigem soluções mais avançadas para a regulação da tensão. Este artigo apresenta uma nova técnica para controle de tensão que utiliza comunicação LPWA (Low Power Wide Area) e algoritmos de inteligência artificial para otimizar a operação de reguladores de tensão em redes ramificadas.

2. Desenvolvimento

2.1 Evolução do Sistema de Distribuição

A operação automática de regulação da tensão pode ser realizada através do uso de RTs, que possuem controles eletrônicos microprocessados e comutador sob carga. Os controladores disponibilizam de recursos de parametrização, aquisição de dados, análise e controle da tensão de saída do sistema, com isso ele é capaz de monitorar e manter a tensão elétrica na rede dentro de limites predeterminados por meio do monitoramento constante dos parâmetros da linha e acionamento do comutador sob carga.

O sistema de distribuição de energia elétrica foi concebido originalmente considerando um alimentador linear, indo da subestação até a carga através de uma linha de distribuição de média tensão. Linhas de distribuição mais longas ou com cargas maiores em seu final podem necessitar de RTs em algum ponto para que a tensão fornecida esteja dentro dos limites permitidos pela regulamentação. Com o passar do tempo, a topologia da rede de distribuição de energia ficou mais complexa, passando a se ramificar da fonte para diversas cargas. No entanto, muitas vezes o sistema de regulação de tensão dos alimentadores não passou por atualizações, de forma que a tensão em alguns pontos pode ficar fora dos limites. Outra novidade no sistema de distribuição de energia são os DERs, que impossibilitam o uso do mecanismo tradicional de Line Drop Compensation (LDC) para determinação da tensão em linhas de distribuição não ramificadas devido à imprevisibilidade e característica dinâmica das DERs. Por exemplo, alteração da intensidade solar, da velocidade do vento ou despacho de energia de baterias, que quase sempre não estão sob domínio da distribuidora de energia.

A Figura 1, mostrada abaixo traz o exemplo de uma rede de distribuição de energia ramificada com DERs.

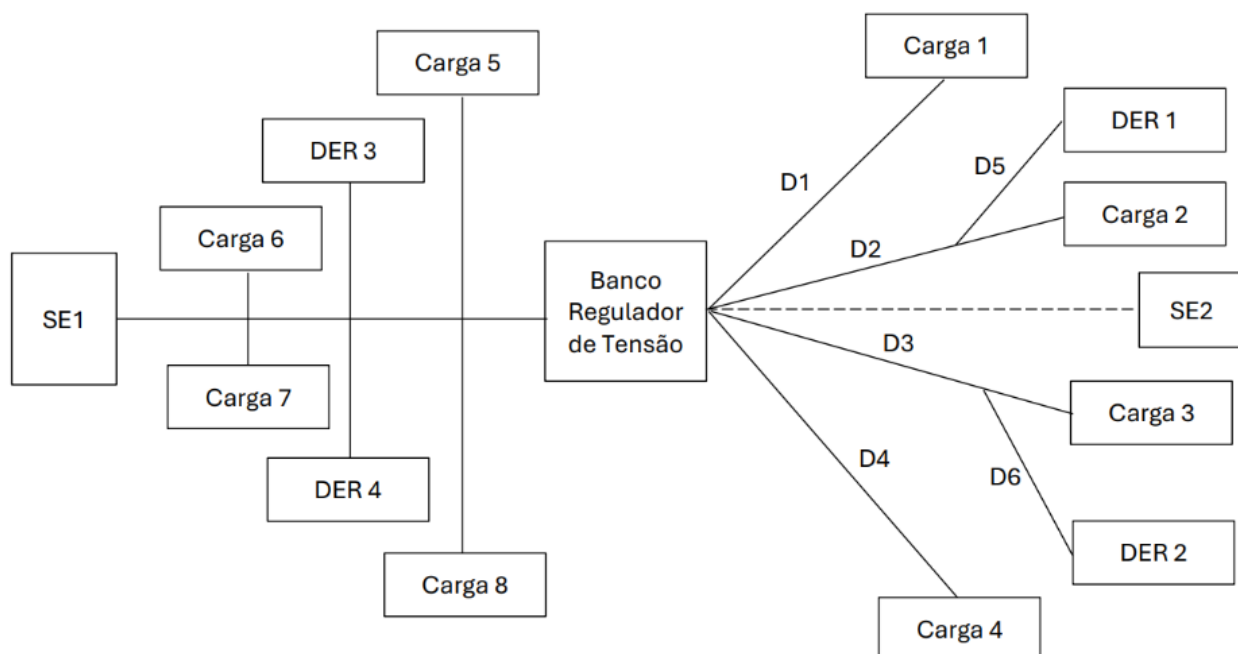


Figura 1 - Exemplo de rede de distribuição de energia ramificada com DERs.

2.2 Proposta de Solução para Regulação de Tensão com DERs

Desta forma, com o objetivo de resolver a regulação de tensão em linhas de distribuição ramificadas com inserção de DERs, um dispositivo controlador de tensão que se comunica remotamente com medidores de tensão instalados na rede pode ser utilizado. Utilizando comunicação LPWA, o sistema coleta dados de tensão e os processa através de um algoritmo especializado que determina o ponto de operação otimizado para os RTs.

O dispositivo controlador de tensão compreende meios para comunicação remota com os medidores e/ou com um ponto intermediário que coleta as informações, meios para realização de um método para determinação do ponto de operação otimizado ou TAP otimizado para operação do Regulador de tensão ou o banco de Reguladores de tensão, e meios para comunicação com controlador do Regulador de tensão. Em uma modalidade preferencial, os meios para comunicação remota incluem comunicação LPWA e/ou rede *mesh*. O dispositivo também pode compreender meios para aprender e memorizar o impacto das mudanças de tensão em cada ponto da rede ramificada.

2.3 Método de Determinação do Ponto de Operação Otimizado

O método envolve a obtenção de dados dos medidores, cálculo da faixa de regulação de tensão, cálculo da tensão média ponderada para os sensores, predição da quantidade de TAPs a comutar e verificação se as tensões estão dentro da faixa de regulação. O algoritmo pode utilizar técnicas de inteligência artificial para aprender e memorizar o impacto das mudanças de tensão em cada ponto da rede, ajustando continuamente os cálculos de predição.

A regulamentação da Aneel determina que a tensão fornecida deve estar dentro dos limites de uma Tensão de Referência (TR) mais as variações superior e inferior aceitas para a faixa de tensão adequada ("ADSUP e "ADINF), como mostrado na Figura 2. Fora dessa faixa, a tensão cairá na faixa de tensão precária, que vai até os limites determinados pela variação de tensão precária superior e inferior ("PRSUP e "PRINF). Além desses limites fica a faixa de tensão crítica.

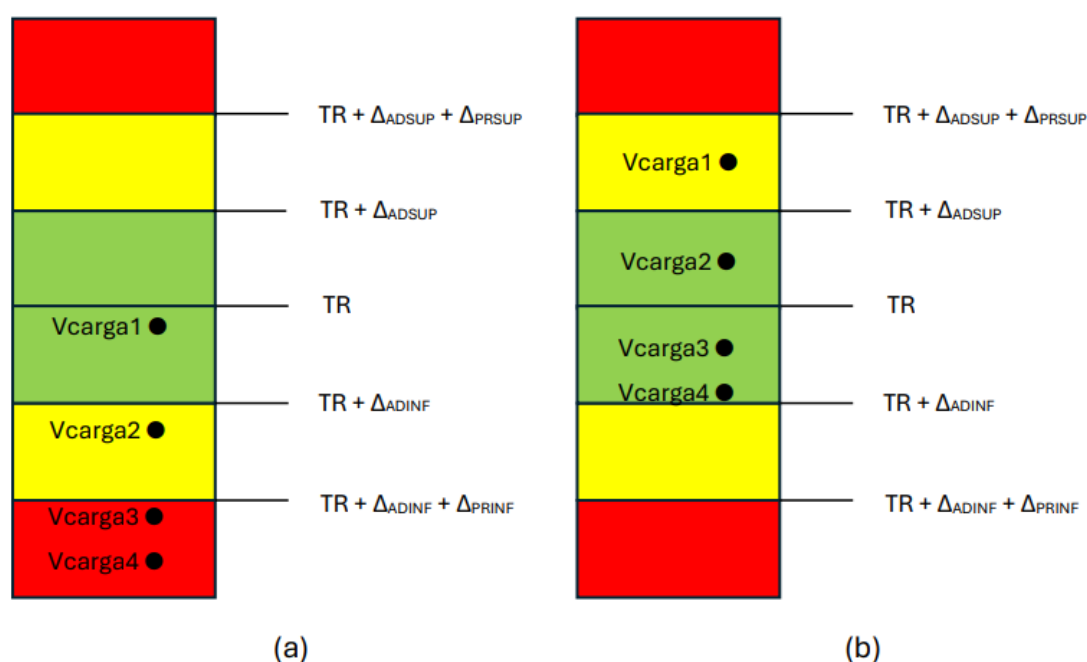


Figura 2 - Os limites de uma Tensão de Referência (TR) mais as variações superior e inferior aceitas para a faixa de tensão adequada.

Inicialmente é calculada a variação entre medições extremas, chamada de Faixa de Regulação de Tensão. Então se verifica se essa variação é menor ou igual a alguma das faixas especificadas na regulamentação da Aneel, no anexo 8 do módulo 8 do PRODIST (Regras e Procedimentos de Distribuição), ilustradas na Figura 2.

A Figura 2 (a) apresenta as tensões que podem ser observadas no campo em uma linha de distribuição ramificada em uma situação hipotética com um controlador de tensão tradicional, que controla apenas uma linha, como no exemplo da Figura 2 (a), a linha da carga 1. As tensões podem ficar e certamente ficarão fora do limite, já que o sistema de controle não controla efetivamente as tensões de todos os ramais. Como mostrado na Figura 2 (a), normalmente é apresentada subtensão, nesse exemplo com as cargas 3 e 4 com tensão crítica. Já a Figura 2 (b) apresenta o resultado obtido com o sistema de controle para redes de distribuição ramificadas, em que o objetivo do algoritmo de controle é ajustar o regulador de tensão de maneira que as tensões fiquem da melhor maneira possível dentro dos limites de tensão adequada. Nesse exemplo, as tensões ficaram quase todas na faixa de tensão adequada, apenas com a tensão da carga 1 ficando na faixa de tensão precária após a elevação de tensão executada pelo Regulador de Tensão. Se a Faixa de Regulação de Tensão for menor que a variação entre os limites máximo e mínimo da faixa de tensão precária, então é calculado o TAP de acordo com o procedimento apresentado nos próximos

parágrafos para regular o máximo de pontos dentro da faixa de tensão precária. Deve ser considerada uma tolerância nesses limites, que é configurável, para evitar instabilidade para o caso de pontos muito próximos dos limites. Senão, é ignorado o ponto com maior desvio em relação à média e repetida essa lógica. Nesse caso, esse ponto com maior desvio pode ser que esteja na faixa de tensão crítica e, nesse caso, pode ser opcionalmente enviado um alarme para o sistema SCADA informando sobre isso. Esse procedimento de eliminar pontos deve ser repetido até obter apenas os pontos dentro da faixa de tensão precária.

Se a Faixa de Regulagem de Tensão for menor que a variação entre os limites máximo e mínimo da faixa de tensão adequada, então é calculado o TAP de acordo com o procedimento apresentado nos próximos parágrafos para regular todos os pontos dentro da faixa de tensão adequada.

Em seguida, é calculado o TAP que deve ser acionado no Regulador de Tensão, sendo que a amplitude máxima da mudança é de 4 TAPs. O objetivo é minimizar a quantidade de vezes em que o TAP é alterado para maximizar a vida útil do comutador. No entanto, deve ser rápido o suficiente para que a tensão esteja regulada dentro do tempo de integração da verificação da adequação da tensão especificada pela regulação.

O método compreende ainda etapas adicionais de exclusão dos valores de medidores com leituras muito discrepantes em comparação aos demais, exclusão de ponto com valor fora da faixa de regulagem de tensão e envio de alarme para SCADA, e mudança do sentido do TAP se as variações de tensões não estiverem no sentido esperado.

2.4 Sistema de Controle de Tensão

O sistema é composto por um dispositivo controlador de tensão, uma pluralidade de medidores de campo e meios de comunicação para envio das informações dos medidores para o dispositivo controlador de tensão. O sistema opera de forma autônoma em um raio de até 15 km, independente do SCADA, utilizando redes mesh para contornar obstáculos e alcançar longas distâncias. Em exemplo de seu diagrama de blocos é apresentado na Figura 4

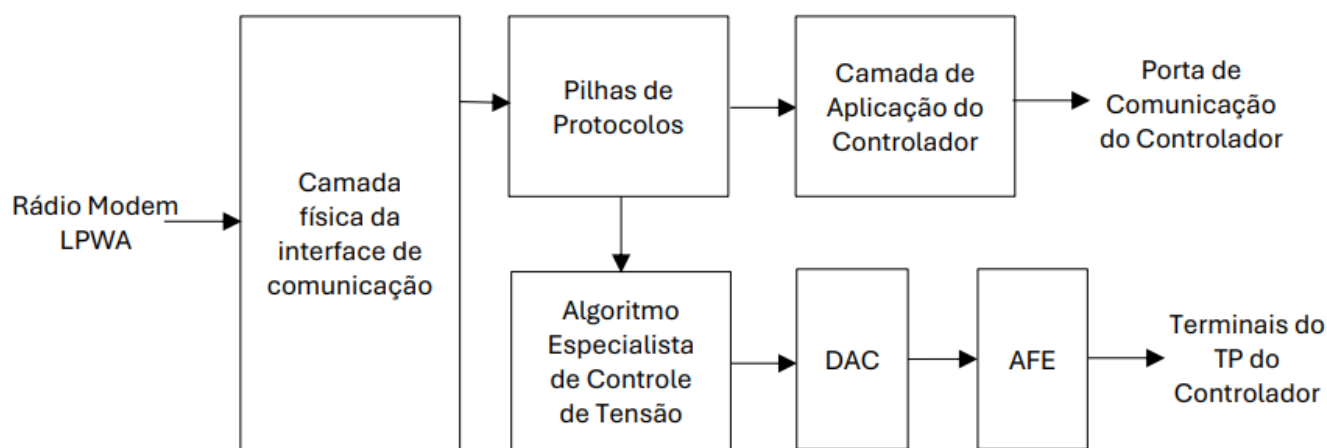


Figura 3 - Diagrama de blocos para uma modalidade do dispositivo controlador de tensão.

O Rádio Modem LPWA é o coletor central de dados da rede de comunicação. Um exemplo de comunicação LPWA que pode ser usada é o padrão Wi-SUN, que usa o protocolo TCP/IPv6 e transporta de maneira transparente os dados da aplicação. Além disso, ele é capaz de formar uma rede mesh através da sua camada 6lowpan. Essa característica é fundamental para alcançar as longas distâncias envolvidas na distribuição de energia. Os repetidores LPWA são os elementos colocados ao longo da linha de distribuição, em locais estratégicos, para rotear o sinal dos sensores de tensão até o rádio modem LPWA.

Se o PER (Packet Error Rate) do sistema LPWA for maior que 20% ou configurável em um intervalo de tempo, o algoritmo será desabilitado e será usada a regulação padrão selecionada pelo usuário. A regulação padrão pode ser não comutar ou modo comum. O modo comum são os algoritmos de funcionamento já disponíveis no controlador de regulador tradicional do estado da técnica, tais como travado em fluxo direto, bidirecional, neutro inativo, cogeração etc. De qualquer forma, os limites de proteção do regulador configurados no controlador de Regulador de tensão continuam tendo prioridade.

A partir de então é implementado o Método de Determinação do Ponto de Operação Otimizado, apresentado na seção anterior.

2.5 Modelo de Predição

Para calcular o TAP é feita a média ponderada de acordo com a equação (1):

$$S_m = (S_1 \times P_1 + S_n \times P_n) / (P_1 + P_n) \quad (1)$$

onde P_1 é o peso do sensor 1 (S_1), P_n é peso do sensor N (S_n) e S_m é a tensão média dos sensores. A partir dessa tensão média calculada é utilizado o algoritmo tradicional de cálculo de TAP, ou seja, o cálculo da quantidade de TAPs a comutar é baseado na diferença entre a média da medição da tensão dos diversos ramais e a tensão nominal. Baseado em predição é calculada a tensão de cada ramo antes da comutação do TAP e caso indicar melhor situação que a atual, o algoritmo toma a decisão de alterar o TAP.

Os pesos podem ser usados para otimizar o resultado. Inicialmente o peso é 1 ou configurável. Caso o cliente queira priorizar algum sensor ele pode ter peso maior, podendo ser um número inteiro de 1 até 10. Caso o cliente possua uma análise aprofundada do alimentador em questão, eventualmente pode ser capaz de inferir valores ótimos para os pesos.

Opcionalmente os pesos podem ser refinados por *machine learning* através da leitura dos sensores e verificação da melhor adaptação aos limites. Isso é especialmente útil quando a DER está presente em alguns ramais e afeta a resposta destes ramais em relação à tensão ajustada pelo Regulador de Tensão, causando a sua variação em uma taxa diferente da taxa de variação dos ramais sem DER.

3. Conclusão

A presente invenção oferece uma solução inovadora para o controle de tensão em redes de distribuição de energia elétrica ramificadas. Utilizando comunicação LPWA e algoritmos de inteligência artificial, o sistema é capaz de otimizar a operação de reguladores de tensão, garantindo a qualidade do fornecimento de energia mesmo em redes complexas e com a presença de DERs. Esta abordagem não só melhora a eficiência do controle de tensão, mas também é compatível com equipamentos legados, facilitando sua implementação em redes existentes.

A inovação reside na capacidade de comunicação remota, no uso de algoritmos de inteligência artificial para otimização e na compatibilidade com equipamentos legados. O sistema proposto é uma solução robusta e eficiente para os desafios modernos de distribuição de energia, proporcionando uma melhoria significativa na qualidade do fornecimento de energia elétrica.

4. Referências bibliográficas

DISPOSITIVO CONTROLADOR DE TENSÃO, MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO MULTIMEDIÇÃO OTIMIZADO COM CAPACIDADE PARA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SIS-

TEMA DE CONTROLE DE TENSÃO EM REDE RAMIFICADA PARA REGULADORES DE TENSÃO. BR
102024018047. 2024.