

<http://dx.doi.org/10.48005/2237-3713rta2022v11n3p96112>

Compensação série como alternativa para o plano de expansão da distribuição*

Series compensation as an alternative for the distribution expansion plan

Raquel de Luca Mattos

Universidade Federal Fluminense
raquel_luca@id.uff.br

Bruno Wanderley França

Universidade Federal Fluminense
bwfranca@id.uff.br

Marcio Zamboti Fortes

Universidade Federal Fluminense
mzamboti@id.uff.br

RESUMO ESTRUTURADO

Diante da necessidade de soluções de planejamento do setor elétrico cada vez mais direcionadas ao aproveitamento racional de recursos, alinhado ainda ao crescimento por demanda de energia elétrica que se evidencia nos sistemas de distribuição, este artigo propõe a aplicação de compensação série em um sistema distribuição de energia elétrica de uma concessionária do sudeste brasileiro como alternativa às técnicas convencionais, visando a resolução de criticidades de tensão e otimização de investimentos no circuito. Nesse sentido, o trabalho objetiva fornecer embasamento teórico, apresentar os conceitos relativos ao dimensionamento, além dos requisitos necessários para viabilizar a instalação de capacitores série no setor de distribuição. Por fim, serão demonstrados os resultados obtidos no estudo realizado para um sistema real considerando a inserção de compensação série ao longo de um alimentador de característica rural, através da utilização dos softwares CYMDIST e ANAFAS. As simulações possuíram a finalidade de verificar o comportamento da tensão, em regime permanente, antes e depois da instalação dos capacitores série, comprovando a sua eficácia em termos de melhorias no perfil de tensão do alimentador.

Palavras-chave: Compensação Série, Regulação de Tensão, Planejamento da Expansão, Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

Given the need for planning solutions in the electrical sector that are increasingly directed towards the rational use of resources, aligned with the growth in demand for electricity that is evident in distribution systems, this paper proposes the application of series compensation in an electrical energy distribution system of a utility in southeastern Brazil as an alternative to conventional techniques, aiming at the resolution of voltage criticalities and optimization of investments in the circuit. In this sense, the article aims to provide theoretical background, present the concepts related to sizing, as well as the necessary requirements to enable the installation of series capacitors in the distribution sector. Finally, the results obtained in the study carried out for a real system considering the insertion of series compensation along a rural

* Received 24 June 2022; accepted in 24 June 2022; published online 08 February 2023.

feeder, using CYMDIST and ANAFAS software. The simulations had the purpose of verifying the voltage behavior, in steady state, before and after the installation of the series capacitors, proving their effectiveness in terms of improvements in the voltage profile of the feeder.

Keywords: Series Compensation, Voltage Regulation, Expansion Planning, Distribution Systems.

1. INTRODUÇÃO

A metodologia para a aplicação de compensação série em sistemas elétricos de potência considera a conexão de banco de capacitores em série em circuitos de corrente alternada, visando compensar um de seus componentes: a reatância indutiva (Wu, et al., 2019). Em sistemas de transmissão, utiliza-se em larga escala esta solução devido a algumas características inerentes aos mesmos. A resistência e a reatância da linha são os dois principais fatores que causam o aumento na queda de tensão. Pelas longas distâncias das linhas de transmissão, considera-se a resistência dos condutores desprezível, diferente dos dados de reatância que são extremamente relevantes. Para os níveis de alta e extra-alta tensão, a eficácia da compensação série possui confiabilidade comprovada visto os inúmeros sistemas em operação existentes (Jesus, et al., 2003).

Diferente da transmissão, os sistemas de distribuição de energia elétrica operam com níveis de tensão reduzidos e de correntes mais elevados, resultando no aumento das perdas elétricas e grandes quedas de tensão. Como método de controle de tensão na distribuição, frequentemente são utilizadas soluções que envolvem e alteram variáveis de corrente e tensão, como a compensação shunt e o regulador de tensão. Porém, os capacitores em série utilizam meios para controlar as características longitudinais da rede elétrica enquanto fornecem energia reativa (Ren, et al., 2011). A sua aplicação na distribuição, em algumas ocasiões e que serão detalhadas ao longo do artigo, apresenta vantagens técnicas e econômicas.

Soluções normalmente utilizadas para resolver problemas de regulação de tensão, como os reguladores de tensão, não são suficientes em alguns casos, pois estes equipamentos possuem um tempo de resposta maior do que os transitórios que ocorrem no sistema. Unindo esta característica de resposta ao fato de que a exigência e regulação em termos de qualidade de energia fornecida ao consumidor final tem sido mais rigorosa, o uso de capacitores em série se torna também uma alternativa para reduzir *flickers* e distorções de forma de onda de tensão (Jesus, et al., 2007). O efeito de sua aplicação é instantâneo e a reatância da linha, junto com as reatâncias do transformador e do gerador, podem chegar a valores próximos a zero. Vale destacar que, no cenário citado anteriormente, a condição de ressonância deve sempre ser observada. Todavia, não basta reduzir o componente de reatância sem garantir a estabilidade de tensão do sistema em regime permanente (Butler, et al., 1938).

Em contrapartida, apesar de vantagens providas pelo uso de compensação série, podendo aqui citar a regulação instantânea, a redução da distorção da forma de onda de tensão, a melhoria do perfil de tensão em regime permanente e o suporte à partida de grandes motores, alguns efeitos adversos são suscetíveis a acontecerem, dentre eles os mais comuns são os fenômenos de ferroressonância e as oscilações subsíncronas. Destaca-se que tais efeitos ocorrem, principalmente, se não houver uma análise assertiva dos estudos e dimensionamento correto nos projetos de suas instalações, de forma a ocasionar a sobrecompensação (Wagner, 1941).

Em (Jesus, et al., 2003), descreveu-se a experiência da implementação do sistema de compensação série em uma distribuidora de energia elétrica na região sul do Brasil. O projeto em questão foi realizado em um alimentador de característica rural com nível de tensão de 23

kV, carga máxima de 12 MVA e extensão de 69 km aproximadamente. Devido ao elevado comprimento do circuito, para o controle de tensão foram necessários três bancos de capacitores paralelos de 200 kvar por fase, além de três reguladores de tensão. O objetivo era a substituição de dois reguladores de tensão por outros dois bancos de capacitores em série, ambos com reatância capacitiva de 35Ω cada, de forma a obter uma melhor regulação de tensão. Os resultados demonstraram a ocorrência de oscilações de tensão na energização do primeiro banco causadas pelo aumento da carga do motor de indução conectado ao alimentador. Assim, o equipamento, cujo objetivo era reduzir o nível de regulação e o efeito de cintilações, produzia oscilações de tensão consideráveis que não podiam se manter no sistema devido ao maior nível de compensação. Depois de estudos de transitórios eletromagnéticos, não foram detectadas soluções técnicas para sanar os problemas relativos às oscilações existentes e a instalação dos equipamentos somente pôde ser realizada em outro alimentador com diferentes características.

Através de simulações no software PSCAD, o trabalho desenvolvido em (Qin, et al., 2016) analisa o fenômeno da ressonância ferromagnética causada pelos capacitores série. Com isso, apresenta uma nova solução FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), com a adição do componente eletrônico tiristor, que possui o objetivo de controlar a capacidade de regulação dos capacitores série, de forma a prevenir a condição de ferrossonância, apesar de possivelmente elevar o custo total do projeto.

Considerando um viés diferente das demais referências bibliográficas citadas, as pesquisas realizadas em (Mokred, et al., 2020) possuem como objetivo a identificação de soluções para o dimensionamento dos capacitores série sob diferentes condições de carga e fator de potência, além de apresentarem comparações e análises críticas em relação aos efeitos e características de aplicações dos dois os tipos de compensação existentes, a série e a paralela, em uma rede de distribuição radial. Como conclusão da comparação realizada, tem-se que o capacitor shunt não consegue se adaptar às diversas condições de carga e fatores de potência, diferente do capacitor série que possui melhor desempenho em condições de carga máxima e baixo fator de potência, sendo essa a condição mais crítica em relação a maiores quedas de tensão.

Outra opção de aplicação do capacitor série pode ser encontrada em (Suzuki, et al., 2008) com sua utilização para o auxílio na partida de motores de indução em um alimentador de característica rural de uma distribuidora brasileira. Em tal sistema existem 61 motores de indução trifásico, mas apenas pouco mais de 40 conseguem entrar em operação pelo nível de queda de tensão devido aos elevados níveis das correntes de partida. Inicialmente, vislumbrou-se a instalação de capacitores série com grau de compensação de 164% e 13 unidades capacitivas em cada fase. Porém, foi observada a ocorrência de ressonância subsíncrona e o projeto teve de ser modificado para equipamentos com 125,9% de grau de compensação, considerando o conjunto de 10 unidades capacitivas.

Diante do exposto que indica a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a aplicação de compensação, este artigo está estruturado da seguinte forma: o primeiro tópico irá explicar, resumidamente, o embasamento teórico sobre a técnica da compensação série para fornecer subsídios ao seu entendimento, incluindo os principais conceitos teóricos de aplicação e a definição para o dimensionamento do grau de compensação, além dos pontos de atenção que devem ser considerados com a implementação. Por fim, será descrito um estudo de caso com o objetivo de verificar a funcionalidade do uso de capacitores série na distribuição, com a aplicação em um sistema real de uma distribuidora da região sudeste do Brasil, como subterfúgio a outras soluções com elevados custos previstas no plano de necessidades para resolver as criticidades de tensão ao longo do horizonte de planejamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: COMPENSAÇÃO SÉRIE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

a) Teoria da compensação série

Conceitualmente, o princípio da compensação série se baseia na redução da reatância indutiva da linha por meio da inserção de bancos de capacitores série (BCS) (Jesus, et al., 2003). A Figura 1 representa exemplos de um sistema radial sem compensação, com a inserção de um componente de compensação série e outro de compensação paralela (ou *shunt*), onde as variáveis representam:

V_1 – Tensão da fonte (V);

V_2 – Tensão da carga (V);

δ – Ângulo da tensão da carga ($^\circ$);

R – Resistência equivalente do sistema exemplo (Ω);

X_L – Reatância indutiva equivalente do sistema exemplo (Ω);

X_C – Reatância capacitiva equivalente do sistema exemplo (Ω);

I – Corrente que flui pelo sistema (A).

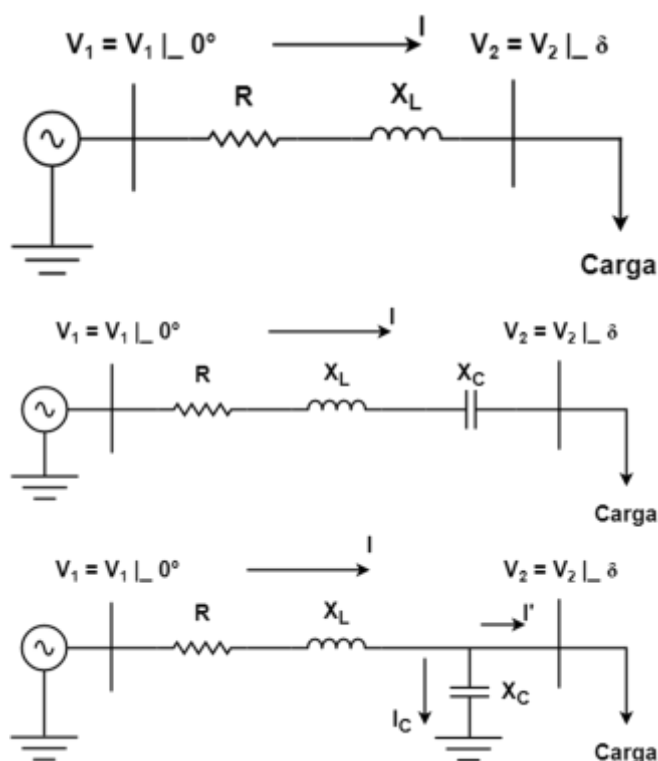


Figura 1 - Diagramas unifilares de um sistema radial sem capacitor, com capacitor série e capacitor paralelo, respectivamente (Mokred, et al., 2020).

Para evidenciar de forma mais clara o efeito deste recurso, serão apresentados alguns diagramas fasoriais de sistemas sem e com capacitores série e paralelo. Inicialmente, na Figura

2, pode ser visto o diagrama fasorial sem nenhum tipo de compensação e carga com fator de potência indutivo.

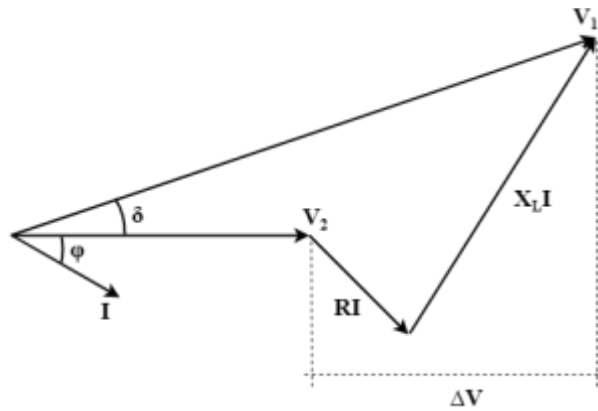


Figura 2 - Diagrama fasorial de queda de tensão sem capacitor (Mokred, et al., 2020).

As Figura 3 e Figura 4 demonstram os diagramas fasoriais de sistemas com a aplicação de capacitores, sendo o primeiro de um capacitor série com reatância menor que a linha e o segundo representando a compensação em paralelo de um sistema.

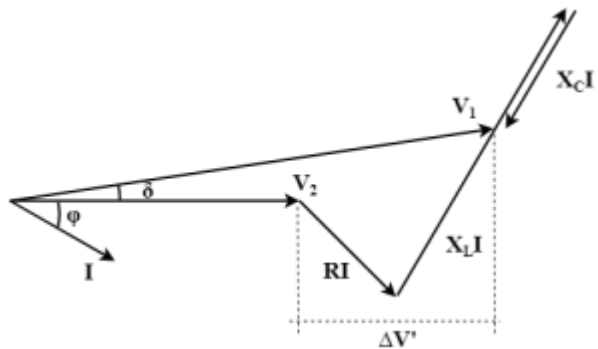


Figura 3 - Diagrama fasorial de queda de tensão com compensação série (Mokred, et al., 2020).

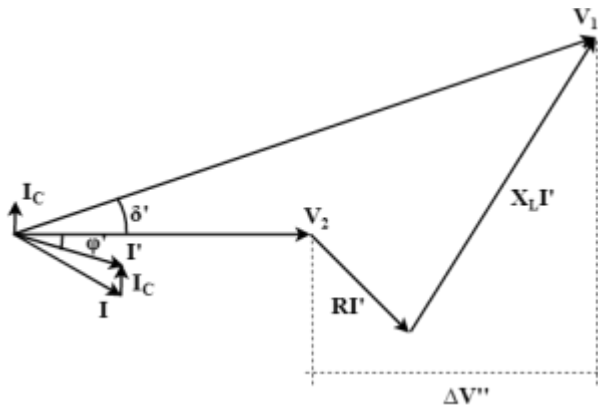


Figura 4 - Diagrama fasorial de queda de tensão com compensação em paralelo (Mokred, et al., 2020).

Sobre a aplicação do BCS da Figura 3, percebe-se que a sua inserção modifica a relação fasorial entre as tensões com a adição de uma reatância capacitiva em série no sistema. Para o sistema trifásico, essa reatância é a de sequência positiva do circuito.

Pela equação (1), pode-se calcular, aproximadamente, a queda de tensão do sistema:

$$\Delta V \cong RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (1)$$

Onde:

ΔV – Queda de tensão entre duas barras do sistema (V);

R – Resistência equivalente do sistema exemplo (Ω);

X – Reatância equivalente do sistema exemplo (Ω);

I – Corrente que flui pelo sistema (A);

Φ - Ângulo da corrente ($^\circ$).

A potência ativa e a reativa da carga podem ser obtidas através das equações (2) e (3):

$$P_{carga} \cong V_2 I \cos \varphi \quad (2)$$

$$Q_{carga} \cong V_2 I \sin \varphi \quad (3)$$

Substituindo (2) e (3) em (1), tem-se:

$$\Delta V \cong \frac{P_{carga}R + Q_{carga}X}{V_2} \quad (4)$$

O valor da queda de tensão pode ser reduzido com a inserção da reatância capacitiva em série que compensa a reatância indutiva do sistema em questão, de acordo com (5):

$$\Delta V \cong \frac{P_{carga}R + Q_{carga}(X_L - X_C)}{V_2} \quad (5)$$

Onde:

X_L - Reatância indutiva total desde a fonte até a carga mais extrema do alimentador (Ω);

X_C – Reatância capacitiva série (Ω);

P_{carga} – Potência ativa por fase absorvida pela carga (W);

Q_{carga} – Potência reativa por fase absorvida pela carga (var).

De modo geral, o valor total de reatância a ser compensado é indutivo devido às características das cargas serem predominantemente indutivas. Quando as cargas forem resistivas, ou seja, com fator de potência unitário, o ganho pelo uso de capacitores série será pequeno. Além disso, o aumento da magnitude da tensão causado pelo capacitor em série é maior para valores mais baixos de fator de potência da carga.

A partir do momento em que a reatância capacitiva se torna maior do que a indutiva, ocorre o fenômeno de sobrecompensação e o valor líquido da reatância da linha se torna negativo. Para que haja maior eficácia na aplicação desta solução, os circuitos com relações X/R mais elevadas devem ser os escolhidos, visto que o capacitor em série não reduz o componente resistivo do sistema e, conseqüentemente, a sua queda de tensão.

Outro ponto positivo do uso de capacitor série está no fato de que, com a redução da carga do sistema, a tensão parcialmente compensada pelo capacitor série diminui de forma correlata, fazendo com o que o mesmo atue com autorregulação (Mokred, et al., 2020), diferente dos capacitores shunt que operam com um valor de reatância fixo e previamente determinado, além do seu efeito não variar de acordo com o aumento da carga do sistema.

b) Grau de compensação

O percentual de compensação série (K_{CS}) a ser aplicado em sistemas elétricos pode ser definido com a equação (6) (Miske, 2000):

$$K_{CS} = \frac{X_C}{X_{tot}} \quad (6)$$

Sendo as reatâncias totais e equivalentes do sistema a montante do transformador obtidas pelas equações (7) e (8), respectivamente:

$$X_{tot} = X_{eq} + X_T + X_{al} \quad (7)$$

$$X_{eq} = V_N^2 / S_{eq} \quad (8)$$

Onde:

X_C – Reatância capacitiva do BCS (Ω);

X_{tot} – Reatância total (Ω);

X_{eq} – Reatância equivalente do sistema a montante do transformador da subestação (Ω);

X_T – Reatância do transformador da subestação (Ω);

X_{al} – Reatância equivalente do alimentador, iniciando no ponto a jusante do transformador da subestação até o de instalação do BCS (Ω);

V_N – Tensão nominal do circuito radial (V);

S_{eq} – Nível de curto-circuito equivalente do sistema a montante do transformador da subestação (VA).

Normalmente, a escolha pelo grau de compensação se dá pela regulação completa da queda de tensão até o ponto em que se encontra a compensação em série, representada pelo $K_{CS} = 1$. Em alguns casos, como a tensão final é muito baixa, o valor K_{CS} aplicado pode ser superior a um (Ren, et al., 2011). Recomenda-se em (Figueiredo, et al., 2015) que o grau de compensação máximo seja de 150% ($K_{CS} = 1,5$), pois valores superiores aumentam a

possibilidade de ocorrência de fenômenos adversos no sistema, tais como ferorrressonância e oscilações subsíncronas.

c) Considerações quanto à aplicação de BCS em sistemas de distribuição

Assim como muitos outros elementos do sistema elétrico de potência, os capacitores série, apesar de trazerem benefícios pela sua aplicação, podem causar efeitos adversos, principalmente quando dimensionados incorretamente. Recomenda-se que seja realizada uma análise detalhada para a elaboração do estudo e do projeto, incluindo simulações de transitórios eletromagnéticos para a entrada em operação do equipamento.

Conforme descrito ao longo deste artigo, o BCS possui eficácia para a regulação de tensão de circuitos em regime permanente, com boa resposta às variações rápidas de carga. Por esse motivo, também se torna um recurso eficiente para o suporte à partida de motores, compensando a redução de tensão decorrente do aumento da corrente reativa requerida pelos motores durante o processo de partida.

Entretanto, deve-se atentar aos problemas passíveis de acontecerem como fenômenos de ferorrressonância, causando severas sobretensões, flutuações momentâneas na velocidade do rotor de um motor síncrono e auto excitação de motores de indução e síncronos (Butler, et al., 1938), além da inerente redução de confiabilidade pela introdução de mais componentes em série. A condição de ferorrressonância, por exemplo, pode ocorrer quando há energização de transformadores em vazio ou com baixo carregamento e surgem as correntes transitórias (*inrush*). Havendo neste circuito o capacitor série, esse fenômeno oscilatório não-linear acontece de forma temporária ou permanente.

Mediante a isso, algumas precauções são importantes: avaliação da adoção de sobrecompensação para sistema com a relação X/R superior a um; curto-circuitar o BCS na energização do circuito e manter o *by-pass* temporariamente por alguns segundos. Para a resolução do fenômeno de ferorrressonância, pode-se considerar a inserção de um resistor de amortecimento, comandado por um relé de subfrequência, sendo instalado em paralelo com o BCS (Jesus, et al., 2003).

Além disso, outro ponto de atenção está na possível ocorrência de auto excitação de motores de indução, provenientes de oscilações subsíncronas. O campo elétrico do sistema elétrico com o BCS energizado pode interagir com campo magnético dos motores trifásicos de indução (MIT). Esta interação pode resultar num circuito ressonante série, principalmente quando há sobre compensação da linha, pois a reatância capacitiva resultante pode ressonar com a reatância indutiva dos MITs em uma determinada condição de acionamento deles. Portanto, numa linha onde há predominância de motores devem ser feitos estudos dos transitórios, considerando a energização dos motores, para verificar a possibilidade da ocorrência de ressonância subsíncrona (RSS) (Suzuki, et al., 2011).

d) Sistemas de controle/proteção e os principais componentes do BCS

Para o correto funcionamento de BCSs integrado às redes elétricas, tornam-se necessárias instalações de sistemas controle e proteção, além de adequado isolamento dos mesmos através de aterramento (Kathim, et al., 2017).

Os capacitores em série podem ser de três tipos: auto protegidos, dimensionados para suportarem sobretensões transitórias ou com proteção externa contra as sobretensões. Por motivos econômicos, há preferência na utilização do modelo com proteção externa, sendo esse

composto por grupos de capacitores, equipamentos de proteção contra sobretensões, chave de *by-pass* e amortecimento, além de um sistema de controle, comando e proteção (Jesus, et al., 2003).

Nesse caso, o dispositivo de controle contra as sobretensões mais utilizado é o varistor em paralelo com o capacitor série, geralmente do tipo ZnO (óxido de zinco). Nesta condição, os terminais de capacitores e varistores, ficam sujeitos à mesma tensão. Porém, somente irá circular pelos capacitores as correntes que eles suportam, segundo o projeto construtivo, e pelos varistores passará o restante da corrente. Para isto, os varistores têm que dissipar uma quantidade significativa de energia durante a circulação da corrente de curto-circuito (Suzuki, et al., 2009).

Incorpora-se a esse sistema chaves para permitir o *by-pass* do capacitor série quando não há tensão na rede de distribuição. Essas chaves podem ser comandadas para estarem fechadas quando a linha estiver sem tensão, considerando ainda um temporizador para abrir a partir de um certo tempo após a energização da linha, de forma que não sejam realizados religamentos nos componentes do BCS, evitando sobretensões elevadas e avarias no equipamento. Para mais detalhes, a Figura 5 ilustra um exemplo do arranjo do conjunto que engloba o capacitor série.

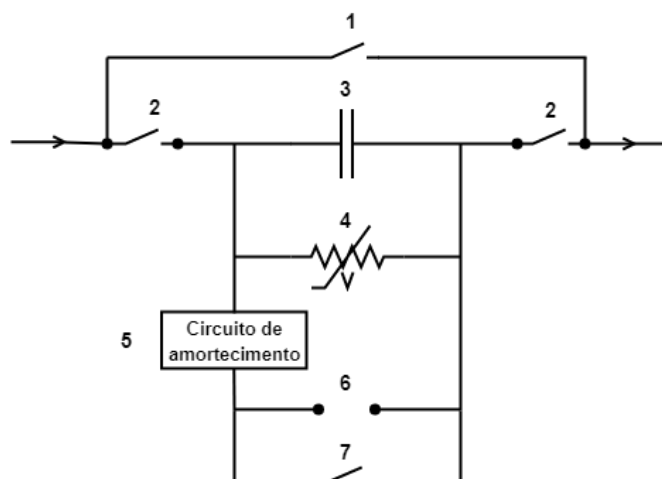


Figura 5 - Diagrama básico do sistema de compensação série (Mokred, et al., 2020).

A identificação dos dispositivos da Figura 5 é:

- 1 – Chave para *by-pass* do banco do sistema de compensação série;
- 2 – Chaves para isolamento do sistema de compensação série;
- 3 – Banco de capacitores conectados em série com o circuito;
- 4 – Varistor ZnO (opcional);
- 5 – Circuito de amortecimento;
- 6 – Centelhador;
- 7 – Chave automática para *by-pass*.

Com o objetivo de otimizar os esforços e tornar mais prática a aplicação da compensação série em sistemas de distribuição, em (Suzuki, et al., 2009) foi apresentado um padrão modular de capacitor série desenvolvido pela concessionária brasileira CPFL, denominado por Compensador Série Modular (CSM). A concepção do padrão desenvolvido considera dois conjuntos, o primeiro deles mais simples e comum a qualquer instalação (formado por capacitor, reator, chave a vácuo, chave *by-pass*, painel de comando e proteção e para-raios), enquanto o segundo capaz de variar com a necessidade do sistema e compreendia células de capacitores, varistor de óxido de zinco, reator, chave a vácuo, chave *by-pass*, painel de comando e proteção, painel de proteção contra desequilíbrio de tensão, transformador e para-raios. Dentre os equipamentos do conjunto com componentes variáveis, pode-se citar a utilização de unidades capacitiva (em série ou paralelo) agrupadas de acordo com a reatância equivalente de cada fase.

3. ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE COMPENSAÇÃO SÉRIE EM UM CIRCUITO RURAL RADIAL DE UMA DISTRIBUIDORA DO SUDESTE BRASILEIRO

Em sistemas de distribuição, normalmente as aplicações de equipamentos de compensação série são mais atraentes para cargas remotas supridas por longos alimentadores, em sistemas com baixo nível de curto-circuito e fator de potência entre 0,8 e 0,95.

Para o estudo de caso em questão, decidiu-se realizar uma pré-avaliação da aplicação de compensação série em um alimentador rural radial de uma distribuidora do sudeste brasileiro, com enfoque no estudo de regulação de tensão em regime permanente. Além disso, como característica de muitos alimentadores rurais, este também apresenta elevado comprimento e é formado por condutores de alta impedância ao longo do tronco principal, contando com o auxílio de três reguladores de tensão dispostos em série para o controle de tensão, que em muitas ocasiões na condição atual, chegam a operar praticamente com o tape máximo (posição 16).

O principal motivo para a escolha desse circuito radial está no fato de que, seguindo as diretrizes para a expansão dos sistemas de distribuição (SDMT) indicadas em (ANEEL, 2021), os estudos de Planejamento devem considerar o horizonte de cinco anos (n+5) para a previsão de novos alimentadores e reforço dos existentes. Destaca-se que o planejamento deve ser realizado com o aproveitamento racional de recursos e com a necessidade por energia elétrica da região, além de custos compatíveis com os requisitos para o desenvolvimento econômico.

Baseado no que fora descrito anteriormente, os três reguladores de tensão instalados no alimentador não são suficientes para a resolução de criticidade ao longo do período de planejamento, e a máxima queda de tensão supera o limite dos 7% admitidos pelo Anexo VIII da Resolução Normativa 956/2021 (ANEEL, 2021). Para essa ocasião, considerando as normas internas da concessionária de energia elétrica, descartou-se a possibilidade do quarto regulador de tensão em série com os demais, visto que há dificuldade para a correta coordenação entre os mesmos pelo elevado tempo de resposta destes equipamentos, possibilitando o aumento de desequilíbrio de tensão em entre as fases do sistema devido ao uso de bancos monofásicos com controle único.

Sendo assim, o plano de necessidades da empresa prevê, para a resolução da criticidade de queda de tensão, a construção de um bay de saída 15 kV na subestação, além de obras com extensão com cerca de 30 km de rede nova para um alimentador de distribuição, havendo necessidade de um investimento aproximado de US\$ 1.700.00,00 para atender a esta demanda técnica.

a) Dados

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros e dados do sistema em questão, desde a subestação abaixadora até o alimentador de distribuição.

Tabela 1 – Parâmetros e dados do sistema simulado (fonte: autor).

| | |
|---|---------------|
| Potência base do sistema (MVA) | 100 |
| Relação de transformação SE (kV) | 69/13,8 |
| Potência nominal transformador SE (MVA) | 25,0 |
| Impedância do transformador SE (%) | 10,8 |
| Tensão nominal alimentador (kV) | 13,8 |
| Comprimento do alimentador (km) | 33,0 |
| Impedância de seqüência positiva equivalente do sistema até a SE (%) | $5,3 + j71,9$ |
| Demanda máxima ano base n (MVA) | 3,7 |
| Demanda máxima ano $n+5$ (MVA) | 4,3 |
| Fator de Potência | 0,92 |
| Taxa de crescimento n até $n+1$ (%) | 1,5 |
| Taxa de crescimento $n+1$ até $n+5$ (%) | 3,0 |

Para o cenário mais crítico do ponto de vista de queda de tensão, considerando a máxima carga registrada no ano n , a topologia do circuito pode ser vista pelo diagrama unifilar da Figura 6, com a distribuição de carga e os principais parâmetros do alimentador subdivididos em onze barras:

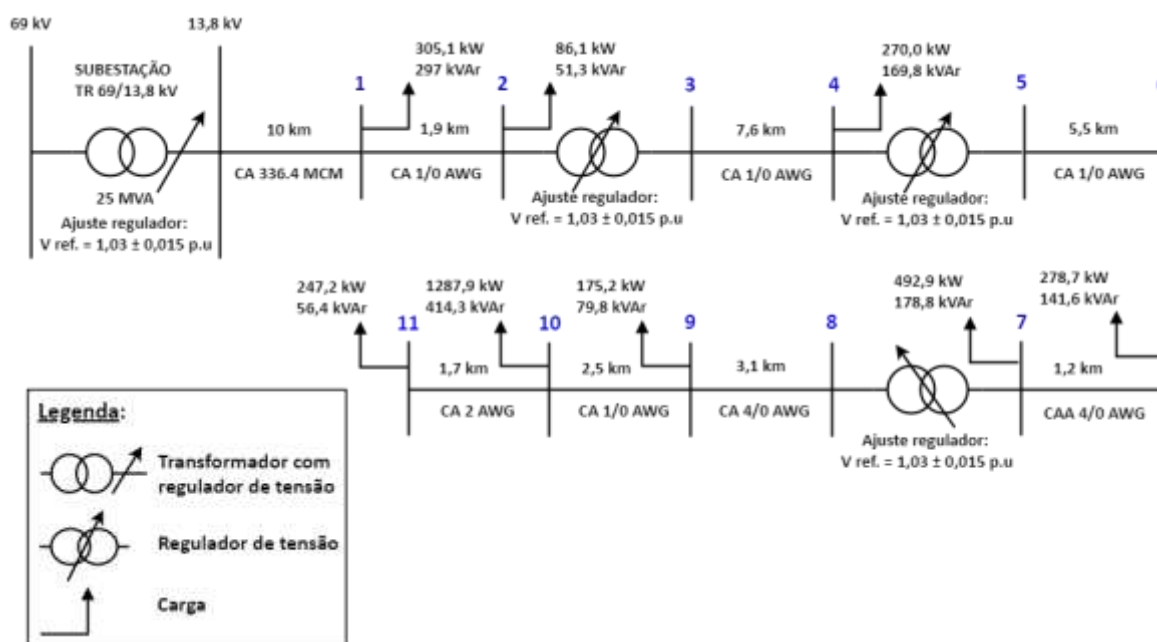


Figura 6 - Representação do diagrama unifilar do sistema simulado (fonte: autor).

De forma a facilitar a visualização da situação real do sistema escolhido, a Figura 7 demonstra a imagem de satélite obtida, em 08/01/2022, pelo software Google Earth:

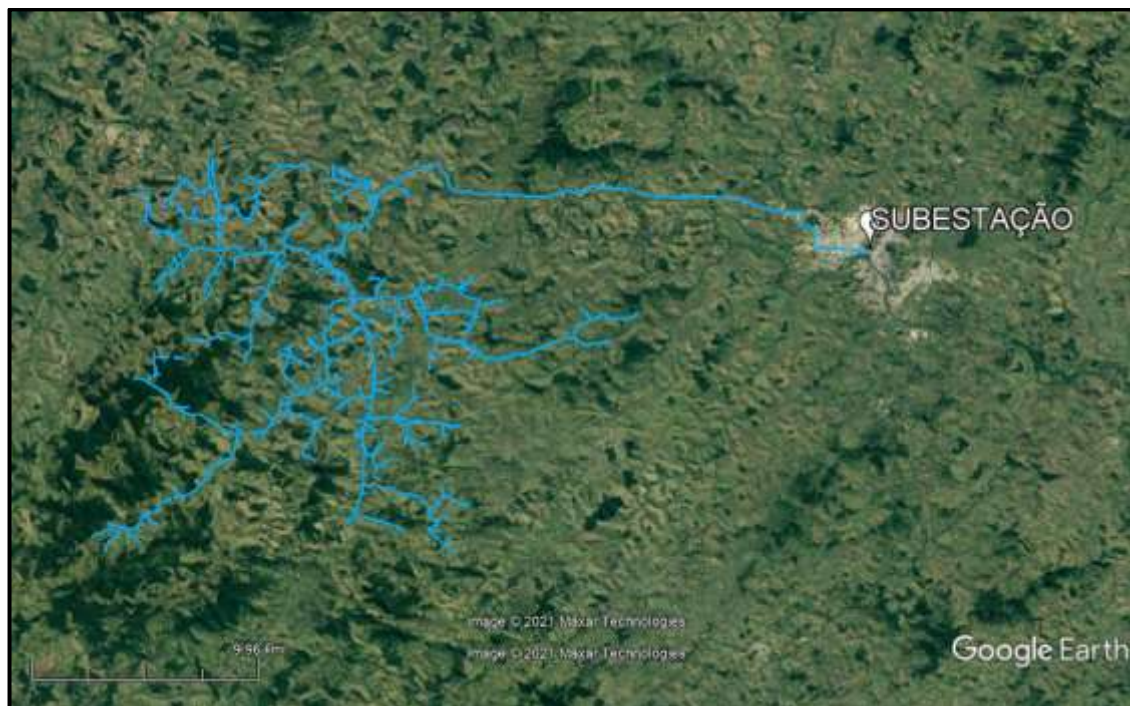


Figura 7 - Imagem de satélite do alimentador simulado (fonte: autor).

b) Dimensionamento do capacitor série

O dimensionamento do capacitor série seguiu os critérios expostos no item 2.b deste trabalho. Para a determinação da reatância capacitiva X_C , calculou-se o somatório da reatância indutiva X_{tot} até o BCS, da seguinte forma:

- $X_{eq} + X_T \Rightarrow$ obtenção dos dados de reatância de sequência positiva equivalente no barramento de 13,8 kV da subestação, através de simulações no software ANAFAS;
- $X_{al} \Rightarrow$ obtenção dos dados de reatância de sequência equivalente do barramento de 13,8 kV até o ponto que se deseja instalar o BCS, através de simulações no software CYMDIST.

Os valores de reatância de sequência positiva estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de reatância de sequência positiva equivalentes do sistema (fonte: autor).

| Referência | Reatância de sequência positiva |
|----------------|---------------------------------|
| $X_{eq} + X_T$ | j71,906% |
| X_{al} | j451,400% |

Pode-se verificar que o capacitor série foi instalado a uma distância elétrica de $Z_1\% = 371,830\% + j451,400\%$ da subestação 13,8 kV, estando esse localizado entre as barras 3 e 4. Para a definição do grau de compensação, utilizou-se a recomendação destacada ao longo deste artigo de, no máximo, 150% ($K_{CS} = 1,5$), sendo esse o valor aplicado na simulação. Portanto, a reatância capacitiva X_C vale:

$$K_{CS} = \frac{X_C}{X_{tot}} \Rightarrow X_C = 1,5 \times [-j7,906\% + (-j451,400\%)]$$

$$X_C = -j 784,959\%$$

Dessa forma, o capacitor série foi dimensionado com a reatância capacitiva de $X_C = -j 784,959\%$ ou $14,94 \Omega$.

c) Resultados

Mediante o valor de $X_C = 14,94 \Omega$, prosseguiu-se com a modelagem do BCS no software CYMDIST para os estudos de fluxo de potência em regime permanente visando verificar o comportamento do sistema para os níveis de tensão sem e com a compensação série. Importante destacar que esta análise foi realizada para o ano final do horizonte de planejamento, o $n+5$.

Tabela 3 - Resultados das simulações sem o BCS e com BCS para os níveis de tensão (em p.u.) em cada barra do sistema (fonte: autor).

| Barra | Tensão (p.u.) | |
|------------|---------------|---------|
| | Sem BCS | Com BCS |
| SE 13,8 kV | 1,015 | 1,015 |
| 1 | 0,948 | 0,964 |
| 2 | 0,917 | 0,936 |
| 3 | 1,009 | 1,018 |
| 4 | 0,902 | 0,973 |
| 5 | 0,993 | 1,028 |
| 6 | 0,921 | 0,952 |
| 7 | 0,913 | 0,944 |
| 8 | 1,004 | 1,021 |
| 9 | 0,988 | 1,004 |
| 10 | 0,977 | 0,993 |
| 11 | 0,973 | 0,988 |

Pode-se verificar pela Tabela 3 que as tensões em todas as barras se encontram na faixa de valores de tensão variando de 0,93 p.u. a 1,05 p.u., conforme exige a ANEEL para o setor de distribuição. Dessa forma, somente com a utilização do BCS, exclui-se a necessidade apontada no plano de necessidades da empresa de construção de um novo alimentador para a divisão de carga do atual.

d) Comparação capacitor série e paralelo

Como análise complementar, foi realizada uma comparação de instalação de um banco de capacitor paralelo (BCP) com potência reativa fixa de 600 kvar (capacidade padrão na distribuidora) na barra 9 e o BCS proposto no item b deste tópico. Os resultados estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado comparativo para os níveis de tensão (em p.u.) em cada barra com o BCS e com o BCP.

| Barra | Tensão (p.u.) | |
|------------|---------------|---------|
| | Com BCS | Com BCP |
| SE 13,8 kV | 1,015 | 1,015 |
| 1 | 0,964 | 0,959 |
| 2 | 0,936 | 0,929 |
| 3 | 1,018 | 1,023 |
| 4 | 0,973 | 0,924 |
| 5 | 1,028 | 1,016 |
| 6 | 0,952 | 0,95 |
| 7 | 0,944 | 0,944 |
| 8 | 1,021 | 1,032 |
| 9 | 1,004 | 1,02 |
| 10 | 0,993 | 1,008 |
| 11 | 0,988 | 1,004 |

Como pôde ser observado, os níveis de tensão violaram os aceitáveis nas barras 2 e 4 (destacados em vermelho) nas simulações que consideraram apenas o uso do BCP, diferente do caso com BCS em que não há violação.

e) Análise econômica

A realização de uma análise econômica para obter o retorno financeiro para este tipo de solução não se mostrou algo simples de ser realizado, visto que protótipos de equipamentos de compensação série para a distribuição não são encontrados facilmente no mercado. Sendo assim, provavelmente haveria necessidade de desenvolvimento de um projeto específico, sendo esse customizado para a necessidade em questão, e os custos ainda precisariam ser estimados para uma possível implementação.

Entretanto, de modo a nortear uma análise preliminar e simplista, adotou-se como referência o modelo de protótipo desenvolvido em (Suzuki, et al., 2011), o “CSM-02”, sendo esse construído utilizando pouco recurso financeiro, incluindo o uso de varistores de óxido de zinco, custando em torno de US\$ 33.510,00, com uma estrutura que abrigava até 7 capacitores (3 unidades por fase) que totalizavam 20,52 Ω – 23,1 kV. Destaca-se que, caso a implementação não fosse com o protótipo mais simples apresentado no artigo de referência, o custo total seria na ordem de US\$ 125.655,00.

Com base nos dados dispostos no parágrafo anterior, considerando que o BCS dimensionado neste artigo foi de 14,94 Ω , estima-se um custo total de US\$ 24.400,00 para utilização do modelo mais simples (Suzuki, et al., 2011) e de US\$ 91.500,00 com a aplicação padrão modular de capacitor série mais robusto. Adicionalmente, deve-se considerar que a projeção dos custos se deu no ano de 2010, sendo necessário considerar as taxas de inflação para possibilitar a reaplicação no ano atual, em 2022.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, inicialmente foram apresentadas as análises teóricas e considerações sobre os requisitos necessários para a correta aplicação de compensação série em sistemas de distribuição. Essa não é uma solução nova neste segmento do sistema elétrico. Em sistemas de transmissão, utiliza-se com frequência, diferente das poucas aplicações no mercado de distribuição. Apesar de pouco usual devido à falta de padrões do equipamento no mercado, não permitindo que a sua aplicação fosse viabilizada em larga escala, possui bons resultados para a melhoria do perfil de tensão de alimentadores.

Conforme descrito ao longo do documento, praticamente não existem meios para controlar os parâmetros longitudinais dos circuitos de distribuição de energia elétrica. Nesse sentido, os capacitores série possuem resposta instantânea e alteram a reatância da linha, a ponto de que o valor de reatância da linha possa ser nulo. Porém, deve-se atentar aos possíveis efeitos adversos que podem surgir, principalmente quando não há o correto dimensionamento para a instalação do equipamento.

Como ponto de atenção, destaca-se a importância de que sejam considerados equipamentos de proteção/controle junto à instalação dos capacitores série de modo a protegê-los de possíveis sobretensões. Para isso, adota-se o uso de varistores como forma de mitigar os valores de tensões elevados nos terminais dos capacitores. Algumas pesquisas e protótipos de modelos estão em desenvolvimento com o objetivo de tornar essa solução mais acessível e prática de ser implementada, como o exemplo citado no item 2 [equipamento da CPFL do Compensador Série Modular (CSM)].

Mediante os benefícios da compensação série, vislumbra-se a possibilidade de implementação em um alimentador rural de uma concessionária de energia elétrica brasileira. Neste caso, existem três bancos de reguladores de tensão em série visando o ajuste e melhoria dos níveis de tensão no alimentador. Considerando o horizonte de Planejamento de cinco anos, o diagnóstico de rede realizado indica que os reguladores instalados não são suficientes para a resolução das criticidades e seria necessário a construção de um novo alimentador na região.

Sendo assim, com a instalação de capacitor série dimensionado para a reatância capacitiva de $14,94 \Omega$ (grau de compensação $K_{CS} = 1,5$), os níveis de tensão do circuito permanecem dentro dos critérios exigidos pela regulação local. Porém, devido à necessidade de customização de um protótipo para a aplicação, não foi realizada uma avaliação econômica assertiva, conforme era desejado, apenas houve uma análise comparativa no tópico 3.e com um protótipo desenvolvido por outra distribuidora, na qual os custos envolvidos foram inferiores quando comparados com a construção de aproximadamente 30 km de rede do novo alimentador para resolver as mesmas criticidades de tensão no circuito avaliado, representando ganhos financeiros significativos com a postergação (ou a não antecipação) com a execução dessa obra. Por fim, foi realizado um comparativo de BCS e BCP, sendo identificado que os resultados do BCP não são suficientes para sanar os problemas de tensão existentes.

5. REFERÊNCIAS

ANEEL. 2021. "Módulo 2 - Planejamento da Expansão de Sistema de Distribuição". *Anexo II da Resolução Normativa N° 956*. Dezembro 7, 2021.

ANEEL. 2021. "Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica". *Anexo VIII da Resolução Normativa N° 956*. Dezembro 7, 2021.

- Butler, J. and Concordia, C. 1938. Analysis of series capacitor application problems. 1938, pp. 110-111.
- Figueiredo, Carlos, et al. 2015. Series compensation on medium voltage radial systems. *23rd International Conference on Electricity Distribution*. June 15-18, 2015, p. 5.
- Jesus, Nelson, et al. 2003. Considerações sobre aplicação de compensação série em sistemas de distribuição visando melhorias na qualidade de energia. *Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica - V SBQEE*. Agosto 17-20, 2003, p. 6.
- Jesus, Nelson, Oliveira, Hermes and Figueiredo, Carlos. 2007. AES Sul's experiences using series compensation on medium-voltage distribution system. *19th International Conference on Electricity Distribution*. May 21-24, 2007, p. 4.
- Kathim, Al-Zohuariali and Zaidan, Majeed. 2017. Use Series Compensation in Distribution Networks 33 kV. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. June 2017, p. 6.
- Miske, S. 2000. Considerations for the application of series capacitors to radial power distribution circuits. *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*. July 16-20, 2000, Vol. 4, p. 2607.
- Mokred, Salah, et al. 2020. Comparison of the Effect of Series and Shunt Capacitor Application in 25kV Radial Power Distribution Network. *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*. July 13-15, 2020, pp. 822-830.
- Mokred, Salah, Lijun, Qin and Khan, Tahir. 2020. Protection Performance During Application of an Intelligent and Fast Switch Series Capacitor to 25kV Radial Power Distribution Network. *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*. July 13-15, 2020, pp. 921-928.
- Qin, Lijun, Yang, Bo and Zhai, Xiongfei. 2016. Research on new series compensation technology in distribution network. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. October 25-28, 2016, pp. 768-772.
- Ren, Yanjie and Piao, Zailin. 2011. Theoretical research and simulation of series compensation technology of distribution line. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. August 12-14, 2011, pp. 2094-2097.
- Suzuki, M., et al. 2009. Aplicação de Capacitor Série como Solução para partida de Grandes Motores de Indução. *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)*. 2009.
- Suzuki, M., et al. 2011. Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 KV. *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)*. 2011, pp. 1-8.
- Suzuki, Massayuki, et al. 2008. Aplicação de Capacitor Série como Solução para partida de Grandes Motores de Indução. *XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*. Outubro 06-10, 2008, pp. 1-12.

Wagner, C. 1941. Self-excitation of induction motors with series capacitors. 1941, pp. 1241-1247.

Wu, Gang, et al. 2019. Research on Application of Series Capacitor Compensation in 35kV Distribution Network. *IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. July 12-14, 2019, pp. pp. 565-568.