

Desafios de Técnicas de Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão com Compensação Série

Raphael L. A. Reis* Kleber M. Silva** Felipe V. Lopes***
Amauri G. M. Britto** Eduardo P. A. Ribeiro** Caio M. Moraes**
Marco A. M. Rodrigues**** Larissa L. Silva†

* *Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), PE.*

** *Universidade de Brasília (UnB), DF.*

*** *Universidade Federal da Paraíba (UFPB), PB.*

**** *Eletrobras Cepel, RJ.*

† *Evoitz, RJ.*

Abstract: In this paper, the impacts of fixed series-compensated transmission lines (TL) on classical phasor-based fault location techniques are evaluated, in order to identify the typical challenges faced by such methods. To do so, several Alternative Transients Program (ATP) fault simulations were carried out in a 500 kV/60 Hz transmission system, which is modeled considering parameters taken from a real Brazilian network. Comparative analyses are performed with uncompensated TL. From the obtained results, low frequencies superimposed to voltage and current signals due to the subsynchronous resonance affect the performance of phasor estimation filters and consequently, fault location procedures. Therefore, the development of solutions that can be immune to such subsynchronous frequencies is needed.

Resumo: Os impactos da compensação série fixa em sistemas de transmissão de energia são avaliados neste trabalho, com vistas a identificar os desafios encontrados por técnicas de localização de faltas normalmente empregadas em dispositivos de proteção. Para tanto, vários cenários de curtos-circuitos foram simulados em um sistema elétrico de 500 kV/60 Hz modelado no *Alternative Transients Program* (ATP), cujos parâmetros são provenientes de uma rede real presente no Sistema Interligado Nacional (SIN). Análises comparativas são realizadas considerando-se o sistema elétrico operando com e sem compensação série. Dos resultados obtidos, as oscilações de baixa frequência originadas pela ressonância subsíncrona afetam o desempenho de filtros de estimação fasorial e, conseqüentemente, procedimentos de localização de faltas. Portanto, o desenvolvimento de soluções que sejam mais imunes a tais componentes de frequência se faz necessário.

Keywords: Fault location; phasor estimation; series-compensated lines; short-circuits; subsynchronous resonance; transmission lines.

Palavras-chaves: Compensação série; curtos-circuitos; estimação fasorial; linhas de transmissão; localização de faltas; ressonância subsíncrona.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a geração de energia elétrica no Brasil é caracterizada por um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas. Neste contexto, as linhas de transmissão (LT) desempenham papel fundamental, pois são responsáveis pela interconexão dos diferentes subsistemas (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte) do Sistema Interligado Nacional (SIN), assim como pela integração das fontes de produção ao mercado consumidor. Em 2005, por exemplo, 83.049,2 km de LT interligavam os diferentes pontos do SIN em níveis de tensão a partir de 230 kV. Já em 2020,

este número aumentou para 145.600 km, sendo estimado aproximadamente 184.054 km para o ano de 2025¹.

Diante da expansão da malha de transmissão do SIN verificada nos últimos anos, o aumento da extensão das LTs foi inevitável, sobretudo devido à necessidade de transferência de potência por longas distâncias para atendimento da crescente demanda de energia. Por outro lado, LTs mais extensas tipicamente apresentam uma maior reatância indutiva, o que reduz a capacidade de transferência de potência ao longo da linha, além de aumentar as perdas ôhmicas. Neste sentido, a construção de novas linhas com menores extensões poderia ser visto como uma alternativa natural, entretanto restrições ambientais e o custo elevado para instalação de um maior número de subestações intermediárias configuram-se como fatores impeditivos (Anderson and Farmer, 1996; Saha et al., 2010). Assim, mecanismos

* O desenvolvimento deste trabalho contou com o suporte técnico e financeiro do IATI, CEPTEL e EVOLTZ.

¹ Informação disponível em: <http://www.ons.org.br/>.

que propiciem um melhor aproveitamento da rede elétrica se fazem necessários.

Uma forma normalmente empregada em sistemas de transmissão de energia consiste no uso da compensação série, que corresponde à inserção de bancos de capacitores em série com a reatância indutiva da LT. Como resultado, dada a menor reatância equivalente da LT, benefícios são obtidos em termos da melhoria da estabilidade do sistema e da regulação da tensão, aumento da capacidade de transferência de potência, assim como redução de perdas no processo de transmissão (Saha et al., 2010). Por outro lado, apesar de reconhecidas vantagens, abre-se margem para ocorrência de ressonância subsíncrona (ElMehdi et al., 2021), transitórios oriundos de manobras dos bancos, inversão de tensão e de corrente (Altuve et al., 2009; Joshi and Kothari, 2014) etc., podendo comprometer o desempenho de funções de monitoração do sistema elétrico, a exemplo de algoritmos de localização de faltas, que têm figurado como indispensáveis para equipes de manutenção de linhas após ocorrência de curtos-circuitos.

Em termos da proteção do sistema elétrico, a impedância estimada pelos relés de distância na ocorrência de curtos-circuitos é normalmente afetada por componentes oscilatórias de baixa frequência, que surgem em razão da ressonância subsíncrona, podendo levar, inclusive, à atuação dos dispositivos por sobrealcance (ElMehdi et al., 2021). De forma análoga, a possibilidade de inversão de tensões e correntes afetam a correta identificação da direcionalidade dos sinais (Altuve et al., 2009; Hoq and Taylor, 2021). Por consequência, métodos clássicos de localização de curtos-circuitos também são comprometidos face à presença dos bancos de capacitores, o que têm impulsionado pesquisadores e engenheiros ao redor do mundo a proporem soluções para minimizar os impactos da compensação série no desempenho de tais funcionalidades (Saha et al., 2010). Neste cenário, apesar de alternativas terem sido reportadas na literatura, as mesmas são normalmente voltadas para o uso de diferentes técnicas, a exemplo das baseadas no domínio do tempo (Od et al., 2021; Ghazizadeh-Ahsaei, 2020; Hoq and Taylor, 2021; Naidu and Pradhan, 2020).

Sendo assim, investigações minuciosas acerca dos impactos da compensação série são realizadas neste trabalho, de modo a identificar os desafios tipicamente encontrados por técnicas clássicas de localização de faltas baseadas em fasores, as quais são amplamente utilizadas em campo. Para tanto, os estudos foram desenvolvidos considerando vários cenários de falta aplicados a um sistema elétrico de 500 kV/60 Hz modelado no *Alternative Transients Program* (ATP), cujos parâmetros e topologia são provenientes de um sistema elétrico real presente no SIN. Análises comparativas são realizadas considerando-se o sistema elétrico operando com e sem compensação série, com vistas a avaliar o desempenho de métodos de localização de curtos-circuitos de um e dois terminais monitorados.

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

2.1 Compensação Série

Os bancos de capacitores utilizados para fins de compensação série são instalados em série com as LT, reduzindo a reatância equivalente da linha. Basicamente, é comum que o

dimensionamento do banco seja realizado para garantir um grau de compensação (relação entre a reatância capacitiva do banco e a reatância da LT) da ordem de 70% (Anderson and Farmer, 1996), muito embora estudos detalhados acerca dos impactos da compensação sejam requisitados independente do grau de compensação determinado (ONS, 2000).

Por estarem conectados em série, os bancos de capacitores estão sujeitos a transitórios oriundos de distúrbios ocorridos na LT. Assim, seu sistema de proteção deve atuar de maneira a limitar a tensão nos terminais do banco, papel este realizado tipicamente por varistores de óxido metálico (MOV - do inglês *Metal Oxide Varistors*), que são conectados em paralelo aos terminais dos bancos. Tais dispositivos apresentam uma característica não-linear, apresentando uma resistência elevada para condições normais de operação, bem como uma baixa resistência no caso de distúrbios que resultem em tensões superiores aos seus valores limites pré-estabelecidos. Deste modo, durante operação normal, a corrente de carregamento do sistema passa pelo banco de capacitores, enquanto que na ocorrência de perturbações na rede, o MOV desvia a corrente do banco para manter o nível de tensão constante em seus terminais. Já a proteção do MOV é realizada por meio de centelhadores (do inglês *gaps*), que monitoram a corrente do MOV (i_{MOV}) e, caso a energia absorvida pelo dispositivo exceda os limites pré-estabelecidos, cria-se um caminho ionizado pelo *gap*, que é responsável por desviar a corrente do MOV e realizar o *bypass* do banco (Saha et al., 2010). Uma representação esquemática do banco de capacitores fixos (BCF) é ilustrada na Fig. 1, levando-se em consideração que a proteção do mesmo é realizada tanto pelo MOV quanto pelo *gap*. Ressalta-se que, a depender de requisitos de estabilidade transitória avaliados em determinado sistema, o arranjo de proteção pode conter apenas um dos dispositivos (MOV ou *gap*) (Anderson and Farmer, 1996). Neste trabalho, ambos equipamentos são considerados.

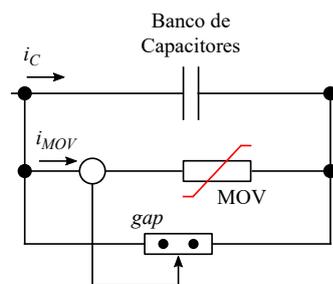


Figura 1. Representação esquemática da compensação série fixa por fase com proteção associada.

Durante a ocorrência de distúrbios na LT, transitórios de alta frequência de tensão e corrente tipicamente surgem e se propagam ao longo da linha, sobretudo devido à dissipação da energia armazenada nas indutâncias da LT e nas capacitâncias *shunt* (Saha et al., 2010). Por outro lado, em sistemas elétricos dotados de compensação série, a interação entre os capacitores em série (C) com as indutâncias da linha (L) resulta em condições de ressonância que originam componentes de baixa frequência, denominadas de componentes subsíncronas (Anderson and Farmer, 1996). De fato, a frequência natural de oscilação (f_{LC}) do circuito LC série resultante é dada por:

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega_1}{2\pi} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad (1)$$

em que ω_1 é a frequência angular fundamental e f_1 a frequência fundamental associada, X_L é a reatância indutiva da LT e X_C é a reatância capacitiva relativa ao banco de compensação.

A partir de (1), f_{LC} é menor que f_1 , uma vez que X_C é projetado para compensar apenas parcialmente X_L . Logo, tais frequências originadas pelo fenômeno da ressonância subsíncrona apresentam-se superpostas aos sinais de tensão e corrente do sistema elétrico, acarretando em oscilações de baixa frequência que podem afetar o desempenho de funções de proteção e localização de faltas.

2.2 Estimação Fasorial

Os dispositivos de proteção e localização de faltas baseados em componentes fundamentais utilizam os fasores dos sinais de tensão e corrente do sistema elétrico para executar suas funcionalidades. Para tanto, filtros digitais são normalmente empregados para extrair as componentes real (filtro h_{re}) e imaginária (filtro h_{im}) das grandezas elétricas na frequência fundamental (Phadke and Thorp, 2009). Entretanto, na ocorrência de perturbações na rede, transitórios de baixa e alta frequências podem aparecer sobrepostos aos sinais de tensão e corrente, podendo comprometer a correta estimação dos respectivos fasores (Phadke and Thorp, 2009; Saha et al., 2010).

Na Fig. 2 ilustra-se a resposta em frequência de um filtro clássico de estimação fasorial (trata-se do filtro de Fourier de ciclo completo, reportado em Phadke and Thorp (2009)), associado a um filtro mímico para atenuar os efeitos da componente CC de decaimento exponencial (Benmouyal, 1995). De modo a considerar os demais filtros presentes no sistema de aquisição de dados, a resposta de um filtro *anti-aliasing* do tipo Butterworth também foi levada em consideração. Dado que a frequência de amostragem das técnicas de localização de faltas avaliadas neste trabalho é de 960 Hz, conforme disposto na seção 2.3, a resposta em frequência dos filtros é apresentada até a

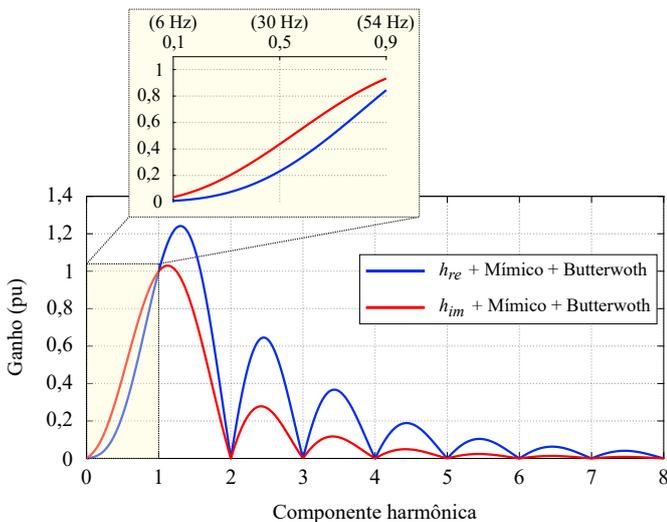


Figura 2. Resposta em frequência conjunta dos filtros de estimação fasorial, mímico e *anti-aliasing*.

oitava harmônica (480 Hz), para atendimento ao critério de Nyquist (Phadke and Thorp, 2009).

Conforme mostrado na Fig. 2, a componente de frequência fundamental é adequadamente estimada pelos filtros h_{re} e h_{im} , além de possibilitar uma completa atenuação das componentes harmônicas. Em contrapartida, apesar de atenuações serem realizadas nas componentes inter-harmônicas e sub-harmônicas em relação à fundamental, tais frequências podem ainda se fazer presentes nos sinais monitorados, afetando a correta estimação dos fasores associados. Particularmente no que tange aos sistemas com compensação série, a ocorrência de ressonância subsíncrona origina componentes de baixa frequência que não são eliminadas pelo filtro de estimação fasorial. De fato, para frequências subsíncronas da ordem de 30 Hz, por exemplo, sinais com amplitudes de cerca de 40% do correspondente na frequência fundamental podem surgir. Maiores amplitudes são ainda passíveis de ocorrer para componentes de frequência subsíncronas mais próximas de 60 Hz.

Para ilustrar tal problemática, um curto-circuito monofásico é aplicado na fase A do sistema elétrico descrito na seção 3, a 5% da Barra Local, considerando casos com e sem compensação. Para possibilitar análises comparativas, o ajuste dos sistemas equivalentes de Thévenin das barras local e remota foi realizado mantendo-se o carregamento constante para situações com e sem a presença do banco de capacitores. Os efeitos da ressonância subsíncrona são ilustrados na Fig. 3. Na Fig. 3(b), \hat{I}_{Acomp} , \hat{I}_A e i_{Acomp} consistem, respectivamente, no módulo do fasor da corrente da fase A para o sistema operando com o banco, no

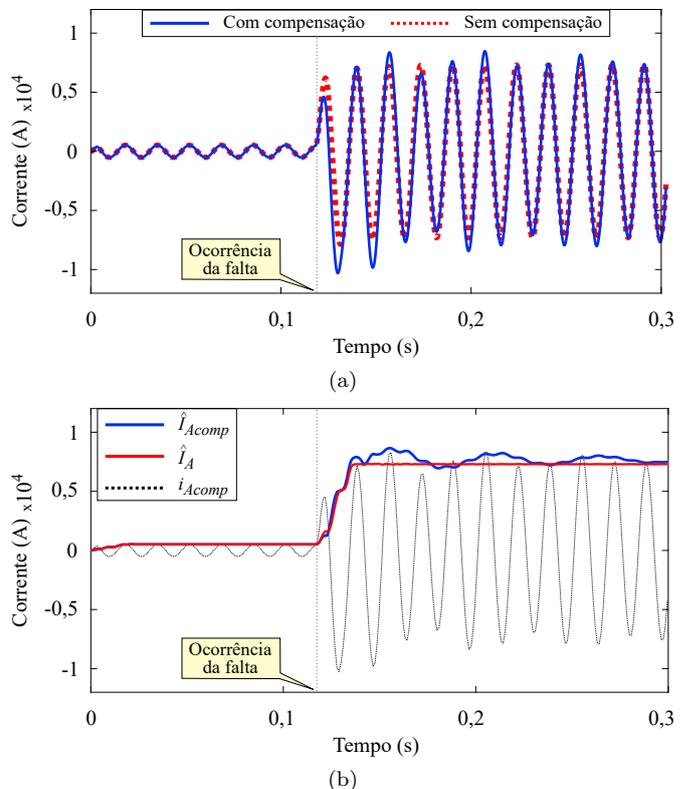


Figura 3. Ressonância subsíncrona proveniente de uma falta monofásica: (a) sinais de corrente para os sistemas com e sem compensação; e (b) fasores associados.

módulo do fasor de corrente da fase A para o sistema sem a compensação série, e no sinal de corrente para a rede com a inserção do banco de capacitores.

Conforme apresentado na Fig. 3, oscilações de baixa frequência são induzidas no sinal de corrente monitorado durante a ocorrência do distúrbio, para o caso do sistema operando com os bancos de capacitores. Nesse sentido, tais componentes de frequência são refletidas no fasor estimado (ver Fig. 3(b)), já que os filtros h_{re} e h_{im} não são imunes aos efeitos da ressonância subsíncrona (conforme apresentado na Fig. 2). Já para o sistema operando sem compensação, por não existir frequências subsíncronas, os fasores estimados convergem mais rapidamente.

Portanto, investigações acerca do impacto da presença de ressonância subsíncrona em funções de localização de faltas se fazem necessárias, de modo a identificar os desafios enfrentados pelas técnicas clássicas, bem como prover um ponto de partida para o desenvolvimento de soluções mais robustas a tal fenômeno.

2.3 Localização de Faltas Baseada em Fasores

Os algoritmos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais usam os fasores de tensão e corrente obtidos de um ou mais terminais monitorados da LT para estimar o local do curto-circuito. Estes métodos são largamente aplicados em campo, uma vez que são considerados como umas das formas mais simples e econômicas de estimar o local do defeito. Nesta categoria, dado que o ponto de ocorrência do distúrbio é identificado por meio do cálculo da impedância aparente no trecho da LT submetida à perturbação, estas técnicas são também conhecidas como algoritmos baseados em impedância (Saha et al., 2010).

Neste trabalho, métodos de um e dois terminais são avaliados. No caso de técnicas que dependem de apenas um terminal monitorado, o local de ocorrência do distúrbio é estimado considerando apenas os fasores de tensão e corrente medidos em uma das barras do sistema elétrico, não necessitando, portanto, de canais de comunicação ou de dispositivos para sincronização de dados (Saha et al., 2010). Por outro lado, embora tais dispositivos sejam requisitados para aplicação de técnicas de dois terminais, resultados mais precisos são normalmente obtidos em razão de uma maior quantidade de dados estarem disponíveis para processamento, o que resulta em informações adicionais acerca do distúrbio a serem usadas como dados de entrada das referidas funcionalidades (Saha et al., 2010); (Reis et al., 2018); (Reis et al., 2019).

Aqui, o algoritmo de um terminal (1T60Hz) reportado em Takagi et al. (1982) é utilizado, cuja estimação do ponto de falta (\tilde{d}_1) é dada por:

$$\tilde{d}_1 = \frac{\text{imag}(\hat{V}_L \cdot \Delta \hat{I}_L^*)}{\text{imag}(Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot \Delta \hat{I}_L^*)}, \quad (2)$$

em que \hat{V}_L e \hat{I}_L são os fasores de tensão e corrente obtidos na barra local (ou terminal monitorado), respectivamente, $\Delta \hat{I}_L$ consiste no fasor da componente incremental de corrente (diferença entre as amostras dos fasores de corrente nos períodos de falta e de pré-falta) e Z_{L1} é a impedância de sequência positiva da LT. Para a aplicação de (2), os valores \hat{V}_L , \hat{I}_L e $\Delta \hat{I}_L$ são selecionados em função do tipo

de falta, seguindo o princípio da seleção de fases (tal como aplicado na proteção de distância tradicional) (Saha et al., 2010; Das et al., 2014).

Além da técnica de um terminal supracitada, avalia-se também um algoritmo de dois terminais (2T60Hz), o qual é reportado em Das et al. (2014), cuja formulação para estimar o local de ocorrência do distúrbio (\tilde{d}_2) é dada por:

$$\tilde{d}_2 = \frac{\hat{V}_{L2} - \hat{V}_{R2} + Z_{L2} \cdot \hat{I}_{R2}}{(\hat{I}_{L2} + \hat{I}_{R2}) \cdot Z_{L2}}, \quad (3)$$

em que \hat{V}_{L2} e \hat{V}_{R2} são os fasores de tensão de sequência negativa das barras local e remota, respectivamente, \hat{I}_{L2} e \hat{I}_{R2} são os fasores de corrente de sequência negativa das barras local e remota, respectivamente, e Z_{L2} é a impedância de sequência negativa da LT, a qual é ajustada como sendo igual à impedância de sequência positiva. Para faltas trifásicas, (3) pode ser aplicada substituindo-se as componentes de sequência negativa pelas de sequência positiva (Das et al., 2014). Ressalta-se que os métodos usados para estimar \tilde{d}_1 e \tilde{d}_2 foram selecionados para as avaliações realizadas na seção 3 uma vez que suas formulações servem de base tanto para o desenvolvimento de novas soluções quanto para aplicações práticas (Das et al., 2014; Schweitzer Engineering Laboratories, 2017).

3. ANÁLISES E RESULTADOS

Para avaliar o impacto da compensação série nos algoritmos de localização de faltas, simulações computacionais foram realizadas no ATP considerando o sistema elétrico de 500 kV/60 Hz apresentado na Fig. 4, o qual é modelado a partir de parâmetros reais de redes de transmissão presentes no SIN, particularmente na LT de circuito duplo que interliga as subestações de Silves e Oriximiná (comprimento $\ell = 334$ km). Neste sistema, dado o interesse por estudos baseados em aplicações que dependem de componentes de frequência fundamental, as linhas foram modeladas a partir de parâmetros distribuídos e constantes na frequência. As medições de tensão foram tomadas no lado da LT. Além disso, a topologia dos BCF é similar à apresentada na Fig. 1.

Basicamente, as faltas foram aplicadas na LT do circuito 2, levando-se em conta diferentes tipos, locais e resistências, cujos parâmetros considerados são apresentados na Tabela 1. Em cada simulação, o erro absoluto percentual (ε) é calculado segundo $\varepsilon = (|d - \tilde{d}|/\ell) \cdot 100\%$, sendo d o local real de aplicação do distúrbio e \tilde{d} igual a \tilde{d}_1 ou \tilde{d}_2 . As

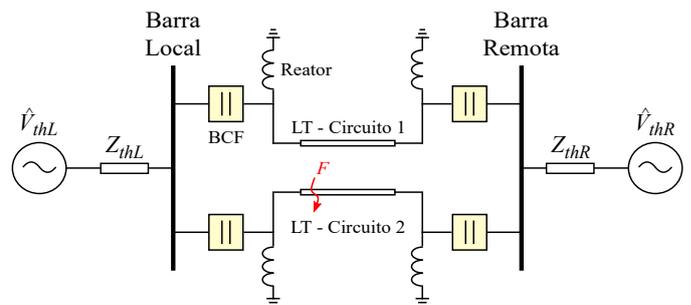


Figura 4. Sistema elétrico de 500 kV/60 kV utilizado nas simulações.

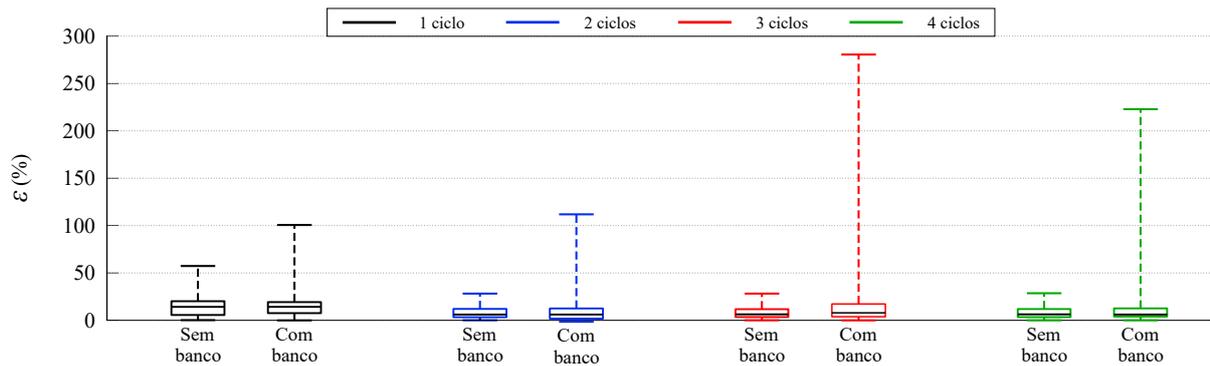


Figura 5. Erros absolutos representados em termos de boxplots para o método 1T60Hz.

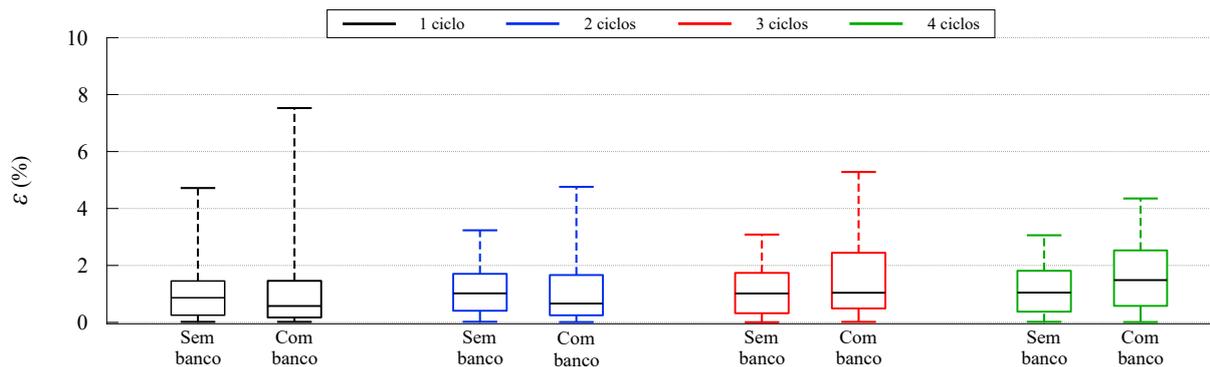


Figura 6. Erros absolutos representados em termos de boxplots para o método 2T60Hz.

Tabela 1. Parâmetros de falta considerados nas simulações.

Variáveis	Valores
Localização da falta (km)	5, 30, 55, 80, ..., 280, 305, 330 (passos de 25 km)
Tipo de falta	AT, BC, BCT, ABC
Ângulo de incidência (°)	90
Resistência de falta (Ω)	1, 30

medições dos sinais de tensão e corrente a serem usados como dados de entrada dos algoritmos avaliados foram tomadas a partir de transformadores de potencial capacitivos e transformadores de corrente ideais, respectivamente.

De modo a realizar análises comparativas com o sistema operando sem a compensação série, as mesmas características de curtos-circuitos dispostas na Tabela 1 foram consideradas, resultando em um total de 224 cenários de falta. Para tanto, os ajustes das fontes equivalentes de Thévenin presentes nas Barras Local e Remota, para ambos os sistemas elétricos (com e sem banco de capacitores), foram realizados tomando como base a tensão constante em cada barra durante condições normais de operação.

Os erros estimados para os métodos 1T60Hz e 2T60Hz são apresentados na forma de *boxplots* nas Figs. 5 e 6, respectivamente. Nestas figuras, os resultados são apresentados tomando como base diferentes amostras para o cálculo do local da falta, sendo essas especificadas em termos do

número de ciclos após a ocorrência dos distúrbios (1, 2, 3 e 4 ciclos).

Dos resultados apresentados nas Figs. 5 e 6, os maiores erros foram obtidos para o sistema elétrico operando com a compensação série, independente do número de ciclos tomados como referência para estimar os locais dos distúrbios. De fato, em virtude da presença de componentes de baixa frequência provenientes da ressonância subsíncrona nos sinais monitorados, oscilações mais evidentes são perceptíveis nos fasores de tensão e corrente estimados, afetando o desempenho dos métodos de um e dois terminais. Entretanto, há a possibilidade da proteção do banco de capacitores (MOV e/ou *gap*) atuar e retirá-lo de operação, realizando o *bypass* do dispositivo. Nestes casos, a ressonância subsíncrona tenderia a ser minimizada após a saída do banco, uma vez que a interação entre os indutores da LT e os capacitores seria cessada. Por outro lado, por se tratar de uma LT de circuito duplo, contribuições e influência dos bancos da linha não submetida ao distúrbio são passíveis de surgir, afetando também o desempenho das técnicas de localização de faltas. Por consequência, os menores erros foram obtidos para o sistema de transmissão operando sem o banco de capacitores.

Em geral, comparando-se o desempenho das técnicas de localização avaliadas, melhores resultados foram estimados por 2T60Hz, especialmente para o sistema sem a compensação série. Este fato já era esperado em razão de uma maior quantidade de informações da rede elétrica ser usada para estimar o local do defeito. Todavia, com a presença da compensação série, mesmo que um banco de capacitores de um determinado terminal da LT saia de operação pela atuação de sua proteção correlata, é possível

que os critérios para operação da proteção do banco do terminal oposto não sejam atendidos em virtude das próprias características do curto-circuito, fazendo com que o mesmo continue em operação. Logo, frequências subsíncronas são passíveis de surgir nas grandezas elétricas monitoradas, afetando o desempenho do algoritmo de dois terminais.

No que tange ao número de ciclos utilizados como dados de entrada das técnicas de localização de faltas, para o sistema operando sem a compensação, os erros tendem a ser menores para amostras de tensão e corrente tomadas em um maior número de ciclos após a ocorrência da falta. Nestes casos, a transição dos estados de pré-falta para falta ocasiona oscilações e transitórios que tendem a ser mais evidentes nos instantes logo após a aplicação da perturbação. Assim, o uso de amostras das grandezas elétricas monitoradas tomadas para um maior número de ciclos apresenta-se como mais vantajoso, uma vez que tais oscilações tendem a ser minimizadas à medida que o estado de falta é estabelecido. Por outro lado, para o sistema operando com a compensação série, a ressonância subsíncrona tende a originar oscilações de baixas frequências que perduram por mais tempo, comprometendo assim o desempenho tanto de técnicas de um quanto de dois terminais monitorados.

Para ilustrar tal situação, apresenta-se na Fig. 7 o fasor do sinal de corrente relativo a uma falta BC, aplicada a 155 km da Barra Local do sistema elétrico mostrado na Fig. 4, considerando a operação com compensação série.

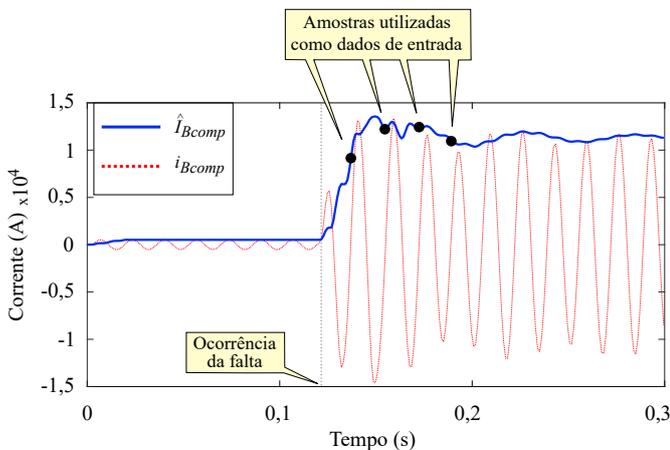


Figura 7. Amostras do fasor de corrente da fase B devidas a uma falta do tipo BC.

Da Fig. 7, as amostras tomadas em até quatro ciclos após a ocorrência do distúrbio são afetadas pela ressonância subsíncrona, uma vez que não há estabilização do fasor correlato para os ciclos considerados. Desta forma, discrepâncias elevadas são estimadas pelas técnicas de localização de faltas em função da quantidade de ciclos tomados como dados de entrada dos algoritmos.

Portanto, a partir das análises realizadas, as técnicas clássicas de localização de curtos-circuitos baseadas em componentes fundamentais são afetadas por frequências subsíncronas, sobretudo devido aos filtros digitais empregados nos processos de estimação fasorial. De fato, as respostas em frequência desses filtros, embora tipicamente eliminem componentes harmônicas, não são capazes de

eliminar frequências inferiores à fundamental, fazendo com que oscilações de baixas frequências apareçam superpostas ao sinal monitorado. Desta maneira, o desenvolvimento de técnicas que sejam imunes a componentes sub-harmônicas, sem perder eficiência no processo de filtragem de outras componentes harmônicas, surge como uma alternativa a ser buscada.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliações acerca do impacto da compensação série fixa de LT em técnicas de localização de faltas baseadas em fasores foram realizadas. Para tanto, diversos cenários de falta foram simulados em um sistema elétrico de 500 kV/60 Hz modelado a parâmetros reais, sendo o local do distúrbio estimado a partir de métodos de um e dois terminais monitorados.

Dos resultados obtidos, durante a ocorrência de perturbações na rede elétrica, a interação entre as capacitâncias dos bancos com a indutância da linha induz frequências subsíncronas nos sinais de tensão e corrente. Tal situação impõe desafios para o desempenho confiável dos algoritmos de localização de faltas, dado que as oscilações de baixa frequência não são totalmente filtradas por processos de estimação fasorial. Neste aspecto, o uso de amostras de tensão e corrente tomadas em um número maior que dois ou três ciclos após a ocorrência da falta não necessariamente conduz a melhores resultados nas estimativas, fato este que é naturalmente verificado em redes elétricas que operam sem compensação série.

Em trabalhos futuros, investigações acerca do *bypass* dos BCF por fase serão realizadas, de modo a correlacionar o instante em que a proteção da compensação série atua com o desempenho das técnicas de localização de faltas. Tal aspecto é importante face à possibilidade da realização de medições desequilibradas provenientes da saída dos BCF por fase em instantes diferentes, o que pode afetar funcionalidades que dependam de grandezas tomadas no domínio de sequência.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com o suporte técnico e financeiro do IATI, CEPEL e EVOLTZ no âmbito do projeto de P&D PD-06908-0003/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

REFERÊNCIAS

- Altuve, H.J., Mooney, J.B., and Alexander, G.E. (2009). Advances in series-compensated line protection. In *63rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*.
- Anderson, P.M. and Farmer, R.G. (1996). *Series Compensation of Power Systems*. PBLSH! Inc., USA.
- Benmouyal, G. (1995). Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2), 621–630. doi:10.1109/61.400869.
- Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A., and Patel, M. (2014). Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, 2, 537–557. doi:10.1109/ACCESS.2014.2323353.

- ElMehdi, A., Benslim, M., Ben-Ashour, A., and Johnson, B. (2021). Effects of low frequency oscillations on distance relay in series compensated transmission systems. In *IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*.
- Ghazizadeh-Ahsaei, M. (2020). Time-domain based fault location for series compensated transmission lines without requiring fault type. *Electric Power Systems Research*.
- Hoq, M.T. and Taylor, N. (2021). Distance protection of series capacitor compensated lines: Practical considerations, industrial status and development. *Electricity*.
- Joshi, H.M. and Kothari, N.H. (2014). A review on series compensation of transmission lines and its impact on performance of transmission lines. *International Journal of Engineering Development and Research*.
- Naidu, O.D. and Pradhan, A.K. (2020). Model free traveling wave based fault location method for series compensated transmission line. *IEEE Access*.
- Od, N., Pradhan, A.K., and George, N. (2021). A hybrid time-domain protection scheme for series compensated transmission line. *IEEE Transaction on Power Delivery (Early Access)*.
- ONS (2000). Procedimentos para determinação das ampliações e reforços na rede básica. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*.
- Phadke, A. and Thorp, J. (2009). *Computer Relaying for Power Systems*. Protective relays. A John Wiley and Sons Ltd, England, 2 edition.
- Reis, R.L.A., Neves, W.L.A., and Fernandes Jr., D. (2018). Influence of instrument transformers and anti-aliasing filters on the performance of fault locators. *Electric Power Systems Research*.
- Reis, R.L.A., Neves, W.L.A., Lopes, F.V., and Fernandes Jr., D. (2019). Sensitivity analysis of traveling wave-based and impedance-based fault location techniques. In *International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)*.
- Saha, M.M., Izykowski, J., and Rosolowski, E. (2010). *Fault Location on Power Networks*. Power Systems. Ed. Springer, London.
- Schweitzer Engineering Laboratories (2017). *SEL-T400L: Instruction manual*. Washington, USA.
- Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., and Matsushima, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(8), 2892 –2898. doi:10.1109/TPAS.1982.317615.