ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO EFEITO CAPACITIVO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SOBRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NO MODELO DE LINHA CURTA

Felipe V. Lopes*, Marcos Isaias F. Diniz*, Kleber M. Silva*, Washington L. A. Neves[†]

* Universidade de Brasília (UnB), Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE) Campus Darcy Ribeiro, Caixa postal 04397, CEP 70910-900, Asa Norte, Brasília-DF, Brasil

[†] Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) Rua Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-000, Bairro Universitário, Campina Grande-PB, Brasil

Emails: felipevlopes@ene.unb.br, marcosfaragodiniz@gmail.com, klebermelo@unb.br, waneves@dee.ufcg.edu.br

Abstract— This paper presents the evaluation of the transmission line capacitive effect on single- and doubleended fault location algorithms based on the analysis of fundamental components, which consider the short line model. It is known that when the short line model is taken into account, the line capacitive effect is neglected, what can lead the fault location method to present relevant errors. Two different approaches to remove the line capacitive effect are described and then evaluated by means of fault simulations in a 500 kV/60 Hz power system modeled in the Alternative Transients Program (ATP). The obtained results show that the line capacitive currents significantly affect methods based on the short line model, resulting in additional errors in the order of few kilometers when compared against those cases in which the line capacitive effect is compensated.

Keywords— Electrical power systems, fault location, line capacitive effect, transmission lines.

Resumo— Neste trabalho, apresenta-se a análise da influência do efeito capacitivo de linhas de transmissão sobre o desempenho de métodos de localização de faltas de um e dois terminais baseados na análise de componentes fundamentais e que consideram o modelo de linha curta. Sabe-se que ao usar o modelo de linha curta, o efeito capacitivo da linha de transmissão é desprezado, o que pode levar o método de localização de faltas a apresentar erros relevantes. Duas soluções distintas para remoção do efeito capacitivo da linha são descritas e em seguida avaliadas por meio de simulações computacionais de faltas em um sistema de 500 kV/60 Hz utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP). Dos resultados obtidos, conclui-se que as correntes capacitivas afetam significativamente os métodos baseados no modelo de linha curta, resultando em erros adicionais na ordem de alguns quilômetros quando comparados aos casos nos quais o efeito capacitivo da linha é compensado.

Palavras-chave— Efeito capacitivo de linhas, linhas de transmissão, localização de faltas, sistemas elétricos.

1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência têm sido requisitados ano após ano a atender uma demanda crescente por energia elétrica. Por isso, as empresas têm realizado investimentos tanto para a expansão de seus sistemas quanto para o desenvolvimento de técnicas que auxiliem equipes de operação e manutenção durante o processo de diagnóstico de distúrbios (Saha et al., 2010). Em relação aos sistemas de transmissão, os algoritmos de localização de faltas têm desempenhado uma função importante para as concessionárias, pois contribuem para a redução da duração de desligamentos não-programados causados por curtos-circuito permanentes em linhas de transmissão (LTs), calculando automaticamente estimativas do ponto de falta poucos instantes após a ocorrência do distúrbio (Schweitzer et al., 2014).

Décadas atrás, quando relés eletromecânicos ainda eram empregados nos esquemas de proteção de LTs, pouco se podia fazer para reduzir o tempo de busca do defeito após a ocorrência de faltas. A inspeção das LTs era realizada por vias terrestres, avaliando torres de transmissão por meio de análises visuais (Saha et al., 2010; Lopes et al., 2015), as quais se tornavam difíceis devido às condições climáticas no momento do distúrbio e ao relevo do terreno na faixa de servidão da LT com defeito. Diante dessas dificuldades, o processo de inspeção era demorado, não atendendo aos anseios das concessionárias em obter estimativas do ponto de falta de forma rápida e confiável.

Com o advento da tecnologia digital, tornouse possível a implementação de algoritmos de localização de faltas em relés microprocessados e em registradores digitais de perturbações, viabilizando a análise de curtos-circuitos com base em diversos princípios, a exemplo da análise de componentes fundamentais e de ondas viajantes (Saha et al., 2010; Altuve and Schweitzer, 2010). Desse modo, o uso de algoritmos de localização de faltas em sistemas reais se tornou uma prática comum (Zimath et al., 2010; Das et al., 2014), o que tem motivado diversas pesquisas no sentido de desenvolver melhorias capazes de otimizar o processo de identificação do ponto de falta em LTs, reduzindo erros, porém sem comprometer a simplicidade operacional das soluções já existentes.

Vários dos dispositivos de localização de faltas disponíveis no mercado se baseiam no modelo de LT curta (Takagi et al., 1982; Wiszniewski, 1983; Eriksson et al., 1985; Girgis et al., 1992; Izykowski et al., 2006; Radojevic et al., 2009; Tziouvaras et al., 2001). Tal fato decorre muitas vezes do interesse em simplificar as formulações matemáticas empregadas ou mesmo reduzir o efeito de imprecisões nos parâmetros *shunt* da LT (Lopes et al., 2013), desprezando a influência de possíveis aproximações do modelo de LT adotado. Porém, no modelo de LT curta, desconsidera-se o efeito capacitivo da LT, o que pode resultar em erros relevantes de técnicas clássicas quando aplicadas em LTs longas ou com maior nível de tensão (Xue et al., 2012; Hinge and Dambhare, 2015).

Historicamente, o efeito capacitivo de LTs tem sido classificado como uma possível fonte de erros para funções de proteção e localização de faltas. Por exemplo, em Xue et al. (2012), apresenta-se uma análise dos efeitos da corrente capacitiva de LTs sobre funções de proteção diferencial. Em Xu et al. (2007) e Kase et al. (2008) são apresentadas soluções que visam a remoção do efeito capacitivo também com foco na otimização de funções de proteção. Em Hinge and Dambhare (2015), apresenta-se uma solução para remoção da corrente capacitiva de LTs visando redução de erros no processo de localização de faltas. Entretanto, na literatura, pouco é reportado sobre análises quantitativas que descrevam a influência do efeito capacitivo de LTs sobre o desempenho de diferentes técnicas de localização de faltas.

Neste trabalho, apresenta-se uma análise da influência do efeito capacitivo de LTs sobre métodos de localização de faltas de um e dois terminais que se baseiam na análise de fasores fundamentais e que possuem formulação baseada no modelo de LT curta. Para tanto, realizam-se simulações computacionais no Alternative Transients Program (ATP) de cenários de faltas em um sistema elétrico de 500 kV/60 Hz, dando destaque tanto para a influência do efeito capacitivo da LT monitorada, como também para os benefícios e limitações de soluções que podem ser eventualmente empregadas para compensação da corrente capacitiva da LT durante o cálculo das estimativas do ponto de falta.

2 Sistema Teste e Simulações

Visando a realização dos estudos propostos, modelou-se no ATP um sistema teste simplificado de 500 kV/60 Hz, o qual é ilustrado na Figura 1, onde d é a distância de falta, ℓ o comprimento da LT, $\hat{V}_L \in \hat{V}_R$ os vetores das tensões de fase nos terminais local e remoto, respectivamente, \hat{I}_L e \hat{I}_R os vetores das correntes medidas nos terminais local e remoto, respectivamente. Os parâmetros elétricos da LT são apresentados na Tabela 1, os quais foram tomados de um sistema real em operação na interligação Norte-Nordeste do Sistema Interligado Nacional (SIN) (Dantas et al., 2007). Ressalta-se que a LT foi modelada usando pa-



Figura 1: Sistema teste 500 kV/60 Hz.

Tabela 1: Parâmetros da LT.

Sequência	$R\left(\frac{\Omega}{km}\right)$	$X\left(\frac{\Omega}{km}\right)$	$\omega C \left(\frac{\mu \mho}{km}\right)$
Zero Positiva	$0,4930 \\ 0,0186$	$1,339 \\ 0,267$	$2,890 \\ 6,124$

râmetros distribuídos constantes na frequência. Ademais, em cada terminal, os sistemas elétricos adjacentes foram representados por equivalentes de Thévenin, cujas impedâncias foram ajustadas para simular um *System-to-line Impedance Ration* (SIR) igual a 0,5, valor este típico para LTs longas (Thompson and Somani, 2015).

Com o objetivo de avaliar o efeito capacitivo da LT em diferentes cenários de carregamento, as fontes de tensão dos circuitos equivalentes de Thévenin foram ajustadas com tensão de $1\angle 0^{\circ}$ p.u. e $0.95\angle \delta$ p.u. nos terminais local e remoto, respectivamente, sendo δ variável para simulação de diferentes ângulos de carregamento na LT. Ademais, foram utilizados transformadores de potencial capacitivos e transformadores de corrente ideais, visando eliminar eventuais interferências nos resultados devido às suas respostas dinâmicas.

Nas simulações, considerou-se um passo de integração no ATP de 1 μ s, gerando registros que representam os sinais analógicos do sistema teste. Uma vez que os métodos de localização de faltas estudados neste trabalho requerem a análise de fasores fundamentais, simulou-se um filtro antialiasing de 3^a ordem do tipo Butterworth com frequência de corte em 180 Hz, aplicando uma taxa de discretização de 16 amostras/ciclo. Para estimar os fasores, utilizou-se o algoritmo do Cosseno Modificado (Hart et al., 2000), o qual tem bom comportamento frente à presença da componente CC de decaimento exponencial.

3 Algoritmos Avaliados

3.1 Método de Takagi (TA)

Em Takagi et al. (1982), apresenta-se um método de um terminal baseado no modelo de LT curta, o qual é largamente empregado em dispositivos microprocessados reais e por concessionárias durante o processo de cálculo da distância de falta quando da indisponibilidade de medições em ambos os terminais da LT monitorada. De fato, sua aplicação é muito simples, com baixo custo associado, o que colaborou para a popularização desta solução, chamada neste trabalho de Método TA. No Método TA, os sinais avaliados de tensão e corrente são selecionados de acordo com as fases envolvidas no distúrbio, assim como realizado em relés de distância. Desse modo, após um processo de identificação das fases envolvidas no defeito, selecionam-se os sinais de tensão e corrente dentre seis unidades de medição, a saber: $Z_{AT}, Z_{BT}, Z_{CT}, Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$, conforme apresentado na Tabela 2 (Saha et al., 2010), em que $\hat{I}_0 = \frac{\hat{I}_L^a + \hat{I}_L^b + \hat{I}_L^c}{3}$ é a corrente de sequência zero e $K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}$ é o fator de compensação de sequência zero, onde $Z_{L0} e Z_{L1}$ são as impedâncias de sequência zero e positiva da LT monitorada, respectivamente. Assim, uma vez selecionados os sinais de interesse, a localização da falta pode ser estimada usando:

$$d_{est} = \frac{\operatorname{Im}\left\{\widehat{V}_L \Delta \widehat{I}_L^*\right\}}{\operatorname{Im}\left\{Z_{L1}\widehat{I}_L \Delta \widehat{I}_L^*\right\}} \ell.$$
(1)

Deve-se destacar que, conforme reportado em Takagi et al. (1982), o uso de (1) minimiza os efeitos da resistência de falta R_f no processo de localização de faltas. De fato, (1) foi desenvolvida com o intuito de eliminar o efeito de R_f em sistemas homogêneos quando a impedância de falta tem característica apenas resistiva. No entanto, ressaltase que na prática a homogeneidade dos sistemas não é garantida, o que tradicionalmente resulta em erros adicionais nas estimativas calculadas via (1). Ainda assim, destaca-se que essa não é uma limitação exclusiva do Método TA, sendo inerente aos métodos de um terminal (Saha et al., 2010).

3.2 Método de Eriksson (ER)

Em Eriksson et al. (1985), apresenta-se um método de um terminal também baseado no modelo de LT curta, o qual será referenciado neste trabalho por Método ER. Assim como no método anterior, Eriksson et al. (1985) também propõem adaptações nas formulações obtidas para os loops de falta com o objetivo de reduzir os efeitos da resistência de falta R_f . Ainda, por meio da formulação proposta, estima-se também o valor de R_f para posterior compensação de seus efeitos em aplicações diversas. Destaca-se que, embora tenha sido apresentado na década de 80, o Método ER é recorrentemente referenciado por pesquisadores na área de localização de faltas e, por isso, também será avaliado nesse trabalho (Das et al., 2014).

Na tentativa de eliminar os efeitos de R_f , o Método ER faz uso de elementos incrementais bem como das impedâncias dos equivalentes de Thévenin nos terminais da LT, o que, em algumas situações práticas, pode resultar em dificuldades operacionais. No entanto, uma vez que o foco deste trabalho está na análise da influência do efeito capacitivo da LT sobre o processo de localização de faltas, considerar-se-á que as impedâncias de Thévenin são conhecidas.

Tabela 2: Sinais utilizados pelo Método TA.

$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Unidade	Sinal de	Sinal de
	de	Tensão [*]	Corrente*
	Medição	\widehat{V}_L	\widehat{I}_L
L_{CA} V_L V_L I_L I_L	$egin{array}{c} Z_{AT} \ Z_{BT} \ Z_{CT} \ Z_{AB} \ Z_{BC} \ Z_{CA} \end{array}$	$ \begin{array}{c} \widehat{V}_L^a \\ \widehat{V}_L^b \\ \widehat{V}_L^c \\ \widehat{V}_L^a - \widehat{V}_L^b \\ \widehat{V}_L^b - \widehat{V}_L^c \\ \widehat{V}_L^c - \widehat{V}_L^a \end{array} $	$ \begin{array}{c} \widehat{I}^a_L + K_0 \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}^b_L + K_0 \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}^c_L + K_0 \widehat{I}_0 \\ \widehat{I}^a_L - \widehat{I}^b_L \\ \widehat{I}^a_S - \widehat{I}^c_S \\ \widehat{I}^c_L - \widehat{I}^a_L \end{array} $

Em resumo, para localizar a falta, conforme reportado em Eriksson et al. (1985), deve-se resolver a seguinte equação de segundo grau:

$$d_{est}^2 - k_1 \cdot d_{est} + k_2 - k_3 \cdot R_f = 0, \qquad (2)$$

sendo:

$$k_1 = x + jy = \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L} + \left(1 + \frac{Z_{FR1}}{Z_{L1}}\right)$$

$$k_2 = q + jw = \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L} \cdot \left(1 + \frac{Z_{FR1}}{Z_{L1}}\right)$$

$$k_3 = e + jf = \left(1 + \frac{Z_{FL1} + Z_{FR1}}{Z_{L1}}\right) \cdot \frac{\Delta\hat{I}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L}$$

onde Z_{FL1} e Z_{FR1} são as impedâncias de sequência positiva dos equivalentes de Thévenin nos terminais local e remoto, respectivamente.

Por fim, conhecendo-se os coeficientes $k_1, k_2 \in k_3$, resolve-se (2) usando:

$$d_{est} = \frac{\left(x - \frac{e \cdot y}{f}\right) \pm \sqrt{\left(x - \frac{e \cdot y}{f}\right)^2 - 4\left(q - \frac{e \cdot w}{f}\right)}}{2}\ell,$$
(3)

sendo considerada válida a localização que recaia entre os valores 0 e 1 p.u. (Eriksson et al., 1985).

Caso seja de interesse o cálculo de R_f , Eriksson et al. (1985) propõem o uso da expressão:

$$R_f = \frac{w - (d_{est}/\ell) \cdot y}{f}.$$
 (4)

3.3 Método de Girgis (GG)

Em Girgis et al. (1992), apresenta-se um algoritmo de dois terminais baseado no modelo de LT curta a parâmetros concentrados, o qual, neste trabalho, será referenciado como Método GG. Para obter a formulação do algoritmo, a tensão no ponto de falta \hat{V}_F é calculada no domínio de fases em ambos os lados do curto-circuito, de modo que, ao igualar as expressões obtidas para \hat{V}_F obtém-se:

$$\widehat{V}_L - \widehat{V}_R + \ell Z_{abc} \widehat{I}_R = dZ_{abc} (\widehat{I}_L + \widehat{I}_R) , \qquad (5)$$

onde Z_{abc} é a matriz impedância série da LT por unidade de comprimento no domínio de fases, a qual é calculada neste trabalho a partir dos parâmetros de sequência positiva e zero da LT monitorada (Dommel, 1996).

A equação (5) pode ser então reescrita como:

$$Y = M \cdot d$$
 ou $\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot d,$ (6)

onde

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (\widehat{I}_S^i + \widehat{I}_R^i), \, \mathbf{p}/j = a, b, c \;, \quad (7)$$

$$Y_{j} = \widehat{V}_{S}^{j} - \widehat{V}_{R}^{j} + \ell \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \widehat{I}_{R}^{i}), \text{ p}/j = a, b, c.$$
(8)

Resolvendo (6) para obter d e, na sequência, substituindo d pela distância estimada do ponto de falta d_{est} , a localização do defeito pode ser calculado usando (Girgis et al., 1992):

$$d_{est} = (M^+ M)^{-1} M^+ Y , \qquad (9)$$

onde M^+ é a matriz conjugada transposta de M.

3.4 Método de Saha (SA)

Em Saha et al. (2010), propõe-se uma formulação para localização de faltas usando dados nãosincronizados baseada na análise das relações de módulos entre impedâncias e componentes fundamentais do sistema monitorado, evitando, dessa forma, problemas com os desvios de fase introduzidos por possíveis erros de sincronismo entre os dispositivos de monitoração. Neste trabalho, o referido método é referenciado como Método SA.

Em termos de parâmetros do sistema, o Método SA requer o conhecimento apenas da impedância série da linha referente ao modelo de LT curta, sendo a localização da falta calculada por meio da solução da equação:

$$O \cdot d_{est}^2 + P \cdot d_{est} + V = 0, \tag{10}$$

sendo:

$$O = \left| Z_{Li} \widehat{I}_{Li} \right|^2 - \left| Z_{Li} \widehat{I}_{Li} \right|^2,$$

$$P = -2 \operatorname{Re} \left[\widehat{V}_{Li} (Z_{Li} \widehat{I}_{Li})^* + (\widehat{V}_{Ri} - Z_{Li} \widehat{I}_{Ri}) (Z_{Li} \widehat{I}_{Ri})^* \right],$$

$$V = \left| \widehat{V}_{Li} \right|^2 - \left| \widehat{V}_{Ri} - Z_{Li} \cdot \widehat{I}_{Ri} \right|^2,$$

onde o subscrito i = 1, 2 ou Δ representa as componentes de sequência positiva, sequência negativa e componentes incrementais, respectivamente, e Z_{Li} representa a impedância série da LT.

Conforme sugerido em Saha et al. (2010), as componentes de sequência negativa podem ser utilizadas no processo de localização de faltas assimétricas, enquanto que as componentes incrementais de sequência positiva podem ser empregadas na localização de faltas simétricas. Assim, a solução obtida de (10) que apresentar valor entre 0 e 1 p.u. é tomada como a estimativa válida.

4 Soluções Avaliadas para Remoção do Efeito Capacitivo da Linha

Embora vários artigos abordem o problema do efeito capacitivo de LTs, poucos resultados em termos de localização de faltas são apresentados para fins de comparação do desempenho dos métodos com e sem aplicação de soluções para compensação das correntes capacitivas. Assim, neste trabalho, os Métodos TA, ER, GG e SA são avaliados considerando duas metodologias de remoção do efeito capacitivo de LTs, as quais serão denominadas de soluções para compensação C1 e C2.

4.1 Solução para Compensação C1

Para melhor entender o procedimento de correção do efeito capacitivo segundo a solução C1, considere o modelo π -nominal de uma LT, conforme ilustrado na Figura 2, onde \hat{I}_{Lcap} e \hat{I}_{Rcap} representam as correntes capacitivas decorrentes do modelo, e \hat{I}_{Lser} e \hat{I}_{Rser} representam as correntes que de fato fluem na direção do curto-circuito.

Figura 2: Modelo π -nominal de uma LT.

Ressalta-se que o modelo ilustrado se baseia em uma representação da LT a parâmetros concentrados, limitando sua aplicação em algoritmos que requerem a análise de sinais com comprimentos de onda muito maiores do que a dimensão do sistema (CIGRE Working Group 02.33, 1990). Assim, embora existam outros modelos de LT, o π -nominal é um dos mais empregados em algoritmos para sistemas elétricos de potência quando não há a necessidade de representação dos parâmetros distribuídos da LT, a exemplo dos métodos baseados na análise de fasores fundamentais.

Basicamente, no modelo π -nominal, considera-se que o efeito capacitivo da LT pode ser representado por capacitores *shunt* concentrados nos terminais da mesma, sendo cada um responsável por representar metade da admitância total da LT. Dessa forma, conforme reportado em Xue et al. (2012), as correntes nos ramos *shunt* capacitivos nos terminais da LT podem ser aproximadas por:

$$\widehat{I}_{Lcap} = j0.5 \cdot B \cdot \widehat{V}_L, \qquad (11)$$

$$\widehat{I}_{Rcap} = j0.5 \cdot B \cdot \widehat{V}_R, \qquad (12)$$

onde B é a matriz admitância da LT dada por:

$$B = \begin{bmatrix} B_s & B_m & B_m \\ B_m & B_s & B_m \\ B_m & B_m & B_s \end{bmatrix},$$
(13)

em que B_s é a admitância própria de fase e B_m é a admitância mútua entre fases.

Na solução C1, propõe-se a remoção de \widehat{I}_{Lcap} e \widehat{I}_{Rcap} das correntes medidas nos terminais da LT, resultando nas parcelas de corrente que de fato fluem para o curto-circuito quando considerado o modelo π -nominal, ou seja, \widehat{I}_{Lser} e \widehat{I}_{Rser} , as quais são calculadas usando:

$$\widehat{I}_{Lser} = \widehat{I}_L - \widehat{I}_{Lcap}, \qquad (14)$$

$$\widehat{I}_{Rser} = \widehat{I}_R - \widehat{I}_{Rcap}.$$
(15)

Por fim, usando as correntes \widehat{I}_{Lser} e \widehat{I}_{Rser} , o processo de localização de faltas segue normalmente, seguindo as etapas previstas para cada algoritmo.

É importante destacar que na solução C1, embora as admitâncias *shunt* estejam igualmente dividas nos terminais da LT, as correntes \hat{I}_{Lcap} e \hat{I}_{Rcap} diferem entre si a depender das tensões \hat{V}_L e \hat{V}_R , respectivamente. Assim, nessa análise, o efeito capacitivo é removido individualmente em cada terminal da LT, propagando imprecisões decorrentes das aproximações adotadas no modelo π -nominal (ou seja, admitâncias *shunt* divididas de forma igualitária em ambos os terminais da LT). Por isso, conclui-se que, embora a solução C1 colabore para a remoção do efeito capacitivo da LT, esta consiste apenas em uma aproximação, pois não avalia o efeito capacitivo nos terminais da LT nas suas devidas proporções.

4.2 Solução para Compensação C2

A solução C2 para compensação do efeito capacitivo de LTs também se baseia no modelo de LT π nominal apresentado na Figura 2. Basicamente, a solução C2 é uma complementação da solução C1, na qual são incluídas adaptações na tentativa de remover de forma mais confiável o efeito capacitivo total da LT, ao invés de remoções individuais em cada terminal da linha, conforme realizado na solução C1.

A solução para compensação C2 é desenvolvida partindo-se do pressuposto que a soma das correntes \hat{I}_{Lcap} e \hat{I}_{Rcap} calculadas via (11) e (12) representa de fato o efeito capacitivo total da LT. Assim, uma vez conhecida a corrente capacitiva total da LT, calculam-se as contribuições de corrente capacitiva que fluem em cada um dos terminais. Para tanto, consideram-se fatores de distribuição de corrente ao longo do sistema, os quais dependem das impedâncias de Thévenin nas extremidades da LT. Para estimar a referida distribuição das correntes capacitivas, considere a LT monitorada como um elemento absorvedor de corrente capacitiva, cujo valor total é dado por:

$$\widehat{I}_{TOTcap} = \widehat{I}_{Lcap} + \widehat{I}_{Rcap}.$$
 (16)

Sendo \hat{I}_{TOTcap} a corrente total capacitiva da LT, por meio de divisores de corrente, calculam-se as contribuições nos terminais local e remoto das correntes capacitivas considerando o circuito puro de falta:

$$\widehat{I}_{Lcap'} = \frac{Z_{FR}}{Z_{FL} + Z_{FR}} \cdot \widehat{I}_{TOTcap}, \qquad (17)$$

$$\widehat{I}_{Rcap'} = \frac{Z_{FL}}{Z_{FL} + Z_{FR}} \cdot \widehat{I}_{TOTcap}.$$
 (18)

Por fim, aplicam-se (14) e (15), removendo-se a parcela de $\widehat{I}_{Lcap'}$ e $\widehat{I}_{Rcap'}$. Na sequência, o processo de localização de faltas segue normalmente, seguindo as etapas de cada algoritmo.

Em relação à solução para compensação C2, é importante notar que sua aplicação está condicionada ao conhecimento das impedâncias dos equivalentes de Thévenin que representam os sistemas adjacentes à LT monitorada. Neste trabalho essas impedâncias foram assumidas como conhecidas, muito embora se saiba que seus valores podem ser estimados a partir da análise de grandezas de sequência ou incrementais durante o regime permanente de curto-circuito (Das et al., 2014).

5 Resultados e Análises

Conforme mencionado anteriormente, as análises realizadas neste trabalho se baseiam em simulações no ATP de cenários de falta no sistema ilustrado na Figura 1. Por questões de limitação de espaço, foram simuladas apenas faltas francas AT, tipo este que é mais comum em sistemas de transmissão (Saha et al., 2010). Para permitir uma melhor visualização da influência do efeito capacitivo da LT sobre o desempenho dos métodos de localização implementados, adotou-se um comprimento para a LT avaliada de 300 km, sem incluir compensação reativa shunt em suas extremidades e considerando o sistema como sendo homogêneo. Ainda, cenários de carregamento moderado e pesado foram simulados. Para tanto, $\delta = -10^{\circ}$ e -30° foram utilizados no ajuste da fonte de Thévenin no terminal remoto.

5.1 Análise dos Métodos TA e ER

Nas Figuras 3 e 4, apresentam-se os resultados obtidos para os métodos TA e ER de um terminal. Para esses métodos, percebe-se que o processo de compensação da corrente capacitiva não se mostrou vantajoso. De fato, usando a formulação clássica, os métodos TA e ER resultaram em erros inferiores a 2 km, enquanto que ao aplicar as soluções para compensação, os erros aumentaram. Das análises, nota-se que a solução para compensação C1 foi mais crítica, resultando em erros da ordem de 10 km em casos de faltas próximas ao terminal remoto. Para a solução C2, não houve aumento significativo dos erros.

5.2 Análise dos Métodos GG e SA

Nas Figuras 5 e 6, apresentam-se os resultados obtidos durante a avaliação dos métodos GG e SA, os quais operam usando dados de dois terminais. Para esses métodos, as soluções para compensação da corrente capacitiva da LT se mostraram vantajosas, reduzindo sobremaneira os erros veri-



Figura 3: Resultados obtidos para o Método TA: (a) $\delta = -10^{\circ}$; (b) $\delta = -30^{\circ}$.



Figura 4: Resultados obtidos para o Método ER: (a) $\delta = -10^{\circ}$; (b) $\delta = -30^{\circ}$.

ficados quando da utilização das formulações originais. Dos resultados obtidos, nota-se que os métodos GG e SA apresentam maiores erros para faltas próximas aos terminais da LT, quando o sistema se torna assimétrico em relação ao ponto de falta, tornando o efeito capacitivo mais evidente no terminal mais distante do curto-circuito.

Ao utilizar as formulações originais, os métodos GG e SA resultaram em erros da ordem de 10 km e 4,5 km para faltas próximas aos terminais da LT, respectivamente. Ao empregar a solução C1 para compensação da corrente capacitiva, os erros dos métodos GG e SA foram reduzidos para aproximadamente 5 km e 2 km, respectivamente.



Figura 5: Resultados obtidos para o Método GG: (a) $\delta = -10^{\circ}$; (b) $\delta = -30^{\circ}$.



Figura 6: Resultados obtidos para o Método SA: (a) $\delta = -10^{\circ}$; (b) $\delta = -30^{\circ}$.

Ainda, ao utilizar a solução C2, os erros de ambos os métodos foram reduzidos para a ordem de 500 m apenas, evidenciando que de fato existe influência do efeito capacitivo de LTs sobre o desempenho de métodos de localização de faltas baseados no modelo de linha curta. Ademais, destaca-se que o processo de compensação da corrente capacitiva em métodos de localização de faltas de dois terminais pode ser vantajoso, especialmente em casos de faltas próximas às extremidades da LT.

5.3 Comentários Gerais

Conforme evidenciado por meio dos resultados obtidos, é nítida a influência do efeito capacitivo de LTs sobre métodos que possuem formulação baseada no modelo de linha curta. Também dos resultados, nota-se que a variação do carregamento não demonstrou ser decisiva no impacto do efeito capacitivo da LT sobre os métodos de localização de faltas avaliados. Ainda, os resultados demonstram que processos de remoção da corrente capacitiva são vantajosos para algoritmos de dois terminais, porém não são indicados para métodos de um terminal. De fato, a depender da formulação adotada nos métodos de um terminal, o processo de remoção da corrente capacitiva em um único lado da LT pode tornar os sinais avaliados incompatíveis com o comportamento geral do sistema, incorrendo em erros adicionais nas estimativas calculadas. Por outro lado, ao usar dados de dois terminais, o processo de remoção da corrente capacitiva é realizado por completo, sem resultar em inconsistências nas formulações empregadas no processo de localização de faltas, sendo portanto vantajoso do ponto de vista de redução dos erros nas estimativas calculadas.

Um aspecto importante a ser destacado em relação às soluções C1 e C2 para compensação da corrente capacitiva diz respeito aos valores das impedâncias dos equivalentes de Thévenin conectados às extremidades da LT monitorada, os quais têm relação direta com o SIR nos terminais local e remoto. Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho se optou por utilizar SIR=0,5 em ambos os terminais, valor este típico para LTs longas (Thompson and Somani, 2015). Embora tal escolha possa em um primeiro momento dar a impressão de que as soluções C1 e C2 resultariam em um mesmo resultado, isso não é verdade. De fato, a solução C1 remove as correntes capacitivas individualmente nos terminais da LT, sendo estas diferentes entre si em decorrência das diferentes tensões nas barras local e remota. Por outro lado, a solução C2 se baseia na distribuição da corrente capacitiva total em função das impedâncias das redes adjacentes, considerando a LT como um grande nó absorvedor de corrente capacitiva. Tal abordagem permite uma análise global do efeito capacitivo, sem propagar erros decorrentes de aproximações inerentes do modelo π nominal adotado como base da fundamentação de metodologias para compensação do efeito capacitivo de LTs. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar outros cenários de falta, incluindo o estudo de sistemas com diferentes valores de SIR nos terminais local e remoto, bem como a avaliação do efeito cruzado entre a resistência de falta e o efeito capacitivo da LT monitorada.

6 Conclusões

Neste trabalho, apresentou-se um estudo sobre a influência do efeito capacitivo de LTs sobre métodos de localização de faltas baseados no modelo de LT curta. Quatro métodos baseados na análise de componentes fundamentais foram avaliados, sendo dois deles de um terminal e outros dois baseados em dados de dois terminais.

Para realizar as análises propostas, utilizouse o ATP para modelar uma LT de 300 km, 500 kV/60 Hz, sem compensação reativa shunt, na qual foram simulados diferentes cenários de falta AT, considerando casos de carregamento moderado e pesado. Em cada caso, os erros absolutos obtidos por meio das formulações originais dos métodos de localização de faltas foram analisados e, em seguida, comparados com os erros obtidos quando da aplicação de duas diferentes abordagens para remoção do efeito capacitivo de LTs. Na primeira abordagem, a remoção das correntes capacitivas é realizada de forma individual em cada terminal da LT, enquanto que na segunda abordagem a LT é tratada como um elemento absorvedor de corrente capacitiva, cuja distribuição no sistema é calculada a partir das impedâncias dos equivalentes de Thévenin adjacentes à LT.

Dos resultados obtidos, conclui-se que o processo de remoção do efeito capacitivo de LTs não é indicado para os métodos de um terminal, visto que a remoção parcial da corrente capacitiva pode incorrer em erros adicionais nas localizações estimadas. Por outro lado, em métodos de localização de faltas de dois terminais, a compensação do efeito capacitivo pode ser realizada por completo, sendo portanto benéfica do ponto de vista de redução dos erros nas estimativas calculadas do ponto de falta. De fato, para os métodos de dois terminais avaliados, verificou-se uma redução dos erros, que passaram de alguns quilômetros para poucas centenas de metros, evidenciando o impacto do efeito capacitivo de LTs quando do uso de localizadores de faltas baseados no modelo de LT curta.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

Referências

- Altuve, H. J. and Schweitzer, E. O. (2010). Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, USA.
- CIGRE Working Group 02.33 (1990). Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients.
- Dantas, K. M. C., Neves, W. L. A., FERNANDES Jr., D., Souza, B. A. and Fonseca, L. C. A. (2007). Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão, VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, Brasil.
- 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.
- Dommel, H. W. (1996). Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book, Portland, BPA.
- Eriksson, L., Saha, M. M. and Rockefeller, G. D. (1985). An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remore-end infeed, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-104**(2): 423–436.
- Girgis, A., Hart, D. and Peterson, W. (1992). A new fault location technique for two- and three-terminal lines, *Power Delivery*, *IEEE Transactions on* 7(1): 98 –107.
- Hart, D. G., Novosel, D. and Smith, R. A. (2000). Modified Cosine Filters, U. S. Patent 6154687 edn.
- Hinge, T. and Dambhare, S. (2015). Secure phase comparison schemes for transmissionline protection using synchrophasors, *IEEE Trans. on Power Delivery* **30**(4): 2045–2054.
- Izykowski, J., Rosolowski, E. and Saha, M. (2006). Post-fault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines, *IEEE/PES General Meeting*.
- Kase, T., Kurosawa, Y. and Amo, H. (2008). Charging current compensation for distance protection, *IEEE Transactions on Power Delivery* 23(1): 124–131.
- Lopes, F. V., Melo, Y. M. P., Fernandes Jr., D. and Neves, W. L. A. (2013). Real-time evaluation of pmu-based fault locators, *Internatio*nal Conference on Power Systems Transients

- Lopes, F. V., Silva, K. M. and Küsel, B. F. (2015). Parametric analysis of two-terminal impedance-based fault location methods, *International Conference on Power Systems Transients*.
- Radojevic, Z. M., Kim, C. H., Popov, M., Preston, G. and Terzija, V. (2009). New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters, *International Conference on Power Systems Transients*.
- Saha, M. M., Izykowski, J. and Rosolowski, E. (2010). Fault Location on Power Networks, Power Systems, Ed. Springer, London.
- Schweitzer, E. O., Guzmán, A., Mynam, M. V., Skendzic, V., Kasztenny, B. and Marx, S. (2014). Locating faults by the traveling waves they launch, 50th Annual Minnesota Power Systems Conference.
- 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, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions* on **PAS-101**(8): 2892 –2898.
- Thompson, M. J. and Somani, A. (2015). A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length, 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers.
- Tziouvaras, D., Roberts, J. and Benmouyal, G. (2001). New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines, 70th IEE International Conf. on Develop. in Power System Protection, pp. 395–398.
- Wiszniewski, A. (1983). Accurate fault impedance locating algorithm, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C 130(6): 311 –314.
- Xu, Z. Y., Du, Z. Q., Ran, L., Wu, Y. K., Yang, Q. X. and He, J. L. (2007). A current differential relay for a 1000-kv uhv transmission line, *IEEE Transactions on Power Delivery* 22(3): 1392–1399.
- Xue, Y., Finney, D. and Le, B. (2012). Charging current in long lines and high-voltage cables-protection application considerations, 39th Annual Western Protective Relay Conference.
- Zimath, S. L., Ramos, M. A. F. and Filho, J. E. S. (2010). Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults, 2010 IEEE/PES Trans. and Dist. Conf. and Exposition, pp. 1–5.