

MELHORANDO A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM DOIS TERMINAIS POR MEIO DA REMOÇÃO PARCIAL DO EFEITO CAPACITIVO DE LINHAS

TAÍS LAURINDO PEREIRA*, FELIPE V. LOPES†

*Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Campus
Universitário Darcy Ribeiro, Brasília - CEP 70910-900

Emails: laurindo.tais@gmail.com, felipevlope@unb.br

Abstract— This paper aims to analyze the benefits of removing the transmission line capacitive effect in two-terminal based fault location procedures. To do so, two different fault location techniques available in the literature were tested by means of Alternative Transients Program (ATP) simulations of faults in 230 kV and 500 kV power systems. In each case, the original versions of the evaluated methods and those which consider the capacitive effect removal process were taken into account. The obtained results reveal that the capacitive effect correction improves the fault location accuracy, specially in long lines and in systems with higher rated voltage.

Keywords— Two-terminal algorithms, transmission lines, fault location

Resumo— Neste artigo, tem-se como objetivo analisar os benefícios da remoção do efeito capacitivo de linhas de transmissão em procedimentos de localização de faltas baseados em dois terminais. Para tanto, duas técnicas diferentes de localização de faltas disponíveis na literatura foram testadas por meio de simulações no *Alternative Transients Program* (ATP) de faltas em sistemas de 230 kV e 500 kV. Em cada caso, as versões originais dos métodos avaliados e as que contemplam a remoção do efeito capacitivo foram consideradas. Dos resultados obtidos, nota-se que a correção do efeito capacitivo melhora a precisão da localização de faltas, especialmente em linhas longas e em sistemas com maior tensão nominal.

Palavras-chave— Algoritmos de dois terminais, linhas de transmissão, localização de faltas.

1 Introdução

O aumento da demanda por energia elétrica nas últimas décadas resultou em um desafio para as concessionárias: prover uma maior eficiência, continuidade e segurança na transmissão de energia. Neste contexto, verifica-se a importância dos sistemas de monitoração e diagnóstico de distúrbios, dentre os quais se destacam os voltados para a localização de faltas em linhas de transmissão (LTs).

A localização de faltas consiste em um processo importante para as concessionárias, pois ajudam na manutenção dos índices de continuidade de serviço na transmissão. De fato, ao localizar a falta, acelera-se o processo de identificação do ponto da LT a ser reparado, reduzindo o tempo de manutenção e, consequentemente, o tempo de indisponibilidade do sistema após a ocorrência de curtos-circuitos.

Com o advento da tecnologia digital, tornou-se comum o uso de localizadores de faltas, cujas funções têm sido incorporadas em relés microprocessados e em registradores digitais de perturbações. Neste contexto, sabe-se que os localizadores de faltas podem depender ou não dos parâmetros da linha, bem como podem se basear na utilização de dados de um, dois ou vários terminais (Stringfield et al., 1957; Takagi et al., 1982; Girgis et al., 1992; T.P.Hinge and S.S.Dambhare, 2015; Z.M.Radojevic et al., 2009; Tziouvaras et al., 2001; Gopalakrishnan et al., 2000).

Neste artigo, apresentam-se análises sobre a influência da remoção do efeito capacitivo da LT sobre dois algoritmos de localização de faltas de

dois terminais. Essas técnicas se baseiam em medições fasoriais sincronizadas tomadas nas extremidades da LT e consideram o modelo de linha curta para o desenvolvimento de suas formulações. Estes algoritmos foram escolhidos intencionalmente com o objetivo de comprovar a possível melhoria de seus desempenhos quando da correção do efeito capacitivo, mesmo em situações nas quais os métodos não contemplam o fluxo de correntes capacitivas no sistema (T.P.Hinge and S.S.Dambhare, 2015). Para tanto, o ATP foi usado para simular faltas em sistemas de 230 kV e 500 kV, considerando casos nos quais as localizações das faltas são estimadas com e sem a remoção do efeito capacitivo da LT.

2 Sistemas Analisados

Para as análises propostas neste trabalho, foram simuladas faltas em sistemas de dois terminais de 230 kV e 500 kV, com topologia similar à apresentada na Figura 1, onde $\hat{V}_{L(a,b,c)}$ corresponde à tensão trifásica no terminal local, $\hat{V}_{R(a,b,c)}$ à tensão trifásica no terminal remoto, $\hat{I}_{L(a,b,c)}$ à corrente no terminal local e $\hat{I}_{R(a,b,c)}$ à corrente no terminal remoto, segundo as polaridades indicadas na figura. A LT foi modelada usando parâmetros distribuídos e constantes na frequência.

Neste trabalho, as fontes de tensão de Thévenin foram definidas como sendo: $\hat{V}_{L(a,b,c)} = 1\angle 0^\circ$ pu e $\hat{V}_{R(a,b,c)} = 0,95\angle -\alpha^\circ$ pu. Além disso, os sistemas de 230 kV e de 500 kV foram simulados assumindo parâmetros típicos tomados de redes

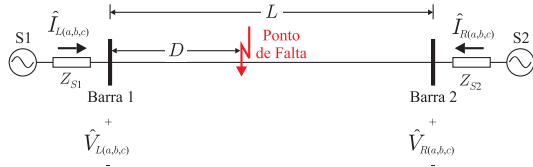


Figura 1: Sistema teste analisado.

elétricas reais pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Para o de 230 kV, considerou-se $Z_{L0} = 0,4177 + j1,5238 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $Y_{L0} = j2,86 \frac{\mu\text{mho}}{\text{km}}$, $Z_{L1} = 0,346 + j0,3005 \frac{\Omega}{\text{km}}$ e $Y_{L1} = j5,51 \frac{\mu\text{mho}}{\text{km}}$, sendo Z_{L0} , Y_{L0} , Z_{L1} e Y_{L1} as impedâncias (Z) e admitâncias (Y) de sequência zero e positiva (representadas pelos índices 0 e 1, respectivamente) da LT. Por outro lado, para o sistema de 500 kV, considerou-se $Z_{L0} = 0,493 + j1,339 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $Y_{L0} = j2,89 \frac{\mu\text{mho}}{\text{km}}$, $Z_{L1} = 0,0186 + j0,267 \frac{\Omega}{\text{km}}$ e $Y_{L1} = j6,124 \frac{\mu\text{mho}}{\text{km}}$. Cabe ressaltar que para ambos os sistemas, simulou-se um *Source Impedance Ration* (SIR) igual a 0,1 nos dois terminais. Em cada caso, além da variação do comprimento de linha L (km), também se variou a localização do curto-circuito D (pu) e o ângulo de abertura angular das barras α . Os valores considerados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de simulação dos sistemas avaliados.

$\alpha(^{\circ})$	-5 $^{\circ}$		-20 $^{\circ}$		-45 $^{\circ}$	
L (km)	200	500	200	500	200	500
D (pu)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Os tipos de falta simulados foram monofásica-terra (AT) e bifásica-terra (ABT). As faltas simuladas foram consideradas sólidas, de forma que foram definidas no ATP resistências de falta com valor $10^{-5} \Omega$. Além disso, para a estimação dos fatores fundamentais, considerou-se o algoritmo do Cosseno Modificado (Hart et al., 2000), o qual tem um bom comportamento frente à presença da componente de decaimento exponencial. Uma taxa de 16 amostras/ciclo foi utilizada.

3 Algoritmos Avaliados

3.1 Método 1

No artigo intitulado *A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines*, Girgis et al. apresentam a elaboração de um algoritmo de localização de falta baseado na análise computacional dos fasores de corrente e tensão obtidos em linhas com dois e três terminais, considerando medições sincronizadas e não-sincronizadas (Girgis et al., 1992). No presente trabalho, considera-se apenas a versão do algoritmo baseada em medições sincronizadas de dois terminais.

O referido método é independente do tipo de falta e não é influenciado de forma significativa pela resistência de falta, o que é uma característica comum aos métodos de dois terminais (M.M.Saha et al., 2010). Além disso, conforme mencionado anteriormente, o algoritmo não inclui as capacitâncias características da LT, sendo, portanto, baseado no modelo de linha curta.

Da Figura 1, nota-se que a distância da falta em relação à Barra 1 é D e, em relação à Barra 2, é $L - D$. Dessa maneira, as seguintes equações podem ser obtidas:

$$\hat{V}_{L(a,b,c)} = \hat{V}_{F(a,b,c)} + DZ_{(a,b,c)}\hat{I}_{L(a,b,c)}, \quad (1)$$

$$\hat{V}_{R(a,b,c)} = \hat{V}_{F(a,b,c)} + (L - D)Z_{(a,b,c)}\hat{I}_{R(a,b,c)}, \quad (2)$$

onde $V_{F(a,b,c)}$ é o vetor de tensões de fase na falta e $Z_{(a,b,c)}$ é a matriz impedância série da LT.

Associando (1) e (2), obtém-se:

$$\begin{aligned} \hat{V}_{L(a,b,c)} - \hat{V}_{R(a,b,c)} + LZ_{(a,b,c)}\hat{I}_{R(a,b,c)} \\ = DZ_{abc}(\hat{I}_{L(a,b,c)} + \hat{I}_{R(a,b,c)}). \end{aligned} \quad (3)$$

Expandindo (3), obtém-se:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{V}_{La} \\ \hat{V}_{Lb} \\ \hat{V}_{Lc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{V}_{Ra} \\ \hat{V}_{Rb} \\ \hat{V}_{Rc} \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{Ra} \\ \hat{I}_{Rb} \\ \hat{I}_{Rc} \end{bmatrix} \\ = D \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{La} + \hat{I}_{Ra} \\ \hat{I}_{Lb} + \hat{I}_{Rb} \\ \hat{I}_{Lc} + \hat{I}_{Rc} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Reescrevendo (4), tem-se que:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{DM}. \quad (5)$$

Finalmente, de (5), é possível estimar o valor da distância de falta D através da fórmula:

$$D = (\mathbf{M}^+\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^+\mathbf{Y}, \quad (6)$$

onde M^+ é a matriz transposta conjugada de M e D é dado em km.

3.2 Método 2

Diferentemente do Método 1, no artigo intitulado *New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters*, Radojevic et al. apresentam um algoritmo baseado em dados sincronizados de dois terminais que não necessita dos parâmetros da LT.

Originalmente desenvolvido para faltas assimétricas, este método requer apenas a análise de componentes de sequência positiva e negativa de tensão e corrente em ambos os terminais da LT, conforme ilustrado na Figura 2, onde os índices "p" e "n" representam as grandezas de sequência positiva e negativa, respectivamente. Além disso, conforme mencionado anteriormente, o algoritmo

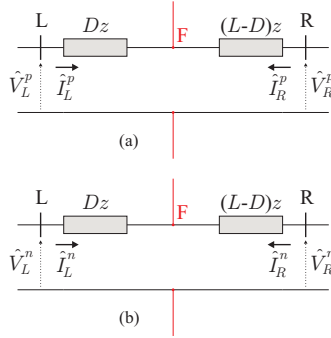


Figura 2: Circuitos equivalentes de seq ncia positiva e negativa (Z.M.Radojevic et al., 2009).

foi originalmente desenvolvido para LTs curtas, de forma que o efeito capacitivo do sistema não é considerado em sua formulação.

Analisando os circuitos de seq ncia, as seguintes expressões são obtidas:

$$\widehat{V}_L^p - zD\widehat{I}_L^p = \widehat{V}_R^p - z(L-D)\widehat{I}_R^p, \quad (7)$$

$$\widehat{V}_L^n - zD\widehat{I}_L^n = \widehat{V}_R^n - z(L-D)\widehat{I}_R^n. \quad (8)$$

Associando (7) e (8), define-se D como um percentual do tamanho da LT:

$$D\% = \frac{D}{L}100 = \frac{zD}{zD + z(L-D)}100, \quad (9)$$

onde zD e $z(L-D)$ s o dadas por rela  es obtidas resolvendo (7) e (8).

Finalmente, a express o final para a localiza  o da falta (em pu)  :

$$D\% = \frac{(\widehat{V}_L^p - \widehat{V}_R^p)\widehat{I}_R^n - (\widehat{V}_L^n - \widehat{V}_R^n)\widehat{I}_R^p}{(\widehat{V}_L^p - \widehat{V}_R^p)(\widehat{I}_L^n + \widehat{I}_R^n) - (\widehat{V}_L^n - \widehat{V}_R^n)(\widehat{I}_L^p + \widehat{I}_R^p)}. \quad (10)$$

4 Correção do Efeito Capacitivo

Na literatura, existe uma adaptação do Método 1, na qual o efeito capacitivo da LT   incluído em uma formulação originalmente baseada no modelo de linha curta (T.P.Hinge and S.S.Dambhare, 2015). Para tanto, as correntes medidas em ambos os terminais da LT são corrigidas com base nas tensões medidas e nos parâmetros de admitância do sistema. Dessa forma, é definida uma nova expressão para as correntes a serem utilizadas na localização de faltas.

Para melhor entender a correção do efeito capacitivo durante a aplicação de algoritmos de localização de faltas, considere o sistema apresentado na Figura 3. Da literatura, sabe-se que as correntes nos ramos *shunt* capacitivos para os terminais local e remoto, respectivamente, são dadas por:

$$\widehat{I}_{Lcap(a,b,c)} = j0,5B\widehat{V}_{L(a,b,c)}, \quad (11)$$

$$\widehat{I}_{Rcap(a,b,c)} = j0,5B\widehat{V}_{R(a,b,c)}. \quad (12)$$

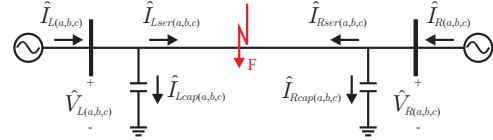


Figura 3: Esquema da solução avaliada.

Portanto, retirando a parcela referente às correntes capacitivas das correntes medidas, tem-se apenas as contribuições de curto de cada lado do sistema que de fato são absorvidas pela falta. Em outras palavras, pode-se dizer que são obtidas as correntes nos ramos série da linha de transmissão em cada lado do curto-circuito, as quais são calculadas usando:

$$\widehat{I}_{Lser(a,b,c)} = \widehat{I}_{L(a,b,c)} - \widehat{I}_{Lcap(a,b,c)}, \quad (13)$$

$$\widehat{I}_{Rser(a,b,c)} = \widehat{I}_{R(a,b,c)} - \widehat{I}_{Rcap(a,b,c)}, \quad (14)$$

onde B é a matriz admitância *shunt* da LT dada por:

$$\begin{bmatrix} B_s & B_m & B_m \\ B_m & B_s & B_m \\ B_m & B_m & B_s \end{bmatrix}, \quad (15)$$

sendo B_s a admitância própria da fase e B_m a admitância mútua entre fases.

Com base no processo apresentado para correção da corrente capacitiva, os métodos de localização de faltas analisados foram modificados conforme apresentado nas subseções a seguir.

4.1 Método 1 Modificado

Após a inclusão da correção da corrente capacitiva, obt m-se para o Método 1 o seguinte equacionamento:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_{La} \\ \widehat{V}_{Lb} \\ \widehat{V}_{Lc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \widehat{V}_{Ra} \\ \widehat{V}_{Rb} \\ \widehat{V}_{Rc} \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{I}_{Rser(a)} \\ \widehat{I}_{Rser(b)} \\ \widehat{I}_{Rser(c)} \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{I}_{Lser(a)} + \widehat{I}_{Rser(a)} \\ \widehat{I}_{Lser(b)} + \widehat{I}_{Rser(b)} \\ \widehat{I}_{Lser(c)} + \widehat{I}_{Rser(c)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

onde Z_s é a impedância série própria de cada fase da LT e Z_m a impedância mútua entre duas fases.

Neste ponto da implementação, (16)   representada no seguinte formato:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{D}\mathbf{M}. \quad (17)$$

Por fim, calcula-se a localização da falta usando:

$$D = (\mathbf{M}^+\mathbf{M})^{-1}\mathbf{M}^+\mathbf{Y}, \quad (18)$$

onde D é dado em km.

4.2 Método 2 Modificado

Através do conceito de componentes simétricas, calculam-se as componentes de sequência negativa e positiva do sistema considerando como entradas as correntes I_{ser} em cada terminal. Dessa forma, obtém-se a seguinte fórmula:

$$D\% = \frac{\hat{V}_{LR}^p \hat{I}_{Rser}^n - \hat{V}_{LR}^n \hat{I}_{Rser}^p}{\hat{V}_{LR}^p (\hat{I}_{Lser}^n + \hat{I}_{Rser}^n) - \hat{V}_{LR}^n (\hat{I}_{Lser}^p + \hat{I}_{Rser}^p)}, \quad (19)$$

sendo $\hat{V}_{LR}^p = \hat{V}_L^p - \hat{V}_R^p$ e $\hat{V}_{LR}^n = \hat{V}_L^n - \hat{V}_R^n$. Em (19), a localização da falta D é dada em pu, e I_{Lser}^n , I_{Rser}^n , I_{Lser}^p e I_{Rser}^p são as correntes de sequência negativa e positiva nos terminais local e remoto do sistema monitorado.

Na Figura 4, apresenta-se o resultado da solução avaliada para os Métodos 1 e 2, considerando o tipo de falta ABT. Nesse exemplo, considerou-se $L=500$ km, $D=0,8$ pu e $\alpha = -20^\circ$:

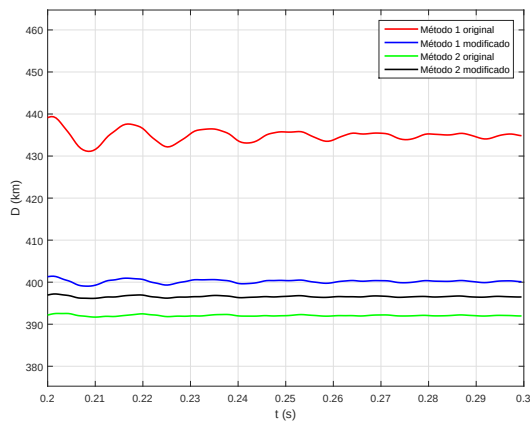


Figura 4: Exemplo de aplicação dos algoritmos modificados.

5 Resultados e Análises

5.1 Sistema de 230 kV

Os resultados obtidos para este sistema são apresentados nas Tabelas de 2 a 5. Nota-se que, no caso da falta ABT, para a linha de 230 kV, as diferenças observadas entre os desempenhos dos algoritmos em suas versões original e modificada foram menos evidentes, se comparadas aos resultados obtidos para o sistema de 500 kV que serão apresentados na próxima seção. Por outro lado, para a falta AT, considerando o SIR avaliado, verificou-se que as diferenças das versões originais e corrigidas foram menos significativas tanto para a linha de 230 kV como para 500 kV.

Conforme exemplificado nas Tabelas 2 e 3, o desempenho das versões original e corrigida para o Método 1 foi praticamente análogo com relação à falta AT, o que indica um menor impacto das correntes capacitivas sobre os métodos de localização de faltas. Por outro lado, para a falta ABT,

Tabela 2: Desempenho do Método 1 original - LT 230 kV.

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,2	-5	0,2	0,19	0,35	0,76
		-20	0,2	0,19	0,35	0,735
		-45	0,2	0,19	0,36	0,66
	0,5	-5	0,5	0,5	0	0,015
		-20	0,5	0,5	0	0,025
		-45	0,5	0,5	0	0,04
	0,8	-5	0,8	0,81	0,345	0,815
		-20	0,8	0,81	0,35	0,815
		-45	0,8	0,81	0,36	0,79
	0,2	-5	0,23	0,13	2,528	6,566
		-20	0,23	0,14	2,518	5,912
		-45	0,23	0,16	2,528	4,478
500	0,5	-5	0,5	0,5	0,006	0,166
		-20	0,5	0,5	0	0,34
		-45	0,5	0,5	0,014	0,714
	0,8	-5	0,78	0,88	2,47	7,566
		-20	0,78	0,88	2,49	7,718
		-45	0,78	0,88	2,546	7,546

Tabela 3: Desempenho do Método 1 modificado - LT 230 kV.

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,2	-5	0,2	0,2	0,41	0,055
		-20	0,2	0,2	0,41	0,08
		-45	0,2	0,2	0,405	0,145
	0,5	-5	0,5	0,5	0,01	0,03
		-20	0,5	0,5	0	0,045
		-45	0,5	0,5	0	0,08
	0,8	-5	0,8	0,8	0,415	0,015
		-20	0,8	0,8	0,41	0,01
		-45	0,8	0,8	0,405	0,03
	0,2	-5	0,23	0,19	2,732	0,54
		-20	0,23	0,19	2,734	0,678
		-45	0,23	0,19	2,714	1,046
500	0,5	-5	0,5	0,5	0,014	0,17
		-20	0,5	0,5	0,004	0,276
		-45	0,5	0,5	0,012	0,452
	0,8	-5	0,77	0,8	2,728	0,298
		-20	0,77	0,8	2,728	0,278
		-45	0,77	0,8	2,748	0,568

Tabela 4: Desempenho do Método 2 original - LT 230 kV ($D = 0,8$ pu).

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
500	0,8	-5	0,75	0,75	5,048	5,108
		-20	0,78	0,78	1,528	1,528
		-45	0,79	0,79	1,302	0,7

Tabela 5: Desempenho do Método 2 modificado - LT 230 kV ($D = 0,8$ pu).

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
500	0,8	-5	0,79	0,79	0,772	0,77
		-20	0,78	0,78	0,692	1,528
		-45	0,79	0,79	0,696	0,694

registrou-se uma queda considerável no erro percentual, com a maior diferença para os testes realizados com $L = 500$ km, especialmente para $D = 0,2$ pu e $D = 0,8$ pu. No caso de $L = 200$ km, também se verificou uma redução considerável nos erros. Apenas para $D = 0,5$ pu não foram observadas diferenças relevantes.

Para o Método 2, as diferenças observadas entre o valor teórico da localização da falta e o valor estimado foram muito pequenas para os casos de $D = 0,2$ pu e $D = 0,5$ pu, de modo que são apresentados apenas os casos mais relevantes nas Tabelas 4 e 5. Os benefícios da correção das correntes capacitivas foram mais evidentes no caso de $L = 500$ km e $D = 0,8$ pu com redução do erro percentual em todos os casos. Destaca-se que, para carregamentos mais baixos, ou seja, para menores

valores de α , o efeito capacitivo da LT predomina, resultando em erros mais significativos das localizações estimadas. Entretanto, com a correção das correntes capacitivas, esses erros são reduzidos sobremaneira, de forma que não ultrapassaram, nos testes realizados, a ordem de 2%.

5.2 Sistema de 500 kV

Os resultados obtidos durante as análises do sistema de 500 kV são apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Nesse sistema, foram verificados desempenhos dos métodos semelhantes àqueles verificados nas simulações envolvendo o sistema de 230 kV. No entanto, para o Método 1 e falta ABT, os erros percentuais para $D = 0,2$ pu e $D = 0,8$ pu foram maiores, tanto para a versão original quanto para a corrigida. Isso se deve ao fato do sistema possuir uma maior tensão nominal, o que resulta em correntes capacitivas mais relevantes.

Ainda com relação à falta ABT, ao aplicar a correção da corrente capacitiva, novamente, observa-se uma diminuição considerável do erro do Método 1 para a versão modificada. Por outro lado, para o caso AT, um desempenho semelhante   observado, como também discutido para o sistema de 230 kV.

Com relação ao Método 2, novamente, as diferenças para o valores de $D = 0,2$ pu e $D = 0,5$ pu não foram significativas. Mesmo para $D = 0,8$ pu, ambas as versões apresentam desempenhos próximos. Porém ainda se verifica o melhor desempenho para o método corrigido, o qual considera a correção das correntes capacitivas. Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados para $D = 0,8$ pu com $L = 200$ km e $L = 500$ km, respectivamente.

Cabe destacar que, por se basear em componentes de seqüência positiva e negativa, sendo esta última intrinsecamente menos afetada pelas correntes capacitivas, o Método 2 pode apresentar em alguns casos uma melhora de desempenho menos significativa com as modificações sugeridas. Ainda assim, pode-se dizer que   perceptível que as correntes capacitivas exercem tipicamente maior influência em casos de faltas próximas aos terminais da linha, como verificado para $D=0,8$ pu no sistema simulado.

5.3 Análise Geral dos Resultados

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que, para o tipo de falta ABT e para o SIR avaliado, o efeito capacitivo de LTs tem influência direta no desempenho de métodos de localização de faltas. Nota-se também que, quão maiores o comprimento das LTs e a tensão nominal do sistema, maior será o efeito capacitivo, resultando em maiores desvios nas localizações de falta devido às correntes capacitivas não contempladas por algoritmos originalmente desenvolvidos considerando o modelo de linha curta. No caso AT, mesmo a

diferença não sendo tão significativa, observa-se que a correção do efeito capacitivo também levou à resultados próximos dos teóricos. Vale ressaltar que, para outros valores de SIR, a influência do efeito capacitivo pode se tornar mais crítico.

Deve-se destacar que, na literatura, existem soluções baseadas no modelo de LT longa que contemplam o efeito capacitivo dos condutores. A princípio, poderia se pensar que a proposta de novas formas de correção da corrente capacitiva seria desnecessária, visto que outras soluções intrinsecamente robustas a este problema já existem. Porém, algumas dessas técnicas são mais sensíveis a erros de sincronismo e nos parâmetros da LT do que alguns algoritmos baseados no modelo de linha curta (Lopes et al., 2013), o que torna atrativa a utilização de soluções que viabilizem o aproveitamento dessas vantagens, sem comprometer a precisão das localizações de falta estimadas.

Do exposto, conclui-se que a solução avaliada neste trabalho pode ser de grande utilidade durante procedimentos de localização de faltas em sistemas de transmissão. De fato, a solução requer cálculos simples, os quais dependem apenas dos parâmetros de admitância *shunt* do sistema e de medições de tensão, viabilizando localizações mais precisas sem aumentos relevantes na complexidade dos algoritmos propostos originalmente considerando o modelo de linha curta.

Tabela 6: Desempenho do Método 1 original - LT 500 kV

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,2	-5	0,2	0,19	0,305	0,715
		-20	0,2	0,19	0,305	0,69
		-45	0,2	0,19	0,305	0,615
	0,5	-5	0,5	0,5	0	0,015
		-20	0,5	0,5	0	0,02
		-45	0,5	0,5	0,005	0,035
	0,8	-5	0,8	0,81	0,305	0,76
		-20	0,8	0,81	0,31	0,765
		-45	0,8	0,81	0,32	0,735
	0,2	-5	0,22	0,14	2,206	5,858
		-20	0,22	0,15	2,182	5,246
		-45	0,22	0,16	2,162	3,892
500	0,5	-5	0,5	0,5	0,002	0,158
		-20	0,5	0,5	0,014	0,316
		-45	0,5	0,51	0,244	0,626
	0,8	-5	0,78	0,87	2,17	6,842
		-20	0,78	0,87	2,17	6,976
		-45	0,78	0,87	2,248	6,794

Tabela 7: Desempenho do Método 1 modificado - LT 500 kV

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,2	-5	0,2	0,2	0,365	0,02
		-20	0,2	0,2	0,365	0,04
		-45	0,2	0,2	0,365	0,105
	0,5	-5	0,5	0,5	0	0,025
		-20	0,5	0,5	0,005	0,045
		-45	0,5	0,5	0,01	0,07
	0,8	-5	0,8	0,8	0,365	0,02
		-20	0,8	0,8	0,365	0,02
		-45	0,8	0,8	0,35	0
	0,2	-5	0,22	0,2	2,41	0,268
		-20	0,22	0,2	2,428	0,398
		-45	0,22	0,19	2,434	0,754
500	0,5	-5	0,5	0,5	0,008	0,164
		-20	0,5	0,5	0,02	0,256
		-45	0,5	0,5	0,072	0,406
	0,8	-5	0,78	0,8	2,356	0,044
		-20	0,78	0,8	2,356	0,038
		-45	0,78	0,8	2,288	0,192

Tabela 8: Desempenho do Método 2 original - LT 500 kV
(D = 0,8 pu)

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,8	-5	0,79	0,79	1,49	0,745
		-20	0,8	0,745	0,47	0,235
		-45	0,8	0,79	0,235	0,23
500	0,8	-5	0,78	0,75	1,59	5,118
		-20	0,78	0,78	1,59	1,588
		-45	0,78	0,79	1,322	1,32

Tabela 9: Desempenho do Método 2 modificado - LT 500 kV
(D = 0,8 pu)

L (km)	D (pu)	α	$D_{est-AT}(pu)$	$D_{est-ABT}(pu)$	$e\%_{AT}$	$e\%_{ABT}$
200	0,8	-5	0,8	0,8	0,11	0,11
		-20	0,8	0,8	0,11	0,105
		-45	0,8	0,8	0,11	0,105
500	0,8	-5	0,79	0,79	0,692	0,782
		-20	0,79	0,79	0,692	0,688
		-45	0,79	0,79	0,69	0,688

6 Conclusões

Apresentou-se neste trabalho a análise dos benefícios da remoção do efeito capacitivo de linhas de transmissão em procedimentos de localização de faltas baseados em dois terminais. Para tanto, foram avaliadas duas técnicas desenvolvidas originalmente considerando o modelo de linha curta para localizar faltas AT e ABT em sistemas de 230 kV e 500 kV.

Em uma primeira etapa, os algoritmos de localização de faltas foram aplicados considerando suas versões originais, ou seja, sem incluir o efeito capacitivo da linha em suas formulações. Em seguida, uma estratégia de correção de correntes capacitivas foi aplicada, evidenciando melhorias nas localizações estimadas.

A solução para correção de correntes capacitivas se mostrou mais eficiente para o Método 1, o qual se baseia em grandezas de fase. É importante salientar que a inclusão das correntes capacitivas no processo de localização de faltas também se mostrou adequada com relação ao Método 2, o qual se baseia na análise de grandezas de sequência, porém apresentando uma menor diferença entre os resultados estimados e os esperados teoricamente, se comparado com o Método 1. No entanto, cabe ressaltar que a versão corrigida deste método apresentou melhor desempenho.

As melhorias no desempenho dos métodos foram mais relevantes em casos nos quais um maior comprimento da linha foi considerado. Neste contexto, pode-se dizer que esses resultados eram esperados, pois o efeito capacitivo de linhas   maior quando se aumenta o comprimento dos condutores ou a tensão nominal do sistema. Dessa forma, conclui-se que o processo de correção das correntes capacitivas apresentado neste trabalho   útil para procedimentos de localização de faltas em linhas muito longas e/ou com maior tensão, viabilizando o uso de técnicas mais simples, sem comprometer a precisão na identificação do ponto de falta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAP-DF pelo apoio financeiro concedido para realização deste trabalho e à Universidade de Brasília.

Referências

- Girgis, A. A., Hart, D. G. and Peterson, W. L. (1992). A new fault location technique for two- and three-terminal lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**(1): 98–107.
- Gopalakrishnan, A., Kezunovic, M., McKenna, S. M. and Hamai, D. M. (2000). Fault location using the distributed parameter transmission line model.
- Hart, D. G., Novosel, D. and Smith, R. A. (2000). *Modified Cosine Filters*, u. s. patent 6154687 edn.
- Lopes, F. V., Melo, Y. M. P., Fernandes Jr., D. and Neves, W. L. A. (2013). Real-time evaluation of pmu-based fault locators, *International Conference on Power Systems Transients*.
- M.M.Saha, Izykowsky, J. and E.Rosolowski (2010). *Fault Location on Power Networks*, Springer.
- Stringfield, T. W., Marihart, D. J. and Stevens, R. F. (1957). Fault location methods for overhead lines, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* **76**(3): 518–529.
- 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 Power Engineering Review* **PER-2**(8): 59–60.
- T.P.Hinge and S.S.Dambhare (2015). Secure phase comparison schemes for transmission-line protection using synchrophasors, *IEEE Transactions on Power Delivery* **30**(4).
- Tziouvaras, D. A., Roberts, J. B. and Benmouyal, G. (2001). New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines, *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEEE)*, pp. 395–398.
- Z.M.Radojevic, C.H.Kim, M.Popov, G.Preston and V.Terzija (2009). New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters, *Power Systems Transients, International Conference on (IPST2009)*.