

PREVENÇÃO DE FALSAS OPERAÇÕES DE RELÉS DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO LONGAS PARALELAS

MARCOS R. ARAÚJO^{1,2}

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil*

²*Unidade Acadêmica 1, Universidade Federal de Itajubá — Campus de Itabira
Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Distrito Industrial II, 35903-087, Itabira, MG, Brasil
E-mail: marcosraraujo@hotmail.com*

CLEVER PEREIRA

*Departamento de Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: clever@ufmg.br*

Abstract— This paper presents an evaluation of the applicability of an approach to avoiding false operations of distance relays in long parallel transmission lines. Using conventional and unconventional distance relaying algorithms, the performance of the healthy line relay have been evaluated for single-line-to-ground faults simulated along the whole faulty line length. The benefit of disabling the zero-sequence mutual coupling compensation in an adaptive distance protection scheme was discussed. It is shown that, independently of fault resistance, the use of the ratio between the magnitudes of the healthy and faulty lines zero-sequence currents is viable as a criterion in long parallel transmission lines.

Keywords— Distance relaying algorithm, false operations, graphs, long parallel transmission lines.

Resumo— Este artigo apresenta uma avaliação da aplicabilidade de uma abordagem de prevenção de falsas operações de relés de distância em linhas de transmissão longas paralelas. Utilizando algoritmos de proteção de distância convencionais e não convencionais, o desempenho do relé da linha sã foi avaliado para faltas monofásicas-terra simuladas ao longo de toda a extensão da linha faltosa. O benefício em se desativar a compensação de acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema de proteção de distância adaptativo foi discutido. Mostrou-se que, independentemente da resistência de falta, a utilização da razão entre as magnitudes das correntes de sequência zero das linhas sã e faltosa é viável como critério em linhas de transmissão longas paralelas.

Palavras-chave— Algoritmo de proteção de distância, falsas operações, grafos, linhas de transmissão longas paralelas.

1 Introdução

A proteção de distância convencional é baseada em um modelo de linha de transmissão (LT) a parâmetros concentrados, no qual os efeitos capacitivo e de propagação são desprezados. Trata-se de uma aproximação pertinente para LTs curtas, contudo, pode acarretar erros expressivos no cálculo de impedâncias aparentes para faltas a longas distâncias. Diante disso, Xu et al. (2008) sugeriram uma formulação baseada em um modelo de LT a parâmetros distribuídos para a proteção de distância, a qual é aplicável a LTs longas de circuito simples.

O acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas ou de circuito duplo pode acarretar tanto subalcances quanto sobrealcances do relé de distância (Wheeler, 1970). Um esquema de proteção de distância adaptativo em que o efeito do acoplamento mútuo é compensado foi proposto por Hu et al. (2002). Neste, a razão entre as correntes de sequência zero das LTs paralelas é utilizada para evitar possíveis falsas operações do relé da LT sã. Todavia, tal algoritmo foi derivado do modelo impedância nominal série, adequado para LTs curtas apenas.

A influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas de pouco mais de meio

comprimento de onda no desempenho do algoritmo de proteção de distância proposto por Xu et al. (2008) foi analisada por Araújo (2016), tendo sido constatados desvios significativos entre as impedâncias aparentes e as impedâncias de sequência positiva dos trechos sob falta, além de falsas operações do relé da LT sã. Um algoritmo de proteção de distância não iterativo para a detecção de faltas monofásicas-terra em LTs longas paralelas simétricas e perfeitamente transpostas foi proposto por Araújo e Pereira (2017). Tal algoritmo considera plenamente os efeitos capacitivo, de propagação e mútuo de sequência zero entre as LTs.

O objetivo deste artigo é avaliar a aplicabilidade em LTs longas paralelas da abordagem de prevenção de falsas operações de relés de distância sugerida por Hu et al. (2002). Para tal, o desempenho do relé da LT sã utilizando o algoritmo proposto por Araújo e Pereira (2017) é verificado frente a faltas monofásicas-terra aplicadas ao longo de toda a extensão da LT faltosa.

Este artigo está organizado em cinco seções. A Seção 2 detalha a modelagem do sistema considerado nas simulações. A Seção 3 apresenta a metodologia de análise empregada. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção 4. A Seção 5 conclui este artigo.

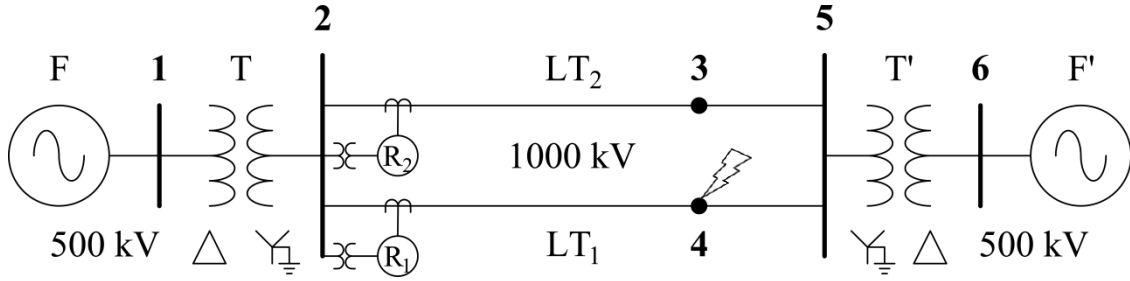


Figura 1. Diagrama unifilar

2 Modelagem do Sistema

A Figura 1 exibe o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência modelado. São consideradas LTs paralelas trifásicas, em corrente alternada, com extensão total (ℓ) de 800 km. Elas são simétricas, perfeitamente transpostas e operam em regime permanente senoidal de 60 Hz. A Tabela 1 detalha os parâmetros do sistema. Os parâmetros das LTs foram baseados em Araújo e Pereira (2017) e Dias et al. (2011). Foram adotados parâmetros típicos de transformadores para os bancos T e T' (Dias et al., 2011). Dados típicos de impedâncias equivalentes de fontes fortes e médias foram usados respectivamente para as fontes F e F' (Chen e Maun, 1997). Assume-se que todo o sistema é equilibrado, possuindo apenas tensões e correntes simétricas de sequência positiva de fases. Os diagramas de impedância sequenciais correspondentes ao sistema admitido neste artigo são ilustrados na Figura 2.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema.

Linhas de Transmissão			
Parâmetro	Sequência Positiva	Sequência Zero	Mútua de Sequência Zero
R (Ω/km)	0,005470	0,344287	0,320364
L (mH/km)	0,453197	3,175137	1,491470
C ($\mu\text{F}/\text{km}$)	0,025823	0,009658	-0,000323
Transformadores			
Reatância (%)	Tensão (kV)	Potência (MVA)	
13,4	500/1000	10x2000	
Impedâncias Equivalentes das Fontes			
Fonte	Sequência Positiva (Ω)	Sequência Zero (Ω)	
F	0,0794 + j4,5493	0,2382 + j6,8208	
F'	0,8930 + j17,039	1,7835 + j16,969	

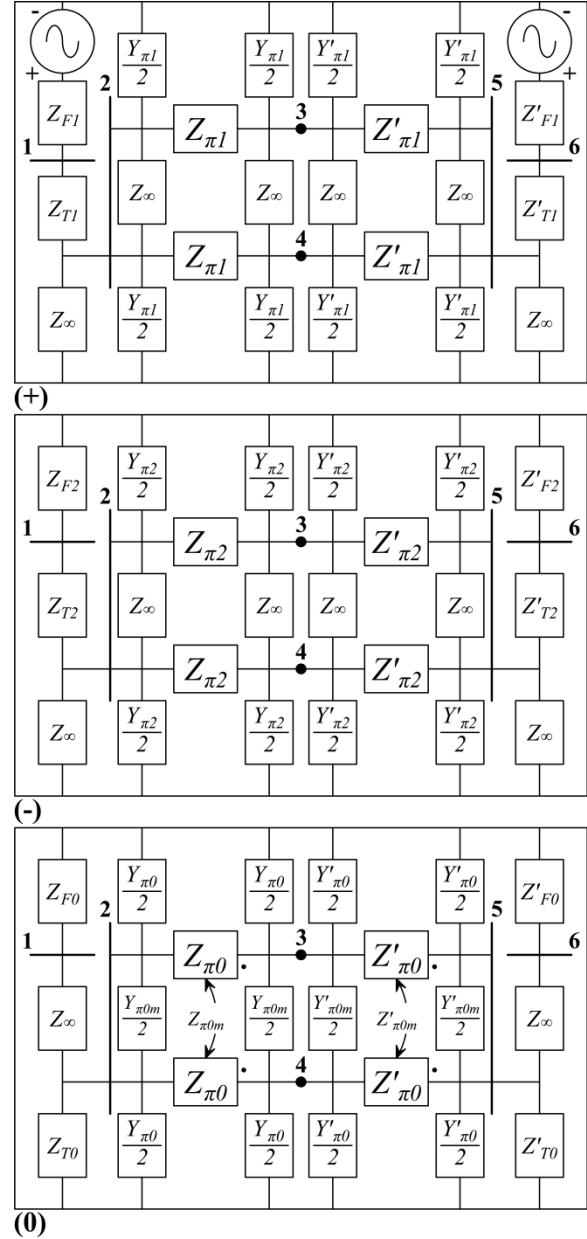


Figura 2. Diagramas de impedância sequenciais

A impedância série equivalente e a admitância transversal equivalente de sequência positiva e negativa foram obtidas de acordo com:

$$Z_{\pi i} = Z_{C1} \sinh(\gamma_1 \ell) \quad (1)$$

$$\frac{Y_{\pi i}}{2} = Y_{C1} \tanh\left(\frac{\gamma_1 \ell}{2}\right) \quad (2)$$

nas quais i é o índice da componente simétrica ($i = 1, 2$ respectivamente para as sequências positiva e negativa), Z_C é a impedância característica, Y_C é a admitância característica e γ é a constante de propagação (Glover, Sarma e Overbye, 2012).

Os parâmetros equivalentes de sequência zero impedância série, impedância mútua, admitância transversal e admitância mútua são descritos por:

$$Z_{\pi 0} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} \ell) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} \ell)}{2} \quad (3)$$

$$Z_{\pi 0m} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} \ell) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} \ell)}{2} \quad (4)$$

$$\frac{Y_{\pi 0}}{2} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m2} \ell}{2}\right)}{Z_{Cm2}} \quad (5)$$

$$\frac{Y_{\pi 0m}}{2} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m1} \ell}{2}\right)}{2Z_{Cm1}} - \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m2} \ell}{2}\right)}{2Z_{Cm2}} \quad (6)$$

em que

$$\gamma_{m1} = \sqrt{(Z_0 - Z_{0m})(Y_0 + 2Y_{0m})} \quad (7)$$

$$\gamma_{m2} = \sqrt{(Z_0 + Z_{0m})Y_0} \quad (8)$$

$$Z_{Cm1} = \sqrt{\frac{Z_0 - Z_{0m}}{Y_0 + 2Y_{0m}}} \quad (9)$$

$$Z_{Cm2} = \sqrt{\frac{Z_0 + Z_{0m}}{Y_0}} \quad (10)$$

sendo Z_0 a impedância longitudinal unitária de sequência zero, Z_{0m} a impedância mútua longitudinal unitária de sequência zero, Y_0 a admitância transversal unitária de sequência zero e Y_{0m} a admitância mútua transversal unitária de sequência zero (Kang e Liao, 2012).

3 Metodologia de Análise

As fontes de tensão foram ajustadas de forma que a tensão pré-falta no extremo emissor das LTs (barra 2) fosse igual a 1 pu com ângulo 0° e o carregamento pré-falta de cada LT fosse igual à sua potência natural. Os módulos e ângulos das tensões

ajustadas para as fontes F e F' são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Ajuste das Fontes de Tensão.

Fonte	Módulo (pu)	Ângulo (°)
F	1,0155	9,6272
F'	1,0347	-79,8910

Faltas fase A-terra (AT) deslizantes foram simuladas ao longo de toda a extensão da LT₁, com passo de um ponto percentual de ℓ , tendo sido aplicadas na barra 4. Os cálculos dos curtos-circuitos foram realizados no software MATLAB utilizando componentes simétricas e a teoria de grafos (Pereira, 2015). Os relés das linhas faltosa (LT₁) e sã (LT₂) são admitidos na barra 2 no sentido das barras 4 e 3, de modo respectivo — de acordo com a Figura 1. As análises foram realizadas em regime permanente, não tendo sido considerados os erros relativos à estimação de fasores e a transformadores para instrumentos.

Unidades de medição quadrilaterais foram adotadas para os relés (Siemens, 2011). Definiu-se um alcance de 85% da impedância de sequência positiva da LT (Z_L) para a impedância réplica do trecho protegido (Z_N). A Tabela 3 expõe as tensões e correntes de entrada para as três unidades de detecção de falta para a terra de relés de distância convencionais adequados para LTs curtas de circuito simples e paralelas ou de circuito duplo (Hu et al., 2002). O subscrito S indica grandezas da LT sã.

Tabela 3. Grandezas de Entrada para Unidades de Detecção de Falta para a Terra em LTs Curtas.

Tipo	Unidade	V_R	I_R
Circuito Simples	AT	V_a	$I_a + kI_0$
	BT	V_b	$I_b + kI_0$
	CT	V_c	$I_c + kI_0$
Circuito Duplo	AT	V_a	$I_a + kI_0 + k_m I_{0S}$
	BT	V_b	$I_b + kI_0 + k_m I_{0S}$
	CT	V_c	$I_c + kI_0 + k_m I_{0S}$

O fator de compensação de sequência zero (k) e o fator de compensação de acoplamento mútuo de sequência zero (k_m) são dados por:

$$k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (11)$$

$$k_m = \frac{Z_{0m}}{Z_1} \quad (12)$$

A impedância aparente vista pelos relés de distância convencionais é do tipo:

$$Z_{RC} = \frac{V_R}{I_R} = xZ_1 \quad (13)$$

na qual x é a distância entre o relé e o ponto de falta. A Tabela 4 exibe as grandezas de entrada para as unidades de terra de relés de distância não convencionais adequados para LTs longas de circuito simples, as quais foram sugeridas por Xu et al (2008), e paralelas ou de circuito duplo, propostas por Araújo e Pereira (2015).

Tabela 4. Grandezas de Entrada para Unidades de Detecção de Falta para a Terra em LTs Longas.

Tipo	Unidade	V_R	I_R
Circuito Simples	AT	$V_a + k_V V_0$	$I_a + k_I I_0$
	BT	$V_b + k_V V_0$	$I_b + k_I I_0$
	CT	$V_c + k_V V_0$	$I_c + k_I I_0$
Circuito Duplo	AT	$V_a + k_{Vp} V_0$	$I_a + k_{Ip} I_0 + k_{ml} I_{0S}$
	BT	$V_b + k_{Vp} V_0$	$I_b + k_{Ip} I_0 + k_{ml} I_{0S}$
	CT	$V_c + k_{Vp} V_0$	$I_c + k_{Ip} I_0 + k_{ml} I_{0S}$

Os parâmetros de compensação de sequência zero k_V , k_I , k_{Vp} , k_{Ip} , e k_{ml} são definidos por:

$$k_V = \frac{\cosh(\gamma_0 x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (14)$$

$$k_I = \frac{Z_{C0} \sinh(\gamma_0 x) - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)}{Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} \quad (15)$$

$$k_{Vp} = \frac{\cosh(\gamma_{m2} x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (16)$$

$$k_{Ip} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} - 1 \quad (17)$$

$$k_{ml} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} \quad (18)$$

A impedância aparente vista pelos relés de distância não convencionais é do tipo:

$$Z_{RNC} = \frac{Z_1}{\gamma_1} \tanh^{-1} \left(\frac{V_R}{I_R Z_{C1}} \right) = x Z_1 \quad (19)$$

4 Resultados e Análises

Curtos-circuitos AT francos foram aplicados ao longo de toda a extensão da LT₁. A Figura 3 apresenta as impedâncias aparentes vistas pela unidade de detecção de falta AT do relé da LT faltosa (R_f) considerando os algoritmos de proteção adequados para LTs paralelas: convencional (Z_{RC}), não convencional com parâmetros de compensação exatos (Z_{RNC}), assumindo um conhecimento prévio dos locais dos defeitos, e não convencional com parâmetros de

compensação constantes (Z_{RNCk}), calculados considerando uma distância até o ponto de falta igual a 85% de ℓ . O subscrito p evidencia adequabilidade para LTs paralelas. As impedâncias aparentes são representadas por marcadores específicos, os quais são interligados por linhas com o propósito de explicitar a sequência de eventos. O círculo, o triângulo e o quadrado indicam curtos-circuitos aplicados no extremo emissor, no limite do alcance da zona 1 e no extremo receptor da LT, de modo respectivo. Destarte, o marcador que representa a impedância aparente vista para uma falta aplicada na barra 2 está circundado por um círculo, assim como aqueles que representam impedâncias aparentes vistas para defeitos aplicados na barra 4 a 85% de ℓ a partir do extremo emissor e na barra 5 estão circundados por um triângulo e por um quadrado, de modo respectivo.

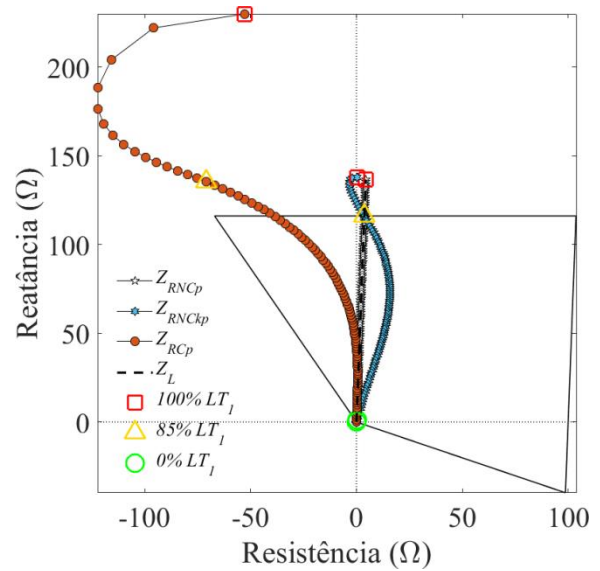


Figura 3. Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT do relé da LT faltosa considerando algoritmos adequados para LTs paralelas.

Verifica-se que, utilizando o algoritmo convencional, o relé subalcança o trecho posterior a 75% do comprimento total a partir do extremo emissor da LT. Fazendo uso do algoritmo não convencional com parâmetros de compensação exatos, uma equivalência plena entre as impedâncias aparentes e as impedâncias de sequência positiva dos trechos defeituosos (xZ_1) é obtida. Já com parâmetros de compensação constantes, desvios não significativos entre Z_{RNCkp} e xZ_1 são observados, contudo, o relé desempenha satisfatoriamente em todos os casos simulados. Nota-se um erro nulo quando de falta aplicada no limite do alcance da zona 1 da proteção de distância (85% da extensão total da LT), o que se deve ao fato de esta ter sido a distância admitida para o cálculo dos parâmetros de compensação de sequência zero constantes utilizados no relé. Ainda considerando os mesmos casos de curto-circuito e algoritmos de proteção, na Figura 4 são mostradas as impedâncias aparentes vistas pela unidade AT do relé da LT sã (R_2).

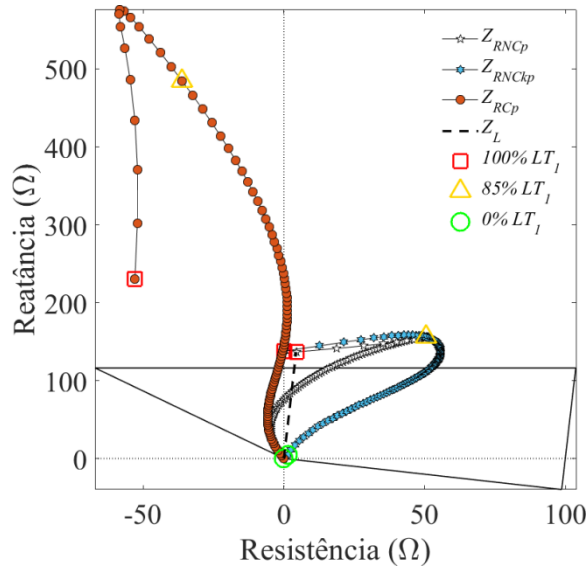


Figura 4. Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT do relé da LT considerando algoritmos adequados para LTs paralelas.

Pode-se constatar, tendo em conta as impedâncias aparentes que são vistas dentro da característica de operação, que o relé da LT se operaria simultaneamente para defeitos aplicados ao longo de trechos de até 38%, 48% e 46% de ℓ a partir do extremo emissor da LT faltosa considerando respectivamente os algoritmos: convencional, não convencional com parâmetros de compensação exatos e não convencional com parâmetros de compensação constantes. Tais falsas operações são atribuídas por Hu et al. (2002) à compensação do acoplamento mútuo de sequência zero no cálculo da impedância de sequência positiva do trecho sob falta, que é realizada com o uso da corrente de sequência zero da LT paralela. A fim de investigar a validade de tal premissa em LTs longas paralelas, na Figura 5 são exibidas as impedâncias aparentes vistas pela unidade AT do relé da LT para os mesmos casos de curto-circuito considerando algoritmos aplicáveis a LTs de circuito simples.

Da mesma forma que na análise a priori, percebe-se que falsas operações do relé da LT ocorreriam para curtos-circuitos aplicados a partir do extremo emissor da LT faltosa ao longo de trechos de até 2% de ℓ considerando o algoritmo convencional, de 0% a 2% e de 5% a 8% de ℓ admitindo o algoritmo não convencional com parâmetros de compensação exatos e em aproximadamente 1% de ℓ considerando o algoritmo não convencional com parâmetros de compensação constantes. Contudo, tais resultados são expressivamente melhores do que aqueles verificados na Figura 4.

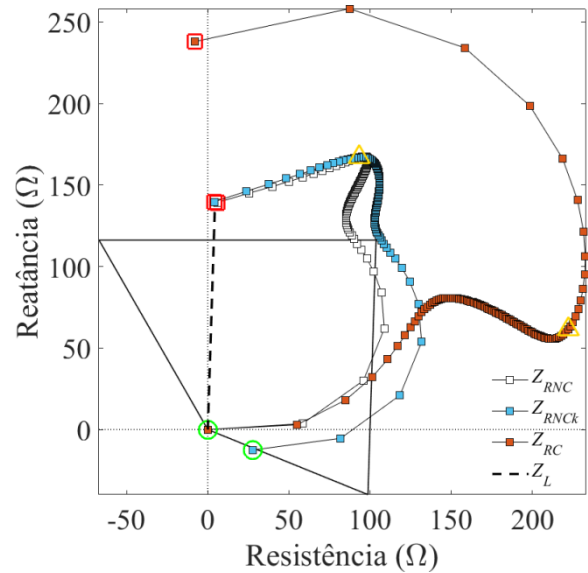


Figura 5. Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT do relé da LT considerando algoritmos adequados para LTs de circuito simples.

Hu et al. (2002) propuseram a utilização de um critério baseado na razão entre o módulo da corrente de sequência zero da LT se e o módulo da corrente de sequência zero da LT faltosa para desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema de proteção de distância adaptativo. Como o módulo da corrente de sequência zero é sempre maior na LT faltosa, exceto para faltas no extremo receptor ou além deste, tal razão seria sempre menor que 1 quando de casos em que a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero é devida. A Figura 6 apresenta as razões entre os módulos das correntes de sequência zero das LTs paralelas para faltas AT francas aplicadas ao longo de toda a extensão da LT₁.

Ao analisar a Figura 6, atesta-se que as razões entre as magnitudes de I_{0s} e I_0 são sempre menores que 1 para curtos-circuitos AT francos ao longo de todo o comprimento da LT faltosa, ao passo que as razões entre os módulos de I_0 e I_{0s} são sempre maiores que 1. Com o propósito de avaliar a validade de tal premissa para defeitos com resistência de falta (R_F) não nula, faltas AT deslizantes foram simuladas com R_F variando de 1 Ω a 200 Ω , com passo de 1 Ω . Os resultados obtidos foram idênticos aos observados na Figura 6. Portanto, o critério proposto por Hu et al. (2002) é insensível à R_F e adequado para LTs longas paralelas.

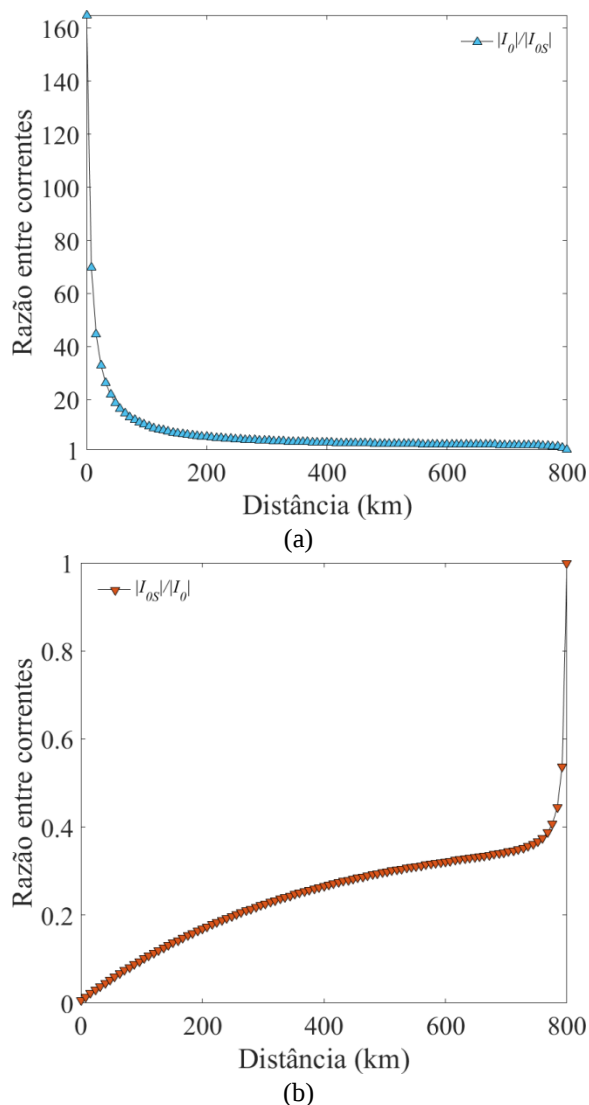


Figura 6. Razão entre os módulos das correntes de sequência zero das LTs paralelas

5 Conclusão

Neste artigo foi avaliada a aplicabilidade de uma abordagem de prevenção de falsas operações de relés de distância em LTs longas paralelas. Para o relé da LT faltosa, a proteção de distância não convencional com compensação de acoplamento mútuo de sequência zero e parâmetros de compensação constantes apresentou resultados satisfatórios e significativamente melhores do que aqueles obtidos com a proteção de distância convencional aplicável a LTs paralelas. Constatou-se que o relé da LT sã operaria simultaneamente para faltas aplicadas ao longo de trechos expressivos da LT faltosa. Utilizando algoritmos adequados para LTs curtas, nos quais não há compensação do acoplamento mútuo de sequência zero, tais falsas operações foram minimizadas. A utilização da razão entre a magnitude da corrente de sequência zero da LT sã e a magnitude da corrente de sequência zero da LT faltosa se provou viável como critério para se desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema

de proteção de distância adaptativo e insensível à variação da resistência de falta.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES — Brasil.

Referências Bibliográficas

- Araújo, M. R. (2016). Proteção de Distância Não Convencional em Linhas de Transmissão Paralelas de Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda. In: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Natal, pp. 1-6.
- Araújo, M. R. e Pereira, C. (2017). A Practical First-Zone Distance Relaying Algorithm for Long Parallel Transmission Lines. *Electric Power Systems Research* (Print), Vol. 146, pp. 17-24.
- Chen, Z. e Maun, J. (1997). Neural Network Based Real-Time Fault Location Technique for Transmission Line. In: *Industrial And Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 10. Atlanta: Gordon and Breach Science Publishers, pp. 341-344.
- Dias, R., Lima, A., Portela, C. e Aredes, M. (2011). Extra Long-Distance Bulk Power Transmission. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3, pp. 1440-1448.
- Glover, J. D., Sarma, M. S. e Overbye, T. J. (2012). *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning, Stamford, CT.
- Hu, Y., Novosel, D., Saha, M. M. e Leitloff, V. (2002). An Adaptive Scheme for Parallel-Line Distance Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, pp. 105-110.
- Kang, N. e Liao, Y. (2012). Equivalent PI Circuit for Zero-Sequence Double Circuit Transmission Lines. In: *Power and Energy Society General Meeting*. San Diego, CA, pp. 1-6.
- Pereira, C. (2015). *Redes Elétricas no Domínio da Frequência: Técnicas de Análise, Modelos de Componentes, Técnicas Computacionais*, Artliber, São Paulo-SP.
- SIPROTEC: distance protection 7SA6 (2011). Siemens, Nürnberg.
- Wheeler, S. A. (1970). Influence of Mutual Coupling Between Parallel Circuits on the Setting of Distance Protection. *Proc. IEE*, Vol. 117, No. 2, pp. 439-445.
- Xu, Z. Y., Huang, S. F., Ran, Li, Liu, J. F., Qin, Y. L., Yang, Q. X. e He, J. L. (2008). A Distance Protection Relay for a 1000-kV UHV Transmission Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, pp. 1795-1804.