

Abordagem de Prevenção de Falsas Operações de Relés de Distância em Linhas de Transmissão Longas Paralelas Equilibradas

Marcos R. Araújo*. Clever Pereira**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica — Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil (e-mail: marcosraraujo@hotmail.com).

** 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 work presents an analysis of the applicability of a strategy to avoiding false operations of distance relays in long parallel transmission lines. Disabling zero-sequence mutual coupling compensation proved effective with the unconventional algorithms, especially when strong sources were involved. It has been shown that reducing the resistive reach of the operating characteristic in adaptive scheme can improve the results obtained.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise da aplicabilidade de uma estratégia de prevenção de falsas operações de relés de distância em linhas de transmissão longas paralelas. O ato de desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero se mostrou efetivo com os algoritmos não convencionais, principalmente quando fontes fortes foram envolvidas. Mostrou-se que uma redução do alcance resistivo da característica de operação em um esquema adaptativo pode aprimorar os resultados obtidos.

Keywords: mutual coupling, protection algorithm; false operation; long parallel transmission lines; fault resistance.

Palavras-chaves: acoplamento mútuo, algoritmo de proteção; falsa operação; linhas de transmissão longas paralelas; resistência de falta.

1. INTRODUÇÃO

A proteção de distância convencional é derivada do modelo de linha de transmissão (LT) impedância nominal série, adequado para LTs curtas apenas. Com o propósito de aplicar a proteção de distância em uma LT longa, Xu et al. (2008) propôs novas grandezas de entrada para as unidades de detecção de falta, baseando-se no modelo π equivalente. Partindo do algoritmo proposto por Xu et al. (2008), Araújo e Pereira (2017) deduziram novas grandezas de entrada para as unidades de detecção de faltas para a terra, compensando também o acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs longas paralelas. Embora a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero aprimore de modo expressivo a sensibilidade do relé da LT faltosa, minimizando possíveis subalcances ou sobrealcances, conforme demonstrado por Wheeler (1970), ela pode acarretar falsas operações do relé da linha sã — comprometendo a seletividade da proteção de distância. Hu et al. (2002) sugeriram a utilização de um critério baseado na razão entre os módulos das correntes de sequência zero das LTs sã e faltosa para desabilitar tal compensação em um esquema de proteção de distância adaptativo. Como o módulo da corrente de sequência zero é sempre maior na LT faltosa, exceto para defeitos 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 fosse devida. Apesar disso, foram

adotados em tal esquema os algoritmos de proteção de distância convencionais, aplicáveis a linhas curtas apenas, tendo o sistema teste sido constituído de duas LTs paralelas de 400 kV com 60 km de extensão total. Quanto a linhas longas, em Araújo (2016) foi realizada uma avaliação da influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas de pouco mais de meio comprimento de onda (190° elétricos) no desempenho do algoritmo de proteção proposto por Xu et al. (2008), o qual é adequado para LTs longas de circuito simples. Constataram-se, então, desvios significativos entre as impedâncias aparentes e de sequência positiva dos trechos sob falta, ademais de falsas operações do relé da linha sã para faltas aplicadas ao longo de trechos muito expressivos da LT faltosa. Uma vez que em Araújo e Pereira (2017) foi proposto um algoritmo de proteção apropriado para LTs longas paralelas, em Araújo e Pereira (2018) foi verificada pelo mesmo autor desta tese a aplicabilidade em tais linhas da abordagem de prevenção de falsas operações apresentada por Hu et al. (2002), porém admitindo os algoritmos de proteção não convencionais. Em tal trabalho, utilizaram-se impedâncias equivalentes típicas de fontes fortes para os dois terminais — baseadas em fontes fortes e médias. O objetivo deste trabalho é expandir a avaliação de Araújo e Pereira (2018), sendo agora assumidas para as fontes combinações de impedâncias equivalentes de fontes fortes, médias e fracas.

Este artigo está organizado em quatro seções. A Seção 2 descreve a metodologia de simulação. A Seção 3 apresenta e discute os resultados obtidos. A Seção 4 conclui este artigo.

2. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

A Fig. 1 exibe o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência modelado. A modelagem empregada está em plena concordância com aquela descrita em Araújo e Pereira (2017) e Araújo e Pereira (2018). As LTs 1 e 2 possuem 800 km de extensão total. Bancos de 10 transformadores de 2000 MVA cada, com reatância de sequência positiva de 13,4%, foram admitidos para T e T' (DIAS et al., 2011). Dados típicos de impedâncias equivalentes de fontes fortes, médias e fracas, os quais são especificados na Tabela 1, foram usados oportunamente para F e F', tendo sido calculados conforme Chen e Maun (2000).

O cálculo dos curtos-circuitos foi realizado no software MATLAB utilizando a teoria de grafos e componentes simétricas, como detalhado em Pereira (2015). As fontes de tensão foram ajustadas de forma que a tensão pré-falta no extremo emissor (barra 2) fosse igual a 1 pu com ângulo 0° e o carregamento pré-falta de cada LT fosse igual à sua potência natural.

Uma unidade de medição quadrilateral baseada em um relé comercial foi adotada para os relés R1 e R2 — ver Fig. 1 (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).

Os algoritmos de proteção convencionais e não convencionais são descritos na Tabela 2.

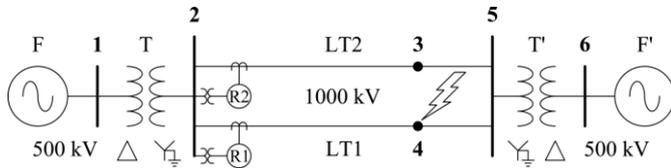


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema modelado

Tabela 1. Impedâncias equivalentes das fontes

Tipo	Sequência positiva (Ω)	Sequência zero (Ω)
Forte	0,079408 + j4,5493	0,23819 + j6,8208
Média	0,89298 + j17,039	1,7835 + j16,969
Fraca	4,957 + j56,659	19,752 + j112,02

Tabela 2. Grandezas de entrada para unidades de detecção de faltas para a terra

Tipo	Circuito	V_R	I_R
Convencional	Simplex	V_a	$I_a + kI_0$
	Duplo	V_a	$I_a + kI_0 + k_m I_{0S}$
Não convencional	Simplex	$V_a + k_V V_0$	$I_a + k_I I_0$
	Duplo	$V_a + k_{VP} V_0$	$I_a + k_{IP} I_0 + k_{mI} I_{0S}$

Os fatores e parâmetros de compensação de sequência zero k , k_m , k_V , k_I , k_{VP} , k_{IP} , e k_{mI} são do tipo:

$$k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \quad (1)$$

$$k_m = \frac{Z_{0m}}{Z_1} \quad (2)$$

$$k_V = \frac{\cosh(\gamma_0 x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (3)$$

$$k_I = \frac{Z_{C0} \sinh(\gamma_0 x) - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)}{Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} \quad (4)$$

$$k_{VP} = \frac{\cosh(\gamma_{m2} x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (5)$$

$$k_{IP} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} - 1 \quad (6)$$

$$k_{mI} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} \quad (7)$$

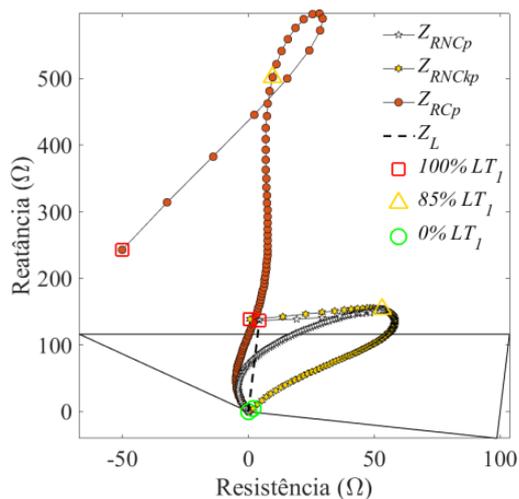
sendo x a distância entre o relé e o ponto de falta, Z_0 a impedância longitudinal unitária de sequência zero, Z_1 a impedância longitudinal unitária de sequência positiva, Z_{0m} a impedância mútua unitária de sequência zero, γ_0 a constante de propagação de sequência zero, γ_1 a constante de propagação de sequência positiva, γ_{m2} a constante de propagação do modo 2, γ_{m1} a constante de propagação do modo 1, Z_{C0} a impedância característica de sequência zero, Z_{C1} a impedância característica de sequência positiva, Z_{Cm2} a impedância característica do modo 2, Z_{Cm1} a impedância característica do modo 1 (KANG; LIAO, 2012).

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

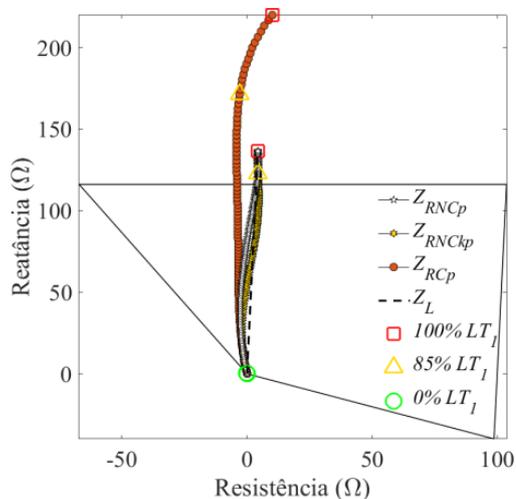
$$Z_{RNC} = \frac{Z_1}{\gamma_1} \operatorname{tgh}^{-1} \left(\frac{V_R}{I_R Z_{C1}} \right) = x Z_1 \quad (8)$$

3. RESULTADOS E ANÁLISES

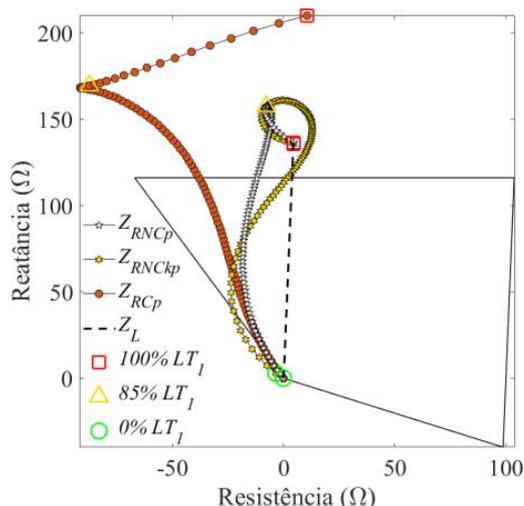
Para cada uma das nove condições de análise (combinações de impedâncias equivalentes de fontes fortes, médias e fracas), defeitos AT francos foram aplicados na barra 4 ao longo de toda a extensão da LT1, com passo de 8 km. As impedâncias aparentes vistas por R1 nesses casos foram discutidas Araújo e Pereira (2018), por exemplo. A Fig. 2 mostra as impedâncias aparentes calculadas pela unidade de detecção de falta AT do relé da LT sã (R2) — vide Fig. 1 — considerando três cenários e os algoritmos de proteção



(a) $F_{\text{forte}}, F_{\text{forte}}$



(b) $F_{\text{fraca}}, F_{\text{média}}$

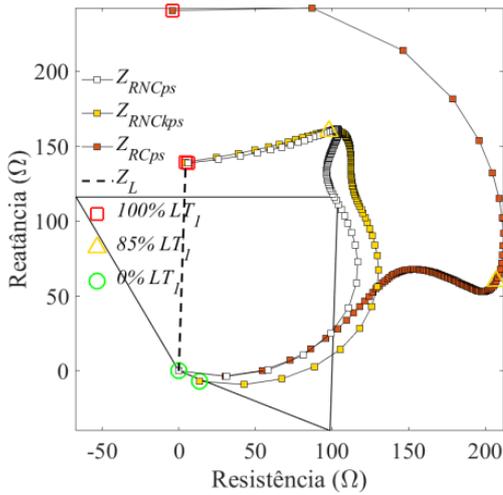


(c) $F_{\text{fraca}}, F_{\text{fraca}}$

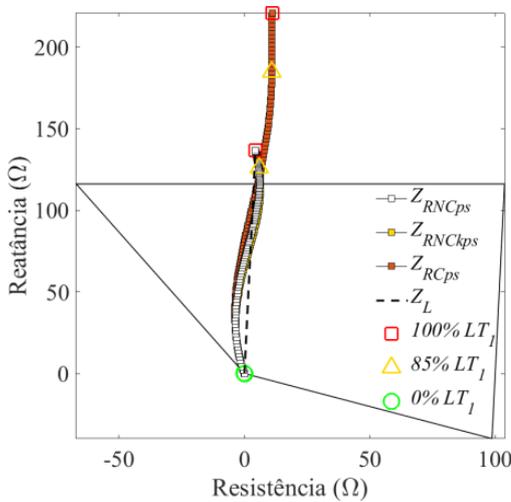
Fig. 2 Impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R2 utilizando os algoritmos convencional e não convencional para faltas AT deslizantes ao longo da LT faltosa.

adequados para LTs paralelas: convencional (Z_{RCp}), não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero constantes, computados considerando $x = 0,85\ell$ (Z_{RNCkp}), sendo ℓ a extensão total das LTs, e não convencional com k_{vp} , k_{lp} e k_{ml} exatos (Z_{RNCp}). O subscrito p indica que os resultados foram obtidos pelo relé da linha paralela à faltosa, ou seja, da LT sã. Impedâncias aparentes vistas para faltas no terminal emissor, limite do alcance da zona 1 e no terminal receptor são destacadas respectivamente por um círculo em verde, um triângulo em amarelo e um quadrado em vermelho.

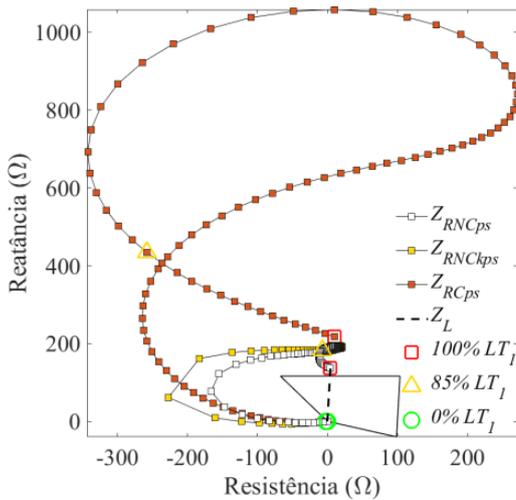
Ao examinar a Fig. 2, certifica-se que as impedâncias aparentes obtidas tanto por Z_{RNCkp} quanto por Z_{RNCp} para curtos-circuitos aplicados a 680 km ($0,85\ell$) do extremo emissor são idênticas, haja vista este ter sido o valor arbitrado para x no cálculo de k_{vp} , k_{lp} e k_{ml} constantes. Para mais, quando de faltas simuladas especialmente a curtas distâncias da barra 2, as repostas de Z_{RCp} e Z_{RNCp} se equivalem, o que se explica pelo fato de nestes casos os efeitos capacitivo e de propagação serem desprezíveis. Atesta-se ainda que, apesar de o algoritmo proposto melhorar a sensibilidade do relé da linha faltosa, ele também tende a amplificar a possibilidade de falsas operações do relé da LT sã — comparativamente ao algoritmo convencional —, tendo os resultados obtidos quando da admissão de parâmetros de compensação de sequência zero constantes sido geralmente um pouco mais críticos do que aqueles de Z_{RNCp} . Performances menos insatisfatórias de R2 são verificadas via de regra em cenários em que fontes fortes são envolvidas — o que é intrínseco de sistemas que compreendem linhas longas — e o algoritmo convencional é empregado. Mesmo assim, em todas as condições analisadas foram averiguados comportamentos intoleráveis, tanto usando o algoritmo não convencional quanto o convencional, o que corrobora a necessidade da adoção de uma abordagem de prevenção de falsas operações eficaz. Segundo Hu et al. (2002), operações simultâneas do relé da LT sã se devem à compensação do acoplamento mútuo de sequência zero no cálculo das impedâncias de sequência positiva dos trechos sob falta, que é realizado com o uso da corrente de sequência zero da outra linha (paralela). Com o objetivo de investigar a validade de tal premissa em LTs longas, na Fig. 3 são exibidas — para os mesmos casos de curto-circuito avaliados na Fig. 2 — as impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R2 fazendo uso agora dos algoritmos de proteção aplicáveis a LTs de circuitos simples: convencional (Z_{RCps}), não convencional com k_v e k_l constantes (Z_{RNCkps}), determinados para $x = 0,85\ell$, e não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero exatos (Z_{RNCps}). O subscrito s aponta adequabilidade dos algoritmos de proteção a linhas de circuito simples.



(a) $F_{\text{forte}}, F'_{\text{forte}}$



(b) $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{média}}$



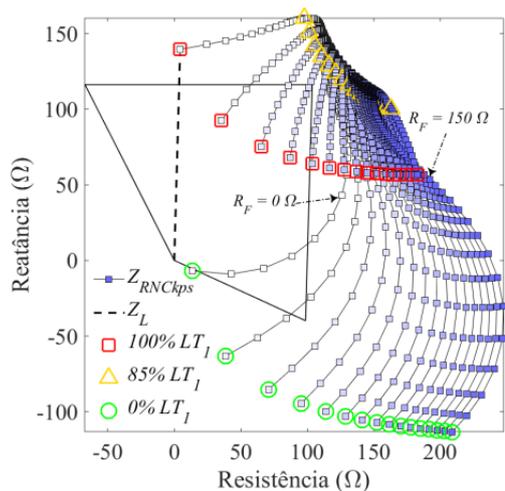
(c) $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{fraca}}$

Fig. 3 Impedâncias aparentes calculadas pela unidade AT de R2 utilizando algoritmos adequados para LTs de circuito simples frente a faltas AT deslizantes ao longo de LT1.

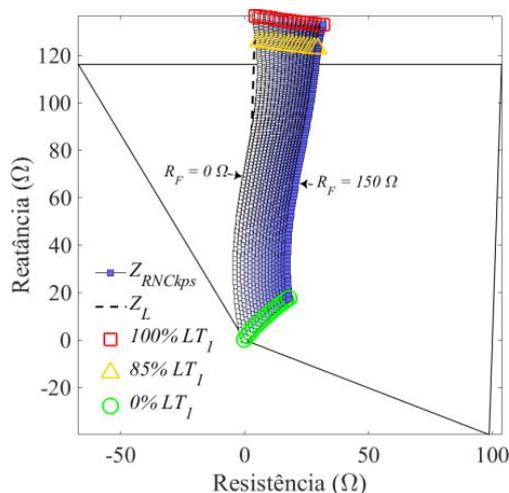
Embora um comportamento plenamente satisfatório de R2 tenha sido alcançado apenas para a configuração $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{fraca}}$ — a qual integra comumente LTs curtas —, confirma-se na Fig. 3 que, de modo geral, o ato de desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero tende a minimizar falsas operações do relé da linha sã em LTs longas paralelas. As tendências de comportamento assinaladas na discussão dos resultados da Fig. 2 permanecem, na maior parte dos casos, válidas ao se explorar a Fig. 3. Logo, respostas mais aprimoradas também são percebidas para configurações envolvendo fontes fortes, que são de particular interesse, como previamente discorrido. Aliás, para a configuração $F_{\text{forte}}, F'_{\text{forte}}$ constata-se agora uma maior satisfatoriedade para o algoritmo não convencional. Entretanto, não se logra êxito na prevenção de operações simultâneas de R2 para faltas simuladas a pelo menos curtas distâncias do terminal emissor de LT1. A extensão dos trechos da LT faltosa passíveis de ocasionar falsas operações de R2 na ocorrência de curtos-circuitos se mostra altamente dependente do alcance resistivo da característica de operação. Portanto, sugere-se neste artigo, como medida complementar à desativação da compensação do acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema adaptativo, uma redução não muito drástica do alcance resistivo da característica de operação do relé da LT sã — de forma a não comprometer a segurança do sistema.

Na Fig. 3 foram analisadas as respostas de R2 frente a faltas francas apenas — o que é uma condição ideal, logo, quimérica. A fim de checar o impacto de R_F em tais respostas, particularmente naquelas do algoritmo não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero constantes, a Fig. 4 apresenta as impedâncias aparentes vistas por R2 empregando tal algoritmo de proteção para faltas AT agora com $R_F = 0:10:150 \Omega$ (variando de 0 a 150 com passo de 10), sendo seus valores sinalizados por um gradiente na cor interna dos marcadores de Z_{RNCkps} de branca a azul-escura.

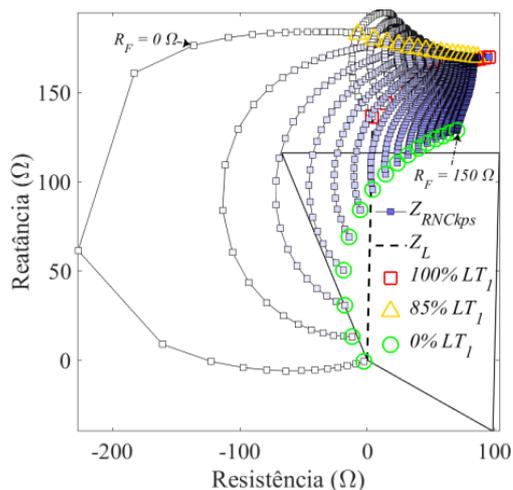
Repara-se na Fig. 4 que existe uma tendência geral de as impedâncias aparentes se afastarem da característica de operação de R2 à medida que se aumenta o valor de R_F , sendo este um aspecto positivo na prevenção de falsas operações. Entretanto, quando fontes fortes são envolvidas, as impedâncias aparentes calculadas para curtos-circuitos simulados nas proximidades do terminal receptor de LT1 tendem a cair dentro de tal característica de operação, promovendo operações indevidas de R2. Apesar disso, para a configuração $F_{\text{forte}}, F'_{\text{forte}}$ foram obtidos desempenhos dentre os mais satisfatórios, havendo indícios de falsas operações apenas para defeitos com valores de R_F não muito elevados em trechos de LT1 não muito expressivos. Ainda, a redução do alcance resistivo da característica de operação conforme recomendado a priori poderia aprimorar os resultados atingidos. Já quanto à configuração $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{fraca}}$, de modo dual, incrementos de R_F provocam operações indevidas de R2 sobretudo para faltas aplicadas proximalmente ao extremo emissor da linha faltosa — em trechos não muito significativos. Enfim, para a configuração $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{média}}$ são verificadas as piores performances do relé da LT sã.



(a) F_{forte}, F'_{forte}



(b) F_{fraca}, F'_{media}



(c) F_{fraca}, F'_{fraca}

Fig. 4 Impedâncias aparentes calculadas pela unidade AT de R2 usando o algoritmo não convencional aplicável a linhas de circuito simples com k_V e k_I constantes para faltas AT deslizantes aplicadas em LT_1 com $R_F = 0:10:150 \Omega$.

Logo, pode-se afirmar que a adoção de tal esquema de proteção de distância adaptativo é vantajosa em LTs longas paralelas, mesmo que este não seja absolutamente eficaz na prevenção de falsas operações. Tais operações indevidas do relé da LT sã podem, de fato, ser minoradas ao se desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero — comutando do algoritmo proposto para outro não convencional aplicável a linhas de circuito simples. Outrossim, a adoção conjunta de um alcance resistivo menos abrangente para a característica de operação do relé — quer seja quadrilateral ou poligonal —, conforme sugerido neste artigo, poderia otimizar tais respostas. Finalmente, para demonstrar a validade do critério proposto em Hu et al. (2002), a Fig. 5 expõe as razões entre os módulos das correntes de sequência zero das LTs paralelas apuradas para os mesmos casos simulados para a Fig. 4. Salienta-se que em todas as condições de análise foram obtidos resultados idênticos.

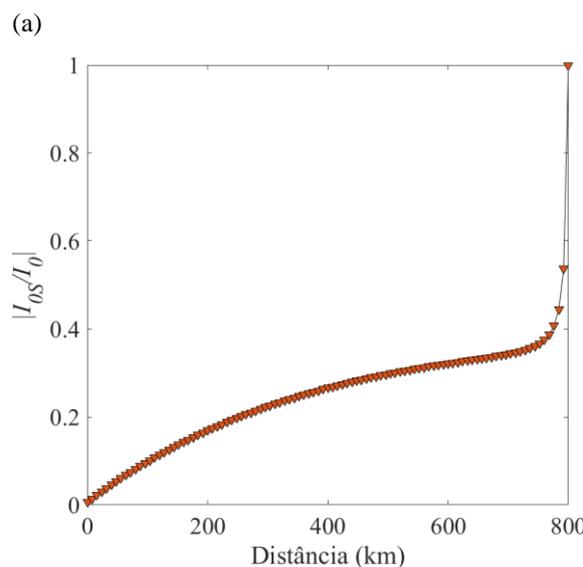
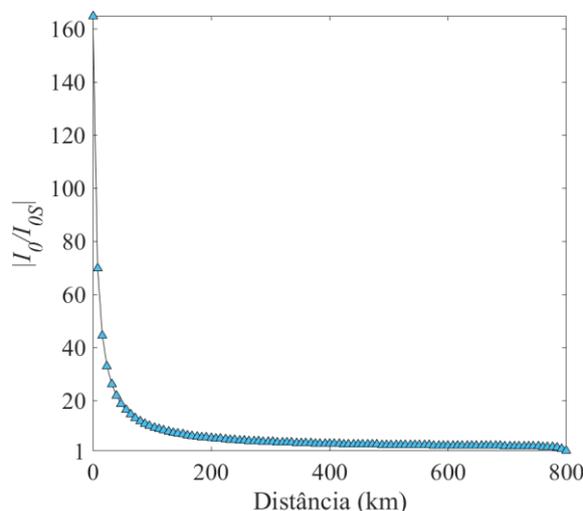


Fig. 5 Razão entre os módulos das correntes de sequência zero das LTs paralelas.

Ao analisar a Fig. 5, atesta-se que as razões entre as magnitudes das correntes de sequência zero das LTs sã (I_{0s}) e faltosa (I_0) são sempre menores que 1 para curtos-circuitos AT 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, independentemente do valor de R_F e da configuração de fontes em ambos os casos.

Isto corrobora o critério de Hu et al. (2002) para se desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema de proteção de distância adaptativo adequado para LTs longas paralelas conectadas a barramentos comuns em ambos os terminais.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo foi verificada a aplicabilidade em LTs longas paralelas de uma abordagem de prevenção de falsas operações empregada em LTs curtas paralelas, admitindo então algoritmos de proteção não convencionais, adequados para linhas longas. Comparando com o algoritmo convencional, apesar de o algoritmo não convencional aprimorar a sensibilidade do relé da LT faltosa, ele também se mostrou propenso a aumentar a possibilidade de falsas operações do relé da linha sã, sendo que isto reforça a necessidade de uma medida de prevenção de tais ocorrências. Desabilitando a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero, as operações simultâneas foram minimizadas, principalmente quando de sistemas terminais envolvendo fontes fortes, o que é um aspecto favorável para o contexto de LTs longas. Como o alcance resistivo da característica de operação da zona 1 exerceu uma alta influência nos resultados alcançados, sugeriu-se como medida complementar à desativação da compensação do acoplamento mútuo de sequência zero em um esquema de proteção de distância adaptativo que emprega algoritmos de proteção não convencionais, aplicáveis a linhas longas, uma redução do alcance resistivo — que não chegue a comprometer a segurança do sistema — quando for detectado curto-circuito na outra LT paralela. A simulação de defeitos não francos confirmou a tendência de as impedâncias aparentes se afastarem da característica de operação do relé da linha sã à proporção que se aumenta o valor de R_F , contudo, indicou uma propensão a falsas operações para faltas aplicadas nas proximidades do extremo receptor da LT faltosa. Ainda, como são realizadas análises em regime permanente de falta, uma operação antecedente de R1 poderia influenciar os resultados obtidos para R2. Por último, a utilização da razão entre as magnitudes das correntes de sequência zero das LTs sã e faltosa se provou viável como critério para se desabilitar a compensação do acoplamento mútuo de sequência zero e insensível à variação de R_F .

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

Xu, Z., Huang, S., Ran, Li, Liu, J., Qin, Y., Yang, Q. and He, J. (2008) A distance protection relay for a 1000-kV UHV

transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p.1795–1804.

Araújo, M. R. and Pereira, C. (2017) A practical first-zone distance relaying algorithm for long parallel transmission lines. *Electric Power Systems Research*, v. 146, p.17–24.

Wheeler, S. (1970) Influence of mutual coupling between parallel circuits on the setting of distance protection. *Proc. IEE*, v. 117, n. 2, p. 439–445.

Hu, Y., Novosel, D., Saha, M. and Leitloff, V. (2002) An adaptive scheme for parallel-line distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 105–110.

Araújo, M. R. (2016) Proteção de distância não convencional em linhas de transmissão paralelas de pouco mais de meio comprimento de onda. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 6., Natal. Anais... Natal: Funpec/UFRN, p. 1–6.

Araújo, M. R. and Pereira, C. (2018) Prevenção de falsas operações de relés de distância em linhas de transmissão longas paralelas. In: *Congresso Brasileiro de Automática*, 22., João Pessoa. Anais... João Pessoa: UFPB, SBA/IFAC e IFPB, p. 1–6.

Dias, R., Lima, A., Portela, C. and Aredes, M. (2011) Extra long-distance bulk power transmission. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p.1440–1448.

Chen, Z. and Maun, J. Artificial neural network approach to single-ended fault locator for transmission lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 1, p. 370–375.

Pereira, C. (2015) *Redes elétricas no domínio da frequência: técnicas de análise, modelos de componentes, técnicas computacionais*. São Paulo: Artliber.

Kang, N. and Liao, Y. (2012) Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines. In: *Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA. Proceedings... San Diego, CA: IEEE, p. 1 – 6.