

# Impacto da Corrente de Infeed Remota em um Algoritmo de Proteção de Distância Adequado para Linhas de Transmissão Longas Paralelas

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 impact of remote infeed current on the performance of a distance protection algorithm suitable for long parallel balanced transmission lines. Faults were simulated considering different terminal systems, pre-fault loading levels and fault resistance values. The unconventional algorithm has been shown to be more advantageous than conventional as first-zone distance relaying algorithm, as it prevents underreaching for short circuits applied over long distances with low to moderate fault resistances.

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma análise do impacto da corrente de infeed remota no desempenho de um algoritmo de proteção de distância adequado para linhas de transmissão longas paralelas equilibradas. Curtos-circuitos foram simulados considerando diferentes sistemas terminais, níveis de carregamento pré-falta e valores de resistência de falta. Mostrou-se que o algoritmo não convencional é mais vantajoso que o convencional como algoritmo de proteção de zona 1, uma vez que previne subalcances para curtos-circuitos aplicados a longas distâncias com resistências de falta de valores baixos a moderados.

**Keywords:** mutual coupling; distance protection algorithm; remote infeed; zero-sequence compensation parameters; fault resistance.

**Palavras-chaves:** acoplamento mútuo; algoritmo de proteção de distância; infeed remoto; parâmetros de compensação de sequência zero; resistência de falta.

## 1. INTRODUÇÃO

A proteção de distância convencional é formulada a partir de um modelo de linha de transmissão (LT) curta, no qual os efeitos capacitivo e de propagação são desprezados. Com o intuito de aplicar a proteção de distância em uma LT longa, Xu et al. (2008) propuseram uma formulação baseada no modelo  $\pi$  equivalente, a qual é adequada para LTs longas de circuito simples. Haja vista o acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas equilibradas, Araújo e Pereira (2017) sugeriram novas grandezas de entrada para as unidades de detecção de falta para a terra da proteção de distância não convencional, sendo os efeitos capacitivo, de propagação e do acoplamento mútuo de sequência zero plenamente considerados. Resistências de falta ( $R_f$ ) de valores significativos estão presentes na maioria dos defeitos monofásicos-terra. Dado que o algoritmo proposto por Araújo e Pereira (2017) é dedicado a unidades de detecção de falta para a terra, é de suma importância avaliar como a formulação sugerida é afetada por  $R_f$ . Logo, o objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da corrente de infeed remota no desempenho de tal algoritmo de proteção.

Este artigo está organizado em quatro seções. A Seção 2 explica a metodologia de simulação. A Seção 3 mostra e

discute os resultados alcançados. A Seção 4 conclui este artigo.

## 2. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

A Fig. 1 expõe o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência modelado. O sistema modelado neste artigo é idêntico ao descrito em Araújo e Pereira (2017). As LTs 1 e 2 possuem 800 km de extensão total ( $\ell$ ). 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 detalhados na Tabela 1, foram usados oportunamente para F e F', tendo sido calculados conforme Chen e Maun (2000).

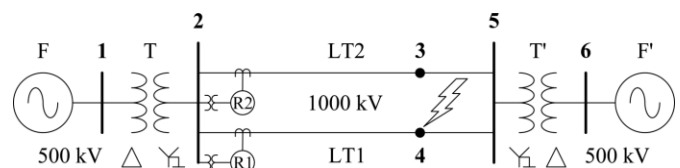


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema modelado.

**Tabela 1. Impedâncias equivalentes das fontes**

Tipo	Sequência positiva ( $\Omega$ )	Sequência zero ( $\Omega$ )
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

O cálculo dos curtos-circuitos foi realizado no software MATLAB utilizando a teoria de grafos e componentes simétricas, sendo que maiores detalhes podem ser verificados em Pereira (2015).

Uma unidade de medição quadrilateral baseada em um relé comercial foi ajustada 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 ( $Z_N$ ).

O algoritmo de proteção proposto por Araújo e Pereira (2017) é do tipo:

$$Z_{RNC} = \frac{Z_1}{\gamma_1} \operatorname{tgh}^{-1} \left[ \frac{V_a + k_{vp} V_0}{(I_a + k_{ip} I_0 + k_{ml} I_{0S}) Z_{C1}} \right] \quad (1)$$

em que  $V_a$  é a tensão da fase A medida pelo relé,  $I_a$  é a corrente da fase A medida pelo relé,  $I_0$  é a corrente de sequência zero medida pelo relé R1 ( $I_0$ ) ou pelo relé da linha sã R2 ( $I_{0S}$ ),  $Z_1$  é a impedância longitudinal unitária de sequência positiva,  $\gamma_1$  é a constante de propagação de sequência positiva,  $Z_{C1}$  é a impedância característica de sequência positiva e os parâmetros de compensação de sequência zero são da forma

$$k_{vp} = \frac{\cosh(\gamma_{m2} x) - \cosh(\gamma_1 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (2)$$

$$k_{ip} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} - 1 \quad (3)$$

$$k_{ml} = \frac{Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} x) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} x)}{2Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x)} \quad (4)$$

sendo  $x$  a distância entre o relé e o ponto de falta,  $\gamma_{m2}$  a constante de propagação do modo 2,  $\gamma_{m1}$  a constante de propagação do modo 1,  $Z_{Cm2}$  a impedância característica do modo 2 e  $Z_{Cm1}$  a impedância característica do modo 1.

O algoritmo de proteção convencional é da forma (HU et al., 2002):

$$Z_{RC}^{AT} = \frac{V_a}{I_a + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} I_0 + \frac{Z_{0m}}{Z_1} I_{0S}} \quad (5)$$

na qual  $Z_0$  é a impedância longitudinal unitária de sequência zero e  $Z_{0m}$  é a impedância mútua unitária de sequência zero.

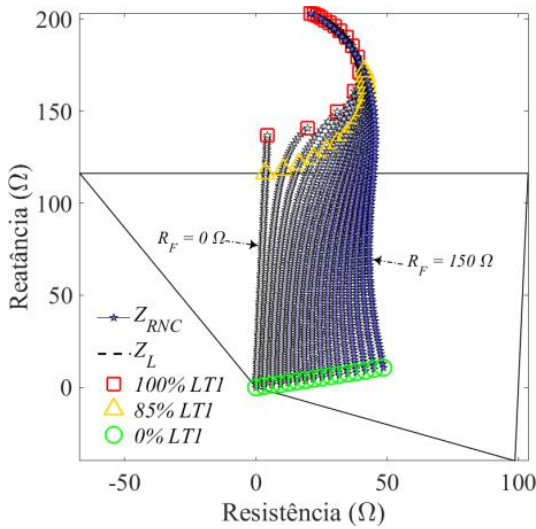
### 3. RESULTADOS E ANÁLISES

Curtos-circuitos AT foram aplicados na barra 4 ao longo de todo o comprimento de LT1, com passo de 0,01ℓ, para valores de resistência de falta variando de 0 a 150  $\Omega$ , com passo de 10  $\Omega$  ( $R_F = 0:10:150 \Omega$ ). Consideraram-se para F e F' combinações de impedâncias equivalentes de fontes dos tipos forte, média e fraca e para cada LT — excepcionalmente nesta análise — três carregamentos pré-falta: a vazio, igual a potência natural ( $P_0$ ) e igual ao dobro de  $P_0$ . Desse modo, os resultados logrados em cada condição avaliada constituíram uma característica de falta para o relé R1. A Fig. 2 apresenta as impedâncias aparentes vistas pela unidade AT de R1 empregando o algoritmo proposto em Araújo e Pereira (2017) com parâmetros de compensação de sequência zero exatos, assumindo um conhecimento prévio dos locais dos defeitos. Apenas a configuração típica  $F_{\text{forte}} F'_{\text{média}}$  é exposta em virtude do espaço disponível. Os valores de  $R_F$  são indicados por um gradiente na cor interna dos marcadores de  $Z_{RNC}$  de branca a azul-escura. O círculo em verde, o triângulo em amarelo e o quadrado em vermelho destacam impedâncias aparentes calculadas para defeitos aplicados no extremo emissor, no limite do alcance da zona 1 e no extremo receptor de LT1, de modo respectivo, o que permite verificar e quantificar subalcances e/ou sobrealcances do relé.

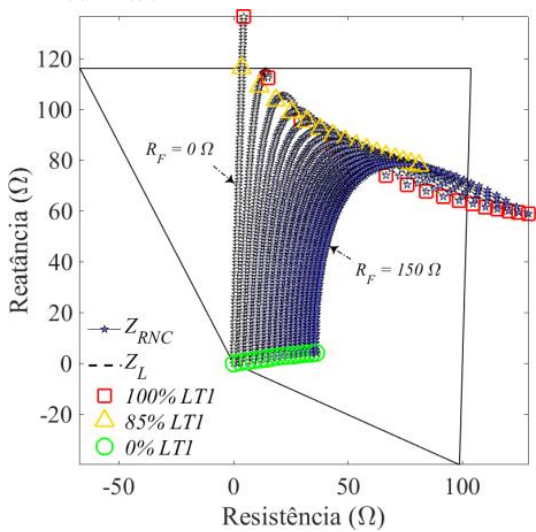
Para todos os carregamentos pré-falta considerados na Fig. 2, simularam-se também faltas francas deslizantes. Nestes casos, a corrente de infeed remota não influencia a impedância aparente vista pelo relé. Portanto, para cada condição avaliada, atestou-se um desempenho adequado do relé para, no mínimo, um valor nulo de  $R_F$ . Quando as LTs operam a vazio, há uma intensificação do efeito capacitivo, o que justifica os subalcances percebidos para as configurações de fontes ponderadas. De modo dual, quando as linhas operam com sobrecarga ( $2P_0$ ), o relé sobrealcança independentemente da configuração de fontes. Tal comportamento pode sugerir sobrealcances de LTs a jusante da linha protegida, o que compromete a seletividade do esquema de proteção. Assumindo para cada LT um carregamento pré-falta igual a  $P_0$ , há também indícios de possíveis sobrealcances de LTs à frente daquela protegida.

Os comportamentos explicitados na Fig. 2 corroboram a necessidade da utilização tanto de um relé direcional de sequência zero quanto de um módulo auxiliar, como aquele proposto por Abdollahzadeh, Mozafari e Jazaeri (2015), funcionando em conjunto com o algoritmo de Araújo e Pereira (2017) para resguardar o sistema de tais ocorrências. Tais práticas, dentre outras, já são correntemente adotadas para a proteção de distância convencional — assim como é usual a instalação de reatores indutivos em derivação visando a neutralizar o efeito Ferranti.

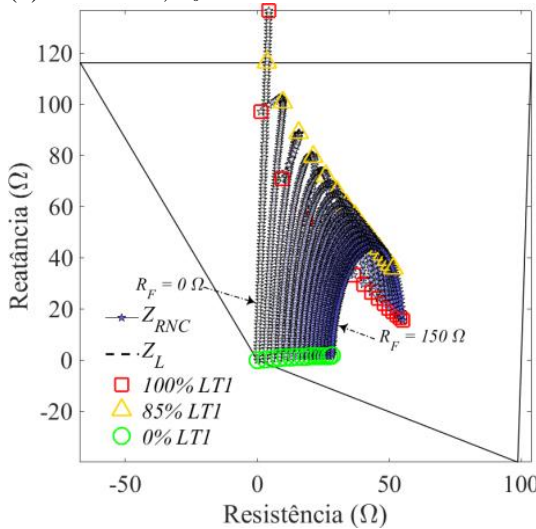
Sem embargo, uma alternativa viável para a implementação da formulação não convencional em tempo real como um algoritmo de proteção de zona 1 é a utilização de parâmetros de compensação de sequência zero constantes, de forma a evitar o emprego de métodos iterativos.



(a)  $F_{\text{forte}}, F_{\text{média}}, A \text{ vazio}$



(b)  $F_{\text{forte}}, F_{\text{média}}, P_0$



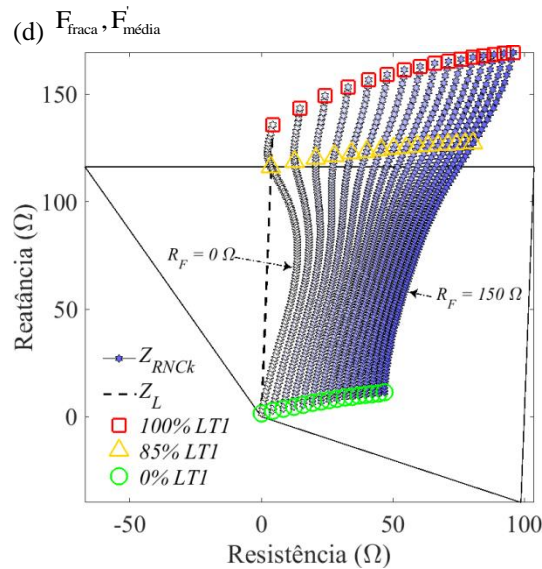
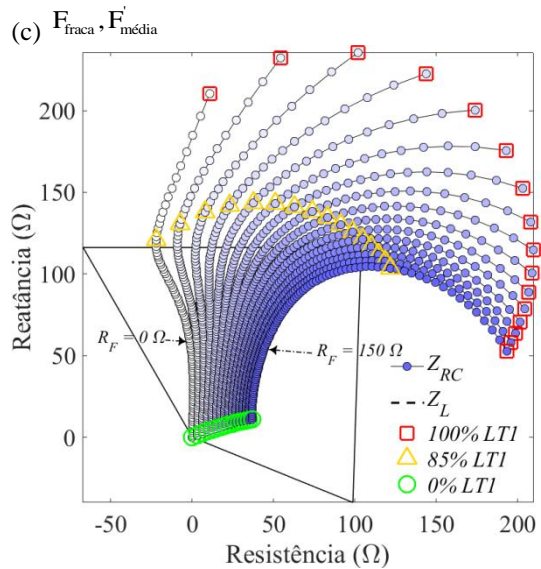
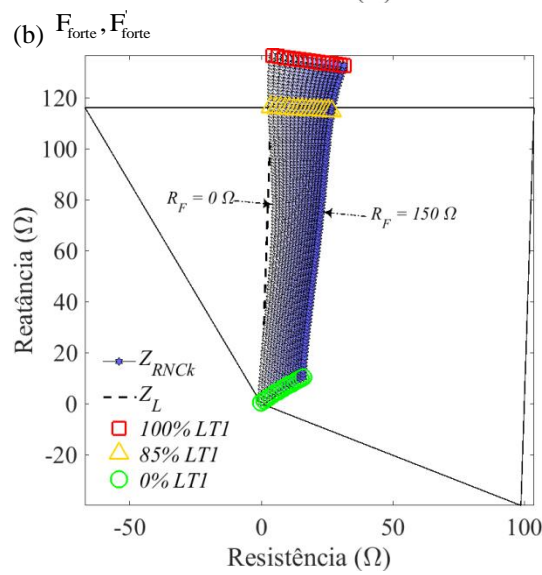
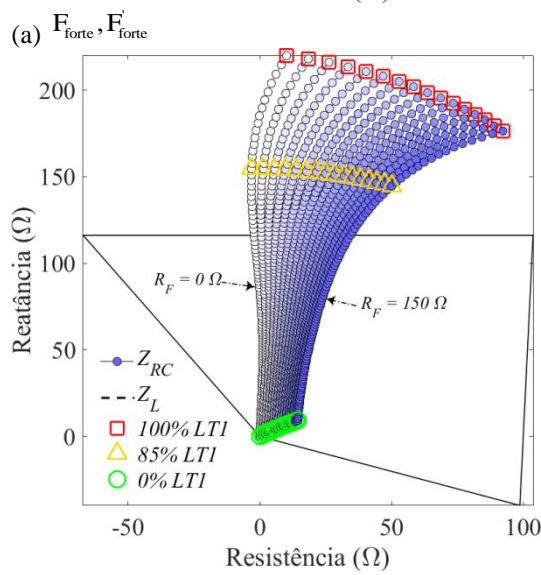
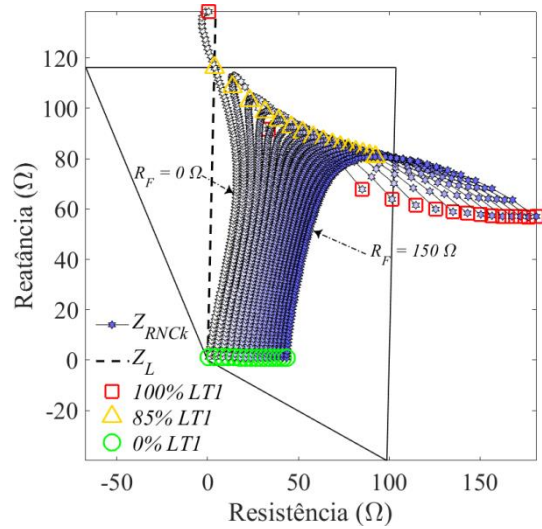
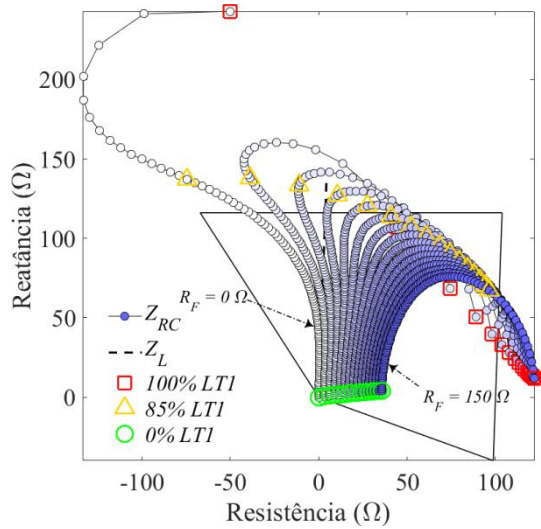
(c)  $F_{\text{forte}}, F_{\text{média}}, 2P_0$

Fig. 2 Impedâncias aparentes calculadas pela unidade AT de R1 usando o algoritmo proposto com parâmetros de compensação de sequência zero exatos para faltas AT com  $R_F = 0:10:150 \Omega$  considerando diferentes níveis de carregamento pré-falta

À vista disso, e de que o algoritmo avaliado apresenta limitações comuns àquelas do relé convencional, na Fig. 3 é feita uma comparação de desempenho entre o algoritmo convencional adequado para linhas paralelas e o algoritmo não convencional com  $k_{vp}$ ,  $k_{lp}$  e  $k_{ml}$  constantes, calculados assumindo  $x$  como igual ao limite do alcance da zona 1 ( $0,85\ell$ ), frente aos mesmos casos simulados para a Fig. 2 considerando agora somente um carregamento pré-falta igual a  $P_0$ . A fim de possibilitar um maior embasamento para as análises de tais resultados, a Fig. 4 mostra, para cada caso averiguado na Fig. 3, os módulos das correntes  $I_{EF}$  e  $I_{RF}$ , parcelas da corrente de falta, sendo a segunda igual à corrente de infeed remota da fase A. Os valores de RF — de 0 a  $150 \Omega$ , com passo de  $10 \Omega$  — são indicados por gradientes nas cores internas dos marcadores de  $I_{EF}$  e  $I_{RF}$ , de branca a verde e de branca a vermelha, respectivamente. Já a Fig. 5 exhibe as diferenças angulares entre  $I_{FR}$  e  $I_{EF}$  (sendo  $I_{FR}$  igual a  $-I_{RF}$ ), também para os mesmos casos da Figura 4.15, estando os valores de resistência de falta indicados de modo semelhante ao desta última.

Quando de configurações envolvendo fontes fortes, comparando os resultados de  $Z_{RNCK}$  na Fig. 3 com aqueles de  $Z_{RNC}$  na Fig. 2 na condição de carregamento pré-falta igual a  $P_0$ , reparam-se meramente pequenas divergências, o que reforça a viabilidade da abordagem de parâmetros de compensação de sequência zero constantes. É importante frisar que, para valores de resistência de falta intermediários aos elencados para as simulações, os resultados dos algoritmos tendem a manter suas propensões, tendo o passo de  $10 \Omega$  sido escolhido com o intuito de favorecer a apresentação das figuras. Dessa forma é de se esperar que, se o algoritmo em questão desempenhou adequadamente para curtos-circuitos francos e com  $R_F = 10 \Omega$ , o mesmo algoritmo tenha uma performance satisfatória também para valores de  $R_F$  de  $1 \Omega$  a  $9 \Omega$ , por exemplo. Ademais, nota-se para  $Z_{RNCK}$  na Fig. 3 um erro nulo quando de defeitos francos aplicados no limite do alcance da zona 1 do relé ( $85\%$  do comprimento total das linhas), independentemente da configuração de fontes. Tal comportamento se deve ao fato de este ter sido o valor de  $x$  admitido para o cálculo de  $k_{vp}$ ,  $k_{lp}$  e  $k_{ml}$  constantes empregados no algoritmo de proteção, o que faz com que, assim como para  $Z_{RNC}$ , não sejam observados subalcances nem sobrealcances em casos com  $R_F$  nula.

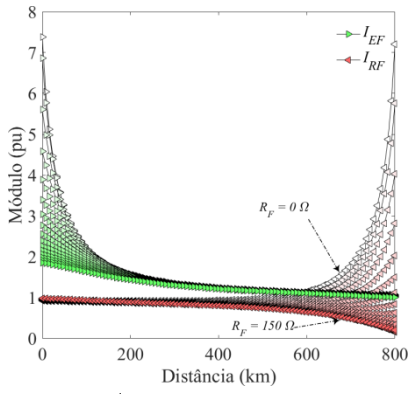
Visto que  $Z_{RC}$  despreza efeitos que são proeminentes em LTs longas paralelas, em nenhum dos cenários ponderados foi atestado um desempenho plenamente satisfatório do relé ao fazer uso de tal algoritmo de proteção. Afora para as configurações  $F_{\text{fraca}}, F_{\text{média}}$  e  $F_{\text{fraca}}, F_{\text{fraca}}$ , o relé convencional subalcança trechos máximos de, no mínimo, aproximadamente  $10\%$  de  $\ell$ , ao mesmo tempo que sobrealcança trechos máximos de ao menos aproximadamente  $13\%$  quando de resistências de falta de valores elevados. Mesmo para as configurações excetuadas, com as quais ocorre apenas o fenômeno de subalcança, o desempenho de  $Z_{RC}$  não chega a ser razoável. A performance aceitável obtida em alguns poucos casos, majoritariamente com resistências de falta elevadas, ou é altamente dependente do ajuste do alcance resistivo da característica de operação, que foi feito empiricamente, ou é inusitada — como para faltas francas considerando  $F_{\text{fraca}}, F_{\text{fraca}}$ .



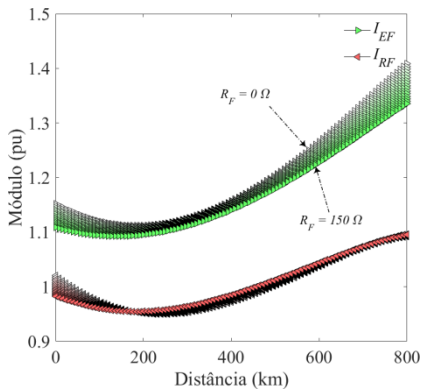
(e)  $F_{fraca}, F'_{fraca}$

(f)  $F_{fraca}, F'_{fraca}$

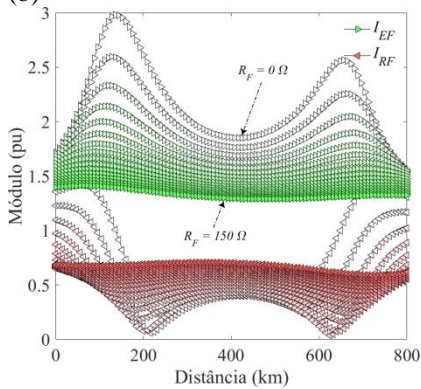
Fig. 3 Comparação de desempenho entre  $Z_{RC}$  e  $Z_{RNCK}$



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



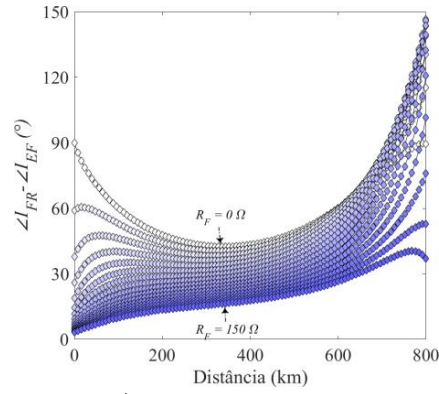
(b)  $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{média}}$



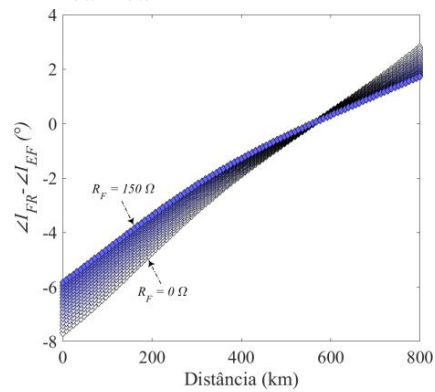
(c)  $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{fraca}}$

Fig. 4 Módulos das parcelas das correntes de curto-circuito

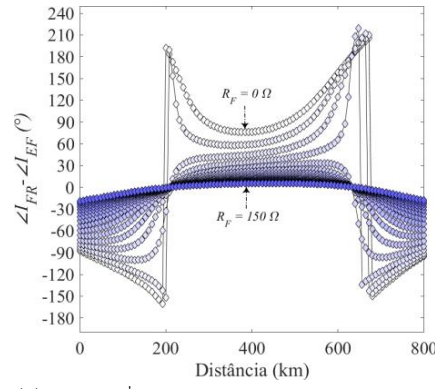
A resposta peculiar dos algoritmos de proteção obtida para as configurações  $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{média}}$  e  $F_{\text{fraca}}, F'_{\text{fraca}}$  pode ser melhor clarificada ao se investigar a Fig. 4 e a Fig. 5. Somente para tais configurações são percebidos casos de atrasos de fase de  $I_{FR}$  com relação a  $I_{EF}$  — o que equivale a diferenças angulares menores que  $180^\circ$  entre  $I_{RF}$  e  $I_{EF}$ . Nesses casos, a corrente de falta  $I_F$ , dada pela soma das correntes  $I_{EF}$  e  $I_{RF}$ , apresenta um avanço de fase com relação a  $I_{EF}$ , culminando em subalcances do relé. Já para diferenças angulares positivas entre  $I_{FR}$  e  $I_{EF}$ ,  $I_{RF}$  está atrasada em relação a  $I_{EF}$  e, portanto,  $I_F$  também estará defasada em comparação com  $I_{EF}$ , acarretando fenômenos de sobrealcançe ao se empregar o algoritmo não convencional. Além disso, para as configurações envolvendo fontes médias e fracas, tratam-se de diferenças angulares pouco expressivas, de forma que  $I_{FR}$  está geralmente quase em fase com  $I_{EF}$ , ou seja,  $I_{RF}$  em geral quase forma um ângulo



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



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



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

Fig. 5 Defasagem angular entre as parcelas das correntes de curto-circuito

de  $180^\circ$  com  $I_{EF}$ , caracterizando, pois, a preponderância de atenuações para  $I_F$ . Sabe-se, da literatura, que quando  $I_{RF}$  está em fase ou defasada de  $180^\circ$  com relação a  $I_{EF}$ , apenas a parte resistiva de  $Z_R$  é afetada por  $R_F$ , o que justifica, também, fenômenos pouco pronunciados para  $Z_{RNC}$  quando de diferenças angulares pouco significativas — já que aí, o relé enxerga uma impedância de falta  $Z_F$  predominantemente resistiva. Ainda, o fato de para tais configurações os módulos das parcelas de  $I_F$  serem pouco destacados contribui para que o relé perceba uma  $R_F$  reduzida.

A análise anterior aclara também os fenômenos de sobrealcançe apurados para as demais configurações de fontes. Para todas elas  $I_{FR}$  sempre está adiantada com relação a  $I_{EF}$ , sendo tais defasagens, via de regra, expressivas.

## REFERÊNCIAS

Repara-se também que quanto mais fraca é  $F'$ , menos proeminente é o módulo de  $I_{RF}$  em relação ao de  $I_{EF}$  para curtos-circuitos aplicados a longas distâncias, o que implica o relé perceber uma  $R_F$  cada vez mais diminuída.

Em virtude de tais resultados, pode-se afirmar que o algoritmo proposto por Araújo e Pereira (2017) com parâmetros de compensação de sequência zero constantes é mais vantajoso que o convencional em LTs longas paralelas, já que previne subalcances do relé para faltas a longas distâncias com resistências de falta de valores baixos a moderados, garantindo uma melhor sensibilidade ao relé. Além das medidas complementares já citadas para resguardar o sistema em casos de defeitos com elevadas resistências de falta, os comportamentos identificados sugerem que a adoção de uma característica de operação adaptativa poderia aprimorar a performance do relé utilizando o algoritmo proposto.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o impacto da resistência de falta no desempenho do algoritmo não convencional foi analisado para diferentes sistemas terminais e níveis de carregamento pré-falta. Um comportamento dual foi apurado para o algoritmo não convencional com parâmetros de compensação de sequência zero exatos ao se considerar as duas LTs operando a vazio e com o dobro da potência natural de cada linha, haja vista a predominância dos efeitos capacitivo e indutivo, respectivamente. Para o primeiro carregamento pré-falta, o relé subalcançou trechos significativos da LT faltosa, ao passo que para o segundo, sobrealcançou — sendo ambos os fenômenos tanto mais pronunciados quanto maior o valor de  $R_F$ . Ao se admitir um carregamento pré-falta igual à potência natural, o qual é recomendado para LTs longas, houve predominância de ocorrência de fenômenos de sobrealcance, sobretudo quando fontes fortes foram envolvidas, sendo estes altamente dependentes do alcance resistivo ajustado para a característica de operação. Todavia, o relé desempenhou satisfatoriamente para faltas aplicadas em trechos de pelo menos até aproximadamente 68% do comprimento total da LT faltosa a partir de seu extremo emissor. Comparando o desempenho do algoritmo não convencional com  $k_{vp}$ ,  $k_{fp}$  e  $k_{ml}$  constantes com aquele do algoritmo convencional, comprovou-se que o algoritmo não convencional é mais vantajoso que o convencional como algoritmo de proteção de zona 1, já que previne subalcances para curtos-circuitos aplicados a longas distâncias com resistências de falta de valores baixos a moderados em LTs longas paralelas. Ainda assim, foi explicitada uma necessidade de adoção de medidas complementares, como a utilização de um relé direcional de sequência zero ou de um módulo auxiliar, além de uma característica de operação adaptativa, para se resguardar o sistema de curtos-circuitos com elevadas resistências de falta. Salienta-se que tal limitação também ocorre para o algoritmo convencional, tendo em conta que ambos os algoritmos são deduzidos admitindo curtos-circuitos francos.

## AGRADECIMENTOS

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

- 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.
- 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. (2000) 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.
- SIEMENS. (2011) *SIPROTEC: distance protection 7SA6*. Nürnberg.
- 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.
- Abdollahzadeh, H., Mozafari, B. and Jazaeri, M. (2015) A functional auxiliary module for 1st-zone conventional distance relays of double-circuit lines to eliminate high fault resistance-introduced under-reach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 71, p. 315–326.