

Proteção de Distância Não Convencional em Linhas de Transmissão Paralelas de Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda

Marcos R. Araújo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG, Brasil
marcosraraujo@ufmg.br

Resumo—Em cenários de bases de geração muito distantes dos centros de carga, como o brasileiro, faz-se necessária a construção de linhas de transmissão extra longas para o atendimento da crescente demanda por energia elétrica. Na última década, a utilização da linha de transmissão em corrente alternada de pouco mais de meio comprimento de onda vem sendo amplamente discutida por pesquisadores, todavia, ainda existem questões técnicas a serem resolvidas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do acoplamento eletromagnético entre linhas de transmissão paralelas de pouco mais de meia onda no desempenho da proteção de distância não convencional. Para curtos-circuitos envolvendo mais de uma fase em um trecho próximo ao extremo emissor, foi verificado um subalcançe das unidades de detecção quando de variação de resistência de falta, o que compromete a eficácia do esquema de proteção.

Palavras-chave—Linhas de Transmissão Paralelas, Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda, Proteção de Distância Não Convencional, Acoplamento Mútuo de Sequência Zero, Grafos.

I. INTRODUÇÃO

Existe no Brasil uma demanda crescente por energia elétrica, concentrada principalmente na região Sudeste, assim como um imenso potencial hidrelétrico ainda pouco explorado, concentrado na região Norte – mais especificamente na Bacia Amazônica em rios como o Madeira, o Xingu, o Teles Pires e o Tapajós [1]. Tendo em vista tal cenário, para o aproveitamento do potencial hidrelétrico da região Norte, faz-se necessária a construção de linhas de transmissão (LTs) extra longas, da ordem de 2500 km.

A LT em corrente alternada de pouco mais de meio comprimento de onda ($\lambda/2^+$) surge como uma solução natural. Nos estudos sobre a transmissão em meia onda, que tiveram início em 1940 na antiga União Soviética, foram verificados efeitos favoráveis para tal configuração – como a inexistência de efeito Ferranti e estabilidade equiparável à de linhas curtas [2]. Dessa forma, não se requer compensação em derivação ou série, nem subestações intermediárias, o que reduz os custos por unidade de comprimento.

Contudo, apontada como economicamente mais vantajosa, a LT em corrente contínua tem sido historicamente a solução

utilizada para a transmissão de energia elétrica a longas distâncias, de mais de aproximadamente 700 km, como nos sistemas de Itaipu e do Madeira.

O domínio da tecnologia da LT de $\lambda/2^+$ é de suma importância para que sua implantação se viabilize economicamente, de forma a se tornar uma opção competitiva em uma eventual ampliação do sistema de transmissão da Amazônia, ou em países como China e Rússia [3].

Em vista da elevada capacidade de transmissão de tais linhas e de peculiaridades como sobretensões muito severas quando da ocorrência de defeitos trifásicos, faz-se essencial a utilização de um sistema de proteção eficaz e eficiente, evitando o desencadeamento de *blackouts* de grandes proporções e o comprometimento da integridade de equipamentos [4].

Na formulação da proteção de distância convencional é considerado o modelo impedância nominal série da LT, no qual a admitância transversal e os efeitos de propagação são desprezados. Haja vista os erros decorrentes de tal simplificação, pesquisadores chineses propuseram um equacionamento baseado no modelo π equivalente para a proteção de distância, que mostrou boa aplicabilidade em uma LT compensada de 645 km [5].

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas de $\lambda/2^+$ no desempenho da proteção de distância não convencional.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

O parâmetro eletromagnético comprimento de onda (λ) é definido como a distância entre dois pontos da onda senoidal, no sentido de sua propagação, defasados de 2π radianos:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} \quad (1)$$

na qual β é a parte imaginária da constante de propagação γ , v é a velocidade de propagação e f é a frequência [6]. Portanto, na frequência industrial de 60 Hz, o comprimento de onda de uma LT ideal ($v \approx c$, sendo c a velocidade de propagação da luz no vácuo) é da ordem de 5000 km.

Considera-se neste trabalho LTs paralelas com parâmetros idênticos, trifásicas em corrente alternada, com comprimento de pouco mais de meia onda (2571 km), perfeitamente transpostas e em regime permanente senoidal de 60 Hz. Ademais, é admitido que todo o sistema é equilibrado, ou seja, possui apenas tensões e correntes simétricas de sequência positiva de fases. A Fig. 1 ilustra o diagrama unifilar do sistema modelado.

Devido a não existirem LTs de $\lambda/2^+$ em operação no mundo, foram adotadas as configurações de geometria de torres e de feixes de condutores propostas em [7], tendo sido definida uma faixa de passagem de 120 m. Utiliza-se 12 condutores ACSR *Bluejay* 1113 MCM (diâmetro externo de 3,1953 cm e resistência CC de 0,0606914 Ω/km) por fase e 2 cabos para-raios EHS 3/8" (diâmetro externo de 0,9144 cm e resistência CC de 4,41402 Ω/km) por torre, admitindo temperaturas iguais a 65 e 40°C, de modo respectivo [8]. O solo é assumido como homogêneo com resistividade igual a 1000 Ωm . O esquema de transposição de cada circuito é apresentado na Fig. 2.

Os parâmetros das LTs foram calculados utilizando a ferramenta *Compute RLC Line Parameters* do bloco *Powergui* do MATLAB/Simulink. Como é sabido, mesmo transpondo perfeitamente cada circuito, não é possível eliminar o acoplamento mútuo de sequência zero.

Foram utilizados para as fontes F e F' os equivalentes de Thévenin nas barras Coletora Porto Velho e Araraquara 2 (pontos de conexão do Linhão do Madeira, que interliga o complexo do Madeira à região Sudeste), respectivamente, tendo sido obtidos do caso Aspen convertido a partir do caso base ONS BR1406A.ANA [9].

Bancos de 10 transformadores de 2000 MVA cada – dada a potência natural (P_0) de cada LT de 7548,4 MW – tiveram seus parâmetros baseados em [7].

Os parâmetros do sistema são detalhados na Tabela I.

As faltas foram simuladas utilizando o programa Cálculo de Curto-Circuito ou Assimetria Shunt em Componentes Simétricas – CCCS (Clever Pereira©), que executa o cálculo de curto-circuito ou assimetria shunt em redes elétricas utilizando a teoria de grafos [10].

A LT foi modelada como circuitos π equivalentes associados em cascata. Os parâmetros de sequência positiva e negativa foram calculados de acordo com:

$$Z_\pi = B = Z_C \sinh(\gamma \ell) = Z_n \frac{\sinh(\gamma \ell)}{\gamma \ell} \quad (2)$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{A-1}{B} = Y_C \tanh\left(\frac{\gamma \ell}{2}\right) = \frac{Y_n}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\gamma \ell}{2}\right)}{\frac{\gamma \ell}{2}} \quad (3)$$

em que Z_C é a impedância característica, ℓ é o comprimento total da LT, Z_n é a impedância nominal da LT, Y_C é a admitância característica e Y_n é a admitância nominal da LT.

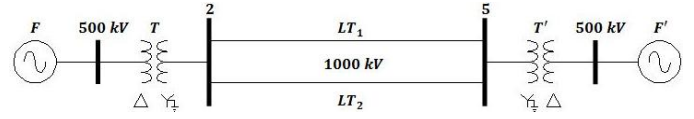


Fig. 1. Diagrama unifilar do sistema.

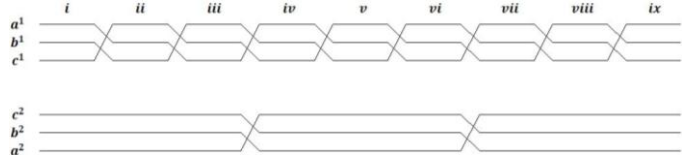


Fig. 2. Esquema de transposição dos circuitos.

TABELA I. PARÂMETROS DO SISTEMA.

Linhas de Transmissão			
	<i>Sequência Positiva</i>	<i>Sequência Zero</i>	<i>Mútua de Sequência Zero</i>
$R\ (\Omega/\text{km})$	0,005470	0,344293	0,320361
$L\ (\text{H}/\text{km})$	0,000453	0,003175	0,001491
$C\ (\mu\text{F}/\text{km})$	0,025822	0,009658	−0,000323
$X\ (\Omega/\text{km})$	0,170853	1,197041	0,562171
$B\ (\mu\text{S}/\text{km})$	9,734853	3,641131	−0,121749
Fontes			
	<i>Sequência Positiva</i>	<i>Sequência Zero</i>	
$Z_{ThF}\ (\Omega)$	0,6500 + j42,4250	0,9250 + j13,5500	
$Z_{ThF'}\ (\Omega)$	0,7250 + j12,9250	3,7750 + j28,4750	
Transformadores			
	$X_T\ (\%)$	<i>Tensão (kV)</i>	<i>Potência (MVA)</i>
T	13,4	500/1000	10 x 2000
T'	13,4	500/1000	10 x 2000

Já para a sequência zero, faz-se necessária uma abordagem específica, haja vista as impedâncias e admitâncias mútuas.

Em [11] foi proposta uma formulação para o circuito π equivalente de sequência zero de linhas paralelas na condição de parâmetros idênticos e transposição perfeita. Os parâmetros equivalentes correspondentes são obtidos por meio das seguintes equações:

$$Z_{\pi 0} = \frac{1}{2} [Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} \ell) + Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} \ell)] \quad (4)$$

$$Z_{\pi 0m} = \frac{1}{2} [Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} \ell) - Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} \ell)] \quad (5)$$

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

$$Y_{\pi 0m} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m1} \ell}{2}\right)}{Z_{Cm1}} - \frac{\tanh\left(\frac{\gamma_{m2} \ell}{2}\right)}{Z_{Cm2}} \quad (7)$$

nas quais

$$\gamma_{m1} = \sqrt{(Z_0 - Z_{0m})(Y_0 + 2Y_{0m})} \quad (8)$$

$$\gamma_{m2} = \sqrt{(Z_0 + Z_{0m})Y_0} \quad (9)$$

$$Z_{Cm1} = \sqrt{\frac{Z_0 - Z_{0m}}{Y_0 + 2Y_{0m}}} \quad (10)$$

$$Z_{Cm2} = \sqrt{\frac{Z_0 + Z_{0m}}{Y_0}} \quad (11)$$

Os diagramas sequenciais e o grafo orientado associado são expostos nas Fig. 3 e 4, respectivamente. Em virtude da ligação delta dos transformadores e do requisito de um grafo único para as seqüências positiva, negativa e zero, foram inseridos elementos de impedância infinita nos diagramas sequenciais de modo a satisfazer tal condição.

III. ANÁLISES E RESULTADOS

Foram simulados curtos-circuitos AT, BC, BCT e ABC ao longo de toda a extensão da LT₂₋₃₋₅, referida como linha faltosa (sobrescrito F), com o passo de 1% de meio comprimento de onda. As faltas foram aplicadas na barra 3, estando os relés instalados na barra 2. A LT₂₋₄₋₅ é referida no decorrer das análises como linha sã (sobrescrito S).

As fontes de tensão foram ajustadas para que em todos os casos a tensão pré-falta na barra dos relés fosse igual a 1 pu com fase 0°, e o carregamento pré-falta de cada LT fosse igual a P_0 .

As análises foram realizadas em regime permanente, portanto não foram considerados os erros relativos à estimação de fasores.

Adotou-se uma unidade de medição de característica poligonal, baseada em um relé comercial [12]. Na Fig. 5 é exibida a característica de operação da zona 1 de tal unidade, com os ajustes realizados. São feitas análises estáticas, à frente do relé, considerando Ω primários. A impedância réplica do trecho protegido (Z_N) foi ajustada com alcance de 85% da impedância de seqüência positiva da LT (Z_L). O alcance resistivo foi baseado na experiência de concessionárias de energia [13]. A reta definida pela resistência do *load encroachment* (R_{LE}) tem como finalidade evitar a operação do relé em condições de carga elevada.

Na Tabela II são mostradas as grandezas de entrada para cada unidade do relé de distância não convencional, sendo x a distância entre o relé e o ponto de falta [5].

Os parâmetros k_v , k_I , k_1 e k_2 são descritos pelas seguintes equações:

$$k_v = k_1 - 1 : k_1 = \frac{\cosh(\gamma_0 x)}{\cosh(\gamma_1 x)} \quad (12)$$

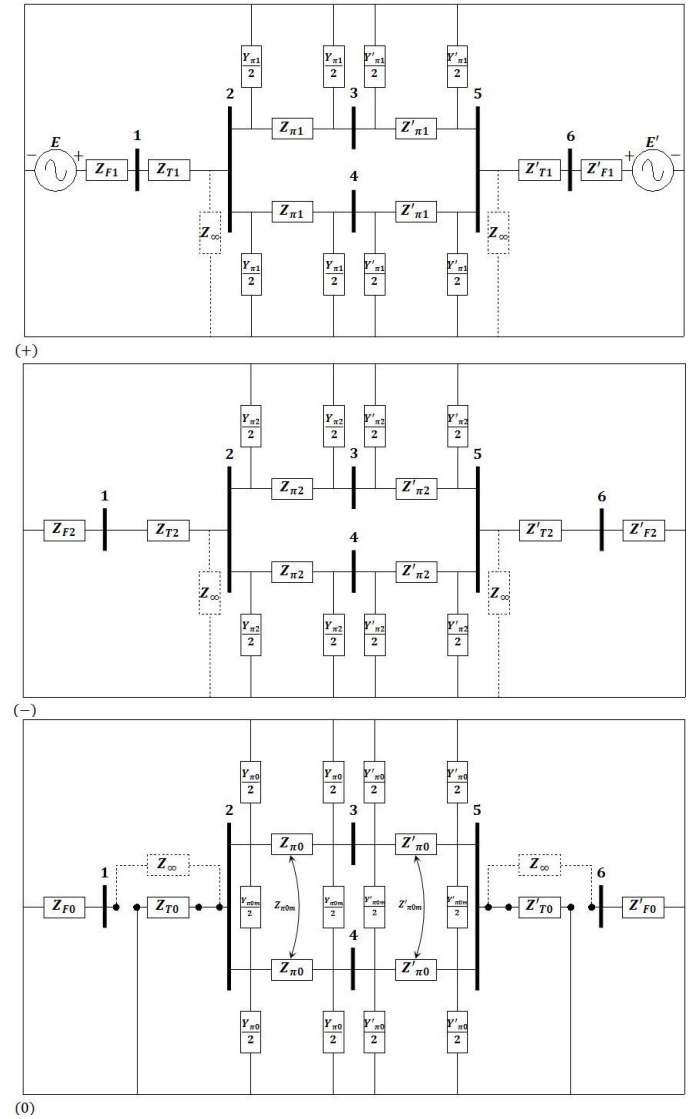


Fig. 3. Diagramas de impedância de seqüência positiva, negativa e zero.

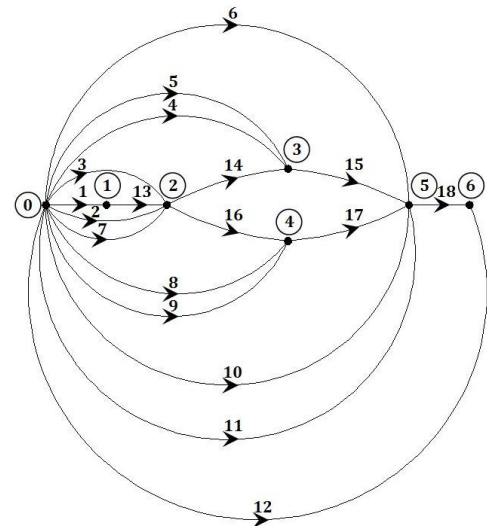


Fig. 4. Grafo orientado.

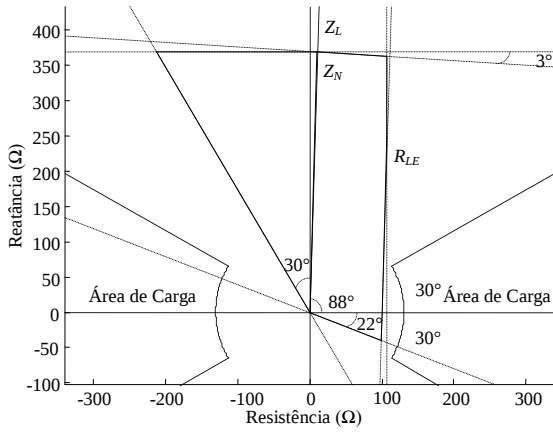


Fig. 5. Plano de impedâncias com a característica de operação ajustada.

TABELA II. GRANDEZAS DE ENTRADA PARA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NÃO CONVENCIONAL.

Unidade	V_R	I_R	Z_R
AT	$V_a + k_V V_0$	$I_a + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
BT	$V_b + k_V V_0$	$I_b + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
CT	$V_c + k_V V_0$	$I_c + 3k_I I_0$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
AB	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
BC	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$
CA	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$	$Z_{C1} \tanh(\gamma_1 x)$

$$k_I = \frac{k_2 Z_{C0} - Z_{C1}}{3Z_{C1}} \therefore k_2 = \frac{\sinh(\gamma_0 x)}{\sinh(\gamma_1 x)} \quad (13)$$

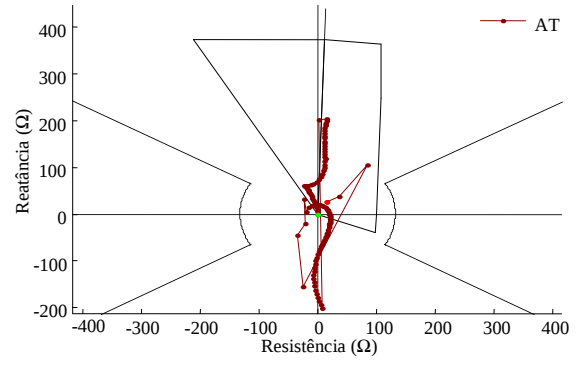
Para que a impedância vista pela proteção de distância não convencional corresponda à impedância longitudinal unitária de sequência positiva da LT (Z_1) multiplicada pela distância até o ponto de falta (x), aplica-se o seguinte filtro:

$$Z_R^* = \frac{Z_1}{\gamma_1} \tanh^{-1} \left(\frac{Z_R}{Z_{C1}} \right) = x Z_1 \quad (14)$$

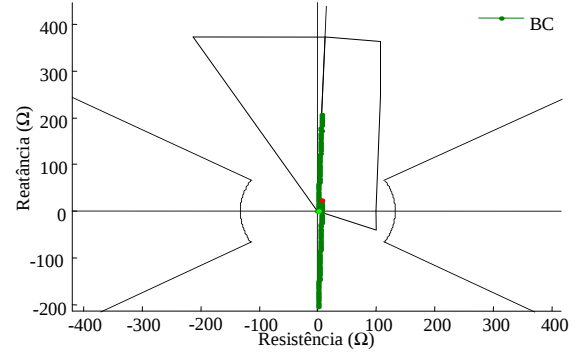
sendo Z_R^* a impedância vista pela proteção de distância não convencional.

Como k_I e k_2 dependem da distância até o ponto de falta, que é uma incógnita, em [5] foi proposta a adoção de valores constantes para tais parâmetros, calculados considerando a falta no final da LT. Trata-se de uma adoção viável para uma linha de 645 km, já que k_I e k_2 não variam significativamente ao longo dessa distância; no entanto, tal premissa não é válida para uma LT de $\lambda/2^+$ [4]. Carece-se ainda de uma solução prática para o uso de tais parâmetros, já que métodos iterativos demandariam de intenso esforço computacional – o que poderia comprometer a eficiência da proteção.

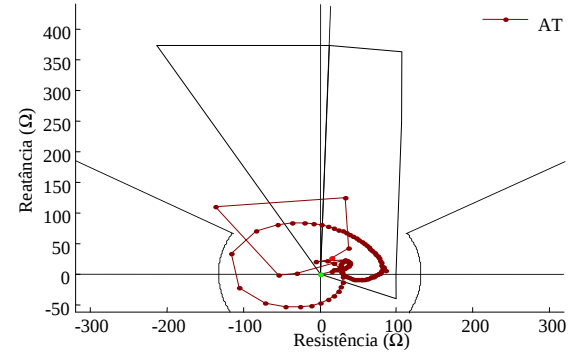
As impedâncias vistas pelas unidades AT e BC dos relés de distância não convencionais das linhas faltosa e sã para faltas AT e BC francas, respectivamente, são expostas na Fig. 6. Os parâmetros k_I e k_2 foram calculados para as localizações exatas dos defeitos, assumindo um conhecimento prévio.



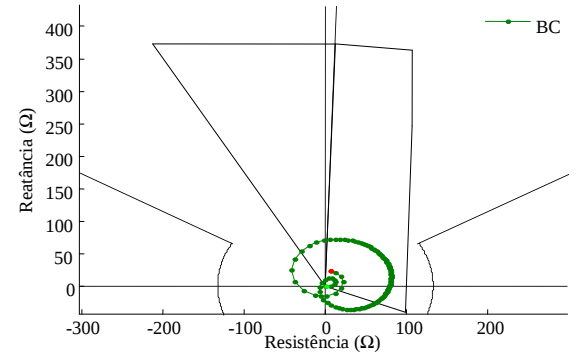
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6. Impedâncias vistas pelas unidades dos relés das linhas (a) (b) faltosa e (c) (d) sã: AT para faltas AT e BC para faltas BC.

As impedâncias vistas pela unidade BC do relé da linha faltosa são equivalentes a xZ_L para curtos-circuitos em até aproximadamente metade da extensão da LT, a partir de onde ocorre um deslocamento no plano $R-X$ que acarreta subbalcanes e sobrealcanes. Já a unidade AT do relé da linha faltosa enxerga impedâncias aparentes com desvios resistivos e reativos irregulares em relação a xZ_L (decorrentes do efeito do acoplamento mútuo entre as linhas), além da descontinuidade em $\lambda/4$.

Verifica-se que o relé da linha sã operaria simultaneamente para curtos-circuitos ao longo de trechos expressivos da linha faltosa, independentemente do tipo de falta.

A função complexa $\text{tgh}^{-1}(z)$ é dada por:

$$\text{tgh}^{-1}(z) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+z}{1-z} \right) = \frac{1}{2} \ln(w) \quad (15)$$

sendo

$$\frac{1}{2} \ln(w) = \frac{\ln|w|}{2} + i \left[\frac{\arg(w) + 2\pi k_{ln}}{2} \right] \quad (16)$$

$$k_{ln} = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

Conforme [14], a descontinuidade das impedâncias aparentes em $\lambda/4$ se deve ao fato de muitos softwares utilizarem a convenção $\arg(z) \in (-\pi; \pi]$. Caso se adotasse $\arg(z) \in (0; 2\pi]$, tal descontinuidade não ocorreria. Assim, é possível determinar o valor de k_{ln} de forma a se obter uma equivalência entre as impedâncias aparentes e xZ_L ao longo de toda a LT.

Definindo k_{ln} igual a 1 quando de impedâncias deslocadas no plano $R-X$, calculando k_1 e k_2 para as localizações exatas dos defeitos e assumindo tais parâmetros constantes para falta a 60° elétricos do extremo emissor (curvas AT_K), na Fig. 7 são exibidas as impedâncias vistas pelas unidades do relé de distância não convencional da linha faltosa: BC para faltas BC francas; AT para faltas AT francas e com resistência de falta (R_F) igual a 50Ω ; e AT para faltas ABC com $R_F = 10 \Omega$.

Para faltas francas, são notados desempenhos aceitáveis mesmo nos casos com k_1 e k_2 constantes, levando à inferência de que a proteção de distância não convencional poderia ser aplicada diretamente em LTs paralelas de $\lambda/2^+$ com a utilização de um algoritmo de seleção de fases apropriado. Contudo, o uso de k_1 e k_2 constantes torna a proteção, a qual já é consideravelmente sensível em relação ao ponto de falta determinado, sensível também ao carregamento pré-falta e à relação entre a impedância de fonte e a impedância da linha, não sendo recomendado. Para faltas AT com $R_F = 50 \Omega$, é observado um desempenho aceitável. Entretanto, para defeitos ABC com $R_F = 10 \Omega$, a unidade de detecção subbalcança um trecho próximo ao extremo emissor, o que compromete a eficácia do esquema de proteção.

Na Fig. 8 são mostrados os perfis dos módulos das tensões e correntes vistas na barra do relé da linha faltosa para faltas ABC francas e com $R_F = 10 \Omega$ aplicadas ao longo de $\lambda/2^+$.

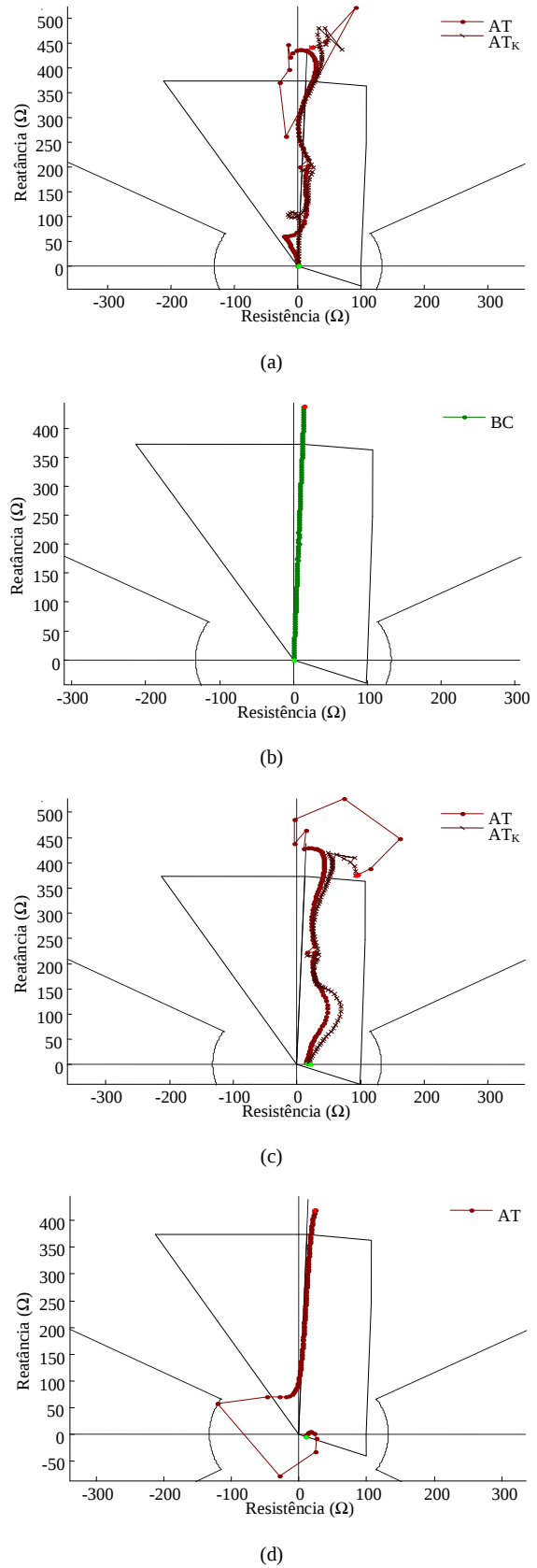


Fig. 7. Impedâncias vistas pelas unidades do relé da linha faltosa: (a) AT para faltas AT francas, (b) BC para faltas BC francas, (c) AT para faltas AT com $R_F = 50 \Omega$ e (d) AT para faltas ABC com $R_F = 10 \Omega$.

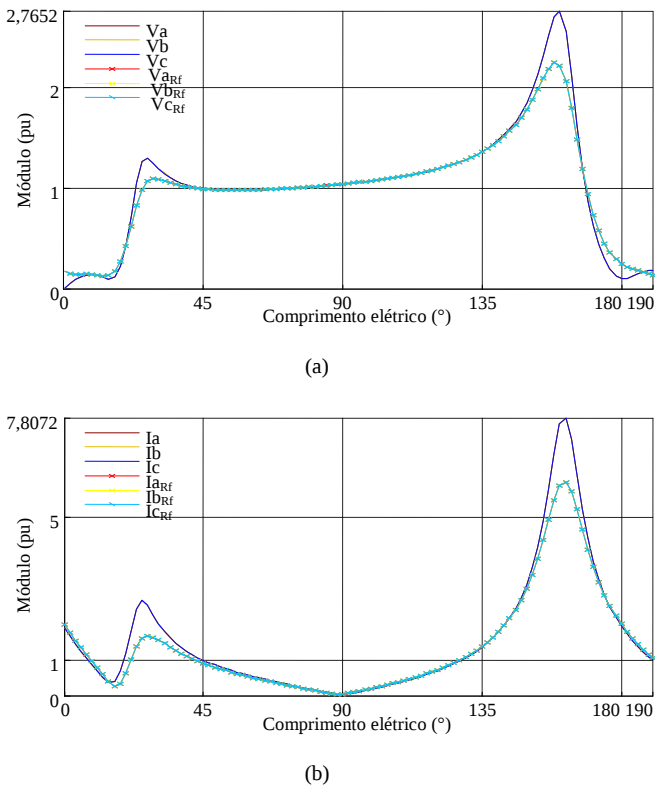


Fig. 8. Perfis das (a) tensões e (b) correntes vistas na barra do relé da linha faltosa para curtos-circuitos ABC ao longo de $\lambda/2^+$.

Quando de defeitos no trecho de aproximadamente 14,4 a 19,8° elétricos (≈ 195 a 268 km), verifica-se um aumento do módulo da tensão e uma redução do módulo da corrente ao se inserir a resistência de falta. Ademais, são notadas peculiaridades como picos das grandezas em aproximadamente 27 e 160° elétricos, sendo estes bem mais pronunciados no segundo, e correntes drasticamente reduzidas (0,03 pu) em 90° elétricos.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a influência do acoplamento mútuo de sequência zero entre LTs paralelas de $\lambda/2^+$ no desempenho da proteção de distância não convencional. Além da descontinuidade em $\lambda/4$, para faltas AT francas, as impedâncias vistas pela unidade AT do relé da linha faltosa apresentaram deslocamentos resistivos e reativos irregulares em relação às impedâncias de sequência positiva reais. Verificou-se que o relé da linha sã operaria simultaneamente para curtos-circuitos ao longo de trechos expressivos da linha faltosa. Ajustando k_{in} quando de impedâncias aparentes deslocadas, foram obtidos desempenhos aceitáveis inclusive para casos com k_1 e k_2 constantes – sendo tal adoção não recomendada. Todavia, ao se variar a resistência de falta, foi observado um subbalcance das unidades de detecção para faltas envolvendo mais de uma fase em um trecho próximo ao extremo emissor, o que compromete a aplicação de tal

proteção em LTs paralelas de $\lambda/2^+$.

AGRADECIMENTOS

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

O autor agradece ao professor Clever Pereira.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Portela e M. Alvim, “Soluções não convencionais em CA adequadas para transmissão a distância muito longa: uma alternativa para o sistema de transmissão da Amazônia”, in *Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância*, Recife, 2007, pp. 1-30.
- [2] F. S. Prabhakara, K. Parthasarathy e H. N. Ramachandra Rao, “Analysis of natural half-wave-length power transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 12, pp.1787-1794, dez. 1969.
- [3] Robson Francisco da Silva Dias, “Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivos de eletrônica de potência”, Doutor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [4] Bernard Fernandes Küsel, “Proteção de linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda”, Mestre, Universidade de Brasília, 2014.
- [5] Z. Y. Xu, S. F. Huang, Li Ran, J. F. Liu, Y. L. Qin, Q. X. Yang, e J. L. He, “A distance protection relay for a 1000-kV UHV transmission line”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp.1795-1804, out. 2008.
- [6] Rubens Dario Fuchs, *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas*. Rio de Janeiro: LTC, 1977.
- [7] Robson Dias, Antonio Lima, Carlos Portela e Maurício Aredes, “Extra long-distance bulk power transmission”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1440-1448, jul. 2011.
- [8] General Electric Company, *Transmission line reference book: 345 kV and above*. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1982.
- [9] ONS - Sistema interligado. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2014.
- [10] Clever Pereira, *Redes elétricas no domínio da frequência: técnicas de análise, modelos de componentes, técnicas computacionais*. São Paulo: Artliber, 2015.
- [11] Ning Kang e Yuan Liao, “Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines”, in: *Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6.
- [12] Siemens, “SIPROTEC: distance protection 7SA6”, Siemens, Nürnberg, 2011.
- [13] Acáz Ferreira Martins, “Filosofia e critérios para ajuste de proteção de linhas de transmissão com base em um caso real”, Especialista, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- [14] Renzo G. Fabián E. e M. C. Tavares, “Distance protection for half wavelength transmission lines”, in: *International Conference on Power Systems Transients*, 11., Cavtat, 2015, pp. 1-6.