



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/12
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

**Proteção de Distância Não Convencional Aplicada às
Linhas de Transmissão com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda**

Bernard Fernandes Küsel (*)

Universidade de Brasília

Felipe Vigolvinho Lopes

Universidade Federal
de Campina Grande

Kleber Melo e Silva

Universidade de Brasília

RESUMO

Muitos têm sido os estudos voltados para buscar soluções para a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias. Uma alternativa que vem sendo bastante discutida são as linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. Contudo, muito pouco foi discutido com respeito à proteção deste tipo de linha. Em estudos preliminares, verificou-se que a atuação da proteção de distância convencional não é adequada. Nesse sentido, apresenta-se nesse trabalho uma nova formulação para a proteção de distância, que considera o modelo π -exato da linha de transmissão. Os resultados obtidos são bastante promissores, indicando a possibilidade da adoção no futuro dessa alternativa de proteção para as linhas de um pouco mais de meio comprimento de onda.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de distância, transmissão de energia não-convencional, meia onda.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estima-se que mais da metade do potencial hidráulico do Brasil se encontra na região Norte do país e que menos de 1% do potencial hidráulico da bacia hidrográfica do Amazonas tenha sido explorado [1]. Concomitantemente, a demanda energética brasileira cresce em torno de 4,8% anualmente, o que torna a exploração energética da bacia amazônica estratégica para o desenvolvimento do país [2]. Para isso, faz-se necessário um meio de transmitir a energia gerada em hidrelétricas na região Norte para as grandes cargas nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, que se encontram a aproximadamente 2500 km das novas usinas da bacia amazônica. Para tanto, diferentes soluções têm sido estudadas, a exemplo da transmissão em linhas de corrente contínua, constituindo o tipo de solução mais empregado nessas situações. Alternativamente, uma estratégia que vem se mostrando economicamente viável é a chamada linha de transmissão de corrente alternada com comprimento de um pouco mais de meia onda (2600 km). Esta configuração de linha de transmissão tem características bastante vantajosas, pois não requer compensação em derivação ou série e nem subestações intermediárias, tendo, assim, um custo muito reduzido e um menor impacto ambiental em relação a outras soluções [2].

Seja qual for a alternativa adotada para transmitir a energia gerada nas usinas hidroelétricas na região Norte para os grandes centros de carga nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste, faz-se necessário analisar, sobre diversos aspectos, o impacto da sua inserção no Sistema Interligado Nacional (SIN). No caso de linhas de um pouco mais de meia onda, estudos mostram que a depender de sua configuração elas não raro podem atingir a capacidade de transmissão da ordem de 9 GW para o nível de tensão de 1000 kV. Notadamente, a entrada em operação de uma linha desse tipo acarretaria um aumento significativo da complexidade operacional do SIN, exigindo, dentre outras coisas, a utilização de modernos sistemas de proteção, a fim de garantir que faltas sejam extintas rápida e apropriadamente. Assim, preservar-se-ia a integridade dos equipamentos e evitar-se-ia o desencadeamento de *blackouts* de energia de grandes proporções.

2.0 - OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do trabalho é apresentar uma nova formulação da proteção de distância em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda. Como objetivos específicos, têm-se:

- Revisar os problemas encontrados no uso da proteção de distância convencional.
- Avaliar o desempenho de uma formulação alternativa da proteção de distância.
- Apresentar os desafios a serem superados para a adoção desta nova estratégia de proteção.

(*) SIA Sul – Área de Serviços Públicos – Lote A (ONS) CEP 71215-000 Brasília, DF, Brasil
Tel: (+55 61) 3362-5281 – Cel: (+55 61) 9638-1107 – Email: kuselbernard@gmail.com

3.0 - BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, as primeiras publicações acerca da transmissão de energia em pouco mais de meio comprimento de onda datam da década de 80. Mais recentemente, diferentes questões têm sido analisadas no âmbito de projetos estratégicos da ANEEL: otimização da geometria das torres e dos seus condutores; operação em regime permanente [3]; utilização de dispositivos FACTS [4, 5], além de um ensaio de energização utilizando linhas do SIN conectadas de tal forma a atingir um tamanho de um pouco mais de meio comprimento de onda [6].

Apesar de muito já ter sido estudado sobre linhas com pouco mais de meio comprimento de onda, muito pouco foi avaliado a respeito do seu sistema de proteção. De fato, sabe-se que o comportamento das correntes e tensões durante curtos-circuitos nesse tipo de linha podem ser bastante diferentes dos observados em linhas com dimensões convencionais, o que pode afetar significativamente a operação dos relés que a monitoram.

Em [7], apresentamos resultados da análise do desempenho da proteção de distância convencional empregada às linhas de um pouco mais de meia onda. Constatamos que a impedância aparente vista pelo relé apresenta um comportamento muito diferente do obtido para linhas de tamanho convencional, o que corrobora com os resultados apresentados por Wedepohl & Mohamed [8]. De fato, o relé de distância convencional não identifica curtos-circuitos em boa parte da extensão da linha, não podendo, portanto, ser utilizado na proteção desse tipo de linha.

Em [9] foi proposta uma nova formulação para a proteção de distância que se baseia no modelo π -exato da linha de transmissão. Os autores afirmam que ela seria utilizada como a principal função de proteção em uma linha de 1000 kV e 650 km em operação na China. Os resultados indicam erros menores que os observados para formulação tradicional. Todavia, a formulação apresentada não foi testada em linhas com comprimentos superiores a 650 km, sendo esta a principal motivação para a realização do estudo apresentado neste trabalho.

4.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA MEIA ONDA

No sistema elétrico brasileiro, a frequência fundamental é de 60 Hz. Em uma dada linha de transmissão, o comprimento de onda das tensões e correntes pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

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

sendo β a parte imaginária da constante de propagação da linha γ , dada por:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta, \quad (2)$$

sendo R , L , G e C a resistência série, reatância série, condutância *shunt* e capacitância *shunt* da linha, respectivamente, por unidade de comprimento. Em linhas sem perdas, a parte real de γ é nula e $\beta = \omega\sqrt{LC}$, de forma que (1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{LC}} \approx \frac{c}{f}, \quad (3)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo. Dessa forma, o comprimento de onda para uma linha sem perdas em um sistema com frequência de 60 Hz é 5000 km, de modo que uma linha com meio comprimento de onda teria 2500 km. No entanto, existe no exato meio comprimento de onda um ponto de singularidade, para o qual pequenas variações na operação podem levar a aberturas angulares no terceiro quadrante e, conseqüentemente, à instabilidade do sistema. Dessa forma, a recomendação é que a linha tenha em torno de 190 graus elétricos (aproximadamente 2600 km) [2].

4.1 Características de tensão e corrente ao longo da linha para diferentes condições de carregamento

De forma a avaliar o perfil da corrente e tensão ao longo da linha para diferentes níveis de carregamento, o quadripolo que considera o modelo π -exato da linha pode ser utilizado:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}(x) \\ \hat{I}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_e \\ \hat{I}_e \end{bmatrix}, \quad (4)$$

na qual $\hat{V}(x)$ e $\hat{I}(x)$ representam a tensão e corrente de sequência positiva a x km do terminal emissor.

As Figuras 1 e 2 mostram o módulo e fase, respectivamente, das tensões e correntes ao longo da linha para diferentes condições de carregamento com fator de potência unitário, tomando-se a potência característica (P_c) da linha como potência base. Conclui-se da análise dessas figuras que, independente do carregamento da linha:

- O módulo da tensão no terminal remoto é sempre aproximadamente igual a do terminal local.
- O módulo da corrente no terminal remoto é sempre aproximadamente igual a do terminal local.
- O módulo da corrente em $\lambda/4$ é sempre aproximadamente igual a 1 pu.
- Os ângulos da tensão e corrente no terminal remoto são sempre atrasados em aproximadamente 180 graus dos respectivos ângulos no terminal local.
- O comportamento da corrente no terminal local e remoto evidenciam a existência de uma elevada corrente capacitiva na linha.

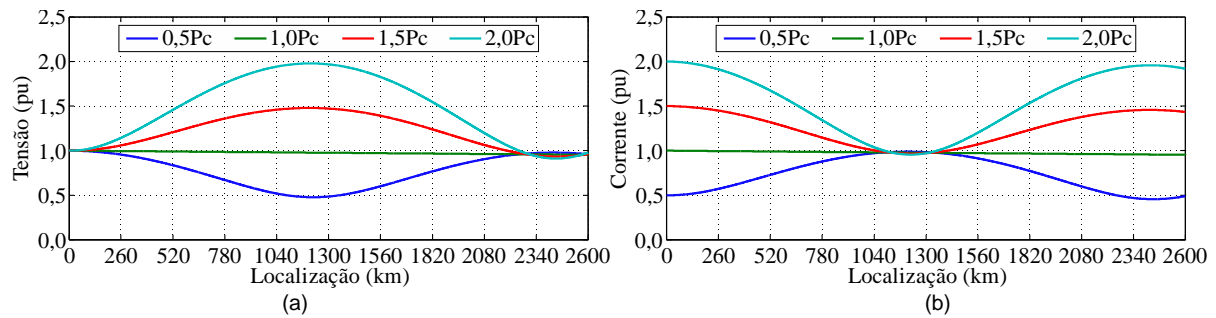


FIGURA 1 - Perfil dos módulos de (a) tensão e (b) corrente ao longo de uma linha de 2600 km para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário.

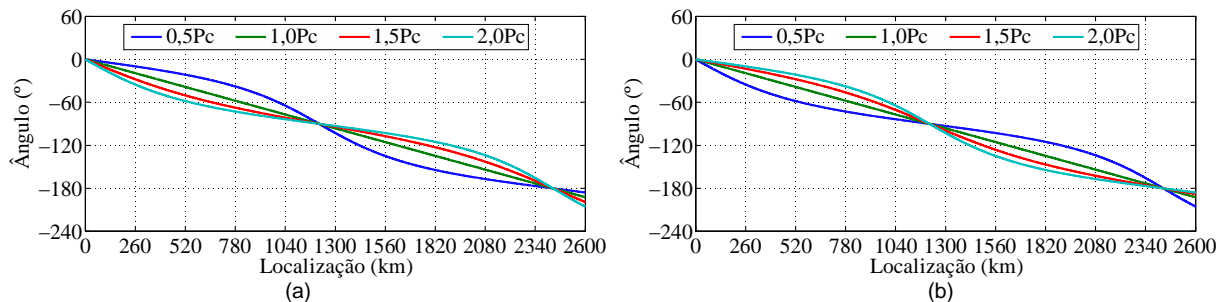


FIGURA 2 - Perfil dos ângulos de (a) tensão e (b) corrente ao longo de uma linha de 2600 km para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário.

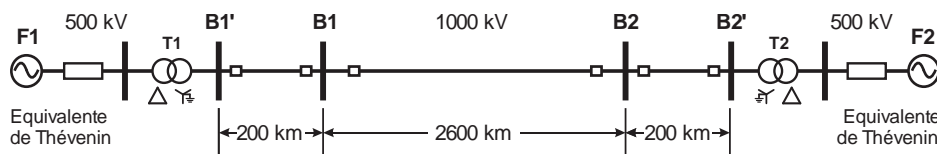


FIGURA 3 - Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado.

Estudos mais aprofundados sobre as propriedades deste tipo de linha de transmissão podem ser encontrados em referências específicas sobre o tema [1-6].

5.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA MODELADO

Nos estudos realizados neste trabalho, utilizou-se a geometria de torre e condutores propostos por Dias et. al [5]. São utilizados 12 condutores por fase e dois cabos para-raios, possibilitando a transmissão de até 8 GW por 2600 km na tensão nominal de 1000 kV.

A fim de tornar as análises mais consistentes, foram utilizados parâmetros de sistemas elétricos reais nas simulações. Os equivalentes de Thévenin nas barras de Xingu e Nova Iguaçu, pontos de conexão da futura linha CC para integração da usina de Belo Monte ao SIN, foram obtidos a partir do caso base ANAFAS de 2021 da EPE. Eles foram conectados a bancos de transformadores que elevam a tensão de 500 kV para 1000 kV. Como não existem transformadores com estas características em operação, seus parâmetros foram baseados nos de outros existentes. Linhas de 200 km com os mesmos parâmetros da proposta em [5] foram adicionadas a montante e a jusante da linha analisada, a fim de avaliar a proteção para faltas externas. O diagrama unifilar do sistema é ilustrado na Figura 3. Um resumo desses dados, assim como os parâmetros eletromagnéticos da linha são apresentados na Tabela 1. Todas as análises neste trabalho são relacionadas a um relé instalado na Barra 1.

Nas simulações realizadas, as fontes de tensão foram ajustadas de forma que, na pré-falta, fluísse pela linha de meia onda uma potência igual a sua potência característica e a tensão na Barra 1 fosse igual a 1 pu com fase 0 graus. A solução de regime permanente do ATP foi utilizada para se obter os fasores de cada grandeza para cada situação de curto, ao invés de se aplicar algoritmos de estimação de fasores aos sinais. Uma rotina auxiliar, desenvolvida em linguagem C++, foi utilizada para variar automaticamente a localização da falta a partir de um arquivo ATP base, simular todos os casos e compilar os resultados de interesse dos arquivos *.lis em um único arquivo de saída.

6.0 - PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA CONVENCIONAL EM LINHAS DE MEIA ONDA

Para analisar o desempenho da proteção de distância convencional em linhas com pouco mais de meio comprimento de onda, simulamos faltas francas AT e ABC ao longo da linha. As tensões e correntes na Barra 1 foram consideradas como entradas para um relé instalado naquele ponto. As grandezas usadas em cada unidade de impedância do relé são listadas na Tabela 2. Optamos por fazer as análises diretamente com as grandezas de tensão e corrente primárias, evitando os erros inerentes aos transformadores para instrumento.

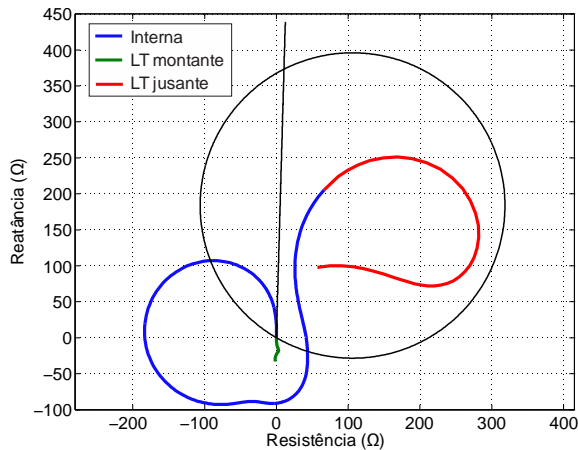
TABELA 1 – Parâmetros do sistema elétrico utilizado nas simulações

Linha de Transmissão						Sistema Elétrico				
Impedâncias e Admitâncias						Impedâncias Equivalentes das Fontes				
Sequência Zero			Sequência Positiva			Fonte	Sequência Zero (Ω)		Sequência Positiva (Ω)	
R_0	X_0	B_0	R_1	X_1	B_1	F1	1,682 + j9,076		0,164 + j6,734	
(Ω/km)	(Ω/km)	($\mu S/km$)	(Ω/km)	(Ω/km)	($\mu S/km$)	F2	2,970 + j15,000		0,563 + j11,746	
0,2856	1,2374	3,4873	0,0048	0,1689	9,8727					
Parâmetros Eletromagnéticos						Pa âmetros dos Transformadores				
$\gamma(km^{-1})$			0,018 + j1,291			Transformador	X_T (%)	Tensão (kV)	Potência (MVA)	
$Z_c(\Omega)$			130,81 – j1,858			T_1	12,0	500/1000	5 x 2000	
$P_C(MVA)$			7.643,90			T_2	12,0	500/1000	5 x 2000	
$v(km/s)$			291.913,71							
$\lambda(km)$			4.865,23							
$\lambda/2(km)$			2.432,61							

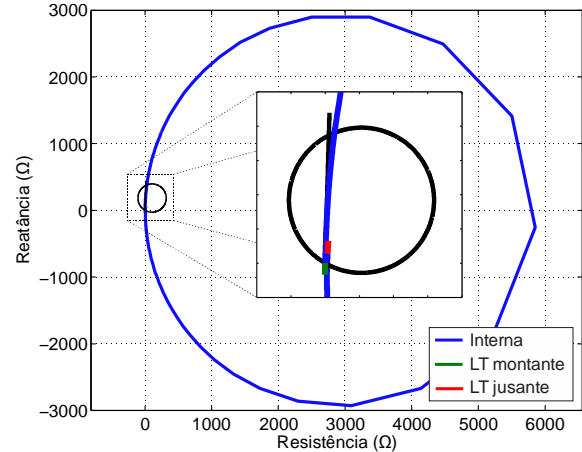
TABELA 2 - Sinais de entrada para as unidades de impedância do relé de distância.

Unidade	Sinal de Tensão	Sinal de Corrente	Unidade	Sinal de Tensão	Sinal de Corrente
Z_{AT}	\hat{V}_a	$\hat{I}_a + K_0 \hat{I}_0$	Z_{AB}	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
Z_{BT}	\hat{V}_b	$\hat{I}_b + K_0 \hat{I}_0$	Z_{BC}	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
Z_{CT}	\hat{V}_c	$\hat{I}_c + K_0 \hat{I}_0$	Z_{CA}	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}$$



(a)



(b)

FIGURA 4 – Impedância vista pela unidade AT da proteção de distância convencional para faltas (a) AT e (b) ABC ao longo da linha de meia onda e das linhas a montante e a jusante.

Nas Figuras 4a e 4b, podem ser observadas as impedâncias vistas pela unidade AT do relé de distância para as faltas AT e ABC simuladas, respectivamente. Como referência, uma característica mho autopolarizada com impedância de alcance igual a $Z_N = 0,85 \cdot 2600 \cdot (R_1 + jX_1)$ e ângulo de torque máximo igual a $\tau = 60^\circ$ foi adicionada às figuras. Em ambos os casos, dois problemas graves são evidenciados:

- Faltas internas em grande parte da extensão da linha são vistas como externas (ou mesmo reversas), de modo que não sensibilizam a proteção.
- Faltas na linha a jusante são vistas como internas e sensibilizam a proteção em 1ª Zona.

Considerando que esse comportamento é causado pela forma como a impedância é calculada, o uso de diferentes características de operação ou estratégias de teleproteção não seriam suficientes para garantir uma operação confiável e segura do relé de proteção. Análises mais aprofundadas sobre a proteção de distância convencional em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda podem ser vistas em [7].

7.0 - PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA NÃO-CONVENCIONAL

O comportamento incomum das impedâncias medidas pela proteção de distância convencional pode ser explicado pelo fato de que, na sua formulação, a linha é considerada como curta, desprezando-se o efeito capacitivo entre os



FIGURA 5 – (a) Modelo de linha curta – usado com base para proteção de distância convencional; (b) Modelo de linha longa – usado como base para proteção de distância não-convencional.

TABELA 3 - Sinais de entrada para as unidades de impedância do relé de distância não-convencional.

Unidade	Sinal de Tensão	Sinal de Corrente	Unidade	Sinal de Tensão	Sinal de Corrente
Z_{AT}	$\hat{V}_a + K_U \hat{V}_0$	$\hat{I}_a + 3K_I \hat{I}_0$	Z_{AB}	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$
Z_{BT}	$\hat{V}_b + K_U \hat{V}_0$	$\hat{I}_b + 3K_I \hat{I}_0$	Z_{BC}	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$
Z_{CT}	$\hat{V}_c + K_U \hat{V}_0$	$\hat{I}_c + 3K_I \hat{I}_0$	Z_{CA}	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$

condutores e a terra, como mostra a Figura 5a. Todavia, por ser muito longa e, conseqüentemente, apresentar forte efeito capacitivo, certamente não é apropriado representar a linha avaliada como tal.

Uma possível solução para essa questão seria re-equacionar a proteção de distância, partindo da premissa que a linha é longa, utilizando o modelo π -exato ilustrado na Figura 5b. Uma formulação alternativa que considera isso foi proposta por Xu et. al [9], para ser utilizada na proteção de uma linha de 650 km que opera em 1000 kV na China.

7.1 Descrição do Algoritmo

A fim de descrever de forma sucinta o algoritmo proposto por Xu et. al [9], primeiro definem-se as variáveis:

$$k_1 = \frac{\cosh(\gamma_0 d)}{\cosh(\gamma_1 d)} \quad k_2 = \frac{\sinh(\gamma_0 d)}{\sinh(\gamma_1 d)} \quad (5)$$

$$K_U = k_1 - 1 \quad K_I = \frac{k_2 Z_{C0} - Z_{C1}}{3Z_{C1}} \quad (6)$$

nas quais γ_0 e γ_1 são as constantes de propagação de sequência zero e sequência positiva da linha, respectivamente, Z_{C0} e Z_{C1} são as impedâncias de surto de sequência zero e sequência positiva da linha, respectivamente, e d é a localização do defeito.

O algoritmo se baseia em duas etapas:

1ª etapa: Calcular as impedâncias vistas por cada unidade com base nos sinais apresentados na Tabela 3.

2ª etapa: Corrigir cada uma das unidades de impedância através da expressão:

$$Z_{mn}^* = \frac{Z_1}{\gamma_1} \operatorname{atanh} \left(\frac{Z_{mn}}{Z_{C1}} \right), \quad (7)$$

sendo Z_{mn} a impedância medida pelo relé e Z_{mn}^* a impedância aparente corrigida.

O algoritmo proposto por Xu et. al [9], apesar de simples, possui um inconveniente: os parâmetros k_1 e k_2 dependem da localização do defeito, que não é conhecida *a priori*. Para a linha de 650 km analisada em [9], os autores sugerem usar valores constantes para esses parâmetros, calculados considerando que a falta ocorre no final da linha de transmissão. Para o caso da linha de 650 km essa premissa é válida, já que k_1 e k_2 variam relativamente pouco para faltas ao longo da linha, como mostrado na Figura 6a. Entretanto, para a linha com pouco mais de meio comprimento de onda analisada, não é possível usar esse critério, já que k_1 e k_2 variam muito a depender da localização da falta, conforme mostrado na Figura 6b. Dessa forma, por simplicidade, vamos assumir o conhecimento prévio do valor exato desses parâmetros para cada ponto de defeito antes da execução do algoritmo de proteção propriamente dito.

7.2 Aplicação do algoritmo em linha de até 1000 km

Para avaliar o desempenho da proteção de distância não-convencional, simulamos inicialmente curtos-circuitos ABC francos ao longo de uma linha de 1000 km operando em 500 kV. A impedância vista pela unidade AT calculada pelo método tradicional e pelo método proposto por Xu et. al [9] são ilustradas nas Figuras 7a e 7b, respectivamente. Percebe-se que, ao utilizar o algoritmo da proteção não-convencional, a impedância vista pelo relé é exatamente igual à impedância de sequência positiva da linha.

7.3 Aplicação do algoritmo na linha de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda

Para avaliar o desempenho da proteção de distância não-convencional em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda, usamos os mesmos sinais simulados nos estudos de caso apresentados na Seção 6 como entradas para o algoritmo. As impedâncias vistas pela unidade AT do relé de distância para as faltas AT e ABC simuladas podem ser vistas nas Figuras 8a e 8b, respectivamente.

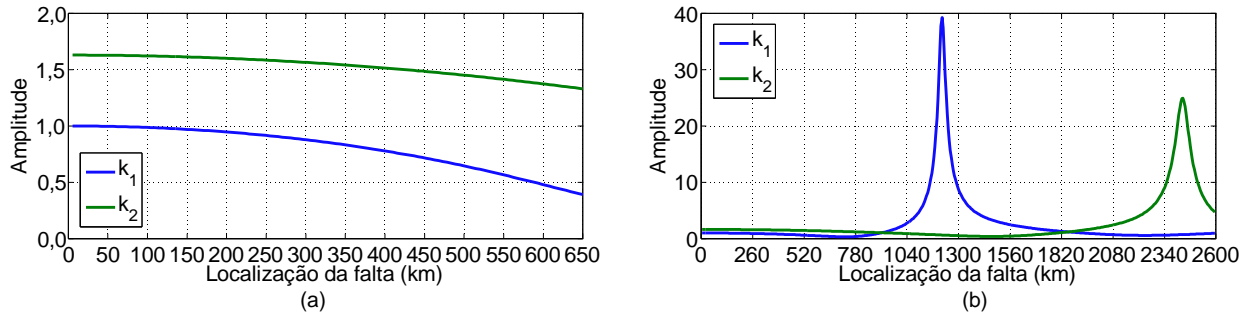


FIGURA 6 – Parâmetros k_1 e k_2 ao longo de uma linha de (a) 650 km e (b) 2600 km.

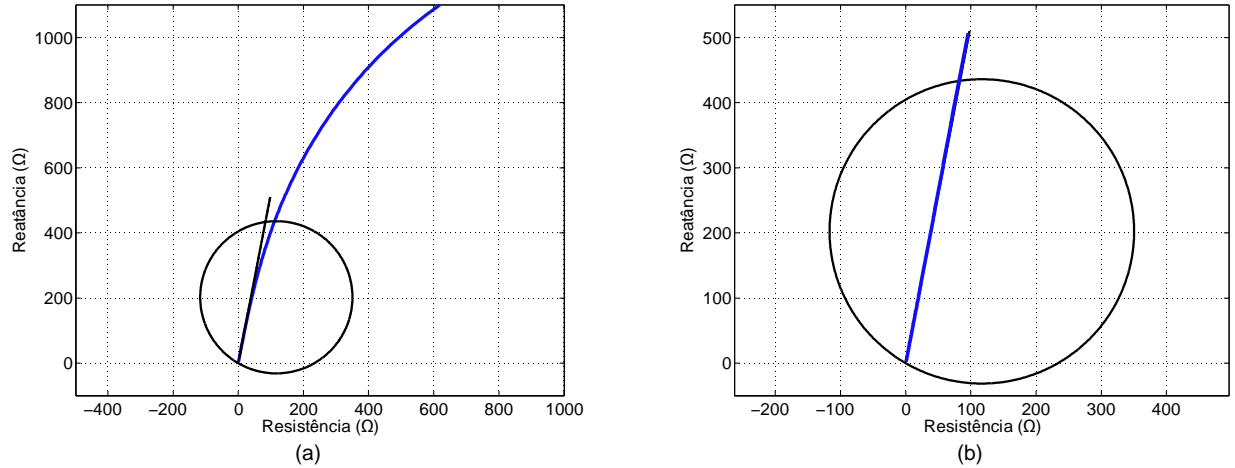


FIGURA 7 – Impedância vista pela unidade AT da (a) proteção de distância convencional e (b) proteção de distância não-convencional para faltas ABC ao longo de uma linha de 1000 km operando em 500 kV.

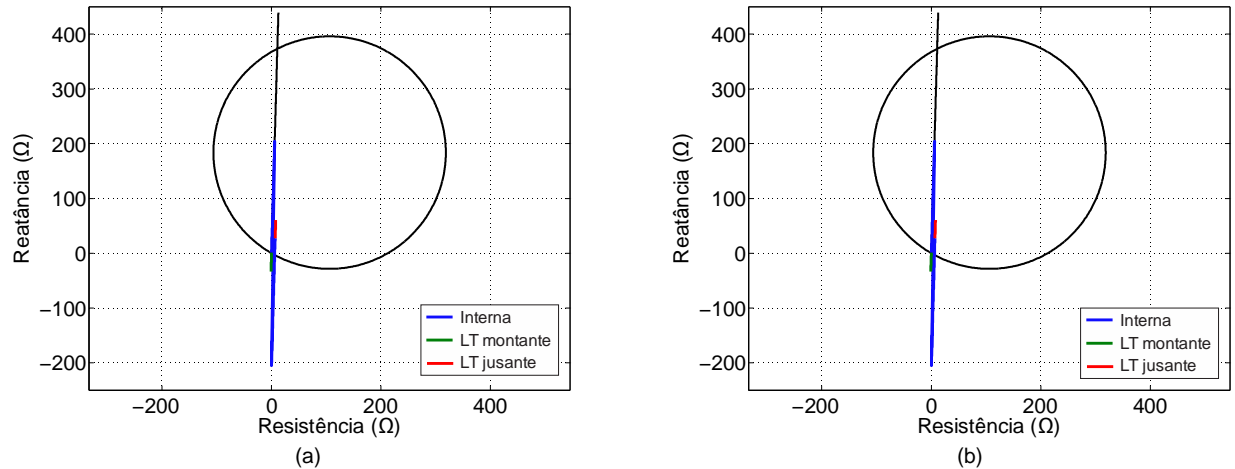


FIGURA 8 – Impedância vista pela unidade AT da proteção de distância não-convencional para faltas (a) AT e (b) ABC ao longo da linha de meia onda e das linhas a montante e a jusante.

Percebe-se que, a partir de um determinado ponto, a impedância vista é deslocada no diagrama R-X, levando à conclusão que a proteção de distância não-convencional não pode ser aplicada diretamente em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda.

Ao plotar uma das Figuras 8 de forma mais conveniente (Figura 9) – mostrando apenas a impedância de sequência positiva da linha e a impedância vista pelo relé para faltas internas –, percebe-se que o fenômeno ocorre para faltas em localizações superiores a $\lambda/4$ km e que o deslocamento pode ser representado por uma impedância erro igual a $Z_{erro} = R_1 \cdot \lambda/4 + jX_1 \cdot \lambda/2$. Com isso, para adequar a proteção de distância não-convencional proposta por Xu et. al [9] às linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda, deve-se identificar variáveis capazes de indicar que uma dada impedância medida pelo relé deve ser corrigida (identificar quando $d \geq \lambda/4$), somando-se a ela a impedância Z_{erro} .

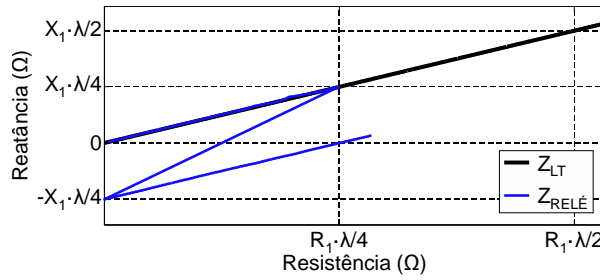


FIGURA 9 – Impedância de sequência positiva da linha e impedância vista pela unidade AT da proteção de distância não-convencional para faltas internas.

8.0 - MÉTODO DE CORREÇÃO PROPOSTO

8.1 Descrição do método

O método proposto se baseia na análise da impedância corrigida Z_{mn}^* em p.u. dada por:

$$Z_{mn}^{pu} = \frac{Z_{mn}^*}{Z_1} = \frac{Z_{mn}^*}{(R_1 + jX_1)L} = Re\{Z_{mn}^{pu}\} + jIm\{Z_{mn}^{pu}\}, \quad (8)$$

sendo L o comprimento da linha com pouco mais de meio comprimento de onda.

Para curtos-circuitos francos em linhas convencionais, $Re\{Z_{mn}^{pu}\}$ equivale à distância em p.u. entre o relé e o ponto de falta, sendo $Im\{Z_{mn}^{pu}\}$ desprezível. Porém, para as linhas com pouco mais de meio comprimento de onda, os valores de $Re\{Z_{mn}^{pu}\}$ e $Im\{Z_{mn}^{pu}\}$ apresentam, respectivamente, deslocamentos de aproximadamente Δdr e Δdi para faltas a distâncias maiores que $\lambda/4$ km do relé em estudo (Figuras 10). Uma vez que tal comportamento se deve unicamente à influência de Z_{erro} , é possível obter analiticamente as expressões para cálculo dos valores de Δdr e Δdi :

$$Z_{erro}^{pu} = \frac{Z_{erro}}{Z_1} = \frac{\frac{\lambda}{2} \left(\frac{R_1^2}{2} + X_1^2 \right)}{(R_1^2 + X_1^2)L} + j \frac{\frac{\lambda}{4} (R_1 \cdot X_1)}{(R_1^2 + X_1^2)L} = \Delta dr + j\Delta di. \quad (9)$$

De posse de (9), elaboramos uma estratégia para correção da impedância vista pelo relé de distância não-convencional, a qual consiste no conjunto de regras descritas a seguir:

$$Z_{relé} = \begin{cases} Z_{mn}^*, & \text{se } |Im\{Z_{mn}^{pu}\}| < 0,5\Delta di \\ Z_{mn}^* + Z_{erro}, & \text{se } |Im\{Z_{mn}^{pu}\}| \geq 0,5\Delta di \end{cases} \quad (10)$$

onde $Z_{relé}$ é a impedância aparente final a ser analisada pelo sistema de proteção de distância.

8.2 Aplicação do método

Os resultados da aplicação do método de correção proposto aos casos apresentados na Seção 6 podem ser vistos nas Figuras 11. Percebe-se que o deslocamento proveniente de Z_{erro} é corrigido de forma adequada, fazendo com que a impedância vista pelo relé passe a ser exatamente igual à impedância de sequência positiva da linha.

9.0 - CONCLUSÕES E DESAFIOS PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho mostra uma sequência dos estudos relativos à proteção de linhas de transmissão que consistiram na sua fundamentação teórica, na apresentação dos problemas encontrados com a proteção de distância convencional, da verificação dos erros de um algoritmo de proteção de distância não-convencional para linhas com comprimentos superiores a $\lambda/4$ e, por fim, da proposição de um método para corrigir tais erros.

Percebemos que os esquemas de proteção tradicionais não serão capazes de garantir segurança e confiabilidade na operação dos relés em linhas de transmissão com pouco mais de meio comprimento de onda, mas que, com o uso de soluções não-convencionais, talvez seja possível alcançar esse objetivo, o que é fundamental para a implantação da tecnologia no futuro. Os desafios que vislumbramos que ainda devem ser superados são:

- Avaliar o método proposto para diferentes condições de carregamento e resistência de falta.
- Desenvolver uma solução prática para uso dos parâmetros k_1 e k_2 .
- Avaliar a influência do acoplamento magnético em linhas de circuito duplo sobre o algoritmo.

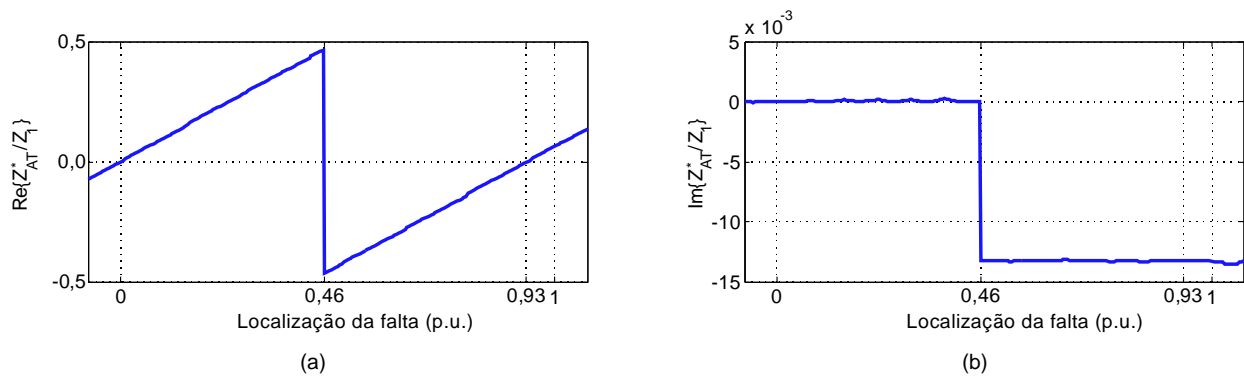


FIGURA 10 – Partes (a) real e (b) imaginária da impedância corrigida em p.u. vista pela unidade AT da proteção de distância não-convencional para faltas AT ao longo da linha de meia onda e das linhas a montante e a jusante.

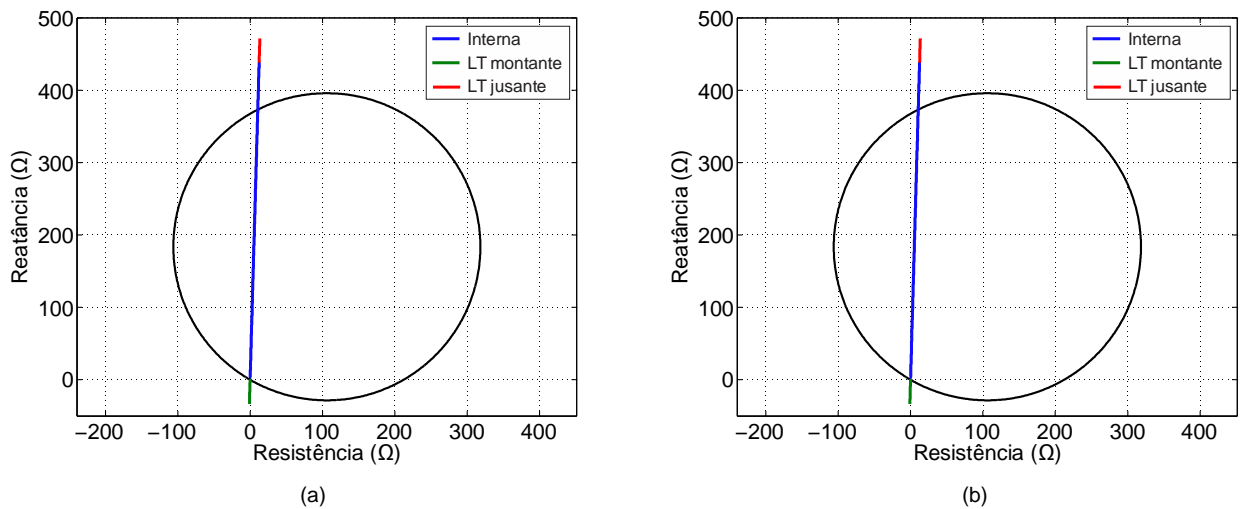


FIGURA 11 – Impedância vista pela unidade AT da proteção de distância não-convencional para faltas (a) AT e (b) ABC ao longo da linha de meia onda e das linhas a montante e a jusante.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VIDIGAL, R. F. Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante a manobra de energização. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, Agosto 2010.
- [2] PORTELA, C.; ALVIM, M. Soluções não convencionais em ca adequadas para transmissão a distância muito longa - uma alternativa para o sistema de transmissão da amazônia. Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância, Recife, PE, 2007.
- [3] SANTOS, M. L. Avaliação do desempenho de linhas de transmissão de energia elétrica de meia onda. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, Setembro 2010.
- [4] DIAS, R. F. S. Derivação ou injeção de energia em uma linha de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda por dispositivos de eletrônica de potência. Tese de Doutorado, Março 2008.
- [5] DIAS, R. ; LIMA, A. ; PORTELA, C. ; AREDES, M. Extra long-distance bulk power transmission. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(3):1440-1448, Julho 2011.
- [6] GOMES, E. C.; TAVARES, M. C. Analysis of the energization test of a half-wavelength ac link composed of similar transmission lines. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Março, 2011.
- [7] KÜSEL, B. F.; SILVA, K. M.; MOLAS, E. C. Pode a Função de Distância Ser Utilizada na Proteção de Linhas de Transmissão com Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda?. XI Seminário Técnico de Proteção e Controle (STPC). Florianópolis, SC. Novembro, 2012.
- [8] WEDEPOHL, L. M.; MOHAMED, S. E. T., Apparent Impedances of Very Long Multiconductor Transmission Lines. Proc. IEE, vol. 117, no. 7, July 1970.
- [9] XU, Z.Y. ; HUANG, S.F. ; RAN, L. ; LIU, J.F. ; QIN, Y.L. ; YANG, Q.X. ; HE, J.L. A Distance Protection Relay for a 1000-kV UHV Transmission Line. IEEE Transactions on Power Delivery, 23(4): 1795-1804, Outubro 2008.

11.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Bernard F. Küsel nasceu em Brasília, 1989. Recebeu o título de B.Sc. no domínio de Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) no ano de 2011. Atualmente, é aluno de Mestrado e participante do Grupo de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (GPSE) na UnB. Estagiou na Eletronorte na área de Planejamento da Expansão da Transmissão no ano de 2011. Trabalha na gerência de Pós-Operação no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e presta consultoria em estudos elétricos. Tem maior interesse em proteção de sistemas elétricos, transitórios eletromagnéticos e transmissão de energia.



Felipe V. Lopes nasceu em Campina Grande, 1985. Recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2009 e 2011, respectivamente. Atualmente, é aluno de Doutorado na UFCG. Tem maior interesse em transitórios eletromagnéticos, proteção de sistemas elétricos e simulações em tempo real.



Kleber M. Silva nasceu em João Pessoa, 1980. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Em 2007, foi professor Visitante da Universidade Federal da Paraíba (UEPB). De 2008 a 2009 foi professor efetivo do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Em 2009, esteve em cooperação técnica com o Instituto Federal de Brasília (IFB). Atualmente é Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). Tem atuado nas áreas de proteção de sistemas elétricos de potência e transitórios eletromagnéticos.