

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE FALTA E DOS DISPOSITIVOS DAS ESTAÇÕES CONVERSoras DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO LCC-HVDC SOBRE A DETECÇÃO DE ONDAS VIAJANTES

F.C.S. JÚNIOR*, D.M.SILVA*, R.L.S.FRANÇA*, F.B.COSTA*

*Avenida Senador Salgado Filho, 59078-970
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, RN, Brasil

Emails: fcojunioreng@gmail.com, daniellmarquesds@gmail.com, rafaelucas03@gmail.com, flaviocosta@ect.ufrn.br

Abstract— Many methods of fault location and transmission line protection based on traveling waves have been published in the last years. The correct traveling waves detection is essential for a proper performance of such methods. Therefore, the analysis of parameters that affect the traveling waves detection is important in this context. This paper investigates the influence of fault parameters (fault resistance and fault inception angle) and converter station devices of LCC-HVDC transmission systems on the traveling waves detection generated by faults in HVAC and HVDC transmission lines. Based on simulation results, it is concluded that the methods based on traveling waves have potential to be better applied for the direct current transmission lines.

Keywords— Traveling Waves, Transmission Lines, Direct Current, Alternating Current

Resumo— Muitos métodos de localização de faltas e proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes têm sido publicados nos últimos anos. A correta detecção das ondas é de suma importância para o adequado funcionamento de tais métodos. Portanto, a análise de parâmetros que afetam a detecção das ondas viajantes é de grande relevância diante deste contexto. Este trabalho investiga a influência de parâmetros de falta (resistência de falta e ângulo de incidência de falta) e dos dispositivos das estações conversoras de sistemas de transmissão LCC-HVDC sobre a detecção de ondas viajantes geradas por faltas em linhas de transmissão HVAC e HVDC. Com base em resultados de simulação, conclui-se que os métodos baseados em ondas viajantes apresentam potencial para serem melhor aplicados às linhas de transmissão em corrente contínua.

Palavras-chave— Ondas Viajantes, Linhas de Transmissão, Corrente Contínua, Corrente Alternada

1 Introdução

A transmissão de energia elétrica, tradicionalmente, é executada em corrente alternada. Entretanto, tem-se um aumento gradativo na utilização de sistemas de transmissão em corrente contínua (CC) motivado, principalmente, pelo desenvolvimento tecnológico na eletrônica de potência (Arrilaga et al., 2007) e pelas suas vantagens frente aos sistemas análogos em corrente alternada (CA) como, por exemplo, a possibilidade de interconexão entre sistemas CA assíncronos. Uma pesquisa, publicada em 2012, realizada pela *Pike Research* demonstra a tendência crescente de utilização dos sistemas de transmissão CC. Segundo a pesquisa, existiam 97 projetos de sistemas de transmissão HVDC (*High Voltage Direct Current*), no mundo, programados para comissionamento entre os anos de 2012 e 2020, resultando em 399,18 GW em capacidade de potência (Pike Research, 2012).

Sérios problemas podem ser causados ao sistema de potência quando uma falta ocorre sobre uma linha de transmissão como, por exemplo, a perda de estabilidade e danos aos ativos do sistema. Portanto, a atuação rápida da proteção é de suma importância para permitir uma operação segura do sistema de potência evitando danos aos seus ativos, incrementando a sua margem de estabilidade e sua capacidade de transmissão de energia elétrica. Além disso, a precisa localização da

falta é desejada para acelerar o processo de manutenção e, conseqüentemente, a retomada da transmissão de energia elétrica. Diante disso, é contínua, por parte da comunidade científica, a busca por esquemas de proteção com atuações cada vez mais rápidas e esquemas de localização cada vez mais precisos. Atualmente, os esquemas de proteção baseados em ondas viajantes apresentam potencial para se tornarem os mais rápidos existentes e têm sido objeto de diversas pesquisas tanto em sistemas CA quanto CC. Além disso, esquemas de localização baseados em ondas viajantes têm se mostrado bastante promissores sendo também objeto de diversas pesquisas recentemente.

Costa et al. (2017) propõem uma proteção, para linhas de transmissão CA, baseada nos instantes de chegada da primeira frente de onda em cada terminal da linha. Em Namdari and Salehi (2017), a partir das informações do tempo de chegada da primeira frente de onda do sinal de corrente e de sua polaridade em cada um dos dois terminais da linha CA protegida, o método identifica se a falta é externa ou interna à linha além de indicar sua direcionalidade. Em Lopes et al. (2018), um método de localização de faltas é proposto baseado nos instantes de chegada da primeira onda viajante e de sua sucessiva reflexão do ponto de falta em ambos os terminais da linha. Em Liu et al. (2009), um método de proteção baseado nos instantes de chegada das primeiras frentes de onda

e nas suas polaridades, em um único terminal, é proposto para a proteção da linha de transmissão de um sistema HVDC monopolar com retorno metálico. Em Zhang et al. (2012), um algoritmo baseado na amplitude das ondas viajantes de sequência positiva e zero é proposto para a proteção das linhas de transmissão de um sistema HVDC bipolar. Em Azizi et al. (2014), um esquema de localização baseado no tempo de chegada da primeira onda viajante nas estações conversoras de sistemas CC multiterminais é proposto.

Conforme os métodos de proteção e localização baseados em ondas viajantes citados, em geral, a correta detecção das ondas é imprescindível para o adequado desempenho dos esquemas. Portanto, a análise de parâmetros que afetam a correta detecção das ondas é de suma importância.

Neste artigo, é investigada a influência de parâmetros de falta (resistência de falta e ângulo de incidência de falta) e dos dispositivos das estações conversoras de sistemas de transmissão LCC (*Line Commutated Converter*)-HVDC, sistemas tradicionais de transmissão CC, sobre a detecção da primeira onda viajante, gerada por faltas em linhas de transmissão HVAC (*High Voltage Alternating Current*) e HVDC, incidente sobre as barras das linhas. Neste trabalho, as ondas são detectadas por meio da transformada *wavelet*. Com base em resultados de simulação, evidencia-se que os esquemas de localização e proteção baseados em ondas viajantes apresentam potencial para serem melhor aplicados às linhas de transmissão em corrente contínua.

2 Teoria Básica Sobre Ondas Viajantes

Quando uma falta ocorre em uma linha de transmissão são originados impulsos eletromagnéticos de alta frequência, provenientes da mudança repentina da tensão no local de falta, que se propagam como ondas viajantes na corrente e tensão, a uma determinada velocidade, conforme ilustrado na Fig.1, em que tem-se uma falta F_1 , com resistência de falta R_F , sobre uma linha de transmissão com impedância característica Z_c . No ponto de falta, são originadas ondas na tensão e corrente, v_1 e i_1 , que se deslocam em direção à barra 1 e ondas v_2 e i_2 que se deslocam em direção à barra 2, conforme o diagrama *Lattice*. Ao atingirem os terminais da linha, informações sobre a falta são fornecidas pelas ondas, podendo ser utilizadas para fins de localização e proteção.

De acordo com Christopoulos et al. (1988), as ondas iniciais de corrente i_i e de tensão v_i , geradas no ponto de falta, que se deslocam em direção à barra 1, por exemplo, apresentam amplitudes dadas por:

$$v_i = -\frac{Z_c}{Z_c + 2R_F}v_f, \quad (1)$$

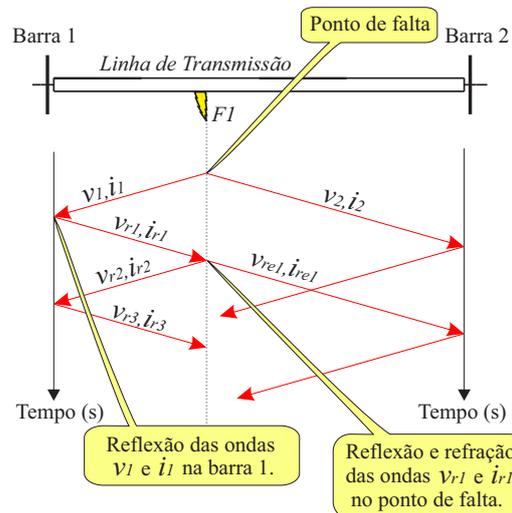


Figura 1: Diagrama *Lattice* das ondas viajantes para uma falta sobre a linha de transmissão.

$$i_i = -\frac{v_i}{Z_c} = \frac{1}{Z_c + 2R_F}v_f, \quad (2)$$

em que v_f é a tensão instantânea no momento da falta.

Ao longo da propagação sobre a linha de transmissão, as ondas viajantes podem sofrer reflexão e refração sobre pontos de descontinuidade da linha como, por exemplo, o local da falta e os terminais da linha, conforme ilustrado na Fig. 1, resultando em sucessivas ondas sobre os terminais. Os sinais refletidos e refratados apresentam amplitudes de acordo com coeficientes de reflexão e refração, respectivamente. A teoria sobre ondas viajantes pode ser encontrada em Powel (1964).

3 Parâmetros que Influenciam a Detecção das Ondas Viajantes Geradas por Faltas

Conforme discutido, a correta detecção das ondas viajantes é, em geral, imprescindível para o adequado funcionamento dos esquemas de localização e proteção de linhas de transmissão baseados em ondas viajantes. Vários parâmetros podem afetar a correta detecção das ondas como, por exemplo, o nível de ruído, o tipo de falta e os efeitos de distorção e atenuação provocados pela propagação da onda ao longo da linha de transmissão.

Entre os parâmetros de falta que podem afetar a correta detecção das ondas, destacam-se a resistência e o ângulo de incidência de falta, este último apenas para sistemas CA, por serem bastante citados na literatura uma vez que apresentam significativa influência sobre a amplitude das ondas viajantes geradas por faltas. Além disso, os dispositivos das estações conversoras de sistemas de transmissão LCC-HVDC também afetam

a amplitude das ondas viajantes e com isso a sua detecção. A influência de tais parâmetros sobre a detecção das ondas é analisada a seguir.

3.1 Resistência de Falta

Conforme (1) e (2), tanto a amplitude da onda viajante de tensão quanto da onda viajante de corrente geradas no ponto de falta é diretamente influenciada pelo valor da resistência de falta. Conforme as equações, quanto maior a resistência de falta menor o módulo da amplitude das ondas. Portanto, faltas com elevadas resistências podem tornar as ondas indetectáveis devido à sua baixa amplitude. Altas resistências de falta são consideradas um persistente problema limitante dos métodos baseados em ondas viajantes tanto em sistemas de transmissão CA quanto CC (Wu et al., 2017; Costa et al., 2017).

3.2 Ângulo de Incidência de Falta

Conforme (1) e (2), quanto menor o módulo da amplitude da tensão no momento da falta menor será o módulo da amplitude das ondas viajantes geradas. Consequentemente, mais difícil torna-se a sua detecção. Tal fato é um potencial problema diante do contexto da transmissão em corrente alternada já que a amplitude da onda viajante fica dependente do ângulo de incidência de falta (α). Por exemplo, uma falta monofásica pode ocorrer no momento do cruzamento da tensão por zero, isto é, com ângulo de incidência igual a zero. Quando isso ocorre, ondas viajantes não são geradas e, consequentemente, os métodos de proteção e localização baseados em ondas viajantes não atuam.

Nos sistemas em corrente contínua, a problemática do ângulo de incidência não existe uma vez que é característico desses sistemas um nível contínuo de tensão ao longo da linha de transmissão.

3.3 Dispositivos das Estações Conversoras de Sistemas de Transmissão LCC-HVDC

As estações conversoras dos sistemas de transmissão LCC-HVDC apresentam dispositivos com características de filtros passa-baixa como, por exemplo, reatores de alisamento (RA), filtros CC e CA, transformadores conversores (Traf) e banco de capacitores (BC), conforme o sistema LCC-HVDC monopolar ilustrado na Fig.2. Devido à característica de filtro passa-baixa de tais elementos, ondas viajantes ao atravessarem as estações conversoras como, por exemplo, ondas que se deslocam da linha CC em direção aos sistemas CA (Fig.2) e vice-versa, perdem a sua característica de impulso tornando-se um sinal suave e atenuado devido à característica de filtro passa-baixa dos dispositivos das estações, o que dificulta a sua detecção. Recentemente, muitos trabalhos vêm promo-

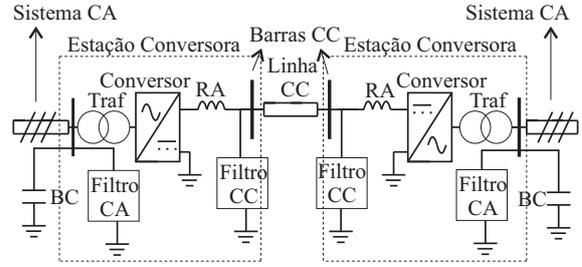


Figura 2: Estação conversora de sistemas de transmissão LCC-HVDC.

vendo proteções de linhas de transmissão CC baseadas em ondas viajantes e na atenuação das ondas provocada por dispositivos das estações conversoras (Liu et al., 2009; Zhang et al., 2012; Wu et al., 2017).

4 Metodologia

Por meio de simulações computacionais a 100 kHz, investiga-se a influência da resistência de falta, do ângulo de incidência de falta e dos dispositivos das estações conversoras de sistemas de transmissão LCC-HVDC sobre a detecção da primeira onda viajante, gerada por faltas em linhas de transmissão HVAC e HVDC, incidente sobre as barras das linhas. O sistema elétrico utilizado é ilustrado na Fig.3. O sistema é baseado no sistema HVDC padrão do CIGRE de 500 kV-1000 MVA com conversores comutados por linha de 12 pulsos baseados em tiristores, proposto por Szechtman et al. (1999).

Modificações sobre o sistema HVDC padrão são realizadas para se obter resultados mais realistas resultando no sistema ilustrado na Fig.3. Dentre as modificações, destaca-se a substituição do modelo a parâmetros concentrados da linha CC pelo modelo de linha de transmissão de Bergeron por ser mais adequado para modelar linhas de transmissão que representem a propagação das ondas viajantes. Os parâmetros distribuídos da linha são obtidos do sistema HVDC de Itaipu, um sistema presente no Brasil, cujos parâmetros estão presentes em Andrade (2013). Destaca-se também a substituição do equivalente CA conectado ao inversor do modelo padrão por linhas de transmissão CA do sistema teste do IEEE (IEEE, 2005) com o objetivo de viabilizar a simulação de faltas em diferentes localizações no sistema CA conectado ao sistema HVDC. Os filtros CA1 e CA2 estão de acordo com Szechtman et al. (1999).

5 Detecção das Ondas Viajantes

Neste trabalho, as ondas viajantes são detectadas por meio da transformada *wavelet* estacionária (SWT - do inglês, *Stationary Wavelet Transform*) (Costa et al., 2010), que consiste em uma

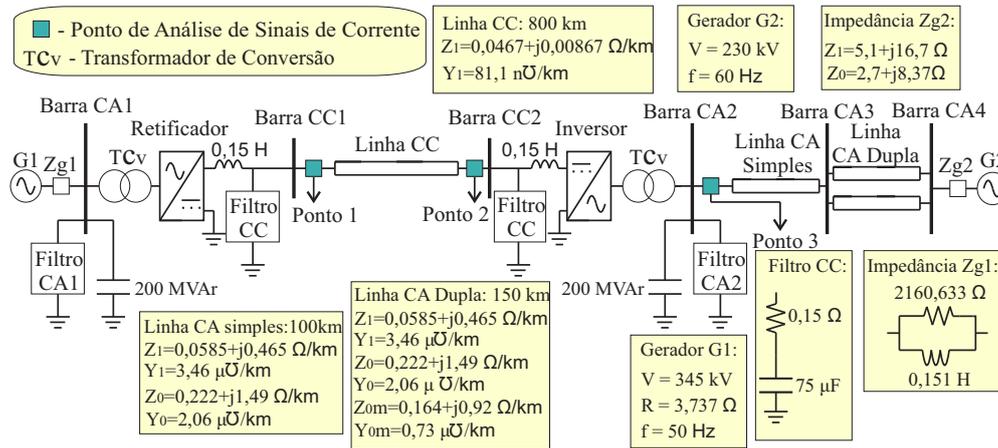


Figura 3: Sistema elétrico utilizado.

ferramenta para detecção de transitórios provocados por distúrbios em sistemas de potência (Costa et al., 2010), cuja *wavelet* mãe adotada é a Daubechies 4 por fornecer uma precisa detecção de transitórios em sistemas de potência (Bollen and Gu, 2006).

A detecção das ondas viajantes é realizada por meio da análise da amplitude dos coeficientes *wavelet* no primeiro nível de decomposição. Em regime permanente, a amplitude dos coeficientes varia dentro de uma determinada faixa de valores devido à presença de ruído conforme uma distribuição normal de probabilidade dada pela média μ e o desvio padrão σ da amplitude dos coeficientes. Em regime, espera-se que os coeficiente apresentem amplitudes entre $[\mu - 4\sigma, \mu + 4\sigma]$ (Costa, 2014). Entretanto, os coeficientes *wavelet* são diretamente influenciados pelas ondas viajantes apresentando amplitudes fora da faixa de variação de regime permanente devido à característica de alta frequência da onda, o que possibilita a sua detecção (Costa, 2014). Em geral, quanto maior a amplitude da onda viajante mais distante da faixa de valores de regime permanente estará o coeficiente, ou seja, maior será a amplitude em módulo do coeficiente.

A transformada *wavelet* é aplicada aos sinais de corrente das barras CC1 e CC2 (pontos 1 e 2, respectivamente) (Fig.3) e à corrente de modo aéreo 1 da barra CA2 (ponto 3) (Fig.3), cujos instrumentos de medição de corrente são considerados ideais já que erros proveniente de tais dispositivos não estão sendo avaliados. A corrente de modo aéreo 1 é escolhida por estar presente em todo tipo de falta em sistemas CA e é obtida por meio da aplicação da matriz de transformação de Clarke (Clarke, 1943) aos sinais de corrente do ponto 3. Todas as correntes apresentam ruído resultando em uma relação sinal-ruído igual a 66 dB.

Com base na análise da amplitude dos coeficientes *wavelet* das correntes em regime permanente dos pontos 1, 2 e 3 (Fig.3), verifica-se que o li-

miar $\pm 6\sigma$ para a identificação das ondas viajantes é uma boa escolha e é o adotado nesse trabalho. Desta forma, coeficientes *wavelet* com amplitudes maiores que 6σ e menores que -6σ indicam uma onda viajante.

6 Análise dos Resultados

Neste trabalho, para propósitos de ilustração, os gráficos dos coeficientes *wavelet* são normalizados por 6σ . Desta forma, os coeficientes normalizados em regime permanente apresentam valores dentro da faixa de -1 a 1, enquanto que um coeficiente relacionado a uma onda viajante apresenta valor maior que 1 ou menor que -1.

6.1 Influência da Resistência de Falta: Linha CA

Para verificar a influência da resistência de falta sobre a detecção da primeira onda viajante incidente sobre a barra CA2 induzida por faltas sobre as linhas CA, faltas monofásicas na fase A são realizadas na linha CA simples a 50 km da barra CA2 com ângulo de incidência de falta igual a 90° e as seguintes resistências de falta: 1, 50, 100, 150 e 200 Ω .

Na Fig.4, apresentam-se a corrente de modo aéreo 1 da barra CA2 e os coeficientes *wavelet* da corrente em torno do instante de falta para a falta com resistência igual a 1 Ω . O coeficiente relacionado à primeira onda viajante incidente sobre a barra CA2 apresenta valor igual a -19,8, valor menor que o limiar -1.

Na Fig.5, apresentam-se as amplitudes dos coeficientes *wavelet* relacionados à primeira frente de onda incidente sobre a barra CA2 em função da resistência de falta. Ao aumentar-se a resistência de falta, a amplitude dos coeficientes tende para zero, um indicio de que o módulo da amplitude da onda viajante gerada pela falta diminui com o aumento da resistência, o que dificulta a sua detecção. Por exemplo, considerando uma falta com

resistência igual a $5\text{ k}\Omega$, o módulo da amplitude da onda gerada é tão baixo que o coeficiente relacionado à primeira onda incidente sobre a barra CA2 apresenta valor igual a $-0,9$, conforme ilustrado na Fig.6, não atingindo o limiar -1 . Portanto, devido à alta resistência de falta, com base no limiar estabelecido, não é possível detectar a onda viajante, demonstrando o efeito da resistência sobre a detecção das ondas.

Os limiares para a detecção das ondas devem ser ajustados cuidadosamente para que ondas não sejam confundidas com ruído e ao mesmo tempo seja possível detectar ondas provenientes de faltas com elevadas resistências.

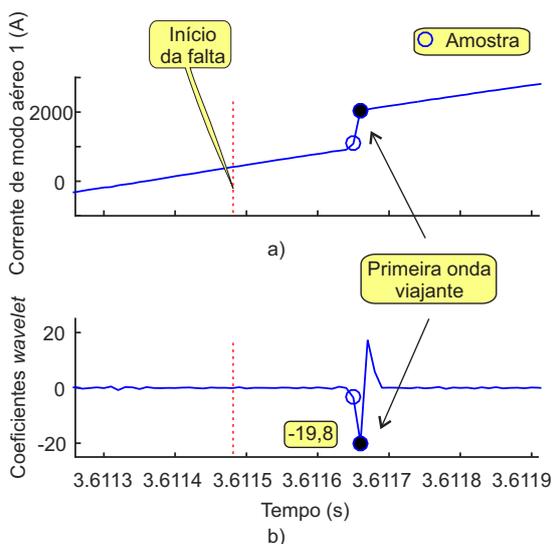


Figura 4: Falta monofásica sobre a linha CA simples na fase A a 50 km da barra CA2 com $\alpha = 90^\circ$ e $R_F = 1\ \Omega$: a) corrente de modo aéreo 1 da barra CA2; b) coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 da barra CA2.

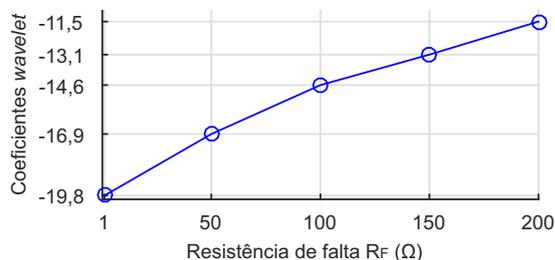


Figura 5: Amplitude dos coeficientes *wavelet* referente à primeira frente de onda incidente sobre a barra CA2, em função da resistência de falta, para faltas monofásicas na fase A sobre a linha CA simples a 50 km da barra CA2 com $\alpha = 90^\circ$.

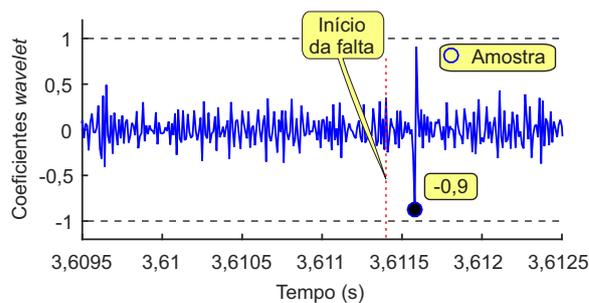


Figura 6: Coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 para uma falta monofásica sobre a linha CA simples na fase A a 50 km da barra CA2 com $\alpha = 90^\circ$ e $R_F = 5\text{ k}\Omega$.

6.2 Influência da Resistência de Falta: Linha CC

Para verificar a influência da resistência de falta sobre a detecção da primeira onda viajante incidente sobre a barra CC1 gerada por faltas na linha CC, são aplicadas faltas sobre a linha CC para a terra a 50 km da barra CC1 com as seguintes resistências de falta: 1, 50, 100, 150 e 200 Ω .

Na Fig.7, apresentam-se a corrente na barra CC1 e os coeficientes *wavelet* da corrente em torno do instante de falta para a falta com resistência igual a $1\ \Omega$. O coeficiente indicando a primeira onda viajante apresenta amplitude igual a $-241,8$, conforme a Fig.7, valor bem distante do limiar -1 .

Ao aumentar-se a resistência de falta, a amplitude dos coeficientes relacionados à primeira frente de onda incidente sobre a barra CC1 tende para zero, aproximando-se dos valores de estado estacionário, conforme a Fig. 8, que ilustra amplitude dos coeficientes referentes à primeira frente

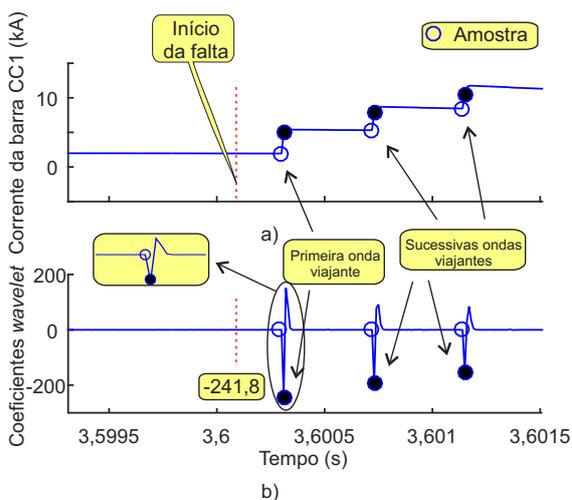


Figura 7: Falta sobre a linha CC para a terra a 50 km da barra CC1 com $R_F = 1\ \Omega$: a) corrente na barra CC1; b) coeficientes *wavelet* da corrente da barra CC1.

de onda em função da resistência de falta. Tal fato é um indício de que ao aumentar-se a resistência de falta o módulo da amplitude das ondas viajantes geradas no ponto de falta diminui, o que dificulta a sua detecção. Por exemplo, para uma falta com resistência igual a $45\text{ k}\Omega$, não é possível identificar ondas viajantes, conforme os coeficientes *wavelet* da corrente da barra CC1 ilustrados na Fig.9. Após a falta, nenhum coeficiente ultrapassa os limiares 1 e -1. Isto é, devido à baixa amplitude da onda viajante gerada no ponto de falta, o coeficiente relacionado à primeira onda se confunde com os de regime permanente. Ou seja, nos sistemas de transmissão CC, assim como nos sistemas CA, há a influência da resistência de falta sobre a detecção das ondas viajantes.

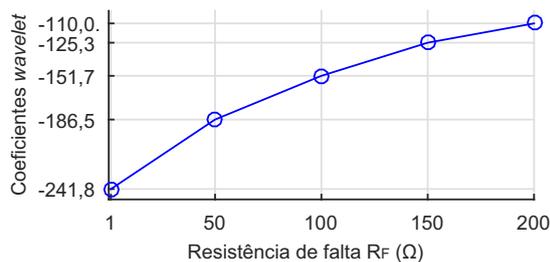


Figura 8: Amplitude dos coeficientes *wavelet* referente à primeira frente de onda incidente sobre a barra CC1 em função da resistência de falta para faltas sobre a linha CC para a terra a 50 km da barra CC1.

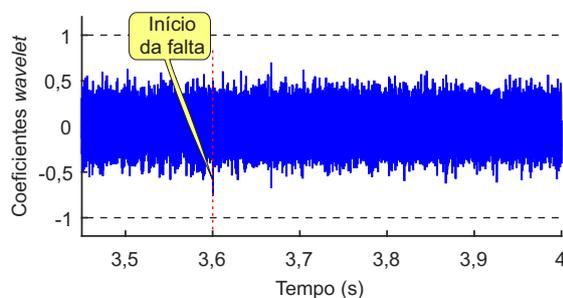


Figura 9: Coeficientes *wavelet* da corrente da barra CC1 para uma falta sobre a linha CC para a terra a 50 km da barra CC1 com $R_F = 45\text{ k}\Omega$.

6.3 Influência do Ângulo de Incidência de Falta: Linha CA

Para verificar a influência do ângulo de incidência de falta sobre a detecção da primeira onda viajante incidente sobre a barra CA2 gerada por faltas sobre as linhas CA, são aplicadas faltas monofásicas sobre a linha CA simples na fase A a 50 km da barra CA2 com resistência de falta igual a $1\ \Omega$ e os seguintes ângulos de incidência (α): 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° e 180° .

Na Fig.10, apresenta-se a amplitude dos coeficientes relacionados à primeira onda viajante incidente sobre a barra CA2 em função do ângulo de incidência de falta. Para determinados ângulos de incidência, a saber, 0° e 180° , a amplitude do coeficiente é igual a zero, o que indica que não são detectadas ondas viajantes. Isto se deve ao fato de que para tais ângulos a tensão no momento da falta é igual a zero e, portanto, ondas viajantes não são geradas, o que consiste em um potencial problema para os esquemas de proteção e localização baseados em ondas viajantes, uma vez que diante desses casos não é possível a atuação dos esquemas.

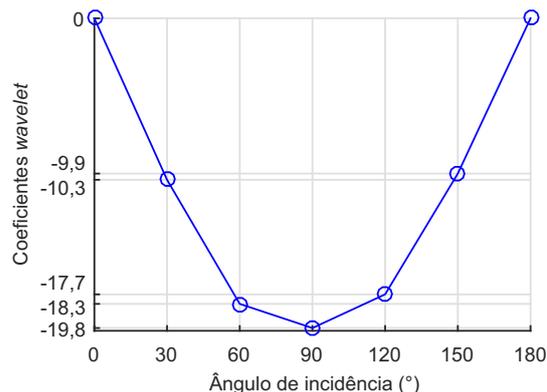


Figura 10: Amplitude dos coeficientes *wavelet* referente à primeira onda viajante incidente sobre a barra CA2, em função do ângulo de incidência de falta, para faltas monofásicas sobre a linha CA simples na fase A a 50 km da barra CA2 com $R_F = 1\ \Omega$.

A problemática do ângulo de incidência não é verificada em sistemas de transmissão CC uma vez que nesses sistemas é característico um nível de tensão contínuo ao longo da linha de transmissão. Portanto, nos sistemas CA, além da problemática da resistência de falta tem-se também a problemática do ângulo de incidência de falta, o que indica que métodos de proteção e localização baseados em ondas viajantes apresentam potencial para serem melhor aplicados à linhas CC já que em linhas CA a probabilidade de não detecção de ondas viajantes induzidas por faltas é maior, considerando os efeitos dos dois parâmetros.

6.4 Influência dos Dispositivos das Estações Conversoras

Para verificar a influência dos dispositivos das estações conversoras sobre a detecção das ondas viajantes, faltas trifásicas sobre a linha CA simples a 20, 40, 60 e 80 km da barra CA2 com resistência entre fases igual a $1\ \Omega$ e ângulo de incidência de falta igual a 90° em relação à fase A e faltas para a terra sobre a linha CC a 20, 40, 50, 60, 80, 250, 450 e 650 km da barra CC1 com resistência

de falta igual a 1Ω são realizadas.

Com relação às faltas sobre a linha CA, identifica-se a presença de ondas viajantes na barra CA2 para todas as faltas. Entretanto, nos pontos 1 e 2 da linha CC não são identificadas ondas para nenhuma das faltas. Por exemplo, na Fig.11, estão ilustrados os coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 da barra CA2, em torno do instante de falta, para a falta trifásica a 20 km da barra CA2 indicando a presença de sucessivas ondas viajantes incidindo sobre a barra, sendo os instantes destas ondas coincidentes com a distância de falta. Entretanto, os coeficientes das correntes das barras CC1 e CC2 não indicam a presença de ondas viajantes para a respectiva falta, devido ao processo de filtragem proporcionado pelos dispositivos da estação conversora, conforme ilustrado na Fig. 12.

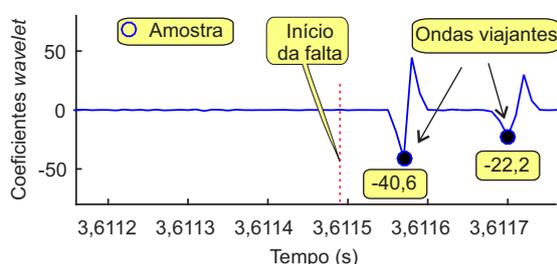


Figura 11: Coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 da barra CA2 para uma falta trifásica sobre a linha CA simples a 20 km da barra CA2.

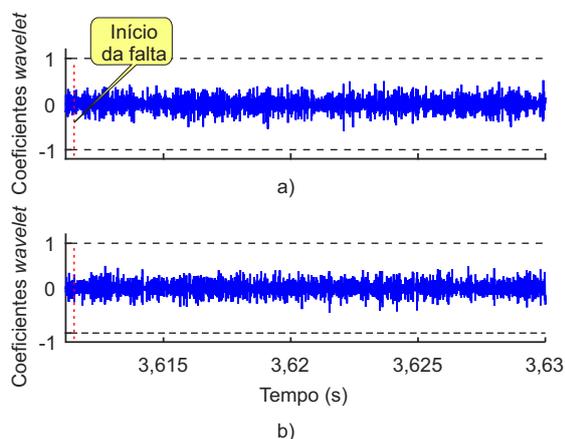


Figura 12: Coeficientes *wavelet* para uma falta trifásica sobre a linha CA simples a 20 km da barra CA2: a) da corrente da barra CC1; b) da corrente da barra CC2.

Com relação às faltas sobre a linha CC, não são identificadas ondas viajantes na barra CA2 para nenhuma das faltas devido ao processo de filtragem proporcionado pelos dispositivos da estação conversora. Entretanto, para todas as faltas são identificadas ondas em ambas as barras CC1

e CC2. Por exemplo, na Fig.13, em que ilustra-se os coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 da barra CA2 após a falta sobre a linha CC a 450 km da barra CC1, não são identificadas ondas viajantes após a falta. Entretanto, nas barras CC1 e CC2, para a mesma falta, é identificada a presença de ondas conforme os coeficientes das correntes de ambas as barras apresentados na Fig.14.

Baseado nos resultados, faltas trifásicas sobre a linha CA simples geraram ondas viajantes no ponto 3, mas não geraram nos pontos 1 e 2. Por sua vez, faltas sobre a linha CC geraram ondas viajantes nos pontos 1 e 2, entretanto não geraram no ponto 3. Tais resultados demonstram que os dispositivos das estações conversoras atenuam a amplitude das ondas viajantes.

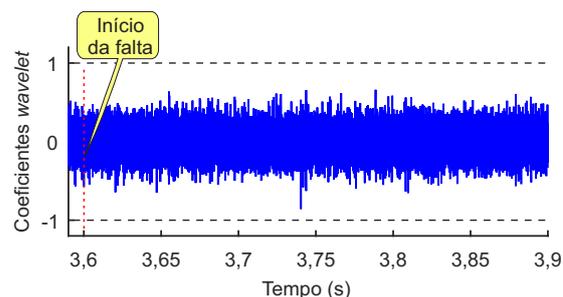


Figura 13: Coeficientes *wavelet* da corrente de modo aéreo 1 para uma falta sobre a linha CC a 450 km da barra CC1 com $R_F = 1 \Omega$.

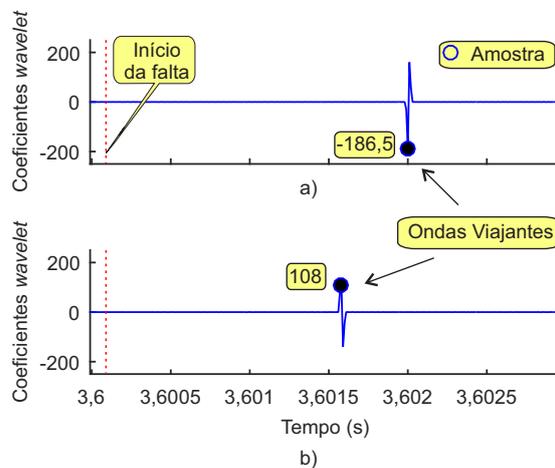


Figura 14: Coeficientes *wavelet* para uma falta sobre a linha CC a 450 km da barra CC1 com $R_F = 1 \Omega$: a) da corrente da barra CC1; b) da corrente da barra CC2.

7 Conclusões

Este artigo apresentou uma análise da influência dos principais parâmetros de falta e dos dispositivos das estações conversoras de sistemas de transmissão LCC-HVDC sobre a detecção das ondas

viajantes geradas por faltas em linhas de transmissão HVAC e HVDC. Demonstra-se que, nos sistemas CA, para determinados valores de resistência e ângulos de incidência de falta, ondas viajantes podem não ser detectadas devido à sua baixa amplitude, o que indica que métodos de proteção e localização baseados em ondas viajantes apresentam potencial para serem melhor aplicados à sistemas CC já que, por haver apenas a problemática da resistência de falta, a probabilidade de detecção das ondas viajantes nesses sistemas é maior em relação aos análogos CA, considerando esses dois parâmetros. Além disso, é demonstrado via simulações que a passagem das ondas pelas estações conversoras atenua a sua amplitude tornando-as indetectáveis.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico)

Referências

- Andrade, L. (2013). *Time-domain impedance-based fault location for HVDC transmission lines*, PhD thesis, Univ. do Porto, Portugal.
- Arrilaga, J., Liu, Y. and Watson, N. (2007). *Flexible Power Transmission - The HVDC Options*, John Wiley & Sons, Ltd, England.
- Azizi, S., Sanaye-Pasand, M., Abedini, M. and Hasani, A. (2014). A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multiterminal dc systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(6): 2552–2560.
- Bollen, M. and Gu, I. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*, IEEE, New York.
- Christopoulos, C., Thomase, D. W. P. and Wright, A. (1988). Scheme, based on travelling-waves, for the protection of major transmission lines, *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution* **135**(1): 63–73.
- Clarke, E. (1943). *Circuit Analysis of A-C Power SYSTEMS*, John Wiley & Sons, Ltd, England.
- Costa, F. B. (2014). Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(1): 140–153.
- Costa, F. B., Monti, A., Lopes, F. V., Silva, K. M., Jamborsalamati, P. and Sadu, A. (2017). Two-terminal traveling-wave-based transmission-line protection, *IEEE Transactions on Power Delivery* **32**(3): 1382–1393.
- Costa, F. B., Souza, B. A. and Brito, N. S. D. (2010). Real-time detection of fault-induced transients in transmission lines, *Electronics Letters* **46**(11): 753–755.
- IEEE (2005). EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing, <http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/EMTP%20Ref%20Model-Final.pdf>.
- Liu, X., Osman, A. H. and Malik, O. P. (2009). Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar hvdc line, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**(2): 569–578.
- Lopes, F. V., Dantas, K. M., Silva, K. M. and Costa, F. B. (2018). Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves, *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(2): 873–880.
- Namdari, F. and Salehi, M. (2017). High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology, *IEEE Transactions on Power Delivery* **32**(1): 246–253.
- Pike Research (2012). High-voltage direct current Transmission Systems, <https://www.navigantresearch.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/HVDC-12-Executive-Summary-2.pdf>.
- Powel, C. A. (1964). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, USA.
- Szechtman, M., Wess, T. and Thio, C. (1999). A benchmark model for hvdc system studies, *Electra* (135): 54–67.
- Wu, J., Li, H., Wang, G. and Liang, Y. (2017). An Improved Traveling-Wave Protection Scheme for LCC-HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **32**(1): 106–116.
- Zhang, Y., Tai, N. and Xu, B. (2012). Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar hvdc lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **27**(3): 1583–1591.