

Estimação Precisa da Localização da Falta e do Comprimento da Linha Baseada em um Terminal Usando Ondas Viajantes

E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. Mynam, V. Skendzic e B. Kasztenny
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

C. Gallacher
Avista Utilities

S. Marx
Bonneville Power Administration

Apresentado na
13th International Conference on Developments in Power System Protection
Edimburgo, Reino Unido
7–10 de março de 2016

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

Estimação precisa da localização da falta e do comprimento da linha baseada em um terminal usando ondas viajantes

*E. O. Schweitzer, III**, *A. Guzmán**, *M. Mynam**, *V. Skendzic**, *B. Kasztenny**, *C. Gallacher†*, *S. Marx***

**Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2350 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163 USA, armando@selinc.com*

†Avista Utilities, 1411 E Mission Ave., Spokane, WA 99202 USA,

***Bonneville Power Administration, 1350 Lindsay Boulevard, Idaho Falls, ID 83401 USA*

Palavras-chave: localização da falta, método de um terminal, ondas viajantes, reflexões, referência de tempo.

Sumário

O método de localização da falta baseado em um terminal usando ondas viajantes pode ser potencialmente mais preciso do que os métodos de localização da falta baseados em dois terminais. As reflexões das ondas viajantes de derivações ou terminais adjacentes podem representar um desafio para esta abordagem, mas a caracterização antecipada dessas reflexões, usando eventos como energização da linha, simplifica a análise. Além da localização da falta, o registro de ondas viajantes pode também ser usado para estimar o comprimento da linha. As análises dos eventos de campo, apresentados neste artigo, mostram como identificamos reflexões para obter precisão na estimação da localização da falta e comprimento da linha. A equipe de inspeção de linhas validou os resultados obtidos usando nossa metodologia.

1 Introdução

A precisão na localização de faltas é essencial para uma operação confiável dos sistemas de potência. Identificar faltas permanentes é importante para o restabelecimento do sistema de potência; contudo, a localização de faltas temporárias com religamento automático com sucesso pode não ter um nível similar de urgência. Os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes (TWFL: “Traveling-Wave-based Fault Location”) oferecem precisão da ordem de um a dois vãos de torre, independentemente do comprimento da linha. Esta precisão torna a localização de isoladores danificados comparativamente menos desafiadora e menos demorada do que usando métodos alternativos como os métodos baseados em impedância. Quando as equipes de linha localizam e substituem os isoladores danificados, as recorrências de faltas transitórias nos mesmos locais são eliminadas, resultando na melhoria da confiabilidade do sistema de potência.

O método TWFL baseado em um terminal usa as diferenças de tempo entre a chegada da primeira onda e as reflexões sucessivas a partir da falta e/ou do terminal remoto para calcular a localização da falta. Este método é atrativo, porque depende apenas de informações locais. Ele não requer um canal de comunicação e uma referência de tempo comum e exata para os dados das TWs locais e remotas. Embora possa ser mais difícil de implementar, o método TWFL baseado em um terminal tem menos erros do que o método TWFL baseado em

dois terminais, porque ele estima os tempos de chegada da primeira onda e das ondas refletidas usando apenas um dispositivo de hardware e seu relógio interno. Isso fornece uma chance para alguns erros se autocancelarem. Além disso, o método de um terminal é a única opção disponível quando da energização de uma linha com defeito. O desafio está na identificação das reflexões, especialmente se as medições de tensão de toda a largura de banda não estiverem disponíveis para isolar a TW incidente das TWs da tensão e corrente medidas.

Este artigo discute um novo método TWFL baseado em um terminal que utiliza TWs de corrente para identificar as reflexões provenientes da falta, do terminal remoto e de qualquer descontinuidade na linha de transmissão. O algoritmo proposto exclui as reflexões das subestações vizinhas, derivações e outras descontinuidades usando uma sequência de TWS de referência capturadas em um ou mais destes eventos: energização da linha, faltas externas, religamento automático (com e sem faltas), e chaveamento de reator ou bancos de capacitor externos. O algoritmo utiliza estas informações juntamente com os dados da TW capturada durante a falta para estimar a localização da falta. Os dados do evento da TW também incluem as informações do tempo de propagação da onda ao longo da linha. Usamos essas informações para determinar o comprimento da linha e as distâncias entre as derivações.

O método proposto é aplicável em linhas de transmissão aéreas e linhas com derivação. Ele também é adequado para aplicações em linhas de transmissão subterrâneas e aéreas/subterrâneas. Apresentamos os dados de uma linha de transmissão de 115 kV com derivações, comprimento de 181.61 km (112.85 milhas), e de uma linha de transmissão de 161 kV com dois terminais, comprimento de 117.11 km (72.77 milhas), para demonstrar a validade deste método. Estes dados, juntamente com os dados capturados durante a energização da linha e outros eventos de religamento, fornecem informações suficientes para uma estimação precisa da localização da falta e comprimento da linha. Validamos os resultados da estimação por TWFL com os resultados reais obtidos pela equipe de inspeção de linhas.

2 TWs refletidas e transmitidas

Ao passar por um ponto de conexão (por exemplo, uma derivação na linha), as TWs de corrente incidentes são refletidas e transmitidas de acordo com as impedâncias características dos segmentos de linha conectados (ver Fig. 1).

Para a TW incidente, i_1^I , os coeficientes de reflexão Γ_i e de transmissão T_i são calculados usando (1) e (2) [1], [2].

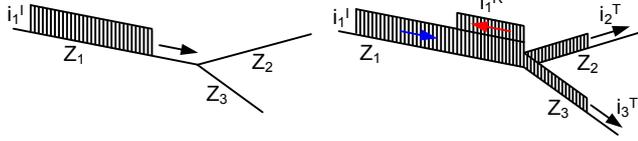


Fig. 1. TW de corrente passando pelo ponto de conexão.

$$\Gamma_i = \frac{Z_1 - Z_p}{Z_1 + Z_p} \quad (1)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_p} \quad (2)$$

onde Z_1 é a impedância característica do Segmento 1, e Z_p é a impedância equivalente do paralelo das impedâncias características dos Segmentos 2 e 3, Z_2 e Z_3 , conforme mostrado em (3).

$$Z_p = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (3)$$

A corrente refletida, i_1^R , e as correntes transmitidas, i_2^T e i_3^T , são calculadas de acordo com (4), (5) e (6), respectivamente.

$$i_1^R = \Gamma_i \cdot i_1^I \quad (4)$$

$$i_2^T = \frac{Z_p}{Z_2} T_i \cdot i_1^I \quad (5)$$

$$i_3^T = \frac{Z_p}{Z_3} T_i \cdot i_1^I \quad (6)$$

Na Seção 3, discutimos os desafios que o método de localização de falta por TW baseado em um terminal enfrenta devido à transmissão e reflexão das TWs.

3 Estimação do comprimento da linha e localização da falta baseada em um terminal

3.1 Estimação da localização da falta

O método de localização da falta por TW baseado em um terminal usa as informações de chegada da TW local provenientes da primeira onda e das ondas refletidas [3], [4] e [5]. A Fig. 2 mostra que a TW atingindo L , no instante t_{L1} , é tanto transmitida quanto refletida. A onda refletida reflete da falta e viaja de volta para L , chegando no instante t_{L2} . O tempo $t_{L2} - t_{L1}$ é o tempo de viagem de L até a falta e de volta (tempo de ida e volta). Observe que a onda refletida do terminal remoto chega no instante t_{L3} . Para estimar a localização da falta, este método de localização de falta baseado em um terminal usa a diferença de tempo entre a TW que chegou primeiro e a reflexão sucessiva a partir da falta, conforme mostrado em (7).

$$m = \left(\frac{t_{L2} - t_{L1}}{2} \right) \cdot v \quad (7)$$

onde:

t_{L1} , t_{L2} são os tempos de chegada da TW em L ,
 v é a velocidade de propagação da TW.

Podemos, portanto, localizar a falta usando informações provenientes de uma extremidade, contanto que não sejamos confundidos por outras ondas refletidas. Por exemplo, suponha que existe uma linha pequena logo atrás de L , tão curta que sua extremidade remota, B , está mais próxima de L do que a distância de L até a falta (ver Fig. 3). Neste caso, a TW proveniente de B pode alcançar L antes de t_{L2} . Estas TWs precisam ser selecionadas de acordo com a sua direção para que a falta seja localizada com precisão.

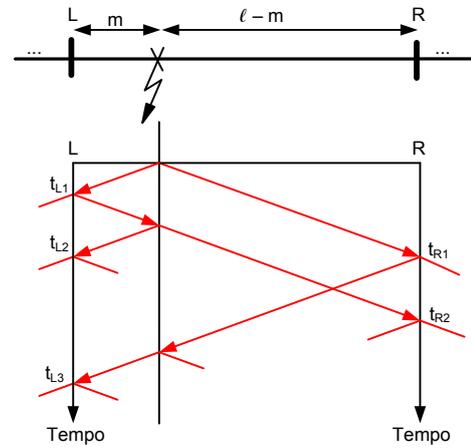


Fig. 2. Diagrama de Lattice mostrando as TWs incidentes, refletidas e transmitidas e os instantes de chegada no terminal local para estimar o comprimento da linha e a localização da falta. ℓ é o comprimento da linha e m é a distância até a falta a partir de L .

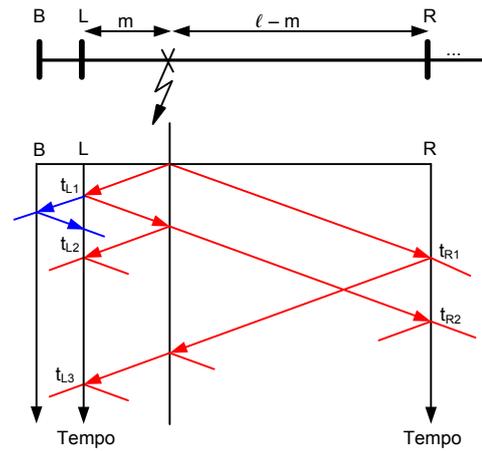


Fig. 3. A reflexão do elemento da rede externa (B) atinge L antes da reflexão proveniente da falta.

Estas reflexões de TW extras dependem da rede. A Schweitzer desenvolveu com sucesso um localizador de faltas baseado em um terminal para linhas DC de alta tensão (HVDC) [3], [4]. O dispositivo utiliza tensão e corrente para separar as TWs incidentes e refletidas.

O uso apenas de correntes para localização de faltas por TW limita a nossa capacidade de separar as TWs incidentes e refletidas. Tendo em vista essas limitações, usamos uma abordagem alternativa na qual descartamos as reflexões de pontos de conexão conhecidos e identificamos reflexões provenientes da falta para simplificar a análise de localização de faltas baseada em uma extremidade. Para identificar as reflexões provenientes de terminais conhecidos (topologia da rede), usamos os dados de TW capturados durante os seguintes eventos do sistema de potência:

- Energização da linha
- Faltas externas
- Religamento automático
- Chaveamento de reator/capacitor externo
- Faltas anteriores na linha

Os casos de campo das Seções 5 e 6 mostram oscilogramas com TWs de corrente registradas a partir de faltas e energização da linha.

3.2 Estimação do comprimento da linha

Além das informações para localização da falta, os relatórios de eventos com TW baseados em um terminal incluem as informações necessárias para estimar o comprimento da linha. Este comprimento estimado fornece *feedback* para a equipe de inspeção de linhas na verificação do comprimento real da linha usado para localizar faltas ao longo da linha. A Fig. 2 ilustra os tempos de chegada das TWs no terminal local L provenientes da falta (t_{L1} e t_{L2}) e do terminal remoto R (t_{L3}). O tempo $t_{L3} - t_{L1}$ é duas vezes o tempo de viagem ao longo da linha menos duas vezes o tempo da falta até L . O tempo $t_{L3} - t_{L1}$ corresponde à distância $2\ell - 2m$. Com estes tempos de chegada da TW, usamos (8) para estimar o comprimento da linha.

$$\ell = \frac{v}{2} [(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})] \quad (8)$$

Se dividirmos (7) por (8), podemos expressar em por-unidade a distância da localização da falta em termos dos atrasos de $t_{L2} - t_{L1}$ e $t_{L3} - t_{L1}$, como mostrado em (9).

$$\frac{m}{\ell} = \frac{(t_{L2} - t_{L1})}{(t_{L2} - t_{L1}) + (t_{L3} - t_{L1})} \quad (9)$$

4 Determinação dos tempos de chegada da TW usando um filtro diferenciador [6]

Esta abordagem teve origem nas “técnicas avançadas de rastreamento” utilizadas no radar [7]. Ela supera a maioria dos efeitos de distorção do sinal e permite a interpolação entre amostras. Este método foi usado pela primeira vez na localização de faltas pelo localizador de defeito DC descrito em [3] e [4]. A posterior implementação do filtro diferenciador (“differentiator smoother”) no localizador de falta AC descrito em [6] comprovou ainda mais esta abordagem no campo.

A Fig. 4a exibe um diagrama de blocos adequado para demonstração do método. A corrente é inicialmente filtrada, ou alisada (“smoothed”), pelo filtro passa-baixa;

saída é diferenciada. O alisamento reduz os efeitos das distorções da forma de onda e suaviza a borda de subida da corrente, tornando-a menos acentuada. “Suavizar” a borda de subida pode parecer, inicialmente, contrário ao objetivo de determinação do tempo de chegada; no entanto, isto espalha a borda ao longo de várias amostras, tornando possível o processo de interpolação de tempo.

A forma de onda alisada é então diferenciada, transformando a forma de onda da corrente tipo degrau em uma forma tipo pulso suave. Esta derivada do tipo pulso tem o seu pico no instante da inclinação mais íngreme da forma de onda da corrente. O pico da derivada é relativamente insensível às mudanças de amplitude, sendo de cerca da metade do caminho ao longo da borda, não importa qual seja a “altura” do degrau da corrente. A Fig. 4c mostra a saída da derivada em detalhes e adiciona os pontos no instante em que as amostras foram obtidas. A figura também mostra um par de linhas; a interseção dessas linhas é uma excelente medida de t_A , o tempo de chegada da TW.

Quando são utilizados filtros para alisar a derivada da corrente, a saída se assemelha a uma parábola, como mostrado na Fig. 4b e na Fig. 4c. Portanto, em nossa implementação, usamos um método de interpolação baseado em parábola para calcular a hora de chegada. O algoritmo seleciona algumas amostras antes da amostra de pico e algumas amostras após o pico. Adicionalmente, ele usa o método de estimação dos mínimos quadrados (LSE: “Least-Square Estimation”) para adaptar uma parábola aos pontos selecionados, incluindo a amostra máxima, e calcula o tempo de chegada (t_A) utilizando a parábola mais adequada (ver Fig. 5).

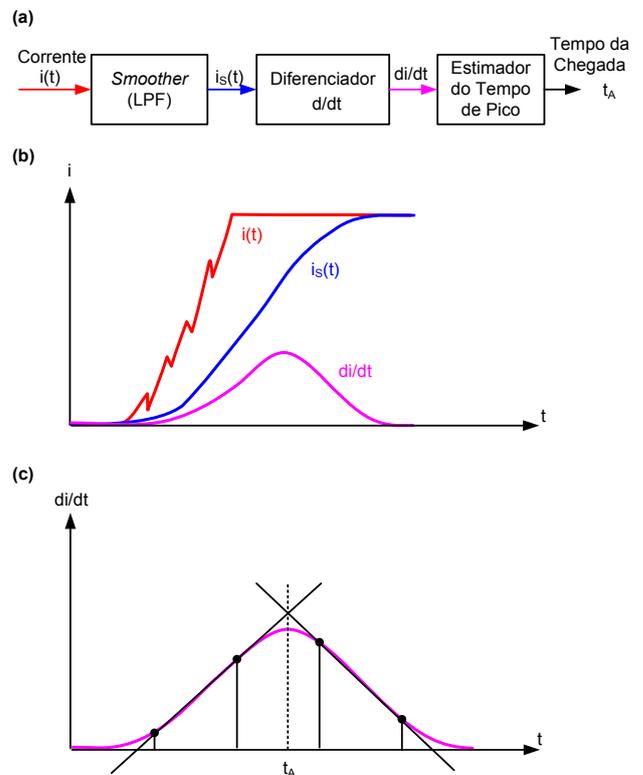


Fig. 4. Filtro diferenciador: (a) diagrama de blocos, (b) formas de onda típicas, e (c) estimação do tempo do pico.

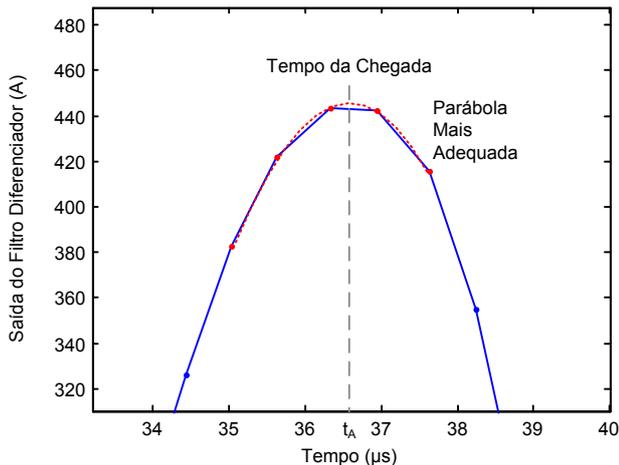


Fig. 5. Estampas de tempo precisas da TW usando a parábola mais adequada.

5 Localização de falta por TW baseada em um terminal usando eventos do campo provenientes de uma linha com derivações

5.1 Linha Brasada-Harney

A Fig. 6 mostra a linha de transmissão Brasada-Harney de 115 kV, 181.61 km (112.85 milhas), juntamente com o sistema adjacente. Os locais das derivações são conectados a transformadores atendendo a alimentadores da distribuição. A linha é uma seção do trajeto de uma linha de transmissão mais longa (cerca de 422 km ou 262 milhas), com várias cargas em derivação, em Oregon Central e Oriental. Metade do trajeto é em 115 kV e o resto do trajeto é em 138 kV. O terreno consiste de deserto de alta altitude rural e fazendas agrícolas irrigadas. Historicamente, a linha é submetida a dez ou mais faltas por ano. Em muitos casos, as faltas na linha foram atribuídas a descargas (“flashover”) nos isoladores causadas por raio, pela contaminação da vida selvagem, ou pela acumulação de pó misturado com chuva ou orvalho. Os relés religaram com sucesso em todas estas faltas.

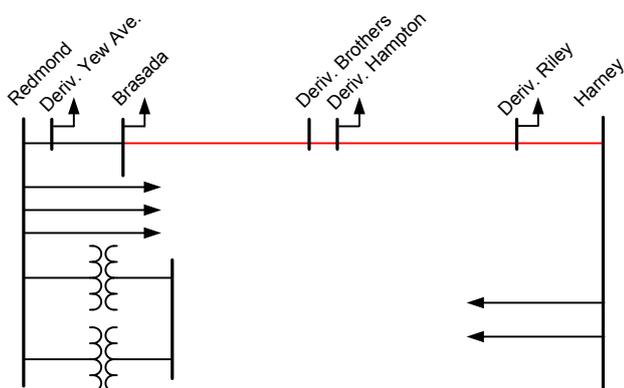


Fig. 6. Rede de transmissão em 115 kV incluindo a linha Brasada-Harney com as derivações e linhas adjacentes.

5.1.1 Usando TWs capturadas durante a energização da linha para identificação da reflexão de TW proveniente de uma falta

Para abordar o desafio de identificar e excluir as reflexões das subestações vizinhas, locais de derivação e outras discontinuidades, usamos uma sequência de referência das ondas capturadas durante a energização da linha com o terminal remoto aberto. Poderíamos também ter capturado a sequência de referência das ondas durante faltas externas ou religamento automático (sem uma falta). As ondas de referência fornecem informações sobre a topologia da linha e derivações adjacentes. Ao utilizar essas ondas de referência juntamente com as ondas capturadas durante uma falta interna, e alinhar a primeira onda capturada proveniente de ambos os eventos, foi possível descartar as reflexões comuns de ambos os eventos. Seguindo esta abordagem, identificamos a reflexão proveniente da falta. As reflexões podem ser diretamente provenientes da falta ou da onda refletida a partir do terminal remoto.

A Fig. 7 mostra as TWs das correntes de fase capturadas durante a energização da linha, as quais foram utilizadas como o sinal de referência. Observe que o fechamento dos polos da fase B e da fase C forneceu uma sequência de ondas mostrando a localização das derivações e outros terminais. Neste evento de energização da linha, o polo da fase A fechou no ponto na onda (“point-on-wave”) com tensão zero. A Fig. 8 mostra a sequência de TWs de corrente registradas em Brasada durante uma energização da linha alinhada com as TWs de corrente da fase A registradas durante uma falta da fase A para a terra.

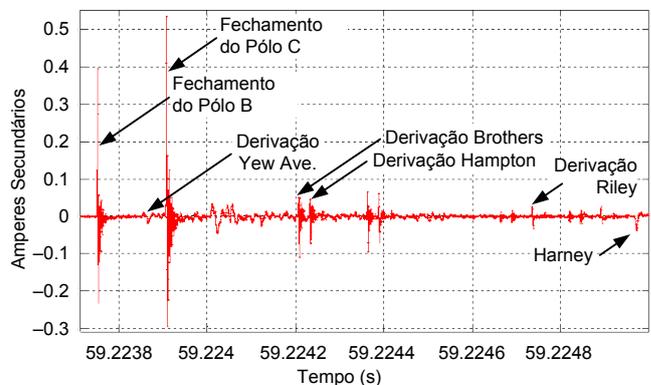


Fig. 7. Evento de energização da linha identificando as reflexões das TWs provenientes das derivações resultantes do fechamento do polo da fase B.

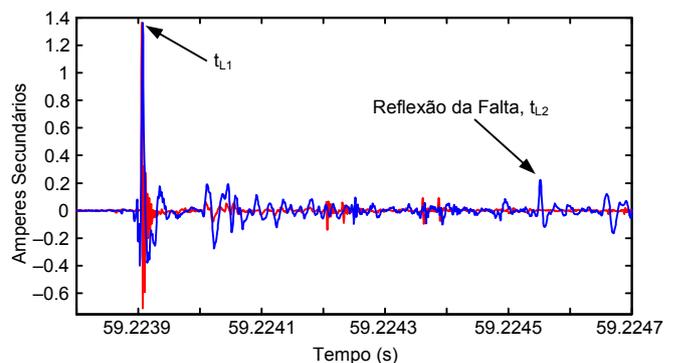


Fig. 8. TWs de corrente da fase A para uma falta da fase A para a terra alinhadas com as TWs de corrente registradas durante a energização da linha.

Uma vez que foi identificada a reflexão proveniente da falta usando o conceito acima, utilizamos os tempos de chegada da onda associados com a chegada da primeira onda ($t_{L1} = 59.223906323$ s) e da onda refletida ($t_{L2} = 59.224552026$ s) proveniente da falta para calcular a localização da falta usando (7). Com $v = 0.99225$ vezes a velocidade da luz, estimamos a localização da falta em 96.04 km (59.68 milhas). Além disso, como conhecíamos a localização das derivações e terminais da linha, informamos para a equipe de inspeção de linhas a localização da falta a partir da derivação Hampton.

5.1.2 Usando a localização de falta baseada em impedância para identificação da reflexão da TW proveniente de uma falta

Utilizamos os relatórios de evento de uma falta da fase C para a terra perto do terminal de Brasada para analisar os sinais da frequência de operação e TWs. Para este evento, a contribuição para a falta proveniente de Harney era tão baixa que o relé da linha em Harney operou após a abertura do disjuntor de Brasada (ocorreu um trip sequencial). A Fig. 9 mostra as correntes e tensões de fase registradas e a Fig. 10 mostra as TWs de corrente registradas no terminal de Brasada.

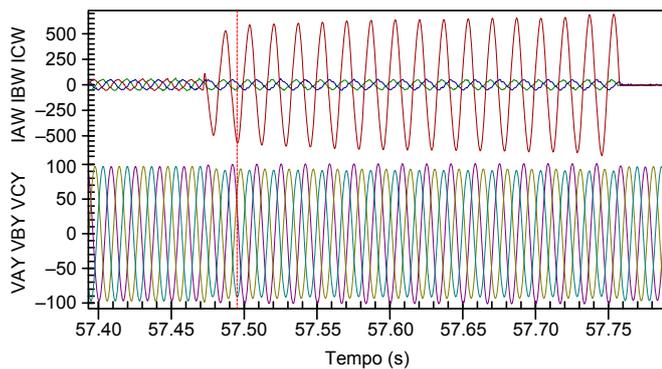


Fig. 9. Correntes (A primários) e tensões (kV primários) para uma falta da fase C para a terra para realizar a primeira estimativa de localização da falta.

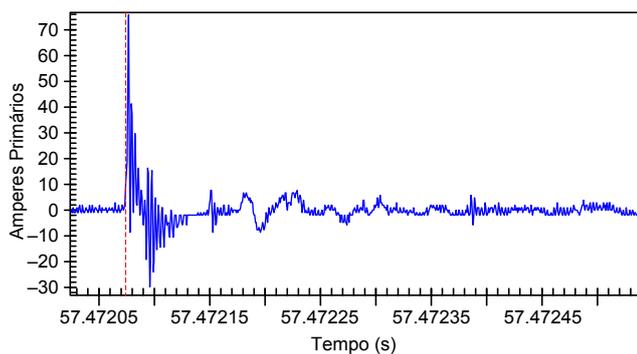


Fig. 10. TWs de corrente para uma falta da fase C para a terra usadas para localização da falta.

Para este evento, foi utilizado um método baseado na impedância de um terminal [8] para identificar a reflexão proveniente da falta. Conforme mencionado anteriormente, este evento resultou em um trip sequencial, o que significa que

o terminal Harney está alimentando a falta com o terminal Brasada aberto (sistema radial). Esta condição do sistema é bem adequada para o método baseado na impedância de um terminal. Usamos as tensões e correntes de fase capturadas no terminal de Harney numa condição de sistema radial juntamente com as impedâncias da linha de sequência-positiva e zero, e calculamos a localização da falta a 170.43 km (105.90 milhas) a partir de Harney e 11.18 km (6.95 milhas) de Brasada. Com esta estimativa da localização da falta baseada na impedância de um terminal, previmos a reflexão associada à falta como sendo de cerca de $t = 57.472114909$ s. Encontramos a reflexão em $t_{L2} = 57.472152205$ s. A Fig. 11 mostra a primeira onda e as reflexões provenientes da falta e da derivação Yew Avenue (localizada logo atrás do terminal Brasada).

Após identificar a reflexão proveniente da falta, calculamos a localização da falta usando o tempo de chegada da primeira TW e o tempo associado à primeira reflexão proveniente da falta: $t_{L1} = 57.472077325$ s e $t_{L2} = 57.472152205$ s. A localização estimada da falta foi a 11.13 km (6.92 milhas) de Brasada. Esta localização da falta leva à torre 8/6 (oitava torre após a sexta milha), onde a equipe de inspeção da linha encontrou um isolador com sinal de descarga mostrado na Fig. 12.

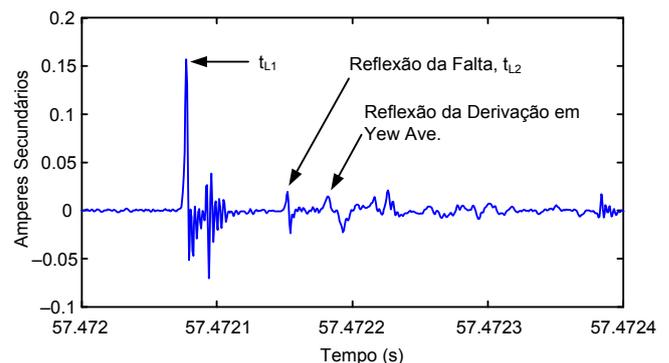


Fig. 11. Corrente alfa da fase C durante uma falta da fase C para a terra registrada no terminal Brasada juntamente com as reflexões identificadas provenientes da falta.



Fig. 12. Descarga no isolador da fase C, torre 8/6 (oitava torre após a sexta milha) da linha Brasada-Harney.

6 Estimação do comprimento da linha usando um evento de campo

Analisamos o evento de campo de uma falta da fase B para a terra na linha Goshen-Drummond de 161 kV, 117.112 km (72.77 milhas) (ver Fig. 13), onde conhecíamos a localização da falta, para estimar o comprimento da linha; a falta foi provocada por tiros em isoladores. A equipe de inspeção de linhas reportou a localização da falta a 61.41 km (38.16 milhas) a partir de Goshen e 55.70 km (34.61 milhas) de Drummond.

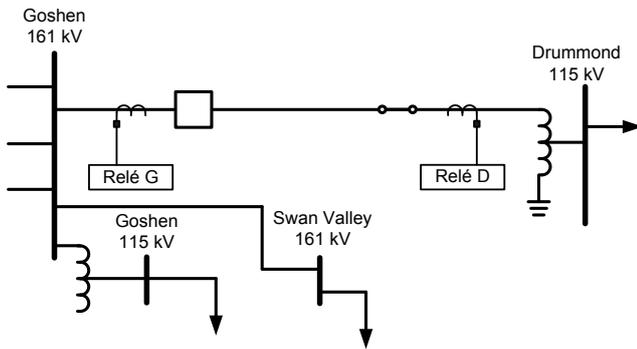


Fig. 13. Rede de transmissão incluindo a linha Goshen-Drummond e as conexões de relés e TCs. Observe que o terminal da linha em Drummond é um autotransformador [9].

A Fig. 14 mostra o diagrama de Lattice para esta falta e as correspondentes TWs das correntes da fase B modo-alfa, conforme visualizadas pelos relés de Goshen e Drummond. Utilizamos o algoritmo para estimar os tempos de chegada da onda descrita na Seção 4. O diagrama mostra as correntes filtradas de acordo com este algoritmo. Nessas plotagens, pode-se ver claramente as reflexões locais e remotas em Goshen: o primeiro pico refletido vem de Drummond e o segundo pico refletido vem da falta. Usando os seguintes dados de Goshen, estimamos o comprimento da linha de 117.44 km (72.97 milhas) usando (8) e a localização da falta em 61.22 km (38.04 milhas) a partir de Goshen usando (7).

$$t_{L1} = 36.832684635 \text{ s}$$

$$t_{L2} = 36.833097963 \text{ s}$$

$$t_{L3} = 36.833064209 \text{ s}$$

$$v = 0.98811 \text{ vezes a velocidade da luz}$$

O erro do comprimento da linha estimado foi de 0.28% ou 328 m; este erro pode ser atribuído ao aumento da flecha do condutor (“conductor sagging”).

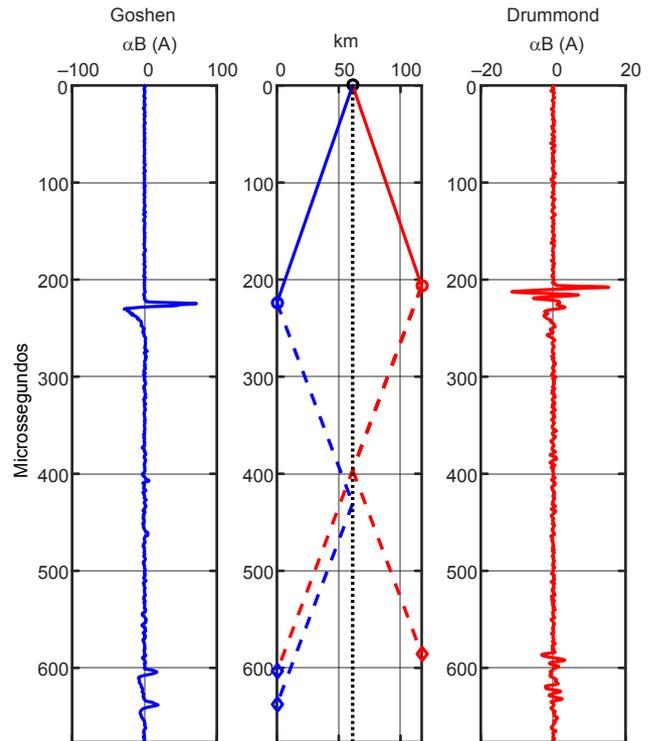


Fig. 14. TWs para uma falta da fase B para a terra na linha Goshen-Drummond usadas para estimação do comprimento da linha.

7 Conclusão

As análises dos eventos de campo apresentados neste artigo demonstram que o algoritmo de localização de faltas que utiliza o filtro diferenciador (“differentiator-smoother”) e o estimador do tempo de chegada da onda, juntamente com o método apresentado para identificação de reflexões a partir da falta, simplifica a análise da localização de faltas e fornece estimações precisas da localização da falta por TW baseada em um terminal (erros de menos de 200 m). As equipes de inspeção de linhas validaram estes resultados.

A análise dos eventos de campo também demonstra que os relatórios de eventos com TW fornecem informações para estimar o comprimento da linha dentro de 0.3%. O aumento da flecha do condutor (“conductor sagging”) é o principal contribuidor para a diferença entre o comprimento real e o geográfico da linha.

Referências

- [1] L. V. Bewley, *Traveling Waves on Transmission Systems*. Dover Publications, Mineola, NY, 1963.
- [2] A. Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems,” 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-62058-0, 1991.
- [3] M. Ando, E. O. Schweitzer, III, and R. A. Baker, “Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines, Part I: Data Collection System and Field Data,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS–104, Issue 12, December 1985, pp. 3524–3530.
- [4] M. Ando, E. O. Schweitzer, III, and R. A. Baker, “Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-Terminal HVDC Transmission Lines, Part II: Algorithm and Evaluation,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS–104, Issue 12, December 1985, pp. 3531–3537.
- [5] M. Aurangzeb, P. A. Crossley, and P. Gale, “Fault Location on a Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves Measured at a Single Line End,” proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 4, Singapore, January 2000, pp. 2437–2442.
- [6] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, “Locating Faults by the Traveling Waves They Launch,” proceedings of the 40th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2013.
- [7] F. E. Nathanson, *Radar Design Principles: Signal Processing and the Environment*, McGraw-Hill Book Co., 1969.
- [8] E. O. Schweitzer, III, “A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience,” proceedings of the 15th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1988.
- [9] S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, “Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results,” proceedings of the 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, May 2013.