

Aplicação de Proteção de Ultra Alta Velocidade e Localização de Falhas por Ondas Viajantes em uma Linha Híbrida

Sthitaprajnyan Sharma, Amol Kathe, Titiksha Joshi e Thamizhcholai Kanagasabai
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado na
46th Annual Western Protective Relay Conference
Spokane, Washington
22 a 24 de outubro de 2019

Traduzido para a português em março de 2021

Aplicação de Proteção de Ultra Alta Velocidade e Localização de Faltas por Ondas Viajantes em uma Linha Híbrida

Sthitaprajnyan Sharma, Amol Kathe, Titiksha Joshi, e Thamizhcholai Kanagasabai
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Resumo—Nesse artigo, compartilhamos uma experiência em uma instalação piloto usando proteção de ultra alta velocidade (UHS) e localização de faltas por ondas viajantes (TWFL) em uma linha híbrida de uma concessionária na Índia. A linha híbrida, de 220 kV e 89 km de extensão, possui duas seções aéreas e uma seção subterrânea no meio. Escolhemos essa linha, que está localizada entre uma estação geradora e uma subestação, para avaliar a performance da proteção de ultra alta velocidade e as funções de localização de falta por ondas viajantes. Ela é uma de duas linhas principais no fornecimento de potência para uma metrópole, e passa por florestas densas, assim como por áreas residenciais. A necessidade de um sistema preciso de localização de faltas e um esquema de religamento adaptativo para bloquear o religamento automático em faltas na seção subterrânea conduziram a esse projeto. Os relés com funções de ultra alta velocidade e localização de faltas por ondas viajantes foram instalados nos dois terminais da linha conectados por um canal de fibra óptica direta. Esse artigo discute os seguintes assuntos, com eventos de campo:

- Energização de linhas híbridas e configuração da proteção de ultra alta velocidade e localização de faltas por ondas viajantes.
- Performance da proteção de ultra alta velocidade para faltas internas e externas.
- Localização de faltas por ondas viajantes para faltas externas.
- Monitoramento de eventos transitórios para aprimorar a manutenção da linha.

I. INTRODUÇÃO

Localizar faltas em linhas híbridas com métodos convencionais pode ser um desafio. Para linhas híbridas, a localização precisa da falta é extremamente importante, e pode ser considerada crítica se a linha passar por terrenos acidentados.

Uma grande concessionária em uma região metropolitana na Índia opera uma linha híbrida de três seções, com circuito duplo de 220 kV e 89.35 km de extensão, entre uma estação geradora (S) e uma estação receptora (R). A capacidade instalada de geração da estação geradora é de 750 MVA (3×250 MVA). Cada linha híbrida possui duas seções aéreas com uma seção subterrânea entre elas. A linha passa sobre diversas estradas, ferrovias, e linhas de distribuição, além de passar sob linhas de extra alta tensão.

Os relés de proteção existentes com métodos de localização de faltas baseados em impedância não têm sido efetivos em aplicações de linhas híbridas. A proteção existente inclui um esquema diferencial de linhas como proteção primária, um elemento de distância como proteção secundária, e um

elemento de sobrecorrente direcional de fase e de terra como proteção de backup.

A concessionária desejava localizar as faltas de forma precisa e explorar a possibilidade de só permitir o religamento automático para faltas nas seções aéreas, impedindo o religamento para faltas na seção subterrânea. Uma instalação piloto de relés de proteção de linhas com proteção de altíssima velocidade e localização de faltas por ondas viajantes foi implementada em uma das linhas híbridas. A concessionária tinha a intenção de aprender sobre essa nova tecnologia, obter experiência, e avaliar a performance dos relés no sistema de 220 kV.

Nesse artigo, a Seção II discute brevemente os princípios da proteção de altíssima velocidade e resume o procedimento para aplicar o método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais em uma linha híbrida. A seção III fornece informações sobre a linha selecionada para o projeto piloto e as práticas atuais de proteção da concessionária nessa linha. A Seção IV apresenta detalhes sobre o comissionamento de dois relés de altíssima velocidade e o teste de energização da linha para configuração do localizador de faltas. A Seção V discute a experiência geral da instalação piloto e analisa a performance da proteção de altíssima velocidade e da tecnologia de localização de faltas por ondas viajantes para diversas faltas registradas no sistema. Devido ao registro de faltas em alta resolução, os relés de altíssima velocidade podem capturar eventos transitórios como precursores de faltas (faltas incipientes) ou indicar eventos como restrike do disjuntor, descargas atmosféricas, falha de equipamentos elétricos, e outros incidentes [1]. A Seção V também discute um incidente em específico onde diversos eventos transitórios foram capturados precedendo uma falta no sistema.

II. VISÃO GERAL DA PROTEÇÃO DE ALTÍSSIMA VELOCIDADE E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Essa seção explica brevemente os conceitos dos elementos de proteção de altíssima velocidade e do método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais em linhas híbridas. Ela também discute a lógica de religamento automático adaptativo para impedir o religamento nas seções subterrâneas [2].

A. Proteção Baseada em Grandezas Incrementais

Os relés de proteção de altíssima velocidade no domínio do tempo instalados nesse projeto piloto utilizam grandezas incrementais de tensão e corrente, que são as diferenças entre uma amostra atual instantânea e uma amostra de um ciclo anterior. As grandezas incrementais contêm a tensão e a corrente puramente da falta, excluindo qualquer informação de carga [3]. Esses sinais são filtrados em um filtro passa-baixa, e então são aplicados a elementos direcionais e de distância. O relé calcula a tensão incremental e as correntes réplicas incrementais para seis loops de medição.

1) Elemento Direcional: TD32

O elemento TD32 fornece uma indicação direcional rápida, segura e confiável. Esse elemento é usado como parte de um esquema de trip permissivo por sobrealcance (POTT). O elemento calcula o torque operativo como um produto entre a tensão incremental com sinal inverso e a corrente réplica incremental. Ele também calcula os torques restritivos a frente e reverso baseado na corrente réplica incremental e nos limites de impedância a frente/reversa. Para uma falta a frente, a tensão incremental e a corrente réplica incremental têm polaridades opostas, o que resulta em um torque positivo. Para uma falta reversa, a tensão incremental e a corrente réplica incremental têm a mesma polaridade, o que resulta em um torque negativo. Os torques calculados são integrados e o torque operativo é comparado com os torques restritivos. As referências [3] e [4] discutem a lógica do elemento direcional em detalhes.

2) Elemento de Distância de Subalcance de Zona 1: TD21

O elemento TD21 é um elemento rápido de subalcance de distância utilizado para *trip* instantâneo. Esse elemento calcula a mudança da tensão incremental no ponto de alcance e compara com a tensão pré falta no mesmo ponto. Para uma falta dentro da zona, a mudança na tensão incremental no ponto de alcance vai ser maior do que a tensão pré falta. Para uma falta além do ponto de alcance, a mudança na tensão incremental no ponto de alcance será menor do que a tensão pré falta no ponto de alcance.

Na Seção V, analisamos a operação do TD32 e do TD21 para faltas internas e externas nessa instalação piloto.

B. Proteção Baseada em Ondas Viajantes

O relé de proteção de altíssima velocidade inclui um elemento direcional baseado em ondas viajantes (TW32) e um esquema de proteção diferencial baseado em ondas viajantes (TW87). As referências [4] e [5] discutem em detalhes os elementos de proteção baseados em ondas viajantes e sua performance em campo. Nós não investigamos a operação dos elementos TW32 e TW87 em detalhes nesse artigo. Os pontos a seguir resumem a natureza das ondas viajantes de corrente e de tensão para diferentes condições de falta e auxiliam na análise básica de ondas viajantes:

- As polaridades das primeiras ondas viajantes de corrente e de tensão indicam a direção da falta. Para uma falta a frente, as ondas viajantes de corrente e de tensão têm polaridades opostas; para uma falta reversa, as ondas viajantes de corrente e de tensão têm a mesma polaridade. Esse princípio fundamental forma a base da lógica do elemento TW32.
- Para uma falta interna, as primeiras ondas viajantes de corrente detectadas nos terminais local e remoto têm a mesma polaridade e devem estar separadas por um tempo menor do que o tempo de propagação das ondas viajantes na linha. Para uma falta externa, as primeiras ondas viajantes de corrente detectadas nos terminais local e remoto têm polaridades opostas e devem estar separadas pelo tempo de propagação das ondas viajantes na linha. Esse princípio fundamental forma a base da lógica do elemento TW87.
- Uma falta em uma linha paralela resulta em ondas viajantes de corrente de mesma polaridade detectadas nos terminais da linha protegida. O esquema TW87 aplica segurança adicional para faltas externas em linhas paralelas. O esquema verifica se polaridade da onda viajante de corrente de operação (IOP) é consistente com a tensão pré falta (VPOL) na localização da falta. Para uma falta interna à linha protegida, é esperado que a polaridade da tensão VPOL seja igual a polaridade da corrente IOP. Esse padrão de polaridade é invertido para faltas na linha paralela.

C. Localização de Faltas em Linhas Híbridas

O relé de altíssima velocidade fornece informação de localização da falta baseada em dois métodos: impedância e ondas viajantes. Os métodos de localização de faltas baseados em impedância não fornecem resultados de alta precisão quando aplicados em uma linha híbrida com seções aéreas e subterrâneas. As referências [2] e [6] resumem os desafios gerais, fatores limitadores de precisão, e os desafios específicos de linhas híbridas dos métodos de localização de faltas baseados em impedância.

Em aplicações de linhas híbridas, os principais desafios incluem não-homogeneidade da linha e diferentes dados de impedância da linha para as seções aéreas e subterrâneas. O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais supera esses desafios. Esse artigo se refere ao princípio de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais e estende esse princípio para aplicações em linhas híbridas, possibilitando que a localização de faltas por ondas viajantes faça o controle adaptativo da lógica de religamento.

1) *O Método de Localização de Falhas por Ondas Viajantes com Dados de Dois Terminais*

Faltas em linhas de transmissão geram ondas viajantes de corrente e de tensão que se propagam do ponto da falta até os terminais da linha. O localizador de faltas implementado no relé de altíssima velocidade usa essa informação de ondas viajantes e emprega dois métodos para determinar a localização da falta: baseado em dados de dois terminais e baseado em dados de um terminal. Conforme o nome indica, o método baseado em dados de dois terminais funciona utilizando dados obtidos de ambos os lados da linha. Ele requer um canal de comunicação para troca dos tempos de chegada das ondas viajantes e fornecimento de sincronização entre os dois relés de altíssima velocidade para alinhar os dados. Um canal direto de fibra óptica é uma das maneiras de se fazer isso. Outra opção é usar um relógio GPS em ambos os terminais da linha para garantir a sincronização temporal e enviar as informações de tempo de chegada das ondas viajantes para um sistema central. O sistema central pode usar essa informação para computar a localização da falta offline.

Considere uma falta a uma distância de M km do terminal S e a uma distância de $LL - M$ km do terminal R. A equação (1) de [2] nos mostra o cálculo do método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais. Ele inclui os tempos de chegada das primeiras ondas viajantes em ambos os terminais da linha, o comprimento total da linha, e o tempo total de propagação das ondas viajantes na linha.

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_S - t_R}{TWLPT} \right) \quad (1)$$

onde:

M é a localização da falta encontrada pelo método de ondas viajantes com dados de dois terminais.

LL é o comprimento total da linha.

$TWLPT$ é o tempo total de propagação das ondas viajantes na linha.

t_S é o tempo de chegada da primeira onda viajante no terminal S.

t_R é o tempo de chegada da primeira onda viajante no terminal R.

A equação (1) pode ser modificada para compensar *delays* nos cabos dos TCs em ambos os terminais. A compensação dos *delays* nos cabos dos TCs ($TWCPT$) é uma configuração do usuário e é contabilizada no cálculo da localização da falta conforme mostrado em (2)

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left(1 + \frac{(t_S - TWCPT_S) - (t_R - TWCPT_R)}{TWLPT} \right) \quad (2)$$

O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais é simples. Diferentemente do método de um terminal, ele só requer identificação das primeiras ondas viajantes. O método de dois terminais foi provado em campo e fornece resultados precisos dentro de um intervalo de um vão de torre, em média.

O método de um terminal usa os dados das ondas viajantes de um lado da linha e deve considerar, além da primeira onda viajante, diversas ondas viajantes sucessivas, refletidas da falta e de outras terminações no sistema [7]. No caso de uma linha híbrida, o método de um terminal é desafiador devido às reflexões de toda terminação de seção na linha, e, portanto, ele não é discutido nesse artigo.

2) *Aplicando o Método de Localização de Falhas por Ondas Viajantes com Dados de Dois Terminais em Linhas Híbridas*

A equação (1) fornece um cálculo de localização da falta para uma linha homogênea de dois terminais. A velocidade de propagação (PV) das ondas viajantes pode ser calculada conforme mostrado em (3).

$$\begin{aligned} LL &= LL_1 + LL_2 + LL_3 \\ TWLPT &= TWLPT_1 + TWLPT_2 + TWLPT_3 \end{aligned} \quad (3)$$

No caso de uma linha híbrida de dois terminais, a velocidade de propagação das ondas viajantes na seção aérea (*Overhead line – OHL*) é diferente da seção subterrânea (*Underground cable – UGC*). Como resultado, (1) deve ser corrigido para considerar essas diferenças nas velocidades de propagação das ondas viajantes entre diferentes seções da linha híbrida. Por exemplo, a velocidade de propagação das ondas viajantes em uma linha aérea é de aproximadamente 98% da velocidade da luz, enquanto em uma seção subterrânea é de aproximadamente 55% da velocidade da luz.

Considere uma linha híbrida não homogênea com duas seções aéreas e uma seção subterrânea no meio. A seções aéreas tem comprimentos LL_1 e LL_3 e tempos de propagação das ondas viajantes de $TWLPT_1$ e $TWLPT_3$, respectivamente. A seção subterrânea tem um comprimento de LL_2 e um tempo de propagação das ondas viajantes de $TWLPT_2$. O comprimento total da linha (LL) e o tempo de propagação das ondas viajantes na linha ($TWLPT$) pode ser calculado em (4):

$$\begin{aligned} LL &= LL_1 + LL_2 + LL_3 \\ TWLPT &= TWLPT_1 + TWLPT_2 + TWLPT_3 \end{aligned} \quad (4)$$

A referência [2] resume a localização de faltas em linhas híbridas nos 3 passos a seguir:

1. Calcule a localização da falta M^* considerando uma linha teoricamente homogênea e substituindo o comprimento total da linha (LL) e o tempo de propagação das ondas viajantes ($TWLPT$) em (1).
2. Calcule o tempo t^* considerando uma linha homogênea representada por uma linha reta.
3. Calcule a localização real da falta M projetando o tempo calculado t^* na característica real da linha híbrida não homogênea.

A Fig. 1 mostra um exemplo onde a localização de falta (M^*) calculada usando (1) sugere que a falta está localizada em uma seção aérea da linha. Aplicando o método de cálculo mencionado previamente, a localização real da falta (M) pode ser calculada, e a falta aparenta estar na seção subterrânea da linha. Essa informação importante pode ser usada na aplicação descrita na próxima seção (Seção D).

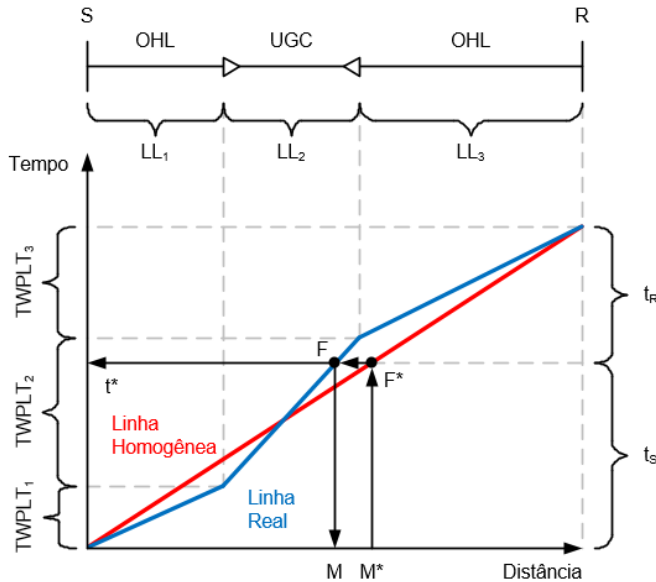


Fig. 1. Ilustração do método para calcular a localização de faltas utilizando três passos, utilizando ondas viajantes com dados de dois terminais, para uma linha não homogênea [2].

3) Medindo o Tempo de Propagação das Ondas Viajantes na Linha

Para configurar o método de localização de faltas baseado em ondas viajantes e obter melhor precisão na localização das faltas, é essencial determinar com exatidão o tempo de propagação das ondas viajantes para todas as seções da linha híbrida. Isso pode ser feito através de um teste de energização da linha durante o comissionamento do relé. A ideia é energizar a linha a partir do terminal local enquanto o disjuntor remoto está aberto. A sequência de eventos esperada é resumida a seguir:

1. Quando a linha é energizada e o disjuntor fecha no terminal local, um degrau de tensão é aplicado, gerando um transitório. As ondas viajantes de tensão e corrente incidentes viajam pela linha até o terminal remoto.
2. As impedâncias características de linhas aéreas (aproximadamente 300–400 Ω) e de cabos subterrâneos (aproximadamente 30–80 Ω) são muito diferentes [8]. Como resultado, todo ponto de transição entre as linhas aéreas e subterrâneas agem como uma terminação na qual parte da onda viajante incidente reflete e parte é transmitida. A onda viajante refletida retorna ao terminal energizado e a onda viajante transmitida viaja para frente em direção ao terminal remoto.

3. No terminal remoto da linha, como o disjuntor está aberto, a onda viajante de corrente incidente é totalmente refletida com polaridade oposta.

Como resultado, a onda viajante viaja o comprimento total da linha duas vezes: para frente quando ela é gerada e de volta ao terminal energizado depois de ser refletida no terminal remoto.

As referências [8] e [9] explicam os conceitos dos coeficientes de reflexão e transmissão das ondas viajantes. Esses coeficientes ajudam a determinar a magnitude e a polaridade das ondas refletidas e transmitidas. Em geral, as ondas viajantes de corrente refletidas de uma linha aérea para uma linha subterrânea têm a mesma polaridade que a onda incidente, enquanto as ondas viajantes refletidas de uma seção subterrânea para uma seção aérea têm polaridade oposta à onda incidente. Essa informação pode auxiliar na correta identificação da onda refletida para a medição do tempo de propagação das ondas viajantes. A referência [2] fornece exemplos numéricos para calcular as ondas viajantes incidentes, transmitidas e refletidas para um teste de energização da linha e faltas em diferentes seções, considerando uma linha híbrida.

D. Lógica de Controle do Religamento Automático Adaptativo em Linhas Híbridas

A informação da localização da falta por ondas viajantes com dados de dois terminais é usada pela lógica de controle do religamento automático adaptativo para 1) permitir seletivamente o *trip* monopolar e o religamento para faltas nas seções aéreas da linha e 2) forçar o *trip* tripolar e bloquear o religamento automático para faltas na seção subterrânea da linha híbrida. Nós podemos configurar diversas regiões de bloqueio nessa aplicação. Se o cálculo da localização da falta por ondas viajantes com dados de dois terminais indicar uma localização dentro de qualquer uma das regiões de bloqueio especificadas, a lógica ativa um *bit* de cancelamento do controle de religamento automático (ARC). Esse *bit* é ativado dentro de alguns milissegundos após a falta e pode ser configurado para controlar a lógica de *trip* e o esquema de religamento. Se a informação de localização da falta estiver indisponível, como no caso de uma falha de comunicação, a lógica permite ou bloqueia o religamento baseando-se em ajustes definidos pelo usuário. A lógica de controle do religamento automático adaptativo é mostrada na Fig. 2.

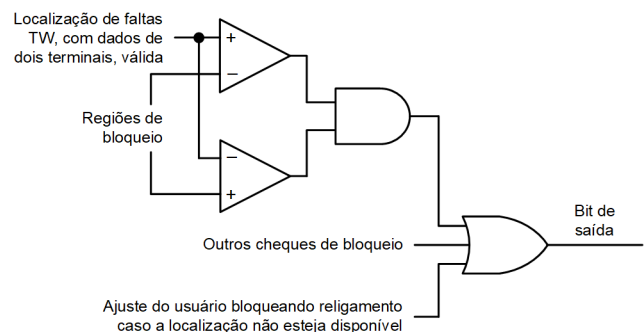


Fig. 2. Diagrama da lógica de controle do religamento automático adaptativo.

III. INSTALAÇÃO PILOTO

A. Configuração da Linha

A potência gerada na estação S é transferida através da linha híbrida de circuito duplo de 220 kV e fornecida para a estação R, como mostrado na Fig. 3. Em condições de pico de carga, a potência transferida por essas duas linhas pode chegar a 700 MVA ou mais, e ambas as linhas são igualmente críticas para a concessionária. De acordo com a concessionária, acontecem aproximadamente cinco a sete faltas por ano em cada circuito. A maioria dessas faltas acontece na seção aérea da linha e comumente ocorrem durante a temporada das monções.

As duas linhas híbridas têm configurações idênticas. Elas estão em torres de circuito duplo na maior parte do comprimento da linha, exceto em um trecho em que elas se separam e passam embaixo de linhas de extra alta tensão em torres de circuito simples. Cabos de XLPE são usados para cada fase na seção subterrânea das linhas de 220 kV. Para o projeto piloto, os relés de proteção com proteção de altíssima velocidade e com a funcionalidade de localização de faltas por ondas viajantes foram instalados em ambos os terminais em uma das linhas híbridas. Um canal direto de comunicação utilizando fibra óptica está disponível entre as Estações S e R, que passa pelo cabo terra nas seções aéreas e é enterrado no subsolo junto com os cabos na seção subterrânea.

B. Filosofia da Proteção Existente

A concessionária utiliza atualmente um esquema diferencial de corrente através de um canal direto de comunicação por fibra óptica como proteção primária e uma proteção de distância convencional baseada em fasores com um esquema de *trip* permissivo por subalcançe (PUTT) como proteção secundária.

Elementos de proteção de sobrecorrente direcional de fase e de terra fornecem proteção de backup. O esquema de proteção existente trata a linha híbrida como uma linha homogênea de dois terminais. Os relés de proteção existentes empregam um método de localização de faltas baseado em impedância utilizando o valor da impedância total da linha híbrida, que é a soma das impedâncias das seções aéreas e subterrâneas. Esse método de localização de faltas baseado em impedância não fornece uma localização de faltas altamente precisa devido aos desafios específicos dos cabos e das linhas híbridas. Esse é um dos maiores desafios que a concessionária enfrenta com o esquema existente. O religamento automático também está em funcionamento no esquema existente. O *trip* do elemento diferencial de linha inicia o religamento automático no relé de distância. O relé de distância deve primeiramente identificar a falta como uma falta monofásica dentro da Zona 1 e enviar um *trip* monopolar antes de liberar o comando de uma tentativa única de religamento automático. O relé de distância envia o comando de religamento depois de um tempo morto de 400 ms.

Para uma falta em evolução, uma falta com mais de uma fase, ou um evento com religamento malsucedido, o esquema existente efetua um *trip* tripolar no disjuntor da linha e vai para estado de *lockout*. proteção de backup do elemento de sobrecorrente direcional envia um *trip* tripolar quando detecta uma falta. O esquema atual não é seletivo e pode gerar um comando de religamento automático mesmo para uma falta monofásica na seção subterrânea, incluindo faltas na terminação dos cabos subterrâneos. O religamento para faltas nos cabos subterrâneos pode causar danos severos e reparos de alto custo. Como um resultado, a concessionária deseja explorar a possibilidade de um esquema de religamento automático adaptativo para bloquear o religamento em faltas na seção subterrânea e nas terminações de cabos.

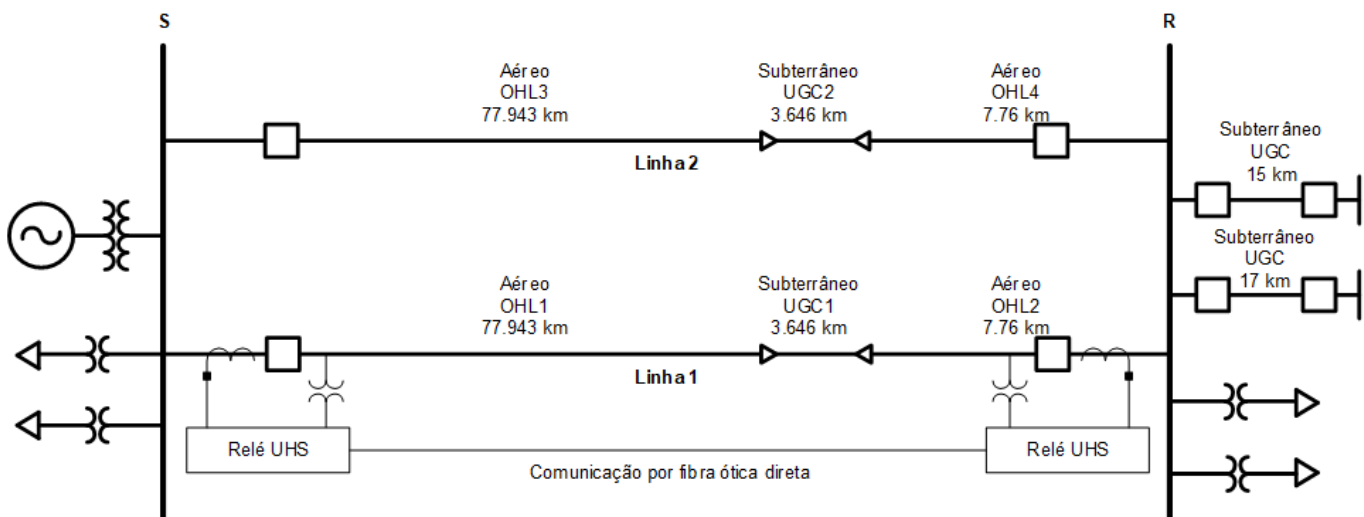


Fig. 3. Diagrama unifilar do sistema

IV. COMISSIONAMENTO

A Fig. 3 mostra o diagrama unifilar do sistema. Os dados do sistema são fornecidos na Tabela I.

TABELA I
DADOS DO SISTEMA

Parâmetro do Sistema	Dado do Sistema
Impedância de sequência positiva da seção aérea	$0.07348 + 0.3938j \Omega/\text{km}$
Impedância de sequência zero da seção aérea	$0.2991 + 1.112j \Omega/\text{km}$
Impedância de sequência positiva da seção subterrânea	$0.0318 + 0.13j \Omega/\text{km}$
Impedância de sequência zero da seção subterrânea	$0.12 + 0.08j \Omega/\text{km}$
Relação do TC (Terminal S)	1000
Corrente nominal no secundário do TC (Terminal S)	1 A
Relação do TP (Terminal S)	2000
Relação do TC (Terminal R)	1000
Corrente nominal no secundário do TC (Terminal R)	1 A
Relação do TP (Terminal R)	2000
Comprimento total da linha	89.35 km

Os relés de altíssima velocidade com funcionalidade de localização de faltas por ondas viajantes estão instalados em ambos terminais da Linha 1. Os relés são conectados via fibra ótica direta e a Estação R possui conexão a um relógio GPS com referência de tempo absoluta.

A. Comunicações

Um canal direto de comunicação por fibra ótica estava disponível entre os terminais S e R. Esse canal foi usado na instalação para trocar sinais de corrente e de tensão e informações de tempo de chegada das ondas viajantes entre os dois relés. Anteriormente ao comissionamento, a perda no canal de comunicação e a seleção do SFP foram verificadas com a ajuda do departamento de telecomunicações da concessionária. O relé de altíssima velocidade monitora o canal de comunicação em tempo real e fornece informações valiosas, como status do canal, *delay* do link, e potência de transmissão e recepção do *transceiver* SFP. Essa informação era usada para garantir que o canal de comunicação estava em um estado saudável.

Um GPS de alta precisão estava disponível somente no terminal R. O esquema de proteção envolvendo os dois relés de altíssima velocidade com um canal de comunicação direto por fibra ótica não requer referência de tempo absoluto de uma fonte de tempo externa. O relógio interno de alta precisão do relé garante sincronização entre os terminais, e ambos os relés permanecem sincronizados entre si, independente da disponibilidade de uma fonte de tempo externa. Essa sincronização fornece o alinhamento de dados necessário entre os relés nos terminais S e R. O relógio GPS no terminal R só fornece uma referência de tempo absoluto para análise pós evento.

B. Teste de Energização da Linha

Durante o comissionamento, um teste de energização da linha foi feito de ambos os terminais para medir o tempo de propagação das ondas viajantes para cada seção da linha híbrida. A linha foi primeiramente energizada a partir do terminal S, como o disjuntor do terminal R aberto; em seguida o teste foi repetido energizando-se o terminal R, com o disjuntor do terminal S aberto.

1) Energização do Terminal S com o Terminal R Aberto

A Fig. 4 mostra as correntes e tensões capturadas durante a energização da linha a partir do terminal S. Esses sinais de correntes e tensões não filtrados foram capturados em uma taxa de amostragem de 1 MHz.

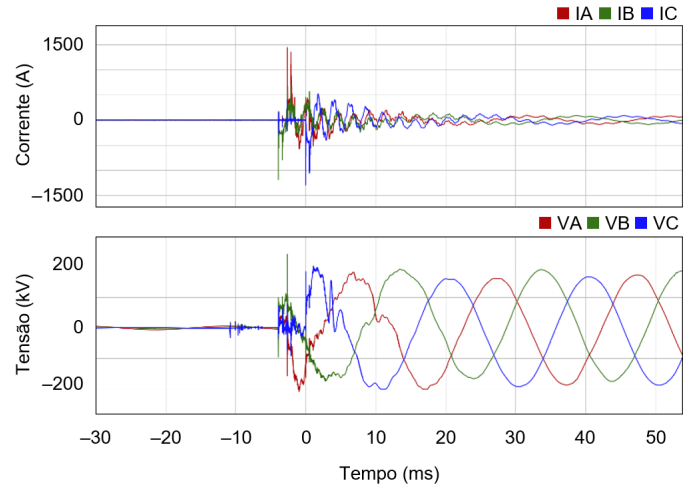


Fig. 4. Correntes e tensões não filtradas capturadas durante a energização da linha a partir do terminal S.

A informação das ondas viajantes é extraída passando os sinais por um filtro *differentiator smoother* [9]. As ondas viajantes contêm dois modos: aéreos (alpha e beta) e de terra [9]. O modo de terra exibe maior atenuação e dispersão. Tipicamente, é melhor selecionar o modo aéreo alpha correspondente ao último polo que foi fechado. A Fig. 5 exibe as ondas viajantes de corrente registradas no terminal S.

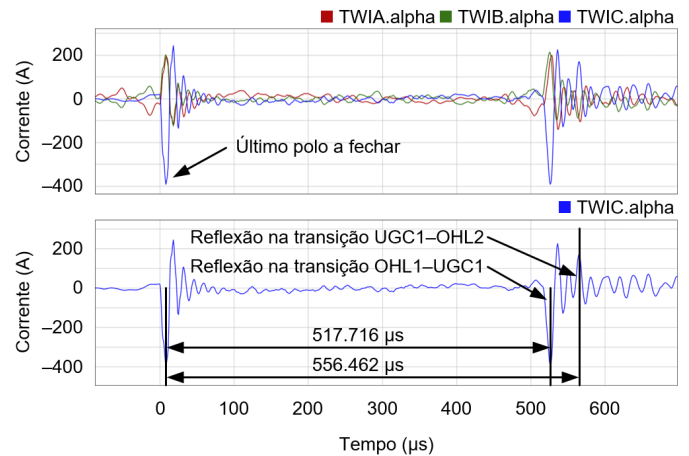


Fig. 5. Ondas viajantes de corrente capturadas durante a energização da linha a partir do terminal S.

Observando o modo aéreo de corrente alpha referenciada a fase C, o terminal S detecta primeiro a reflexão da transição OHL1-UGC1 em $517.716 \mu\text{s}$, seguida de uma reflexão da transição UGC1-OHL2 em $556.462 \mu\text{s}$. Perceba que esse é o tempo de ida e volta, pois, a onda viajante gerada da energização do terminal S viaja para frente em direção ao terminal remoto aberto, é refletida em todos os pontos de transição entre a linha aérea e a seção subterrânea, e viaja de volta ao terminal energizado S. O tempo de propagação das ondas viajantes para qualquer seção pode ser calculado primeiramente determinando o tempo de ida e volta da seção a partir das medições disponíveis e em seguida dividindo os valores calculados por 2. A Tabela II mostra os tempos de propagação das ondas viajantes na linha calculados para as seções OHL1 e UGC1.

TABELA II
MEDIÇÕES DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS VIAJANTES

Seção	Tempo de Ida e Volta	TWLPT
OHL1	$517.716 \mu\text{s}$	$258.858 \mu\text{s}$
UGC1	$556.462 - 517.716 = 38.746 \mu\text{s}$	$19.373 \mu\text{s}$

Durante o teste, foi difícil identificar as reflexões do terminal R e determinar o tempo de propagação das ondas viajantes na seção OHL2. Um dos motivos é a atenuação e dispersão das ondas viajantes [8] [9]. Como as ondas viajantes percorrem longas distâncias e passam por linhas aéreas e seções subterrâneas, elas são atenuadas e apresentam um padrão de dispersão. Cabos subterrâneos apresentam muito mais dispersão e atenuação em relação às linhas aéreas. Além desses efeitos, qualquer transição entre uma seção aérea e uma seção subterrânea resulta em reflexão e redução nos níveis de sinal das ondas viajantes que chegam até o terminal remoto da linha. Quando o sinal de ondas viajantes chega no terminal remoto da linha, ele pode ser reduzido ainda mais se houverem outros sinais de ondas viajantes chegando naquele terminal ao mesmo tempo por caminhos diferentes. Por essas razões, é possível que o terminal energizado não detecte reflexões do terminal remoto da linha ou dos pontos de transição que estão longe do terminal energizado. Portanto, é uma boa prática realizar os testes de energização da linha nos dois terminais.

2) Energização do Terminal R com o Terminal S Aberto

O teste de energização da linha descrito anteriormente foi repetido energizando-se o terminal R, com o disjuntor do Terminal S aberto. A Fig. 6 mostra esses sinais não filtrados de tensão e corrente capturados a cada microssegundo no terminal R.

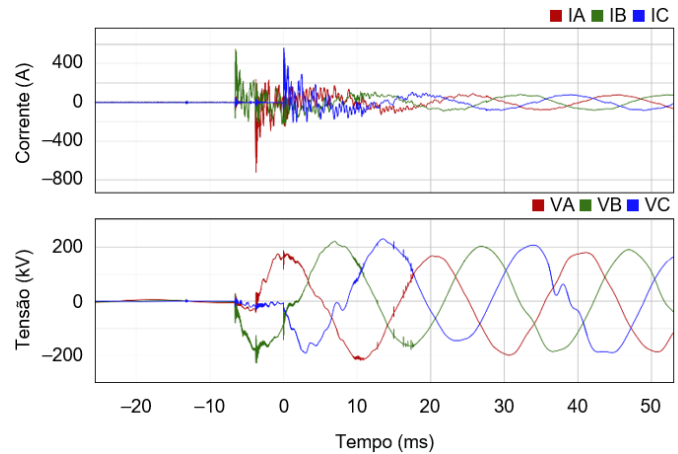


Fig. 6. Correntes e tensões não filtradas capturadas durante a energização da linha a partir do terminal R.

A Fig. 7 mostra as ondas viajantes de corrente registradas no terminal R. Como o polo C foi o último a se fechar, o modo aéreo alpha referenciado a fase C foi usado para calcular o tempo de ida e volta.

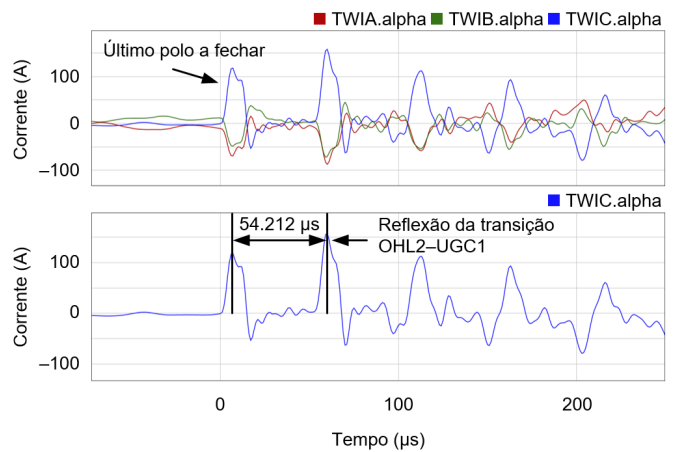


Fig. 7. Ondas viajantes de corrente capturadas durante a energização da linha a partir do terminal R.

Durante esse teste, a reflexão da transição OHL2-UGC1 foi identificada, e o tempo de ida e volta foi usado para calcular o tempo de propagação das ondas viajantes para a seção OHL2, conforme mostrado na Tabela III.

TABELA III
MEDIDAS DE TEMPO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS VIAJANTES

Seção	Tempo de Ida e Volta	TWLPT
OHL2	$54.212 \mu\text{s}$	$27.106 \mu\text{s}$

A Tabela IV resume os dados de comprimento das linhas e tempos de propagação das ondas viajantes para a linha híbrida.

TABELA IV
DADOS DE ONDAS VIAJANTES DA LINHA HÍBRIDA

Seção	Comprimento da linha	TWLPT
OHL1	77.943 km	258.858 μ s
UGC1	3.646 km	19.373 μ s
OHL2	7.76 km	27.106 μ s
Total	89.349 km	305.337 μ s

C. Ajustes do Relé

Devido à falta de dados disponíveis durante o comissionamento e por ser uma instalação piloto, o ajuste de impedância a frente do elemento TD32 foi ajustado em seu valor mínimo. O ajuste de impedância reversa do elemento foi configurado em 30% da magnitude da impedância de sequência positiva da linha. O alcance do elemento TD21 foi ajustado em 70% da linha, e o alcance do elemento TD21 de terra foi ajustado em 65% da linha.

O localizador de faltas foi configurado usando o comprimento da linha e o tempo de propagação das ondas viajantes na linha informado na Tabela IV. A lógica de controle adaptativo do religamento automático foi configurada ajustando a região de bloqueio igual ao comprimento da seção subterrânea, com uma margem de segurança de 600 m para evitar religamentos espúrios em faltas nos cabos subterrâneos. Em casos onde a informação de localização de falta está indisponível, o ajuste foi configurado para bloquear o religamento automático. A concessionária desejava entender e avaliar a performance dos relés de altíssima velocidade antes de conectá-los ao circuito de *trip* dos disjuntores da linha. Como resultado, as saídas dos relés não foram usadas para comandar o disjuntor da linha e o esquema existente de religamento automático.

V. ANÁLISE DE EVENTOS DE CAMPO

Essa seção é focada na performance dos elementos de proteção e do localizador de falta para diferentes eventos que ocorreram no sistema piloto durante o ano seguinte ao comissionamento.

A. Falta Interna da Fase A para Terra em 24 de Setembro de 2018

Essa foi a primeira falta interna na Linha 1 registrada pela concessionária após o comissionamento dos relés de altíssima velocidade. A Fig. 8 e a Fig. 9 mostram os sinais de tensão e de corrente no terminal S e R, respectivamente. A Fig. 10 e a Fig. 11 mostram que a tensão incremental e a corrente réplica incremental têm polaridades opostas durante a falta.

Como resultado, TD32FA e TD32F foram ativados em menos de 1 ms, indicando uma direção de falta a frente e a fase A como a fase com falta. As saídas dos elementos de distância de terra, TD21AG e TD21G, foram ativadas em 6 a 7 ms em ambos os terminais com identificação correta da fase em falta.

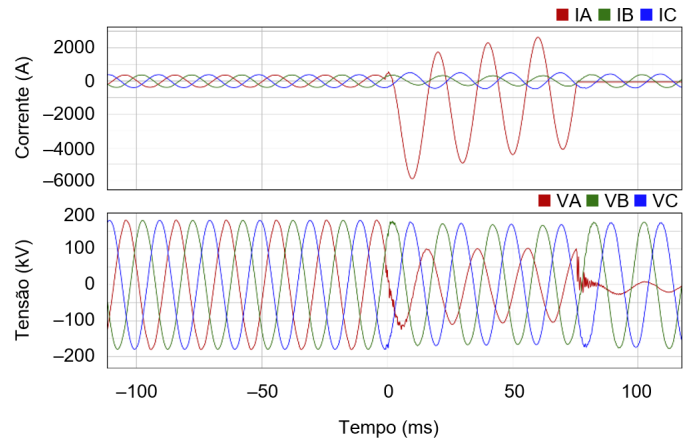


Fig. 8. Sinais de tensão e de corrente para uma falta interna da fase A para a terra no terminal S.

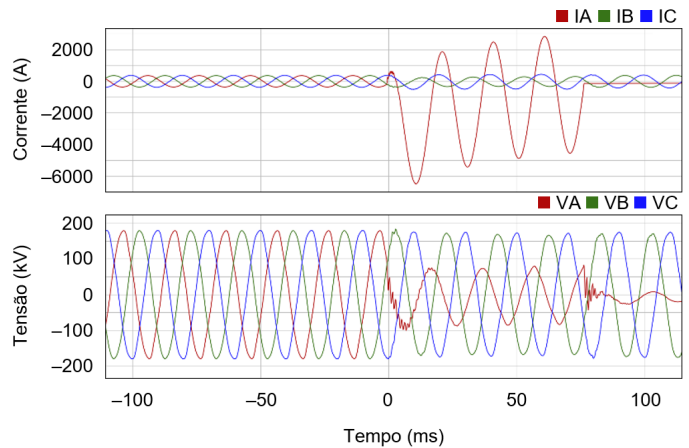


Fig. 9. Sinais de tensão e corrente para uma falta interna da fase A para terra no terminal R.

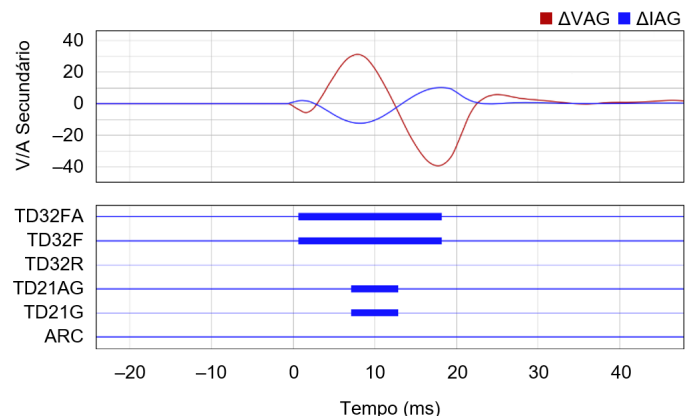


Fig. 10. Grandezas incrementais de tensão e de corrente (com escala) de resposta dos elementos TD32 e TD21 para uma falta interna da fase A para a terra no terminal S.

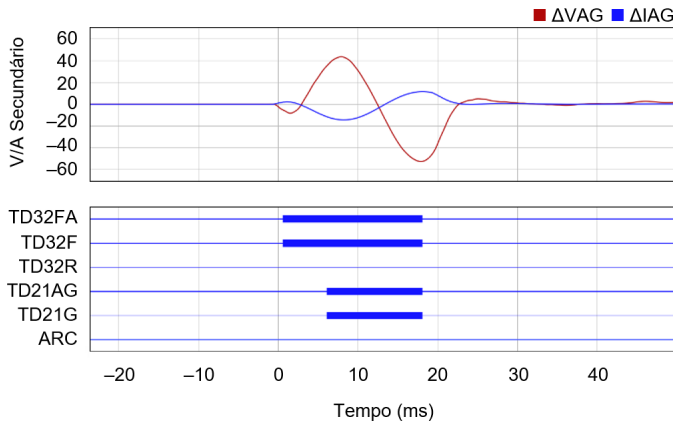


Fig. 11. Grandezas incrementais de tensão e de corrente (com escala) de resposta dos elementos TD32 e TD21 para uma falta interna da fase A para a terra no terminal R.

A Tabela V mostra a localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais reportada pelos relés nos terminais S e R. A falta aconteceu na seção aérea OHL1, e a lógica de controle do religamento automático não ativou o bit de bloqueio do religamento automático ARC em nenhum dos dois terminais.

TABELA V
LOCALIZAÇÃO DA FALTA POR ONDAS VIAJANTES REPORTADA PELO RELÉ

Terminal	Método de Localização da Falta	Localização da Falta
S	Ondas viajantes com dados de dois terminais	51.342 km
R	Ondas viajantes com dados de dois terminais	38.010 km

B. Falta Interna da Fase A para Terra em 27 de Fevereiro de 2019

A concessionária registrou uma falta interna da fase A para a terra em uma das seções aéreas da linha 1. A Fig. 12 mostra os sinais de corrente e tensão e a performance da proteção no terminal R. Os elementos TD32FA e TD21AG operaram corretamente, indicando uma falta dentro da zona da fase A para a terra. O relé de altíssima velocidade emitiu o *trip* em menos de 2 ms. O terminal R enviou um sinal permissivo *key* (KEYA) para o terminal S quando o elemento TD32F foi ativado.

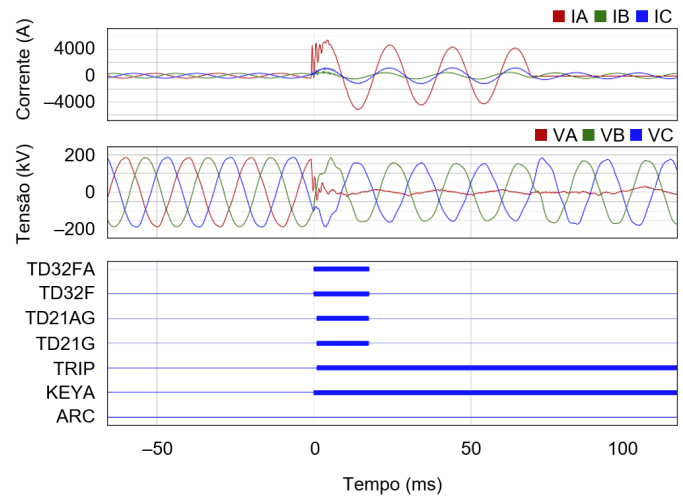


Fig. 12. Sinais de corrente e de tensão e performance da proteção no terminal R.

A Fig. 13 mostra as primeiras ondas viajantes de corrente e tensão no terminal R. As polaridades são opostas, indicando uma falta a frente.

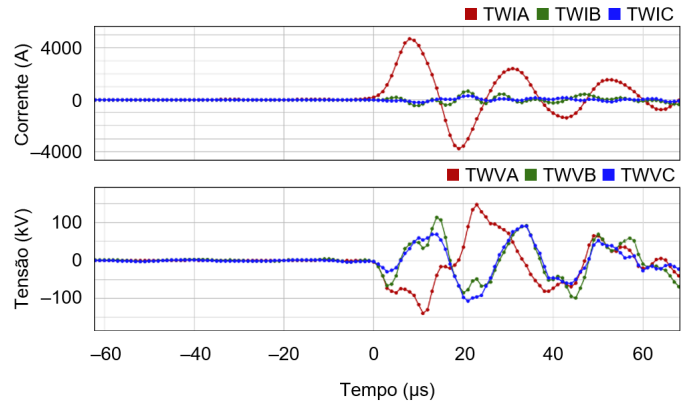


Fig. 13. Primeiras ondas viajantes de corrente e de tensão no terminal R durante uma falta interna.

A Fig. 14 mostra os sinais de corrente e tensão e a performance da proteção no Terminal S. O elemento TD32FA operou, indicando uma falta a frente na fase A, mas o elemento TD21G não operou, pois, a falta aconteceu a 98% da linha e além do ajuste de alcance. O terminal S operou em um esquema de POTT sobre o canal direto de fibra óptica após receber o sinal permissivo PTRXA e emitiu o *trip* em menos de 2 ms.

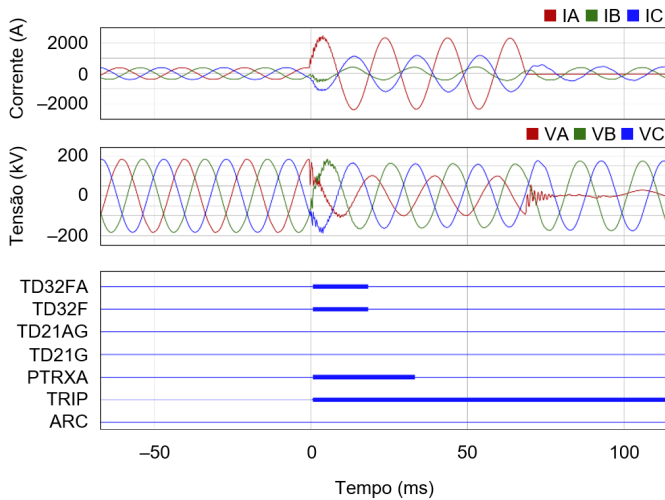


Fig. 14. Sinais de tensão e de corrente e performance da proteção no terminal S.

A Tabela VI mostra localização da falta reportada pelo método de ondas viajantes com dois terminais pelos relés nos terminais S e R. A falta foi na seção aérea da linha, perto do terminal R.

TABELA VI
LOCALIZAÇÃO DE FALTA POR ONDAS VIAJANTES REPORTADA PELO RELÊ DE ALTÍSSIMA VELOCIDADE

Terminal	Método de Localização da Falta	Localização da Falta
S	Ondas viajantes com dados de dois terminais	87.649 km
R	Ondas viajantes com dados de dois terminais	1.702 km

Como essa falta ocorreu na seção aérea da linha, a lógica de controle automático do religamento não ativou o bit de saída ARC, como mostrado nas Fig. 12 e Fig. 14. A concessionária também confirmou que um religamento foi realizado pelo esquema existente e obteve sucesso.

C. Falta Externa da Fase A para Terra em 5 de Junho de 2019.

Uma falta da fase A para a terra ocorreu na Linha 2 (a linha paralela, não monitorada pelos relés de altíssima velocidade) em 5 de junho de 2019, às 11:25, e os relés da Linha 2 iniciaram o *trip* para essa falta. Os relés de altíssima velocidade da Linha 1 restringiram corretamente, sem operação dos elementos TD21 e do esquema POTT. A Fig. 15 mostra os sinais de corrente e tensão e a resposta da proteção no terminal S. Os elementos TD32RA e TD32R operaram, indicando uma falta reversa na fase A.

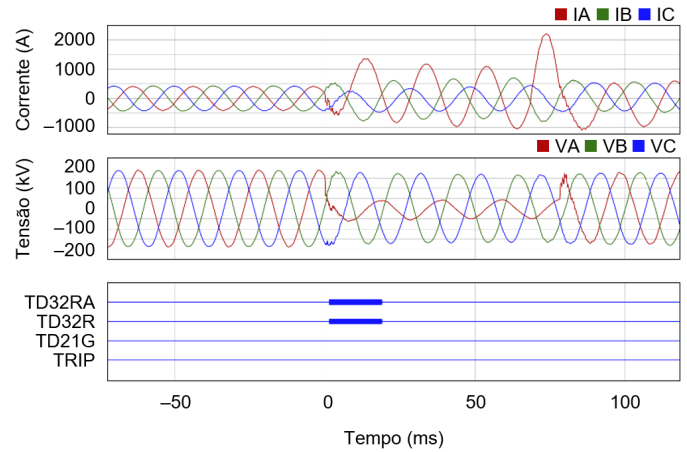


Fig. 15. Sinais de tensão e de corrente e performance da proteção no terminal S.

A Fig. 16 mostra que a tensão incremental e a corrente réplica incremental têm a mesma polaridade para uma falta reversa no Terminal S.

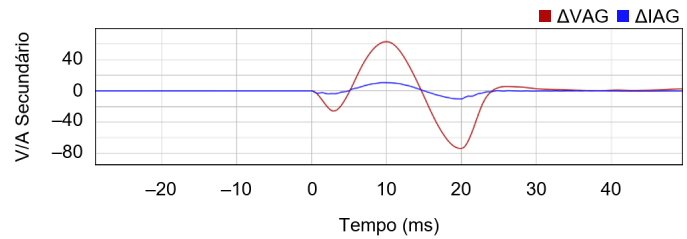


Fig. 16. Relação entre a tensão incremental e a corrente réplica incremental (em escala) para a falta reversa no terminal S.

A Fig. 17 mostra os sinais de corrente e de tensão e a resposta da proteção no terminal R. O elemento TD32F operou e o elemento TD21G restringiu, pois, a falta aconteceu na linha paralela mais próxima do terminal S.

A Fig. 18 mostra que as primeiras ondas viajantes de corrente e de tensão na fase A no terminal S têm a maior magnitude entre as três fases, e suas polaridades coincidem. Isso é uma indicação de uma falta reversa na fase A.

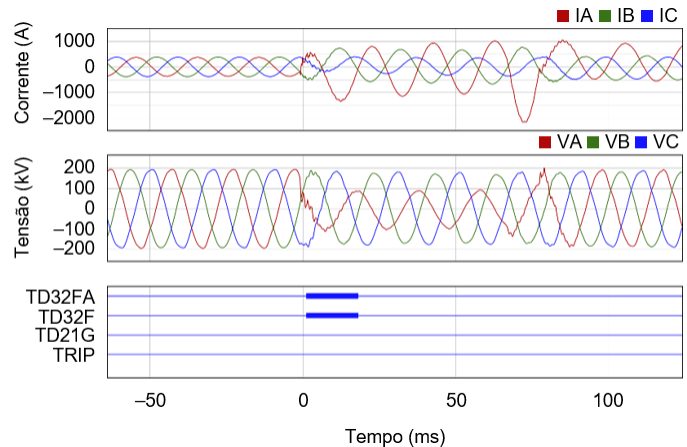


Fig. 17. Sinais de corrente e tensão e performance da proteção no terminal R.

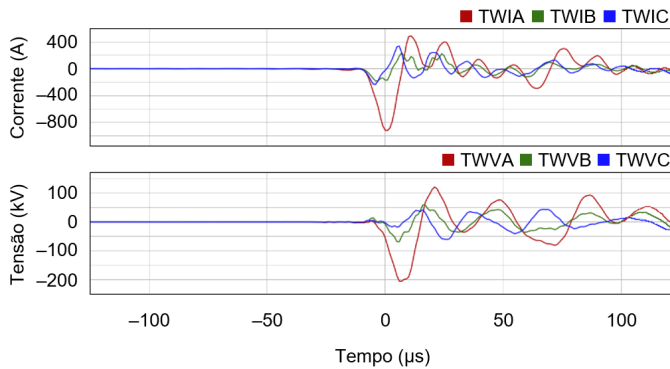


Fig. 18. Ondas viajantes de corrente e de tensão durante uma falta externa no terminal S.

Como as primeiras ondas viajantes foram capturadas com sucesso pelos relés de altíssima velocidade nessa falta, os tempos de chegada podem ser usados para calcular a localização da falta *offline*. A Fig. 19 mostra as primeiras ondas viajantes de corrente nos terminais S e R.

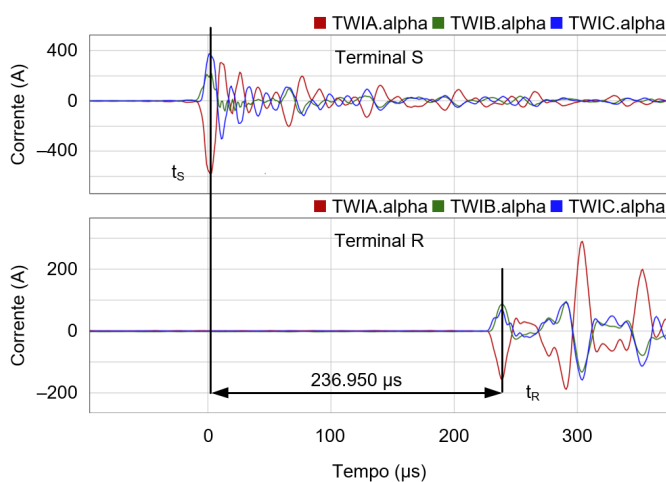


Fig. 19. Primeiras ondas viajantes de corrente capturadas nos terminais S e R.

Substituindo $t_S = 0 \mu s$ e $t_R = 236.950 \mu s$ em (1), obtemos a localização da falta a partir do terminal S em (5).

$$M = \frac{89.35}{2} \cdot \left(1 + \frac{-236.950}{305.34} \right) = 10.01 \text{ km} \quad (5)$$

A localização de 10.01 km corresponde a $t^* = 34.1950 \mu s$, assumindo uma linha homogênea. O valor de t^* usando a característica de linha híbrida nos dá a verdadeira localização da falta de 10.25 km do terminal S na linha 2. O relé de distância existente no terminal S reportou uma localização da falta de 9.1 km através do método baseado em impedância.

Conforme explicado na seção II, o esquema TW87 inclui um *check* de segurança VPOL-IOP para determinar se a falta é interna ou externa, especificamente para linhas paralelas. Nesse evento, a falta ocorreu em um ponto positivo da onda de tensão pré falta na localização da falta (VPOL), e a polaridade da onda viajante da corrente de operação (IOP) era negativa. Essa análise *offline* também confirmou que a falta foi externa e na linha paralela (linha 2).

A Fig. 20 mostra os sinais de tensão e corrente capturados pelo relé de proteção no terminal S na linha 2. A oscilografia nos mostra a sequência completa da falta: uma falta da fase A para a terra resultou em uma abertura monopolar, seguida do tempo morto do religador. Passado o tempo morto, a linha foi religada na falta, resultado em um *trip* tripolar e *lockout* no religador.

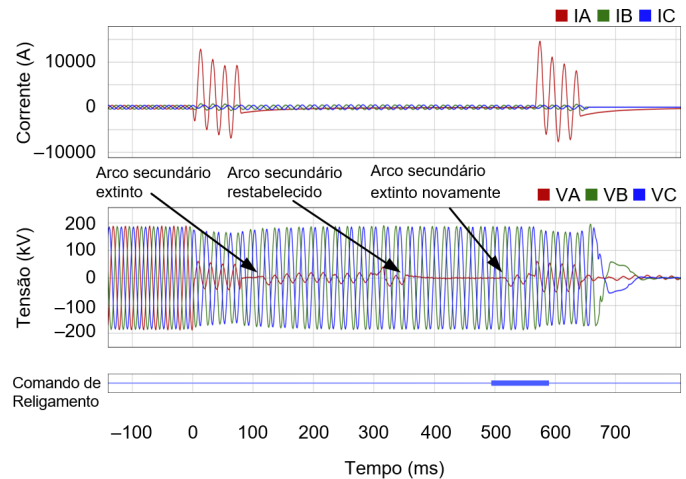


Fig. 20. Sequência da falta capturada pelo relé de proteção no terminal S na linha 2.

A equipe da concessionária não encontrou qualquer indicação visual de uma falta permanente após a condição de *lockout*. Foi feita uma tentativa de religamento manual que teve sucesso. É interessante notar que o arco secundário foi extinto e reestabelecido durante o tempo morto. É possível que o tempo morto configurado de 0.4 segundos não tenha sido suficiente para deionizar o ar, assim resultando em uma falha no religamento da linha. A concessionária está avaliando as razões para a utilização do tempo morto de 0.4 segundos. A referência [10] fornece uma fórmula empírica mostrada em (6) para encontrar o tempo morto suficiente para que o arco seja deionizado e não aconteça um *restrike*; essa fórmula é aplicada quando as três fases são abertas e não há energia armazenada, como no caso de reatores *shunt*. Para aplicações com *trip* monopolar, um tempo morto maior é recomendado.

$$t_{open} = \frac{\text{System Voltage}_{kV}}{34.5} + 10.5 \text{ cycles} \quad (6)$$

D. Monitorando Eventos na Linha Utilizando Ondas Viajantes

Anteriormente à falta na linha 2 às 11:25 da manhã no dia 5 de junho de 2019, houve diversos eventos transitórios gravados pelos relés de altíssima velocidade em um intervalo de 30 minutos. Esses eventos transitórios não resultaram em operações de *trip* e motivaram os autores a realizar análises *offline*. Para a análise *offline*, os objetivos eram 1) identificar se os eventos eram originários da linha monitorada (linha 1), 2) calcular a localização da fonte do evento transitório e 3) reportar as localizações destes eventos para a concessionária para investigação em campo. A Fig. 21 fornece um exemplo dos sinais transitórios registrados no terminal S por volta de 11:04 da manhã.

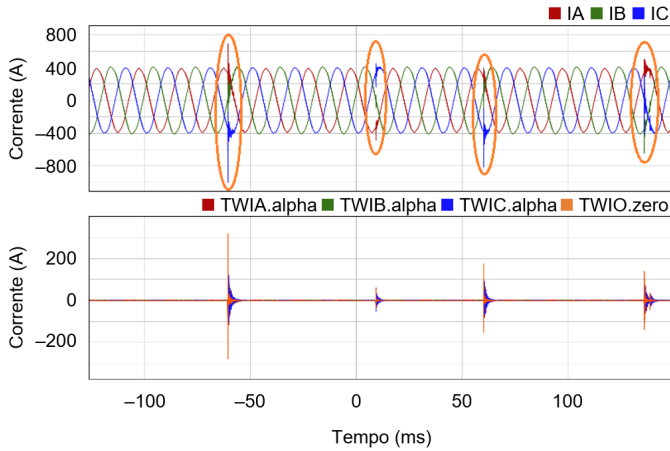


Fig. 21. Um exemplo de múltiplos eventos transitórios registrados no terminal S (circulados no gráfico).

Os eventos transitórios geram ondas viajantes significativas, e estas foram utilizadas para calcular a localização de origem destes transitórios utilizando o método de ondas viajantes com dados de dois terminais. A Fig. 22 mostra um resumo dessas localizações calculadas a partir do terminal S. No eixo x, o comprimento da linha é dividido entre lotes de 0.25 km, e os pontos médios dos lotes são marcados como 0.25, 0.5, 0.75, e assim por diante. Cada lote possui um contador que é incrementado se a localização do evento calculada estiver dentro do lote. Cada contador conta eventos internos e externos separadamente. Pela Fig. 22, é possível observar que diversos lotes entre 11 e 27 km tem uma contagem

de eventos diferente de zero, e a contagem de eventos em alguns lotes é maior que um. Uma contagem de eventos maior que um indica um evento transitório recorrente e um ponto de problema na linha que deve ser investigado pela equipe de campo. Um evento recorrente na mesma localidade pode ser contado em lotes adjacentes, considerando o pequeno comprimento do lote e a precisão do método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais. Como resultado, três lotes consecutivos com uma contagem de eventos igual a um em cada são igualmente preocupantes, necessitando de investigação. Essa análise de eventos foi apresentada para a concessionária e foi solicitado que as localizações fossem investigadas.

Essa seção demonstra que as ondas viajantes podem ser usadas para identificar pontos de problema no sistema. As ondas viajantes podem ser detectadas antes que a falta ocorra através de precursores de faltas ou durante eventos de baixa energia como descargas parciais devido a isoladores sujos ou invasão de vegetação. O monitoramento desses eventos transitórios fornece uma oportunidade antecipada de identificar o ponto de falha e tomar medidas preventivas. Conclusão

Neste artigo, discutimos a proteção de altíssima velocidade e os princípios da localização de faltas por ondas viajantes utilizada pelos relés no domínio do tempo. O método de localização de faltas por ondas viajantes com dados de dois terminais fornece localização precisa de faltas para aplicações que envolvem linhas híbridas com seções aéreas e subterrâneas, e pode ser usado para controlar de forma adaptativa o esquema de religamento.

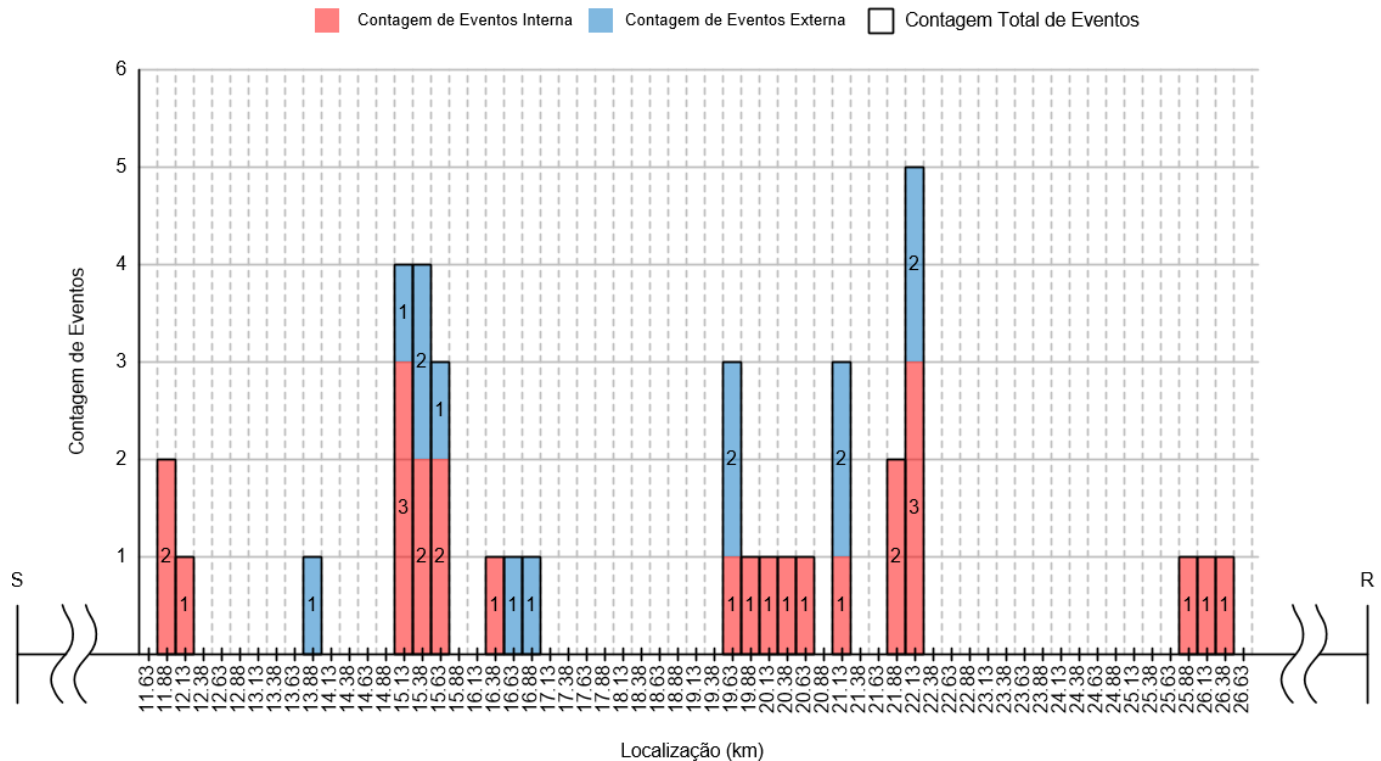


Fig. 22. Resumo das localizações dos eventos calculadas a partir do terminal S para eventos transitórios registrados em um intervalo de 30 minutos antecedentes à falta (o eixo x foi aproximado para visualização das localizações dos eventos entre 11 e 27 km).

O artigo apresenta detalhes sobre uma instalação piloto e configuração de relés de altíssima velocidade para proteção e localização de faltas. Também são apresentados detalhes sobre a instalação e a configuração dos relés de altíssima velocidade para proteção e localização de faltas. Um teste de energização da linha foi realizado para determinar o tempo de propagação das ondas viajantes para cada seção da linha híbrida. A performance dos relés de altíssima velocidade foi avaliada para duas faltas internas e uma falta externa. As duas faltas internas foram na seção aérea da linha, e a lógica controle adaptativo do religamento atuou com sucesso, permitindo o religamento para essas faltas. O registro de eventos de alta resolução dos relés de altíssima velocidade forneceu informações de ondas viajantes de grande valor que poderiam ter sido usadas para monitoramento, inspeção, e manutenção preventiva do sistema.

Os relés de altíssima velocidade instalados nesse projeto piloto empregam um recurso de monitoramento de linha que calcula, classifica e registra as localizações de eventos para qualquer evento de alta ou baixa energia percebido na linha. Esse recurso fornece monitoramento do sistema em tempo real. Ao capturar e registrar os precursores de faltas, o recurso de monitoramento da linha fornece meios para emitir um alarme permitindo identificar os pontos de falha antes que eles se desenvolvam em faltas permanentes na linha. Esse recurso pode ajudar na condução de manutenção preventiva para garantir a operação saudável da linha.

VI. RECONHECIMENTO

Os autores reconhecem com muita gratidão a contribuição e suporte dos engenheiros da concessionária e da equipe de campo nesse projeto piloto.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] E. O. Schweitzer, III, V. Skendzic, A. Guzmán, M. V. Mynam, J. L. Eternod, and Y. Gong, "Mystery Solved: Five Surprises Discovered With Megahertz Sampling and Traveling-Wave Data Analysis," proceedings of the 72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2019.
- [2] B. Kasztenny, A. Guzmán, M. V. Mynam, and T. Joshi, "Locating Faults Before the Breaker Opens – Adaptive Autoreclosing Based on the Location of the Fault," proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2017.
- [3] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?" proceedings of the 41st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2014.
- [4] A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, J. L. Eternod, and R. M. Morales, "Directional Elements – How Fast Can They Be?" proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2017.
- [5] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, and M. V. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults," proceedings of the 42nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2015.
- [6] E. O. Schweitzer, III, "A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience," proceedings of the Northwest Electric Light & Power Association Conference, Bellevue, WA, April 1988.
- [7] A. Guzmán, B. Kasztenny, Y. Tong, and M. V. Mynam, "Accurate and Economical Traveling-Wave Fault Locating Without Communications," proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2017.

- [8] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd ed., Wiley Interscience, New York, NY, 1991.
- [9] 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.
- [10] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying Principles and Applications*, 4th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2014.

VIII. BIOGRAFIAS

Sthitaprajnyan Sharma recebeu seu diploma de pós graduação em economia internacional, com honras, do Instituto Indiano de Comércio Exterior em 1916 e seu Bacharelado em engenharia elétrica, com honras, da Universidade de Utkal em 2006. Ele começou sua carreira profissional na SPML como um engenheiro de design de sistemas de potência. Mais tarde, trabalhou na ABB como engenheiro de proteção. Ele se juntou à Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2011 como engenheiro de aplicação e trabalha atualmente como gerente da engenharia de aplicação na Índia. Esteve envolvido na proteção de subestações e geradores, soluções de transferência rápida de barras de motores, engenharia de aplicação, testes e comissionamento de soluções de proteção e controle.

Amol Kathe recebeu seu bacharelado em engenharia elétrica pela Universidade de Mumbai, em Mumbai, na Índia em 2006, e seu mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Tecnológica e Michigan em Houghton, MI, em 2014. Ele trabalhou por mais de cinco anos como gerente na Reliance Infrastructure Limited no departamento de operações da divisão de energia. Ele se juntou à Schweitzer Engineering Laboratories, Inc em 2014 e ocupa a posição de engenheiro de potência na divisão de pesquisa e desenvolvimento.

Titiksha Joshi é engenheira de potência na divisão de pesquisa e desenvolvimento da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Ela recebeu seu bacharelado em engenharia elétrica pela Universidade de Mumbai, na Índia, em 2012, e seu mestrado em ciência da engenharia elétrica da Universidade Estadual do Arizona em 2014. Ela trabalhou como estagiária na Crompton Greaves (2011) e na Midcontinent Independent System Operator, Inc. (2013).

Thamizhcholai Kanagasabai recebeu seu bacharelado em engenharia elétrica e eletrônica pela Universidade Anna, em Chennai, em 2010. Ele começou sua carreira profissional no design de sistemas de potência e serviços de comissionamento como engenheiro de proteção. Ele se juntou à Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2016 e ocupa a posição de engenheiro de aplicação.