

Análise em Serviço de Circuitos de Proteção Diferencial de Linha: Comparando Desempenho TDM com Rede de Comutação de Pacotes

Ron Beck

Central Lincoln PUD

Paul Robertson, Troy Ledford e Cole Salo
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Apresentado em
47th Annual Western Protective Relay Conference
Formato Virtual
20 a 22 de Outubro, 2020

Traduzido para o português em julho de 2021

Análise em Serviço de Circuitos de Proteção Diferencial de Linha: Comparando Desempenho TDM com Rede de Comutação de Pacotes

Ron Beck, *Central Lincoln PUD*

Paul Robertson, Troy Ledford e Cole Salo, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Abstract—Muitas transmissoras estão migrando sua infraestrutura de rede de área ampla da multiplexação por divisão de tempo (TDM) e rede óptica síncrona (SONET) para tecnologias baseadas em pacotes baseadas em *multiprotocol label switching* (MPLS) ou Carrier Ethernet. Isso criou o desafio de criar canais piloto baseados em pacotes para fornecer o determinismo (desempenho garantido) exigido em aplicações de proteção. Os esquemas de proteção diferencial de linha de transmissão são os mais rigorosos do ponto de vista do desempenho do canal de comunicação. Esses esquemas requerem latência baixa e determinística, baixa assimetria e recuperação rápida de falhas do canal de comunicação. Até o momento, a maioria dos estudos sobre a proteção diferencial de linha em execução em redes baseadas em pacotes foram baseadas em testes de laboratório em condições de rede simuladas e focados principalmente na medição da latência do canal. No entanto, a contribuição da assimetria do canal de comunicação é mais significativa com redes comutadas por pacotes e precisa ser considerada além da latência.

Este artigo fornece uma grande quantidade de dados de desempenho obtidos dos sistemas de proteção em serviço na Central Lincoln PUD executando esquemas diferenciais de corrente de linha em uma rede de pacotes convergente de tecnologia da informação/operacional (TI/OT). O artigo fornece uma análise aprofundada do desempenho do canal de comunicação no contexto do plano alfa, uma característica popular de análise da operação de relés. O plano alfa é usado por relés diferenciais para detectar faltas internas na linha enquanto mantém a segurança para a corrente de carga da linha, saturação do transformador de corrente (TC) e assimetria de canal. A análise no plano alfa é usada para comparar a latência do canal de proteção e o desempenho de assimetria antes da migração (usando a infraestrutura de rede TDM da Central Lincoln PUD) com o desempenho após a migração (usando sua implementação de rede de pacote).

A implementação da rede da Central Lincoln PUD usa uma tecnologia chamada rede síncrona virtual para resolver as limitações de desempenho quando circuitos de teleproteção de relés atuam por sistemas de pacotes. Os resultados de desempenho de rede em serviço mostram que é possível obter desempenho de nível TDM em uma rede de área ampla baseada em pacotes.

I. INTRODUÇÃO

Hoje, a maioria dos esquemas de proteção de sistemas elétricos usa canais de comunicação digital. Os esquemas de proteção assistida por comunicações facilitam o compartilhamento de dados entre os dispositivos de proteção e possibilitam o emprego de métodos que melhoram a dependabilidade, a seletividade, a segurança e a velocidade. Esses esquemas assistidos por comunicação também permitem

a implementação de esquemas de comparação diferencial, tais como proteção diferencial de linha de transmissão (87L). Muitas concessionárias usam uma combinação de *links* diretos de fibra ponto a ponto e dois canais multiplexados para prover comunicação de alta disponibilidade para manter a função do circuito de teleproteção do relé no caso de diferentes cenários de falha no sistema elétrico.

A Central Lincoln PUD é uma concessionária pública de energia elétrica, que atende cerca de 700 milhas quadradas de território em áreas de quatro condados, incluindo 112 milhas da costa central do Oregon. Depois de iniciar suas operações em 1943, o Central Lincoln PUD atende atualmente a mais de 32.734 consumidores residenciais e aproximadamente 5.625 consumidores comerciais e industriais.

A Central Lincoln PUD usa fibra direta e uma rede de comunicação multiplexada para suportar seus canais de teleproteção diferencial de linha. Como muitas transmissoras, a Central Lincoln PUD conta com uma rede TDM para fornecer sua comunicação de rede. No entanto, eles recentemente embarcaram em um programa de migração de rede para modernizar sua infraestrutura de comunicações, afastando-se da TDM e implementando uma rede convergente de tecnologia da informação/tecnologia operacional (TI/TO) baseada na tecnologia de pacotes Carrier Ethernet.

A migração para tecnologias de rede baseadas em pacotes, como *multiprotocol label switching* (MPLS) e Carrier Ethernet, criou o desafio de projetar serviços de teleproteção que forneçam determinismo e garantam a performance requerida pelas aplicações de proteção.

A Central Lincoln PUD estava na metade da implementação de sua rede e já havia migrado cerca de metade de seus circuitos de proteção para a nova infraestrutura de pacotes. Como a Central Lincoln PUD já tinha uma rede TDM operacional, eles estavam em uma posição única para estudar o desempenho em serviço de seus esquemas de corrente diferencial de linha para comparar o desempenho relativo em fibra direta, TDM e transporte de pacotes.

A análise de dados foi obtida de relés em serviço, fornecendo pela primeira vez uma análise objetiva de TDM versus tecnologias de transporte de pacotes. Isto ajudou a avaliar como as diferentes tecnologias de canais de comunicação afetam os dados apresentados e processados pelas proteções diferenciais de corrente de linha de transmissão.

II. EXPLICANDO A PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHA

A proteção diferencial de linha emprega a lei de correntes de Kirchhoff para proteger linhas de vários comprimentos e tensões. Simplificando, ela compara a corrente que entra na linha com a corrente que sai da linha. Para esta comparação de correntes, os dados de todos os terminais da linha protegida devem ser cuidadosamente alinhados para os cálculos da função 87L. Este alinhamento requer comunicação determinística confiável para intercâmbio de dados. Os esquemas 87L modernos foram aprimorados além de apenas um esquema de comparação de correntes e agora incluem recursos tais como detecção de faltas local e remota, contadores *watchdog*, alinhamento de tempo avançado e métodos de degradação (*fallback*), compensação da corrente capacitiva da linha e maior segurança por meio de detecção de falha externa.

A proteção digital 87L oferece os benefícios de sensibilidade, segurança e seletividade. Esses esquemas asseguram eliminação rápida de faltas em qualquer lugar da zona protegida da linha. A Fig. 1 mostra um diagrama unifilar de uma linha de dois terminais com um canal de comunicação principal e de *backup*.

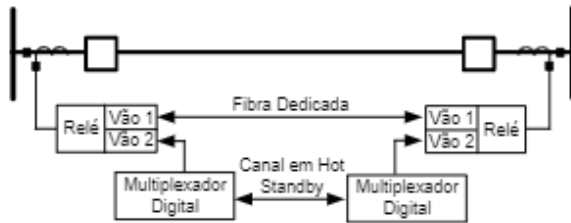


Fig. 1. Aplicação de Proteção Digital 87L a Linha de Dois Terminais

Os esquemas 87L são aplicáveis a linhas longas e curtas. Eles são uma boa solução para aplicações complicadas, como linhas com compensação série, linhas multiterminais e linhas com acoplamento mútuo de sequência zero. Eles têm um bom desempenho para faltas evolutivas, faltas entre circuitos e *cross-country*, faltas internas com *outfeed*, inversões de corrente e oscilações de potência. Os desafios típicos para esses esquemas incluem a corrente capacitiva da linha, transformadores em série e em derivação e a saturação dos transformadores de corrente (TC) durante faltas externas [1]. Esses esquemas requerem um canal de comunicação confiável, de alta capacidade e baixa latência e devem alinhar com segurança as amostras de correntes em terminais remotos, apesar do ruído do canal, atrasos e assimetria [2].

Os esquemas de diferenciais tradicionais usam uma característica percentual de restrição. A corrente de operação ou diferencial é calculada como o módulo da soma dos fasores de corrente do terminal. A corrente de restrição é uma medida dos módulos das correntes de todos os terminais. Dependendo do projeto, também pode ser a soma das magnitudes de corrente do terminal, a média dos módulos das correntes dos terminais e assim por diante. Os esquemas diferenciais tradicionais operam quando a corrente de operação excede uma porcentagem da corrente de restrição, conforme determinado por um ajuste da inclinação (*slope*) da característica de operação. Uma limitação desse tipo de projeto é que a sensibilidade e a segurança são inversamente proporcionais. A característica baseada em *slope*

aumenta a segurança para valores de restrição mais altos, diminuindo a sensibilidade. A segurança pode ser aumentada manipulando os valores de restrição e as características de *slope* [3].

A referência [4] introduziu o conceito original de um princípio digital para a função 87L que usava uma característica de restrição implementada no plano alfa. O plano alfa é um plano da razão complexa entre as correntes dos terminais. A Fig. 2 mostra a representação do plano alfa das condições ideais da corrente de falta externa. As magnitudes de I_L (corrente medida local) e I_R (corrente medida remota) são iguais e seus ângulos de fase estão defasados de 180 graus. Portanto, $I_R/I_L = 1 \angle 180 = -1$ pu.

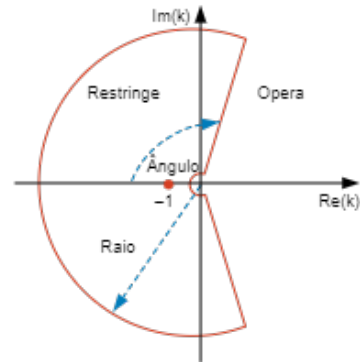


Fig. 2. Plano Alfa

A relação entre a corrente do terminal remoto e a corrente local é plotada no plano alfa. As relações que estão dentro da região de restrição evitam que o elemento diferencial opere. Esta característica responde bem a erros de alinhamento de fase, observando explicitamente a diferença angular entre as correntes local e remota. A sensibilidade é posteriormente controlada por uma comparação separada da corrente de operação versus uma configuração de sensibilidade mínima. A sensibilidade é ainda melhorada pela presença de elementos de sequência zero e sequência negativa, além de elementos segregados por fase [2].

O foco principal deste artigo é comparar diferentes meios de comunicação para canais 87L e seus efeitos no esquema geral de proteção. Os dados coletados de sistemas de transmissão em serviço capturam os efeitos gerais de latência e assimetria sobre o esquema.

Latência (isto é, atraso de canal) é uma componente aditiva nos cálculos de tempo de disparo da função 87L. A latência excessiva retarda a operação do 87L e pode violar os tempos de atuação críticos. Os requisitos típicos para a latência do canal do 87L estão na faixa de 5 a 10 milissegundos. A referência [5] sugere a especificação de canais com latência abaixo de 5 milissegundos [6].

Latência é o tempo necessário para armazenagem e processamento de quaisquer dispositivos de comunicação ativos que compõem o canal do 87L. Em algumas redes, o pior caso de latência é de interesse, pois pode mudar consideravelmente, dependendo do tráfego de dados, modos de falha ou mudanças na configuração da rede [6].

Os esquemas 87L podem alinhar as correntes remota e local usando apenas o canal (ou seja, sem o auxílio de qualquer

referência de tempo externa), mas apenas se o canal for simétrico. Isso significa que os tempos de propagação nas direções de transmissão e recepção são iguais. Para esses esquemas, a simetria é uma característica chave do canal.

Em esquemas 87L que alinham a corrente sem fontes de tempo externas, a assimetria na ordem de um quarto a meio ciclo do sistema de potência, dependendo do projeto do relé, pode tornar o esquema inoperante. Assim como no caso da latência do canal, o pior caso de assimetria é de interesse [6].

III. VISÃO GERAL DA REDE DE COMUNICAÇÃO

A Central Lincoln PUD usa uma combinação de micro-ondas e fibra para sua infraestrutura de comunicação de rede de área ampla.

A Fig. 3 mostra o meio de comunicação utilizado para seus relés diferenciais de linha. O canal de teleproteção primário (X) é transportado por uma fibra direta e o canal secundário (Y) é transportado por uma rede de comunicação.

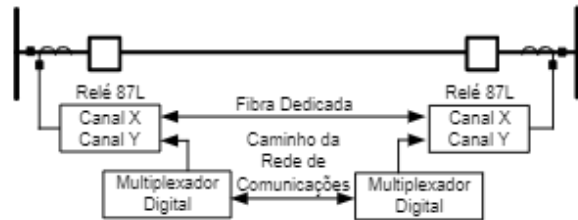


Fig. 3. Meios de Comunicação do Relé 87L Usados para Teleproteção

A. Fibra Direta

A fibra direta usa um cabo de fibra óptica dedicado, ou um par de fibras dedicadas (transmitir e receber), para prover o meio para os relés se comunicarem. Uma vez que nenhum dispositivo de comunicação intermediário é usado no intercâmbio de informações, pode ser considerado um meio de comunicação ideal sob uma perspectiva de desempenho de latência e assimetria de canal. Neste estudo, a fibra direta fornece uma referência ideal para comparar o desempenho das redes de comunicação.

B. Redes TDM

A Central Lincoln PUD tem usado uma rede TDM para multiplexar seus circuitos secundários de teleproteção diferencial de linha por muitos anos. A infraestrutura da TDM provê para a Central Lincoln PUD suas comunicações de rede de área ampla desde 1995.

O setor elétrico conta com tecnologias de comunicação de multiplexação por divisão de tempo (TDM), como T1 e SONET, para prover a comunicação de dados necessária ao tráfego de teleproteção. O TDM tem tradicionalmente oferecido uma solução ideal para circuitos de teleproteção devido à sua arquitetura síncrona baseada em uma referência comum combinada com uma estrutura de enquadramento que dedica *timeslots* a cada circuito. Esta propriedade garante que cada circuito de teleproteção tenha uma latência fixa garantida, independentemente de outro tráfego na rede. O TDM fornece um circuito de comunicação determinístico, de baixa latência e baixa assimetria.

A maioria dos relés diferenciais de linha usa uma interface síncrona para que o canal de teleproteção se comunique por

meio de um DS0 de 64 kbps padronizado pela Central Lincoln PUD na interface síncrona EIA-422, mas outros formatos, como IEEE C37.94 e ITU-T G.703, também são comumente usados.

C. Redes de Comutação de Pacotes

Em 2018, a Central Lincoln PUD iniciou um estudo de modernização de rede para avaliar uma solução para sua rede de área ampla (WAN) de próxima geração. A empresa decidiu adotar uma solução de transporte de rede de pacotes baseada em Carrier Ethernet e, em 2019, começou a implantar a nova infraestrutura de rede. O objetivo da Central Lincoln PUD era implementar um modelo de rede convergente que usa uma única rede para transportar o tráfego de TI/TO. A teleproteção se encaixa na categoria de tecnologia operacional, juntamente com outros serviços que estão diretamente associados à operação em tempo real do sistema elétrico.

Existem desafios com a implementação de um modelo de rede TI/TO convergente para fornecer o desempenho requerido por circuitos críticos de proteção. Esses desafios incluem o seguinte:

- **Complexidade:** O provisionamento de circuitos individuais de proteção com requisitos de desempenho estritos de latência e assimetria em um núcleo de pacote é complexo.
- **Priorização de tráfego:** Dar prioridade mais alta a todos os circuitos críticos cria atrasos de sequenciamento nas redes de pacotes.
- **Desempenho da teleproteção:** as redes de pacotes não oferecem a mesma latência, assimetria e desempenho de restauração que as redes TDM, e esses fatores de desempenho podem mudar devido ao carregamento da rede ao longo do tempo.

Para ajudar a enfrentar esses desafios de desempenho, a Central Lincoln PUD adotou uma tecnologia chamada rede síncrona virtual (*virtual synchronous networking* – VSN) como uma solução para oferecer suporte ao tráfego de TO enquanto ainda atingindo seu objetivo de implementar uma rede convergente. O VSN permite que o tráfego TO, que inclui circuitos de teleproteção, seja segregado do tráfego de TI.

Além disso, a tecnologia VSN oferece uma maneira de transportar canais de teleproteção seriais pela Ethernet enquanto mantém o desempenho do TDM. Essa tecnologia permite que as concessionárias preservem o desempenho do canal para suas aplicações de proteção após a migração de um sistema TDM para um outro usando MPLS ou Carrier Ethernet [4].

A tecnologia VSN mantém uma rede síncrona mediante um subsistema TDM. O subsistema TDM fornece uma interface síncrona para cada circuito serial de teleproteção. No topo do subsistema TDM, uma função de empacotamento e transporte Ethernet é implementada. A implementação empacota os dados TDM nativos no nível VT1.5 ou sinal de transporte síncrono (STS) (em vez de DS0) para ser mais eficiente em largura de banda. Os pacotes Ethernet são quadros padrão da Camada 2 (*Layer 2*) que contêm os dados TDM junto com as informações

de sincronização e o canal do Sistema de Gerenciamento de Rede (*Network Management System – NMS*).

Os nós de borda (*edge nodes*) de TO são usados para descrever os multiplexadores de comunicação robustos da subestação que fornecem funcionalidade VSN. Os nós de extremidade OT fornecem o ponto de acesso para os serviços OT da subestação, incluindo teleproteção. Os nós de extremidade OT são instalados próximos aos dispositivos de Carrier Ethernet, que fornecem o *backbone* de transporte WAN. Percursos fixos ou estáticos são provisionados na rede de pacotes para criar um anel VSN (ver Fig. 4).

Este enfoque traz os seguintes benefícios:

- Agrupa todos os circuitos da subestação em um único caminho estático, o que reduz a complexidade associada ao provisionamento e gerenciamento de caminhos separados para cada circuito de proteção na rede de TI.
- Cria uma demarcação entre TI e TO, permitindo que os circuitos de proteção sejam gerenciados pela equipe de TO.
- Permite que a *failover* seja executado pelo dispositivo de borda VSN TO, que permite um *failover* muito rápido (em menos de 5 milissegundos).

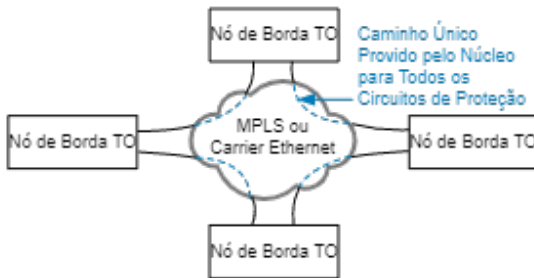


Fig. 4. Topologia VSN em Anel Suportada por Caminhos Estáticos Através do Núcleo

A Fig. 5 mostra o diagrama de rede para os caminhos do circuito de teleproteção diferencial de linha da Central Lincoln PUD, onde o canal X está sobre a fibra direta e o canal Y está sobre a rede de pacotes.

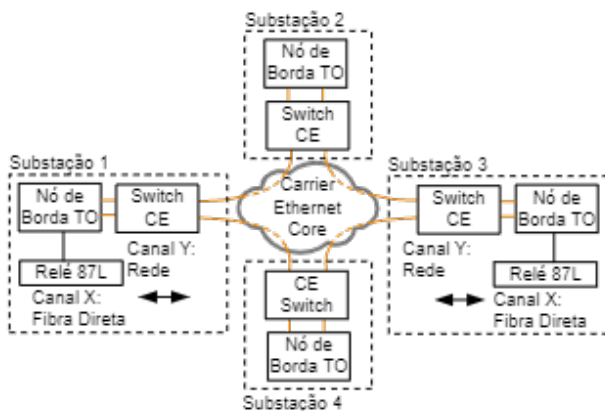


Fig. 5. Topologia de Rede Mostrando Caminhos de Circuito de Teleproteção por 87L

Como a Central Lincoln PUD utilizava fibra dedicada para o canal principal em cada relé, o estudo seria capaz de comparar o caminho da rede com um canal ideal de referência fornecido por fibra direta.

IV. OBJETIVOS E METODOLOGIA DO ESTUDO

O objetivo deste estudo de caso é avaliar o desempenho de dois canais para proteções diferenciais de linha em serviço simultaneamente por um longo período de tempo. Normalmente, o procedimento de comissionamento para um relé diferencial de linha verifica se todos os canais de comunicação diferencial estão disponíveis e se os relés estão trocando dados conforme o esperado. As características de cada canal são verificadas de acordo com os requisitos específicos determinados pelo usuário: se disponibilidade, latência, assimetria e os dados recebidos correspondem aos valores esperados. No entanto, espera-se que os relés fiquem em serviço por anos, mas o procedimento de comissionamento leva no máximo alguns dias. O que acontece após o breve procedimento de comissionamento? O trabalho que a Central Lincoln PUD fez verifica se o desempenho dos canais das proteções diferenciais de linha permanece dentro da tolerância por um longo período de tempo.

O estudo compara diretamente uma conexão de fibra ponto a ponto com uma rede de comutação de pacotes ou uma rede TDM. A fibra direta atua como o controle para este estudo porque pode ser considerada o melhor caminho de comunicação de dados entre os relés diferenciais. Portanto, o estudo avalia o desempenho da rede de comutação de pacotes ou TDM comparando-a com o canal de fibra direta ponto-a-ponto.

V. MÉTODOS DE CAPTURA DE DADOS

Discutiremos dois métodos que podem ser usados na captura de dados para conduzir um estudo dos canais de comunicação para proteções diferenciais de linha.

A. Relés com um Canal Ativo de Hot Standby

Os relés em serviço usados pela Central Lincoln PUD para o estudo admitem dois canais independentes de comunicação no mesmo relé diferencial. Este documento se refere aos canais como canais X e Y. Para a configuração dos relés usados neste estudo, o canal X era fibra direta ponto-a-ponto e o canal Y era um meio de comunicação em rede de comutação de pacotes ou TDM.

Os relés usados pela Central Lincoln PUD implementam um canal diferencial ativo com *hot standby*. O princípio por trás deste conceito é que o relé faz os cálculos diferenciais duas vezes a cada intervalo de processamento – uma vez para os dados do canal X e uma vez para os dados do canal Y – mesmo que apenas um dos canais esteja sendo usado ativamente pelo algoritmo da proteção diferencial. O canal diferencial ativo de *hot standby* permite que o relé alterne perfeitamente os canais X e Y, de modo que se algo causar a queda do canal diferencial primário, o relé pode alternar instantaneamente para o outro canal disponível para a atuação da proteção diferencial de linha. Essa transição de um canal para o outro ocorre no mesmo intervalo de processamento. Os relatórios de eventos deste relé incluem os dados dos canais X e Y.

Este artigo usa os dados dos relatórios de eventos para analisar o desempenho dos canais diferenciais. Para adquirir os relatórios de eventos necessários para a análise, o relé foi programado para disparar um evento a cada hora durante duas

semanas. Os eventos foram disparados e imediatamente capturados e armazenados. Isso resultou em centenas de relatórios de eventos para cada linha de dois terminais avaliada. É importante observar que este estudo não teve impacto na disponibilidade dos relés envolvidos. O valor de usar o relatório de eventos como o mecanismo de coleta de dados é que ele inclui até 1 segundo de dados diferenciais a serem analisados, em oposição a um único intervalo de processamento de dados de medição, por exemplo. Ao realizar um estudo desta natureza, é imprescindível garantir que haja dados suficientes para chegar a uma conclusão sobre o desempenho do canal diferencial.

B. Relés sem um Canal Ativo de Hot Standby

Este estudo pode ser reproduzido também em relés que não possuem um canal ativo com *hot standby*. A configuração requer que dois relés separados no mesmo terminal sejam usados. Cada relé deve ser sincronizado com um sinal de alta exatidão, porque os registros de tempo nos relatórios de eventos devem ser usados para comparar os dados do Relé 1 com os do Relé 2. Por exemplo, o Relé 1 teria uma conexão por fibra direta ponto-a-ponto e o Relé 2 teria uma conexão de comunicação em rede. Os relatórios de eventos devem ser disparados em ambos os relés aproximadamente no mesmo instante, para que os dados do evento em cada relé se superponham. Os dois relatórios de eventos podem então ser plotados juntos em um software visualizador de eventos para avaliar o desempenho de cada canal diferencial em relação ao outro.

VI. ANÁLISE DE DADOS

Conforme mencionado anteriormente, os relés que a Central Lincoln PUD tinha em serviço em seu sistema eram equipados com um canal ativo com *hot standby*. Portanto, os relatórios de eventos capturados para este estudo incluíram os dados do canal X (fibra direta) e do canal Y (comunicação em rede) do terminal remoto. No entanto, o relatório de eventos do relé usou o atraso de *ping-pong* do canal ativo de comunicação diferencial para alinhar a corrente diferencial local. O relé executou um cálculo diferencial nos dados dos canais X e Y, mas os dados do plano alfa para o relatório de eventos só puderam ser derivados com exatidão para o canal remoto que estava sendo usado (X ou Y). O motivo foi que o relatório de eventos só incluiu os dados diferenciais locais uma vez, quando na realidade havia duas versões da corrente local porque o atraso de comunicação foi derivado do cálculo *ping-pong* para os canais X e Y independentemente e pode não ser o mesmo. Por exemplo, se o atraso do canal unilateral para o canal X foi de 1 milissegundo e o atraso do canal Y foi de 5 milissegundos, a corrente local teve que ser atrasada em 1 milissegundo para ser alinhada com os dados remotos do canal X, ao passo que a corrente local teve que ser atrasada em 5 milissegundos para os dados do canal Y. O relatório de eventos não incluiu os dados necessários para determinar o plano alfa do canal que estava em *standby*.

Uma vez que uma comparação direta dos dados do plano alfa para os canais X e Y não pôde ser realizada, os dados dos canais X e Y tiveram que ser combinados para chegar a um método para avaliar o desempenho do canal de comunicação em rede, considerando o seguinte:

- O resultado do plano alfa para o canal diferencial primário para a corrente de carga (fibra direta no caso da Central Lincoln PUD) deve ser muito próximo de -1 , conforme discutido anteriormente. Isso revelou que o canal de fibra direta estava operando conforme o esperado e uma relação poderia ser determinada a partir dele.
- Assumindo que os dados do plano alfa apresentaram performance esperada, a análise mostrou a relação angular entre a corrente diferencial do canal X e a corrente diferencial do canal Y. A expectativa era que, para dois canais com desempenho semelhante, o ângulo entre as correntes de fase dos canais X e Y semelhantes deve ser o mesmo em todo o relatório de eventos. A expectativa era que a corrente Y ficaria defasada em relação à corrente X aproximadamente pelo mesmo valor ao longo de cada relatório de eventos. O grau de separação angular não deve apenas permanecer constante ao longo do evento, mas também ao longo das duas semanas de dados. Deve-se notar que o valor de separação não é motivo de preocupação neste estudo. O desempenho do canal foi conduzido garantindo que a diferença angular entre os canais X e Y não aumentasse constantemente.

As verificações de dados foram simples. Os dados do plano alfa podem ser determinados pelas informações incluídas no relatório de eventos. Um gráfico dos dados do plano alfa para um relatório de evento foi criado, configurando-se o *software* visualizador de eventos para exibir a corrente diferencial remota do canal ativo sobre a corrente diferencial local, conforme mostrado na Fig. 6. Alguns programas visualizadores de eventos permitem isso sem ter que fazer um cálculo customizado.

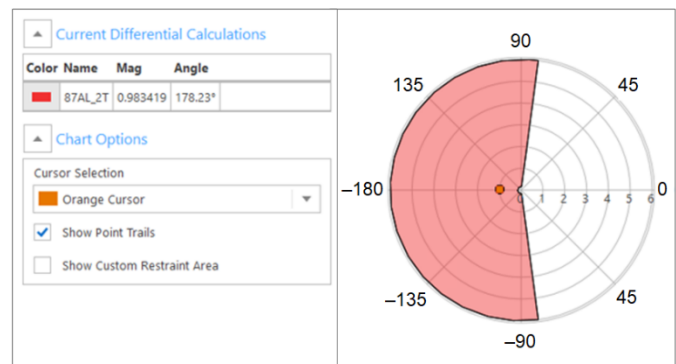


Fig. 6. Plotagem do Plano Alfa

A relação angular entre os dados dos canais X e Y foi determinada por meio de um cálculo customizado. Uma referência foi atribuída aos dados do evento para simplificar a equação usada para a análise. A equação então simplesmente calculou a diferença entre o ângulo da corrente do canal X em reação àquele da fase semelhante dos dados do canal Y. A equação não era necessária, pois estava simplesmente usando os dados fasoriais. O gráfico fasorial também poderia ter sido usado, mas mostraria apenas um único ponto de dados do relatório de eventos, e assim uma tendência na diferença

angular ao longo da duração do evento não seria tão facilmente identificada. Em seguida, a diferença angular foi traçada para o relatório de eventos, conforme mostrado na Fig. 7. Neste exemplo do sistema da Central Lincoln PUD, a fase A local (IAL), a fase A remota do canal X (IAX) e a fase A remota do canal Y (IAY) foram comparadas. Os dados das fases B e C foram semelhantes.

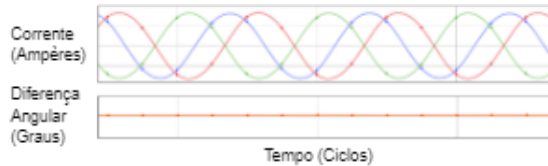


Fig. 7. Plotagem da Diferença Angular

O gráfico de diferença angular foi retilíneo ao longo do tempo. Isso significa que a relação de fase dos dados remotos da fase A que retornaram pelo canal X era estável em comparação com os dados do canal Y. O gráfico de diferença angular retilínea indicou que o canal de comunicação estava funcionando de forma idêntica ao canal de fibra direto e não houve variação de latência ao longo do tempo. Qualquer variação de latência criaria uma mudança na diferença angular entre os canais X e Y. Como sabemos que o canal de fibra direto é um canal perfeito com base na física dos fótons que passam por uma fibra de vidro, qualquer mudança na diferença angular se deve a mudanças de latência na rede de comunicação.

Ao capturar a diferença angular ao longo do tempo, podemos estudar a variação da latência da rede de comunicação e comparar o desempenho relativo de diferentes redes.

A variação na diferença angular entre as amostras (isto é, a mudança na diferença angular medida entre as amostras sucessivas) se correlaciona com a mudança da latência no canal de comunicação. Usando a seguinte relação, onde uma variação de diferença angular de 1 grau é equivalente a uma mudança de latência de 0,046 milissegundos para um sistema de 60 Hz, podemos determinar uma estimativa da mudança de latência máxima exibida no canal para fornecer um valor numérico e comparar o desempenho de diferentes redes de comunicação. Identificar a maior mudança pode ajudar a fazer uma aproximação do pior caso de assimetria do canal em comparação com outros canais medidos.

Neste estudo, usamos este método de análise para comparar o desempenho relativo de TDM versus VSN sobre pacote.

VII. RESULTADOS DOS TESTES

Os testes foram realizados em quatro esquemas diferentes de relés. Dois dos pares de relés estavam usando TDM para o caminho de comunicação do canal Y e os outros dois relés estavam usando VSN sobre Carrier Ethernet. Iremos nos referir a cada esquema como Circuito TDM 1, Circuito TDM 2, Circuito de Pacotes VSN 1 e Circuito de Pacotes VSN 2.

Um relatório de eventos foi capturado a cada hora de cada relé durante um período de duas semanas. Os dados de cada relatório de eventos para cada relé foram combinados em um único arquivo para analisar tendências ao longo do tempo.

A Fig. 8 apresenta uma amostra de captura de dados para um único dia em que o canal Y estava usando a rede TDM. O

gráfico de dados superior mostra a captura de tempo com relatórios de eventos numerados por hora. Como a análise concatena cada relatório de eventos em um único conjunto de dados, há descontinuidades entre o final de um relatório de eventos e o início do próximo. Essas descontinuidades resultam em picos no gráfico de diferença angular. Isso deve ser ignorado na análise de tendência da diferença angular ao longo do tempo. Na Fig. 8, a diferença angular é estável ao longo do período de 24 horas com uma variação muito pequena nos horários 4 a 5, 21 a 22 e 22 a 23.

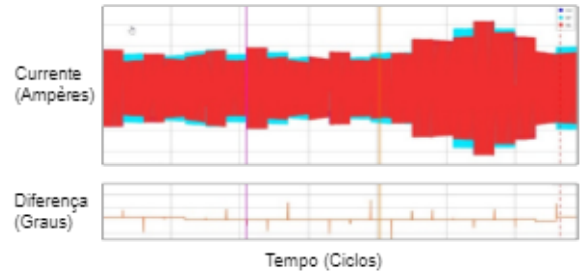


Fig. 8. Captura de Dados para um Único Dia Mostrando Descontinuidades entre Relatórios de Eventos Obtidos a Cada Hora

A. Comparação de Latência

Traçando a visualização no tempo dos diferentes circuitos de rede versus fibra, uma variação de latência pode ser vista entre o Circuito TDM 1 e o Circuito de Pacotes VSN 2. A Fig. 9 mostra isso na diferença de fase entre IAX e IAY. Essa diferença de fase se deve à diferença de latência no canal da rede. O Circuito de Pacotes VSN 1 tem menor latência do que o Circuito TDM 1. Os relés foram capazes de registrar a latência do canal Y que está resumida da seguinte forma:

- Latência do Circuito TDM 1: 6,2 milissegundos
- Latência do Circuito TDM 2: 0,9 milissegundo
- Latência do Circuito de Pacotes VSN 1: 1,0 milissegundo
- Latência do Circuito de Pacotes VSN 2: 1,0 milissegundo

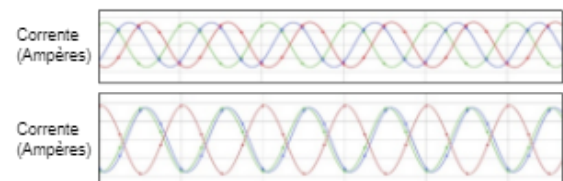


Fig. 9. Captura de Tempo Mostrando a Latência do Canal do Circuito TDM 1 e do Circuito de Pacotes VSN 1

A partir da comparação de latência, pode-se concluir que VSN sobre pacotes apresenta uma latência consistente, que é comparável à da TDM. A Fig. 10 mostra a comparação de latência entre o Circuito TDM 2 e o Circuito VSN sobre pacotes 2. Esses circuitos têm latência semelhante.

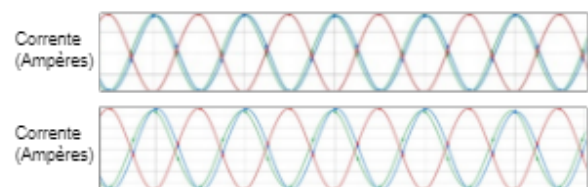


Fig. 10. Captura de Tempo Mostrando a Latência do Canal do Circuito TDM 2 e do Circuito VSN sobre Pacotes 2

B. Estabilidade da Assimetria ao Longo do Tempo

O objetivo do estudo era comparar a latência e a estabilidade da assimetria ao longo do tempo entre TDM e VSN sobre pacotes em comparação com a fibra. Os dados a seguir mostram a estabilidade do canal ao longo de um período de duas semanas dos circuitos TDM e VSN em comparação com a fibra direta. Conforme mencionado anteriormente, os relatórios de eventos foram capturados a cada hora e a diferença angular foi medida e plotada.

Cada diagrama mostra a captura de tempo agregada dos dados do relatório de eventos, a diferença angular ao longo do tempo, o diagrama fasorial instantâneo de um único ponto de dados e o *locus* da razão I_R/I_L no plano alfa ao longo do tempo. O plano alfa foi plotado apenas para o canal de fibra direta. Isso ocorre porque os dados do plano alfa estavam disponíveis apenas para o canal ativo no relé e não para o canal de espera. Os pontos do plano alfa são centralizados em torno do ponto de 1, 180 graus, mas as descontinuidades de fase entre os relatórios de eventos causam pontos de dados espúrios. A Fig. 11 mostra dois pontos de dados que estão dentro ou perto da região de operação do lado direito do plano alfa. Isso ocorre devido a picos de descontinuidade de fase, que podem ser ignorados.

A Fig. 11 mostra os resultados para o Circuito TDM 1. Os resultados da variação da diferença angular são resumidos da seguinte forma:

- Diferença angular mínima = 98 graus
- Diferença angular máxima = 137 graus
- Variação da diferença angular = 39 graus
- Máximo degrau de variação = 18 graus
- Assimetria máxima estimada = 0,8 milissegundos

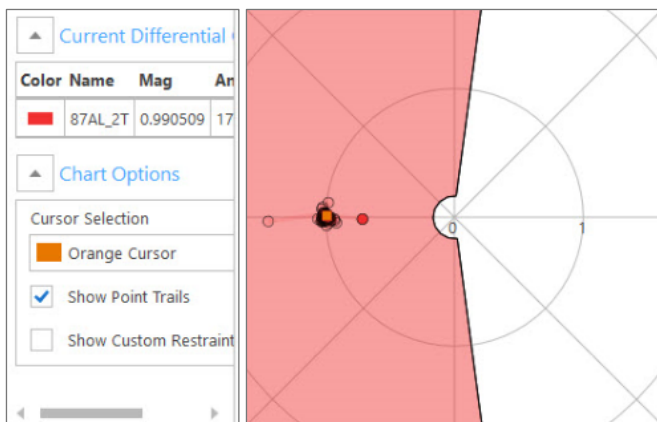
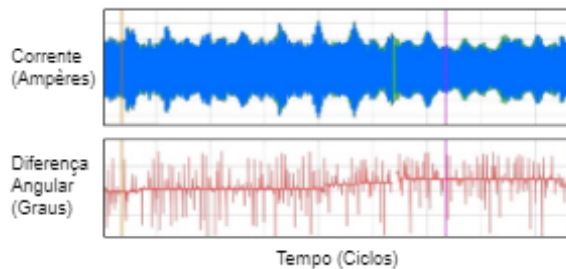


Fig. 11 Análise do Circuito TDM 1 por um Período de Duas Semanas

A Fig. 12 mostra os resultados para o Circuito TDM 2. Os resultados da variação da diferença angular são resumidos como segue.

- Diferença angular mínima = 0,5 graus
- Diferença angular máxima = 25,5 graus
- Variação da diferença angular = 25 graus
- Máximo degrau de variação = 15 graus
- Assimetria máxima estimada = 0,7 milissegundos

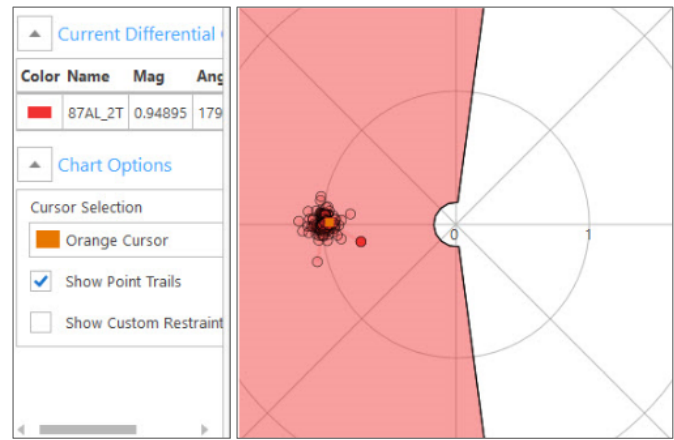


Fig. 12 Análise do Circuito TDM 2 por um Período de Duas Semanas

A Fig. 13 mostra os resultados para VSN sobre o Circuito de Pacotes VSN 1. Os resultados da variação da diferença angular são resumidos como segue.

- Diferença angular mínima = 10 graus
- Diferença angular máxima = 23 graus
- Variação da diferença angular = 13 graus
- Máximo degrau de variação = 13 graus
- Mudança máxima de latência estimada = 0,6 milissegundos

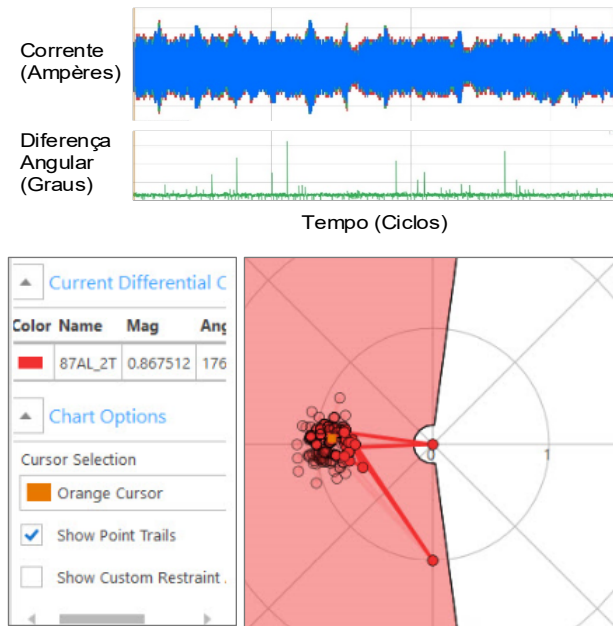


Fig. 13. Análise de VSN Sobre o Circuito de Pacotes VSN 1 por um Período de Duas Semanas

A Fig. 14 mostra os resultados para VSN Sobre o Circuito de Pacotes VSN 2. Os resultados de variação da diferença angular são resumidos como segue.

- Diferença angular mínima = 13 graus
- Diferença angular máxima = 26 graus
- Variação de diferença angular = 13 graus
- Máximo degrau de variação = 13 graus
- Mudança máxima estimada de latência = 0,6 milissegundos

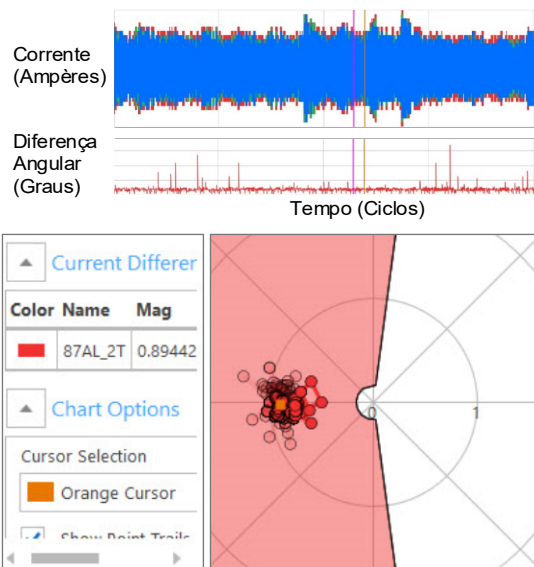


Fig. 14. Análise de VSN Sobre o Circuito de Pacotes VSN 2 por um Período de Duas Semanas

Os nós de borda OT usados para o VSN em circuitos de rede sobre pacotes foram capazes de medir a latência e a assimetria do canal na rede de pacotes a partir do ponto de referência do circuito EIA-422 usado para se comunicar com o relé. Ele fornece uma única instância no tempo da latência e assimetria

medidas em cada circuito de pacote VSN. Os dados são resumidos da seguinte forma:

- Latência (caminho primário) VSN Sobre o Circuito de Pacotes 1: 0,175 milissegundos
- Latência (caminho primário) VSN Sobre o Circuito de Pacotes 2: 0,175 milissegundos
- Assimetria Instantânea do VSN Sobre o Circuito de Pacotes 1: 0,009 milissegundos
- Assimetria Instantânea VSN Sobre o Circuito de Pacotes 2: 0,001 milissegundos

É útil ver a diferença nos valores em comparação com os dados capturados dos relatórios de eventos do relé. Existe um processamento adicional para o relé transmitir e receber dados. Uma medição instantânea ou uma série de medições tiradas da interface da rede de comunicação são comumente usadas para fornecer uma avaliação do desempenho do canal para circuitos de proteção. Esta abordagem não fornece a profundidade de análise necessária para ver a tendência de desempenho ao longo do tempo e não mostra a visão da perspectiva do relé sobre os dados que estão sendo usados para medir a integridade da linha de transmissão protegida.

VIII. SUMÁRIO DOS RESULTADOS

A Tabela I resume os resultados deste estudo.

TABELA I
COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE TDM E VSN SOBRE PACOTES

	TDM Circuito 1	TDM Circuito 2	VSN Sobre Pacotes Circuito 1	VSN Sobre Pacotes Circuito 2
Latência	6,2 ms	0,9 ms	1,0 ms	1,0 ms
Máxima variação angular	39°	25°	14°	13°
Máximo degrau de variação	18°	15°	13°	13°
Máxima variação de latência estimada	0,8 ms	0,7 ms	0,6 ms	0,6 ms

IX. CONCLUSÕES

Ao estudar a tendência da diferença angular ao longo do tempo para cada um dos circuitos da rede de comunicação, podemos observar que todos eles mostram uma tendência retilínea e estável ao longo do período de duas semanas e são semelhantes entre si. O Circuito TDM 1 mostra uma mudança ligeiramente maior na diferença angular ao longo do período de análise: 39 graus em comparação com 25 graus para o Circuito TDM 2 e 14 e 13 graus para o VSN em circuitos sobre pacotes.

A medida mais significativa é a comparação do máximo degrau de variação, que foi muito semelhante em todos os circuitos testados. Novamente, o circuito TDM 1 teve o maior degrau (18 graus correspondendo a uma variação de latência estimada de 0,8 milissegundos). Ambos os circuitos de pacotes

VSN tiveram um desempenho semelhante com uma mudança de degraú máxima de 13 graus, que se aproxima de uma mudança de latência de 0,6 milissegundos. Esses dados implicam que a assimetria de todos os canais era muito semelhante com o circuito TDM 1, exibindo assimetria ligeiramente maior do que o outro canal TDM e VSN sobre canais de pacote.

A principal conclusão a tirar deste estudo é que o VSN sobre o método de pacotes oferece desempenhos de latência e assimetria do canal de comunicação que são comparáveis ao TDM. O desempenho da estabilidade ao longo do tempo com baixa latência e baixa assimetria oferece as características ideais para atuar com a proteção diferencial de linha de transmissão. Isso é significativo porque os estudos realizados até o momento em redes nativas MPLS e Carrier Ethernet mostram uma degradação no desempenho de latência e assimetria quando comparados com TDM. Esses resultados mostram que é possível manter o desempenho TDM sobre uma implementação de rede de pacotes e garantir o mesmo desempenho de canal para circuitos críticos de proteção. Isso resolve muitos dos desafios associados à migração para redes baseadas em pacotes.

Além disso, o método de análise fornece uma ferramenta de análise valiosa para estudar um canal de comunicação ao longo do tempo para avaliar sua adequação para suportar uma proteção diferencial de linha.

X. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer e reconhecer as contribuições de Steve Alexanderson e do restante da Central Lincoln PUD. Sem a ajuda e percepção deles, não teria sido possível realizar o estudo e escrever este artigo. Foi uma oportunidade única de estudar circuitos de proteção em serviço em uma rede que estava no meio de uma migração de uma rede TDM para uma rede baseada em pacotes. Este estudo agrega valor para as transmissoras que estão lidando com o desafio do TDM para a migração de rede baseada em pacotes.

XI. REFERÊNCIAS

- [1] J. Roberts, D. Tziouvaras, G. Benmouyal, and H. J. Altuve, "The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security," proceedings of the South African Power System Protection Conference, November 2000.
- [2] B. Kasztenny, N. Fischer, K. Fodero, and A. Zvarych, "Communications and Data Synchronization for Line Current Differential Schemes," proceedings of the 2nd Annual Protection, Automation and Control World Conference, Dublin, Ireland, June 2011.
- [3] K. Zimmerman and D. Costello, "A Practical Approach to Line Current Differential Testing," proceedings of the 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2013.
- [4] J. Geurink, K. Fodero, and P. Robertson, "Addressing Analog Leased Line Obsolescence by Preserving Protection Channel Performance Over Ethernet," proceedings of the 45th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2018.
- [5] CIGRE JWG34/35.11, "Protection Using Telecommunications," August 2001.
- [6] B. Kasztenny, G. Benmouyal, H. J. Altuve, and N. Fischer, "Tutorial on Operating Characteristics of Microprocessor-Based Multiterminal Line Current Differential Relays," proceedings of the 38th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2011.

XII. BIOGRAFIAS

Ron Beck é engenheiro de rede da Central Lincoln People's Utility District (Central Lincoln PUD) em Newport, Oregon. Nessa função, ele é responsável pelo projeto, engenharia e construção dos sistemas de telecomunicações da concessionária, redes locais e de área ampla e sistemas de segurança cibernética. Ele foi o arquiteto principal da infraestrutura de comunicação para projetos de Smart Grid Investment Grant e Grid Modernization da Central Lincoln PUD. Atualmente, ele está atuando no Conselho de Diretores da UTC como ex-presidente. Ele é membro da InfraGard Oregon Alliance Chapter, está envolvido com o National Cybersecurity Center of Excellence do NIST e é um membro ativo em vários outros esforços de consultoria da indústria de energia elétrica.

Paul Robertson é gerente de produto sênior da linha de produtos de comunicação de rede sem fio da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL). Ele tem mais de 25 anos de experiência no desenvolvimento e comercialização de produtos para a indústria de telecomunicações, abrangendo sistemas de comunicação celular sem fio e com fio. Paul trabalhou em várias funções técnicas e de marketing na Motorola, Hewlett-Packard e Agilent Technologies antes de ingressar na SEL. Ele é bacharel em engenharia elétrica e eletrônica pela University of Strathclyde e possui MBA pela Edinburgh Business School.

Troy Ledford tem um BSEE da University of Idaho. Ele é um estagiário de engenharia em Idaho. Troy trabalhou para a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. por mais de 5 anos e ocupou cargos em várias divisões, incluindo pesquisa e desenvolvimento, marketing e, mais recentemente, em vendas e atendimento ao cliente. Sua função atual é como engenheiro associado de aplicações de proteção. Atualmente é membro do IEEE e PES.

Cole Salo tem um BSEE da Montana Tech. Ele é um engenheiro líder de desenvolvimento de produto e ocupou vários cargos na divisão de pesquisa e desenvolvimento da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. nos últimos 10 anos.