



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPC/19

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

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

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

**Marco Antonio M. Rodrigues (*)
CEPEL**

**Júlio César Marques de Lima
CEMIG-D**

**Mario Roberto Bastos
CTEEP**

**Daniel Nascimento Barbin
CTEEP**

**André Luiz Lins Miranda
CEPEL**

**Laiz de Carvalho Souto
POLI_USP**

**Newton José Salles
CPFL**

**Fábio Bicalho de Araujo
FURNAS**

**Juliana Pigead Muratore
LIGHT**

**Luiz Puppi
COPEL GeT**

**Sônia Ribeiro Campos
CEMIG-D**

RESUMO

Localização de faltas em linhas de transmissão é um tema amplo, que envolve várias técnicas e áreas de aplicação. O Study Committee B5 do CIGRÉ criou um grupo internacional para estudar os diversos métodos existentes, cujo trabalho ainda está em andamento. O relatório a ser preparado pelo WG B5.52 – “Analysis and comparison of fault location systems in Substation Automation Systems” - vai discorrer sobre os princípios e características práticas de implementação das técnicas de localização de faltas, indicando as diferentes aplicações desses resultados, além de apresentar o conteúdo de uma pesquisa internacional sobre a utilização de localização de faltas nas concessionárias. O foco principal do trabalho do WG B5.52 é avaliar e comparar diferentes conceitos disponíveis para localização de faltas e fazer recomendações para a aplicação adequada de sistemas de localização de faltas em redes de transmissão e distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, localização de faltas, distância de falta, sistemas elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

O objetivo desse informe técnico, preparado pelo grupo espelho brasileiro, é apresentar o andamento do WG internacional e também divulgar as conclusões a que o grupo está chegando. Cabe lembrar que o estudo do WG B5.52 compreende as técnicas utilizadas em linhas de transmissão e distribuição em corrente alternada. O relatório englobará não somente a apresentação de técnicas de localização de faltas como também as questões práticas relacionadas à sua implementação, descrição das fontes analógicas de sinais, outras fontes de informação para melhorar os resultados da localização de faltas, aplicações (que métodos aplicar em cada tipo de circuito), considerações operacionais (formas de uso dos dados nas empresas), perspectivas futuras e o resultado de um questionário respondido por concessionárias de vários países.

2.0 - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS E SUA IMPLANTAÇÃO

2.1 Métodos de localização de faltas baseados na frequência fundamental

Os métodos de localização de faltas nessa categoria utilizam os componentes em frequência dos valores de tensão e corrente medidos nos terminais das linhas de transmissão e os parâmetros de linha, calculados também para a frequência fundamental. Eles consistem em calcular as impedâncias aparentes, vistas nos terminais das linhas de transmissão e compará-las aos valores conhecidos dos parâmetros de linha. Podem ser ainda divididas em duas subcategorias: a primeira inclui técnicas que usam medições em apenas um terminal de linha; e a segunda inclui

técnicas que utilizam medições provenientes de dois ou mais terminais de linha. Sua popularidade se dá em função de sua simplicidade e economicidade quando comparadas às outras técnicas baseadas no tempo. Em geral, se toma como premissa que as fontes de energia são conectadas em ambos os lados da linha e que as linhas são homogêneas e sem derivações que não sejam modeladas.

2.1.1.. Localização de faltas por impedância utilizando dados de um terminal

A localização de faltas é estimada comparando a impedância aparente Z_{app} calculada a partir das grandezas de tensão e corrente medidas em apenas um dos terminais de linha com a impedância da linha por unidade de distância. A literatura apresenta algumas técnicas comumente utilizadas em localização de faltas de um terminal baseada em impedância. Cada uma delas parte de certas premissas que afetam a precisão da estimação de localização da falta, veja Tabela 1. Em comum, todas assumem que a impedância de falta seja puramente resistiva e que a resistividade da terra seja constante, utilizam a impedância de sequência positiva e zero e assumem que as fases envolvidas na falta são conhecidas.

Tabela 1: Comparação das técnicas de localização de faltas de um terminal baseadas em impedância (1)

Técnica	Medições de pré-falta/falta	Parâmetros	Premissas
Reatância	Tensão e corrente de falta	Reatância da linha	As impedâncias de linha e das fontes têm o mesmo ângulo
Takagi	Corrente de pré-falta, tensão e corrente de falta	Impedância da linha	A linha e as impedâncias das fontes têm o mesmo ângulo. Não é afetada pela carga.
Takagi Modificado	Tensão e corrente de falta	Impedância da linha	Compensação parcial quando as impedâncias de linha e de fonte têm ângulos diferentes. Não é afetado pela carga.
Eriksson	Corrente de pré-falta, tensão e corrente de falta (I_0 da linha paralela)	Impedâncias da linha e das fontes local e remota.	A corrente de <i>charging</i> é desprezível; a magnitude e ângulo das fontes não se alteram com a falta.

As vantagens de se utilizarem técnicas de localização de faltas de um terminal baseadas em impedância é que elas são simples de implementar, têm precisão aceitável na maioria dos casos e não requerem dados dos terminais remotos. As fontes de erro estão relacionadas ao componente exponencial DC, à saturação do transformador de corrente, efeito da carga, presença de compensação série e o efeito da não homogeneidade da linha, dentre outras. Além da Tabela 1, o relatório do grupo apresenta a formulação matemática dos métodos envolvidos e detalha várias cuidados e considerações necessárias para cada técnica.

A localização de faltas por um terminal é disponibilizada em vários dispositivos monitorando as linhas de transmissão, particularmente em relés numéricos de proteção, como uma característica padrão. Outra maneira bastante usual é o cálculo pós-evento, utilizando dados de oscilografia digital. Para implementação dos algoritmos de localização de faltas é necessário digitalizar os sinais em uma frequência de amostragem adequada, numa janela de tempo que engloba o período de falta, e em certos casos o período de pré-falta. Depois, calculam-se os valores fasoriais a partir das formas de onda de tensão e corrente medidas. Existem diferentes técnicas para calcular as grandezas fasoriais sendo a transformada discreta de Fourier (DFT) a mais utilizada. Um trecho de pelo menos um ciclo no período de pré-falta e outro no de falta são escolhidos para esse cálculo. Para a escolha da janela referente ao trecho de falta, precisa-se considerar que após o evento, existe um período de transição do sistema de potência para seu novo estado de falta, um período de convergência dos algoritmos de Fourier e o momento em que o circuito de falta é alterado (por exemplo, pela abertura de um disjuntor após comando de um relé de proteção). Nesse caso, existe a necessidade de prover a coleta e armazenamento de arquivos que, em geral, estão no formato COMTRADE, o que pode ser feito de diversas formas, dependendo da tecnologia utilizada nos dispositivos de registro de oscilografia e na disponibilidade de redes de comunicação de dados. Algumas arquiteturas em uso atualmente são abordadas.

2.1.2 Localização de faltas por impedância utilizando dados de dois terminais

A utilização da técnica de localização de faltas por impedância utilizando dados de dois terminais pode melhorar significativamente os resultados. As técnicas mais simples de dois terminais requerem valores de tensão e corrente medidos nos dois terminais de forma sincronizada, mas são altamente sensíveis ao erro de sincronização das fases. Se a falta for evolutiva ou os disjuntores nos terminais de linha forem abertos em tempos diferentes, surgirão várias condições de falta, mas os dados a serem utilizados devem se referir à mesma condição.

As técnicas que permitem utilização de dados de dois terminais não sincronizados podem ser utilizadas onde a sincronização por uma fonte de tempo não é viável e a sincronização manual de sinais em oscilogramas é muito trabalhosa. Os métodos também se aplicam no caso dos dados estarem sincronizados. A formulação do problema leva à solução de um sistema não linear, requerendo uma abordagem adequada para sua solução. Uma possibilidade é a utilização de métodos iterativos, por exemplo, baseados em mínimos quadrados não lineares. Pode-se também utilizar as formas de onda de pré-falta para corrigir o erro de sincronização dos fasores obtidos no trecho de falta. É apresentado um método baseado na magnitude da sequência negativa da corrente em ambos os terminais, que tem a vantagem de não necessitar de dados de pré-falta, do conhecimento do tipo de falta ou de várias iterações, mas

que não se aplica aos casos de faltas tri-fásicas que produzem componentes de sequência negativa com valores muito baixos. Outras técnicas já estudadas e publicadas também são comentadas no relatório.

Os métodos de localização de faltas por impedância usando os dois terminais geralmente superam a acurácia dos métodos de um terminal, visto que conseguem melhorar a estimação da corrente de falta. Quando é possível a sincronização temporal entre os dois terminais, os resultados tendem a ser ainda melhores. Além disso, muitas das premissas das técnicas de um terminal não precisam ser consideradas neste caso.

Quando a localização de faltas por impedância em dois terminais é implementada de forma automática, torna-se necessário garantir que os registradores estejam sincronizados, de forma a garantir: (1) a possibilidade de determinar o par de arquivos que registraram a falta, um em cada terminal; e (2) determinar o ângulo relativo entre os dois extremos da linha, quando o algoritmo utilizado precisar desse valor. Para o item 1 se a sincronização não tiver imprecisões do poucos segundos - em certos sistemas que utilizam as primeiras gerações de GPS, esses desvios podem ocorrer - sem que isso impeça a determinação do par de arquivos. Nesse caso o ângulo não pode ser utilizado corretamente, e necessita-se adaptar os algoritmos utilizados para obter um valor aceitável de localização de faltas.

Atualmente, a tecnologia dos sistemas de sincronização de tempo vem evoluindo a cada dia, estando disponíveis outros sistemas de georreferenciamento por satélite, além do protocolo PTP (IEEE 1588), que promove a sincronização através da rede de dados.

2.1.3 Localização de faltas por impedância em linhas com múltiplos terminais

A análise nesses casos é um pouco mais complexa. Por exemplo, no caso de três terminais, consideramos um terminal local S, um terminal remoto R e um segundo terminal remoto T. A linha pode ser dividida em três trechos ou ramais, cada um partindo de um dos terminais, sendo J o ponto de junção. Esse sistema pode ser modelado considerando-se todas as impedâncias de fonte e de linha e supondo-se que a falta foi no trecho entre o terminal S e a junção J, numa posição m . O mesmo pode ser feito supondo-se a falta nos demais trechos, gerando três equações no total. Estando disponíveis os dados dos três terminais e sendo todas medições sincronizadas, a equação que resultar um valor de m entre 0 e 1, indicará em que trecho ocorreu a falta.

2.1.4 Outros métodos baseados em valores calculados na frequência fundamental

Além dos métodos citados anteriormente, existem alternativas também citadas no estudo. Por exemplo, um método muito utilizado pelas concessionárias inclui usar informação da corrente medida nos terminais da linha de transmissão. O sistema de potência é modelado no programa de curto-circuito, o que permite obter-se o perfil de corrente de falta versus a impedância, ou distância, entre o ponto de data e um dos terminais da linha. O procedimento é feito em dois passos:

1. A razão entre os valores RMS da corrente de falta medida nos terminais da linha é comparada com a razão entre os valores de corrente calculados pelo programa de curto-circuito para um dado tipo de falta, posição e valor de resistência de falta. Essa posição é variada até os valores dessas razões tornarem-se compatíveis. O processo é automatizado utilizando-se um algoritmo de otimização tal como o método da seção áurea.
2. Uma vez determinada a posição da falta, a magnitude da impedância de falta é variada até que as amplitudes da corrente calculada e medida sejam similares.

O desempenho desse método de localização de faltas depende de fatores como a precisão do modelo, os erros de medição, a resistência de falta e o estado operativo do sistema. É comum recorrer-se aos valores apresentados em registros de oscilografia para obter os valores de corrente de falta utilizados no método acima.

Nos casos de sistemas com linhas não homogêneas que não possam ser simulados em programas de curto-circuito, o cálculo ainda é possível utilizando-se um simulador de transitórios eletromagnéticos, como o EMTP ou equivalente, porém o esforço de modelagem e de simulação é consideravelmente maior. Essa técnica de cálculo off-line é particularmente útil quando a falta tem alta impedância ou é instável

2.2 Métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes

Os métodos de localização de faltas baseada em ondas viajantes têm a vantagem de apresentar alta precisão, com erros esperados da ordem da distância entre uma ou duas torres, na maioria dos casos. Têm como requisito uma alta taxa de amostragem, requerendo especificações de hardware mais exigentes para digitalização de tensões e correntes. Os métodos de ondas viajantes se baseiam na detecção de frentes de onda geradas pelo arco elétrico que se forma durante uma falta. Essas frentes são detectadas nos terminais da linha de transmissão e o seu tempo de chegada é utilizado para calcular a localização da falta. A única exceção é o algoritmo tipo C, vide a seguir, onde um pulso é injetado na linha.

Os métodos baseados em ondas viajantes, assim como os baseados no domínio da frequência, podem utilizar dados de um ou de dois terminais. Os métodos de um terminal se dividem nos seguintes tipos:

- O **método tipo A** é a abordagem mais simples em termos do hardware empregado, mas os sinais observáveis são de difícil análise. Ele utiliza sinais medidos em apenas um dos terminais da linha. O algoritmo se inicia com a chegada da primeira frente de onda e em seguida monitora as reflexões que ocorrem entre o ponto de falta e os terminais da linha.
- O **método tipo C** também utiliza apenas um terminal, porém utiliza um transitório injetado na linha de transmissão, monitorando suas reflexões que ocorrem a partir de qualquer descontinuidade encontrada.
- O **método tipo E** utiliza como fonte do transitório a atuação de disjuntores quando energizando a linha. Nesse caso deve-se observar que cada polo do disjuntor age como um gerador de impulso e que o tempo do pulso irá variar para cada fase. O método é muito utilizado para determinação do comprimento elétrico da linha, incluindo a catenária formada pelos condutores e não a distância em linha reta entre as torres.

Existem algumas limitações nos métodos de ondas viajantes por um terminal: para a amplitude da frente de onda ser significativa, a impedância de arco deve ser bem inferior à impedância característica da linha; faltas evolutivas vão tornar mais complexa a identificação correta da frente de onda; linhas com descontinuidades tais como ramais e seções de cabo vão produzir múltiplas reflexões; como os disjuntores estão fechados até a atuação da proteção, podem surgir reflexões de outros circuitos, tornando mais complexa ainda a identificação correta da frente de onda; circuitos paralelos em linhas com circuitos duplos também vão conduzir a frente de onda que chegou ao terminal remoto. Por esses e outros motivos, os métodos de ondas viajantes por um terminal não são muito usados, exceto quando em combinação com outras técnicas.

Uma forma de minimizar os efeitos das múltiplas reflexões que costumam ocorrer no método localização de faltas por um terminal é a utilização de método híbrido, onde é feita a localização de faltas por impedância usando dados de um terminal para identificar uma região ou zona da linha onde a falta teria ocorrido. Com o conhecimento dessa região pode-se descartar mais facilmente frentes de onda refletidas que não se originam do ponto de falta.

Os métodos de dois terminais apresentam um desempenho muito bom, ao custo de um *hardware* mais complexo. Esses métodos se dividem nos seguintes tipos:

- O **método tipo B** utiliza um localizador de faltas em cada lado da linha, mas somente um dos lados utiliza uma base de tempo precisa. A sincronização é feita por um canal de comunicação entre os terminais cujas características não variem significativamente no tempo, como uma conexão de fibras óticas, por exemplo.
- O **método tipo D** é o mais popular, utilizando sincronização dos dispositivos em ambos os lados por uma base absoluta, como o GPS. O canal de comunicação ainda é necessário, porém suas características não são importantes no desempenho do método. A distância para a falta pode ser calculada a partir da diferença entre os tempos T_s e T_r (veja Figura 1) e da velocidade de propagação no condutor.

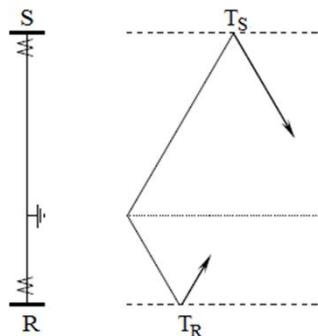


FIGURA 1 – Diagrama de propagação de ondas para o localizador de faltas por ondas viajantes do tipo D (1)

Apesar de menos complexos que os métodos de onda viajante de um terminal, os métodos de dois terminais podem não conseguir entregar resultados, por exemplo: no caso de faltas em linhas energizadas onde um dos terminais está aberto; em religamentos sob falta, pois a frente de onda gerada pelo fechamento do disjuntor se propaga até o final da linha, resultando o valor do comprimento da linha. A utilização em cabos subterrâneos fica limitada em função de uma maior dispersão e atenuação da frente de onda. Nesses e em outros casos uma interpretação manual do sinal registrado pode ajudar a determinar os tempos corretos de propagação e, conseqüentemente a localização de faltas.

No caso de circuitos com múltiplos terminais, havendo uma falta, a frente de onda será refletida no ponto de junção de volta ao terminal mais próximo à falta e propagada para os demais terminais. Um circuito com três terminais S, R e T, com um ponto de junção J, costuma ser analisado como três circuitos de dois terminais, ou seja, utiliza-se o localizador por ondas viajantes do tipo D entre os terminais S-R, R-T e T-S. A falta será corretamente determinada pelos pares de localizadores que estiverem posicionados nos terminais que "veem" a falta diretamente (para uma falta no trecho J-T, os localizadores S-T e T-R), e será incorretamente calculada pelo par de localizadores posicionados nos terminais que estão atrás do ponto de junção (no caso os localizadores S-R). Existem

implementações para circuitos com múltiplos terminais, sendo que nesse caso se monitora a frente de onda no maior número possível de terminais. No relatório, um exemplo é dado para o caso de um circuito de seis terminais.

Os métodos de ondas viajantes necessitam uma calibração prévia para cada instalação. Essa calibração tem por objetivo obter o valor real do comprimento elétrico da linha, como explicado anteriormente, e calcular o fator de compensação da velocidade da frente de onda no condutor, que é ligeiramente inferior à velocidade da luz no vácuo. Outro cuidado na instalação é evitar que os circuitos secundários atenuem ou mesmo entrem em ressonância com o sinal de alta frequência; isso pode acontecer em função da natureza dos cabos que levam o sinal para as salas de relés das subestações.

No processo de detecção, o sinal da frente de onda é filtrado de forma a retirar as componentes de baixa frequência, inclusive da fundamental, deixando apenas os componentes que realcem a passagem da frente de onda. É comum se utilizar a transformada de *wavelet* nessa filtragem.

2.3 Indicadores de faltas em linhas de média tensão

A técnica se baseia na medição de corrente em vários pontos de um circuito com muitas derivações, comuns em média tensão. Como, em geral, a corrente de falta supera a corrente de carga, é possível determinar o caminho da corrente de falta e apontar o segmento onde houve a falta. Para isso medidores precisam monitorar cada uma das fases, ou condutores, e serem instalados em pontos importantes, como ramificações ou próximo a seccionadoras. A localização da falta tende a ser mais precisa na medida em que se aumenta o número de sensores e pontos monitorados. A maioria dos dispositivos disponíveis permite a verificação local (comunicação sem fio ou indicação visual) ou remota (redes móveis – GSM/GPRS) de seu estado. Nesse último caso, os sensores se comunicam com uma unidade central que será capaz de indicar o caminho real da corrente de falta. Essa técnica permite indicar um segmento onde a falta ocorreu, mas não a sua posição exata.

Quando existem IEDs com capacidade de medição de tensão e corrente instalados nos alimentadores, relés de proteção ou religadores, por exemplo, é possível calcular a impedância vista do terminal onde o IED foi instalado e determinar um conjunto de segmentos cuja reatância supera o valor calculado. Utilizando-se o resultado dos indicadores de falta, pode-se determinar o local da falta com maior precisão.

2.4 Patrulha de linha

Patrulha ou manutenção de linha é a técnica mais precisa para localização de faltas, mas ao mesmo tempo, a que mais consome tempo e que envolve um ou mais grupos de funcionários permanentemente à disposição. O uso dessa alternativa se justifica quando a instalação de dispositivos para localização de faltas não é vantajoso, como no caso de linhas curtas, em locais facilmente acessíveis de automóvel ou em circuitos cuja recuperação não seja crítica para a operação do sistema.

O trabalho das equipes de manutenção de linha pode ser enormemente facilitado se houver uma indicação prévia para a localização da falta. Mesmo conhecendo-se com certa segurança a posição da falta, a atuação dessas equipes se faz necessária em situações tais como: após tentativas de religamento sem sucesso; em período de queimadas, quando o religamento automático estiver inibido, ou em locais onde já se sabe que há maiores riscos de falta. A decisão de despachar uma equipe de campo após uma ocorrência de uma falta é normalmente tomada pelo centro de controle.

Durante o patrulhamento de linha, as equipes buscam evidências de uma falta, tal como condutores caídos, torres danificadas, isoladores quebrados, árvores queimadas, ninhos de pássaros etc. O deslocamento das equipes pode se dar de diversas formas, de acordo com as circunstâncias: a pé, de automóvel ou de helicóptero. Mais recentemente o uso de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) tem sido adotado.

3.0 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

3.1 Fontes de sinais analógicos para aplicações de localização de faltas

As fontes de sinais analógicos usadas para aplicações de localização de faltas impactam diretamente o seu desempenho. Devido às suas limitações, tais como largura de banda reduzida, algumas fontes não são recomendadas para determinados métodos. No relatório existe uma sessão dedicada a descrever o desempenho de cada fonte de sinal analógico e dar recomendações sobre a mais adequada para cada método de localização de faltas. A Figura 2 é um exemplo.

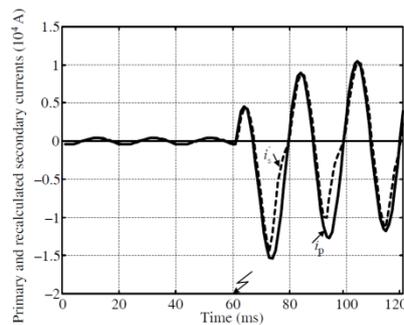


FIGURA 2: Saturação de um TC – formas de onda do primário e secundário (recalculado para o lado primário)(1).

Por exemplo, enquanto TCs não convencionais comerciais apresentam excelente precisão e baixa distorção, sendo altamente indicados para métodos baseados em componentes da frequência fundamental, eles têm certas limitações para aplicações de ondas viajantes, devido à baixa frequência de amostragem no estágio de saída.

Por outro lado, bobinas de Rogowski tem excelente resposta e servem para todos os métodos, mas é necessário integrar o sinal de saída para obter-se uma réplica do sinal no primário.

3.2 Outras informações para melhorar a confiabilidade dos métodos de localização de faltas

Nessa seção é discutido como outros sistemas de informação, utilizados na monitoração de sistemas elétricos de potência podem ser utilizados para aumentar a confiabilidade dos resultados de localização de faltas. O sistema SCADA pode fornecer, por exemplo, o registro da sequência de eventos (SOE), que permitem entender a ordem dos desligamentos e atuações da proteção e controle num determinado momento, ajudando a identificação do equipamento desligado. Imagens de satélite podem ajudar a identificar áreas onde há queimadas, informação que pode ser georreferenciada com a posição das linhas de transmissão, de forma a confirmar ou complementar o resultado de outro método de localização de faltas. No Brasil, o INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais – fornece desde 1998 as imagens de seus satélites e as coordenadas dos focos de calor, latitude e longitude. O Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, assim como concessionárias de maior porte utilizam esses dados para confirmar os resultados da localização de faltas. Esses dados podem ser importados por sistemas SCADA e apresentados sobre diagramas unifilares ou associados à posição de linhas de transmissão como se observa na Figura 3 à esquerda, onde é identificada a LT Montes Claros 2 – Várzea da Palma 1 (em amarelo) da CEMIG e focos de queimadas em sua proximidade (quadrados em azul e rosa). Ocorreu uma falta na linha e o resultado do método de localização de falta por impedância foi confirmado pela informação do satélite.

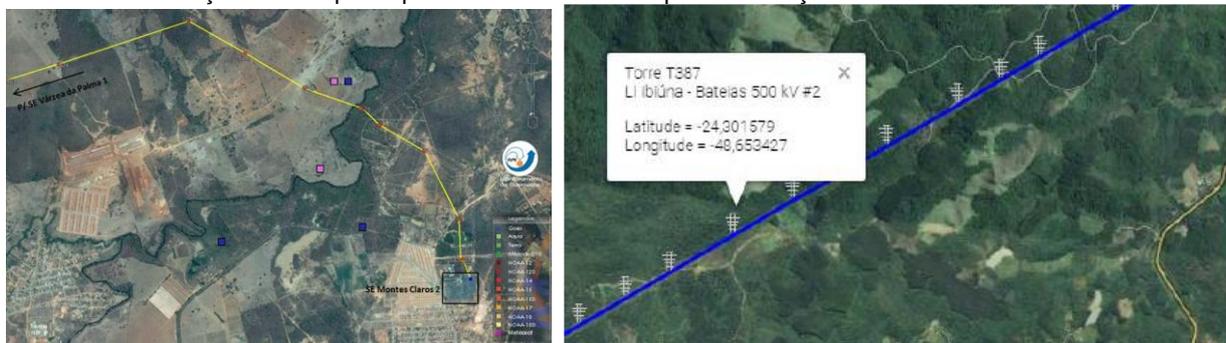


FIGURA 3: Imagem de satélite com indicação de linha de transmissão e queimadas (esquerda) e visualização do terreno no local em que a falta foi localizada (direita).

Sistemas de detecção de descargas atmosféricas também podem ser de utilidade para confirmar os resultados dos métodos de localização de faltas, tornando mais certo o despacho das equipes de campo. Existem empresas que monitoram a atividade de raios e disponibilizam a informação em seus bancos de dados para acesso de seus clientes, via Internet. A utilização de mapas com georreferenciamento das torres das linhas de transmissão auxilia também a movimentação das equipes de campo, indicando acidentes naturais, estradas e outros acessos às proximidades da linha, vide Figura 3, à direita.

Na área de distribuição, com o avanço da tecnologia de medidores inteligentes, com comunicação integrada, aumenta a facilidade para determinar com grande precisão o local da falta, já que cada medidor pode reportar o estado da rede elétrica no local onde está instalado.

4.0 - CONSIDERAÇÕES OPERACIONAIS BASEADAS NOS RESULTADOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Essa parte do relatório do WG apresenta a utilização dos resultados de localização de faltas nos diversos setores

da empresa. Além do centro de controle e das equipes de manutenção, outros setores da empresa, como engenharia, atendimento aos clientes, gerência de ativos, estatísticas também vão utilizar a informação, porém em momentos diferentes.

Alguns fatores precisam ser analisados para determinar o interesse nesses resultados, por exemplo:

1. Houve um religamento com sucesso?
2. Algum controle automático falhou?
3. Houve desligamentos de cargas importantes?
4. O evento iniciou um incêndio na vegetação próxima à faixa de servidão?

No documento é apresentada uma matriz que relaciona a condição do sistema, exemplificada acima, com os diversos setores da empresa, indicando se a notificação deve ser imediata, num tempo médio ou se não se aplica. Por exemplo, um religamento sem sucesso não vai interessar à área de relacionamento com clientes, a não ser que seja acompanhada de uma perda de carga.

Em termos de ações imediatas, o resultado da localização de falta costuma ser usado:

- Pela operação do sistema quando despachar uma equipe para manutenção de campo.
- Pela operação do sistema para ser incluída no relatório diário da operação.
- Pelos especialistas de análise de perturbações.

5.0 - APLICAÇÕES E FONTES DE ERRO

Nessa parte do relatório do WG são relacionados os diversos tipos de configurações de circuitos elétricos com os métodos de localização de falta mais adequados.

Em linhas de transmissão com dois terminais, que podem ser aéreas, subterrâneas ou mistas, terem acoplamento eletromagnético com um circuito paralelo, terem derivações ou terem a relação X/R homogênea ou não homogênea. Os métodos aplicados são os mais conhecidos, localização de faltas por impedância e por ondas viajantes usando dados de um ou dois terminais. Existem métodos que não necessitam de sincronização, assim como é possível uma sincronização, manual ou automática, a partir do transitório e dos valores de falta.

Em linhas não homogêneas, cada seção da linha pode ser modelada como tendo uma relação X/R distinta. Os métodos de impedância podem ser utilizados quando se considera cada uma dessas seções separadamente. Por exemplo, estando a falta na mesma seção que parte do terminal de linha, basta o cálculo tradicional da impedância. Se estiver na seção seguinte, deve-se considerar a impedância da primeira seção constante e trabalhar sobre a diferença, e assim por diante. Métodos de ondas viajantes também apresentam problemas nesses casos, pois a mudança de características provoca reflexões e refrações múltiplas de frentes de onda, dificultando a escolha da frente de onda correta para o cálculo do tempo de propagação a partir do ponto de falta.

A não transposição de linhas também provoca erros significativos no método por impedância, efeito que é ampliado no caso de circuitos duplos. Isso ocorre porque nesses casos a matriz de impedância da linha, utilizada para relacionar as tensões e correntes medidas no terminal, deixa de ter certas simetrias que permitiriam realizar o cálculo de forma simplificada, desacoplando os circuitos de sequência positiva, zero e negativa, ou seja usando apenas os parâmetros de impedância de sequência zero Z_0 , positiva Z_1 e negativa Z_2 . Quando a linha não é transposta, essa abordagem simplificada, que é a mais utilizada, vai impactar negativamente a precisão do resultado, como se observa na Figura 4, onde a linha preta corresponde à impedância de sequência positiva da linha de transmissão.

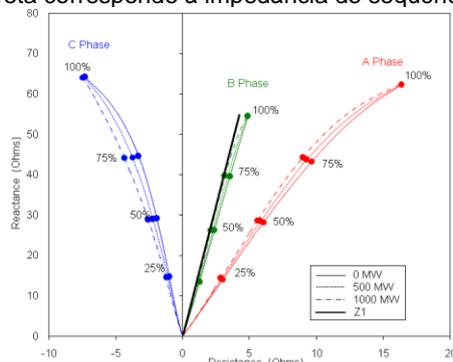


FIGURA 4: Impedância aparente observada em cada fase para faltas à terra em vários pontos da linha (1 e 2).

Outra aplicação discutida é a localização de faltas em linhas com compensação série. Esses equipamentos possuem além do banco de capacitores em série, uma proteção, que é feita por varistores de óxido metálico (MOV), um *gap* de *bypass* e um disjuntor de *bypass*. Sua aplicação em uma linha provoca a mudança da natureza indutiva da rede sob certas condições de falta, fenômeno ressonante de baixa frequência e transitórios de alta frequência. A

impedância aparente medida durante a falta é influenciada pelo fato do MOV ou do *gap* estarem conduzindo ou não, provocando erros significativos nos algoritmos de localização de faltas. Para um funcionamento mais preciso, seria necessário, por exemplo, compensar o efeito dessa compensação série e o efeito da reatância resultante do *infeed* de corrente proveniente do terminal remoto. Um algoritmo que faz essa compensação é apresentado. Em geral, é muito difícil obter precisão elevada em linhas com compensação série, sendo o método de ondas viajantes a abordagem mais utilizada.

O relatório do WG fala também de localização de faltas em sistemas de distribuição, discutindo sua aplicação nas configurações de redes radiais e em anel.

Em geral, o método de localização de faltas usando componentes de frequência aplicado a linhas radiais com múltiplas derivações, usadas em média tensão, precisa lidar com o problema das múltiplas estimativas, ou seja, a impedância de falta vista do terminal até o ponto de falta pode indicar vários pontos na linha principal ou em algumas das derivações. Esse problema pode ser minimizado ao se instalarem indicadores de falta em determinadas posições. Outros problemas que impactam a localização de faltas são a não homogeneidade das seções de linha do alimentador que são adicionadas à medida que se torna necessário expandir o sistema, e as cargas conectadas. O assunto ainda merece atenção dos pesquisadores e ganha mais interesse com a utilização cada vez mais frequente de geração distribuída.

Em linhas radiais de média tensão com compensação (ou com aterramento ressonante), o problema fundamental para localização de faltas à terra, quando comparado com outras configurações de aterramento de neutro, é a reduzida corrente de falta. Em consequência, a queda de tensão associada é tipicamente muito pequena, dificultando a localização mais precisa da falta. O *loop* de falta é modelado e alguns resultados em um sistema de 20 kV são apresentados, mostrando que localização de faltas utilizando componentes da frequência fundamental para faltas à terra em redes compensadas dependem bastante da qualidade das medições e dos parâmetros de entrada quando a resistência da falta tem um valor mais elevado.

6.0 - PERSPECTIVAS FUTURAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A tecnologia de medição fasorial sincronizada oferece novas oportunidades para melhorias nos resultados de localização de faltas: o aumento continuado do número de pontos medidos; a disponibilidade de medições sincronizadas em diferentes pontos do sistema; o aumento na confiabilidade da rede de comunicação utilizada por esses sistemas; a possibilidade de aplicações mais sistêmicas, incluindo localização em linhas multiterminais. Uma aplicação de cálculo de distância de falta em uma linha com dois terminais usando dados fasoriais conseguiu manter os erros de localização em torno de 1,9%.

Localização de faltas centralizada, baseada em modelos, é uma abordagem para sistemas de distribuição que também se beneficia da grande quantidade de valores medidos e das facilidades de comunicação disponíveis. A ideia central é calcular o fluxo de potência para faltas em diferentes nós do sistema e depois comparar os resultados com os valores medidos, de forma que a simulação que apresentar valores mais próximos das medições indicará o ponto de falta. Para reduzir o esforço computacional do método anterior, pode-se utilizar uma árvore de decisão para identificar o segmento problemático, reduzindo-se significativamente a quantidade de nós candidatos antes de iniciar a busca iterativa.

7.0 - QUESTIONÁRIO

Concessionárias de vários países (cinco do Brasil) responderam ao questionário do grupo. Seu objetivo foi levantar detalhes sobre as práticas adotadas em vários países com respeito à localização de faltas em linhas de transmissão:

- Perfil das empresas que participaram.
- Métodos de localização de faltas utilizados.
- Requisitos de precisão adotados.
- Implementação dos sistemas de localização de faltas.
- Principais problemas em sistemas de localização de faltas.

Os resultados do questionário são riquíssimos em informações e permitem traçar um excelente perfil de como o problema da localização de faltas está sendo tratado ao redor do mundo.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) "Analysis and comparison of fault location systems in Substation Automation Systems", relatório do Working Group B5.52 do Study Committee B5 do Cigré, versão preliminar de setembro de 2016. Em inglês.
- (2) D. Spoor, K Hinkley "TransGrid's Experience with Travelling Wave and Impedance-Based Fault Location on Double Circuit 500kV Lines" CIGRE, South East Asia Protection and Automation Conference, 10-11 March, 2011

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marco Antonio Macciola Rodrigues formou-se em Engenharia Elétrica em 1986, concluindo o mestrado (M.Sc.) em 1991 e o doutorado (D.Sc.) em 1999 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Desenvolve suas atividades no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 1987 e hoje trabalha nas áreas de automação e proteção de sistemas elétricos. É atualmente coordenador do Comitê B5 do Cigré-Brasil.

André Luiz Lins Miranda nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1971. Formou-se em Engenharia Elétrica em 1994 pela UERJ e concluiu seu mestrado na área de Processamento de Sinais em 2005 pela COPPE/UFRJ. Desenvolve suas atividades no CEPEL desde 1997, nas áreas de automação e proteção de sistemas elétricos, projeto e desenvolvimento de sistemas e algoritmos para análise de sinais medidos no sistema de potência. Daniel Nascimento Barbin, Engenheiro Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá - MG, MBA do Setor Elétrico, FGV, Cargo Atual: Engenheiro Sênior de Avaliação da Operação e Proteção, Departamento de Operação – ISA CTEEP. Jundiaí, São Paulo, Brasil.

Fábio Bicalho de Araujo nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1981. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio em 2008 e concluiu o mestrado (M.Sc) em Sistemas de Energia Elétrica em 2010 também pela PUC-Rio. Atualmente é engenheiro da Gerência de Proteção e Automação de Furnas Centrais Elétricas.

Juliana Pigeard Muratore recebeu seu diploma de Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2009 e de Pós-Graduação/ Extensão em Sistemas de Energia pela COPPE/UFRJ em 2016. Desde 2010 é engenheira na LIGHT SESA no grupo de Proteção da Gerência de Planejamento do Sistema de Alta Tensão, atuando na análise de ocorrências, ajuste dos relés de proteção e estudo dos esquemas de proteção do sistema de 138kV da Light.

Júlio César Marques de Lima graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas) em 1985 e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela mesma instituição em 2002. Trabalha na CEMIG desde o ano de 1988 na área de Engenharia Operacional de Proteção, onde responde pelos estudos de ajustes de proteção e análises de perturbações do sistema elétrico de alta tensão. É professor do curso de graduação em Engenharia Elétrica e da pós-graduação da PUC Minas desde o ano de 2015.

Laiz Souto nasceu em São Paulo em 21 de novembro de 1990, é graduada em Engenharia de Energia e Automação Elétricas e Mestre em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade de São Paulo, foi pesquisadora visitante no KTH Royal Institute of Technology em Estocolmo entre 2014 e 2015, e atualmente é pesquisadora e estudante de doutorado na Universidade de Groningen, em algoritmos de controle para integração de sistemas de energia de maneira sustentável, confiável, eficiente e socialmente aceitável.

Luiz V. S. Puppi, Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Paraná, especialista em sistemas elétricos de potência pela Universidade Federal de Itajubá. Atua na área de proteção do sistema elétrico de transmissão da COPEL GeT.

Mário Roberto Bastos, nasceu em Franca – SP, graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI-1985), possui MBA em Tecnologia da Informação (2002) e Mestrado em Engenharia Elétrica (2006), ambos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente trabalha no Departamento de Estratégia e Inovação da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (ISA CTEEP) e possui 31 anos de experiência na área de supervisão e controle. É Membro IEEE/PES e CIGRE.

Newton José de Salles é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade São Francisco (1998), mestre em Engenharia Elétrica pela UNICAMP (2007) e doutor em Engenharia Elétrica pela UNICAMP (2013). É Engenheiro Especialista na CPFL Paulista, uma empresa do Grupo CPFL Energia. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em especificações, normas e proteção de Sistemas Elétricos de Potência.

Sônia Ribeiro Campos nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, em 1964. Bacharel em Eng. Elétrica pela PUC de Minas Gerais em dezembro de 1987. Defendeu sua tese de Mestrado Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 2008. Realizou também vários cursos de extensão. Trabalha na Cemig com Engenheira de Planejamento da Operação do Sistema Elétrico de Potência desde 1987.