



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

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO GPC

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

SOLUÇÕES MODERNAS PARA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE CORRENTE DE LINHA

Hank Miller e John Burger
American Electric Power

Normann Fischer e Bogdan Kasztenny
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

RESUMO

A proteção diferencial de corrente de linha apresenta desafios para o projeto e aplicação de relés. Sob a perspectiva do projeto, a natureza distribuída do sistema diferencial de corrente de linha impõe limites na quantidade de dados que podem ser trocados entre os terminais do sistema e requer esquemas com alinhamento dos dados para habilitar o princípio da proteção diferencial.

Sob a perspectiva da aplicação, os esquemas diferenciais de corrente de linha levam em conta cuidadosamente: a saturação dos TCs, particularmente nas aplicações com disjuntor dual; reatores dentro da zona ("in-zone") e corrente de carregamento da linha; transformadores em derivação e na linha ("in-line"); sensibilidade a faltas com alta resistência; desligamento monopolar; segurança contra atenuação do canal; aplicação em linhas com mais de três terminais; e assim por diante.

Este artigo analisa soluções técnicas para o projeto e aplicação da proteção diferencial de corrente de linha, abordando as restrições comuns de projeto e necessidades de aplicação da concessionária de energia elétrica. O artigo é um tutorial sobre este assunto desafiador, associando os princípios e aplicações da proteção com os sistemas de comunicação e processamento de sinais.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção, Diferencial, Plano Alfa, Teleproteção

1.0 - INTRODUÇÃO

Baseando-se numa proteção unitária com uma zona delimitada pela localização dos transformadores de corrente (TCs), o princípio da proteção diferencial é considerado superior em relação à seletividade, sensibilidade e velocidade de operação quando comparado aos esquemas de distância com zonas temporizadas, comparação de fases e comparação direcional.

A função diferencial responde à soma de todas as correntes da respectiva zona de proteção. Idealmente, esta soma é igual a zero em todos os eventos, exceto para faltas internas. Na prática, os erros de medição e elementos *shunt* internos à zona podem criar um sinal diferencial espúrio, requerendo medidas defensivas adequadas. Essas medidas defensivas se tornaram mais sofisticadas com os avanços na área da proteção diferencial, progredindo a partir da adição de uma temporização intencional, restrição porcentual e bloqueio e restrição por harmônicos para algoritmos avançados de detecção de faltas externas e técnicas sofisticadas de restrição adaptativas.

Na aplicação para proteção de linhas, o princípio diferencial enfrentou as limitações do comprimento da linha. Os esquemas analógicos através de fio piloto podem somente ser aplicados a linhas bem curtas em função da atenuação do sinal devida à resistência série e à capacitância *shunt* do piloto. Essas aplicações ainda são vantajosas, pois as linhas muito curtas não podem ser adequadamente protegidas por relés de distância.

O desenvolvimento dos esquemas diferenciais de corrente de linha baseados nos microprocessadores utilizando canais de comunicação digitais redefiniram o campo da proteção de linhas.

Quando os canais de comunicação digitais adequados de longo alcance se tornaram disponíveis em função da implementação das conexões diretas via fibra óptica e micro-ondas digital, bem como dos sistemas de rede de fibra óptica síncrona (“synchronous optical network” – SONET) ou hierarquia digital síncrona (“synchronous digital hierarchy” – SDH), as aplicações dos esquemas diferenciais de corrente de linha continuaram expandindo.

Os principais benefícios da proteção diferencial aplicada nas linhas de transmissão incluem: o desempenho adequado nas linhas com múltiplos terminais e compensação série, além das linhas de qualquer comprimento, quando comparados aos esquemas de distância ou comparação direcional; imunidade considerável às variações nas condições do sistema, evolução do sistema a longo prazo, ou fontes de corrente de curto-circuito não tradicionais, tais como geradores eólicos, fontes fotovoltaicas ou fontes baseadas na eletrônica de potência de forma geral; boa sensibilidade; e simplicidade de aplicação, pelo menos sob a perspectiva da proteção.

Sob o ponto de vista do projeto do relé, este artigo aborda os requisitos mencionados e descreve um esquema diferencial de corrente de linha otimizado que opera com canais de largura de banda limitada, ao mesmo tempo em que fornece alto desempenho em termos de velocidade de operação, sensibilidade e segurança durante saturação dos TCs e atenuação do canal.

2.0 - REQUISITOS PARA A PRÓXIMA GERAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE CORRENTE DE LINHA

Os esquemas diferenciais de corrente de linha baseados nos microprocessadores passaram a ser amplamente aplicados há apenas uma década. Muitas lições foram aprendidas a partir desses esquemas da primeira geração. Se olharmos em direção à próxima geração de esquemas diferenciais de corrente de linha, os seguintes requisitos são identificados sob a perspectiva da concessionária.

2.1 Alto Desempenho

Os avanços na proteção diferencial de barras e transformadores permitiram o desenvolvimento de produtos de alto desempenho. Isso se refere à velocidade de operação, sensibilidade e imunidade à saturação de TCs. Essas melhorias foram possíveis em função da disponibilidade dos microprocessadores de alto desempenho, amostragem de alta velocidade, barramentos avançados de dados internos e novos algoritmos. Tempos de trip da ordem de subciclos se tornaram comuns, ao mesmo tempo em que os requisitos para os TCs foram reduzidos substancialmente por meio da implementação de detectores de faltas externas e técnicas avançadas de restrição.

Espera-se um desempenho igualmente elevado na próxima geração de relés diferenciais de corrente de linha.

2.2 Segurança da Proteção

Mesmo que sua aplicação esteja sendo constantemente ampliada, os esquemas diferenciais de corrente de linha tendem a ser usados em tensão elevada, linhas críticas e linhas cujo comprimento é relativamente mais curto. Seja protegendo linhas transmitindo gigawatts de potência no sistema de expansão de 765 kV ou protegendo linhas de transmissão que interligam a geração distribuída, os esquemas diferenciais de corrente de linha têm que ser excepcionalmente seguros.

Pelo menos três fatores afetam a segurança de um esquema diferencial de corrente de linha:

- A robustez do hardware e firmware do relé.
- A robustez das lógicas e algoritmos aplicados.
- A capacidade de lidar com as atenuações do canal e circuitos longos de fibra óptica.

As duas primeiras categorias se aplicam a qualquer relé baseado em microprocessadores. Os fabricantes têm evoluído significativamente, adquirindo mais conhecimentos sobre os projetos e desempenho de relés e algoritmos.

A última categoria é específica para os relés diferenciais de corrente de linha em relação à interação do relé com o sistema de comunicação—um sistema relativamente complexo que está fora do controle dos projetistas do relé e apenas parcialmente sob o controle dos engenheiros de proteção na empresa dos usuários. As lições aprendidas a esse respeito devem ser incorporadas aos esquemas da próxima geração, incluindo a assimetria do canal não esperada, chaveamento do canal, recursos para detecção de erros, *loopback* acidental, conexão cruzada acidental de relés, e assim por diante.

Além disso, um relé moderno deve fornecer recursos para registro ou coleta de evidências para ajudar na análise pós-eventos de áreas relacionadas às atenuações da comunicação.

2.3 Requisitos do Canal

Ambas as conexões multiplexadas e de fibra óptica direta ponto-a-ponto devem ser suportadas.

A fibra óptica ponto-a-ponto direta pode ser disponibilizada para aplicações críticas. Quanto a isso, os usuários esperam que os relés suportem distâncias maiores. Isso permite a eliminação dos amplificadores ao longo do caminho da fibra óptica e da infra-estrutura relacionada (ex., suportes, fonte de alimentação redundante, perímetro de segurança física, estradas de acesso, requisitos de segurança cibernética).

A conectividade multiplexada é requerida para a maioria das aplicações regulares quando as conexões diretas de fibra óptica não podem ter reservas e, ao invés disso, somente 64 kbps ou um múltiplo desse valor são disponibilizados para a proteção diferencial de corrente de linhas.

Um relé moderno deve fornecer opções para canais redundantes, pelo menos nas aplicações de dois terminais. Em particular, um canal pode ser uma conexão de fibra óptica direta, e o canal *standby* pode ser uma conexão multiplexada.

2.4 Compensação da Corrente de Carregamento

A compensação da corrente de carregamento da linha é um recurso esperado de um relé diferencial de corrente de linha moderno.

Nos sistemas que operam com significativo desbalanço, a compensação da corrente de carregamento pode ser altamente benéfica, mesmo se usar elementos diferenciais de sequência, tal como o elemento diferencial de sequência-negativa (87LQ).

Em algumas instalações de 765 kV, a corrente de carregamento de sequência-positiva está na faixa de algumas centenas até mais de 1.000 A, e pode ser maior do que a carga ou nível da falta.

2.5 Redefinição do Papel das Funções de Retaguarda

Tradicionalmente, um relé diferencial de corrente de linha fornece retaguarda para a proteção de distância básica para cobrir casos de indisponibilidade da função diferencial devido a problemas com os canais de comunicação. Tipicamente, essas funções de distância são baseadas num projeto comum e menor velocidade, podendo enfrentar alguns problemas de desempenho.

Atualmente, uma nova tendência requer um “relé de linha” ao invés de um relé diferencial de corrente de linha, um relé de distância com múltiplos recursos, um relé de distância de retaguarda ou um simples relé de sobrecorrente de retaguarda.

Neste conceito, um relé de linha com múltiplos propósitos é fornecido com as mesmas dimensões físicas, fiação e ordem de compra, independentemente da função atendida. Isso permite o projeto de um painel genérico e amplia a padronização dos painéis, fiação e integração da subestação, levando a um custo reduzido e ciclos de produção e projetos mais curtos.

As funções de tal relé ainda são diferenciadas de forma a permitir o controle do valor e custo para o usuário.

Em um dos aspectos deste conceito, existe pouca ou nenhuma diferenciação entre um relé de distância com múltiplos recursos e um relé diferencial de corrente de linha. A aplicação pode ser decidida mais tarde no projeto, ou ela pode mudar em algum ponto a tempo, mas o relé montado no painel tem capacidade para fornecer ambas as funções, embora não necessariamente ao mesmo tempo. Algumas funções podem somente ser operacionais quando as comunicações não estiverem em serviço.

2.6 Aplicações Multiterminais

Um relé moderno deve fornecer proteção para linhas com mais de três terminais. Esta necessidade é requerida pelas cargas em derivação ou geração distribuída conectada às linhas de transmissão.

2.7 Funções Auxiliares

Um relé moderno deve suportar funções inovadoras e emergentes de diversas áreas. Isso inclui, mas não se limita, a conectividade avançada Ethernet, sincrofasores, IEC 61850, sinalização digital ponto-a-ponto segura, funções matemáticas programáveis pelo usuário, interfaces customizadas pelo usuário e transferência de trip.

2.8 Abertura e Religamento Monopolares

Espera-se que sob condições de congestionamento no sistema de transmissão, maior penetração da geração distribuída e expansão global do sistema de potência da América do Norte, mais e mais linhas de transmissão sejam protegidas usando a filosofia de abertura e religamento monopolares.

Um relé diferencial de corrente de linha moderno deve ter capacidade de efetuar abertura e religamento monopolar. Isso se aplica à abertura através do diferencial, bem como das funções de retaguarda.

3.0 - SISTEMA DIFERENCIAL DE CORRENTE DE LINHA TÍPICO

Com referência à Fig. 1, a característica mais importante de um sistema de proteção diferencial de corrente de linha é o fato de este sistema consistir de múltiplos relés operando de forma independente e interligados por um canal de comunicação digital.

Os múltiplos relés do sistema dependem uns dos outros para atender aos respectivos propósitos de fornecer proteção diferencial de corrente de linha, porém estão localizados em subestações diferentes e operam de forma autônoma em termos de amostragem, rastreamento da frequência, transmissão e recepção de dados, filtragem e cálculos da proteção.

Cada relé amostra as respectivas correntes analógicas de entrada através de um conversor analógico-digital (A/D) para obter uma representação digital (i_D) das entradas analógicas (i_A). A taxa de amostragem pode variar desde alguns quilohertz até menos de 20 amostras por ciclo, dependendo do projeto. Tipicamente, os mesmos dados digitais alimentam o subsistema diferencial de corrente de linha do relé, bem como todas as outras funções locais—medição, registros de faltas e proteção (retaguarda de distância, falha de disjuntor, sobrecorrente, e assim por diante). Portanto, a amostragem tipicamente possui resolução e taxa elevadas, embora a função diferencial de corrente de linha possa utilizar esses dados com taxas de amostragem menores.

A sincronização dos dados (alinhamento) é um dos elementos essenciais de um sistema diferencial de corrente de linha. Normalmente, um método de sincronização baseado no canal conhecido como algoritmo “ping-pong” é usado para estimar o desvio (“offset”) do horário do relógio entre dois relés operando através de um canal de comunicação. Este método bem conhecido de cronometragem dos sistemas de comunicação mede o tempo do percurso de ida e volta atribuindo estampas de tempo para a transmissão e recepção dos eventos de comunicação e trocando algumas das estampas de tempo. Assumindo que o canal é simétrico (significa que ele tem a mesma latência em ambas as direções), o tempo total do canal pode ser recalculado no desvio do relógio entre os dois relés. Conhecendo este *offset*, o sistema tem capacidade para efetuar o alinhamento dos dados.

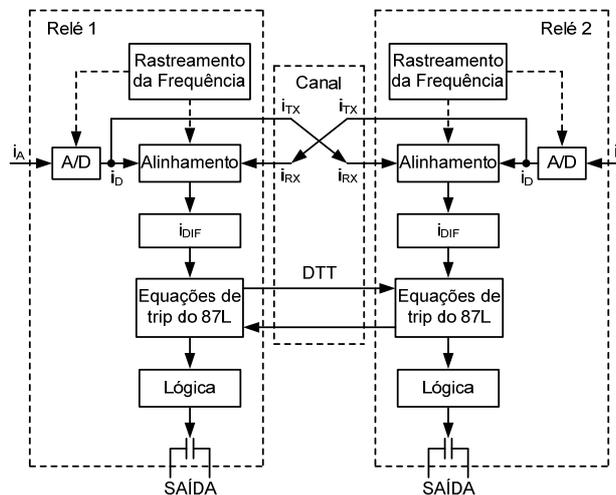


Fig. 1. Arquitetura simplificada de um sistema diferencial de corrente de linha típico.

Um método de alinhamento consiste em usar o desvio (“offset”) do relógio medido para controlar o tempo de amostragem local em ambas as extremidades com o objetivo de anular o *offset*, o que significa forçar a sincronização dos dois relógios. Este método funciona satisfatoriamente nas aplicações de dois terminais, mas se torna complexo nas aplicações com múltiplos terminais.

Outro método consiste em atribuir estampas de tempo aos dados transmitidos usando o tempo local e, conhecendo a diferença dos relógios entre os dois relés, reamostrar os dados para alinhá-los com os mesmos instantes de tempo. Este método funciona naturalmente para qualquer número de terminais uma vez que permite que cada relé opere de forma independente sem forçar um grupo maior de relés para um sincronismo relativo.

O método de sincronização baseado no canal opera de forma adequada se o canal for simétrico. Se os atrasos na transmissão e recepção forem diferentes, o alinhamento se torna menos preciso, levando a um desvio fantasma entre as medições de corrente local e remota. Diversos algoritmos de proteção têm imunidades diferentes a tais desvios se eles forem pequenos, porém com uma assimetria maior, ambas a confiabilidade e a segurança são impactadas até o ponto de perda completa da função.

Em tais casos, os relés diferenciais de corrente de linha usam a sincronização, se necessário, baseando-se numa referência de tempo externa para complementar ou substituir a sincronização baseada no canal. Até agora, o Sistema de Posicionamento Global (“Global Positioning System” – GPS) tem sido a única forma prática que permite a regulação baseada numa referência de tempo comum em áreas amplas. A dependência de um sistema de satélite e dispositivos adicionais não é uma solução de proteção ideal. Portanto, as aplicações com canais simétricos têm sido consideradas superiores, enquanto a necessidade de ajuda do GPS tem sido considerada a solução de menor preferência.

Entretanto, sistemas terrestres estão emergindo para fornecer uma referência de tempo comum [1]. Esses sistemas são sincronizados com o GPS—para o benefício de usar tempos reais sob condições normais—via múltiplos receptores localizados em múltiplas localizações geográficas, mas continuam a fornecer fontes de tempo comuns independentemente de todas as entradas do GPS serem perdidas. Esses sistemas são parte da infra-estrutura de comunicação que é usada primeiramente para a comunicação do diferencial de corrente de linha. Portanto, eles consistem num meio seguro de fornecer uma referência de tempo externa sem introduzir mais dispositivos, interdependências desnecessárias, ou redução da confiabilidade ou disponibilidade.

4.0 - PLANO ALFA GENERALIZADO PARA APLICAÇÕES MULTITERMINAIS

4.1 Introdução

O princípio da proteção diferencial de corrente no Plano Alfa compara os ângulos e magnitudes individuais das correntes da zona. O princípio é fácil de ser compreendido para o caso de uma linha de dois terminais. Sob condições equilibradas, as duas correntes da zona (I_L e I_R) são iguais em magnitude e opostas em fase. Isso produz um ponto de operação no Plano Alfa de $k = 1 \angle 180^\circ$. Para faltas internas, a relação da corrente complexa, k , afasta-

se deste ponto de bloqueio ideal, permitindo que o elemento do Plano Alfa opere. As regiões de operação e bloqueio têm os formatos mostrados na Fig. 3, tipicamente com dois parâmetros fáceis de serem ajustados.

Tipicamente, são aplicados os elementos do Plano Alfa de fase (87LP) e o elemento de sequência-negativa (87LQ) ou de terra (87LG).

Devido a suas inúmeras vantagens, o princípio tem sido implementado com sucesso e comprovado por inúmeros registros de campo [5]. As vantagens mais importantes são: tolerância significativa à saturação do TC e erros de sincronização, excelente sensibilidade e velocidade dos elementos 87LQ e 87LG, tolerância significativa dos elementos 87LQ e 87LG à corrente de carregamento da linha, e bom desempenho nas linhas com compensação série.

Embora seja intuitivo e direto nas aplicações de dois terminais, o Plano Alfa é menos intuitivo no caso geral de N terminais. Padrões complexos do fluxo de corrente podem ser encontrados, tal como uma corrente circulante—uma corrente saindo da zona em um terminal para reentrar no outro. Esses padrões têm que ser analisados cuidadosamente para evitar uma falha do trip ao responder a uma das correntes fluindo para fora da zona para alimentar uma carga ou fluindo para o outro terminal da linha. Diversas permutações possíveis das relações entre várias correntes possíveis complicam o entendimento, implementação, testes e análise pós-eventos.

Este artigo introduz um conceito do Plano Alfa generalizado para N terminais. Este método calcula um equivalente de dois terminais para um caso geral de N terminais e aplica o princípio testado e comprovado do Plano Alfa para as duas correntes equivalentes.

4.2 Mapeamento das Correntes de N Terminais Dentro das Correntes de Dois Terminais

O Plano Alfa geral para N terminais opera com duas correntes equivalentes ($I_{L\ EQ}$ e $I_{R\ EQ}$) calculadas a partir das N correntes de uma zona arbitrária de N terminais, usando os termos de restrição e diferencial como uma ferramenta de transformação.

Considere uma zona de proteção do diferencial para o caso geral de N terminais, conforme mostrado na Fig. 2a. O princípio diferencial clássico deriva as seguintes correntes de restrição e diferencial para esta zona (todas as correntes são fasores nas equações seguintes, e $| |$ representa a magnitude do fasor):

$$I_{DIF(N)} = \sum_{n=1}^N I_n \quad (1a)$$

$$I_{RST(N)} = \sum_{n=1}^N |I_n| \quad (1b)$$

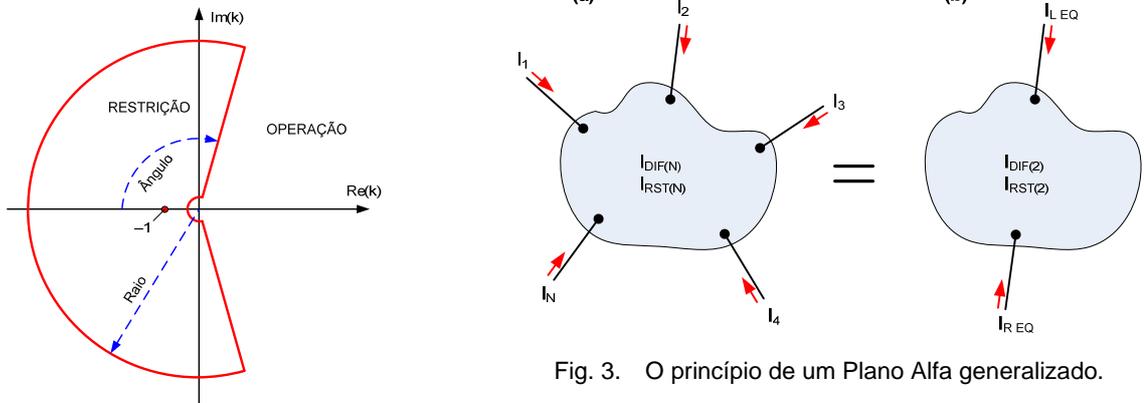


Fig. 3. O princípio de um Plano Alfa generalizado.

Fig. 3. Característica Típica do Plano Alfa.

Considere agora o caso de dois terminais da Fig. 3.b—a aplicação natural para o Plano Alfa.

As duas correntes virtuais no equivalente de dois terminais são obtidas de forma que a mesma corrente diferencial e mesma corrente de restrição sejam medidas no equivalente de dois terminais como na aplicação real de N terminais.

$$I_{DIF(2)} = I_{DIF(N)} \quad (2a)$$

$$I_{RST(2)} = I_{RST(N)} \quad (2b)$$

As duas correntes do equivalente de dois terminais têm um total de quatro graus de independência (duas magnitudes e dois ângulos), embora exista um total de três equações de fronteira: as partes real e imaginária da corrente diferencial (2a) e a magnitude da corrente de restrição (2b).

Neste método de representação das N correntes de uma zona do diferencial através de duas correntes equivalentes para o Plano Alfa, a quarta equação de equilíbrio requer que uma das duas correntes equivalentes obtidas esteja ao longo da linha de uma corrente específica da zona de N terminais. Esta corrente da zona específica (I_P) é selecionada como aquela que tem a maior projeção no fasor da corrente diferencial.

A base lógica para esta escolha consiste no fato de que durante faltas externas com saturação do TC, o sinal diferencial espúrio, se significativo, estará localizado aproximadamente ao longo da linha da corrente de falta. Portanto, ao selecionar a corrente de referência I_p que está mais próxima em fase da corrente diferencial, posicionamos as duas correntes equivalentes do Plano Alfa ao longo das linhas da corrente fluindo para dentro e fora da zona.

Para selecionar a corrente de referência I_p , os números auxiliares seguintes são calculados primeiro:

$$R_n = \left| \text{real} \left(I_n \cdot I_{\text{DIF}(N)}^* \right) \right| \quad (3)$$

onde $n = 1..N$.

A corrente com o maior valor de R se torna a corrente de referência I_p .

Vamos designar o ângulo desta corrente como β :

$$\beta = \text{angle} \left(I_p \right) \quad (4)$$

A corrente diferencial é defasada para a conveniência dos cálculos subsequentes, conforme indicado a seguir:

$$I_X = I_{\text{DIF}(N)} \cdot 1 \angle (-\beta) \quad (5)$$

E as duas correntes do equivalente de dois terminais são agora calculadas da seguinte forma:

$$I_{L\text{EQ}} = \left(\frac{\text{Im}(I_X)^2 - \left(I_{\text{RST}(N)} - \text{Re}(I_X) \right)^2}{2 \cdot \left(I_{\text{RST}(N)} - \text{Re}(I_X) \right)} + j \cdot \text{Im}(I_X) \right) \cdot 1 \angle \beta \quad (6a)$$

$$I_{R\text{EQ}} = \left(I_{\text{RST}(N)} - |I_{L\text{EQ}}| \right) \cdot 1 \angle \beta \quad (6b)$$

O princípio de proteção do Plano Alfa tradicional passa a ser considerado a partir deste ponto, trabalhando com as correntes $I_{L\text{EQ}}$ e $I_{R\text{EQ}}$.

O princípio diferencial clássico tem sido usado neste método como uma ferramenta de mapeamento matemático para projetar o caso geral de uma zona diferencial com N terminais dentro de uma zona com dois terminais equivalente, requerendo que as correntes de restrição e diferencial sejam idênticas entre a aplicação de N terminais e seu equivalente de dois terminais.

O princípio é aplicado para os elementos diferenciais de terra, fase e sequência-negativa através das correntes filtradas de restrição e diferencial.

5.0 - COMPENSAÇÃO DA CORRENTE DE CARREGAMENTO DA LINHA

5.1 Impacto da Corrente de Carregamento da Linha e Benefícios da Compensação

As linhas aéreas de alta tensão drenam aproximadamente 1 A por cada quilômetro de comprimento (cerca de 1,6 A por milha). Para cabos de alta tensão e linha aéreas de extra-alta tensão, a corrente de carregamento total pode chegar a centenas de amperes primários. Em alguns casos, a corrente de carregamento pode ser comparável à corrente de falta.

A corrente de carregamento da linha não passa pela medição do diferencial e afeta tanto a segurança quanto a confiabilidade da proteção diferencial. O elemento diferencial de fase (87LP) é impactado mais do que os elementos de sequência (87LQ e 87LG).

Considere a energização da linha, faltas externas e faltas internas no contexto da corrente de carregamento da linha.

5.2 Princípio da Compensação da Corrente de Carregamento da Linha

O objetivo da compensação do carregamento da linha consiste em remover a corrente de carregamento da corrente diferencial. Idealmente, o método aplicado deve funcionar sob condições equilibradas e não equilibradas, linhas transpostas e não transpostas, energização, faltas externas, faltas internas e outros eventos.

Com referência à Fig. 4, uma linha multiterminal drena uma corrente de carregamento através de suas capacitâncias distribuídas. A distribuição exata desta corrente depende dos parâmetros do sistema e da linha, bem como do perfil de tensão ao longo da linha e seus segmentos. Tensões maiores drenam correntes de carregamento maiores. Linhas com uma extremidade aberta desenvolvem uma sobretensão na extremidade aberta embora não drenem nenhuma corrente desta extremidade. Durante condições de falta (interna ou externa), as tensões variam e se tornam desbalanceadas, causando variações na corrente de carregamento, com a carga saindo e entrando da linha.

Sob o ponto de vista da proteção diferencial, contudo, a corrente de carregamento total é de interesse primário. As contribuições para a corrente diferencial provenientes dos terminais individuais da linha são secundárias. Neste caso, a corrente de carregamento da linha total pode ser bem aproximada como a corrente drenada pela

capacitância total da linha sob a tensão média da linha. A primeira é conhecida e passa a ser um ajuste do usuário. A última pode ser calculada a partir das tensões medidas nos terminais da linha. Com referência à Fig. 5, a capacitância da linha pode ser representada por um modelo de parâmetros concentrados em cada terminal da linha que permite que o relé diferencial de corrente de linha efetue a medição da tensão.

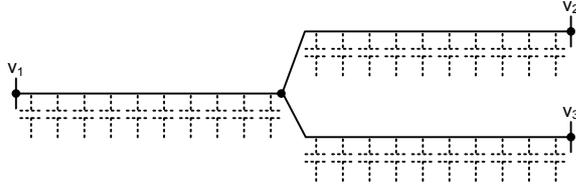


Fig. 4. Linha de três terminais com capacitâncias distribuídas.

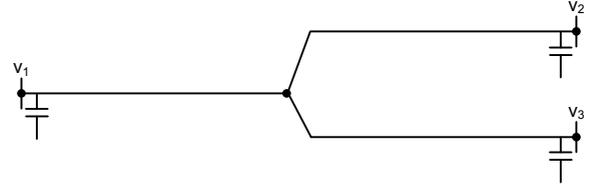


Fig. 5. Linha de três terminais com parâmetros concentrados

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_{AVERAGE} \quad (7a)$$

A tensão média da linha pode ser aproximada através da tensão média do terminal, e portanto:

$$i_{C_TOTAL} = C_{TOTAL} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{dt} (v_1 + v_2 + v_3) \quad (7b)$$

Rearranjando:

$$\begin{aligned} i_{C_TOTAL} &= \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_1 + \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_2 + \dots \\ &\dots + \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_3 \end{aligned} \quad (7c)$$

Em outras palavras, a corrente de carregamento total é a soma dos três componentes:

$$i_{C_TOTAL} = i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} \quad (8a)$$

cada derivada a partir de uma tensão do terminal da linha:

$$i_{C1} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_1 \quad (8b)$$

$$i_{C2} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_2 \quad (8c)$$

$$i_{C3} = \frac{1}{3} \cdot C_{TOTAL} \cdot \frac{d}{dt} v_3 \quad (8d)$$

Isso explica que cada terminal pode calcular uma parcela da corrente de carregamento total baseando-se na tensão local e uma parte da capacitância total da linha proporcional ao número de terminais de linha que executam a compensação em qualquer tempo determinado.

Essas frações da corrente de carregamento, quando incorporadas pela corrente diferencial final, vão anular a corrente de carregamento real.

Este princípio é essencial—o sistema diferencial de corrente de linha calcula efetivamente a corrente de carregamento baseando-se na tensão média de todos os terminais de linha, sem transmitir quaisquer tensões entre os relés. Ao invés disso, cada terminal subtrai sua parcela da corrente de carregamento da corrente medida e transmite este valor para os respectivos “pares” (“peers”) (TX é transmitida para os “peers”; RX é recebida dos “peers”):

$$i_{TX} = i_{MEASURED} - i_C \quad (9a)$$

e calcula a corrente diferencial da linha como:

$$i_{DIF} = i_{TX} + \sum i_{RX} \quad (9b)$$

Usando a Fig. 5 como um exemplo, a corrente diferencial é calculada como indicado a seguir:

$$\begin{aligned} i_{DIF} &= (i_{MEASURED1} - i_{C1}) + (i_{MEASURED2} - i_{C2}) + \\ &(i_{MEASURED3} - i_{C3}) \end{aligned} \quad (10a)$$

ou

$$i_{DIF} = i_{MEASURED1} + i_{MEASURED2} + i_{MEASURED3} - (i_{C1} + i_{C2} + i_{C3}) \quad (10b)$$

ou

$$i_{DIF} = i_{MEASURED1} + i_{MEASURED2} + i_{MEASURED3} - i_{C_TOTAL} \quad (10c)$$

A parcela da corrente de carregamento estimada em um determinado terminal pode não ser igual à corrente de carregamento real fornecida por este terminal. A extremidade da linha aberta consiste no caso ideal—a corrente real fornecida pelo terminal aberto é zero, embora este terminal estime sua parcela da corrente de carregamento total baseando-se na tensão da extremidade aberta, considerando que haja TPs instalados no lado da linha. Ao mesmo tempo, o terminal fechado despreza sua parcela. Quando acrescentada nos cálculos do diferencial, todas as estimativas da corrente de carregamento vão, entretanto, ser compatíveis com a corrente de carregamento real total da linha.

De forma geral, para uma linha com N terminais efetuar a compensação da corrente de carregamento, cada terminal usa 1/N da capacitância total da linha e sua própria tensão para estimar sua parcela da corrente de carregamento.

5.3 Tratamento dos Reatores da Linha

Linhas longas que se beneficiam do recurso de compensação da corrente de carregamento do relé frequentemente possuem reatores *shunt* instalados dentro da zona de proteção limitada pela localização dos TCs para conexão do esquema do diferencial de corrente de linha. A corrente capacitiva da linha e a corrente indutiva dos reatores não se anulam durante o transitório de forma tão rápida quanto é necessário para a proteção. A natureza transitória (resposta à frequência) é diferente entre um indutor e um capacitor, suas relações da reatância de sequência-positiva pela sequência-zero podem ser diferentes, e a saturação do reator torna a indutância não linear. Além disso, os reatores são chaveados (“on” e “off”) como parte do controle de tensão/potência reativa do sistema de potência e podem ser operados de forma desbalanceada (uma ou duas fases).

Com o objetivo de manter as aplicações de proteção simples, a corrente do reator é tipicamente retirada da zona de medição por meio do paralelismo de seus TCs com os TCs da linha. Em qualquer tempo determinado, a linha pode ou não ser compensada, porém os relés sempre medem a corrente de carregamento total e efetuam a compensação da mesma.

Com referência à Fig. 6, quando for aplicada a compensação da corrente de carregamento da linha, a zona do diferencial de linha exclui ambos os reatores e a própria corrente de carregamento.

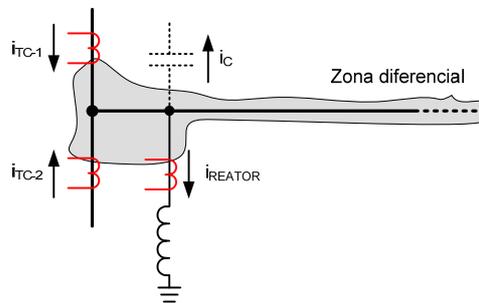


Fig. 6. Os reatores da linha e a capacitância da linha são removidos da zona da proteção diferencial.

6.0 - TRANSFORMADORES NA LINHA (“IN-LINE”)

6.1 Introdução

Em algumas aplicações, uma linha e um transformador são instalados sem um disjuntor no meio para separar os dois equipamentos (ver Fig. 7). Isso é frequentemente efetuado por razões econômicas, particularmente nos casos em que a linha não é uma derivação ou multiterminal, e o transformador não alimenta quaisquer outras cargas. Portanto, a instalação de um disjuntor separado não acrescenta qualquer flexibilidade operacional. A falta de um disjuntor de separação coloca ambos a linha e o transformador na mesma zona de trip, independentemente de qual elemento realmente requer isolamento do resto do sistema.

Ainda é vantajoso aplicar duas zonas de medição neste caso, conforme mostrado na Fig. 7a, mesmo que ambas dêem trip tanto na linha quanto no transformador. Usando relés projetados para um determinado tipo de dispositivo, maximizamos o desempenho global do sistema de proteção, em particular a sensibilidade para faltas no transformador.

Há uma tendência, contudo, para combinar as duas zonas de medição em um relé diferencial de corrente de linha com o transformador *in-line*, conforme mostrado na Fig. 7b. Este método simplifica a aplicação, pois requer menos relés, menos fiação e menos trabalho.

7.0 - CONCLUSÕES

Este artigo resume as tendências gerais para o projeto da nova geração de esquemas de proteção diferencial de corrente de linha.

Em relação à sincronização e alinhamento dos dados, a solução apresentada é unificada para os métodos de sincronização baseada numa referência de tempo externa e baseada no canal. Ao não forçar a sincronização da amostragem dos relógios, a solução apresentada funciona naturalmente e é mais robusta nas aplicações multiterminais.

Uma fonte de tempo terrestre, independente do GPS, foi introduzida, tornando as aplicações do diferencial de corrente de linha com canais assimétricos mais seguras e mais confiáveis.

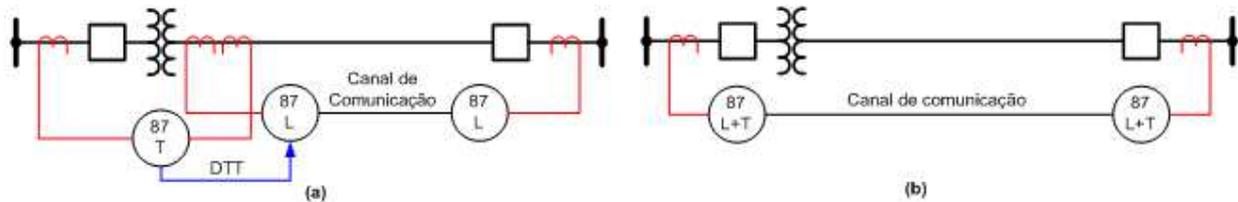


Fig. 7. Proteção de linha e transformador—zonas de medição individuais (a) e combinadas (b).

Diversas estratégias de retaguarda foram apresentadas para permitir que o sistema suporte a perda temporária da fonte de sincronização dos tempos.

Uma técnica de restrição no Plano Alfa confiável foi proposta para as aplicações multiterminais com qualquer número de entradas de corrente local para os relés. O tamanho e a estrutura da carga útil ("payload") das comunicações são independentes do número de terminais ou número de correntes locais do sistema, tornando a implementação simples e a solução mais robusta.

O sistema trabalha com informações de corrente de alta fidelidade, possibilitando uma lógica rápida para detecção de faltas externas, assim como medições de harmônicos para as aplicações dos transformadores *in-line*.

A combinação da lógica de detecção de faltas externas de alto desempenho com capacidade para detectar faltas externas baseada em até 3 milissegundos de formas de onda de corrente não saturadas e técnicas de restrição adequadas torna o relé tanto seguro quanto rápido. Como no caso dos relés modernos de transformadores ou barras, a aplicação da detecção de faltas externas reduz consideravelmente os requisitos dos TCs e simplifica a aplicação ao eliminar uma análise complexa da adequabilidade dos ajustes e TCs aplicados.

A solução apresentada aplica as equações de trip do diferencial no Plano Alfa, incluindo todas as vantagens testadas e comprovadas deste método, porém melhora o conceito original para as aplicações multiterminais e permite a restrição por harmônicos do Plano Alfa para facilitar a proteção dos transformadores *in-line*.

A compensação da corrente de carregamento da linha foi incorporada, melhorando a segurança durante a energização da linha, bem como a sensibilidade para faltas internas. Um novo conceito de seleção dinâmica das fontes de tensão para a compensação foi introduzido, minimizando a dependência do esquema dos TPs.

Pacotes de comunicação e tratamento dos dados internamente aos relés foram projetados para latências baixas. Combinado com o desempenho de alta velocidade das equações de proteção aplicadas, isso habilita tempos de trip da ordem de subciclos nas aplicações com canais de comunicação rápidos.

8.0 - REFERÊNCIAS

- [1] K. Fodero, C. Huntley, and D. Whitehead, "Wide-Area Time Synchronization for Protection," proceedings of the 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2009.
- [2] J. Roberts, D. Tziouvaras, G. Benmouyal, and H. Altuve, "The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security," proceedings of the 55th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, May 2001.
- [3] A. Guzmán, C. Labuschagne, and B.-L. Qin, "Reliable Busbar and Breaker Failure Protection With Advanced Zone Selection," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2004.
- [4] A. Guzmán, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Improvements in Transformer Protection and Control," proceedings of the 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2009.
- [5] G. Benmouyal, "The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
- [6] K. Behrendt, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays," proceedings of the 33rd Annual Western Protective