

Elementos de Distância Quadrilaterais de Fase e Terra Adaptativos

Fernando Calero, Armando Guzmán, e Gabriel Benmouyal
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

A edição revisada foi lançada em novembro de 2017

Publicado previamente no
SEL *Journal of Reliable Power*, Volume 1, Number 1, julho de 2010

A edição revisada anterior foi lançada em dezembro de 2009

Originalmente apresentado na
36th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 2009

Traduzido para o português em julho de 2016

Elementos de Distância Quadrilaterais de Fase e Terra Adaptativos

Fernando Calero, Armando Guzmán, e Gabriel Benmouyal, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Resumo—Os elementos de distância quadrilaterais podem fornecer uma cobertura significativamente maior para resistência de falta do que os elementos de distância mho nas aplicações de linhas curtas. As características dos elementos de distância quadrilaterais de fase e terra resultam da combinação de diversos elementos de distância. Os elementos direcionais discriminam entre faltas na direção à frente e reversa, enquanto os elementos de reatância e resistência são fundamentais para o correto desempenho da característica quadrilateral. As considerações do fluxo de carga determinam a escolha da grandeza de polarização para esses elementos. Os elementos de reatância têm que acomodar o fluxo de carga e se adaptar ao mesmo. *Blinders* resistivos devem detectar a maior resistência de falta possível sem provocar subalcançe ou sobrealcançe excessivo do elemento de distância quadrilateral. Neste artigo, discutiremos um esquema de distância quadrilateral adaptativo que pode detectar resistência de falta maior do que na implementação anterior. Além disso, o artigo discute as considerações da aplicação dos elementos de distância quadrilaterais.

I. VISÃO GERAL

Enquanto a literatura debate as diferenças e benefícios dos elementos de distância de terra quadrilateral e mho [1], este artigo descreve a teoria, aplicação e características de uma implementação particular dos elementos de distância quadrilaterais de fase e terra.

O fato de a característica quadrilateral ser benéfica na proteção de linhas de transmissão curtas é bem aceito [1][2]. É também aceito que esquemas de proteção piloto sensíveis não dependem apenas dos elementos de distância; esses esquemas também dependem do sobrecorrente direcional de terra (67G), uma unidade com capacidade de detecção de resistência de falta (R_f) maior do que elementos de distância de terra de qualquer formato [3].

Em geral, faltas com elevadas R_f têm sido associadas às faltas fase-terra (AG, BG, CG). Para essas faltas, a R_f associada é considerável. Por outro lado, faltas entre fases são menos susceptíveis a valores elevados de R_f . Portanto, como as linhas de transmissão curtas são muito mais afetadas por valores elevados de R_f , deve ser usado o elemento com maior capacidade de detecção de falta [1][2][3].

A. Resistência de Falta

Os curtos-circuitos ao longo da linha de transmissão têm um certo grau de impedância adicional. Se esta impedância adicional for desprezível, a impedância da linha é predominante, e a impedância aparente medida vai refletir esta condição, reportando uma impedância com o mesmo ângulo da impedância da linha. Por outro lado, se esta impedância

adicional não for desprezível, a impedância aparente medida não vai mais apresentar o ângulo da linha.

A Fig. 1 mostra os diferentes componentes da resistência de falta para faltas na linha de transmissão. Embora extremamente simplificada, a figura mostra os condutores de fase (somente a Fase A e a Fase B estão mostradas), a estrutura da torre, as cadeias de isoladores, o fio terra, e as diferentes impedâncias para o fluxo da corrente de falta. Essas impedâncias são simplificadas para serem valores apenas resistivos [4][5].

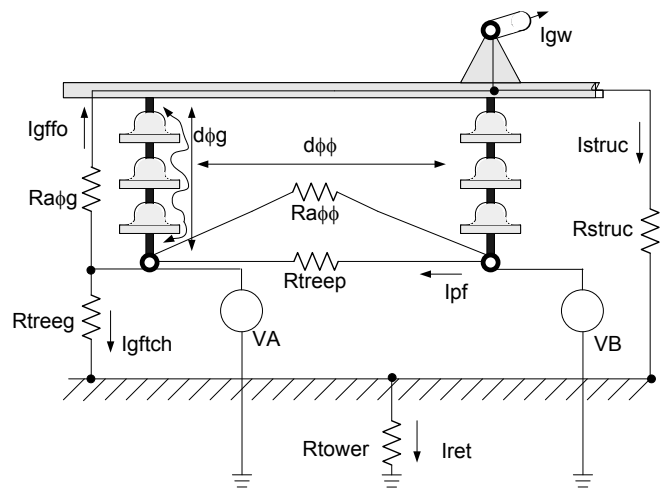


Fig. 1. Visualizando o componente R_f

A resistência R_{tower} é geralmente chamada de “resistência de pé de torre.” É um parâmetro crítico relativo ao projeto e construção das linhas de transmissão [6]. Para uma falta devida a um arco (“flashover”) no isolador, o caminho de retorno é através da própria torre. Quando um objeto estranho toca os condutores, a corrente é distribuída entre as torres adjacentes, porém retorna através da resistência de pé de torre. Idealmente, quanto menor for a resistência de pé de torre, melhor será o desempenho da detecção de faltas à terra na linha de transmissão. Contudo, ainda que existam valores menores, na prática os valores variam de 5 a 20 ohms; nos terrenos rochosos, a resistência pode ser igual ou maior do que 100 ohms [1].

Na Fig. 1, $R_{a\phi g}$ representa a resistência de arco para um flashover no isolador para uma falta fase-terra. Ela está no caminho da corrente de falta à terra, I_{gffo} , devida ao flashover. $R_{a\phi\phi}$ é a resistência de arco para uma falta fase-fase.

O valor da resistência de arco é dependente do comprimento do arco e da corrente que circula através do arco. Uma fórmula bem aceita é aquela derivada empiricamente por A. Van Warrington, expressa em (1). Outras equações fornecem

resultados similares [7]. Em (1), o comprimento do arco é expresso em metros.

$$R_{arc} = 28688.5 \frac{\text{length}}{I^{1.4}} \Omega \quad (1)$$

Inicialmente, o arco possui alguns ohms de impedância. Com o passar do tempo, ele pode evoluir, aumentando para 50 ou mais ohms [1]. É importante observar que seu valor depende do comprimento do arco e da corrente que circula através do arco. Na Fig. 1, o comprimento do arco é indicado por $d\phi g$ para faltas à terra e $d\phi\phi$ para faltas entre fases.

R_{struc} é a resistência da estrutura da torre. Embora insignificante para uma estrutura metálica, esta resistência pode ter um valor significativo se construída a partir de material não condutivo como madeira.

R_{tree} e R_{treep} são as resistências dos objetos estranhos que podem estar causando uma falta no sistema de potência. Uma árvore é escolhida como exemplo. Esses valores de resistência podem ser da ordem de algumas centenas de ohms.

1) Faltas Fase-Terra

Faltas fase-terra consistem no tipo de falta mais comum no sistema de potência. Elas envolvem uma única fase que conduz a corrente de falta para a terra. Existem dois cenários possíveis para faltas fase-terra: flashover no isolador e um objeto criando um caminho para a terra.

a) Flashover no Isolador

Um flashover no isolador (resistência de arco $R_{a\phi g}$), que pode ser devido a uma descarga atmosférica ou qualquer outro evento que possa submeter o isolador a um elevado esforço, conduz a corrente de falta a partir do condutor de fase para a estrutura da torre (I_{gffo}) e, então, para a terra através da “resistência de pé de torre” (R_{tower}). O arco é formado ao longo do comprimento $d\phi g$. Este comprimento é a distância de escoamento (“creepage”) da cadeia de isoladores, que é a distância elétrica mais curta entre o condutor e a torre medida ao longo da estrutura da cadeia de isoladores.

b) Falta à Terra Através de um Objeto

Outra falta fase-terra possível pode ocorrer quando o condutor de fase entra em contato com um objeto, tal como uma árvore (R_{tree}), que está em contato com a terra (ver Fig. 1). É mais provável que o contato não seja na localização da torre. Ele pode ocorrer em qualquer ponto ao longo do vão entre as torres. A corrente de falta é distribuída para a terra através das resistências das torres, com um valor porcentual de corrente maior fluindo para a resistência de pé de torre da torre mais próxima. De forma conservadora, podemos assumir que a corrente está circulando apenas através da resistência de pé de torre de uma única torre. Esta consideração simples contrasta com outras técnicas de análise avançadas e precisas [8].

Independentemente dos dois cenários possíveis, o caminho para a terra envolve a R_{tower} equivalente, que é a resistência do caminho composto a partir da terra para o aterramento do sistema. Para um flashover no isolador, R_f é a soma de $R_{a\phi g}$ e R_{tower} , ignorando a resistência da torre (R_{struc}). Para uma falta à terra devida ao contato com um objeto para a terra, R_f é a soma de R_{tree} e R_{tower} . O componente R_f para este tipo de falta pode ser significativo.

A presença de fios terra na torre distribui a corrente de falta de forma diferente. Uma porção da corrente de falta vai retornar para a terra (I_{gw}) através desses fios. Os fios terra são parte da impedância de sequência-zero e, portanto, não associados à R_f .

2) Faltas Fase-Fase

Faltas fase-fase, conforme ilustrado na Fig. 1 não envolvem o caminho de retorno pela terra. Assim como ocorre nas faltas fase-terra, um *flashover* no isolador ou uma conexão entre as fases através de um objeto pode ser a causa da falta.

Se a falta for devida ao *flashover* no isolador, R_f é expressa por (1), e o comprimento do arco pode ser uma linha reta ou um caminho em torno da torre ($d\phi\phi$). O fator importante é que R_f é totalmente devida à resistência de arco.

Devido ao espaçamento entre as fases nos sistemas de transmissão de alta tensão (AT) e extra-alta tensão (EAT), e mesmo nos níveis de subtransmissão, é altamente improvável que um objeto possa provocar uma falta fase-fase devido ao contato. Nas redes de distribuição, entretanto, faltas fase-fase têm maior probabilidade de ocorrer porque o condutor pode ter contato com diferentes objetos, tais como galhos de árvores, lançamento de vários tipos de materiais, etc.

B. A Necessidade de um Elemento Quadrilateral nos Sistemas de Transmissão

As três conclusões seguintes podem ser feitas com base na Fig. 1:

- O componente do arco da falta, $R_{a\phi g}$ ou $R_{a\phi\phi}$, tem um valor que pode ser estimado. A equação (1) indica que o valor pode não ser significativo para os níveis de transmissão.
- Faltas à terra podem ter valores significativos de R_f . As resistências de pé de torre ou resistências de objetos estranhos podem ter valores elevados.
- Faltas entre fases nos sistemas de transmissão têm maior probabilidade de apresentar valores baixos de resistência de arco.

Ao discutir os sistemas de proteção com relés de distância para linhas de transmissão, é importante conhecer as características de impedância do relé e esquemas usados. Conforme discussão acima, os relés de distância de terra para linhas curtas, que podem ser complicadas, se beneficiam do uso de uma característica quadrilateral, pois as faltas à terra envolvem mais do que a resistência de arco. Os relés de distância de fase, por outro lado, detectam faltas onde somente a resistência de arco está envolvida e, portanto, as complicações de um elemento quadrilateral não são geralmente necessárias. Por essas razões, os esquemas de proteção com relés de distância que implementam algoritmos de distância mho de fase para detectar faltas entre fases e uma combinação de elementos de distância de terra mho e quadrilateral para detectar faltas à terra são justificados.

Para a maioria das aplicações de linhas de transmissão, desde os níveis de tensão da subtransmissão até a EAT, o elemento mho de fase e o esquema de distância de terra mho quadrilateral comprovaram ser adequados. Linhas extremamente curtas podem representar um desafio para este esquema. Os elementos de sobrecorrente direcionais de sequência-negativa e sequência-

zero provaram ser a solução para as limitações dos elementos de distância para linhas curtas.

C. Aplicações em Linhas Curtas

Uma linha de transmissão curta geralmente tem valores baixos de impedância e comprimento. Num diagrama R-X, como mostrado na Fig. 2, a impedância da linha está eletricamente muito afastada da máxima carga esperada. Para algumas aplicações, os valores do alcance da impedância da linha (Z_{set}) desafiam as precisões de medição do próprio relé.

Mesmo para uma falta à terra sem resistência de arco (R_{afg} igual a zero), o componente R_f terá o valor da resistência de pé de torre, conforme discutido anteriormente. Os elementos de terra mho possuem uma capacidade intrínseca para expandir e acomodar mais R_f . Esta expansão é proporcional à impedância da fonte (Z_s), conforme mostrado na Fig. 2 [9]. Contudo, se as resistências de pé de torre estiverem na faixa das impedâncias da linha, que se somam à R_f , o elemento mho terá dificuldades para detectar faltas mesmo sem resistência de arco. A situação é negativamente ampliada se a fonte atrás do relé for muito forte—implicando uma Z_s muito pequena.

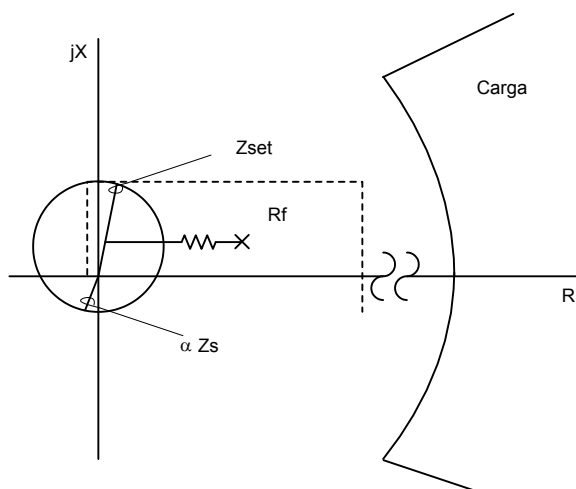


Fig. 2. Impedância aparente de uma linha curta

Os elementos de distância quadrilaterais de terra podem fornecer uma margem maior para acomodar R_f . Esses elementos são bem mais adequados para proteção de linhas curtas. Há algumas limitações no valor de R_f que eles podem acomodar (ver Seção IV). Entretanto, seu desempenho é melhor do que o de um círculo mho.

A situação para detecção de faltas entre fases é similar àquela de detecção de faltas à terra nas aplicações de linhas curtas. Se a resistência de arco esperada for aproximadamente da mesma magnitude que a impedância da linha de transmissão, haverá problemas para detecção da falta pelo círculo mho de fase. Nas aplicações de linhas significativamente curtas, os elementos de distância quadrilaterais de fase fornecem uma cobertura notavelmente melhor do que um elemento mho de fase.

Todavia, é aceito que os elementos de sobrecorrente direcionais são os elementos mais sensíveis para detecção de faltas; logo, eles devem ser incluídos nos esquemas de proteção piloto [1][3].

D. Sobrecorrente Direcional

A proteção de sobrecorrente direcional é uma técnica mais sensível para detecção de faltas do que qualquer tipo de elemento de distância [1][10]. O alcance desses elementos varia com a impedância da fonte de um sistema de transmissão. Os elementos direcionais de terra são polarizados por tensão de sequência-negativa ou sequência-zero. A polarização por sequência-negativa é também usada para proteção de sobrecorrente direcional de fase. Outros esquemas direcionais de fase também são possíveis.

Nos esquemas de proteção de linhas, o sobrecorrente direcional é usado como esquema de retaguarda para perda do canal do esquema piloto.

Os esquemas de proteção piloto com comparação direcional comparam a direção da falta entre dois ou mais terminais. Recomenda-se incluir elementos de sobrecorrente direcionais (67) para complementar os elementos de distância tradicionais (21), conforme ilustrado na Fig. 3.

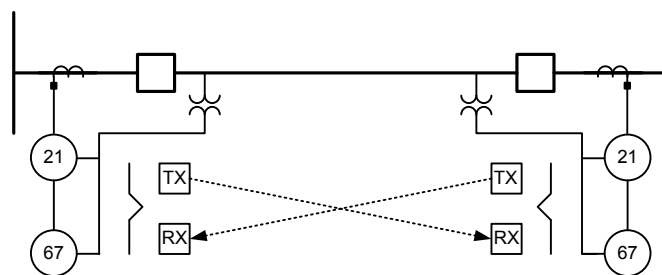


Fig. 3. Comparação direcional usando elementos de sobrecorrente direcionais

Os esquemas piloto com o sobrecorrente direcional de terra, como mostrado na Fig. 3, vão compensar qualquer falta de sensibilidade dos elementos mho para linhas curtas. Na verdade, uma maior sensibilidade é obtida usando elementos de sobrecorrente direcionais no esquema, independentemente dos tipos de linha e elementos de distância.

E. Resistência de Falta no Plano de Impedância Aparente

Os engenheiros de relés de proteção usam o plano da impedância aparente para analisar o desempenho dos elementos de distância durante condições de carga, falta e oscilação de potência, tanto com elementos mho quanto quadrilaterais. Neste plano, podemos representar a impedância aparente para faltas na linha com diferentes valores de R_f e condições de carregamento da linha. A Fig. 4 mostra o sistema usado para calcular a impedância aparente para faltas fase-terra localizadas a 85% a partir da extremidade exportadora.

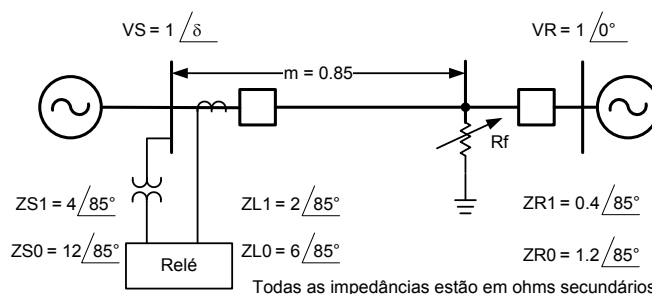


Fig. 4. Parâmetros e condições de operação do sistema de potência para análise do desempenho dos elementos de distância

A Fig. 5 mostra o lugar geométrico da impedância aparente para diferentes condições de carregamento (δ igual a -20 , -10 , 0 , 10 e 20 graus) e todos os valores possíveis de R_f .

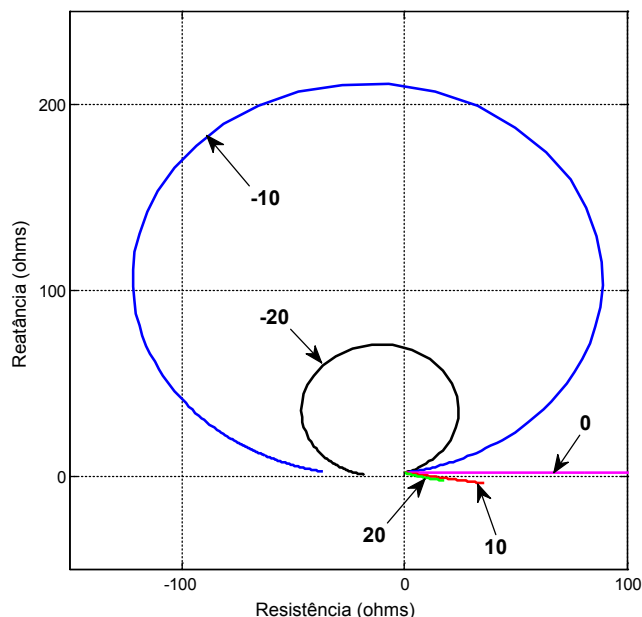


Fig. 5. Impedância aparente para δ igual a -20 , -10 , 0 , 10 e 20 graus, enquanto R_f varia de 0 a ∞

A Fig. 6 mostra que a impedância aparente pode causar subbalcance e sobrelance dos elementos de distância com característica fixa e ter cobertura limitada de R_f se o elemento de distância não tiver uma característica adaptativa [11].

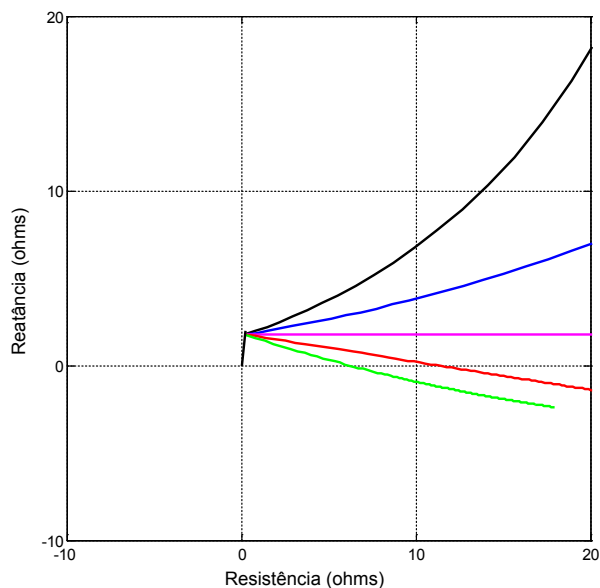


Fig. 6. A impedância aparente pode provocar subbalcance e sobrelance dos elementos de distância e ter cobertura limitada de R_f

A Fig. 7 mostra o lugar geométrico da impedância para fluxo de carga na direção à frente (δ igual a 10 graus). Nesse caso, a tensão VR da extremidade remota é igual a 0.98 pu. Independentemente da medição no loop da impedância (loop da falta à terra ou loop da falta entre fases), a impedância aparente inicia num valor de carga, Z_{LOAD} , que corresponde a R_f igual a ∞ . Para um fluxo de potência ativa na direção à frente, Z_{LOAD}

está no lado direito (valores positivos de resistência) do plano. Uma vez que R_f começa decrescendo, a impedância aparente descreve o lugar geométrico mostrado na Fig. 7. Observe que com R_f igual a 0 , a impedância aparente é exatamente igual a 85% da impedância da linha.

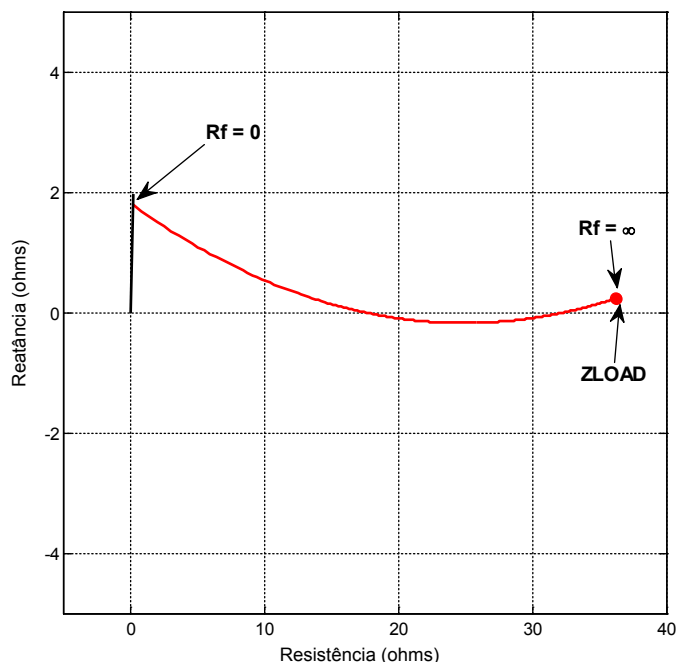


Fig. 7. Lugar geométrico da impedância aparente para carga na direção à frente (δ igual a 10 graus)

A Fig. 8 mostra o lugar geométrico da impedância para um fluxo de carga “entrando” (δ igual a -10 graus). Esta impedância aparente representa um desafio para os elementos de distância detectarem elevados valores de R_f , evitando o subbalcance do elemento.

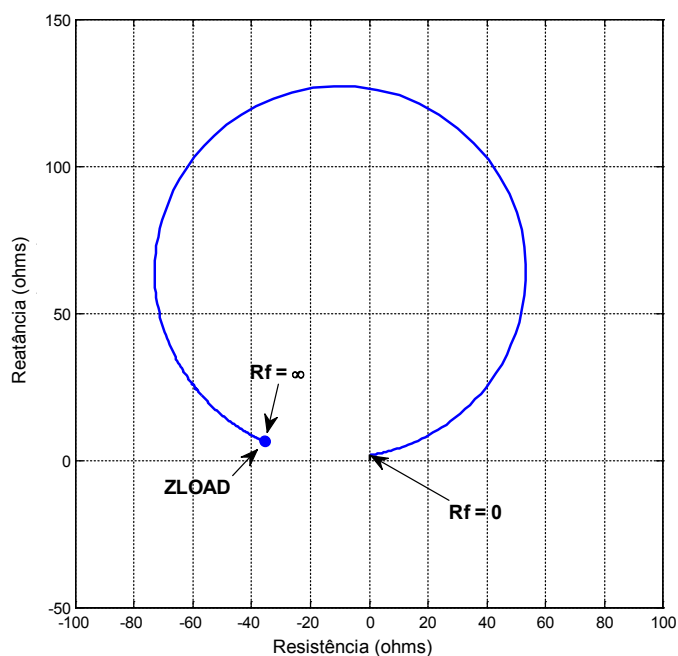


Fig. 8. Lugar geométrico da impedância aparente para um fluxo de carga “entrando” (δ igual a -10 graus)

II. ELEMENTOS DE DISTÂNCIA QUADRILATERAIS

Os elementos de distância mho descrevem uma curvatura suave e natural no plano de impedâncias. O formato é o resultado de uma comparação de fases de duas grandezas que fornecem o círculo familiar no plano de impedância aparente [9]. Os elementos de distância quadrilaterais não são tão diretos. A combinação dos elementos de distância tem permitido aos projetistas criarem todos os tipos de formatos e características poligonais.

Uma função de impedância com uma característica quadrilateral requer a implementação do seguinte:

- Um elemento direcional
- Um elemento de reatância
- Cálculos das resistências dos dois blinders (direito e esquerdo)

A Fig. 9 ilustra um elemento quadrilateral típico composto por três elementos de distância. O elemento que determina o alcance da impedância é o elemento de reatância X . O elemento que determina a cobertura resistiva para as faltas é o elemento de resistência do lado direito, R_{right} . O elemento que limita a cobertura para fluxo de carga reverso é o elemento de resistência do lado esquerdo, R_{left} . Uma verificação direcional mantém a unidade detectando faltas somente na direção à frente.

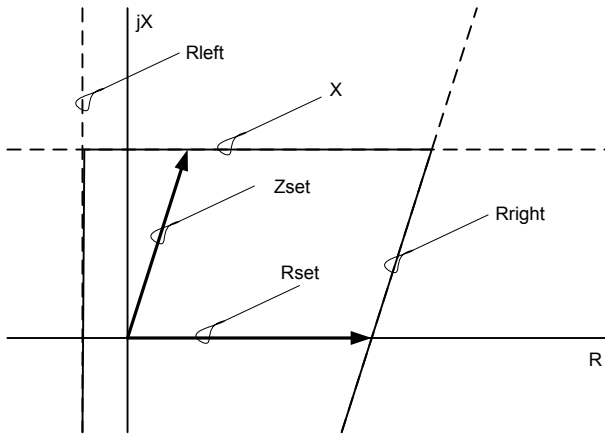


Fig. 9. Componentes de um elemento de distância quadrilateral

O ajuste do alcance no lugar geométrico do ângulo da impedância da linha é indicado por Z_{set} na Fig. 9. Ele não é um ajuste no eixo X , mas é o alcance na impedância da linha. Mostraremos que este ajuste é o ponto principal do alcance da impedância da linha. O ajuste R_{set} é o offset resistivo a partir da origem. Uma linha paralela à impedância da linha está mostrada na Fig. 9.

As linhas da impedância da Fig. 9 são linhas retas para questões práticas. A teoria, contudo, mostra que essas linhas são círculos com raio infinito [9]. A grandeza de polarização para criar esses círculos amplos é a corrente medida na localização do relé.

A. Elemento de Reatância Adaptativo

Diversas publicações sobre relés de proteção reportam problemas graves de sobre alcance ocorridos com elementos de reatância não adaptativos, causados pelo fluxo de carga à frente e R_f [1][2][11]. Se o elemento de reatância de uma característica

quadrilateral não for projetado para acomodar a situação mostrada na Fig. 10, uma falta externa com R_f pode entrar na área de operação. A curvatura intrínseca e o deslocamento benéfico do círculo mho são suficientes para superar este problema. Portanto, as linhas de reatância precisam ser projetadas para acomodar esta situação.

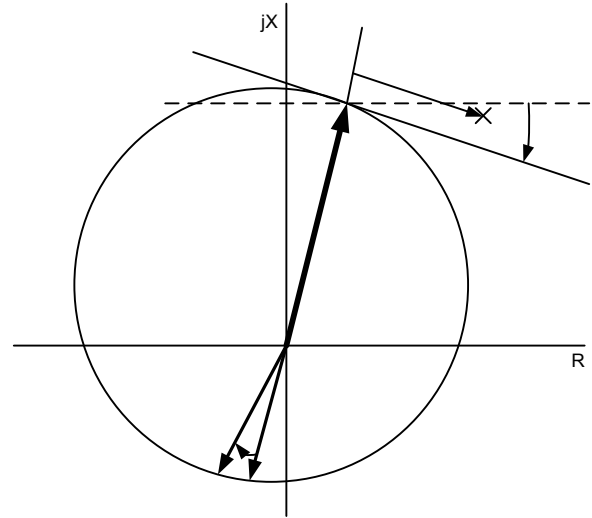


Fig. 10. Os elementos mho e de reatância se adaptam às condições de carga

A Fig. 10 mostra o comportamento desejado da linha de reatância para um fluxo de carga à frente. É necessário efetuar uma inclinação na direção mostrada. Diversas técnicas têm sido propostas para este objetivo, incluindo uma inclinação da característica fixa e o uso da carga de pré-falta.

É interessante observar que um círculo mho com diâmetro infinito fornece a mesma inclinação que um círculo mho regular, e a linha reativa se torna adaptativa [9]. A corrente de polarização adequada é a componente de sequência-negativa [12]. A homogeneidade do diagrama de sequência-negativa e a maior proximidade do ângulo de I_2 com o ângulo da corrente de falta (I_f) torna a corrente I_2 uma grandeza de polarização ideal.

Para obter a característica da reatância desejada para o loop AG, as duas grandezas seguintes podem ser comparadas através de um comparador de fases de 90 graus:

$$S1 = VRA - Z_{set}(IRA + k0 \cdot 3I0) \quad (2)$$

$$S2 = j(IR2)e^{jT} \quad (3)$$

As equações (4) e (5) definem os vetores resultantes a e b usados para plotar a característica do elemento de reatância [9].

$$a = Z_{set} \quad (4)$$

$$b = \infty e^{-j \left[90^\circ - T + \text{ang} \left(1 + \frac{IA1}{IA2} + \frac{IA0}{Z_{set}} \right) \right]} \quad (5)$$

$$k0 = \frac{Z_{set0} - Z_{set1}}{3 \cdot Z_{set1}} \quad (6)$$

onde:

$k0$ é o fator de compensação de sequência-zero.

Z_{set0} é o alcance da impedância de sequência-zero derivado de $k0$ e Z_{set} .

A Fig. 11 mostra o comportamento adaptativo da linha de reatância derivada de (4) e (5). Calculando uma inclinação adequada do ângulo de homogeneidade (indicada por T na equação), a unidade garante um alcance correto independentemente da direção do fluxo de carga.

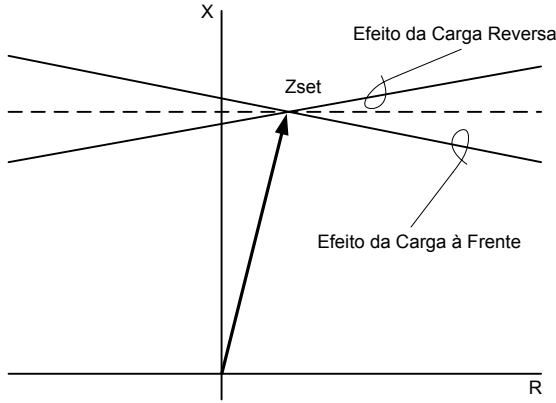


Fig. 11. Característica do elemento de reatância de terra adaptativo

Para os elementos de distância de terra, $I0$ consiste em outra escolha para polarização do elemento de reatância. Esta opção é aceitável se o fator de homogeneidade, T , para as impedâncias de sequência-zero, for conhecido.

Para os elementos de distância de fase, o uso da corrente de sequência-negativa também é uma opção.

$$S1 = (VRB - VRC) - Zset(IRB - IRC) \quad (7)$$

$$S2 = j(IRB2 - IRC2)e^{jT} \quad (8)$$

Os vetores resultantes a e b estão mostrados em (9) e (10).

$$a = Zset \quad (9)$$

$$b = \infty e^{-j\left(90-T+\text{ang}\left(1+\frac{IB1-IC1}{IB2-IC2}\right)\right)} \quad (10)$$

Conforme descrito em [9], o vetor b define o diâmetro infinito e o ângulo da inclinação, os quais são expressos em (5) para a linha de reatância de terra e (10) para a linha de reatância de fase. A linha resultante é adaptativa à direção do fluxo de carga, como mostrado na Fig. 11. A linha de reatância se adapta adequadamente ao fluxo de carga e Rf .

B. Elemento de Resistência Adaptativo

A Fig. 9 mostra que o elemento de resistência do lado direito é responsável pela cobertura resistiva de um elemento de distância quadrilateral. Este componente do elemento de distância quadrilateral deve acomodar e detectar o máximo de Rf possível.

Ao propor uma linha de resistência adaptativa, é possível construir a linha estática ou adaptativa, conforme efetuado para a linha de reatância. Um blinder resistivo adaptativo é obtido através da definição de $Rset$ em (2) e da defasagem de (3) por $(\theta L1 - 90^\circ)$, onde $\theta L1$ é o ângulo da impedância de sequência-positiva da linha. O benefício mostrado na Fig. 12 é um deslocamento do elemento de resistência para a direita, o qual acomoda faltas com fluxo de carga à frente. As equações (11) e (12) implementam o elemento de resistência de terra adaptativo.

$$S1 = VRA - Rset(IRA + k0 \cdot 3I0) \quad (11)$$

$$S2 = IR2 e^{j\theta L1} \quad (12)$$

De forma similar, as equações (13) e (14) definem o elemento de resistência de fase adaptativo para faltas entre fases.

$$S1 = (VRB - VRC) - Rset(IRB - IRC) \quad (13)$$

$$S2 = (IRB2 - IRC2) e^{j\theta L1} \quad (14)$$

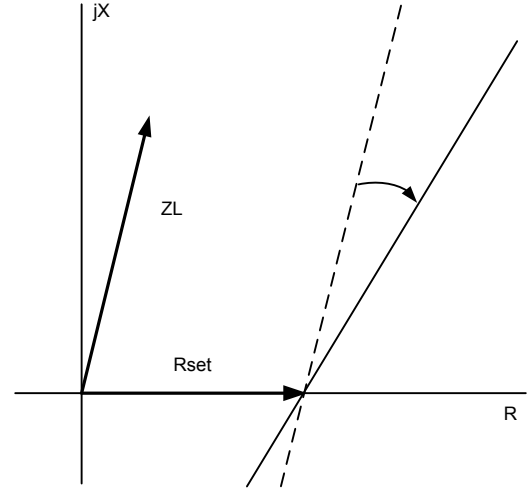


Fig. 12. Característica do elemento de resistência de terra adaptativo

Embora o uso da corrente de sequência-negativa forneça uma inclinação benéfica do elemento de resistência para carga na direção à frente, conforme mostrado na Fig. 12, a inclinação é na direção oposta para carga na direção reversa. Portanto, a inclinação não é benéfica sob esta condição.

Opções adicionais de polarização, tal com o componente alfa ($I1 + I2$) para elementos de distância de terra e $I1$ para elementos de distância de fase, fornecem um comportamento satisfatório da inclinação para fluxo de carga reverso. O comportamento para fluxo de carga reverso é o mesmo.

C. Elemento de Resistência do Lado Esquerdo

A linha resistiva do lado esquerdo da Fig. 9 é responsável por limitar a operação do elemento quadrilateral para fluxo de carga reverso. Ele não precisa ser adaptativo. É necessário ter cuidado para não incluir a origem para garantir uma operação satisfatória para linhas muito reativas.

D. Implementação de Alta Velocidade

Em diversas aplicações de proteção de linhas de transmissão, tempos de operação da ordem de subciclos são necessários para os elementos de distância. Em muitos relés, elementos de distância com características mho ou quadrilateral são disponibilizados. Quando os elementos de distância selecionados têm apenas características quadrilaterais, o mesmo requisito de alta velocidade é aplicável para faltas com valores baixos de resistência.

Para obter uma operação da ordem de subciclos com elementos quadrilaterais, o mesmo conceito de filtro dual apresentado em [14] para os elementos mho é aqui usado. O princípio básico consiste em processar a mesma função de

distância duas vezes, usando dois tipos de fasores de corrente e tensão: a função é processada usando, em primeiro lugar, os fasores com filtro de meio ciclo (alta velocidade) e uma segunda vez através dos fasores com filtro de um ciclo (convencional). O estado da função final é obtido através da operação da lógica OU dos dois processos.

Para aplicações de abertura monopolar, esses três elementos de distância de terra (AG, BG e CG) precisam ser supervisionados por uma função de seleção da fase em falta.

Para o propósito da implementação do elemento direcional e da seleção da fase defeituosa para a parcela de alta velocidade da função quadrilateral, o algoritmo descrito em [14] e [15] usa uma função conhecida como seleção do tipo da falta e direcional de alta velocidade (“high-speed directional and fault type selection” – HSD-FTS). Esta função processa os sinais usando filtros de meio ciclo e grandezas sobrepostas para fornecer os 14 sinais direcionais relacionados na Tabela I.

TABELA I
SINAIS DIRECIONAIS DE ALTA VELOCIDADE

Sinal	Descrição da Falta
HSD-AGF, HSD-AGR	AG à frente, reversa
HSD-BGF, HSD-BGR	BG à frente, reversa
HSD-CGF, HSD-CGR	CG à frente, reversa
HSD-ABF, HSD-ABR	AB à frente, reversa
HSD-BCF, HSD-BCR	BC à frente, reversa
HSD-CAF, HSD-CAR	CA à frente, reversa
HSD-ABCF, HSD-ABCR	ABC à frente, reversa

Uma vez que os sinais HSD-FTS são derivados das correntes e tensões incrementais, eles estarão disponíveis somente por 2 ciclos logo após o início de uma falta. Consequentemente, os sinais quadrilaterais de alta velocidade estão disponíveis durante o mesmo intervalo de tempo logo após a detecção de uma falta.

Para o elemento de reatância, a parcela de alta velocidade da implementação da característica quadrilateral usa as mesmas equações dos elementos de terra enquanto a parcela convencional correspondente usa polarização baseada na corrente de sequência-negativa ou sequência-zero. Durante uma condição de pólo aberto, a polarização através da corrente de sequência (negativa ou zero) é substituída pela corrente incremental do loop da impedância de forma que os elementos de terra permaneçam operacionais para aplicações de abertura monofásica.

Para os elementos de fase, a polarização é baseada na corrente incremental do loop da impedância de forma que as faltas entre fases e aplicações de abertura monopolar sejam automaticamente cobertas.

Para os cálculos dos dois blinders de resistência, as equações são idênticas à sua parcela convencional de forma que o alcance da resistência em regime será idêntico.

Com os elementos quadrilaterais de alta velocidade, os cálculos dos blinders de resistência e reatância usam um sistema de filtragem de meio ciclo para obter uma operação rápida.

A lógica para uma falta fase A-terra é apresentada na Fig. 13. Uma lógica similar é usada para os dois outros elementos de falta à terra e para os elementos de fase.

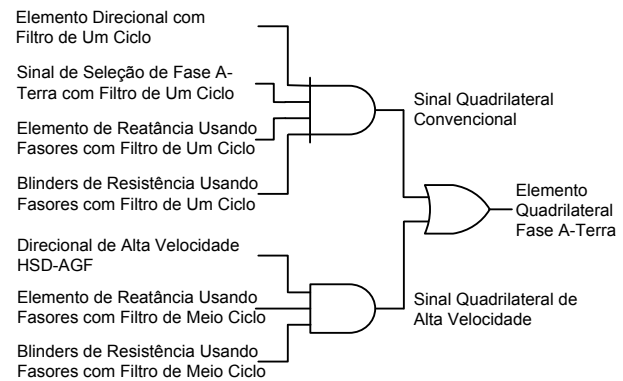


Fig. 13. Lógica da característica quadrilateral de alta velocidade para faltas fase A-terra

Para ilustrar a operação paralela dos elementos quadrilaterais de alta velocidade e convencional, uma falta fase A-terra é simulada a 33% do comprimento da linha, usando a linha de transmissão de alta tensão do sistema de potência da Fig. 4. O alcance da impedância é ajustado em 85% de ZL1. A falta é simulada no instante 100 milissegundos na simulação do EMTP (“*Electromagnetic Transients Program*” – Programa de Transitórios Eletromagnéticos).

A Fig. 14 mostra os cálculos da distância até a falta dos dois elementos de reatância (alta velocidade e convencional) para R_f igual a 0 ohm. O elemento de alta velocidade opera em 12,5 milissegundos e o elemento convencional opera em 21 milissegundos.

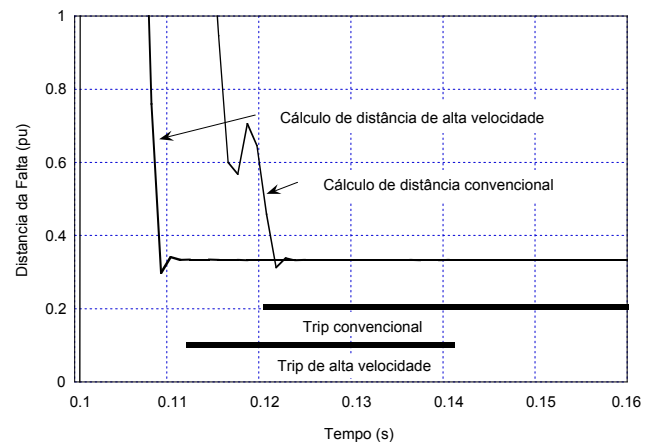


Fig. 14. Cálculos dos elementos de distância de alta velocidade e convencional para uma falta fase A-terra, 0 ohm, localizada a 33% do comprimento da linha

A Fig. 15 detalha a mesma experiência, porém com uma R_f primária de 50 ohms. O elemento de alta velocidade tem um tempo de operação de 14,5 milissegundos, enquanto o elemento convencional tem um tempo de operação de 25 milissegundos.

Como regra geral, a lógica quadrilateral de alta velocidade enviará um sinal de saída meio ciclo antes da lógica convencional. Isso corresponde, na maioria das vezes, a uma

operação total da ordem de subciclos para valores baixos de R_f . Conforme ilustrado nos dois exemplos acima, à medida que R_f aumenta, tanto a corrente de falta quanto o afundamento de tensão serão reduzidos. Nessas circunstâncias, os tempos de operação dos elementos quadrilaterais de alta velocidade e convencional vão aumentar de forma que os tempos totais de operação próximos ou acima de 1 ciclo serão mais típicos das faltas de alta resistência.

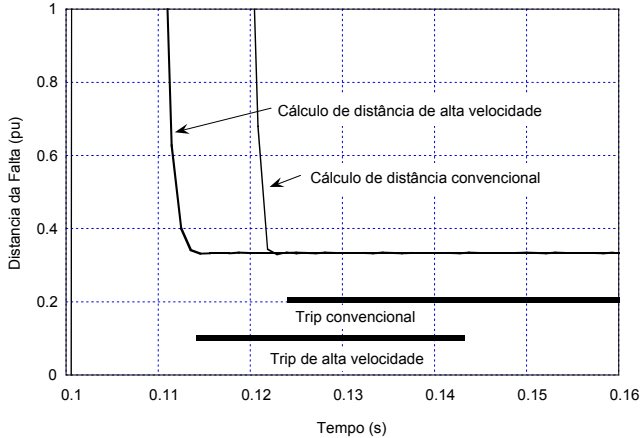


Fig. 15. Cálculos dos elementos de distância de alta velocidade e convencional para uma falta fase A-terra, 50 ohms, localizada a 33% do comprimento da linha

III. APLICAÇÃO DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA QUADRILATERAL

A. Cálculo da Homogeneidade

A linha reativa de um elemento de distância quadrilateral pode ser polarizada por corrente de sequência-negativa (IR_2) ou sequência-zero (IR_0) para se adaptar corretamente ao fluxo de carga, conforme mostrado na Fig. 11. A polarização através dessas correntes torna a linha adaptativa e menos susceptível a sobrealçar. Uma verificação é necessária, contudo, para garantir um desempenho efetivo do elemento de distância de fase e terra quadrilateral da Zona 1 [13]. Esta verificação é para a homogeneidade das impedâncias de sequência-negativa (ou impedâncias de sequência-zero, se tiver sido usada a polarização por sequência-zero).

Numa falta à terra ou falta entre fases assimétrica, a corrente de falta total sempre está atrasada das tensões da fonte. Esta corrente de falta, IF , é a corrente de polarização perfeita. Ela está na mesma direção, independentemente do tipo da falta (mesmo ângulo, porém com magnitude diferente). Como a corrente IF não é mensurável, as correntes medidas na localização do relé são as únicas disponíveis. A corrente de sequência-negativa é uma opção para polarizar a linha de reatância do elemento quadrilateral. O relé de proteção está medindo a IR_2 local (corrente de sequência-negativa). A corrente IF_2 é a corrente apropriada para ser usada.

A Fig. 16 ilustra o diagrama de sequência-negativa de uma linha de transmissão simples e as respectivas impedâncias da fonte de ambos os terminais. Se possível, este diagrama com duas fontes deve ser avaliado. Se o sistema for ligeiramente mais complexo (ex., linhas paralelas), um programa de curto-circuito pode fornecer as correntes IF_2 e IR_2 . O cálculo deve ser feito

para uma falta dentro do alcance da Zona 1, onde m é aproximadamente 80%.

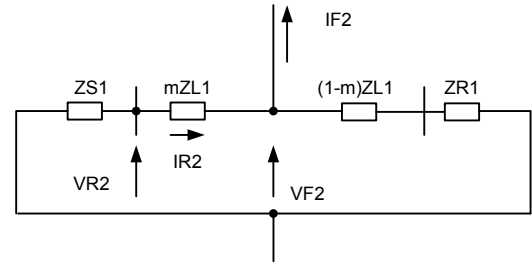


Fig. 16. Diagrama de sequência-negativa com duas fontes

A variável T é o fator de homogeneidade, e é a diferença angular entre a corrente de falta e a corrente medida na localização do relé. A referência [12] ilustra a avaliação deste fator, que é a expressão do divisor de corrente seguinte:

$$T = \arg\left(\frac{IF_2}{IR_2}\right) = \arg\left[\frac{ZS_1 + ZL_1 + ZR_1}{ZR_1 + (1-m)ZL_1}\right] \quad (15)$$

O ângulo T em (15) ajusta a corrente IR_2 medida ao ângulo da corrente de falta IF_2 . Ele é usado em (3) e (8) para polarizar corretamente a linha de reatância do elemento quadrilateral.

Quando o elemento quadrilateral de terra for polarizado por corrente de sequência-zero (IR_0), use uma expressão similar para calcular T (15), exceto se as correntes e impedâncias forem de sequência-zero.

A equação (15) também fornece algumas informações extras sobre a homogeneidade do diagrama de sequência. Para a maioria dos sistemas de transmissão, os ângulos da impedância do diagrama de sequência-negativa são muito similares. O cálculo de (15) fornece um ângulo pequeno, usualmente na faixa de ± 5 graus. Por outro lado, no diagrama de sequência-zero, o ângulo de homogeneidade varia muito mais.

Em (3) e (8), a linha de reatância é efetivamente inclinada pelo ângulo T .

B. Load Encroachment

Os elementos de distância quadrilaterais discutidos neste artigo são inerentemente imunes à ocorrência de transgressão do limite de carga (“load encroachment”). A linha reativa que define o alcance é polarizada por correntes de sequência-negativa, conforme mostrado em (3) e (8). As linhas reativas de fase e terra iniciam seus cálculos quando há uma condição de falta que implica num desbalanço de (I_2/I_1) ou (I_0/I_1) maior do que o desbalanço natural do sistema, que é menor do que 10%.

Num esquema de proteção completo, contudo, deve haver recursos para detecção de faltas trifásicas. Embora seja raro, este tipo de falta é possível. Usualmente, é uma falta quase sem R_f .

O elemento de detecção de falta trifásica é obtido através do uso da auto-polarização por corrente. Por exemplo, o loop BC será polarizado com:

$$S_2 = j(IR_B - IR_C)e^{-jT} \quad (16)$$

Para evitar o sobrealcance devido à carga fluindo para a frente, o ajuste T em graus é uma inclinação, provavelmente

descendente, para a linha reativa. O alcance resistivo é polarizado por corrente de sequência-positiva.

O elemento quadrilateral trifásico descrito é ajustado com o mesmo alcance dos elementos de distância bifásicos. Ele requer certas considerações de carga para evitar a condição *load encroachment*.

Se a linha de transmissão for longa e o ajuste resistivo escolhido for conflitante com a carga, é necessário um elemento de *load encroachment*. Este elemento deve definir claramente a área de carga quando a direção do fluxo de carga for para a frente. A Fig. 17 ilustra a característica da tradicional e já amplamente usada lógica *load encroachment*. O ponto de operação da impedância de carga nesta região vai identificar claramente as condições de carga e evitar a operação do algoritmo de detecção de faltas trifásicas.

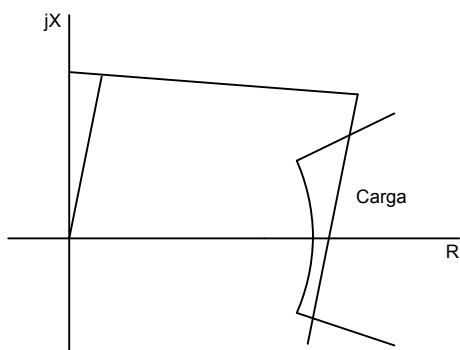


Fig. 17. “Load encroachment” para elementos de distância quadrilaterais trifásicos

C. Perda de Sincronismo

Grande parte da teoria e discussão da literatura sobre detecção de perda de sincronismo (“out-of-step”) pode ser aplicada aos elementos de distância quadrilaterais [16][17]. Quando os fluxos de potência estão oscilando no sistema de potência, as impedâncias aparentes medidas pelos elementos de distância descrevem uma trajetória no plano R-X. Essas oscilações podem ser causadas pela instabilidade angular ou simplesmente por chaveamentos de linhas (energizando ou desenergizando) [17]. Se as oscilações estiverem contidas num envelope de máximas oscilações e forem amortizadas ao longo do tempo, as oscilações de potência são consideradas estáveis. Por outro lado, se as oscilações de potência não forem amortizadas ao longo do tempo, elas são consideradas instáveis.

No diagrama R-X mostrado na Fig. 18, uma trajetória da impedância de uma oscilação de potência estável está contida no lado direito (ou no lado esquerdo para fluxo de potência reverso) e, no final, permanece em um novo ponto de operação da impedância de carga. Uma oscilação de potência instável, de forma contrária, vai mostrar uma trajetória que atravessa o plano da esquerda para a direita (ou da direita para a esquerda). Teoricamente, e assumindo o diagrama simples com duas fontes mostrado na Fig. 18, a oscilação de potência instável vai cruzar o centro elétrico do sistema quando a diferença angular entre as tensões das duas fontes for próxima de 180 graus. A não ser que

o sistema de potência possa ser reduzido a um modelo com duas fontes, isso não é apenas uma questão de prever a trajetória da impedância; logo, estudos de estabilidade podem ser necessários.

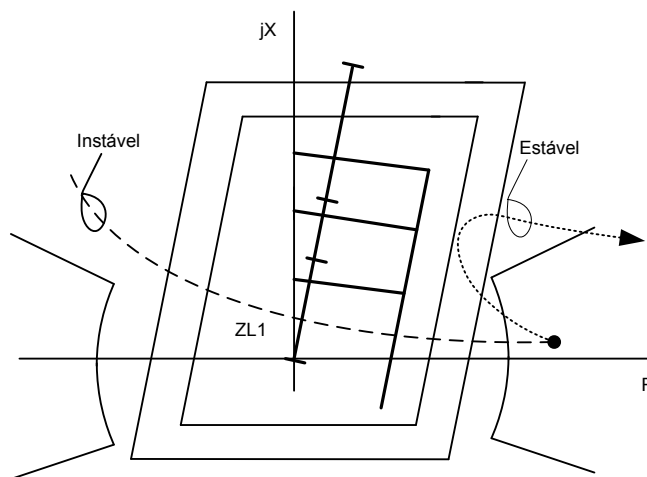


Fig. 18. Característica tradicional de perda de sincronismo com zona dual

Durante oscilações do sistema de potência, requisitos de estabilidade demandam que as linhas de transmissão permaneçam no sistema de potência. A abertura de linhas de transmissão sem necessidade prejudica a estabilidade do sistema de potência. Portanto, é necessário garantir que trajetórias instáveis no diagrama R-X, entrando nas características do elemento de distância (mostrada na Fig. 18) não desliguem desnecessariamente a linha de transmissão. Entretanto, algumas aplicações requerem a abertura das linhas de transmissão, efetuada de forma controlada.

Tradicionalmente, as técnicas de detecção de perda de sincronismo tiram vantagem da menor velocidade da trajetória da impedância aparente no diagrama R-X para condições de oscilação de potência. A trajetória do ponto de operação muda de carga para falta quase instantaneamente para condições de falta.

A Fig. 18 ilustra um esquema tradicional formado por duas zonas. Se a zona interna operar após uma temporização ajustada (2 a 5 ciclos), uma condição de perda de sincronismo é detectada. Se a trajetória for devida a uma falta no sistema de potência, ambas as zonas vão operar numa janela de tempo muito pequena.

Há diversas filosofias para serem seguidas ao ajustar os parâmetros deste esquema [17]. Algumas das mais importantes considerações são:

- A zona interna não deve operar para oscilações estáveis. Conforme mostrado na Fig. 18, uma oscilação estável retorna, no final, para a impedância de carga.
- A zona externa não deve incluir qualquer impedância de carga possível. Se a carga for incluída pela zona externa, há um risco de declarar incorretamente uma condição de oscilação de potência.

- A distância da zona interna para a zona externa no plano de impedâncias deve ser tão ampla quanto possível de forma a permitir a detecção da condição de oscilação de potência.
- A zona interna não deve incluir qualquer zona do elemento de distância que está para ser bloqueado. Para aplicações de linhas longas, pode não ser possível atingir este objetivo para todas as zonas de distância. Podemos fazer com que a zona interna cruze parte da característica do elemento de distância. Isso cortará efetivamente parte da característica.

A Fig. 18 ilustra algumas dessas considerações. Linhas curtas apresentam margem suficiente para acomodar as zonas interna e externa juntamente com qualquer tipo de elemento de distância, tal como uma unidade de distância quadrilateral, seguindo-se as diretrizes acima. Linhas de transmissão longas, contudo, podem não fornecer margem suficiente. É necessário que sejam usados critérios de engenharia para ajustar as zonas interna e externa, bem como o alcance resistivo do elemento quadrilateral.

Ao determinar os parâmetros de ajuste, pode ser muito difícil cobrir todos os cenários possíveis de instabilidade com um modelo simples de duas fontes. Portanto, estudos de transitórios serão necessários para compreender a efetividade do esquema da Fig. 18.

Recentemente, foi proposto um algoritmo de detecção de oscilação de potência que requer poucas informações do usuário [18]. Este algoritmo vai detectar e declarar uma oscilação de potência baseando-se na estimação da tensão do centro da oscilação (“swing center voltage” – SCV), que é a tensão do centro elétrico de um modelo com duas fontes. Esta tensão pode ser estimada através de medições locais e seu comportamento utilizado para detectar uma condição de perda de sincronismo. A vantagem desta metodologia é que não são necessárias informações do sistema.

D. Aplicações do Capacitor Série

É comum aplicar sistemas de proteção com comparação direcional na proteção de linhas de transmissão com compensação série. Os relés de proteção usados com a finalidade de proteger essas linhas devem ser projetados para acomodar as variações da impedância medida (devido aos MOVs [“metal oxide varistors”] e centelhadores [“spark gaps”] em paralelo com o banco de capacitores) e correntes e tensões sub-síncronas que são características dos sistemas compensados com capacitores série [19]. Além disso, os sistemas de relés de proteção instalados em linhas adjacentes devem ter confiabilidade para determinar a direção da falta.

Para elementos de distância que são polarizados por tensão, como os elementos de distância mho, a inversão da tensão devida ao capacitor série é corretamente tratada através da memória de tensão [19][20]. Além disso, os elementos direcionais determinam a direção correta da falta [21].

A identificação da direção da falta é importante para evitar que as linhas de reatância e resistência dos elementos de distância quadrilaterais operem incorretamente. Um elemento direcional polarizado por sequência-negativa baseado em impedância (ou um elemento polarizado por sequência-zero

alternativo para faltas à terra) vai determinar corretamente a direção da falta, a não ser que haja uma inversão de corrente. Dependendo da localização do banco de capacitores e da localização dos transformadores de tensão (TPs), sugestões de ajustes para os valores limites direcionais (Z2F e Z2R) podem ser encontradas em [20] e [21]. Para as impedâncias do sistema compensado da Fig. 19, o valor limite do elemento direcional, Z2F, deve ser ajustado em:

$$Z2F \leq \frac{(ZL1 - XC)}{2} \quad (17)$$

O ajuste deste limite tão perto da origem quanto possível vai assegurar a determinação direcional correta, a não ser que seja possível uma inversão de corrente no sistema de potência.

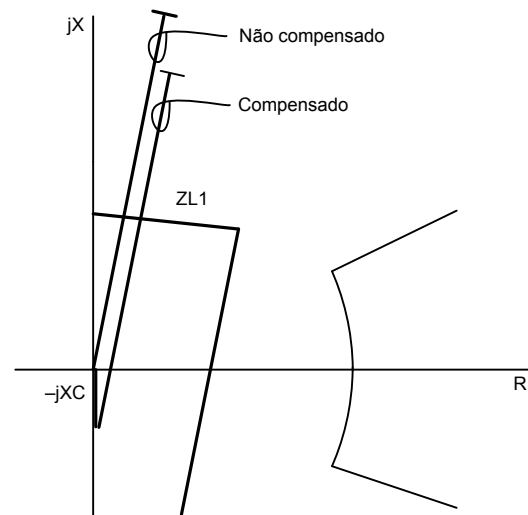


Fig. 19. Aplicações do capacitor série

A Fig. 19 mostra a perspectiva de uma linha longa. Linhas com compensação série são linhas longas que requerem compensação para transmitir mais potência. Não há linhas curtas compensadas com capacitores série. Além disso, nas vizinhanças de uma instalação com capacitores série, existe a possibilidade de oscilações sub-síncronas das correntes e tensões [19][20][21]. Embora os filtros dos relés de proteção sejam muito bons para eliminar componentes de alta frequência, os filtros não são eficientes para eliminar frequências mais baixas. Esses transitórios sub-síncronos, mostrados como oscilações da impedância no plano de impedância aparente, convergem, no final, para a impedância aparente verdadeira, conforme ilustrado na Fig. 20. Esta figura mostra também que há possibilidade de sobrealcançe dos elementos de distância.

Os elementos de distância da Zona 1 devem responder ao fenômeno acima, reduzindo o alcance [20][21]. Uma boa sugestão consiste em ajustar o alcance da linha reativa em metade da impedância da linha compensada [20]. Por outro lado, os relés de proteção podem ter um ajuste de alcance automático baseado na impedância aparente medida comparada a um valor calculado teoricamente [14][21]. Dessa forma, o alcance é automaticamente reduzido para metade da impedância da linha compensada quando os transitórios forem detectados. O alcance resistivo deve seguir as recomendações para uma linha longa (ex., $Rset$ igual à metade de $Zset$).

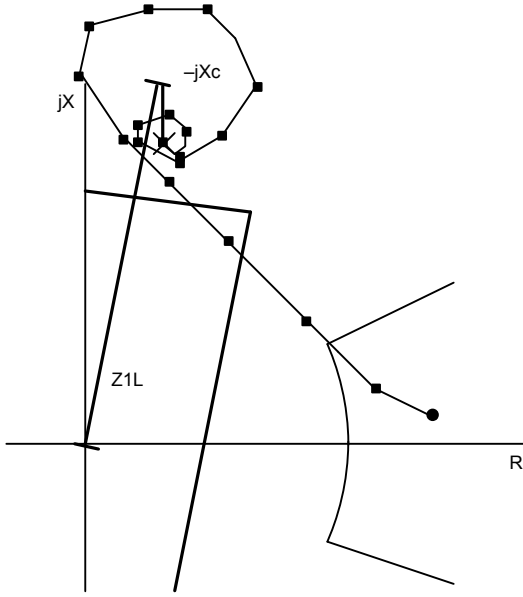


Fig. 20. Transitórios de frequências sub-harmônicas podem causar o sobrealcançe dos elementos de distância

A presença do capacitor série no sistema de potência modifica a homogeneidade das impedâncias de sequência-zero e sequência-negativa. Portanto, ao ajustar o fator de homogeneidade T , descrito em (18) e (19), a impedância do capacitor deve ser considerada. Quando usar um elemento de reatância polarizado por corrente de sequência-negativa:

$$T = \arg\left(\frac{IF2}{IR2}\right) = \arg\left[\frac{ZS1 + ZL1 - XC + ZR1}{ZR1 + (1-m)(ZL1 - XC)}\right] \quad (18)$$

E quando usar uma linha de reatância polarizada por sequência-zero:

$$T = \arg\left(\frac{IF0}{IR0}\right) = \arg\left[\frac{ZS0 + ZL0 - XC + ZR0}{ZR0 + (1-m)(ZL0 - XC)}\right] \quad (19)$$

Observe que as impedâncias de sequência-zero e sequência-negativa de um capacitor série são iguais à impedância de sequência-positiva.

A equação (18) para a linha não-compensada deve também ser avaliada. O valor mínimo calculado de T (mais negativo) deve ser usado.

Ao aplicar qualquer esquema de relés de proteção a linhas com compensação série, recomenda-se efetuar testes e simulações de transitórios [19][21]. Esta etapa garante confiabilidade e confirma os ajustes propostos.

E. Aplicações de Trip Monopolar

Na proteção de linhas de transmissão, é comum usar esquemas de trip monopolar. O esquema desliga a fase defeituosa somente para uma falta fase-terra. Quando o pólo é aberto, as outras duas fases ainda permanecem transmitindo potência, e o sistema é capaz de permanecer sincronizado. Durante o intervalo de pólo aberto, espera-se que haja desionização do arco. Após o intervalo de pólo aberto, um comando de religamento é enviado para o disjuntor.

A polarização por corrente usando corrente de sequência-negativa ($I2$) ou corrente de sequência-zero ($I0$) não é confiável

durante o intervalo de pólo aberto. O pólo aberto torna o sistema de potência desbalanceado, causando circulação de correntes de sequência-negativa e sequência-zero. A consequência para os elementos de distância polarizados por correntes dos componentes de sequência, como em (3) e (8), é que a polarização se torna não-confiável. Dependendo da direção do fluxo de carga, $I2$ e $I0$ terão diferentes direções. Felizmente, existem outros elementos de distância que vão operar de forma confiável durante uma condição de pólo aberto [14]. O elemento mho polarizado por tensão de sequência-positiva permanece estável durante os intervalos de pólo aberto e vai detectar de forma confiável faltas no sistema de potência durante esta condição. Num esquema prático, os elementos quadrilaterais de fase e terra devem ser desabilitados quando uma condição de pólo aberto for detectada. O elemento de distância quadrilateral de alta velocidade é implementado com grandezas incrementais e não precisa ser desabilitado durante o intervalo de pólo aberto.

IV. AJUSTE DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA QUADRILATERAL

Considere o circuito da falta fase A-terra da Fig. 4. A equação (20) determina a impedância aparente (Z_{app}) que o relé instalado no lado esquerdo da linha mede como uma função das correntes e tensões de falta. A equação (21) determina Z_{app} como uma função de Rf e localização da falta m .

$$Z_{app} = \frac{VA}{IA + k0 \cdot IR} \quad (20)$$

$$Z_{app} = m \cdot ZL1 + KR \cdot Rf \quad (21)$$

Em (21), KR é um fator que depende dos fatores de distribuição das correntes de sequência-positiva e sequência-zero ($C1$ e $C0$) e é igual a:

$$KR = \frac{3}{2 \cdot C1 + C0(1 + 3 \cdot k0)} \quad (22)$$

$C1$ e $C0$ são iguais a:

$$C1 = \frac{(1-m) \cdot ZL1 + ZR1}{ZS1 + ZL1 + ZR1} \quad (23)$$

$$C0 = \frac{(1-m) \cdot ZL0 + ZR0}{ZS0 + ZL0 + ZR0} \quad (24)$$

$k0$ é o fator de compensação de sequência-zero igual a:

$$k0 = \frac{ZL0 - ZL1}{3 \cdot ZL1} \quad (25)$$

For no-load conditions (δ igual a 0) e sistemas homogêneos, o blinder resistivo do elemento quadrilateral adaptativo vai ser ativado para uma Rf que atenda a esta condição:

$$R_{app} < R_{set} \quad (26)$$

$$R_{app} = \text{Real}(KR) \cdot Rf \quad (27)$$

onde R_{set} é o ajuste do alcance resistivo. Alternativamente, podemos calcular R_{app} usando as correntes e tensões do relé para uma falta em m de acordo com (28).

$$R_{app} = \text{Real}(Z_{app}) - m \cdot \text{Real}(ZL1) \quad (28)$$

Para o sistema da Fig. 4, a Fig. 21 representa os valores de $Real(KR)$ como uma função de m com um valor constante de $Rset$. Os valores crescentes de $Real(KR)$ indicam que o valor máximo detectável de Rf , para condições sem carga, decresce à medida que a distância até a falta aumenta.

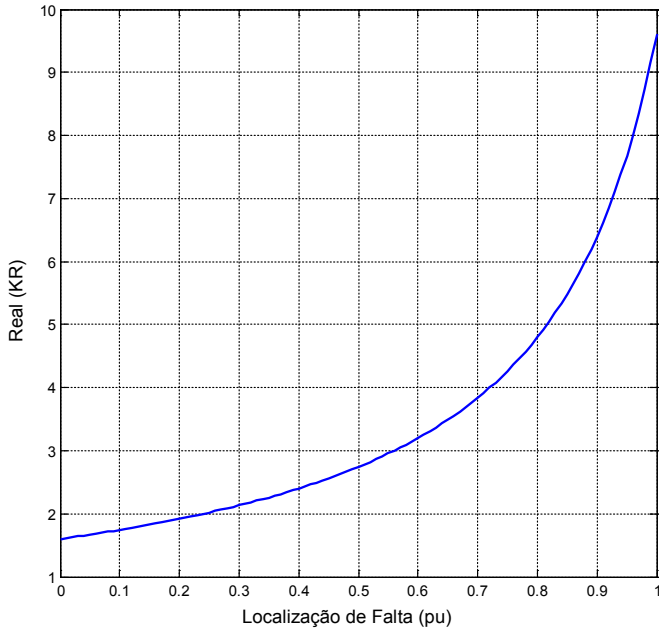


Fig. 21. Fator $Real(KR)$ para o sistema da Fig. 4

utra consideração que deve ser feita ao determinar o ajuste da cobertura resistiva envolve os erros no TP e TC (transformador de corrente). A referência [22] indica que pode ser assumido um erro angular composto, $\theta\epsilon$, na medição.

A. Zona 1

Para uma aplicação da Zona 1, o requisito é que a Zona 1 nunca sobrealcance para qualquer falta na extremidade da linha. Assumindo que para faltas resistivas na extremidade da linha existe um erro angular $\theta\epsilon$, o caminho efetivo para Rf crescente vai inclinar, para baixo, com um ângulo extra $\theta\epsilon$, conforme mostrado na Fig. 22. Para Rf crescente, a interseção com a linha reativa da Zona 1 é a indicação da máxima $Rset$ ou $Rmax$. Usando a lei dos senos e a trigonometria, $Rmax$ pode ser expressa como:

$$Rmax = \frac{\sin(\theta\epsilon + \theta LI)}{\sin(\theta\epsilon)} \cdot (1 - Zset_pu) \cdot |ZLI| \quad (29)$$

A equação (29) define $Rmax$, o ajuste do alcance resistivo máximo seguro da Zona 1, levando em conta os erros de medição do relé, TC, TP e $\theta\epsilon$. $Rmax$ é uma função do ajuste do alcance da impedância, $Zset$, da magnitude da impedância de sequência-positiva da linha $|ZLI|$ e ângulo θLI , e do erro angular total em radianos, $\theta\epsilon$ [22].

A Fig. 23 mostra a $Rmax$ pu como uma função de $Zset$ para θLI igual a 40, 55, 70 e 75 graus e $\theta\epsilon$ igual a 2 graus.

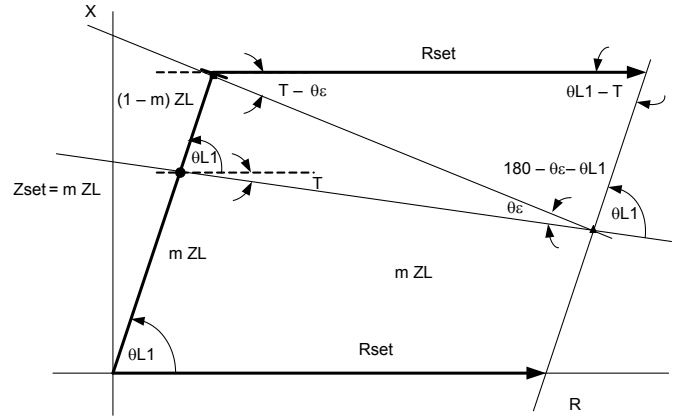


Fig. 22. Avaliação dos erros do TP e TC para a Zona 1

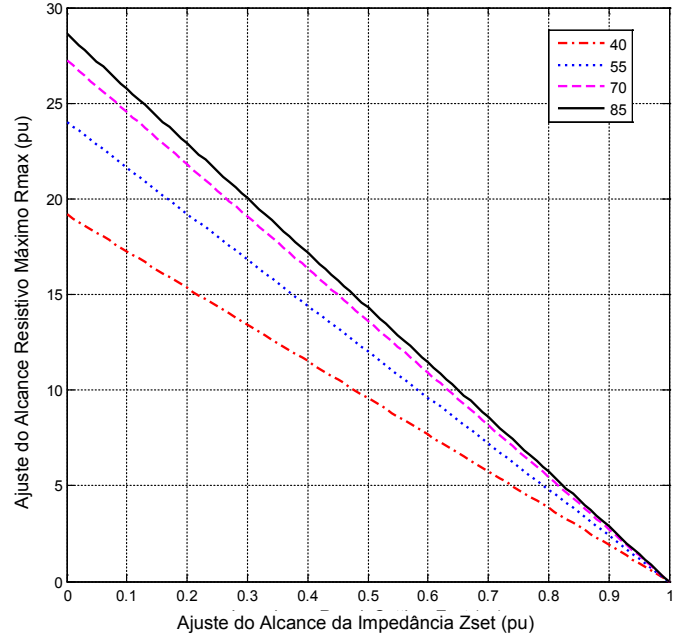


Fig. 23. Ajuste do alcance resistivo máximo como uma função do alcance da impedância devido aos erros de medição

Um ajuste típico do alcance da impedância da Zona 1 para linhas curtas é 70%. Para o sistema da Fig. 4, $Zset_zone1$ é igual a 1.4 ohm secundário.

Com $Zset$, $|ZLI|$, θLI e $\theta\epsilon$, podemos calcular $Rmax$ usando (29) ou obter o valor em pu, $Rmax_pu$, em relação à impedância total de sequência-positiva da linha da Fig. 23. Nesse caso, $Rmax$ é igual a 17.17 ohms secundários, ou $Rmax_pu$ é igual a 8.58 pu.

Adicionalmente, precisamos verificar se a corrente de falta está acima da máxima sensibilidade do relé. Nesse caso, a corrente residual é 3.0 A secundários e a sensibilidade do relé é 0.25 A. Portanto, o relé pode ver a falta em 70% da linha com Rf igual a 25 ohms primários.

A Fig. 24 mostra a resistência aparente para valores diferentes de R_f para uma falta a 70% da linha. Observe que com R_{set_zone1} igual a 11.52 ohms, o elemento quadrilateral pode ver 3 ohms secundários ou 25 ohms primários.

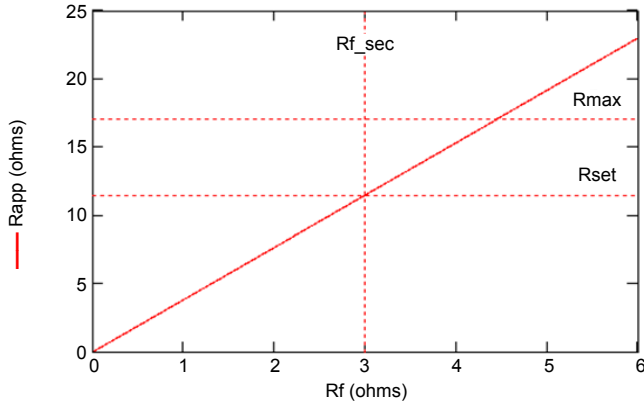


Fig. 24. Resistência aparente para uma falta a 70% da linha

A Fig. 25 mostra a margem da R_{set} selecionada em relação a R_{max} para a Z_{set} selecionada.

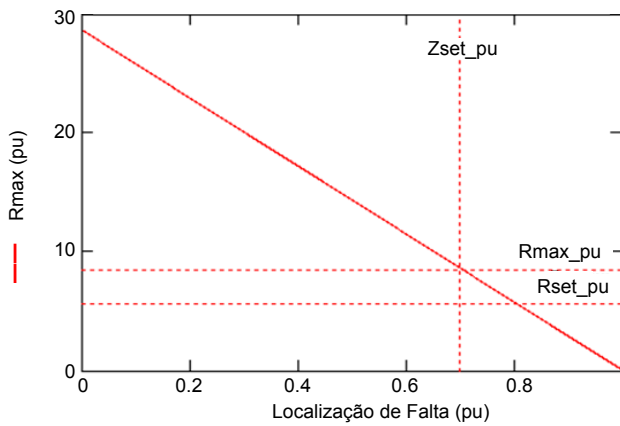


Fig. 25. Margem de R_{set} para Z_{set_zone1} igual a 0.7 pu

A Fig. 26 mostra que o elemento de distância quadrilateral pode ver até 3 ohms para faltas em 70% da linha para R_{set} igual a 11.52 ohms.

A análise efetuada para uma fase-terra pode também ser aplicada para faltas fase-fase. Nesses casos, o fator KR é igual a:

$$KR = \frac{1}{2 \cdot CI} \quad (30)$$

Para condições sem carga (δ igual a 0) e sistemas homogêneos, o blinder resistivo do elemento quadrilateral de fase vai ser ativado para uma R_f que satisfaça (31) ou (32).

$$\frac{R_f}{2 \cdot \text{Real}(CI)} < R_{set} \quad (31)$$

$$R_{app} = \text{Real}\left(\frac{V_{\phi\phi}}{I_{\phi\phi}}\right) - m \cdot \text{Real}(ZL1) \quad (32)$$

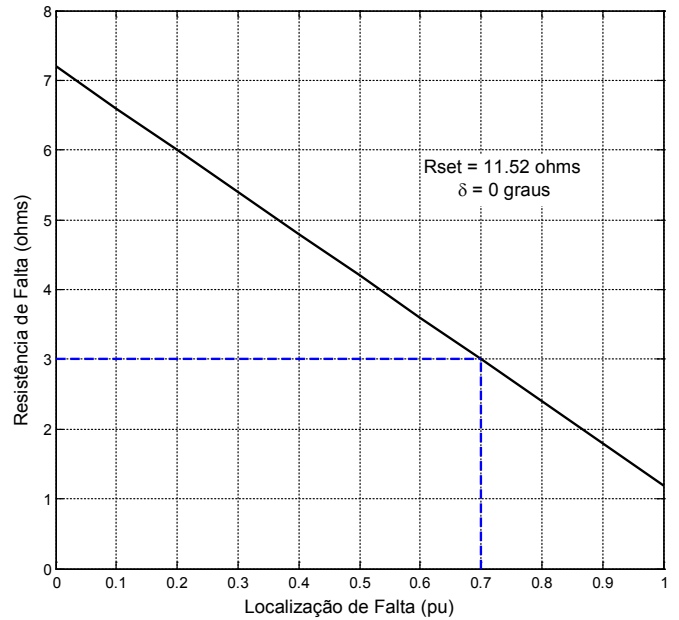


Fig. 26. Máxima cobertura de R_f com R_{set} igual a 11.5 ohms para faltas ao longo da linha

B. Zona 2

Ao considerar as zonas de sobrealcance, é importante determinar o subalcance máximo e verificar se a zona cobre pelo menos a R_f esperada. Por exemplo, na aplicação da Zona 2, espera-se que todas as faltas na linha, bem como aquelas no terminal remoto, sejam detectadas. É uma prática comum ajustar o alcance da Zona 2 em 120% do comprimento da linha. Em determinadas circunstâncias, contudo, este alcance da impedância não vai garantir cobertura para faltas com R_f , e um alcance maior será necessário.

A seguir, uma abordagem conservadora para ajustar a Zona 2 de forma a garantir que o elemento de sobrealcance veja todas as faltas com cobertura de valores específicos de R_f . A Fig. 27 mostra a resistência aparente para um sistema homogêneo e condições sem carga.

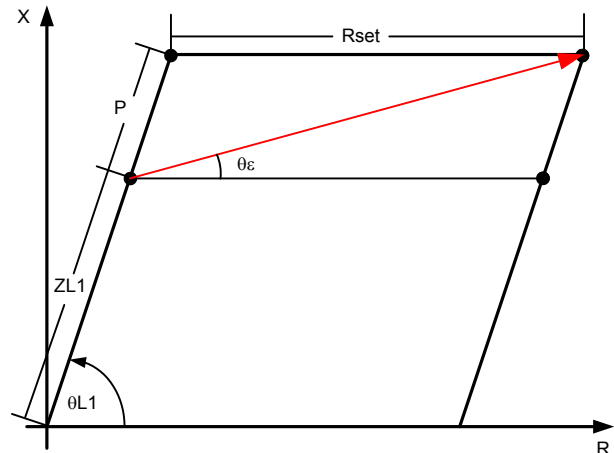


Fig. 27. Impedância aparente para uma falta na extremidade da linha considerando os erros de medição

A partir da Fig. 27, podemos estimar os ajustes do alcance resistivo requerido R_{set_zone2} e alcance da impedância Z_{set_zone2} de acordo com (33) e (34) para cobertura de uma R_f desejada.

$$R_{set_zone2} = \frac{\sin(\theta L1 + \theta \varepsilon)}{\sin(\theta L1)} \cdot \text{Real}(KR) \cdot R_f \cdot |e^{-j\theta \varepsilon}| \quad (33)$$

$$Z_{set_zone2} = |ZL1| - \frac{\sin(\theta \varepsilon)}{\sin(\theta L1 + \theta \varepsilon)} \cdot R_{set_zone2} \quad (34)$$

Podemos representar $R_{set_zone2_pu}$ como função de P_{pu} de acordo com (35). Esses valores são os valores normalizados de R_{set_zone2} e P (ver Fig. 27) em relação a $|ZL1|$.

$$R_{set_zone2_pu} = -\frac{\sin(\theta L1 + \theta \varepsilon)}{\sin(\theta \varepsilon)} \cdot P_{pu} \quad (35)$$

A Fig. 28 mostra $R_{set_zone2_pu}$ para $\theta L1$ igual a 40, 55, 70, e 85 graus e para $\theta \varepsilon$ igual a -2 graus.

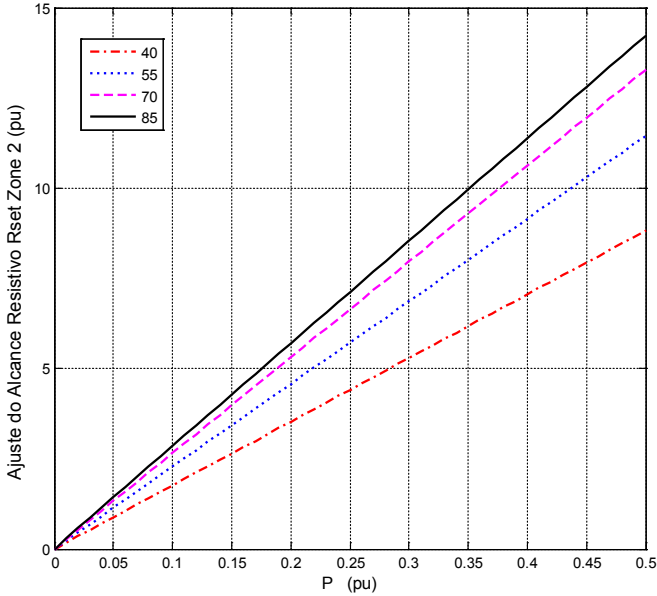


Fig. 28. Ajuste do alcance resistivo como uma função do ajuste do alcance da impedância para diversos valores de $\theta L1$

Para o relé da Fig. 4, calculamos R_{set_zone2} para uma R_f desejada igual a 3 ohms secundários. Usando (33) com $\theta \varepsilon$ igual a -2 graus e uma falta na extremidade da linha, obtemos R_{set_zone2} igual a 28.69 ohms secundários e $R_{set_zone2_pu}$ igual a 14.35 pu. A partir da Fig. 28, obtemos o valor requerido de P_{pu} e o alcance da impedância da Zona 2 $Z_{set_zone2_pu}$ igual a 1.5 ou 150% de $|ZL1|$.

V. DESEMPENHO DOS ELEMENTOS DE DISTÂNCIA

A. Características do Elemento de Distância Tradicional

Os elementos de distância quadrilaterais de fase e terra adaptativos foram projetados para melhorar a cobertura de R_f nas aplicações de linhas curtas. O relé de distância antigo incluía uma característica do elemento de distância quadrilateral de terra com um elemento de reatância adaptativo e dois elementos de

resistência que calculam R_f de acordo com (36) e uma característica de distância mho de terra com um elemento mho adaptativo que calcula a distância até a falta de acordo com (37) [12].

$$R_{relay1} = \frac{\text{Im} \left[V \cdot (I \cdot e^{j\theta L1})^* \right]}{\text{Im} \left[\frac{3}{2} \cdot (I2 + I0) \cdot (I \cdot e^{j\theta L1})^* \right]} \quad (36)$$

$$m_{relay1} = \frac{\text{Re} \left[V \cdot (V1_mem)^* \right]}{\text{Re} \left[I \cdot e^{j\theta L1} \cdot (V1_mem)^* \right]} \quad (37)$$

B. Elemento de Resistência Adaptativo

A Fig. 29 mostra a característica do elemento de distância quadrilateral que usa o elemento de reatância adaptativo do projeto anterior com um elemento resistivo adaptativo.

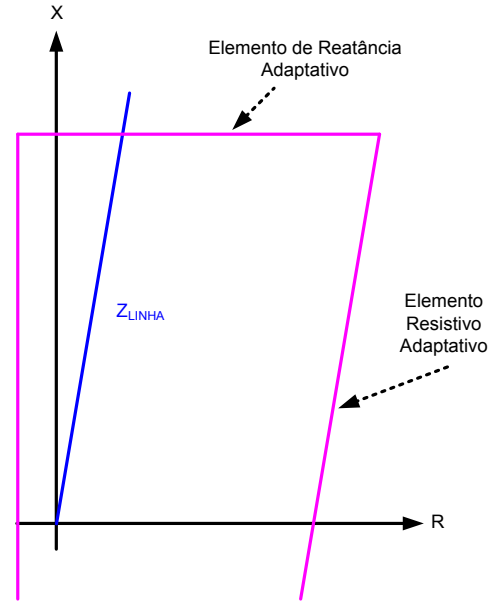


Fig. 29. Característica do elemento de distância quadrilateral com um elemento de resistência adaptativo

O elemento resistivo adaptativo calcula R_f de acordo com (38) e (39), e compara o mínimo dos dois resultados dos cálculos com o ajuste resistivo.

$$R2 = \frac{\text{Im} \left[V \cdot (I2 \cdot e^{j\theta L1})^* \right]}{\text{Im} \left[I \cdot (I2 \cdot e^{j\theta L1})^* \right]} \quad (38)$$

$$R\alpha = \frac{\text{Im} \left[V \cdot (I\alpha \cdot e^{j\theta L1})^* \right]}{\text{Im} \left[I \cdot (I\alpha \cdot e^{j\theta L1})^* \right]} \quad (39)$$

A equação (38) é equivalente a (11) e (12). Ela usa uma forma diferente da equação do comparador de fases. A equação (39) usa o componente alfa ($I\alpha = I1 + I2$).

C. Cobertura Resistiva

Para comparar a cobertura resistiva dos tradicionais elementos de distância com o elemento resistivo adaptativo, usamos o sistema da Fig. 4 e efetuamos os testes discutidos nas seções seguintes.

1) Falhas em Múltiplas Localizações

Calculamos a máxima R_f que os elementos de distância podem detectar para uma falta fase A-terra para valores de m entre 0 e 1 e ângulos de carga de δ iguais a $-10, 0$ e 10 graus. Os elementos de distância quadrilaterais têm um ajuste do alcance resistivo (R_{set}) de 11.52 ohms e um ajuste do alcance da impedância (Z_{set}) de 120% de Z_{LI} . O elemento de distância mho tem um alcance de 120% de Z_{LI} . A sensibilidade de todos os elementos de distância é $0.05 \cdot I_{nom}$.

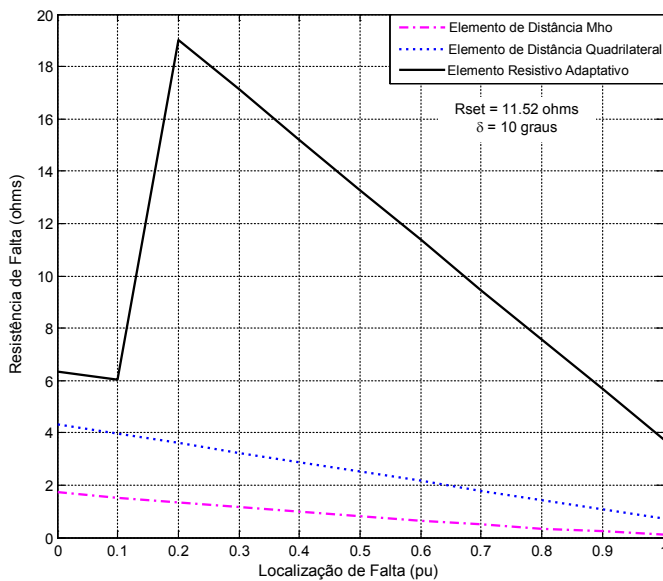


Fig. 30. Cobertura de R_f dos elementos de distância mho e quadrilateral para δ igual a -10 graus

A Fig. 30, Fig. 31, e a Fig. 32 mostram a cobertura de R_f dos elementos de distância mho e quadrilateral. Observe que a cobertura de R_f é severamente reduzida à medida que a falta se aproxima da extremidade da linha. Conforme esperado, o elemento mho é o que tem a menor cobertura de R_f e o elemento de resistência adaptativo tem a maior cobertura de R_f , especialmente para fluxo de potência na direção à frente, δ igual a 10 graus.

2) Falhas para m Igual a 0.7 e Múltiplos Ângulos de Carga

Calculamos a cobertura de R_f para uma falta a 70% da linha e diferentes ângulos de carga (ver Fig. 33). O elemento de resistência adaptativo tem a maior cobertura de R_f , enquanto o elemento mho tem a menor cobertura de R_f .

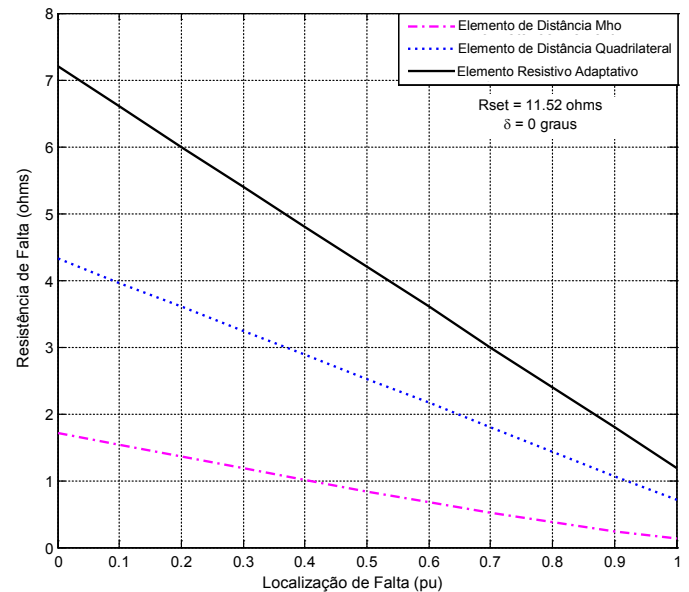


Fig. 31. Cobertura de R_f dos elementos de distância mho e quadrilateral para δ igual a 0 grau

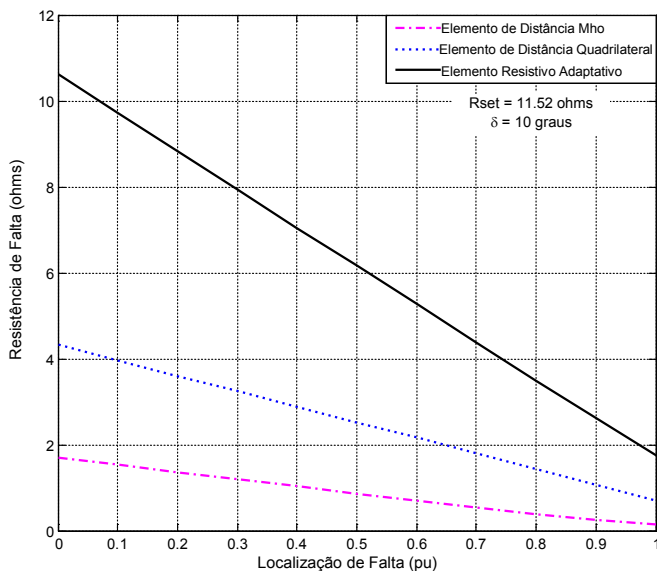


Fig. 32. Cobertura de R_f dos elementos de distância mho e quadrilateral para δ igual a 10 graus

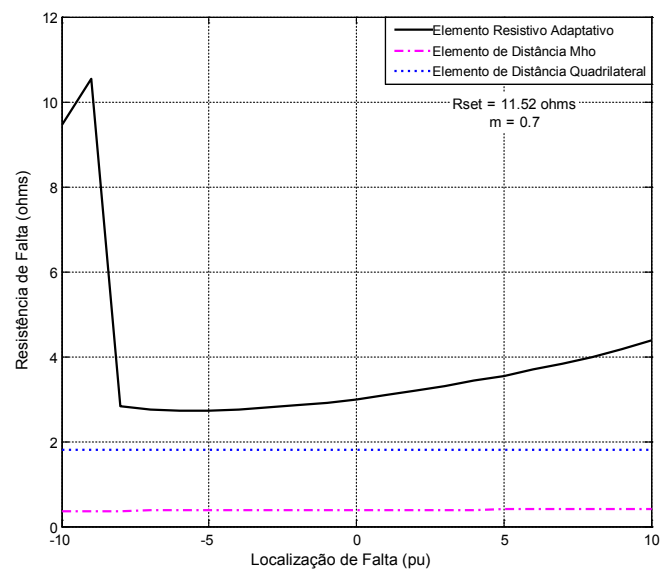


Fig. 33. Cobertura de R_f para faltas a 70% da linha com diferentes ângulos de carga

D. Comportamento Adaptativo

Uma característica quadrilateral cuidadosamente projetada deve ter uma linha de reatância adaptativa para evitar o sobrealcançe devido à carga na direção à frente e R_f . Além disso, este artigo apresentou o conceito de uma linha resistiva adaptativa que é inclinada benéficamente para detectar mais R_f .

Duas figuras serão usadas para ilustrar o comportamento adaptativo da linha reativa. A Fig. 34 ilustra uma falta à terra detectada no terminal com fluxo de carga para a frente. A Fig. 35 mostra a mesma falta, com a mesma R_f , detectada no outro terminal (ou seja, o terminal com fluxo de carga na direção reversa).

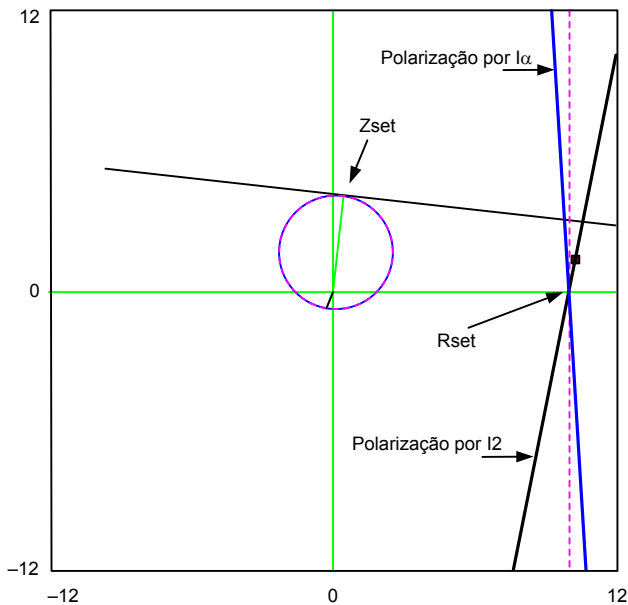


Fig. 34. Exemplo de uma falta à terra detectada no terminal com fluxo de carga na direção à frente

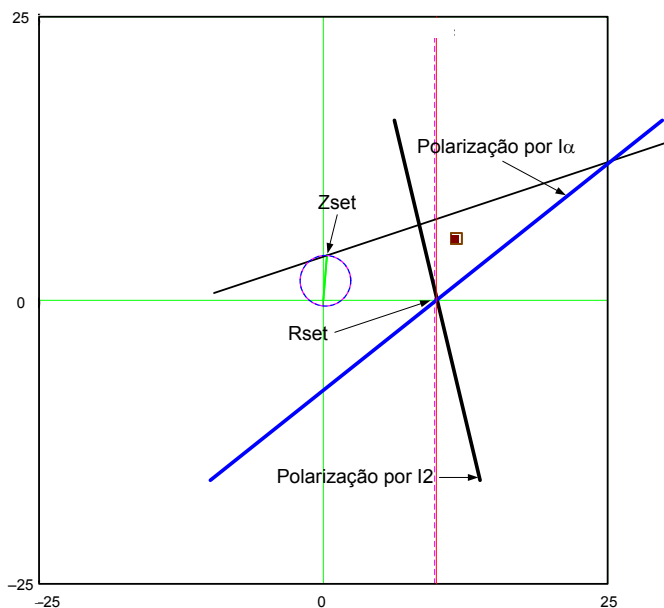


Fig. 35. Exemplo de uma falta à terra detectada no terminal com fluxo de carga na direção reversa

A Fig. 34 e Fig. 35 ilustram o comportamento adaptativo do elemento de distância quadrilateral. Uma vez que essas figuras têm propósito ilustrativo, as impedâncias do sistema de potência, localização da falta e/ou valor de R_f não são relevantes para a discussão. Essas duas figuras simplesmente ilustram o comportamento adaptativo das linhas de reatância e resistiva.

O tipo da falta é uma falta à terra; e o elemento quadrilateral de terra é formado por uma linha de reatância polarizada por corrente de sequência-negativa (a polarização preferida). Os dois elementos de resistência são polarizados por sequência-negativa (I_2) e pelo componente alfa ($I_1 + I_2$). A polarização é que torna as linhas adaptativas, conforme explicado nas seções anteriores.

A Fig. 34 e Fig. 35 fornecem informações importantes sobre o comportamento dessas linhas de impedância, incluindo o seguinte:

- O elemento de reatância gira em torno do alcance da impedância da linha, e tal ponto é fixo. Os elementos de resistência giram em torno do alcance resistivo, que é um ajuste.
- O grau com que essas linhas são inclinadas é determinado pelas condições de operação e parâmetros do sistema de potência. Isso inclui as impedâncias da linha, fluxo de carga e R_f .
- O círculo mho e a linha de reatância são inclinados ao mesmo tempo e na mesma direção.

A decisão de trip do elemento de resistência é a combinação OU de qualquer linha resistiva. Seu comportamento depende da direção do fluxo de carga e sua operação é complementar (uma com a outra).

Para o terminal com fluxo de carga na direção à frente da Fig. 34, concluímos:

- O elemento de reatância é inclinado benéficamente no sentido horário. Este comportamento evita o sobrealcançe devido à alta resistência do fluxo de carga.
- O elemento de resistência polarizado por corrente de sequência-negativa vai se adaptar para fornecer uma melhor cobertura do alcance resistivo. Esta linha resistiva vai tomar a decisão para faltas com carga na direção à frente.
- O elemento de resistência polarizado pela corrente do componente alfa é inclinado na direção oposta. A cobertura resistiva desta característica é menos efetiva se comparada à outra linha resistiva.

Para o terminal com fluxo de carga na direção reversa da Fig. 35, concluímos:

- O elemento de reatância se move na direção em que o lugar geométrico da impedância aparente se movimenta, conforme mostrado na Fig. 10.
- O elemento de resistência polarizado por corrente de sequência-negativa move-se na direção oposta e com menor cobertura resistiva.
- O elemento de resistência polarizado pelo componente alfa fornece uma cobertura mais efetiva e vai detectar a falta.

VI. CONCLUSÕES

Faltas no sistema de potência apresentam diferentes valores de R_f . Faltas à terra apresentam valores maiores de R_f em função da resistência de arco e resistência de pé de torre.

Nas aplicações de proteção de linhas curtas com elementos de distância, recomenda-se o uso de elementos de distância quadrilaterais para proteção contra faltas à terra e entre fases. O valor esperado de R_f para linhas curtas pode ser da mesma ordem de magnitude da impedância da linha de transmissão.

R_f e o fluxo de potência têm o efeito de modificar a impedância aparente medida pelos elementos de distância. A descrição da influência de R_f foi plotada para diferentes valores de R_f e fluxos de carga.

Especialmente para linhas curtas, os elementos de distância quadrilaterais podem detectar faltas com R_f maior do que os elementos de distância mho. Os erros nos transformadores de instrumento e na medição do relé limitam a cobertura de R_f nas aplicações de linhas curtas.

Uma característica adaptativa para os elementos de distância quadrilaterais de fase e terra foi apresentada. O elemento de reatância, polarizado por corrente de sequência- negativa, adapta-se com base na direção do fluxo de carga e evita problemas de sobrealcançe associados ao fluxo de carga na direção à frente. Os elementos de resistência são polarizados por duas grandezas simultaneamente. A polarização por sequência-negativa tem uma cobertura melhor de R_f para fluxo de carga à frente. O uso do distância de terra (componente alfa) e distância de fase (componente de sequência-positiva) fornece melhor cobertura para faltas com fluxo de carga reverso. Para os elementos de resistência, efetuar duas polarizações ao mesmo tempo ajuda a detectar o máximo possível de R_f .

Uma versão em alta velocidade dos elementos quadrilaterais normalmente melhora a velocidade de operação em meio ciclo. Esses elementos são necessários nas aplicações que requerem tempos de abertura extremamente rápidos. Esses elementos fornecem tempos de operação da ordem de subciclos e operam de forma confiável durante condições de pólo aberto.

O artigo apresentou um elemento de distância avançado com uma característica quadrilateral adaptativa que pode ser parte de um relé de proteção de linhas.

O desempenho do elemento de distância quadrilateral adaptativo foi comparado à implementação quadrilateral anterior, mostrando os benefícios. Uma ilustração gráfica do desempenho esperado das linhas de reatância e resistiva foi apresentada com um exemplo na Fig. 34 e Fig. 35.

A cobertura de R_f do elemento quadrilateral adaptativo aumenta nos terminais com fluxo de carga na direção à frente.

Os elementos de distância quadrilaterais de fase apresentados neste artigo são adequados para qualquer aplicação de linhas de transmissão; porém, devido à sua natureza, eles se adaptam melhor às aplicações de linhas curtas. Nenhum elemento de distância, contudo, pode fornecer melhor sensibilidade e

cobertura de R_f do que os elementos de sobrecorrente direcionais em um esquema piloto.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] S. Ward, "Comparison of Quadrilateral and Mho Distance Characteristic," proceedings of the 26th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1999.
- [2] J. Holbach, V. Vadlamani, and Y. Lu, "Issues and Solutions in Setting a Quadrilateral Distance Characteristic," proceedings of the 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2008.
- [3] J. Mooney and J. Peer, "Application Guidelines for Ground Fault Protection," proceedings of the 24th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1997.
- [4] S. Sebo, "Zero-Sequence Current Distribution Along Transmission Lines," IEEE Transactions on Apparatus and Systems, PAS-88, Issue 6, June 1969.
- [5] G. Swift, D. Fedirchuk, and T. Ernst, "Arcing Fault 'Resistance' (It Isn't)," proceedings of the Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference, Atlanta, GA, May 2003.
- [6] H. Khodr, A. Menacho e Moura, and V. Miranda, "Optimal Design of Grounding System in Transmission Line," proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, November 2007.
- [7] V. Terzija and H. Koglin, "New Approach to Arc Resistance Calculation," IEEE PES Winter Meeting, Vol. 2, 2001.
- [8] L. Popovic, "A Digital Fault-Location Algorithm Taking Into Account the Imaginary Part of the Grounding Impedance at the Fault Place," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, Issue 4, October 2003.
- [9] F. Calero, "Distance Elements: Linking Theory With Testing," proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2008.
- [10] J. Roberts, E. O. Schweitzer, III, R. Arora, and E. Poggi, "Limits to the Sensitivity of Ground Directional and Distance Protection," proceedings of the 1997 Spring Meeting of the Pennsylvania Electric Association Relay Committee, Allentown, PA, May 1997.
- [11] J. Roberts, A. Guzmán, and E. O. Schweitzer, III, "Z = V/I Does Not Make a Distance Relay," proceedings of the 20th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1993.
- [12] E. O. Schweitzer, III and J. Roberts, "Distance Relay Element Design," proceedings of the 46th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 1993.
- [13] *SEL-421 Instruction Manual*. Available: <http://www.selinc.com>.
- [14] A. Guzmán, J. Mooney, G. Benmouyal, and N. Fischer, "Transmission Line Protection System for Increasing Power System Requirements," proceedings of the 55th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2002.
- [15] G. Benmouyal and J. Roberts, "Superimposed Quantities: Their True Nature and Application in Relays," proceedings of the 26th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1999.
- [16] D. Tziouvaras and D. Hou, "Out-of-Step Protection Fundamentals and Advancements," proceedings of the 30th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2003.
- [17] J. Mooney and N. Fischer, "Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
- [18] G. Benmouyal, D. Tziouvaras, and D. Hou, "Zero-Setting Power-Swing Blocking Protection," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2004.
- [19] H. Altuve, J. Mooney, and G. Alexander, "Advances in Series-Compensated Line Protection," proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2008.

- [20] J. Mooney and G. Alexander, "Applying the SEL-321 Relay on Series-Compensated Systems," SEL Application Guide AG2000-11. Available: <http://www.selinc.com>.
- [21] F. Plumtre, M. Nagpal, X. Chen, and M. Thompson, "Protection of EHV Transmission Lines With Series Compensation: BC Hydro's Lessons Learned," proceedings of the 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2009.
- [22] E. O. Schweitzer, III, K. Behrendt, and T. Lee, "Digital Communications for Power System Protection: Security, Availability and Speed," proceedings of the 25th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1998.

VIII. BIOGRAFIAS

Fernando Calero recebeu seu BSEE em 1986 da University of Kansas, seu MSEE em 1987 da University of Illinois (Urbana-Champaign) e seu MSEPE em 1989 do Rensselaer Polytechnic Institute. De 1990 a 1996, ele trabalhou em Coral Springs, Flórida, na divisão de relés da ABB, nas áreas de projetos, testes, treinamento e suporte de relés de proteção. Entre 1997 e 2000, trabalhou para a Itec Engineering, Florida Power and Light, e Siemens. Desde 2000, Fernando tem trabalhado como engenheiro de aplicação em marketing e vendas internacionais na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., fornecendo treinamento e assistência técnica.

Armando Guzmán recebeu seu BSEE com louvor da Guadalajara Autonomous University (UAG), México. Ele recebeu um diploma em engenharia de fibra óptica do Monterrey Institute of Technology and Advanced Studies (ITESM), México, e seu MSEE da University of Idaho, USA. Efetuou palestras na UAG e University of Idaho sobre estabilidade de sistemas de potência e proteção de sistemas de potência. Desde 1993, Armando integra a equipe da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., em Pullman, Washington, onde é o gerente da área de engenharia de pesquisas. Ele detém diversas patentes nas áreas de medição e proteção de sistemas de potência. É membro sênior do IEEE.

Gabriel Benmouyal, P.E. recebeu seu BASc em engenharia elétrica e seu MASc em engenharia de controle da Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá, em 1968 e 1970. Em 1969, ele começou a trabalhar da Hydro-Québec como especialista em instrumentação e controle. Trabalhou em diferentes projetos nas áreas de sistemas de controle de subestações e centros de despacho. Em 1978, foi para a IREQ, onde sua principal área de trabalho foi a aplicação de técnicas digitais e microprocessadores para sistemas de proteção e controle de subestações de linhas e usinas. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro responsável pela área de pesquisas. Gabriel é membro sênior do IEEE, um engenheiro profissional com registro na Province of Québec, e atende ao Power System Relaying Committee desde maio de 1989. Ele detém mais de seis patentes e é autor e co-autor de diversos papers nas áreas de proteção e controle de sistemas de potência e processamento de sinais.