

# RENASCIMENTO DAS GRANDEZAS DE SEQÜÊNCIA-NEGATIVA EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO COM RELÉS MICROPROCESSADOS

Fernando Calero  
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.  
La Paz, Bolívia

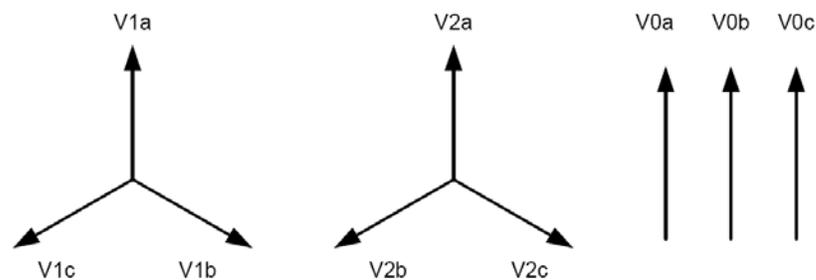
## RESUMO

Este *paper* enfoca o uso das grandezas de seqüência-negativa nos sistemas de proteção. A ênfase é dada aos relés numéricos, uma vez que eles facilitaram o cálculo das componentes simétricas. As grandezas de seqüência-negativa (tensão e corrente designadas por  $V_2$  e  $I_2$ ) são muito úteis nos sistemas de proteção. A simplicidade no cálculo dessas grandezas, que é efetuado pelos relés numéricos modernos, reforçou o seu uso na teoria e nos métodos utilizados pelos dispositivos atuais dos sistemas de proteção.

Este artigo começa com a análise de algumas implementações de filtros de seqüência-negativa nos relés antigos. Em seguida, uma breve revisão das componentes simétricas e uma análise de faltas desequilibradas no sistema de potência. Essa revisão leva a uma discussão sobre as características das grandezas de seqüência-negativa e apresenta algumas ilustrações de como essas grandezas são usadas nos relés de proteção. Tendo em vista que a discussão geralmente envolve a teoria de componentes simétricas, o *paper* faz referência às outras duas componentes simétricas (seqüência-positiva e seqüência-zero).

## INTRODUÇÃO

Um grupo de três fasores (por exemplo, tensões de fase  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ) pode ser representado por três grupos de componentes (seqüência-positiva, seqüência-negativa e seqüência-zero), de forma que dois dos grupos de componentes (positiva e negativa) sejam equilibrados e o outro grupo (zero) seja composto por três fasores iguais.



**Figura 1** Componentes de Seqüência-Positiva, Seqüência-Negativa e Seqüência-Zero

A Figura 1 mostra os três grupos de fasores. Teoricamente, o grupo de seqüência-positiva é o único presente durante operação equilibrada do sistema de potência. A presença das componentes de seqüência-negativa e seqüência-zero indica uma operação desequilibrada do sistema de potência e faltas no sistema de potência.

Todas as grandezas trifásicas do sistema de potência podem ser representadas pelo somatório das componentes simétricas. Por exemplo, as tensões de fase podem ser expressas em termos de suas componentes simétricas, conforme mostrado nas Equações (1), (2) e (3).

$$V_a = V_{1a} + V_{2a} + V_{0a} \quad (1)$$

$$V_b = V_{1b} + V_{2b} + V_{0b} \quad (2)$$

$$V_c = V_{1c} + V_{2c} + V_{0c} \quad (3)$$

Usando o operador “a” ( $a = e^{j120^\circ}$ ), podemos representar as grandezas de fase em termos das componentes da fase A, conforme mostrado na matriz da Equação (4).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{0a} \\ V_{1a} \\ V_{2a} \end{bmatrix} \quad (4)$$

As Equações 1, 2 e 3 permitem o cálculo das grandezas de fase para componentes simétricas conhecidas. Calculando as componentes simétricas, para valores de fase conhecidos (calculando o inverso da matriz da equação (4)), leva às seguintes expressões:

$$V_{0a} = 1/3(V_a + V_b + V_c)$$

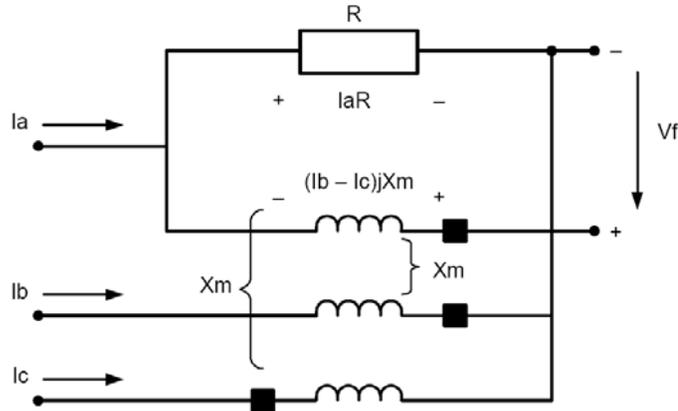
$$V_{1a} = 1/3(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_{2a} = 1/3(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

Na literatura, o sufixo “a” é omitido pois as componentes da fase A são a referência, e as componentes são denominadas por V0, V1 e V2.

## FILTROS DE SEQÜÊNCIA NOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés numéricos introduziram funções que já eram anteriormente desejadas, porém sua implementação era difícil nas tecnologias anteriores. Uma dessas funções é o cálculo das grandezas de seqüência-negativa a partir das tensões e correntes trifásicas medidas. Os filtros de seqüência-negativa das tecnologias eletromecânicas e de estado sólido não podem competir com a simplicidade dos filtros numéricos dos modernos relés numéricos. Um exemplo de um filtro de seqüência-negativa usado nos relés eletromecânicos está representado na Figura 2 [1].

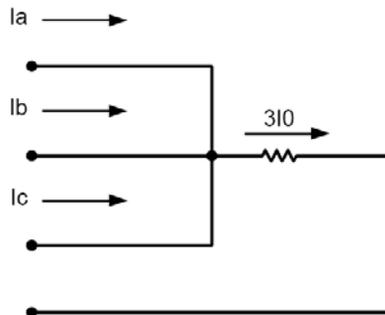


**Figura 2** Filtro de Seqüência-Negativa em um Relé Eletromecânico

A saída do filtro é uma tensão proporcional à componente de seqüência-negativa das correntes:

$$V_f = I_a R + (I_b - I_c) j X_m$$

$X_m$  é a reatância mútua e as escolhas para  $R$  e  $X_m$  são tais que  $X_m = R / \sqrt{3}$ . Se aplicarmos somente correntes de seqüência-positiva ( $I_a, I_b = a^2 I_a$  e  $I_c = a I_a$ ), a saída do filtro é zero ( $V_f = 0$ ). Quando são aplicadas correntes de seqüência-negativa ( $I_a, I_b = a I_a$  e  $I_c = a^2 I_a$ ), a saída do filtro tem um valor proporcional à componente de seqüência-negativa ( $V_f = 2RI_2$ ). A saída,  $V_f$ , é a entrada para a unidade de medição eletromecânica. Tendo em vista que não há retorno de neutro para as correntes de entrada, o filtro não responde às componentes de seqüência-zero. A Figura 2 é um exemplo típico da inventividade e engenhosidade demonstradas pelos projetistas dos sistemas de proteção de unidades eletromecânicas.

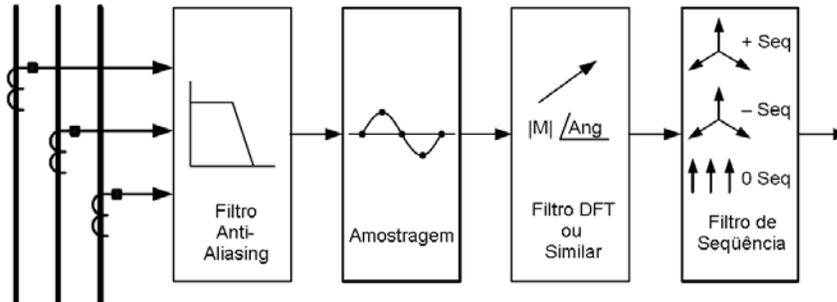


**Figura 3** Filtro de Seqüência-Zero

A obtenção das grandezas de seqüência-zero não era um problema pois a componente ( $3I_0$ , por exemplo) não precisa ser defasada através do operador “a”. A Figura 3 mostra um filtro de seqüência-zero. A soma das três correntes é proporcional à componente de seqüência-zero do grupo de correntes de fase. Se uma unidade de medição precisasse da corrente de seqüência-zero, isso seria fornecido diretamente.

As componentes de seqüência-zero e as componentes de seqüência-negativa são ambas indicações mensuráveis de condições anormais. Entretanto, a complexidade para implementação do filtro de seqüência-zero é substancialmente menor do que para o filtro de seqüência-negativa mostrado na Figura 2. Embora fosse possível medir e utilizar as grandezas de seqüência-negativa nos relés eletromecânicos, as técnicas necessárias para os filtros de seqüência-negativa eram muito caras; as grandezas de seqüência-zero eram mais fáceis de serem medidas.

A tecnologia de estado sólido nos dispositivos de proteção proporcionou algumas vantagens como equipamentos menores e mais funcionalidade no espaço do painel. Entretanto, a implementação de filtros para grandezas de seqüência-negativa ainda era complicada. Circuitos baseados em defasagens com amplificadores operacionais, ou outros componentes de estado sólido, capacitores e resistores foram usados para implementar as defasagens necessárias para o operador “a” ( $a = e^{j120^\circ}$ ).



**Figura 4** Processos para Obtenção das Grandezas de Seqüência em um Relé Numérico

Os relés numéricos proporcionaram um grande número de vantagens bem conhecidas e de novas funções para os sistemas de proteção. Um dos benefícios ocultos é a simplicidade e precisão para calcular as componentes simétricas a partir das grandezas de fase. Um processo matemático mais simples e mais compreensível ocorre no subsistema A/D (analogico para digital) e no firmware do equipamento, conforme mostrado na Figura 4. As entradas de corrente ou tensão são introduzidas em um filtro *anti-aliasing* para condicionar as grandezas de fase. Os relés de proteção numéricos são sistemas de dados por amostragem, de forma que o bloco de amostragem da figura indica a aquisição de amostras instantâneas das grandezas de fase. Um filtro digital baseado nas técnicas de Fourier calcula a componente fundamental a partir das amostras capturadas na memória do equipamento. Essa componente fundamental é indicada por uma grandeza fasorial com uma magnitude ( $|M|$ ) e um ângulo, ou pelas componentes real e imaginária. Como exemplo, o popular filtro co-seno (uma variação DFT), com uma taxa de amostragem de 4 amostras por ciclo, calcula o fasor da seguinte maneira:

$$I_{real_k} = 1/4(I_k - I_{k-1} - I_{k-2} + I_{k-3})$$

$$I_{imag_k} = I_{real_{k-1}}$$

Um filtro de seqüência de um relé de proteção numérico é uma técnica matemática simples que implementa as equações para as componentes simétricas, descritas acima, com os recursos matemáticos de um microprocessador [2].

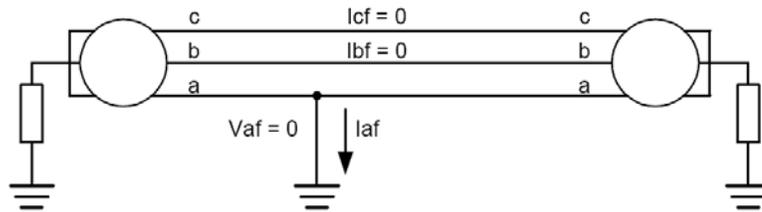
O procedimento é parte do *loop* contínuo no firmware do equipamento. É mais simples e mais preciso do que os circuitos complexos das tecnologias antigas. Além disso, os poderosos recursos matemáticos dos processadores modernos permitem que o projetista calcule todas as componentes por fase (por exemplo, I2a, I2b e I2c).

O processamento de sinais, executado nos relés numéricos modernos, possibilita que o relé faça medições, de forma equivalente, das grandezas de seqüência-zero e grandezas de seqüência-negativa, sem aumentar a carga ou o custo dos processadores. No firmware de um relé numérico, o cálculo das componentes de seqüência-negativa não é mais difícil do que o cálculo das componentes de seqüência-zero.

## ANÁLISE CONVENCIONAL DAS COMPONENTES SIMÉTRICAS DE SISTEMAS TRIFÁSICOS

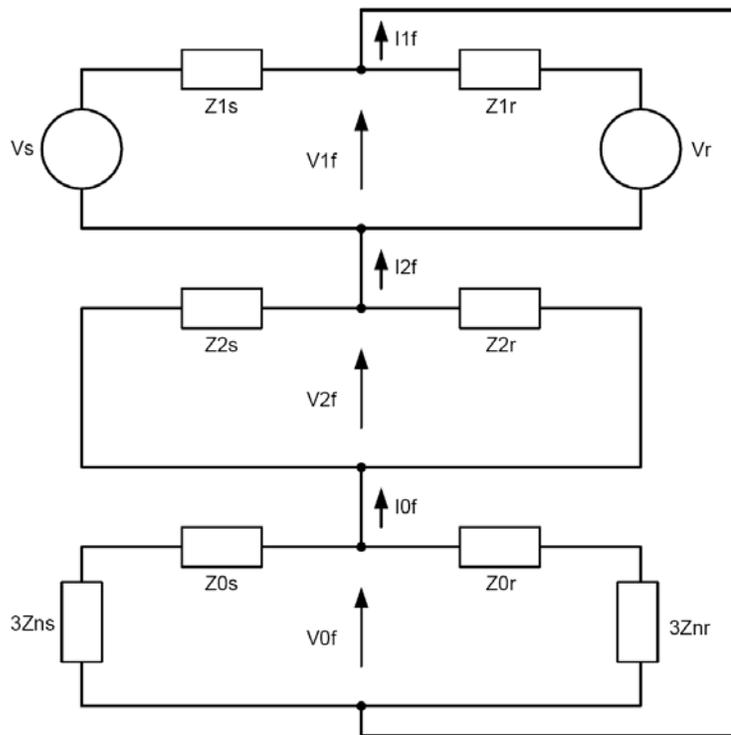
Usando as componentes simétricas, podemos analisar a distribuição das correntes e tensões no sistema de potência durante condições de desbalanço [1][3]. Como revisão, dois exemplos sucintos ilustram a formulação da conexão do diagrama de seqüências.

A falta da fase A para terra da Figura 5 é um exemplo de um desbalanço “shunt” no sistema de potência.



**Figura 5** Falta da Fase A para Terra

No ponto da falta,  $V_{af} = 0$ . Isso indica que as componentes simétricas da tensão de falta na fase A somam zero, isto é,  $V_{af} = 0 = V_{1f} + V_{2f} + V_{0f}$ . As componentes simétricas da corrente de falta podem ser obtidas observando que  $I_{bf} = I_{cf} = 0$ . Isso indica que  $I_{1f} = I_{2f} = I_{0f} = (1/3) I_{af}$ .

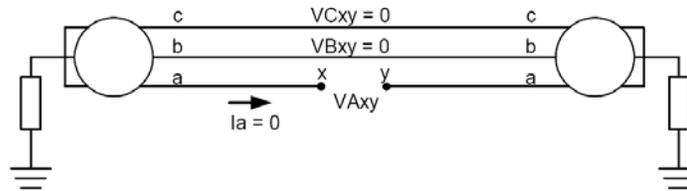


**Figura 6** Conexão do Diagrama de Seqüências para uma Falta da Fase A para Terra

A Figura 6 ilustra o diagrama que atende os dois requisitos para a distribuição das correntes e tensões. Observe o seguinte:

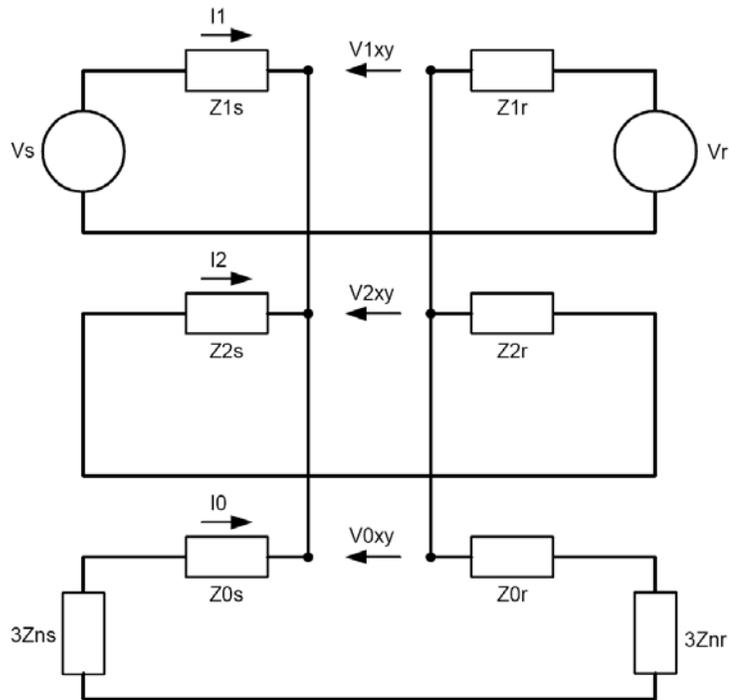
- Existem três subdiagramas representando os equivalentes de seqüência-positiva, seqüência-negativa e seqüência-zero. Esses diagramas representam a distribuição das respectivas componentes através do sistema de potência.
- Os diagramas de seqüência-positiva e seqüência-negativa são basicamente iguais, exceto pelos equivalentes do gerador presentes somente no diagrama de seqüência-positiva. As fontes geram grandezas de seqüência-positiva; as grandezas de seqüência-negativa que um gerador produz são desprezíveis.
- As impedâncias de seqüência-negativa são mais homogêneas do que as impedâncias de seqüência-zero; isso significa que os ângulos das impedâncias do diagrama são muito similares. No diagrama de seqüência-zero, o retorno pela terra é sempre considerado. Isso torna as impedâncias dessa seqüência dependentes da resistividade de terra do terreno, do tipo de aterramento do sistema de potência e da conexão dos transformadores trifásicos. A Figura 6 apresenta as diferentes possibilidades de aterramento em ambas as extremidades do sistema com  $Z_{ns}$  e  $Z_{nr}$ .

A Figura 7 mostra uma condição de desbalanço diferente. Uma fase A aberta no sistema de potência é o desbalanço “série”.



**Figura 7** Fase A Aberta

No circuito,  $I_a = 0$ . Isso significa que  $I_a = 0 = I_1 + I_2 + I_0$ . No ponto da falta,  $V_{Bxy} = V_{Cxy} = 0$ . Isso significa que  $V_{1xy} = V_{2xy} = V_{0xy} = (1/3)V_{Axy}$ . A conexão do diagrama de seqüências para este desbalanço está mostrada na Figura 8.

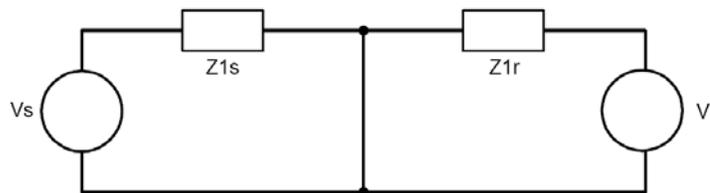


**Figura 8** Conexão do Diagrama de Seqüências com a Fase A Aberta

As mesmas observações sobre a Figura 6 podem ser feitas para a Figura 8. As diferentes formas com que os diagramas de seqüência estão interconectados possibilitam o estudo da distribuição das tensões e correntes de seqüência através do diagrama. Uma condição de fase aberta, como a mostrada na Figura 8, gera componentes de seqüência-negativa e seqüência-zero.

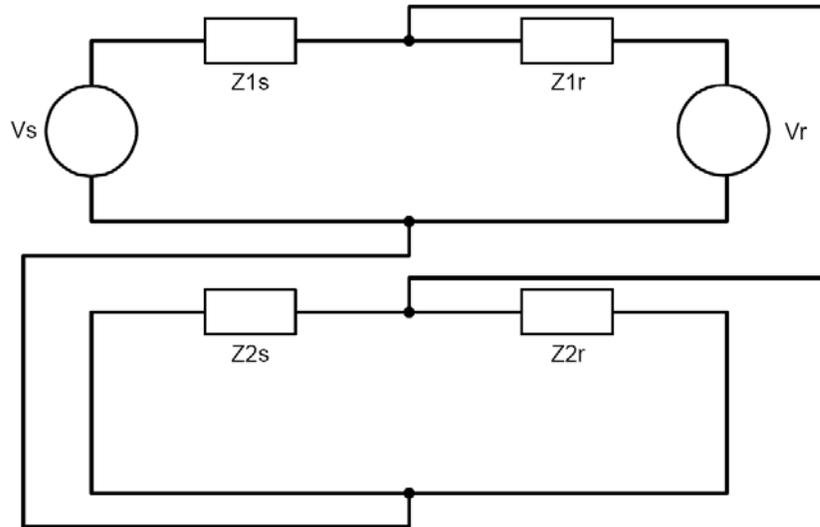
### CONEXÃO DO DIAGRAMA DE SEQÜÊNCIAS PARA DIFERENTES TIPOS DE FALTAS [1][3]

Usando a fase A como referência, podemos analisar as diversas faltas *shunt* possíveis no sistema de potência. A análise é a mesma que a descrita acima para os desbalanços da falta da fase A para terra e da fase A aberta. Quando as fases B ou C forem usadas como referência, a análise é bem similar.



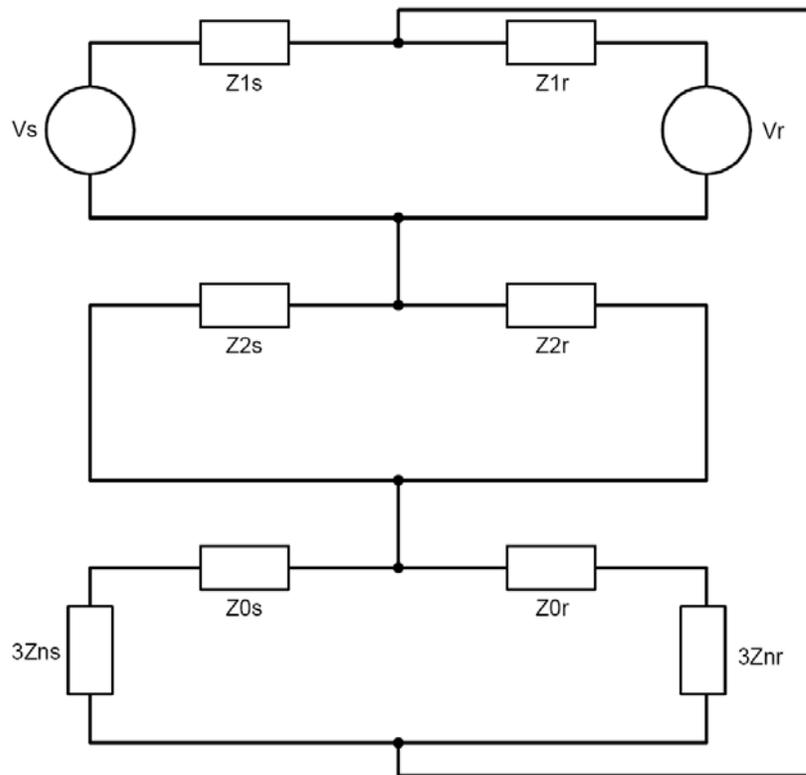
**Figura 9** Falta Trifásica

Uma falta trifásica no sistema de potência não é, na realidade, um desbalanço; entretanto, ela pode ser analisada como tal. A Figura 9 mostra uma conexão do diagrama de seqüências para uma falta trifásica. Essa é a única falta que não envolve as grandezas de seqüência-negativa.



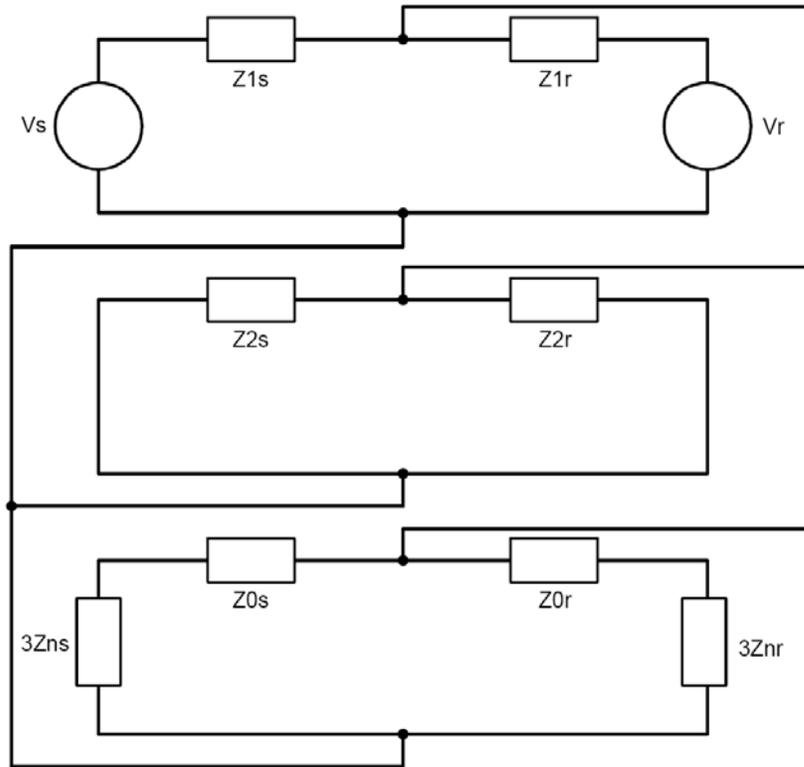
**Figura 10** Falta BC

Uma falta fase-fase envolve os diagramas de seqüência-positiva e seqüência-negativa. A Figura 10 mostra a conexão do diagrama de seqüências.



**Figura 11** Falta da Fase A para Terra

Para uma falta da fase A para terra, os diagramas de seqüência estão em série, conforme mostrado na Figura 11.



**Figura 12** Falta das Fases B-C para Terra

Para uma falta fase-fase-terra, os três diagramas são conectados em paralelo, conforme mostrado na Figura 12.

A partir desta breve recapitulação da análise de componentes simétricas, e focando nas grandezas de seqüência-negativa, podemos concluir o seguinte:

- As componentes de seqüência-negativa estão presentes em todos os tipos de falta, exceto na falta trifásica.
- As componentes de seqüência-negativa indicam desbalanços e faltas.
- As impedâncias de seqüência-negativa são iguais às impedâncias de seqüência-positiva (com a possível exceção das impedâncias de geradores), e elas são mais homogêneas do que as impedâncias do diagrama de seqüência-zero.
- Os diagramas de seqüência-negativa são basicamente iguais aos diagramas de seqüência-positiva, exceto pela ausência das fontes e por defasamentos diferentes em algumas conexões dos transformadores de potência.

Faltas e desbalanços produzem componentes de seqüência-negativa. Essas componentes indicam a operação anormal do sistema de potência durante faltas. Os relés de proteção podem usar as grandezas de seqüência-negativa em diversas técnicas, seguindo a teoria das componentes simétricas, para fornecer ao engenheiro de proteção as funções que são confiáveis na detecção de desbalanços e faltas.

## GRANDEZAS DE SEQÜÊNCIA-NEGATIVA EM RELÉS DE PROTEÇÃO

As grandezas de seqüência-positiva foram corretamente associadas à carga e às condições equilibradas. As grandezas de seqüência-zero são fáceis de serem medidas e quantificadas. Por outro lado, as grandezas de seqüência-negativa foram uma fonte de mistérios para muitos engenheiros de proteção pois elas não eram facilmente mensuráveis.

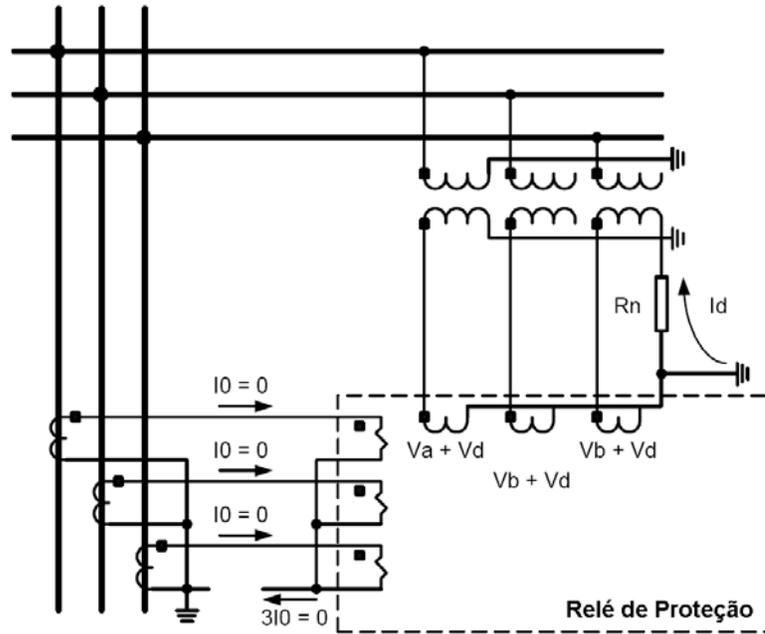
Hoje, os relés numéricos podem medir com confiabilidade as grandezas de seqüência-negativa e também fornecer as ferramentas para os engenheiros de relés de proteção analisarem essas componentes. Atualmente, esse engenheiro pode utilizar as grandezas de seqüência-negativa com segurança pois elas são medidas e fornecidas por esses equipamentos.

A maioria dos fabricantes utiliza os mesmos métodos para os elementos dos relés de proteção baseados nas grandezas de seqüência-negativa; poucos incorporam técnicas proprietárias usando essas grandezas para os relés de proteção. O uso das grandezas de seqüência-negativa nos sistemas de proteção é variado; este *paper* ilustra algumas destas técnicas de aplicação. Esta seção dedica-se a discutir as fontes de seqüência-negativa e fontes de entrada do relé, aplicações em máquinas rotativas, proteção de sobrecorrente, elementos direcionais, diferencial de corrente de linhas, seleção de fases, localização de faltas e desbalanços no sistema de potência.

### Fontes de Entrada do Relé

As componentes de seqüência-negativa e seqüência-zero estão presentes durante faltas desequilibradas. A medição dessas grandezas pelos relés de proteção não é significativa durante condições normais de operação. Qualquer presença dessas grandezas sob condições de carga é basicamente uma indicação de desbalanço de impedância no sistema de potência.

As fontes de entrada do relé são o grupo de TCs e TPs trifásicos. Eles têm a função de refletir precisamente os valores primários do sistema de potência. As grandezas de seqüência-negativa são mais desprezíveis do que as grandezas de seqüência-zero quando ocorre uma falha no circuito secundário e permanece despercebida até que a falta ocorra; isso ocorre quando as componentes de seqüência-negativa e seqüência-zero do circuito primário forem significativas.



**Figura 13** Falhas nos Circuitos Secundários dos TCs e TPs

Uma falha no circuito secundário do circuito do TC indica o rompimento de um cabo do neutro. A Figura 13 ilustra a situação. Durante uma falta à terra, as correntes de seqüência-zero circulam nos circuitos primários; porém, como as correntes de seqüência-zero não circulam nos circuitos secundários, devido ao cabo condutor de retorno de neutro rompido, o relé de proteção está impossibilitado de medir as correntes de seqüência-zero.

Por outro lado, as correntes de seqüência-negativa utilizam o mesmo caminho que as correntes de carga e elas não precisam do condutor de retorno de neutro rompido. O relé vai medir corretamente as correntes de seqüência-negativa.

Uma falha no circuito secundário do circuito do TP é um segundo aterramento involuntário no neutro do circuito, conforme mostrado na Figura 13. Os dois aterramentos não estão necessariamente no mesmo potencial, e uma diferença de tensão entre os dois induz uma corrente ( $I_d$ ). A corrente e a impedância do cabo da fiação do neutro leva a uma diferença de tensão ( $V_d$ ) que aparece como uma grandeza adicionada às medições secundárias do relé, conforme mostrado nas Equações (5), (6) e (7).

$$V_{ar} = V_a + V_d \tag{5}$$

$$V_{br} = V_b + V_d \tag{6}$$

$$V_{cr} = V_c + V_d \tag{7}$$

Observe que, ao calcular a tensão de seqüência-zero, o relé usa a seguinte relação:

$$3V_{0r} = 3V_0 + 3V_d$$

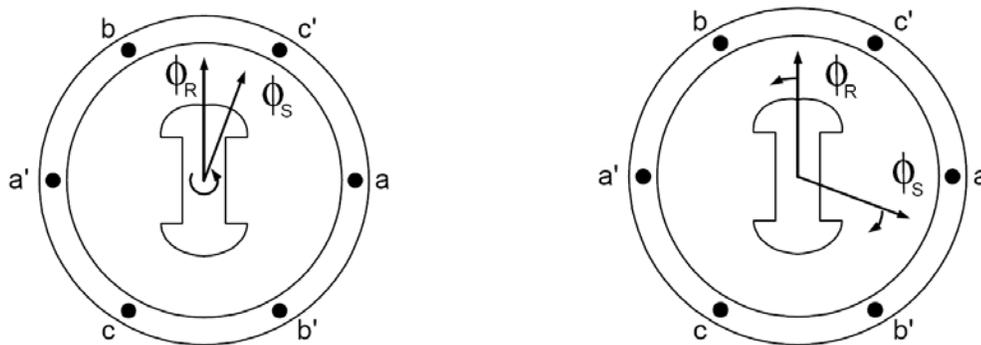
Por outro lado, ao calcular a tensão de seqüência-negativa, o relé vai obter:

$$3V_{2r} = 3V_2 + (1 + a + a^2)V_d = 3V_2$$

Isso indica que um segundo aterramento involuntário no condutor do neutro do circuito do TP não tem efeito na medição de seqüência-negativa. As grandezas de seqüência-negativa utilizam o mesmo caminho do circuito usado pelas grandezas normais de seqüência-positiva; portanto, qualquer modificação acidental do circuito de retorno não tem efeito sobre elas.

## Máquinas Rotativas

As máquinas rotativas trifásicas são severamente afetadas pelo fluxo das correntes de seqüência-negativa. Para ambos, motores e geradores, o estator está livre de qualquer dano devido ao fluxo das correntes de seqüência-negativa. Por outro lado, o rotor é enormemente afetado e pode sofrer danos estruturais térmicos devidos às correntes induzidas pela freqüência duplicada, causadas pelo fluxo das correntes de seqüência-negativa.



**Figura 14** Fluxo das Correntes de Seqüência-Positiva (à esquerda) e Seqüência-Negativa (à direita) em uma Máquina Rotativa

A Figura 14 mostra a influência do fluxo das correntes de seqüência-positiva e seqüência-negativa sobre uma máquina rotativa. Quando as correntes de seqüência-positiva circulam no estator de uma máquina rotativa (lado esquerdo da Figura 14), o fluxo no rotor ( $\phi_R$ ) e o fluxo no estator ( $\phi_S$  – somatório dos fluxos nas fases) giram na mesma direção. Para um gerador, os dois fluxos giram basicamente numa velocidade sincronizada ( $\omega_S$ ), com uma pequena diferença angular entre os dois. Teoricamente, não há indução de correntes no rotor. Para um motor de indução, os dois fluxos giram normalmente quase na mesma velocidade. O fluxo no estator ( $\phi_S$ ) gira com velocidade síncrona, mas o fluxo no rotor ( $\phi_R$ ) gira com velocidade quase síncrona. A diferença entre as duas velocidades é a freqüência de escorregamento. A diferença entre os fluxos no estator e no rotor induz o fluxo de corrente no rotor. Para o gerador, essa indução é desprezível; para o motor, a indução é proporcional à freqüência de escorregamento ( $s = (f_s - f_r)$ ), que é um valor muito pequeno [4].

Quando as correntes de seqüência-negativa circulam no estator de uma máquina rotativa, o fluxo no estator ( $\phi_S$ ) gira numa direção diferente e em sentido oposto ao fluxo no rotor ( $\phi_R$ ), conforme mostrado no lado direito da Figura 14. A diferença de rotação para o gerador é uma indução equivalente das correntes com duas vezes a freqüência síncrona:  $f_s - (-f_s) = 2f_s$ . Para o motor, as correntes no estator induzem tensões no rotor proporcionais a:  $(-f_s - f_r) = -(2f_s - s)$ , novamente muito próxima de duas vezes a freqüência síncrona.

Os danos causados pelo fluxo da corrente de seqüência-negativa no rotor foram utilizados nos geradores com curvas  $K = I^2 t$  [1][5]. O fabricante do gerador fornece uma curva para cada fator K. Os modernos relés numéricos para proteção de geradores implementaram as curvas  $I^2 t$  com maior sensibilidade e

precisão do que seus predecessores eletromecânicos. Essas curvas propiciam a proteção de backup adequada para o gerador contra fluxo indesejado de correntes de seqüência-negativa.

Para motores de indução (a grande maioria dos motores elétricos), as curvas  $I^2t$  podem ser usadas se o fabricante do motor fornecer as informações. Um relé de sobrecorrente de seqüência-negativa pode ser aplicado [1].

O aquecimento no rotor de um motor é um processo que depende da seqüência de operação do motor. Partir um motor em temperatura ambiente quando o motor ficou inativo por um longo período é diferente de partir o mesmo motor após ele ter sido retirado de operação. As técnicas modernas digitais e numéricas permitem a implementação de modelos térmicos [6]. Em função desse recurso, a proteção do motor inclui um modelo térmico que reflete o efeito do fluxo das correntes de seqüência-negativa no estator.

O modelo térmico estima o aquecimento que as correntes do estator causam no rotor. Mais especificamente, ele é o aquecimento da resistência do rotor ( $R_r$ ). A resistência do rotor não é uma função constante; ela é uma função da freqüência de escorregamento em pu ( $s = (f_s - f_r)/f_s$ ). Além disso, as resistências do rotor para o fluxo das correntes de seqüência-positiva e seqüência-negativa, respectivamente, são:

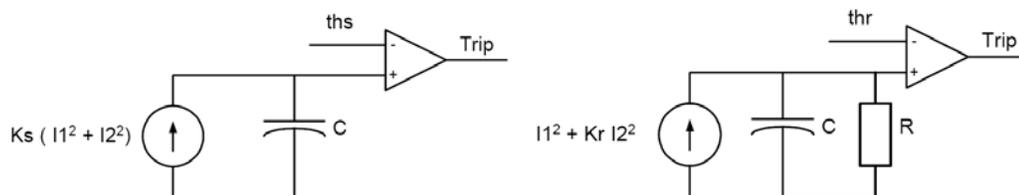
$$R_{r+} = (R_1 - R_0)s + R_0$$

$$R_{r-} = (R_1 - R_0)(2 - s) + R_0$$

Onde  $R_1$  é a resistência do rotor travado (a resistência estimada para  $s = 1$ , ou resistência do rotor travado), e  $R_0$  é a resistência do rotor em operação (aproximadamente quando  $s \cong 0$ ).

Quando o motor parte ( $s = 1$ ), o efeito do aquecimento do fluxo das correntes de seqüência-positiva ou seqüência-negativa no rotor é o mesmo, pois a resistência do rotor é  $R_r = R_1$  se  $s = 1$ . Por outro lado, quando o motor está operando ( $s \cong 0$ ), a resistência de seqüência-positiva do rotor é  $R_0$ , mas a resistência de seqüência-negativa é  $2R_1 - R_0$ . Quando o motor está em operação, o efeito do aquecimento das correntes de seqüência-negativa é maior do que para as correntes de seqüência-positiva.

O modelo que considera os efeitos das correntes de seqüência-positiva e seqüência-negativa sob condições de partida e condições de operação propõe o aquecimento e o resfriamento de forma exponencial [6], análogo ao carregamento e descarregamento de um capacitor.



**Figura 15** Modelos Térmicos para Partida e Operação do Motor

A Figura 15 mostra o conceito de um modelo térmico considerando dois estados. O estado referente à partida do motor faz uma suposição muito conservadora de que todo o calor está aquecendo o rotor e que ambas as correntes de seqüência-positiva e seqüência-negativa aquecem o rotor da mesma forma. O estado referente ao motor em operação considera o efeito do aquecimento maior das correntes de seqüência-negativa. Esse estado do motor em operação leva em conta a dissipação do calor através de um resistor equivalente e de uma constante de tempo RC. Todas as constantes mostradas na Figura 15

são calculadas a partir dos dados de placa do motor. A descrição dessas constantes pode ser encontrada na Referência [6].

O ponto importante a ser considerado no modelo térmico é a “carga” do capacitor C. Essa “carga”, que emula o aquecimento do rotor, fornece memória para o modelo. O modelo térmico memoriza o aquecimento causado no estado de partida e no estado de operação. Durante a transição de um estado para outro, o capacitor relembra sua “carga”. O modelo térmico altera o estado para o estado de partida se a corrente no motor exceder 2,5 pu. Abaixo desse nível, o modelo térmico permanece no estado de operação.

As equações diferenciais necessárias para modelar o elemento térmico descrito acima podem ser implementadas através de métodos de programação nos relés numéricos. Esse modelo térmico é um ótimo exemplo do uso de microprocessadores e da facilidade do cálculo de componentes de seqüência-negativa.

### **Coordenação da Proteção de Sobrecorrente de Seqüência-Negativa**

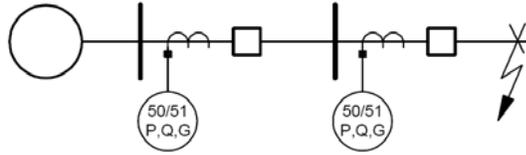
Após ter sido revisada a teoria de componentes simétricas e os diagramas de seqüência para diferentes tipos de faltas desequilibradas, surge o interesse em descobrir por que a corrente de seqüência-negativa não era a grandeza usada para proteger alimentadores da distribuição do sistema de potência contra faltas fase-fase e faltas à terra. A razão principal pode ter sido que a teoria de componentes simétricas não era totalmente acessível quando foram iniciados os projetos de proteção de sobrecorrente. Uma outra razão pode ter sido que, conforme descrito acima, o hardware dos filtros de seqüência na tecnologia de relés eletromecânicos era caro e complicado. Outro motivo é que, para faltas à terra, dependendo do aterramento do sistema, existe a necessidade de elevar a sensibilidade propiciada pelos TCs de fase (informação usada para calcular I<sub>2</sub>), usando um TC de neutro com relação menor. O TC de neutro com relação menor (usado para calcular I<sub>0</sub>) proporciona uma maior sensibilidade do que os TCs de fase com relações maiores.

No caso em que somente for possível o uso de TCs de fase para calcular as correntes de seqüência-negativa e seqüência-zero, ambas as correntes proporcionam a mesma sensibilidade. Por exemplo, isto é possível nos sistemas da distribuição que têm o neutro solidamente aterrado. Por outro lado, nos sistemas da distribuição não aterrados, existe a necessidade de fazer com que a detecção de faltas à terra seja o mais sensível possível, devido à magnitude da corrente de falta à terra ser insignificante e difícil de ser medida. É necessário um TC de neutro com relação mais baixa para atender esse propósito. Nesses casos, a sensibilidade da corrente de seqüência-zero é maior do que a da corrente de seqüência-negativa.

O método usado pelos engenheiros de proteção, que associa faltas à terra com correntes de seqüência-zero, é um raciocínio válido. A coordenação da proteção de sobrecorrente através de seqüência-negativa para proteção de faltas à terra é possível; entretanto, ela é geralmente considerada mais como uma grandeza de backup para a coordenação de sobrecorrente de seqüência-zero do que como o método principal para detecção de faltas à terra. A proteção de faltas à terra através das componentes de seqüência-zero nos sistemas da distribuição vai permanecer como a grandeza escolhida para os fatores acima mencionados. Entretanto, para a detecção de faltas fase-fase e fase-fase-terra, a proteção de sobrecorrente de seqüência-negativa é uma alternativa mais sensível e mais fácil de ser aplicada do que os relés de fase tradicionais [7].

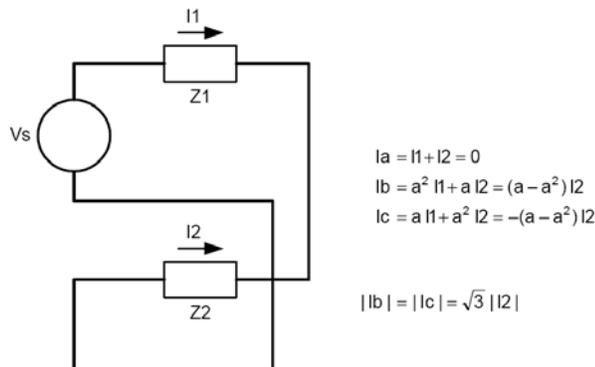
A coordenação dos valores de sobrecorrente nos relés de fase e terra de alimentadores radiais é um método bem conhecido e descrito. Os engenheiros de proteção têm um profundo conhecimento desse

assunto, porém pode haver uma certa preocupação em aplicar elementos de seqüência-negativa na coordenação da proteção de sobrecorrente.



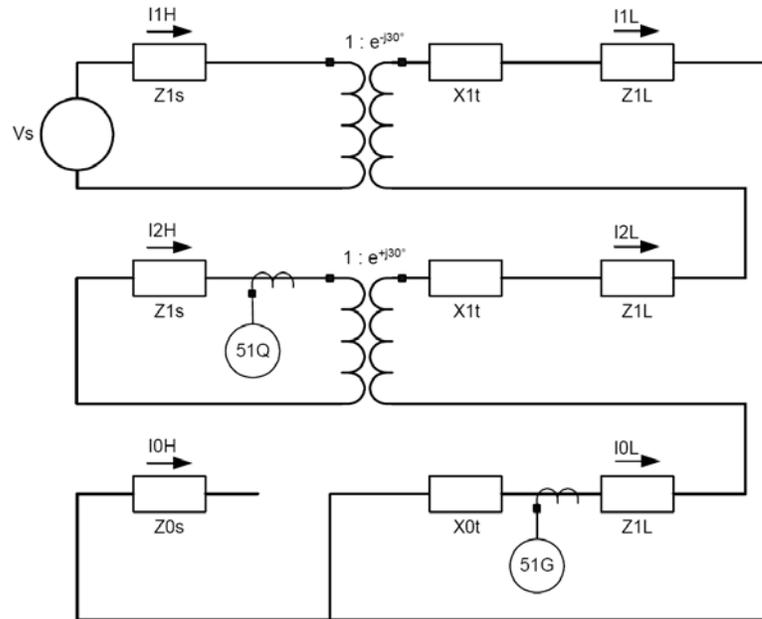
**Figura 16** Coordenação de um Alimentador Radial

A Figura 16 mostra um alimentador radial típico que requer a coordenação dos dispositivos de proteção de sobrecorrente. Neste ponto, podemos considerar que a fonte é solidamente aterrada, uma vez que faremos posteriormente, nesta seção, algumas considerações sobre aterramentos. Os estudos de curto-circuito ou os cálculos manuais vão apresentar as magnitudes das faltas correspondentes que o sistema vai fornecer aos relés. O dispositivo de sobrecorrente localizado mais à frente (“downstream”) vai ser ajustado com a maior sensibilidade. Os elementos de fase (P) são ajustados com a maior sensibilidade possível, permanecendo sempre acima da máxima corrente de carga estimada. Infelizmente, isto limita sua sensibilidade para faltas fase-fase. Os elementos de terra (G = 3I0) são ajustados com a maior sensibilidade possível e acima do maior valor de desbalanço estimado. Para faltas entre fases, os elementos de fase operam. Para faltas monofásicas, os elementos de terra operam. Para faltas bifásica-terra, geralmente não há descoordenação pois os relés de terra são ajustados com valores entre 3 a 10 vezes mais sensíveis do que os elementos de fase, e o seu tempo de operação é menor. Para os dispositivos de sobrecorrente de seqüência-negativa, indicados pela letra “Q”, a preocupação é a sua coordenação com os elementos de fase e de terra.



**Figura 17** Corrente de Falta Fase-Fase e Magnitude da Corrente de Seqüência-Negativa

A Figura 17 é uma ilustração simples, ainda que descritiva, da relação entre a corrente de uma falta entre fases e a corrente de seqüência-negativa. Quando é efetuada a coordenação do elemento de sobrecorrente de fase e do elemento de sobrecorrente de seqüência-negativa, a corrente de fase equivalente do elemento de seqüência-negativa é  $\sqrt{3}$  da corrente  $I_2$  medida. Portanto, quando se coordena dispositivos de sobrecorrente de fase e seqüência-negativa, o fator  $\sqrt{3}$  tem que ser considerado.



**Figura 18** Coordenação da Proteção de Sobrecorrente de um Alimentador Radial

Se um transformador delta-estrela estiver incluído na coordenação, os elementos de sobrecorrente de seqüência-negativa podem propiciar a coordenação da proteção de sobrecorrente de backup para os relés de sobrecorrente de terra no lado estrela do transformador, conforme mostrado na Figura 18. A figura mostra a conexão do diagrama de seqüências para uma falta à terra no lado de baixa tensão de um transformador delta-estrela. Em transformadores ideais, simplesmente é efetuado o defasamento de  $30^\circ$  de um lado para o outro. A magnitude de corrente, em pu, não é alterada a partir do lado primário para o lado secundário. A corrente em pu no relé 51Q é a mesma que a do relé 51G. Além disso, o relé 51Q pode também proteger o transformador e o lado de baixa tensão do sistema para faltas entre fases desequilibradas. Observe que um relé de sobrecorrente de neutro no lado de alta tensão do transformador não fornece nenhuma proteção de backup para o lado de baixa tensão. A conexão delta no lado de alta tensão do transformador não permite a circulação das correntes de seqüência-zero, conforme indicado na Figura 18 através de  $I_{0H} = 0$ .

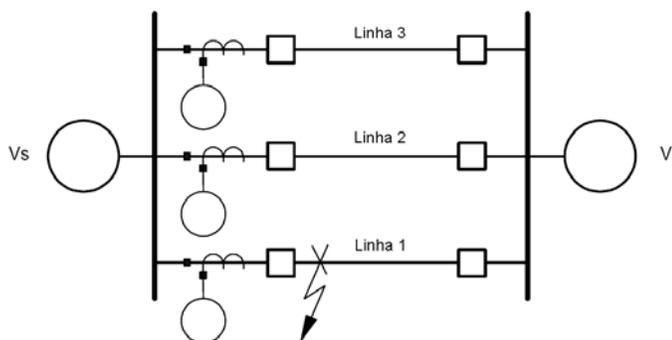
A discussão acima focou nos sistemas de potência solidamente aterrados, onde a quantidade de corrente de faltas à terra é grande e a impedância equivalente de seqüência-zero da fonte é pequena. Alguns sistemas da distribuição não possuem o neutro solidamente aterrado. Na verdade, em muitas localidades ao redor do mundo, o costume é manter o neutro não aterrado ou usar o lado de baixa tensão do transformador da estação de distribuição conectado em delta. Isso é chamado, por razões óbvias, de sistemas não aterrados. Existem também diversas instalações onde a intenção é forçar a magnitude das correntes de faltas à terra para zero, usando um reator de compensação calculado de acordo com a capacitância de seqüência-zero do sistema. Esses são os sistemas aterrados através da Bobina de Petersen.

Sistemas não aterrados e aterrados através da Bobina de Petersen vão apresentar valores desprezíveis de correntes de faltas à terra; o método recomendado é o de medir a corrente de seqüência-zero através de um TC toroidal com uma relação bem menor dos que a dos TCs de fase. Além disso, é necessário fornecer a metodologia direcional para a detecção de faltas à terra. Infelizmente, para esses sistemas, a detecção de faltas à terra não pode depender das grandezas de seqüência-negativa. As magnitudes da tensão de seqüência-negativa e da corrente de seqüência-negativa são muito pequenas para terem

utilidade. Entretanto, a detecção de faltas entre fases desequilibradas pode se beneficiar enormemente da proteção de sobrecorrente de seqüência-negativa. As faltas entre fases podem ser detectadas com uma menor sensibilidade do que somente através dos elementos de sobrecorrente de fase pois os relés de sobrecorrente de seqüência-negativa podem ser ajustados abaixo da corrente de carga. Para sistemas não aterrados e aterrados através da Bobina de Petersen, o elemento 50/51Q coordena somente com os dispositivos de detecção de faltas entre fases. Tendo em vista que o filtro de seqüência-negativa utiliza TCs de fase, a sensibilidade será muito menor do que para os elementos de detecção de faltas à terra de alta sensibilidade.

### Elementos Direcionais

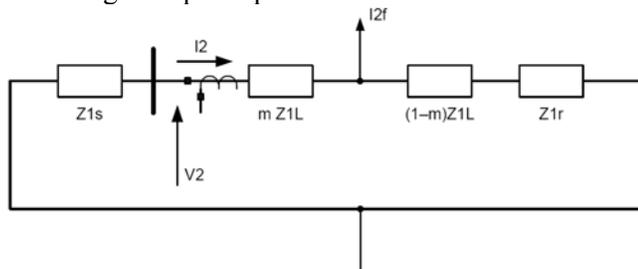
A função de um elemento direcional é o de indicar a direção do fluxo de potência durante uma falta. Esses elementos não são usados para dar trip ou alarme diretamente; eles são usados como elementos de supervisão.



**Figura 19** Exemplo da Direção da Falta

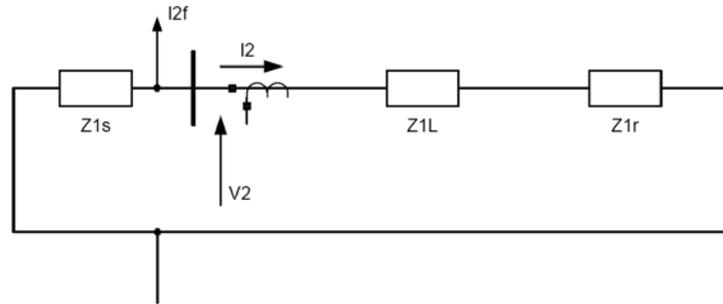
Uma forma bem simples de ilustrar o conceito de um elemento direcional é através de um exemplo como o mostrado na Figura 19. Uma falha na Linha 1 está na direção “à frente” (*forward – FWD*) para o relé da Linha 1. A mesma falha está na direção reversa (*reverse – REV*) para os relés das linhas 2 e 3. Os elementos direcionais são requisitados em muitas aplicações onde as linhas não são radiais. Se as linhas (alimentadores) forem radiais, pode ser possível determinar de forma inteligente a direção da falta através da magnitude da corrente. Os alimentadores radiais não aterrados e aterrados através da Bobina de Petersen requerem elementos direcionais para faltas à terra.

Com as grandezas de seqüência-negativa, é possível designar elementos direcionais confiáveis para todos os tipos de faltas desequilibradas. As faltas trifásicas não contêm componentes de seqüência-negativa, portanto é necessário efetuar uma abordagem diferente para as mesmas. A revisão da teoria de componentes simétricas mostrou que o diagrama de seqüência-negativa está presente em todas as faltas desequilibradas. Usamos esse diagrama para apresentar e analisar um elemento direcional [8].



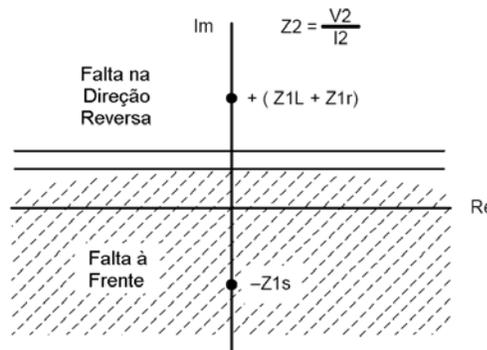
**Figura 20** Falta na Frente do Relé

A Figura 20 mostra o diagrama de seqüência-negativa para uma falta na frente do relé com a relação de  $V2/I2 = -Z1s$ . Se as impedâncias forem reativas, a medição ocorre no eixo reativo negativo, conforme mostrado na Figura 22.



**Figura 21** Falta Atrás do Relé

A Figura 21 mostra o diagrama de seqüência-negativa para uma falta atrás do relé com a relação de  $V2/I2 = + (Z1L + Z1r)$ . A medição é a soma de todas as impedâncias na frente do relé e tem um sinal positivo. Se as impedâncias forem reativas, a medição ocorre no eixo reativo positivo, conforme mostrado na Figura 22.



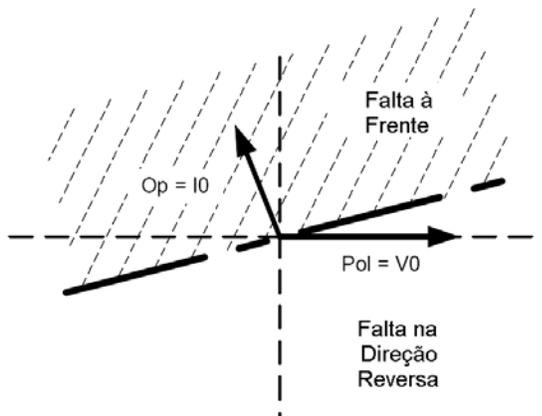
**Figura 22** Plano de Impedâncias para um Elemento Direcional Baseado na Impedância de Seqüência-Negativa

Usando o sinal da medição de  $V2/I2$  (uma impedância), um elemento direcional pode ser formulado [8]. A Figura 22 mostra um elemento direcional com dois limites indicando uma condição de falta à frente e uma condição de falta reversa. O critério para ajuste é baseado na impedância de linha conhecida ( $Z1L$ ). Para uma falta na direção reversa, o relé mede pelo menos a impedância da linha. Se os valores limites para as direções “à frente” e reversa forem considerados próximos de  $Z1L/2$  (uma consideração muito conservadora), então os limites para o elemento direcional estão definidos. A Figura 22 mostra esses dois limites.

O elemento direcional de seqüência-negativa, assim como outros elementos nos relés de proteção, não operam sozinhos; ele faz parte de um esquema com outros elementos para detecção de faltas com confiabilidade. Esses outros elementos podem ser, por exemplo, elementos de sobrecorrente ou de distância. O elemento direcional de seqüência-negativa determina de forma confiável a direção de todos os tipos de falta no sistema de potência, exceto para as faltas trifásicas. Isso torna o elemento altamente atrativo para os relés modernos que precisam fornecer proteção de faltas entre fases e proteção de faltas à terra.

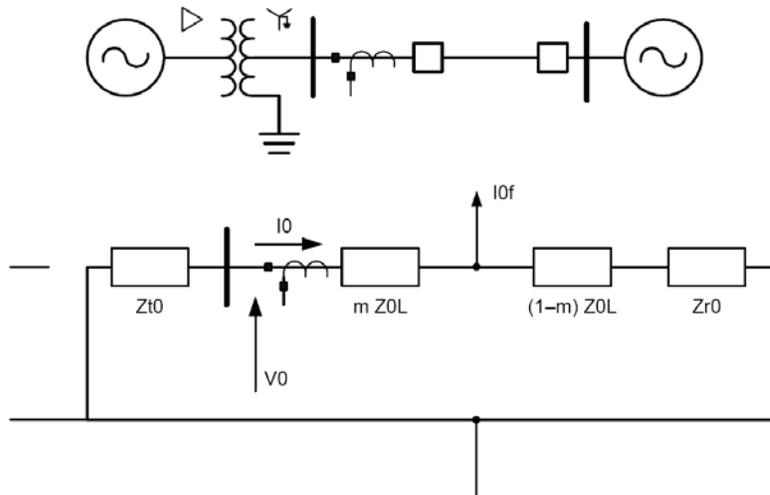
No diagrama de seqüência-negativa, os ângulos da impedância são altamente previsíveis; eles são basicamente reatâncias. Isso torna a aplicação do elemento direcional de seqüência-negativa mais simples para todos os sistemas, diferentemente dos elementos direcionais de seqüência-zero que podem ter que considerar o aterramento do sistema para sua operação.

O elemento direcional de terra pode ser projetado com grandezas de seqüência-zero. Ele pode ser baseado na impedância ou na comparação fasorial tradicional da tensão de seqüência-zero e da corrente de seqüência-zero.



**Figura 23** Elemento Direcional Tradicional de Seqüência-Zero

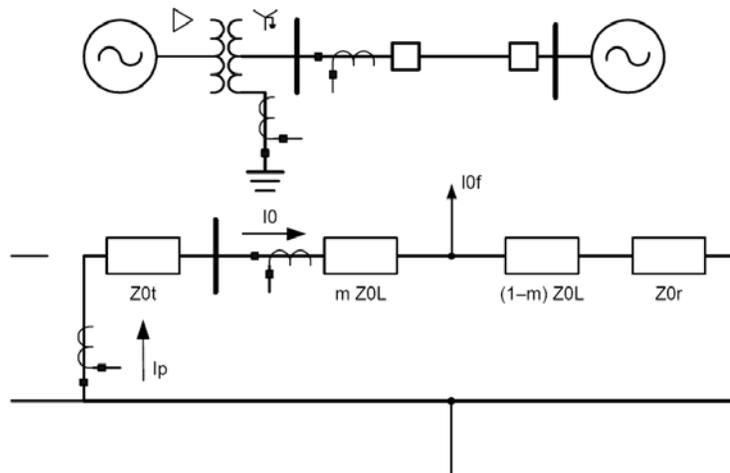
A Figura 23 apresenta um elemento direcional de terra tradicional polarizado por tensão de seqüência-zero. A tensão de seqüência-zero ( $V_0$ ) é a grandeza de polarização, e a corrente de seqüência-zero é a grandeza de operação. A presença de  $V_0$  é requisitada e necessária para que o elemento seja “polarizado” (ter uma referência). Sem um  $V_0$  confiável, esse elemento não tem uma polarização adequada.



**Figura 24** Se  $V_0$  For Pequena, Não Há Grandeza de “Polarização”

A tensão de seqüência-zero é muito pequena em certas situações. Um caso típico está mostrado na Figura 24. O lado conectado em estrela do transformador, solidamente aterrado, com impedância de seqüência-zero muito baixa, apresenta uma tensão de seqüência-zero muito baixa. A magnitude da

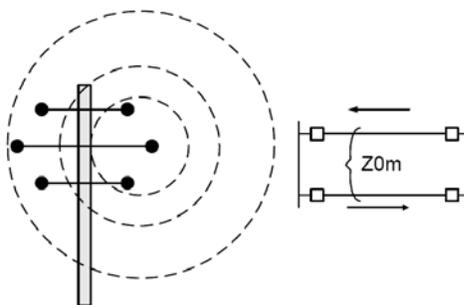
tensão não “polariza” o elemento direcional de terra polarizado por tensão de seqüência-zero. Uma solução tradicional consiste em usar uma outra grandeza de seqüência-zero para polarizar o elemento direcional de terra. O neutro do transformador de potência é uma fonte de polarização adequada [9].



**Figura 25** Elemento Direcional de Terra Polarizado por Corrente de Seqüência-Zero

Como pode ser visto na Figura 25, o neutro do transformador vai fornecer uma corrente de polarização que está sempre na mesma direção para faltas à terra. A corrente de seqüência-zero, medida na localização do relé, será comparada com essa corrente de polarização para determinar a direção “à frente” ou a direção reversa.

Mesmo com a grandeza de polarização adequada, os elementos direcionais de terra de seqüência-zero encontram uma difícil tarefa quando estão protegendo linhas com circuito paralelo. A impedância mútua de seqüência-zero entre linhas paralelas pode causar problemas para os direcionais de terra, o que já é um fato comprovado. O fluxo das correntes de seqüência-zero numa linha em paralelo induz corrente na outra linha. O efeito da mútua de seqüência-zero pode ser tal que a direção da falta não seja determinada corretamente.



**Figura 26** Efeitos da Mútua Resultantes da Impedância Mútua de Seqüência-Zero

A Figura 26 ajuda na análise dessa condição sem utilizar cálculos de impedância complexos. Se considerarmos o enlace do fluxo de um circuito com o outro, os enlaces de seqüência-negativa e seqüência-positiva são muito pequenos pois  $I_a + I_b + I_c = 0$ . O enlace do fluxo de seqüência-zero, entretanto, é significativo pois  $\Sigma I \neq 0$ . Conforme mostrado na Figura 26, a mútua de seqüência-zero,  $Z_{0m}$ , induz correntes de seqüência-zero na outra linha. Isso pode levar a uma determinação direcional incorreta.

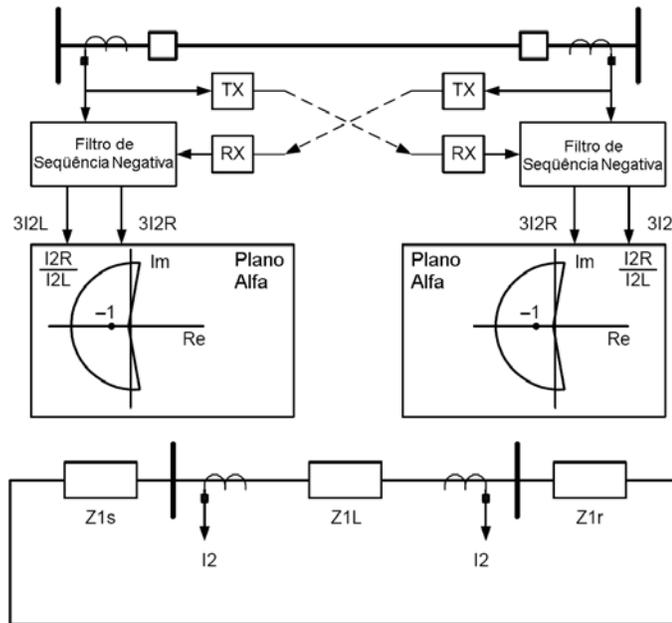
Os elementos direcionais de terra de seqüência-negativa não sofrem essa limitação. É enormemente reconhecido que os elementos direcionais baseados em seqüência-negativa são os mais apropriados para a proteção de linhas de transmissão paralelas.

### Diferencial de Corrente de Linha

Os relés diferenciais de corrente de linha são uma excelente escolha para proteção de linhas quando houver recursos adequados de comunicação disponíveis para atender a demanda da troca de informações. Esses relés têm ajustes mais simples e envolvem a aplicação de um algoritmo para a linha de transmissão. Os sistemas de comparação de fases comparam as fases das correntes de ambos os terminais e o resultado é similar ao dos relés diferenciais de linha. Os relés com a característica do plano alfa associam a comparação de fases e das magnitudes das correntes para tomar a decisão correta.

Os sistemas originais de proteção de linhas baseados somente em corrente consideravam as informações de fase e de seqüência-zero. Poucos relés eletromecânicos utilizavam as grandezas de seqüência-negativa para proteção diferencial de linha. Devido às limitações do canal, as informações de seqüência-negativa eram usadas de forma composta; os relés usavam a soma das componentes de seqüência.

O relé diferencial de linha com características do plano alfa efetua a troca de informações de seqüência-negativa independentemente dos elementos de comparação de fase ou terra [10]. O plano alfa é uma comparação das magnitudes e das fases das correntes local e remota ( $I_{remota}/I_{local}$ ) em um plano complexo. As técnicas modernas de filtragem e a comunicação digital são utilizadas para determinar a presença de faltas internas ou externas em uma linha de transmissão.



**Figura 27** Diferencial de Corrente de Linha com Característica do Plano Alfa e Componentes de Seqüência-Negativa

A Figura 27 ilustra o processo da comparação de seqüência-negativa no relé com plano alfa. As correntes trifásicas locais ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ) são usadas para calcular a magnitude e o ângulo das componentes locais de seqüência-negativa, conforme descrito em uma seção anterior deste *paper*. As correntes trifásicas são transmitidas para o terminal remoto através do canal de comunicação. O relé local recebe

as correntes da extremidade remota e usa essas correntes para calcular a componente de seqüência-negativa daquela extremidade.

O plano alfa propicia uma característica de restrição ampla e segura, bem como uma área de operação confiável capaz de acomodar condições severas de *outfeed*.

Embora o relé com características do plano alfa efetue comparações das grandezas de fase e de seqüência-zero, a simplicidade no cálculo das componentes de seqüência-negativa nos relés numéricos possibilita que o esquema também faça comparações de seqüência-negativa. Conforme mostrado na Figura 27, o relé supervisiona o fluxo de corrente no diagrama de seqüência-negativa. Uma falta externa vai ser representada na unidade negativa (-1) do plano alfa, como mostrado na Figura 27. Para uma falta interna, as correntes serão alteradas; as magnitudes provavelmente serão diferentes em ambas as extremidades, e os ângulos das duas correntes serão praticamente iguais. Isso será representado no lado direito do plano alfa.

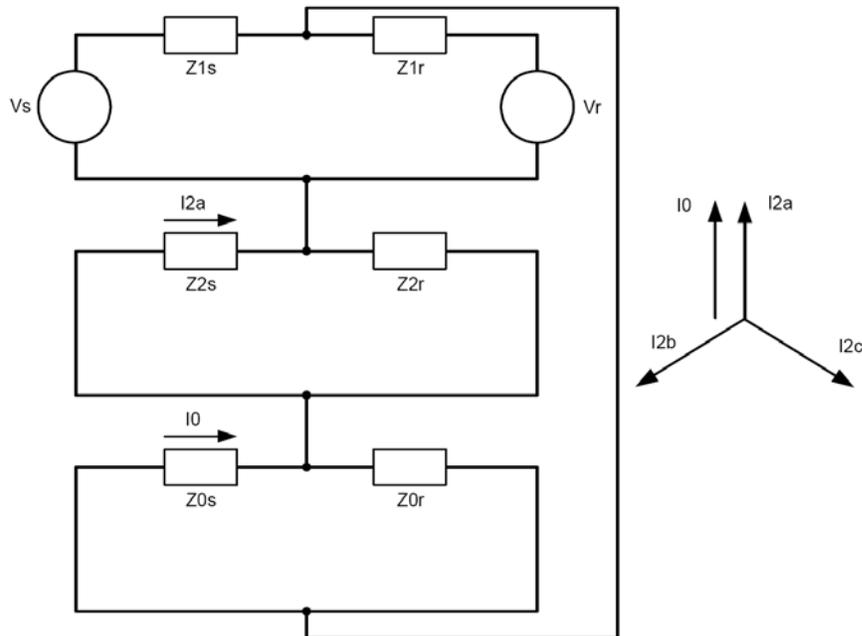
A comparação de seqüência-negativa em um relé diferencial de linha acrescenta sensibilidade à detecção de faltas à terra com alta resistência e de faltas fase-fase. Durante uma falta interna com alta resistência, a corrente de fase não é muito alterada. Entretanto, a comparação diferencial de seqüência-negativa e seqüência-zero propiciará um grau maior de sensibilidade, possibilitando a detecção dessas faltas. O diferencial de seqüência-negativa é tão sensível quanto, se não maior do que, o diferencial de seqüência-zero para faltas à terra. Além disso, ele proporciona uma cobertura adicional para faltas fase-fase com alta resistência.

A comparação de seqüência-negativa no plano alfa é considerada mais segura do que a comparação de seqüência-zero no plano alfa durante a saturação de TCs. Uma das preocupações usuais quando se considera o diferencial de corrente de linha é a capacidade de tolerância a um certo nível de saturação de TCs. A saturação de TCs produz um fasor de corrente que é menor em magnitude e mais adiantado do que o fasor ideal sem saturação de TCs. Os defasamentos ( $a$  e  $a^2$ ) em uma equação de seqüência-negativa acrescentam segurança, tornando-as mais seguras para inversão de fases (não magnitude) do que as componentes de seqüência-zero, devido à saturação de um TC de fase [10].

### **Algoritmo de Seleção de Fases**

O algoritmo para seleção de fases é amplamente usado em esquemas de abertura monopolar. Durante faltas à terra, o objetivo é abrir o pólo que tem a fase em falta. Algoritmos diferentes são usados para selecionar o pólo correto durante uma falta à terra. A operação dos elementos individuais de distância de terra não é suficiente para selecionar o pólo a ser aberto.

Os relés numéricos modernos utilizam uma solução excelente e eficaz baseada na comparação da corrente de seqüência-zero do terminal e nas componentes de seqüência-negativa medidas. Lembre-se que, na maioria dos casos, o cálculo da componente de seqüência-negativa da fase A ( $I_{2a}$ ) é suficiente para a maioria das aplicações das componentes de seqüência-negativa. Entretanto, para a seleção de fases, as componentes de seqüência das fases B e C são necessárias ( $I_{2b}$  e  $I_{2c}$ ). Isso requer uma simples defasagem ( $a^2$  e  $a$ ) da componente da fase A.



**Figura 28** Seleção da Fase em Falta Usando Componentes de Seqüência-Negativa

A Figura 28 mostra a seleção de fases para uma falta da fase A para terra. Para o caso ideal apresentado acima, a componente de seqüência-negativa da fase A está em fase com a componente de seqüência-zero. Admite-se que os fatores de distribuição de seqüência-negativa e seqüência-zero produzem componentes das correntes que estão praticamente em fase, embora seja esperada uma variação pequena do ângulo.

Se a componente de seqüência-negativa da fase B estiver em fase com a componente de seqüência-zero, então a falta é da fase B para terra. O mesmo pode ser considerado para uma falta da fase C para terra. A seleção de fases desse algoritmo seleciona a fase em falta correta para faltas monofásicas. A lógica de seleção de fases do dispositivo de proteção deve considerar também que uma falta das fases B-C para terra também terá as componentes  $I_{2a}$  e  $I_0$  em fase. Felizmente, existem outros indicadores no sistema de potência que podem determinar se é uma falta da fase A para terra ou uma falta das fases B-C para terra, e o esquema de proteção fará a seleção de fases apropriada.

### Localização de Faltas

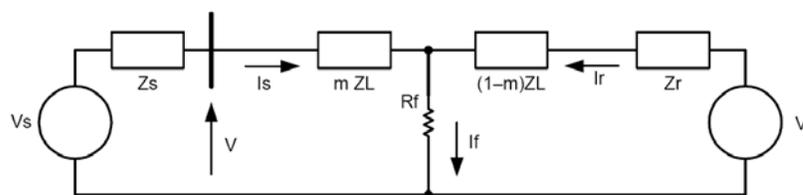
Os relés numéricos modernos propiciam a localização de faltas como um recurso padronizado – uma filosofia que no passado era inconcebível. Ao lado de muitas outras funções incorporadas ao relé numérico, a localização de defeitos é uma função do equipamento muito importante e bastante esperada.

A localização de faltas difere do algoritmo de cálculo da impedância no sentido de que a saída da localização do defeito deve ser precisa, e o relé, entretanto, tem mais do que tempo suficiente para efetuar o cálculo. Os elementos de distância são instantâneos e sua função é detectar as faltas no sistema de potência. A aplicação dos elementos de distância nos esquemas de proteção é tal que erros na saída são tolerados e esperados.

Este artigo limita a discussão sobre este assunto ao uso das componentes de seqüência-negativa nos algoritmos de localização de faltas. Este tópico recebeu grande atenção e diversas técnicas foram propostas. Não é efetuada nenhuma tentativa de qualificar, neste *paper*, essas técnicas.

Uma metodologia simples de localização de faltas utiliza o cálculo da impedância de seqüência-positiva aparente da linha de transmissão. O resultado é uma impedância ( $R + jX$ ), que indica a distância da falta. Considerando que a parte reativa dessa impedância seja a informação mais precisa, a distância até a falta é calculada como uma porcentagem da reatância total da linha. O método descrito é o algoritmo de localização de defeitos por reatância. O principal inconveniente do algoritmo é o efeito do fluxo de cargas elevadas com alta resistência no cálculo da impedância. O cálculo resulta em uma componente reativa, positiva ou negativa, que vai afetar o cálculo da localização do defeito.

Faltas com alta resistência são um item a ser considerado nos algoritmos de localização de faltas. Os efeitos da mútua em linhas paralelas, a imprecisão do cálculo da impedância da linha e os erros dos TCs e TPs são exemplos de outros itens que são levados em consideração na localização de faltas. A metodologia original apresentada por Takagi mostrou uma forma de desprezar os efeitos da alta resistência de faltas à terra na localização de defeitos. Diversas outras metodologias apresentaram propostas baseadas nesse método, porém uma deve ser observada com mais atenção neste *paper*. Este método, um algoritmo modificado de Takagi, usa as grandezas de seqüência-negativa [11][12].



**Figura 29** Desenvolvimento Monofásico do Algoritmo de Takagi

Para simplificar a derivação, usamos um arranjo monofásico das impedâncias mostradas na Figura 29. A derivação pode ser ampliada para impedâncias de *loops* diferentes para faltas fase-terra e fase-fase. A Equação (8) representa a Figura 29:

$$V = I_s(mZ_L) + (I_f)(R_f) \quad (8)$$

Onde:

- “ $I_s$ ” é a corrente de falta medida no terminal onde o algoritmo de localização de faltas é executado.
- “ $I_f$ ” é a corrente total de falta desconhecida (não o valor medido pelo relé) circulante através de  $R_f$ .

As componentes de  $I_f$  são as correntes de contribuição para a falta, provenientes das fontes  $V_s$  e  $V_r$ , onde  $I_f = I_{fs} + I_{fr}$ . A componente  $I_{fs}$  é facilmente relacionada à corrente  $I_s$  medida usando a corrente de pré-falta do terminal ( $I_{spf}$ ), conforme mostrado na Equação (9):

$$I_{fs} = I_s - I_{spf} \quad (9)$$

A maior fonte de erro na equação vem da resistência de falta, que é eliminado através de uma técnica matemática. Ambos os lados da equação são multiplicados pelo conjugado complexo de  $I_{fs}$  para obter a Equação (10):

$$V I_{fs}^* = m(Z_L I_s I_{fs}^*) + R_f (I_{fs} + I_{fr}) I_{fs}^* \quad (10)$$

Observe que  $I_{fs}$  e  $I_{fr}$  estão praticamente em fase, e se aceitarmos qualquer pequeno erro resultante dessa consideração, então o termo na equação contendo  $R_f$  é um número real. Portanto, se as componentes imaginárias da equação forem isoladas, podemos determinar a distância até a da falta ( $m$ ):

$$m = \text{Im} \{ ZL I_s I_{fs}^* \} / \text{Im} \{ V I_{fs}^* \} \quad (11)$$

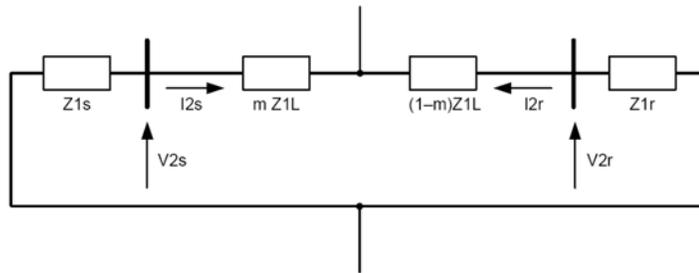
A Equação (11) indica a necessidade de se conhecer a corrente de pré-falta do terminal. Uma versão modificada desse algoritmo reconhece que as correntes de seqüência-negativa são grandezas incrementais, similares a  $I_{fs}$ , onde o valor de pré-falta é zero.

$$m = \text{Im} \{ ZL I_s I_2^* \} / \text{Im} \{ V I_2^* \}$$

O uso das componentes de seqüência-negativa na localização de faltas propicia uma atenuação dos efeitos da mútua de seqüência-zero nas linhas de transmissão, conforme descrito anteriormente.

O método que acabamos de discutir é um algoritmo para um único terminal, existente nos relés numéricos modernos. A metodologia é afetada pelo acoplamento mútuo de linhas paralelas. Para superar esse problema, alguns pesquisadores propuseram metodologias para dois terminais com diversos requisitos. Um dos mais importantes requisitos é a necessidade de um canal de comunicação para o envio de informações de ambos os terminais para um ponto central ou informações locais para a extremidade remota. Alguns métodos propõem a sincronização exata dos dados de ambos os lados da linha.

O algoritmo de localização de faltas para dois terminais utiliza grandezas de seqüência-negativa para superar as dificuldades associadas aos requisitos dos dados de pré-falta, efeitos da mútua de seqüência-zero e qualquer *infeed* de seqüência-zero na linha [13]. Como em qualquer método para dois terminais, este requer transmissão de dados, porém o volume de dados transferidos é mínimo, consistindo da magnitude de  $I_2$  e da magnitude e ângulo da impedância da fonte de seqüência-negativa ( $Z_2$ ).



**Figura 30** Diagrama de Seqüência-Negativa para Localização de Faltas

A Figura 30 apresenta o diagrama de seqüência-negativa para qualquer falta série desequilibrada (faltas trifásicas não apresentam componentes de seqüência-negativa). O algoritmo leva vantagem neste fato, propondo uma única equação para todas as faltas desequilibradas.

Ambas as extremidades podem medir facilmente a magnitude e o ângulo da impedância da fonte conforme mostrado nas Equações (12) e (13):

$$Z1s = -(V2s / I2s) \quad (12)$$

e

$$Z1r = -(V2r / I2r) \quad (13)$$

No ponto da falta, a Equação (14) é verdadeira, onde todas as variáveis são conhecidas ou medidas exceto “m”, a distância até a falta.

$$I_s(Z1s + mZ1L) = I_r(Z1r + (1 - m)Z1L) \quad (14)$$

Uma vez que a Equação (14) é uma equação vetorial, podemos calcular “m” usando as técnicas matemáticas apropriadas.

O aspecto importante na técnica de localização de faltas descrita acima, no escopo deste artigo, é o uso de todas as grandezas de seqüência-negativa. Esses parâmetros de seqüência-negativa da linha são facilmente calculados e são equivalentes à impedância de seqüência-positiva. As impedâncias da fonte de seqüência-negativa são fáceis de serem medidas ( $V2/I2$ ) pois não há uma fonte equivalente atrás das mesmas. Conforme observado anteriormente neste *paper*, este método fornece uma estimativa excelente da localização da falta.

### **Desbalanços no Sistema de Potência**

A simetria, nos sistemas de potência, é desejada para todas as fases. O condutor da fase A deve ser praticamente igual ao das outras fases; de outra forma, a simetria estaria prejudicada. Os sistemas de potência dependem da simetria das fases. Entretanto, a geometria das linhas de transmissão não permite que isso ocorra. As distâncias entre as fases e a terra nunca são exatamente as mesmas; conseqüentemente, haverá desbalanços no fluxo da corrente de carga.

Considere uma linha de transmissão com impedâncias próprias das fases  $Z_{aa}$ ,  $Z_{bb}$  e  $Z_{cc}$ , e impedâncias mútuas entre as fases  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  e  $Z_{ca}$ . A queda da tensão na linha pode ser calculada como:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

As impedâncias dependem da geometria da linha de transmissão. A consideração do retorno pela terra está incluída nas mesmas; portanto, se as correntes não forem equilibradas, a equação inclui a influência do retorno pela terra. A única situação em que  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  e  $Z_{ca}$  são iguais ocorre quando a linha é completamente transposta. Nessa situação, um arranjo geométrico diferente existe em cada 1/3 da linha [14].

Usando a seguinte igualdade baseada na matriz da Equação (4), as componentes simétricas podem ser obtidas:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_0 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

e

$$\begin{bmatrix} \Delta V_0 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

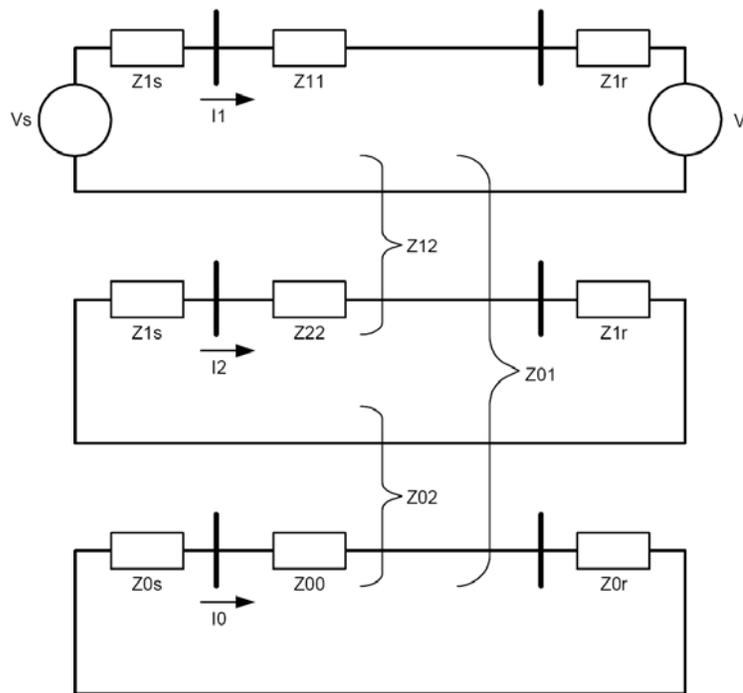
Em termos mais simples:

$$\begin{bmatrix} \Delta V0 \\ \Delta V1 \\ \Delta V2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z00 & Z01 & Z02 \\ Z01 & Z11 & Z12 \\ Z02 & Z12 & Z22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I0 \\ I1 \\ I2 \end{bmatrix}$$

Se  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  e  $Z_{ca}$  forem iguais (linha transposta), os termos localizados fora da diagonal são zero e nós temos:

$Z00 = Z0L =$  impedância de seqüência-zero da linha; e

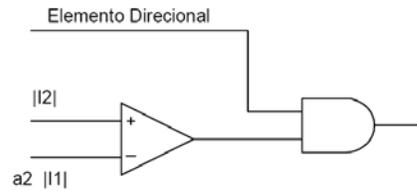
$Z11 = Z22 = Z1L =$  impedância de seqüência-positiva e seqüência-negativa da linha



**Figura 31** Desbalanço como Resultado da Assimetria de uma Linha de Transmissão

O fato é que linhas de transmissão não são geralmente transpostas e desbalanços são gerados. A Figura 31 ilustra o efeito de tensões equilibradas (tais como as geradas nas usinas de energia) nos diagramas de seqüência. Haverá corrente de seqüência-negativa e corrente de seqüência-zero induzidas na linha de transmissão como resultado das assimetrias na geometria da linha.

Nos sistemas de proteção, as sensibilidades dos relés são geralmente ajustadas com um valor alto o suficiente para que os relés não sejam afetados por esses desbalanços. Os relés numéricos modernos são projetados para supervisionar seus elementos de proteção (elementos direcionais de seqüência-negativa, por exemplo) com detectores de falta. Esses detectores de falta requerem que a corrente de seqüência-negativa medida seja maior do que o conteúdo da corrente de seqüência-positiva.



**Figura 32** Detector de Falta

A Figura 32 mostra uma aplicação típica de um detector de falta supervisionando um elemento do relé: um elemento direcional, por exemplo. O fluxo da corrente de seqüência-positiva na linha de transmissão induz correntes de seqüência-negativa, conforme mostrado anteriormente, mas a relação é constante e definida pelas impedâncias mútuas das componentes simétricas:  $Z_{12}$ , neste caso. A supervisão mostrada na figura garante a operação dos elementos dos relés de proteção e assegura que eles operem para uma falta real no sistema de potência. Para uma falta assimétrica, a relação da corrente de seqüência-negativa pela corrente de seqüência-positiva é maior do que o fator “a2”. Não apenas a supervisão de seqüência-negativa é possível, mas o mesmo conceito pode ser aplicado para as correntes de seqüência-zero.

## HOMOGENEIDADE DO ÂNGULO DE IMPEDÂNCIA NO DIAGRAMA DE SEQÜÊNCIA-NEGATIVA

Um grupo de impedâncias do sistema de potência é considerado homogêneo quando os ângulos forem iguais. Por exemplo, se considerarmos que todas as impedâncias do sistema de potência são indutoras (todas com um ângulo de  $90^\circ$ ), então o sistema de potência é homogêneo. Por outro lado, a introdução de impedâncias com ângulos diferentes em um grupo de impedâncias do sistema de potência implica um certo grau de não-homogeneidade.

Em muitos centros acadêmicos, é sempre considerado que as impedâncias do sistema de potência são reativas, exceto no diagrama de corrente de seqüência-zero. Essa é uma consideração adequada que facilita os cálculos matemáticos e, ao mesmo tempo, mostra que o diagrama de seqüência-zero é o menos homogêneo. Na realidade, os ângulos das impedâncias de seqüência-positiva e seqüência-negativa são previsíveis e muito similares uns com os outros. As impedâncias de seqüência-zero são influenciadas pelo retorno pela terra, que pode ser uma resistência (por exemplo, aterrando um gerador), por um terreno rochoso com alta resistividade (para uma linha de transmissão), ou por uma impedância de magnitude infinita (para um transformador conectado em delta). Resumindo, os diagramas de seqüência-positiva e seqüência-negativa tendem a apresentar as impedâncias mais homogêneas.

A não-homogeneidade é a causa do erro no cálculo da reatância da falta e da localização da falta. Considerando, por exemplo, o sistema monofásico mostrado na Figura 29, a impedância de falta medida na fonte  $V_s$  é

$$Z_{fs} = \frac{V}{I_s} = (mZ_L) + \left(\frac{I_f}{I_s}\right)R_f$$

Os relés numéricos modernos oferecem uma característica quadrilateral que estima a componente reativa da impedância da falta ( $mX_L$ ). Se os ângulos de  $I_f$  e  $I_s$  forem iguais, então

$$mX_m = \text{Im} \left\{ \frac{V}{I_s} \right\} \quad (I_f \angle I_f = \angle I_s)$$

A Referência [15] descreve a implementação de uma linha reativa para um relé de distância quadrilateral. A idéia é estimar a componente reativa do cálculo da queda na linha,  $V - Z_c I$  ( $Z_c$  é o ajuste do relé), com uma corrente de polarização  $I_p$ . Uma corrente geralmente polariza as componentes da reatância dos elementos quadrilaterais. As correntes de fase ou a componente da corrente de seqüência-positiva são afetadas pelo fluxo de carga (uma outra fonte de erro). As componentes da corrente de seqüência-zero e corrente de seqüência-negativa não são afetadas pela carga.

A corrente de polarização é somente uma referência; o seu ângulo é a informação importante. Conforme descrito acima, se uma linha reativa for ser implementada para um elemento de distância quadrilateral no diagrama monofásico da Figura 29, nós teremos

$$V_{I_p}^* = mZL I_s I_p^* + R_f I_f I_p^*$$

e

$$\frac{\text{Im}\{V_{I_p}^*\}}{\text{Im}\{ZL I_s I_p^*\}} = m + R_f \frac{\text{Im}\{I_f I_p^*\}}{\text{Im}\{ZL I_s I_p^*\}}$$

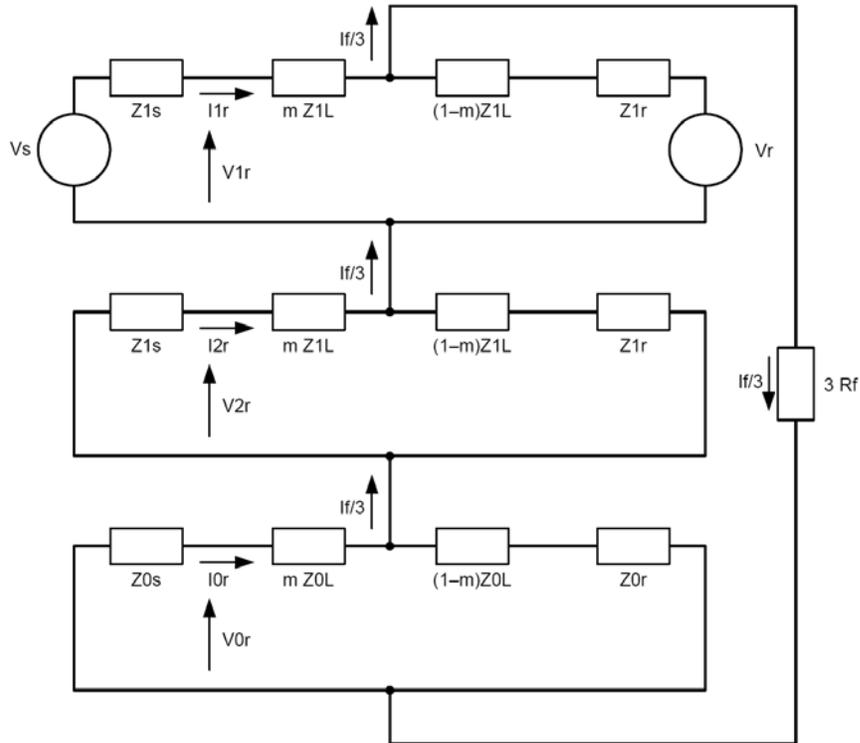
O relé de distância calcula “m”, que é a magnitude em pu da impedância da linha. O lado direito da equação acima é o termo do erro devido à resistência da falta. A escolha de uma corrente de polarização adequada vai fazer com que o termo do erro seja zero. Na verdade, se a corrente de polarização for  $I_p = I_f$ , então o termo do erro é zero. O ângulo entre  $I_f$  e  $I_p$  torna o termo do erro igual a zero:

$$\frac{I_f}{I_p} = A \angle T \tag{15}$$

desde que

$$\text{Im}\{I_f I_p^*\} = |I_f||I_p| \sin T$$

O diagrama monofásico simples da Figura 29 e a discussão acima possibilitaram a ilustração do erro causado pela resistência de falta ( $R_f$ ). Tradicionalmente, os elementos quadrilaterais são associados aos elementos de distância de terra dos relés numéricos modernos.



**Figura 33** Conexão do Diagrama de Seqüências para uma Falta da Fase A para Terra

A corrente de polarização adequada para uma componente reativa de um elemento de distância quadrilateral de terra deve ser obtida pela análise do diagrama da Figura 33. A análise monofásica para a Figura 29 pode ser facilmente estendida para a Figura 33, e pode ser facilmente demonstrado que

$$V_A = mZ_{1L}(I_A + 3I_0K_0) + I_f R_f \quad (16)$$

Onde  $K_0$  é o fator de compensação de seqüência-zero ( $K_0 = (Z_{0L} - Z_{1L})/3Z_{1L}$ ). A fase da corrente de polarização deve ser o mais próximo possível do ângulo da corrente de falta. As duas correntes disponíveis para a medição, para esse propósito, são as correntes de seqüência-negativa ( $I_{2r}$ ) e de seqüência-zero ( $I_{0r}$ ). A corrente de seqüência-positiva é afetada pela carga (o ângulo entre  $V_r$  e  $V_s$ ); portanto, ela não é uma grandeza adequada.

A escolha adequada da polarização decorre da análise da homogeneidade das impedâncias de seqüência. As correntes de seqüência-negativa e correntes de seqüência-zero são grandezas apropriadas para a polarização da linha de reatância de um elemento quadrilateral de terra. A Equação (15), se considerada no diagrama de seqüência-negativa da Figura 33, é um simples divisor de correntes:

$$I_{2r} = \frac{(1 - mZ_{1L})}{Z_{1s} + Z_{1L} + Z_{1r}} I_f$$

e

$$\frac{I_f}{I_{2r}} = \frac{Z_{1s} + Z_{1L} + Z_{1r}}{(1 - mZ_{1L})} = A_2 \angle T_2$$

O mesmo pode ser feito para o diagrama de seqüência-zero:

$$\frac{I_f}{I_{0r}} = \frac{Z_{0s} + Z_{0L} + Z_{0r}}{(1 - mZ_{0L})} = A_0 \angle T_0$$

Os ângulos ( $T_2$  ou  $T_0$ ) são uma indicação apropriada da corrente de polarização a ser usada. Na maioria dos casos, as impedâncias de seqüência-negativa são as mais homogêneas; portanto,  $T_2$  é menor do que  $T_0$ . Os relés numéricos modernos levam em conta a não-homogeneidade calculada nas equações acima e incluem um ajuste para a diferença angular.

A Equação (16) e uma corrente de polarização compensada ( $I_p e^{jT}$ ) possibilitam o cálculo correto do alcance reativo do elemento quadrilateral de terra:

$$\frac{\text{Im}\{VA(I_p e^{jT})^*\}}{\text{Im}\{Z_{1L}(IA + 3I_{0K0})(I_p e^{jT})^*\}} = m + R_f \frac{\text{Im}\{I_f(I_p e^{jT})^*\}}{\text{Im}\{Z_{1L}(IA + 3I_{0K0})(I_p e^{jT})^*\}}$$

Podemos eliminar o termo  $R_f$  do lado direito da equação através da inclusão do fator  $T$  no cálculo.  $I_p$  terá mais propensão a ser igual a  $I_2$ , devido ao diagrama estimado, mais homogêneo, de seqüência-negativa.

## SUMÁRIO

As grandezas de seqüência-negativa indicam uma operação desequilibrada do sistema de potência e a medição dessas grandezas gera informações importantes para os relés de proteção. Para ilustrar o aumento no uso dessas grandezas nos esquemas modernos de relés de proteção, este *paper* apresenta alguns exemplos de aplicação das componentes de seqüência-negativa nos relés numéricos.

O cálculo das componentes de seqüência-negativa, bem como outras funções atualmente padronizadas nos relés numéricos, eram difíceis de serem implementados nas tecnologias dos relés antigos. Os relés numéricos modernos tornam relativamente simples o cálculo das componentes de seqüência-negativa.

Este *paper* analisa como as funções de proteção baseadas na seqüência-negativa podem ser implementadas nos relés numéricos. Um modelo térmico do motor é descrito para a proteção de motores. A coordenação da função de sobrecorrente propicia proteção de backup sensível para faltas entre fases e proteção de backup de sobrecorrente através de um transformador delta-estrela. Os elementos direcionais de seqüência-negativa podem propiciar a sensibilidade e a direção necessárias para todas as faltas desequilibradas. Um relé com características do plano alfa e comparação de seqüência-negativa aumenta a sensibilidade dos relés diferenciais de linha na detecção de faltas desequilibradas. Um algoritmo eficaz de seleção de fases baseado nas correntes de seqüência-negativa e seqüência-zero permite a implementação de relés de abertura monopolar sofisticados. Algoritmos de localização de faltas usando componentes de seqüência-negativa fornecem soluções precisas e eficazes, que não são afetadas, relativamente, pelo acoplamento mútuo de linhas paralelas. O uso de detectores de falta pode compensar o desbalanço natural resultante das correntes de seqüência-negativa nas linhas de transmissão. O uso da corrente de polarização por seqüência-negativa para os elementos de distância quadrilateral de terra decorre de o diagrama de seqüência-negativa ser o mais homogêneo.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] W. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1994.
- [2] A.G. Padke, J.S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems", Research Study Press Ltd. John Wiley & Sons Inc., 1988.
- [3] C.F. Wagner, R.D. Evans, "Symmetrical Components", Robert E. Krieger Publishing, Malabar, FL, 1982.
- [4] M. S. Sarma, "Electric Machines – Steady-State Theory and Dynamic Performance", West Publishing Company, 1986.
- [5] "IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators", IEEE 95TP102.
- [6] S. E. Zocholl, "AC Motor Protection", publicado pela SEL, ISBN 0-9725026-0-2, fevereiro de 2003.
- [7] A. F.Elneweihi, E. O. Schweitzer III, M. W. Feltis, "Negative-Sequence Overcurrent Element Application and Coordination in Distribution Protection", IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, WA, julho de 1992.
- [8] J. B. Roberts, A. Guzman, "Directional Element Design and Evaluation", Atas da 21st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1994.
- [9] J. L. Blackburn, "Protective Relaying: Principles and Applications", Segunda Edição, Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1998.
- [10] J. B. Roberts, D. A. Tziouvaras, G. Benmouyal, H. Altuve, "The Effect of Multi-Principle Line Protection on Dependability and Security", Atas da 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, abril de 2001.
- [11] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N° 8, agosto de 1982.
- [12] E. O. Schweitzer III, "Evaluation and Development of Transmission Line Fault Locating Techniques Which Use Sinusoidal Steady-State Information", Atas da 9th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1982.
- [13] D. A. Tziouvaras, J. B. Roberts, G. Benmouyal, "New Multi-Ended Fault Location Design for Two or Three Terminal Lines", CIGRE, 1999.
- [14] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IEEE Press – Power System Engineering Series, 1995.
- [15] E. O. Schweitzer III, J. B. Roberts, "Distance Relay Element Design", Atas da 46th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, abril de 1993.
- [16] J. Mooney, J. Peer, "Application Guidelines for Ground Fault Protection", Atas da 24th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1997.



## BIOGRAFIA

**Fernando Calero** recebeu seu BSEE (86) da *University of Kansas*, Lawrence, KS, seu MSEE (87) da *University of Illinois* em Urbana-Champaign, Urbana, IL, e seu MSEPE (89) do *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, NY. Ele começou sua carreira profissional na *Westinghouse* como engenheiro projetista de transformadores (89) e posteriormente foi para a *ABB Relay Division* em Coral Springs, Flórida, quando a ABB adquiriu a empresa *Westinghouse T&D*. Na divisão de relés da ABB, o sr. Calero trabalhou nas seções de projetos, testes, treinamento e apoio na área de relés de proteção (90 – 96). Em seguida, o sr. Calero trabalhou para a *Itec Engineering* (97). Ele participou dos trabalhos do grupo EMS para a *Flórida Power & Light* (98) e trabalhou para a *Siemens Energy Automation* em Norcross, GA (99). Desde 2000, o sr. Calero tem trabalhado na SEL como Engenheiro Internacional de Aplicação de Campo, baseado na América do Sul. Ele escreveu *papers* técnicos para o IEEE, ministrou conferências sobre relés de proteção e detém quatro patentes na área de sistemas de proteção. O sr. Calero é um engenheiro profissional registrado no estado da Flórida.