



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

GSE 17
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE 138 kV – UM ESTUDO DE ENGENHARIA

Afonso Ferreira Ávila * Antônio Emilio A. Araújo Eduardo Nohme Cardoso

José Osvaldo S. Paulino

Paulo Fernandes Costa**

CEMIG Distribuição *

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET-MG **

RESUMO

O artigo inicia-se com a apresentação dos principais fatores que motivaram o desenvolvimento no tema. São apresentadas as principais causas de interrupções no Sistema de Distribuição da CEMIG, onde 39% destas têm origem em fenômenos de curta duração. Em seguida são discutidos os três principais métodos de aterramento do neutro de transformadores: solidamente aterrado, isolado e ressonante. Na quarta seção o aterramento ressonante é avaliado considerando a operação do sistema, métodos de detecção e localização de faltas, e vantagens de sua aplicação. Finalmente, adoção do aterramento ressonante levará à eliminação das interrupções devido a fenômenos de curta duração.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento ressonante, bobina de “Petersen”, falta fase-terra, interrupção momentânea, interrupção sustentada.

1.0 - INTRODUÇÃO

No contexto do atual mercado de energia as interrupções, sejam momentâneas ou sustentadas, representam perdas para os consumidores e as concessionárias de energia, que podem ser contabilizadas como perdas de faturamento, multas dos órgãos reguladores, ressarcimentos comerciais aos consumidores, além da perda da imagem da empresa perante o consumidor, essa última de valor intangível.

Vários fatores fazem com que as concessionárias de energia busquem novas técnicas de controle e minimização das interrupções. São eles: o crescimento das cargas sensíveis, processos automatizados de produção, aplicação de dispositivos eletrônicos inteligentes e sensíveis à flutuação de tensão e desligamentos momentâneos do sistema, a mensuração mensal e anual do desempenho do sistema elétrico através de índices oficiais (DIC, FIC, DMIC), ênfase nos aspectos de segurança pessoal, e a nova legislação brasileira para o mercado de energia elétrica.

O fenômeno descarga atmosférica é responsável por aproximadamente 80% das interrupções acidentais causados por fenômenos naturais, o que equivale a 40% do número total de interrupções do Sistema de Distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (1). As técnicas mais utilizadas para a melhoria de desempenho das linhas até 34.5 kV, são: aumento da tensão suportável de isolamento (TSI) das linhas e a aplicação de pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Dessa forma as linhas tornam-se mais resistentes às descargas atmosféricas laterais (2). Contudo, todas as técnicas estudadas, possuem uma característica em comum, foram estudadas para o regime de neutro solidamente aterrado. Ainda hoje no Brasil, poucos são os trabalhos que consideram a forma de aterramento do neutro no desempenho dos sistemas elétricos.

Vários são os métodos ou técnicas de aterramento do neutro de transformadores de potência. A implementação de um método específico de aterramento é o resultado de vários fatores, tais como: características físicas da rede, densidade de carga, segurança ou proteção do sistema elétrico, qualidade de fornecimento e a confiabilidade do sistema. Na operação em regime do sistema, o método de aterramento do neutro não tem influência. No entanto, na ocorrência de faltas à terra, as consequências para o sistema elétrico dependem fundamentalmente da forma de aterramento do neutro (3).

Sistemas solidamente aterrados e aterrados através de baixa impedância podem ter níveis elevados de correntes de faltas à terra. Esses níveis elevados normalmente requerem a abertura da linha para remover a falta do sistema. Os sistemas não aterrados caracterizam-se por não possuir uma conexão intencional com a terra, e a limitação da corrente de falta depende da resistência de falta e da capacitância fase-terra de seqüência zero.

Nas linhas de distribuição compensadas ou com aterramento ressonante, o sistema é aterrado através de um reator de impedância variável conectado ao neutro do secundário do transformador de potência ou ao neutro de um banco de aterramento. Esse reator compensa a capacitância fase-terra do sistema de forma que o diagrama de seqüência zero se torna um caminho com impedâncias muito elevadas. O reator, conhecido como bobina de "Petersen", permite o ajuste do valor da indutância para preservar a condição de sintonia do sistema para diferentes topologias de rede. O aterramento ressonante propicia a auto-extinção do arco da falta em linhas aéreas em cerca de 80% das interrupções temporárias (4).

2.0 - INTERRUPTÕES NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO – CAUSAS

A CEMIG Distribuição possui cerca de 6.0 milhões de consumidores, 367 mil quilômetros de linhas de distribuição, 3.6 milhões de postes e 620 mil transformadores instalados. A extensão malha de distribuição, o expressivo número de equipamentos e postes instalados e o elevado nível cerâmico do Estado, fazem com que o sistema seja muito exposto à falhas e intempéries com conseqüente interrupções no fornecimento de energia.

As interrupções podem ser classificadas em programadas e acidentais. Nos últimos 5 (cinco) anos, as interrupções programadas corresponderam em média a 15% do total e as acidentais a 85% das interrupções do Sistema de Distribuição. As interrupções programadas seguem o cronograma estabelecido pelas áreas de manutenção e construção da concessionária. Já as interrupções acidentais tem origem na atuação de agentes externos (fenômenos naturais e meio ambiente) e internos (falha de equipamentos, falha humana, operação de equipamentos de proteção) ao sistema.

Em 2006 foram 302.020 interrupções acidentais, sendo 65,4% dos eventos causados por agentes externos (fenômenos naturais e meio ambiente) e o 34,6% originados por causas internas ao sistema elétrico. O gráfico da Figura 1 apresenta a estratificação das causas de interrupções acidentais.

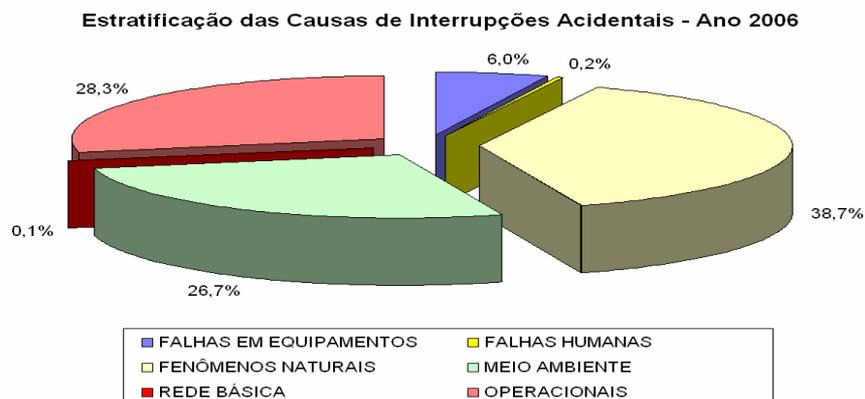


FIGURA 1 – Gráfico de Estratificação das Causas de Interrupções Acidentais

Dentre as interrupções acidentais de 2006, cerca de 90.392 foram devido a descargas atmosféricas, 53.595 por religamento manual (com e sem inspeção), 50.956 pela atuação de religadores automático, 30.093 devido à interferência de pássaros e animais nas linhas e 21.456 pela interferência da arborização nas linhas de distribuição, ver Figura 02. Nesse ano as interrupções momentâneas corresponderam a 17,5% e as sustentadas 82,5% do total. As interrupções cuja causa foram os fenômenos de curta duração (descarga atmosférica, religamento automático, contato de arborização, entre outros) representaram 39,4% do total de interrupções.

Segundo Costa e Paulino (3), muitos dos desligamentos não programados são provocados por curto-circuito, que estatisticamente, apresentam a seguinte distribuição percentual, nos sistemas com neutro solidamente aterrado:

65% curto-circuito fase-neutro; 15% curto-circuito fase-terra (simples); 10% curto-circuito fase-fase (bifásico); 1% curto-circuito trifásico, e o restante representando curto-circuito duas fases-neutro, duas fase-terra e três fases-terra. Verifica-se que 80% dos curto-circuitos são monofásicos (fase-neutro ou fase-terra), provocados principalmente por descargas atmosféricas, contato com arborização, vendaval, abalroamento entre outras causas. Apesar de terem origem em fenômenos de curta duração, devido ao elevado nível de curto-circuito fase-terra, essas faltas podem evoluir para um desligamento sustentado.

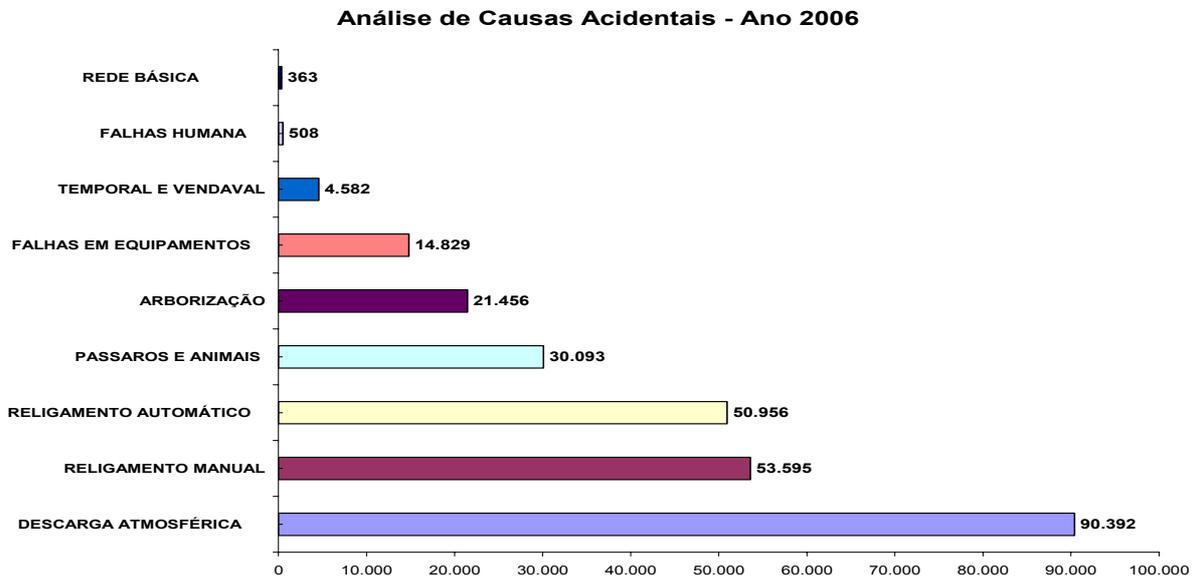


FIGURA 2 – Análise das Principais Causas de Interrupções Acidentais – Ano de 2006

A aplicação de novas técnicas e/ou tecnologias de controle das interrupções, pode reduzir o número de interrupções acidentais, resultando na continuidade do serviço e na melhoria na qualidade de fornecimento de energia. Entre as diversas técnicas utilizadas, destaca-se a aplicação do aterramento ressonante ou compensada, apresentada nos próximos itens.

3.0 - ATERRAMENTO DO NEUTRO DOS TRANSFORMADORES – PRINCIPAIS MÉTODOS

Os sistemas de aterramento possuem como regra geral prover a segurança de pessoas e a proteção de equipamentos. Quando da ocorrência de uma falta para terra, o nível das correntes de falta e a duração da falta fase-terra são determinantes na escolha do método de aterramento do sistema (5).

Diversas são as formas de aterramento do neutro, contudo esse trabalho realiza uma análise dos três principais tipos de aterramento, utilizados no mundo: o solidamente aterrado, o não aterrado ou isolado e o compensado ou ressonante.

3.1 Sistema Solidamente Aterrado

O sistema solidamente aterrado é o mais simples dos métodos de aterramento. Um sistema é definido como solidamente aterrado, quando $R_0 \leq X_1$ e $X_0 \leq 3X_1$, onde R_0 e X_0 são a resistência e reatância de seqüência zero, e X_1 a reatância de seqüência positiva do sistema (6). Na prática, os sistemas solidamente aterrado possuem todos os neutros conectados à terra sem qualquer impedância intencional entre o neutro e a terra.

Faltas à terra nesses sistemas podem produzir correntes de elevada magnitude cuja interrupção normalmente requer a abertura de todo o circuito, com conseqüente desligamento dos consumidores do trecho de falta. Cerca de 80% das faltas à terra que ocorrem nas linhas de distribuição são transitórias (4). O religamento automático com várias tentativas é amplamente utilizado nesses sistemas. O ciclo resultante de interrupção e restabelecimento pode representar um problema para consumidores com cargas rotativas elevadas ou aqueles com cargas sensíveis aos afundamentos de tensão.

Existem duas implementações práticas diferentes do sistema solidamente aterrado: uniaterrados e multiaterrados. No primeiro caso, a corrente de falta retorna através da terra para o neutro da subestação, pois o aterramento existe apenas nesse ponto. Já nos sistemas multiaterrados, o sistema é aterrado na subestação e em cada transformador ao longo do circuito. A corrente de falta nesse caso é dividida entre o condutor neutro e a terra.

O sistema solidamente aterrado auxilia na redução das sobretensões temporárias e transitórias que ocorrem durante as faltas à terra. Por outro lado, o neutro solidamente aterrado, permite a circulação de elevadas correntes de falta a terra, podendo causar efeitos drásticos, tais como: elevadas tensões de passo e/ou de toque transferidas a pessoas e animais, danos irreversíveis em equipamentos, incêndios em instalações, perturbações nos sistemas de telecomunicações e equipamentos sensíveis. O sistema não requer um nível de isolamento tão elevado quanto aquele requerido por um sistema com neutro isolado.

3.2 Sistema Não Aterrado ou Neutro Isolado

Em um sistema com neutro isolado, o neutro não tem uma conexão intencional com a terra. O sistema é conectado à terra através das capacitâncias fase-terra, ver Figura 3.

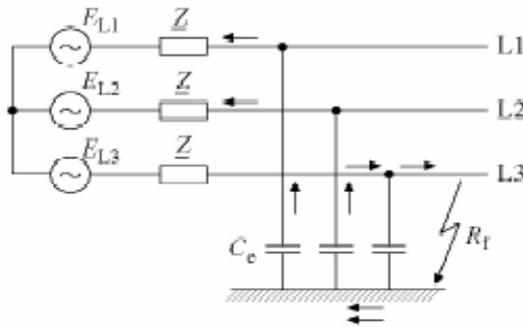


FIGURA 3 – Falta para terra em um sistema com neutro isolado

Dois são os principais fatores limitantes da magnitude da corrente de falta à terra: a resistência de falta e a capacitância fase-terra de sequência zero. A auto-extinção de faltas à terra nas linhas aéreas não aterradas pode ocorrer para baixos valores da corrente de falta à terra. Para valores maiores de corrente de falta, as faltas têm menor probabilidade de se auto-extinguirem na passagem pelo zero natural da corrente de falta devido a elevada tensão transitória de restabelecimento, podendo permanecer por longos períodos.

3.3 Sistema Ressonante ou Neutro Compensado

O aterramento ressonante constitui uma importante opção de projeto do sistema elétrico para obtenção de um fornecimento de energia de qualidade. A principal vantagem desse sistema é a possibilidade de continuidade da operação do sistema elétrico durante uma falta fase-terra sustentada. Por consequência tem-se uma redução no número de interrupções no fornecimento de energia para o consumidor. (8)

A compensação da reatância capacitância do sistema para terra por meio de uma reatância indutiva de valor próximo conectada ao neutro do transformador, implica numa correspondente redução da corrente de falta ao mínimo e a extinção do arco de potência no ponto de falta, como mostrado na figura 4. De acordo com os valores comparativos destas reatâncias, o sistema poderá tornar totalmente compensado (100% de sintonia), sobrecompensado ou subcompensado. O indutor utilizado nesse tipo de aterramento é conhecido como bobina de "Petersen", ou bobina de supressão de arco ou neutralizador de faltas à terra.

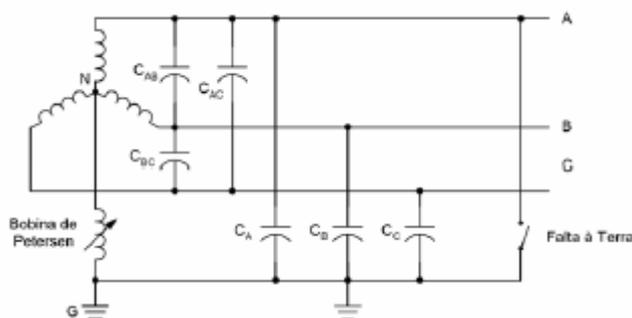


FIGURA 4 – Falta para terra em um sistema com neutro compensado

Para o sistema com neutro não aterrado o maior valor de tensão de sequência-zero (V_0) será o valor da tensão de fase do sistema (E). Duante uma falta para terra, as tensões no neutro são substancialmente maiores nos sistemas com neutro compensado do que nos sistemas com neutro não aterrado. Por outro lado, o sistema com

aterramento ressonante, pode reduzir a corrente de falta à terra para aproximadamente 3 a 10% daquela de um sistema não aterrado (4).

4.0 - SISTEMA COM NEUTRO COMPENSADO – ANÁLISE TÉCNICA

Dois são os tipos básicos de faltas à terra: as faltas restabelecidas e faltas sustentadas. Faltas restabelecidas são faltas com auto-extinção que se tornam repetitivas como resultado do dano permanente à isolamento. Faltas sustentadas são todas as faltas permanentes e algumas faltas são eliminadas pelo mecanismo de extinção de arco ressonante. Dessa forma a análise da operação dos sistemas compensados é importante para identificação das alternativas disponíveis de detecção de faltas nesses sistemas, assim como do comportamento do sistema durante o regime constante e na ocorrência da falta fase-terra.

4.1 Operação do Sistema com Neutro Compensado

A operação do sistema com neutro compensado permite a auto-extinção do arco de falta em linhas aéreas para aproximadamente 80% faltas à terra. Deste total, mais de 50% das faltas são eliminadas sem a abertura do disjuntor (4).

O sistema compensado é apresentado na Figura 5, sendo a bobina de “Petersen” representada por uma combinação paralela de uma indutância (L_N) e uma resistência (R_N). Os valores de capacitância fase-terra do sistema são representados por C_A, C_B, C_C e os valores de resistência de dispersão são representados por R_A, R_B, R_C . A ocorrência de uma falta na fase A, é representado através do fechamento da chave S_F , sendo R_F a resistência de falta.

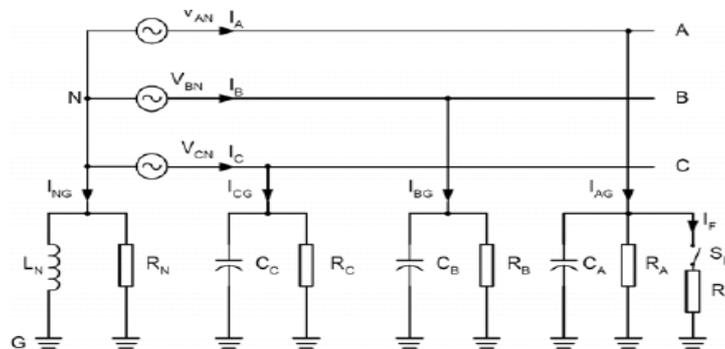


FIGURA 5 - Representação trifásica de uma linha com neutro compensado

Considera-se para esta análise os valores de resistências $R_N=R_A=R_B=R_C \rightarrow \infty$. A corrente que circula no aterramento do sistema (I_{NG}) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\vec{I}_{NG} + \vec{I}_{AG} + \vec{I}_{BG} + \vec{I}_{CG} = 0 \quad (1)$$

Para o sistema simétrico sem defeito, a corrente no neutro será nula e o neutro (N) estará no potencial de terra ($V_{NG}=0$). Para uma falta fase-terra ($R_F=0$), por exemplo na fase A, o potencial da terra e da fase defeituosa são iguais. Nas fases B e C, os valores de tensão fase-terra são multiplicados por $\sqrt{3}$ do valor fase-terra, igualando-se aos valores da tensão fase-fase ($V_{BG}=V_{BA}$ e $V_{CG}=V_{CA}$). Da mesma forma a tensão neutro-terra iguala-se ao negativo da tensão fase-neutro da fonte correspondente à fase defeituosa ($V_{NG} = -V_{AN}$). A corrente de falta (I_F) será calculada pela seguinte equação:

$$\vec{I}_F = \vec{I}_{AG} = -\vec{I}_{NG} - (\vec{I}_{BG} + \vec{I}_{CG}) \quad (2)$$

A corrente que circula no aterramento está defasada de 180° em relação a componente $(I_{BG}+I_{CG})$, para um sistema ideal sem perdas. A corrente de falta poderá ser eliminada, quando ajustada a correta sintonia da bobina de “Petersen”, sendo essa condição presente na ressonância paralela do circuito:

$$|\vec{I}_{NG}| = |\vec{I}_{BG} + \vec{I}_{CG}| \quad (\text{sistema ressonante}) \quad (3)$$

A equação (3) representa a situação de 100% de sintonia. Quando o sistema estiver fora da sintonia de 100%, uma das seguintes condições de operação poderá ocorrer:

$$\left| \vec{I}_{NG} \right| > \left| \vec{I}_{BG} + \vec{I}_{CG} \right| \quad (\text{sistema sobrecompensado}) \quad (4)$$

$$\left| \vec{I}_{NG} \right| < \left| \vec{I}_{BG} + \vec{I}_{CG} \right| \quad (\text{sistema subcompensado}) \quad (5)$$

Quando a resistência de falta (R_F) for diferente de zero, a corrente através da falta será apenas uma parcela da corrente na fase defeituosa, ou seja, a igualdade da equação (2) não se verifica. O início da falta pode ser representada como uma alteração na admitância da fase defeituosa (4). A magnitude do deslocamento da tensão de neutro como resultado da falta será menor do que a tensão fase-neutro da fonte ($V_{NG} < V_{AN}$). Dessa forma a tensão neutro-terra pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\frac{\vec{V}_{NG}}{V_{nominal}} = - \frac{\vec{Y}_A + a^2 \vec{Y}_B + a \vec{Y}_C}{\vec{Y}_N + \vec{Y}_A + \vec{Y}_B + \vec{Y}_C} \quad (6)$$

onde $V_{nominal}$ o valor da tensão nominal do sistema, $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$.

Dessa forma as admitâncias da fase defeituosa (fase A) e do neutro podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$\vec{Y}_A = G_A + jB_A = \frac{I}{R_A} + j\omega C_A \quad (\text{admitância na fase A para terra}) \quad (7)$$

$$\vec{Y}_N = G_N + jB_N = \frac{I}{R_N} + \frac{I}{j\omega L_N} \quad (\text{admitância do neutro}) \quad (8)$$

A resistência (R_N) e a indutância (L_N) das equações anteriores são expressas pelas seguintes equações:

$$R_N = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{R} \quad e \quad L_N = \frac{R^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L} \quad (9)$$

onde R e L são os valores de resistência e a indutância da bobina de Petersen.

Sob efeito de uma falta, todos os parâmetros permanecem inalterados, exceto a admitância da fase A (fase defeituosa), que pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\vec{Y}_A = \frac{I}{R_F} + \frac{I}{R_A} + j\omega C_A \quad (10)$$

A ocorrência da falta faz com que haja uma mudança na magnitude e da fase da tensão neutro-terra (V_{NG}). Contudo, as alterações de fase não são um indicador claro da falta, pois as variações de V_{NG} são muito pequenas para faltas de alta resistência. Como resultado, as faltas podem melhorar o equilíbrio do sistema ao invés de prejudicá-lo. Isto representa uma limitação da detecção de faltas baseada na magnitude da tensão neutro-para-terra.

4.2 Métodos de Detecção de Falta em Sistemas com Neutro Compensado

No sistema com neutro compensado uma falta fase-terra constitui uma condição de operação anormal do sistema. Essa condição deve ser identificada e rapidamente corrigida. O modo pelo qual a falta fase-terra é identificada depende da configuração da rede e do método de proteção aplicado.

A literatura apresenta diversos métodos para detecção e localização de faltas à terra nos sistemas compensados: detecção de tensão, wattímetro, e de frequência fundamental.

O método de detecção de tensão utiliza tanto a tensão de seqüência zero, quanto a tensão fase-terra como indicadores de falta. Entretanto, para faltas de alta resistência, a alteração da tensão pode ser muito pequena, resultando numa baixa sensibilidade de detecção de falta. Outro problema é que a tensão de seqüência-zero tem quase o mesmo valor em toda a rede de distribuição. Isto faz com que as quedas de tensão causadas por correntes de seqüência-zero circulantes através das impedâncias de seqüência-zero das linhas e transformadores

sejam muito pequenas em comparação com a queda de tensão das impedâncias fase-terra do sistema. Por essa razão os métodos de detecção de faltas à terra baseados na tensão não são seletivos. A falta fase-terra é detectada, mas o elemento defeituoso não. Dessa forma a detecção de falta por tensão possui limitações, sendo em geral utilizado como "ponto" de partida para detecção de faltas em sistemas compensados.

O método do wattímetro é simples, seguro e confiável para falta fase-terra de baixa resistência, sendo um dos métodos mais utilizados nos sistemas compensados. O elemento do relé responde à componente em fase (real) da corrente de seqüência-zero em relação à tensão de seqüência-zero (V_0). O requisito para detecção da tensão V_0 limita a sensibilidade do método wattímetro para faltas com alta resistência. Algumas empresas têm resolvido esse problema com a aplicação de relés de tensão de seqüência-zero para detecção de falta fase-terra e a conexão automática de um resistor paralelo à bobina de "Petersen". Dessa forma para faltas de alta resistência, a conexão do resistor reduz a tensão de seqüência-zero sem aumentar a corrente de falta de seqüência-zero.

A componente de frequência fundamental das tensões e corrente fornece informações mais confiáveis e significantes para detecção de falta com alta resistência em sistemas compensados. Os métodos que utilizam a frequência fundamental e que proporcionam alta sensibilidade requerem informações de todos os alimentadores e/ou algum tipo de controle da bobina de "Petersen".

Alguns dos métodos relacionados podem ser combinados de forma a permitir a detecção e localização da falta. Muito comum o uso da tensão de seqüência-zero (método de detecção de tensão) na detecção da falta e a aplicação do método do wattímetro para a localização do ponto de falta no alimentador. Para uma solução de proteção ser considerada otimizada do ponto de vista de engenharia, é necessário o conhecimento da topologia da rede, estudos e simulações dos métodos e procedimentos a serem aplicados na detecção, localização e eliminação da falta (9).

4.3 Aplicação da "Bobina de Petersen" – Vantagens

Algumas das vantagens da aplicação da bobina ressonante como método de aterramento, são : (10)

- a redução da corrente de falta para níveis de corrente dentro de limites definidos como seguros pelos órgãos regulatórios;
- a redução de 70% a 90% no número de religamentos automáticos (rápidos) causados por faltas fase-terra ;
- redução de necessidade de manutenções em chaves;
- o aumento da tensão após a extinção do arco é lento, diminuindo o risco de restabelecimento do arco;
- capacidade do sistema em operar por várias horas, mesmo que a falta persista.;
- a redução da potência dissipada pela falta quando a rede opera por várias horas em condições permanente de falta;
- redução da probabilidade da falta evoluir para outros tipos de falta (fase-fase, ou trifásica).

5.0 - CONCLUSÕES

Durante a operação normal do sistema o tipo de aterramento do neutro é irrelevante. Contudo, para a condição de falta à terra o tipo de aterramento escolhido tem importância. Isto, porque a magnitude das correntes de falta diferem de acordo com o tipo de aterramento adotado. No sistema solidamente aterrado os valores de correntes de falta são elevados, sendo necessária a abertura da linha para eliminação da falta. Para os sistemas não aterrados a magnitude da corrente de falta à terra depende da resistência de falta e a capacitância fase-terra de seqüência zero. Em sistema compensados os valores de corrente de falta são pequenos, devido a atuação da "bobina de Petersen", que compensa a reatância capacitiva fase-terra do sistema. O sistema compensado é o que apresenta o menor valor da corrente de falta à terra, permitindo a operação da linha durante a falta, até a remoção da mesma pela equipe de manutenção do sistema.

A análise do sistema compensado demonstra que esse tipo de aterramento do neutro dos transformadores pode reduzir em até 80% as faltas à terra evitando a operação de disjuntores em até 60% das faltas. Essa técnica evita a operação rápida do religador automático de 70% a 90% dos casos, contribuindo dessa forma para a melhoria do fornecimento de energia de qualidade.

No sistema de distribuição 39,4% das interrupções são devido a fenômenos de curta duração. A aplicação do aterramento ressonante poderá levar a minimização dessas interrupções. Todos argumentos apresentados nesse artigo reforçam que o aterramento do neutro compensado deve ser considerado como uma solução de melhoria de desempenho da linhas de distribuição em conjunto com as atuais técnicas já empregadas.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AVILA, AFONSO F.; Estudo de Desempenho de Redes de Distribuição Rural Utilizando Dados do Sistema de Localização de Tempestades e da Operação do Sistema – Uma Abordagem de Engenharia – Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, 2005.
- (2) ROCHA, R. C. C; SOARES, M. R.; Estruturas de NBI Elevado - Anais do Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – XI SENDI ; Blumenal – SC, Outubro de 1991.
- (3) COSTA, P. F.; PAULINO, J. O. S.; Redução das Paralisações dos Sistemas de Aéreos de Distribuição Brasileiros através do uso da Bobina de “Petersen”; Anais do Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – XVII SENDI ; Belo Horizonte - MG, Agosto de 2006.
- (4) ROBERTS, J.; ALTUVE, H.J.; HOU, D.; Análise dos Métodos de Proteção contra Falhas à Terra nos Sistemas de Distribuição Aterrados, não Aterrados e Compensados; Publicação Técnica da Schweitzer Engineering Laboratories – SEL, 2001.
- (5) ZAMORA, I.; MAZÓN,A.J.; ANTEPATA, F.; et all; Experiences of Neutral Resonant System Implantation in Gorliz Substation; 17th Internation Conference of Eletricity Distribution – CIRED; Barcelona – Spain, 12th-15th May 2003.
- (6) GÖNEN, T., “Modern Power System Analysis” – Cap. 6 Analysis of Unbalanced Faults – Wiley-Interscience Publication, Singapore – 1987.
- (7) HANNIEN, S.; LEHTONEN, M.; Method for Detection and Location of very High Resistive Faults; European Transactions on Electric Power – ETEP, Vol. 9, No. 5, pp. 285-291, September – 1999.
- (8) DRUMT, G.; KUGI, A.; PARR. B.;Control of Petersen Coil ; XI International Symposium on Theoretical Electrical Engineering – August, 2001
- (9) BJERKAN, E.; VENSETH, T.; Locating Earth-Faults in compensated Distribution Networks by means of Faults Indicators, International Conference on Power Systems Transients-IPST 2005, Montreal-Canadá, June 19th-23th, 2005.
- (10) ZAMORA, I.; MAZÓN,A.J.; ANTEPATA, F.; et all; First Resonat Neutral Grounding Implantion ins Spanish Distribution System; IEEE Porto Power Tech Conference – PPT 2001, Porto – Portugal, September 10th-13th, 2001.

7.0 - BIOGRAFIA

Afonso Ferreira Ávila – Nascido em Salto Grande – MG, Brasil, em 14/02/1962. Graduação em Engenharia Elétrica na UFMG em 1985. Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFMG em 2005. Atualmente desempenha a função de Engenheiro de Operação do Sistema de Distribuição na CEMIG, tendo desenvolvido atividades na área de Engenharia da Distribuição de 1987 a 2006.

Antonio Emílio Angueth de Araújo – Prof. Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1980. Graduação em Engenharia Elétrica na UFMG em 1980, mestrado na UFMG em 1983, PhD. Na The University of British Columbia, Canadá, 1993.

Eduardo Nohme Cardoso – Prof. Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, Graduação em Engenharia Elétrica UFMG 1977, Mestrado PUC-RJ 1982, Doutorado UFSC 1994, com atuação na área de Sistemas de Energia Elétrica

José Osvaldo Saldanha Paulino – Nascido em Belo Horizonte, MG, Brasil em 09/03/1957, Doutorado (1994 – UNICAMP), Mestrado (1985 – UFMG) e Graduação em Engenharia Elétrica (1979 – UFMG), Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, desde 1980.

Paulo Fernandes Costa – Prof. Assistente do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Consultor Senior Engenharia, Graduação em Engenharia Elétrica UFMG 1972, Mestrado UFMG 1995.