*XV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI 2002*

# Malha de Terra Auxiliar para o Neutro do Reator de Aterramento do Sistema de Distribuição 34,5/13,8 kV

**R. M. Ribas – COPEL**

E-mail: rosane.maris@copel.com

***Palavras-chave*** – COORDENAÇÃO - MALHA DE TERRA - PROTEÇÃO

***Resumo*** – O trabalho tem por objetivo expor a aplicação recentemente adotada para reduzir os inúmeros desligamentos causados pela atuação descoordenada das proteções de sobrecorrente no sistema de distribuição 34,5/13,8 kV.

Trata-se de um tipo de sistema de distribuição que apresenta uma particularidade em sua configuração, padrão na COPEL: Transformadores com primário em estrela com neutro solidamente aterrado e secundário em delta, com reator trifásico de aterramento.

A solução encontrada foi a construção de uma malha de terra auxiliar nas subestações 34,5/13,8 kV, separada eletricamente da malha de terra principal, para o aterramento do neutro do reator trifásico de aterramento, visando facilitar a passagem das correntes de seqüência zero, quando de um curto-circuito fase-terra, eliminando com isto, a atuação descoordenada da proteção que causa inúmeros desligamentos de circuitos 34,5 kV (sistema estrela–aterrada) pela atuação de relés de neutro (51N) para faltas à terra nos alimentadores de 13,8 kV.

## 1. INTRODUÇÃO

### *1.1. Critérios de Aterramento*

#### *1.1.1. Ligação de Transformadores de Força*

No sistema elétrico da COPEL, os enrolamentos dos transformadores são ligados em estrela. Exceção feita ao nível de 13,8 kV, em que os enrolamentos são ligados em triângulo, a não ser o transformador de aterramento no qual a ligação adotada é o ziguezague.

A adoção da ligação triângulo em 13,8 kV se prende a conveniência de ter um enrolamento triângulo nas transformações para estabilizar o neutro dos outros enrolamentos, principalmente dos enrolamentos de alta tensão e do versátil aproveitamento deste terciário na distribuição da área adjacente às subestações principais, e eventualmente a ligações de fontes e cargas reativas.

Construtivamente, o critério estrela-aterrada na alta tensão e triângulo na baixa simplifica a ligação interna dos enrolamentos.

No sistema elétrico da COPEL em geral, as correntes de curto-circuito de fase para terra em alta tensão, são maiores que as correntes de curto-circuito trifásicas, por ser a relação $\frac{X_0}{X_1} < 1$.

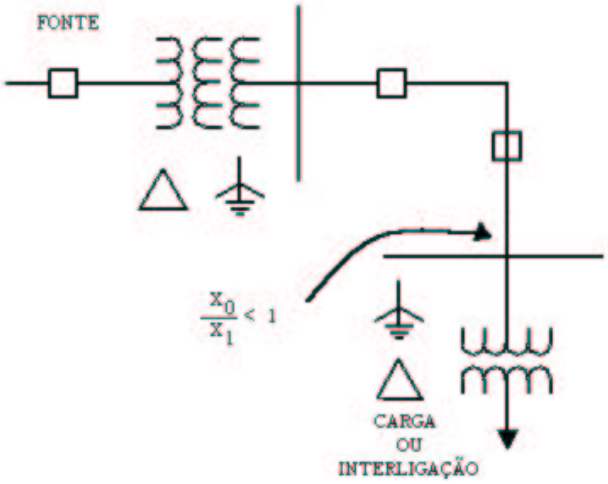


FIGURA1
LIGAÇÃO DE TRANSFORMADORES

Quando a ligação é em triângulo na alta tensão, o enrolamento é mais vulnerável a sobretensões, pelo fato de a relação $X_0/X_1$ ser elevada e correm risco de serem energizados por fonte de neutro isolado em caso de abertura de religadores nas fontes.

#### *1.1.2. Reatores Trifásicos de Aterramento*

Reatores trifásicos de aterramento são usados para prover uma conexão à terra no circuito em delta dos transformadores de força por duas razões:

- Permitir a circulação de correntes de seqüência zero quando de curtos à terra nesse circuito, fornecendo assim meios de proteção contra tais curtos por relés de terra.

- Limitar, quando da ocorrência de curto à terra, as sobretensões nas fases não faltosas a valores razoáveis e que não ofereçam problemas ao isolamento do transformador.

Os reatores de aterramento geralmente não alimentam carga, sendo portanto solicitados somente durante a permanência do curto.

São sistemas aterrados através de uma impedância na qual o principal elemento é a reatância, e de tal forma que para qualquer condição de operação tenhamos, em todos os pontos, mantida as seguintes relações:

$$3 < \frac{X_0}{X_1} \leq 10$$

## 2. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

### *2.1. Comportamento do Sistema de Distribuição 34,5/13,8 kV com Secundário em Delta*

O sistema de distribuição da COPEL foi concebido para atender as premissas de baixo investimento inicial e custo operacional reduzido. Dentro desta filosofia optou-se por duas tensões de distribuição: 13,8 e 34,5 kV fazendo esta última tensão também o papel de subtransmissão. As linhas de subtransmissão de 34,5 kV, que partem de subestações de transmissão 138/34,5/13,8 kV, alimentam subestações de 34,5/13,8 kV (até 4 subestações) que atendem pequenas localidades.

#### *2.1.1. Faltas à terra*

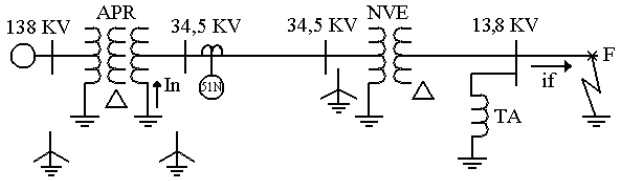


FIGURA 2
CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA
(ENSAIO REAL DE FALTA NO CAMPO)

Faltas à terra em sistemas de distribuição são muito freqüentes devido a descargas atmosféricas, animais, galhos e objetos sobre a rede e rompimento de cabos.

Devido a esta configuração do sistema de distribuição, na COPEL, desde 1991, se tem constatado inúmeros desligamentos das proteções nas subestações fontes 138/34,5/13,8 kV, onde defeitos que envolvam a terra nos alimentadores de 13,8 kV provocam a abertura dos equipamentos de proteção de retaguarda no sistema de 34,5 kV, através da atuação dos relés de neutro (51N) destas proteções.

#### *2.1.2. Modelo Elétrico Completo*

Foi desenvolvido um modelo elétrico, baseado em componentes simétricas que explicasse o fenômeno e permitisse o cálculo das correntes de seqüência zero que fluem no sistema. A figura 3 representa o modelo:

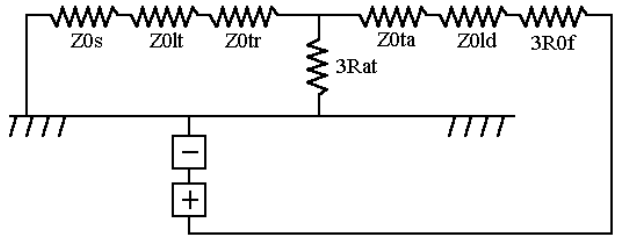


FIGURA 3
MODELO COMPLETO DE SEQÜÊNCIA ZERO INTERLIGADO AOS DEMAIS CIRCUITOS DE SEQÜÊNCIA

Onde:

3Rat = resistência de aterramento da subestação de distribuição;

Z0s = impedância de seqüência zero equivalente na barra de 34,5 kV;

Z0lt = impedância de seqüência zero da linha de transmissão 34,5 kV;

Z0tr = impedância de seqüência zero do transformador 34,5/13,8 kV;

Z0ta = impedância de seqüência zero do transformador de aterramento;

Z0ld = impedância de seqüência zero da linha de distribuição;

3R0f = resistência de falta fase-terra.

O modelo acima considera o valor da resistência de aterramento da subestação B (NVE) e também a ligação metálica entre os neutros do transformador de força e do reator de aterramento. Desta forma, a corrente de seqüência zero divide-se em duas a partir da barra de referência de seqüência zero: uma parte via sistema de transmissão e outra parte via resistência de aterramento da malha de terra da subestação B.

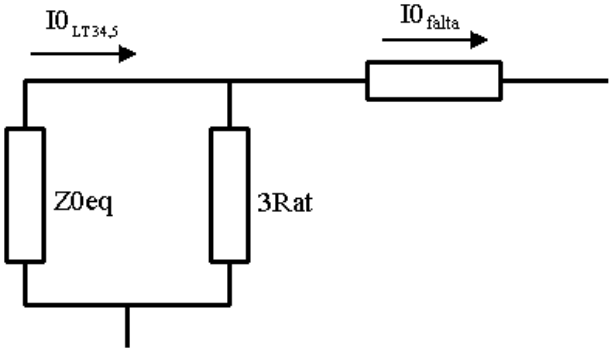


FIGURA 4
MODELO FINAL DE SEQÜÊNCIA ZERO PARA CÁLCULOS DAS CORRENTES

Com base na figura 4, pode-se calcular o valor da corrente de seqüência zero que circula pela linha de transmissão 34,5 kV:

$$3I0_{lt34,5} = \frac{3Rat}{Z0eq + 3Rat} X 3I0 \qquad (1)$$

Exemplo: Seja um sistema de distribuição conforme figura 2. A corrente de curto-circuito fase-terra é de 60 A,

Rat = 15 Ω

Z0eq = j2,6 pu (na tensão de 34,5 kV) = j2,6 x 11,90 = j30,94 Ω

Com base no modelo acima apresentado, teremos:

Corrente de seqüência zero (3I0) circulando pela linha de transmissão 34,5 kV que interliga as subestações A (APR) e B (NVE) = 49,20 A .

Esta corrente poderá facilmente fazer atuar indevidamente a proteção de sobrecorrente de neutro da subestação A (APR), para uma corrente de falta de 60 A .

## 2.2. Alternativa para Sanar o Problema de Descoordenação da Proteção

### 2.2.1. Condição Crítica

Algumas subestações em particular reúnem situações críticas para o aparecimento do problema de operação indevida da proteção à montante para faltas à terra em alimentadores:

- Subestação à montante muito próximas, o que provoca uma impedância de seqüência zero equivalente baixa (Z0eq), aumentando a corrente que circula pela linha de transmissão 34,5 kV que interliga as subestações A e B, provocando a abertura dos equipamentos de proteção de retaguarda no sistema de 34,5 kV, nas subestações fontes;

- Resistência de aterramento das malhas bastante altas, que pode ser conseqüência dos valores altos de resistividade do solo, ou por possuírem uma malha de terra extremamente antiga e deteriorada, contendo hastes e condutores insuficientes e que provavelmente não estejam mais desenvolvendo as funções pretendidas.

### 2.2.2. Solução Adotada

Como a corrente de seqüência zero que circula pela linha de transmissão 34,5 kV que interliga as subestações A e B depende da relação entre duas impedâncias Z0eq e 3Rat, e após terem sido feitos ensaios reais de falta no campo e simulações monitorando as principais correntes do sistema, escolheu-se a mais adequada dentre as várias alternativas possíveis para resolver o problema de descoordenação da proteção, ou seja: a construção de uma malha de terra auxiliar nas subestações 34,5/13,8kV, para o aterramento do neutro do reator trifásico de aterramento, visando facilitar a passagem das correntes de seqüência zero, quando de um curto fase-terra.

Esta solução é muito eficiente, pois isola os sistemas de seqüência zero de 34,5 e 13,8 kV, eliminando a circulação de corrente de seqüência zero pelo sistema do lado primário do transformador de força.

### 2.2.3. Especificação Técnica da Malha de Terra Auxiliar

- A malha de terra auxiliar deverá estar isolada eletricamente da malha de terra principal da subestação e também de todas as partes metálicas (cabo totalmente isolado até a bucha de neutro do reator trifásico de aterramento, por meio de conduíte de pvc ou similar).

Porém, o tanque do reator de aterramento deverá continuar solidamente aterrado na malha principal da subestação.

- A malha de terra auxiliar deverá ter baixo valor de resistência de aterramento ou possuir um valor aproximado ao da resistência da malha principal da subestação.

Uma melhoria conseguida e de baixo custo foi a instalação de eletrodos especiais (Tipo BQ-2400).

São eletrodos baro-químicos de 2 polegadas de diâmetro por 2,40 metros de comprimento e no seu interior está repleto de sais metálicos, que são gradativamente drenados através do solo ao redor, por meio da existência de alguns furos em toda sua extensão.

Devem ser instalados em um poço com diâmetro de 30 cm, cheio de gel ao seu redor para melhor condicionamento do solo e interligados através de solda oxiacetilênica.

Maiores informações referentes aos procedimentos para instalação e manutenção destes eletrodos especiais BQ-2400, consultar recomendação do fabricante.

Estes eletrodos são tão eficientes que apenas 01 (um) pode substituir até 10 (dez) hastes convencionais, sendo portanto, este um fator muito importante quando temos restrições de espaço para instalarmos um aterramento elétrico.

A eficiência da instalação destes eletrodos foram confirmadas na prática, com a realização da medição da resistência de malha de terra.

Os procedimentos para o projeto da malha de terra auxiliar levam em conta o número de eletrodos e a distância entre eles, a resistividade do solo do local e o valor final que se pretende de resistência de malha de terra. As fórmulas e cálculos matemáticos são fornecidos pelo fabricante.

- A resistência mútua entre as malhas de terra (principal e auxiliar) deve ser nula.

Para a verificação do valor da resistência mútua na prática procede-se da seguinte maneira:

$$R_T = R_1 + R_2 - 2R_M \quad (2)$$

onde:

$R_1$ = resistência da malha principal;

$R_2$ = resistência da malha auxiliar;

$R_T$ = resistência medida entre as duas malhas, com o resistímetro, curto-circuitando os eletrodos de corrente (C1) e de potencial (P1) e C2 com P2, e conectando-os nas malhas totalmente separadas;

$R_M$ = resistência mútua, que será um valor médio calculado, pois na realidade engloga outras grandezas, porém de pequenos valores podendo ser desprezados.

### 2.2.4. Custo para Execução da Malha de Terra Auxiliar Utilizando Eletrodos Especiais

Nas subestações onde foram executadas malhas auxiliares, após cálculos levando-se em conta todos os parâmetros, ficou estabelecida a necessidade da instalação de dois eletrodos especiais espaçados de 5 metros, para que se obtenha um valor similar ao da resistência da malha de terra principal, logo:

Custo de Material:

- 2 eletrodos especiais tipo BQ-2400 (kit completo) = R$ 1.232,00 (cotação de preço em 25/06/2002);
- 100 m de cabo de cobre nú – 70 $mm^2$ = R$ 600,00;
- materiais diversos: tubo de pvc ¾, soldas oxiacetilênicas, etc. = R$ 300,00

Custo da Mão de Obra

- abertura de valetas e lançamento de cabos = R$ 300,00

Total de Custos Estimados = R$ 2.432,00

## 3. CONCLUSÃO

Estas malhas de terra auxiliares já encontram-se instaladas em 6 subestações 34,5/13,8 kV da COPEL.

O primeiro projeto foi executado na subestação Nova Esperança e serviu de protótipo para a realização de inúmeros testes, com o objetivo de verificar a efetiva solução.

Segue os valores retirados das oscilografias monitoradas para três configurações distintas:

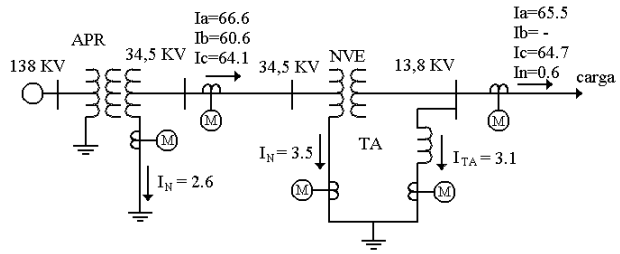


FIGURA 5
MEDIÇÕES PRÉ – FALTA

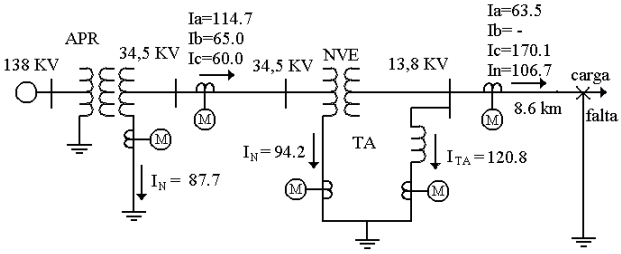


FIGURA 6
MEDIÇÕES DE CORRENTE, COM FALTA NO 13,8 kV

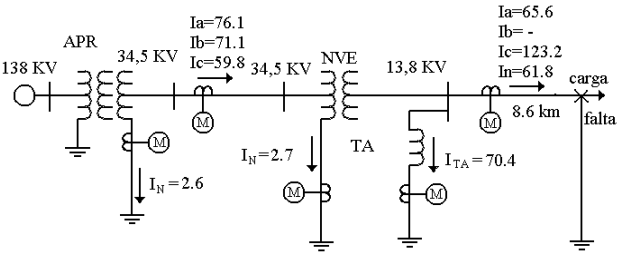


FIGURA 7
MEDIÇÕES DE CORRENTE, COM FALTA NO 13,8 kV
(MALHA AUXILIAR)

Os testes, nas duas primeiras configurações, foram realizados com o reator trifásico de aterramento conectado na malha convencional (principal) e a última, com o reator de aterramento conectado na malha auxiliar, isolada eletricamente da malha de terra principal.

Com a construção da malha de terra auxiliar, constatou-se que houve uma redução significativa dos valores das correntes de seqüência zero nos transformadores das subestações Nova Esperança (NVE) e fonte (subestação Alto Paraná – APR) e também na linha de subtransmissão de 34,5 kV.

As ocorrências estão ainda sendo monitoradas porém, já consegue-se com esta nova performance de instalação, perceber ganhos qualitativos como uma redução considerável de desligamentos indesejáveis nas proteções destas subestações.

## 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Bourges, F. "Faltas à Terra em Sistemas de Distribuição com Secundário em Delta". XV Encontro Técnico de Proteção – GCOI/SCM/GTMI. Vitória, Brasil. 1997.

[2] Nery, L. G.; Holzmann, C. "Sistema Elétrico da COPEL – Ligação de Transformadores". COPEL – SPS/DPET – Relatório 010/82. Curitiba, Brasil. 1982.

[3] Rezende, D. S. "Transformadores de Aterramento". COPEL – DVEI – Relatório 05/77. Curitiba, Brasil. 1977.

[4] Rezende, D. S. "Descoordenação da Proteção para Curtos Fase-Terra no 13,8 kV". COPEL – SGM. Curitiba, Brasil. 1996.

[5] Ribas, R. M.; Reifur, N.; Moro, A. "Melhoria da Malha de Terra Auxiliar para o Aterramento do Neutro do Transformador de Aterramento na SE/NVE". COPEL – VGMS – Relatório 035/97. Curitiba, Brasil. 1997.

[6] Rufato, E. J. " Relatório de Ensaios de Curto Circuito na SE Nova Esperança". COPEL – CNDS – Relatório 01/96. Curitiba, Brasil. 1996.

[7] Rufato, E. J. "Malha de Terra de Subestações: Responsável pela Descoordenação das Proteções de Sobrecorrente". XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Foz do Iguaçu, Brasil. 2000.

[8] Silva, J. M.; Bourges, F.; Ribas, R.; Reifur, N. "Manutenção em Malhas de Aterramento de Subestações 34,5/13,8 kV". Seminário de Materiais do Setor Elétrico - UFPR/COPEL. Curitiba, Brasil. 1996.

[9] Ushikubo, M. F. " Um Modelo Matemático para a Impedância de Seqüência Zero do Conjunto Transformador Estrela-Aterrada/Delta e Reator Trifásico de Aterramento Zig-Zag Instalados em Solos de Alta Resistividade". Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE. Foz do Iguaçu, Brasil. 1999.

[10] "Manual de Instalação e Manutenção do Eletrodo Baro-Químico BQ-2400". Informe de Ideal Engenharia Indústria e Comércio Ltda. Disponível em http://www.idealengenharia.com.br