



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DURANTE MANOBRAS DE REATORES
DE ATERRAMENTO EM SISTEMAS DE 69KV**

Angela C.S.L. Guimarães (*)

Antônio Roseval F. Freire

Rita K.D.M. Medeiros

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Chesf

RESUMO

Nas subestações de fronteira do sistema de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) com as distribuidoras, o sistema de subtransmissão em 69kV opera com neutro isolado. Para fornecer uma referência a terra e permitir a circulação de correntes de seqüência zero durante faltas monofásicas, são utilizados reatores de aterramento com os enrolamentos ligados em zigue-zague aterrados.

A rede de proteção da Chesf registrou uma seqüência de perdas de barramento de 69kV durante a manobra desses reatores de aterramento, tendo os eventos apresentado características similares, como: sobretensões transitórias fase-terra elevadas na barra de 69kV.

Neste artigo serão apresentados os resultados encontrados nos estudos, a análise comparativa com os registros oscilográficos das ocorrências e os critérios de riscos que associam as instalações e o reator de aterramento.

PALAVRAS-CHAVE

Neutro Isolado – Reator de Aterramento – Ferrorressonância – Transformador de Potencial Indutivo – Arco Elétrico.

1.0 INTRODUÇÃO

Muitos sistemas de energia elétrica operam totalmente isolados da terra ou aterrados através de uma alta impedância. Apesar de ter vantagens, sistemas como estes ficam insensíveis a defeitos monofásicos. Num sistema isolado (estrela não-aterrada ou delta), uma falta fase-terra só sensibilizará a proteção se outro defeito a terra ocorrer em algum lugar do sistema. Além disso, em sistemas de 69kV isolados, quando ocorre um defeito para terra, as sobretensões nas fases sãs podem atingir valores teóricos superiores a 1,73 vezes o valor da tensão fase-terra antes do defeito.

Para dar referência a um sistema elétrico com neutro isolado é utilizado um reator de aterramento. O reator de aterramento é um transformador de potência que opera em vazio, que tem impedância infinita na seqüência positiva e impedância baixa na seqüência zero. [1][2]

Os sistemas de transmissão e subtransmissão em 69kV na região Nordeste do Brasil, constituídos pelas subestações de 69kV da Chesf e pelos sistemas de subtransmissão em 69kV, pertencentes às concessionárias de distribuição, são sistemas elétricos de neutro isolado e com os enrolamentos de 69kV dos transformadores conectados em delta. Para reduzir as sobretensões nas fases sãs durante defeitos monofásicos, nas subestações da Chesf são utilizados reatores de aterramento, conectados com os seus enrolamentos conectados em zigue-zague aterrado (Figura 1).

Os reatores de aterramento (TT) alteram apenas a impedância de seqüência zero e, por conseqüência, a relação $X0/X1$ do sistema. Quanto mais baixa a impedância em ohms/fase do TT, menor a relação $X0/X1$. Baseado em Normas Técnicas, dimensionam-se esses equipamentos de acordo com a suportabilidade dos equipamentos do sistema elétrico que estão instalados com relação as sobretensões temporárias fase-terra.

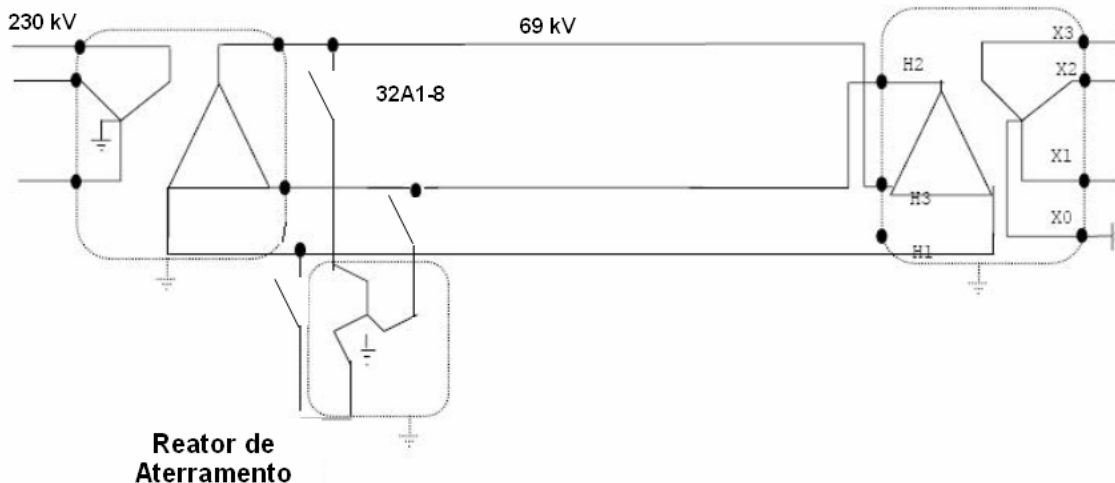


FIGURA 1. Instalação típica das subestações 230/69kV da Chesf, com sistema elétrico isolado, utilizando Reator de Aterramento como referência à terra.

Em duas ocorrências na Chesf foi registrada a perda da barra de 69kV, associada à manobra da chave seccionadora 32A1-8 durante a liberação de reator de aterramento, com a atuação da proteção de barra 59R (3V0). A falta de registros em oscilógrafos, de relatórios de ocorrências anteriores na Chesf e até mesmo a falta de experiência de outras empresas motivaram a realização de estudos para subsidiar o diagnóstico das ocorrências.

A seguir será apresentado um breve histórico dos trabalhos realizados e os resultados encontrados nos estudos de transitórios eletromagnéticos de manobras de reatores de aterramento, através da chave seccionadora 32A1-8 nas subestações diagnosticadas como críticas e apresentar as soluções encontradas para a realização de manobras nesses equipamentos em condições seguras.

2.0 ESTUDOS REALIZADOS E O DIAGNÓSTICO DO FENÔMENO:

A fim de subsidiar o diagnóstico da causa de ocorrências aonde tiveram indícios de danificação de equipamentos, desligamentos de cargas ou atuações indesejadas de proteções coincidentes com manobras de reatores de aterramento, foram realizados estudos de transitórios eletromagnéticos.

Para tal, foi modelado no ATP/EMTP todo o setor de 69kV das subestações, ou seja, o sistema de transmissão equivalente, visto da barra de 69kV; os alimentadores de 69kV; a carga; os bancos de capacitores; transformadores de potencial indutivos (TPI); pára-raios (PR) e o reator de aterramento.

Para reproduzir em simulação as tensões e correntes transitórias resultantes das perdas de barramento nas SE Ribeirão, Penedo e Juazeiro, foram analisadas as seguintes influências:

- Dispersão entre pólos, sendo simulados casos estatísticos de abertura da chave 32A1-8 considerando uma dispersão aleatória;
- Os equipamentos presentes no setor de 69kV das subestações e os tipos de ligação dos transformadores abaixadores, pára-raios de 72kV, TPI, alimentadores e cargas de 69kV;
- As características não-lineares dos equipamentos, como a curva de magnetização dos TP de 69kV e a do próprio Reator de Aterramento;
- Potência de curto-circuito do barramento, fator $X0/X1$, número de alimentadores de 69kV, carga, presença de BC 69kV, presença de outro reator de aterramento, etc.

2.1 Casos Estudados

A manobra no reator de aterramento da SE Ribeirão foi feita para atender uma manutenção programada do equipamento. Na Figura 2 está apresentado o diagrama unifilar do setor de 69kV da subestação de Ribeirão.

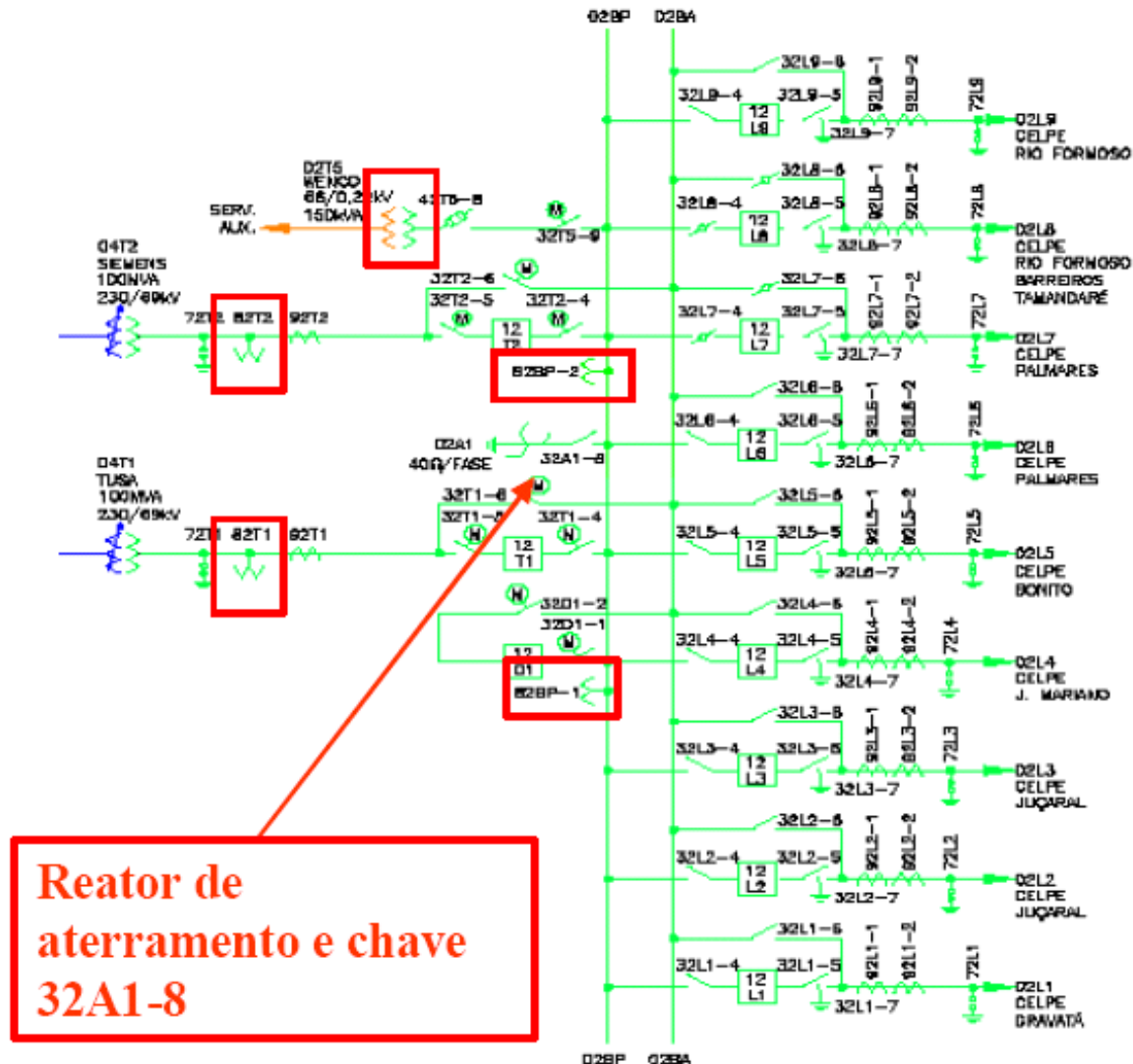


FIGURA 2. Diagrama unifilar da SE Ribeirão da Chesf

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os registros oscilográficos encontrados na SE Ribeirão durante a manobra de abertura do Reator de Aterramento pela Chave Seccionadora 32A1-8. Observa-se na Figura 3 o comportamento das tensões fase-terra na barra de 69kV da SE Ribeirão e a provável ocorrência de um curto-circuito, que se transfere de uma fase para outra ao longo do defeito.

Na Figura 4 está apresentado o registro da corrente de neutro no reator de aterramento da SE Ribeirão. Neste registro, observa-se uma perturbação no sistema antes do início do curto-circuito.

No mesmo mês, foi registrado na SE Penedo a perda da barra de 69kV pela atuação da proteção de barra 59R (3V0), sendo que, dessa vez, sem registros oscilográficos. Entendendo a necessidade de maiores informações que cercavam o fenômeno, a Chesf resolveu monitorar a manobra programada em outra subestação, a SE Juazeiro, apresentadas nas Figuras de 5 a 7.

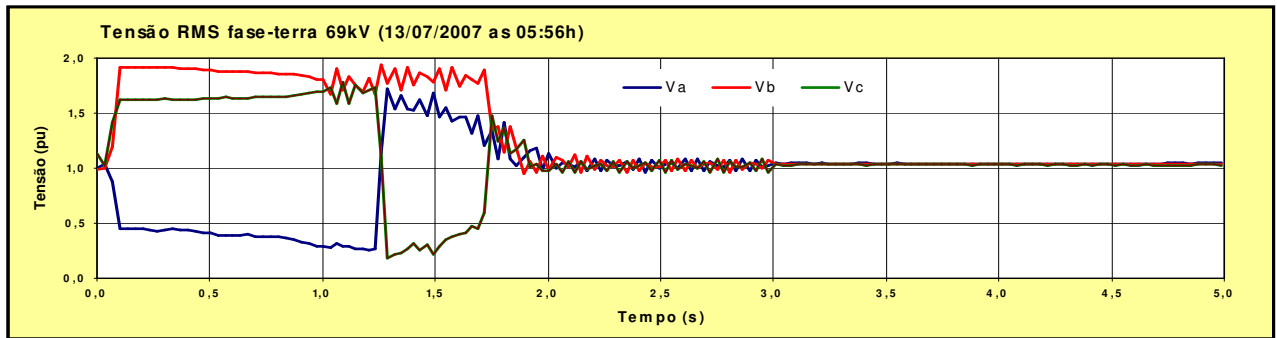


FIGURA 3.- Registro oscilográfico na SE Ribeirão da tensão Fase-Terra na barra de 69kV(pu) durante a manobra de abertura do Reator de Aterramento pela Chave Seccionadora 32A1-8.

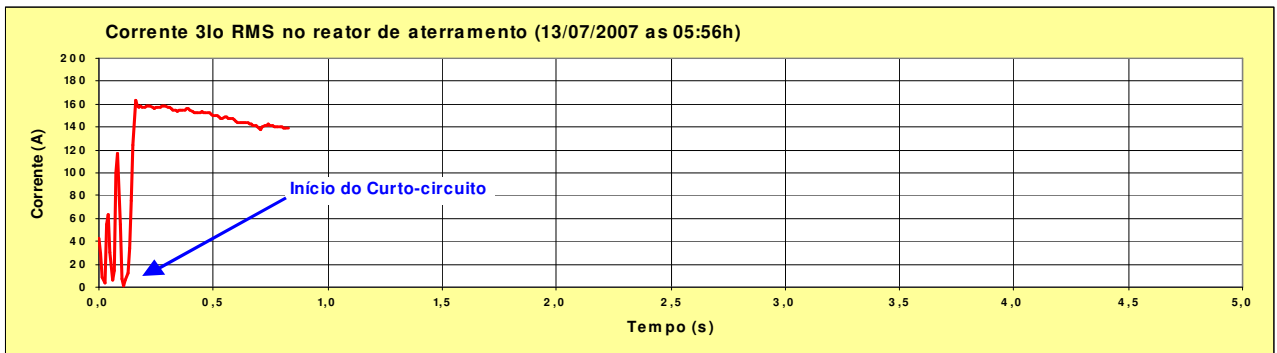


FIGURA 4 - Registro oscilográfico da corrente de Neutro (A) do Reator de Aterramento durante a sua desenergização na SE Ribeirão.

Nos registros da SE Juazeiro, durante a desenergização do reator de aterramento, puderam ser observadas três novos fatores agregados ao fenômeno.

Primeiro, foram observados três diferentes comportamentos na tensão 3V0, correspondentes provavelmente à abertura de cada pólo da chave seccionadora 32A1-8 (Figura 5).

Depois, observou-se que, no barramento de 69kV da subestação, as tensões fase-fase são senoidais e de amplitude próxima a 1pu, apesar de as tensões fase-terra estarem distorcidas, indicando uma perturbação no circuito de seqüência zero.(Figuras 6 e 7).

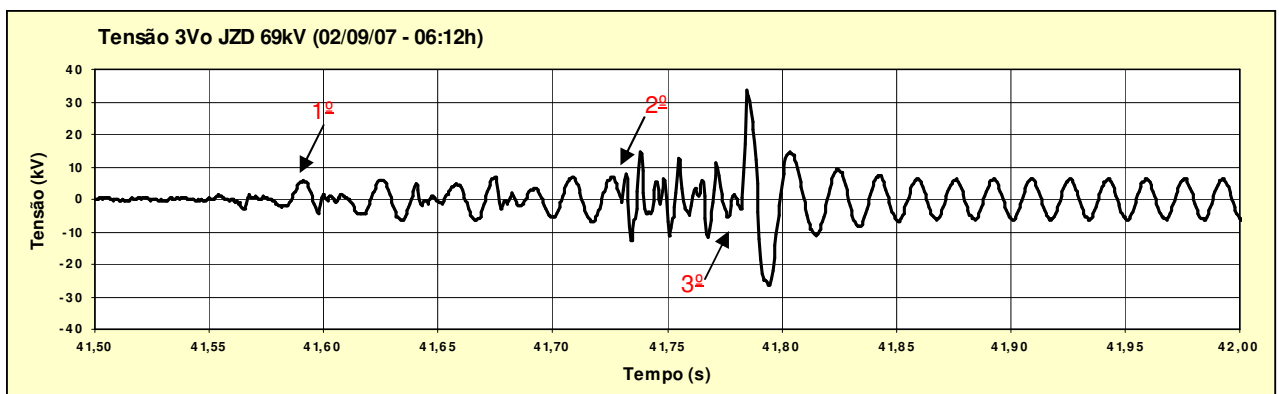


FIGURA 5. Registro oscilográfico da tensão 3V0 (kV) do relé 59R na SE Juazeiro durante a desenergização do Reator de Aterramento, referido ao lado de 69kV.

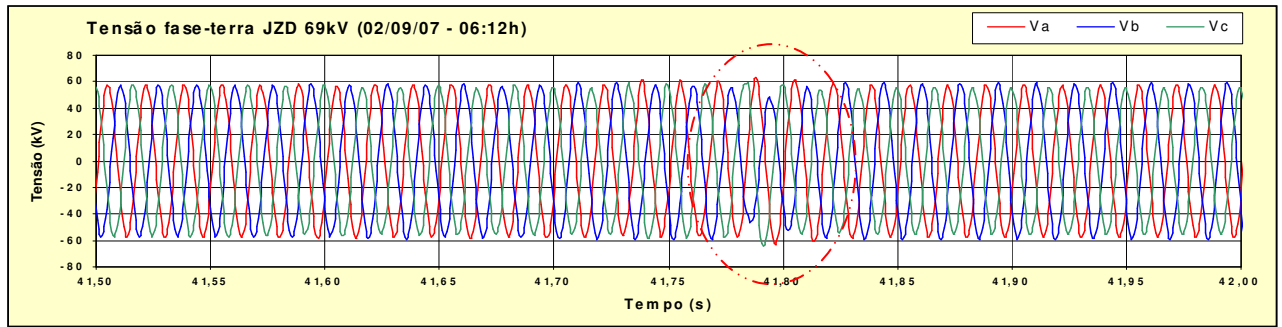


FIGURA 6.- Registro oscilográfico da tensão fase-terra (kV) da barra de 69kV na SE Juazeiro durante a desenergização do Reator de Aterramento.

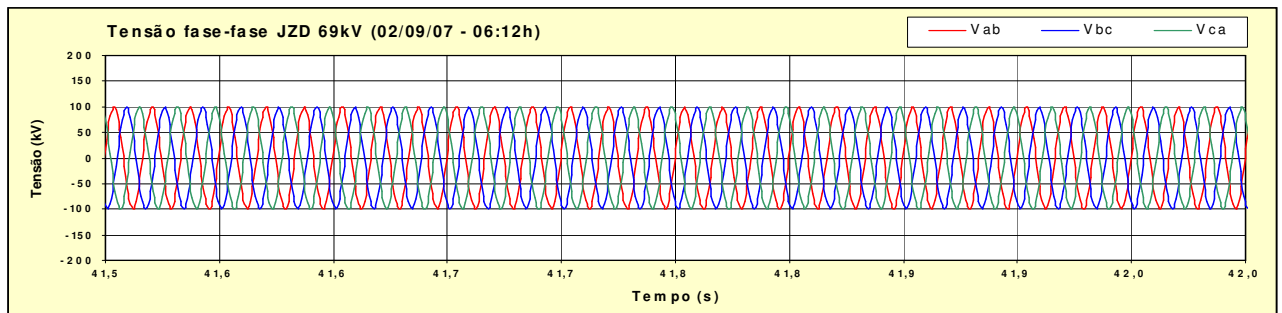


FIGURA 7- Registro oscilográfico da tensão fase-fase (kV) da barra de 69kV na SE Juazeiro durante a desenergização do Reator de Aterramento.

2.2 Fatores de Influência ao risco

Uma das análises feitas sobre as influências nas sobretensões sustentadas encontradas no barramento de 69kV, durante manobras de reatores de aterramento nas subestações da Chesf foi a influência da capacitância para terra dos alimentadores de 69kV, proporcional ao número de linhas presentes.

Na Figura 8 está apresentada a tensão resultante $3V_0$ ($V_{at} + V_{bt} + V_{ct}$) do lado de 69kV visto pelo relé 59R de barra durante a simulação de desenergização do único reator de aterramento de uma subestação com potência de curto-circuito de 900MVA, relação $X_0/X_1 = 7,6$, variando o número de alimentadores presentes, em 06, 08 ou 09.

Observa-se que as capacitâncias de seqüência zero dos alimentadores de 69kV apresentaram uma forte influência nas condições que propiciaram o aparecimento de sobretensões fase-terra sustentadas. Vê-se que quanto maior o número de alimentadores, menor o risco de aparecimento do fenômeno.

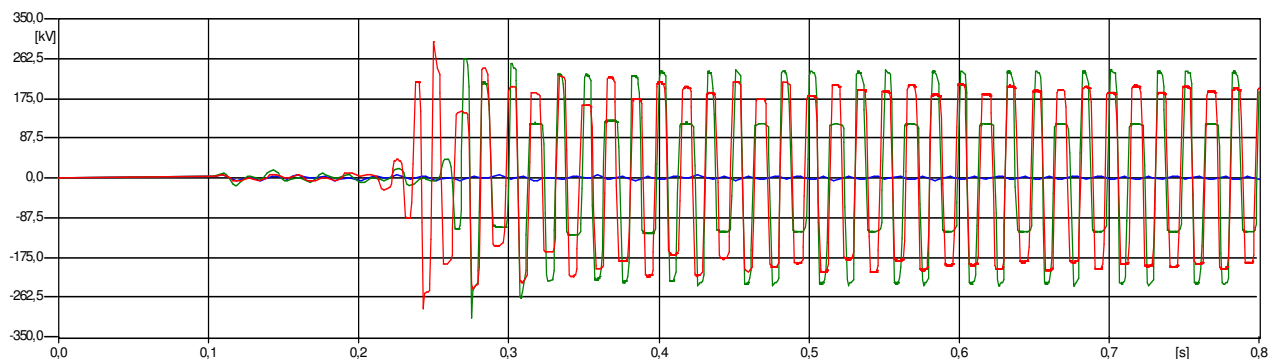


FIGURA 8 - Tensão $3V_0$ (kV) do relé 59R resultado da simulação da desenergização de um reator de aterramento, variando o número de alimentadores presentes na subestação, referido ao lado de 69kV, sendo o caso 06 alimentadores (vermelho), 08 (verde) e 09 (azul).

Na Figura 9 está apresentado o resultado de uma simulação aonde foram comparadas subestações com os setores de 69kV idênticos e potências de curto-circuito diferentes.

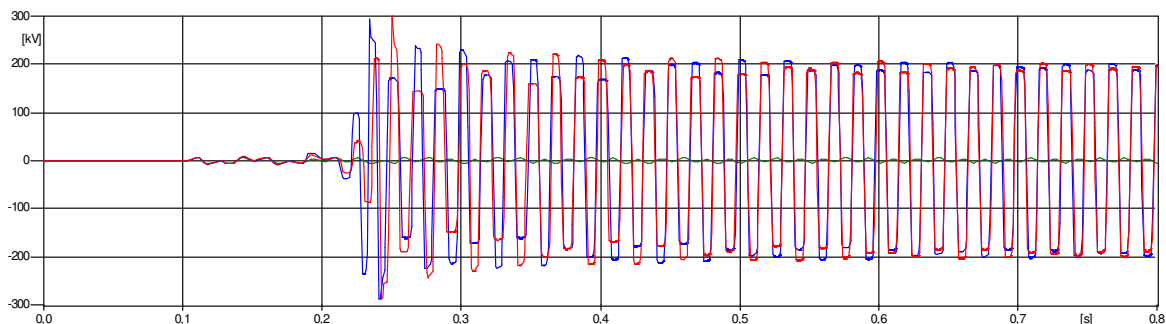


FIGURA 9 - Tensão 3V0 (kV) do relé 59R resultado da simulação da desenergização de um reator de aterramento, variando a potência de curto-circuito vista da barra de 69kV da subestação, referido ao lado de 69kV, sendo o caso 900MVA (vermelho), 500MVA (verde) e 1200MVA (azul).

Observa-se que o aumento da potência de curto-circuito na subestação favorecia ao aumento do risco de sobretensões, o que justifica a aparição do fenômeno apenas após reformas e ampliações do sistema.

Também a partir de simulações foi verificado que uma grande dispersão entre pólos da chave seccionadora, verificada em equipamentos manobrados manualmente, tinham forte influência sobre o fenômeno. Quanto maior a dispersão, maior o risco.

Em simulações análogas, foi verificado que a característica de magnetização do reator de aterramento influenciava no fenômeno. Quanto maior a corrente de magnetização (I_0), maior o risco de sobretensões.

Outra característica analisada foi a presença de outro reator de aterramento na instalação durante a manobra da chave 32A1-8. Observou-se que, a referência à terra dada pelo 2º reator de aterramento elimina o risco de aparecimento do fenômeno, durante a manobra do 1º.

Já os bancos de capacitores e as cargas de 69kV, devido ao tipo de ligação isolada da terra, não influenciaram no aparecimento do fenômeno.

Assim, diante dos resultados encontrados, verificou-se que se tratava do fenômeno de ferrossonância com sobretensões temporárias fase-terra elevadas, ou seja, ressonância no circuito de seqüência zero, de baixo amortecimento, alimentada pelo acoplamento com o circuito de seqüência positiva, e iniciado por uma interação entre a indutância de magnetização do reator de aterramento e as capacitâncias de seqüência zero dos alimentadores de 69kV. Após a abertura das três fases da chave 32A1-8 estendia-se uma ressonância entre as indutâncias de magnetização dos TP e as capacitâncias de seqüência zero do circuito de 69kV, prolongando a duração do 3V0.[3][4][5].

3.0 SOLUÇÕES INCORPORADAS ÀS MANOBRAS DE REATORES DE ATERRAMENTO:

Na configuração atual, as manobras do reator de aterramento através da chave 32A1-8 podem iniciar ferrossonância e provocar solicitações acima dos limites de projeto e de ensaios, podendo causar falhas por degradação excessiva do isolamento interno. Foi dado como solução definitiva a instalação da chave 32A1-6 (Figura 10) para permitir a transferência do reator para a barra auxiliar, sendo a energização e desenergização do equipamento feitas pelo disjuntor auxiliar 12D1, reduzindo significativamente as solicitações sobre o equipamento e evitando a ferrossonância.

Até que todas as chaves 32A1-6 fossem instaladas, foram estudadas soluções provisórias que permitissem o controle do risco de ferrossonância durante a manobra dos reatores de aterramento. Para cada subestação foi analisada a condição de operação necessária para inibir o aparecimento de sobretensões fase-terra, interferindo nos fatores de risco, como, por exemplo, alterando a potência de curto-circuito na barra, modificando a topologia da instalação; ou alterando o circuito de seqüência zero, controlando o número de alimentadores de 69kV energizados.

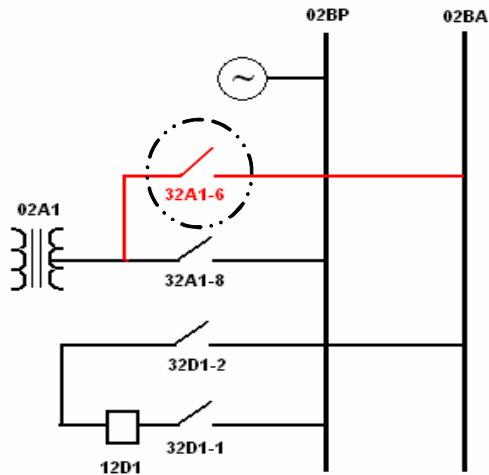


FIGURA 10 - Solução para manobra de reatores de aterramento através da instalação da chave 32A1-6

Até que todas as chaves 32A1-6 fossem instaladas, foram estudadas soluções provisórias que permitissem o controle do risco de ferorrressonância durante a manobra dos reatores de aterramento. Para cada subestação foi analisada a condição de operação necessária para inibir o aparecimento de sobretensões fase-terra, interferindo nos fatores de risco, como, por exemplo, alterando a potência de curto-circuito na barra, modificando a topologia da instalação; ou alterando o circuito de seqüência zero, controlando o número de alimentadores de 69kV energizados.

Nas Figuras 11 e 12 estão apresentados dois casos de instalações nas quais foram dadas soluções provisórias diferentes de mitigação do risco de ferorrressonância. Na subestação de Coremas (Figura 11), por exemplo, durante a abertura do único reator de aterramento instalado, apenas com a saída de três dos alimentadores de 69kV apareceria a ferorrressonância e, portanto, esses alimentadores poderiam estar fora de operação, tanto que os demais estivessem energizados pela Chesf, em vazio ou em carga.

Já na subestação de Tacaimbó (Figura 12), mesmo com todos os alimentadores presentes apareciam sobretensões temporárias no 69kV durante a manobra. Só com a saída de um dos transformadores de potência (TR) instalados, ou seja, reduzindo-se a potência de curto-circuito da barra de 69kV, seria possível a desenergização do reator de aterramento, sem risco de ferorrressonância.

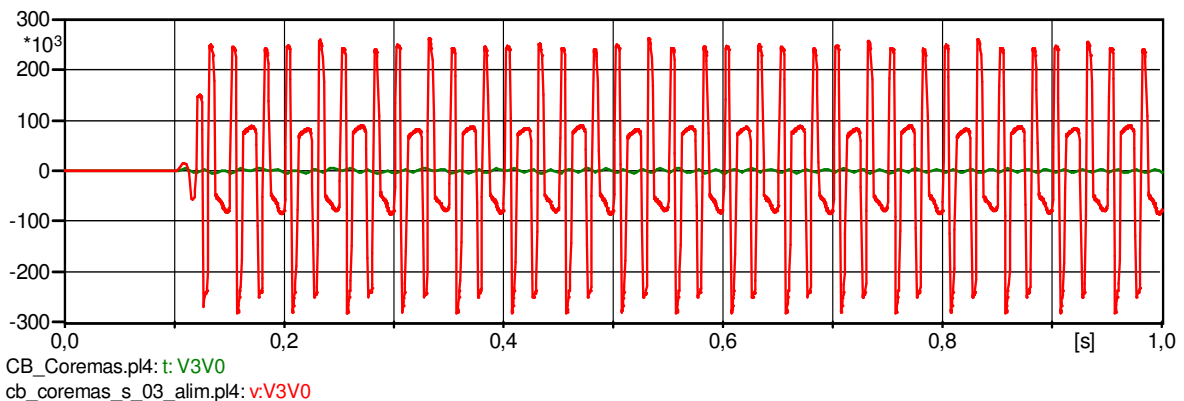


FIGURA 11- Tensão 3V0 (kV) do relé 59R, referido ao lado de 69kV, resultante da simulação da desenergização de um reator de aterramento na SE Coremas, variando o número de alimentadores presentes na subestação sendo o caso vermelho, com a instalação completa e verde, sem 03 alimentadores

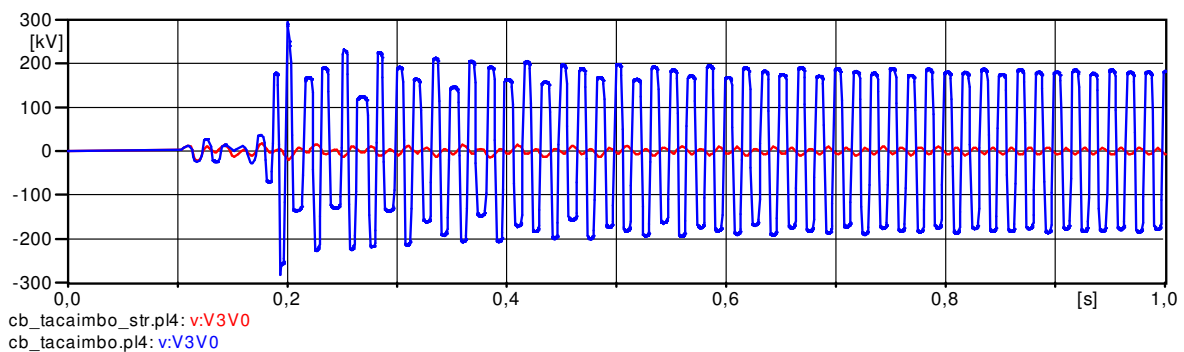


Fig. 12. Tensão 3V0 (kV) do relé 59R, referido ao lado de 69kV, resultante da simulação da desenergização de um reator de aterramento na SE Tacaimbó, variando o número de alimentadores presentes na subestação sendo o caso azul, com a instalação completa e vermelha, sem 01 TR

4.0 CONCLUSÕES:

Embora apresentem vantagens, o sistema elétrico com neutro isolado não permite a detecção de faltas monofásicas, tornando-se, portanto, indispensável o uso de reatores de aterramento para dar referência à terra. As ocorrências detectadas nas subestações da Chesf mostraram que a entrada em operação de novas obras, tais como: transformadores de potência, linhas de transmissão e/ou usinas; podem iniciar as condições para que ocorra a ferorrressonância durante a manobra desses equipamentos através de chaves seccionadoras.

O aparecimento de sobretensões fase-terra transitórias em sistemas elétricos de neutro isolado de 69kV além de provocar a atuação da proteção 3V0 com perda da barra; pode forçar a interrupção de corrente elevada ($>0,5A$) pela chave, com arco prolongado; provocar acidentes nas manobras com chaves sem mecanismo motorizado (arco fora de controle); danificar equipamentos, como pára-raios, por dissipação de energia elevada e até curtos-circuitos.

Recomenda-se que, em sistemas de neutro isolado, as manobras de reatores de aterramento com características de magnetização elevadas devem ser feitas através de disjuntor, a fim de evitar a ferorrressonância; sendo a instalação da chave seccionadora 32A1-6 a solução para as subestações que podem utilizar-se do disjuntor de transferência.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- (1) Erroa, C., Cruz M., Calero F., "Experiencia, Mejoras en La Operación, Limitaciones de Un Esquema de Protecciones de Un Sistema Eléctrico de Neutro Aislado", *XII ERIAC-Encuentro Regional Ibero-Americano del Cigr, Foz de Iguazú-Pr, Brasil.*, Mayo 2007.
- (2) Ávila, A.F., Araújo, A.E.A., Cardoso E.N., e outros, "Aterramento de Neutro dos Transformadores de Distribuição de 138kV – Um Estudo de Engenharia", *XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro-Brasil*, Outubro 2007.
- (3) Freire, A.R.F., Lins, L.R., Campos, A.J.S., "Ferroressonância Durante Manobras de Energização em Vazio do Transformador Abaixador do Compensador Estático da Subestação Funil", *X ERLAC, CE33 Encontro Regional Latino Americano do CIGRÉ*, Foz do Iguazu - Brasil, Maio 2003.
- (4) Rocha, A.C.O., Souza, W.M., Mendes J.C., "Practical Experiences in Analysis of Abnormal Voltages due Neutral Instability", *IEEE Transactions, on P.D.*, July 1996.
- (5) Ferracci, Ph., "Ferroressonance", *Cahier Technique Schneider ECT 190*, March 1998.