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 ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS E FERRORRESSONÂNCIA SUSTENTADA EM SISTEMAS DE 69kV QUE OPERAM COM O NEUTRO ISOLADO

Antonio Roseval F. Freire(*) **Sérvulo de Oliveira Pinto** **Flávio Porto Dias** **Sylvia de Almeida Barros**

Eliel Celestino da Silva **Ângela Cristina S. L. Guimarães** **Ademar Vieira de Carvalho Jr**

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (CHESF)

RESUMO

Em algumas manobras de energização de transformadores em vazio foram registradas sobretensões temporárias fase-terra elevadas. Essas sobretensões são geradas por uma condição de ferrorressonância sustentada causada pela interação dos transformadores de potencial indutivo com capacitâncias parasitas. Apresenta-se neste trabalho uma síntese da experiência operativa e das análises realizadas para permitir uma melhor avaliação dos riscos e da influência dos parâmetros envolvidos, incluindo a metodologia dos estudos, os modelos utilizados nas simulações e as soluções de engenharia ou medidas operativas identificadas para mitigar o fenômeno, visando evitar os riscos de danificação de equipamentos e desligamentos indesejados.

PALAVRAS-CHAVE

Ferrorressonância, Transformador, Sobretensão Temporária, Transformador de Potencial Indutivo, Neutro Isolado

1.0 - INTRODUÇÃO

Nas subestações de fronteira, 230/69kV e 138/69kV, do sistema de transmissão da Chesf com as distrbuidoras, são utilizados transformadores trifásicos com os enrolamentos primários ligados em estrela aterrada e os enrolamentos de 69kV ligados em delta. O sistema de subtransmissão em 69kV, derivado dessas subestações e pertencentes às distribuidoras, operam com o neutro isolado. Para fornecer uma referência de terra e perrmitir a circulação de correntes de seqüência zero durante faltas monofásicas, na barra principal de 69kV dessas subestações são instalados reatores de aterramento com os enrolamentos ligados em zigue-zague aterrado. A impedância de seqüencia zero do reator de aterramento é dimensionada de tal forma a limitar a relação X0/X1 para que a sobretensão nas fases sãs, durante defeitos monofásicos, não ultrapasse o limite definido pela tensão suportável especificada para os equipamentos de 69kV.

A Figura 1 mostra um diagrama do padrão das conexões (CT) de 230kV e 69kV dos transformadores. No lado de 69kV, o transformador é ligado às barras principal (BP) e auxiliar (BA) através do disjuntor (DJ) e das chaves secionadoras associadas. Entre os terminais de 69kV do transformador e o disjuntor são conectados pára-raios de óxido de zinco (PR), transformadores de potencial indutivo (TPI) e transformadores de corrente (TC).

Mesmo com a presença do reator de aterramento conectado na barra principal de 69kV, o transformador pode operar com o lado de 69kV isolado ou flutuante quando o disjuntor da CT de 69kV encontra-se aberto, não existindo neste caso correntes de seqüência zero para defeitos monofásicos no trecho compreendido entre os terminais do transformador e do disjuntor. Em algumas subestações em que são utilizados relés digitais, conectados no secundário dos TPI instalados na CT de 69kV, é possível calcular e monitorar a tensão de seqüência zero (3V0), de forma a proteger este trecho contra defeitos monofásicos.

(*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – Sala A314 – Anexo II - Bloco A – CEP 50.761-901 Recife, PE, – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-4048 – Fax: (+55 81) 3229-4058 – Email: roseval@chesf.gov.br

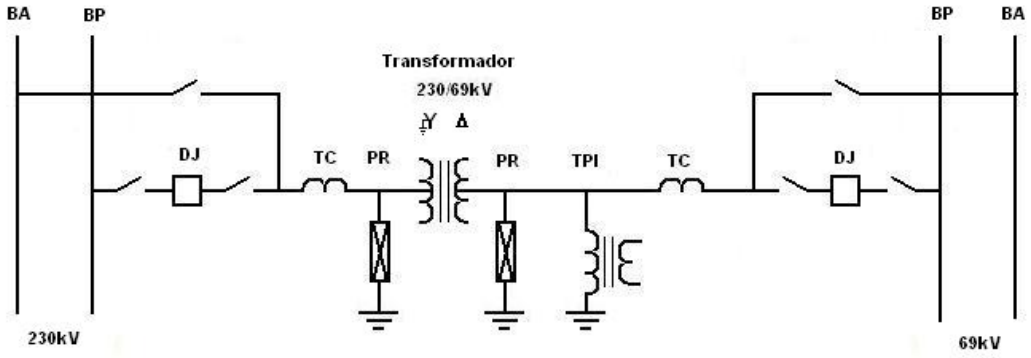

FIGURA 1 – Padrão de conexão (CT) dos transformadores 230/69kV

Com a instalação de registradores digitais de perturbação (RDP) nos secundários dos TPI da CT de 69kV, foi possível verificar através dos registros que, em algumas subestações que operam com a configuração da Figura 1, durante manobras de energização de transformadores em vazio, através do disjuntor de 230kV, podem ocorrer sobretensões temporárias fase-terra elevadas no lado de 69kV. As análises realizadas a partir das características observadas nos registros obtidos indicaram uma condição de ferrorressonância sustentada (1), (2), (3). Este diagnóstico motivou o desenvolvimento de estudos para permitir uma melhor avaliação dos riscos de ferrorressonância e da influência de alguns parâmetros, além da definição de soluções de engenharia e medidas operativas adequadas para minimizar os riscos de danificação de equipamentos e de desligamentos indesejados.

2.0 - EXPERIÊNCIA OPERATIVA

Em operação no sistema de transmissão da Chesf existem cerca de noventa transformadores de potência de 230/69kV, com potências nominais de 50, 100 e 150MVA, com TPI instalado na CT de 69kV, conforme Figura 1. Em quase 7% desses transformadores já foram detectadas, através da análise dos registros de RDP obtidos durante manobras de energização em vazio pelo disjuntor de 230kV, sobretensões temporárias fase-terra elevadas na CT de 69kV. A Figura 2 apresenta os registros de RDP obtidos no lado de 69kV do transformador 04T2 da subestação Penedo, para a manobra de energização em vazio deste transformador no dia 10/11/2007.

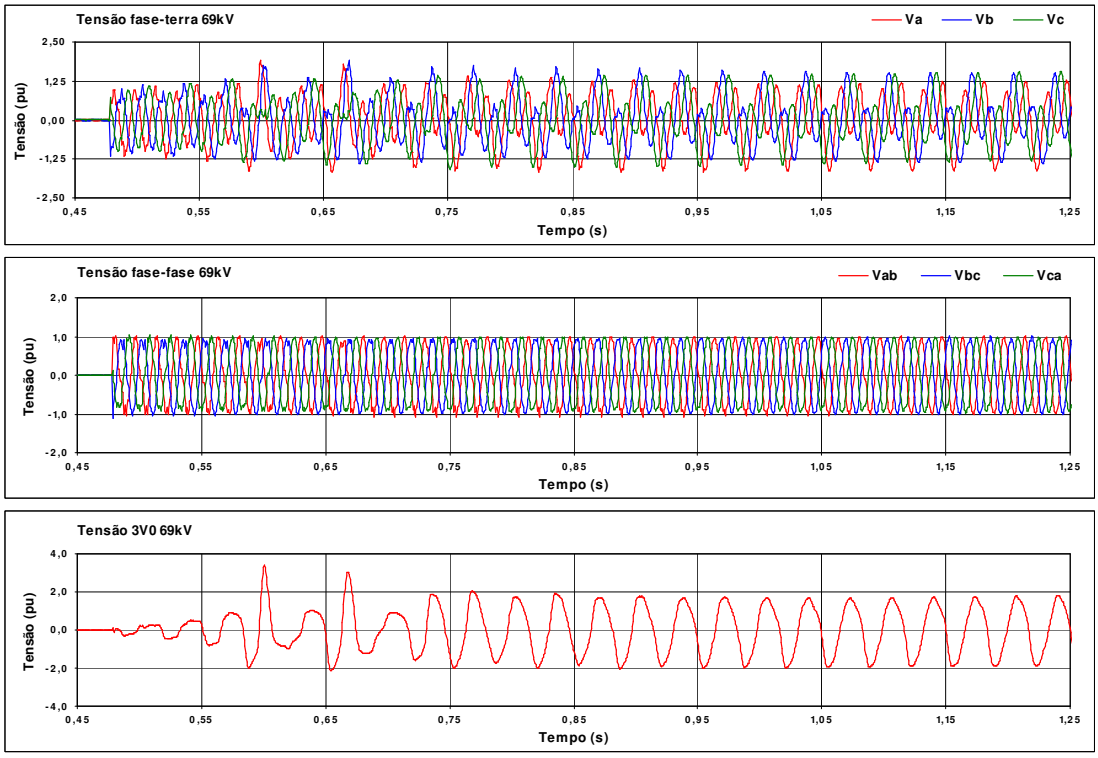

FIGURA 2 – Energização em vazio do transformador da SE Penedo (Medição)

As formas de onda das tensões fase-terra são fortemente distorcidas, atingindo um valor máximo de 1,90pu na fase B, com valores sustentados de até 1,60pu. A forma de onda das tensões fase-fase são praticamente senoidais e com amplitudes próximas de 1,0pu. A tensão residual 3V0 apresenta um comportamento oscilatório sub-harmônico com freqüência dominante próxima de 30Hz, atingindo um valor máximo de 3,40pu, com um valor sustentado próximo de 2,0pu.

Os registros de RDP mostram que as sobretensões fase-terra iniciam após o fechamento do disjuntor do lado de 230kV, energizando o transformador em vazio, e são mantidas por um tempo de cerca de 13s, cessando com o fechamento do disjuntor do lado de 69kV, energizando a barra de 69kV com o reator de aterramento conectado. No período de tempo entre os instantes de fechamento dos disjuntores, os equipamentos da CT de 69kV são submetidos à sobretensões temporárias elevadas.

O comportamento mostrado na Figura 2 é típico nos casos em que foram detectadas sobretensões temporárias durante manobras de energização de transformadores em vazio com TPI na CT de 69kV, ocorrendo em subestações com transformadores e TPI de diferentes fabricantes, localizadas em diferentes pontos do sistema de transmissão da Chesf. Em alguns casos, a tensão 3V0 resultante pode provocar a atuação indesejada da proteção de faltas a terra (59R) que é alimentada pelo TPI da CT de 69kV, levando a abertura automática do disjuntor de 230kV do transformador manobrado. Esta proteção normalmente é de tempo definido com ajuste típico de pick-up igual a 0,5pu, com temporização de 1,3s.

Para minimizar os riscos de desligamentos indesejados e de danificação de equipamentos, até a implantação da solução de engenharia, definitiva, foram adotadas algumas medidas operativas como, por exemplo: (i) Os transformadores sob risco não devem operar em vazio, energizados pelo lado de 230kV ou 138kV; (ii) Quando da abertura, manual ou automática, do disjuntor da CT de 69kV, o disjuntor da CT de 230kV ou 138kV deve ser aberto automaticamente; (iii) Os transformadores devem ser energizados em vazio pelo lado de 230kV com o comutador na posição de tensão mais elevada possível, mas dentro da faixa previamente definida para permitir o fechamento do disjuntor de 69kV logo em seguida, reduzindo assim a duração da sobretensão temporária.

3.0 - SIMULAÇÕES DIGITAIS EM ATP/EMTP

3.1 Procedimentos, Critérios e Modelos

Foram realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATP/EMTP (4), (5), para energização de transformadores em vazio e para abertura dos disjuntores da CT de 69kV, na subestação Penedo, considerando o sistema de transmissão apresentado na Figura 3. Nas simulações das manobras de energização de transformadores em vazio, para calcular os riscos envolvidos e determinar os instantes mais críticos para o fechamento dos pólos do disjuntor, foram realizadas simulações estatísticas considerando uma dispersão máxima entre pólos de 5ms, com uma variação aleatória dos instantes de fechamento. Após a determinação dos instantes críticos de fechamento dos pólos do disjuntor, foram realizadas simulações determinísticas para análise das formas de onda. Para identificar uma condição de ferrorressonância sustentada foi calculada, através da rotina TACS, a integral do módulo da tensão 3V0.

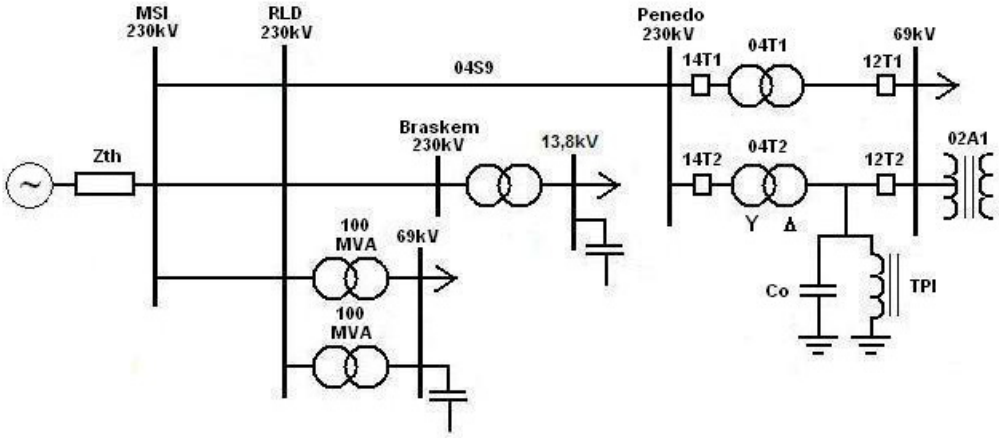

FIGURA 3 – Diagrama unifilar do sistema simulado

A suportabilidade dos equipamentos com relação às sobretensões temporárias (TOV) é geralmente definida através de curvas de tensão suportável em função do tempo, que são normalmente fornecidas pelos fabricantes.

Estas curvas indicam o limite de sobretensão para uma dada duração e este limite não deve ser ultrapassado sob pena de danificação ou de degradação excessiva da isolação dos equipamentos. A Figura 4 mostra algumas curvas de suportabilidade, incluindo a curva dos pára-raios de 72kV (ZnO). Para o nível de sobretensão sustentada apresentado na Figura 2 (1,60pu), o limite de duração seria de apenas 0,52s pela curva mínima especificada para os transformadores de potência e de 13s pela curva garantida pelo fabricante do transformador 04T2 da subestação Penedo.

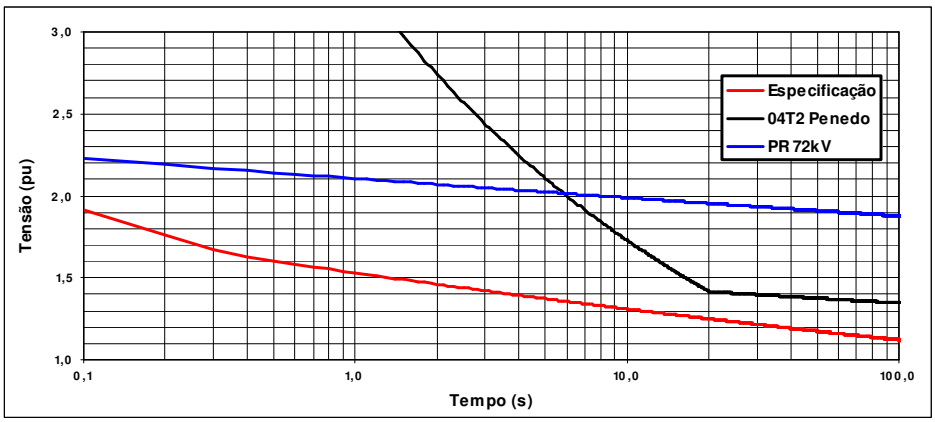

FIGURA 4 – Capacidade de TOV dos equipamentos de 69kV

A suportabilidade dos TPI com relação às sobrecorrentes transitórias é avaliada através do limite de i^2t obtido da norma IEC (6). Esta norma especifica que o TPI deve ser projetado e construído para suportar sem danos, quando energizado na sua tensão nominal, os efeitos térmicos e mecânicos de um curto-circuito externo com uma duração de 1,0s, que no caso do TPI instalado nas CT de 69kV da subestação Penedo corresponde a $8{,}15A^2s$. Este limite não deve ser ultrapassado sob pena de danificação do TPI por sobreaquecimento. Nas simulações o i^2t da corrente no enrolamento primário dos TPI foi calculado através da rotina TACS.

Para evitar a atuação indesejada de proteções de faltas a terra (59R), alimentadas pelo secundário dos TPI instalados nas CT de 69kV, os ajustes de pick-up e temporização desta proteção devem ser definidos de tal forma a impedir a sua atuação indesejada durante manobras, mas ao mesmo tempo deve atuar nas manobras em que ocorre a ferrorressonância sustentada, num tempo adequado para evitar a superação dos limites definidos pela curva de suportabilidade dos equipamentos.

Para este de tipo de análise é suficiente representar o sistema de transmissão utilizando uma modelagem adequada para os estudos de energização de transformadores (5). No lado de 69kV dos transformadores foram representados circuitos RC série para a terra, com o objetivo de evitar oscilações numéricas e de permitir o cálculo das tensões fase-terra. Este circuito RC representa a capacitância equivalente para a terra e as perdas nos isolamentos sólidos, incluindo as capacitâncias do transformador, dos TPI e dos TC. Para o caso analisado, a capacitância equivalente para a terra é igual a 6610pF. A Figura 5 mostra o circuito equivalente do TPI de 69kV e os parâmetros utilizados para caracterizar a sua curva de magnetização.

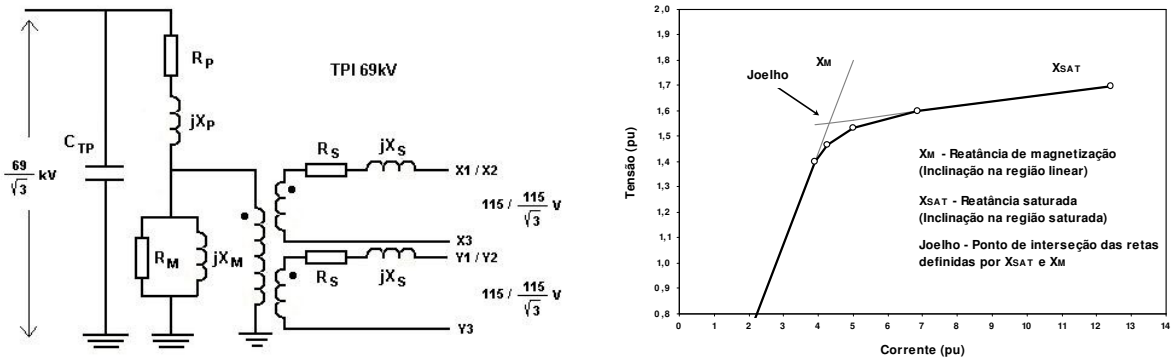

FIGURA 5 – Circuito equivalente do TPI 69kV

Os TPI de 69kV são conectados entre fases e terra e possuem dois enrolamentos secundários, sendo um para medição e outro para proteção. Nas CT de 69kV os secundários são ligados em estrela aterrada, alimentando cargas de medição e proteção conectadas entre fases ou entre fases e terra. Os parâmetros dos modelos dos TPI

foram calculados a partir dos dados fornecidos pelos fabricantes, dos relatórios de ensaios de tipo em laboratório e de medições em campo. Os resultados das medições mostram uma grande dispersão nos valores do joelho e da relação X_{sat}/X_m, mesmo entre unidades do mesmo tipo e fabricante, com variações nas faixas de 1,13 a 1,87pu e 5,0 a 8,8%, respectivamente.

3.2 Energização de Transformadores

Foram realizadas simulações de fechamento do disjuntor 14T2 com os disjuntores 14T1, 12T1 e 12T2 abertos, com uma tensão pré-manobra de 1,10pu na barra de 230kV e o comutador do transformador na posição 230kV. Nesta configuração, os resultados do caso estatístico mostram que em 40% das manobras ocorre uma condição de ferrorressonância sustentada com sobretensões temporárias. A Figura 6 mostra as formas de onda calculadas, com os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor de 230kV correspondentes aos instantes que geram os maiores valores da integral do módulo da tensão 3V0 e de i^2t da corrente no enrolamento primário do TPI. A Tabela 1 mostra um resumo dos resultados obtidos na análise do efeito da variação de alguns parâmetros.

A condição de ferrorressonância sustentada gera sobretensões temporárias fase-terra que apresentam formas de onda distorcidas, com uma tensão 3V0 elevada e com uma componente dominante próxima de 30Hz. Os valores sustentados das sobretensões fase-terra e tensão 3V0 atingem 1,98pu e 2,77pu, respectivamente. As tensões fase-fase são praticamente senoidais e próximas de 1,0pu. De acordo com a Figura 4, o transformador 04T2 e os pára-raios da CT de 69kV suportariam esse nível de sobretensão por cerca de 6s e 8s, respectivamente. Nesta condição de ferrorressonância também ocorrem elevadas correntes transitórias nos enrolamentos de 69kV e sobrexcitação do núcleo dos TPI. A sobrecorrente permanente atinge 0,33A com um i^2t igual a 0,00681A^2s, num tempo de 1,0s.

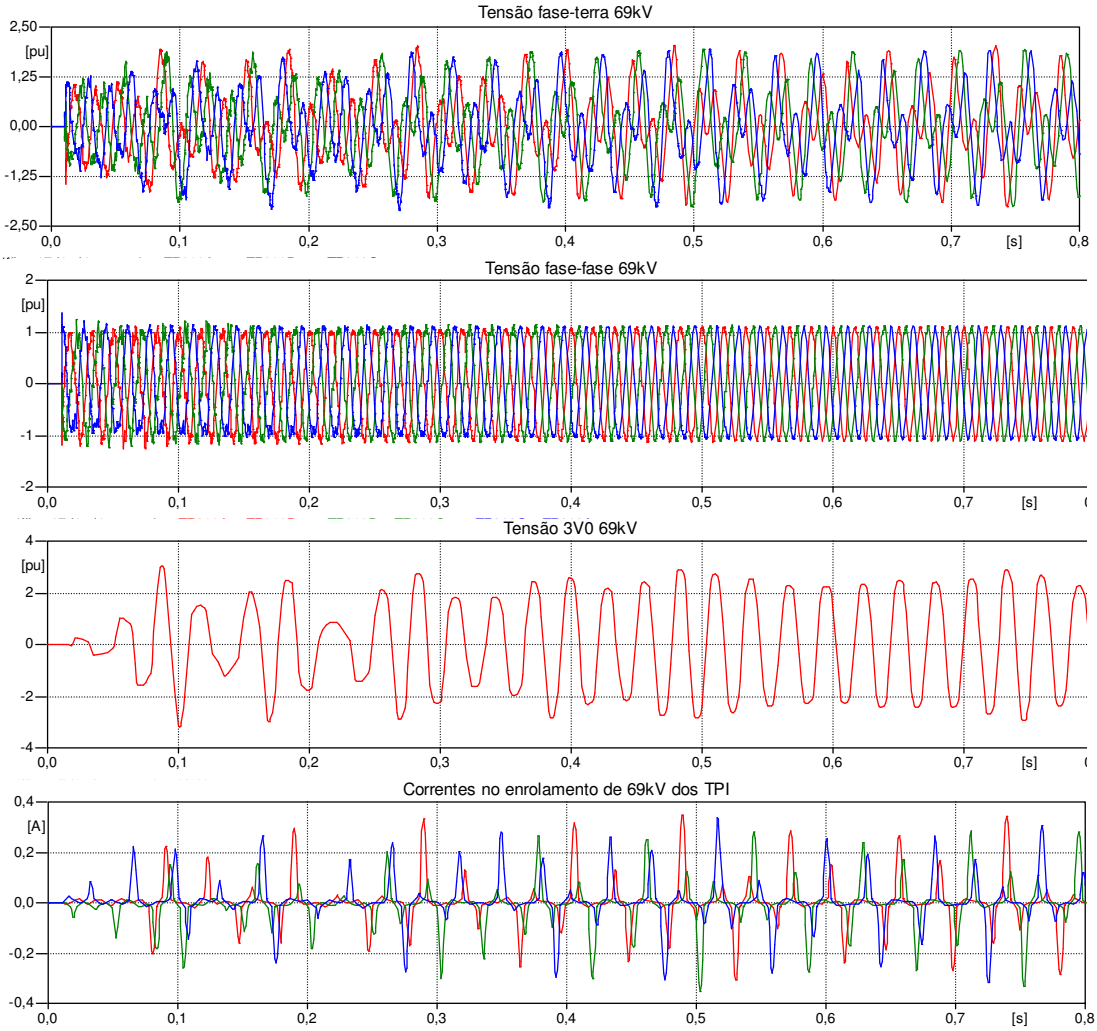

FIGURA 6 – Energização em vazio do transformador da SE Penedo (Simulação)

A instalação de um resistor de amortecimento de 20Ω para fechamento dos enrolamentos secundários dos TPI, ligados em delta aberto, elimina o risco de ocorrer uma condição de ferrorressonância sustentada, com uma redução significativa das solicitações impostas aos equipamentos. A Figura 7 mostra as formas de onda calculadas, com os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor de 230kV que correspondem ao maior valor da integral do módulo da tensão 3V0 e ao maior valor de i^2t da corrente no enrolamento primário do TPI. Só ocorre a circulação de corrente no resistor durante cerca de 150ms, com uma energia dissipada igual a 10,2J.

TABELA 1 – Fatores de influência na energização em vazio

Fator	Influência
Instantes de fechamento dos pólos do disjuntor com relação à onda de tensão	A ocorrência de ferrorressonância numa manobra depende dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor da CT de 230kV, ou seja, nas mesmas condições uma determinada manobra pode ou não gerar ferrorressonância.
Curva de magnetização do TPI (Joelho e Xsat/Xm)	A curva de magnetização do TPI tem uma influência significativa no risco de ocorrer uma ferrorressonância sustentada e nas solicitações impostas aos equipamentos. No caso analisado, não ocorre ferrorressonância sustentada quando o joelho da curva de magnetização dos TPI é superior a 1,80pu.
Capacitância equivalente para a terra (Co)	Quanto mais elevado o valor da capacitância equivalente para a terra, menor o risco de ocorrer ferrorressonância sustentada e mais elevadas às solicitações impostas aos equipamentos e os valores sustentados da tensão 3V0.
Carga resistiva nos secundários dos TPI (Carregamento dos TPI)	Para cargas secundárias resistivas variando de 0 a 100% da carga nominal, o risco de ocorrer uma ferrorressonância sustentada é praticamente independente do carregamento dos TPI. Entretanto, os valores sustentados de sobretensão fase-terra, corrente no enrolamento de alta dos TPI e tensão 3V0, diminuem com o aumento do carregamento.
Tensão pré-manobra na barra de 230kV	Quanto mais elevada a tensão pré-manobra na barra de 230kV, maior o risco de ferrorressonância sustentada e maiores as solicitações impostas aos equipamentos da CT de 69kV.
Posição do comutador em carga (Tape) no instante da manobra	Quanto mais elevada a posição do comutador, menor a tensão fase-terra que se estabelece em regime permanente no lado de 69kV e, por conseqüência, menor o risco de ocorrer uma ferrorressonância sustentada e menores as solicitações impostas aos equipamentos da CT de 69kV.
Resistor instalado nos secundários ligados em delta aberto (Rd)	Quanto mais baixo o valor do resistor de amortecimento, menores os riscos de ferrorressonância sustentada e as solicitações impostas aos equipamentos.

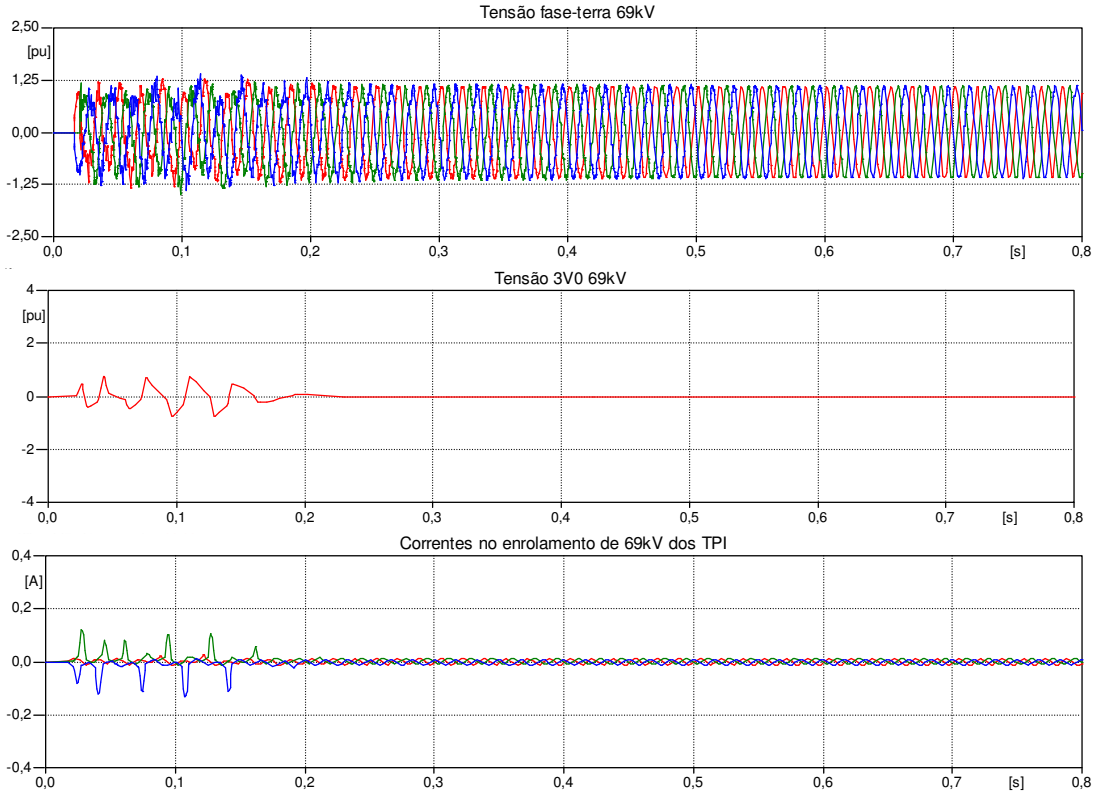

FIGURA 7 – Energização em vazio do transformador da SE Penedo (Simulação com Rd=20Ω)

3.3 Abertura do Disjuntor de 69kV

Na configuração de operação normal da subestação Penedo, em condição de carga leve, foram realizadas simulações determinísticas com abertura simultânea dos disjuntores das CT de 69kV, 12T1 e 12T2, com e sem curto-circuito monofásico na barra de 69kV da subestação, considerando ou não a presença do reator de aterramento 02A1 conectado na barra principal. Nas simulações com curto-circuito, foi considerada a abertura dos disjuntores das CT de 69kV num tempo de 200ms após o início do defeito. A Figura 8 mostra as formas de onda obtidas para um curto-circuito monofásico aplicado na crista da onda de tensão da fase A, eliminado com a abertura dos disjuntores 12T1 e 12T2. Após a abertura do disjuntor 12T2 ocorre uma ferrorressonância sustentada com sobretensões fase-terra e tensão 3V0 elevadas na CT de 69kV, com freqüência dominante próxima de 30Hz. Nesta condição de ferrorressonância ocorrem elevadas correntes transitórias nos enrolamentos primários dos TPI. As sobretensões fase-terra e a tensão 3V0 são mais elevadas que as ocorridas durante o curto-circuito monofásico.

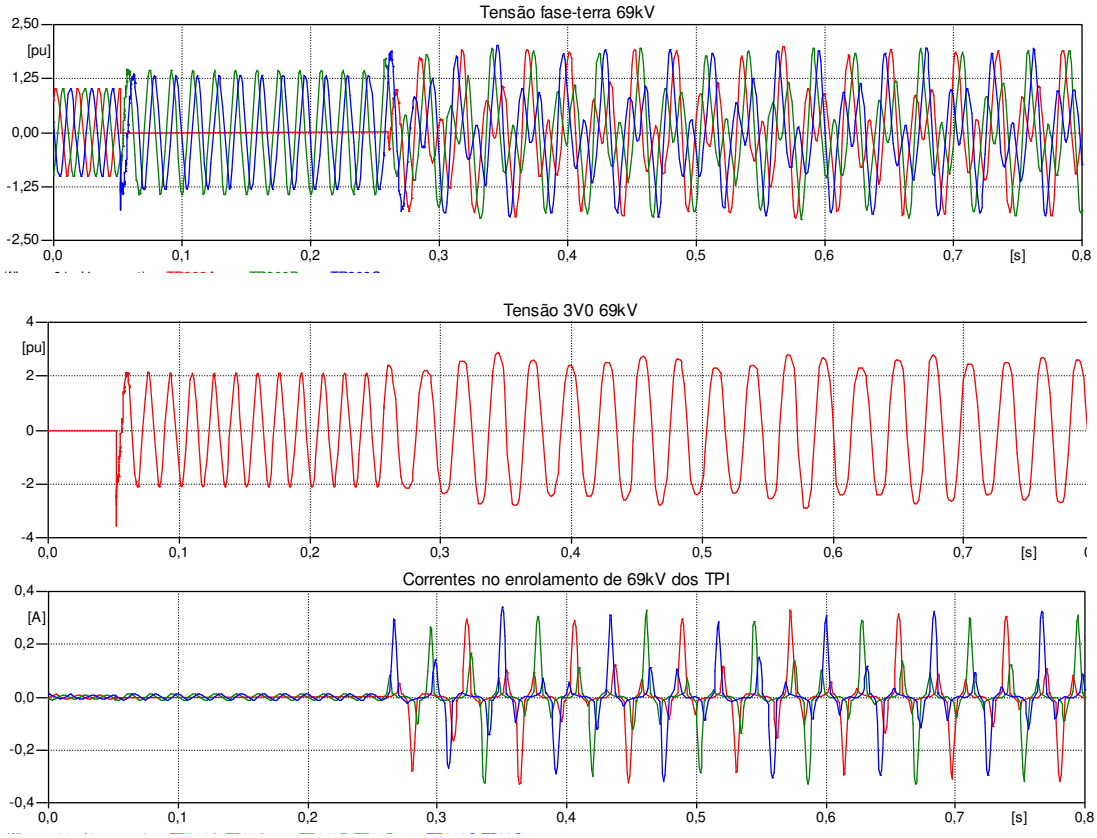

FIGURA 8 – Abertura do disjuntor da CT de 69kV eliminando defeito na barra (Simulação)

Neste caso também foram realizadas simulações adicionais para avaliar os efeitos da variação de alguns parâmetros. Foi verificado que o risco de ferrorressonância também depende do valor da capacitância equivalente para a terra (Co) e da curva de magnetização dos TPI e, no caso analisado, pode ser eliminado com a instalação de um resistor de amortecimento de 20Ω no secundário dos TPI, conectados em delta aberto. Poderá ocorrer ferrorressonância sustentada mesmo com um joelho igual a 1,80pu.

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E SOLUÇÕES

A instalação de TPI na CT de 69kV dos transformadores 230/69kV ou 138/69kV pode gerar uma condição de ferrorressonância sustentada durante manobras de energização em vazio pelos disjuntores das CT de 230kV ou 138kV, ou nas manobras com abertura, manual ou automática, com ou sem defeito, do disjuntor da CT de 69kV. Esta ferrorressonância é o resultado de uma interação entre as indutâncias não lineares de magnetização dos TPI e as capacitâncias equivalentes para a terra, na CT de 69kV, que provoca oscilações no circuito de seqüência zero que são refletidas nas tensões fase-terra e de neutro. Quando as perdas no circuito de seqüência

zero não são suficientemente altas, as oscilações podem ser permanentes, dando origem a uma condição de ferrorressonância sustentada. Este fenômeno já foi observado e analisado em instalações com outros níveis de tensão no sistema de transmissão da Chesf, durante manobras de energização de transformadores em vazio (1).

As sobretensões temporárias fase-terra encontradas nas simulações podem superar os limites definidos pelas curvas de suportabilidade dos equipamentos de 69kV, podendo causar uma degradação ou perda de vida excessiva da isolação ou até mesmo a danificação de equipamentos, e os valores elevados de tensão 3V0 associados podem causar a atuação de proteções de faltas a terra com desligamentos indesejados do transformador manobrado. Além das solicitações dielétricas, as simulações também mostram sobrecorrentes transitórias elevadas nos enrolamentos primários dos TPI. O i^2t calculado para essas sobrecorrentes transitórias pode exceder o limite definido pela norma IEC (6), indicando uma solicitação térmica excessiva aplicada aos TPI.

Em função dos riscos envolvidos, a ferrorressonância sustentada deve ser evitada e a definição da solução mais adequada, do ponto de vista técnico e econômico, deve considerar duas situações distintas: (i) Instalações que já estão em operação ou em fase de integração; (ii) Futuras instalações que estão em fase de planejamento ou projeto. Para as instalações em operação pode ser aplicada uma das soluções clássicas que corresponde à instalação de um resistor de amortecimento (Rd) nos enrolamentos secundários dos TPI (1), conectados em delta aberto. Para as futuras instalações pode ser adotada a mesma solução ou pode ser incluído nas Especificações Técnicas dos TPI de 69kV requisitos para a curva de magnetização (valor mínimo aceitável para o joelho) e o atendimento a este requisito deve ser verificado através de ensaios em laboratório. Nas Especificações Técnicas deve ser solicitado o circuito equivalente e os parâmetros dos TPI, incluindo a curva de magnetização do núcleo.

5.0 - CONCLUSÃO

Para as subestações de fronteira 230/69kV e 138/69kV do sistema de transmissão da Chesf, os estudos realizados indicam que nas manobras de energização de transformadores em vazio pelo lado de 230kV ou 138kV, ou de abertura, manual ou automática, do disjuntor do lado de 69kV, existe um risco significativo de ocorrer uma condição de ferrorressonância sustentada com sobretensões temporárias fase-terra, tensão 3V0 e sobrecorrentes transitórias elevadas nos enrolamentos primários dos TPI, dependendo de algumas características dos TPI instalados nas CT de 69kV. Nas manobras de energização de transformadores em vazio pelo primário, o valor da tensão pré-manobra, a posição do comutador em carga e os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor com relação à onda de tensão, têm uma influência importante no risco. As sobretensões podem causar solicitações acima dos limites definidos pelas curvas de suportabilidade dos equipamentos e as sobrecorrentes transitórias podem causar danificação dos TPI por sobreaquecimento. Além disso, a tensão 3V0 resultante pode provocar a atuação indesejada de proteções de faltas a terra (59R) com desligamento automático dos transformadores manobrados.

As formas de onda calculadas nas simulações de transitórios eletromagnéticos foram comparadas com as formas de onda obtidas dos registros de RDP, permitindo constatar que as simulações digitais reproduzem as principais características do fenômeno registrado. Este resultado valida a metodologia do estudo e os modelos utilizados nas simulações, pelo menos de forma qualitativa, e confirma que este tipo de fenômeno pode ser adequadamente analisado utilizando ferramentas de simulação como o ATP/EMTP.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) FREIRE, A. R. F., LINS, L. R., CAMPOS, A. J. S., “Ferrorressonância Durante Manobras de Energização em Vazio do Transformador Abaixador do Compensador Estático da Subestação Funil”, X ERLAC, CE 33, Foz do Iguaçu – PR, Maio de 2003.

(2) ROCHA, A. C. O., SOUZA, W. M., MENDES, J. C., “Practical Experiences in the Analysis of Abnormal Voltages due to Neutral Instability”, IEEE Bologna Power Tech Conference, June 2003.

(3) NISHIWAKI, S., et ali, “A Special Ferro-resonance Phenomena on 3-phase 66kV VT – Generation of 20Hz Zero Sequence Continuous Voltage”, International Conference on Power Systems Transients (IPST), Lyon, France, June 2007.

(4) LEUVEN EMTP CENTER, “ATP – Alternative Transients Program – Rule Book”, Herverlee, Belgium, July 1987.

(5) Slow Transient Task Force of the IEEE WG on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, “Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients – Part III: The Study of Ferroresonance”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000.

(6) IEC 60044-2, Part 2 : Inductive Voltage Transformers, 2003