



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

BR/GDS/06
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

DESLIGAMENTOS INDESEJADOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DEVIDO RESSONÂNCIAS DE BAIXA FREQUÊNCIA PROVOCADAS PELA PRESENÇA DE BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.

Janaina Mirses de S. C. Costa* Eduardo Luiz F. Dantas Fábio P. Campanha

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO - CHESF

RESUMO

O desligamento automático de uma linha de transmissão de 500kV da interligação Norte/Nordeste do Sistema Interligado Nacional, provocou o aparecimento de elevadas sobrecorrentes em transformadores de 230/69kV, causando o desligamento automático desses equipamentos.

Este informe técnico apresenta os resultados dos estudos de transitórios eletromagnéticos realizados para identificar as causas dessa ocorrência, cujos resultados mostram que perturbações no sistema de 500kV podem desencadear uma ressonância de baixa frequência e este fenômeno está associado ao número de bancos de capacitores série presentes na subestação de 500kV que alimenta os transformadores de 230/69kV envolvidos no evento.

PALAVRAS-CHAVE

Ferroressonância de Baixa Frequência, Interação Transitória, Transformadores de Potência, Bancos de Capacitor Série, Análise de Ocorrência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em agosto de 2010, ocorreram desligamentos automáticos de transformadores das subestações Eliseu Martins (ELM) e Picos (PIC), pertencente ao sistema de transmissão operado pela CHESF (ver Figura 1), devido a atuação das respectivas proteções diferenciais (relé 87). Estes desligamentos foram coincidentes com a abertura, seguida de religamento automático, da LT S. J. do Piauí – Ribeiro Gonçalves - 500kV (interligação N-NE), pertencente a outro agente da transmissão, para eliminação de um defeito bifásico (fases A/B) nesta linha.

A partir das informações coletadas dos Registradores Digitais de Perturbação (RDP) das SE SJI, ELM e PIC, foi possível desenvolver estudos de transitórios eletromagnéticos e reproduzir o comportamento das grandezas registradas durante a ocorrência, como também identificar a origem dos fenômenos observados. Constatou-se que o desligamento automático de linhas de transmissão de 500kV da interligação Norte/Nordeste do Sistema Interligado Nacional, pode desencadear uma ressonância de baixa frequência a depender do número de Bancos de Capacitores Série (BCS) em operação na SE São João do Piauí 500kV, podendo gerar correntes elevadas nos transformadores de 230kV devido uma interação transitória entre as características de magnetização desses equipamentos e esta ressonância.

Este informe técnico apresenta um resumo dos estudos que subsidiaram a análise dessa ocorrência e as soluções operativas encontradas para evitar a reincidência do fenômeno observado.

(*) R. Delmiro Gouveia, 3333/ Anexo II – BL A– sala 312 – CEP 50761-901-Recife, PE – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-4177 – Fax: (+55 81) 3229-4174 – Email: jmirses@chesf.gov.br

2.0 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A subestação de S. J. do Piauí, pertencente ao sistema de transmissão operado pela CHESF, no ano de 2010, era alimentada por quatro circuitos, em 500kV, onde três deles possuem compensação série no terminal desta subestação. Através de um autotransformador (ATR) 500/230/13,8kV - 300MVA essa energia é transmitida, em 230kV, para as subestações de S. J. do Piauí (SJI), Eliseu Martins(ELM) e Picos(PIC), conforme apresentado na figura abaixo.

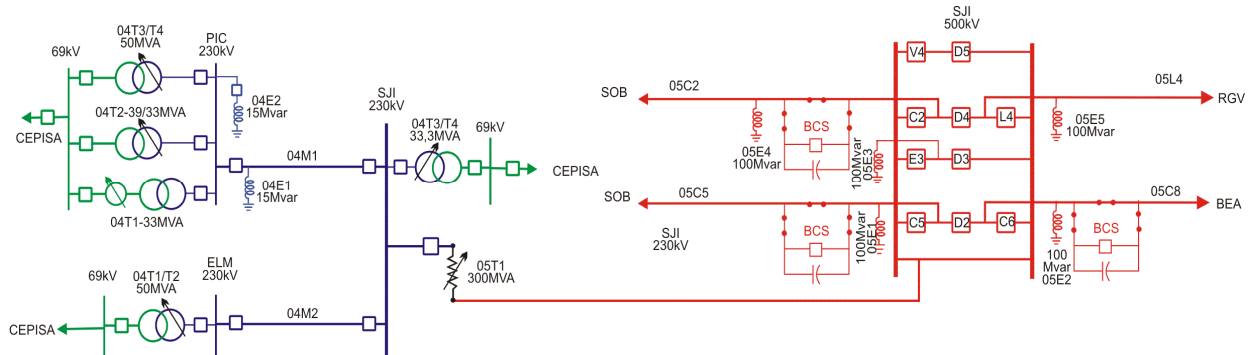


Figura 1 - Diagrama unifilar simplificado do sistema de transmissão envolvido na ocorrência.

3.0 - ANÁLISE DOS REGISTROS DA OCORRÊNCIA

Para chegar ao diagnóstico dessa ocorrência, foram feitas análises dos registros armazenados na rede de oscilografia que monitora continuamente na área de atuação da Chesf, registrando grandezas elétricas durante perturbações.

Dos registros coletados dos RDP das subestações de SJI e ELM durante o evento, verifica-se que houve um curto-circuito bifásico envolvendo as fases A e B externo a Chesf, na LT S. J. do Piauí – Ribeiro Gonçalves de 500kV (SJI_RBG) (ver Figura 2). Observa-se que a partir da abertura deste circuito no terminal de SJI, para eliminação do defeito, aparecem distorções na forma de onda da tensão vista do barramento de 500kV da SE SJI, com uma oscilação de aproximadamente 10Hz, indicando a presença de ressonâncias de baixa frequência. Também foram registradas elevadas correntes, bastante distorcidas, através do autotransformador (05T1) da SE SJI (ver Figura 3).

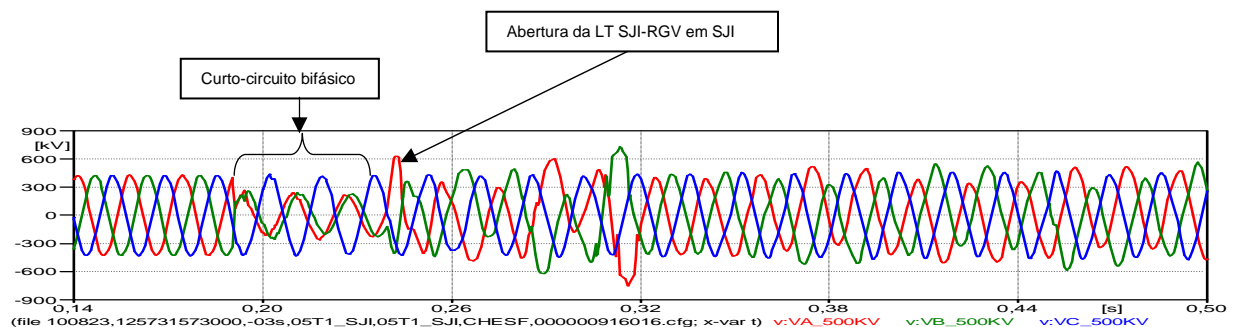


Figura 2 - Tensão de fase no barramento de 500kV da SE SJI

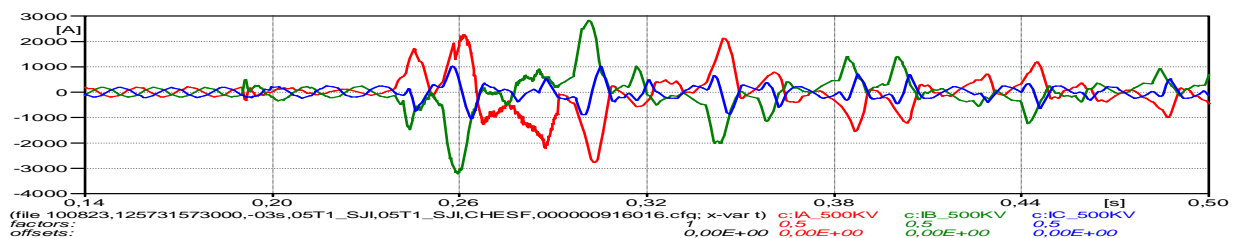


Figura 3 - Corrente de fase no enrolamento de 500kV do ATR da SE SJI

O surto, originado no 500kV, se reflete nas subestações de 230kV. Tomando-se como referência a SE ELM, pode-se observar que as tensões no barramento de 230kV dessa subestação se apresentam bastante distorcidas (ver Figura 4). As correntes no lado de alta e baixa do transformador 04T1, dessa subestação, mostram-se com picos elevados e comportamento não senoidal (ver Figuras 5 e 6).

Segundo análise da área de proteção, diante dos valores RMS dessas correntes (ver Figuras 7 e 8) a proteção diferencial desse transformador atuou corretamente, provocando seu desligamento automático.

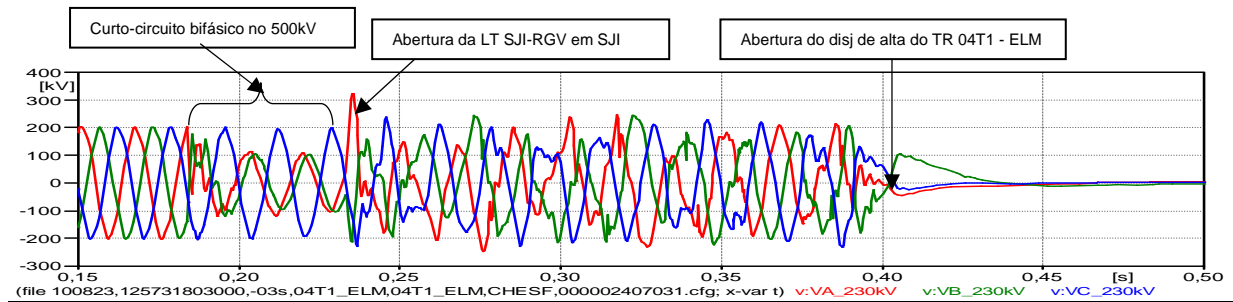


Figura 4 - Tensão fase-terra no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM

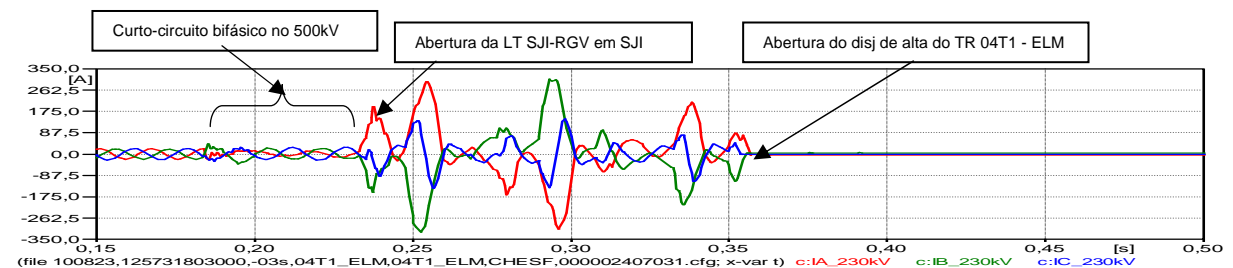


Figura 5 - Corrente de fase no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM

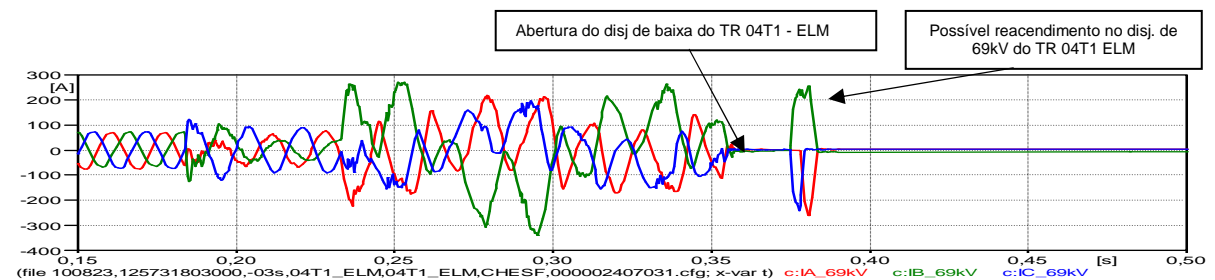


Figura 6 - Corrente fase no enrolamento de 69kV do TR 04T1 da SE ELM

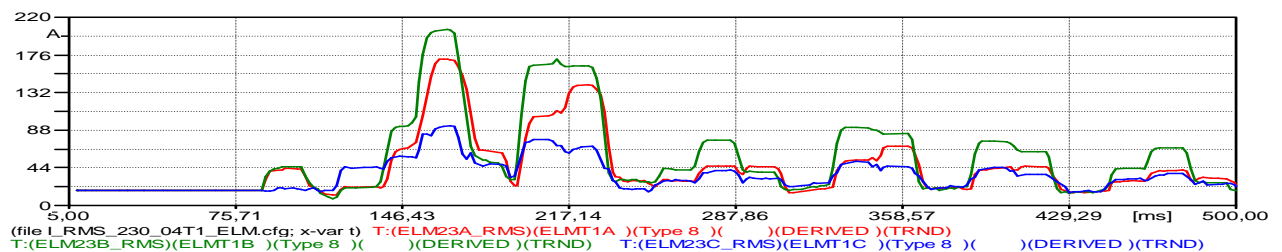


Figura 7 - Valor RMS da corrente fase no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM

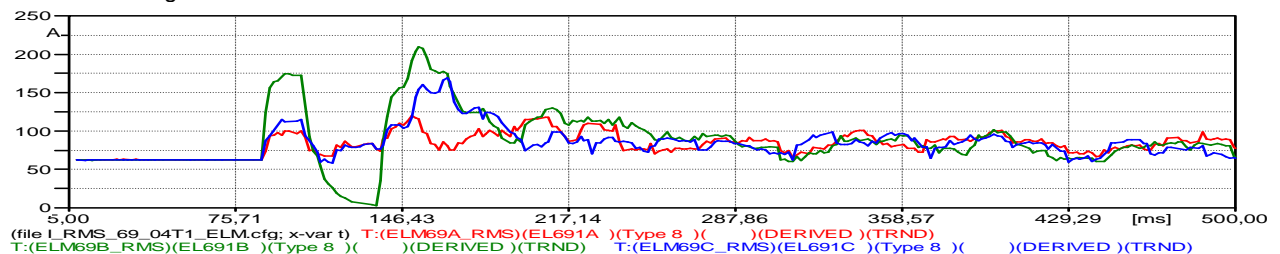


Figura 8 - Valor RMS da corrente fase no enrolamento de 69kV do TR 04T1 da SE ELM

3.1 Espectro de Frequências

Devido as oscilações observadas nas tensões e correntes após a abertura da interligação, foi extraído das formas de onda registradas da tensão na barra de 500kV da SE SJI, e da corrente do lado de alta do transformador 04T1 da SE ELM o espectro de frequência, para um período de 0,5s, através da função "FOUR", disponível no PlotXY do

programa ATP (6). Esta função toma como base a Transformada Discreta de Fourier (DFT) (ver Figura 9). Pode-se observar a presença significativa de componentes na faixa de 8 a 10Hz nas grandezas analisadas.

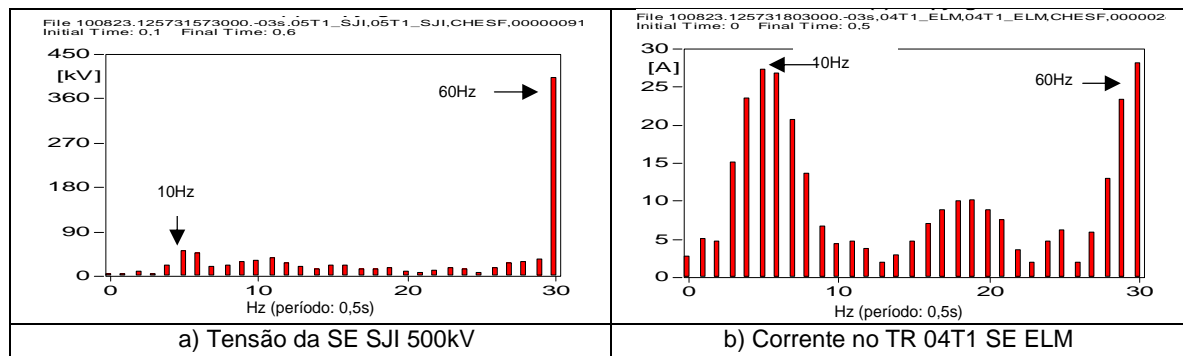


Figura 9 - Espectros de frequência

4.0 - REPRODUÇÃO DA OCORRÊNCIA

Foram realizadas simulações de transitórios eletromagnéticos, através da ferramenta computacional ATP-EMTP (6), para reprodução dos eventos. Pode-se observar nas figuras a seguir, que foi possível reproduzir com boa precisão o comportamento das sobretensões e sobrecorrentes registradas pela rede de oscilografia.

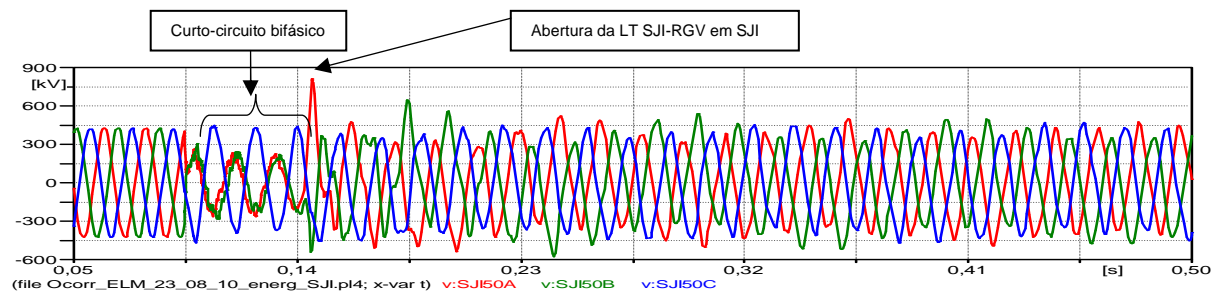


Figura 10 - Tensão fase-terra no barramento de 500kV da SE SJI.

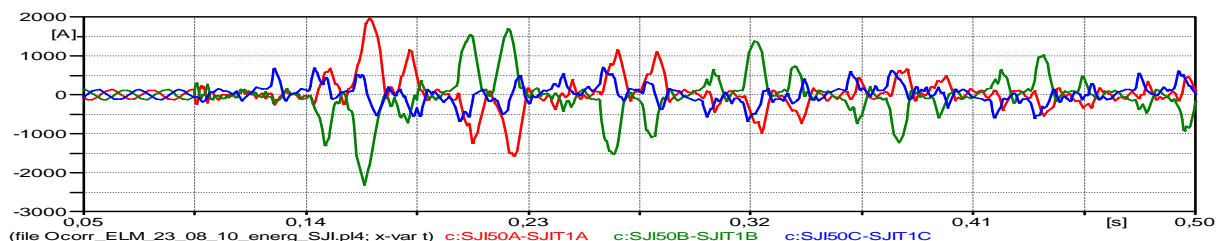


Figura 11- Corrente de fase no enrolamento de 500kV do ATR da SE SJI.

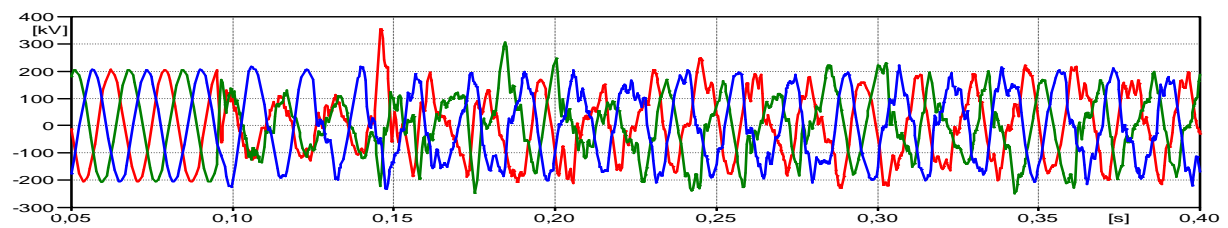


Figura 12 - Tensão fase-terra no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM.

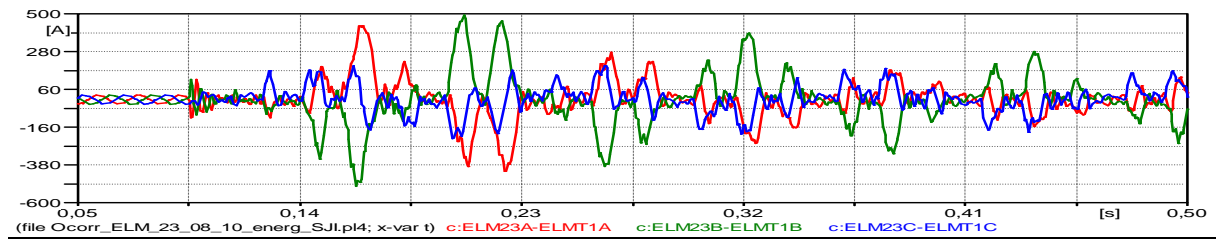


Figura 13 - Corrente de fase no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM.

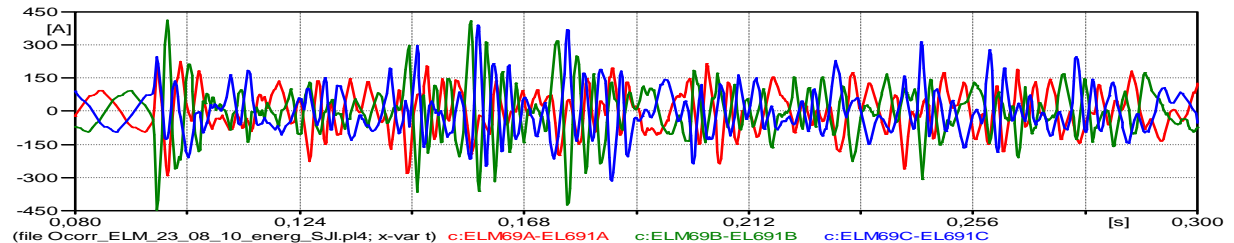


Figura 14 - Corrente de fase no enrolamento de 69kV do TR 04T1 da SE ELM.

5.0 - ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Visando identificar a origem dos fenômenos registrados e possíveis soluções operativas para evitar desligamentos indesejados de instalações da Chesf, foram realizadas estudos de transitórios eletromagnéticos para verificar a influência da manobra de outros circuitos de 500kV derivados da SE SJI e dos BCS presentes nesta subestação no fenômeno observado.

5.1 Estudos no Domínio da Frequência

Foram feitas análises no domínio da frequência, utilizando as impedâncias vistas do barramento de 230kV da SE SJI, variando a topologia do sistema. A metodologia usada se baseia na injeção de uma fonte de corrente, sequência zero e positiva com amplitude 1,0A no barramento de interesse, cuja frequência foi variada pela rotina FREQUENCY SCAN, na faixa de 5Hz à 1kHz e comparou-se a resposta em frequência vista desse barramento, para várias topologias. Dos resultados encontrados, observou-se que as impedâncias de sequência zero não são afetadas de maneira expressiva pela variação de topologia estudada, enquanto que as impedâncias de sequência positiva são afetadas de forma significativa na faixa de 5 a 60Hz. Diante disto, serão apresentados a seguir, apenas os resultados mais relevantes de sequência positiva.

5.1.1 Influência da LT S. J. do Piauí - Ribeiro Gonçalves 500kV

A figura 15 mostra uma comparação da resposta em frequência no barramento de 230kV da SE SJI estando o sistema completo (verde) e sem a LT SJI-RGB (vermelho). Pode-se verificar que, estando a LT SJI-RGB fora de operação, este sistema de transmissão apresenta uma ressonância paralela bastante acentuada, de sequência positiva, por volta dos 7Hz (vermelho), o que leva a constatação que as correntes transitórias nos transformadores das SE ELM e PIC foram geradas pela interação das características de saturação dos transformadores com esta ressonância em baixa frequência.

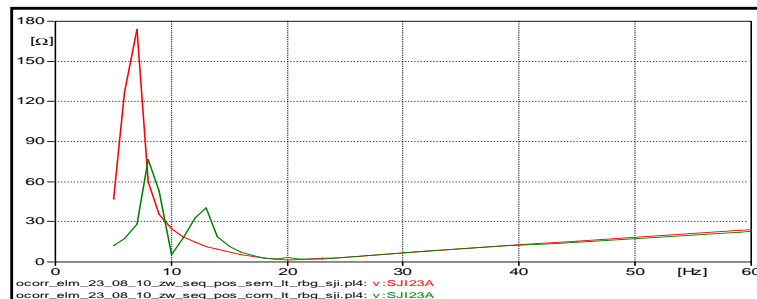


Figura 15:- Influência da LT SJI-RGV – 500kV na resposta em frequência

5.1.2 Influência dos Bancos de Capacitores Série

Conforme pode ser verificado no diagrama apresentado na Figura 1, existem em operação BCS nas LT S. J. do Piauí-Sobradinho (05C5) e S. J. do Piauí - Boa Esperança (05C6), operados pela Chesf (3) e na LT S. J. do Piauí-Sobradinho (05C2), pertencente à outra transmissora.

A compensação série é aplicada com o objetivo de prover uma maior capacidade de transmissão de energia permitindo um aumento da estabilidade do sistema de potência e diminuição das perdas através da redução da reatância total da linha de transmissão compensada. Contudo, por criar circuitos L-C série, a inclusão de BCS no sistema provoca circuitos ressonantes. Como a relação X_C/X_L é sempre menor que 1, a frequência ressonante será um sub-harmônico da frequência do sistema. Os transitórios sub-harmônicos são fenômenos que podem durar vários ciclos e normalmente surgem após uma perturbação no sistema, seja por manobras de equipamentos ou faltas (1) (5).

Diante disto, para uma análise de sensibilidade quanto a influência desses bancos no fenômeno em questão, foi verificado a variação do $Z(\omega)$ na barra de 230kV da SE SJI diante do número de BCS em operação no setor de 500kV dessa subestação, estando fora de operação a LT SJI-RGB.

Na figura 16 pode se observar que a saída de qualquer um dos três bancos elimina a ressonância abaixo de 10Hz, quando comparada com a condição da ocorrência (vermelho). Contudo, o efeito é mais significativo com a saída do BCS de uma das LT S. J. do Piauí - Sobradinho (rosa e verde) do que com a saída do BCS da LT S. J. do Piauí - Boa Esperança (Azul). Para frequências acima de 30Hz a configuração de BCS na barra de 500kV da SE S. J. do Piauí não apresentou diferenças.

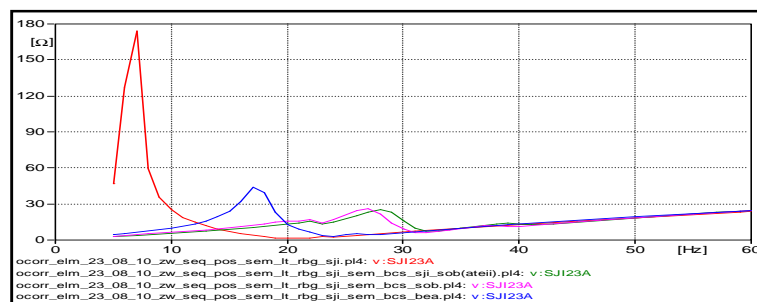


Figura 16:-- Influência dos BCS da SE SJI – 500kV na resposta em frequência

5.1.3 Influência do 2º circuito COL-RBG-SJI e da LT SJI-MLG.

Foi verificada a modificação na resposta em frequência vista da barra de 230kV da subestação SJI devido a entrada em operação, no ano seguinte da ocorrência (2011), do segundo circuito Colinas – R. Gonçalves – S. J. do Piauí (COL-RBG-SJI) (interligação N-NE) e da LT S. J. do Piauí – Milagres (SJI-MLG). Observa-se que a entrada em operação desses circuitos diminui os picos ressonantes de baixa frequência (vermelho), de sequência positiva, quando comparado com a topologia da época da ocorrência (verde) (ver Figura 17).

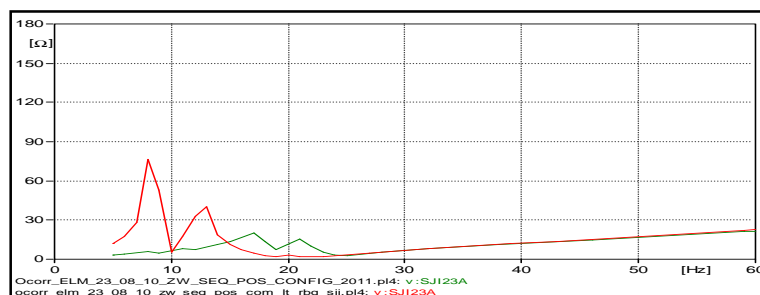


Figura 17 - Resposta em frequência – Configuração 2010 x Configuração 2011.

5.2 Estudos no Domínio do Tempo

Diante dos resultados verificados nos estudos de resposta em frequência (item 5.1), foram realizadas simulações determinísticas para identificar recomendações operativas que possam diminuir o risco de ocorrência da ressonância de baixa frequência e consequentemente evitar desligamentos indesejados de transformadores alimentados por este sistema.

5.2.1 Saída da LT S. J. do Piauí – Ribeiro Gonçalves 500kV, estando fora de operação um dos BCS da LT S. J. do Piauí – Sobradinho 500kV

Pelos resultados mostrados no item 5.1.2, a ressonância registrada durante a ocorrência está relacionada com o número de BCS em operação na SE SJI e de fato, os resultados de simulação comprovaram que, estando o BCS da LT S. J. do Piauí - Sobradinho fora de operação não há ressonância de baixa frequência nesse sistema (ver Figuras 18, 19 e 20) durante o mesmo evento que levou a atuação da proteção diferencial dos transformadores da SE ELM e PIC. Comportamento semelhante é verificado estando fora de operação qualquer um dos outros BCS conectados a SE SJI.

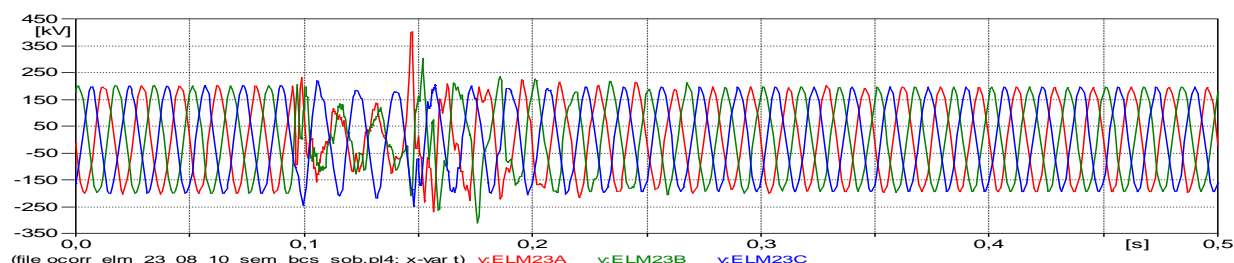


Figura 18 - Tensão de fase-neutro no barramento de 230kV da SE ELM, devido a CC 2f na LT SJI-RIB 500kV.

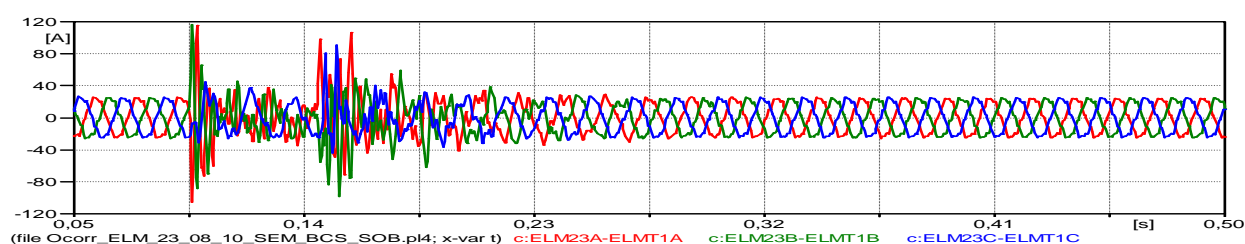


Figura 19 - Corrente fase no enrolamento de 230kV do TR 04T1 da SE ELM.

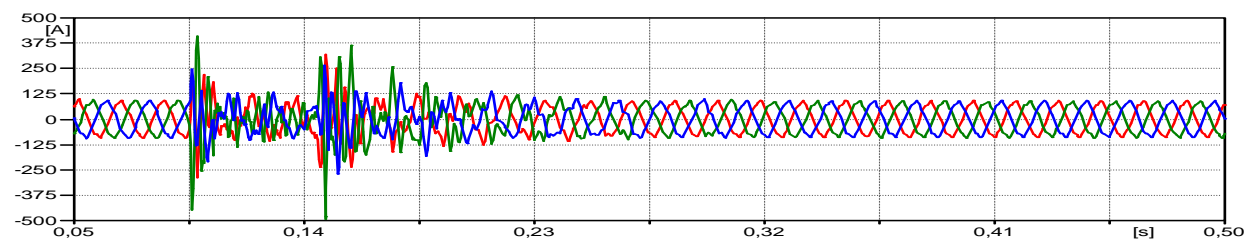


Figura 20 - Corrente fase no enrolamento de 69kV do TR 04T1 da SE ELM.

6.0 - CONCLUSÕES

As análises realizadas mostram que na perturbação iniciada pelo desligamento automático da linha de transmissão 05L4 São João do Piauí – Ribeiro Gonçalves de 500kV, houve atuação correta da proteção diferencial dos transformadores 04T1 da SE Eliseu Martins e 04T3 da SE Picos, ocasionando o desligamento automático dessas unidades.

As correntes transitórias que levaram a atuação da proteção diferencial desses transformadores é resultado de um fenômeno de origem sistêmica que se iniciou com a entrada em operação da linha de transmissão 05C2 São João do Piauí – Sobradinho de 500kV, com o respectivo banco de capacitores série, 05H3.

O sistema de transmissão foco desse estudo (Figura 1) tem uma ressonância na faixa de 7 a 10Hz e durante perturbações no sistema pode ocorrer uma interação transitória entre as características de magnetização dos transformadores e esta ressonância, gerando correntes transitórias que podem levar a atuação indesejada de proteções de transformadores. Verificou-se que este fenômeno está diretamente relacionado com o número de bancos de capacitores série presentes na SE S. J. do Piauí 500kV e que estando um deles fora de operação, não se verifica ressonância de baixa frequência que venha a provocar atuações indesejadas das proteções dos transformadores das subestações de 230kV alimentadas por esta subestação.

Na configuração atual foi recomendado implantar uma instrução operativa para “by-passar” um dos BCS em operação na SE São João do Piauí quando a linha de transmissão São João do Piauí – Milagres 05V4 estiver indisponível. Contudo, foi solicitado à área de proteção analisar a possibilidade de adequar os ajustes das proteções diferenciais dos transformadores 230/69kV das SE Picos e Eliseu Martins, para não atuarem diante de correntes transitórias de baixa frequência.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brito, A. L., Arruda G. A., Moraes P. R., Costa, J. M. S. C., Silveira, P. M. "Estudo de caso: Atuação incorreta em zona 1 para curto externo, da proteção da linha com compensação série, São João do Piauí/ Boa Esperança 500 kV", XI STPC, Florianópolis 18 a 21 de novembro de 2012.
- (2) P. M. Anderson, R.G. Farmer, "Series Compensation of Power Systems", PBLSH Inc., Encinitas, CA, 1996, ISBN 1-888747-01-3
- (3) SIEMENS, "Manual de Treinamento dos Bancos de Capacitores de São João do Piauí" PTD H16MP-002147/E\04
- (4) G. Ziegler, "Numerical Differential Protection - Principles and Applications, SIEMENS", Publicis, 2005
- (5) Zanetta Júnior, Luiz Cera. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.
- (6) Leuven EMTP Center, "ATP - Alternative Transient Program - Rule Book", Herverlee, Belgium, 1987.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Janaina Mirses de Sousa Cruz Costa, nascida em Recife-PE, 1972, é engenheira eletricitista formada em 2002, pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Em 2009, obteve especialização em sistemas elétricos, com ênfase em transmissão, pela UNIFEI. Trabalha na Chesf desde 2002, onde atualmente realiza estudos elétricos da Operação. Sua principal área de interesse é transitórios eletromagnéticos. Leciona no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), desde 1994.



Eduardo Luiz Feles Dantas, nascido em Paudalho-PE, 1982, é engenheiro eletricitista formado em 2005, pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Trabalha na Chesf desde 2008, onde atualmente realiza estudos elétricos da Operação. Sua principal área de interesse é transitórios eletromagnéticos.



Fábio Pontes Campanha, nascido em Recife-PE, 1977, é engenheiro eletricitista formado em 2001, pela Universidade de Pernambuco (UPE). Em 2012, obteve especialização em sistemas elétricos, com ênfase em proteção, pela UNIFEI. Trabalha na Chesf desde 2003, onde atualmente realiza Análise de Desempenho dos Sistemas de Proteção. Sua principal área de interesse é proteção de sistemas elétricos de potência.