



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

GSC 28  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO X**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC**

#### **ANÁLISE DO DESEMPENHO TRANSITÓRIO DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE FORTALEZA NA CONFIGURAÇÃO ATUAL DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA ÁREA NORTE**

**Ladário M. Casado\***  
Antonio Roseval F. Freire

**Roberto F. Dias Filho**  
José Robério G. Nascimento

**Luciano R. Lins \*\***  
Pedro Augusto V. Ferreira

**Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF)**  
**\*\* Universidade de Pernambuco (UPE)**

## **RESUMO**

Alguns desligamentos do compensador estático de Fortaleza causaram um grande impacto nos indicadores e custos de indisponibilidade. Os registros oscilográficos das ocorrências mostraram distúrbios transitórios, suficientes para provocar a atuação correta das proteções com sucessivos desligamentos. Nas inspeções e testes realizados não foram identificadas falhas de equipamentos que justificassem esses desligamentos. Foram realizados estudos de transitórios eletromagnéticos com o ATP/EMTP utilizando um modelo detalhado do compensador estático, permitindo uma avaliação adequada do desempenho do equipamento, incluindo o cálculo das elevações de temperatura de junção, com o objetivo de identificar as causas da queima dos tiristores. Os resultados das simulações apresentaram uma boa concordância com os registros oscilográficos permitindo a identificação da origem dos distúrbios.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Compensador Estático, Válvulas de Tiristores, Interação Transitória, Experiência Operativa, Ressonância, Sobretensão Transitória.

## **1.0 INTRODUÇÃO**

O compensador estático (CE) de Fortaleza, com nominais de -140/+200Mvar – 230kV, entrou em operação comercial na década de 80 quando o sistema de transmissão da área Norte da Chesf, para atendimento ao regional de Fortaleza, era constituído de três circuitos radiais em 230kV. Até o início do ano 2000, esta configuração evoluiu para cinco circuitos radiais em 230kV utilizando a técnica de recapacitação com feixe expandido, atingindo um nível de curto-circuito na barra de 230kV da subestação Fortaleza de cerca de 1200MVA.

A partir do ano 2000 foram incorporadas ao sistema de transmissão da área Norte várias obras de grande porte, de tal forma que na configuração atual o nível de curto-circuito nesta barra pode atingir cerca de 5500MVA, indicando uma evolução significativa notadamente a partir de setembro de 2003 com a energização das linhas de transmissão de 500kV Milagres – Quixadá e Quixadá – Fortaleza II. A Figura 1 mostra um diagrama simplificado do sistema de transmissão em 500kV e 230kV da área Norte, indicando as localizações dos compensadores estáticos de Fortaleza e Milagres e das usinas térmicas (UTE) Senador Carlos Jereissati e Termofortaleza.

Em março de 2006 ocorreram alguns desligamentos do compensador estático com atuação de proteções de sobrecorrente e de múltiplos disparos protetivos das válvulas de tiristores, danificação de tiristores e curto-circuito

para a terra no lado de média tensão (26kV). Os rebatimentos diretos na disponibilidade, desempenho e integridade de um ativo de transmissão, motivaram o desenvolvimento de estudos de transitórios eletromagnéticos para identificar as causas e soluções, seguindo uma prática adotada pela Chesf mesmo após a reforma do Setor Elétrico Brasileiro (1), (2).

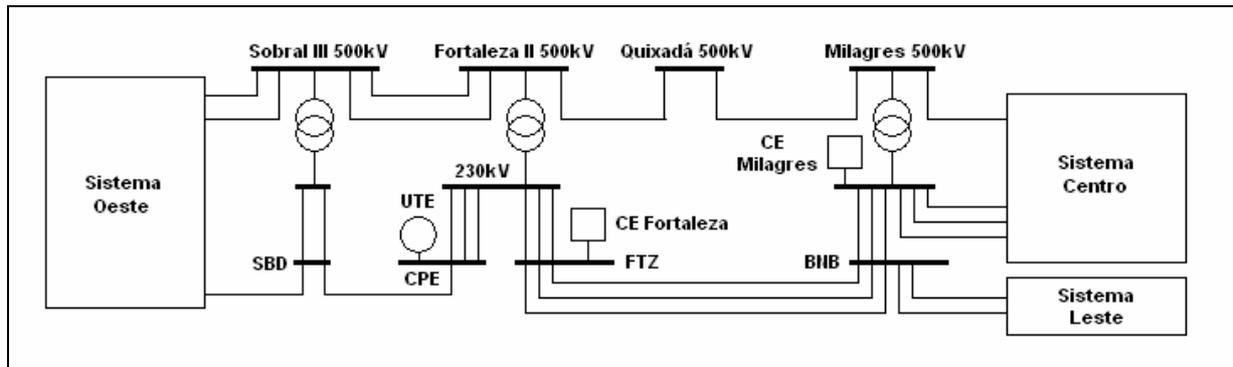


FIGURA 1 – Diagrama simplificado do sistema de transmissão da área Norte

## 2.0 COMPENSADOR ESTÁTICO DE FORTALEZA

### 2.1 Componentes de potência

O compensador estático de Fortaleza tem nominais de  $-140/+200\text{Mvar} - 230\text{kV}$  e é composto por um banco de transformadores monofásicos de 200MVA, com dois enrolamentos secundários de 26kV, sendo um ligado em estrela isolada (Lado Y) e o outro em delta (Lado  $\Delta$ ). Nos setores de 26kV encontram-se dois reatores controlados a tiristores (RCT) ligados em delta e dois bancos de capacitores ligados em estrela isolada. A Figura 2 mostra um diagrama unifilar simplificado do equipamento. Com esta configuração, o compensador estático pode operar em 12 pulsos, com os dois lados energizados, ou em 6 pulsos com apenas um dos lados energizado, estando o disjuntor do outro lado (19Q1 ou 19Q2) aberto.

As válvulas de tiristores que controlam os RCT são compostas de 16 níveis conectados em série, sendo cada nível composto de dois pares de tiristores conectados em anti-paralelo, circuito snubber (RC) e disparo protetivo por BOD (em média 4kV por nível). Como a válvula de tiristores é composta de 16 níveis, a tensão média de disparo protetivo por válvula é 64kV.

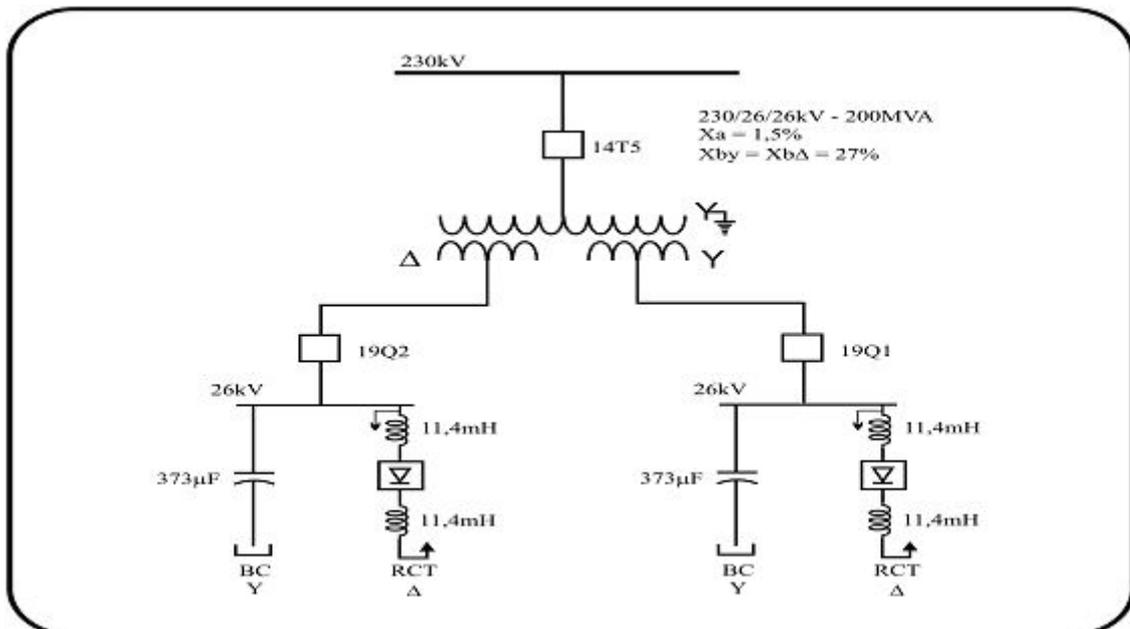


FIGURA 2 – Diagrama unifilar do CE Fortaleza



desligamentos que podem ter sido provocados pelo mesmo fenômeno e que também tiveram uma repercussão importante na disponibilidade do compensador estático. No período de janeiro de 2004 a abril de 2006, esse fenômeno foi responsável por cerca de 45% dos desligamentos e 99% das horas de indisponibilidade do compensador estático.

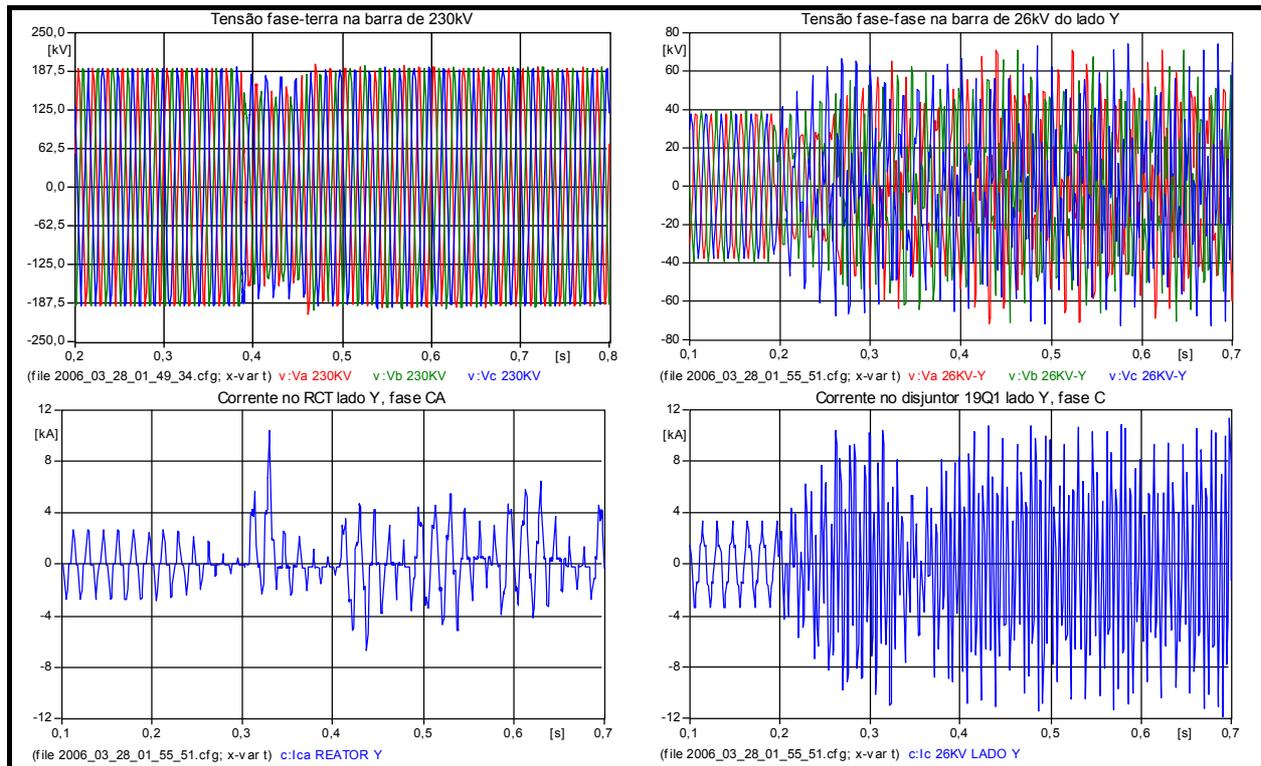


FIGURA 4 – Registros oscilográficos da ocorrência do dia 28/03/2006

## 4.0 SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

### 4.1 Modelos utilizados

#### 4.1.1 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão foi representado no ATP de forma detalhada. Com todas as linhas de transmissão energizadas e com apenas uma máquina em cada UTE, o nível de curto-circuito obtido na barra de 230kV da subestação Fortaleza foi de 5200MVA. Também foi gerado um caso base sem a presença dessas máquinas e sem um circuito de 230kV nos trechos Milagres – Banabuiú, Banabuiú – Fortaleza e Fortaleza II – Cauípe, o que reduz o nível de curto-circuito para 3600MVA. Partindo dos dois casos base, foram realizadas simulações com e sem a presença de máquinas nas UTE Termofortaleza e Senador Carlos Jereissati, para permitir uma avaliação da influência do nível de curto-circuito e ou da presença dessas máquinas. As linhas de transmissão de 500kV Milagres – Quixadá – Fortaleza II apresentam a maior influência no nível de curto-circuito na barra de 230kV da subestação Fortaleza.

#### 4.1.2 Compensador Estático

O compensador estático de Fortaleza foi representado de forma detalhada, incluindo todos os componentes de potência e o sistema de controle em malha fechada (3), (4). No diagrama simplificado da Figura 2 são indicadas as principais variáveis da TACS que foram monitoradas nas simulações para permitir uma avaliação do desempenho do equipamento. Para permitir uma avaliação das elevações de temperatura de junção, com o objetivo de subsidiar a identificação das causas da queima de tiristores, foi incluído no modelo da TACS um conjunto de instruções que representa a imagem térmica dos tiristores. A Figura 5 mostra um diagrama de blocos da imagem térmica, onde  $T_j$  é a temperatura instantânea de junção do tiristor,  $I_{RCT}$  é a corrente no RCT e  $T_A$  é a temperatura máxima de entrada da água no sistema de refrigeração das válvulas de tiristores, que no caso do compensador estático de Fortaleza corresponde a 50,3°C. A potência instantânea dissipada no tiristor  $p(t)$  e a impedância térmica transitória  $Z_{th}$  são utilizados para calcular a elevação de temperatura da junção  $\Delta T$ .

A Figura 6 mostra o comportamento da temperatura média máxima de junção dos tiristores em função do ponto de operação do compensador estático, definido pela potência reativa vista do lado de 230kV. Como pode ser

observado nesta Figura, quando mais indutivo o ponto de operação do compensador estático, mais elevada à temperatura de junção, que pode atingir até 86,6°C com uma potência reativa de -140Mvar.

Nas condições de operação atual da área Norte, por conseqüência do excesso de potência reativa capacitiva gerado pelas linhas de transmissão, o compensador estático de Fortaleza tem sido utilizado para o controle de tensão em regime permanente, operando com freqüência na faixa indutiva, com carregamentos de -70 a -100Mvar e com temperaturas de junção entre 80°C e 83°C.

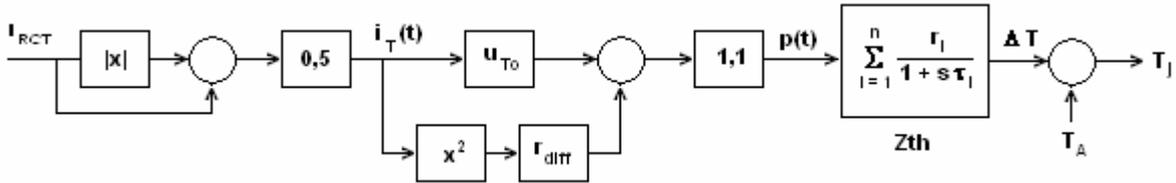


FIGURA 5 – Imagem térmica do tiristor

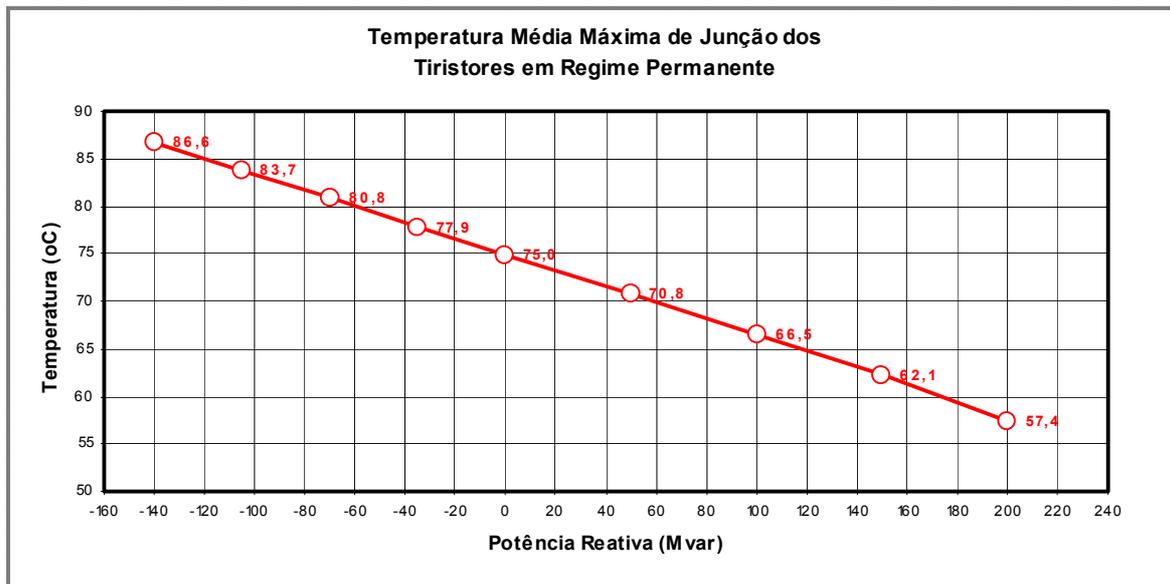


FIGURA 6 – Temperatura de junção do tiristores

#### 4.2 Resultados obtidos

Partindo dos casos base descritos no item 4.1.1, foram realizadas várias simulações com análise da influência dos ajustes do sistema de controle em malha fechada e do ponto de operação do compensador estático (zero, -100 e +100 Mvar). Foram simulados eventos tais como a energização dos lados Y e Δ, curto-circuito monofásico e bifásico na barra de 69kV da subestação Fortaleza, com e sem rejeição total das cargas desta subestação, e curto-circuito monofásico na barra de 500kV da subestação Fortaleza, com desligamentos simples e duplos de linhas de transmissão de 500kV. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para a simulação de curto-circuito monofásico na linha de transmissão Quixadá – Fortaleza II 500kV com duração de 100ms, próximo da barra de Fortaleza II, com todas as linhas de transmissão presentes mas sem as UTE Senador Carlos Jereissati e Termofortaleza.

As sobretensões transitórias nas barras de 26kV, com componentes dominantes nas freqüências de 60Hz e 190Hz, são suficientes para provocar a atuação do disparo protetivo das válvulas de tiristores, gerando sobrecorrentes transitórias nos reatores controlados a tiristores (RCT). Também ocorrem sobrecorrentes transitórias nos bancos de capacitores, com componentes dominantes nas freqüências de 60Hz e 190Hz. As sobrecorrentes transitórias nos RCT provocam a atuação do limitador de corrente (LINUC) e os múltiplos disparos protetivos provocam a atuação do circuito inicializador do PI. Com o circuito inicializador do PI desativado, a duração das sobretensões e sobrecorrentes transitórias é significativamente reduzida.

Este comportamento transitório, com múltiplos disparos protetivos, de forma permanente, também foi observado nas simulações de outras perturbações no sistema de transmissão e nas manobras de energização de um lado do compensador estático, nas configurações do sistema de transmissão com um nível de curto-circuito entre 2700 e

4500MVA. As simulações realizadas mostram que na configuração atual, sem a linha de transmissão Quixadá - Fortaleza II e sem as máquinas das UTE Termofortaleza e Senador Carlos Jereissati, não ocorrem os múltiplos disparos protetivos. A duração das sobretensões e sobrecorrentes transitórias e, por consequência, os riscos de desligamento do compensador estático e de danificação de equipamentos do setor de 26kV, é influenciada pelo ganho do controlador PI. Esta influência do ganho nas sobretensões e sobrecorrentes no setor de 26kV já foi detectada em estudos anteriores (2). Com um valor de ganho adequado para as condições de operação do sistema, as sobretensões e sobrecorrentes transitórias podem ser minimizadas.

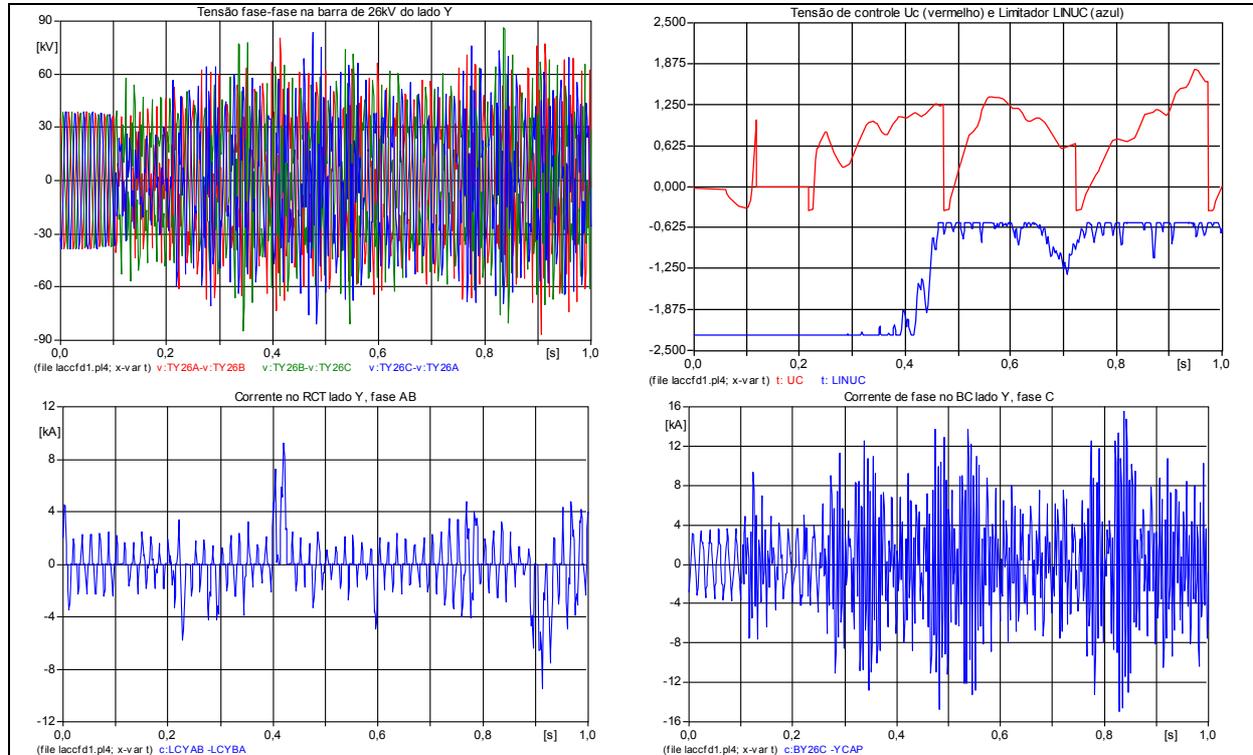


FIGURA 7 – Simulação : Perda LT 500kV Quixadá – Fortaleza II

A Figura 8 mostra os resultados das simulações para o caso apresentado na Figura 7, mas com a instalação de pára-raios entre fases nas barras de 26kV, com nível de proteção de 64kV para uma corrente de 6kA.

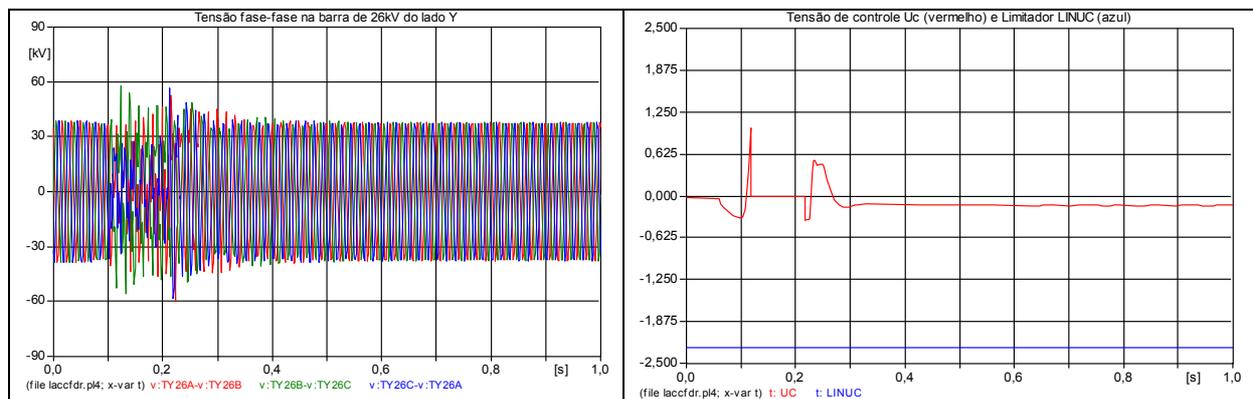


FIGURA 8 – Simulação: Caso da Figura 6 com pára-raios fase-fase nas barras de 26kV

Os resultados das simulações de curtos-circuitos bifásicos na barra de 69kV da subestação Fortaleza, seguido de rejeição de cargas, na configuração com um nível de curto-circuito de 3600MVA e com o compensador estático operando inicialmente com -100Mvar, indicam sobretensões e sobrecorrentes transitórias com múltiplos disparos protetivos, durante e após a eliminação do defeito, e duas atuações do circuito inicializador do PI. Esta ocorrência levaria ao desligamento do compensador estático por sobrecorrente ou por BOD repetitivo. Com um ganho KP 0,40V/V e uma duração do defeito de aproximadamente 200ms, o fenômeno transitório se prolonga por cerca de 400ms. Com a elevação do ganho KP para 1,2V/V, o compensador estático responde de forma mais rápida e ocorrem menos disparos protetivos após a eliminação do defeito além de apenas uma atuação do circuito inicializador do PI. De uma forma geral as sobretensões e sobrecorrentes transitórias são menos severas e os riscos de desligamento do compensador estático são reduzidos.

A Figura 9 apresenta a temperatura de junção dos tiristores calculada, para os casos de curto-circuito bifásico na barra de 69kV da subestação Fortaleza, para a maior sobrecorrente nos reatores controlados. Com o ganho  $KP=0,40V/V$  as solicitações impostas aos tiristores são mais elevadas.

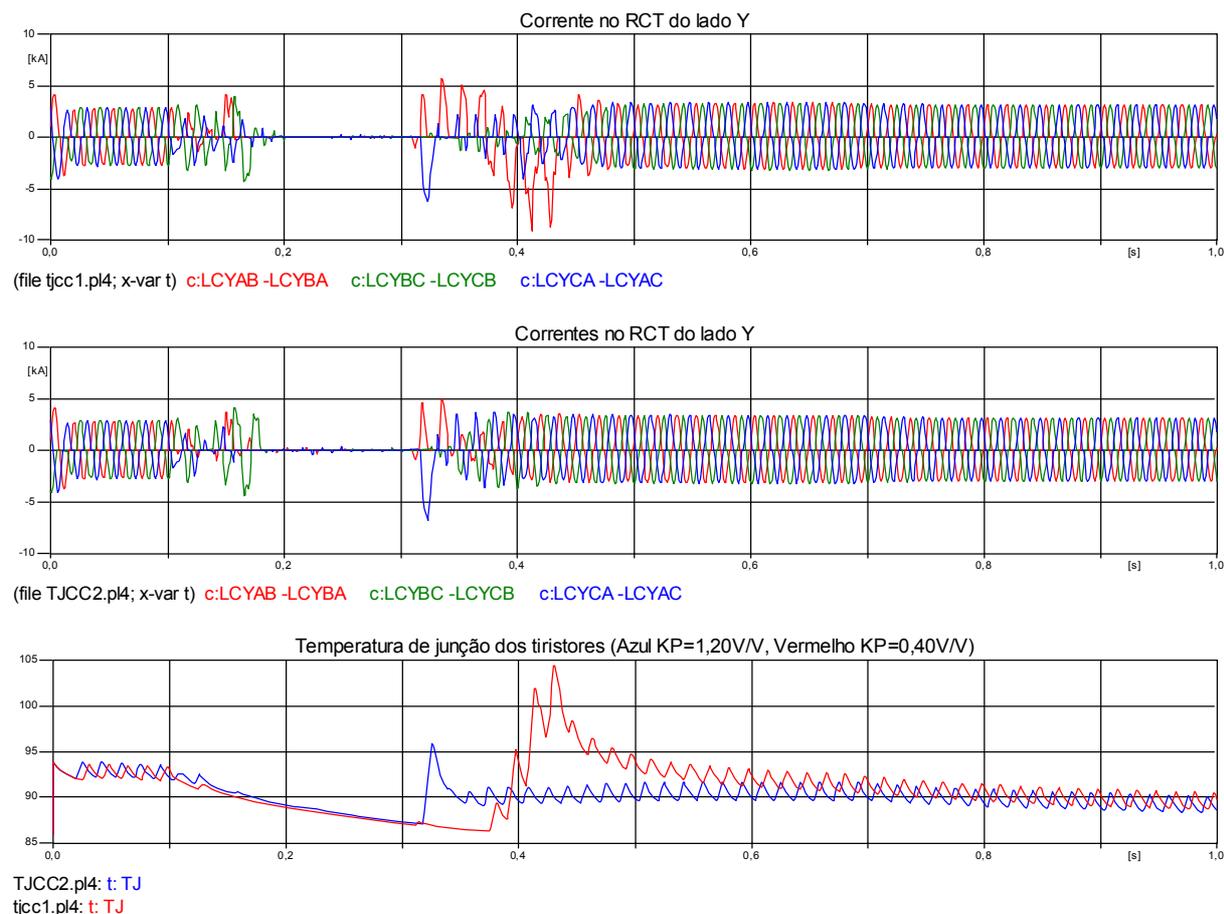


FIGURA 9 – Temperatura de junção dos tiristores

## 5.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As análises realizadas mostram sobretensões transitórias nas barras de 26kV, resultantes do circuito ressonante formado pela capacitância do banco de capacitores e pela indutância equivalente do transformador abaixador, do sistema de transmissão e do RCT, com uma frequência natural próxima do terceiro harmônico. A configuração do sistema de transmissão tem pouca influência na frequência de ressonância mas tem uma influência importante na sua magnitude. As sobretensões transitórias na barra de 26kV, atingem valores suficientes para provocar a atuação do disparo protetivo das válvulas de tiristores, gerando sobretensões e sobrecorrentes transitórias que por sua vez provocam novos disparos protetivos, gerando então múltiplos disparos protetivos ou uma condição de BOD repetitivo. Esta condição pode levar, corretamente, ao desligamento automático do compensador estático pela atuação de proteções de sobrecorrente ou pela atuação da proteção de BOD repetitivo, evitando a danificação de equipamentos do setor de 26kV.

A ocorrência dos múltiplos disparos protetivos com duração suficiente para provocar desligamentos ou danificação de equipamentos depende do nível de curto-circuito na barra de 230kV da subestação Fortaleza, ou seja, da magnitude da ressonância. Este fenômeno de interação do disparo protetivo com o sistema só ocorre dentro de uma determinada faixa de nível de curto-circuito, que por sua vez depende basicamente da presença de máquinas nas UTE Termofortaleza e Senador Carlos Jereissati e da configuração de linhas de transmissão de 500kV e 230kV em operação. Portanto, procedimentos operativos sistêmicos como o despacho das UTE, as condições energéticas, as intervenções em linhas de transmissão e o controle de tensão da área Norte, afetam o risco de desligamento do compensador estático de Fortaleza.

Para evitar os desligamentos do compensador estático e minimizar os riscos de danificação de equipamentos é necessário evitar os disparos protetivos. Uma alternativa analisada foi a instalação de pára-raios de alta capacidade de energia entre fases nas barras de 26kV, substituindo os pára-raios atualmente existentes. Até a

implantação da solução definitiva, os riscos de desligamentos e de danificação de equipamentos podem ser minimizados com a alteração de ajustes no sistema de controle em malha fechada tais como a alteração do ganho do controlador PI de 0,4V/V para 1,2V/V e a desativação do circuito inicializador do PI, mantendo ativada a proteção de BOD repetitivo com temporização mínima de 200ms. Além disso, para as manobras de energização dos lados Y e  $\Delta$  podem ser implantadas medidas operativas como abrir previamente um dos terminais da linha de transmissão Quixadá - Fortaleza II e retirar de operação as máquinas das UTE Termofortaleza e Senador Carlos Jereissati.

## 6.0 CONCLUSÃO

As sobretensões e sobrecorrentes transitórias observadas nos registros oscilográficos durante manobras de energização de um dos lados do compensador estático ou durante perturbações no sistema são decorrentes de uma interação transitória do disparo protetivo das válvulas de tiristores com o sistema de transmissão. Esta interação só ocorre dentro de uma determinada faixa de nível de curto-circuito na barra de 230kV da subestação Fortaleza e, portanto, trata-se de um fenômeno de origem sistêmica. Além das modificações de ajustes do sistema de controle em malha fechada, para evitar as restrições operativas e minimizar riscos, a solução recomendada é evitar os disparos protetivos através da instalação de pára-raios de óxido de zinco de alta capacidade de energia, ligados entre fases nas barras de 26kV.

As ocorrências envolvendo os desligamentos do compensador estático de Fortaleza devido à interação do disparo protetivo com o sistema de transmissão, são exemplos práticos de como a expansão e a operação do sistema podem afetar a disponibilidade, o desempenho e a integridade dos ativos de transmissão existentes.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) LINS, L. R., et ali, Commissioning and Operation of The Fortaleza Static Var Compensator : Studies, Problems and Solutions Employed, I Symposium of Specialists in Electric Operational Planning, august 1987.
- (2) FREIRE, A. R. F., et ali, Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para a Energização de um Autotransformador de 550/230kV – 600MVA e Influência do Comportamento Transitório de Compensadores Estáticos e Sistemas de Proteção, XVI SNPTEE, Campinas – SP, outubro de 2001.
- (3) RAMOS, A. J. P., et ali, Modelagem Detalhada de Compensadores Estáticos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, VII SNPTEE, São Paulo – SP, maio de 1986.
- (4) VASCONCELOS, A. N., et ali, Detailed Modeling of na Actual Static Var Compensator for Eletromagnetic Transient Studies, IEEE Trans. on Power System, february 1992.