



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

GAT 19
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NOS ENSAIOS DE RTDS DO CONTROLE DE MALHA FECHADA DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE SÃO LUÍS II

Nuno Henrique Moura Nunes Brito*
Camilo Machado Júnior
Geraldo Luiz Costa Nicola

ELETRONORTE

Mário Lemes
Heinz Tyll
Frank Schettler

SIEMENS

Manfredo Correia Lima

CHESF

RESUMO

Está prevista para o ano de 2007 a entrada em operação de um Compensador Estático - CE na SE São Luís II, pertencente à Eletronorte. A fim de avaliar seu desempenho dinâmico foram realizados testes em fábrica utilizando-se o *Real Time Digital Simulator* – RTDS.

Assim, este Informe Técnico tem por objetivo apresentar os diversos elementos de controle do CE de São Luís II e discutir as principais constatações relativas ao seu desempenho, além de apresentar e comentar os principais resultados dos testes de RTDS, estabelecendo importantes subsídios para o comissionamento e operação do referido equipamento, bem como contribuições para futuras especificações.

PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático – SVC - RTDS – desempenho dinâmico – controle de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

A SE São Luís II 500/230 kV – 3 x 600 MVA, situada no estado do Maranhão, é responsável pelo atendimento a toda a capital do estado e ao consumidor eletrointensivo Alumar. A fim de proporcionar um adequado controle de tensão nessa região, estudos de planejamento definiram a necessidade de ser instalado nessa subestação um CE de 230 kV, com potência de (-100; + 150) Mvar, cuja instalação foi autorizada à Eletronorte pela ANEEL.

A Figura 1 apresenta, de forma simplificada, a configuração do sistema elétrico e a localização do referido CE.

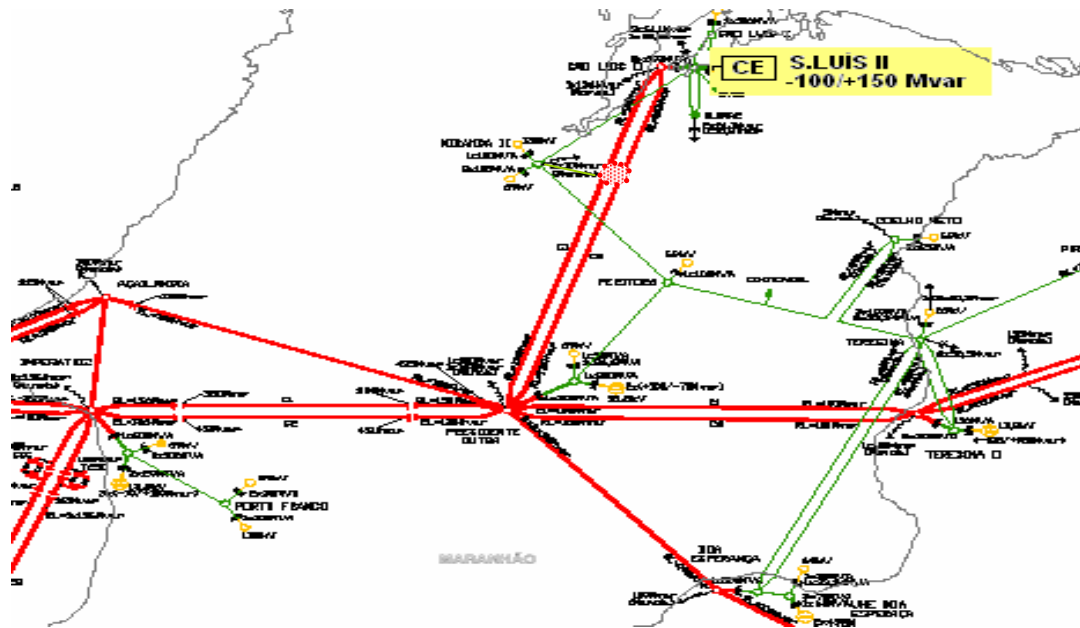


FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

O CE de São Luís II foi adquirido pela Eletronorte junto à Siemens e é, basicamente, composto pelos seguintes elementos:

- Reator Controlado a Tiristores – TCR;
- Capacitor Chaveado a Tiristores – TSC;
- Filtros de 5° e 7° harmônicos;
- Transformador elevador 230/18,3 kV – 150 MVA.

A configuração do referido CE é mostrada na Figura 2.

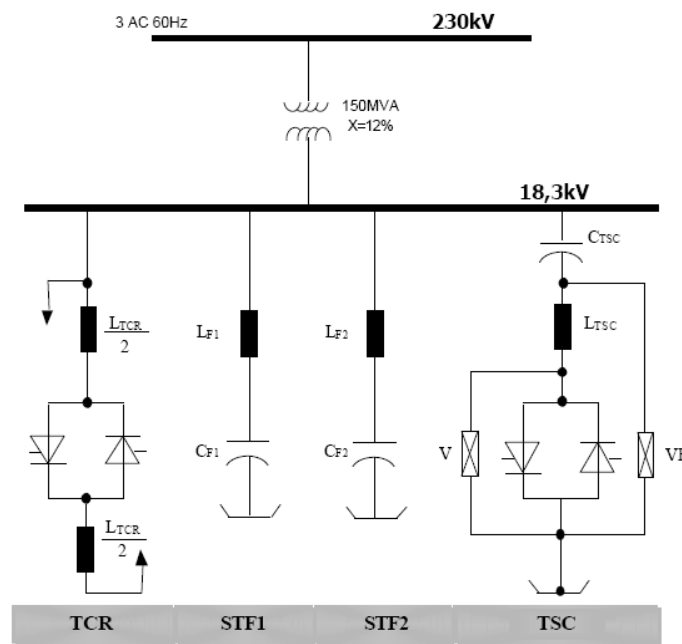


FIGURA 2 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO CE DE SÃO LUÍS II

Para avaliar o desempenho dinâmico do CE de São Luís II, bem como o atendimento aos requisitos de desempenho estabelecidos na especificação técnica, foram realizados testes em RTDS, onde foi representada a rede elétrica da área Maranhão, configurações atual e futura, equivalentada na SE P. Dutra, utilizando-se os painéis reais do sistema de controle do referido compensador. Foram simuladas, além de degraus na referência de tensão do CE, perturbações envolvendo perda de linhas de transmissão e rejeição de carga, com e sem a aplicação de curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados, manobras de bancos de capacitores e energização de transformador externo, dentre outras.

2.0 - DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE

O princípio de operação do Modo Automático de Controle de Tensão baseia-se em, ao medir o erro de tensão na entrada do controlador, o sistema de Controle em Malha Fechada (*Closed Loop Controller – CLC*) define a susceptância shunt do CE, requerida no 230 kV, obtida através de combinações entre TCR e TSC.

Assim, considerando que os filtros estão sempre inseridos em operação normal, os mesmos não fazem parte das ações de controle. O TCR tem sua susceptância variada de forma rápida e contínua através do controle do ângulo de disparo dos tiristores. Já o TSC, apesar de representar uma ação rápida, porém descontínua, de chaveamento *ON/OFF* acionado por tiristores, tem essa descontinuidade compensada pelo sistema de controle do CE, que utiliza o TCR para compensar a entrada/saída do TSC. Com isso, visto da barra de 230 kV, à frequência fundamental, o CE proporciona uma excursão rápida e contínua da potência reativa ao longo de seus limites indutivo e capacitivo.

A Figura 3 apresenta, de forma simplificada, a estrutura geral do sistema de controle.

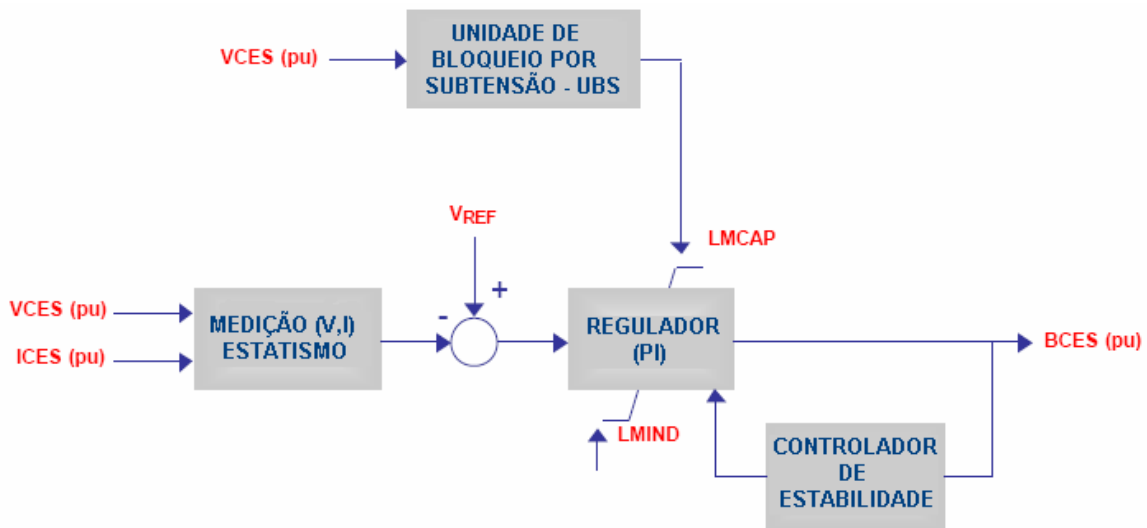


FIGURA 3 – ESTRUTURA GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE DO CE DE SÃO LUÍS II

Na Figura 3, VCES e ICES são, respectivamente, a tensão e a corrente do CE no lado de alta tensão (230 kV), em “pu”, BCES é a susceptância controlada e conectada no barramento 230 kV e V_{REF} é a tensão de referência, ou *setpoint*, ajustável pelo operador.

A malha de controle principal, apresentada na Figura 4, compreende a medição de tensão e corrente, realizando a função de estatismo, e o regulador de tensão, que consiste basicamente de um elemento de medição com constante de tempo da ordem de 20 ms e de um regulador tipo Proporcional-Integral - PI.

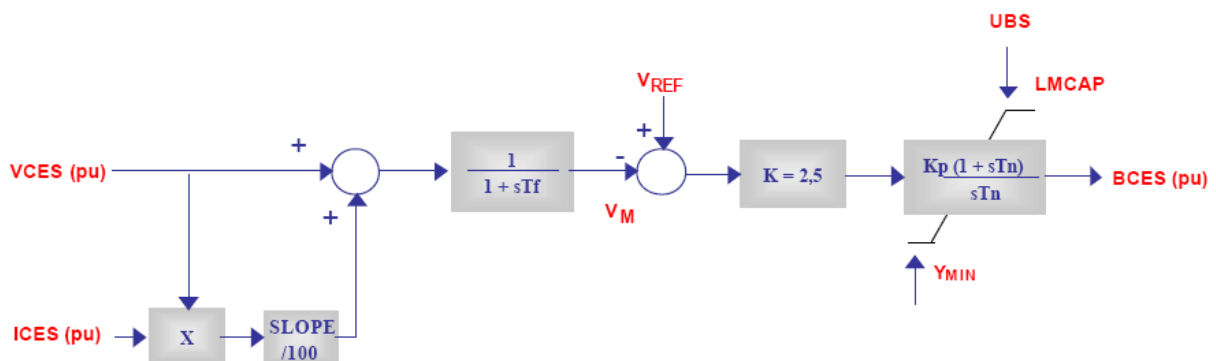


FIGURA 4 – MALHA DE CONTROLE PRINCIPAL DO CE DE SÃO LUÍS II

Além de recursos especiais tradicionais, o sistema de controle do CE de São Luís II, por ser um equipamento de última geração, dispõe também de recursos avançados, conforme descrito a seguir.

Unidade de Bloqueio por Subtensão (UBS): recurso que visa a evitar que o CE tente controlar a tensão durante determinadas condições de curto-circuito na rede, que provoquem, no ponto de controle, grandes afundamentos de tensão. Quando a tensão atinge o valor ajustado, de 0,50 pu, esse recurso força o CE a operar com 0 Mvar, evitando assim contribuir para uma possível sobretensão quando da eliminação da falta. O valor ajustado para desbloqueio dessa unidade é 0,55 pu.

Ajuste Automático do Ganho: proporciona que o ganho do controlador seja ajustado automaticamente em função do nível de curto-circuito na barra de conexão do CE com o sistema elétrico de potência, através de uma medida da sensibilidade $\Delta V/\Delta Q$ e do estatismo.

Controlador de Estabilidade (*Hunting Detection*): estratégia através da qual, quando da ocorrência de variações consecutivas na direção do sinal de saída do regulador PI, com frequências superiores a 4 Hz, o valor do ganho do controlador é automaticamente reduzido, passo-a-passo, de 20% por passo, a fim de garantir um desempenho estável do CE.

Chaveamento de Elementos Externos: recurso que possibilita o chaveamento coordenado de capacitores e reator *shunt* existentes na SE São Luís II. Tal função, designada pelo fabricante como *external devices*, envolve dois tipos de controle, o modo lento (*time normal*) e o modo rápido (*time fast*). O modo lento atua com uma temporização da ordem de minutos e comanda o chaveamento *ON/OFF* do reator de 136 Mvar / 500 kV e dos capacitores de 55 Mvar / 230 kV, caso o CE permaneça fora de uma faixa de potência reativa pré-definida. O controle rápido também comanda o chaveamento *ON/OFF* do reator de 136 Mvar / 500 kV e dos capacitores de 55 Mvar / 230 kV, mas com uma temporização da ordem de segundos e nas situações que o CE atinja seu limite de potência reativa e não consiga corrigir o sinal de erro na entrada do regulador de tensão. Na hierarquia estabelecida para tomada de decisão entre energizar um capacitor ou desenergizar um reator, ou vice-versa, os chaveamentos *OFF*, tanto do reator como dos capacitores, sempre acontecerão primeiro que os chaveamentos *ON*.

3.0 - TESTES NO SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL

O desempenho dinâmico do CE de São Luís II, bem como o atendimento aos requisitos de desempenho estabelecidos na especificação técnica, foi avaliado em fábrica utilizando-se um simulador digital em tempo real (RTDS). Os testes foram realizados com os painéis reais de proteção, controle de malha fechada e controle de malha aberta conectados ao RTDS e foram considerados como testes de aceitação e pré-comissionamento. A rede elétrica da área Maranhão foi representada para as configurações atual e futura, equivalentada na SE Presidente Dutra, e, dentre os testes realizados, destacam-se:

- Aplicação de degraus de tensão na referência do controlador, para diversos níveis de curto-circuito;
- Levantamento da curva $V \times Q$;
- Aplicação e eliminação de faltas, monofásicas e trifásicas, com perda de linha de transmissão, nas proximidades da SE São Luís II;
- Aplicação e eliminação de faltas, monofásicas e trifásicas, com rejeição de carga, nas proximidades da SE São Luís II;
- Energização de um dos transformadores de 500/230 kV – 600 MVA da SE São Luís II;
- Manobras de bancos de capacitores e reator da SE São Luís II.

As características de desempenho transitório de um sistema de controle são normalmente descritas em termos da resposta a degrau. É desejável que a resposta transitória seja suficientemente rápida e suficientemente amortecida. Porém, essas relações são conflitantes pois, um sistema com elevado amortecimento responde de forma lenta e vice-versa. Portanto, há necessidade de um compromisso entre a rapidez de resposta e o *overshoot* permissível.

Assim, a fim de observar o atendimento aos requisitos de desempenho especificados, os testes iniciais consistiram na avaliação da resposta transitória do CE à aplicação de degraus de tensão na referência do controlador, para diversas condições. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos nos testes de aplicação de degrau de 2%, considerando duas condições extremas de nível de curto-circuito, com estatismo de 2%.

TABELA 1 - RESULTADOS DOS TESTES DE RESPOSTA A DEGRAU

NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO	BAIXO (2,71 GVA)	ALTO (5,33 GVA)
Tempo de Resposta (ms)	30,0	31,0
Tempo de Estabelecimento (ms)	100,0	84,0
Overshoot (%)	7,1	10,0
Ganho	3,12	4,40

Foi também verificada a característica V x Q do CE, com estatismo nominal (2%). O procedimento adotado para levantamento da curva foi o de elevar lentamente a tensão do sistema de 0 pu até aproximadamente 1,2 pu e, posteriormente, reduzir essa tensão, também lentamente, de aproximadamente 1,2 pu até 0 pu, registrando os valores de potência reativa associados. O resultado é apresentado na Figura 5.

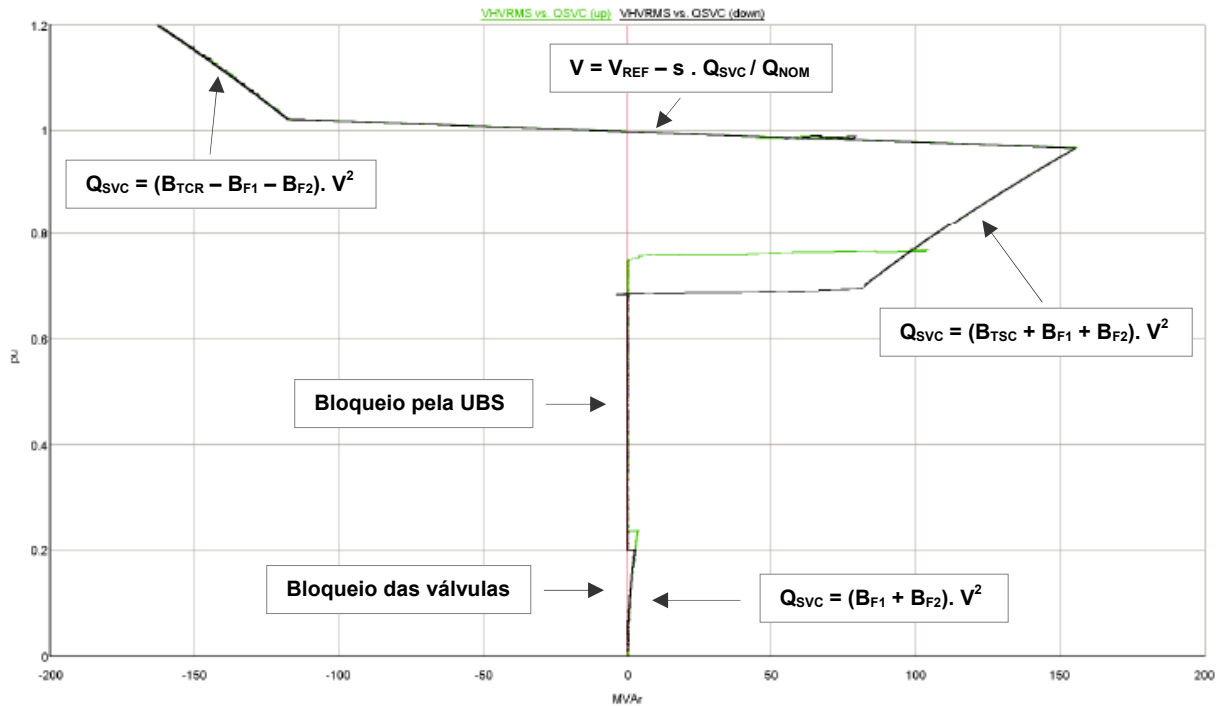


FIGURA 5 – CARACTERÍSTICA V x Q

Observa-se que dentro da faixa de controle, que é a faixa normal de operação, o comportamento é linear e a tensão é controlada em um valor dado por: $V_{REF} - s \cdot Q_{SVC} / Q_{NOM}$, onde "s" é o estatismo do CE. Fora da faixa de controle observa-se a variação quadrática da potência reativa com a tensão, em função do CE funcionar como um elemento de susceptância constante. Assim, após atingir seu limite indutivo, o CE apresenta susceptância fixa equivalente à susceptância do TCR menos os filtros. Após atingir seu limite capacitivo, o CE apresenta susceptância fixa equivalente à susceptância do TSC mais os filtros. Pode-se observar também o bloqueio pela unidade de subtensão, mantendo a potência reativa nula, e o bloqueio das válvulas de tiristores, para valores reduzidos de tensão. Adicionalmente visualiza-se a histerese entre os caminhos de "ida" e de "volta".

Diversas condições de manobras na rede elétrica foram avaliadas, notadamente envolvendo os bancos de capacitores e o reator instalados na SE São Luís II. A Figura 6 ilustra os registros de RTDS para a manobra de desenergização de um dos bancos de capacitores de 55 Mvar / 230 kV, onde observa-se a rápida compensação da potência reativa por parte do CE (Q_{SVC}), proporcionando uma imediata correção da tensão (V_{ACT}). A ação de controle se deu de forma contínua, sem atuação da lógica de subtensão, que não foi sensibilizada.

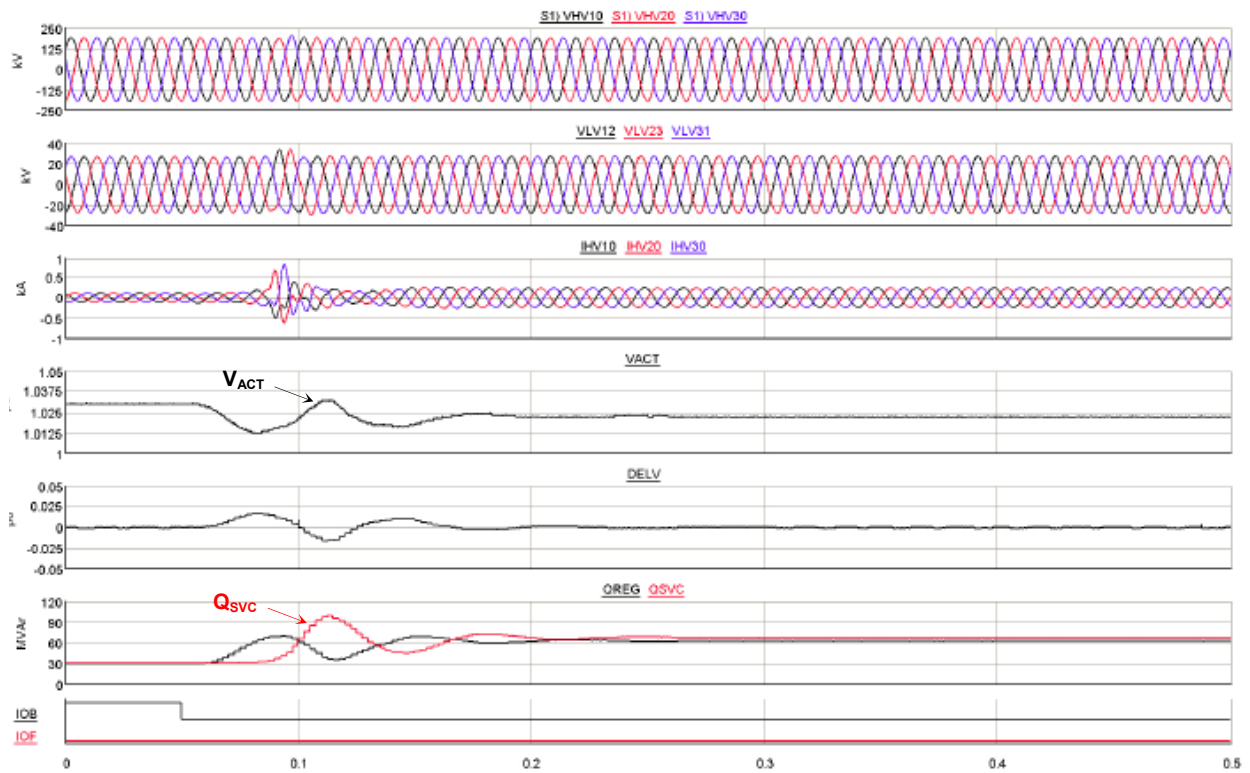


FIGURA 6 – REGISTROS DE RTDS PARA A MANOBRA DE UM BANCO DE CAPACITORES DE 55 Mvar / 230 kV

Na seqüência, foi avaliado o desempenho do CE sob diversas condições de distúrbios no sistema. Na Figura 7 são apresentados os registros de RTDS para um desses testes, relativo à perda de um dos circuitos da LT P. Dutra – Miranda 500 kV, após curto-circuito na SE Miranda 500 kV, eliminado em cinco ciclos.

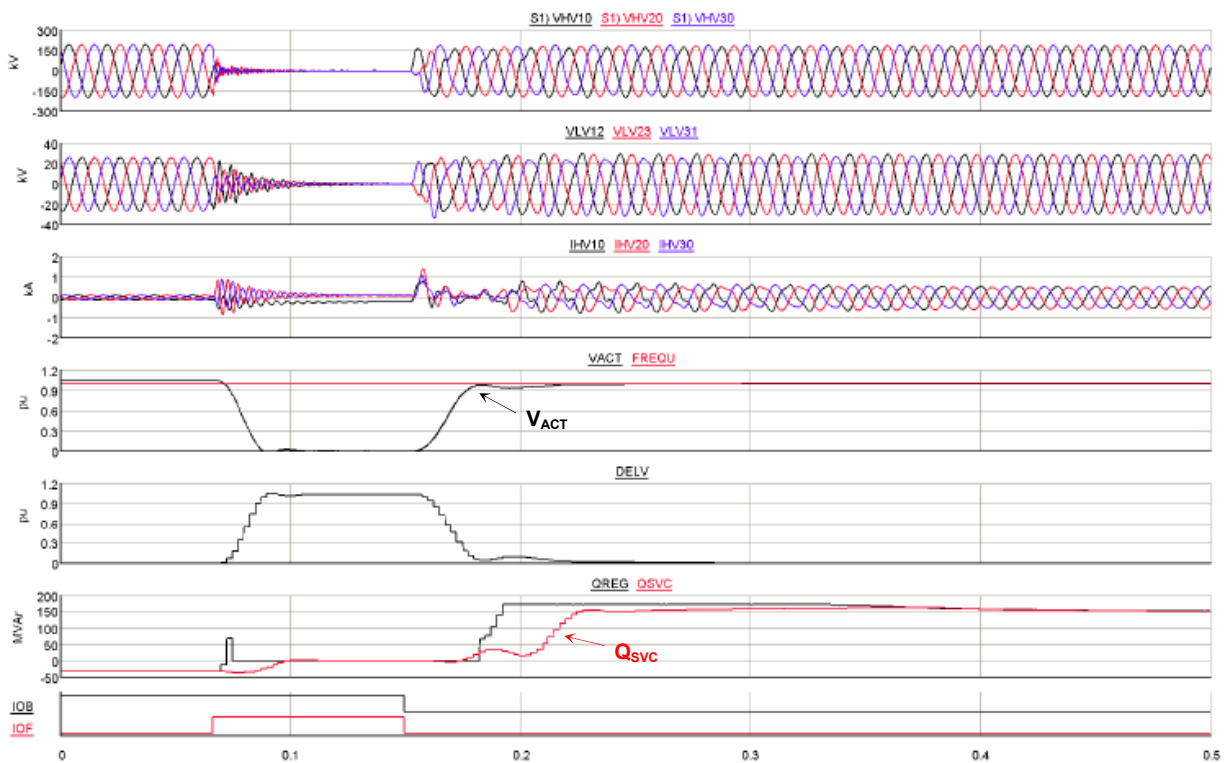


FIGURA 7 – REGISTROS DE RTDS PARA A PERDA DA LT P. DUTRA – MIRANDA 500 kV

Apesar de tratar-se de um distúrbio que causaria significativo afundamento de tensão na região de São Luís, se não estivesse presente o CE, observa-se na Figura 7 uma rápida recuperação da tensão e a concomitante variação de potência reativa fornecida pelo CE. Observa-se também que durante o curto-circuito o CE permanece com 0 Mvar, em função do bloqueio por subtensão.

Diversos testes foram realizados com a função *External Devices* – ED habilitada, em seus Modos Lento (*time normal*) e Rápido (*time fast*), visando a avaliar o desempenho da mesma. Ilustra-se na Figura 8 o comportamento do CE frente à perda de um dos circuitos da LT P. Dutra – S. Luís II 500 kV, após curto-circuito na SE S. Luís II 500 kV, eliminado em cinco ciclos. Essa perturbação é a que mais exige o CE e visou a avaliar o comportamento do Modo Rápido da função *External Devices*. O sistema estará sujeito a esse distúrbio na configuração que existirá até a entrada em operação da SE Miranda II 500 kV, a qual seccionará os atuais circuitos P. Dutra – S. Luís II 500 kV.

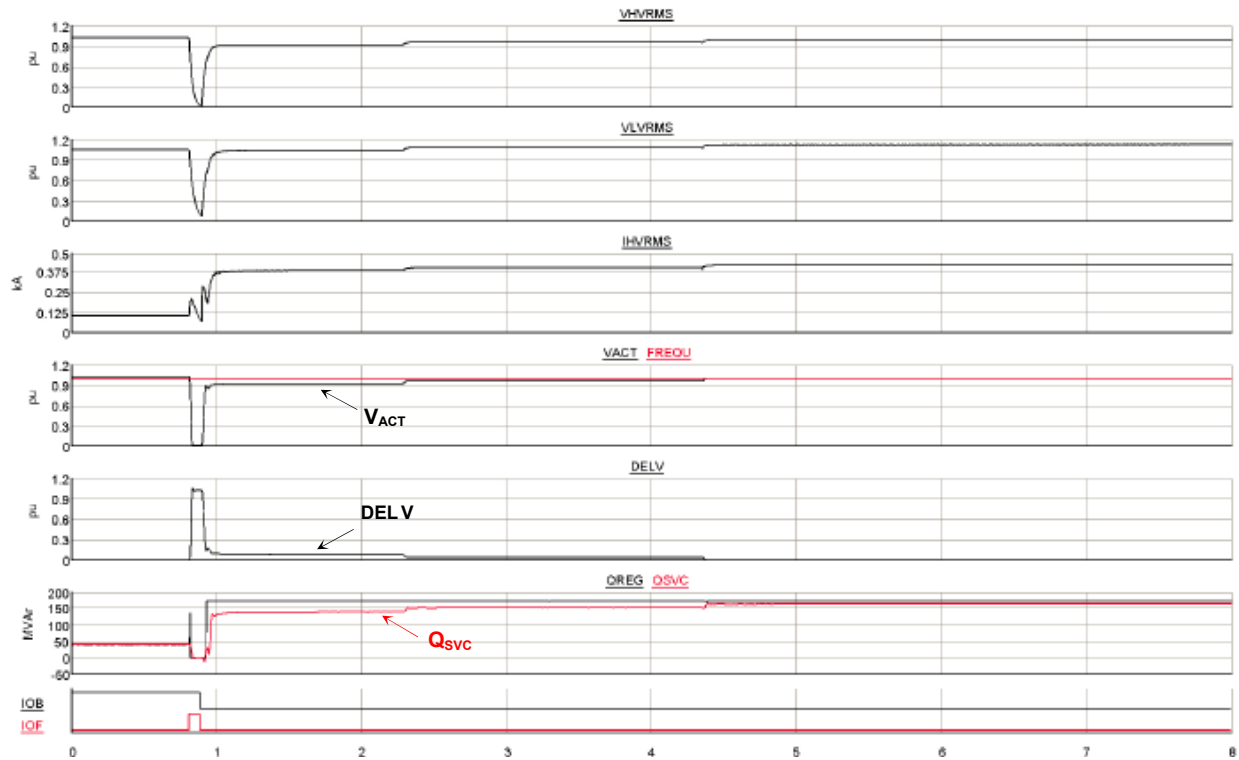


FIGURA 8 – REGISTROS DE RTDS PARA A PERDA DA LT P. DUTRA – S. LUÍS II 500 kV

Observa-se que após a perturbação o CE atingirá seu limite capacitivo sem que consiga zerar o sinal de erro na entrada do regulador de tensão (**DEL V**). Assim sendo, após o tempo estabelecido é comandado pelo CE o desligamento do reator de barra de 136 Mvar / 500 kV da SE S. Luís II. Como ainda persiste um erro de tensão, após dois segundos é comandado pelo CE a energização de bancos de capacitores de 2 x 55 Mvar / 230 kV da SE S. Luís II, quando então é zerado o erro na entrada do regulador de tensão.

O Modo Rápido possibilita ajustar a temporização do primeiro chaveamento externo na faixa de zero a cinco segundos. A partir do segundo chaveamento a temporização é fixa em dois segundos.

A fim de avaliar a atuação do controlador de estabilidade (*hunting detector*), foi testada uma situação de curto-circuito remoto com rejeição de carga que provocasse um sinal oscilatório na saída do regulador. A Figura 9 ilustra esse teste onde se observa uma oscilação inicial do sinal de controle (**Q_{REG}**) e a atuação do controlador de estabilidade reduzindo o ganho de 20%, ou seja, de 4,24 para 3,39, após quatro trocas consecutivas na direção do sinal de controle, com frequência superior a 4 Hz. Observa-se que durante o curto-circuito remoto não houve redução de tensão significativa na barra de 230 kV da SE São Luís II que levasse à atuação da Unidade de Bloqueio por Subtensão e, assim, o sinal **Q_{REG}** foi para seu limite capacitivo, reduzindo seu valor imediatamente após a eliminação da falta, com simultânea rejeição de carga.

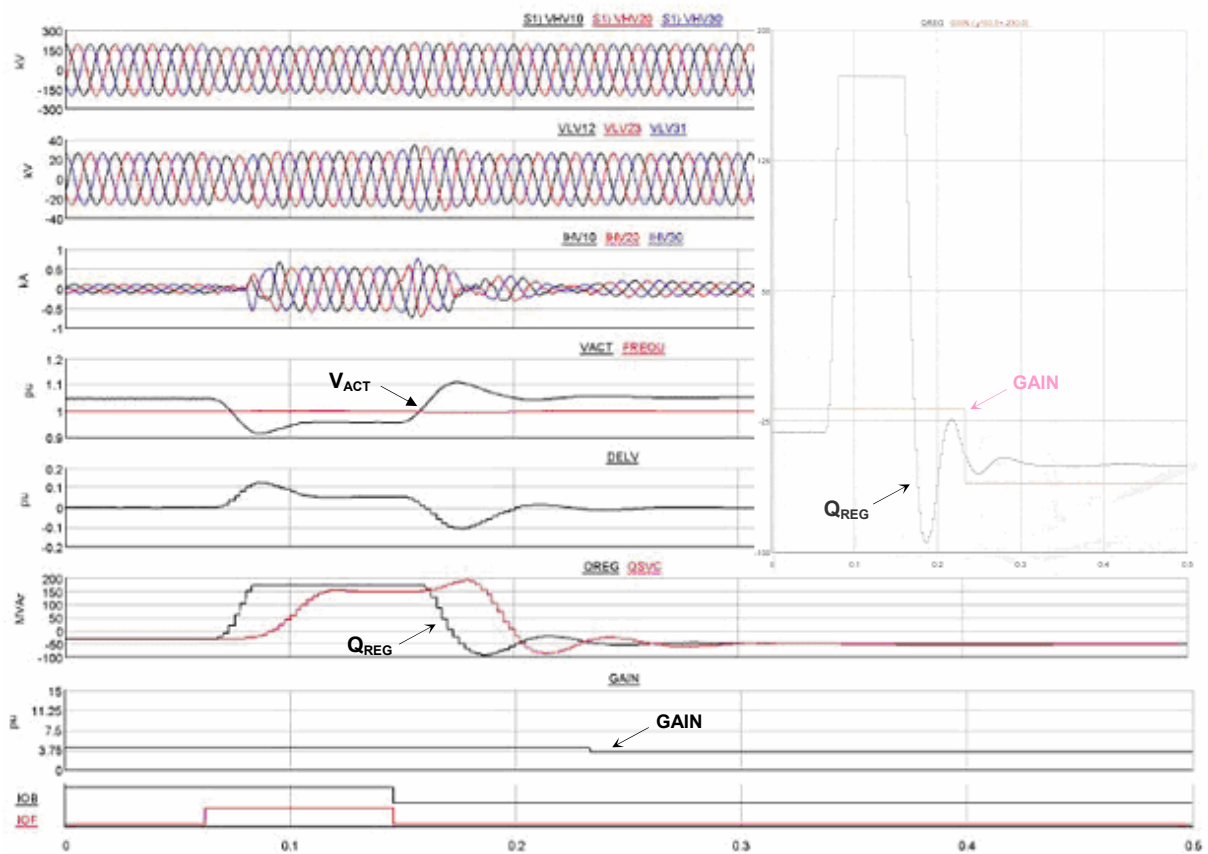


FIGURA 9 – ATUAÇÃO DO CONTROLADOR DE ESTABILIDADE

Vale ressaltar que se novas reduções de ganho fossem necessárias, seriam feitas para apenas uma troca de direção do sinal de controle, por passo. Destaca-se, também, que transcorridos 20s da atuação do controlador de estabilidade, é feito um novo teste de ajuste automático de ganho e, se necessário, o ganho volta a ser elevado, passo-a-passo.

4.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma descrição das funções e testes de RTDS realizados para o CE de (-100; + 150) Mvar / 230 kV, previsto para a SE São Luís II.

As principais conclusões do trabalho são:

- O CE apresenta-se como um importante reforço para a melhoria da qualidade do atendimento de energia elétrica à região de São Luís;
- O desempenho dinâmico apresentado pelo CE durante os testes de RTDS atendeu às especificações de projeto;
- Os testes de RTDS, utilizando os painéis reais do CE, proporcionam maior segurança operativa e redução dos trabalhos de comissionamento.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIEMENS. SVC São Luís – Basic Design Study. PTD H 166/568.9966. Dec. 2005.
- [2] SIEMENS. SVC São Luís – Closed Loop / Open Loop Control. Apr. 2006.
- [3] SIEMENS. SVC São Luís / Sinop – External Device Control. May. 2006.
- [4] ANDESA. Modelagem do Compensador Estático de São Luís II para o ANATEM. Relatório ANDESA-RT-02.11.06 – V02. nov. 2006.
- [5] ANDESA. Modelagem do Compensador Estático de São Luís II / External Device para o ANATEM. Relatório ANDESA-RT-01.01.07 – V02. fev. 2006.
- [6] SIEMENS. CLC Acceptance Test São Luís. Sep. 2006.