



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7537
Tópico: Modelagem e Simulações

COMPENSADORES ESTÁTICOS DE ALTA TENSÃO COM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO: COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS EM PSCAD / EMTDC™ E TESTES EM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL

MANFREDO CORREIA LIMA
CHESF

CLIVALDO SILVA DE ARAÚJO
UFPB

RESUMO

O presente artigo apresenta os resultados das simulações de grandes e pequenas perturbações efetuadas em PSCAD / EMTDC™, realizadas na área de influência dos SVC Funil e Bom Jesus da Lapa, considerando a representação detalhada dos sistemas de 230 e 500kV associados a tais equipamentos. É analisada a influência do esquema de controle adaptativo do ganho presente em tais equipamentos no desempenho dos SVC. É também efetuada a comparação entre os resultados das simulações em PSCAD/EMTDC™ e testes realizados em RTDS. Semelhanças e eventuais diferenças entre os resultados obtidos com o uso das duas ferramentas são analisadas.

PALAVRAS CHAVE

RTDS - Sistema de Controle – PSCAD/EMTDC™
- Compensador Estático (SVC) – Controle Adaptativo

1.0 INTRODUÇÃO

Testes em RTDS (Real Time Digital Simulator) constituem poderosa ferramenta para avaliação do desempenho de equipamentos FACTS, em particular de compensadores estáticos (SVC), pois permitem que os seus sistemas de controle sejam testados de modo conjunto, em situações bastante próximas das que são submetidos em condições reais de operação [1]. Além disso, este procedimento abrevia de forma significativa os trabalhos de comissionamento, pois ao final dos

testes em RTDS, os painéis são instalados em *containers* e remetidos à subestação, prontos para os testes de pós-comissionamento, dispensando o teste individual de cada painel, bem como das suas interligações, antes realizado no campo. Este procedimento foi aplicado com sucesso para o SVC Funil (100Mvar indutivos / 200Mvar capacitivos - 230kV) atualmente em operação na região Sul do Estado da Bahia [2]. Por outro lado, estudos em RTDS envolvendo sistemas malhados apresentam o desafio da redução da rede através de equivalentes de Thévenin, o que requer aproximações, dando margem a questionamentos quanto à correspondência entre os resultados obtidos e o desempenho do sistema real. Dentre as principais ferramentas para simulação de transitórios eletromagnéticos, destaca-se o PSCAD/EMTDC™, por possuir amigável interface gráfica, além de recursos avançados que em muito facilitam a modelagem de equipamentos FACTS, tais como SVC e TCSC. Além do mais, o emprego de softwares para simulação permite a utilização de uma representação mais detalhada do sistema elétrico de potência, livre das limitações inerentes ao RTDS. Considerando a evolução do sistema de transmissão e a entrada em operação da interligação Nordeste-Sudeste em 500kV (Figura.1), este artigo apresenta as simulações em PSCAD/ EMTDC™ de aplicação de distúrbios na área de influência dos SVC Funil (FNL) e Bom Jesus da Lapa (BJL). É considerada uma representação detalhada para os sistemas de 230 e 500kV e para o SVC Funil. Para o SVC

BJL e para a UHE Itapebi, foram adotados modelos típicos disponíveis no PSCAD/EMTDC™ [2]. Os resultados das simulações são comparados com os de estudos em RTDS

realizados durante os testes de performance do SVC Funil. A influência do controle adaptativo, presente em ambos os SVC, é também analisada.

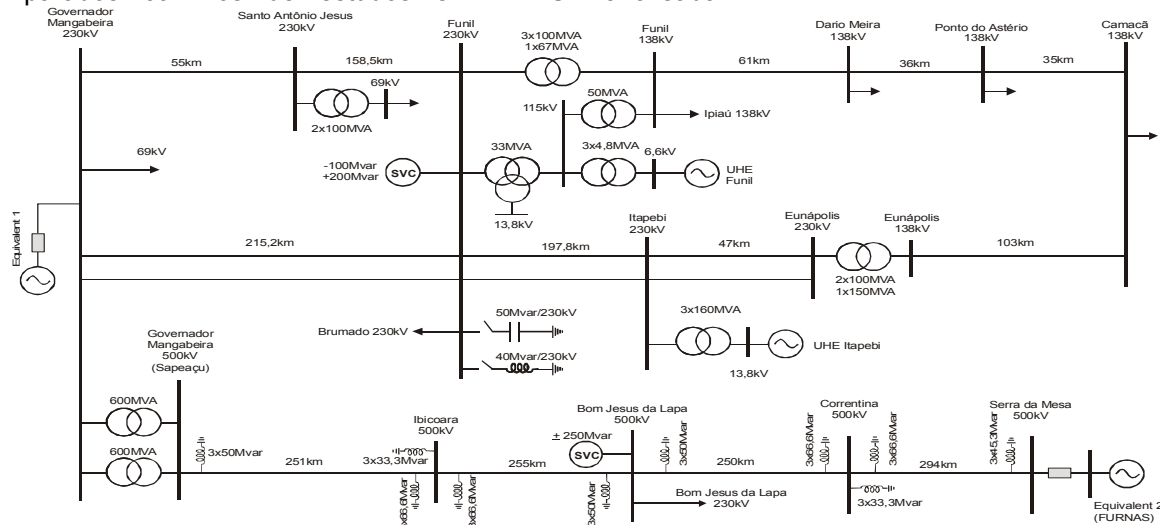


Figura.1. Diagrama unifilar simplificado da rede elétrica representada no PSCAD / EMTDC™

2.0 SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO

Os SVC FNL e BJL possuem avançados recursos nos seus sistemas de controle, dentre as quais se destacam:

- Cálculo automático de ganho (AGC);
- Detector de oscilações (HD);
- Bloqueio por subtensão (VSUB).

Nas simulações apresentadas, é adotada uma representação detalhada para o SVC Funil, incluindo as características avançadas do seu sistema de controle. Para o SVC BJL ($\pm 250\text{Mvar}$, 500kV), é adotada representação simplificada através do modelo SVC400, disponível no PSCAD/EMTDC™ [2]. Intuitivamente, um controle adaptativo é aquele capaz de modificar seu comportamento em resposta a mudanças na dinâmica do processo e na característica das perturbações aplicadas. Uma das definições que mais se adequa à maioria das situações práticas é a fornecida por [3]: “um controle adaptativo é aquele que dispõe de parâmetros ajustáveis e de um sistema automático para ajuste destes parâmetros”. Dentre os diversos tipos de controle adaptativo [3], o que mais se assemelha ao empregado nos SVC FNL e BJL é o conhecido como *Gain Scheduling* (Figura.2). O sistema é composto por duas malhas: a interna, formada pelo processo e pelo controlador e a externa, que efetua o ajuste dos parâmetros do controlador, de acordo com as condições de operação. *Gain Scheduling* pode ser interpretado como um

sistema de controle não linear, em malha fechada, com uma característica peculiar: possui um controlador linear, cujos parâmetros são modificados de acordo com as condições de operação, de forma pré-estabelecida [3] (tabela de ganhos ou função previamente definidos).

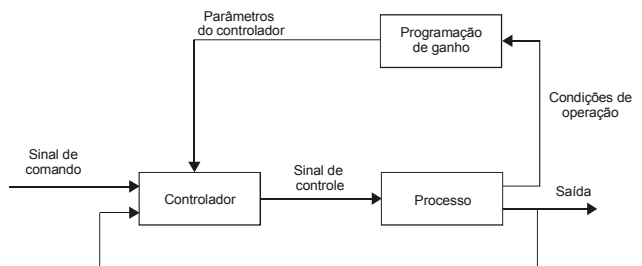


Figura.2. Controle adaptativo tipo “Gain Schedule”

O controlador automático de ganho é necessário para assegurar que a resposta do SVC seja constante e atenda aos requisitos da especificação, dentro do intervalo de variação de potência de curto-circuito especificado ($0,5$ a $1,7$ GVA para o 230kV do SVC Funil). Este controlador procura determinar o coeficiente de sensibilidade entre tensão e potência reativa do sistema no ponto de conexão com o SVC (aproximado pela relação $\Delta V_{ACT} / \Delta Q_{SVC}$) e, com base neste parâmetro, calcula o valor ótimo do ganho proporcional do controlador PI para a condição de operação do sistema encontrada (Figura.3). Na prática, pode-se aproximar o referido coeficiente pela potência de curto-circuito trifásica calculada no ponto de conexão do SVC com a rede elétrica (230 kV).

defeito. A ativação do bloqueio do SVC pelo esquema de subtensão é acompanhada pela inibição do detector de oscilações (HD). Com esta estratégia, evita-se que variações observadas no sinal de saída do controlador PI decorrentes da atuação do VSUB sejam interpretadas pelo HD como oscilações, causando reduções indevidas de ganho. O SVC é novamente liberado para controlar a tensão caso a magnitude das tensões do 230kV seja superior a um valor previamente ajustado depois de decorrido um intervalo de tempo também ajustável da recuperação da mesma, para evitar oscilações nas ações de bloqueio e desbloqueio.

Caso as tensões no setor de 13,5kV do SVC Funil sejam reduzidas abaixo de 25% do seu valor nominal, o disparo correto não é garantido, devido à dificuldade na identificação dos cruzamentos pelo zero das tensões aplicadas às válvulas de tiristores dos TCR e TSC. Para evitar que os tiristores sejam disparados de forma aleatória, o bloqueio da inserção dos referidos elementos durante tais subtensões é implementada.

4.0 APLICAÇÃO DE FALTAS TERMINAIS NO SVC FUNIL

Este grupo de simulações consiste na aplicação e eliminação de defeitos trifásicos à terra na barra de 230kV da SE Funil. Para maximizar o grau de severidade, a falta é aplicada no instante em que a tensão da fase *a* do 230kV passa pelo zero e eliminada 100mseg depois, nos instantes em que as correntes nas respectivas fases cruzam o zero. Simultaneamente à eliminação da falta, é simulada a rejeição da carga total do 138kV de Funil e do anel 138kV Funil-Eunápolis. Durante o intervalo de aplicação da falta, o SVC tem sua ação bloqueada pela ação dos esquemas de subtensão nas barras de 230 e 13,5kV, mas na sua eliminação, o referido equipamento é efetivo no combate às sobretensões pós-falta, decorrentes principalmente de rejeição de carga. Nas simulações realizadas, variou-se o nível de atuação do bloqueio por subtensão, com o objetivo de determinar o valor mais adequado na configuração do sistema elétrico correspondente a Dez/2003. Para os níveis de ativação compreendidos entre 0,60 e 0,30pu do VSUB no 230kV, tem-se níveis de sobretensão pós-defeito bastante reduzidos, cerca de 1,07pu, com rápida extinção, da ordem de alguns poucos milissegundos. Os tempos de recuperação da tensão são adequados e facilmente é atingido o regime permanente após a eliminação da falta. Considerando desativado o referido esquema de

bloqueio por subtensão, o nível de sobretensão presente na eliminação do defeito eleva-se para em torno de 1,1pu, mas com rápida atenuação. Na eliminação da falta, a saída do controlador PI (Q_{REG}) desloca-se para o limite capacitivo, na tentativa de corrigir o elevado valor de erro desenvolvido na sua entrada durante o intervalo de aplicação da falta. Como o esquema de bloqueio por subtensão no 13,5kV é sempre ativado, este efeito não se pronuncia na potência reativa de saída do SVC (Q_{SVC}). Entretanto, como o integrador do controlador PI atinge o seu limite, alguns milissegundos são necessários para o mesmo atuar no sentido contrário e retornar a um ponto de operação próximo do regime permanente pós-falta, o que implica em elevação do tempo de resposta do SVC. Desta forma, recomenda-se manter ativado o esquema de bloqueio do SVC por subtensão no 230kV. O nível de bloqueio pode ser o mais baixo possível, ou seja, 0,30pu, fazendo com que o bloqueio somente ocorra para faltas com elevado grau de severidade e garantindo que no maior número possível de defeitos, o SVC encontre-se liberado para auxiliar no controle da tensão do sistema. Perde o sentido a redução do citado nível de bloqueio abaixo de 0,30pu devido à existência do esquema de bloqueio por subtensão no 13,5kV, cujo nível de atuação encontra-se ajustado, conforme recomendação do Fabricante, em 0,25pu. Durante a aplicação de faltas com valores muito reduzidos de tensão, circula nos TCR a chamada *DC trapped current*. Como a tensão aplicada ao TCR durante o defeito é nula ou muito reduzida e seu valor instantâneo é proporcional à derivada da corrente, um valor nulo de tensão produz um valor constante de corrente. O grau de severidade deste defeito é tão mais elevado quanto maior for o valor instantâneo da corrente no instante de aplicação da falta. O TCR é projetado para suportar a *DC trapped current* correspondente à aplicação da falta no instante em que a corrente através do referido componente passa pelo máximo, com tensão pré-falta de 1,05pu e tempo de eliminação da falta de 100mseg, conforme relatório de projeto básico fornecido pelo Fabricante. Os valores presentes nas simulações apresentadas encontram-se dentro dos limites permitidos.

A Figura.4 apresenta os resultados da simulação em PSCAD/EMTDC™ de aplicação de falta trifásica à terra no 230kV de Funil, eliminada em 100mseg com rejeição total da carga do 138kV e abertura do anel 138kV Funil-Eunápolis. O nível de bloqueio por subtensão no 230kV é 0,30pu. A Figura.5 apresenta os resultados do teste em RTDS de aplicação de uma falta trifásica à terra

no 230kV de Funil, Dez/2001, carga máxima. Verifica-se a desejada equivalência entre as simulações realizadas com as ferramentas EMTDC e RTDS, destacando-se o efeito da *DC trapped current*. O SVC BJT atua de forma coordenada com o SVC Funil, deslocando-se para pontos fortemente capacitivos durante a falta e contribuindo para que um regime permanente estável pós-defeito seja facilmente atingido. Os níveis de sobretensão pós-defeito em BJT 500kV são de 1,15pu, com rápido amortecimento.

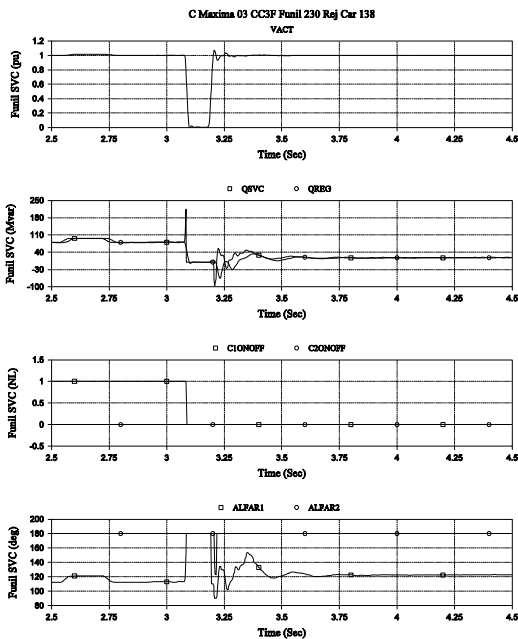


Figura.4-(a).Curto-circuito no 230kV da SE Funil – PSCAD/EMTDC™

5.0 APLICAÇÃO DE FALTAS TERMINAIS NO SVC BOM JESUS DA LAPA

É apresentada na Figura.6 a aplicação de falta trifásica à terra em BJT 500kV, eliminada com abertura da linha BJT-Correntina 500kV, 100mseg após a eliminação da falta (PSCAD/EMTDC™). O ganho calculado pelo AGC para o SVC BJT

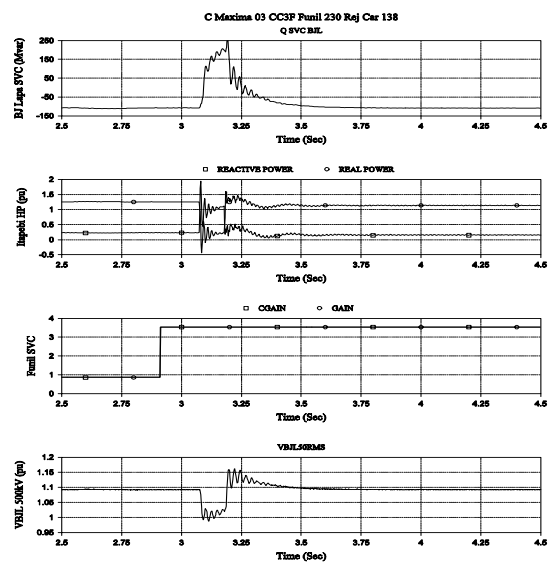


Figura.4-(b). Curto-circuito no 230kV da SE Funil – PSCAD/EMTDC™

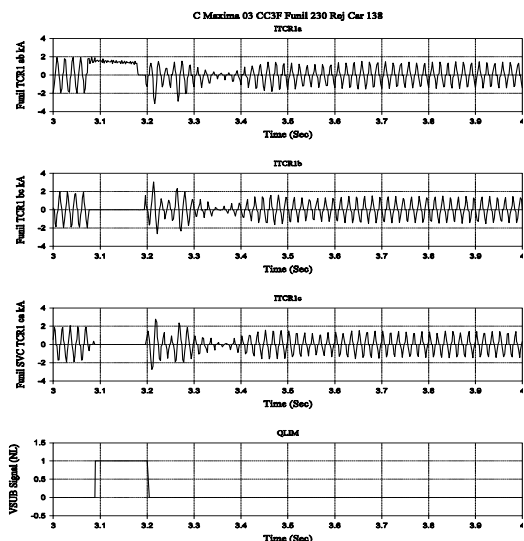


Figura.4-(c). Curto-circuito no 230kV da SE Funil – PSCAD/EMTDC™

em carga máxima (4,44) produz comportamento oscilatório quase sem amortecimento dos instantes subseqüentes à eliminação do defeito até o final de simulação (durante cerca de 500mseg). Com a redução do ganho do SVC BJT para 2,22, são totalmente eliminadas as oscilações anteriormente registradas. A atuação do HD, presente no SVC real e não representada no modelo utilizado para o SVC BJT, reduz o ganho deste equipamento após a eliminação do defeito, contribuindo para que o mesmo apresente um desempenho estável. Não se verifica a presença de oscilações não amortecidas associadas a interações entre os

controles dos SVC, confirmando que aquelas registradas na simulação com ganho 4,44 para o SVC BJL são associadas à não representação do

AGC do referido SVC e ao emprego de um ganho fixo, adequado para regime permanente, mas não para grandes perturbações.

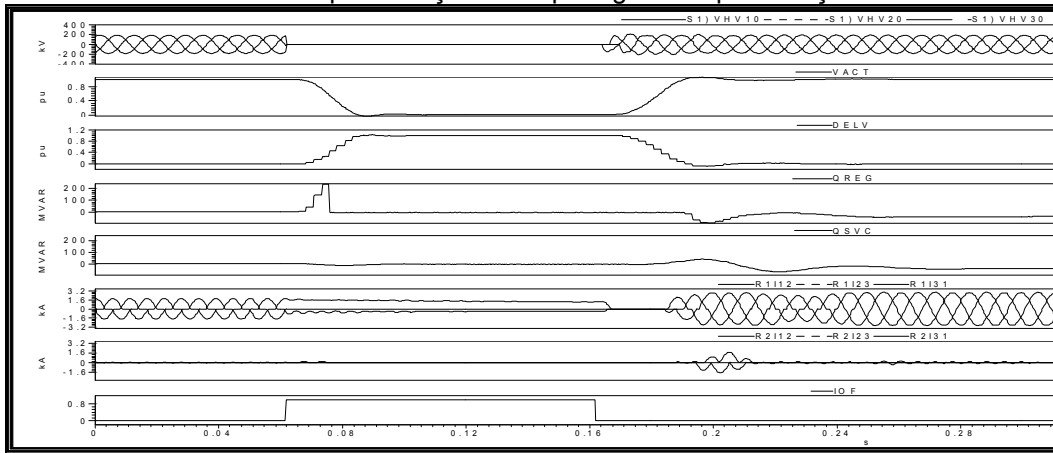


Figura.5. Falta trifásica à terra no 230kV de Funil, Dezembro/2001, carga máxima, teste em RTDS

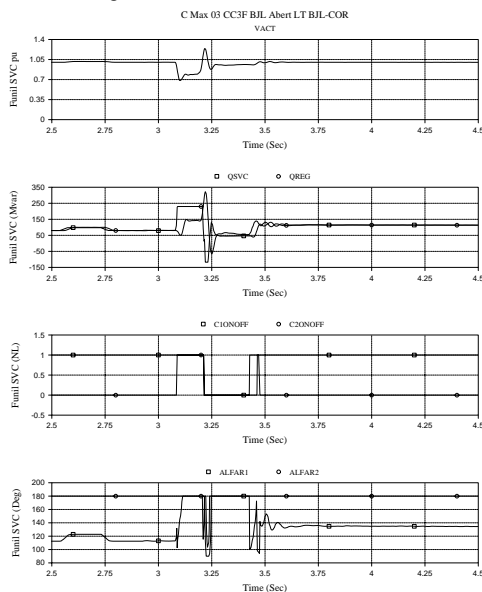


Figura.6-(a). Falta trifásica à terra LT BJL-COR 500kV-EMTDC ($K_p=2,22$ SVC BJL)

6.0 CONCLUSÕES

O uso de modelos típicos para equipamentos FACTS pode levar a resultados incoerentes com o desempenho dos equipamentos reais, reforçando a importância do uso de modelagem detalhada para os mesmos. Esquemas de controle adaptativo para SVC em especial, os do tipo "Gain Schedule" aqui abordados, apresentam-se como uma eficiente estratégia para o atendimento aos requisitos de especificação. Destaca-se a equivalência entre os resultados dos estudos com o emprego de RTDS e PSCAD / EMTDC™.

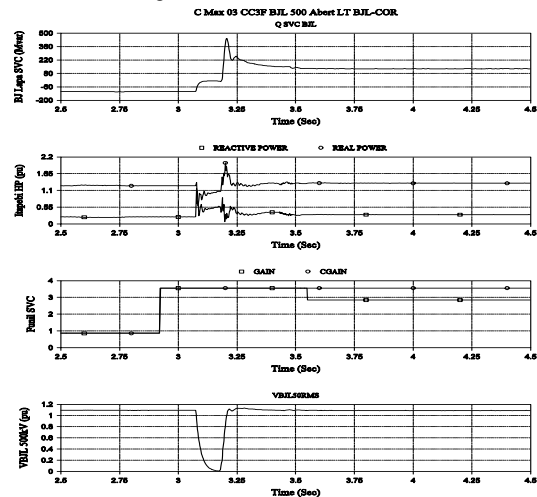


Figura.6-(b). Falta trifásica à terra BJL-COR 500kV-EMTDC ($K_p=2,22$ SVC BJL)

7.0 REFERÊNCIAS

- [1] Claus, M., Retzmann, D., Schmidt, M., Wild, G., Li, H., Shen, F., Shen, D., Zhang, D., Forsyth, P., Maguire, T., 1999, "Development of Real-Time Simulation Technology: Summary of Experiences and Results", Proceedings of International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS) 99, Västerås, Sweden.
- [2] Correia Lima, M., Kirschner, L., Araújo, C., "A Comparison Between Studies Performed with EMTDC and RTDS for High Voltage Static Var Compensator", IX SEPOPE, Maio, 2004, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] Åström, K. and Wittenmark, B., "Adaptive Control", Second Edition, pp.1-2, Addison-Wesley Publishing Company, 1995, USA.