



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

BR/GAT/30
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

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

INTERLIGAÇÃO TUCURUÍ – MACAPÁ - MANAUS: ESTUDOS EM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL (RTDS) PARA AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES SUBSÍNCRONAS ENTRE COMPENSADORES ESTÁTICOS E BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE

Manfredo Correia Lima(*)
Chesf

Per - Emil Eliasson
ABB

RESUMO

Este informe técnico apresenta os resultados dos estudos em simulador digital em tempo real (RTDS) realizados para avaliar as interações entre o compensador estático de Silves (-200 a 300 Mvar, 500kV) e os bancos de capacitores série instalados nas linhas de transmissão em 500kV Oriximiná - Silves – Lechuga. Tais interações indicam a presença de oscilações subsíncronas não amortecidas na eliminação de faltas em linhas de 500kV em configurações do sistema associadas à eliminação de faltas em linhas de 500kV. Estes elementos integram o Lote C da Interligação Tucuruí – Macapá - Manaus, cuja concessão foi obtida pelo Consórcio Manaus Transmissora de Energia (MTE) através do Leilão ANEEL 004/2008.

PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático, Capacitor Série, Oscilações Subsíncronas, Simulador Digital em Tempo Real

1.0 - INTRODUÇÃO

Para a realização do leilão ANEEL 004/2008, o sistema de transmissão associado à Interligação Tucuruí – Macapá - Manaus foi dividido em três lotes (FIGURA 1). O lote C objeto deste Informe Técnico (IT) é composto pelas linhas em 500kV Oriximiná – Silves - Lechuga, além das subestações 500/138kV Silves e 500/230kV Lechuga. O leilão deste lote teve como vencedor o Consórcio Manaus Transmissora de Energia (MTE), formado por Abengoa, Chesf e Eletronorte. Foi também definida a instalação no referido lote de bancos de capacitores série com grau de compensação de 70% em todos os trechos das linhas de 500kV e de um compensador estático (CE) com nominais (-200 a +300Mvar, 500kV) na subestação de Silves.

Durante os testes de aceitação em fábrica realizados para verificação do desempenho do CE Silves, foi observado que interações entre os bancos de capacitores série instalados no Lote C e o referido compensador produziam oscilações de frequência subsíncrona fracamente amortecidas no sistema elétrico de potência, na eliminação de faltas em linhas de 500kV (2).

Para evitar atrasos no cronograma da obra associada ao CE Silves, foi decidido por ocasião da conclusão dos testes de aceitação em fábrica do referido equipamento, enviar os seus painéis de controle para instalação no campo. Teve início então uma nova etapa dos trabalhos, onde uma análise detalhada do problema foi realizada através de estudos em PSCAD, na busca de uma solução que propiciasse de forma satisfatória o desejado amortecimento das referidas oscilações. Várias alternativas foram analisadas, sendo aquelas consideradas mais adequadas testadas em uma réplica dos painéis reais do CE Silves conectada ao RTDS.

Os resultados de tais estudos em RTDS são apresentados neste IT. São analisadas várias alternativas para amortecimento das referidas oscilações, sendo demonstradas a eficácia e a robustez da solução selecionada para o adequado amortecimento das oscilações subsíncronas inicialmente encontradas.

(*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 Bongi – CEP 50.761-901 Recife, PE – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-2539 – Fax: (+55 81) 3229-2488 – Email: manfredo@chesf.gov.br

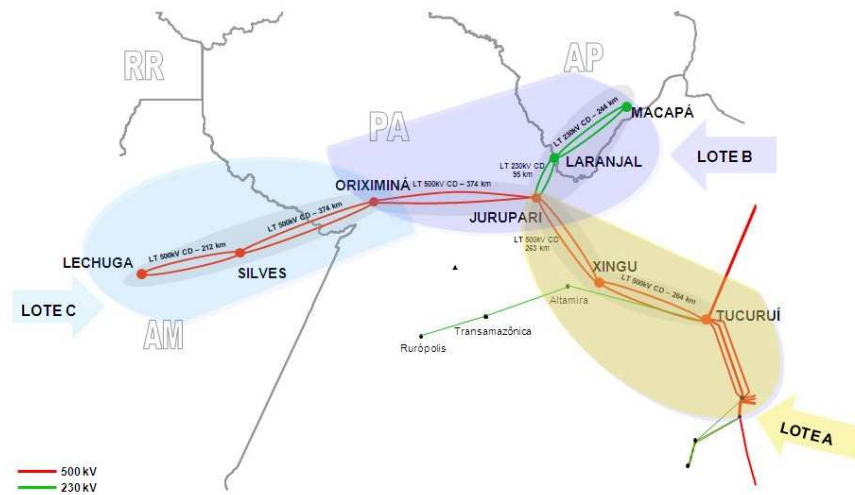


FIGURA 1 – Composição dos Lotes da Interligação Tucuruí – Macapá - Manaus

2.0 - COMPENSADOR ESTÁTICO DE SILVES

O compensador estático de Silves é composto pelos seguintes elementos (FIGURA 2):

- Banco de transformadores 500 / 20kV, 300MVA, unidades monofásicas, Y aterrado – Δ , uma unidade reserva.
- Dois reatores controlados a tiristores (TCR) de 148Mvar cada.
- Dois capacitores manobrados a tiristores (TSC) de 139Mvar cada.
- Dois filtros de harmônicos de 37Mvar sintonizados na quinta harmônica.

Como descrito em (1), a malha principal do CE Silves baseia-se em um controle integral e tem por objetivo controlar a tensão terminal de 500kV com base na medição da sua componente de sequência positiva, variando a susceptância de saída do referido equipamento. O ganho desta malha depende do coeficiente de sensibilidade entre tensão e potencia reativa, medido no ponto de acoplamento com a rede CA, sendo necessário modificar o seu valor para manter os parâmetros de desempenho do CE Silves conforme especificado quando ocorrem mudanças de configuração da rede elétrica.

Para assegurar desempenho estável, mesmo em condições de operação originalmente não previstas, um esquema de Supervisão de Ganho é implementado. Este esquema detecta oscilações na susceptância de saída do compensador e reduz o seu ganho até que tais oscilações sejam adequadamente amortecidas. Após a operação do esquema de Supervisão de Ganho, este parâmetro pode ser definido manualmente pelo operador ou através do Otimizador de Ganho, cuja função é determinar um valor de ganho que proporcione desempenho estável com atendimento aos parâmetros de desempenho especificados (1). O Otimizador de Ganho atua aplicando pequenos graus na tensão de referência do compensador e com base na sua resposta eleva ou reduz o valor do ganho (1).

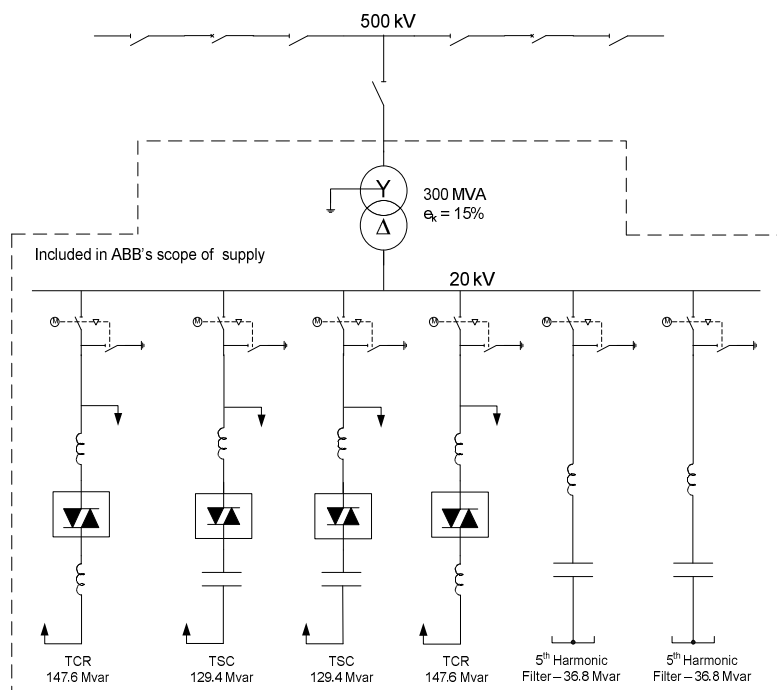


FIGURA 2 – Compensador Estático de Silves

2.1. Influência do CE Oriximiná

Conforme mostrado na FIGURA 3, o CE Oriximiná (-200 a +300Mvar, 500kV), integrante do Lote B, foi representado nos estudos em RTDS apresentados neste IT através de um modelo típico disponível no RTDS. No sistema real, um terceiro compensador similar ao CE Oriximiná encontra-se instalado na SE Jurupari, integrante do Lote B. Entretanto, devido a limitações na capacidade do RTDS, apenas os CE Silves e Oriximiná foram representados neste estudo. O CE Oriximiná representa uma susceptância controlada de forma independente conectada eletricamente próxima do CE Silves, o que dificulta a determinação do coeficiente de sensibilidade tensão x potência reativa em Silves 500kV. Com o CE Oriximiná em operação manual, o Otimizador de Ganho do CE Silves comporta-se de forma satisfatória, mas quando este opera em automático, o desempenho do CE Silves é afetado. Este efeito é claramente identificado nos testes de resposta ao degrau do CE Silves após a ativação do seu Otimizador de Ganho e torna-se mais crítico na configuração de sistema fraco (2). Esta interação é esperada, devido à proximidade elétrica entre os CEs Oriximiná e Silves.

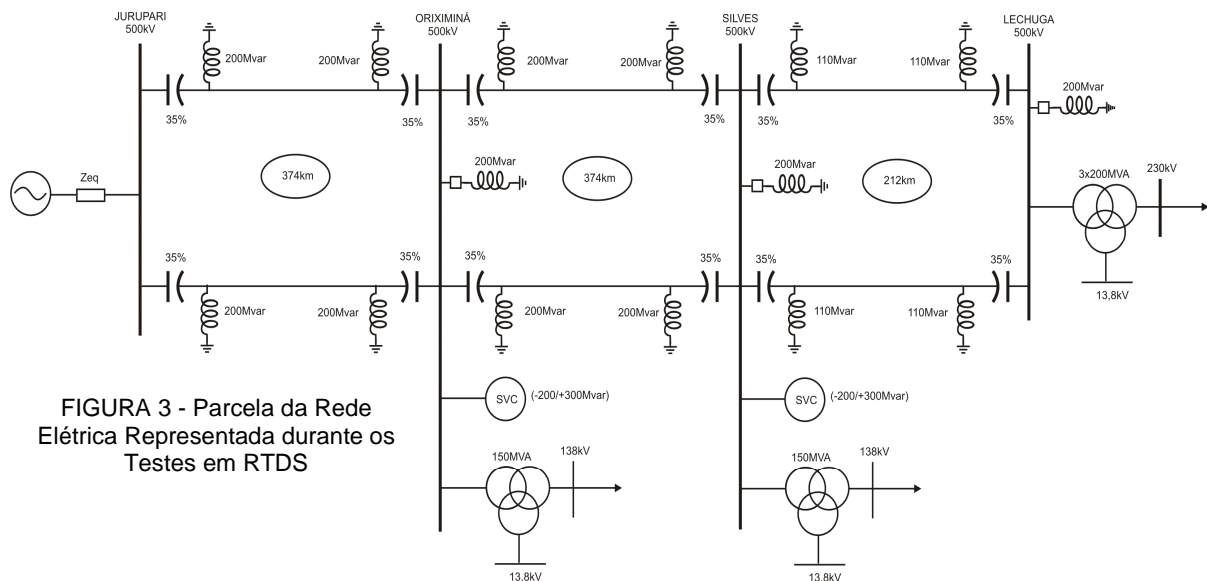


FIGURA 3 - Parcela da Rede Elétrica Representada durante os Testes em RTDS

2.2 Esquema que Considera a Influência de Outros Compensadores sobre o CE Silves

Um esquema adicional de controle para considerar a influência de outros compensadores operando nas proximidades do CE Silves foi proposto durante os testes de aceitação em fábrica deste equipamento (2). Os resultados obtidos mostram que o ganho calculado pelo Otimizador de Ganho deve ser ligeiramente reduzido se outro CE encontra-se operando em automático nas suas proximidades, sendo este efeito particularmente relevante para condições de sistema fraco e sua ativação efetuada através da ação do operador via Interface Humano Máquina (IHM).

3.0 - ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA AMORTECIMENTO DAS OSCILAÇÕES

3.1 Introdução

Durante os estudos em RTDS realizados na etapa inicial dos testes de aceitação em fábrica do CE Silves (2), foram observadas oscilações fracamente amortecidas envolvendo este equipamento e os bancos de capacitores série do Lote C. Nesta ocasião, alguns casos de aplicação de falta considerando o reator shunt de 500kV da subestação de Silves fora de operação com sistema fraco mostraram a presença de oscilações não amortecidas na tensão de saída do CE Silves. Para não interromper os testes e evitar atrasos no cronograma da obra, optou-se por concluí-los com o reator shunt conectado, o que proporcionava adequado amortecimento e enviar os painéis reais ao campo. A partir daí, teve início uma nova etapa dos trabalhos, iniciada por estudos em PSCAD e complementada por simulações adicionais em RTDS utilizando-se uma réplica dos painéis reais de controle do CE Silves, com o objetivo de analisar alternativas e definir a solução mais adequada para o amortecimento das oscilações acima referenciadas, considerando configurações de sistema fraco (reduzido nível de curto-circuito – 2,6GVA) e forte (elevado nível de curto-circuito – 10,6GVA), com e sem o reator shunt de Silves 500kV e com o CE Oriximiná em manual e automático.

A seguir é efetuada a análise das alternativas selecionadas para o amortecimento das referidas oscilações, destacando-se os resultados mais relevantes obtidos em simulações de RTDS, utilizando a réplica dos painéis de controle do CE Silves.

3.2 Alternativas Analisadas

- a. Elevação do retardo na liberação do CE Silves pelo esquema de bloqueio por subtensão (1) quando da recuperação da tensão de sequência positiva de 500kV dos atuais 20mseg utilizados durante os testes de aceitação em fábrica para 40mseg e 100mseg. Foram realizadas simulações de falta trifásica à terra em Silves 500kV com sistema fraco. Não foram registradas diferenças significativas na resposta do CE Silves, quando comparado ao caso inicial com retardo de 20mseg.
- b. O esquema de bloqueio por subtensão do CE Silves força o referido equipamento a operar no ponto correspondente à susceptância de saída $B_{REF} = 0pu$ (1). A segunda alternativa testada consistiu na modificação deste valor para 0,65pu, que corresponde à susceptância equivalente dos filtros do compensador, conforme a seguir:
 - Retardo para liberação de 20mseg e $B_{REF} = 0pu$.
 - Retardo para liberação de 20mseg e $B_{REF} = 0,65pu$.
 - Retardo para liberação de 40mseg e $B_{REF} = 0,65pu$.

Não há diferenças significativas na resposta do CE Silves, quando comparado ao caso (a) com $B_{REF} = 0pu$.

- c. Conforme descrito em (1), o esquema de bloqueio por subtensão do CE Silves, quando ativado, produz o bloqueio dos dois TSCs, do primeiro TCR e força o segundo a operar no ponto correspondente à susceptância dos filtros, produzindo uma susceptância equivalente de saída de 0Mvar para o compensador. Foi testada a influência do bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do CE Silves pelo esquema de bloqueio por subtensão, conforme a seguir.
 - Retardo para liberação de 20mseg, $B_{REF} = 0pu$, sem bloqueio dos TSCs.
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 0pu$, com bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão.

Esta alternativa apresenta resultados ligeiramente superiores às anteriores no que diz respeito ao amortecimento das oscilações, mas traz como desvantagem a redução na faixa capacitiva do CE Silves durante o intervalo no qual os TSCs permanecem bloqueados.

- d. A quarta alternativa testada variou o valor da susceptância de referência do CE Silves na qual o referido equipamento é forçado a operar durante a atuação do esquema de bloqueio por subtensão, conforme a seguir.
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 0pu$ com bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão.
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 1pu$ indutivo, com bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão.
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 0,65pu$ capacitivo, com bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão.

Não há diferenças significativas na resposta do CE Silves quanto ao amortecimento das oscilações neste caso, quando comparado à alternativa (c).

- e. Esta alternativa contempla o by-pass dos bancos de capacitores série instalados nas linhas de 500kV Oriximiná – Silves – Lechuga, a partir da atuação do esquema de bloqueio por subtensão do CE Silves, conforme a seguir.
 - Retardo para liberação de 20mseg, $B_{REF} = 0pu$, sem bloqueio dos TSCs, sem by-pass dos bancos série (S1).
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 0,65pu$ capacitivo, bloqueio dos TSCs por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão e by-pass dos bancos série sem reinserção (S2).
 - Retardo para liberação de 40mseg, $B_{REF} = 0,65pu$ capacitivo, bloqueio dos TSCs e by-pass dos bancos série por 200mseg após a liberação do compensador pelo esquema de bloqueio por subtensão (S3).

Em todas as alternativas, considerou-se o reator shunt de Silves 500kV desconectado e o SVC Oriximiná em operação automática. Os resultados obtidos indicam que o by-pass dos bancos de capacitores série do Lote C produz efeitos significativos no amortecimento das oscilações subsíncronas aqui estudadas (Curvas S2 e S3 da FIGURA 4). O bloqueio dos TSCs não será utilizado por implicar em redução, ainda que temporária, da faixa capacitiva do CE Silves. Na próxima seção, simulações adicionais em RTDS são apresentadas, com o objetivo de confirmar que o by-pass dos bancos série apresenta-se como a alternativa de melhor desempenho para o amortecimento das oscilações subsíncronas.

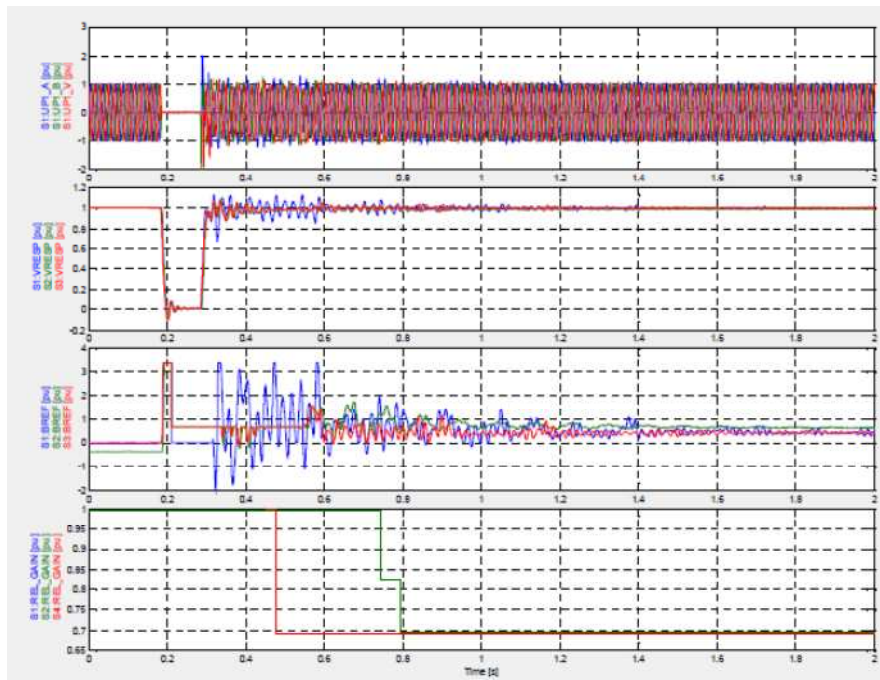


FIGURA 4 – Falta 3 ϕ em Silves 500kV, Sistema Fraco. (a) Tensões em Silves 500kV. (b) Sinal de Saída do Controle. (c) Susceptância de Referência. (d) Ganho do CE Silves

4.0 - ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES COM BY-PASS DOS BANCOS DE CAPACITORES SÉRIE

Nesta seção, a alternativa apresentada no item e da seção 3.2 é avaliada de forma mais detalhada através da realização de simulações em RTDS considerando o reator shunt de Silves 500kV desconectado e o CE Oriximiná em operação automática. São realizadas simulações de aplicação de faltas 1 ϕ e 3 ϕ -T no 500kV de Silves, em condições de sistema fraco (reduzido nível de curto-circuito – 2,6GVA) e forte (elevado nível de curto-circuito – 10,6GVA). A atuação do esquema de bloqueio por subtensão foi considerada conforme a seguir. Haverá o bloqueio do CE Silves no ponto de operação correspondente a $B_{REF} = 0$ pu quando a componente de sequência positiva da tensão do 500kV de Silves cair abaixo de 0,7pu por mais de 20mseg. Simultaneamente, o comando de by-pass será enviado aos bancos de capacitores série das linhas Oriximiná – Silves – Lechuga. A liberação do CE Silves ocorrerá quando a tensão do 500kV desta subestação recuperar-se além de 0,75pu por mais de 20mseg. Os bancos de capacitores série permanecerão by-passados por 200 mseg a contar do instante de liberação do compensador.

4.1 Simulações com Sistema Fraco

4.1.1 Aplicação de Falta Monofásica no 500kV de Silves

Os resultados da simulação são apresentados na FIGURA 5, onde S1 corresponde ao caso com os bancos de capacitores série inseridos e S2 ao caso onde tais equipamentos encontram-se by-passados. Com base em tais resultados, verifica-se que durante o intervalo de tempo no qual os bancos de capacitores série encontram-se by-passados (entre $t = 0,35$ seg e $t = 0,62$ seg) não existem oscilações no sinal B_{REF} do CE Silves. Quando tais elementos são reinseridos, as oscilações surgem novamente, mas são amortecidas em um intervalo de tempo significativamente menor do que ocorre no caso onde não há by-pass dos bancos série. Assim, dois benefícios são introduzidos: não há oscilações logo após a eliminação da falta e aquelas existentes após a reinserção dos bancos de capacitores série são amortecidas de forma mais rápida.

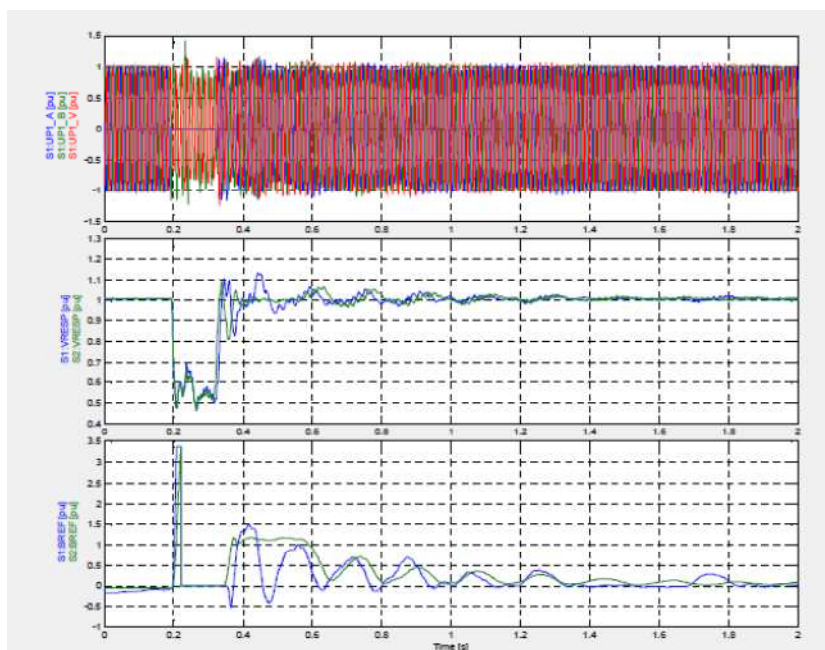


FIGURA 5 – Falta 1 ϕ em Silves 500kV, Sistema Fraco. (a) Tensões em Silves 500kV. (b) Sinal de Saída do Controle. (c) Susceptância de Referência.

4.1.2 Aplicação de Falta Trifásica à Terra no 500kV de Silves

Os resultados da simulação são apresentados na FIGURA 6, onde S1 corresponde ao caso com os bancos de capacitores série inseridos e S2 ao caso onde tais equipamentos encontram-se by-passados. Nesta simulação, observa-se a presença de oscilações após a liberação do CE Silves pelo esquema de bloqueio por subtensão e após a reinserção dos bancos série, mas estas apresentam magnitude inferior e amortecimento mais rápido, quando comparado ao caso onde não ocorre o by-pass de tais elementos.

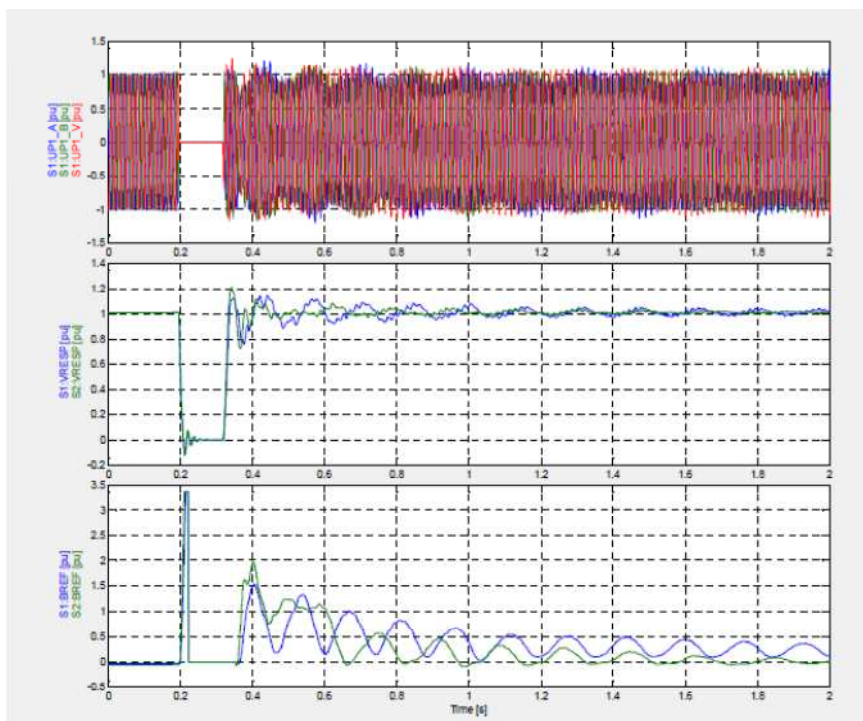


FIGURA 6 – Falta 3 ϕ -T em Silves 500kV, Sistema Fraco. (a) Tensões em Silves 500kV. (b) Sinal de Saída do Controle. (c) Susceptância de Referência.

4.3 Simulações com Sistema Forte

4.3.1 Aplicação de Falta Monofásica no 500kV de Silves

A FIGURA 7 apresenta os resultados da simulação. Neste caso, o afundamento de tensão durante a falta é inferior a 0,7pu, o esquema de bloqueio por subtensão não é ativado e desta forma, não ocorre o by-pass dos bancos série. Embora esteja prevista a implantação de um esquema de bloqueio por subtensão que atue com base na detecção do valor mínimo instantâneo das tensões fase-neutro, fica evidenciada uma desvantagem do esquema proposto, que não atua em situações onde o esquema de bloqueio por subtensão não é ativado.

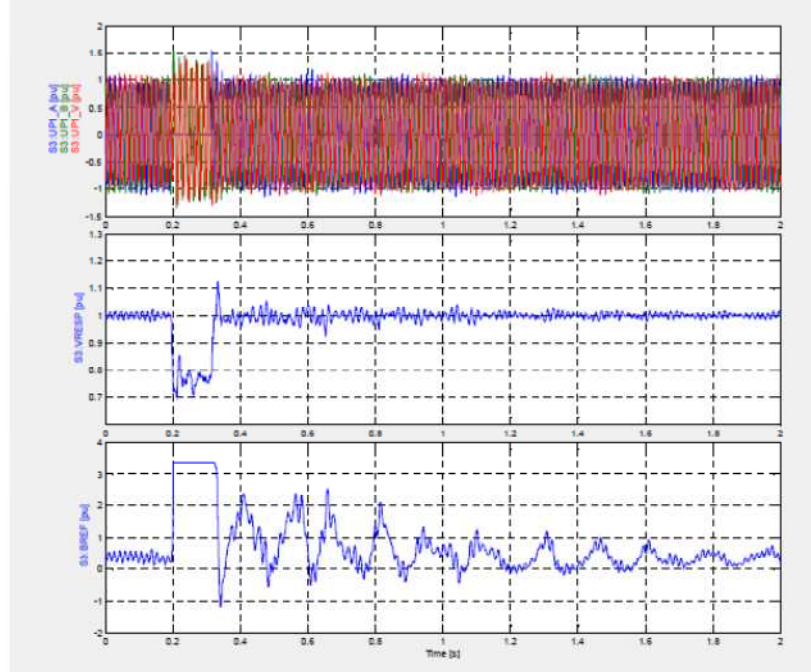


FIGURA 7 – Falta 1 ϕ em Silves 500kV, Sistema Forte. (a) Tensões em Silves 500kV. (b) Sinal de Saída do Controle. (c) Susceptância de Referência.

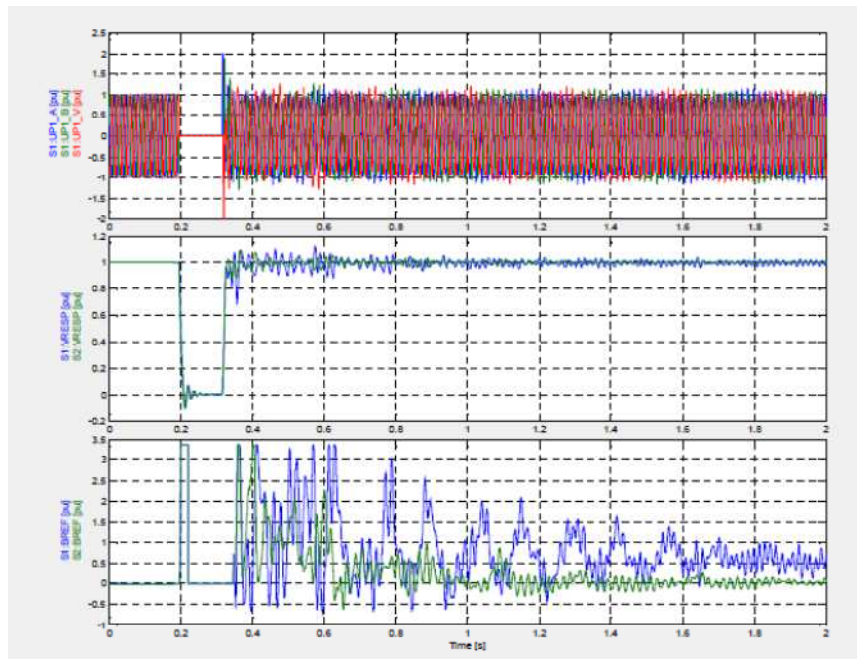


FIGURA 8 – Falta 3 ϕ -T em Silves 500kV, Sistema Forte. (a) Tensões em Silves 500kV. (b) Sinal de Saída do Controle. (c) Susceptância de Referência.

Na FIGURA 7, a análise do sinal B_{REF} mostra de forma clara a presença de oscilações não amortecidas após a eliminação da falta. Uma alternativa para efetuar o bloqueio dos bancos de capacitores série no caso sob análise seria a utilização do sinal proveniente da proteção de linha, que independe da magnitude do afundamento da tensão associado à falta e por consequência, é capaz de atuar durante faltas locais e remotas, configurando-se como a alternativa mais adequada para implementar o by-pass dos bancos série aqui discutido, independente da atuação do esquema de bloqueio por subtensão.

4.3.2 Aplicação de Falta Trifásica à Terra no 500kV de Silves

A FIGURA 8 apresenta os resultados da simulação, onde verifica-se a presença de oscilações nos sinais de saída do CE Silves por ocasião da eliminação da falta, ainda com os bancos série by-passados (S2). Entretanto, a magnitude destas oscilações é inferior à do caso sem by-pass (S1). Após a reinserção dos bancos série, observa-se que o amortecimento das referidas oscilações se dá de forma mais rápida do que no caso sem by-pass, comprovando que o by-pass dos bancos série contribui de forma efetiva para o amortecimento das oscilações.

5.0 - CONCLUSÕES

Foi constatada durante os estudos em RTDS realizados por ocasião dos testes de aceitação em fábrica do CE Silves a ocorrência de interações negativas entre os bancos de capacitores série instalados nas linhas que integram o Lote C e o CE Silves. Estas interações tornam-se mais intensas na eliminação de faltas em linhas de 500kV e manifestam-se sob a forma de oscilações de tensão.

Várias alternativas foram testadas visando o amortecimento das referidas oscilações. A estratégia que efetua o by-pass dos bancos de capacitores série na ocorrência de faltas e efetua a sua reinserção em 200mseg após a sua eliminação mostrou-se como a de melhor desempenho.

É recomendada a utilização dos sinais provenientes da proteção das linhas de transmissão para o comando do by-pass e reinserção dos referidos bancos série, devido ao seu grau de confiabilidade na atuação durante faltas, sejam elas locais ou remotas, equilibradas ou desequilibradas.

Embora a solução proposta neste IT para o amortecimento das oscilações seja, no entender dos autores, robusta, efetiva e de fácil implementação, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que age sob delegação da ANEEL na análise do projeto e na liberação da licença de operação, não aceitou a sua implantação, sob a alegação de que a mesma utiliza a manobra de elementos externos ao compensador para efetuar o amortecimento das oscilações provenientes de interações entre este equipamento e os bancos de capacitores série.

Por este motivo, a liberação para operação do Lote C foi concedida excluindo-se o CE Silves, até que uma solução para amortecimento das referidas oscilações que não envolva a manobra de elementos externos ao compensador seja desenvolvida. Estudos para o desenvolvimento desta solução encontram-se em andamento.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) LIMA, M. C., CALAZANS, A., DE OLIVEIRA, M., ABERG, M., JONFORSEN, R. E. Análise do Desempenho de Equipamentos FACTS Através de Testes em Simulador em Tempo Real (RTDS): O Exemplo do Compensador Estático de Silves, XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Grupo 004, Florianópolis-SC, Outubro de 2011.

(2) LIMA, M, ALVES, F., DE OLIVEIRA, M., ELIASSON, P. E., ABERG, M., BAUER, J. Static Var Compensators Performance Evaluation Studies for Systems with Strong Presence of Fixed Series Capacitors: The Example of Tucuruí – Manaus 500kV Interconnection, XII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE), Rio de Janeiro-RJ, Maio de 2012.

7.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Manfredo Correia Lima nasceu em Recife, Brasil, em 1957. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1979, recebeu o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1997 e o de Doutor em Engenharia Mecânica, com ênfase em automação de sistemas pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2005. Dr. Correia Lima ingressou na Chesf em 1978, onde desenvolve atividades nas áreas de eletrônica de potência, equipamentos FACTS, qualidade de energia, sistemas de controle, transitórios eletromagnéticos e transmissão em CCAT. Em 1992, ingressou na Universidade de Pernambuco (UPE), onde é responsável pelas disciplinas Eletrônica de Potência e Controle de Processos e desenvolve atividades de pesquisa. É representante da Chesf no CE - B4 (Eletrônica de Potência e Elos CCAT) da Cigré Brasil.



Per-Emil Eliasson, nasceu em Västerås, Suécia, em 1979. Recebeu o grau de Mestre em Física Aplicada e Engenharia Elétrica pela Universidade de Linköping, Suécia em 2004. Ingressou na ABB também em 2004, onde trabalhou no desenvolvimento de sistemas de controle para automação industrial e mais tarde com projetos e estudos de sistemas de compensação de potência reativa. Desde 2011 é o gerente do Grupo de Projetos de FACTS da ABB.

