



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

FI/GAT/27
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – IV

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

**IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO HVDC DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ITAIPU NO SOFTWARE
RSCAD PARA SIMULAÇÕES NO RTDS**

Suzana Mensch de Carvalho (*)
ITAI

Robson Almir de Oliveira
ITAIPU

Paulo Márcio Silveira
UNIFEI

RESUMO

Este trabalho apresenta um novo modelo de representação do sistema de transmissão HVDC de ITAIPU no *software* RSCAD, para ser utilizado em simulações no RTDS (*Real Time Digital Simulator*). As características do novo modelo estão descritas bem como os procedimentos e resultados da validação. É feita também uma comparação das respostas do sistema de transmissão de ITAIPU com este novo modelo de HVDC e com aqueles que consideram as formas anteriores de representação, ou seja, através de uma carga dinâmica ou por meio da associação RL.

PALAVRAS-CHAVE

HVDC (*High Voltage Direct Current*), RTDS, Modelo, Sistema de Transmissão Itaipu

1.0 - INTRODUÇÃO

O ensaio de modelo utilizando o simulador RTDS (*Real Time Digital Simulator*) tem por objetivo a criação de um cenário de testes que se aproxime o mais fielmente possível das condições às quais os IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) de proteção estarão submetidos em campo, em termos de fenômenos eletromagnéticos. Este tipo de ensaio permite uma ampla varredura de casos em pouco tempo de simulação, com os sistemas de potência e proteção operando em malha fechada e em tempo real. Porém, a fidelidade às condições reais de campo está estreitamente atrelada às considerações e aproximações que são assumidas durante a etapa de modelagem do sistema de potência ao qual o sistema de proteção a ser testado está inserido. Para simulações utilizando o RTDS, esta implementação do modelo é feita através do *software* RSCAD (*Real Time Simulation Computer Aided Design Software*).

Em virtude de sua importância no contexto do SIN (Sistema Interligado Nacional) e por ter um simulador RTDS disponível, a ITAIPU BINACIONAL tem usado com frequência este tipo de simulação para realizar diversos ensaios de modelos, com o objetivo de definir, validar, corrigir ou aprimorar ajustes ou mesmo lógicas de proteção. Desta maneira, busca-se obter a máxima confiabilidade e previsibilidade possível de seus sistemas de proteção.

Até o momento os estudos para os sistemas de proteção de linhas de transmissão, transformadores e barramentos do setor de 50 Hz foram executados considerando-se o sistema de transmissão HVDC representado de forma simplificada através da associação de componentes RL ou utilizando-se uma carga dinâmica, que mantém a potência ativa e reativa em valores pré-definidos.

Mesmo verificando-se que o modelo com o HVDC representado pela carga dinâmica apresentava uma resposta adequada, sempre houve um frequente questionamento sobre o quão confiável era esta representação e se não haveria situações em que uma pequena variação da resposta esperada pudesse afetar o comportamento do IED.

Ou seja, almejava-se confirmações de que o modelo utilizado nos testes em laboratório estava representando satisfatoriamente os distúrbios que podem ocorrer no sistema real. Por este motivo foi feito um esforço para a implementação de um novo modelo no RSCAD, com a representação monopolar do sistema HVDC de ITAIPU.

Este informe técnico apresenta as características deste novo modelo e a metodologia de validação do seu desempenho. Também é apresentada uma comparação dos modelos com o HVDC representado por uma carga dinâmica e por componentes RL.

2.0 - DESCRIÇÃO DO MODELO

A implementação do HVDC no RSCAD foi desenvolvida utilizando-se como referência o HVDC modelado no software ATPDraw, já consolidado através da validação de suas respostas com as informações disponíveis no artigo "ITAIPU HVDC Transmission System - PSCAD/EMTDC Model" (2), apresentado no SEPOPE 2012 e por meio de comparações com um registro real de falta. Também foi utilizado como ponto de partida o modelo do tutorial do RSCAD, disponível no capítulo 10B (3).

2.1 Sistema de Potência

O modelo compreende a representação monopolar do sistema HVDC de ITAIPU - 50 Hz, considerando-se o equivalente paralelo das linhas DC, dos reatores de alisamento e dos transformadores conversores. As curvas de saturação destes transformadores não foram consideradas. O sistema de potência apresenta as características listadas a seguir, sendo seu modelo representado através da Figura 1.

- A ITAIPU está representada por 10 unidades geradoras.
- As 4 linhas de transmissão que interligam a ITAIPU à Subestação Margem Direita (SMD) e as 4 que interligam a SMD à Subestação Foz do Iguaçu (SFI) foram implementadas considerando-se o acoplamento mútuo entre elas.
- O sistema paraguaio conectado à SMD está representado por um equivalente de curto-circuito, bem como a rede AC conectada ao inversor.
- Os filtros AC e DC do retificador e do inversor estão representados.
- Tanto o retificador quanto o inversor foram representados por uma ponte trifásica de 12 pulsos. O RSCAD disponibiliza um componente denominado *VALVE GROUP* (grupo de válvulas) que consiste num transformador conversor conectado a uma ponte conversora de 6 pulsos. Foram utilizados 2 grupos destes para representar o retificador e 2 para o inversor.

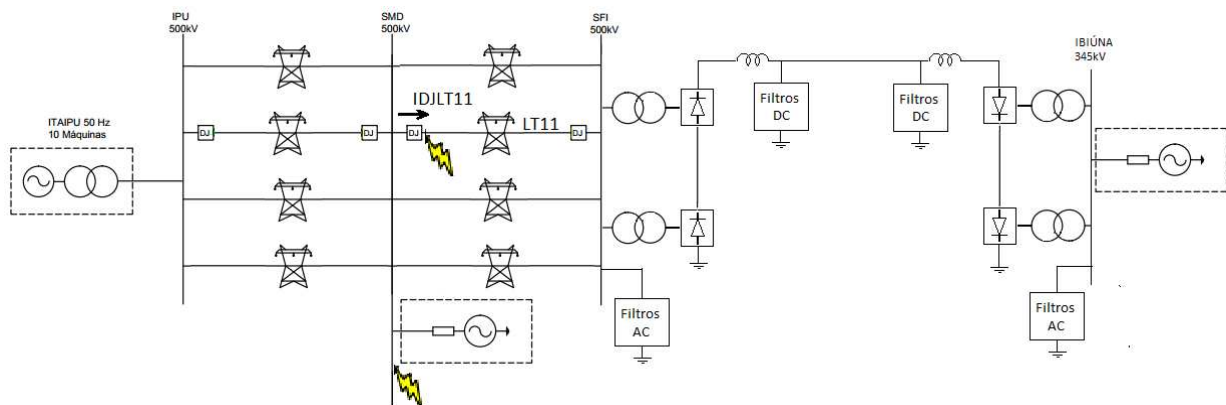


FIGURA 1 – Modelo Simplificado Utilizado nos Testes

2.2 Sistema de Controle

O sistema de controle do HVDC é composto pelas malhas que definem os ângulos de disparo do retificador e do inversor. A Figura 2 apresenta um esquemático simplificado da lógica de controle utilizada para a determinação do ângulo do retificador. O sinal de corrente DC medido é comparado com um valor de referência estabelecido pela variável *lord* (ordem de corrente) que, em regime permanente, é proporcional à quantidade de potência ativa que se deseja transmitir no link DC. Quando ocorre uma variação da tensão contínua do elo o bloco *VDCOL* atua como um limitador que altera a ordem de corrente. Com baixos níveis de tensão a potência consumida pelos

conversores é maior do que quando está operando sob tensões nominais. Como a corrente DC aumenta, a quantidade de potência reativa requerida também sobe. Isto por sua vez pode levar a uma maior redução da tensão. Neste caso, a ordem de corrente produzida pelo VDCOL cai rapidamente para ajudar na recuperação do sistema submetido à falta, dado que ao reduzir o consumo de reativos do conversor, propicia uma retomada mais rápida da tensão da rede de corrente alternada. Quando o sistema começa a se recuperar de uma contingência, a tensão volta a subir e o VDCOL assume uma taxa de crescimento da ordem de corrente menor para evitar a possibilidade de falha de comutação no inversor.

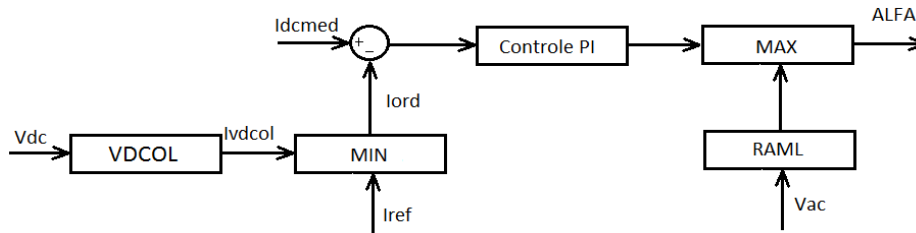


FIGURA 2 – Lógica de Controle do Retificador

A diferença entre a corrente medida e a ordem de corrente entra num controle proporcional-integral, cuja malha fornece como saída o ângulo de disparo necessário para corrigir este erro. Este ângulo é ainda comparado com um sinal proveniente da lógica RAML (*Rectifier Alpha Minimum Limiter*), que é um limitador de alfa mínimo. O RAML força o inversor a atuar no controle de corrente durante faltas no retificador e logo após a sua eliminação. Um vez eliminada, a referência do limite de alfa mínimo retorna gradualmente ao seu valor original, voltando o controle de corrente para o retificador (1).

No caso do inversor, o controle do ângulo de disparo foi implementado utilizando-se apenas um regulador de corrente proporcional-integral que, sob condições normais de operação, mantém o inversor operando com um ângulo de extinção constante. Assim como no retificador, a ordem de corrente também é gerada considerando-se o sinal vindo do VDCOL do inversor, garantindo a operação estável durante distúrbios.

No sistema HVDC real os disparos dos tiristores provêm do bloco GPD (Gerador de Pulsos de Disparo) que opera de acordo com o sistema denominado controle equidistante ou isócrono. Neste procedimento, não se vincula o disparo das válvulas com o cruzamento por zero da tensão de comutação, e sim com o disparo anterior, ou seja, se estima a variação do ângulo de disparo de forma a anular o sinal de erro (1).

No caso do *software* RSCAD, o componente *Firing Pulse Generation* gera um sinal com os pulsos de disparos que é usado como entrada no componente que representa o grupo de 6 válvulas. Um novo pulso é gerado sempre que a entrada “Phi” se iguala igual ou excede o ângulo de disparo calculado pela malha de controle de corrente. Este ângulo “Phi” é determinado pelo componente PLL (*Phase Locked Loop*), que utiliza a tensão AC da barra de comutação para gerar um sinal dente de serra, com uma faixa de 0 à 2π (3).

3.0 - VALIDAÇÃO DO MODELO

As respostas deste novo modelo de representação do HVDC foram validadas avaliando-se o comportamento das tensões AC das barras ITAIPU, SMD e SFI e das correntes AC das linhas de transmissão ITAIPU-SMD e SMD-SFI sob condições de faltas. Estas respostas foram comparadas àquelas obtidas no modelo de referência do ATPDraw. Como forma de exemplificação, são apresentados nas Figuras 3 à 5 os resultados do ATPDraw (vermelho) e do RSCAD (verde) quando ocorre uma falta AN, à 0% da linha de transmissão LT11, que interliga as subestações SMD-SFI (ver Figura 1).

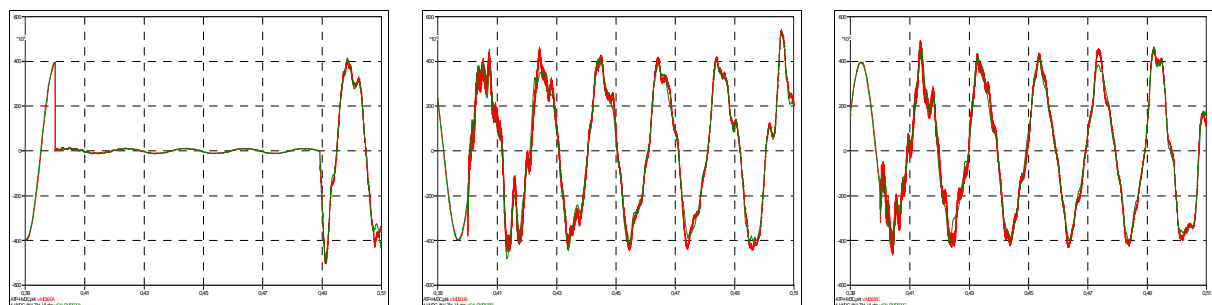


FIGURA 3 – Tensões AN, BN e CN na Barra SMD (Falta AN, 0% de LT11)

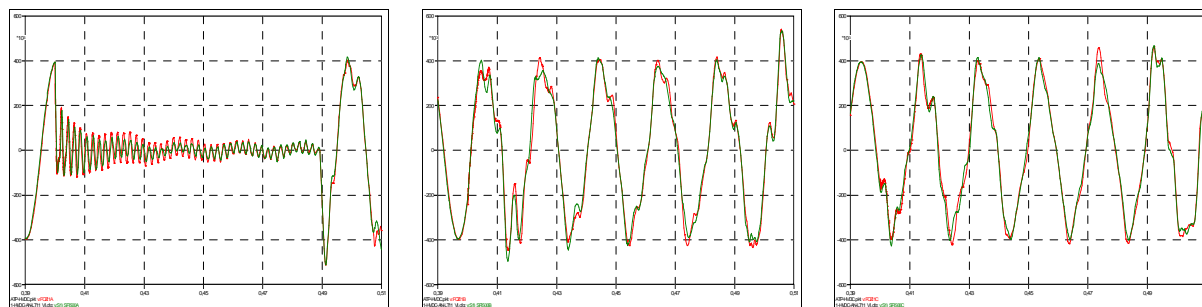


FIGURA 4 – Tensões AN, BN e CN na Barra SFI (Falta AN, 0% de LT11)

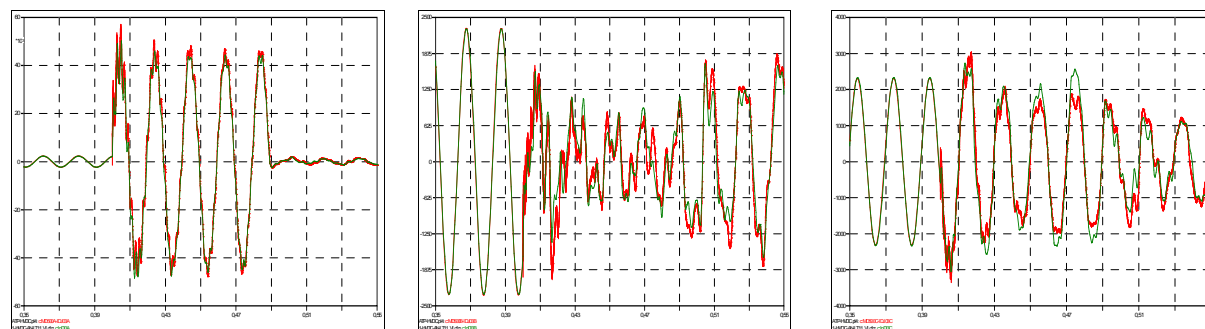


FIGURA 5 – Correntes nas fases A, B e C da linha LT11 (Falta AN, 0% de LT11)

Em todos os testes executados foi observada uma proximidade das respostas do sistema do RSCAD com o modelo de referência do ATPDraw, tanto para a fase defeituosa quanto para as sãs.

Um segundo exemplo está demonstrado pelas Figuras 6 à 8. Trata-se de uma falta AN na barra SMD.

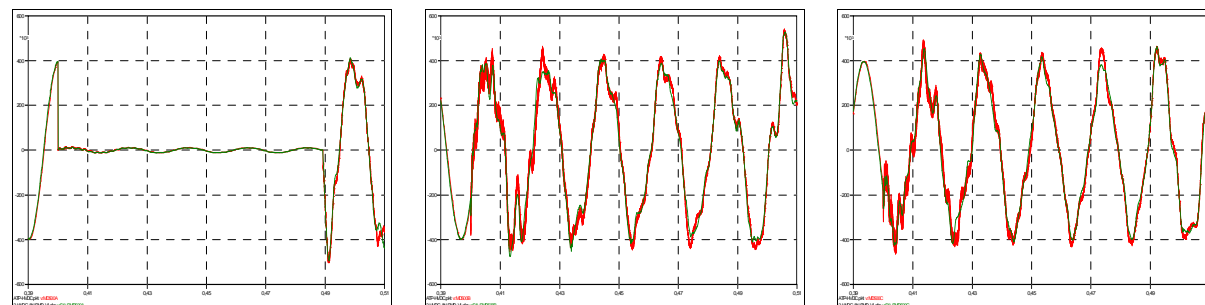


FIGURA 6 – Tensões AN, BN e CN na Barra SMD (Falta AN na SMD)

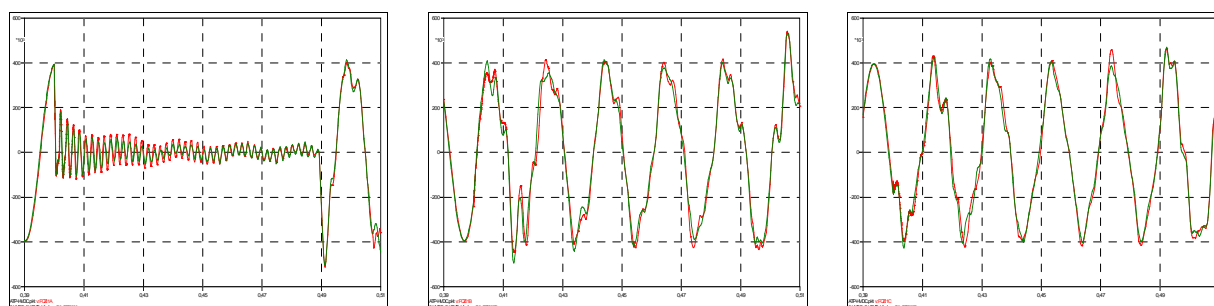


FIGURA 7 – Tensões AN, BN e CN na Barra SFI (Falta AN na SMD)

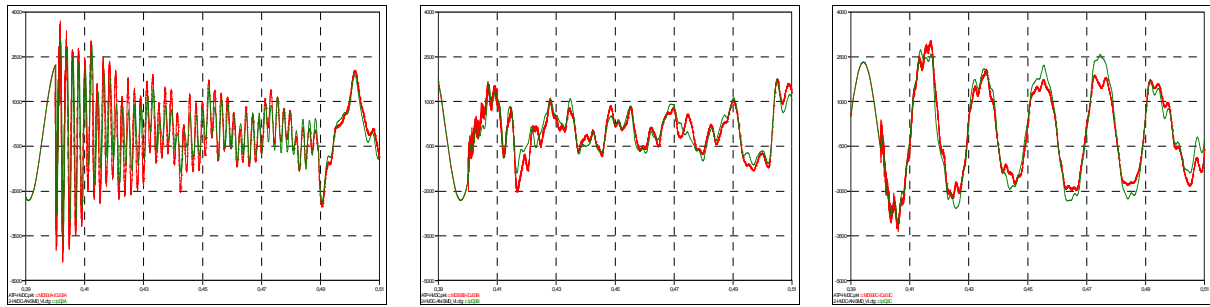


FIGURA 8 – Correntes nas fases A, B e C da linha LT11 (Falta AN na SMD)

Novamente observa-se que os resultados do modelo do HVDC no RSCAD estão próximos daqueles obtidos no modelo de referência do ATPDraw.

4.0 - COMPARAÇÃO COM O MODELO DE CARGA DINÂMICA

Com o objetivo de sanar as dúvidas com relação aos testes que têm sido executados considerando-se o HVDC como uma carga dinâmica, o modelo contendo esta representação também foi analisado comparativamente com as respostas obtidas com o novo modelo de HVDC do RSCAD.

O modelo de carga analisado compreende um transformador de 3 enrolamentos, com o primário conectado ao sistema ITAIPU e o secundário e o terciário conectados a duas cargas que tentam manter os valores de P e de Q previamente ajustados.

As Figuras 9 à 11 apresentam os resultados considerando-se o mesmo tipo de falta na LT11, exemplificada no item anterior, ou seja, falta AN, à 0% da linha. Os resultados do novo modelo de HVDC estão em vermelho e do modelo com carga dinâmica em verde, ambos implementados no RSCAD.

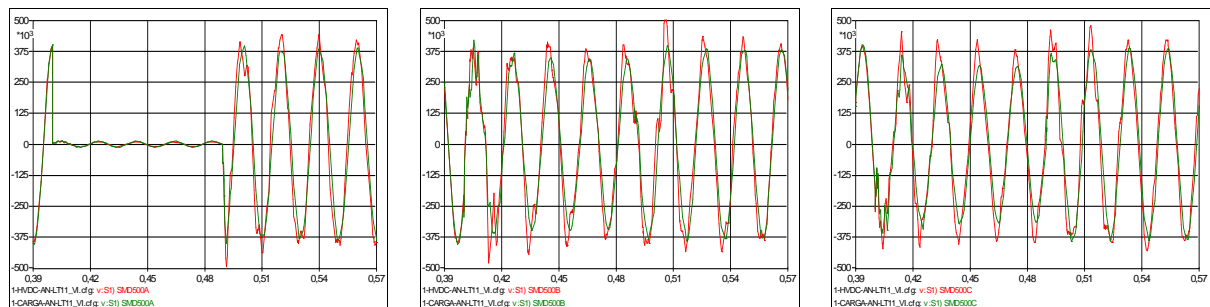


FIGURA 9 – Tensões AN, BN e CN na Barra SMD (Falta AN, 0% de LT11)

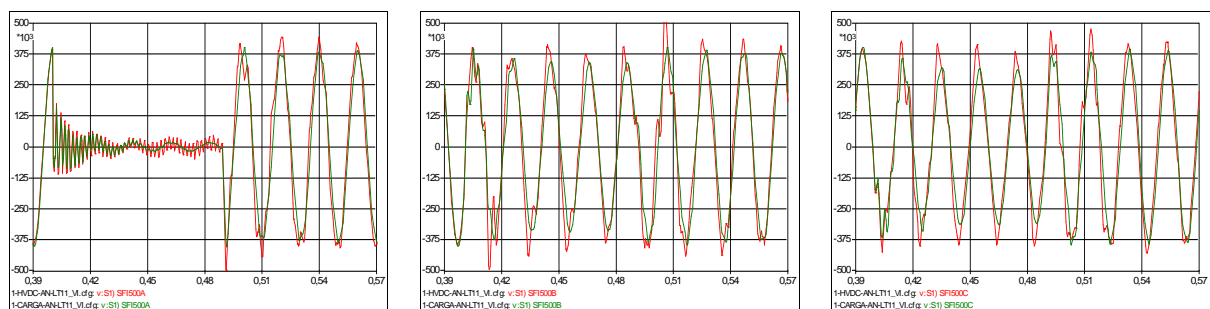


FIGURA 10 – Tensões AN, BN e CN na Barra SFI (Falta AN, 0% de LT11)

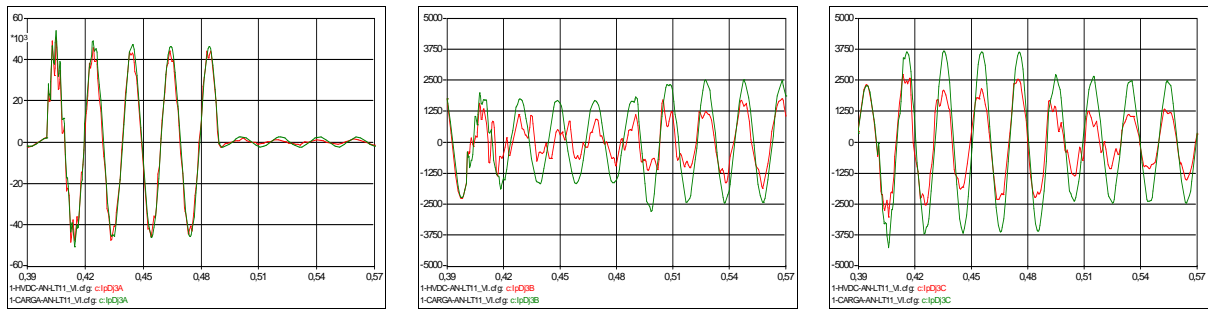


FIGURA 11 – Correntes nas fases A, B e C da linha LT11 (Falta AN, 0% de LT11)

A comparação demonstrou que as respostas do sistema com a carga dinâmica apresentam tensões menores e correntes maiores em relação àquelas observadas com o novo modelo de HVDC, principalmente quando observadas as fases sãs.

5.0 - COMPARAÇÃO COM O MODELO RL

O mesmo tipo de comparação foi feita com relação ao modelo que utiliza apenas a associação de componentes RL para a representação do HVDC. A justificativa para esta análise é que este tipo de representação foi utilizado nos primeiros ensaios de RTDS realizados para a ITAIPU. As Figuras 12 à 14 apresentam os resultados do novo modelo de HVDC em vermelho e do modelo com componentes RL em verde.

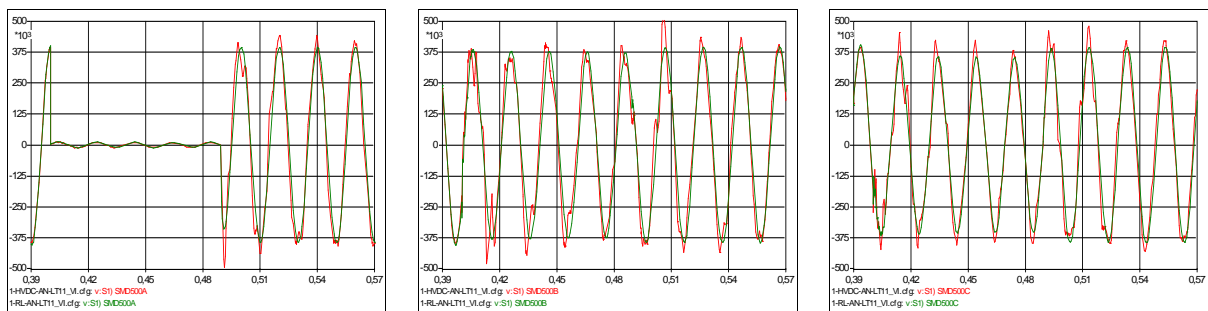


FIGURA 12 – Tensões AN, BN e CN na Barra SMD (Falta AN, 0% de LT11)

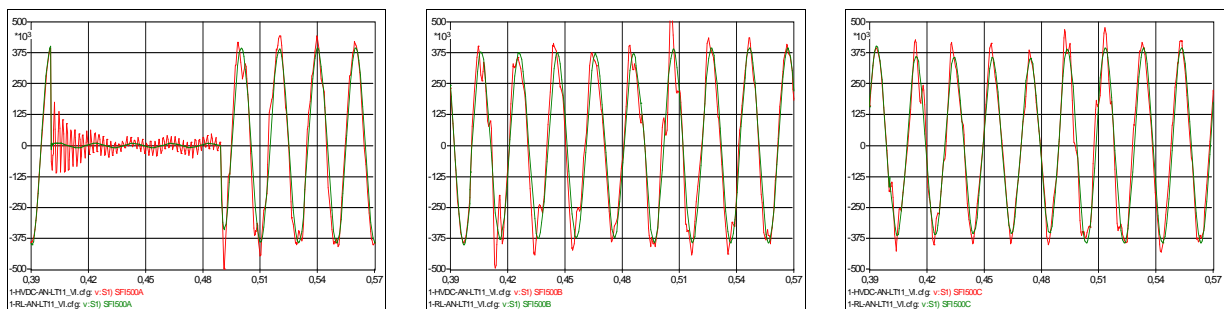


FIGURA 13 – Tensões AN, BN e CN na Barra SFI (Falta AN, 0% de LT11)

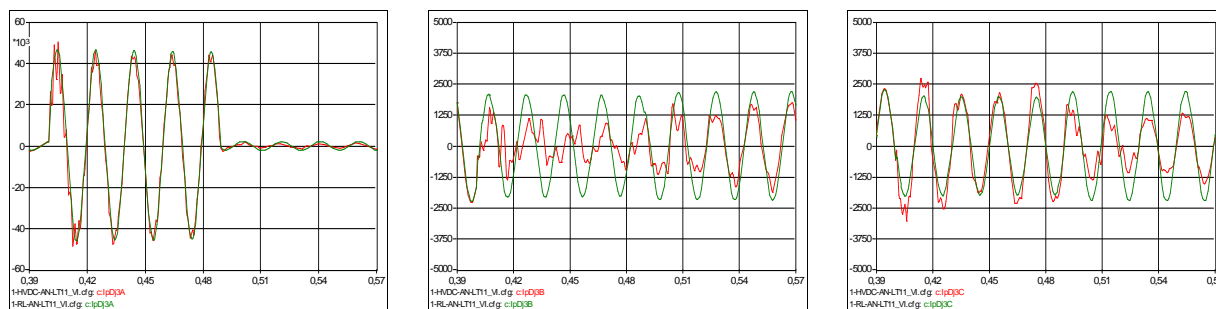


FIGURA 14 – Correntes nas fases A, B e C da linha LT11 (Falta AN, 0% de LT11)

Além das diferenças em termos de amplitude das tensões e correntes, observou-se claramente nestes testes que o modelo do HVDC no RSCAD reproduz mais fielmente os harmônicos presentes nas respostas do sistema do que a representação apenas pela associação de componentes RL.

6.0 - CONCLUSÃO

Considerando-se a complexidade para a implementação de um modelo de HVDC, o RSCAD pode ser considerado uma ferramenta amigável que fornece componentes e exemplos que auxiliam significativamente no processo de modelagem.

A representação do HVDC de ITAIPU no RSCAD apresentou respostas muito próximas ao esperado em termos dos sinais que são disponibilizados para os equipamentos do sistema de proteção das linhas de 500 kV. Observou-se que estas respostas são mais fiéis do que as apresentadas pela representação por carga dinâmica e que esta, por sua vez, também responde melhor do que a representação do HVDC apenas pela associação de componentes RL. A principal melhoria detectada neste novo modelo do RSCAD está relacionada às respostas das fases sãs, que se aproximam mais do desempenho do HVDC real.

Com relação à dúvida sobre a confiabilidade do uso de uma carga dinâmica para a representação do HVDC, mesmo verificando-se respostas próximas ao esperado, considera-se interessante a realização de uma análise minuciosa através da execução de um ensaio de modelo, para que se possa fazer uma varredura mais completa em termos de quantidade de casos testados. Também deseja-se verificar se as respostas deste novo modelo, com os sinais contendo mais harmônicos, poderiam impactar de alguma maneira no desempenho do sistema de proteção.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) elc – Electroconsult Del Paraguay SA, Desarrollo Del Modelo de Interconexión CCAT en el EMTP – Informe Final, 1993.
- (2) G. S. Luz, F. C. Jusan – ITAIPU HVDC Transission System – PSCAD/EMTDC Model – Brasil – XXI SEPOPE – Rio de Janeiro, 2012.
- (3) RTDS Technologies, Real Time Digital Simulator Tutorial Manual (RSCAD Version)

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Suzana Mensch de Carvalho nasceu em Foz do Iguaçu – Paraná. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) em 2006 e tornou-se Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2011. Desde 2007 trabalha como Engenheira Eletricista no Laboratório de Simulação de Sistemas Elétricos do Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI). A sua principal área de atuação é a pesquisa e execução de ensaios de sistemas de proteção utilizando o simulador RTDS.



Robson Almir de Oliveira é natural de Conceição das Pedras, MG. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1997 e conclui o mestrado em sistemas elétricos de potência em 2001, ambos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Trabalha na Itaipu Binacional desde 2000 na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a realização de estudos elétricos, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas Scada/EMS, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de sistema elétrico de potência.



Paulo Márcio da Silveira é Bacharel e Mestre em Engenharia Elétrica pela UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá (1984) e (1991) respectivamente, e doutor pela UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina (2001). Durante o ano de 2007 trabalhou como pesquisador visitante (trabalho de pós-doutorado) no *Center for Advanced Power System (CAPS)*, na *Florida State University*, EUA. Ele é professor da UNIFEI desde 1993 onde exerce atualmente o cargo de diretor do Instituto de Engenharia Elétrica e coordenador do Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes (CERIn). Ele é pesquisador bolsista do CNPq com interesses em áreas de proteção de sistemas elétricos, RTDS – Simulação Digital em Tempo Real, qualidade de energia elétrica e processamento de sinais aplicados à IEDs (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) e redes elétricas inteligentes.