



GRUPO X

GRUPO DE SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)

ESTUDOS DE SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS DA INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL – ENFOQUE OPERATIVO DO IMPACTO SOBRE O SISTEMA SUL-SUDESTE

Alexandre Lima Farias* Luiz Roberto Bezerra Pedro A. M-S. David Guilherme S. Luz Flávio Horovitz

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

RESUMO

O trabalho tem como proposta apresentar os critérios e principais conclusões obtidas nos estudos de transitórios eletromagnéticos efetuados para a entrada em operação da Interligação Norte-Sul, sob o enfoque de esforços sobre o sistema Sul-Sudeste. Esta é a primeira ligação entre os 2 grandes sistemas elétricos que suprem o Brasil e o caráter inédito desta obra fica ainda mais reforçado pelo fato de ser a instalação pioneira no país com equipamentos do tipo FACTS.

PALAVRAS-CHAVE:

Transitórios Eletromagnéticos; Sobretensões Transitórias; Energização; Rejeição de Carga; Auto-excitação, Religamento Monopolar; Curto-circuito.

1. INTRODUÇÃO

A Interligação Norte-Sul promove a conexão do sistema Norte-Nordeste ao sistema Sul-Sudeste e deverá ser formada por 2 troncos de transmissão em 500 kV. Além da sua importância estratégica na integração regional elétrica, traduzida inclusive em termos dos benefícios para o sistema eletro-energético brasileiro, traz consigo a inédita utilização dos avanços tecnológicos da eletrônica de potência através do emprego de “Thyristor Controlled Series Capacitor” (TCSC) para amortecer oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

O primeiro tronco da Interligação Norte-Sul é formado por 4 trechos de linha 500 kV, compensados por reatores e bancos de capacitores série, indo da usina hidrelétrica de Serra da Mesa (FURNAS) à subestação de Imperatriz (ELETRONORTE). Os TCSC estão instalados nas saídas das linhas em S.Mesa e Imperatriz. Além destas linhas, o estudo avaliou o

desempenho da entrada em operação do segundo circuito da LT Serra da Mesa – Samambaia 500kV (Figura 1).

Este trabalho apresenta um resumo dos estudos realizados pela equipe de FURNAS, no âmbito da Força-Tarefa do GCOI dos Estudos Pré-operativos da Interligação Norte-Sul, referentes a sobretensões resultantes de manobras intencionais, como a energização e desligamento de equipamentos, ou intempestivas, como rejeição de carga causada por curto-circuito.

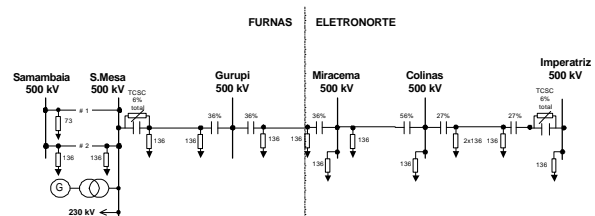


FIGURA 1 – Configuração da Interligação

2. MODELAGEM DO TCSC

Considerando que a modelagem do TCSC de forma mais detalhada representa um aumento do tempo de processamento dos casos, especialmente naqueles que envolvem chaveamento estatístico, tanto pela necessidade da inicialização dos disparos das válvulas como pela própria introdução de variáveis de controle, o TCSC foi representado em todos os estudos pela sua capacitância equivalente. Esta representação, para a análise das sobretensões ao longo de toda a Interligação e, conseqüentemente, da energia dissipada nos pára-raios de barra e de linha, é bastante satisfatória. Já para a análise de curto-circuito, a representação pela capacitância equivalente é mais pessimista, uma vez que durante o curto, as válvulas

* End.: R. Real Grandeza, 219 / B-607, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 22283 900
tel.: (021) 528-5189, fax.: (021) 528-5576, e-mail: alfarias@furnas.com.br

são bloqueadas. Nesta situação o TCSC opera como banco fixo, portanto com um valor de reatância capacitiva um pouco menor do que a equivalente ao valor quando o reator e as válvulas estão operando. Isto reduz a tensão sobre o TCSC, fazendo com que a corrente e energia sobre o pára-raios de óxido metálico (MOV) que o protege sejam também um pouco menores. Esta diferença só se torna importante quando analisadas as correntes e energias sobre o TCSC, pois nos demais equipamentos esta influência é desprezível.

As figuras 2 e 3 apresentam respectivamente a tensão sobre o TCSC e a energia no MOV durante um curto-circuito, para as duas condições, quais sejam representando o TCSC pela capacitância equivalente e por seu modelo mais detalhado. Como pode ser observado na figura 2, os 50ms iniciais foram utilizados para a operação do TCSC atingir a condição de regime quando então as tensões tornam-se iguais.

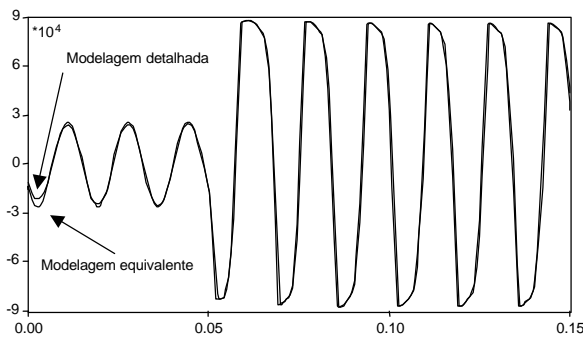


FIGURA 2 – Tensão no TCSC

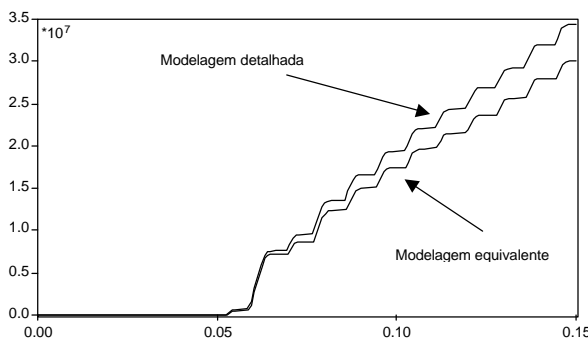


FIGURA 3 – Energia no MOV

3. ENERGIZAÇÃO DE LINHAS

De modo a se obter as condições de recomposição que deverão ser seguidas nas manobras de normalização do sistema, foi realizado um estudo sobre o impacto destas manobras a partir do terminal de Serra da Mesa. Foi pesquisada a influência da presença dos reatores de linha, dos bancos de capacitores série e do sistema mínimo conectado à Serra da Mesa.

O estudo buscou estabelecer os valores de pré-energização de modo a garantir que a tensão máxima de regime permanente ficasse limitada em 550kV, que a energia dissipada em pára-raios não ultrapassasse o

limite (5,3MJ) e que não houvesse risco de atuação de proteção de sobretensão.

Como conclusão geral pode-se afirmar que a energização feita a partir do terminal de Serra da Mesa não apresenta restrições causadas por sobretensões transitórias, que se mostraram de baixa amplitude e rapidamente amortecidas, mesmo com apenas 1 gerador na Usina de Serra da Mesa. As condições de energização foram definidas pela resposta do sistema em regime permanente, de modo a cumprir a restrição de tensão máxima de 550kV. As sobretensões transitórias não causaram a dissipação de valor significativo de energia nos pára-raios e não se identificou risco de atuação da proteção de sobretensão de nenhum equipamento.

As condições da energização não foram significativamente afetados pela presença dos capacitores-série. Entretanto, os reatores de linha e de barra se mostraram fundamentais para o sucesso das manobras. Para garantir que o valor de 550kV não seja excedido, na grande maioria dos casos é necessário realizar manobras prévias na subestação que está recebendo a tensão e conectar o reator de barra previamente à linha. Uma possível indisponibilidade de reator poderá vir a trazer dificuldades operativas, exigindo a presença de todos os geradores de Serra da Mesa para que o critério de tensão máxima inferior a 550kV seja atendido.

4. CURTO-CIRCUITO

A ocorrência de um curto-circuito próximo dos bancos de capacitores série fixos e variáveis (TCSC) causa uma sobrecorrente na fase em falta que pode provocar uma sobretensão no equipamento.

Para impedir que esta sobretensão atinja valores elevados existe um esquema de proteção baseado na ação de pára-raios de óxido metálico (MOV) e centelhadores. Diferente dos esquemas de proteção empregados nos bancos de capacitores série já existentes no sistema de 750kV de FURNAS [1], só deverá ocorrer atuação do centelhador ("bypass" do capacitor) se o evento provocar corrente e/ou energia dissipada nos pára-raios de valor elevado e que possa ultrapassar a sua capacidade nominal. Isto permite que o capacitor permaneça mais tempo em serviço, diminuindo os impactos para o sistema. O comando de disparo, de acordo com os fabricantes, poderia ser baseado no valor da corrente na linha ou no pára-raios, na taxa de crescimento da energia ou no valor acumulado da energia dissipada no pára-raios [2].

O estudo de transitórios após curto-circuito tem por objetivo definir quais os bancos de capacitores série que precisariam ser curto-circuitados ("bypass") devido a uma falta para a terra, permitindo uma representação mais correta nos estudos dinâmicos.

Foram simulados curtos monofásicos sem resistência

de falta em todas as barras e saídas de linha da interligação. Foi avaliada a influência do instante do fechamento do curto empregando uma chave sistemática disponível no programa ATP e realizando as manobras com um intervalo de 10 graus elétricos dentro de um semi-ciclo da frequência fundamental. Todos os pára-raios de proteção dos bancos de capacitores série foram representados e foi pesquisada a influência do ponto de operação, considerando o fluxo máximo nos 2 sentidos e também com o intercâmbio próximo a zero.

Para esta etapa da interligação Norte-Sul só foram identificados valores elevados de corrente e energia nos pára-raios que protegem os TCSC de S. Mesa e Imperatriz e o banco de capacitores fixos desta última subestação, quando da ocorrência de curtos internos às suas linhas e próximos destes elementos (até poucos quilômetros da subestação). Nestes eventos é necessário que seja comandado o disparo do centelhador para que a energia dissipada nos pára-raios não atinja valores muito elevados.

5. REJEIÇÃO DE CARGA

O estudo de rejeição de carga foi efetuado em duas etapas distintas. Na primeira etapa foi realizada uma investigação “tradicional” que avaliou a sobretensão resultante da abertura de linhas, considerando o sistema em uma configuração operativa normal em carga mínima. Foram analisadas rejeições simples ou causadas por defeitos, onde se avaliou a eliminação de curto monofásico no barramento da subestação ou no terminal dos trechos de linha. Admitiu-se que a energia dissipada nos pára-raios não poderia ultrapassar o limite do equipamento dentro do intervalo de estudo adotado de 300ms.

Foram estudados casos com 1 ou 3 geradores na usina de Serra da Mesa e o fluxo na Interligação foi mantido no valor máximo de 1000MW, pesquisando a transmissão nos 2 sentidos. Foi verificado que não existe limitação na transmissão causada por rejeição de carga sobre o Sistema Sul-Sudeste, pois a energia máxima dissipada foi inferior a 85% da capacidade nominal e não se identificou risco de atuação de proteção em pontos remotos durante o distúrbio.

Na indisponibilidade de um dos reatores da Interligação, seja de linha ou de barra, poderia vir a ocorrer a sensibilização da proteção de sobretensão temporizada das linhas Serra da Mesa – Samambaia 500kV se houvesse a rejeição de carga em Imperatriz com apenas 1 gerador em S. Mesa. Este risco não existe se estiverem em operação mais geradores na usina ou se todos os reatores estiverem presentes.

A segunda etapa do estudo analisou especificamente a ocorrência do fenômeno de auto-excitação sobre as máquinas de Serra da Mesa. A auto-excitação ocorre quando há um aumento da tensão terminal da máquina

após uma rejeição de carga, em uma configuração tal que o gerador fique ligado a uma carga capacitiva, como no caso de linhas longas, sem que a atuação do regulador seja suficiente para controlar esta tensão[3].

Inicialmente foi realizada uma avaliação do problema através do programa de transitórios eletromecânicos ANATEM, considerando a variação dos parâmetros da rede com a frequência. A Figura 4 mostra a tensão terminal dos geradores no evento de rejeição tripla simultânea das linhas em Imperatriz e Samambaia, com a transformação de Serra da Mesa 500/230kV previamente desligada.

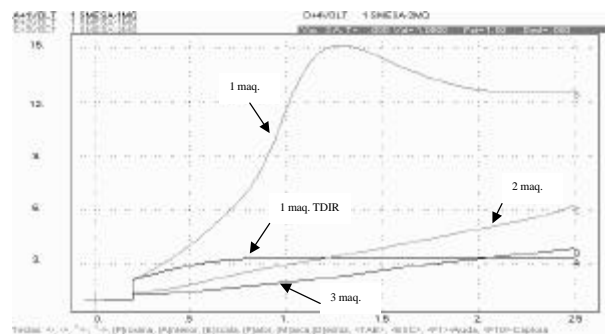


FIGURA 4 – Tensão em S.Mesa 15kV (pu)

Nota-se a ocorrência de auto-excitação para qualquer número de geradores, sendo mais acentuada com um menor número de máquinas presentes. Também está apresentada a resposta sem considerar a variação dos parâmetros com a frequência (TDIR), que mascara a auto-excitação. A rejeição em Imperatriz sobre a usina isolada do sistema Sul/Sudeste ou a rejeição das 2 linhas em Samambaia com a Interligação Norte-Sul desligada também provocam a auto-excitação das máquinas, mas de forma mais lenta.

Estes resultados serviram de ponto de partida para indicar a necessidade de uma avaliação mais detalhada com o programa ATP.

Os geradores de Serra da Mesa foram representados pelo modelo 59 de máquina síncrona, considerando a influência do seu regulador de tensão que foi modelado empregando rotinas MODELS.

As Figuras 5 e 6 e a Tabela 1 mostram um resumo dos resultados encontrados para as simulações detalhadas a seguir, em que a transformação de Serra da Mesa 500/230kV estava sempre desligada :

- Caso 1 : Rejeição tripla simultânea das linhas em Imperatriz e Samambaia.
- Caso 2 : Rejeição em Imperatriz, sem as linhas para Samambaia.
- Caso 3 : Rejeição dupla em Samambaia, sem as linhas para Imperatriz.

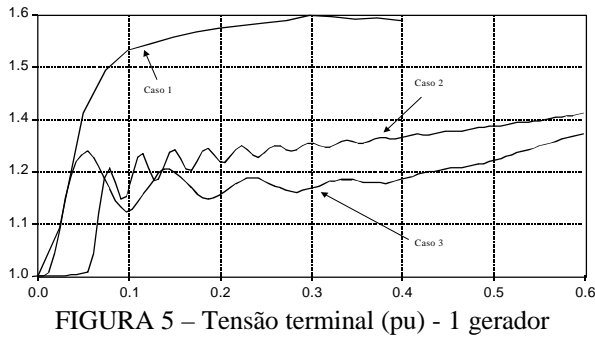


FIGURA 5 – Tensão terminal (pu) - 1 gerador

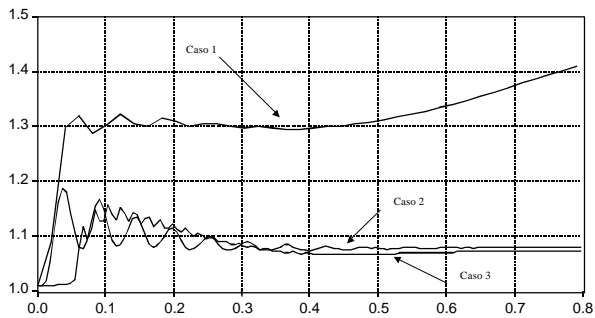


FIGURA 6 – Tensão terminal (pu) - 2 geradores

Nota-se que somente o Caso 1, com apenas uma máquina em Serra da Mesa, é crítico. A energia dissipada nos pára-raios atinge o seu valor nominal 140ms após a rejeição. Este intervalo de tempo é muito curto para garantir que as linhas já foram desligadas, seja por transferência de disparo ou por atuação da proteção. Entretanto, a probabilidade de ocorrerem estes desligamentos simultâneos é extremamente baixa.

TABELA 1

Caso	1 Gerador		2 Geradores	
	Energia (MJ)	Tempo (ms)	Energia (MJ)	Tempo (ms)
Caso 1	5,0	150	2,0	800
Caso 2	5,0	800	0,25	800
Caso 3	0,1	800	0,09	800

Com mais geradores sincronizados, ou na rejeição de apenas parte das linhas sobre um gerador de Serra da Mesa, observou-se que o crescimento da tensão terminal é mais lento. A energia nos pára-raios apresenta grandes margens de segurança mesmo para intervalos de tempo mais longos. O efeito das saturações dos elementos não-lineares e a presença dos pára-raios retardam a ocorrência da auto-excitação, evitando qualquer risco às máquinas.

6. TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA (TRT)

Não é comum haver a necessidade de se reavaliar a capacidade de interrupção de disjuntor no âmbito do planejamento da operação, a não ser que haja uma

alteração grande na topologia dos circuitos próximos ou da potência de curto da região. No caso específico deste estudo foi investigada a possibilidade de se operar a Interligação na indisponibilidade de um reator de linha.

Nesta análise, uma das principais preocupações diz respeito a manobra de abertura da linha em vazio, em que é interrompida uma corrente capacitiva maior do que a da configuração normal de operação. A interrupção desta corrente elevada pode se refletir em uma tensão aplicada entre os pólos do disjuntor (TRT) superior à suportável, ocorrendo uma descarga disruptiva entre os contatos.

Na análise do problema foram empregados os valores de especificação da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) para abertura de linha em vazio [3]:

Valor de crista: 1300kV Tempo: 7,6ms.

Conforme critério adotado em FURNAS, a tensão entre os contatos é comparada com a envoltória definida por estes 2 parâmetros. Admite-se que a envoltória de TRT pode ser ultrapassada apenas no primeiro ¼ de ciclo após o início da abertura dos contatos. Nesta situação pode haver o “reacendimento térmico” do arco que não representa risco para o disjuntor nem para o sistema, ao contrário da “reignição”, que pode ocorrer se a ultrapassagem do limite de suportabilidade se der após este período [4,5].

Deste estudo se chegou a conclusão que, para todos os trechos da Interligação Norte-Sul, a ausência de reator de linha causa a violação da envoltória da Tensão de Restabelecimento Transitória especificada para a manobra de abertura de linha em vazio, inviabilizando esta configuração operativa.

A Figura 7 mostra a tensão entre os contatos dos disjuntores na abertura da LT S. Mesa – Gurupi sem reator em Gurupi. Observa-se que não apenas o valor máximo é ultrapassado mas também a taxa inicial de crescimento faz com que a envoltória de especificação seja violada por um longo período no início da abertura.

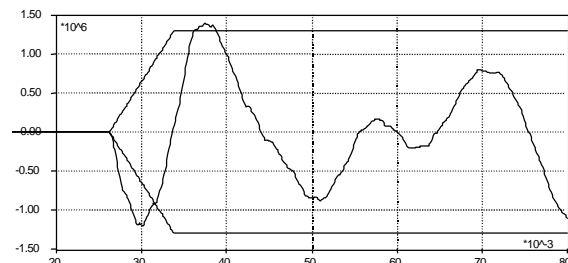


FIGURA 7 – TRT na abertura de linha sem reator (V)

Na figura 8 é apresentada uma comparação do resultado da abertura da linha na configuração normal e na indisponibilidade de um de seus reatores. Observa-se que mesmo na configuração original ocorre a violação do trecho inicial da envoltória de TRT.

Entretanto, isto não configura um problema pois ocorre por um período de tempo inferior a 4 ms. Entretanto, sem um dos reatores da linha, nota-se que a TRT permanece acima da envoltória limite por um período de 5 ms, ou mais.

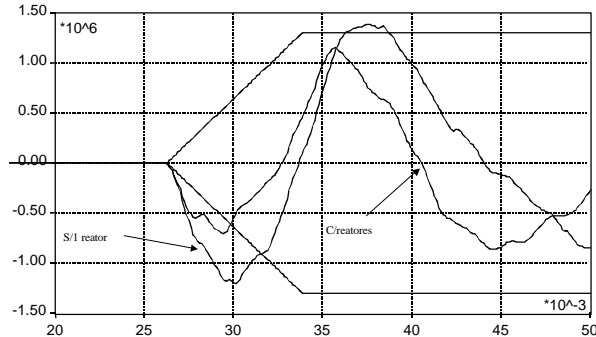


FIGURA 8 – Influência do reator na TRT

7. RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

No estágio inicial da Interligação Norte-Sul, com apenas um circuito ligando S. Mesa a Imperatriz, somente o esquema de religamento monopolar ficará ativado. Este esquema atua após defeitos monofásicos, diminuindo o impacto do distúrbio ao permitir que os sistemas se mantenham interligados através das fases sãs.

Nos estudos pré-operacionais, além do comportamento da corrente de arco secundário, também foram verificados os esforços sobre pára-raios e a corrente desequilibrada que surge no sistema durante o tempo morto, de modo a permitir o ajuste da proteção por relés de corrente residual.

A análise do comportamento do arco secundário se baseou na existência de uma região de extinção [6] em que o primeiro pico da tensão de restabelecimento e o valor eficaz da corrente de arco devem se situar abaixo da linha que define a zona de provável extinção do arco secundário. Baseado neste critério, os resultados indicaram que, com um tempo morto de pelo menos 500 ms, é grande a probabilidade de ocorrer o religamento monopolar com sucesso de todos os trechos de linha da interligação.

Foram analisadas as manobras de fechamento considerando cada um dos 2 terminais de cada linha como líder, levando em conta também a ocorrência de religamento sem sucesso, com o curto ainda presente.. A resistência de falta foi representada com um valor fixo de 50 ohms, pois estudos na fase de planejamento de FURNAS mostraram que os resultados não diferiam muito daqueles encontrados ao se representar a dinâmica do arco por modelos mais acurados[7].

As sobretensões transitórias no religamento variaram de 1.53 a 1.94 pu de 500 kV. De modo a exigir mais dos pára-raios, foi simulado um período de 200 ms

após o fechamento com sucesso da fase defeituosa no terminal líder sem que ocorresse a sincronização no seguidor.

Em todos os casos simulados a energia dissipada ficou dentro dos limites dos pára-raios, encontrando-se os maiores valores (até 60% do nominal) nos casos em que se considerou o religamento da LT Serra da Mesa – Gurupi, a partir dessa última subestação. No religamento pelo outro terminal a energia foi inferior a 5% da capacidade dos pára-raios.

Para as outras linhas não existem discrepâncias de comportamento tão marcantes ao se mudar o terminal líder, sendo encontradas diferenças de no máximo 10% nas sobretensões e de 0,5 MJ na energia dissipada em pára-raios.

Entretanto, ao simular o religamento sem sucesso, se observou uma taxa de crescimento bastante elevada da energia dissipada nos pára-raios da linha S. Mesa – Gurupi, no caso de Gurupi ser o terminal líder. Aproximadamente 50 ms após a abertura das fases sãs no terminal de S. Mesa, ocorre a superação da capacidade de dissipação dos pára-raios. Se o terminal líder for S. Mesa não se verificam valores elevados de energia. Para as outras linhas também não foi identificada nenhuma restrição ao se representar o religamento sem sucesso.

A partir dos resultados encontrados foi recomendado que o terminal de Serra da Mesa deverá ser o líder do religamento monopolar da LT S. Mesa – Gurupi. Para as outras linhas não se mostrou necessária qualquer recomendação adicional.

Durante o período em que a fase em curto permanece aberta surge um desequilíbrio de corrente que dá origem a uma componente residual nas correntes de linha e dos reatores. Este evento tem que ser levado em consideração no ajuste das proteções e apresentou um comportamento com 3 períodos distintos (Figura 9):

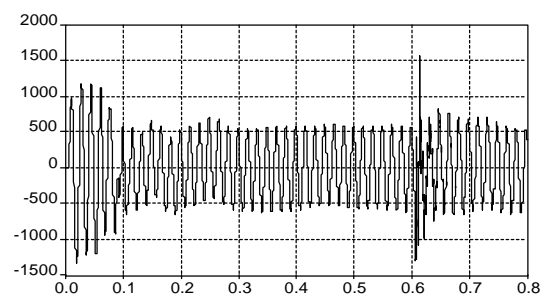


FIGURA 9 – Corrente residual na linha (A)

- período inicial: durante a aplicação do curto, normalmente com valores elevados de corrente;
- período intermediário: durante o tempo morto com uma fase aberta, em que a corrente pode apresentar um comportamento oscilatório;
- período final: em que a fase permanece energizada

em vazio após o fechamento do terminal líder. Em alguns eventos observa-se uma corrente com um grande deslocamento (“offset”) e em outros, se mantém as oscilações do período intermediário.

8. COMISSIONAMENTO DA INTERLIGAÇÃO

Durante o primeiro trimestre de 1999 foi realizado o comissionamento dos equipamentos, não tendo sido identificado nenhum problema inesperado relacionado com sobretensões transitórias.

Para possibilitar alguns testes do TCSC houve a necessidade de se energizar trechos de linhas sem um de seus reatores e estudos específicos foram sendo efetuados pela equipe de trabalho para liberar estas configurações. Foram autorizadas determinadas manobras em condições especiais para não colocar em risco nenhum equipamento, especialmente disjuntores e pára-raios.

9. CONCLUSÕES

Os estudos pré-operativos de sobretensões transitórias mostraram que o sistema, conforme planejado, tem um bom desempenho.

A energização da interligação a partir de Serra da Mesa, não apresenta maiores dificuldades. As sobretensões transitórias são bastante amortecidas e os níveis atingidos não são suficientes para causar a dissipação significativa de energia nos pára-raios.

Não foi identificada nenhuma limitação na potência a ser transmitida pela Interligação Norte-Sul devido à rejeição de carga sobre o sistema Sul-Sudeste e o esquema de proteção dos bancos de capacitores série deverá permitir uma boa disponibilidade dos mesmos durante distúrbios.

Não foram identificados riscos reais de auto-excitação nos geradores de Serra da Mesa como consequência de rejeição de carga.

A Interligação Norte-Sul se mostrou bastante dependente da presença dos seus reatores. Os reatores de barra têm um papel muito importante na normalização das linhas e a indisponibilidade de algum deles aumenta muito as restrições a serem seguidas.

A capacidade de abertura de linha em vazio é totalmente satisfeita com o sistema operando com os

reatores de linha presentes. Mas a indisponibilidade de qualquer um destes elementos nesta etapa da Interligação implica na impossibilidade de manter a linha em serviço. Esta restrição só poderá ser revista se houver garantia dos fabricantes que os disjuntores são capazes de interromper a corrente capacitiva verificada nestes casos.

Ficou claro a necessidade de serem realizados estudos pré-operacionais detalhados para definir as possíveis restrições e otimizar a operação, sem a inclusão de limitações desnecessárias. A existência de uma equipe técnica capacitada é essencial para dar autonomia e segurança nas tomadas de decisão das empresas.

10. REFERÊNCIAS

- [1] F.A.Salmen, D.E.Fletcher, J.C.P.Mello, “Aplicação de Capacitores Série no Sistema 800kV de Itaipu”, IV SNPTEE, 1977
- [2] “Capacitores Série Controlados a Tiristor na SE Serra da Mesa TCSC”, SIEMENS Power Transmission and Distribution, 73_T01_001, 1998
- [3] Luiz Chiganer, “Alguns problemas relacionados com a auto-excitação das máquinas síncronas”, V SNPTEE, 1979
- [4] Jorge Amon Filho, S.A.Morais “Reavaliação dos Requisitos de Abertura de Linha em Vazio dos Disjuntores de 525kV da LT 500kV Serra da Mesa – Samambaia”, VII ERLAC, 1997
- [5] Carvalho, A.C.C.et alli, “Disjuntores e Chaves – Aplicação em Sistemas de Potência”, Editora da Universidade Federal Fluminense, 1995
- [6] CEPTEL, “Características Tecnológicas de Disjuntores para Sistemas de UAT CA – Projeto 1100”
- [7] S. Goldberg, W. Horton – “A computer model of the secondary arc in single phase operation of transmission lines” IEEE Trans. On Power Delivery, vol 4, no. 1 January 1989
- [8] Zanetta et alli, “Religamento Monopolar em Sistemas de Transmissão a Longas Distâncias em Redes de Ultra-alta Tensão”, XIII SNPTEE, 1995