



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

CB/GTM/12

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**REATORES SHUNT MANOBRÁVEIS COM NÚCLEO DE AR
EXPERIÊNCIA DE PROJETO E APLICAÇÃO EM 230 kV**

**José V. Oliveira Jr (*)
SIEMENS**

**Marcos B. Schwarz
SIEMENS**

**Daniel B. Andrade
SIEMENS**

**Angelica C. O. Rocha
ATG ENGENHARIA**

RESUMO

Estudos de avaliação elétrica do Sistema Elétrico Interligado realizados no âmbito ONS e EPE indicaram a necessidade de instalação de compensação reativa adicional para garantir o seu desempenho elétrico quanto ao controle de tensão. A aplicação de reatores manobráveis é uma das possibilidades para este tipo de compensação.

Neste contexto, este trabalho tem o objetivo apresentar a experiência obtida no projeto e aplicação de dois bancos de reatores manobráveis monofásicos de 13,3 MVA, a seco com núcleo de ar instalados na barra de 230 kV da SE Irapé, demonstrando as vantagens do uso desta tecnologia com foco nos detalhes construtivos e operacionais.

O projeto desses reatores torna-se especial tendo em vista ser o primeiro desses equipamentos a seco com núcleo de ar (encapsulados) instalados para esse tipo de aplicação no Brasil. Estes reatores são uma alternativa interessante aos isolados a óleo, tradicionalmente mais empregados, trazendo melhorias consideráveis sob diversos aspectos para operação do sistema e simplificações quanto à instalação.

Reatores encapsulados apresentam sob o ponto de vista de projeto, características específicas dentre as quais se destacam:

- Enrolamento encapsulado em fibra de vidro, com impregnação em resina Epóxi;
- Condutores totalmente em alumínio, isolados com isolantes sólidos de alto desempenho;
- Alta resistência mecânica e de curto-circuito;
- Baixo nível de ruído durante toda a vida útil do reator;
- Estrutura à prova de intempéries.

Diferenças operacionais também existem entre os tipos básicos dos reatores (ar e imerso em óleo), tais como:

- Características magnéticas e as implicações da não saturação dos reatores com núcleo de ar;
- Cuidados com a segurança de trabalhadores operacionais e público geral em relação aos níveis de exposição humana a campos elétricos e magnéticos;
- Aspectos ambientais, econômicos e diferenças de instalação;
- Análise do regulativo de perdas no sistema brasileiro (Procedimento de Rede Submódulo 2.3) para reatores derivação e suas implicações nos reatores a seco com núcleo de ar;
- Inspeção e Manutenção.

Foram realizadas também análises de transitórios eletromagnéticos relativas às manobras de abertura dos bancos de reatores, com e sem a presença de dispositivos de controle, levando-se em conta o fenômeno do corte de

(*) Av. Engº João Fernandes G. Molina, nº 1745 – Prédio 10 – CEP 13.213-080 Jundiaí, SP – Brasil
Tel: (+55 11) 4585-2379 – Email: josevicente.oliveira@siemens.com

corrente associado à interrupção de pequenas correntes indutivas. A literatura mostra que a abertura de banco de reatores, sem dispositivos de controle, pode dar origem a sucessivas reignições do arco elétrico no disjuntor, gerando sobretensões de alta frequência em seus terminais que podem não estar devidamente cobertas pelos ensaios dielétricos normalizados.

Dessa forma, esta análise teve, como foco principal, a determinação dessas sobretensões para a análise da suportabilidade dielétrica dos reatores frente a essas solicitações. Tendo em vista ser esperado um número elevado de manobras por ano dos bancos de reatores, essa verificação torna-se fundamental para garantia da confiabilidade operativa.

PALAVRAS-CHAVE

Reatores a Seco com Núcleo de Ar, Transitórios Eletromagnéticos, Reatores Encapsulados.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em geral existem dois tipos básicos para a construção de um reator, imerso em óleo ou do tipo seco (1). Os reatores imersos em óleo são constituídos de um núcleo de aço silício e um enrolamento dentro de um tanque de aço preenchido com óleo isolante e terminais acessíveis através de buchas. Já a solução a seco consiste somente pelos enrolamentos apoiados em isoladores suporte.

Ou seja, em reatores secos com núcleo de ar (RSNA) não existe núcleo de aço silício, tanque, óleo ou buchas e são sempre compostos por unidades monofásicas (2). A isolamento para terra é garantida através de pedestais distanciadores e isoladores suporte. Suas dimensões dependem de diversos fatores, dentre eles devemos ressaltar o estresse elétrico nos enrolamentos e limites para transporte, sendo assim, uma fase pode ser constituída de mais de um módulo.

Dentre as aplicações comuns de RSNA, destacamos: Reatores em derivação em Média Tensão, Reatores Limitadores de Corrente, Reatores para Filtros de Harmônicas, Reatores para Fornos a Arco Elétrico, Reatores para Ensaios Usados em Laboratórios e Reatores para Aplicação em HVDC.

Com o avanço tecnológico dos materiais isolantes e condutores, se tornou possível a utilização de RSNA para novas aplicações em derivação em tensões a partir de 230 kV.

2.0 - COMPARATIVOS DE REATORES A AR E A ÓLEO

2.1 Instalação

Como pode ser visto na Figura 1 abaixo, existem profundas diferenças construtivas e de instalação entre os dois tipos de reatores. Assim, alguns cuidados devem ser tomados quando da utilização de RSNA.



FIGURA 1 - Reatores (6+1R) de 13,3 MVAR e 230 kV instalados na SE Irapé

Devido à dispersão do campo magnético próprio do reator, correntes parasitas podem ser induzidas nas vizinhanças de partes metálicas, no aço do reforço da estrutura da base de fixação ou nos sistemas de

aterramento. Dependendo do tamanho e da forma destes elementos certos fenômenos térmicos e eletrodinâmicos podem ocorrer.

Em relação às bases de fixação há duas maneiras de se mitigar estes efeitos, através de estruturas de aço que não formam laços fechados ou uso de materiais não metálicos (fibra de vidro). O mesmo conceito se aplica as cercas que protegem os operadores da subestação de acidentes por contato com os reatores. Para reatores de baixa potência, como é o caso em 230 kV, normalmente a distância elétrica mínima para o nível de tensão já é superior as distâncias magnéticas mínimas.

Os cabeios dos sistemas de controle, proteção, voz e dados de comunicação e aparatos eletrônicos devem ser blindados adequadamente ou removidos para uma área livre da influência dos reatores.

Por outro lado, os RSNA não possuem óleo e, portanto não apresentam riscos de incêndios e explosões. Assim, não é necessária a instalação de bacias de contenção de óleo, parede corta fogo e sistemas de proteção contra incêndios específicos para estes equipamentos.

O transporte e o manuseio dos RSNA durante a montagem no campo são mais simples que nos reatores imersos em óleo. Os RSNA em derivação para tensões maiores que 72.5 kV são modulares, assim não é necessário nenhum tipo de transporte especial. Para a montagem, basta realizar o empilhamento dos módulos e conexão entre módulos e fases permitindo que o equipamento esteja pronto para operar. A montagem em campo de um conjunto trifásico completo em 230 kV pode ser realizada em até 3 dias.

2.2 Operação e Manutenção

Os RSNA apresentam uma curva de característica linear, assim efeitos como a saturação ou ferroressonância não necessitam ser considerados.

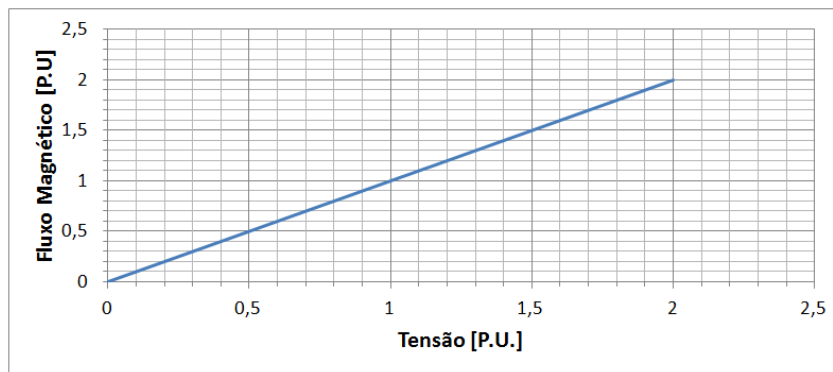


FIGURA 2 - Curva da característica magnética dos RSNA

A capacidade de autorregeneração dos isoladores suporte nos casos de um sobretensão para terra (falha fase-terra) apresenta um importante benefício, sendo que em um caso mais severo bastaria a substituição do isolador. Já no caso de um reator imerso em óleo uma falha na carcaça requer um reparo extremamente complicado e que muitas vezes só pode ser realizado em uma oficina especializada.

O nível de ruído natural de um RSNA é inferior aos reatores imersos em óleo. Isto porque o RSNA possui apenas o enrolamento como fonte de ruído enquanto os reatores imersos em óleo possuem outros elementos tais como núcleo magnético e buchas. Modelos analíticos atuais permitem o projeto de artifícios que minimizam a potência sonora gerada pelos RSNA.

Uma vez que o RSNA é constituído apenas pelo enrolamento e isoladores suporte, não se faz necessário nenhum tipo de monitoramento da condição do equipamento, bastando somente a realização de inspeção visual e por termovisão na mesma periodicidade que os demais equipamentos da subestação.

Uma unidade reserva pode ser facilmente considerada no projeto, uma vez que os RSNA serão sempre monofásicos. Além disto, no caso de uma falha entre espiras, é possível a substituição somente do módulo afetado, não sendo necessária a substituição da fase completa. E ainda, como os RSNA não possuem polaridade os módulos que compõe a fase poderão ser totalmente intercambiáveis, desde que previamente solicitado.

2.3 Perdas

O limite de perdas para reatores em derivação conectados a rede básica é definido pelo Submódulo 2.3 do Procedimento de Rede (3) conforme Figura 3 abaixo:

8.2.2.6 Perdas

- (a) Para reatores em derivação trifásicos ou monofásicos de potência nominal igual ou superior a 5 Mvar e de tensão nominal do enrolamento de alta tensão igual ou superior a 230 kV, as perdas totais máximas, à tensão e frequência nominais, devem atender à Tabela 6.

Tabela 6 – Perdas totais máximas à tensão e frequência nominais para reatores em derivação trifásicos ou monofásicos com tensão nominal igual ou superior a 230 kV, em percentagem da potência nominal

Potência Nominal (Pn)	Perdas Totais Máximas
5 ≤ Pn < 10 Mvar	0,70 % de Pn
10 ≤ Pn < 15 Mvar	0,60 % de Pn
15 ≤ Pn < 20 Mvar	0,50 % de Pn
20 ≤ Pn < 30 Mvar	0,40 % de Pn
Pn ≥ 30 Mvar	0,30 % de Pn

FIGURA 3 - Item 8.2.2.6 do Submódulo 2.3do Procedimento de Rede

Desta forma o atendimento ao Submódulo 2.3 é realizado considerando a potência monofásica do RSNA.

Entretanto, vale ressaltar que os valores descritos acima foram elaborados de acordo a condição de perdas presentes em um reator imerso em óleo onde o fluxo magnético esta concatenado através no núcleo de aço silício. Algo que não ocorre nos RSNA no qual se observa o fluxo magnético disperso no ar, como pode ser observado na Figura 4 abaixo.

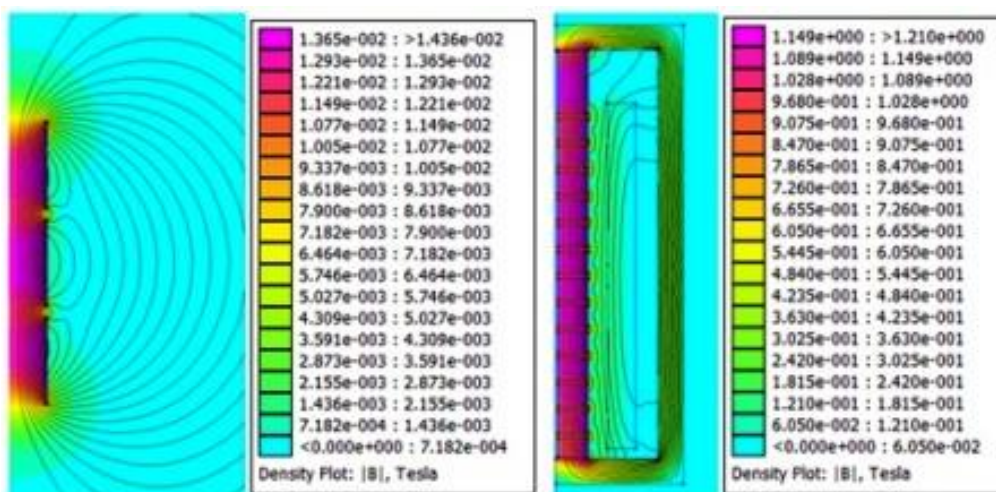


FIGURA 4 - Campo magnético de uma unidade de 5 MVar em 230 kV, nas alternativas RSNA (esq.) e óleo (dir.)

Tabela 1 – Comparativo de perdas

Valores nominais por fase	Reator a seco com núcleo de Ar	Reator imerso em Óleo
Potência Nominal (MVar)	5	5
Tensão Nominal (V)	230√3	230√3
Impedância por Fase (ohms)	3526.7	3526.7
Indutância por Fase (mH)	9354.6	9354.6
Corrente Nominal (A)	37.6	37.6
Comprimento de Espiras por Fase (km)	≈ 72.0	≈ 9.0
Material dos condutores	Alumínio	Cobre
Densidade de corrente (A/mm²)	1.88	2.92
Perdas Naturais a 75 °C @ Corrente Nominal (kW)	92	29
Percentual de Perdas	2.0%	0.7%

Como pode ser evidenciado pela Tabela 1 acima, as perdas naturais de um RSNA são superiores ao valor encontrado em um reator com núcleo magnético. Isto se deve principalmente a dispersão do fluxo magnético que exige então um maior comprimento de espiras por fase.

Os RSNA podem ser projetados para atender os requisitos atuais de perdas, porém isto acaba por elevar consideravelmente o custo do equipamento e podendo inclusive inviabilizar o seu uso. Assim, com uma leve flexibilização dos valores limites de perdas estabelecidos atualmente, o RSNA poderá ser uma alternativa interessante financeiramente, mesmo se considerados índices para a valorização das perdas adicionais.

3.0 - COMPORTAMENTO DURANTE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Com a finalidade de se avaliar a suportabilidade dielétrica dos reatores, foram realizadas análises de transitórios eletromagnéticos relativas às manobras de abertura dos reatores 230 kV 13,3 MVA instalados na subestação de Irapé (5), com e sem a presença de dispositivos de controle, levando-se em conta o fenômeno do corte de corrente associado à interrupção de pequenas correntes indutivas.

A literatura mostra que as tensões de restabelecimento transitórias (TRT), quando da abertura de banco de reatores sem dispositivos de controle, podem dar origem a sucessivas reignições do arco elétrico do disjuntor, gerando sobretensões de alta frequência em seus terminais. Essas sobretensões podem não estar cobertas pelos ensaios dielétricos normalizados.

3.1 Modelagem

As simulações foram realizadas através do software ATP, onde foram considerados modelos de alta frequência para os diversos componentes da subestação Irapé, destacando-se o banco de reatores manobráveis instalados na barra de 230 kV desta subestação.

As unidades monofásicas dos bancos de reatores em análise foram representadas através de parâmetros RLC conforme Figura 5. Foram considerados também os para-raios internos de 24,4 kV MCOV, para cada módulo de reator.

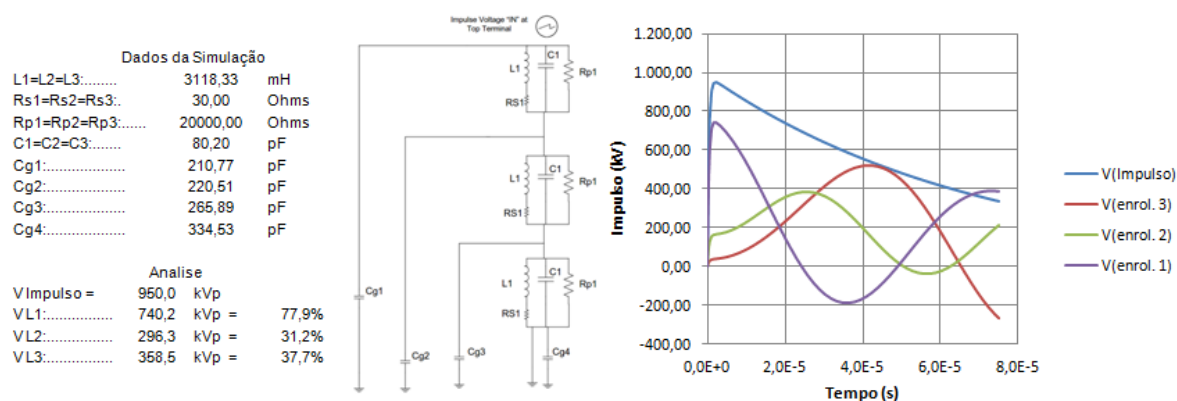


FIGURA 5 - Modelo do RSNA

Neste ponto pode-se notar que para um impulso atmosférico, 78% da tensão estará distribuída sobre as espiras do primeiro módulo. Isto ocorre porque a distribuição de tensão impulsiva é comandada pelas capacitâncias entre espiras e pelas capacitâncias entre cada espira e a terra ou objetos aterrados que possuem distribuição altamente não uniforme pelo enrolamento. O efeito da indutância sobre a tensão entre espiras não tem influência, pois nesta condição funcionam como um circuito aberto.

3.2 Sobretensões e TRT Associadas à Corrente de Corte

As sobretensões de manobra que se seguem aos cortes de corrente no desligamento de reatores (tensão de "chopping") são caracterizadas por oscilações com frequências na faixa de poucos kHz. Para essa condição, o stress dielétrico resultante nos reatores é similar ao do impulso de manobra apresentado nas normas. Já as sobretensões associadas às reignições são caracterizadas por frequências muito superiores, da ordem de centenas de kHz, e elevadas taxas de variação, possíveis de causar solicitações dielétricas severas ao isolamento dos reatores. A faixa de frequência dessas sobretensões entre 50 kHz e 2000 kHz, de interesse nesse estudo, é denominada, na literatura, como segundo modo de oscilação paralela (4) e podem não estar caracterizadas pelos impulsos padronizados dos ensaios dielétricos.

Nas simulações, utilizou-se a configuração da subestação com um dos bancos de reatores indisponível com o objetivo de tornar os resultados mais severos.

O estudo das sobretensões transitórias associadas ao corte de corrente quando da abertura do banco de reatores considerou duas condições operativas: dispositivo de manobra controlada em operação (condição pré-reignição) e esse dispositivo fora de operação com consequente ocorrência de reignições (condição pós-reignição).

Para a primeira condição, observa-se uma sobretensão máxima de 1,10 pu (Base: $230\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV) frequência de oscilação da ordem de 2 kHz (Tabela 2, Figura 6) decorrente do corte de corrente de 3 A considerado. Este valor está dentro dos limites de suportabilidade dos RSNA foco dessa análise. Para esse caso, as energias dissipadas nos para-raios foram desprezíveis.

Tabela 2 – Resultados referentes ao pior caso de abertura do disjuntor com manobra controlada pré-reignição

Frequência dos parâmetros no modelo	Corte de Corrente (A)	Com manobra controlada e fase pré-reignição			
		Sobretensão máxima devido a corrente de corte (kV)		Frequências das sobretensões no reator (Hz)	TRTs máximas no Disjuntor (kV)
		kV	pu		
60 Hz	3	207,98	1,108	1972,4	411,8
160 kHz	3	207,64	1,106	2024,2	417,8

Observa-se, pela tabela acima, que há uma pequena sobretensão devido à corrente de corte e que pouco se altera com a correção das capacitâncias parasitas de 60 Hz para 160 kHz.

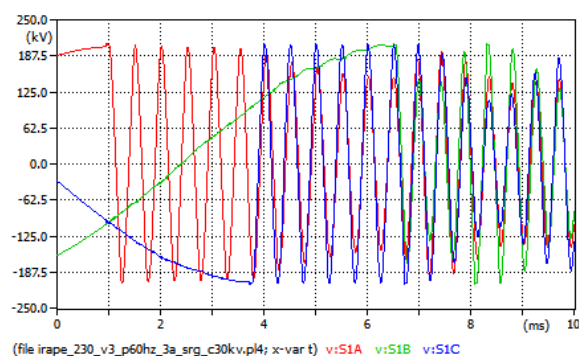


FIGURA 6 – Oscilações de tensão nas fases do banco de reatores com ocorrência de corte de corrente de 3 A do disjuntor de 230 kV

Sem a presença da manobra controlada, a sobretensão máxima encontrada foi de 1,43 pu com frequências predominantes de 160 kHz e 330 kHz (Tabela 3, Figura 7). A taxa de crescimento de tensão nos bornes do reator ficou acima dos 500 kV/μs. Esse resultado foi decorrente da simulação de uma reignição no instante de tensão máxima após abertura da corrente de corte de 3 A. Os valores de energias verificadas nos para-raios de 230 kV ficaram abaixo do limite desses equipamentos.

Tabela 3 – Resultados referentes à simulação de reignições sem a presença de manobra controlada com ocorrência de reignição

Frequência dos parâmetros no modelo	Corte de Corrente (A)	Com reignição					
		Sobretensões pós-reignição aplicadas ao reator				Maior energia nos para-raios internos do reator (J)	Maior energia nos para-raios do reator (J)
		Frequência 2ª oscilação paralela (kHz)	Amplitude máxima		Taxas de variação (kV/μs)		
			kV	pu			
60 Hz	3	509,7	268,8	1,431	643	40	165
160kHz	3	534,2	267,1	1,422	529	35	152

Pela Tabela 3 percebe-se que correção das capacitâncias para terra pouco interferiu nas amplitudes e energias encontradas.

A Figura 7, a seguir, apresenta a sobretensão máxima no terminal do banco de reatores após a reignição, capacitâncias calculadas para 60 Hz.

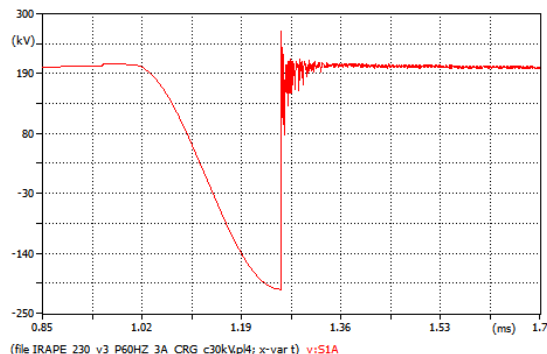


FIGURA 7 – Tensão na fase A do banco de reatores no desligamento do banco. Corte de corrente de 3 A

A Figura 8, a seguir, apresenta a comparação entre o espectro dos transitórios frente ao envelope dos fenômenos cobertos pela onda de impulso atmosférico padronizada ($1.2\mu\text{s} / 50\mu\text{s}$).

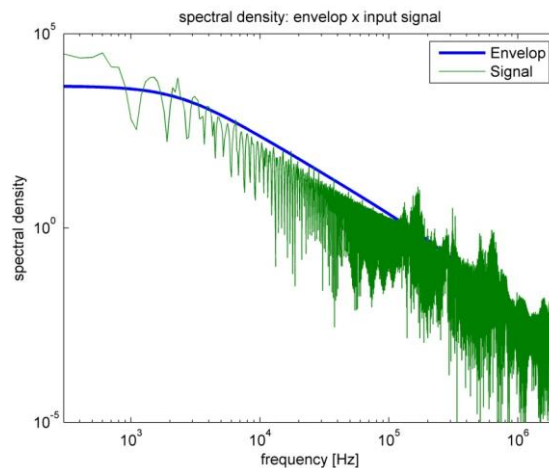


FIGURA 8 – Comparação entre espectro do transitório e envelope de ondas padronizadas - NBI 950 kV - Reignição

3.3 Sobreensões Associadas à Energização

A partir de uma análise estatística de 200 fechamentos considerando os contatos do disjuntor independentes e dispersão dos tempos de fechamento com desvio padrão σ de 1,25 ms, identificou-se aquela que gerou a maior sobreensão nos bornes do reator. Os tempos do fechamento das fases do disjuntor, referentes a esse caso mais crítico, foram, então, aplicados a um caso determinístico para determinação da forma de onda da de sobreensão e energias dos para-raios.

A análise da energização do banco de reatores apresentou como resultado uma sobreensão máxima de 1,4 pu (Base: $230\sqrt{2}/\sqrt{3}$ kV), Figura 9, também bastante inferior ao NBI de 950 kVp, considerado como referência. Os valores de energias verificadas nos para-raios de 230 kV ficaram abaixo do limite desses equipamentos.

Tabela 4 – Máxima tensão nos bornes do banco de reatores resultante da energização estatística com fechamento da chave em 6,5 ms e σ de 1,25 ms e tensão pré-energização de 1,05 pu.

Reator S1 230 kV				Energia máx. para-raios externo 230 kV (J)
Vmed. (pu)	σ (pu)	Vmáx. (kV)	Vmáx. (pu)	
1,338	3,84E-02	264,17	1,407	65

As tensões nos bornes do reator S1 para o pior caso, obtido a partir da análise estatística, são apresentadas na Figura 9. Devido à modelagem detalhada da subestação, pode-se observar a presença de componentes de alta frequência nas tensões, porém bastantes atenuadas e de baixas amplitudes.

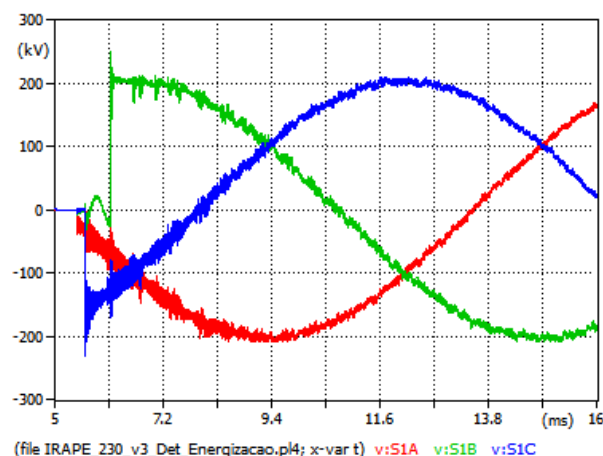


FIGURA 9 – Tensão vista nos bornes do banco de reatores resultante da energização estatística com fechamento da chave em 6,5 ms e σ de 1,25 ms e tensão pré-energização de 1,05 pu. Maior valor de 264,2 kV na fase B

4.0 - CONCLUSÃO

Como pode ser visto acima, a utilização dos reatores a seco com núcleo de ar em sistemas de 230 kV é sem duvidas uma alternativa viável para a compensação de reativos do sistema elétrico.

Muito se tem discutido com relação a soluções “verdes” para o sistema elétrico. Neste sentido os RSNA contribuem por não necessitar de óleo isolante e ser constituído de materiais não agressivos ao meio ambiente em caso de falhas.

As diferenças construtivas permitem uma instalação mais simples e em menor tempo se comparado ao reator imerso em óleo. Também existem ganhos significativos relacionados a operação e manutenção destes equipamentos.

O seu uso poderá ser mais abrangente caso seja realizada uma adequação nos níveis de perdas estabelecidos no Procedimento de Rede. Garantindo assim uma solução financeiramente interessante, mesmo que se valorizados os custos relativos a diferença de perdas entre a solução RSNA e isolada em óleo.

O equipamento mostrou excelente comportamento durante os transitórios eletromagnéticos. Sendo capaz de suportar os efeitos referentes as manobras estudadas acima, mesmo com os fatores de severidade encontrados sendo muito superiores a unidade. Isto é possível devido ao projeto que garante uma suportabilidade a impulsos atmosféricos integral a cada módulo (950 kV), proporcionando assim um alto fator de segurança aos reatores (6).

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dry-Type, Air-Core Shunt Reactors Relay Protection, 20/04/2016 – Trench;
- (2) High Voltage Dry-Type Air-Core Shunt Reactors, Cigrè 2014;
- (3) Procedimento de Rede, Submodulo 2.3 de Janeiro de 2017;
- (4) IEC1233 - high voltage alternating current-breakers inductive load switching –first edition -1994;
- (5) Estudo de Transitórios Eletromagnéticos - Manobra e coordenação de isolamento dos reatores de Barra de 230/√3 kV, 6+1X13,3 MVar, ETG Engenharia, de Novembro de 2015;
- (6) Resposta ao Estudo de Transitórios Eletromagnéticos - Manobra e coordenação de isolamento dos reatores de Barra de 230/√3 kV, 6+1X13,3 MVar. 28003-SIEMENS-095 rev. A, de Dezembro de 2015.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Vicente de Oliveira Jr, graduado em Engenharia Elétrica com especialidade em Engenharia Industrial pela Universidade Federal de São João Del Rei, UFSJ. Atua por mais de 15 anos na Siemens Ltda. onde se especializou em projetos de equipamentos elétricos de alta e média tensão com ênfase em reatores a seco com núcleo de ar e bobinas de bloqueio.

Marcos Bernert Schwarz, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Trabalhou em diversas empresas fabricantes de equipamentos de manobra, como Lorenzetti, Merlin Gerin, Schneider, VAtch e Areva. Atualmente é responsável pela área de Engenharia de Aplicação da unidade de produtos de alta tensão da Siemens Ltda.

Daniel Brunelli de Andrade, graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. Trabalha há mais de 10 anos nas áreas de Vendas e Engenharia de aplicação de equipamentos de alta tensão.

Angelica da Costa Oliveira Rocha, graduada em Engenharia Elétrica com especialidade de Sistemas de Potência pela Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Trabalhou por mais de 30 anos na CEMIG GT onde se especializou em Estudos Especiais de Sistemas de Potência com foco em transitórios eletromagnéticos, qualidade de energia, análise de ocorrências e suporte a especificação de Equipamentos. Atualmente atua como consultora na ATG Engenharia.