



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

GSC 30
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

ESTUDOS DE ESTADO PERMANENTE, TRANSITÓRIOS E HARMÔNICOS DE UM PROTÓTIPO DE REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL

Marcelo J. A. Maia* **M. Afonso de Carvalho Jr.**** **Luiz A. Magnata da Fonte****
Fabiana S. Leal* **Jurandir A. Cavalcanti***

***COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO (Chesf)**
****UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)**

RESUMO

Os reatores de saturação natural (RSN) têm, na atualidade, atraído o interesse de várias empresas do setor elétrico nacional graças aos benefícios que oferecem à operação dos sistemas de potência. Na Chesf o interesse apresentado para o RSN foi para compensação de linhas de transmissão em substituição aos tradicionais reatores lineares. Com essa finalidade, firmou um projeto de P&D com a UFPE para as investigações necessárias.

O presente informe técnico descreve parte dos trabalhos desenvolvidos, particularmente os estudos de estado permanente, transitórios e harmônicos para colocação em operação de um protótipo de RSN de 5,4 Mvar e 13,8 kV.

PALAVRAS-CHAVE

Reator de Saturação Natural, Controle de Tensão, Fluxo de Potência, Tensões Harmônicas

1.0 - INTRODUÇÃO

A aplicação de reatores de saturação natural (RSN) para a compensação de linhas de transmissão em substituição aos tradicionais reatores lineares tem sido motivo de diversas pesquisas realizadas na Chesf e na UFPE. Os ganhos de potência transmitida pelas linhas assim compensadas, bem como o aumento da margem de estabilidade de tensão, conforme demonstram as simulações computacionais efetuadas (1, 2), revelam a enorme potencialidade dessa alternativa. Além desses atributos, os RSNs também apresentam uma resposta transitória rápida (3), a qual se alia às já conhecidas qualidades dos transformadores de potência: alta confiabilidade, longa durabilidade, grande simplicidade de instalação, manutenção e operação, e baixo custo de produção.

A preferência pelos RSNs em detrimento dos dispositivos com base em eletrônica de potência deve-se não somente aos aspectos econômicos, mas também ao crescente obsolescência experimentado pelos últimos, conseqüência da constante mudança de tecnologia. Assim, muito antes do retorno do investimento inicial tomar lugar, novas aplicações financeiras para modernização far-se-ão necessárias, pois deverá haver dificuldade de encontrar peças de reposição no mercado.

Os aspectos relacionados acima são, evidentemente, de grande interesse para as empresas do setor elétrico e, particularmente, para a Chesf, o que motivou a contratação da UFPE, através de um projeto de P&D, para dimensionar, construir e instalar um protótipo de RSN no barramento de 13,8 kV de uma de suas subestações (SE Mossoró), para as necessárias investigações. Os estudos de desempenho em estado permanente, transitório e harmônico desse protótipo serão descritos no presente informe técnico.

2.0 - ESTUDOS DE ESTADO PERMANENTE

A característica operacional definida para o RSN destinado à subestação estudada, Figura 1, estabelece que, para tensões inferiores a 12862 V, esse equipamento não deverá absorver potência reativa superior a 10% do seu valor nominal, ou seja, aproximadamente 0,5 Mvar. Em tal ponto de funcionamento, o RSN será dito estar operando em vazio. Acima desse valor de tensão, o consumo do RSN crescerá rapidamente, alcançando a plena carga, 5,4 Mvar, na marca dos 14297 V. Tal regime operacional deverá, naturalmente, ser compatível com as exigências de potência reativa da barra de conexão do RSN. Para examinar o atendimento desse requisito, fluxos de potência oriundos da base dados do ONS foram simulados no programa ANAREDE do Cepel no horizonte de interesse, 2007, ano previsto para instalação do RSN.

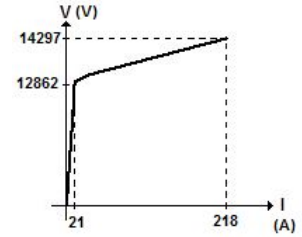


FIGURA 1

2.1 Modelo do RSN

O modelo matemático concebido para representar o RSN em regime permanente é constituído por uma fonte de tensão constante, V_s , em série com uma reatância linear x_s , tal como assinala a Figura 2. A tensão da fonte é, exatamente, a tensão de início de saturação do RSN, para o caso em apreço:

$$V_s = 12862 V = 0,932 pu$$

A inclinação da característica $V \times I$ fornece a reatância x_s , como mostra a Figura 2, expressa em ohms por:

$$x_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_n - V_s}{I_n} = \left(\frac{V_n - V_s}{I_n} \right) \left(\frac{V_n}{V_n} \right) = \frac{(V_n - V_s)V_n}{Q_n}$$

$$x_s^{pu} = \frac{x_s}{V_b^2 / Q_b} = \left(\frac{V_n - V_s}{V_b} \right) \left(\frac{V_n}{V_b} \right) \left(\frac{Q_b}{Q_n} \right)$$

e em pu:

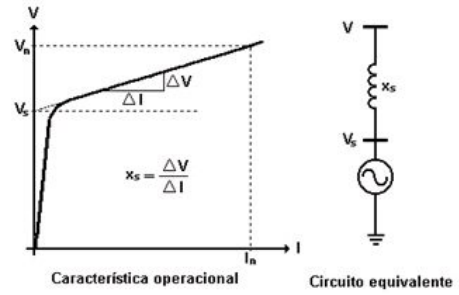


FIGURA 2

Sendo a tensão e a potência nominal do RSN respectivamente:

$$V_n = 14297 V = 1,036 pu$$

$$Q_n = 5,4 MVA$$

e a potência de base do ANAREDE:

$$Q_b = 100 MVA$$

a reatância em p.u. será:

$$x_s^{pu} = 1,9950 pu$$

Convertendo-se esse valor para % obtém-se:

$$x_s^{\%} = 199,50 \%$$

Para implementação desse modelo do RSN no programa ANAREDE, a barra da fonte de tensão da Figura 2 é assumida como uma barra de tensão controlada (PV) com valor fixado em V_s e interligada à barra de conexão do RSN ao sistema, considerada uma barra de carga (PQ), pela reatância x_s . Para circunscrever a ação desse modelo exclusivamente à região indutiva, impedindo, assim, a circulação de corrente quando a tensão nos terminais do RSN for inferior a V_s , o limite superior de potência reativa da barra de tensão controlada é anulado. Assim procedendo, sempre que a tensão na barra de carga, V , cair abaixo de V_s , a impossibilidade de manter tal valor por falta de um aporte adequado de reativo, importará na comutação dessa barra do tipo PV para PQ com carga nula, como é de praxe nos programas. Também os limites de potência ativa dessa barra PV são anulados, já que, para efeito dos estudos de estado permanente, o RSN é considerado sem perdas.

2.2 Casos-Base

Considerando-se que a instalação do protótipo de RSN se dará no ano de 2007, as configurações e condições de carregamento do sistema foram retiradas dos arquivos correspondentes, fornecidos pelo ONS para o sistema interligado nacional, a saber:

- Carga leve
(Jul-07-LEV*PAR 05-07*01/09/04);
- Carga média
(Jul-07-MED*PAR 05-07*01/09/04);
- Carga pesada
(Dez-07-PES*PAR05-07*01/09/04).

Com base nesses arquivos, fluxos de potência foram simulados com o auxílio do programa ANAREDE, cujos resultados, especificamente para as barras associadas à subestação de Mossoró, podem ser apreciados na Figura 3. O reator linear, atualmente conectado à barra 5445 dessa subestação e que deverá ser alvo de substituição, somente permanecerá em operação durante o período de carga leve, sendo retirado do sistema por ocasião das cargas média e pesada.

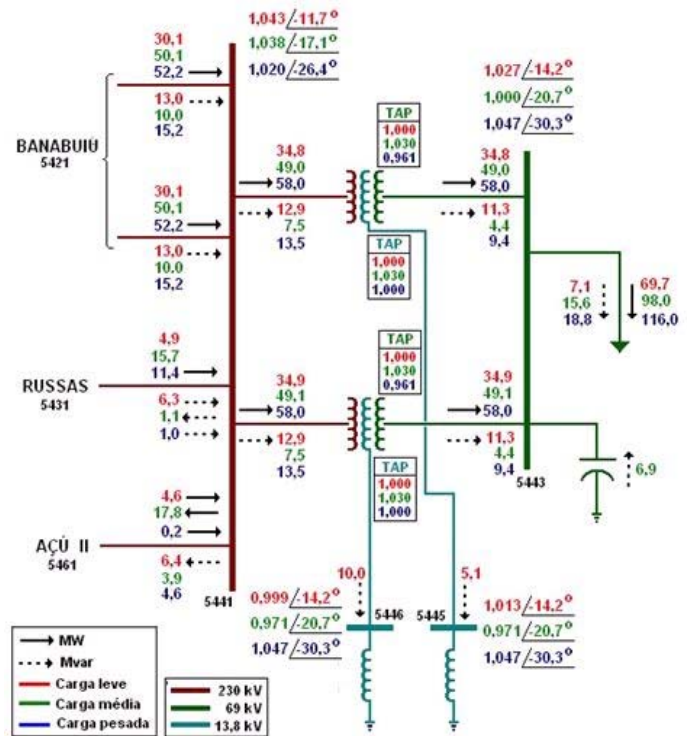


FIGURA 3

2.2 Casos-Estudados

Os casos-base descritos no item anterior foram modificados com a remoção do reator linear da barra 5445 da subestação de Mossoró e introdução no seu lugar do RSN especificado na Figura 1, o qual foi modelado no programa ANAREDE tal como descrito no tópico 2.1. Os fluxos de potência obtidos nas simulações do sistema interligado nacional estão registrados na Figura 4, novamente apenas no que diz respeito às barras da subestação de Mossoró.

Como se observa na Figura 4, o RSN ajustou automaticamente a sua demanda de potência reativa aos diferentes carregamentos do sistema, assegurando, em todos os casos simulados, condições operacionais satisfatórias de tensão para as barras da subestação. Também se constata na Figura 4 que os comutadores de derivações dos transformadores permaneceram fixos em todos os regimes de trabalho, 0,977 e 1,000 respectivamente, não exigindo, dessa maneira, qualquer ação do centro de operação. Na configuração atual com o reator linear conectado à rede, cada condição de carregamento do sistema solicitará posições distintas para os comutadores, como se verifica na Figura 3. A modificação no comutador somente se fará necessária quando se pretender que o RSN efetue uma incursão completa pela sua faixa de trabalho, o que deverá ser requerido por ocasião dos ensaios programados para o comissionamento.

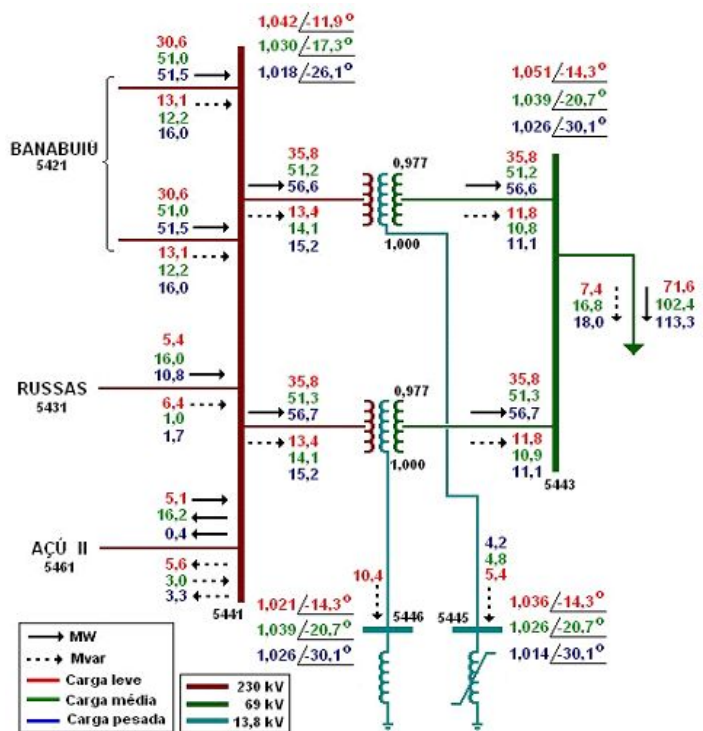


FIGURA 4

3.0 - ESTUDOS TRANSITÓRIOS

A instalação do RSN na barra de 13,8 kV da subestação de Mossoró, como foi explicitado, possui um caráter eminentemente experimental, não tendo sido planejada, portanto, com a pretensão de introduzir qualquer melhoria no controle da tensão do sistema. Todavia, como pretende-se que esse RSN substitua um reator linear, atualmente em operação na mesma barra e desenvolvendo a mesma potência, presume-se algum benefício extra com a sua entrada em operação. Evidentemente que a reduzida capacidade do RSN perante o porte do Subsistema Norte da Chesf restringirá, obviamente, a sua esfera de influência à imediata vizinhança do ponto de instalação. Dessa maneira, os estudos de natureza transitória com o intuito de aferir o desempenho do RSN frente ao reator linear, alvo da substituição, circunscreveram-se a eventos na subestação de Mossoró:

- Manobra de energização do RSN na barra de conexão;
- Rejeição total da carga do setor de 69 kV da SE Mossoró;
- Abertura de uma das linhas de transmissão Banabuiú/Mossoró.

As simulações no EMTP-ATP dos eventos arrolados observaram as duas condições extremas de funcionamento da rede, cargas leve e pesada, e foram conduzidas para alguns exemplares de RSNs, eleitos como os mais apropriados para aplicação pretendida.

3.1 Modelagem dos Componentes do Sistema

Os componentes do sistema de potência foram modelados no EMTP-ATP da forma trifásica tradicionalmente consagrada para esse fim, quais sejam:

- parâmetros R-L-C distribuídos para as linhas de transmissão;
- parâmetros R-L-C concentrados para os reatores lineares e cargas;
- modelo "T" para os transformadores de potência.

A modelagem dos RSNs no EMTP-ATP para os estudos mencionados foram desenvolvidas durante as pesquisas realizadas na UFPE (4), onde cada núcleo desse equipamento é tratado como um transformador de múltiplos enrolamentos e representado por intermédio do componente "Saturable transformer", Figura 5. Para a implementação de tal modelo, os seguintes dados de cada reator deverão ser conhecidos:

- número de espiras dos enrolamentos;
- resistência e reatância de dispersão dos enrolamentos;
- curva de magnetização dos núcleos.

Tais parâmetros foram obtidos durante os procedimentos de projeto de cada um dos RSNs, uma vez que o processo reverso utilizado com tal finalidade requer essa modelagem. Considerou-se no projeto a curva $B \times H$, o tipo de aço se GO-Grão Orientado ou GNO-Grão Não Orientado e três disposições dos enrolamentos nas colunas da estrutura magnética, sendo uma com ligação série e duas com ligação paralelo (5).

3.2 Rejeição da Carga do Setor 69 kV

A rejeição da carga do setor de 69 kV da SE Mossoró foi simulada na situação mais crítica, qual seja, com o sistema suprindo a sua carga máxima. Na configuração original, o Subsistema Mossoró não conta, nesse regime de funcionamento, com o concurso dos reatores lineares conectados às barras de 13,8 kV da subestação em tela, porém, mesmo assim, não se constatou, na rejeição, variações expressivas da tensão na barra de 69 kV. Em estado permanente, o crescimento registrado foi de 0,045 p.u.. Transitoriamente, nos primeiros ciclos após o evento da rejeição, como indica a Figura 6, a tensão elevou-se com maior intensidade, alcançando um máximo de 1,213 p.u. como seria esperado.

Considerando-se que o RSN destinado a SE Mossoró foi especificado para absorver apenas 5,4 Mvar quando a tensão apresentar uma variação de 11%, é evidente que sua contribuição para minimizar os efeitos no estado permanente da rejeição de carga no 69 kV descrita é bastante limitada. Um exame na Figura 7 do comportamento da tensão na barra de 69 kV da SE Mossoró quando um RSN (com ligação série dos enrolamentos primários utilizando o aço do tipo GNO e com saturação principiando em 1,70 T) foi conectado à barra de 13,8 kV da mesma, não aponta qualquer mudança importante. De fato, para conter a tensão nos patamares anteriores à rejeição de carga, seria necessário um RSN que absorvesse uma potência reativa no mínimo igual ao valor descartado, 17,6 Mvar, e isso mediante uma elevação de apenas 4,5% na tensão. O comportamento ora descrito para o RSN com ligação série foi verificado igualmente para todos os demais tipos de RSN desenvolvidos para a subestação de Mossoró.

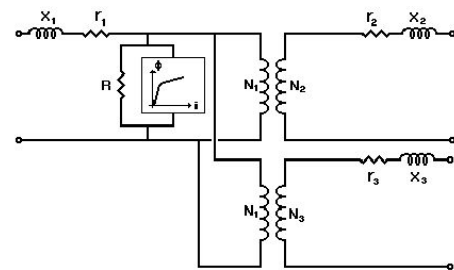


FIGURA 5

É importante registrar que imediatamente após a ocorrência da rejeição, o RSN reagiu prontamente, elevando o consumo de corrente de 0,86 para até 1,17 p.u. como se verifica na Figura 8, outra vez retratando a rápida resposta do RSN com ligação série e com 1,70 T de indução de saturação. A despeito dessa presteza, a atuação do RSN mostrou-se, pelas razões já citadas, insuficiente para conter o crescimento da tensão nas barras de Mossoró com o evento da rejeição de carga. Esse mesmo desempenho foi observado para todos os tipos eleitos para aplicação em Mossoró, de sorte que a mesma conclusão apresentada acima também é válida para tais RSNs. O que é importante assinalar é que a atuação do RSN, já no primeiro ciclo após a ocorrência do evento, confirma as informações registradas por outros autores (3) e permite considerar tais equipamentos como de resposta praticamente instantânea.

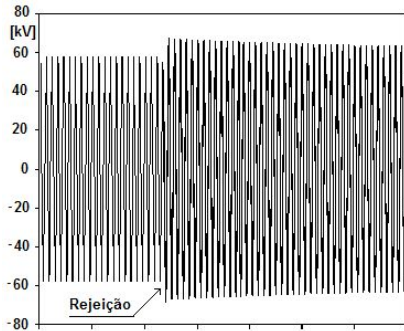


FIGURA 6

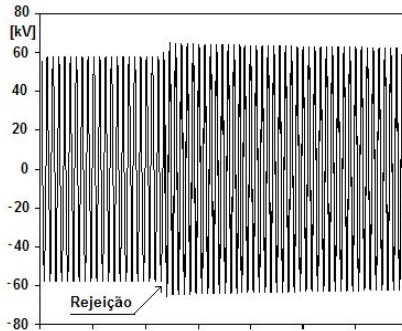


FIGURA 7

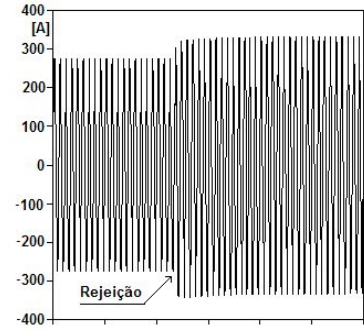


FIGURA 8

3.3 Abertura da Linha de Transmissão

O desligamento de uma das linhas de transmissão derivada de Banabuiú e que supre uma parcela importante da carga da subestação de Mossoró foi efetuada com o sistema operando em carga plena. De acordo com as simulações no EMTP-ATP, essa operação produziu uma redução muito pequena na tensão das barras dessa subestação, não superando 0,02 p.u. para a configuração correspondente ao ano de 2007. A Figura 9 ilustra, justamente, esse comportamento da tensão para a barra de 69 kV da SE Mossoró.

A introdução de um RSN no barramento de 13,8 kV dessa subestação não ensejou qualquer benefício adicional para a tensão durante o evento da abertura da mesma linha oriunda de Banabuiú, como mostra a Figura 10. Os registros dessa figura referem-se especificamente ao RSN com ligação paralela dos enrolamentos primários aos moldes de um autotransformador, modelo desenvolvido pela TTU (Tallinn Technical University), utilizando o aço do tipo GNO e saturando em 1,80 T. Todavia, o mesmo comportamento foi verificado para todos os demais tipos de RSN dimensionados para a subestação de Mossoró. Embora o RSN tenha promovido uma redução da corrente consumida, tão logo a tensão iniciou o processo de queda, essa reação foi insuficiente para manter os padrões anteriores ao desligamento da linha. Como já foi mencionado, tal fato se deve à própria característica operacional do RSN, a qual não foi definida com essa finalidade específica, mas para permitir as investigações previstas no projeto de P&D.

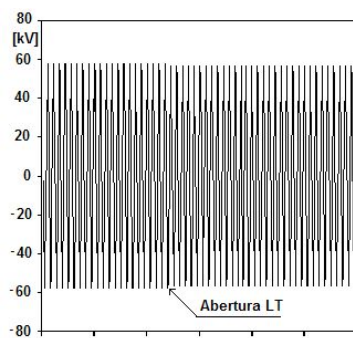


FIGURA 9

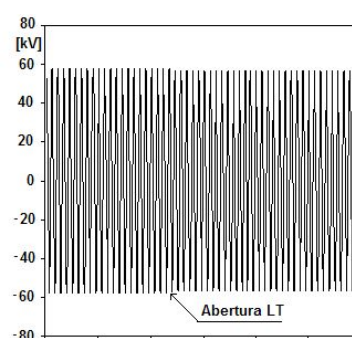


FIGURA 10

3.4 Energização do RSN

As simulações de energização dos RSNs foram efetuadas na situação operacional mais desfavorável, exatamente com o sistema configurado em carga leve, ocasião em que a tensão na barra de conexão alcançará sua magnitude máxima. Também o instante de fechamento da chave foi eleito de sorte a proporcionar a maior componente contínua possível, ou seja, no instante em que a tensão aplicada ao RSN apresenta um valor nulo, já que a resistência do mesmo é praticamente desprezível perante a reatância. Nas condições estipuladas, a corrente solicitada pelos RSNs assumiu os valores mais intensos, como de fato mostra a Figura 11, que registra a

corrente nas três fases dos dois diferentes tipos de RSNs, enrolamentos primários ligados em paralelo com indução de saturação de 1,80 T e enrolamentos ligados em série com indução de 1,70 T.

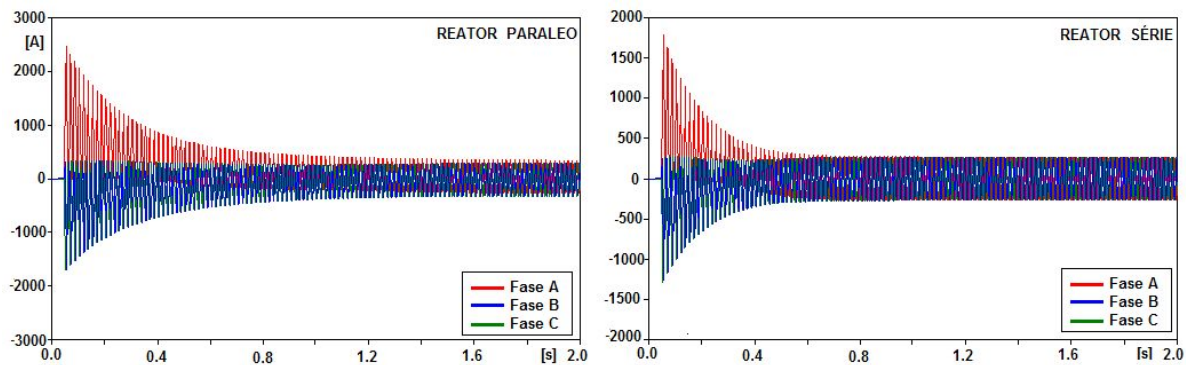


FIGURA 11

Uma análise dos afundamentos de tensão produzidos nas barras da subestação de Mossoró durante o procedimento de energização dos RSNs mostrou que essa redução atingiria, no máximo, 4% no barramento de 69 kV, o que denota que tais manobras não serão capazes de introduzir perturbações de monta no sistema.

4.0 - ESTUDOS HARMÔNICOS

A análise harmônica do Subsistema Mossoró foi efetuada com o auxílio da rotina "Frequency Scan" do EMTP-ATP e abrangeu o intervalo compreendido entre 60 e 5000 Hz. A impedância do sistema vista dos terminais de instalação do RSN, barramento de 13,8 kV de Mossoró, obtida da forma descrita é apresentada na Figura 12 para duas situações distintas; com e sem o banco de capacitores do setor de 69 kV dessa subestação. No primeiro caso, somente frequências na imediata vizinhança do ponto de ressonância, 540 Hz (Nona harmônica), interessam à análise. Ora, essa frequência não está incluída entre as componentes harmônicas características dos diferentes modelos de RSN, pois essas são dadas pela expressão:

$$h = 18n \pm 1 \quad \forall \quad n \in \mathbb{N}$$

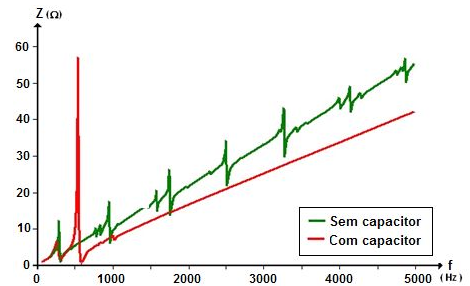


FIGURA 12

Portanto, nenhuma distorção harmônica importante será introduzida pelo RSN nessa configuração.

Por outro lado, com o capacitor fora de operação, a impedância do sistema apresenta vários pontos de ressonância devido às linhas de transmissão. O valor da impedância nas frequências típicas do RSN é, todavia, também insuficiente para causar distorções harmônicas relevantes na tensão do sistema, como se observa na Tabela 1, que contém:

- o valor da impedância do sistema nas frequências características do RSN, $Z(\Omega)$;
- o valor da máxima corrente harmônica produzida pelos dois tipos de RSNs, um com ligação série dos enrolamentos e outro com ligação paralela, $I(\Omega)$;
- a tensão harmônica gerada na barra de 13,8 kV de Mossoró calculada por $V(\Omega) = Z(\Omega) \times I(\Omega)$.

5.0 - CONCLUSÃO

Os estudos ora apresentados revelam que a conexão no barramento de 13,8 kV da subestação de Mossoró de qualquer um dos modelos de RSN não deverá introduzir transtornos significativos à operação do sistema, pois, como foi mostrado:

- as distorções harmônicas geradas por tais RSNs situam-se abaixo dos limites prescritos nas normas ora vigentes no setor elétrico brasileiro;

TABELA 1

HARMÔNICA		IMPEDÂNCIA (Ω)	CORRENTE (A)		TENSÃO (V)	
Ordem	Frequência (Hz)		Série	Paralelo	Série	Paralelo
17	1020	10,164	6,272	2,077	63,749	21,111
19	1140	12,139	6,082	1,998	72,289	24,254
35	2100	23,032	0,828	0,144	19,070	3,317
37	2220	24,665	0,160	0,214	3,946	5,920
53	3180	35,906	0,072	0,143	2,585	5,135
55	3300	34,055	0,088	0,026	2,997	0,885
71	4260	46,917	0,028	0,017	1,314	0,798
73	4380	47,837	0,032	0,057	1,531	2,727

- a queda de tensão provocada pela corrente solicitada por ocasião da energização dos diferentes tipos de RSNs encontra-se dentro de patamares aceitáveis.

Quanto aos benefícios auferidos com a aplicação do RSN, os estudos distinguem:

- a suspensão das manobras diárias ora exigidas pelo reator linear instalado na subestação de Mossoró;
- a sustação das mudanças constantes nos comutadores de derivações dos transformadores 230/69/13,8 kV.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines - Carvalho, M. A. e Fonte, L. A. M. - IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001;
- (2) Análise Comparativa entre Reatores Convencionais e Reatores Saturados: Estudo de Caso para a LT Colinas-Sobradinho – Maia M. J. A. e outros – XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005;
- (3) Ten Year's Operational Experience with Saturated Reactors – Thanawala H. L., Williams W. P., Young D.J. – GEC Journal of Acience and Technology, vol. 45, no. 3, 1979;
- (4) Controle de Tensão em Transitórios e em Estado Permanente de Linhas Longas de Transmissão em EAT – Carvalho, M. A. e Fonte, L. A. M – XVI SNPTEE, Campinas, 2001;
- (5) Reator de Saturação Natural: Estudos para o Projeto de um Protótipo – Maia M. J. A. e outros – XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo José Albuquerque Maia

Nascido em Campina Grande, PB, em 12 de maio de 1956;

MBA em Administração (1997): FGV-RJ, Especialização em Sistemas Elétricos (1980): UNIFEI-MG e Graduação em Engenharia Elétrica (1978): UFCG-PB;

Empresa: Chesf – Desde 1978;

Assessor da Superintendência de Planejamento da Expansão da Transmissão.

Luiz Antônio Magnata da Fonte

Nascido no Recife, PE, em 08 de janeiro de 1947;

Doutorado (2004), Mestrado (1997) e Graduação (1969) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco;

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Manoel Afonso de Carvalho Jr.

Nascido em Salvador, BA, em 10 de agosto de 1950;

Ph. D (1983): UMIST-Inglaterra, Graduação (1973) em Engenharia Elétrica: UFBA-Bahia;

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Fabiana da Silva Leal

Nascida no Recife, PE, em 07 de outubro de 1972;

Mestrado (2000) e Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco;

Empresa: Chesf – Desde 2002, Engenheira da Divisão de Estudos e Tecnologia de Alta Tensão-DEAT/DES/SPE.

Jurandir de Almeida Cavalcanti

Nascido em Garanhuns, PE, em 06 de abril de 1954;

MBA em Finanças (2004): FGV-RJ; Especialização em Sistemas Elétricos (1984): UFSC-SC e Graduação (1978) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco;

Empresa: Chesf – Desde 1978, Engenheiro da Divisão de Planejamento do sistema de Transmissão - DEPT/DES/SPE.