

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**GANHOS NA TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA PELA SUBSTITUIÇÃO DE REATORES LINEARES
DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR REATORES DE SATURAÇÃO NATURAL (RSN)**

Marcelo José A. Maia(*) Jurandir A. Cavalcanti Manoel Afonso C. Junior Luiz A. Magnata da Fonte

Chesf

UFPE

RESUMO

Os reatores de saturação natural (RSN) se constituem em um equipamento de grande versatilidade, podendo ser útil em diversas situações operacionais dos sistemas de potência. Na década de 60, em face do conhecimento ainda incipiente no tocante a eletrônica de potência, os RSN foram largamente empregados para a compensação de reativos, flutuação de tensão em fornos a arco, harmônicos, atenuação de VTCD, regulação de tensão etc.

Este trabalho apresenta as análises efetuadas com objetivo de verificar o ganho no atendimento ao mercado da área leste da região Nordeste do Brasil, associado à aplicação de RSN em substituição a reatores lineares fixos (RL), utilizados nas linhas de transmissão de 500 kV.

Palavra-Chave: Reator de Saturação Natural, Reator Linear, Compensação Reativa, Planejamento da Expansão, Regime Permanente e Estabilidade de tensão.

1.0 - HISTÓRICO

Os reatores de saturação natural (RSN) se constituem em um equipamento de grande versatilidade, podendo ser útil em diversas situações operacionais dos sistemas de potência. Na década de 60, em face do conhecimento ainda incipiente no tocante a eletrônica de potência, tais equipamentos foram largamente empregados para a compensação de reativos, flutuação de tensão na operação de fornos a arco (flicker), harmônicos, atenuação de VTCD (variação transitória de curta duração, voltage sag e voltage swell), regulação de tensão como mostra a Figura 1 (1, 2). Para isso, o RSN era conectado em derivação aos moldes de um reator linear (RL), em geral, empregando um transformador elevador e também capacitores, quer para a correção da inclinação da curva característica, quer como fonte de potência reativa.

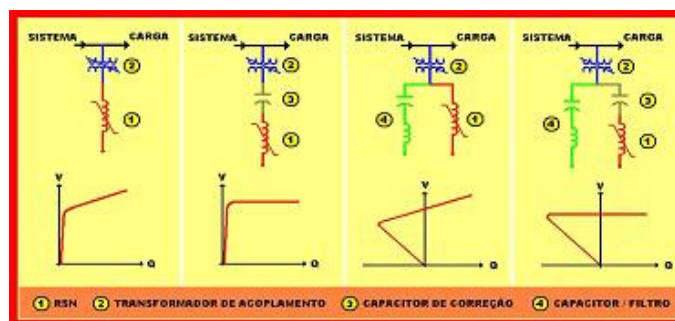
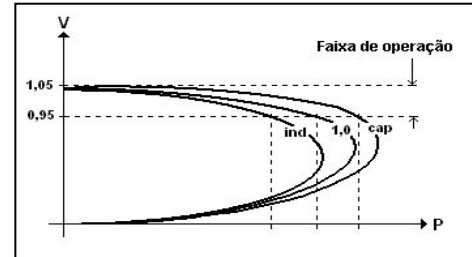


FIGURA 1 – Diagramas Elementares

2.0 - INTRODUÇÃO

Um dos aspectos importantes no planejamento dos sistemas de transmissão longos em Extra Alta Tensão (EAT) diz respeito às sobretensões produzidas pelo efeito Ferranti durante energizações e por ocasião das rejeições de carga. Usualmente, para assegurar níveis aceitáveis de tensão, as empresas de energia elétrica lançam mão de um recurso convencional: a compensação transversal por reatores lineares fixos. Tais equipamentos, quando utilizados com essa finalidade, deverão permanecer às vezes continuamente em operação, o que afetará a capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão.

A potência e a tensão nos terminais de uma linha de transmissão, alimentada por uma fonte do tipo barra infinita, relacionam-se conforme as curvas da figura ao lado, quando o fator de potência da carga é tomado como parâmetro. De acordo com as mesmas, na faixa de tensão normalizada para o sistema brasileiro [0.95 a 1.05 pu], a potência sofre uma redução significativa quando o fator de potência da carga passa da região capacitiva para a indutiva. Ora, esse é justamente o comportamento observado quando um reator linear fixo é aplicado aos terminais da linha a guisa de compensação.



Essa perda de capacidade de transmissão poderia ser evitada se, ao invés da injeção fixa de reativos, uma injeção de caráter variável fosse utilizada e, nesse particular, a indústria de equipamentos elétricos oferece duas alternativas; os tradicionais compensadores rotativos ou os modernos compensadores estáticos, concebidos com base na eletrônica de potência. Ambas, todavia, exigem elevados investimentos de curto, médio e longo prazo, o que restringe bastante o âmbito de aplicação dessas opções. Tal cenário estimulou a Chesf/UFPE na investigação de uma alternativa que, embora antiga, ainda se mostra atual para a questão sob exame: os RSN. De fato, um exame da característica operacional desse tipo de reator, Figura 2, revela os principais atrativos desse equipamento para a aplicação pretendida:

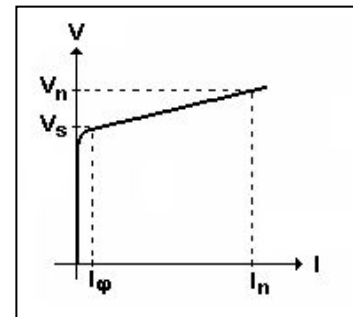


FIGURA 2

- nas tensões mais baixas, verificadas por ocasião do carregamento máximo do sistema, o reator operará na vizinhança do ponto (V_s, I_φ), demandando, portanto, um valor irrisório de potência em torno de 10% do seu valor nominal;
- à medida que a carga do sistema reduzir-se, a tensão do mesmo elevar-se-á e o ponto de operação do reator deslocar-se-á para (V_n, I_n), crescendo o seu consumo para o valor requerido pela compensação.

Estudos efetuados no âmbito do sistema elétrico brasileiro, (3, 4), atestam enfaticamente os ganhos auferidos com a substituição dos reatores lineares fixos por RSN.

Afora esses aspectos, também do ponto de vista econômico os RSN mostram-se viáveis como uma alternativa para a compensação, haja vista que seus custos de produção deverão equiparar-se àqueles de um transformador de dois enrolamentos com o mesmo porte. Trata-se, pois, de um equipamento de preço bastante moderado quando confrontado com os compensadores rotativos ou estáticos.

Essa similaridade com os transformadores de potência faculta outros méritos para os RSN: manutenção de baixo custo, operação desassistida, elevada confiabilidade, resistências às intempéries e durabilidade. Tais particularidades serão de grande relevância quando a geografia do sistema ditar a instalação de dispositivos de compensação em locais distantes e de difícil acesso. No caso particular do sistema brasileiro, a exploração do potencial hidrelétrico da Amazônia para atender a demanda industrial das regiões Sudeste e Nordeste apresenta-se como um campo muito promissor para a experimentação dos RSN.

Apesar de todos esses elementos concorrerem para tornar, sem qualquer dúvida, bastante atrativo o emprego dos RSN como compensador transversal de linhas de transmissão, as empresas ainda guardam, em geral, uma posição conservadora em favor dos reatores fixos. Uma das razões para essa postura reside, em parte, na ausência de um modelo matemático simples, porém satisfatório, para representar os RSN nos estudos de regime permanente.

Tal fato não é mais impeditivo, pois uma metodologia simplificada, porém precisa, para dimensionar e modelar os RSN nos estudos de regime permanente dos sistemas de potência foi concebido dentro do projeto de P&D Chesf/UFPE (5).

Para validação dessa metodologia foi investigada na aplicação de RSN na compensação transversal das grandes linhas de transmissão, em 500 kV, da área leste da região Nordeste do Brasil, parte integrante deste informe técnico. Os resultados obtidos recomendam a metodologia ora proposta e apontam os benefícios auferidos com essa aplicação, consistindo na elevação da capacidade e da margem de estabilidade dessa área.

3.0 - IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO RSN NO PROGRAMA DE FLUXO D EPOTÊNCIA

Uma apreciação das diferentes rotinas utilizadas pelos programas de fluxo de potência aponta que o modelo ora proposto para a representação de um RSN é idêntico àquele empregado para os equivalentes de Thevenin de partes das redes elétricas. De fato, esse equivalente é composto por uma fonte de tensão constante em série com uma impedância também constante, exatamente como no modelo da Figura 3. Portanto, bastará seguir os passos já estabelecidos com essa finalidade também para os RSN:

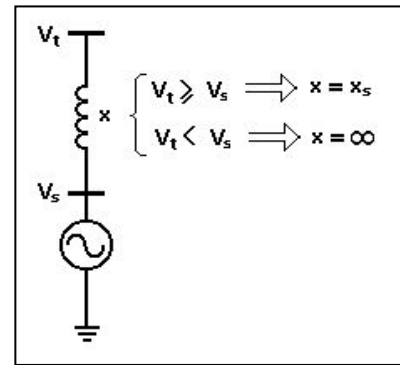


FIGURA 3

- Definição de uma barra de tensão controlada, tipo PV na nomenclatura do fluxo de carga, com magnitude V_s para simular a barra interna do RSN;
- Definição de uma barra de carga, tipo PQ, interligada à anterior pela reatância x_s .

A última barra, embora dita de carga, representa, na verdade, uma barra de passagem, de modo que nenhuma potência deverá ser associada à mesma, tal como ocorre com a simulação dos terminais de uma linha de transmissão.

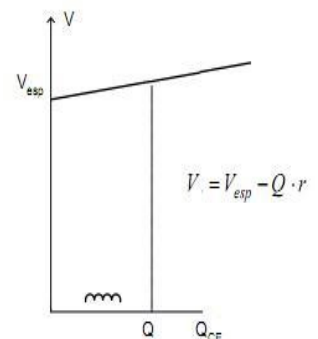
Os condicionantes de potência impostos à barra de tensão controlada, por sua vez, deverão ser escolhidos tendo em mente os requisitos próprios do RSN. No que tange à potência ativa, o consumo e os limites deverão ser anulados, pois o RSN foi concebido sem perdas. Já no tocante à potência reativa, além do consumo, apenas o limite correspondente à parcela indutiva fornecida pela barra, operação como capacitor, deverá ser anulado. Assim procedendo, sempre que a tensão na barra de carga, V_t , 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 praxe nos programas do gênero. Assim, tudo se passa como se o RSN fosse desconectado da rede.

Para efeito das análises de estado permanente, dimensionar um RSN é estabelecer a curva tensão×corrente que o mesmo deverá obedecer e, para isso, bastará que sejam caracterizados os pontos extremos da mesma: V_n , I_n e V_s da Figura 2. Os estudos de sobretensão do sistema indicam o valor da injeção de reativos necessário para cada barra. Esses estudos fornecem, portanto, os dados referentes à condição nominal do RSN próprio para cada barra do sistema. Obtidas as condições nominais, resta eleger a tensão de início de saturação, V_s , a qual, a rigor, deverá ser fixada tendo-se em conta critérios de otimização do binômio custos-benefícios. É relevante registrar que a

inclinação da curva tensão×corrente do RSN, definida por $s = \frac{V_n - V_s}{V_n}$ se constitui um parâmetro importante para

o projeto do equipamento, pois determinará a necessidade ou não de capacitores para correção. Conforme a experiência da GEC, (7), sozinho, um RSN é capaz de assegurar uma inclinação mínima de 8%. Para valores abaixo desse limite, um capacitor deverá ser conectado em série com o RSN, de modo a corrigir a inclinação da curva. No caso em questão a tensão máxima permitida foi de 1,10 pu e a mínima 1,05 pu:

Uma outra forma de modelagem do RSN no programa ANAREDE do CEPEL, é considerar esse equipamento como um compensador estático (CE) com apenas faixa indutiva, vide figura ao lado. A tensão especificada do CE foi feita igual ao joelho do RSN (1.05 pu) e sua capacidade de absorção: infinita. A inclinação do CE foi calculada como sendo igual à relação entre a diferença de tensão do joelho do RSN e a tensão máxima permitida no 500 kV (1.10 pu), dividida por 1.1025 vezes a capacidade nominal do RL, constante essa que foi calculada como sendo igual à tensão controlada pelo CE (1.05 pu) elevada ao quadrado.



4.0 - REDE ELÉTRICA

Foi utilizado nas simulações de regime permanente o caso base de fluxo de potência usado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no ciclo de estudos do Plano Decenal 2008/2017, ano de 2021 na condição de carga pesada. O fluxo de potência em condições normais de operação está ilustrado na Figura 4.

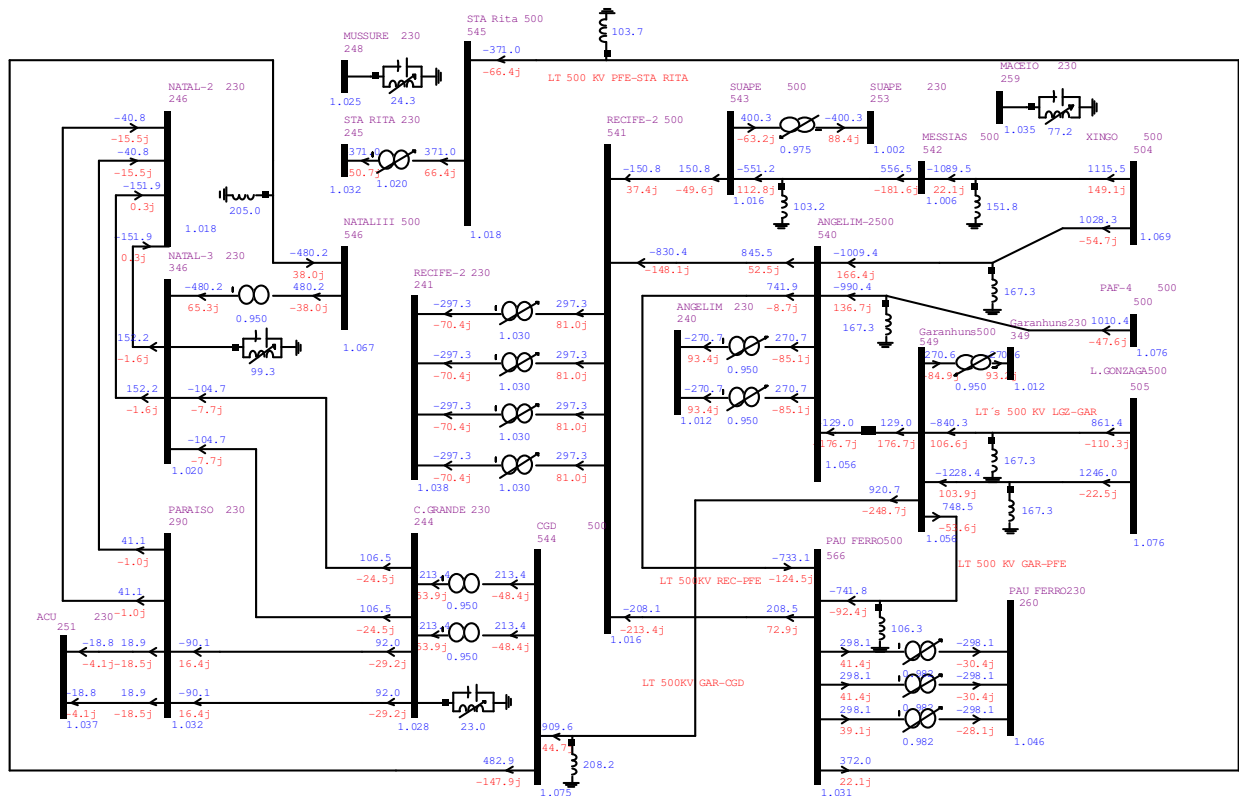


FIGURA 4 – Fluxo de potência em condições normais de operação, ano 2021, carga pesada

Observa-se que essa rede possui no total dez reatores lineares fixos, especialmente bem distribuídos. Todos esses reatores estão relacionados na Tabela 1, totalizando um valor nominal de 1410 Mvar.

Tabela 1 – Reatores lineares fixos na área leste da região Nordeste do Brasil

| Circuito em 500 kV | Reator DE (Mvar) | Reator PARA (Mvar) |
|--------------------------|------------------|--------------------|
| P. Afonso-Angelim, C1 | - | 150 |
| Xingó-Angelim, C1 | - | 150 |
| Xingó-Messias, C1 | - | 150 |
| L. Gonzaga-Garanhuns, C1 | - | 150 |
| L. Gonzaga-Garanhuns, C2 | - | 150 |
| Messias-Suape, C1 | - | 100 |
| Garanhuns-P. Ferro, C1 | - | 100 |
| Garanhuns-C. Grande, C1 | - | 180 |
| P. Ferro-Sta Rita, C1 | - | 100 |
| C. Grande-Natal, C1 | - | 180 |
| Total | - | 1410 |

5.0 - APLICAÇÃO DE RSN EM CIRCUITOS QUE TEM APENAS COMPENSAÇÃO TRANSVERSAL TIPO RL

A aplicação de RSN em substituição à RL para circuitos que possuem apenas compensação transversal produz um aumento na estabilidade de tensão da rede elétrica, conforme ilustrado na Figura 5. Em outras palavras, a potência natural do circuito (SIL) tende a ser resgatada à medida que todos os RL forem substituídos.

Nesse exemplo os demais circuitos tiveram sua compensação reativa transversal mantida. Observa-se uma redução bastante significativa na potência natural desses circuitos, que deveria ser da ordem de 1100 a 1200 MW.

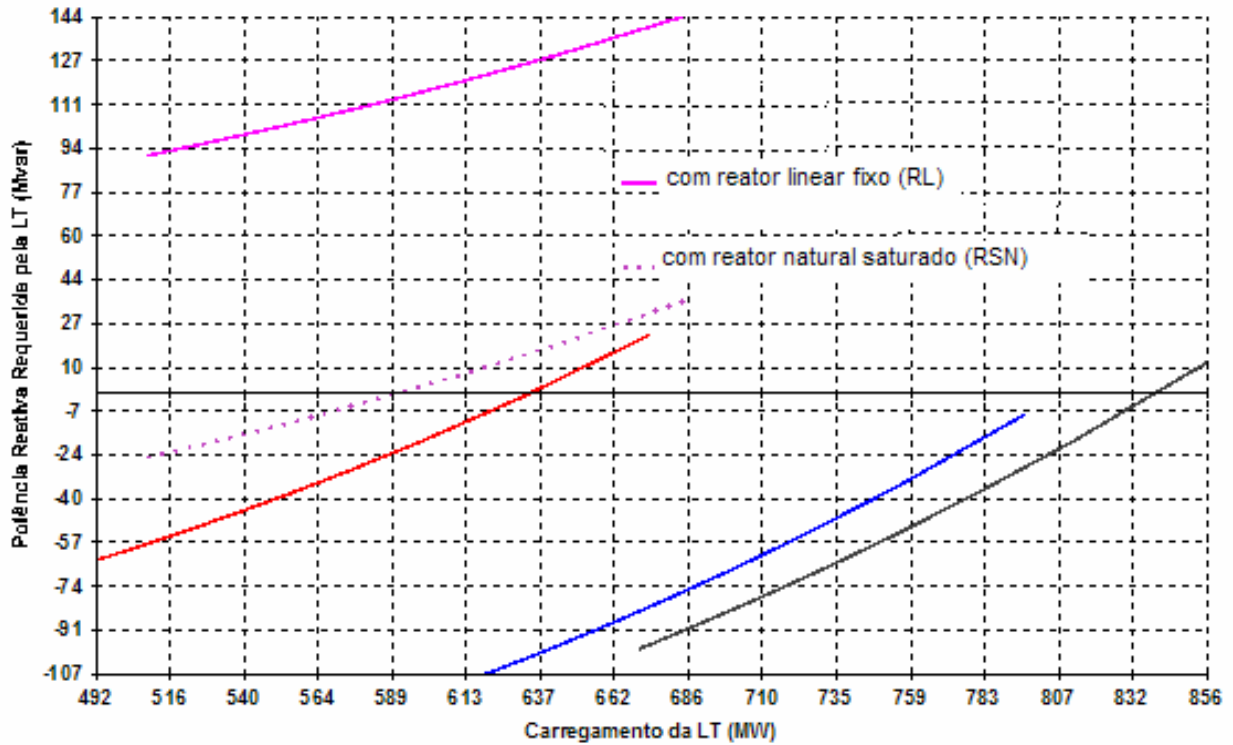


FIGURA 5 – Efeito na estabilidade de tensão na rede elétrica associado à substituição de RL por RSN em circuito de 500 kV

6.0 - ESTUDO DE CASO

Considerou-se como estudo de caso o planejamento da expansão feito pela Chesf para a área leste da região Nordeste do Brasil no horizonte 2021 (6), que identificou um mercado da ordem de 5900 MW como sendo a maior carga que poderia ser atendida pelo programa de obras lá recomendado. Naquele estudo ficou demonstrado que a região apresentava instabilidade de tensão para o mercado referenciado anteriormente, em todos os barramentos de rede elétrica, independente do nível de tensão.

Para o estudo de caso, foram substituídos todos os reatores lineares listados na Tabela 1 por RSN, utilizando a modelagem de equivalente de Thévenin ilustrada no item 3. Os valores nominais dos RSN foram escolhidos de modo a reproduzir exatamente o regime de operação dos RL substituídos, quando o sistema funcionava em carga leve. A tensão de início de saturação de cada RSN, V_s que substituiu os RL da Tabela 1, foi selecionada em 1.05 pu. Com essa especificação, antes do sistema alcançar o colapso, os RSN transitarão ao longo de toda a sua faixa operativa, possibilitando, assim, um teste cabal de funcionalidade do modelo. As reatâncias, calculadas de conformidade com a expressão (6) e na base de 100 MVA e 500 kV para cada um dos RSNs, também estão assinaladas na Tabela 1.

Utilizando-se o método do fluxo de potência continuado disponível no programa ANAREDE do Cepel, foi determinado o novo mercado da área leste que poderia ser atendido por essa nova configuração em contingência, a saber: 6452 MW. Observa-se um aumento da ordem de 550 MW (9,32 %), vide Figura 6.

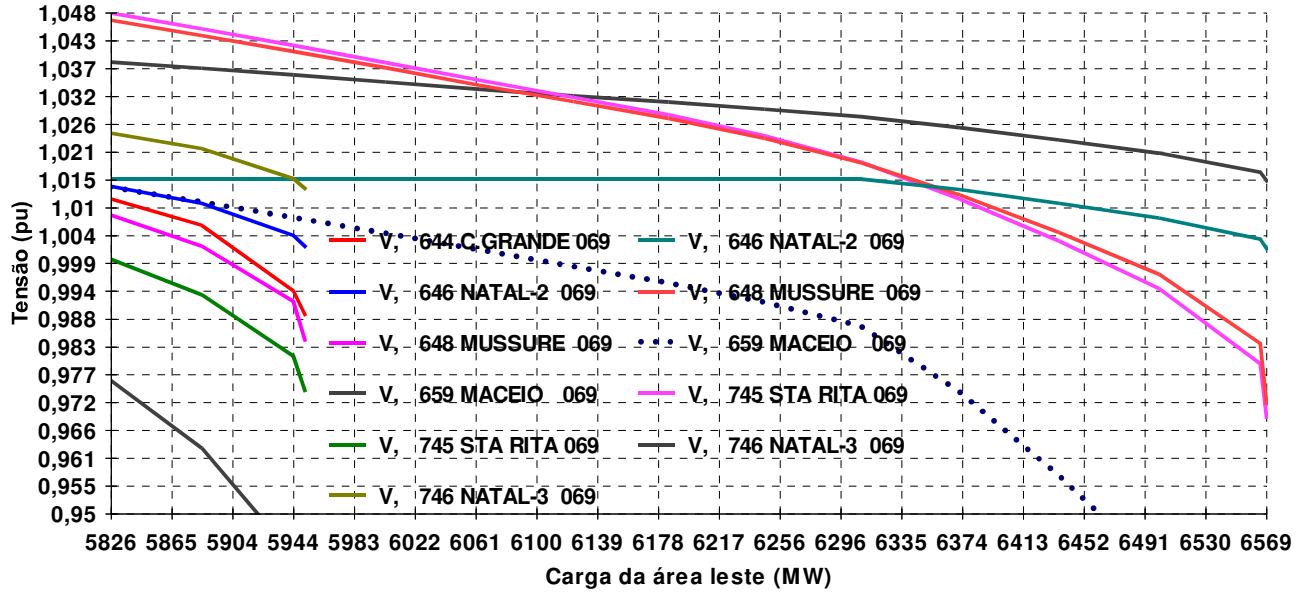


FIGURA 6 – Aumento do mercado da área leste do Nordeste pela substituição dos RL por RSN, em contingência

Utilizando o programa FLUPOT também do Cepel é possível melhorar o ponto de operação obtido pelo ANAREDE para o mercado da área leste de 6450 MW referenciado anteriormente, vide Figura 7, na qual está destacada a modelagem do RSN de 180 Mvar de C. Grande.

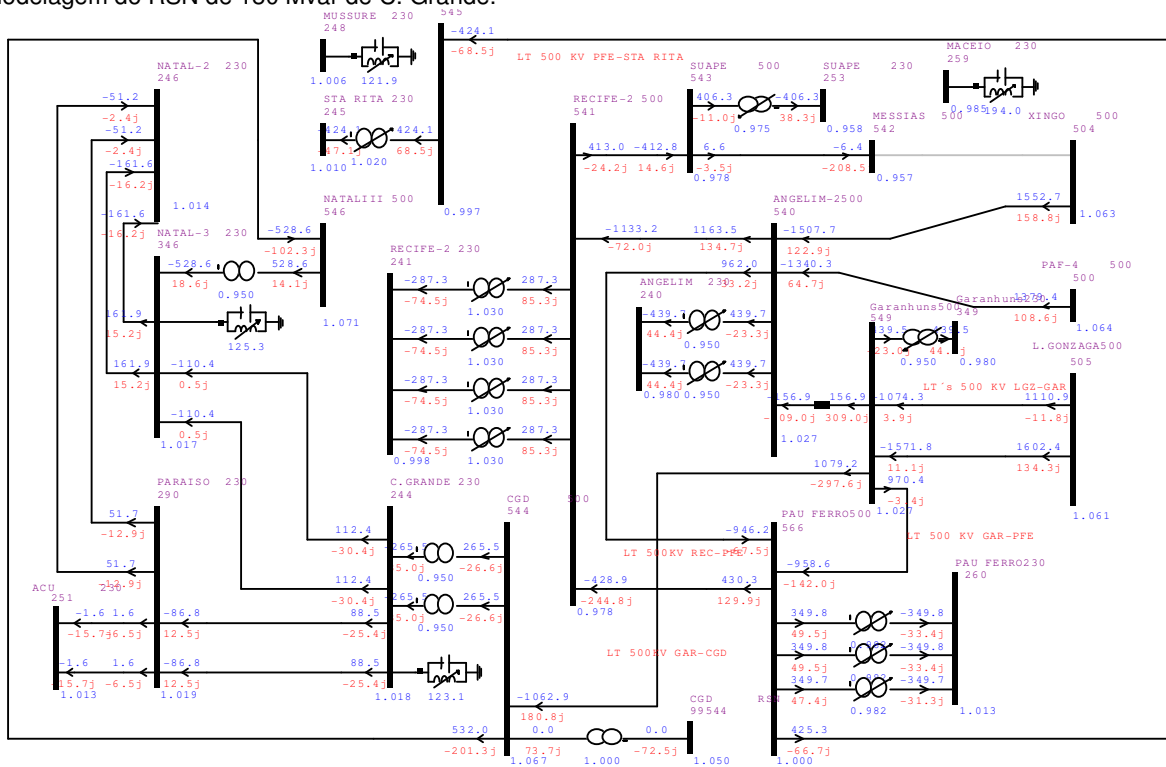


FIGURA 7 – Fluxo de potência em condições normais de operação para o mercado da área leste de 6450 MW, otimizado pelo FLUPOT

Utilizando-se novamente o método do Fluxo de Potência continuado, foi determinado o mercado da área leste que poderia ser atendido por esse novo ponto de operação em contingência, a saber: 6696 MW. Observa-se um aumento acumulado da ordem de 690 MW (11,69 %), vide Figura 8.

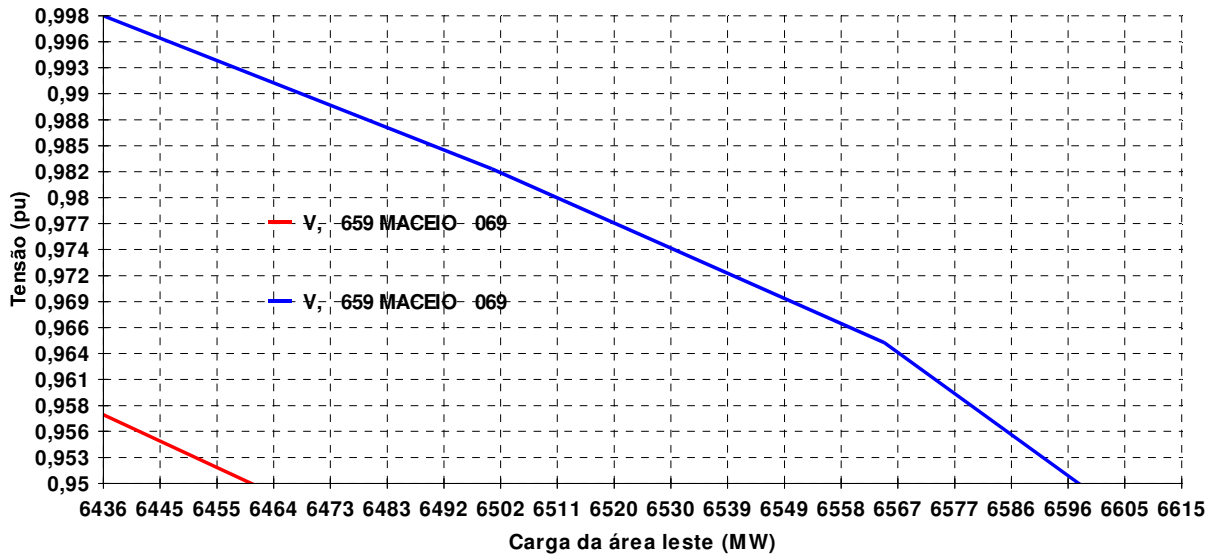


FIGURA 8 – Aumento do mercado da área leste para o novo ponto de operação definido pelo FLUPOT, em contingência

Na Figura 9 ilustra-se uma instabilidade de tensão generalizada na área leste para o mercado da ordem de 6590 MW, semelhante àquela observada no estudo da referência (4).

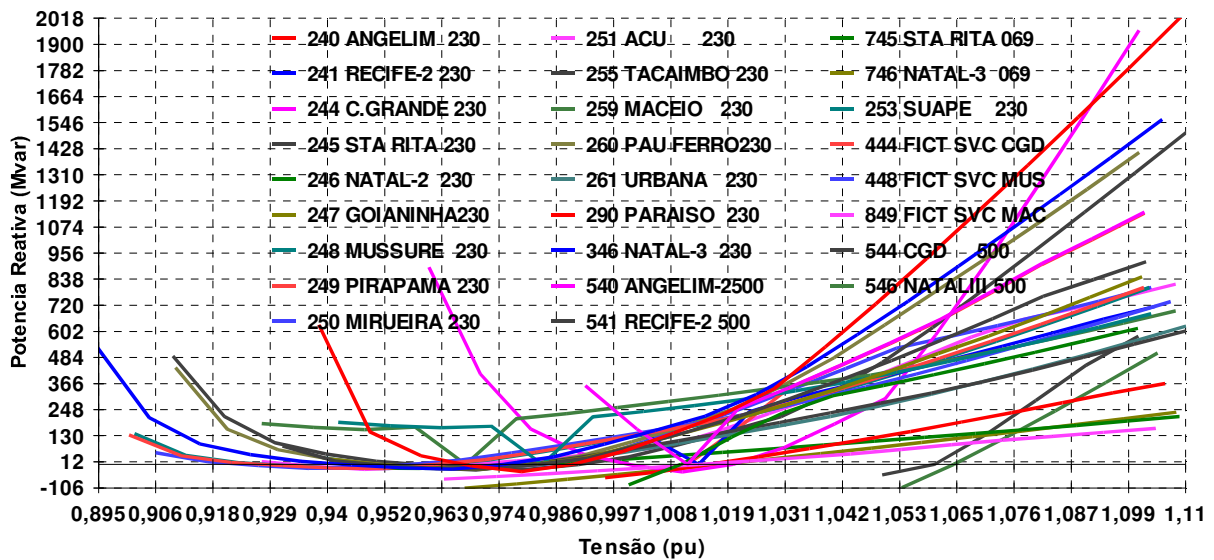


FIGURA 9 – Instabilidade de tensão generalizada na área leste para o mercado da ordem de 6590 MW

7.0 - CONCLUSÃO

- Este trabalho mostrou, claramente, a vantagem de substituição de RL de linhas de transmissão existentes ou planejadas, por RSN.
- Como constatação pode-se dizer que a aplicação de RSN nos circuitos de rede elétrica da área leste da região Nordeste do Brasil em substituição dos RL, aumenta o mercado considerado no horizonte do estudo da referência (4) em torno de 11.69 %. (690 MW).

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Armstrong, W., Montgomery, D. - Saturated Reactors: Aid Long Distance AC Line Planning - Energy International, vol. 12, no. 7, July 1975.
- (2) Thanawala, H. L., Young, D. J - Saturated Reactors: Some Recent Applications in Power Systems - Energy International, vol. 7, no. 11, November 1970.
- (3) Carvalho Jr, M. A. e Fonte, L. A. M., *Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines*, IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001.
- (4) Carvalho Jr, M. A. e Fonte, L. A. M., *Steady State and Transient Voltage Control on Long EHV Transmission Lines*, IEEE / PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, 2001.
- (5) Maia, Marcelo J. A., Cavalcanti, Jurandir A., Carvalho Jr, Manoel A. , Fonte, Luiz A. M. - Modelagem e Especificação de Reatores Naturalmente Saturados para Regime Permanente –, XI SEPOPE, Belém, Março/2009
- (6) “Atendimento de Energia Elétrica a Área Leste da Região Nordeste do Brasil”, Relatório Técnico Chesf/2008.

9.0 - 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, Divisão de Estudos e Tecnologia de Alta Tensão - DEAT

Jurandir de Almeida Cavalcanti

Nascido em Garanhuns, PE, em 6 de Abril de 1953;

MBA em Finanças (2003): FGV-PE, Especialização em Sistemas de Controle (1985): UFSC-SC e Graduação (1978) em Engenharia Elétrica: UFPE-Pernambuco;

Manoel Afonso de Carvalho Jr.

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

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

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

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)