



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

FI/GDS/24
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

APLICAÇÃO DE REATORES SATURADOS EM LINHAS DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA - ANÁLISE TÉCNICA

SANTOS, A.A.S.(*)
CEFET-RJ

VIEIRA, L.C.R.

ARRUDA, C.K.C.

DART, F. C.
CEPEL

RESUMO

O presente trabalho propõe um estudo de reatores naturalmente saturados em LPNEs, observando paralelamente soluções combinando linhas convencionais e reatores lineares. Foram comparados o desempenho de cada linha, e para cada situação o uso dos dois tipos de reatores para regulação de tensão, além do desempenho em alguns transitórios típicos de manobras. A metodologia utiliza modelos contidos no software ATP, além de modelos específicos desenvolvidos pelos autores. Será dada atenção especial ao modelo do reator e curva de saturação, além de considerações sobre modelos de LTs usualmente aplicados.

PALAVRAS-CHAVE

Reator Saturado, LPNE, Transitórios de manobra, ATP.

1.0 - INTRODUÇÃO

A exploração de recursos energéticos longe dos centros de carga, torna necessária a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias. Além disso, há uma preocupação em relação a qualidade da energia e o custo associado à transmissão. Naturalmente busca-se, nesse contexto, a melhoria contínua da eficiência das linhas de transmissão (LTs), diminuindo as perdas e aumentando sua capacidade ao menor custo possível.

Uma solução potencial para transmissão em corrente alternada é a tecnologia LPNE (Linha de Potência Natural Elevada), que através da disposição adequada dos condutores das fases, permite aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica de uma linha, garantindo economia quando comparado a um projeto de uma LT tradicional (1, 7). Um efeito natural na otimização da linha é a elevação da capacitância, que provoca desta forma um efeito Ferranti mais acentuado.

Para solucionar o problema da regulação podem ser utilizados, como uma solução mais flexível, reatores saturados. Compostos por um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais, esses reatores permitem a compensação reativa tanto nos instantes de elevação quanto de redução da carga da linha na qual está conectado. Algumas das características desse tipo de equipamento são a robustez, baixo custo, menores requisitos de manutenção e bom desempenho quando comparado aos reatores *shunt* fixos.

Ainda existem os reatores com saturação magneticamente controlada, que tem o núcleo exposto a correntes de excitação com componentes alternadas e contínuas. Isso porque os enrolamentos primários são diretamente conectados a rede CA e os enrolamentos secundários são alimentados por tensão CC controlada. O controle do ponto de operação do reator é obtido através da variação da componente CC dos enrolamentos secundários. (4)

O emprego de reatores saturados em linhas de transmissão convencionais torna seu desempenho equivalente ou superior ao uso de reatores lineares, já que permitem que a tensão em seus terminais seja controlada de acordo com a característica operacional especificada para os mesmos.

O objetivo deste informe é verificar o desempenho dos reatores saturados em LPNEs, concluindo a importância do projeto e otimização de LTs, não somente em relação aos parâmetros elétricos como potência característica, mas envolvendo os equipamentos de compensação e suporte.

2.0 - SISTEMAS ANALISADOS

Os sistemas de transmissão utilizados são radiais e formados por duas linhas de transmissão em paralelo. Foram avaliados quatro sistemas diferentes, combinando linhas de transmissão convencionais ou LPNEs com reatores lineares ou saturados.

Ambos os sistemas são alimentados por geradores síncronos de pólos salientes com amortecedores. O gerador é representado no ATPDraw por uma fonte de tensão ideal trifásica de 13,8 kV, em série com uma reatância subtransitória de 0,2 p.u. (8).

Para elevar o nível de tensão do sistema, foi utilizado um modelo de transformador ideal com ligação estrela aterrada. Este modelo faz parte da biblioteca do ATP, e foi utilizado para que as características de um transformador real não influenciasse os resultados obtidos.

Os transitórios analisados foram obtidos nas simulações através de manobras realizadas por chaves ideais, também próprias do programa. Houve uma preocupação em adequar os tempos de manobra a fim de não sobrepor os transitórios simulados ao transatório provocado pela energização do sistema.

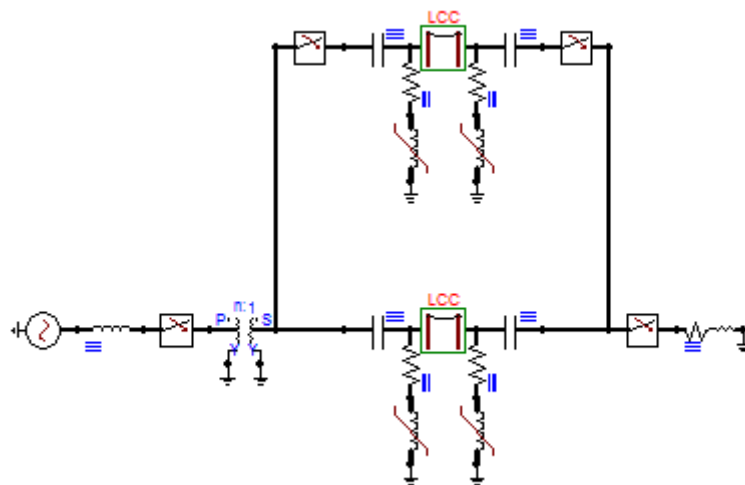


FIGURA 1 – Sistema radial de 500KV com compensação de reativo por reatores saturados

2.1 Linhas de Transmissão

Para a análise foram escolhidas duas linhas de transmissão, ambas com tensão de 500 kV e comprimento igual a 350 km. Para efeito comparativo, considerou-se duas LTs com certa similaridade, supondo uma estrutura estaiada do tipo *cross-rope*, no qual as fases possuem um maior acoplamento, elevando assim a capacidade de transmissão, logo o parâmetro básico a ser alterado é o feixe de cada fase.

O projeto de linha convencional, com feixes de quatro condutores por fase em espaçamento padronizado de 18" (aproximadamente 45 cm), resultou numa potência característica da ordem de 1100 MW. Já a LPNE permitiu obter uma potência característica da ordem de 1600 MW, através da substituição dos feixes anteriores por feixes de seis condutores, além da expansão dos feixes em formato elíptico com raio de 1,4 m nas fases A e C e de 0,6 m na fase B.

As duas linhas estão resumidas na Tabela 1. Para ambas as configurações, os parâmetros em comum são: resistividade do solo de 1000 $\Omega \cdot m$, dois para-raios continuamente aterrados e EDS 20%.

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros das linhas simuladas

	Convencional	LPNE
Feixe	4 x CAA TERN	6 x CAA TERN
P_C (MW)	1113,35	1595,62
R_1 @ 60 Hz (m Ω / km)	22,0634	14,9179
L_1 @ 60 Hz (mH/ km)	0,7558	0,5280
C_1 (nF/ km)	15,2550	21,9349
R_0	356,4630	349,5893
L_0	3,9641	3,7323
C_0	6,5916	7,7507
Reativo transversal(Mvar/ km)	1,4377	2,0673

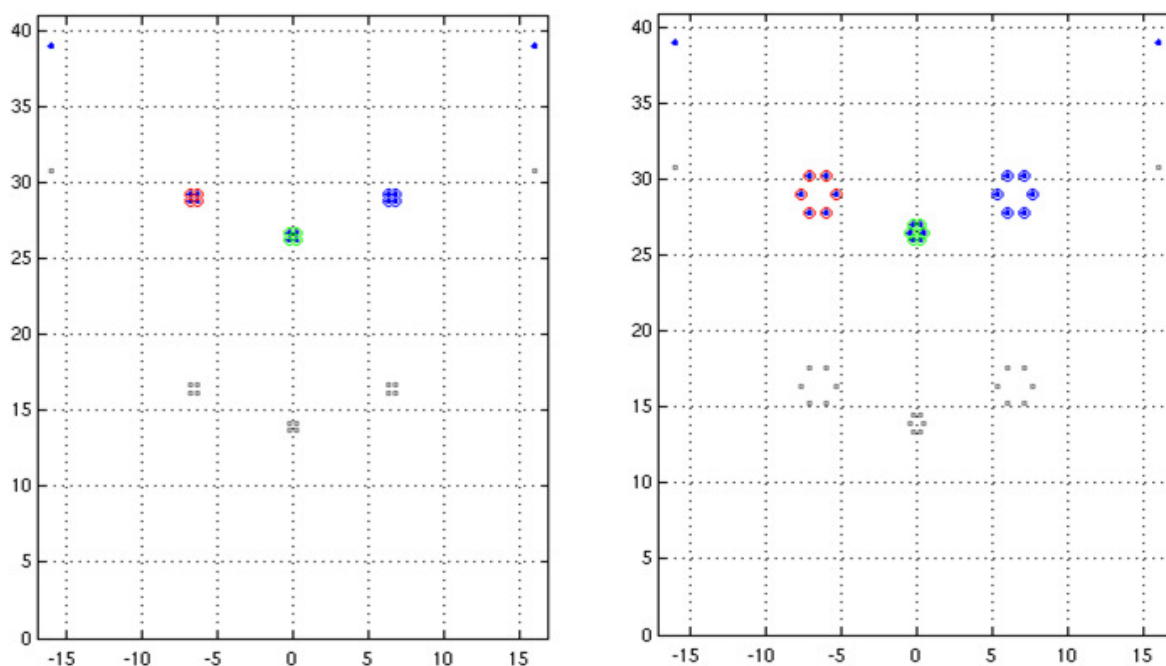


FIGURA 2 – Perfis das LTs (cor - posição dos condutores na torre, cinza - meio do vão)
(a) linha convencional; (b) LPNE

A principal característica que faz das LPNEs uma das melhores soluções para se ter uma maior capacidade de transmissão é a sua construção com arranjos assimétricos para os sub-condutores das fases, que deixam de ser distribuídos de forma simétrica em círculo. Esse tipo de linha pode ter a distância entre fases compactada, seu feixe expandido, ou até um misto dessas duas técnicas. Também podem ter um aumento do número de seus sub-condutores para atingir a mesma finalidade.

Foi utilizado o modelo de linha “JMarti”, pois é o mais rápido e confiável algoritmo desenvolvido para modelagem precisa de LTs ao longo de uma ampla faixa de frequência. É o mais adequado para simular o fenômeno de ondas viajantes em “cabos longos”.

2.2 Compensação de Reativos

Através de um modelo computacional desenvolvido pelo Cepel, foi possível encontrar os parâmetros da linha necessários para a compensação. Estes parâmetros foram reafirmados pelo cálculo interno do ATP.

Em relação a compensação série, foi aplicado um valor preliminar de 50%, por não ser parte direta do estudo, mas não se omitir este tipo de equipamento nas possíveis interações nos transitórios de manobra.

Já para o cálculo da compensação shunt foi adotado o seguinte critério: a compensação escolhida seria a menor compensação que apresentasse no final da linha uma elevação de tensão inferior a 5% em relação a tensão do início da linha. Após os testes, chegou-se ao valor de 60%, que para a linha convencional representa a ligação de um reator de 163 Mvar em cada extremidade e para a LPNE, 217,5 Mvar, sendo para um valor mais preciso a necessidade de se estudar outras variáveis, como custos de construção e manutenção etc.

2.2.1. Reator Saturado

Os reatores a núcleo saturado, tem se mostrado uma boa alternativa para compensação de sistemas de potência em função de atrativos como simplicidade operacional e construtiva e custo competitivo.

Através da tensão em seus terminais, há uma regulação automática do consumo de potência reativa, reduzindo o consumo quando a tensão se encontra abaixo de um valor determinado e aumentando a demanda por potência reativa caso haja aumento da tensão terminal, auxiliando na regulação de tensão.

Para a representação no software ATP, foi utilizado o modelo de indutância não linear "Type 98". Para este modelo, próprio do ATP, é necessário informar a característica de saturação do reator.

Devido às peculiaridades de cada tipo de linha (convencional e LPNE), foi necessário dimensionar um reator saturado específico para cada uma delas. Além disso, foram consideradas perdas máximas de 0,3% nos reatores saturados de acordo com a referência (5). As perdas foram representadas através de uma resistência em série com cada fase dos reatores.

A curva do reator saturado é composta por uma região linear, e uma região de saturação. Para que a curva obtida fosse adequada ao sistema, igualou-se o comportamento de sua região linear ao do reator linear. Já na região de saturação, o reator tem sua indutância reduzida, aumentando significativamente a taxa de variação da corrente em relação a um acréscimo no fluxo. As curvas características dos reatores saturados utilizados neste informe estão expostas na Figura 3 e tem seus pontos explicitados na Tabela 2.

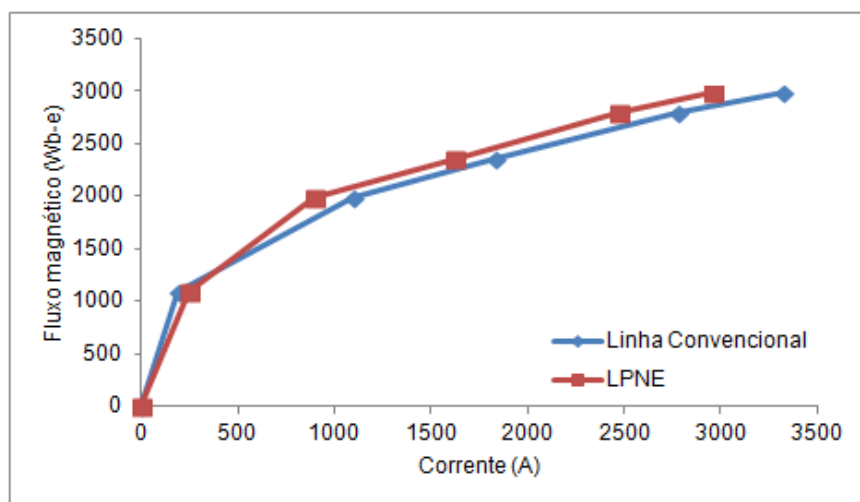


FIGURA 3 – Curvas características dos reatores saturados

Tabela 2 – Pontos das curvas características dos reatores saturados

Linha Convencional		LPNE	
Corrente (A)	Fluxo magnético (Wb-e)	Corrente (A)	Fluxo magnético (Wb-e)
0,00	0,00	0,00	0,00
188,20	1083,62	251,06	1083,62
1100,00	1979,49	900,00	1979,49
1830,29	2347,37	1626,92	2347,37
2781,86	2785,32	2472,77	2785,32
3328,51	2978,01	2958,68	2978,01

2.3 Estudo de transitórios

Para cada caso, foi estabelecido um tempo adequado de simulação, sendo de 2 s para o religamento rápido e 1 s para os demais casos. Chaves ideais foram utilizadas para reproduzir os transitórios no sistema, efetuando as manobras em instantes específicos.

O primeiro caso estudado foi a energização de uma das linhas estando o sistema já energizado. Para isso, as chaves das extremidades desta linha fecham simultaneamente no instante 0,10025s, quando a tensão do gerador passa pelo seu valor máximo e o transiente de energização do sistema já se extinguiu.

Para o transiente de rejeição de carga, com as linhas previamente energizadas, no instante 0,10036 s acontece a abertura da chave, excluindo a carga do sistema.

No caso de abertura da linha, o sistema é inicialmente energizado sem carga e as chaves de suas extremidades são abertas em 0,3 s.

Por fim, foi simulado um curto monofásico no meio de uma das linhas em 0,27928 s. Após o tempo equivalente a detecção e abertura de um disjuntor, as chaves das extremidades da linha tem suas três fases abertas em 0,3459 s. A extinção do curto ocorre dentro de um período de 30 ciclos, ao fim do qual a linha é religada, em 0,8459 s.

3.0 - RESULTADOS

As simulações realizadas no ATP permitiram observar a diferença entre as formas de onda de tensão dos sistemas.

Os principais resultados foram sintetizados e são mostrados a seguir. A Tabela 3 mostra a comparação entre os valores de tensão medidos no final da linha nos sistemas com linha convencional e LPNE. Os valores estão em pu de tensão, sendo o valor de base igual a 5003/2 kV. As colunas Δ (%) mostram a redução percentual das tensões resultantes do sistema com reator saturado em relação ao sistema com reator linear.

Tabela 3 – Valores máximos de tensão

		Convencional			LPNE		
		Reator linear	Reator saturado	Δ (%)	Reator linear	Reator saturado	Δ (%)
Abertura da LT em vazio	Fase A	2,1000	1,7360	17,3325	2,3148	2,1741	6,0801
	Fase B	1,8118	1,8118	0,0010	1,7133	1,6521	3,5718
	Fase C	1,7974	1,6412	8,6882	1,7862	1,7122	4,1450
Energização da LT	Fase A	1,4704	1,4225	3,2552	1,4820	1,4695	0,8403
	Fase B	1,1696	1,1820	-1,0569	1,2460	1,2237	1,7923
	Fase C	1,5096	1,4955	0,9331	1,5352	1,4820	3,4623
Rejeição de Carga	Fase A	1,4154	1,3378	5,4878	1,5420	1,4751	4,3379
	Fase B	1,3948	1,3014	6,6931	1,4735	1,4694	0,2776
	Fase C	1,4389	1,3952	3,0409	1,5069	1,4487	3,8681

Religamento	Fase A	1,6032	1,5785	1,5411	1,5420	1,4751	4,3379
	Fase B	1,5697	1,4355	8,5492	1,4735	1,4751	-0,1130
	Fase C	1,4389	1,3952	3,0409	1,5069	1,4487	3,8681

Além da tabela, foram obtidas curvas referentes a cada caso. As Figuras 4 e 5 mostram a tensão na fase B no final da linha no caso de um religamento após um curto monofásico no meio da mesma. A curva em vermelho representa uma linha convencional com reatores lineares e a curva em verde representa uma linha convencional com reatores saturados. A Figura 5 mostra o instante em que a linha foi religada após o curto.

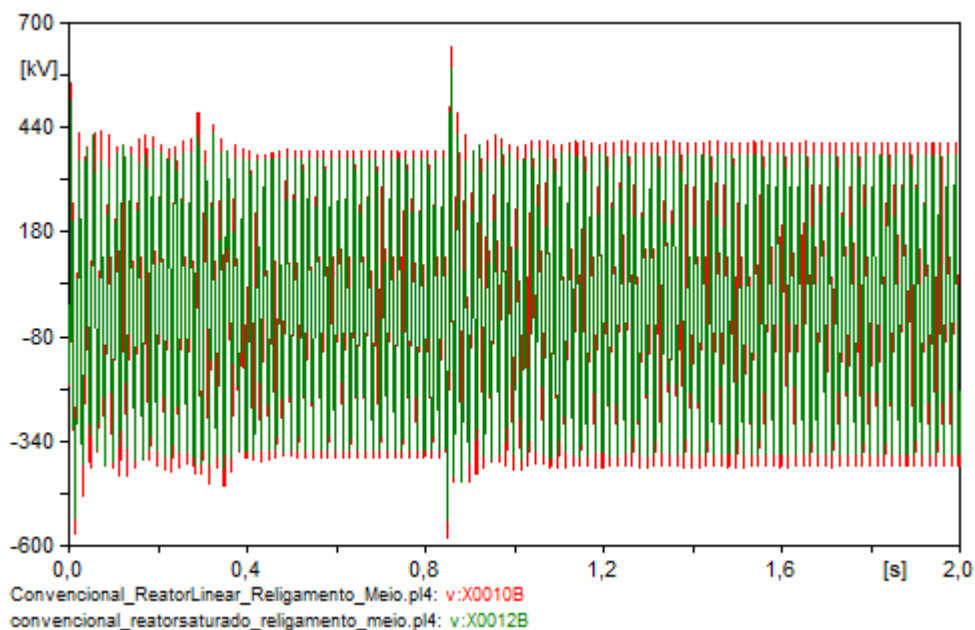


FIGURA 4 - Tensão no final da linha convencional com reator linear e com reator saturado

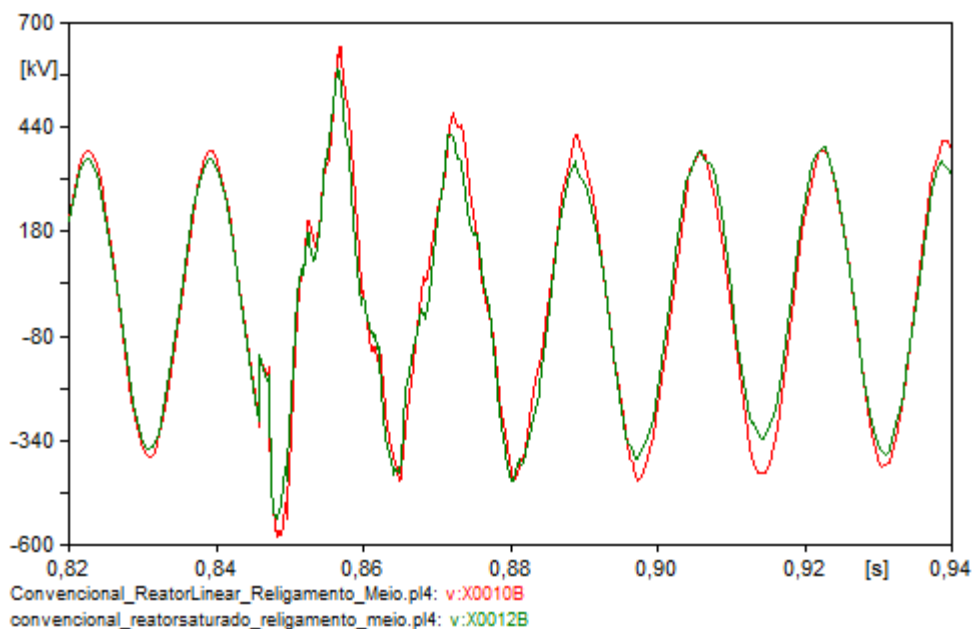


FIGURA 5 - Detalhe da tensão no final da linha convencional com reator linear e com reator saturado

As Figuras 6 e 7 mostram a tensão na fase A no final da linha no caso de abertura da linha em vazio. A Figura 7 mostra o instante de energização do sistema.

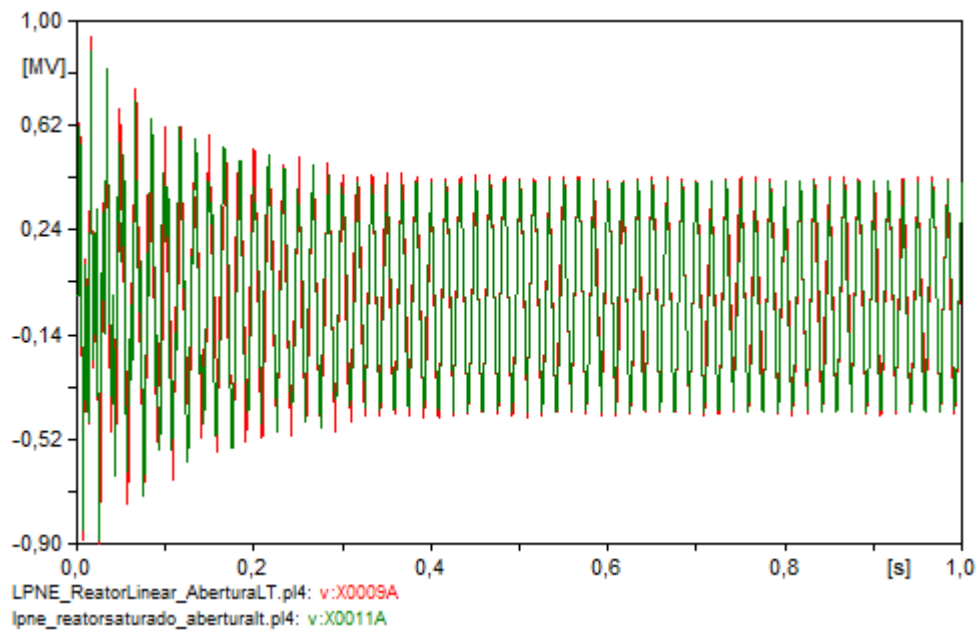


FIGURA 6 - Tensão no final da LPNE com reator linear e com reator saturado

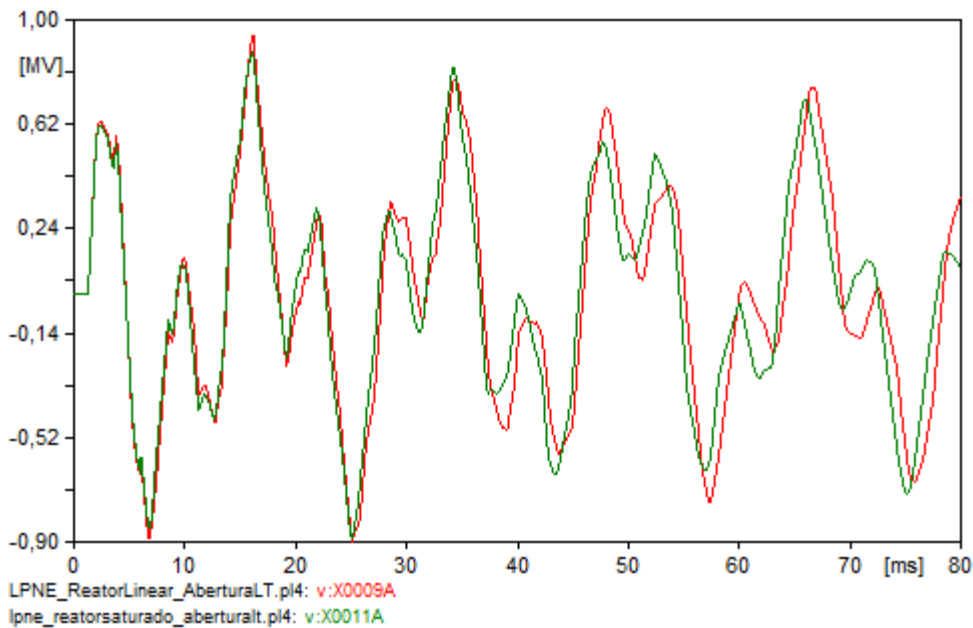


FIGURA 7 - Detalhe da tensão no final da LPNE com reator linear e com reator saturado

4.0 - CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados apresentados, foi possível concluir que a redução das sobretensões com a aplicação de reatores saturados foi significativa apenas em casos específicos como no caso do religamento rápido e nos primeiros ciclos após a energização do sistema em vazio. A melhoria foi verificada nos demais casos com menor intensidade.

Para uma análise mais completa, é necessária uma abordagem estatística dos fenômenos envolvidos, e.g. nos tempos de ocorrência das faltas e atuação de chaves, além de condições operacionais do sistema. Obviamente

uma modelagem de outros fenômenos não-lineares, e.g. saturação nos transformadores, pode fornecer outros resultados, mas que foge do objeto deste estudo.

Para aumentar o efeito poderiam ser aplicados reatores com saturação controlada, que através de um circuito de eletrônica de potência permitem a alteração do nível de saturação do núcleo. (4)

Além disso, seria interessante verificar o efeito da inclusão de um capacitor em paralelo com o reator naturalmente saturado. Esta alternativa permite que o reator forneça ou absorva potência reativa, auxiliando na regulação durante uma elevação ou redução da tensão do barramento. (6)

Por fim este IT constata a importância de uma otimização global e projetos de LTs, envolvendo parâmetros elétricos, mecânicos e sistêmicos, ou seja, a interação da linha com equipamentos componentes, como reatores e FACTS, ou outros elementos eletricamente próximos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALEKSANDROV, G. N., NOSOV, I. M. The Increase of Effectiveness of Transmission Lines and Their Corridor Utilization; CIGRE Paper 38-104, Paris, 1996.
- (2) CAM/ AM EMTP USER GROUP. Rule Book - Alternative Transient Program; 1995.
- (3) DART, F. C. et al. The HSIL Line – A New Approach for System Planning; VI SEPOPE, Salvador, BA, 1998.
- (4) FARINHA, M. V. G. S. Modelagem e análise do desempenho de reatores com saturação controlada em sistemas de potência; Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2013
- (5) FRONTIN, SERGIO O. Equipamentos de Alta Tensão Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas; Finatec, 1ed. Brasília, 2013.
- (6) PACHECO, J. M. et al. Projeto e Análise Desempenho de um Reator Saturado de 570 kVAr e 13,8 kV para Regulação de Tensão; VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE, Santos-SP, Brasil. 2007.
- (7) Regis Jr., Oswaldo et al. Avaliação Comparativa das Concepções de Linhas de Potência Natural Elevada em 500KV Utilizadas no Brasil; XIII ERIAC, Iguaçu, 2009.
- (8) Stevenson, William D. Elementos de análise de sistemas de potência; McGraw-Hill do Brasil, 2ed. São Paulo, 1986.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Anny de Almeida Silveira dos Santos - Nascida no Rio de Janeiro no ano de 1994, Estudante do nono período de Engenharia Elétrica do CEFET/RJ (previsão de conclusão dezembro de 2015), Estagiária do CEPEL no DLE.

Laura Cristina Rosa Vieira - Nascida no Rio de Janeiro no ano de 1991, Estudante do nono período de Engenharia Elétrica do CEFET/RJ (previsão de conclusão dezembro de 2015), Estagiária do CEPEL no DLE.

Carlos Kleber da Costa Arruda - Engenheiro eletricitista (1999) pelo CEFET/RJ, D.Sc. (2012) pela COPPE/ UFRJ, Pesquisador do CEPEL desde 2000 nas áreas de linhas de transmissão, aterramento e descargas atmosféricas.

Fernando Chaves Dart - Engenheiro eletricitista (1976) pela UFRJ, Pesquisador do CEPEL desde 1986 nas áreas de linhas de transmissão, aterramento e compatibilidade eletromagnética.