



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPL/23
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**APLICAÇÃO DE REATORES VARIÁVEIS EM SISTEMAS TRONCO DE TRANSMISSÃO EM
CORRENTE ALTERNADA: UMA ALTERNATIVA PARA A INTEGRAÇÃO DA USINA DE BELO MONTE
E PARA A CONTROLABILIDADE DO SIN**

Marcelo J. A Maia *
Chesf

Carlos Leoncio G. Costa
Chesf

Luiz A. Magnata da Fonte
UFPE

Jurandir A. Cavalcanti
Chesf

Fernando Edier F. Freitas
Chesf

RESUMO

Esta contribuição técnica apresenta uma opção de compensação de reativos para sistemas de corrente alternada de 765 kV como alternativa para a integração dos futuros aproveitamentos hidroelétricos da região Amazônica. A utilização de reatores variáveis na compensação das linhas de transmissão fará com que elas possam operar sintonizadas na sua potência natural, região onde o fluxo de reativos na linha é praticamente nulo. Esse modo de operação trás enorme benefício à transmissão de potência, às tensões do sistema tanto em regime como em contingências e à controlabilidade do sistema interligado nacional – SIN.

PALAVRAS-CHAVE

Transmissão em Corrente Alternada, Reatores Variáveis, Transmissão a Longa Distância, Controlabilidade do SIN, Planejamento.

1.0 - INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão da geração da matriz energética brasileira tem determinado a construção de grandes projetos de geração hidrelétrica na Região Norte do Brasil, tais como as usinas do rio Madeira (Santo Antonio e Jirau), rio Xingu (Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte), as usinas do rio Tapajós, etc (1). A estratégia de expansão de explorar o potencial hidrelétrico da Amazônia necessita da construção de grandes troncos de transmissão a fim de permitir o escoamento da energia para outras regiões do país. Para os dois primeiros projetos citados (rio Madeira e Xingu), foi definido que a transmissão em corrente contínua (EATCC) deveria ser utilizada para fazer o transporte da maior parte da energia por se apresentar economicamente mais atrativa. Os links do sistema para a transmissão do Madeira até a subestação coletora no estado de São Paulo (SE Araraquara), distante cerca de 2500 km, encontram-se em fase de construção.

Um dos limites de maior relevância para a transmissão de energia em extra-alta tensão é notadamente a potencia natural da linha de transmissão (SIL-Surge Impedance Load); em alguns troncos do sistema de transmissão de 500 kV já em operação no Brasil, tem-se utilizado o conceito de linhas de potência natural elevada, LPNE, afim de elevar a capacidade de transmissão do sistema. Na LPNE, a indutância série da linha de transmissão é reduzida e sua capacitância é elevada, necessitando muitas vezes por conta disso, a utilização de reatores shunt fixos de maior capacidade a fim de se fazer a devida compensação de reativos do sistema. Sabe-se que a instalação dos reatores shunt fixos nas linhas de transmissão, tem o efeito antagônico de reduzir o SIL das linhas de transmissão,

prejudicando assim o efeito ora perseguido pelas LPNE's que é aumentar a capacidade de transmissão do sistema. Por outro lado, com a instalação de banco de capacitores série (BCS) com a linha de transmissão se tem o efeito inverso aos reatores em derivação, ou seja, tem-se uma elevação do SIL da linha de transmissão. Diga-se de passagem que este é o 'calcanhar de Aquiles' para os planejadores de sistema de transmissão pois, se por um lado há um esforço dos projetistas de LT em disponibilizar projetos econômicos função da potência desejada para um determinado corredor de transmissão, por outro, para atender aos critérios de planejamento e operativos (principalmente controle de tensão) necessita-se de compensação reativa em derivação. Este fato, como já foi dito, impede que se transmita toda a capacidade da linha, fato este anulado pela incorporação dos BCS. Ou seja, adquire-se um equipamento (BCS) para anular outro equipamento (reator derivação).

A substituição do conjunto reator linear (em derivação) + BCS por reator saturado trás enormes benefícios, conforme já apresentado em seminários anteriores (2, 3, 4).

No rol das alternativas em estudo para transmissão da energia das usinas da amazônia, durante a fase de planejamento, além dos sistemas de corrente contínua, foi usado nos sistemas de corrente alternada o conceito de LPNE, nas tensões de 500kV, 765kV e 1000kV. Com a elevação do SIL das linhas de transmissão, foi necessário o uso de compensação reativa shunt e série também em um valor elevado, contribuindo para a elevação do custo das alternativas em corrente alternada.

Neste trabalho serão apresentadas as principais vantagens de utilização dos reatores variáveis no planejamento e na operação de um sistema de transmissão. Apresenta-se também uma análise de viabilidade econômica, sendo feito uma comparação dos custos (incluindo perdas) de um sistema em corrente alternada convencional e um sistema com este tipo de compensação. Para tanto, será utilizado o sistema de corrente alternada em 765 kV, proposto para integração da usina de Belo Monte na fase de planejamento (1).

2.0 - O SISTEMA DE 765 KV PLANEJADO PARA AHE BELO MONTE

A tecnologia em 765 kV CA foi considerada para o tronco N-S. É uma tecnologia madura, em razão da experiência na operação desses sistemas de transmissão e de sua contínua expansão em diversos países. Foram considerados dois e três circuitos em paralelo para o tronco N-S, a configuração com três circuitos em paralelo foi escolhida como topologia final do estudo. De acordo com estudos realizados para a conexão das usinas hidroelétricas do Rio Madeira, essa topologia deveria ser alterada buscando-se solução que suporte uma rejeição de carga total, condição crítica para um tronco de transmissão em 765 kV de grande comprimento, com linhas em paralelo, transmitindo grandes blocos de energia.

As alternativas em 765 kV foram concebidas com três LT's, seis condutores por fase, e uma conexão com a interligação Norte-Sul 500 kV, na SE Miracema ou Colinas.

A partir da definição para a interligação Norte-Nordeste pela rota Miracema a conexão única nas alternativas passou a ser nessa subestação. As análises definiram a necessidade de mais pontos de conexão para aliviar as sobrecargas no sistema em 500 kV existente da Norte-Sul. Diversas combinações foram analisadas e a alternativa de menor custo global foi a de três pontos de acoplamento.

A primeira ligação é em Itacaiúnas através da nova SE Parauapebas, a segunda conexão seria na SE Miracema e a terceira em Serra da Mesa através da nova SE Trindade.

Ao longo do estudo foram concebidas varias alternativas com dois e três circuitos; as duas alternativas mais promissoras para três e dois circuitos mostradas na Figura 1.

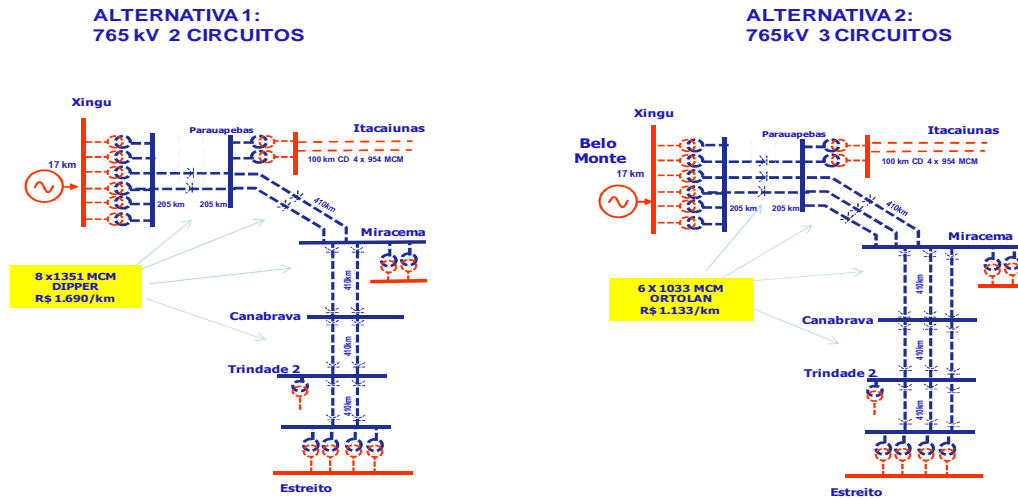


Figura 1: Alternativas de 765 kV

A Figura 2 ilustra a curva Q X P da linha de transmissão escolhida (6 X Ortolan). Observa-se o efeito da compensação série e em derivação fixa sobre o desempenho do sistema. Sem o efeito das compensações, a linha de transmissão trabalharia no SIL para o sistema inteiro onde cada LT transmitiria cerca de 3000 MW. Como foi visto na seção anterior, isto significa que a LT nem iria gerar nem consumir reativos do sistema. Contudo, na contingência de uma das LT's, o fluxo nas linhas remanescentes seria de 4100 MW e a configuração com compensação série teria um melhor desempenho quanto à subtensão, pois nesta configuração, a LT consumiria menos reativo. Naturalmente, para baixos carregamentos, a linha de transmissão gera uma grande quantidade de reativo. Por exemplo, para um carregamento em torno de 500 MW cada LT irá gerar em torno de 400 Mvar mesmo considerando a instalação dos reatores fixos na linha. A fim de se evitar sobretensões devido a essa geração de reativos, devem ser instalados reatores chaveados nas subestações para serem usados nos baixos carregamentos das LT's.

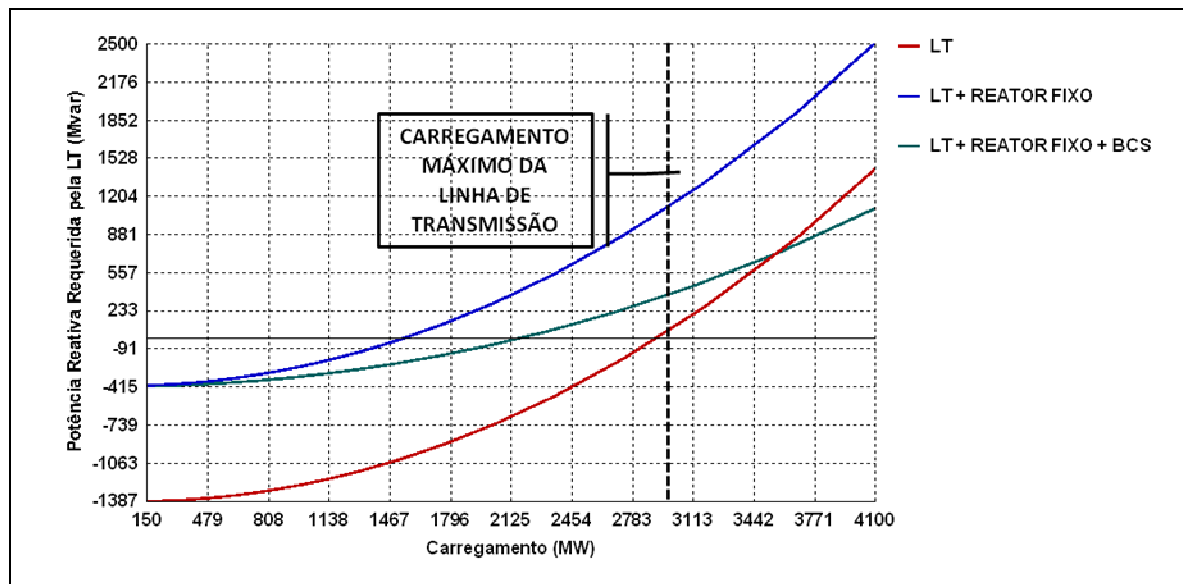


Figura 2: Curva Q X P da Linha de transmissão escolhida

Com a utilização de reatores variáveis, força-se a linha de transmissão a trabalhar sempre no SIL. A figura 3 ilustra a curva Q X P da linha de transmissão com a adição de reatores variáveis.

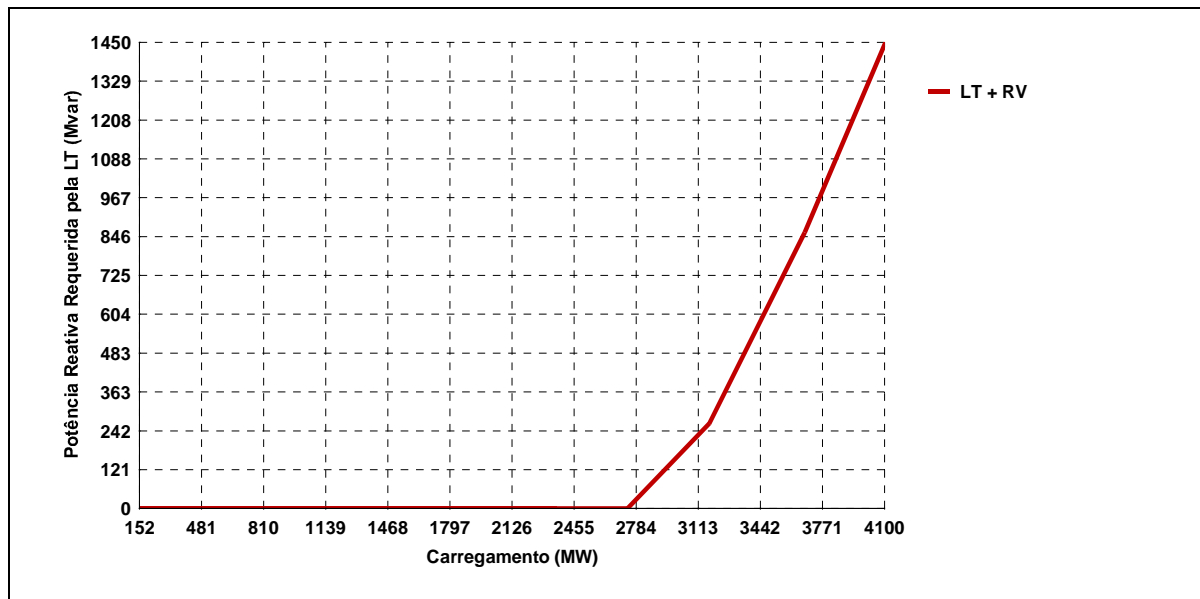


Figura 3: Curva Q X P da Linha de transmissão com instalação de Reatores Variáveis compensando 100 % da LT

Pode-se verificar, que neste caso não haverá necessidade de instalação de reatores de barra nas subestações pela ausência de geração de reativo em baixos carregamentos.

3.0 - COMPARAÇÃO ECONOMICA DOS SISTEMAS DE 765 KV CONVENCIONAL X SISTEMA DE 765 KV COM REATOR VARIÁVEL

A comparação econômica entre sistema de 765 kV convencional e o sistema de 765 kV com reator variável considerou-se apenas os custos não comuns, ou seja, o objetivo foi apenas mostrar o quanto se economizaria utilizando-se o reator variável pra fazer a compensação da linha de transmissão em substituição às compensações convencionais.

Utilizando-se o reator variável, foi possível eliminar todas as outras compensações do sistema de transmissão. Portanto, a comparação econômica consistirá na comparação do custo das compensações da alternativa convencional X alternativa com reator variável. O custo do reator variável foi considerado como sendo o custo de uma das tecnologias existentes para este fim, o Reator de Saturação Natural (RSN) por este já possuir grande numero de pesquisas desenvolvidas no Brasil em particular pelos projetos de pesquisa e desenvolvimento levados a cabo pela Chesf e a UFPE com recursos do P&D ANEEL (Lei 9991/2000).

A tabela 1 mostra o custo das compensações do sistema convencional e o custo do RSN utilizados para as alternativas.

Tabela 1: Resumo da comparação econômica

	Quantidade	Potencia Reativa (Mvar)	custo(R\$ X 10 ⁶)
Capacitor Série	15	1200	1500
Compensação shunt Linha	42	300	300
Reator de saturação Natural	42	800	1000

4.0 - O EFEITO DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE E SHUNT NO SIL DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

O objetivo deste item é mostrar o efeito da compensação de reativos sobre a capacidade de transporte de uma linha de transmissão, através da curva PXQ de uma linha de transmissão. Será também discutida a necessidade de se fazer a compensação de reativos usando a mesma técnica.

A figura 4 mostra a curva PXQ para uma Linha de transmissão de 765 kV. Observa-se que para baixos carregamentos a LT fornecerá algo em torno de 1400 Mvar ao sistema o que poderá ocasionar sobretensões sustentadas na rede elétrica.

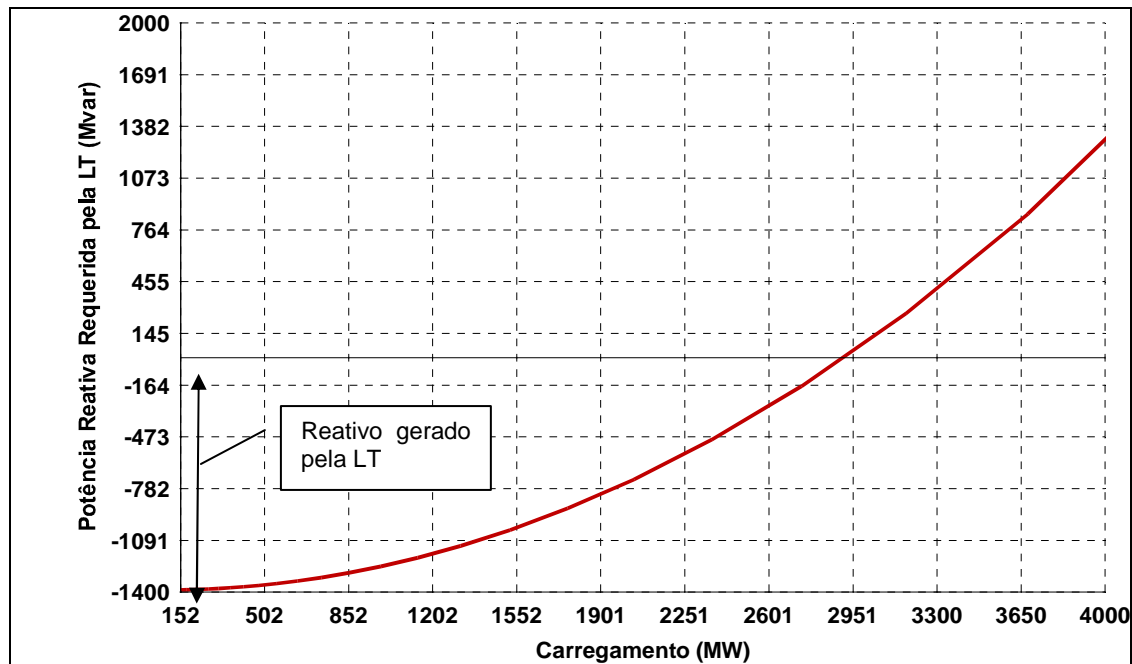


Figura 4 – Curva P x Q para LT 765 kV

A fim de evitar tais sobretensões, utiliza-se a compensação shunt de 80 %. A figura 5 mostra o efeito da compensação shunt fixa na curva PXQ da mesma LT.

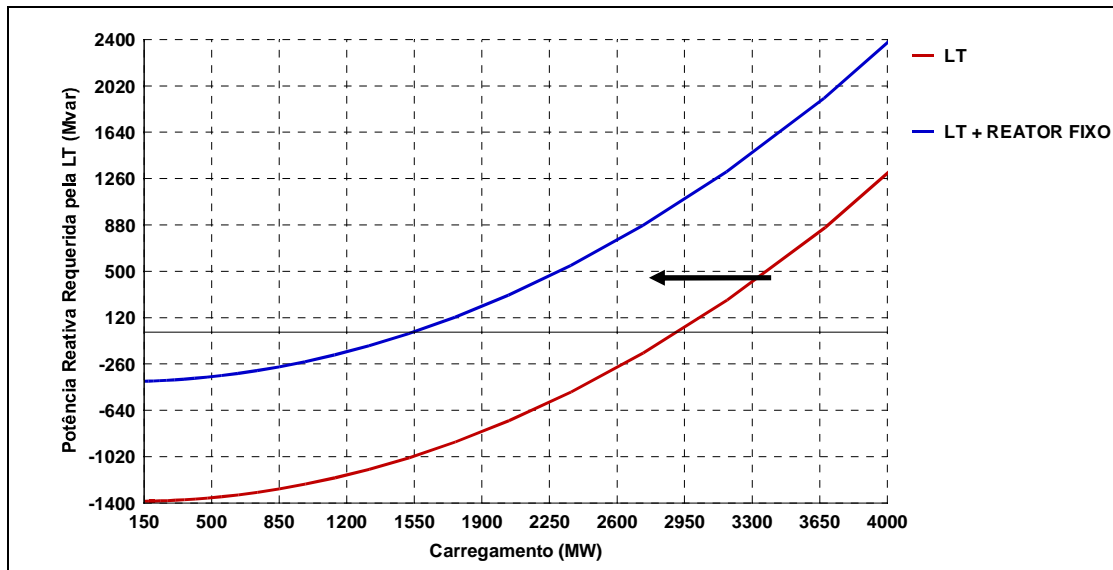


Figura 5 – Curva P x Q para LT 765 kV e 80% de compensação

Observa-se que o efeito da compensação shunt fixa é deslocar a curva PXQ para a esquerda. Percebe-se que a geração de reativos da LT para baixos carregamentos é sensivelmente reduzida, porém, o SIL da Linha agora é algo em torno da metade da linha sem compensação alguma (chamado na literatura de SIL virtual). Observa-se que para um carregamento em torno do SIL da Linha sem compensação (3000 MW) a LT compensada estará absorvendo algo em torno de 1000 Mvar. Este efeito se agravará para carregamentos maiores.

A figura 6 mostra o efeito da compensação série fixa sobre a curva PxQ de uma linha de transmissão. A figura apresenta a LT compensada em 50%

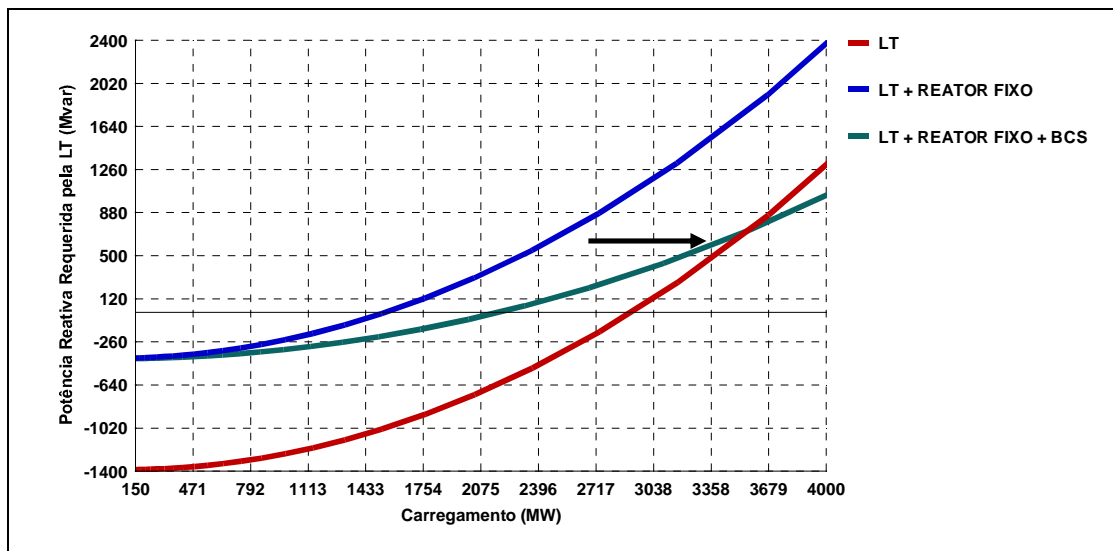


Figura 6 – Curva P x Q LT 765 kV 50% compensada

Observa-se que a curva sofre uma rotação no sentido horário restaurando parte do SIL e suavizando o consumo de reativos para carregamentos elevados.

5.0 - CONCLUSÃO

Os estudos efetuados mostram claramente as vantagens do emprego de reatores variáveis (Reator com saturação natural-RSN) para a compensação shunt do sistema de 765 kV planejado para a integração do aproveitamento hidroelétrico de Belo Monte ao SIN ao invés da compensação tradicional; reatores lineares em derivação e capacitores em série.

Esta análise pautou-se em dois pontos considerados críticos:

- ✓ Influência da compensação no SIL da linha de transmissão;
- ✓ Custos para aquisição dos componentes da compensação.

Como ficou evidenciado, os custos para assegurar o pleno carregamento da linha de transmissão serão pelo menos 45% menores com o uso dos reatores variáveis em lugar da compensação tradicional.

Um estudo mais amplo, envolvendo todo o SIN, mostraria sem dúvidas outros aspectos vantajosos para a aplicação dos reatores variáveis, pois a operação de tais equipamentos tem reflexos positivos ao longo do sistema elétrico.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EPE – Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste – Escoamento da usina de Belo Monte e reforços no SIN - Nº EPE-DEE-RE-040/2011-r0 – agosto de 2011
- (2) CARVALHO, M. A., FONTE, L. A. M., Increasing the capacity of long EHV transmission lines, IEEE / PES Transmission and Distribution Latin America Conference, São Paulo, 2001
- (3) CARVALHO, M. A., 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
- (4) Maia, M. J. A., Cavalcanti, J. A., Junior, M. A. C., Fonte, L. A. M., Oliveira, A. C. C, Análise Comparativa entre Reatores Convencionais e Reatores Saturados: Estudo de caso para a LT Colinas – Sobradinho, XVIII SNPTTE, Grupo VII, GPL 29, Outubro/2005, Curitiba-PR, Brasil.
- (5) T. J.E. Miller, Reactive Power Control In Electric Systems
- (6) Paper Indiano
- (7) Paper Chinês

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo José de Albuquerque Maia: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (1978), pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1980) e MBA em Administração de Empresa pela Fundação Getulio Vargas - RJ (1997). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica e Transitórios Eletromagnéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: Transitórios de chaveamento, controle de tensão, compensação de reativos, reator saturado e para-raios.

Luiz Antônio Magnata da Fonte: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1969), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1997) e doutorado em Processamento da Energia pela Universidade Federal de Pernambuco (2004). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração e Transmissão de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: controle de tensão, reator saturado, compensação de reativos, reatores lineares, transformadores e máquinas rotativas.

Carlos Leoncio G. Costa: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2001), De 2001 a 2008 trabalhou na CELPE (Companhia de Distribuição de Energia Elétrica do Estado de Pernambuco), executando estudos de planejamento e de qualidade de energia. Atualmente trabalha na CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) desde 2009, executando estudos de planejamento da expansão do sistema de transmissão e integração de empreendimentos eólicos ao sistema de transmissão. Seus interesses controle de tensão, compensação de reativos, dinâmica de sistemas de potência e geração distribuída.

Jurandir de Almeida Cavalcanti: Nasceu em Garanhuns, PE, em 1954. Graduação (1978) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Pós-Graduação em Sistema de Controle de Redes Elétricas (1985) na Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, MBA em Finanças Empresarias (2004) pela Fundação Getúlio Vargas - FGV, Curso de Especialização de Engenharia e Segurança do Trabalho CEEST (2005) na Universidade de Pernambuco - UPE, Trabalha na Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, desde 1978, no Planejamento da Expansão da Transmissão.

Fernando Edier F. Freitas: Possui o curso técnico em Eletrotécnica pela Escola Técnica Federal de Pernambuco (2000), graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2008) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2010), com ênfase em Reatores Saturados Naturalmente. Atualmente trabalha na CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) desde 2011 na área de planejamento da expansão do sistema de transmissão, executando estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Coordenação de Isolamento e de Curto-circuito.