



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

GAT 18
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MODELOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVO COM A CORREÇÃO DOS LIMITES COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Nilo J.P. Macedo* Fernando M. Fonseca Márcio G. Sereno Paulo M. Portugal

Furnas Centrais Elétricas S.A.

ELETROBRÁS

RESUMO

Nas simulações de situações de perda de todos os circuitos de um trecho da transmissão CA, que levem a uma operação isolada de um subsistema, as variações de frequência podem atingir valores elevados, implicando na necessidade de se corrigir os parâmetros da rede e dos geradores com a frequência na análise dinâmica.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo para representar Compensadores Estáticos de Reativo (CER) em estudos de avaliação de desempenho dinâmico de sistemas interligados durante distúrbios no sistema transmissão com rejeições de carga, utilizando o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM (1). Neste trabalho são apresentados os diagramas de blocos da função de transferência no domínio de Laplace do controle do CER, tendo sido incluídas a lógica de proteção contra subtensões e a lógica utilizada para representar a correção dos seus limites com as variações da frequência. A título de ilustração também são apresentados os resultados de alguns testes de resposta dinâmica do modelo sugerido.

PALAVRAS-CHAVE

Compensadores Estáticos de Reativo; Estabilidade Eletromecânica; Controle de Tensão; Variação da Frequência.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Compensadores Estáticos de Reativo (2) são dispositivos que utilizam a eletrônica de potência associada a bancos de capacitores e reatores para melhorar o controle de tensão do sistema elétrico e tem por finalidade:

- Estabilização de tensão em regime permanente de operação;
- Rápida estabilização de tensão quando da ocorrência de faltas, visando a manutenção da capacidade de transmissão, do fluxo de corrente e, conseqüentemente, da estabilidade do sistema;
- Amortecimento das oscilações de carga;
- Controle de fluxo de potência reativa, visando a otimização da operação do sistema e a correção do fator de potência;
- Compensação de cargas desbalanceadas;
- Controle de reativo de um sistema conversor CC/CA.

Atualmente duas configurações básicas de CER são mais utilizadas no sistema interligado brasileiro: CER com reator controlado a tiristor e capacitores fixos ou CER com reator controlado a tiristor e capacitores chaveados a tiristores.

Um CER com reator controlado a tiristores (RCT) consiste, basicamente, de um conjunto de bancos de capacitores fixos e um reator cuja potência reativa é variável por meio de um sistema tiristorizado e controlado. A potência total dos bancos de capacitores é calculada de tal forma que supra a máxima solicitação de reativos que se possa prever. Já o reator tem, normalmente, uma potência nominal maior que a dos capacitores, o que permite uma eventual compensação indutiva. A figura 1 mostra um diagrama esquemático de uma instalação RCT típica.

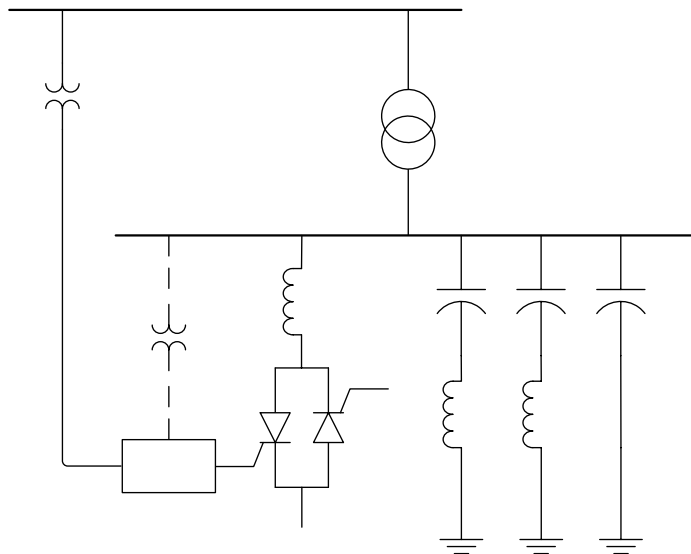


Figura 1 – Diagrama típico de uma instalação de RCT.

O arranjo RCT com capacitores chaveados a tiristores foi desenvolvido visando diminuir dois problemas existentes nos CER com capacitores fixos: perdas e performance durante distúrbios. Nos compensadores com RCT e capacitores fixos o compensador será sempre visto como um circuito paralelo LC o qual, durante grandes distúrbios, estabelecerá oscilações com a impedância do sistema CA. Estas oscilações podem provocar transitórios de tensão com grandes magnitudes, especialmente se esse distúrbio for seguido de rejeição de carga, podendo também interferir no controle do compensador.

2.0 - VARIAÇÃO DOS LIMITES DO CER COM A FREQUÊNCIA

Sob o aspecto de modelagem dos controles dos CER para a análise de estabilidade eletromecânica em programas convencionais, tanto o RCT com capacitores fixos quanto o RCT com capacitores chaveados a tiristores são, geralmente, representados da mesma forma. Apenas o cálculo dos valores limites de geração ou absorção de potência reativa pode variar em função do tipo de equipamento que estiver sendo considerado.

O valor de saída do modelo do CER, no ANATEM, corresponde à susceptância requerida pelo controle e os limites máximos e mínimos correspondem às susceptâncias máxima e mínima do equipamento. No caso de um RCT com capacitores fixos, o limite superior representa o valor total dos elementos capacitivos (capacitores fixos + filtros) e o limite inferior à soma da susceptância dos elementos capacitivos com a susceptância total do reator ($L_{sup} = B_{cap} + B_{filt}$; $L_{inf} = B_{cap} + B_{filt} + B_{reat}$). No RCT com capacitores chaveados, o limite superior também corresponde ao valor total dos elementos capacitivos e o limite inferior à soma da susceptância total do reator com a susceptância dos filtros ($L_{sup} = B_{cap} + B_{filt}$; $L_{inf} = B_{filt} + B_{reat}$).

Entre outros parâmetros, os limites dos modelos dinâmicos dos CER representados através de “Controladores Definidos pelo Usuário” - CDU, no programa ANATEM, podem ser importados dos limites de Q_{max} e Q_{min} definidos no programa de fluxo de potência ANAREDE. Na realidade o que se considera é que, para a tensão nominal, as susceptâncias máximas e mínimas, em p.u., são iguais aos limites da potência reativa, em p.u., considerando a mesma base de potência (100 MVA).

Em análises dinâmicas que envolvam rejeições de carga ou perda de blocos de geração, com variações significativas da frequência, a correção dos limites do CER pode ser realizada de uma maneira bem simples, utilizando no controle o valor da variação da frequência medida na barra em que o CER está conectado.

Para a configuração RCT com capacitores fixos, os limites máximo e mínimo do CER podem ser corrigidos através das seguintes expressões:

$$L_{max} = B_{max} * FREQ \quad e \quad L_{min} = (B_{min} - B_{max} + B_{max} * FREQ^2) / FREQ ;$$

onde os valores de Bmax e Bmin são definidos, através do comando DEFVAL do CDU, como subtipo BMXCES e BMNCES (valores de Qmax e Qmin, em p.u., importados do programa de fluxo de potência) e FREQ é o valor da frequência da barra, em p.u., onde o CER está conectado.

No caso da configuração RCT com capacitores chaveados, seria necessário informar, no CDU do controle, qual a parcela, em pu, que corresponde à susceptância capacitiva dos filtros (Bfilt). Logo, a correção de Lmax seria a igual ao CER com capacitores fixos e o limite mínimo calculado como:

$$L_{min} = (B_{min} - B_{filt} + B_{filt} * FREQ^2) / FREQ .$$

A medição da frequência da barra em que o CER está conectado é um sinal calculado a partir das variações do ângulo da barra e pode apresentar algum erro durante a aplicação de um curto-circuito próximo ao CER. Outro sinal que poderia ser utilizado para a correção dos limites seria a frequência do centro de massa do subsistema ao qual o CER está conectado, porém o ANATEM ainda não disponibiliza esta variável para utilização em modelos definidos pelo usuário.

3.0 - MODELO DE CER PARA ESTUDOS DE PLANEJAMENTO

A figura 2 apresenta um diagrama de blocos do sistema de controle de um CER do tipo RCT com capacitores fixos, considerando a representação de uma filosofia para a estratégia de proteção de subtensão (área demarcada em azul) e a correção dos limites com a frequência. A tabela 1 mostra alguns valores típicos dos parâmetros para análise dinâmica. O regulador de tensão deste CER possui característica proporcional-integral com realimentação da tensão e da corrente com estatismo (slope). A lógica de subtensão leva o CER a operar com geração nula de reativo durante uma situação de curto-circuito próximo ao barramento em que está conectado, de forma a evitar sobretensões transitórias após a eliminação da falta.

3.1 Resultados de Testes no Modelo de CER

Para ilustrar o desempenho dinâmico do modelo de controle apresentado na Figura 2, os itens seguintes apresentam os resultados de alguns testes aplicados em dois CER de +200/-150 Mvar conectados a um sistema de transmissão de 500 kV, considerando situações de curto-circuito e variações de frequência decorrentes de um ilhamento da área em que os CERs estão conectados.

3.1.1 Curto-circuito próximo ao CER

As figuras 3 e 4 apresentam as variações da tensão e da potência reativa total dos CERs para um curto-circuito monofásico próximo e eliminação da falta com abertura de apenas um circuito da LT de 500 kV em 100 ms. Neste caso teste não ocorreu nenhum ilhamento e não se verificou variação significativa da frequência do sistema. Porém, pode-se observar que a queda de tensão nos CERs foi suficiente para ativar a lógica de subtensão no caso em que foi considerada a sua representação.

Neste caso exemplo considerou-se como filosofia para a lógica de subtensão que valores inferiores a 0.7 pu na tensão terminal leva o CER a operar com geração nula de reativo durante a duração do curto-circuito (parâmetros #X3 e #X4 da tabela 1). Obviamente estes valores podem ser ajustados em função das características do sistema de transmissão ao qual o CER está associado.

3.1.2 Rejeição de Carga com Ilhamento

A emergência considerada foi um curto-circuito monofásico no sistema de transmissão em 500 kV, com a eliminação da falta através da abertura de dois circuitos, em 100 ms, ilhando a área em que os dois CERs estavam conectados. As figuras 5 e 6 apresentam a influência da correção da frequência nas variações da tensão e da potência reativa dos CERs, podendo-se observar a elevação dos níveis de tensão e a redução da capacidade de absorção de reativo dos CERs quando a correção dos limites com a frequência é considerada.

As figuras 7 e 8 mostram a variação da frequência da área ilhada em que os CERs estão conectados, podendo-se perceber no detalhe apresentado na figura 8 a diferença entre a frequência do maior gerador da área e a frequência da barra dos CERs. Esta diferença é provocada pelas variações do ângulo da barra durante o curto-circuito próximo ao CER e não afeta de forma significativa o comportamento do modelo no que se refere à correção de seus limites com a frequência.

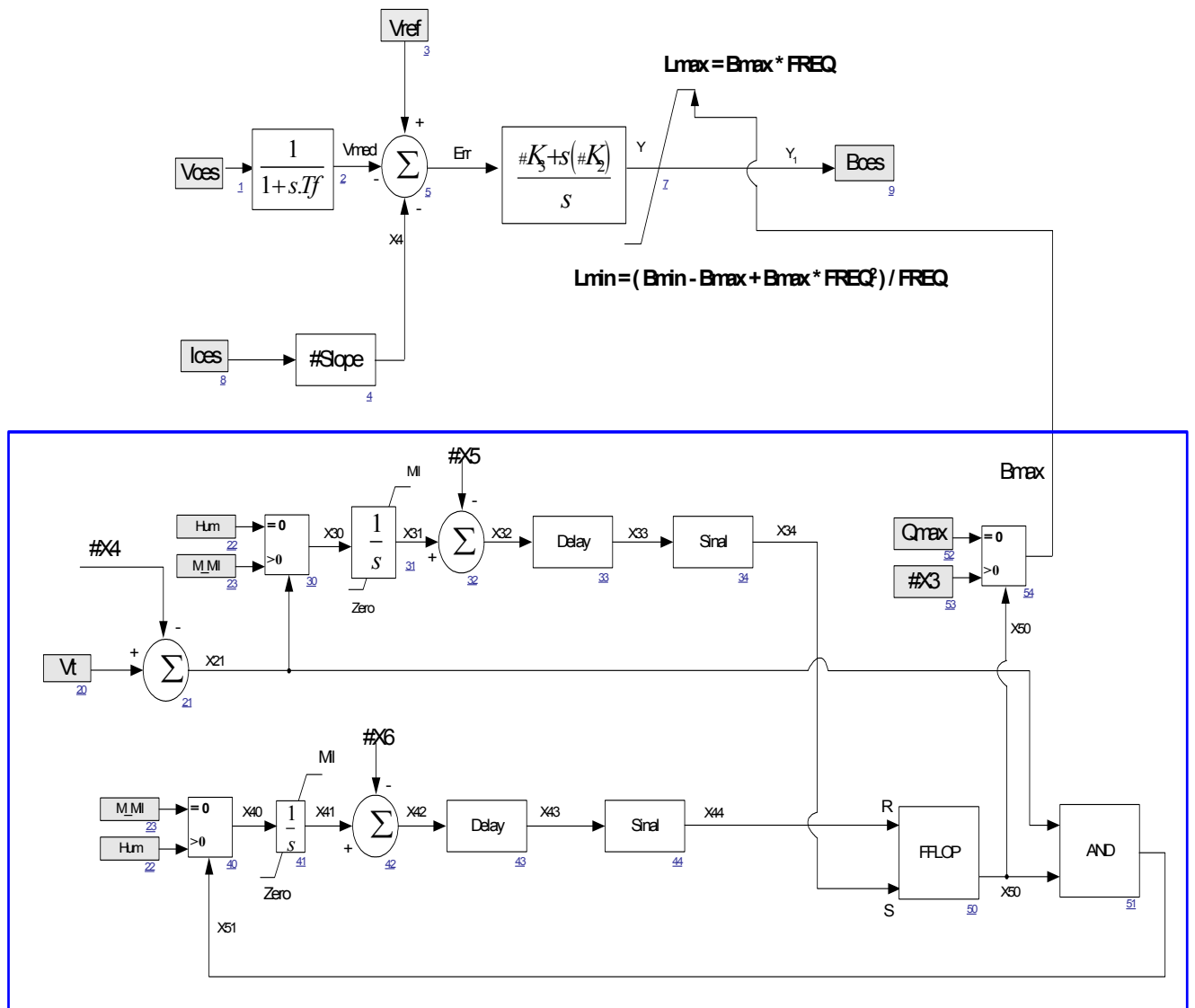


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle do CER com a lógica de subtensão e correção dos limites com a frequência

Tabela 1 – Parâmetros típicos para o sistema de controle do CER

| Parâmetros | Valor | Unidade | Descrição | Faixa |
|------------|-------|---------|--|----------------------|
| V_{CES} | (*) | pu | Tensão da barra controlada pelo CER | [0.95 ... 1.05] |
| V_{ref} | (*) | pu | Referência de tensão do CER | [0.95 ... 1.05] |
| T_f | 0.02 | s | Constante de tempo do filtro de medição da tensão | [0.005 ... 0.05] |
| # slope | 0.01 | pu/pu | Estatismo do CER | [0.0 ... 0.5] |
| # K 2 | 3.0 | pu/pu | Ganho Proporcional do RT | [0.0 ... 100.0] |
| # K 3 | 500.0 | pu/s | Ganho Integral do RT | [0.0 ... 500.0] |
| Q_{max} | (*) | pu | Máxima Potência Reativa do CER ($p/V_{CER} = 1$ pu) | |
| Q_{min} | (*) | pu | Mínima Potência Reativa do CER ($p/V_{CER} = 1$ pu) | |
| # X 3 | 0.0 | pu | Valor de saída do CER durante um curto-circuito | [Q_{MIN} ... 0.0] |
| # X 4 | 0.7 | pu | Tensão abaixo da qual atua a lógica de subtensão | [0.0 ... 0.7] |
| # X 5 | 0.03 | s | Tempo de pick up para atuar a lógica de subtensão | [0.0 ... 1.0] |
| # X 6 | 0.04 | s | Tempo de droop out para desligar a lógica | [0.0 ... 1.0] |
| $BCES$ | | pu | Valor de saída do CER | |

(*) – Valores importados do fluxo de potência

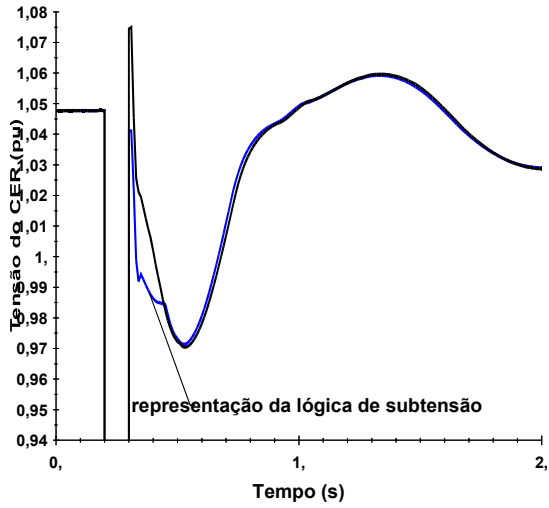


Figura 3 – Detalhe da Variação da Tensão do CER

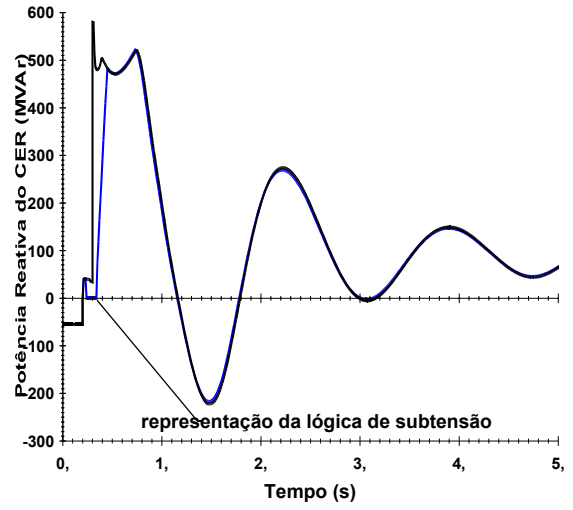


Figura 4 – Variação da Potência Reativa do CER

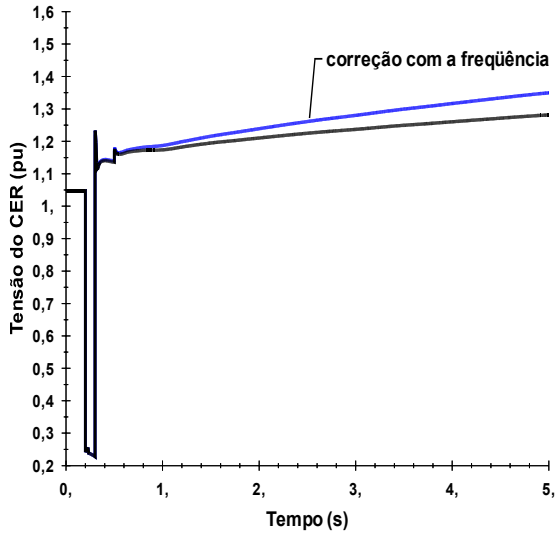


Figura 5 – Variação da Tensão do CER

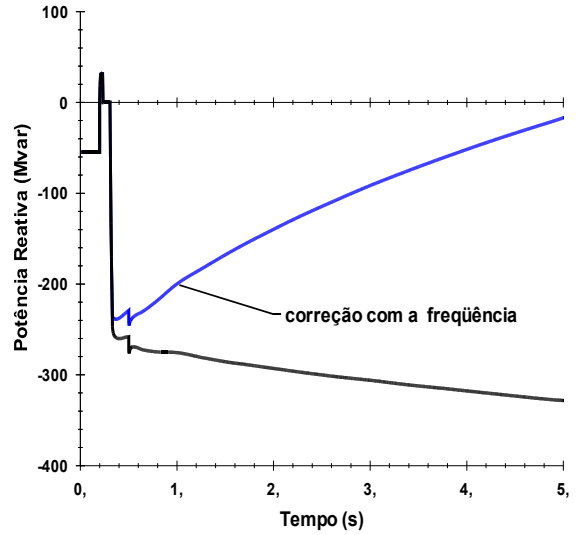


Figura 6 - Variação da Potência Reativa do CER

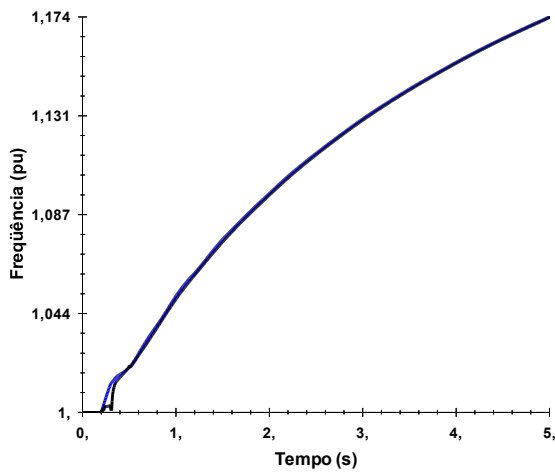


Figura 7 – Variação da frequência (pu)

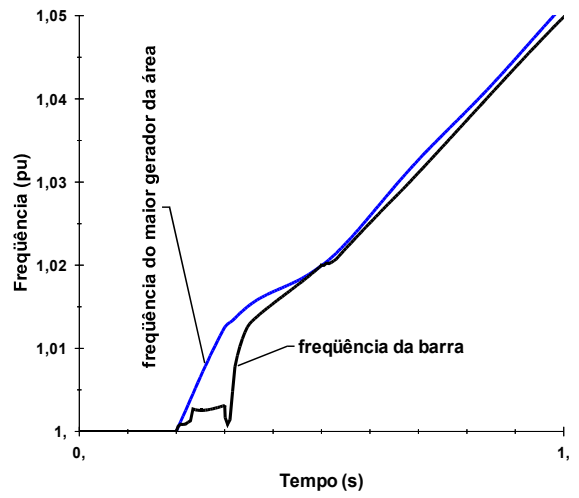


Figura 8 – Detalhe da variação da frequência

4.0 - CONCLUSÕES

Durante a fase de planejamento de sistemas de transmissão que possuam compensadores estáticos de reativo para controle dinâmico da tensão e manutenção da capacidade de transmissão, podem ser utilizados modelos dinâmicos já existentes e disponíveis no banco de dados do ONS. Estes modelos, entretanto, podem possuir várias malhas de controle ou de proteção que foram ajustadas para outras situações específicas e configurações do sistema elétrico. Na fase de definição das características básicas de um novo sistema de transmissão, modelos de CER mais genéricos podem ser úteis, desde que possuam a representação de um conjunto básico de controles.

O programa ANATEM corrige automaticamente os parâmetros da rede elétrica e dos geradores considerando a variação da frequência do centro de massa do subsistema se a opção FREQ for ativada no código de execução EXSI. No entanto, nos estudos de planejamento, ou operação do sistema elétrico, que envolvam a análise de grandes distúrbios no sistema interligado, com variações significativas da frequência devido a perdas de blocos de carga ou de geração, além da correção dos parâmetros da rede com a frequência, a correção dos limites de equipamentos FACTs também deve ser considerada para uma avaliação mais precisa das sobretensões ou subtensões resultantes.

O modelo genérico apresentado neste trabalho é adequado para a representação de CERs em estudos de planejamento e alguns parâmetros, tais como o estatismo (slope), limites máximos e mínimos e ajuste da lógica de subtensão, devem ser ajustados em função das características do sistema em análise.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Programa ANATEM, Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário, V09-12/05a, Cepel 2005.
- (2) STATIC VAR COMPENSATORS, Working Group 38-01, Task Force No. 2 on SVC – CIGRÉ, 1986.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nilo José Pereira de Macedo

Nascido em Macaé, RJ em 01 de outubro de 1954.

Mestrado (1992) na COPPE-UFRJ e Graduação (1979) em Engenharia Elétrica na PUC-Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1980.

Engenheiro da Divisão de Estudos de Especiais do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Participante do Grupo de Estudos CE B4 do CIGRÉ-Brasil e WG B4-34 do CIGRÉ-Internacional.

Fernando Mendonça da Fonseca

Nascido em Cataguases, MG em 30 de abril de 1969.

Curso de Especialização – CESI (2004) na UNIFEI-MG e Graduação (1992) em Engenharia Elétrica na UERJ-Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1997.

Engenheiro da Divisão de Estudos de Especiais do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Márcio Goldemberg Sereno

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 27 de abril de 1953.

Pós-graduado (1983) em Sistemas de Potência na PUC-RJ e Graduação (1977) em Engenharia Elétrica na UERJ-Rio de Janeiro.

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1978.

Chefe da Divisão de Estudos do Sistema de Transmissão do Departamento de Planejamento de Transmissão.

Paulo Max Maciel Portugal.

Nascido em Nilópolis, RJ em 09 de outubro de 1977.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica na UERJ – Rio de Janeiro.

Empresa: Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., desde 2003.

Engenheiro da Divisão de Estudos Elétricos da Transmissão.

Participante do grupo de estudos do CE B4 do CIGRÉ-Brasil.