
REPRESENTAÇÃO DO CONTROLE MESTRE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA FOZ-IBIUNA NO PROGRAMA ANATEM

**NILO JOSÉ P. DE
MACEDO ***
Eletrobras Furnas
Brasil

**SÉRGIO DO ESPÍRITO
SANTO**
Eletrobras Furnas
Brasil

**FERNANDO M. DA
FONSECA**
Eletrobras Furnas
Brasil

***Resumo** - O modelo “built-in” que representa o Controle de Potência do Sistema HVDC no programa de estabilidade eletromecânica ANATEM é muito simples. Nas simulações do elo CC, no modo de operação em controle síncrono de potência, são necessárias intervenções dos usuários para representar adequadamente o seu comportamento. Este trabalho apresenta um modelo para o Controle Mestre, desenvolvido em CDU, que representa de forma mais realista o Controle de Potência e o comportamento dinâmico do elo CC com as transferências automáticas de potência entre os polos. Esse novo modelo facilita e melhora a representação do elo CC em controle síncrono de potência durante eventos, tais como perda de polo, bipolo ou faltas na linha CC. Neste trabalho, além da descrição do Controle Mestre, são apresentados alguns resultados de simulações envolvendo as principais emergências no elo CC.*

***Palavras - chave:** Elo CCAT, Sistema HVDC, Controle Mestre, Controle de Potência do Bipolo.*

1 INTRODUÇÃO

A validade dos estudos de simulação digital está diretamente relacionada à fidelidade dos modelos e dados utilizados na representação dos diversos componentes do sistema elétrico de potência. Por este motivo, desde a fase de planejamento do Sistema de Transmissão de Corrente Contínua de FURNAS, aqui denominado também por Sistema HVDC FOZ-IBIUNA, ou por Elo CC de Furnas, modelos dinâmicos desse sistema vêm sendo continuamente desenvolvidos nos programas de estabilidade eletromecânica utilizados pelas empresas brasileiras. O grau de detalhamento dos modelos, com a inclusão de características adicionais de controle, tem aumentado em função da necessidade dos grupos de estudos de analisar modos especiais de operação ou reproduzir emergências próximas ao elo CC que afetem o seu desempenho dinâmico. Em geral, os modelos são validados com base em registros de campo ou resultados de simulações dos eventos no Simulador de Sistemas Elétricos da Eletrobras Furnas.

No programa ANATEM [1], dadas as limitações inerentes de uma modelagem monofásica de um elo CC em programas de transitórios eletromecânicos, ou em função de simplificações na modelagem de controles hierarquicamente mais elevados, nas simulações de alguns eventos ainda são necessários alguns procedimentos especiais para que se consiga reproduzir de forma adequada o seu comportamento. Entre as limitações existentes no modelo “built-in” atual pode-se destacar, por exemplo, a representação simplificada do Controle de Potência nas simulações de perda de polo ou de bipolo em controle síncrono de potência.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de Controle Mestre, que melhor represente o elo CC em controle síncrono de potência no programa ANATEM, e descrever os procedimentos que devem ser adotados para a sua utilização nos estudos dinâmicos do Sistema Interligado Nacional (SIN).

2 OPERAÇÃO DO SISTEMA HVDC EM CONTROLE SÍNCRONO DE POTÊNCIA

A Fig.1 apresenta um diagrama simplificado da configuração do Sistema HVDC FOZ-IBIUNA. Cada polo CC desse sistema possui duas pontes conversoras de 300 kV ligadas em série e, dependendo se uma ponte está ligada ou não, é possível a operação de cada polo em 600 kV ou 300 kV. O modo de operação normal dos polos é em 600 kV, mas por questões de manutenção ou por conveniência operativa em condições de baixa carga, é possível operá-los em qualquer combinação. Ou seja, é possível a operação de cada bipolo em +600/-600, +600/-300, +300/-600 ou +300/-300 kV.

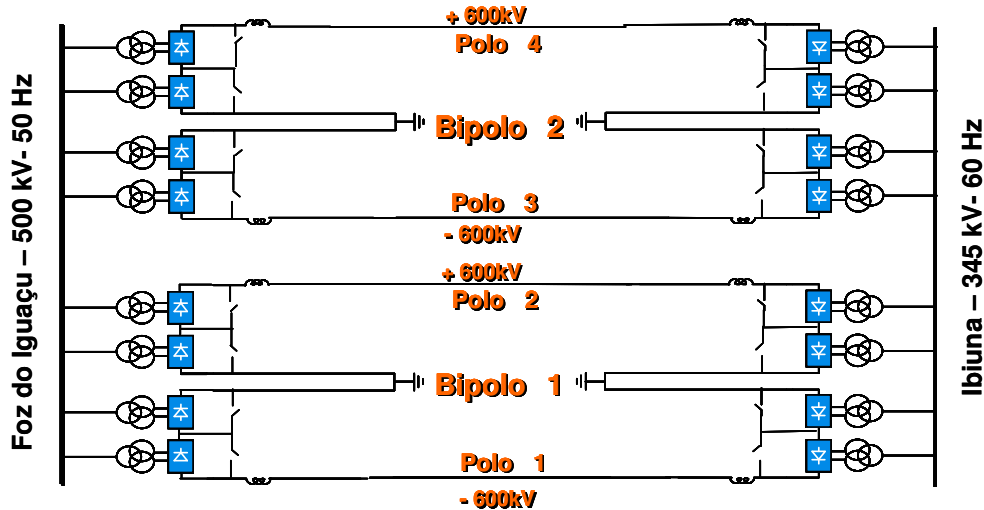


Fig. 1 – Configuração do Sistema HVDC FOZ-IBIUNA

Além da possibilidade de operação com diferentes níveis de tensão CC, esse sistema pode operar em diversas configurações no que se refere ao controle de carga dos bipolos: operação em controle síncrono de potência; operação em controle assíncrono de potência e operação em controle de corrente [2].

A forma usual de operação é o controle síncrono de potência nos dois bipolos. Neste modo de operação, quando ocorre a perda de um polo, o outro polo do mesmo bipolo assume instantaneamente a potência perdida até o limite de sua capacidade máxima de transmissão de corrente CC e o excedente é transferido para o outro bipolo. No modo assíncrono de potência não ocorre a transferência de potência entre os polos. No modo de operação em controle de corrente também não ocorre a transferência de potência entre os polos.

A Fig.2 mostra o diagrama de blocos com a Função de Transferência (FT) do controle de potência “built-in” do programa ANATEM. O sinal de entrada SM01 é utilizado para conectar o estabilizador de frequência do sistema CA em 50 Hz (STAB50), atualmente já modelado em CDU (um modelo para cada polo). A Fig. 3 mostra a FT do STAB50 [3].

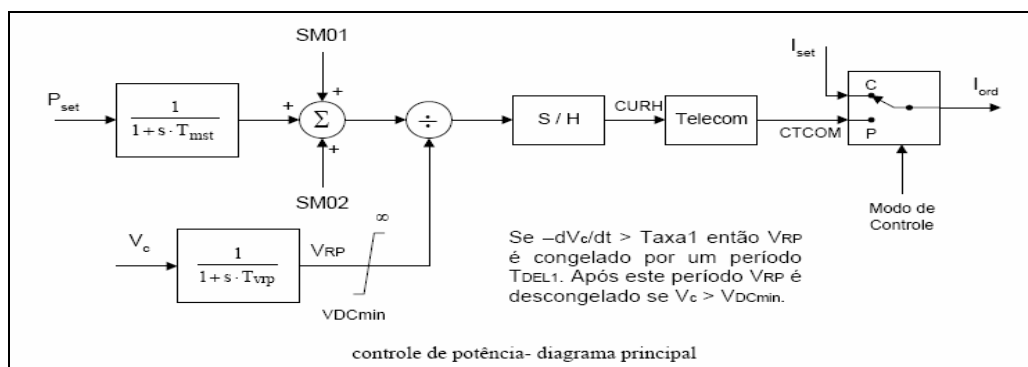


Fig. 2 – Função de Transferência do modelo “built-in” do Controle de Potência de cada polo

Como a transferência automática de potência entre os polos ou entre bipolos no modo síncrono de potência não está representada no modelo “built-in” do elo CC, é necessária a alteração manual da ordem de potência de cada polo remanescente, para reproduzir estas ações, através da aplicação de degrau no sinal de referência de controle do conversor. Entre os controles automáticos que precisam ter os parâmetros alterados em função do modo de controle, destacam-se os estabilizadores de frequência dos lados de 50 Hz (STAB50) e 60 Hz (DP60). O STAB50 e o DP60 atuam no Elo CC a nível de bipolo e como no modelo “built-in” a representação do controle de potência é realizada a nível de polo, os ganhos e os limites desses modelos precisam ser alterados em função do modo de operação e da configuração dos polos nas simulações dinâmicas [4].

O modelo de Controle Mestre [3] para representar o controle de potência dos dois bipolos foi desenvolvido em CDU (Controle Definido pelo Usuário) e pode ser ligado ao modelo “built-in” que representa os demais controles do elo CC, tais como o controle de corrente e da área de extinção (ou gama) de cada polo. Como o controle de sobrecarga de cada polo também foi incluído no modelo em CDU, o modelo “built-in” do STOL pode ser desativado através da alteração de seus parâmetros (limites e sobrecarga).

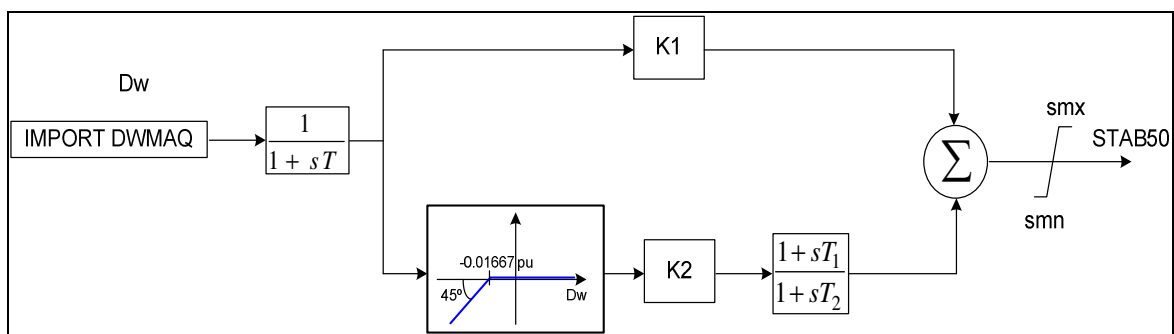


Fig. 3– Função de Transferência do Estabilizador de Frequência do Sistema de 50 Hz (STAB50)

A Fig. 4 apresenta um diagrama funcional simplificado do controle de potência síncrona com a transferência de potência do bipolo 1 para o bipolo2. O sinal de entrada é a ordem de potência do bipolo, acrescida da contribuição do STAB50 e da variação de potência proveniente do bipolo 2 ($\Delta P3 + \Delta P4$). A variação total da ordem de potência do bipolo 1 é dividida pela soma das tensões CC dos polos 1 e 2 ($Ud1 + Ud2$) para calcular a ordem de corrente de cada polo. A ordem de corrente de cada polo é limitada pelo STOL (Short Time Overload Limiter), que reduz automaticamente a sobrecarga, e a diferença entre a ordem de corrente e a corrente limitada corresponde à parcela de potência que cada polo não consegue transmitir e é transferida para o bipolo 2 ($\Delta P1 + \Delta P2$).

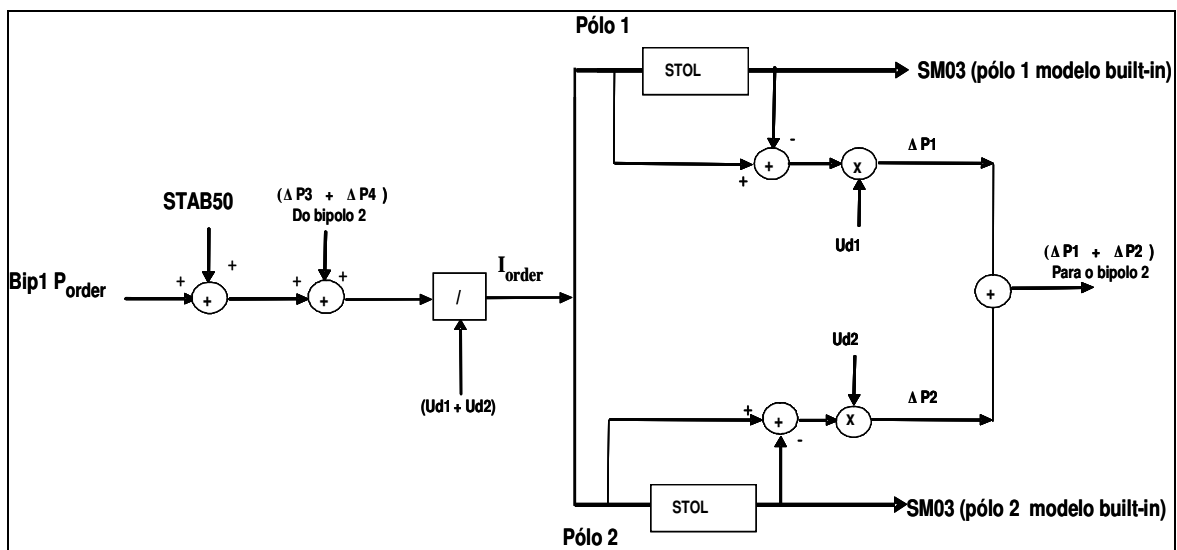


Fig. 4 – Diagrama Simplificado do Controle de Potência Síncrona do Bipolo 1

3 EXEMPLOS DE SIMULAÇÕES DE EMERGÊNCIAS NO ELO CC

Os itens a seguir apresentam alguns exemplos de eventos no Sistema CC e os resultados das simulações no ANATEM utilizando um modelo misto, onde o modelo em CDU do Controle Mestre foi conectado aos modelos “built-in” dos demais controles dos polos. No modelo do Controle Mestre o modo de operação bipolar síncrona pode ser ativado ou desativado através de parâmetros (#SINCR = 1.0 e #TRANS =1.0).

3.1 Perda do Polo 1 do Bipolo 1

Além das alterações de parâmetros do STAB50, a simulação deste evento com o modelo “built-in” apresentado na Figura 2 não considera a capacidade dos polos 3 e 4 em assumir uma parcela da potência do polo 2 quando o controle de sobrecarga (STOL) começa a atuar. Como os polos 3 e 4 assumem uma parcela menor de potência no início do evento, eles ainda poderiam assumir uma parte da potência reduzida no polo 2 pelo STOL.

O exemplo abaixo apresenta a simulação da perda do polo 1 do bipolo 1 no instante $t=1.0$ s, considerando o elo CC transmitindo em torno de 90% da potência nominal em controle síncrono, utilizando o modelo do Controle Mestre em CDU. Pode-se observar, na Fig. 5, a sobrecarga de corrente do polo 2 nos instantes iniciais e, com a redução da corrente para o seu valor nominal (1.0 pu) pela atuação do STOL deste pólo, a tomada de carga automática nos polos 3 e 4 do bipolo 2 pela transferência de potência entre os bipolos.

```

(=====
( DADOS DE EVENTOS - BLOQUEIO DO POLO 1 DO BIPOLO 1
(=====
DEVT IMPR
(Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und          (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
BELO 1.0          1          +
999999
    
```

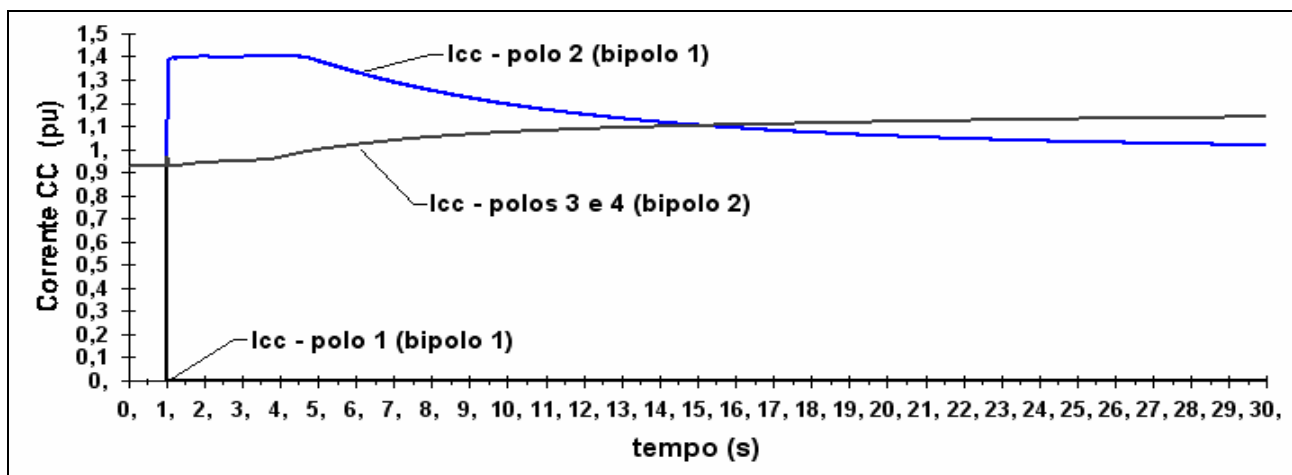


Fig. 5 – Variação de Corrente CC nos Polos (pu)

3.2 Perda dos Polos 1 e 2 do Bipolo 1

O exemplo abaixo apresenta o resultado da simulação da perda dos polos 1 e 2 do bipolo 1 em $t=1.0$ s. Pode ser observado, na Fig. 6, que os polos 3 e 4 assumem automaticamente parte da corrente CC perdida no bipolo 1 até o limite de 40% de sobrecarga e o STOL começa a reduzir automaticamente essa sobrecarga após 5 s.

```

(=====
( DADOS DE EVENTOS - BLOQUEIO DOS POLOS 1 E 2 DO BIPOLO 1
(=====
DEVT IMPR
(Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex) ( % ) (ABS ) Gr Und          (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
BELO 1.0          1          +
BELO 1.0          2          +
999999
    
```

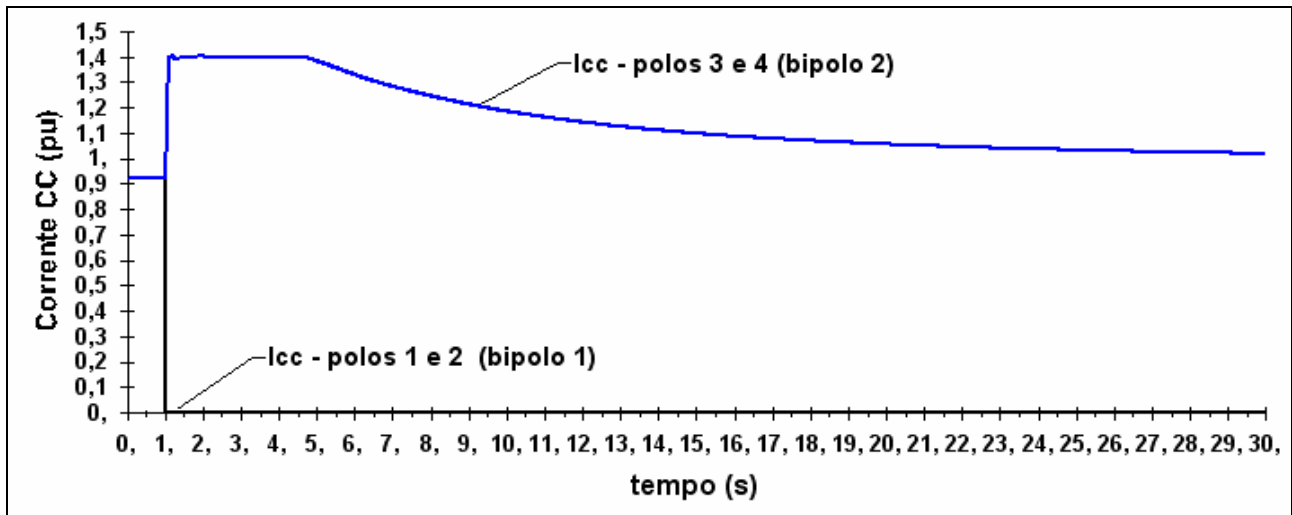


Fig. 6 – Variação de Corrente CC nos polos (pu)

3.3 Falhas na Linha CC

A identificação da falta CC pela proteção é realizada através da monitoração da tensão CC nas estações conversoras, podendo atuar por nível ou por taxa de variação da tensão. Para faltas no meio da linha CC em geral a proteção atua por nível de tensão, podendo ocorrer um atraso da ordem de 100 ms entre o instante da falta e o instante de atuação da proteção. A proteção da linha do Elo CC de FURNAS possui 4 religamentos automáticos temporizados. O primeiro religamento ocorre após um tempo morto de 250 ms; o segundo, após 350 ms; o terceiro, após 450 ms; o quarto, e último, após 550 ms. Os três primeiros religamentos ocorrem com tensão plena (600 kV) e o último religamento com tensão reduzida de 450 kV (0.75 pu de 600 kV).

A representação das tentativas de religamento não é automática no ANATEM, sendo necessário repetir os eventos para cada falta e cada religamento. A aplicação da falta CC é realizada através do evento ACLC (aplicação de curto-circuito em linha CC), e a sua eliminação, através do evento RCLC (remoção de curto-circuito em linha CC). A atuação e desativação da proteção contra faltas CC também não são automáticas e precisam ser efetuadas através de comandos. O evento LPCC liga proteção de curto-circuito em linha CC e o evento DPCC desliga proteção de curto-circuito em linha CC.

Na situação de quatro religamentos, quando ocorre o religamento com a tensão reduzida em um polo, a soma das tensões dos polos no lado retificador cai de 2.0 pu para 1.75 pu, provocando uma elevação instantânea da ordem de corrente nos dois polos para compensar essa queda. Dependendo do valor da ordem de potência dos bipolos antes do evento, duas situações podem ocorrer:

- Na condição operativa em que a potência do bipolo antes do evento é inferior a 2740,5 MW, a elevação da ordem da corrente CC consegue compensar a redução da tensão, e a potência CC total transmitida pelo bipolo continua a mesma, tanto em regime transitório quanto em regime permanente.
- Nas condições operativas em que a ordem de potência está acima desse valor, a corrente CC ultrapassa o seu valor nominal para compensar transitoriamente a queda de tensão, porém o controle de sobrecarga de curta duração (STOL) reduzirá a ordem de corrente, diminuindo a potência CC para o limite de 2740,5 MW no bipolo. No caso de operação síncrona com transferência de potência, o outro bipolo poderá assumir a parcela da potência perdida, respeitando também a sua curva de sobrecarga.

A simulação da falta na linha CC com o 4º religamento com a tensão CC reduzida não pode ser realizada de forma automática utilizando os modelos “built-in” dos controles a nível de polo. Como no Sistema HVDC FOZ-IBIUNA a configuração de cada polo possui seis válvulas de 6 pulsos, 150 kV por válvula, ligadas em

série, uma forma aproximada de representar a operação com tensão CC reduzida (0.75 pu) em um polo é a simulação, através do evento RMPC, da perda de uma ponte de 6 pulsos nos lados retificador e inversor do polo em questão. Entretanto, com essa simplificação o consumo de reativo do polo não é exatamente igual ao consumo real da operação com tensão reduzida. O exemplo a seguir apresenta a simulação de 4 faltas no meio da linha CC do polo 1, em controle síncrono de potência, com os comandos nos dados de eventos para simular o curto-circuito (ACLC/RCLC), a atuação da proteção de falta na linha CC (LPCC/DPCC) e a operação com tensão reduzida (RMPC). A fig. 7 mostra o comportamento da potência nos polos do elo CC para este evento.

```

(=====
( DADOS DE EVENTOS - 4 FALTAS NO MEIO DA LINHA CC DO POLO 1
(=====
DEVT IMPR
(Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex ) ( % ) (ABS ) Gr Und          (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
ACLC  1.0    10   20
LPCC  1.0     1
RCLC  1.25   10   20
DPCC  1.25    1
(
ACLC  2.00   10   20
LPCC  2.00    1
RCLC  2.35   10   20
DPCC  2.35    1
(
ACLC  3.00   10   20
LPCC  3.00    1
RCLC  3.45   10   20
DPCC  3.45    1
(
ACLC  4.00   10   20
LPCC  4.00    1
RCLC  4.55   10   20
DPCC  4.55    1
RMPC  4.55    1           1
RMPC  4.55    2           1
999999

```

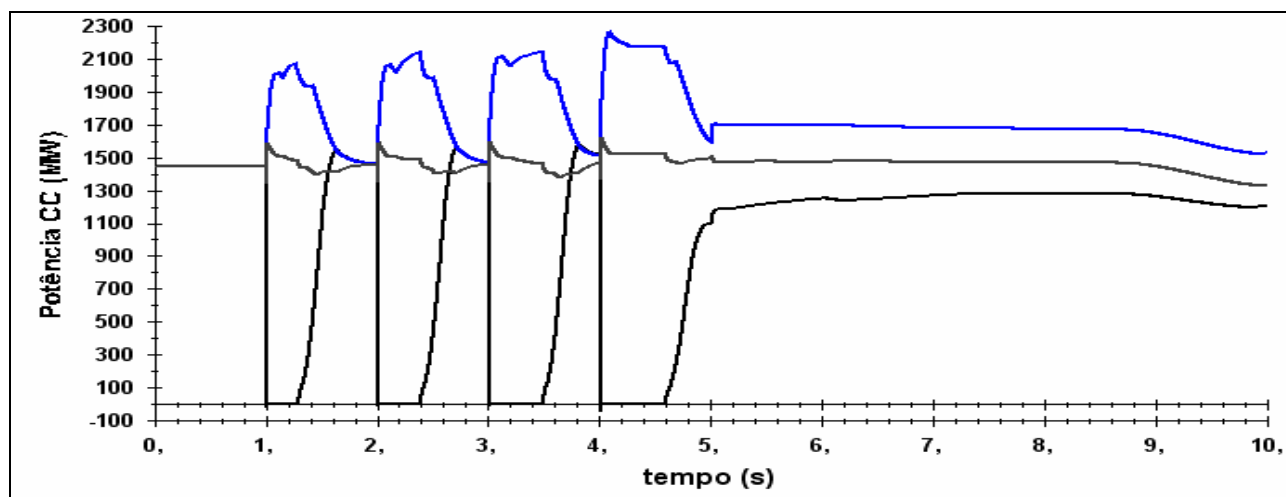


Fig. 7 – Variação de Potência CC nos polos (MW)

4 VARIAÇÃO DA ORDEM DE POTÊNCIA DE UM BIPOLO

A variação da referência de potência dos bipolos é feita através de uma rampa de carga que depende do número de geradores sincronizados em Itaipu 50 Hz, respeitando o limite máximo de 1 MW/s por máquina. Considerando nove geradores em operação, por exemplo, a rampa máxima de carga seria de 9 MW/s.

A Fig. 8 mostra o diagrama de blocos um pouco mais detalhado do controle de potência do bipolo 1. A referência da potência (PREFB1) corresponde ao bloco 1 do CDU do Controle Mestre e pode ser alterada

através do evento TCDU (degrau em sinal de entrada de CDU). O parâmetro #RAMP representa o valor da rampa de carga em pu/s e pode ser ajustado de acordo com a necessidade.

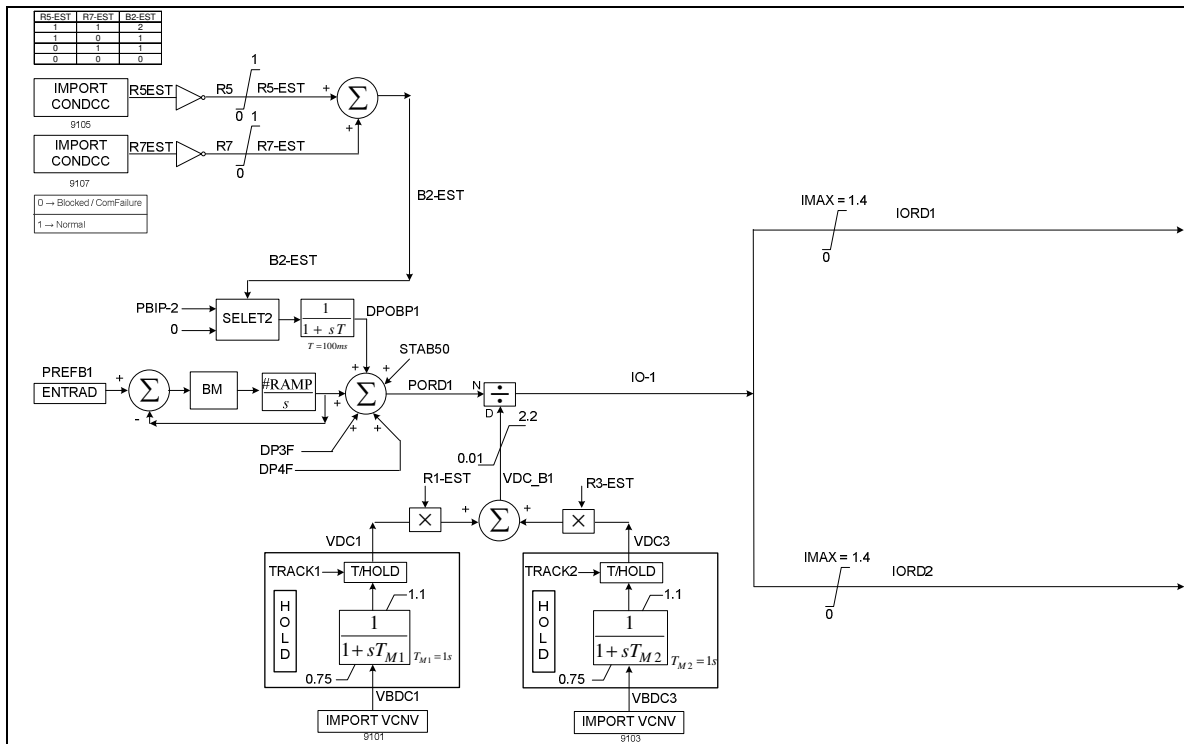


Fig. 8– Controle de potência do bipolo 1

O exemplo a seguir apresenta os comandos nos dados de eventos para simular uma redução de 25% na ordem de potência do bipolo 1, considerando uma rampa de 8,3 MW/s. A Fig. 9 mostra o comportamento da potência nos polos do elo CC para este evento. A pequena elevação da potência nos polos do bipolo 2 deve-se à atuação do STAB50 para amortecer a variação de frequência decorrente da redução da potência do bipolo 1.

```

(=====
( DADOS DE EVENTOS - VARIAÇÃO DE -25% NA ORDEM DE POTÊNCIA DO BIPOLO 1
(=====
DEVT IMPR
(Tp) ( Tempo) ( El ) ( Pa)Nc( Ex ) ( % ) (ABS ) Gr Und          (Bl)P ( Rc ) ( Xc ) ( Bc ) (Defas)
TCDU 1.0 9990          -25          1
999999
    
```

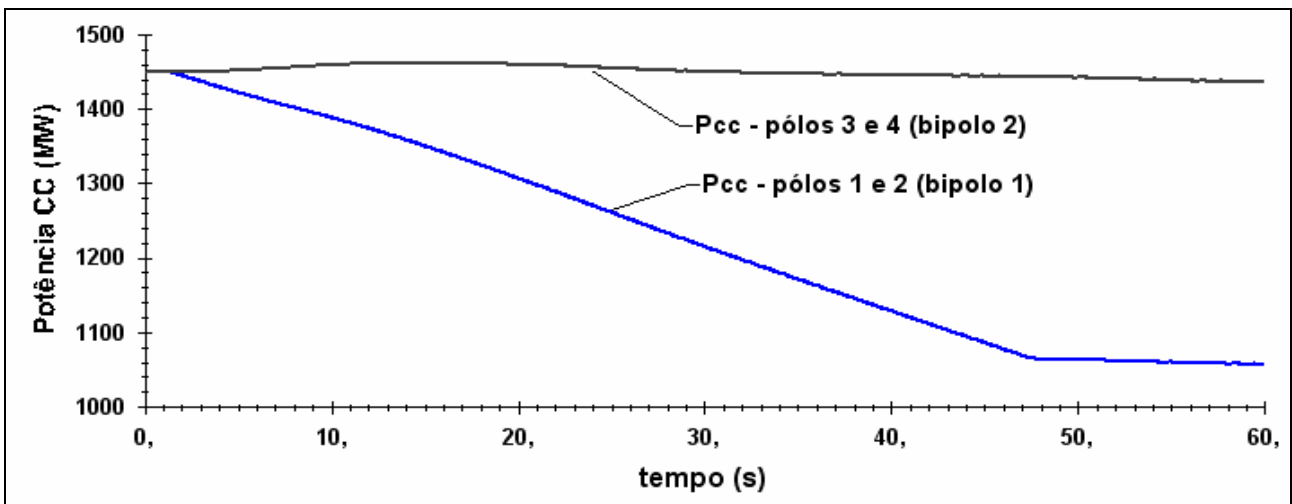


Fig. 9– Variação da Potência CC nos polos (MW)

5 CONCLUSÕES

O sistema de controle global do elo CC envolve diversas malhas de controle. Devido à sua complexidade e diversidade, faz-se necessária uma coordenação de controle hierarquizada.

No topo da cadeia hierárquica encontra-se o controle mestre, que engloba o controle de potência a nível de bipolo, responsável pela determinação, supervisão e distribuição da potência transmitida no elo. A atribuição do controle de potência é enviar a ordem de corrente calculada (I_{ord}) para as duas estações terminais conversoras, retificador e inversor. Estas, por sua vez, tratam a ordem recebida nos seus respectivos controles de polo, verificando se houve alguma restrição, ou seja, se algum limite foi ultrapassado. A seguir, o controle de polo gera a informação relativa ao instante de disparo adequado para que a ordem de corrente desejada seja alcançada. Esta informação, na forma de um sinal de tensão, é dirigida aos controles das pontes conversoras responsáveis pelo disparo das válvulas.

A utilização de modelos “built-in” para representar todas as malhas de controle do elo CC apresenta resultados com precisão adequada para os principais eventos no sistema CA, tais como curtos-circuitos monofásicos ou trifásicos, ou bloqueio de bipolo, apesar da necessidade de alterações manuais da ordem de potência para representar a transferência de potência entre os bipolos. Entretanto, para facilitar e representar de forma mais precisa a perda de um polo, ou faltas na linha CC, verificou-se a necessidade de melhorar a representação da malha de controle a nível dos bipolos.

A opção de representar apenas os níveis de controle mais elevados em CDU, conectados aos modelos “built-in” dos controles a nível de polo, melhora a representação de alguns eventos e elimina a necessidade de alteração manual de parâmetros do STAB50, porém não evita totalmente a necessidade de intervenções por parte do usuário. Para representar todos os eventos envolvendo o elo CC de forma automática sem a necessidade de intervenções manuais através da inserção de comandos de eventos, todas as malhas de controle do elo CC precisam ser modeladas em CDU.

Nos novos modelos, atualmente em fase final de desenvolvimento e testes de desempenho, pretende-se representar em CDU toda a malha de controle do elo CC a nível de polo, com o controle da tensão CC, a proteção da falta na linha CC com os religamentos automáticos e os chaveamentos automáticos dos filtros CA dos lados retificador e inversor, coordenados pelo controle mestre.

6 REFERÊNCIAS

- [1] ANATEM – ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑICOS – MANUAL DO USUÁRIO – V09-12/02, Eletrobras CEPTEL, 2010.
- [2] V. Madzarevic, C.A.O. Peixoto, L. Hagloef, “General Description and Principal Characteristics of the Itaipu HVDC Transmission System”, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HVDC TECHNOLOGY, paper 1-1, Mar. 1983, Rio de Janeiro, Brazil.
- [3] A.G. Figueiredo, A.A.S. Praça, N. L. Shore, “Master Control of the Itaipu HVDC Transmission System”, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HVDC TECHNOLOGY, paper 1-7, Mar. 1983, Rio de Janeiro, Brazil.
- [4] N.J.P.Macedo, C.H.B.P. Damião, S.E. Santo, “Representação de Eventos no Sistema de Transmissão de Corrente Contínua de FURNAS no Programa ANATEM” – Nota Técnica de Furnas, DEEO.O – 01/2000, Abril 2000.