



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

Desenvolvimento e Validação do Modelo do Bipolo 1 do Sistema de Transmissão HVDC de Belo Monte para o Programa ANATEM

FERNANDO CATTAN JUSAN* (1); VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA (2); SAULO JOSÉ DA SILVA FILHO (2); EDUARDO DE MEDEIROS BRANDI (3); Furnas Centrais Elétricas (1); Jordão Engenharia (2); BMTE (3);

RESUMO

Este informe apresenta o desenvolvimento e os resultados de validação de um modelo de simulação digital do sistema de controle e proteção DC do Bipolo 1 do sistema de transmissão HVDC de Belo Monte (Xingu - Estreito) para o programa ANATEM, do CEPEL. O modelo foi desenvolvido através de “Controles Definidos pelo Usuário” (CDU), organizados de forma hierárquica e modular, e possui elevado grau de detalhamento e automatismo. Com isso, praticamente elimina-se a necessidade de intervenções manuais pelo usuário para representar ações que são executadas automaticamente pelo sistema de controle. O modelo foi desenvolvido com base em um modelo conceitual desenvolvido pelo fabricante para o programa PSCAD. Algumas funções não presentes no modelo PSCAD foram desenvolvidas a partir de relatórios técnicos e descritivos funcionais disponibilizados pelo fabricante. Os testes de validação demonstram a precisão do modelo e sua aplicabilidade em estudos de planejamento e de operação do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

HVDC, Belo Monte, Modelo, ANATEM, Sistema de Controle.

1.0 - INTRODUÇÃO

O complexo hidrelétrico de Belo Monte está localizado no estado do Pará, no Norte do Brasil, e possui uma capacidade instalada de aproximadamente 11 GW (18 x 611 MW). Os estudos de planejamento da expansão da transmissão indicaram que a integração da usina de Belo Monte ao sistema interligado nacional iria requerer um reforço significativo da inteligência Norte-Sudeste para viabilizar o aumento da transferência de energia entre os referidos subsistemas (1). A solução técnica escolhida é composta por dois bipolos HVDC de ± 800 kV, 4.000 MW cada, conectando a subestação de Xingu 500 kV (localizada a poucos km de Belo Monte) a dois pontos de conexão distintos na região sudeste, Estreito 500 kV (em Minas Gerais) e Terminal Rio 500 kV (no Rio de Janeiro). Cada bipolo foi concedido de forma independente pela ANEEL por meio de leilões públicos de transmissão.

O consórcio Belo Monte Transmissora de Energia (BMTE) é o reponsável pela construção do primeiro bipolo (Bipolo 1), sendo formado por empresas privadas e estatais: State Grid Brazil Holding S.A. (51%), Furnas (24.5%) e Eletronorte (24.5%). O Bipolo 1 entrou em operação comercial em dezembro de 2017, interligando as subestações de Xingu e Estreito, por meio de uma linha de transmissão aérea de aproximadamente 2.084 km. Este é o primeiro sistema HVDC em ± 800 kV do país (e do ocidente) e também o primeiro inserido na rede AC do sistema brasileiro, i.e. onde o sistema HVDC corre em paralelo com a rede AC existente. O segundo bipolo (Bipolo 2) está previsto para começar a operar em meados de 2019 e será conectado à nova subestação de Terminal Rio, distante aproximadamente 2.400 km de Xingu. O Bipolo 2 pertence a outra transmissora (XRTE – Xingu Rio Transmissora de Energia), que escolheu outro fabricante para o projeto, teste e fabricação dos componentes, equipamentos e

(*) Rua Real Grandeza, 219 – Sala 110 - Bloco E – CEP 22.281-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
Tel.: +55(21)2528-5451 – E-mail: cattan@furnas.com.br

sistemas das estações conversoras. A integração dos dois bipolos neste cenário com múltiplos agentes e fornecedores representa um desafio adicional ao projeto e, portanto, a utilização de modelos de simulação precisos e detalhados é fundamental para uma correta avaliação das interações dinâmicas entre os bipolos e dos ajustes dos sistemas de controle e proteção.

Este informe apresenta o desenvolvimento e os resultados de validação de um modelo de simulação digital do sistema de controle e proteção DC do Bipolo 1 do sistema de transmissão HVDC de Belo Monte (Xingu - Estreito) para o programa de transitórios eletromecânicos ANATEM, do CEPEL (2). O modelo possui elevado grau de detalhamento e automatismo, praticamente eliminando a necessidade de intervenções manuais pelo usuário via DEVT (dados de eventos) para representar ações que são executadas automaticamente pelo sistema de controle. O modelo é compatível com a versão 11.5.00 ou superior do ANATEM.

2.0 - ESTRUTURA DO MODELO ANATEM

O modelo do sistema de controle do Bipolo 1 para o programa ANATEM foi desenvolvido com base em um modelo conceitual elaborado pelo fabricante para o programa PSCAD. Algumas funções não presentes no modelo PSCAD foram desenvolvidas a partir de relatórios técnicos e descritivos funcionais disponibilizados pelo fabricante. O modelo PSCAD por sua vez constitui uma tradução fiel das principais funções de transferência dos controles físicos reais do fabricante, e é suficientemente detalhado para as análises de desempenho dinâmico, com foco na resposta do sistema HVDC a faltas nos sistemas AC e DC em condições normais de operação.

O modelo foi desenvolvido através de “Controles Definidos pelo Usuário” (CDU), uma ferramenta disponível no programa ANATEM que permite o usuário desenvolver sistemas de controle a partir de uma linguagem própria baseada em diagramas de blocos de funções elementares. Foram utilizados 14 CDU's, organizados de forma hierárquica e modular. Uma das premissas básicas era desenvolver um conjunto único de CDUs que funcionasse adequadamente em qualquer configuração (bipolar, monopolar ou desligado) e sentido de transmissão de potência (Xingu→Estreito e Estreito→Xingu), sem que fosse necessário o usuário alterar arquivos de modelo em função destas condições. Assim, o modelo detecta automaticamente a configuração e o modo de operação dos conversores (retificador/inversor) a partir do caso base de fluxo de potência, inicializa as variáveis apropriadamente e habilita o conjunto correspondente de parâmetros e funções dentro de cada CDU, deixando as demais funções virtualmente desabilitadas. O modelo emprega ainda o recurso de Topologia de Controladores Definidos pelo Usuário (TDU) para aqueles CDUs cuja topologia é igual para ambos os polos e/ou terminais, facilitando alterações e melhorias futuras no modelo (3).

As funções de controle representadas em cada CDU são descritas na Tabela 1. Uma breve descrição de cada CDU é apresentada nos itens a seguir.

2.1 Station Control

O CDU 95000 é responsável pelas funções em nível de controle de estação/bipolo, tais como rampas de potência e funções de estabilidade. A saída do modelo é a referência de potência do bipolo ($P_{ref\ BP}$), que é enviada para os dois polos. As rampas de potência são executadas via código DEVT a uma taxa definida pelo usuário através do parâmetro #RAMPA. Da mesma forma, Runups/Runbacks podem ser aplicados manualmente via DEVT a uma taxa dada pelo parâmetro #TAXA. O modelo também executa Runups/Runbacks comandados automaticamente pelo CDU do Sistema Especial de Proteção – SEP (ver item 2.6).

Funções de estabilidade são funções suplementares que visam aprimorar o desempenho dinâmico do sistema a partir da manipulação de grandezas do sistema HVDC, tais como controles de frequência e POD (“*Power Oscillation Damping*”). O controle de frequência adotado no Bipolo 1 possui dois modos de controle: sistêmico e local. O controle de frequência sistêmico é o preferencial e utiliza medições de frequência de ambos os terminais. O controle local utiliza a frequência medida apenas no terminal no qual a função está selecionada. A comutação do controle de frequência sistêmico para o controle local pode ser feita manualmente (por meio do parâmetro #LFCON) ou automaticamente quando há desligamento dos dois circuitos entre Xingu e Tucuruí. Quando ativo no terminal que opera como inversor, o sinal de saída do controle de frequência local é automaticamente corrigido pelo modelo (multiplicado por -1). Independente do modo e de em qual terminal o controle de frequência esteja habilitado, a sua saída modula a referência de potência do bipolo, no terminal que opera como retificador. O atraso de comunicação entre estações (#TELCM=30ms) para envio de sinais de frequência ou de saída de controlador de um terminal para o outro é também representado no modelo. A função POD também modula a referência de potência do bipolo e tem como objetivo amortecer oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Este controlador possui ainda uma lógica automática de liga/desliga em função dos desvios de frequência, feita de forma suave para evitar grandes perturbações no sistema.

2.2 Pole Control

Os CDU's 97761, 97762, 97763 e 97764 representam as funções atribuídas ao nível de controle de polo e de conversor. A mesma topologia (TDU 97760) é usada pelos CDU's dos polos 1 e 2, bem como pelos terminais de

Xingu e Estreito. Diversas funções de controle estão representadas nestes CDU's, conforme mostrado na Tabela 1. Vale ressaltar que tanto as funções para operação como retificador quanto inversor estão representadas em um mesmo CDU. Assim, o CDU detecta o modo de operação do conversor a ele associado (retificador ou inversor) e habilita apenas as funções correspondentes, deixando as demais funções virtualmente desabilitadas.

Estes CDU's importam a referência de potência bipolar (P_{ref_BP}) do CDU do Station Control e, através da função P/U, localizada no terminal retificador, determinam a referência de corrente do polo (I_{ref_DC}). O cálculo de I_{ref_DC} é realizado por cada polo separadamente dividindo-se P_{ref_BP} pela tensão DC bipolar (P/U), i.e. a soma das tensões DC dos dois polos ($U_{d_P1} + U_{d_P2}$). A referência de corrente é então sujeita a limites de sobrecarga de curta e longa duração (pela função "Pole Current Limitation" - PCL), bem como é manipulada pela função CMC ("Current Margin Compensation"), que aumenta I_{ref_DC} quando há perda de controle de corrente pelo retificador, compensando a redução de corrente quando o inversor assume o controle (devido à margem de corrente). A referência de corrente do polo é então enviada aos terminais retificador e inversor de forma coordenada (através da função "Pole Current Order Coordination" - PCOC) para evitar a perda da margem de corrente durante variações na ordem de corrente. Esse processo de coordenação leva em consideração o atraso de comunicação entre estações (#TELCM=30ms). No retificador, I_{ref_DC} é manipulada pelas funções VDCL ("Voltage Dependent Current Limit") e "Transient Fault Recovery" para aprimorar o desempenho dinâmico do sistema HVDC sob faltas. No inversor, além do VDCL, há atuação da função "Current Margin Switching", que altera dinamicamente a margem de corrente durante distúrbios, evitando que o inversor assuma o controle da corrente durante a recuperação após faltas.

Neste CDU é também definida a referência de tensão DC do polo (U_{d_ref}). O sinal U_{d_ref} é inicializado a partir da tensão U_{d_r} , medida no retificador, no caso de fluxo de potência. Em condições normais, $U_{d_r}=1.0$ pu, mas é previsto operação com tensão reduzida de até 0.7 pu. A alteração de U_{d_ref} pode também ser feita durante a simulação de forma dinâmica, de forma manual (via código DEVT) ou automática (pelo CDU da sequência de religamento para faltas na linha DC). A tensão DC de referência pode ainda ser manipulada pela função CEC, que promove uma transição suave entre os controles de U_d e de I_d no inversor, evitando a chamada "instabilidade dos três pontos".

Os controles em nível de conversor são também representados nestes CDU's. No retificador, estão modelados os controladores de I_d (principal) e de U_{d_max} (backup). No inversor, são empregados controladores de U_d (principal), I_d (backup) e γ (backup). Os erros de cada controlador são escalonados e comparados através de blocos seletores de mínimo (retificador) e máximo (inversor). Em cada terminal, o erro selecionado é aplicado um controlador PI, cujos limites são manipulados pela função "Firing Angle Limitation", que indiretamente altera os limites inferior e superior do ângulo de disparo ordenado (α_{ord}) naquele terminal. Os ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i) do controlador PI são dinamicamente alterados em função da malha de controle que está ativa (U_d , I_d ou γ). A saída do modelo é o ângulo de disparo ordenado, obtido a partir do arco seno da saída do controlador PI. A interface do controle em CDU com os modelos "built-in" dos conversores AC/DC é realizada neste ponto.

2.3 Tap-Changer Control

Os CDU's 9110, 9120, 9130 e 9140 correspondem aos controles de tape dos terminais Xingu e Estreito, Polos 1 e 2, respectivamente. A mesma topologia (TDU 9110) é usada pelos quatro CDU's. Tanto as funções associadas à operação como retificador quanto inversor estão representadas no modelo, de forma que o modo de operação do conversor associado é detectado a partir do caso de fluxo de potência e apenas as funções correspondentes são habilitadas.

O CDU possui apenas a representação do modo "Angle control mode", no qual o controle de tape atua para manter o ângulo de disparo (no retificador) ou de extinção (no inversor) dentro de uma faixa pré-definida. Este é o modo normal de operação. As posições de tape são alteradas de forma discreta (em passos de 1.25%) e com temporização de 5s. Os limites físicos do tap-changer são também representados no modelo (entre 93,75% e 125%, correspondendo às posições -5 a +20). O modelo pode ser usado no modo automático ou no modo manual, por meio do parâmetro #AUTO. No modo manual, o tape é mantido fixo no valor inicializado do caso de fluxo de potência e só pode ser alterado através de comando do usuário (via DEVT).

2.4 AC Filter Control

Os CDU's 9210 e 9220 correspondem aos controles de chaveamento dos filtros AC dos lados de Xingu e Estreito, respectivamente. Para possibilitar a automatização do chaveamento, os filtros foram representados por meio de bancos shunt individualizados (código DBSH). Em Xingu, existem 8 sub-bancos (3A + 3B + 2C), enquanto em Estreito são 12 sub-bancos (3A + 3B + 6C). O modelo assume que todos os filtros estão disponíveis (condição normal de operação) e realiza as manobras de conexão e desconexão em uma sequência pré-definida (Xingu→ABABABCC, Estreito→ABABABCCCC). O caso de fluxo de potência deve, portanto, ser inicializado considerando essa sequência de chaveamento. Caso o usuário opte por uma configuração inicial de filtros diferente da definida pela sequência normal, é necessário colocar o modelo no modo manual através do parâmetro #AUTO. Neste caso, os filtros deverão ser chaveados manualmente (via DEVT).

Todas as funções existentes no controle real estão representadas no modelo: Q-control (chaveamento por intercâmbio de potência reativa), U-control (chaveamento por tensão AC), Voltage Limitation Control – VLC

(chaveamento por subtensão e sobretensão) e Harmonic Performance Control – HPC (chaveamento por desempenho harmônico). O modelo leva em consideração a coordenação entre as funções de acordo com a hierarquia de prioridades especificada, ou seja, funções de mais alta prioridade podem inibir a conexão ou desconexão de filtros por funções de menor prioridade. Atrasos para chaveamento dos filtros e intervalos entre chaveamentos consecutivos são definidos para cada função através de parâmetros (código DEFPAR). Outros parâmetros, níveis e faixas de atuação das diversas funções implementadas no modelo também podem ser alterados pelo usuário por meio do código DEFPAR. O modelo realiza o chaveamento de filtros mesmo estando os conversores bloqueados (em modo U-control).

Tabela 1 – Lista de CDU's do modelo

Número TDU	Número CDU	Nome CDU	Descrição	Funções de controle
-	95000	BMTE-STATION	“Station Control”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rampa de referência de potência ✓ Runup e Runback manual ✓ Power Oscillation Damping (POD) ✓ System Frequency Control (SFC) ✓ Local Frequency Control (LFC) ✓ Frequency Limit Control (FLC)
97760	97761	PC-XINGU-P1	“Pole Control”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Current Order Calculation (COG) – Função P/U ✓ Pole Current Limitation (PCL) ✓ Current Margin Compensation (CMC) ✓ Pole Current Order Coordination (PCOC) ✓ Current Margin Switching (CMS) ✓ VDCL e Transient Fault Recovery Controls ✓ DC Current Controller (Id-controller) ✓ DC Voltage Controller (Ud-controller) ✓ Extinction Angle Controller (γ-controller) ✓ Current Error Characteristic (CEC) ✓ Error Selection e PI-Controller ✓ Firing Angle Limitation (alpha limits) ✓ Alpha Scaling ✓ Current Error Modulation (CEM) ✓ Force Retard ✓ AC Undervoltage Detection (ACUV) ✓ Commutation Failure Mitigation
	97762	PC-ESTR-P1		
	97763	PC-XINGU-P2		
	97764	PC-ESTR-P2		
9100	9110	BM-TAP-P1-X	“Tap-Changer Control”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Operação AUTO ou MANUAL ✓ Angle Control (α no retificador e γ no inversor)
	9120	BM-TAP-P1-E		
	9130	BM-TAP-P2-X		
	9140	BM-TAP-P2-E		
-	9210	BM-ACFC-X	“AC Filter Control”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Operação AUTO ou MANUAL ✓ Q-Control ✓ Uac-Control ✓ Voltage Limitation Control (VLC) ✓ Harmonic Performance Control (HPC) ✓ Inibição temporária do Q-control após faltas AC
	9220	BM-ACFC-E		
97000	97010	BM-DCLFRS-P1	“Proteção contra falta na linha DC e sequência de religamento”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Detecção automática de faltas ✓ Sequência de religamento (0 a 4 tentativas) ✓ Seleção automática do tempo de deionização e tensão de religamento (normal ou reduzida) ✓ Lógica de reset do ciclo de religamento ✓ Bloqueio do polo após a última tentativa ✓ Interrupção da sequência para falta bipolar
	97020	BM-DCLFRS-P2		
-	96000	BMTE-SEP	“Sistema Especial de Proteção (SEP)”	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lógica 1 (1A1, 1A2 e 2B1) – perda simples ✓ Lógica 2 (2A1, 2A2 e 2B1) – perda dupla ✓ Lógica 3 – Perda de bipolo (ou do último polo) ✓ Lógica 4 – Contingências externas na Norte-Sul ✓ Lógica 5 – Perda de UG em Belo Monte

2.5 Proteção contra falta na linha DC e sequência de religamento

Os CDU's 97010 e 97020 representam as proteções contra falta na linha DC dos polos 1 e 2, respectivamente. A mesma topologia (TDU 97000) é usada pelos dois CDU's. Faltas aplicadas na linha DC são detectadas automaticamente pelo modelo com base em dv/dt e di/dt no terminal retificador e no status dos conversores do lado

inversor (para não atuar indevidamente durante falhas de comutação). Os níveis de atuação são ajustados para a função não atuar para faltas no lado AC ou oscilações sistêmicas.

Uma vez detectada a falta na linha, o modelo executa automaticamente a sequência de religamento. O retificador aplica um Force Retard por um tempo de deionização parametrizável para extinguir a corrente de falta e em seguida efetua uma tentativa de religamento (remove o Force Retard). Caso seja uma falta permanente, o sistema de controle detecta que o polo não se recuperou da falta e dá continuidade à sequência de religamento. O número máximo de Force Retards e tentativas de religamento é quatro, mas o usuário pode alterar este número por meio do parâmetro #NRELI (0 a 4). Para cada tentativa de religamento, o usuário pode definir o tempo de deionização (default: 150ms, 200ms, 250ms, 250ms) e a tensão de religamento (default: 1pu, 1pu, 1pu, 0.7pu). A última tentativa normalmente é feita em tensão reduzida. A contagem do número de tentativas de religamento é feita mesmo se as faltas forem intermitentes (não permanente). O ciclo de religamento é automaticamente resetado se o intervalo entre faltas sucessivas for superior a 6s, como implementado no sistema de controle real. Se a última tentativa de religamento for mal sucedida, o polo é automaticamente bloqueado pelo CDU. Há ainda uma funcionalidade que interrompe a sequência de religamento e comanda o bloqueio dos dois polos se ambos detectarem falta na linha DC durante o mesmo ciclo de religamento.

2.6 Sistema Especial de Proteção (SEP)

O CDU 96000 representa o Sistema Especial de Proteção (SEP) associado ao Bipolo 1 de Belo Monte. Todas as cinco lógicas existentes estão representadas no modelo. A lógica 1 (1A1, 1A2, 1B1) atua para contingências simples da LT 500 kV Xingu – Tucuruí. A lógica 2 (2A1, 2A2, 2B1) atua para contingências duplas dessa linha. A lógica 3 atua para bloqueio do último polo do Bipolo 1. A lógica 4 atua para contingências nas linhas AC da interligação Norte-Sudeste. A lógica 5 atua para perdas de unidades geradoras de Belo Monte, estando os dois circuitos da LT 500 kV Xingu – Tucuruí desligados previamente.

O CDU executa automaticamente as seguintes ações: Runup/Runback, bloqueio dos conversores e desligamento de unidades geradoras em Belo Monte e Tucuruí, dependendo da lógica e das condições de atuação. Os desligamentos de máquinas são acompanhados de correções na impedância dos transformadores elevadores da usina automaticamente. O automatismo destas ações passou a ser possível após o CEPEL implementar um novo recurso no programa ANATEM, que permite que o estado operativo de diversos elementos da rede elétrica seja alterado automaticamente por CDUs, informalmente chamado de “relé por CDU” (3). As lógicas atuam para os eventos descritos no parágrafo anterior, condicionados a uma série de condições operativas, tais como: potência transmitida e sentido de transmissão Xingu→Estreito, fluxo de potência e sentido de transmissão Xingu→Tucuruí, fluxo de potência na interligação Norte-Sudeste, entre outros. O tempo de atuação é definido através de parâmetros (código DEFPAR) e pode ter ajustes diferentes para ações de runup/runback/bloqueio (#TDPO) e de corte de máquina (#TDROP). O modelo considera medições das grandezas analógicas pré-falta para referência de atuação. Para contingências em cascata dos circuitos 1 e 2 da LT 500 kV Xingu – Tucuruí, o modelo emprega uma lógica de congelamento das medições pré-falta para coordenar as atuações das lógicas 1 e 2. As medições pré-falta são congeladas durante uma janela de 5s, de forma que a atuação da lógica 2 é determinada com base nas medidas de antes da atuação da lógica 1, mas complementando as ações já realizadas pela lógica 1.

3.0 - TESTES DE VALIDAÇÃO ANATEM X PSCAD

Diversos testes de validação em malha fechada foram realizados com o modelo desenvolvido. Com o objetivo de eliminar as possíveis discrepâncias decorrentes de diferenças na modelagem da rede AC nos dois programas, os testes foram realizados utilizando redes CA bastante simples, formadas por barras infinitas em série com impedâncias de curto-circuito. Foram considerados cenários de fluxo de potência nos dois sentidos de transmissão e em diversos patamares de potência transmitida. Este sistema-teste foi representado no ANATEM e no PSCAD e os resultados obtidos com os dois programas foram confrontados.

Os seguintes resultados são apresentados neste informe:

- FIGURA 1 → Falta trifásica em Estreito inversor (tensão residual de ≈ 0.6 pu), 4.000 MW, X→E
- FIGURA 2 → Falta trifásica em Xingu retificador (tensão residual de ≈ 0.6 pu), 4.000 MW, X→E
- FIGURA 3 → Falta na linha DC e religamento com sucesso na 4ª tentativa, 4.000 MW, X→E

4.0 - TESTES DE VERIFICAÇÃO FUNCIONAL

Um grande quantidade de testes funcionais foram realizados para verificar as funcionalidades e automatismos implementados no modelo desenvolvido, incluindo as lógicas de comutação do tap-changer, chaveamento de filtros, sequência de religamento, lógicas do SEP, etc. Os testes foram realizados considerando diversas condições operativas, configurações e modos de operação. Os resultados de alguns destes testes são apresentados a seguir.

A FIGURA 4 mostra o chaveamento automático de filtros em Xingu para uma rampa normal de potência de 400 MW a 2000 MW. O bipolo está na configuração bipolar e sentido de transmissão Xingu→Estreito. O “AC Filter

Control” está no modo Q-control (DEFPAR #Q/U = 1) e com #QREF igual a 300 Mvar (correspondente a uma faixa de $Q_{MIN}=+30$ a $Q_{MAX}=+300$ Mvar). A figura mostra a conexão de filtros pelas funções HPC (maior prioridade) e Q-control (menor prioridade). A função HPC opera em malha aberta e conecta filtros de acordo com tabelas de filtragem mínima, que dependem do modo de operação do bipolo e da corrente DC nos polos. Já a função Q-control opera em malha fechada, i.e. quando o intercâmbio de potência reativa (Q_{EXCH}) sai da faixa ajustada, um filtro é chaveado.

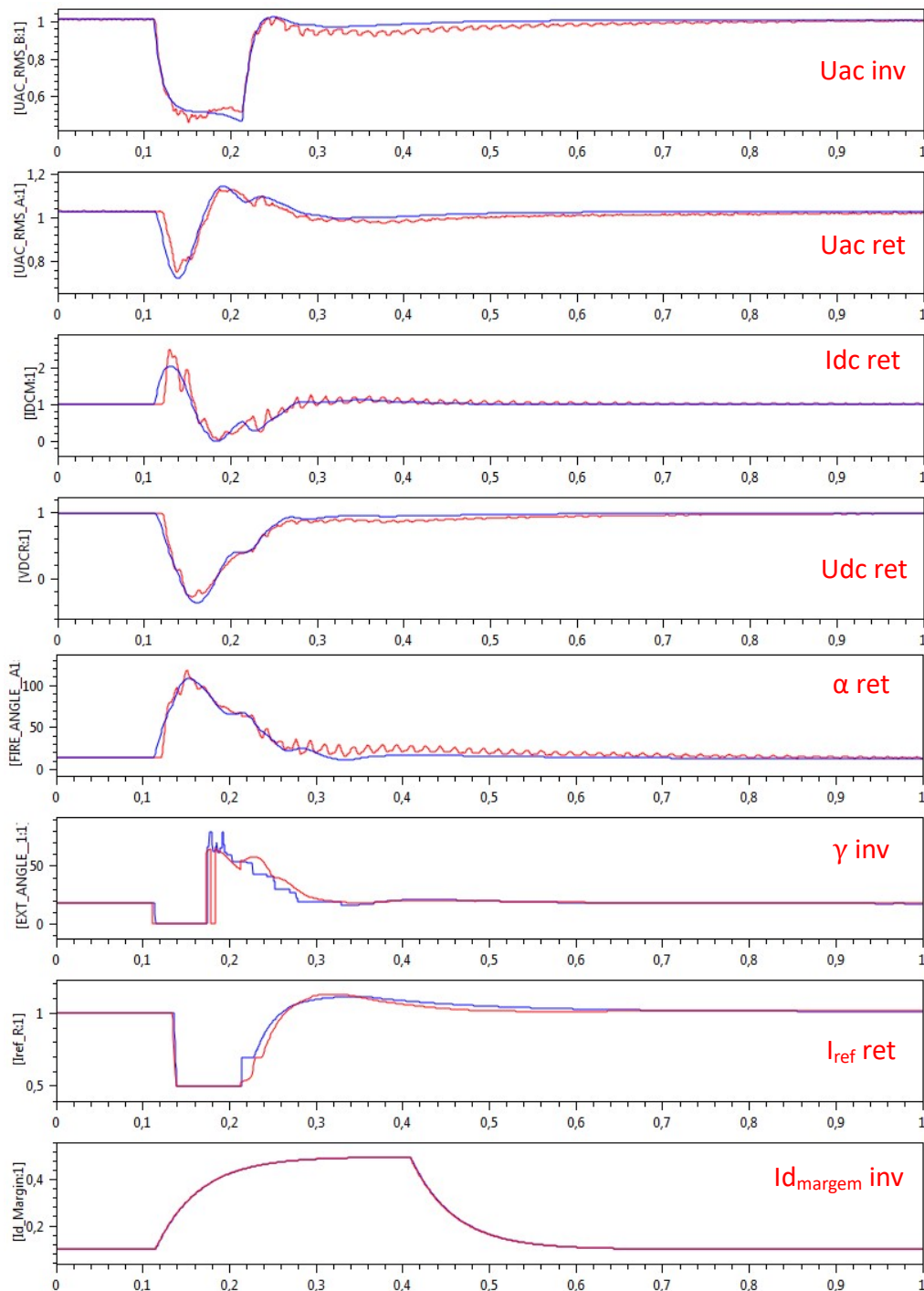


FIGURA 1 – Curto-circuito trifásico remoto em Estreito (4.000 MW, X→E) – PSCAD x ANATEM

A FIGURA 5 mostra um exemplo no qual há transferência do controle de corrente do terminal retificador para o inversor. Para isso, a tensão AC do lado retificador foi reduzida através de sucessivos degraus de 0.5%. Para manter a corrente constante, o retificador diminui o ângulo de disparo. Quando o ângulo de disparo atinge o limite mínimo de 5° , o retificador não consegue mais controlar a corrente DC. A transição do controle de corrente do retificador para o inversor é feita de forma suave por meio da função “Current Error Control” (CEC), que promove uma redução de até 2% na referência de tensão DC (U_{dref}), de forma proporcional ao desvio de corrente. O

inversor controla a corrente em um valor 10% abaixo da referência do retificador (chamado de margem de corrente). O retificador detecta a perda de controle da corrente e, através de uma função chamada “Current Margin Compensation” (CMC), promove um aumento da referência de corrente DC ($I_{d,ref}$) para compensar a perda na potência transmitida. Esse aumento em $I_{d,ref}$ no retificador é enviado para o lado inversor via sistema de comunicação entre estações.

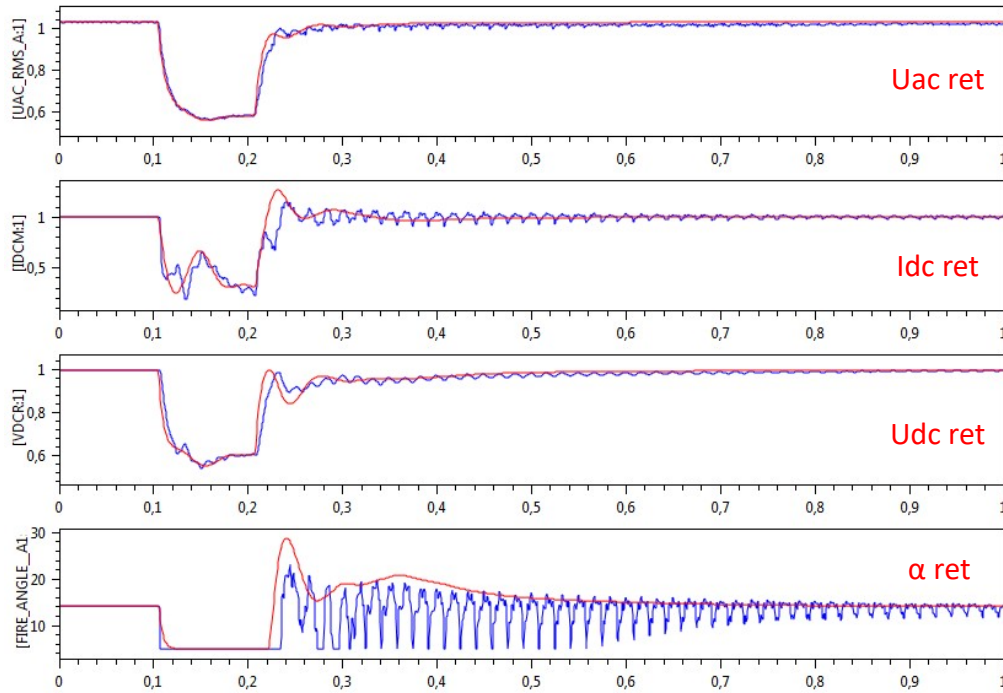


FIGURA 2 – Curto-circuito trifásico remoto em Xingu (4.000 MW, X→E) – PSCAD x ANATEM

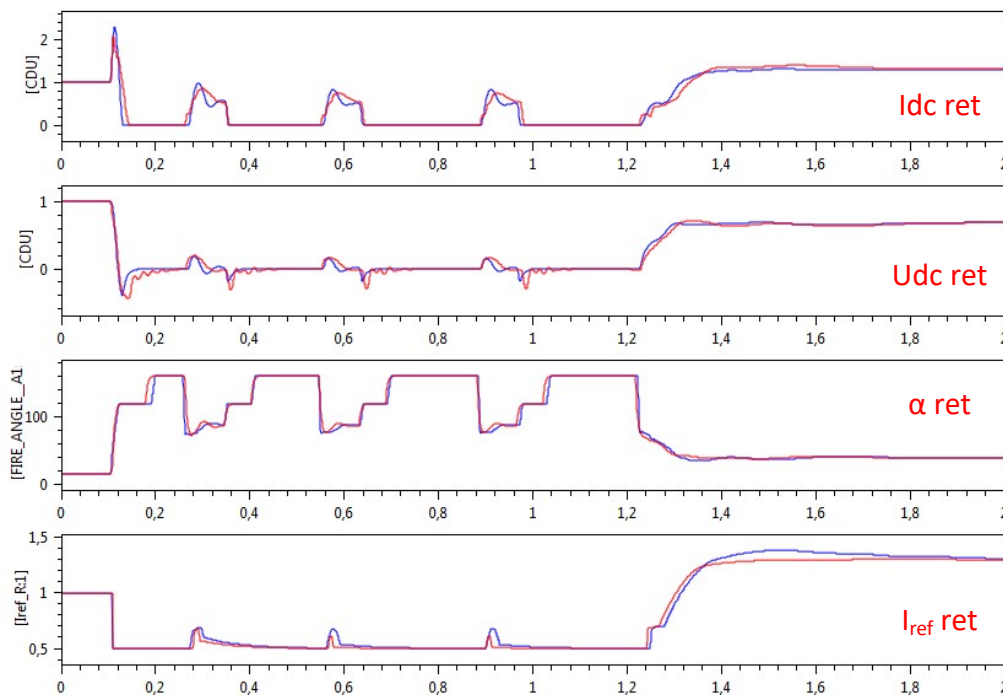


FIGURA 3 – Falta na linha DC e religamento com sucesso na 4ª tentativa (4.000 MW, X→E) – PSCAD x ANATEM

A FIGURA 6 mostra a atuação das lógicas 1A1 e 2A1 do SEP. O Bipolo 1 está inicialmente transmitindo 4.000 MW no sentido X→E e a linha Xingu-Tucuruí opera com fluxo de potência de 3.600 MW no sentido X→T. Em $T=0.1s$, ocorre a abertura de um circuito da linha Xingu-Tucuruí, levando a atuação da lógica 1A1. Esta lógica comanda um Runup de 1.000 MW no Bipolo 1 para evitar sobrecarga no circuito remanescente, elevando a potência do Bipolo 1 para 5.000 MW (utilizando a capacidade de sobrecarga de longa duração do bipolo). Em $T=0.8s$ ocorre o

desligamento do segundo circuito, levando a atuação da lógica 2A1. Como o desligamento dos dois circuitos ocorreu dentro da janela de 5s, a lógica 2A1 atua com base no fluxo pré-falta na linha Xingu-Tucuruí medido antes da abertura do primeiro circuito, ou seja 3.600 MW. Como a lógica 1A1 já havia comandado um Runup de 1.000 MW, o ΔP remanescente é de 2.600 MW. Como a capacidade de sobrecarga de longa duração do bipolo é de 5.320 MW, é comandado um Runup adicional de 320 MW e é enviado um ΔP de 2.280 MW para Belo Monte, resultando em um desligamento de 3 UGs (under-trip). Os tempos de atuação do SEP tanto para o Runup (#TDPO) quanto para o corte de máquina (#TDROP) foram ajustados em 150ms neste exemplo.

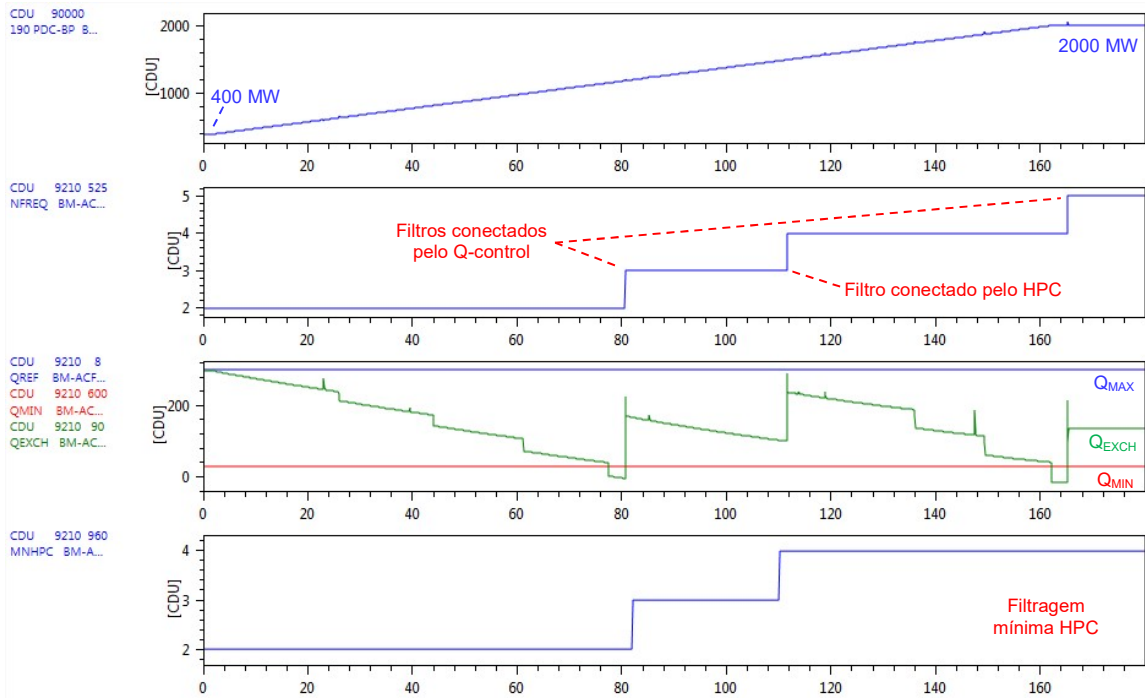


FIGURA 4 – Rampa normal de potência – atuação das funções HPC x Q-control

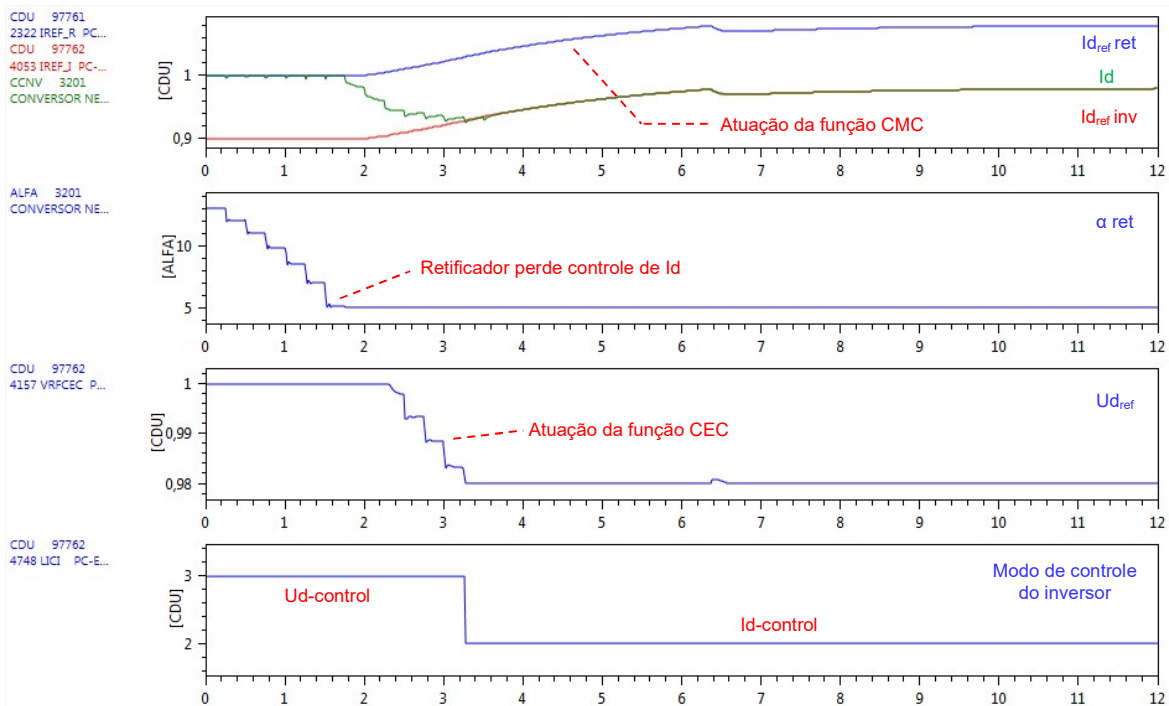


FIGURA 5 – Transição do controle de corrente do retificador para o inversor – atuação das funções CMC e CEC

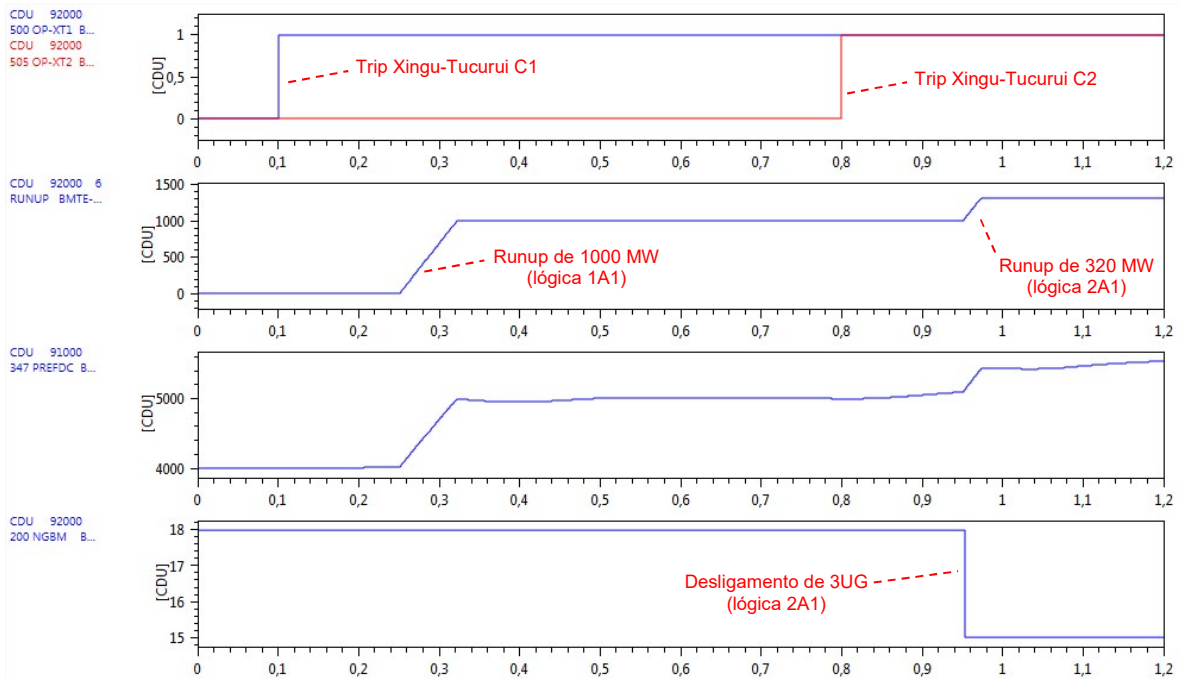


FIGURA 6 – Atuação das Lógicas 1A1 e 2A1 do SEP

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e validação de um modelo detalhado do sistema de controle do Bipolo 1 de Belo Monte para o programa de transitórios eletromecânicos ANATEM. Os testes de validação demonstraram uma excelente correlação com os resultados obtidos a partir de um modelo preciso no programa PSCAD disponibilizado pelo fabricante, demonstrando a precisão e validade do modelo ANATEM. As diferenças observadas são aceitáveis e podem ser claramente atribuídas às simplificações inerentes a programas de estabilidade. O modelo foi desenvolvido através de "Controles Definidos pelo Usuário" (CDU), organizados de forma hierárquica e modular, e possui elevado grau de detalhamento e automatismo, praticamente eliminando a necessidade de intervenções manuais por parte do usuário.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) D. S. Carvalho, D. F. Souza, P. C. V. Esmeraldo; "Planning conceptions for a ± 800 kV HVDC transmission system in Brazil". Cigré CE B4 Colloquium in HVDC and Power Electronic to Boost Network Performance, Brasília, Brazil, October 2-3, 2013.
- (2) CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ANATEM v11.5.00, Manual do Usuário, 2018.
- (3) N. A. R. L. Neto, M. P. da Silva, F. L. Lirio, L. R. da Silva, "Utilização de controladores definidos pelo usuário para modelagem de sistemas especiais de proteção no ANATEM", XXIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba – PR, 22 a 25 de outubro de 2017.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando Cattán Jusan graduou-se em Engenharia Elétrica em 2003 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET-RJ). Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ em 2007 na área de oscilações subsíncronas e interação torcional com sistemas de controle de geradores, FACTS e HVDC. Ingressou em Furnas em 2004, onde trabalha na Gerência de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação. Trabalhou no projeto, testes e comissionamento das estações conversoras do Bipolo 2 do sistema de transmissão HVDC do Rio Madeira de 2008 a 2016 e do Bipolo 1 de Belo Monte desde 2013. As principais áreas de atuação são: desenvolvimento de modelos de simulação computacional, estudos e testes de desempenho dos sistemas de controle e proteção DC e suas interações com os sistemas AC, projeto e verificação de desempenho de filtros AC e DC, especificação do circuito principal. É membro do Cigré desde 2008, onde atualmente atua como coordenador do Working Group internacional WG B4.66, na área de harmônicos e filtros para sistemas HVDC.