



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

BR/GPC/01
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

**GRUPO – V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA -
GPC**

Controle Mestre do Sistema de Transmissão HVDC do Rio Madeira

**Rogério Antônio da Silva
Eletronorte**

**Paulo Cesar Gonçalves Campos
Eletronorte**

**Igor Leitão Spinelli
Eletronorte**

**Marcus Danilo Perfeito
Themag/Arcadis Logos**

**Antônio Pagioro
ABB**

**Antônio X. Ramos
ABB**

RESUMO

Este trabalho apresenta o Controle Mestre do Sistema de Transmissão HVDC associado às usinas do Rio Madeira. Sua função é realizar ações automáticas necessárias para coordenação dos bipolos, blocos (back-to-back), linhas e geradores durante ocorrências, tais como:

- Redistribuir a potência ativa entre os bipolos em decorrência da perda de polos ou de blocos (back-to-back) ou de limitações da capacidade de transmissão.
- Equilibrar a potência ativa transmitida devido a perda de geradores nas usinas ou de linhas de interligação com as usinas na Coletora Porto Velho ou de linhas para escoamento na SE Araraquara 2.
- Evitar autoexcitação dos geradores nas usinas, limitando o quantitativo de filtros AC conectados.
- Evitar a possibilidade de ocorrência de sobretensões no sistema AC, limitando o quantitativo de filtros AC conectados.

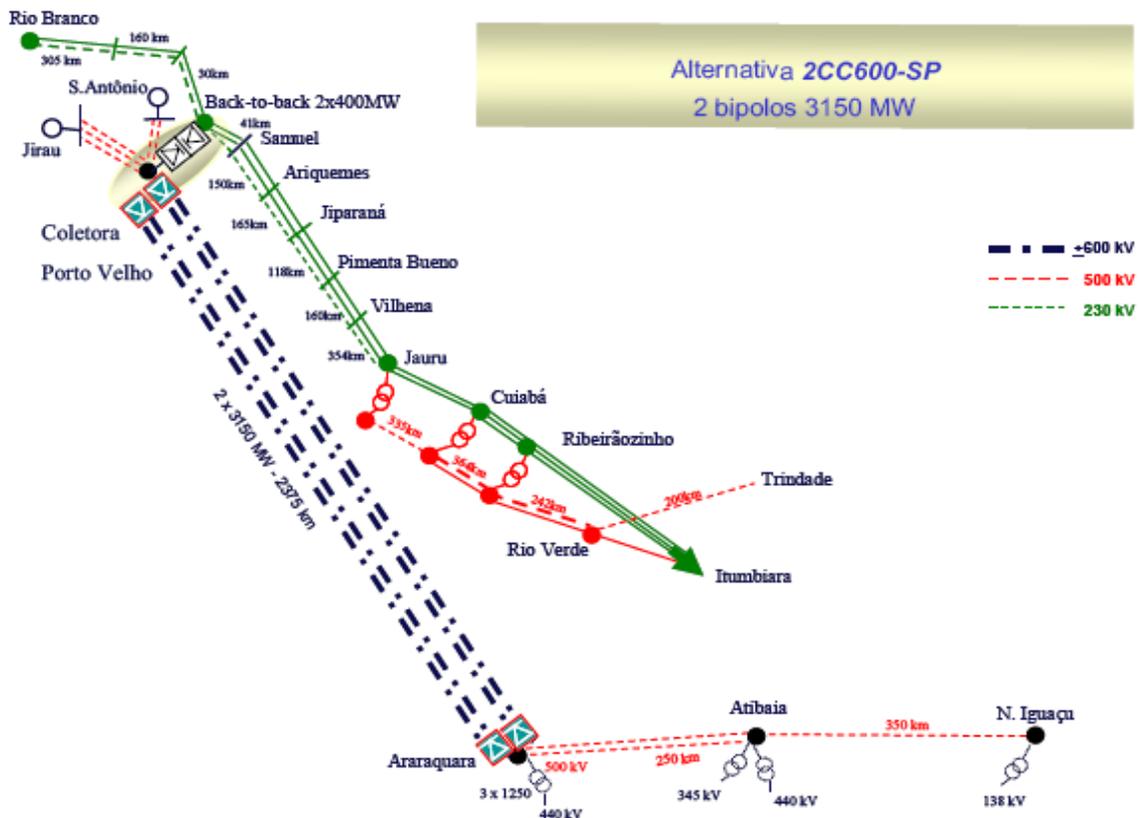
Será apresentada a descrição funcional das suas principais funções de controle, a coordenação com as demais funções de controle de bipolo e de polo, a arquitetura do sistema e os benefícios advindos da sua implantação.

PALAVRAS-CHAVE

HVDC, CCAT, Controle Mestre, Master Control, Rio Madeira

1.0 - INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira é formado pelas usinas UHE Santo Antônio de 3.150MW da Santo Antônio Energia – SAESA e UHE Jirau de 3.300MW da Energia Sustentável do Brasil – ESBR. Sua integração ao Sistema Interligado Nacional – SIN será através de um Sistema de Transmissão HVDC composto por dois bipolos de 3.150MW +/- 600kVdc cada, pertencentes a Estação Transmissora de Energia – ETE (lote C) e Interligação Elétrica do Madeira – IE Madeira (lote F) na Coletora Porto Velho (RO) (lote A) da Porto Velho Transmissora de Energia – PVTE e na SE Araraquara 2 (SP) (lote E) da Araraquara Transmissora de Energia – Cymi, interligadas por duas linhas de aproximadamente 2.375km, uma pertencente a IE Madeira (lote D) e a outra da Norte Brasil Transmissora de Energia – NBTE (lote G). Também é composto por dois blocos (back-to-back) de 400MW +/- 51kVdc cada, com tecnologia CCC (Capacitor Commutated Converter), pertencentes à PVTE (lote A), interligados por duas linhas de 230kVac, pertencentes também à PVTE, entre a Coletora Porto Velho e a SE Porto Velho da Eletrobras Eletronorte. A potência entregue na SE Araraquara 2 (SP) será transmitida ao SIN através de duas linhas de 500kV e duas linhas de 440kV, conectadas nas subestações existentes Araraquara (Furnas) (SP) e Araraquara (CTEEP) (SP), respectivamente, e mais uma linha de 500kV da Copel a ser conectada na SE Taubaté (SP) existente.



Observa-se a multiplicidade de agentes envolvidos, cada qual com fornecedores diferentes de equipamentos e sistema de proteção e controle, bem como equipes de operação e de manutenção distintas. É evidente a necessidade de coordenação das ações entre os bipolos, blocos, linhas e geradores, especialmente durante anomalias e contingências.

O fornecimento deste Controle Mestre foi previsto pelo edital Aneel como responsabilidade da ETE (lote C), subsidiária integral da Eletrobras Eletronorte. Seus equipamentos e projeto foram contratados da ABB Suécia. Os estudos foram desenvolvidos pela ABB, com coordenação e orientação do ONS. Todo o seu sistema de controle é redundante.

O Controle Mestre tem o objetivo de receber e tratar informações advindas dos agentes envolvidos e realizar ações automáticas necessárias entre os bipolos, blocos (back to back), linhas e geradores, tais como:

- Redistribuir a potência ativa entre os bipolos em decorrência da perda ou de limitações da capacidade de transmissão dos polos, minimizando a variação total do fluxo de potência transmitido.
- Redistribuir a potência ativa entre os bipolos em decorrência da perda ou de limitações da capacidade de transmissão dos blocos (back-to-back).
- Equilibrar a potência ativa transmitida devido à perda de geradores nas usinas ou de linhas de interligação entre as usinas e a Coletora Porto Velho.
- Equilibrar a potência ativa transmitida devido à perda de linhas para escoamento na SE Araraquara 2.
- Evitar autoexcitação dos geradores nas usinas, limitando o quantitativo de filtros AC conectados.
- Evitar a possibilidade de ocorrência de sobretensões no sistema AC, limitando o quantitativo de filtros AC conectados.
- Controlar a potência reativa trocada entre os bipolos, filtros AC e sistema de transmissão.
- Coordenar a parte integral do controle de frequência na SE Coletora Porto Velho.
- Identificar se as quatro barras de 500kV das SE Coletora Porto Velho e Araraquara 2 estão conectadas entre si ou separadas (Split Bus).
- Validar a operação em paralelo de linhas e de polos de bipolos diferentes dentre os diversos modos de operação possíveis, exigindo o compartilhamento de equipamentos.

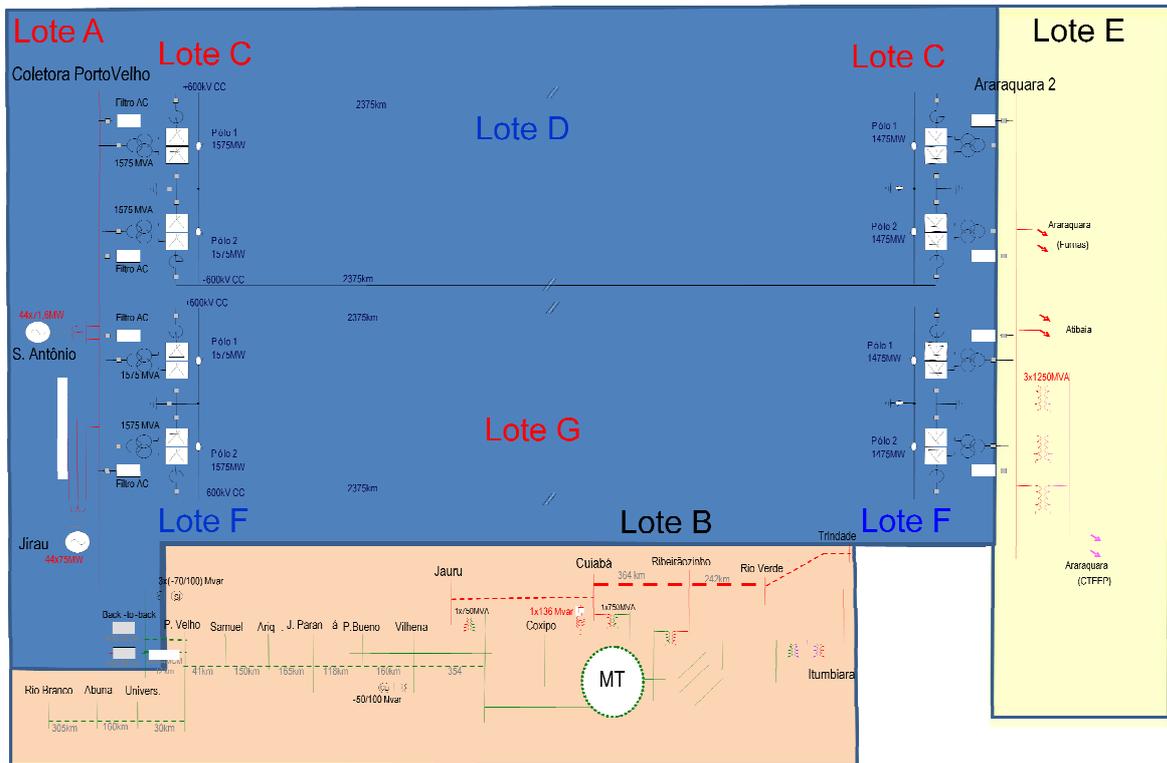


FIGURA 2 – Sistema de Transmissão HVDC – agentes e lotes

2.0 - CONTROLE MESTRE – MASTER CONTROL – MC

O sistema de proteção e controle é redundante e dividido em três níveis hierárquicos: controle mestre (MC), proteção e controle de bipolo (BCP) e proteção e controle de polo (PCP). O sistema é modular, cada nível utiliza computadores industriais programáveis, sistemas operacionais multitarefa em tempo real, interligados por barramentos para comunicação através de protocolos padronizados. O sistema de controle é executado em computadores distintos do sistema de proteção. Cada nível fica instalado em cubículos distintos, possuindo interfaces com o processo (I/O) próprias e distribuídas.

As funções de controle são hierarquizadas, de tal maneira que a maioria das funções é executada pelo controle de polo ou controle de bloco. Para coordenar as ações de controle entre os polos ou entre os blocos existe o controle de bipolo ou bibloco. Para coordenar as ações de controle entre os dois bipolos e o bibloco existe o Controle Mestre.

A topologia do sistema é a mesma na Coletora Porto Velho e em Araraquara 2. Portanto existe um Controle Mestre em cada subestação, executando funções independentemente e interligados por canais para comunicação de dados redundantes, através de meios físicos distintos (fibra ótica e SDHs de cada linha de bipolo).

Os lotes A e C serão fornecidos pela ABB e o lote F pela Alstom. O fornecimento do Controle Mestre faz parte do lote C.

Foram utilizadas interfaces físicas por fio para aquisição de dados e envio de comandos entre o Controle Mestre e o sistema de controle e proteção dos lotes E e F, devido a dificuldades para integração de protocolo e requisitos de tempo de latência para transmissão das informações. Como o sistema dos agentes também é redundante, a interface foi definida de forma que cada unidade do Controle Mestre envia e recebe informações das duas unidades redundantes do agente. A interface com o lote A e usinas utiliza rede local para comunicação de dados, por ser do mesmo fornecedor que o Controle Mestre.

2.1 Generator Station Coordinator – GSC

As usinas UHE Santo Antônio e UHE Jirau são compostas por aproximadamente 90 geradores de cerca de 70MW ou 75MW cada, agrupados em diversos transformadores elevadores e casas de força, conectados com a Coletora Porto Velho por quatro e três linhas de interligação, respectivamente. O sistema de controle de cada usina possui um coordenador (Generator Station Coordinator – GSC) que funciona integrado ao Controle Mestre, executando um conjunto ações para equilibrar o eventual desbalanço entre a carga e a geração.

Se a capacidade de transmissão HVDC for reduzida pelo desligamento de um polo ou mesmo de um bipolo, o Controle Mestre recalcula a quantidade máxima de potência ativa capaz de ser transmitida nos polos remanescentes. Se não houver capacidade suficiente para transmitir a geração despachada é enviada uma ordem

para o GSC de cada usina, com a nova geração máxima a ser despachada “Max Generated Active Power”, proporcional a geração despachada anteriormente em cada usina. Cabe ao GSC determinar os geradores a serem desligados, considerando o arranjo, a potência e o estado de cada gerador, de forma a obter a nova geração máxima a ser despachada.

O GSC envia para o Controle Mestre o número de geradores em operação e a potência ativa despachada. Se a capacidade de geração das usinas for reduzida pelo desligamento de geradores, ou transformadores elevadores, o Controle Mestre deverá reduzir a potência total transmitida, o chamado “Runback”.

Para prevenir a autoexcitação dos geradores da UHE Jirau todas as suas linhas de interligação com a Coletora devem ser desligadas em caso de perda de todos os polos, desde que pelo menos um bloco (back-to-back) permaneça em operação. Se houver a perda de todos os polos e também dos dois blocos, as linhas de interligação da UHE Santo Antônio com a Coletora também devem ser desligadas. Nestes casos, o Controle Mestre envia uma ordem de geração máxima com valor zero e ao recebê-la, o respectivo GSG desligará todas as linhas nos dois terminais.

Também é função do GSC monitorar a capacidade de transmissão das linhas de interligação da usina com a SE Coletora Porto Velho, para evitar sobrecarga nas linhas remanescentes em caso de desligamento de alguma delas, promovendo o desligamento de geradores, se necessário.

O sistema GSG das usinas também será fornecido pela ABB.

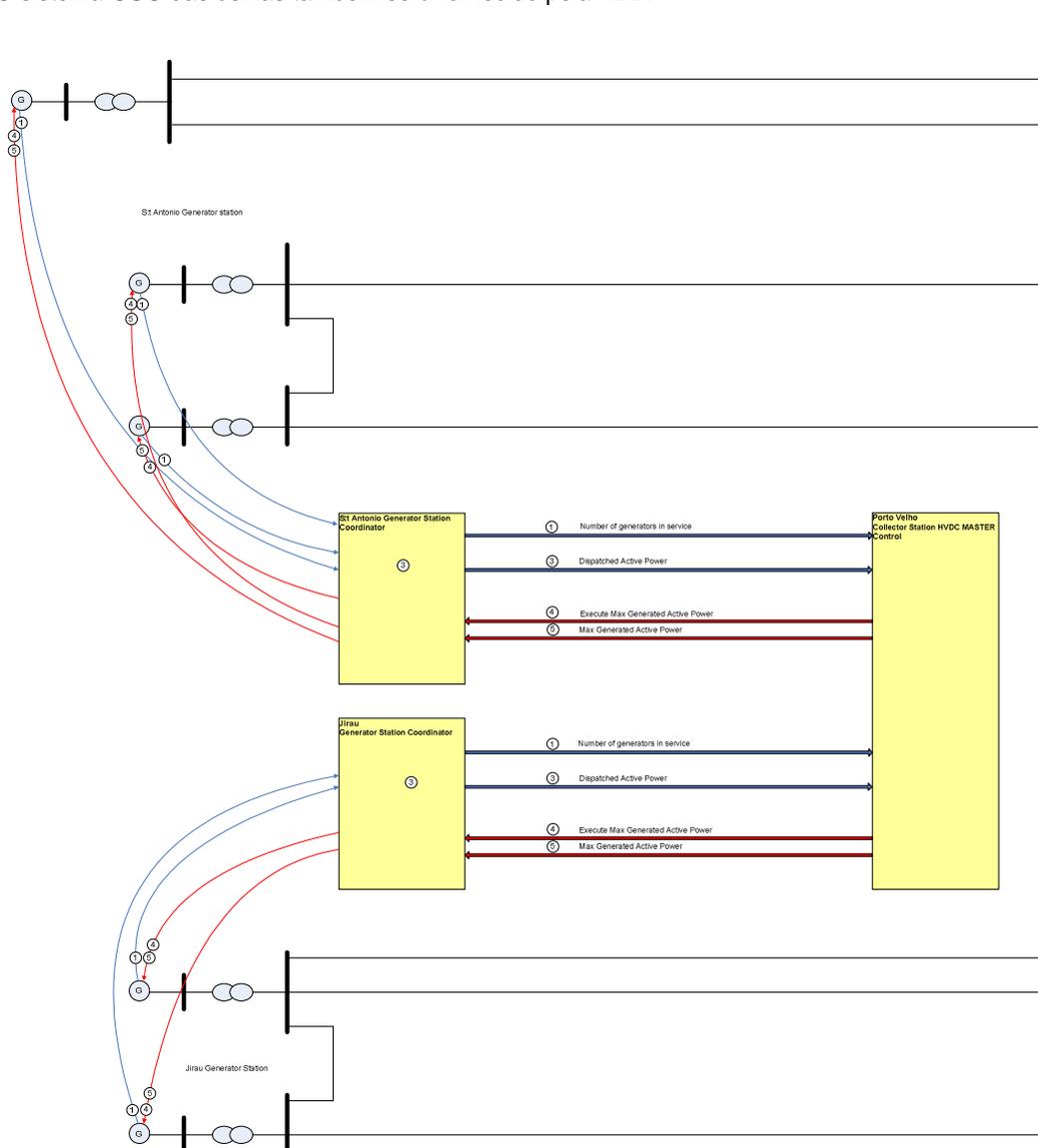


FIGURA 4 – Sinais entre o Controle Mestre e o GSC

2.2 Controle de Potência Ativa – Emergency Active Power Distributor – EAPD

Esta função realiza o balanceamento entre a geração despachada pelas usinas e a capacidade de todo o sistema de transmissão HVDC, executando um conjunto ações no Controle Mestre e no GSC para equilibrar a carga e a geração. Atua apenas nos polos que estejam operando em modo "Bipole Power Control".

No caso de perda ou limitação de um polo ou mesmo de um bipolo, com os dois bipolos em operação, a potência ativa a ser transmitida nos polos remanescentes é recalculada com objetivo de manter a potência total transmitida inalterada. Inicialmente a potência ativa é redistribuída entre os bipolos de forma proporcional à disponibilidade de potência de cada polo até sua capacidade nominal. Se esta redistribuição inicial não for suficiente, então é utilizada a capacidade de sobrecarga de cada polo de 33%, igualmente em todos os polos. Se ainda assim não houver capacidade suficiente para transmitir a geração despachada, é enviada uma ordem para o GSC de cada usina, com a nova geração máxima a ser despachada, proporcional a geração despachada anteriormente em cada usina. O GSC de cada usina desligará os geradores necessários para obter a nova geração máxima definida. Se após 30 minutos a potência não for reduzida manualmente, ela será reduzida automaticamente, através de uma rampa de carga pré-definida, até a capacidade nominal dos polos.

A potência transmitida pelos blocos back-to-back não é alterada. Se apenas um bipolo estiver em operação a redistribuição da potência entre os seus polos é executada pelo próprio controle de bipolo.

No caso de perda de linhas ou de autotransformadores na SE Araraquara 2, para evitar sobrecarga nas linhas ou autotransformadores remanescentes, se necessário, a potência ativa será reduzida nos bipolos até o limite máximo disponível para escoamento e enviada uma ordem para o GSC de cada usina, com a nova geração máxima a ser despachada. A potência transmitida pelos back-to-back somente será alterada se nenhum dos bipolos estiver em operação.

No caso de perda de linhas de interligação das usinas para SE Coletora Porto Velho, para evitar sobrecarga nas linhas remanescentes, se necessário, a potência ativa será reduzida pelo respectivo GSC, com o desligamento de geradores, até o limite máximo disponível para escoamento. A nova potência ativa despachada pela usina é enviada para o Controle Mestre, onde a EAPD redistribuirá a nova potência total a ser transmitida dentre os bipolos através de "Runback", equilibrando a potência ativa gerada e consumida.

No caso de perda de geradores nas usinas, a potência ativa despachada será reduzida. O respectivo GSC envia o novo número de geradores em operação ao Controle Mestre, onde o EAPD redistribuirá a nova potência total a ser transmitida, enviado como uma redução da ordem de potência dos bipolos em operação, chamado de "Runback", reequilibrando a potência ativa gerada e consumida. A potência transmitida pelos blocos back-to-back somente será alterada se nenhum dos bipolos estiver em operação.

No caso de perda de algum bloco back-to-back o próprio controle de bibloco aumenta a potência transmitida no outro bloco, até a sua capacidade nominal, com objetivo de manter a potência total transmitida para a SE Porto Velho 230kV inalterada. Não há capacidade de sobrecarga a ser explorada. Se não for possível remanejar toda a potência, o que exceder a capacidade nominal do bloco será redistribuída entre os bipolos, com objetivo de manter a potência total recebida na Coletora Porto Velho inalterada.

A função EAPD continua em operação mesmo se apenas os blocos back-to-back estiverem em operação..

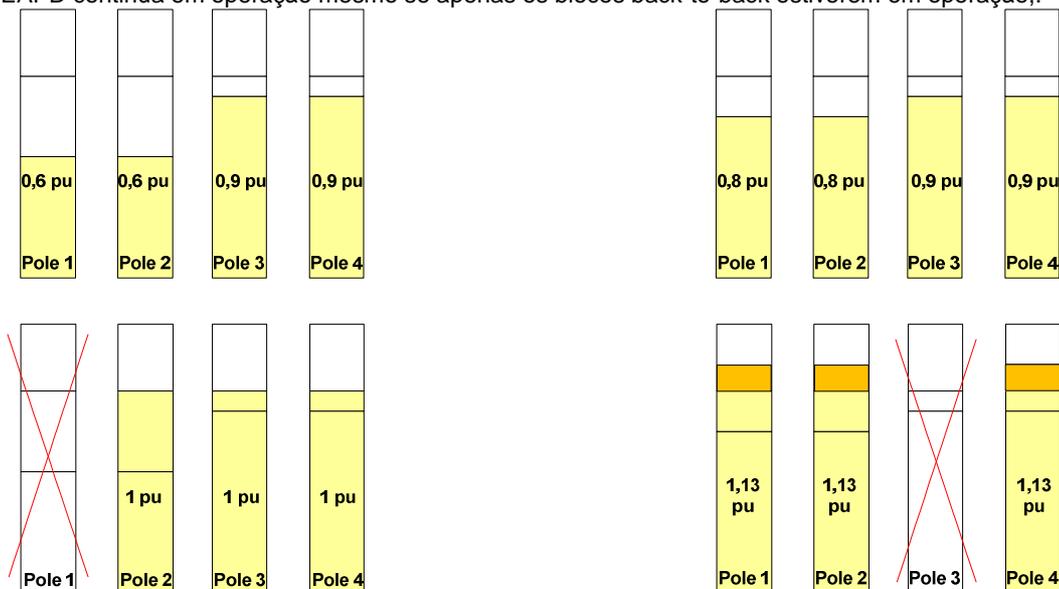


FIGURA 5 – Exemplos de redistribuição de potência ativa pela função EAPD

2.3 Controle de Frequência na Coletora Porto Velho

A parte integral do controle de frequência na barra de 500kV da Coletora Porto Velho pode ser manualmente selecionada, conforme conveniência operacional, para ser realizada nas usinas UHE Santo Antônio e UHE Jirau ou pelos conversores HVDC. Neste caso, será executado no controle de bipolo. Cabe ao Controle Mestre apenas selecionar e coordenar se este controle será realizado no bipolo 1 ou 2 ou no bibloco, de acordo com o arranjo do sistema.

Se os dois bipolos estiverem em operação será selecionado o bipolo que tiver mais polos em operação. Se o número for polos em operação for igual nos dois bipolos, será selecionado o bipolo 1, mas o operador pode selecionar manualmente o bipolo 2.

Se apenas um bipolo estiver em operação, este bipolo será selecionado.

Somente se nenhum bipolo estiver em operação será selecionado o bibloco.

A parte proporcional do controle de frequência está sempre ativada no controle dos polos.

Somente será ativada nos blocos back-to-back se nenhum bipolo estiver em operação.

2.4 Controle de Potência Reativa – Master Reactive Power Control – MRPC

O controle de potência reativa assegura que a quantidade e tipo de filtros estejam corretamente conectados nas barras de 500kV na Coletora Porto Velho e na SE Araraquara 2. Existem cinco funções hierarquizadas conforme sua prioridade. Algumas são executadas no controle de bipolo (RPC) e outras no Controle Mestre (MRPC). Quatro destas funções existem nas duas subestações, sendo executadas numa subestação de forma independente da outra. Cada bipolo possui os seus próprios filtros e seu controle de bipolo atua apenas neles. O controle de reativo possui dois modos de operação: manual e automático. Em modo manual o operador pode conectar e desconectar filtros manualmente. Entretanto as três funções de maior prioridade estão sempre ativadas, mesmo em modo manual.

A Figura 6 mostra as funções, sua prioridade, ação e onde são processadas, no Controle Mestre (MRPC) ou no controle de cada bipolo (RPC).

A função “Max Filter” é executada apenas no Controle Mestre da Coletora Porto Velho para prevenir a autoexcitação dos geradores das usinas UHE Santo Antônio e UHE Jirau. Possui a maior prioridade e permanece ativa nos modos manual e automático. Avalia se o reativo gerado pelos filtros AC conectados nos lotes A, C e F é muito superior ao número de geradores em operação, podendo desconectar filtros, se necessário, ou permitir sua conexão pelas funções de menor prioridade.

A função “Absmin” é executada no controle de bipolo para prevenir a sobrecarga dos filtros AC conectados na Coletora Porto Velho e na SE Araraquara 2. Permanece ativa nos modos manual e automático. Avalia se o número de filtros conectados é suficiente para a potência transmitida, podendo conectar filtros, se necessário, ou permitir a sua desconexão pelas funções de menor prioridade. Se não houver mais filtros disponíveis poderá reduzir a potência ativa transmitida.

A função “Umax” é executada no Controle Mestre para prevenir a ocorrência de sobretensão nas barras de 500kV da Coletora Porto Velho e Araraquara 2. Permanece ativa nos modos manual e automático. Avalia se a tensão ultrapassa uma referência, podendo desconectar filtros, se necessário, ou permitir a sua conexão pelas funções de menor prioridade.

A função “Min filter” é executada no controle de bipolo apenas em modo automático. Avalia se o número de filtros conectados na Coletora Porto Velho e Araraquara 2 satisfaz os critérios de filtragem de harmônicos, podendo conectar filtros, se necessário, ou permitir a sua desconexão pelas funções de menor prioridade.

A função “Q-control” é executada no Controle Mestre apenas em modo automático.

Na Coletora Porto Velho serve para prevenir um grande desbalanço de potência reativa com o sistema AC, por exemplo, se a potência ativa transmitida for reduzida sem a desconexão de filtros, podendo desconectar filtros, se necessário.

Na SE Araraquara 2 serve para minimizar a troca de potência reativa com o sistema AC. Avalia se a troca de potência reativa ultrapassa uma referência selecionável, podendo conectar ou desconectar filtros do bipolo que tiver o maior desbalanço.

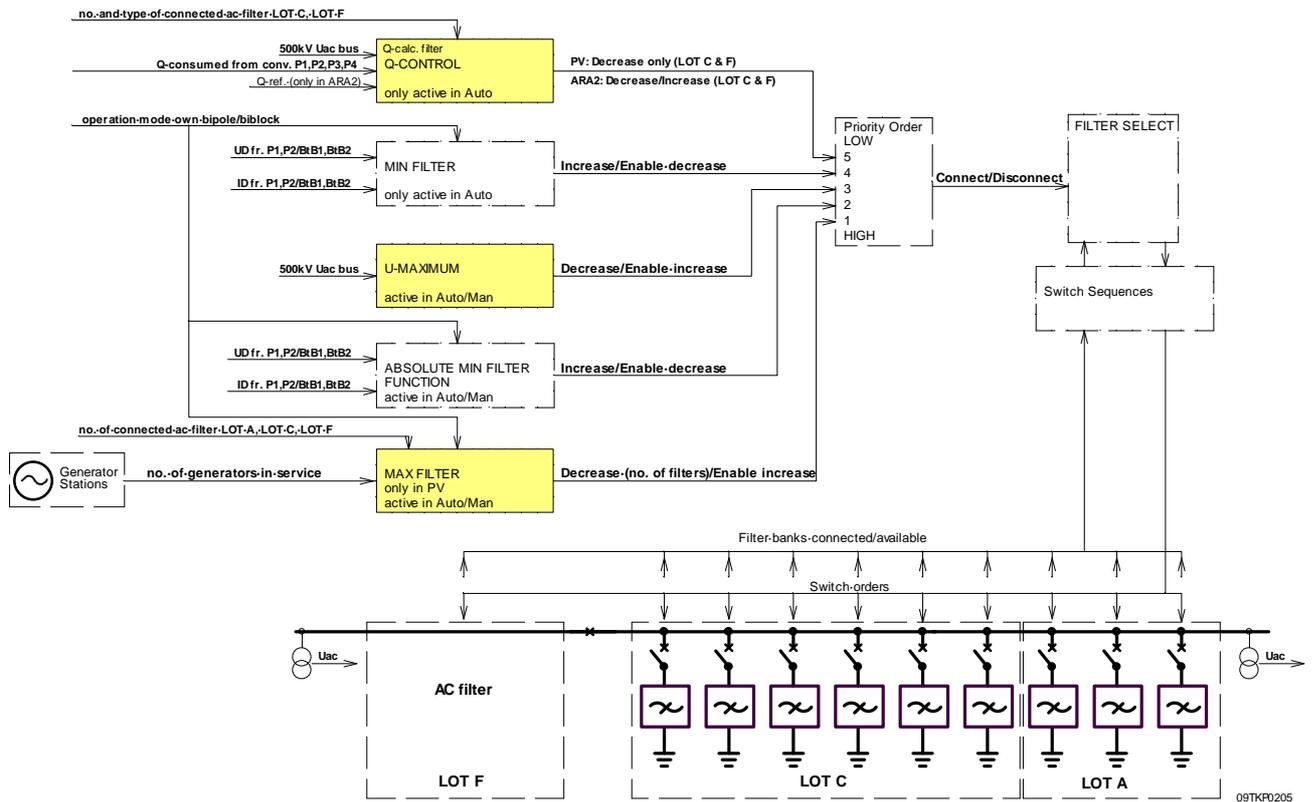


FIGURA 6 – Controle de potência reativa – MRPC e RPC

2.5 Separação das barras de 500kV (Split Bus)

Caso aconteça a separação das barras de 500kV na Coletora Porto Velho, a UHE Jirau passa a alimentar apenas o bipolo 2 e a usina UHE Santo Antônio passa a alimentar apenas o bipolo 1 e os blocos back-to-back. Nesta condição as funções do Controle Mestre passam a ser processadas independentemente para cada bipolo, inclusive o controle de frequência, e não acontece mais a redistribuição de potência ativa entre os bipolos, apenas dos blocos para o bipolo 1.

2.6 Validação da configuração para os modos de operação em paralelo dos bipolos

Existem vários modos de operação em paralelo entre os bipolos, que permitem, por exemplo: a utilização de uma mesma linha por polos em paralelo, a utilização por um polo das linhas dos bipolos em paralelo, a utilização por um polo da linha do outro bipolo. Para possibilitar os 30 arranjos possíveis, existem várias seccionadoras para a transferência de linha e de polo, cujo intertravamento é gerenciado pelo respectivo controle de bipolo. Para dar maior segurança ao processo de transferência, foi implementado no Controle Mestre a comparação da configuração selecionada em cada um dos bipolos como pré-condição para liberação da permissão de manobra.

3.0 - CONCLUSÃO

O sistema de transmissão HVDC associado às usinas do Rio Madeira possui dois bipolos e dois blocos back-to-back. Para minimizar o impacto devido à perda, anormalidades e contingências nas linhas, conversores ou nas usinas foi implantado um Controle Mestre com a função de coordenar automaticamente algumas ações entre os bipolos, blocos, linhas e geradores, otimizando o aproveitamento do sistema de transmissão. As principais funções executadas são o controle da potência ativa, o controle de frequência e o controle de potência reativa, pela redistribuição de potência ativa entre polos, desligamento de geradores nas usinas e conexão e desconexão de filtros AC.

A multiplicidade de agentes envolvidos, cada qual com fornecedores diferentes de equipamentos e sistema de proteção e controle, tornaram mais complexos o projeto e a implantação do Controle Mestre, previsto pelo edital Aneel como responsabilidade da ETE (lote C).

As ações do Controle Mestre serão muito importantes para a operação e otimização do aproveitamento das usinas do Rio Madeira.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Anexo 6C-CC Lote LC-CC Transmissão associada à integração das usinas do Rio Madeira – Conversoras do bipolo 1 – SE Coletora Porto Velho e SE Araraquara 2 – Edital de leilão nº 007/2008 – Aneel
- (2) 1JNL100135-736 HVDC Master Control System de ABB
- (3) 1JNL100134-462 HVDC Control Functions Bipole & Pole de ABB
- (4) 1JNL100139-226 HVDC Control Functions Back-to-Back de ABB
- (5) 1JNL100142-011 Master Control signal interchange considerations de ABB
- (6) 1JNL100148-695 Parallel Operation and other modes using equipment of both Poles de ABB

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rogério Antônio da Silva nasceu em Uberlândia – MG em 1960. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB em 1983. Possui curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos pela FUPAI da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Trabalha na Eletronorte desde 1984 na área de estudos de sistemas de proteção, controle e automação.

Paulo Cesar Gonçalves Campos nasceu no Rio de Janeiro em 1954. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida – RJ em 1981. Possui curso de Especialização em Automação de Sistema de Potência pela Universidade Federal da Bahia e curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos pela FUPAI da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Trabalha na Eletronorte desde 1986 na área de estudos de sistemas de proteção, controle e automação.

Marcus Danilo Perfeito nasceu em 1962 em Morrinhos, Goiás (Brasil). Graduiu-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletricista, pela Universidade de Brasília, Brasília, e concluiu pós-graduação em Engenharia de Sistemas Elétricos pela Universidade de Itajubá, Minas Gerais, em 1993. Atuou na área de estudos e projeto de sistemas de proteção e controle de subestações. Atualmente Coordenador da Engenharia de Proprietário da Estação Transmissora de Energia, empresa do Grupo Eletrobras Eletronorte.