

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

INVESTIGAÇÃO DA QUEIMA SUCESSIVA DOS FILTROS CA 500 KV DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA BACK-TO-BACK DA SE COLETORA PORTO VELHO: CAMPANHA DE MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS, SIMULAÇÕES EM ATP E ANÁLISE DE OSCILOGRAFIAS

FILIFE RODRIGUES LOPES(1);JOÃO PAULO FERNANDES LIMA(1);NILO SÉRGIO SOARES RIBEIRO(1)
ELETROBRAS ELETRONORTE(1)

RESUMO

Os filtros do Elo CC Back-to-Back da SE Coletora Porto Velho têm sofrido sucessivos danos ao longo de sua operação comercial, mesmo estando submetido a condições para os quais foram projetados. Majoritariamente, o elemento danificado tem sido o reator superior L1 do ramo HP3/5. A fim de entender este fenômeno e propor soluções para mitigar este problema que tem levado ao esgotamento de sobressalentes pela frequente periodicidade de substituição deste reator, este trabalho analisa, através de simulações computacionais, medições de harmônicos e oscilografias de campo, a influência das manobras mais significativas da rede CA de 500 kV sobre os filtros do terminal retificador do BTB.

PALAVRAS-CHAVE

Elo de corrente contínua, filtros harmônicos, transitórios eletromagnéticos

1.0 INTRODUÇÃO

O Back-to-Back (BTB) do Rio Madeira é um dos elementos que compõe o sistema HVDC do Rio Madeira, conectando assincronamente por meio de um Elo CC ponto-a-ponto o potencial hidroelétrico das usinas do Rio Madeira (UHE Santo Antônio e Jirau) ao Sistema Interligado Nacional pelo estado de Rondônia, com capacidade de transmitir até 800 MW.

O Back-to-Back fez parte Lote A do Edital Aneel 007/2008, originalmente vencido pela Eletrobras Eletrosul, tendo sido integralmente adquirido posteriormente pela Eletrobras Eletronorte. A tecnologia adotada para o BTB é baseada na topologia de CCC (*Capacitor Commutated Converters*). Nesta topologia é prevista a utilização de filtros CA conectados aos barramentos terminais a fim de minimizar o efeito de frequências harmônicas características e não características produzidas pelos conversores sobre a rede ao qual está inserido, além de prover potência reativa necessária aos conversores na frequência fundamental. A Figura 1 apresenta o diagrama do circuito principal do Back-to-Back, considerando a nomenclatura dos disjuntores e filtros conforme o padrão Eletrobras Eletronorte.

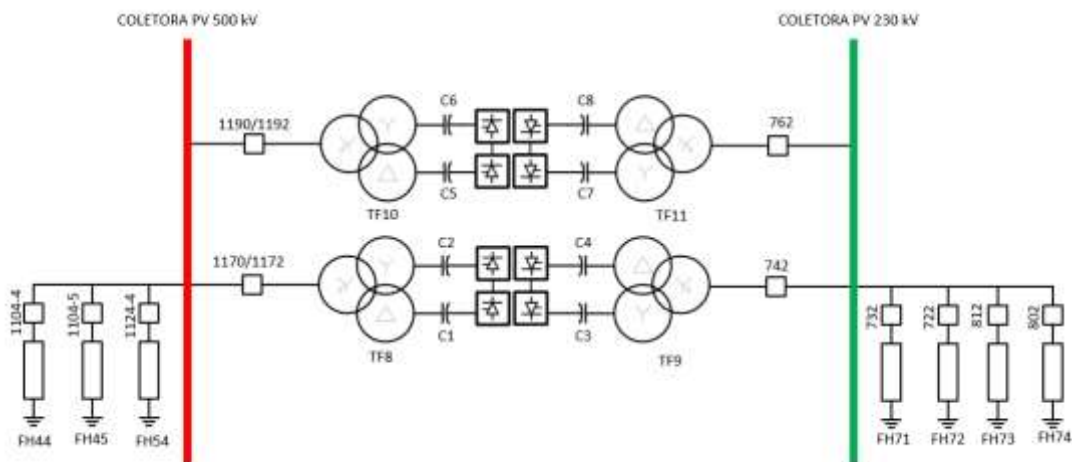


Figura 1 - Diagrama simplificado do Back-to-Back e filtros

Os filtros CA em elos de corrente contínua são projetados para atender requisitos de qualidade de energia da rede, minimizando os impactos de frequências harmônicas geradas pelos conversores (harmônicas características do tipo $12k\pm1$), bem como harmônicas não características (desbalanço entre elos CC, ressonância entre rede CA e CC) e entre outras oriundas da rede CA. Além disso, são responsáveis por contribuir com potência reativa necessária para o consumo dos conversores em frequência nominal. O detalhamento dos requisitos de projeto impostos aos filtros são definidos na Especificação Técnica do Edital Aneel 007/2008 do Lote A [1] e nos Procedimentos de Rede, submódulo 2.8 [2].

Os 3 filtros CA no barramento de 500 kV da SE Coletora Porto dedicados ao Back-to-Back (FH44, FH45 e FH54), cada um com 142 MVar, são compostos por dois bancos (ou ramos) paralelos de filtros, configurados como:

- Um banco de filtro de dupla sintonia para harmônicos de 3ª e 5ª ordem (HP 3/5);
- Um banco de filtro e tripla sintonia para harmônicos de 12ª, 24ª e 36ª ordem (HP12/24/36).

A figura abaixo apresenta a configuração de um filtro CA 500 kV do Back-to-Back enquanto a Tabela 1 apresenta os dados de cada componente desse filtro. Ambas as informações foram retiradas do documento [3] e são reproduzidos a seguir:

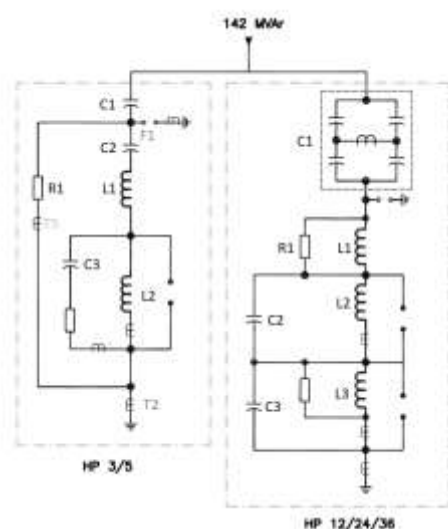


Tabela 1 - Dados dos componentes do filtro CA de 500 kV do Back-to-Back

Ramo		HP3/5	HP12/24/36
Q3φ a 500 kV	MVar	45	97
C1	μF	0.476	1.02
C2	μF	3.83	1.47
L1	mH	1620	28.1
R1	Ω	4300	730
C3	μF	1.76	1.64
L2	mH	202	4.90
R2	Ω	50	-
L3	mH	-	10.2
R3	Ω	-	360

Figura 2 - Configuração de filtro CA de 500 kV do BTB

Os filtros 500 kV do Back-to-Back têm sofrido sucessivos danos ao longo de sua operação comercial, mesmo estando submetido a condições para os quais foram projetados. Há registros de sinistro de reator ainda durante os testes de comissionamento dos filtros. Após a entrada em operação comercial do Back-to-Back, outros episódios de queima de reatores internos aos 3 filtros CA de 500 kV disponíveis foram registrados e, majoritariamente, o elemento danificado é o reator L1 do ramo HP3/5.

A fim de entender este fenômeno e propor soluções para mitigar este problema que tem levado ao esgotamento de sobressalentes na estação Coletora Porto Velho pela frequente periodicidade de substituição deste elemento indutivo, este trabalho analisa a influência das manobras mais significativas da rede CA de 500 kV sobre os filtros do terminal retificador do BTB, buscando encontrar o que tem levado o equipamento à constante degradação.

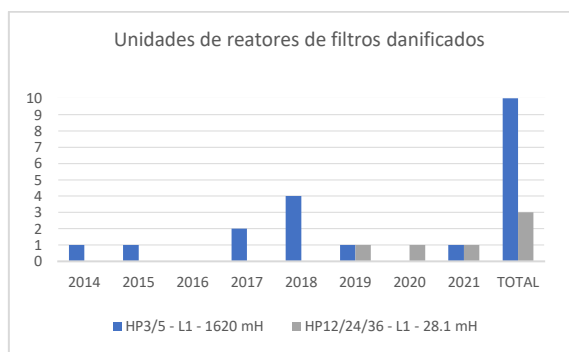


Figura 3 - Histórico das falhas nos reatores dos filtros CA do BTB

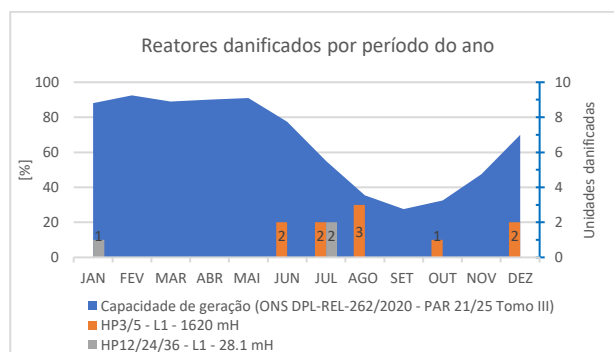


Figura 4 - Correlação entre falha nos filtros e regime hidrológico anual

Adicionalmente, como parte inicial do estudo de investigação da queima destes elementos indutivos específicos nos filtros CA do BTB, foi realizada uma campanha de medição de harmônicos, visando verificar se os filtros estavam

submetidos à frequências harmônicas em regime permanente além da capacidade especificada em projeto. A metodologia aplicada, os critérios adotados e os resultados obtidos são apresentados no item a seguir.

2.0 MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS EM REGIME PERMANENTE

A campanha de medição de harmônicos no filtro do BTB foi realizada entre os dias 15/08 e 24/09/2019 no ramo HP3/5 do filtro FH45, por meio dos TCs T2 e T5 (vide Figura 2), a fim de calcular, via leis de *Kirchhof*, a corrente que flui entre dos terminais do reator L1. Adicionalmente, foram realizadas medições de tensão por meio do TP do filtro, adjacente à barra de 500 kV, medindo os harmônicos de tensão sobre todo o filtro, isto é, ambos os ramos. Para tal, foi utilizado o equipamento 3196 Power Quality Analyzer da Hioki [4].

Visando avaliar a possibilidade de sobrecarga harmônica no equipamento, foi realizada a medição da amplitude das frequências sobre o reator dentro de uma janela de tempo específica, comparando os respectivos valores máximos obtidos com o valor nominal de corrente eficaz de regime permanente, conforme valores especificados pelo fabricante para o reator L1 [5], apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2 – Requisitos de especificação do reator L1 do ramo HP3/5 do filtro CA 500 kV do BTB: correntes harmônicas de regime permanente

Corrente nominal total de regime, em [A] RMS	Correntes harmônicas principais, em [A] RMS					
	1	2	3	5	7	9
60,5	59,4	1,6	10,7	2,3	1,6	1,0

A seguir, o resultado da medição global das correntes harmônicas sobre o elemento indutivo, L1:



Figura 5 - Resultado da medição harmônica total de corrente entre os terminais de L1 do ramo HP3/5

Não foi detectado qualquer violação do critério do requisito de especificação para as frequências harmônicas de corrente entre os terminais do reator L1, indicando que não há sobrecarga no equipamento.

Adicionalmente, foram determinadas e analisadas as seguintes grandezas: Distorção Harmônica Total; Harmônicas pares até a 30ª harmônica; Harmônicas ímpares até a 31ª harmônica; Harmônicas ímpares individuais, por fase, até a 29ª; e Análise das harmônicas individuais de 3ª, 5ª, 23ª e 25ª;

Os critérios adotados para comparar os resultados deste estudo são apresentados abaixo:

Tabela 3 - Limites globais e individuais para distorção harmônica de tensão para sistemas >69kV (Tabelas 5 e 6 do [6])

Limites Globais				Limites Individuais			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	2			3 a 25	0,6	Todos	0,6
		2, 4, 6	1				
9, 11, 13	1,5						
		≥8	0,5				
15 a 25	1						
≥27	0,5			≥27	0,4		
DTHTS95% = 3%				DTHT95% = 1.5%			

A seguir, os resultados das medições das distorções harmônicas de tensão durante uma janela de tempo de uma semana (15/08 – 23/08/2019). Serão apresentados os gráficos de medição com a distorção harmônica total e das componentes que apresentaram destaque, isto é, intervalos de harmônicos não apresentados se mostraram desprezíveis na medição.



Figura 6 - Medição da distorção harmônica na tensão. Respectivamente: Distorção harmônica total, DHlv para as componentes pares da 2ª a 10ª harmônicas, DHlv para as componentes ímpares da 3ª a 11ª harmônicas, DHlv para as componentes ímpares da 13ª a 21ª harmônicas e DHlv para as harmônicas ímpares da 23ª a 31ª harmônicas

Novamente, não foi detectado qualquer violação do critério de distorção harmônica de tensão, indicando que os filtros estão adequadamente sintonizados e contribuindo satisfatoriamente para a qualidade da energia na rede em que estão conectados sem prejuízo dos equipamentos.

3.0 EFEITO DAS MANOBRAS DE EQUIPAMENTO SOBRE O REATOR L1 DO RAMO HP3/5

Para investigar o fenômeno em potencial capaz de danificar este equipamento, foi realizada uma série de simulações em ambiente computacional, por meio da ferramenta ATP/EMTP utilizando o modelo do Back-to-Back e do Bipolo 1 com respectiva rede CA adjacentes, desenvolvido pelo fabricante dos equipamentos dos Lotes A e C do Elo CC do

Rio Madeira, a ABB. A descrição e validação destes modelos foram apresentadas pelo fabricante em [7] para o Back-to-Back e em [8] para o Bipolo 1.

Considerando que, majoritariamente, o equipamento danificado é um elemento do filtro HP3/5 e que este ramo filtra frequências harmônicas externas àquelas características ao processo de comutação dos conversores, pressupõe-se que o evento causador da falha esteja associado a alguma manobra na rede CA ou à manobra do próprio filtro, gerando um fenômeno transitório de tensão ou de corrente capaz de danificar o elemento em questão.

Para isso, um parâmetro de referência importante para mensurar o nível de stress da dielétrico no equipamento é o Nível Básico de Isolamento para surto de manobra (NBI ou BIL, de *Basic Insulation Level*), especificado para o reator L1, objeto de análise. Para a corrente, o parâmetro de referência é a especificação de corrente temporária (20s) admissível, que inclui as frequências harmônicas em seu valor eficaz. Ambos os parâmetros de referência são retirados de [5].

Tabela 4 - Requisitos de especificação do reator L1 do ramo HP3/5 do filtro CA 500 kV do BTB: suportabilidade, corrente temporária total e harmônicos admissíveis

Parâmetro de referência	Unidade	Especificação de projeto para equipamento L1 do ramo HP 3/5	
NBI para surto de manobra (medido entre os terminais do equipamento)	kV	380	
Corrente de inrush, 1º pico	A_{pico}	290	
Corrente temporária nominal (durante 20s)		67.1	
Correntes Harmônicas	A_{RMS}	1ª	66.5
		2ª	2.2
		3ª	8.1
		5ª	2.0
		7ª	1.4

Adicionalmente, será considerado o critério de suportabilidade a sobretensões de manobra para reatores que o valor das tensões transitórias não deve ser superior ao nível de isolamento dos equipamentos, com uma margem de segurança de 15%, conforme [9]. Isto é, o maior transitório de tensão entre os terminais do reator não deverá ultrapassar 323 kV.

Dentre as manobras analisadas, destacaram-se por apresentarem tensões ou correntes acima dos valores de especificação de projeto:

- Energização de transformadores conversores, quando de falha do relé sincronizador;
- Energização própria de filtro CA, quando da falha do seu instante de fechamento;
- Sequência de religamento rápido de filtro CA do Back-to-Back.

A seguir, os resultados das simulações das manobras citadas acima.

3.1 Energização de Transformador Conversor com Falha de Relé Sincronizador

Para a simulação da energização determinística de transformador conversor foi realizado previamente um processamento de simulação estatística, desprezando a ação de dispositivos sincronizadores visando representar tanto a falha deste equipamento (algo que já se verificou em campo), bem como maximizar os efeitos negativos da manobra a fim de avaliar o quão prejudicial essa manobra pode ser para o reator L1 do filtro. Para isso, foi utilizada uma chave estatística simulando os disjuntores de fechamento do equipamento, considerando uma distribuição normal dos instantes de fechamento dos três polos truncada em $\pm 2\sigma$. Dessa forma, a dispersão máxima dos instantes de fechamento dos contatos nos três polos (pole spread) corresponde a 5ms (4σ), representando um desvio de 1,25ms. Ao final de 200 chaveamentos randômicos, as piores solicitações de tensão e corrente sobre o reator L1 dos filtros CA 500 kV do Lote A foram reproduzidas deterministicamente.

Os resultados apresentados na Figura 7 são para a manobra do transformador conversor de polo do Bipolo 1 com o BTB operando em modo *stand-alone*, com um bloco transmitindo 400 MW, um filtro CA de 500 kV conectado e 12 unidades geradoras na UHE Santo Antônio.

Não foi verificada violação no critério de suportabilidade, tendo a tensão atingido um valor de pico de 315 kV entre os terminais do reator, o que representa 83% do NBI especificado. Entretanto, verifica-se uma sobretensão sustentada entre os terminais do reator, cerca de 3.3 pu acima da tensão de operação em regime permanente enquanto permanece a corrente de inrush no transformador energizado. Não foi verificada violação do critério de corrente de inrush e de corrente temporária nominal, uma vez que a corrente que flui entre os terminais após 20s era de 58,9 A. Entretanto, foram violados os critérios das correntes harmônicas para as componentes de 2ª e 5ª em todas as fases, e a de 3ª harmônica nas fases B e C.

Sendo assim, em razão da observação de suportabilidade do equipamento, bem como do critério de correntes harmônicas, os resultados apontam que a energização de transformador com falha do relé sincronizador é

potencialmente perigosa e indica possibilidade de dano ao dielétrico do equipamento, bem como indica risco potencial de sobreaquecimento dos enrolamentos do equipamento após a manobra.

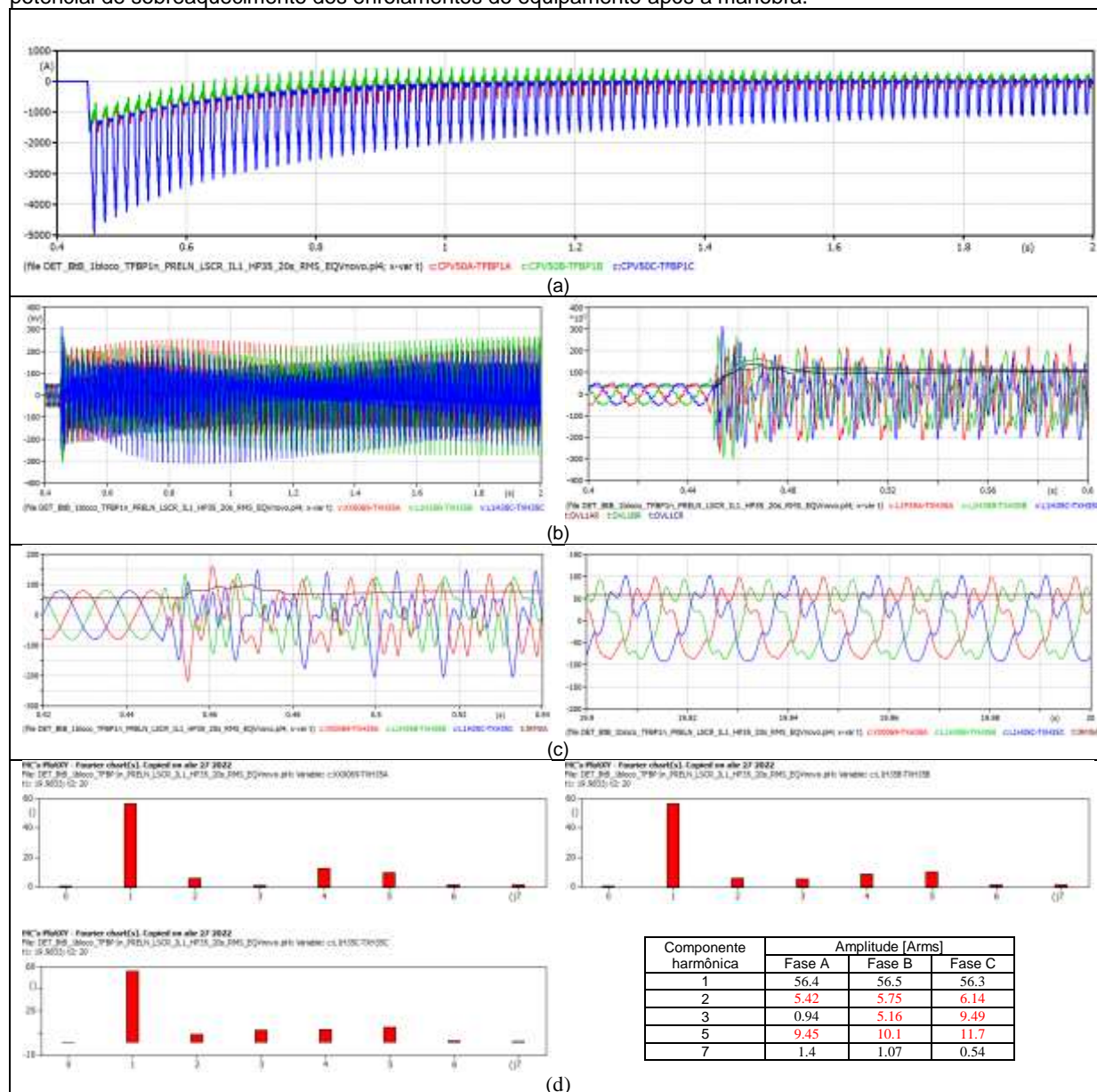


Figura 7 – Resultados da simulação de energização de transformador conversor de polo do Bipolo 1: (a) Corrente de inrush; (b) Tensão entre os terminais do reator no instante da manobra e detalhe da tensão de pico; (c) Corrente que flui entre os terminais do reator no instante da manobra e ao final de 20s; (d) Espectro de Fourier do último ciclo antes dos 20s da corrente

3.2 Energização de Filtro Desenergizado com Falha no Instante de Conexão

Para a simulação determinística da energização de um filtro previamente desenergizado representando a falha do sincronismo de conexão, foi utilizado um processo estatístico anterior para o disjuntor do barramento que conecta o filtro, visando encontrar o pior caso de fechamento e assim mensurar o risco potencial de dano do equipamento por meio desta manobra.

Os resultados apresentados na Figura 8 são para a manobra do filtro CA 500 kV/142 Mvar do BTB, com dois blocos em operação e um outro filtro CA previamente conectado.

Nesta manobra não foram verificadas violações nos critérios de suportabilidade ou de corrente, com o valor máximo de tensão atingindo 66% do NBI e o 1º pico de corrente, 69% do requisito de especificação do fabricante. Contudo, há que se destacar que esta manobra tem sido demasiadamente recorrente. Portanto, levando em consideração que os impactos transitórios têm efeito cumulativo sobre os elementos que compõem o equipamento, há o risco de diminuição de vida útil do filtro como um todo.

De acordo com a operação da Eletronorte, a manobra de fechamento manual de disjuntor de filtro CA 500 kV do BTB apresentou 64 registros em 2020 e 120 em 2019, o que conforme parágrafo anterior, aumenta o desgaste do equipamento, bem como o risco de falha mecânica, levando a um fechamento malsucedido e uma energização potencialmente perigosa para o reator.

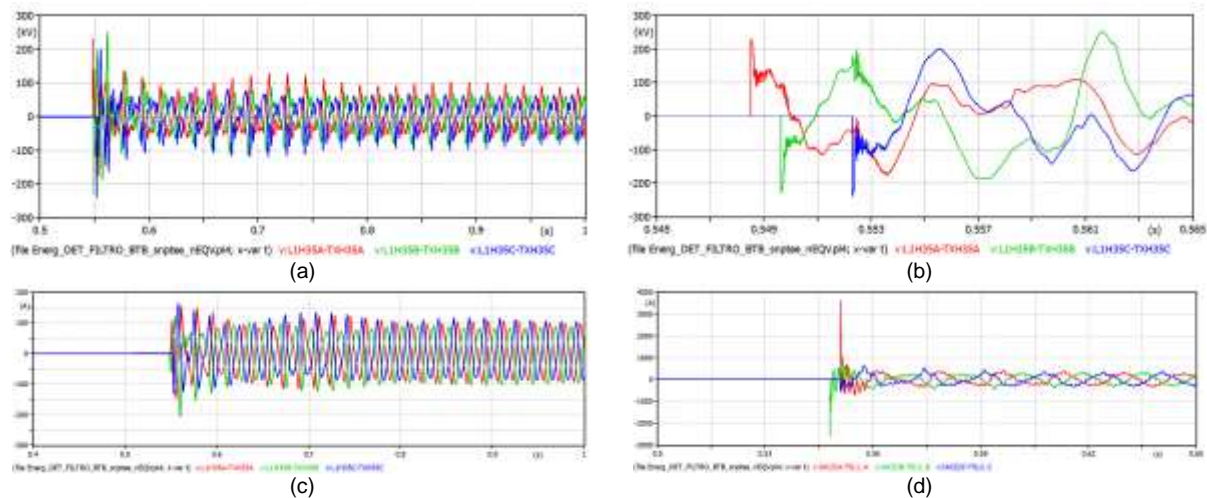


Figura 8 - Resultados da simulação de energização de filtro CA 500 kV do BTB: (a) Tensão entre os enrolamentos do reator; (b) Detalhe do pico da tensão; (c) Corrente que flui entre os terminais do reator no instante da manobra; (d) Corrente total no filtro

3.3 Religamento de Filtro Energizado na Sequência de *Fast Reclose*

A sequência de religamento rápido dos filtros do BTB (*Fast Reclose*) se dá por ação de controle, que visa reconectar os filtros que foram desligados quando da perda do último polo do Bipolo 1, quando da operação conjunta do Bipolo 1 e BTB.

Ambos compartilham da mesma ilha no pátio de filtros CA da SE Coletora Porto Velho, conforme apresenta a Figura 9. Para evitar a exposição desnecessária dos filtros CA do Bipolo 1 frente às máquinas das UHEs Santo Antônio e Jirau após a contingência de seu último polo, a fim eliminar o risco de auto-excitação nessas unidades geradoras, o controle desliga todo o pátio de filtros 500 kV – inclusive os filtros do BTB. Entretanto, como o BTB permanece em operação e, portanto, dependente de seus filtros, este mesmo controle reconecta os filtros, preferencialmente, o filtro desenergizado. Entretanto, em caso da impossibilidade de reconectá-lo, o controle decide religar o filtro outrora energizado após 10 segundos, tempo insuficiente para descarregar o capacitor C1 do ramo HP 3/5 (Figura 2).

Tanto as simulações como as oscilografias demonstram que, quando esse religamento se dá de maneira dessincronizada, isto é, fora do instante de tempo ótimo e em polaridade inversa à carga do capacitor, o transitório de tensão sobre o reator L1 do ramo HP3/5 é extremamente severo.

Novamente, com o intuito de maximizar os resultados potencialmente perigosos para o equipamento, foi utilizado um processo estatístico análogo ao descrito anteriormente, a fim de encontrar os piores instantes de fechamento do disjuntor do filtro, considerando que seus capacitores estão previamente carregados. Os resultados da simulação são apresentados na Figura 11. Nesta simulação, em que propositalmente buscou-se condicionar as condições de contorno para maximizar os efeitos da manobra (fechamento com inversão de polaridade entre tensão na barra e carga do capacitor, tensão de 1.1 pu no ponto de manobra, baixo nível de curto-circuito, processo estatístico para determinar pior ponto de fechamento e etc), justamente para avaliar o risco potencial desta energização, verificou-se uma sobretensão transitória de alta frequência entre os terminais do reator de 360 kV, o que representa 95% do NBI do equipamento, superando o critério de margem de segurança para sobretensão de manobra de reator. A Figura 10 ilustra o motivo pelo qual o religamento do filtro sob carga com inversão de polaridade em relação à tensão da barra pode ser tão perigoso.

Novamente, a significativa sobretensão entre os terminais do equipamento, muito próxima ao NBI do reator nesta quando desta manobra e de forma recorrente, é um indicativo de potencial dano ao isolamento do reator, o que pode levar a uma falha entre as espiras e à falha permanente do equipamento. Ressalta-se que esta sequência de controle ocorre com mais frequência no período seco, quando o Bipolo 1, em função da baixa capacidade das usinas (e, portanto, com baixa potência de curto-circuito na barra de 500 kV da SE Coletora Porto Velho), opera em configuração monopolar, tornando o *Fast Reclose* mais suscetível de acontecer. Adicionalmente, foi verificada a violação do critério de 1º pico da corrente, quando a reenergização do filtro em carga atingiu máxima corrente de 337 A, superando o critério em 16%.

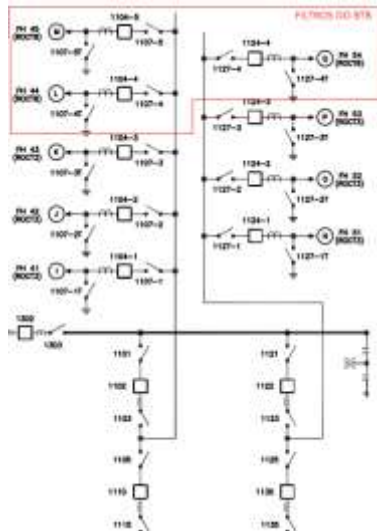


Figura 9 - Configuração da ilha de filtros CA 500 kV da SE Coletora Porto Velho para o BTB e o Bipolo 1



Figura 10 - Energização do ramo HP3/5 durante religamento do filtro sob carga

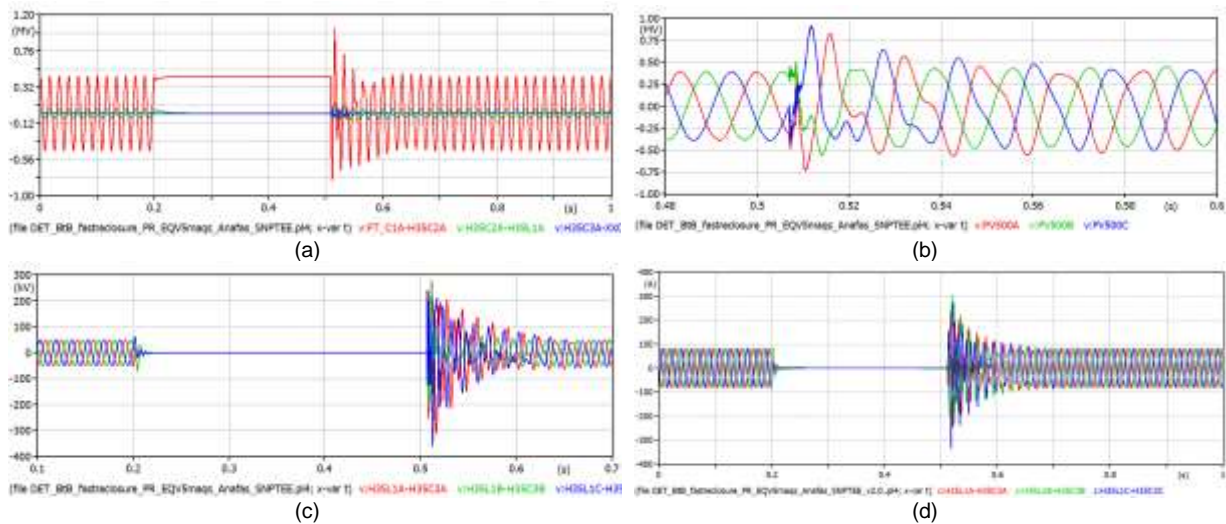


Figura 11 – Resultados da simulação do religamento rápido de filtro energizado do BTB: (a) Carga nos capacitores do ramo HP 3/5 durante o tempo-morto até o religamento do filtro, destacando a polaridade do C1 no instante do religamento; (b) Tensão do barramento no instante da energização; (c) Tensão entre os terminais do reator L1 antes e durante a sequência de religamento; (d) Detalhe no pico da tensão sobre o reator.

A figura a seguir são oscilografias de tensões no reator L1 do ramo HP3/5 do filtro do BTB e no barramento de um exemplo de Fast Reclose, ocorrido no dia 15/09/2019. Na ocasião, o Bipolo 1 operava em configuração monopolar, o Back-to-Back, com um bloco e um filtro, 11 unidades geradoras na UHE Santo Antônio e 9, na UHE Jirau. A tensão no barramento de 500 kV era de 520 kV (1.040 pu). Ou seja, as condições do sistema no instante do religamento rápido do filtro não eram as mais críticas.

Conforme se observa na Figura 2, por não haver qualquer dispositivo de medição que realize a leitura de tensão entre os terminais do reator L1, foi necessário calcular a tensão sobre o reator por meio das relações das correntes disponíveis por meio dos TCs do ramo, a saber:

$$V_{L1} = 1620mH \frac{d(i_{T2} - i_{T5})}{dt}$$

Entretanto, por este se tratar de um transitório de alta frequência e pela limitação da taxa de amostragem do oscilógrafo, o resultado gráfico do cálculo da tensão sobre o reator dá mais uma medida qualitativa do fenômeno do que um resultado com precisão de medição. Sendo assim, verifica-se na Figura 12 um pico na fase A que superaria o NBI do equipamento, demonstrando o perigo da manobra e o risco para a integridade do reator. A distorção severa na tensão, por sua vez, é um dado concreto do quão rigoroso é o *Fast Reclose*.

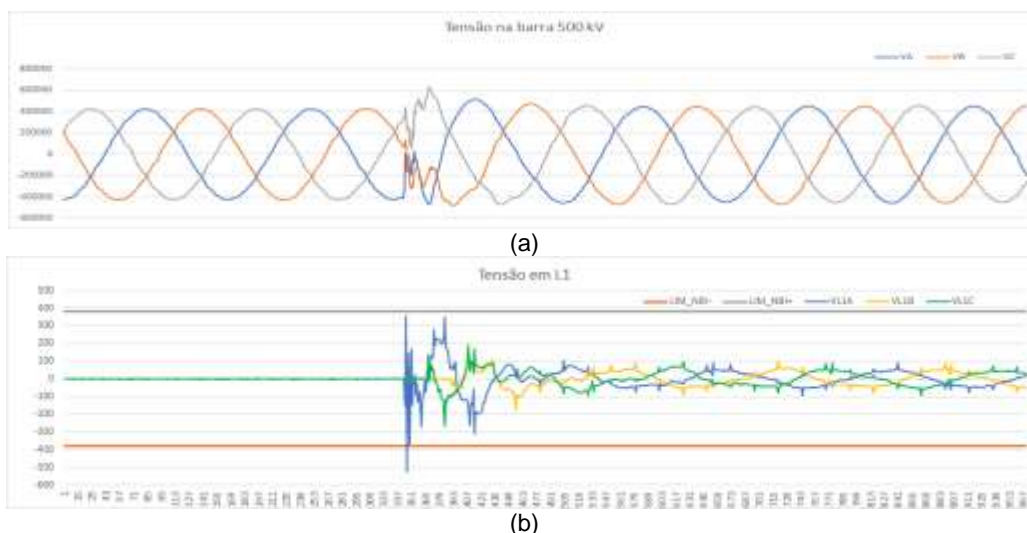


Figura 12 – Oscilografia de um religamento rápido de filtro pré-energizado. (a) Tensão no barramento de 500 kV; (b) Tensão entre os terminais do reator L1

4.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados da investigação dos aspectos elétricos que podem ter contribuído para a queima de 10 reatores de 1620 mH do ramo HP3/5 dos filtros CA 500 kV/142 Mvar do Back-to-Back, desde seu comissionamento até 2021.

Estatísticas da falha mostram que as falhas destes equipamentos acontecem com maior incidência na transição para período seco do ano ou no próprio regime seco, o que indica que a quantidade de unidades geradoras, isto é, o baixo nível de curto-circuito na barra 500 kV da SE Coletora Porto Velho, bem como a configuração do Elo CC do Rio Madeira, contribuem desfavoravelmente para a falha do equipamento. Enquanto o baixo nível de curto-circuito deixa as tensões na barra mais suscetíveis a excursões mais altas de tensões transitórias, a configuração do Elo CC no período seco favorece a operação em configuração monopolar, o que aumenta o risco da atuação da sequência de Fast Reclose em caso de falha da linha DC.

A campanha de medição de harmônicos, realizada durante aproximadamente 45 dias, demonstrou que não há correlação entre as queimas sucessivas dos reatores dos filtros do BTB e as condições operacionais de regime permanente. Observou-se que os valores de distorção harmônica, sejam eles totais ou individuais, se mantiveram abaixo dos valores de referência – tanto os estabelecidos pelo fabricante quando pelo ONS, nos Procedimentos de Rede – para todos os cenários e configurações observados durante o período de medição.

As principais manobras de equipamentos que geram transitórios de corrente ou de tensão entre os terminais do reator objeto de estudo deste trabalho foram as energizações de transformador conversor, a manobra individual do filtro CA 500 kV do BTB e o religamento rápido do filtro CA 500 kV do BTB sob carga. Estas manobras foram simuladas considerando as condições mais críticas de rede, bem como a falha dos dispositivos sincronizadores, visando maximizar os resultados, a fim de mensurar o potencial dano ao equipamento. Entretanto, oscilografias de campo corroboraram o risco de dano apontados pelos estudos. Neste trabalho, foi apresentado apenas a oscilografia da sequência de Fast Reclose, que apresentou os piores resultados.

Na energização do transformador conversor não foram encontradas violações de critérios de suportabilidade, entretanto verificou-se uma rigorosa sobretensão sustentada entre os terminais do reator durante todo o período em que a corrente de inrush permanece circulando, na ordem de 3 pu da tensão de operação em regime permanente. Adicionalmente, foram encontradas violações do critério de correntes harmônicas nas componentes de 2ª, 3ª e 5ª harmônica. Na energização individual do filtro, não foram encontradas quaisquer violações de suportabilidade ou de corrente, entretanto observa-se transitórios relevantes, especialmente de corrente total sobre o filtro. Somado ao fato desta manobra ocorrer dezenas de vezes ao ano, torna-se importante destacá-la entre as manobras severas com potencial risco de dano. Quanto ao religamento rápido de filtro energizado, mais propenso a acontecer em período seco, esta manobra viola o critério de margem de segurança do isolamento de surto de manobra em reatores, bem como o critério de 1º pico de corrente de inrush. Corroboram registros da operação da Eletronorte de queima de reatores imediatamente após as manobras supracitadas.

Finalmente, a experiência da Eletronorte e do projetista (Hitachi, outrora ABB) adquirida nestas falhas, levou ao aperfeiçoamento das lógicas de controle que fazem o fechamento automático dos filtros, tornando o sistema mais preciso com relação ao tempo ótimo para fechamento dos disjuntores destes equipamentos. Adicionalmente, levou a empresa a implantar rotinas de manutenção nos disjuntores dos transformadores mais frequentes, também com intenção de tornar mais precisa a manobra do transformador. Finalmente, reatores com especificações mais robustas estão sendo adquiridos, a fim de substituir aqueles danificados.

5.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] ANEEL, Edital de Leilão nº 007/2008-ANEEL - Anexo 6A-CC - Lote LA-CC - Integração do Madeira - Transmissão Associada à Integração das Usinas do Rio Madeira - Características e Requisitos Técnicos Básicos das Instalações de Transmissão.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede, submódulo 2.8 - Requisitos mínimos para elos em corrente contínua, Revisão 2021.08.
- [3] ABB HVDC, Características dos filtros CA, Bipolo 1 e Back-to-Back. 1JNL100133-468_PT Rev.03, 2010.
- [4] HIOKI E. E. CORPORATION, 3196 Power Quality Analyzer, Instruction Manual.
- [5] ABB HVDC, “AC Filter Reactors, Porto Velho Collector, 500 kV side. Requirement Specification - 1JNL100139-263,” 2010.
- [6] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede, submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica, Revisão 2020.12.
- [7] ABB PGGI - Consulting, Back-to-Back Porto Velho - SE Porto Velho 230/500 kV - Manual do Usuário. 1HBR44273396-002. Rev 0B, 2018.
- [8] ABB PGGI - Consulting, Bipolo Rio Madeira, SE Porto Velho 500 kV. SE Araraquara II 500 kV - Manual do Usuário. Rev 0B.
- [9] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Procedimentos de Rede, submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos, Revisão 2021.08.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS



FILIPPE RODRIGUES LOPES, Engenheiro Eletricista desde 2006, graduado pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Trabalha na Eletrobras Eletronorte desenvolvendo estudos elétricos de operação da transmissão e de desempenho de sistemas elétricos de potência desde 2007. Experiências com estudos de fluxo de potência, transitórios eletromagnéticos e transitórios eletromecânicos, modelagem computacional e análise desempenho da operação de sistemas CA e HVDC.

(2) JOÃO PAULO FERNANDES LIMA, natural de Goiânia-GO, graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pela Universidade Federal de Goiás, tendo recebido o título de mestre pela mesma instituição em 2005. É engenheiro de operação da Eletrobras Eletronorte desde 2011, com atuação na área de estudos elétricos da operação de sistemas. Atualmente, desenvolve estudos operacionais e para os sistemas elétricos da empresa, contemplando as análises de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica, curto-circuito e transitórios eletromagnéticos, com particular interesse em estudos de energização de transformadores.

(3) NILO SÉRGIO SOARES RIBEIRO, É engenheiro eletricista, mestre em Qualidade da Energia Elétrica e doutorando em Proteção de Sistemas Elétricos. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em simulações digitais de sistemas de transmissão, especialista em transitórios eletromagnéticos e fluxo de carga, modelagem computacional, planejamento energético, qualidade da energia e efficientização energética. Atualmente é engenheiro da ELETROBRAS-ELETRONORTE, em Brasília, atuando na área de estudos elétricos da operação, e docente no Centro Universitário de Brasília - UniCeub, ministrando as disciplinas de Análise de Sistemas de Potência, Circuitos Polifásicos e Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.