SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GCQ 19
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA - GCQ

PROJETO DOS NOVOS FILTROS 3ª/5ª HARMÔNICA DE IBIÚNA DESEMPENHO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Ricardo André Gonçalves(*) **Eduardo Medeiros Brandi** **Guilherme Sarcinelli Luz**

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

José Roberto Medeiros **Arnoldo Rodrigo Saavedra**
JRMED

RESUMO

Os filtros de 3ª/5ª harmônicas da Estação Inversora de Ibiúna do sistema de transmissão em Corrente Contínua (ELO CC) de Itaipu foram dimensionados, do ponto de vista do carregamento de correntes harmônicas, para suportar as correntes originadas dos conversores, considerando as condições mais severas de ressonância paralela entre os filtros e a rede CA, acrescidas da margem de 10%, para considerar os harmônicos da rede externa.

Há alguns anos, entretanto, foram registradas perdas de alguns elementos desses filtros devido à sobrecarga de corrente harmônica (mais notadamente do 5º harmônico). Tendo em vista a impossibilidade de operação do ELO CC de Itaipu sem a presença de pelo menos uma unidade de filtro de 3ª/5ª harmônica, diversas ações no nível da rede elétrica passaram a ser implementadas de maneira a reduzir tal sobrecarga e viabilizar a operação do ELO CC sem restrições operativas.

Adicionalmente, a ANEEL autorizou FURNAS a adquirir outros dois filtros de 3ª/5ª harmônica, com maior "rating" de corrente, de maneira a atender as novas condições de fluxo harmônico nas redes elétricas, em particular na região de Ibiúna.

O objetivo do artigo é apresentar, a partir da especificação elaborada por FURNAS, o projeto dos novos filtros de 3ª/5ª harmônicas recém instalados na SE IBIÚNA para evitar o problema de sobrecarga.

PALAVRAS-CHAVE

Filtros de harmônicos, qualidade de energia elétrica, ELO CC

1.0 INTRODUÇÃO:

A crescente utilização de equipamentos eletrônicos por consumidores, seja industrial, comercial e até mesmo residencial, fez com que aumentassem os níveis de harmônicos no sistema sem que houvesse, em contrapartida, o mesmo crescimento na instalação de equipamentos no sistema para suprimir tais harmônicos, sejam eles próximos ou afastados das fontes de perturbação. Este fato fez com que os filtros de 3º/5º harmônicos no lado CA da Subestação Inversora do ELO CC de Itaipu em Ibiúna, operado por FURNAS, passassem a absorver, de forma crescente, harmônicos de baixa ordem, vindos da rede, mais notadamente o 5º harmônico, implicando no seu desligamento em determinadas condições. por sobrecarga harmônica. Devido a este problema, o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) solicitou a FURNAS operar o ELO de Itaipu sem os filtros de 3º/5º harmônicos na SE IBIÚNA, já que eles eram mais importantes nos primeiros estágios do projeto. Entretanto, o projeto inicial estabelece que, para manutenção das garantias do projeto, na indisponibilidade dos 2 filtros existentes de 3º/5º harmônicos, é necessário reduzir a potência transmitida pelo ELO CC para seu valor mínimo, em função dos estudos de transitórios realizados na época indicarem que a presença dos mencionados filtros tem importância relevante na recuperação do ELO CC após transitórios, tais como faltas monofásicas e trifásicas, energização de

(*) Rua Real Grandeza, 219 – sala 1607 - Bloco C – CEP 22281-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2528-2125 – Fax: (+55 21) 2528-4857 – Email: randre@furnas.com.br

transformadores, principalmente com a presença de 5º harmônico no barramento CA de Ibiúna, provenientes de fontes externas.

Verificações recentes quanto à assimetria de disparo das válvulas e testes de sintonia dos filtros indicaram que todos os equipamentos estão operando dentro dos requisitos especificados, comprovando que os harmônicos excessivos não estão sendo gerados pelo ELO CC.

Ao contrário do que se verificava em meados da década de 90, quando os alarmes de sobrecarga só ocorriam em condições de carga leve, os mesmos passaram a ocorrer durante quaisquer períodos de operação do ELO CC, mesmo com potências acima de 4500 MW e, até mesmo, com potência nula. Estas sobrecargas foram responsáveis pela queima de sete reatores desses filtros nos últimos anos.

O sistema foi inicialmente projetado para operar com apenas 1 banco de filtros de 3º/5º harmônicos, ficando o segundo banco existente como reserva. A sobrecarga harmônica impôs a utilização contínua dos 2 bancos de filtros existentes, dificultando a realização de manutenções preventivas. Como FURNAS não autorizou a operação do ELO CC sem a presença de pelo menos um dos bancos, a indisponibilidade dos 2 bancos implicaria na redução da potência transmitida para cerca de 160 MW, o que em termos práticos significaria interromper a sua operação.

Após várias reuniões com ONS, foi encaminhado e aprovado pela ANEEL a instalação de duas novas unidades de filtros de 3º/5º harmônicos, no sentido de resolver o problema de sobrecarga harmônica em Ibiúna.

2.0 ASPECTOS DA ESPECIFICAÇAO:

A aquisição dos novos filtros de 3º/5º harmônicos de Ibiúna 345 kV passou por uma discussão filosófica sobre a profundidade de detalhes com que eles deveriam ser especificados. Inicialmente, seria feita uma especificação idêntica à dos filtros existentes, detalhando-se cada equipamento a ser adquirido. Posteriormente, chegou-se a conclusão que seria mais adequado transferir a responsabilidade do desempenho dos filtros como um todo para o fabricante. Nesse contexto, foi elaborada uma especificação técnica funcional, onde apenas as funções essenciais a serem desempenhadas pelos novos filtros foram detalhadas.

Deste modo, elaborou-se uma especificação para que os novos filtros fossem mais efetivos e mais robustos que os existentes. Foram ainda considerados os dados dos filtros existentes tendo em vista a experiência operativa do ELO CC de quase 20 anos.

Os filtros de 3º/5º harmônicos existentes tem a seguinte configuração:

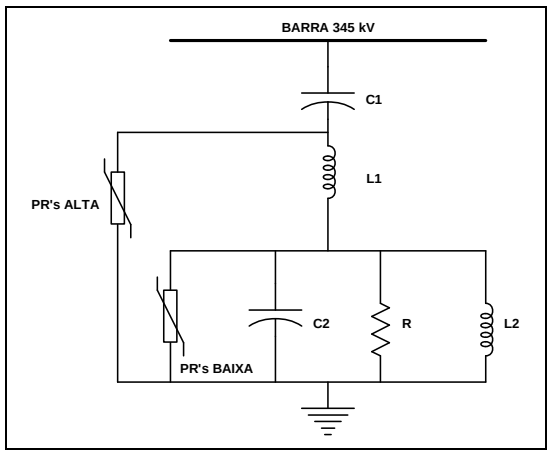

Figura 1 – Configuração Original dos Filtros de 3º/5º harmônicos de Ibiúna 345 kV

As características desses filtros e as tolerâncias consideradas no projeto original são mostradas na Tabela 1.

Parâmetros e Tolerâncias do Filtro Original	
C1 (μF)	1,19 (±0,5%)
L1 (mH)	409,05 (±1,0%)
C2 (μF)	4,22 (±0,5%)
L2 (mH)	112,30 (±2,0%)
R (Ω)	2500 (±10,0%)
Fator de qualidade L1	300
Fator de qualidade L2	180
Potência (Mvar)	57
Variação de freqüência (Hz)	± 0,15
ΔC1 e ΔC2 devido à variação de temperatura e perda de unidades	± 2,0%

Tabela 1 – Parâmetros e Tolerâncias Considerados no Projeto Original dos Filtros

Com esses parâmetros e tolerâncias, foram levantadas as diversas respostas em freqüência que o filtro poderia apresentar, parametrizando as várias possibilidades de combinação de tolerâncias nos seus componentes e, ainda, considerando um escalonamento dos componentes, já que o filtro novo teria uma potência trifásica 2 Mvar superior a potência trifásica do filtro antigo, na tensão nominal.

De todas as respostas em freqüência, foi levantada a envoltória definida pelos limites máximos e mínimos das curvas obtidas, tanto para o módulo quanto para o ângulo da impedância.

A Figura 2, a seguir mostra as envoltórias obtidas para a faixa de freqüência do 1º ao 6º harmônico.

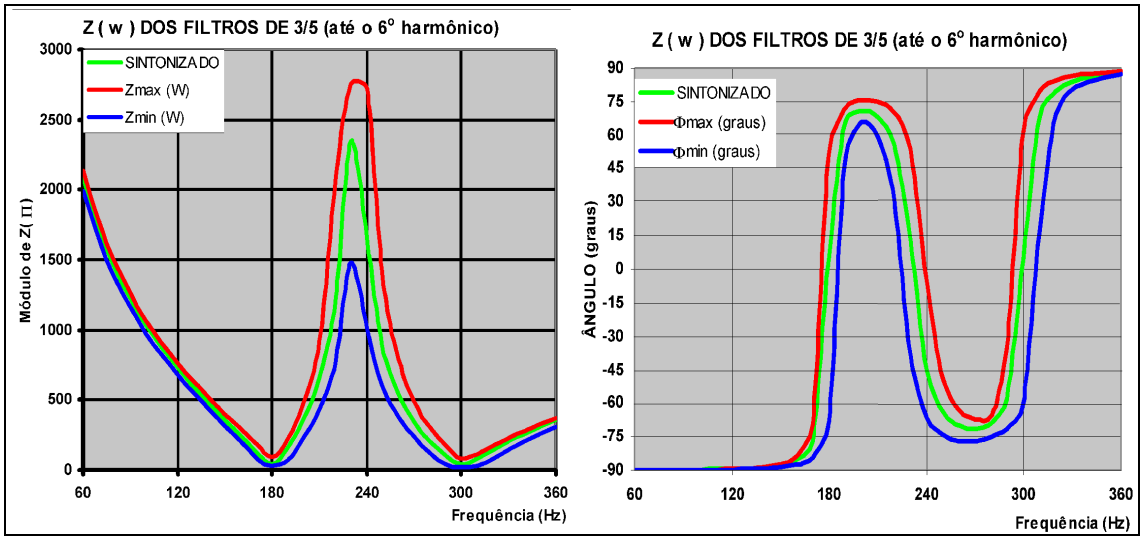

Figura 2 – Resposta em Freqüência dos Filtros Originais até o 6º Harmônico

No sentido de se obter um filtro mais sintonizado, foi reduzida a área entre as curvas mínimas e máximas de tal forma que, ainda assim, não inviabilizasse a fabricação de equipamentos mais precisos. A princípio, sem conhecer o fornecedor, não poderia ser feita uma estimativa de precisão na fabricação dos componentes.

Com o objetivo de garantir que os filtros novos tivessem uma probabilidade de apresentar menor impedância para as freqüências de sintonia do que os antigos filtros (maior absorção de harmônicos pelos filtros novos), foi adotada como limite, a faixa do módulo de impedâncias entre a curva mínima e a curva do filtro sintonizado

Para o ângulo, procurou-se estreitar a faixa, adotando-se um fator de redução de 95% em toda a extensão e de 90% próximo às freqüências de sintonia (3º e 5º harmônicos). Dessa forma, a especificação dos novos filtros teve como exigência, o atendimento às curvas de resposta em freqüência mostradas na Figura 3, a seguir:

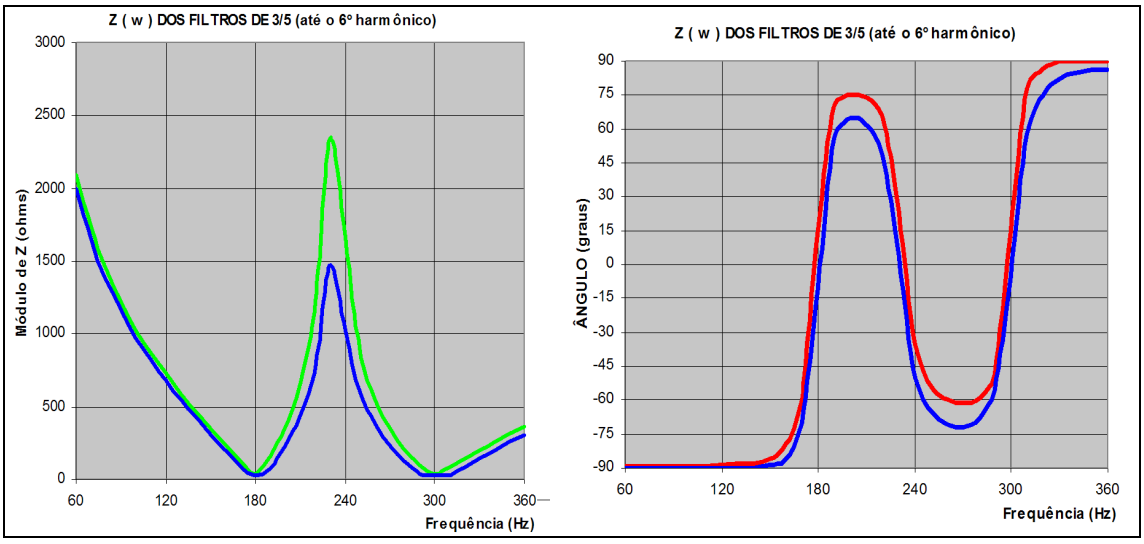

Figura 3 – Resposta em Freqüência dos Filtros Exigida na Especificação até o 6º Harmônico

Com o objetivo de obter um filtro mais robusto, em termos de “rating”, foram especificados os índices de distorção harmônica no barramento de Ibiúna 345 kV, baseados na experiência operacional do ELO. Assim sendo, o filtro

deverá operar, considerando a faixa de variação da tensão operativa e, concomitantemente, as distorções harmônicas máximas de tensão (em conjunto), conforme indicado na Tabela 2, mostrada a seguir.

DADOS OPERACIONAIS	HARMÔNICO	DISTORÇÃO (%)	HARMÔNICO	DISTORÇÃO (%)
	2º	0.15	8º	0.05
Vmax = 1.05 pu	**3º**	**0.50**	9º	0.10
Vmin = 0.95 pu	4º	0.15	10º	0.05
$Scc_{3Ø}$ máx = 24000 MVA	**5º**	**0.80**	11º	0.30
$Scc_{3Ø}$ min = 19500 MVA	6º	0.10	12º	0.05
$Scc_{1Ø}$ máx = 27500 MVA	7º	0.20	13º	0.20
$Scc_{1Ø}$ min = 23500 MVA	14º ao 50º			0.05

Tabela 2 - Distorções Harmônicas Máximas, Presentes no Barramento de Ibiúna.

Foram relacionados na Especificação Técnica, dentre outros, os seguintes estudos a serem apresentados pelo fabricante: desempenho em regime permanente, dimensionamento dos componentes em regime permanente, dimensionamento dos componentes e pára-raios em regime transitório, sobretensões e coordenação de isolamento, perdas e proteção.

3.0 ESTUDOS DE DESEMPENHO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DOS FILTROS EM REGIME PERMANENTE:

3.1. Estudo de Desempenho

Basicamente, os novos filtros deveriam ter potência nominal, à freqüência fundamental, de 59Mvar (capacitivo). Qualquer que fosse a composição do filtro, considerando as possíveis variações de freqüência (±0,15Hz), de temperatura (temperatura ambiente variando de -5º C a 50º C) e de tolerâncias na fabricação dos seus componentes, a sua resposta em freqüência deveria se situar dentro da faixa de módulo de impedância e fase, conforme anteriormente mostrado nas Figuras 2 e 3.

Em linhas gerais a metodologia para o estabelecimento da alternativa de filtro considerada foi:

- Estabelecimento da configuração básica, ou seja, um filtro do tipo sintonia dupla (3º/5º) ou dois filtros de sintonia simples (3º e 5º);
- Realização de análise de sensibilidade de maneira a verificar, a partir da configuração básica, a possibilidade de ajustes adicionais de forma a melhorar o desempenho do filtro;
- Avaliação do desempenho da alternativa de projeto escolhido considerando possíveis variações de freqüência, de temperatura e de tolerâncias na fabricação dos seus componentes, conforme estabelecido na especificação.

Quanto à escolha da configuração do filtro, dois fatores foram determinantes:

- A necessária aderência da resposta em freqüência dos novos filtros à resposta em freqüência dos filtros originais existentes;
- A impossibilidade de se obter o mesmo desempenho dos filtros, considerando a configuração de dois filtros de sintonia simples, mantendo-se o valor da soma das suas respectivas potências reativas igual a 59 MVAR.

Assim sendo, o projeto do filtro partiu da alternativa de dupla sintonia, onde os valores dos componentes foram escalonados de maneira que sua potência reativa, em condições nominais, passasse de 57 Mvar do filtro original para 59 Mvar, bem como adequados de maneira a melhor se ajustar a curva de resposta em freqüência especificada, resultando os valores de componentes apresentados na tabela 3.

Parâmetro	Valores	Parâmetro	Valores
C1 (µF)	1,20	QL2	350,00
L1 (mH)	391,00	Mvar	59,00
C2 (µF)	4,43	Δf (Hz)	+/- 0,15
L2 (mH)	106,29	Tolerância de fabricação C1 (%)	+/- 0,50
R (Ω)	3379,60	Tolerância de fabricação L1 (%)	+/- 1,00
QL1	350,00	Tolerância de fabricação L2 (%)	+/- 1,00
		ΔC1 e ΔC2 devido a ΔT (%)	+/- 1,50

Tabela 3 – Valores dos componentes do novo filtro 3º/5º da SE Ibiúna

3.2. Dimensionamento dos componentes em regime permanente.

O dimensionamento dos componentes do filtro em regime permanente teve por objetivo estabelecer os valores de corrente e tensão máximos, na freqüência fundamental e nas freqüências harmônicas, ou seja, a suportabilidade em regime permanente de cada componente quanto a:

- Corrente eficaz (RMS), considerando a soma quadrática das máximas correntes harmônicas individuais, incluindo a fundamental calculada com tensão máxima operativa na barra de 345 kV;
- Tensão total de pico, considerando soma linear das máximas tensões harmônicas individuais, incluindo a fundamental calculada com tensão máxima operativa na barra de 345 kV;
- Valores das componentes individuais dos valores de corrente e tensão para a freqüência fundamental, bem como o 3º e 5º harmônicos.

Para a determinação das máximas correntes e tensões harmônicas em cada componente dos filtros foram utilizadas as máximas tensões harmônicas na barra de 345 kV da conversora estabelecidas por FURNAS, baseada em sua experiência operativa.

Para estes cálculos foram consideradas as variações dos valores representativos dos elementos do filtro, incluindo tolerâncias de fabricação, variação de temperatura e perda de unidades capacitivas, bem como variações de freqüência de maneira a determinar os máximos valores de corrente e tensão em cada componente.

Quanto às variações dos componentes, foram introduzidas nas variações de C1 e C2 (ΔC1 e ΔC2), além da variação de temperatura (ΔT) aquelas resultantes da perda de unidades capacitivas, resultando uma variação de total de ±2,0%.

A Tabela 4 apresenta os valores máximos de corrente e tensão recomendados pelo estudo.

Componentes	Corrente (A) Soma Quadrática	Tensão (kVp) Soma Linear
C1	135,7	435,4
L1	135,8	125,1
C2	168,2	50,1
L2	179,0	50,1
R	6,6	50,1

Tabela 4 – Valores recomendados de 'rating'

Para o cálculo de perdas foram consideradas as máximas tensões harmônicas na barra de 345 kV da conversora, estabelecidas por FURNAS, bem como o valor máximo de tensão à freqüência fundamental (362 kV), incluindo as condições de desvio dos valores dos componentes do filtro bem como da freqüência da rede.

Em princípio, as perdas máximas devem ocorrer nas condições de melhor sintonia dos filtros, pois neste caso são maiores as correntes das harmônicas principais (3^a e 5^a). Neste caso, o valor resultante das perdas garantidas foi de 530,5 kW, por filtro.

4.0 ESTUDOS DE DESEMPENHO EM REGIME TRANSITÓRIO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES RLC E PÁRA-RAIOS INTERNOS DOS FILTROS:

4.1 Objetivo do estudo, modelagem e dados.

Os estudos de regime transitório descritos a seguir foram feitos com o ATP (Alternative Transient Program). Como mencionado no item 3, os novos filtros, para satisfazer os requisitos de impedância em função da freqüência, tiveram que manter a mesma composição de elementos dos filtros originais (Figura 1), embora com parâmetros um pouco diferentes. Conseqüentemente, os pára-raios (PR's) também mantém a mesma disposição (Figura 1). O objetivo deste estudo foi determinar, por um lado, as características de dimensionamento transitório dos elementos RLC dos filtros, incluindo as máximas correntes e tensões transitórias que eles devem suportar, bem como a energia associada ao elemento resistor, e, por outro lado, as características "V x I" dos PR's internos de alta e baixa tensão para proteção dos elementos dos filtros, assim como suas capacidades de dissipação de energia e correntes máximas. Portanto, os PR's internos estão formados por PR conectado a terra a partir do ponto comum de ligação de L1 e C1 (PR de alta) e PR em paralelo com L2, C2 e R (PR de baixa), em cada fase de cada filtro. Estes PR's estão associados ao dimensionamento dos elementos do filtro, no que diz respeito à suportabilidade transitória de corrente e tensão.

Tendo em conta as pequenas diferenças dos parâmetros RLC dos novos filtros em relação aos antigos, os estudos foram feitos considerando PR's internos com as mesmas características "V x I" dos PR's antigos, embora considerando diferentes suportabilidades em kA e kJ/kV, não sendo verificada a conveniência de variar estas características para otimizar o dimensionamento transitório dos componentes dos novos filtros, considerando o curto prazo para entrada em serviço. Para os PR's externos (345 kV), foram utilizadas também as mesmas características "V x I" definidas para os PR's existentes no barramento de 345 kV, tendo em conta a operação em paralelo para sobretensões temporárias.

Os cálculos de ratings transitórios dos elementos dos novos filtros foram feitos para os mesmos fenômenos considerados como decisivos para os filtros antigos. Os estudos foram divididos em duas categorias: a) estudos de sobretensões temporárias com ressonâncias harmônicas de saturação de transformadores, e b) estudos de descarga dos capacitores dos filtros a curtos-circuitos próximos aos pontos de conexão. Os estudos "a" foram feitos para duas condições: a1) início e eliminação de faltas trifásicas e monofásicas, e, a2) energização de transformadores conversores e outros. Os estudos da categoria "b" foram feitos também para duas condições: b1)

com os capacitores carregados com tensão máxima, correspondente ao nível de proteção dos PR's de 345 kV, e b2) com os capacitores carregados com tensão correspondente a baixa corrente nos PR's internos de alta tensão. Estas condições definiram os esforços máximos nos PR's internos de alta e os níveis de isolamento dos pontos internos dos filtros onde estão instalados esses PR's.

Paralelamente aos estudos principais, foi verificado que os PR's não sofrerão esforços significativos de corrente e energia durante manobras de energização normal, com os capacitores C1 e C2 descarregados até o nível definido pela norma IEC 60871-1:1997.

Para se obter as piores condições de sobretensão temporária, foi considerada máxima transmissão de potência no ELO CC, com recepção de 6000 MW, com 3000 Mvar, na barra de 345 kV da SE Ibiúna. Para esta potência, foi calculado fluxo de potência para ajustar as tensões das fontes equivalentes dos conversores, estrela e delta.

Para maximizar as sobretensões de eliminação de faltas, além dos filtros novos, foi ligado o resto da filtragem (exceto filtros antigos de 3ª/5ª harmônicas) e a compensação reativa (capacitores e 2 dos 4 síncronos), com máxima impedância da rede externa. Por este motivo, foi ajustado no ATP um equivalente de seqüência positiva da rede externa, com o menor nível de curto-circuito especificado, com tensão ajustada para manter 1,05 pu de tensão operativa na barra de 345 kV. Como este equivalente é válido somente para 60 Hz, a impedância harmônica foi compensada com circuitos de ressonância forçada (sintonizadores RLC série) nas harmônicas mais críticas de saturação (h<8). Esta forma conservativa de cálculo é original deste estudo, tendo a vantagem de incluir em um único cálculo todas as possíveis ressonâncias potencialmente críticas, sendo superior aos cálculos com equivalentes de curto-circuito ou com uma rede detalhada. Estas ressonâncias da barra de 345 kV foram ajustadas com os sintonizadores para cada harmônica (h<8), com agudez suficiente para não afetar impedâncias harmônicas laterais, nem a fundamental, calculando o ponto certo no envelope de impedância harmônica da rede externa determinado previamente por FURNAS [7].

Para modelar os PR's foi utilizado o modelo recomendado pelo IEEE [5] para pulso rápido e um modelo simplificado para as sobretensões temporárias [6]. Os PR's foram representados com suas características máximas ("V x I") para a determinação dos ratings dos componentes dos filtros, e com suas características mínimas para identificar as energias que devem dissipar eles mesmos, e as correntes máximas que devem suportar. Os casos apresentados a seguir foram os decisivos para os ratings transitórios, embora tenham sido calculadas condições adicionais.

4.2 Resultados dos estudos para avaliação de desempenho transitório

o Estudo de início e eliminação de curto-circuito com bloqueio:

Foram simuladas faltas trifásicas sem terra nas proximidades dos filtros, incluindo sua eliminação, considerando o efeito das saturações dos transformadores da estação conversora e o bloqueio dos conversores, os quais foram desligados durante a falta, até o final da simulação. Embora, as faltas trifásicas sem terra sejam as mais críticas, de acordo com os estudos dos filtros originais, foram simulados também casos de curtos-circuitos fase-terra.

Foi pesquisado o instante de aplicação do curto-circuito de maneira a "congelar" os fluxos dos circuitos de magnetização com valor máximo em uma das fases. O instante da eliminação do curto-circuito foi pesquisado para se obter a máxima integral de tensão com a mesma polaridade do fluxo residual. Desta forma foram obtidas as máximas correntes de "Inrush" na eliminação do curto-circuito, e os maiores esforços nos elementos dos novos filtros e nos PR's internos. No início do curto-circuito, C1 sofre um pulso muito rápido de corrente, o qual não é considerado neste caso, por ser maior este pulso na descarga do filtro a curto-circuito próximo.

o Estudo de energização de um transformador conversor:

Para simular a energização de um transformador conversor foi utilizada a mesma rede montada para o estudo de eliminação de curto-circuito, porém, representando um transformador conversor separado do equivalente YY. Para se obter o fluxo residual de aproximadamente 90% na fase A (arbitrária) antes da energização, foi utilizado um método de "carga de fluxo residual", o qual parece ser original deste trabalho, baseado na aplicação de curtos-circuitos nas fases do nó interno do transformador, isolado da rede em estudo, em pontos adequados das ondas de tensão, para "congelar" o fluxo nos valores desejados. A onda de tensão pode ser aplicada externamente, mediante fontes específicas, porém também pode ser utilizada a tensão da própria barra de energização com resistência de isolamento de alto valor, localizada entre o primário do transformador e a barra de energização (345 kV). Após o "congelamento" o curto-circuito é eliminado, seguindo o "by-pass" da resistência de isolamento, o que provoca a energização do transformador com os fluxos residuais desejados. Os pontos da onda de tensão na energização devem permitir que a integral subseqüente da tensão tenha a mesma polaridade do fluxo residual, para maximizar o Inrush.

o Estudo de descarga do filtro a curto-circuito próximo:

Estas simulações foram feitas com um circuito de poucos metros de extensão representando as conexões dos filtros ao barramento de 345 kV mediante suas indutâncias. Para as faltas ("backflashovers") foram escolhidos alguns pontos de suporte dos barramentos de 345 kV mais próximos dos filtros, pois a menor reatância do circuito permite maximizar a descarga dos filtros. Os resultados mostram que ocorrem sobretensões e sobrecorrentes altas em forma muito rápida, com queda a valores baixos em poucos µs. Nesta análise foram consideradas duas condições principais, descritas a seguir:

CONDICAO A - Curto-circuito no 345 kV com sobretensão igual a 552 kVp (1,96 pu), correspondente ao nível de proteção dos PR's para surtos de manobra. Este caso é bastante pessimista, pois os capacitores C1 estão carregados com tensão maior que 2 pu antes da descarga.

CONDICAO B - Curto-circuito nas conexões de 345 kV com tensão pré-falta de 235 kV para a qual os PR's internos de alta tensão conduziriam pequena corrente (1 kA), procurando estressar os elementos (R, L2 e C2) e os PR's internos de baixa tensão.

A Tabela 5 abaixo resume os resultados alcançados pelos estudos de desempenho em condições transitórias, considerando as situações mais críticas.

ESTUDO	Esforços nos elementos dos Filtros								
	Corrente (Ap)					Energia (kJ)	Tensão (kVp)		
	C1	L1	C2	L2	R	R	C1	L1	C2, L2, R
Eliminação falta com bloqueio	616,0	610,0	776,0	1164,0	35,5	390,0	657,1	226,3	125,0
Energização Transf. conversor	208,0	208,0	300,0	478,0	15,1	30,0	391,0	74,6	51,0
Descarga a falta próxima A	34900,0	110,0	208,1	243,0	9,7	3,2	606,0	356,0	32,8
Descarga a falta próxima B	7400,0	314,7	609,0	634,0	25,9	22,0	325,0	196,0	120,0
Máximos	34900,0	610,0	776,0	1164,0	35,5	390,0	657,1	356,0	125,0
ESTUDO	**Esforços nos pára-raios**								
	PRs externos (345 kV)			PRs de alta			PRs de baixa		
	Energia kJ	Umax kVp	Imax kAp	Energia kJ	Umax kVp	Imax kAp	Energia kJ	Umax kVp	Imax kAp
Eliminação falta com bloqueio	5000,0	494,9	8,3	100,0	220,7	0,0	120,0	125,0	0,0
Energização Transf. conversor				0,8	94,0	0,1	0,7	51,0	0,1
Descarga a falta próxima A		552 (dado)		218,0	367,0	37,2	0,0	32,8	0,0
Descarga a falta próxima B		235 (dado)		13,6	203,1	1,7	0,7	87,7	0,0
Máximos	5000,0	494,9	8,3	218,0	367,0	37,2	120,0	125,0	0,1

Tabela 5 – Resultados dos estudos com esforços máximos nos elementos dos filtros e nos PRs

5.0 ASPECTOS DA PROTEÇÃO DO FILTRO

A filosofia do sistema de proteção que é apresentado neste trabalho foi oriunda da busca de elementos mais efetivos que atendessem às necessidades observadas ao longo da experiência operativa de FURNAS com bancos de capacitores de forma geral e na operação de bancos de filtros, em particular.

Em vista disso, destacamos que muitas funções de proteção implementadas são novas e foram desenvolvidas em função de obter-se uma resposta positiva a essa experiência. Estas funções buscaram avançar não só no aspecto de detecção de perda de sintonia dos filtros, mas também, nas funções de desbalanço, sobrecarga térmica, além da função de elemento aberto. Adicionalmente, destaca-se a necessidade da proteção ser imune as oscilações de tensão naturais de desbalanço, bem como as variações de parâmetros elétricos dos elementos dos filtros com a temperatura ambiente.

Nesse novo projeto, a possibilidade de operar o filtro com apenas 02 fases energizadas foi prevista tanto no circuito de controle quanto no circuito de proteção. Isso quer dizer que, as proteções podem ser ajustadas para operação de "trip" tripolar ou operação de "trip" monopolar, implicando, em se ter relés de bloqueio por fase, proteções monopolares independentes, circuitos de controle inteligentes de maneira que permitam que o banco esteja em funcionamento com no mínimo duas fases energizadas.

Assim sendo, os novos bancos de filtros possuem dois modos de operação, a saber: modo de operação monopolar e modo de operação tripolar.

A seleção do modo de operação monopolar viabiliza a operação dos filtros com somente uma fase desenergizada e para isso todas as funções de intertravamento e bloqueio de discrepância dos disjuntores e das proteções são ajustadas de forma a tornar possível este modo de operação.

A seguir são apresentados alguns requisitos que foram incluídos na especificação da proteção do filtro: consistir de dois sistemas independentes e redundantes digitais e alfanuméricos; relés com função de oscilografia dos sinais analógicos e digitais com registro de tempo de 1 ms de resolução sincronizados com gps; possibilidade de coleta automática de dados e acesso remoto; operar sem nenhuma restrição, com proteção degradada, e uma das proteções fora de operação; proteções alimentadas por diferentes enrolamentos secundários de transformadores; capacidade de identificar e isolar as falhas individuais por fase, ou seja, realizar disparo monopolar ou tripolar quando selecionado; quando em disparo monopolar, identificar a fase faltosa, isolando-a e mantendo as demais em operação, bem como alterando as funções internas dos relés e do disjuntor de forma a permitir a operação com duas fases energizadas; identificar as flutuações naturais dos elementos capacitivos, bem como, dos transdutores de medidas, sem perda da sua capacidade de discernimento do estado da tensão sobre os elementos capacitivos, que possam vir a mascarar esta informação, de forma a causar a recusa ou a operação indevida do mesmo; todas as proteções deverão ser providas de níveis de ajuste de alarme e de disparo (instantâneo e/ou temporizado); todos os elementos dos filtros devem ser protegidos de modo a assegurar que nenhum deles permaneça em operação fora da sua suportabilidade, seja ela térmica ou dielétrica; identificar a perda de sintonia do filtro.

Adicionalmente, deve proteger os elementos do filtro contendo as seguintes funções mínimas: proteção contra sobretensão nas unidades capacitivas; proteção contra sobrecarga térmica e dielétrica nos elementos individuais dos filtros; proteção contra perda de sintonia dos filtros; proteção para falhas a terra; proteção de sobrecorrente; proteção de trecho morto ("stub bus"); proteção de elemento aberto; identificação e adequação das proteções para operação com uma fase fora de operação.

6.0 CONCLUSÕES

O ineditismo de se elaborar uma especificação para filtros, exigiu um cuidado especial para evitar problemas que poderiam não ser vislumbrados durante essa etapa impondo um risco futuro de interferir no excelente desempenho do ELO.

A especificação dos valores dos componentes dos novos filtros de 3ª/5ª harmônicas da estação inversora do ELO de Itaipu, seu dimensionamento em regime permanente e transitório, bem como o estabelecimento de novos esquemas de proteção, corresponderam a desafios que propiciaram inovações importantes, tanto do ponto de vista dos estudos realizados como do desenvolvimento de equipamentos e novas técnicas de proteção.

O desempenho operativo dos novos filtros tornou a operação do ELO bem como do sistema no entorno de Ibiúna mais confiável. Esta constatação justifica plenamente todo o esforço desenvolvido no projeto. Observa-se, contudo, que as causas da sobrecarga dos filtros ainda estão presentes e com tendência de crescimento na rede elétrica, representadas pelas cargas não lineares tanto de grande como de pequeno porte.

Neste sentido, esforços deverão ser desenvolvidos para a identificação das fontes de distúrbio e, tanto quanto possível, a implementação de ações que venham a prevenir o aumento dos impactos ao "rating" dos novos filtros, que já se encontram em operação.

7.0 REFERÊNCIAS

[1] Relatório da ASEA-PROMON AP 127 - "AC Filter Transient Rating for São Roque" - (08/05/1981)

[2] "AC System Modeling for AC Filter Design; an Overview of Impedance Modeling". ELECTRA, no.164, February 1996, pp.133-51. Membros do WG 14.03 da CIGRÉ (J. Arrillaga, L. Juhlin, M. Lathinen, P. Ribeiro, A.R. Saavedra);

[3] "Estação Conversora de Freqüência de Uruguaiana - Filtros de Harmônicos", P. C. Charles, M. R. Quinaud, A. B. C. Albuquerque, A. R. Saavedra, T. Kuwabara, S. Irokawa, J. Arai, VIII SNPTEE, 1986 São Paulo;

[4] "Power System Harmonics", J. Arrillaga & N. R. Watson. Livro, John Wiley & Sons, Ltd. April 2004.

[5] "Modeling Of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Working Group 3.4.11, IEEE Transactions On Power Delivery, VOL. 7 No.1 JANUARY 1992

[6] "A Simpified Model For Zinc Oxide Surge Arresters", P. Pinceti, M. Giannettoni, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 14, No. 2, 1999.

[7] Estudo de Impedância Harmônica Vista de Ibiúna 345 kV – Influência sobre o Desempenho do ELO de Corrente Contínua de Itaipu com a Entrada em Operação da Interligação Ibiúna – Bateias 500 kV – Relatório do Projeto Básico da Interligação Ibiúna – Bateias de FURNAS para a ANEEL.