



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

GAT 04
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

O LEVANTAMENTO E O EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA DO HARMÔNICO DE 5ª ORDEM NO SUBSISTEMA SUDESTE DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

**Antonio Carlos Barbosa Martins * Cesar Ribeiro Zani Luiz Edmundo dos Santos Ferreira
Guilherme Sarcinelli Luz Davi Sixel Arentz Roberto Luiz Farizele Pinto**

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

O Sistema de Transmissão de FURNAS conta, desde 1985, com o Sistema de Transmissão em Corrente Contínua (Elo CC) em ± 600 kV, com capacidade nominal de 6.300 MW, que transporta para a Região Sudeste do Brasil a energia gerada em 50 Hz pela UHE Itaipu. O Elo CC é formado por dois bipolos, com capacidade nominal de 3.150 MW, cada. O sistema de retificação e de inversão de potência é formado por pontes tiristoras de 12 pulsos, comandadas pelo equipamento denominado Controle da Estação. Marco pioneiro no Brasil e no mundo, este sistema de transmissão em corrente contínua, que interliga Foz do Iguaçu (PR) a Ibiúna (SP), é o maior de seu gênero desde o início de sua operação comercial, tanto pela potência transmitida quanto pelo seu comprimento em torno de 800 km.

Da forma como este sistema retifica e inverte a potência, uma grande quantidade de potência reativa é absorvida através dos transformadores conversores. Este consumo de potência reativa é suprido por um grande número de filtros AC, bancos de capacitores e compensadores síncronos. Os filtros, que são passivos RLC [1,2], além de gerarem potência reativa, foram projetados para drenar as correntes harmônicas geradas nos processos de retificação e de inversão de potência.

O barramento da Subestação (SE) Ibiúna em 345 kV possui bancos de filtros para os harmônicos característicos, a saber: 11º, 13º, e HP (high pass). Esta SE possui também bancos de filtros para os harmônicos não característicos, a saber: 3º e 5º. O harmônico de 5ª ordem é originado na ponte conversora quando há assimetria do ângulo de disparo das válvulas, ou quando há diferenças entre as reatâncias dos transformadores conversores, ou ainda quando há desbalanço de tensão do sistema AC. A corrente harmônica de 3ª ordem é originada transitoriamente nos transformadores conversores quando estes são reenergizados. Para estas correntes harmônicas não característicos o projeto original forneceu dois bancos de filtros de 3ª/5ª ordem. O projeto original do Elo CC mostrou que é necessário somente 1 banco de filtro harmônico de 3ª/5ª ordem, tendo o 2º banco sido previsto como reserva.

O Elo CC mantém a mesma capacidade de transmissão de potência desde o início de sua operação comercial em 1985, o que significa que a necessidade de filtragem na SE Foz do Iguaçu e na SE Ibiúna, por conta da transmissão CC, permanece inalterada desde então. No entanto, desde o final da década de 80, devido a necessidades do Sistema Interligado Nacional (SIN), está sendo necessário manter o segundo filtro em operação simultânea para evitar a saída do primeiro por sobrecarga mostrando, portanto, que há um aumento de produção de harmônico de 5ª ordem no SIN.

A situação se agravou há 3 anos, quando os dois filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem da SE Ibiúna passaram a alarmar sobrecarga harmônica, sendo necessário, nessas ocasiões, a adoção de medidas operativas para reduzir ou eliminar a sobrecarga antes que a proteção destes filtros os retirasse de operação.

Pela especificação original o Elo CC não deve operar sem a filtragem de 3º e 5º harmônicos na SE Ibiúna (ou Foz do Iguaçu). Esta ocorrência implica em diminuir drasticamente a transmissão de potência para um valor de 160 MW nos dois bipolos. Dependendo do horário de carga e da disponibilidade de geração, esta redução abrupta pode acarretar sérios problemas eletroenergéticos para o SIN.

FURNAS instalou em novembro de 2006 mais dois filtros de 3º e 5º harmônicos na SE Ibiúna por decisão conjunta com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ONS, de forma a tentar minimizar este problema.

A contribuição deste IT reside na discussão mais abrangente do problema do aumento da produção do harmônico de 5ª ordem no SIN, particularmente na região Sudeste do Brasil, e os possíveis caminhos que o setor elétrico deverá tomar em curto e médio prazos na tentativa de reverter esta tendência. Questões como quais são as fontes produtoras deste harmônico; de que forma podemos evitar o aumento da produção deste harmônico; como o setor elétrico pode sugerir a órgãos como o INMETRO uma avaliação para introduzir modificações nos projetos de aparelhos eletrônicos de forma a filtrar nos próprios aparelhos sua produção de correntes harmônicas; qual a eficácia de se aumentar a filtragem destes harmônicos na SE Ibiúna, e outras questões serão discutidas ao longo do IT.

PALAVRAS-CHAVE

Corrente harmônica, Sobrecarga harmônica, Qualidade de energia, Filtros, Sistema de corrente contínua

1.0 - INTRODUÇÃO

O levantamento e o equacionamento do problema do harmônico de 5ª ordem no subsistema Sudeste do SIN se tornaram uma matéria relevante e urgente devido aos problemas diários de alarmes das proteções dos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna desde outubro de 2004.

No entanto, o problema de sobrecarga harmônica na SE Ibiúna remonta o início da década de 90. Um relatório do GCOI [3] já concluía que “os níveis de harmônicos existentes na subestação de Ibiúna, e que são superiores aos esperados, são causados pelo excesso de harmônicos presentes no sistema de corrente alternada, sendo que a principal causa está, provavelmente, associada às cargas industriais”. Adicionalmente já apontava medidas operativas que deveriam ser empregadas na tentativa de se reduzir o índice de distorção harmônica, tais como abertura de circuitos e energização de bancos de capacitores. Entretanto, com a evolução do problema, estas medidas passaram a não mais atender a todas as situações de sobrecarga nos filtros e causando transtornos à operação por diminuir a confiabilidade do atendimento à Região Sudeste.

Com a instalação de dois novos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna em novembro de 2006 este problema foi abrandado no curto e médio prazos, mas não resolvido para longo prazo.

Uma solução perene e robusta deve levar em consideração o crescimento da geração do harmônico de 5ª ordem no SIN. Para isto, é necessário que sejam feitas medições visando a identificação do fluxo destas correntes harmônicas no SIN e suas fontes de origem para que se possa estabelecer as medidas preventivas e corretivas deste problema. Dentre as possíveis medidas preventivas incluem-se a necessidade de legislação específica para combater a geração destas correntes harmônicas, independente de sua magnitude, na própria fonte. Como medidas corretivas entende-se a instalação de novos bancos de filtros em pontos mais apropriados do SIN.

Neste IT é relatada no item 2.0 a filosofia de operação da SE Ibiúna desde o início da operação do Elo CC e as mudanças ocorridas nos últimos 23 anos; no item 3.0 caracteriza-se o aumento da produção do harmônico de 5ª ordem no SIN; no item 4.0 discorre-se sobre as estratégias adotadas pelo ONS para a eliminação da sobrecarga harmônica na SE Ibiúna ao longo dos últimos anos; no item 5.0 discute-se as novas estratégias que poderão ser adotadas para a diminuição da produção do harmônico de 5ª ordem no SIN; no item 6.0 estão as conclusões do IT; no item 7.0 estão as referências bibliográficas; e, no item 8.0, estão os dados biográficos dos autores deste IT.

2.0 - A FILOSOFIA DE OPERAÇÃO DA SE IBIÚNA

A SE Ibiúna se configura de suma importância para a Região Sudeste brasileira e para a Área São Paulo, em particular. Se as condições operativas desta SE estiverem sadias, pode-se inferir que as condições operativas da Área São Paulo estão sadias também, do ponto de vista do Sistema de Transmissão em 345 kV desta Área, e vice-versa.

A SE Ibiúna, por ser a SE receptora do Elo CC proveniente da UHE Itaipu 50 Hz, tem a responsabilidade de manter sua tensão em 345 kV em níveis de 104 a 105%, e de transmitir, através de seus 6 circuitos em 345 kV e 1 circuito em 500 kV, para a Área São Paulo toda a energia proveniente deste sistema em corrente contínua, além de gerir a Interligação Sul/Sudeste em 500 kV das duas linhas de transmissão de FURNAS provenientes da SE Bateias (COPEL).

A Área São Paulo é composta por uma rede de transmissão em 440 kV, 345 kV e 500 kV, com característica de rede malhada, e com diversas fontes de geração. As usinas do rio Paraná, extremo oeste da Área São Paulo,

fornece boa parte da geração da área através de rede de transmissão malhada em 440 kV. A Interligação Norte/Sul, através de circuitos em 500 kV de FURNAS e da CEMIG, fornece outro quinhão de geração à área. As usinas dos rios Grande e Paranaíba, pertencentes a FURNAS e CEMIG, são fonte também para a Área São Paulo. Finalmente, através das SEs Tijuco Preto, Ibiúna e Campinas, a Área São Paulo obtém geração da Região Sul e da UHE Itaipu 60 e 50 Hz.

A filosofia de operação da SE Ibiúna sofreu algumas mudanças ao longo dos últimos 20 anos. A concepção desta SE está direcionada para a operação do Elo CC. Desta forma, o número de bancos de filtros e de compensadores síncronos (CSs) foi projetado visando o bom desempenho do Elo CC, tanto em regime permanente quanto em regimes transitório e dinâmico.

Em relação ao número de CSs é necessária a presença de 3 destes equipamentos para, junto a um conjunto mínimo de linhas de transmissão conectadas à SE, fornecer o nível de curto-circuito necessário para possibilitar uma maior estabilidade da transmissão em corrente contínua da SE Foz do Iguazu para SE Ibiúna. O 4º CS da SE Ibiúna é a unidade reserva dos demais CSs, o que possibilita a manutenção destes equipamentos ao longo do ano. Ainda em relação à filosofia original de operação da SE Ibiúna, o projeto previa fator de potência unitário desta SE com o restante do sistema de transmissão, ou seja, não deveria haver importação ou exportação de potência reativa entre a SE Ibiúna e o restante do sistema de transmissão, ficando esta variação em torno de 200 Mvar.

Esta condição operativa foi bem sucedida até o início da década de 90 quando, por solicitação do GCOI, houve um relaxamento na observância de exportação de potência reativa da SE Ibiúna para a Área São Paulo, passando da média de 200 Mvar para uma média de 600 Mvar esta exportação. Em meados de 1996 FURNAS constatou um aumento significativo nesta média de exportação, solicitando ao GCOI a criação de um grupo de estudo específico para verificar as deficiências de compensação reativa nas Áreas São Paulo e Rio de Janeiro/Espírito Santo. Este grupo foi criado e emitiu um Relatório em dezembro de 1996 apontando, dentre outras conclusões, a necessidade da então CESP realizar um estudo para a retirada de reatores de linhas de transmissão e de barras do sistema em 440 kV.

A esta altura, ainda por solicitação do GCOI, os 4 CSs da SE Ibiúna foram mantidos em operação regular, dificultando as saídas programadas e não programadas de manutenção destes CSs. Antes mesmo de haver sido iniciado o estudo para a retirada dos reatores do sistema em 440 kV foi constatado que, em meados de março e abril de 1997 a exportação de potência reativa da SE Ibiúna para a Área São Paulo estava em patamares de 1.100 Mvar. Se somarmos a contribuição da SE Tijuco Preto esta exportação era da ordem de 2.000 Mvar. Nos dias 24 e 25 de abril de 1997, no mesmo horário, entre 18:00 e 18:30 h, período de rampeamento da carga média para a carga pesada na Área São Paulo, houve duas instabilidades de tensão seguidas de colapso de tensão na Área São Paulo, respectivamente [4].

A partir do segundo semestre de 1997 houve uma significativa redução na exportação de potência reativa pela SE Ibiúna com a tomada de uma série de providências pela CESP em seu sistema de transmissão e, também, por FURNAS no controle do Elo CC. No entanto, os níveis médios de exportação de potência reativa permaneceram acima de 600 Mvar, e o 4º CS permanece em operação com os demais desde então.

Em relação à filtragem do harmônico de 5ª ordem na SE Ibiúna o projeto do Elo CC definiu a necessidade de um banco de filtros em operação, ficando o 2º banco de filtros como reserva para as ocasiões de manutenção preventiva e/ou corretiva. No entanto, desde o final da década de 90, os dois filtros harmônicos de 5ª ordem estão tendo que operar simultaneamente devido a constantes alarmes de sobrecarga harmônica dificultando muito a execução de manutenção de algum destes filtros.

A partir de 2004 deu-se início a uma série de alarmes de sobrecarga harmônica em um ou nos dois filtros harmônicos de 5ª ordem, estando os dois filtros em operação. Estes alarmes foram ficando cada vez mais frequentes até que, de 2004 até novembro de 2006, as proteções de sobrecarga harmônica alarmavam diariamente, mais de uma vez por dia. Como resultado de investigações realizadas por Furnas e após discussões com o ONS, essa empresa estabeleceu, desde 2004, uma série de modificações nas medidas corretivas no Sistema Interligado Nacional (SIN) de forma a reduzir o fluxo do harmônico de 5ª ordem para a SE Ibiúna. Dentre estas medidas está o desligamento de linhas de transmissão conectadas a SE de Ibiúna, o que constata que a sobrecarga harmônica tem sua origem no sistema que se interliga a esta SE. Estas medidas são de grande importância para que se elimine esta sobrecarga harmônica, uma vez que, se um filtro for desligado por sua proteção, o filtro remanescente irá também ser desligado e, na eventualidade de não haver filtragem de 3º/5º harmônico disponível, é necessário reduzir a potência transmitida pelo Elo CC para 160 MW em um período de tempo da ordem 30 minutos. Esta medida visa proteger os equipamentos do Elo CC. No entanto, do ponto de vista do SIN, a realocação de cerca de 5.000 MW pode desencadear um gigantesco problema energético. Operativamente, portanto, deve-se evitar a qualquer custo o desligamento intempestivo deste conjunto de filtros.

Em novembro de 2006 foram instalados na SE Ibiúna dois novos filtros para os harmônicos de 3º/5ª ordem. Testes estão sendo realizados por FURNAS e ONS para que se estabeleça a melhor configuração de operação

destes filtros. Os alarmes de sobrecarga cessaram desde a entrada destes novos filtros. No entanto, ainda estamos longe de uma solução perene, robusta e abrangente.

Percebe-se claramente que a SE Ibiúna sofreu, ao longo dos últimos vinte anos, mudanças significativas em seu *modus operandi*, mudanças estas advindas de necessidades e de deficiências no SIN. No entanto, estas necessidades e deficiências não devem interferir na confiabilidade operativa da SE Ibiúna e, conseqüentemente, do Elo CC. A perda de confiabilidade na operação desta SE pode causar sérios problemas ao SIN.

3.0 - O AUMENTO DA PRODUÇÃO DO HARMÔNICO DE 5ª ORDEM NO SIN

A importância dos bancos de filtros e dos bancos de capacitores na SE Ibiúna se dá pelo significativo suporte de potência reativa, da ordem de 3.000 Mvar, além da filtragem das correntes harmônicas características e não características geradas nesta conversão.

As principais razões para o emprego de filtragem harmônica de 3ª/5ª ordem são [5]:

- auxiliar a atender aos requisitos de desempenho de distorção harmônica e interferência telefônica para as pequenas correntes não-características de 3º e 5º harmônicos geradas pelos conversores CCAT;
- participar no balanço de potência reativa (296 Mvar e 280 Mvar por banco de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem, respectivamente, para os bancos de filtros originais);
- reduzir picos de sobretensões harmônicas durante eliminação de faltas trifásicas no inversor, que foram observados em estudos do projeto.

Pelo projeto original do Elo CC a máxima distorção harmônica de tensão no barramento em 345 kV na SE Ibiúna deve ser menor que 1% para cada harmônico individual e menor que 4% para a distorção harmônica total (DHT). Com a presença de um filtro de 3º/5º harmônico garante-se uma distorção menor que 1% no barramento em 345 kV do harmônico de 5ª ordem gerado pelas pontes conversoras da SE Ibiúna.

Conforme o Submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede do ONS, os valores limites dos índices permitidos para a Rede Básica atualmente são superiores aos que foram utilizados no projeto:

- DHT < 3%
- Distorção individual de tensão harmônica para as ordens 3, 5 e 7 < 2%
- Desbalanço de tensão < 2%

Medições realizadas por FURNAS na SE Ibiúna indicam o aumento do fluxo de correntes harmônicas de 5ª ordem nesta SE desde 1992. Entretanto, verificações quanto à assimetria de disparo das válvulas e testes de sintonia dos filtros indicam que todos os equipamentos estão operando dentro das condições esperadas e que o conteúdo harmônico gerado pelas pontes conversoras permanece inalterado desde o início da operação comercial do segundo bipolo do Elo CC. Além disso, existem registros de sobrecarga harmônica, com conseqüente desligamento destes filtros, mesmo com o Sistema de Corrente Contínua fora de operação. Estes fatos indicam que o acréscimo na geração do harmônico de 5ª ordem não é oriundo da estação conversora.

Deste modo, o aumento das correntes harmônicas de 5ª ordem que vem ocorrendo de forma sistemática nos últimos anos só pode ser devido a alterações no SIN e o fato de haver filtragem de grande potência destes harmônicos na SE Ibiúna faz com que estes filtros se tornem um caminho natural de baixa impedância para estas correntes harmônicas.

Ao longo da operação do Elo CC, ocorreram 7 queimas de reatores de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem trazendo prejuízos a FURNAS e ao sistema elétrico como um todo, no sentido de ter sua confiabilidade reduzida. Isso fez com que FURNAS mobilizando-se na busca de uma solução que evitasse tais queimas, instalando um sistema de monitoração que alarma ao operador a tendência de sobrecarga harmônica destes filtros.

Este sistema foi instalado há alguns anos e, desde então, foi verificado um grande número de alarmes de sobrecarga harmônica nos filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna, mesmo com ambos os filtros conectados ao sistema. Ilustrando esse fato, a figura 1 abaixo apresenta um levantamento realizado pelo Centro de Operação do Sistema de FURNAS das citadas ocorrências de alarme para os anos entre 2002 e 2006, no qual se pode constatar que a solicitação do sistema imposta aos filtros vinha sendo cada vez mais freqüente e intensa.

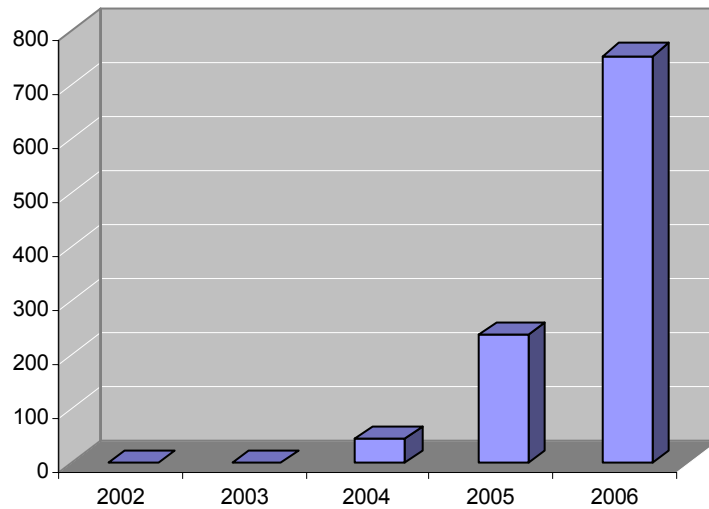


Figura 1 – Total de Ocorrências de Sobrecarga Harmônica Anuais nos Filtros harmônicos de 3^a/5^a ordem na SE Ibiúna

Ainda mais agravante, ao contrário do que se verificava em meados da década de 90, quando os alarmes de sobrecarga só ocorriam em condições de carga leve (fins-de-semana e feriados), os mesmos passaram a ocorrer durante quaisquer períodos de operação do Elo CC, mesmo com potências acima de 4.500 MW ou, no outro extremo, com potência nula [6].

Em novembro de 2006, quando foram instalados dois novos bancos de filtros harmônicos de 3^a/5^a ordem, verificou-se que, conforme esperado, a distorção harmônica presente na tensão da barra de 345 kV foi efetivamente reduzida, conforme a figura 2 abaixo ilustra. Entretanto, um efeito adverso também esperado deve-se ao fato de que filtros adicionais reduzem a impedância harmônica da subestação, fazendo com que uma quantidade maior de harmônicos dirija-se aos filtros. Esse fato também fica evidente na figura 2 abaixo, observando-se que a corrente total sendo absorvida pelo conjunto de filtros de 3^a/5^a ordens aumenta conforme o número de bancos energizados aumenta.

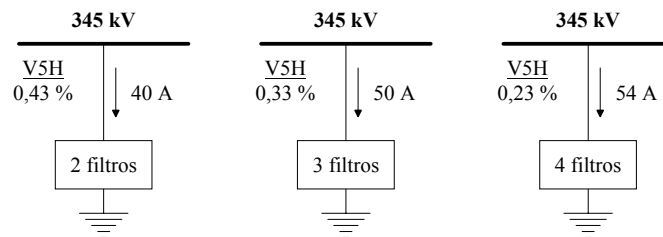


Figura 2 – Efeito da Presença de Bancos Adicionais de Filtragem

Com isto, a instalação de novos filtros harmônicos na SE Ibiúna se configura como uma solução de curto prazo e médio prazos, pois a tendência, no longo prazo, é de aumento do fluxo de correntes harmônicas de 5^a ordem para esta SE. A solução final para a questão deverá passar pela identificação das fontes de injeção harmônica no sistema e apontando quais medidas devem ser tomadas para cada fonte encontrada e quais órgãos federais e/ou não governamentais devem ser acionados de forma a aplicar as modificações necessárias do ponto de vista legal ou normativo de forma a minimizar a produção de correntes harmônicas de 5^a ordem no SIN.

3.1 Medição de Qualidade de Energia na SE Ibiúna [6]

Ao longo dos últimos anos foi efetuado pela Divisão de Análise do Sistema em FURNAS um acompanhamento contínuo do desempenho harmônico da tensão na SE Ibiúna. Este acompanhamento permitiu identificar alguns parâmetros que têm decisiva influência na manifestação do fenômeno e chegar a conclusões importantes que auxiliam no seu esclarecimento. A abertura de uma LT Ibiúna – Interlagos 345kV, medida operativa empregada nos últimos anos para diminuir a sobrecarga harmônica dos filtros, provoca uma diminuição sensível do índice de 5^o harmônico [3]. Neste período de análise foram identificadas diversas ocorrências, algumas com desligamento de filtros, em que o Sistema de Corrente Contínua se encontrava em condições operativas variadas.

Em uma destas ocorrências o índice de 5^o harmônico atinge um máximo de 1,56% enquanto que a DHT alcança 2,44%. No período em que o Elo CC permaneceu desligado o índice de 5^o harmônico se manteve acima de 1,1%.

Apesar de estar dentro dos limites dos Procedimentos de Rede, este último valor excede a especificação de projeto.

Em outra ocorrência o perfil da DHT acompanha a variação da Distorção Individual de 5ª ordem. Isto deixa clara a preponderância deste harmônico, ainda mais ao se comparar os valores dos índices registrados em que o 5º harmônico é da ordem de 70% da distorção total. Deve-se ressaltar que os índices de distorção harmônica apresentam valores reduzidos graças à presença dos filtros de Ibiúna. Pouco antes do horário de ponta ocorre uma redução sensível no 5º harmônico, que aumenta lentamente até por volta das 23 horas. Este comportamento se repete em qualquer dia da semana. O 3º harmônico tem um comportamento estável, com valor inferior a 0,3% da tensão nominal. Os filtros que estão apresentando sobrecarga também são sintonizados para esta frequência, mas o índice encontrado não causa preocupação até o momento.

4.0 - AS ESTRATÉGIAS ADOTADAS PARA ELIMINAÇÃO DA SOBRECARGA HARMÔNICA

4.1 Medidas Operativas

O ONS adota diversas medidas no SIN para eliminar ou minimizar a sobrecarga harmônica nos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna. Dentre estas medidas inclui-se a diminuição da tensão no barramento de 345 kV através dos LTC dos autotransformadores 500/345 kV e, dependendo do sentido do fluxo de potência da LT Ibiúna-Bateias, adotam-se as seguintes medidas:

a) Fluxo nas LT 500 kV Ibiúna/ Bateias no sentido de Ibiúna para Bateias:

Abertura de um dos circuitos da LT 345 kV Ibiúna-Interlagos; Redução da potência transmitida pelo Elo de CC;
- Abertura de um dos circuitos da LT 525 kV Ibiúna / Bateias; Redução da Potência Transmitida pelo Elo C.C.

b) Fluxo nas LT 500 kV Ibiúna/ Bateias no sentido de Bateias para Ibiúna:

Abertura de um dos circuitos da LT 345 kV Ibiúna-Interlagos; Abertura de um circuito da LT 345 kV Ibiúna-Tijuco Preto; Redução da Potência Transmitida pelo Elo C.C.

Medidas não programadas são também adotadas na operação em tempo real pelo ONS quando as providências previstas não resolvem a questão de forma satisfatória, sempre acompanhadas pelo Centro de Operação de FURNAS.

4.2 Instalação de Novos Bancos de Filtros Harmônicos de 3ª/5ª Ordem na SE Ibiúna

FURNAS instalou em novembro de 2006 mais dois bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna por decisão conjunta com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ONS.

Esta instalação eliminou temporariamente as ocorrências diárias de alarmes de sobrecarga nos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem, embora já tenha havido, em meados do mês de fevereiro de 2007, uma ocorrência de alarme de sobrecarga em um dos três bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem presentes na SE Ibiúna.

5.0 - ESTRATÉGIAS A SEREM ADOTADAS PARA A MINIMIZAÇÃO DA INJEÇÃO DO HARMÔNICO DE 5ª ORDEM NO SIN

5.1 A Produção do Harmônico de 5ª Ordem em Lâmpadas e em Aparelhos Eletrônicos

Desde 2001, quando o racionamento de energia elétrica foi adotado pelo Governo federal devido aos dois períodos consecutivos de seca e devido a 10 anos de falta de planejamento de expansão elétrica e energética no Brasil, as empresas, as indústrias, o comércio e as residências passaram a adotar em massa o uso de lâmpadas fluorescentes, a chamada luz fria, devido ao seu baixo consumo de energia elétrica.

Mesmo após o período de racionamento, todas as classes consumidoras continuaram a fazer uso das lâmpadas fluorescentes e a usar a energia elétrica de forma racional. Desta forma, o mercado no Brasil obteve um decréscimo de consumo de tal forma que somente em 2008 deveremos alcançar os patamares que estávamos em 2001.

Em razão de sua elevada eficiência e da flexibilidade de recursos oferecidos, a utilização de reatores eletrônicos, lâmpadas fluorescentes tubulares longas e lâmpadas fluorescentes de base única (lâmpadas fluorescentes compactas) está se tornando cada vez mais difundida. Sistemas de iluminação utilizando esses equipamentos podem proporcionar uma substancial redução na potência absorvida da rede e conseqüente grande economia de energia. Todavia, lâmpadas de descarga apresentam uma característica tensão x corrente fortemente não linear, o que favorece a presença de harmônicos na rede. Tradicionalmente, as lâmpadas a descarga são empregadas em conjunto com reatores que, através da absorção de potência reativa e injeção de harmônicos na rede, podem

apresentar um baixo fator de potência.

Além dos novos sistemas de iluminação, a expansão do uso de elementos semicondutores está também atingindo pesadamente o consumidor residencial, pois essa tecnologia é hoje largamente empregada em equipamentos que utilizam fontes chaveadas, tais como fornos de microondas, liqüidificadores, furadeiras elétricas, computadores, impressoras, televisores, *dimmers* e outros. O emprego desse tipo de cargas vem resultando em um aumento significativo da produção do harmônico de 5ª ordem no SIN.

5.2 A Produção do Harmônico de 5ª Ordem em Sistemas Industriais e Comerciais [7]

Cargas do tipo fornos a arco, motores, sistemas de laminação, guinchos e outras mais, presentes em um grande número de sistemas industriais, são reconhecidamente geradores de harmônicos, e um esforço razoável de análise dos problemas a eles associados vem se desenvolvendo ao longo dos anos.

Recentemente, entretanto, várias novas tecnologias vêm contribuindo para o aumento do nível de harmônicos nos sistemas de potência. Conversores tiristorizados, inversores e retificadores estão hoje sendo utilizados em quase todos os processos industriais e em equipamentos conectados a sistemas comerciais.

Um complicador adicional ao problema deve-se ao fato de que uma das características dos sistemas e equipamentos com base em circuitos eletrônicos ou em componentes semicondutores é seu fator de potência inerentemente baixo, exigindo que o sistema receba algum tipo de compensação de reativo, usualmente na forma de capacitores ligados em derivação. O risco advém do fato de que o uso acentuado de capacitores para a correção de fator de potência e regulação de tensão aumenta as possibilidades de ocorrência de condições de ressonância no sistema, podendo amplificar os efeitos da presença harmônica no sistema elétrico.

5.3 A Padronização da Produção de Equipamentos que Geram o Harmônico de 5ª Ordem

A produção de harmônicos de 5ª ordem, sendo em grande parte decorrente de processos eletrônicos inerentes aos equipamentos presentes não só em indústrias como também em residências e em atividades comerciais, como por exemplo, computadores e televisores, fazem parte cada vez mais da própria atividade sócio-econômica do país. Isto explica inclusive o crescimento substancial desses harmônicos nos últimos anos e faz com que seja previsto um aumento proporcional ao desenvolvimento econômico da sociedade. Este quadro mostra-se preocupante, na medida em que se vislumbra que haverá uma necessidade cada vez maior de filtragem desses harmônicos. Na situação atual, essa filtragem, em sua maior parte, encontra-se a cargo do segmento de transmissão de energia elétrica, tal como aconteceu com a expansão da SE Ibiúna. O que se vê, no entanto, é que dificuldades cada vez maiores se apresentam como a necessidade de espaços maiores e atendimento a restrições ambientais, o que acarretará um aumento do custo da energia elétrica, e que atingirá a todos os consumidores, seja qual for a participação desse consumidor na produção dos harmônicos.

A perspectiva mostrada acima levou ao entendimento que medidas locais, de menor porte, porém eficientes, seriam uma solução mais adequada para um problema de alcance crescente como este, na realidade encontrada no país: uma estratégia que poderia minimizar a médio e longo prazos este problema é a introdução de circuitos de filtragem nos equipamentos que produzem os harmônicos, sejam eles grandes equipamentos de uso industrial ou mesmo monitores de vídeo. Essa medida, sob o ponto de vista elétrico, faria com que os harmônicos não fossem injetados na rede elétrica, evitando-se a necessidade de aumento de filtragem de grande porte ao longo do SIN. Sob o ponto de vista econômico, o custo de implantação desses circuitos seria absorvido pelo próprio processo de produção do equipamento, não encarecendo o custo da energia e sendo socialmente mais justo, na medida em que o próprio responsável pela produção do problema o eliminaria.

Essa estratégia, para ser bem sucedida, necessitaria de ações que padronizassem a produção de equipamentos que não injetassem harmônicos na rede, algo como uma certificação obrigatória para a comercialização do equipamento no país. Ações como estas envolvem diversos aspectos, o que levaria à necessidade de uma análise aprofundada do problema, certamente sob o comando de órgãos governamentais, tais como Ministério das Minas e Energia, ANEEL, etc.

6.0 - CONCLUSÕES

O problema de sobrecarga harmônica na SE Ibiúna remonta o início da década de 90, quando FURNAS passou a operar com os dois filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem para não haver sobrecarga.

O levantamento e o equacionamento do problema do harmônico de 5ª ordem no subsistema Sudeste do SIN se tornou uma matéria relevante e urgente devido aos problemas diários de alarmes das proteções dos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna desde outubro de 2004 até novembro de 2006, quando era necessário nessas ocasiões tomar alguma medida operativa no SIN para eliminar a sobrecarga antes que a proteção destes filtros os retirasse de operação, o que implicaria em um grande impacto para o SIN devido às restrições operativas que teriam de ser impostas ao Elo CC.

O Elo CC mantém a mesma capacidade de transmissão de potência desde o início de sua operação comercial. Isto significa que a necessidade de filtragem na SE Foz do Iguaçu e na SE Ibiúna, por conta da transmissão CC, permanece inalterada desde 1985.

Novos sistemas de iluminação e a expansão do uso de elementos semicondutores em âmbito industrial, comercial e residencial vêm resultando em aumentos significativos da produção de harmônicos de 5ª ordem no SIN.

Com a entrada em operação de dois novos bancos de filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem na SE Ibiúna em novembro de 2006, o problema da sobrecarga harmônica no sistema de filtragem da SE Ibiúna foi abrandado no curto prazo e médio prazos, mas não resolvido para longo prazo, no sentido em que a evolução das cargas do sistema elétrico provavelmente acabará por levar à necessidade de instalação de novos bancos de filtros.

Uma solução perene e robusta deve levar em consideração o recente crescimento da geração do harmônico de 5ª ordem no SIN para que se possa estabelecer as medidas preventivas (por exemplo, a necessidade de legislação específica para combater a geração destas correntes harmônicas na própria fonte) e corretivas (tais como a instalação de novos bancos de filtros em diversos pontos do SIN) para o problema.

Os dois novos filtros harmônicos de 3ª/5ª ordem instalados em novembro de 2006 reduzem a impedância harmônica da subestação, fazendo com que uma quantidade maior de harmônicos dirija-se aos filtros de 3ª/5ª ordem. A corrente total absorvida pelo conjunto de filtros de 3ª/5ª ordens aumenta conforme o número de bancos energizados aumenta.

Portanto, a solução final para a questão deverá passar pela identificação das fontes de injeção harmônica no sistema, ações de natureza regulatória e ações de natureza normativa. Deve-se incluir também a obrigatoriedade de introdução de circuitos de filtragem nos equipamentos que produzem os harmônicos, que é socialmente mais justo na medida em que o próprio responsável pela produção do problema o eliminaria, e uma certificação obrigatória para a comercialização do equipamento no país, providências estas a serem tomadas pelo Ministério das Minas e Energia e pela ANEEL.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Madzarevic, V. et al, "General Description and Principal Characteristics of the Itaipu HVDC Transmission System", International Symposium on HVDC Technology, 1983
- [2] Guarini, A. P. et al, "Cálculo de corrente e tensões harmônicas em conversores em corrente contínua", V SNPTEE, Recife, 1979
- [3] Relatório SCEL-002/92, GCOI, "Sobrecarga harmônica na SE Ibiúna – Diagnóstico e expectativa de solução"
- [4] Martins, A.C.B. et al, "Avaliação de Soluções para o Fenômeno da Instabilidade de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste Brasileiro", VI SEPOPE, Salvador, 1998
- [5] Medeiros, J. R. et al, "Sistema de transmissão de Itaipu CA/CC – Determinação dos requisitos dos filtros nas estações terminais CA", VI SNPTEE, Camboriú, 1981
- [6] Farias, A.L., et al, *Sobrecarga Harmônica em Filtros AC do Sistema de Corrente Contínua de FURNAS*, X ERLAC, Paraguaí, 2003
- [7] Arentz, D.S., et al, "Influência de Pequenas Cargas Geradoras de Harmônicos Presentes no Sistema de Distribuição sobre a Rede de Transmissão", X ERLAC, Paraguaí, 2003

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Carlos Barbosa Martins

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 26 de maio de 1955.

Graduação (1979) em Engenharia Elétrica: PUC - Rio de Janeiro

Mestrado (1983) em Engenharia Elétrica: COPPE - Rio de Janeiro

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 1979.

Experiência profissional inclui o planejamento da operação e a operação de Sistemas Elétricos de Potência. Áreas de interesse incluem estabilidade dinâmica eletromecânica e estabilidade de tensão.

Engenheiro da Divisão de Estudos Especiais da Operação do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Senior member do IEEE e membro regular do CIGRÉ, atuando no CE-C2.

Cesar Ribeiro Zani

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 14 de agosto de 1955.

Graduação (1977) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Pós-Graduação (1990) em Sistemas Elétricos de Potência: UNIFEI

Pós-Graduação (2000) em Gerência de Energia: Fundação Getúlio Vargas

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 1978.

Superintendente de Operação, Secretário do CE-C2 do CIGRÉ.

Luiz Edmundo dos Santos Ferreira

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 14 de outubro de 1956.

Graduação (1979) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 1980.

Chefe da Divisão de Estudos Especiais da Operação do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Guilherme Sarcinelli Luz

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 12 de novembro de 1957.

Graduação (1981) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Empresa: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1993.

Engenheiro da Divisão de Estudos Especiais da Operação do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Davi Sixel Arentz

Nascido em Petrópolis, RJ, em 21 de maio 1973.

Graduação (1997) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal Fluminense

Mestrado (2001) em Computação Aplicada a Sistemas de Potência: Universidade Federal Fluminense

Empresas: CEPEL (1998 a 2001); FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 2001.

Engenheiro da Divisão de Análise do Sistema do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação

Roberto Luiz Farizele Pinto

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 13 de março de 1979.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Mestrado (2006) em Engenharia Elétrica: COPPE – Rio de Janeiro

Cursando Pós-Graduação (2008) em Proteção de Sistemas de Potência: COPPE – Rio de Janeiro

Empresas: CEPEL, de 2002 a 2005; FURNAS Centrais Elétricas S.A., desde 2005.

Engenheiro da Divisão de Análise da Proteção do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação