

Alimentação de cargas não lineares por transformadores

Por Eng Jose Starosta; MSc – diretor da Ação Engenharia e Instalações e presidente da ABESCO

Em boa parte dos projetos de instalações industriais e prédios comerciais de médio e grande porte, a especificação de transformadores aplicados como fontes destas instalações seguem alguns critérios clássicos como a demanda a ser suprida em algum horizonte de tempo definido e muitas vezes durante a etapa da especificação, as cargas (e suas características) a serem supridas não são totalmente conhecidas, mas apenas estimadas.

Outra condição clássica são as situações onde vários transformadores dividem as cargas de uma mesma instalação/consumidor. Outra situação que vem se tornando comum é a aplicação de transformadores como elementos de blindagem eletrostática e no bloqueio (ou filtro) de harmônicas de sequência zero, em mesmo nível de tensão de entrada e saída.

A presença de cargas não lineares (que possuem correntes harmônicas) nas instalações elétricas pode causar uma série de fenômenos bem conhecidos como sobrecarga nos condutores, especialmente nos condutores neutros, aquecimento e vibração em motores de indução, queima de capacitores por ressonância, aumento da distorção de tensão, aumento das perdas em transformadores devido principalmente ao aumento das perdas de Foucault, entre outros. O incremento destas perdas na presença destas correntes harmônicas é quantificado por expressão que considera a elevação das perdas na proporção do quadrado das correntes harmônicas pelo quadrado da própria ordem harmônica ($\sum I_h^2 \cdot h^2$). A expressão geral considera as perdas totais como:

$$P_t = P_f \cdot \sum I_h^2 \cdot h^2$$

Onde:

- P_t são as perdas totais de Foucault incrementadas devido as correntes harmônicas
- P_f são as perdas de Foucault na frequência fundamental
- I_h são as correntes harmônicas
- h são as ordens harmônicas relativas às correntes presentes

Como as correntes harmônicas possuem frequências características superiores à frequência fundamental (no Brasil 60 Hz), pode-se prever o aumento das perdas em função da presença e circulação destas correntes em transformadores. Esta evolução das perdas é um dos pontos que pode comprometer a operação confiável dos transformadores, construídos em princípio para operação com cargas lineares, portanto isentas de deformação de suas formas de onda de corrente.

Aspectos térmicos:

O documento 144 da CDA (*cooper development association*) apresenta dois modelos bastante aplicáveis quando se constata ou quando se prevê a circulação de correntes harmônicas em transformadores. O primeiro destes, definido pela norma "BS 7821 Part 4" está associado a uma situação de transformador existente e operando, quando as cargas não lineares são instaladas, e o segundo a uma situação que ocorrerá, isto é, o Trafo ainda será instalado. Este segundo modelo é apresentado por norma do UL. Vale lembrar que as avaliações devem sempre considerar além dos aspectos quantitativos, os aspectos qualitativos e operacionais evitando paranoias que induzem a investimentos desnecessários.

Os dois modelos utilizaram pelos seus proponentes um fator chamado de "k" (e não devem ser confundidos), deve-se tomar cuidado para se entender se a questão está em um ou outro caso, ou seja: deseja-se especificar um transformador novo ou definir até que carga um transformador existente poderá suportar na presença das correntes harmônicas.

1-Situação existente, transformador instalado (BS 7821 Part 4).

O primeiro modelo proposto considera a aplicação de um transformador instalado, e que passa a alimentar cargas não lineares com um determinado espectro de correntes harmônicas. Como as correntes harmônicas nas instalações variam conforme a variação da curva de carga, a definição do espectro harmônico a ser considerado nesta avaliação deve levar em conta aspectos típicos do comportamento da carga, desprezando-se valores de picos relacionados a transientes ou outros fenômenos de curta duração. Lembrar que está se buscando o incremento de perdas, portanto fenômeno térmico, relacionado à operação média das cargas.

Nesta situação é proposto um modelo de “desclassificação” em uma tradução direta do termo aplicado em inglês (“*de-rating*”). Tal modelo busca o cálculo de um coeficiente maior que 1, que será aplicado no denominador da potencia nominal do Trafo afim de se calcular e definir qual seria a “nova potencia nominal” na presença destas correntes harmônicas.

A expressão 1, apresentada pela norma BS 7821 parte 4, abaixo reproduzida, considera o calculo deste coeficiente ou fator de desclassificação.

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} \left(n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0.5}$$

Expressão 1: Cálculo do coeficiente de desclassificação apresentado pela BS 7821 – parte 4.

Onde:

K é o coeficiente de desclassificação pelo qual a potência do transformador será dividida, para a definição da nova capacidade do Trafo.

“e” é um coeficiente de perdas, definido como a relação entre as perdas Foucault na frequência fundamental e perdas relativas à corrente continua equivalente a corrente em valores eficazes senoidais em uma temperatura de referencia. Este coeficiente pode ser assumido como 0,1, conforme o documento.

“q” é uma constante exponencial que depende do tipo de enrolamentos e frequência. Em geral para transformadores com enrolamentos que possuem secção retangular ou circular em ambos os enrolamentos o coeficiente assume o valor de 1,7. Para transformadores cujo enrolamento de baixa tensão é construído com o uso de laminas em baixa tensão, este valor é recomendado como 1,5.

“I₁” é a corrente fundamental

“I” é a corrente eficaz (rms)

"n" é a ordem harmônica (h)

"I_n" é a corrente harmônica na ordem "n" (ou I_h)

Partindo-se então para um exemplo de aplicação, considerando uma carga alimentada por um transformador de 1000 kVA, 440V, 60Hz com as harmônicas com comportamento ilustrado em (máximos e mínimos) na figura 1; observa-se:

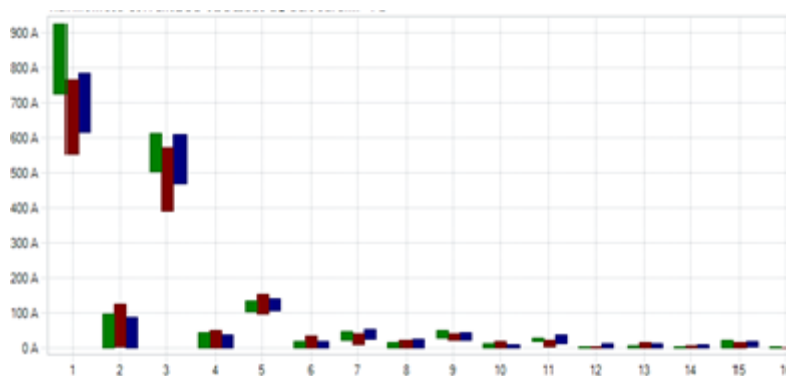


Figura 1 – espectro de correntes de transformador – 1000 kVA

As tabelas 1 e 2 expressam o roteiro de cálculo do coeficiente de desclassificação apresentado na expressão 1.

n(ordem H)	I _h	(I _h /I ₁)	(I _h /I ₁) ²	n ^q	n ^q *(I _h /I ₁) ²
1	850	1	1		0
3	600	0,705882	0,49827	6,47301	3,22530
5	120	0,141176	0,01993	15,42585	0,30745
7	50	0,058824	0,00346	27,33170	0,09457
9	50	0,058824	0,00346	41,89983	0,14498
11	20	0,023529	0,00055	58,93422	0,03263
Σ					3,80494

Tabela 1 – cálculo da expressão "Σ" da figura 1

Potencia trafo-kVA	1000
Tensão V	440
I_{rms} Regime (A)	1050
I_1/I_{rms}	0,8096
$(I_1/I_{rms})^2$	0,6554
Σ	3,8049
$e/(1+e)$	0,0909
K	1,1076
desclassif % (para)	90,29
Potencia descl-kVA	903
Carga-kVA	799
I nominal trafo (A)	1314
I descl (A)	1186
carregamento descl %	89
carregamento nominal%	80

Tabela 2

Avaliação do coeficiente de desclassificação conforme expressão 1

Portanto um Trafo com potencia nominal de 1000 kVA perde sua capacidade em valores da ordem de 10% (903 kVA) caso a carga alimentada possua um conteúdo de correntes harmônicas semelhantes às apresentadas na figura 1.

-outro método para a mesma abordagem

Uma metodologia simplificada para desclassificação de transformadores considera o fator de desclassificação (K) como a relação direta do fator de crista (relação da corrente de pico pela corrente eficaz) por 1,4 (raiz quadrada de 2), que seria o fator de crista da corrente em caso de não existência de correntes harmônicas.

$$K = FC / \sqrt{2}$$

Isto é, se a carga for linear o fator de crista seria naturalmente 1,4, não havendo o que desclassificar, $K=1$. No caso de uma carga apresentar fator de crista, por exemplo, da ordem de 1,9; o valor de K seria então 1,36 ($1,9/1,4$) e este seria o coeficiente a ser aplicado. Ou seja o Trafo poderia ser carregado até aproximadamente 75% ($100\%/1,36$) de sua capacidade. Porém, dada a imprecisão deste método, recomenda-se utiliza-lo para avaliação inicial na falta de outras informações disponíveis.

2-Situação nova – Transformador a ser especificado (UL).

Para o caso em que se deseja especificar um transformador adequado às cargas não lineares que nele serão instalados, o critério desenvolvido pela norma publicada pela UL considera o (também denominado) fator K reproduzido na expressão 2, que exprime a relação das perdas totais pelo perda de Foucault.

$$K = \frac{P_t}{P_f} = \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 h^2$$

Expressão 2 – cálculo do fator K de acordo com a UL

Onde:

I_h são as correntes harmônicas expressas em pu
h são as ordens harmônicas

Tomando-se a mesma carga utilizada no item anterior, a tabela 3 apresenta o método de avaliação do fator K de acordo com a UL e expressão 2.

Harmonica h	I(A)	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$	I_h/I	$(I_h/I)^2$	$(I_h/I)^2 * h^2$
1	850	1	1	0,8096	0,6554	0,6554
3	600	0,7059	0,4983	0,5715	0,3266	2,9393
5	120	0,1412	0,0199	0,1143	0,0131	0,3266
7	50	0,0588	0,0035	0,0476	0,0023	0,1111
9	50	0,0588	0,0035	0,0476	0,0023	0,1837
11	20	0,0235	0,0006	0,0190	0,0004	0,0439
	1050					Σ 4,2601

Tabela 3: Avaliação do fator K de acordo com a UL.

O "fator k", ou "k factor" passou a ser uma informação adicional na especificação dos transformadores que serão aplicados na alimentação de cargas distorcidas. Portanto, neste caso os transformadores são construídos para suportar as cargas não

lineares, bastando que se informe ao fabricante como é o “modelo” desta carga. O fator “k” expressa o conteúdo de harmônicas no Trafo. Neste caso o “fator k” calculado, 4,26 (próximo a 5), deverá ser informado ao fabricante na especificação do equipamento. Os valores normalmente fabricados comercialmente são Transformadores com fatores K5, K20 ou K30. Também as medições elétricas efetuadas com instrumentos com funções de qualidade de energia, este fator k é medido e disponibilizado juntamente com as correntes harmônicas.

Portanto, o transformador especificado com o fator k adequado poderá ser utilizado em sua potencia nominal, caso a carga se mantenha com o mesmo comportamento utilizado para a definição do fator k. Uma aplicação bastante comum do uso destes transformadores de fator k proposto pela UL é encontrada nos data centers ou centro de dados, onde transformadores com enrolamentos delta no primário e estrela no secundário, pela sua própria construção, elimina a circulação das harmônicas de sequencia zero a montante do transformador, evitando os efeitos das correntes harmônicas nesta parte da instalação, reduzindo também a tensão entre terra e neutro. Complementarmente estes transformadores podem ser construídos com blindagem eletrostática.

Uso de filtros

Filtros de harmônicas nas instalações elétricas são equipamentos que podem ser aplicados quando as correntes harmônicas devido às cargas não lineares devem ser eliminadas ou reduzidas por qualquer outra razão (redução de perdas, redução da distorção de tensão, cintilação, ressonância harmônica, etc).

A circulação de correntes harmônicas nos circuitos e nas fontes (transformadores, geradores, UPS, etc) causam o surgimento das tensões harmônicas, proporcionais às próprias correntes harmônicas e as impedâncias destes circuitos e fontes. As limitações de operação impostas pelas normas que versam sobre este assunto tratam de

estabelecer limites de distorções de tensão em função do ponto da instalação e níveis de tensão. Normalmente estas normas são referenciadas no ponto de acoplamento comum (PAC) entre a concessionária e o consumidor e podem variar desde 5% a 10% dependendo da norma e nível de tensão. Maiores informações sobre estes limites, vide o documento "ANEEL – Prodist modulo 8", IEE519, ou IEC61000-2-2 (baixa tensão), que são as normas que estabelecem estes limites.

Uma das formas de reduzir a circulação destas correntes harmônicas é filtrá-las evitando assim que as tensões dos barramentos sejam distorcidas quando da alimentação das cargas não lineares (conforme detalhado na sequência deste texto, a circulação de correntes harmônicas pelas fontes é a principal causa do surgimento das tensões harmônicas).

Naturalmente outras possibilidades de redução das distorções de tensão são:

- distribuição de cargas em outras fontes: Nesta situação, cargas não lineares são relocadas na instalação de modo a reduzir os valores de distorção de tensão nos barramentos onde as mesmas são conectadas.

- Aumento da potência das fontes: O aumento da potência das fontes, reduz a impedância de curto circuito a montante da carga, reduzindo as distorções de tensão nos barramentos.

- Uso adequado de transformadores defasadores.

- Especificação de cargas com controle de emissão ou escolha de cargas com melhores características.

Portanto, a simples existência de correntes harmônicas, por "*maiores*" que sejam; sem uma correspondência em incremento nas tensões harmônicas nos barramentos que as alimentam não é normalmente razão para intervenção. A discussão sobre o quanto uma carga é distorcida deve considerar não somente a distorção total de corrente (THDI), ou as correntes harmônicas relacionadas a corrente da componente fundamental, mas também estas correntes harmônicas relacionadas a capacidade de corrente da fonte (transformador, por exemplo).

A instalação de filtros de correntes harmônicas, ou simplesmente filtros de harmônicas, surge como outra possibilidade para adequação dos valores registrados de distorção de tensão, por conta do controle das correntes harmônicas. De uma forma geral os filtros evitam que as harmônicas circulem pelas fontes, reduzindo, portanto as tensões harmônicas a montante e por consequência reduzindo também as distorções de tensão nos barramentos de baixa tensão. Os filtros mais comumente aplicáveis são os filtros passivos e ultimamente os filtros ativos vem tomando espaço. Ambas aplicações estão descritas na sequência.

a) Filtros passivos

Os filtros passivos são normalmente compostos por conjuntos de indutores e capacitores sintonizados em uma frequência de ressonância característica. Podem também serem construídos em conjuntos de forma a serem sintonizados em várias frequências desejáveis simultaneamente. A função dos filtros passivos é de absorver as correntes harmônicas da carga, impedindo que as mesmas circulem pela rede. Devido à sua própria construção, também injetam energia reativa na rede, enquanto as harmônicas são absorvidas (em geral a absorção das harmônicas não é total, mas normalmente uma parcela daquelas geradas pela carga). Caso a carga seja variável, a construção destes filtros deve prever o arranjo em grupos de filtros de forma a adequar a operação dos mesmos à variação da carga, evitando sobre compensação de energia reativa.

A figura 2 apresenta o registro da distorção harmônica de tensão em um barramento onde um filtro passivo com manobra estática, com tempo de resposta de 16 ms e composto por 6 grupos de 100 kvar foi instalado. Neste caso todos os grupos estão sintonizados em frequência próxima à 5ª harmônica. A figura 3 apresenta o comportamento da corrente de 5ª harmônica na rede antes e depois da inserção do filtro passivo. Há uma relação de compromisso muito importante na construção deste filtro, visto que alguns módulos operam em paralelo e buscam a injeção de energia reativa em intervalos muito curtos, filtrando a 5ª harmônica simultaneamente. A distorção de tensão é reduzida de valores médios de 8% para 5%.

FIGURA 2 – COMPORTAMENTO DA DISTORÇÃO TOTAL DE TENSÃO
Fonte: Ação Engenharia e Instalações

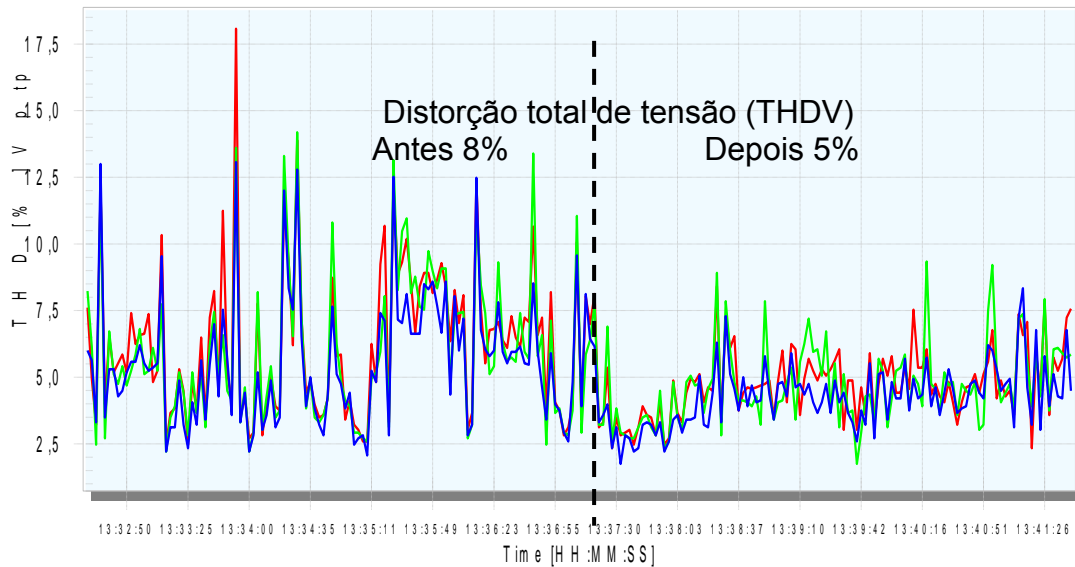
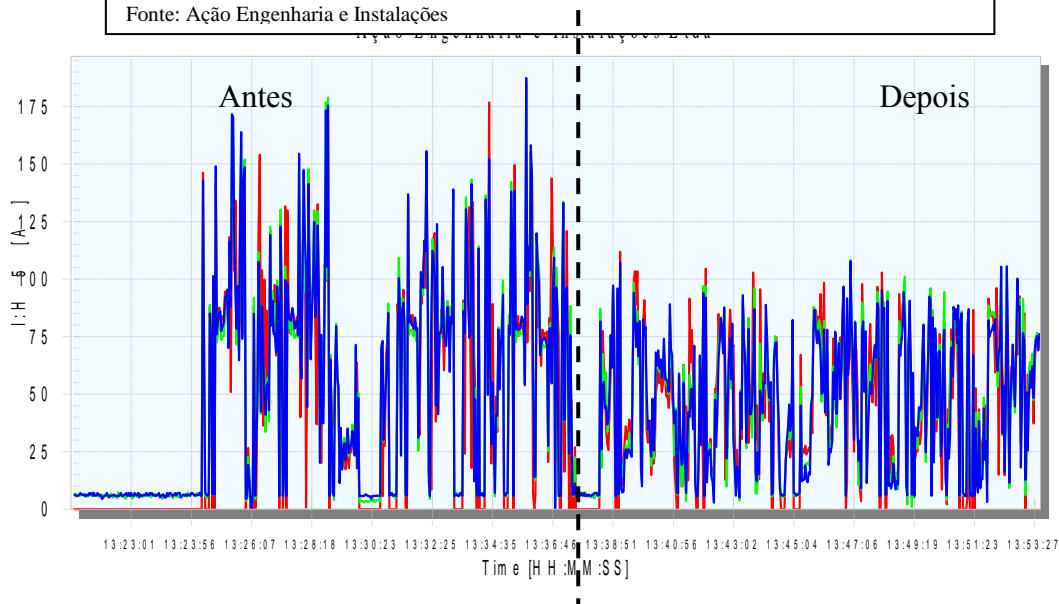


FIGURA3 – ATENUAÇÃO DA CORRENTE DE 5ª HARMÔNICA COM O USO DE FILTRO PASSIVO COM MANOBRA ESTÁTICA
Fonte: Ação Engenharia e Instalações



A figura 4 apresenta este filtro com 6 estágios de 100 kvar e manobra estática em ensaio na fábrica. Em função da demanda da carga, os grupos são manobrados em ciclos de 16 milisegundos, compensando a energia reativa compensada e filtrando as harmônicas das cargas.



FIGURA 4 – FILTRO PASSIVO COM MANOBRA ESTÁTICA DE 6 ESTÁGIOS

Fonte: Elspec

b) Filtros Ativos

Os filtros ativos, apesar de terem a mesma função dos passivos são concebidos por equipamentos eletrônicos que injetam correntes harmônicas defasadas adequadamente daquelas geradas pelas cargas, de modo que ao se somarem se cancelem. Enquanto os filtros passivos são normalmente dependentes e especificados pelos valores dos indutores, capacitores e elementos de manobra que os compõe, os filtros ativos são especificados pelos “amperes” que irão filtrar.

O entendimento do filtro ativo pode ser o de uma “máquina de corrente elétrica”, onde são geradas não só correntes harmônicas em diversas frequências em função da presença de cada uma delas, como na própria frequência fundamental, que poderão servir para equilibrar as correntes nas fases, ou até mesmo para adiantar as correntes da frequência fundamental em relação a tensão, melhorando assim o fator de potencia.

A figura 5 apresenta a ilustração da operação real de um filtro ativo. Nesta figura, pode-se verificar as formas de onda de corrente na carga, no filtro e a resultante na rede de alimentação (corrente filtrada)

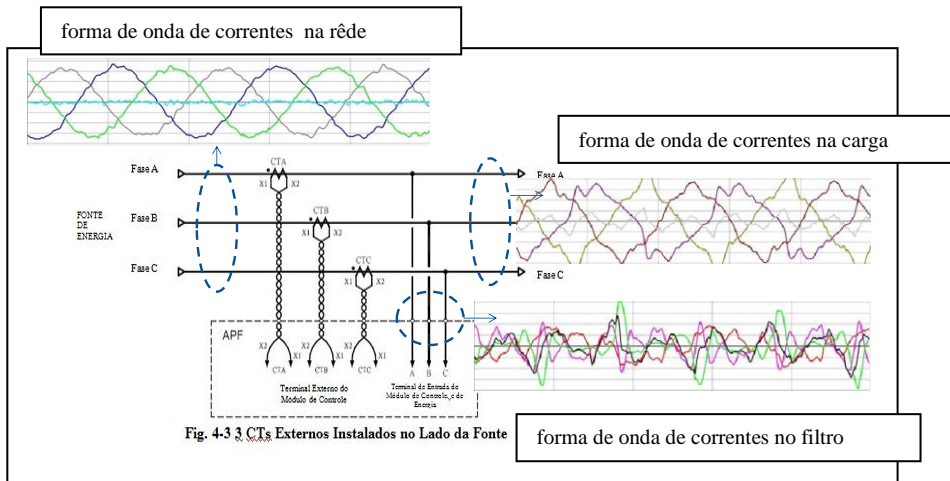


Figura 5 – forma de onda das correntes na carga, filtro e rede
Fonte: Lacerda Sistemas

c) Filtros passivos X Filtros Ativos

Pelo exposto, a solução de escolha entre filtros ativos e passivos dependerá fundamentalmente da aplicação, relacionada ao custo-benefício da escolha.

O entendimento que parece bastante aplicável nesta fase de custos das tecnologias no nosso mercado, é o de que filtros passivos compensam energia reativa e fator de potência e também filtram as correntes harmônicas, enquanto filtros ativos filtram as harmônicas e também compensam o fator de potência. Ainda a especificação dos filtros passivos é normalmente feita em potência reativa (kvar) e a dos filtros ativos em corrente (A).

A escolha dependerá da necessidade específica de cada caso. Em casos recentes observados, citamos:

- prédio comercial com transformador de 2000 kVA, com distorção total de tensão de até 10% e fator de potência da ordem de 95%.

- indústria de acumuladores com transformador de 1500 kVA com distorção total de tensão de 5% e fator de potência menor que 70%.

A instalação de um filtro passivo no primeiro caso, não é indicada ou não será suficiente para filtrar as correntes harmônicas que causam a distorção de tensão. Para que o filtro passivo cumpra seu papel e que opere sem sobrecarga será necessário se injetar potência reativa superior àquela demandada pela carga, originando sobretensões no barramento.

Já no segundo caso, a instalação de filtro ativo, seria útil na redução das correntes harmônicas, contudo sua aplicação na compensação (do ângulo) da corrente fundamental, traria custos muito superiores a solução com capacitores.

Uma possibilidade aplicada em alguns projetos é o uso misto, com o sistema de compensação de energia reativa efetuada com o uso de filtros passivos (com o uso de reatores antiressonantes (ver nota), sendo os filtros ativos somente aplicado às correntes harmônicas. Neste caso, o uso de reatores antiressonantes (filtros antiressonante) na compensação reativa é importante, uma vez que caso o filtro ativo venha a falhar por alguma razão, o sistema estaria sujeito à ocorrência de ressonância provocada pelos capacitores sem reatores.

Nota: Sistemas antiressonantes ou filtros antiressonantes são filtros passivos como os acima apresentados, porém cuja sintonia não é próxima às frequências presentes na corrente das cargas, mas em outra faixa. Esta aplicação é bastante comum e econômica quando se deseja proteger os capacitores e evitar que os mesmos provoquem ressonância harmônica em redes que suportam a presença de cargas não lineares e não se deseja a redução da distorção da corrente harmônica.

3- Conclusões:

A presença de correntes harmônicas nas instalações requerem intervenções de equipes de projetos e manutenção quer na especificação de transformadores adequados ou na limitação de carregamento daqueles que não preveem tal utilização.

As vantagens do uso do transformador de acordo com as premissas da UL já na fase de projeto são inúmeras, entre as quais a melhor eficiência e redução de perdas. Contudo não se pode desprezar a existência de transformadores nas instalações e a impossibilidade de substituí-los. Recomenda-se nestes casos de transformadores existentes a serem desclassificados, especial atenção aos aspectos de controle da temperatura de operação, que deverá estar adequada a sua classe de temperatura (B,F ou H). Outros pontos de atenção são a coordenação de proteção no primário e no secundário, além dos cuidados na operação, de forma que não se perca na história que

aquele transformador não pode efetivamente atender sua carga nominal.

Por outro lado, cargas não lineares produzem correntes harmônicas que podem causar níveis de distorção de tensão acima dos limites das normas.

Além de soluções aplicáveis nas instalações, com remanejamento de fontes e cargas, os filtros podem reduzir a circulação destas correntes harmônicas nas instalações.

Os filtros podem ser concebidos em construção de filtro passivo ou ativo, sendo a melhor solução dependente do objetivo do projeto, normalmente relacionado à necessidade de injeção de energia reativa ou somente à redução das correntes harmônicas. Usos mistos também são soluções de custo-benefício interessante.

Bibliografia

Copper Development Association-Publication 144
ANEEL-PRODIST MODULO 8
IEEE 519
IEEE 1159
IEC 61000-2-2
NBR 5410
Elspec Ltd - Technical Reports
Ação Engenharia e instalações- relatórios técnicos