

Uso de Filtros Passivos Dessintonizados para Compensação de Reativos na Presença de Harmônicas

Eng^o Jorge Luis Gennari – Mantest Engenharia Elétrica

Desde meados de 1996, por determinação da ANEEL, as concessionárias passaram a medir o Fator de Potência – FP – como uma média horária, além do valor mínimo do FP ter sido majorado para 0,92. Além de novo limite e da nova forma de medição, outro ponto importante ficou definido: das 6h00 da manhã as 24h00 o FP tem de ser no mínimo 0,92 para a energia e demanda de potência reativa indutiva fornecida pela concessionária. Das 24h00 até as 6h00 no mínimo 0,92 para a energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida pela concessionária. Ainda hoje, as mudanças ocorridas na legislação àquela época continuam evocando problemas cada vez mais atuais, pois a necessidade de correção do FP certamente leva as empresas a fazerem investimentos em equipamentos para se adequarem. Estas adequações podem significar simplesmente a instalação de capacitores isolados, instalação de bancos com sofisticados equipamentos de controle e chaveamento ou até mesmo a instalação de compensadores estáticos.

Correção do fator de potência

Seja qual for o caso a considerar, a grande maioria das soluções irá determinar a instalação de capacitores para a elevação do fator de potência. Com a limitação imposta, a energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida pela concessionária no período das 24h00 às 6h00, as indústrias que operam com baixo fator de carga durante a noite deverão retirar do sistema os capacitores usados para elevar o FP durante o dia e que poderiam, à noite, causar sobretensões indesejáveis. De um modo geral, para manter o fator de potência dentro dos novos limites temos que obedecer a seguinte igualdade:

$$Q_{carga} - Q_{capacitor} = 0$$

onde:

Q_{carga} = VARs necessários para que o fator de potência fique dentro do limite;

$Q_{capacitor}$ = VAR's a serem injetados

Da igualdade acima vê-se que, se a necessidade de reativos é zero, a necessidade de capacitores também é zero. Como exemplo real, na figura 1 temos um gráfico onde é mostrada uma curva de carga reativa em função do tempo. Para que seja mantido o limite de 0,92 para o fator de potência, devem ser instalados cerca de 2,6 MVar de capacitores.

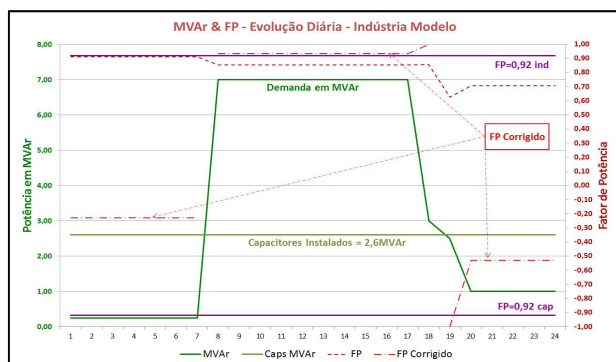


Figura 1

Isto no intervalo das 8h00 as 18h00. A partir daí, a necessidade de reativos cai até um valor mínimo de 1 MVar para uma potência ativa de 1MW (considerando o fator de potência da carga igual a 0,71). Se forem mantidos os 2,6 MVar de capacitores conectados ao sistema, teríamos uma sobra de cerca de 1,6 MVar, o que levaria o fator de potência na barra da concessionária para 0,53 capacitivo, estando assim fora dos valores permitidos. Ou seja, para que o limite não fosse excedido teriam que ser desconectados do sistema cerca de 1,6 MVar de capacitores. Este exemplo é baseado em um caso extremamente simples. Na verdade, as curvas de carga não se comportam de maneira tão uniforme, podendo variar bastante ao longo de um período. Normalmente elas são função do processo industrial, do número de turnos de trabalho, das contingências do dia-a-dia de uma indústria, etc. Nos casos em que esta variação de curva de carga é grande, pode nem ser viável (considerando a avaliação horária do fator de potência) o uso de banco de capacitores fixos, e sim bancos com múltiplos estágios. E, em alguns casos, até mesmo compensadores síncronos.

Harmônicas

Existem alguns equipamentos, como inversores de frequência, retificadores, fornos de indução, fornos de arco, transformadores, lâmpadas fluorescentes, televisores, e outros equipamentos eletrônicos, que se comportam como cargas não lineares.

A principal característica destes equipamentos a ser considerada aqui é que a forma das ondas de tensão e corrente na barra que os alimentam não é senoidal, podendo assumir formas das mais variadas dependendo do equipamento. Para manipular essas ondas utiliza-se o artifício matemático "Série de Fourier", por meio do qual a onda deformada é decomposta em um somatório infinito de ondas senoidais.

Por Fourier podemos então escrever:

$$U(t) = U_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + U_2 \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) + \dots + U_n \times \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t)$$

Onde $U(t)$ é a onda deformada a ser decomposta:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

com f sendo a frequência base de decomposição e n = inteiro variando de 1 a infinito.

A onda deformada é então dividida em uma soma de infinitas senóides com frequências de oscilação múltiplas da frequência base que, para sistemas elétricos no Brasil, é o de 60 Hz. Essas ondas são chamadas de componentes harmônicas da frequência base; esta frequência base é a frequência fundamental; e n é a ordem da harmônica. Em um sistema elétrico não existem necessariamente harmônicas de todas as ordens. A forma da onda depende de equipamento que causa deformação, e para cada forma de onda é associada certa decomposição, havendo ou não a presença de determinadas ordens.

Por exemplo, um retificador de p pulsos gera correntes harmônicas do lado CA de ordem:

$$n = p \cdot k + 1$$

onde:

n = ordem harmônica;

p = número de pulsos do retificador;

k = número inteiro de 1 a infinito.

Para um retificador de seis pulsos:

$$n = 6 \cdot k + 1, \quad n = 5; 7; 11; 13; 17; 19 \dots$$

Para um retificador de 12 pulsos:

$$n = 12 \cdot k + 1, \quad n = 11; 13; 23; 25 \dots$$

Essas harmônicas são chamadas harmônicas características de um equipamento. Esta deformação das ondas de tensão e de corrente pode causar vários danos ao sistema, entre os quais podemos destacar:

- Aumento das perdas nos estatores e rotores de máquinas rotativas, perdas que podem causar superaquecimento danoso às máquinas;
- A existência de fluxo de harmônicas nos elementos de ligação de uma rede (transformadores e cabos, p. ex.) leva a perdas adicionais causadas pelo aumento do valor rms da corrente, além do surgimento de quedas de tensões harmônicas nas várias impedâncias dos circuitos.
- No caso dos cabos há um aumento de fadiga dos dielétricos, diminuindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção. O aumento das perdas e o desgaste precoce da isolamento também podem afetar os transformadores do sistema elétrico, em especial os transformadores de retificadores/inversores, já que estes não são beneficiados com a presença de filtros;
- Distorção das características de atuação de relés de proteção;
- Aumento do erro em instrumento de medição de energia, que estão calibrados para medir ondas senoidais puras. Este erro pode chegar a até 6% acima do valor real;
- Interferência em equipamentos de comunicação, aquecimento em reatores de lâmpadas fluorescentes, interferência na operação de computadores, interferência em equipamentos tiristorizados de variação de velocidade de motores, etc.;
- Perdas extras em capacitores utilizados para correção do fator de potência;
- Aparecimento de ressonâncias entre os capacitores para correção do fator de potência e o restante do sistema, causando sobretensões e sobrecorrentes que podem causar sérios danos ao sistema.

Sobrecarga dos capacitores e ressonância

Os dois últimos itens são de especial interesse para o estudo de correção de fator de potência. Para o dimensionamento das perdas extras, temos que a impedância de um capacitor e a corrente que circula por ele são:

$$X_c = -\frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$I_c = U \cdot \omega \cdot C$$

Onde:

U = tensão em Volts;

C = capacitância em Faraday.

Tomando como exemplo a harmônica de ordem 11, se tivermos U_{11} com 10% do valor da fundamental U_1 , fica:

$$I_{c11} = (0,1 \cdot U_1) \cdot (11 \cdot \omega_1) \cdot C_1 = 1,1 \cdot U_1 \cdot \omega_1 \cdot C_1$$

$$I_{c11} = 1,1 \cdot I_{c1}$$

Ou seja, a corrente da harmônica de ordem 11 (I_{c11}) é da mesma ordem da corrente da fundamental (I_{c1})!

Felizmente, para cálculo da corrente total temos uma soma vetorial e não algébrica, o que resulta em:

$$I_c = \sqrt{(I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + \dots + I_{cn}^2)}$$

$$I_c = \sqrt{(I_{c1}^2 + I_{c11}^2)}$$

$$I_c = \sqrt{(I_{c1}^2 + 1,1I_{c1}^2)}$$

$$I_c = 1,45 \cdot I_{c1}$$

Mesmo assim, ocorre um considerável aumento (de 45%) no valor rms da corrente de operação do capacitor e um conseqüente aumento das perdas no capacitor.

Para análise do aparecimento de ressonâncias no sistema, lembremos a definição de Halliday & Resnick, em "Fundamentos da Física" (volume III), segundo a qual a ocorrência de ressonância em um circuito elétrico se dá quando, através de uma excitação externa periódica, obtêm-se amplitudes de corrente ou de tensão máximas. Pode-se ter ressonância LC-série e ressonância LC-paralelo.

Tomemos como exemplo o circuito da figura 2. É imposto um degrau de tensão U_0 obtendo-se como resposta U_L , U_C e i mostrados no gráfico. Se U_0 for indefinidamente mantido, o circuito irá oscilar também indefinidamente de modo estável. Este é um circuito oscilatório série.

Já para o circuito da figura 3, é imposto um degrau de corrente i , obtendo-se como resposta i_L , i_C e u mostrados no gráfico. Se i for indefinidamente mantido, o circuito irá oscilar também indefinidamente de modo estável. Este é um circuito oscilatório paralelo.

Em ambos os casos a frequência de oscilação do sistema é:

$$f_{osc} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

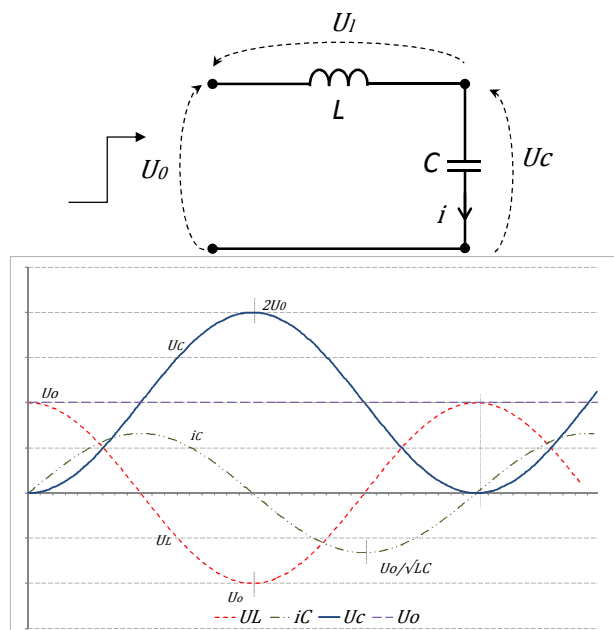


Figura 2

Agora, imaginemos que a tensão de excitação U_0 , no caso do circuito série, ou a corrente de excitação i , no caso do circuito oscilatório paralelo, varie como mostrado na figura 4. Ou seja, mantenha-se constante um intervalo de tempo, depois caia a zero e, depois de um período igual a:

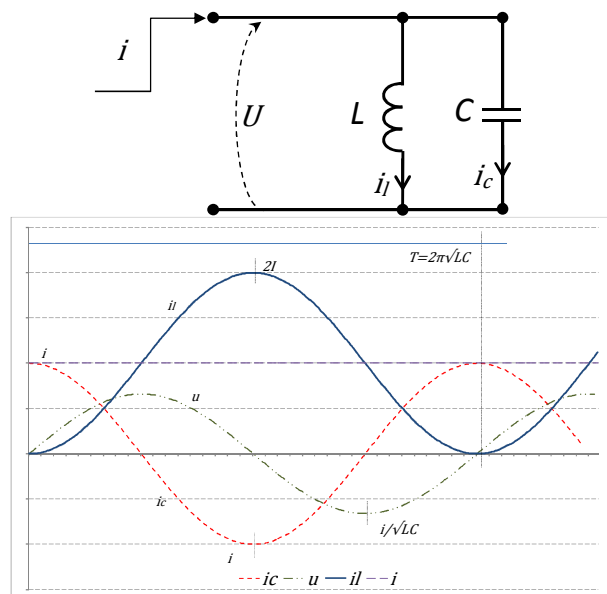


Figura 3

$$T_{osc} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}$$

suba novamente até o valor U_0 (ou i).

Quando isto acontecer, o valor inicial de U_c já não será nulo, o que irá aumentar a amplitude de oscilação de U_0 . Este ciclo se repetirá indefinidamente e a amplitude de U_0 crescerá também indefinidamente. Dizemos então que existe uma ressonância série ou paralela.

Deve-se considerar que só haverá esta ressonância se a tensão ou corrente de excitação oscilarem próximas a uma frequência bem definida, que é chamada frequência de ressonância do sistema f_r , e é dada por:

$$f_{osc} = \frac{1}{T_{osc}}$$

Algebricamente falando, para uma frequência ω :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Temos

$$X_L = \omega \cdot L \text{ e } X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C}$$

E como impedância resultante X_r temos, para o circuito série da figura 2, o valor:

$$X_r = X_L + X_C$$

E, para o circuito paralelo da figura 3, o valor:

$$X_r = \frac{X_L + X_C}{X_L \cdot X_C}$$

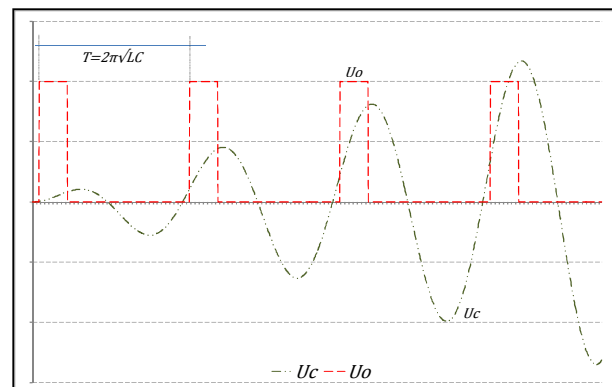


Figura 4

Para ocorrer ressonância em uma determinada frequência, em ambos os casos, a seguinte igualdade deve ocorrer:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

O que leva a:

$$X_L = -X_C$$

Os valores de X , resultantes são, para circuitos série:

$$X_r = 0$$

E no circuito paralelo

$$X_r = \infty$$

Os resultados dos valores acima na corrente e na tensão são evidentes.

Para o circuito série:

$$I = \frac{U}{X_r} \quad I \rightarrow \infty$$

Para o circuito paralelo:

$$U = X_r \cdot I \quad U \rightarrow \infty$$

Os circuitos descritos acima são circuitos ideais, onde nenhuma perda é considerada. Na realidade, as perdas do sistema limitam o crescimento da tensão ou da corrente, porém os valores alcançados são suficientemente grandes para causar danos consideráveis aos bancos de capacitores e ao sistema elétrico.

Como abordar o problema

Até aqui vimos que:

- Os valores de impedância do sistema variam com a frequência;
- A frequência de ressonância é a função da capacitância C e da indutância L .

Isso nos leva de volta à solução do problema da correção do fator de potência em sistemas elétricos que têm a presença de harmônicas. Se, para a correção do fator de potência em uma indústria com uma curva de carga variável é necessária a instalação de bancos de capacitores com vários estágios de operação, teremos para cada estágio uma diferente capacitância C sendo inserida no sistema.

Se, além disso, existem no sistema fontes de harmônicas que causam fluxos de correntes em diversas frequências (figura 5), a possibilidade de aparecimento de ressonâncias é bastante aumentada, e um criterioso estudo deve ser feito para serem limitados os seus efeitos.

O diagnóstico da presença ou não de harmônicas no sistema não é difícil, pois existem modernos aparelhos de medição que são apropriados para esta finalidade. Porém, a simulação da erradicação de harmônicas do sistema é um problema de difícil solução, exigindo o uso de técnicas de simulação computacionais.

A principal alternativa para a diminuição das harmônicas, após a identificação das fontes de harmônicas é, sem dúvida, a tomada de medidas para diminuição da geração de harmônicas no equipamento fonte. Se esta diminuição não for possível, uma alternativa é a instalação de filtros de harmônicas. O dimensionamento destes filtros é bastante delicado. Filtros mal dimensionados podem causar ressonâncias indesejáveis ou ainda agravar as já existentes.

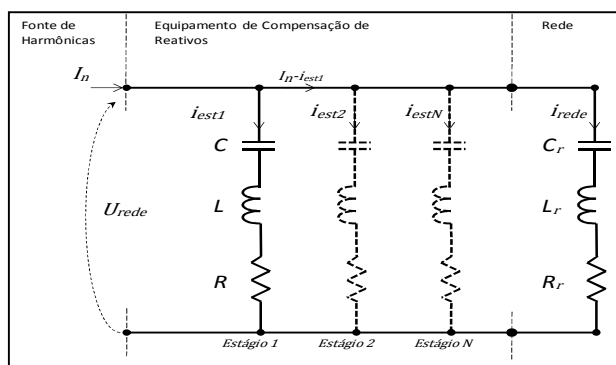


Figura 5

Os filtros podem ser divididos em filtros passivos e ativos. Devido a sua simplicidade e baixo custo, os filtros passivos são muito mais utilizados que os ativos. Neste artigo, trataremos apenas do dimensionamento de filtros passivos.

Atualmente, existem elaborados programas computacionais para o cálculo de parâmetros do sistema elétrico que permitem a avaliação do desempenho dos equipamentos a serem instalados para a correção do fator de potência e dos filtros para a supressão de harmônicas. Deve-se considerar que a simulação de sistema elétricos, assim como a otimização de seus parâmetros com o auxílio de computadores digitais, somente são eficientes se forem elaborados modelos bem ajustados à realidade.

Um estudo visando à instalação de equipamentos para a correção de fator de potência deve, inicialmente, modelar o sistema elétrico visando à análise harmônica. Com base no modelo aferido por medições de componentes harmônicas presentes no sistema, pode-se avaliar as diversas alternativas de implantação de equipamentos para injeção dos reativos que corrigirão o fator de potência.

Na prática, este estudo deve contar com as seguintes fases:

- A. Medições de componentes harmônicas;
- B. Levantamento de dados do sistema elétrico;
- C. Modelagem do sistema elétrico; e
- D. Simulações e escolha de alternativas.

A importância das medições não está somente na identificação e quantificação das harmônicas presentes ao sistema, os resultados dessas medições são necessários para a aferição do modelo a ser implementado.

O modelamento e parametrização do sistema devem ser feitos com o levantamento de dados dos equipamentos já existentes, como máquinas síncronas e assíncronas, bancos de capacitores, retificadores de potência, principais bombas e compressores, cargas de iluminação, linhas de distribuição de média e baixa tensão, transformadores e todas as cargas consideradas de importância para a realização do estudo. Esta é a fase de levantamento de campo para coleta de dados.

A curva de carga horária da indústria também é um dado muito importante. Como dissemos acima, a instalação de capacitores em barras que em determinado horário apresentam baixo fator de carga, deve ser acompanhada da instalação de equipamentos para desligar a quantidade de capacitores que for necessária para manter o fator de potência dentro dos limites impostos.

Após a implementação do modelo computacional do sistema elétrico, devem ser feitas simulações da distribuição de harmônicas resultantes destas simulações. Comparamos então os valores das medições do espectro de tensões harmônicas que foram efetuadas com os resultados calculados através de simulação computacional. Estes resultados, a medição e o calculado, devem ser próximos para se considerar o modelo computacional adequado.

Com a modelagem do sistema já implementada, passa-se à fase de busca de uma solução otimizada para injeção de reativos que atenda a necessidades do sistema elétrico quanto à correção do fator de potência e atenda também os valores máximos padronizados de distorção harmônica total.

Desta forma, o cálculo do fluxo de potência harmônica fornece um retrato, em regime permanente, de como o sistema irá se comportar, ou seja, qual o fator de potência esperado na barra da concessionária, qual a contribuição de cada barra no valor final deste fator de potência e quais os valores esperados da distorção harmônica total de tensão para cada barra do sistema elétrico.

Este fluxo de potência deve ser calculado levando-se em conta as curvas de carga horária da instalação para cada barramento. Para cada intervalo significativo é possível determinar a quantidade de reativos necessários que devem ser injetados no sistema. A partir daí, será possível estabelecer alternativas para o dimensionamento e localização de bancos de capacitores e outros equipamentos de injeção de reativos.

Também deve ser investigado o possível uso de máquinas síncronas existentes como fonte de reativos, pois a potência reativa gerada em uma máquina síncrona pode ser controlada através de sua excitatriz. Neste caso, a máquina síncrona pode ser utilizada como moduladora da quantidade de reativos necessários para a manutenção do fator de potência no nível desejado.

Com os modelos dinâmicos dessas máquinas já implementados no computador, a simulação fornecerá subsídios para a análise de transitórios que possam ocorrer no sistema devido às variações da curva de carga.

Após a definição dos equipamentos novos a serem instalados e definição da possibilidade do aproveitamento dos equipamentos já existentes, deve ser feita uma simulação da ocorrência de transitórios de tensões de barra e uma simulação da distribuição das componentes harmônicas no sistema. Ai então se define a necessidade do dimensionamento de filtros passivos que atenuem o valor destas componentes harmônicas.

O detalhe no caso dos filtros passivos é que o seu dimensionamento deve ser feito de forma que não haja sobrecarga nos seus componentes. Isto é feito com a adoção da técnica de *dessintonização* do filtro, que é nada mais que a sua sintonia em uma frequência ligeiramente diferente das frequências harmônicas presentes no sistema elétrico.

O resultado deve ser a definição de uma configuração para o sistema que atenda o objetivo do estudo, que é a manutenção do fator de potência no valor mínimo de 0,92 como regulamentado na portaria citada anteriormente.

Uma vez implementadas as medidas necessárias. Novas medições de harmônicas devem ser feitas visando uma aferição final das medidas tomadas.

Os resultados de um caso real

A figura 6 mostra um caso real para ser tomado como exemplo. Na barra de entrada da concessionária de tensão nominal de 23kV, estão conectados dois transformadores de 225kVA que alimentam vários inversores além de outras cargas.

Para a análise a ser realizada, foram feitos as seguintes simulações:

- Fluxo de carga na frequência fundamental – 60Hz
- Fluxo de carga harmônico nas frequências presentes no sistema
- Cálculo dos Fatores de Distorção Totais de Tensão THD V

Os casos simulados foram:

- Sem banco de capacitores
- Com banco de capacitores nas barras A e B – 50kVAR e 100kVAR respectivamente
- Com banco de capacitores e filtros dessintonizados nas barras A e B

O cálculo de fluxo de carga na frequência fundamental, mostra que a instalação de um banco de capacitores de 50kVAR na Barra A e de outro banco de 100kVAR na Barra B mantém o valor do fator de potência na barra da concessionária em 0,96.

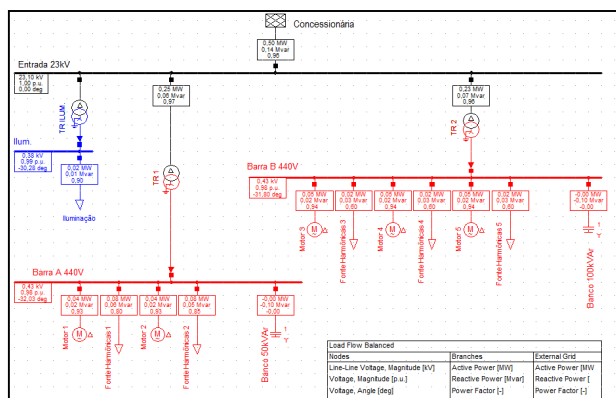


Figura 6

Do ponto de vista de correção de fator de potência o problema estaria resolvido. Foi feito então o cálculo de fluxo de potência para **todas as harmônicas presentes no sistema**, e os resultados para os fatores de distorção total de tensão estão apresentados na figura 7 abaixo.

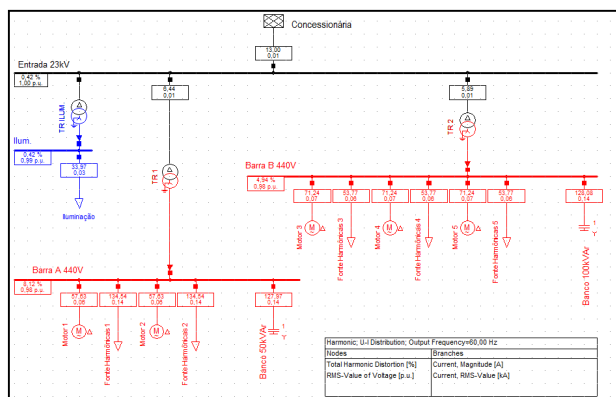


Figura 7

Pode-se ver que o THD V da Barra A é 8,12% e o THD V da Barra B é 4,94%, valores estes considerados altos. Mas, o principal a ser observado com a presença dos bancos de capacitores é a alta impedância das barras A e B entre as frequências correspondentes a 7ª e a 15ª harmônica (curva azul da figura 8).

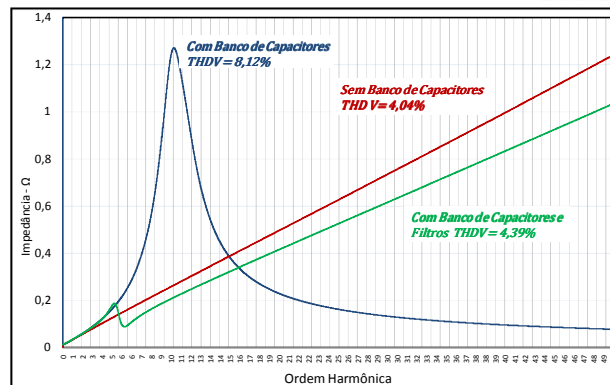


Figura 8

Na figura 9, são apresentados os espectros das harmônicas na barra A para os casos simulados.

Neste gráfico nota-se o que existe um alto valor harmônico para as tensões correspondentes às frequências próximas à 11ª harmônica.

Pode-se ver que a evolução da THD V se dá da seguinte forma:

- Sem banco de capacitores THDV = 4,04%
- Com banco de capacitores nas barras A e B THDV = 8,12%
- Com banco de capacitores e filtros dessint THDV = 4,39%

Após a instalação dos filtros dessintonizados, é bastante visível a redução ocorrida no valor das harmônicas, e o THDV cai para 4,39%.

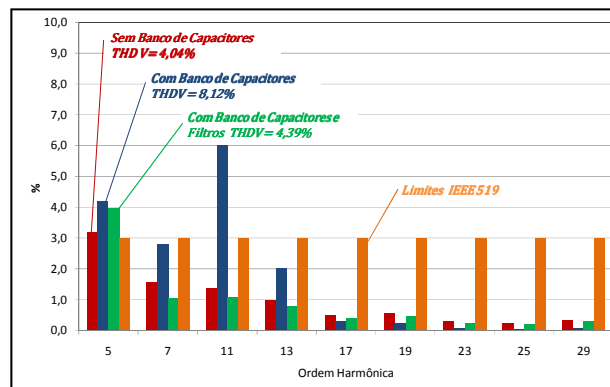


Figura 9

É interessante notar que os altos valores de impedância para frequências superiores a 17ª harmônica não causam problemas pois os valores das harmônicas a partir desta ordem são muito baixos e até inexistentes.

Conclusão

Do exposto, conclui-se que a compensação de reativos através da instalação de bancos de capacitores pode se tornar uma fonte de problemas se não forem considerados os efeitos das possíveis fontes de harmônicas existentes no sistema. Neste artigo pretendemos mostrar que a adoção de filtros dessintonizados é uma solução relativamente barata e simples de ser implementada com resultados mais do que satisfatórios.

Bibliografia

- Just, W.: Blindstrom-kompensation in der Betriebspraxis. VDE Verlag. 1991.
- Kloss, A.: Oberschwingungen. VDE Verlag 1992
- Stromrichter-Netzrückwirkungen – Technische Akademie Esslingen – Universität Hohenheim. 1987.
- Reactive power: basics, problems and solutions. IEEE Tutorial Course. 1987.
- Grundzätze für die Beurteilung von Netzrückwirkungen. VDEW Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke. 1987.
- Stevenson Jr., W.: Elements of power system analysis. Mcgraw Hill. 1986.
- IEEE 519-1992 Recommended Practices & Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems