

Capítulo VIII

Compensação reativa e qualidade da energia elétrica

Por Flávio Resende e Gilson Paulillo*

No contexto da qualidade da energia elétrica (QEE), um dos temas mais importantes envolve o equacionamento da demanda de reativos na rede elétrica, classicamente abordado para a correção do fator de potência em instalações, e os aspectos relacionados aos fenômenos de QEE, principalmente harmônicos. Neste aspecto, se por um lado a adoção de filtros – passivos e ativos – permite a compensação da demanda de reativos da rede e de uma instalação, por outro lado, este também deve ser adotado com cuidado em virtude dos potenciais efeitos negativos advindos das ressonâncias harmônicas. Estas, dependendo da configuração da rede e da instalação, podem aparecer na adoção de soluções simples – instalação de um banco de capacitores não chaveado – e complexas – instalação de filtros ativos – para a compensação de reativos em uma instalação.

Vale lembrar que os principais efeitos decorrentes da aplicação de capacitores em derivação (compensação reativa) junto à carga:

1 – Redução nas contas de energia: Em função das penalidades impostas pela legislação pelo baixo fator de potência, os capacitores reduzem as contas de energia evitando o pagamento de tais penalidades.

2 – Liberação da capacidade do sistema: Em equipamentos limitados termicamente, como é o caso dos geradores, transformadores, cabos, chaves, etc., os capacitores diminuem a corrente circulante

nestes equipamentos, liberam sua capacidade e, portanto, permitem um maior aproveitamento dos mesmos.

3 – Melhoria das condições de tensão: Pelas reduções das quedas de tensão, os capacitores ajudam a manter o sistema de tensão sustentado ao longo dos alimentadores. Esta melhoria na tensão significa melhor rendimento dos motores e aumento de eficiência do sistema.

4 – Redução de perdas: Pelo fornecimento de KVAR no ponto onde há a necessidade, os capacitores aliviam o sistema de transmitir corrente reativa. Desde que a corrente elétrica na linha é reduzida, as perdas (I²R) e (I²X) também diminuem e reduzem o kWh consumido.

5 – Redução e/ou postergação de investimentos em instalações elétricas, justamente em função dos item 2, 3 e 4 citados anteriormente.

Estes aspectos, os principais conceitos e os potenciais impactos na QEE da instalação serão abordados neste artigo.

Redução de perdas

As perdas elétricas estão associadas à corrente elétrica em uma instalação. Estas são proporcionais ao quadrado da corrente, sendo e estando diretamente associadas à melhoria do fator de potência de uma instalação. Isto pode ser demonstrado pela relação (1) e pela Figura 1:

$$\frac{\% \Delta P}{P} = 100 - 100 \times \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2$$

Em que: $\cos \phi_1 = \text{F.P. original}$
 $\cos \phi_2 = \text{F.P. corrigido}$ (1)

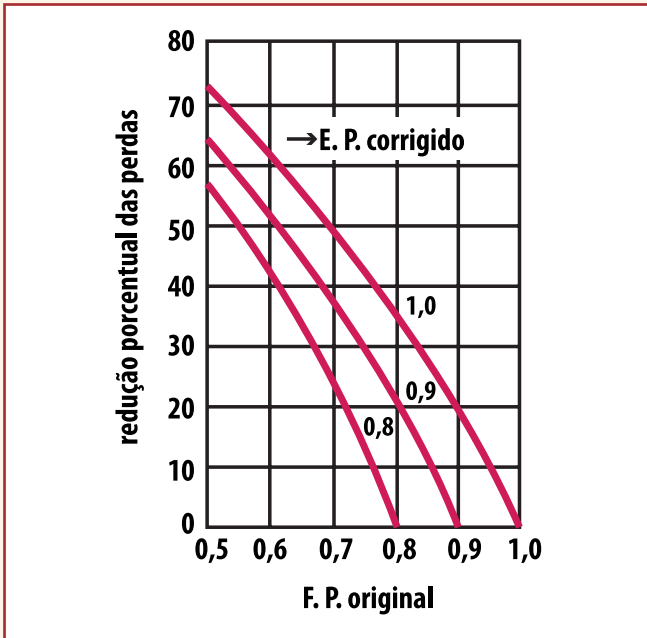


Figura 1 – Relação entre perdas e fator de potência corrigido de uma instalação.

Analisando-se a Figura 1, verifica-se que uma carga com F.P. original igual a 0,7, se corrigida para um F.P. de 0,9, gera uma redução das perdas de 39,5%.

Redução das quedas de tensão

A melhoria da tensão após a aplicação de capacitores deve ser considerada como mais um benefício. Para tanto, considere a Figura 2, que representa a aplicação típica de um banco de capacitores em uma instalação.

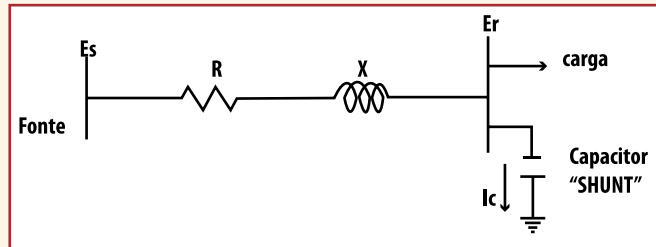


Figura 2 – Aplicação de compensação de reativos em uma instalação

Com base na Figura 2, a queda de tensão desta instalação é determinada pelas seguintes relações:

$$V = R \times I_r + X \times I_x$$

$$I_r = I \times \cos \varphi$$

$$I_x = I \times \sin \varphi$$

(2)

Logo, a redução do valor de I_x , que pode ser viabilizada por meio da aplicação, por exemplo, de um banco de capacitores tipo shunt, permitirá a melhoria do perfil de tensão da instalação.

Vale lembrar que cuidados especiais devem ser tomados quando da operação do banco de capacitores sob condições de carga leve, pois, nesta situação, a tensão tende a se elevar bastante, podendo atingir valores acima dos permitidos. Nestes casos, é aconselhável a adoção do chaveamento manual ou automático dos capacitores, de acordo com as necessidades da instalação. Esta condição pode ser observada na Figura 3, que mostra que a instalação apropriada de capacitores pode manter a tensão no fim da linha dentro de limites bem próximos do valor da tensão no início da linha.

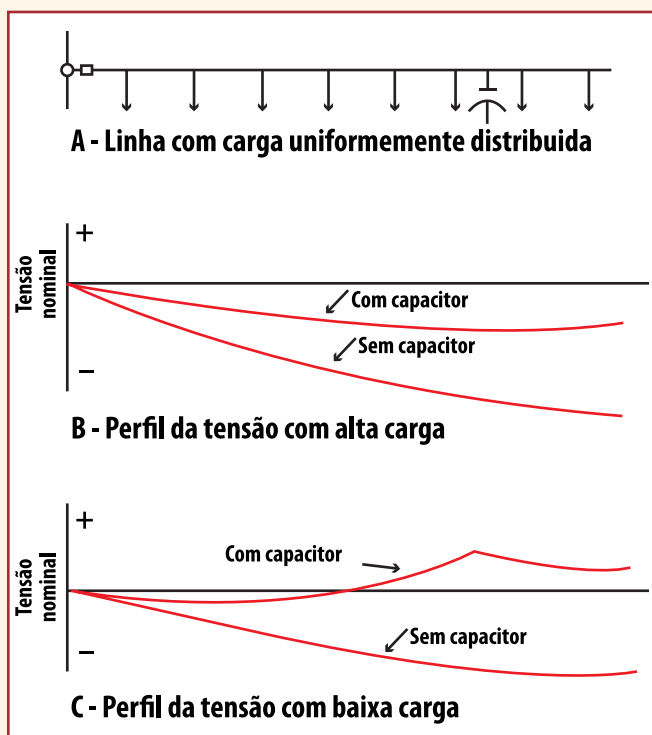


Figura 3 – Variação da queda de tensão em linhas com carga distribuída.

Eliminação das multas por baixo fator de potência

A regulamentação definida no Módulo 8, dos Procedimentos de Distribuição (Prodist), da Aneel, indica os seguintes limites para o fator de potência das instalações elétricas conectadas às redes de distribuição, com tensão inferior a 230 kV:

FATOR DE POTÊNCIA	MEDIÇÃO TRADICIONAL	MEDIÇÃO HORÁRIA
	MENSAL	HORÁRIA
Limite FP Indutivo	F.P > 0,92	0:00-06:00 HS Sem limite 6:00-24:00 HS FPind > 0,92
Limite FP Capacitivo	Sem limite	0:00-06:00 HS FPcap > 0,92 6:00-24:00 HS Sem limite
Demanda Max Reativa	Não mede	Mede

Clientes com medição do tipo média mensal:

Considera-se, neste caso, a correção do fator de potência de consumidores do tipo “B”, que, via de regra, estão submetidos à medição mensal do fator de potência.

O valor atualmente mais indicado para correção do fator de potência é de 0.95, recomendando-se que ele não apresente fatores médios abaixo de 0.93 ou acima de 0.98. No primeiro caso, conforme a característica da instalação, adotar a estratégia de correção para valores abaixo de 0.93 pode ocasionar multas em determinados períodos do ano devido à estreita margem de erro. No segundo caso, a correção para valores acima de 0.98 pode levar a problemas na instalação do consumidor.

Assim, recomenda-se a realização de um estudo detalhado das diversas alternativas de compensação como, por exemplo, a aplicação de bancos automáticos, correção localizada, filtros ativos, dentre outros.

A identificação mais prática e segura dos problemas de multa por baixo fator de potência e, conseqüente, a necessidade de se adotar um mecanismo de compensação de reativos é a análise das contas de energia da instalação.

Dados das contas de energia:

Em geral, as contas de energia dos quatro meses antecedentes ao estudo, normalmente, são suficientes para avaliar as necessidades da instalação no tocante ao fator de potência. Todavia, deve-se considerar o tipo de atividade do cliente e, conforme o caso, esta análise deve considerar as últimas 12 contas de energia. Por meio desta análise serão identificados os seguintes parâmetros:

- Demanda máxima: é a máxima demanda registrada pela instalação, expressa em kW;
- FP registrado;
- Consumo (kWh): é importante considerar as variações de consumo do cliente. Quando o consumo é razoavelmente estável, pode-se utilizar o valor médio das contas disponíveis. Sabendo-se a quantidade de horas que o cliente trabalha por mês, pode-se calcular a demanda média em kW (kilowatt). Utilizando-se da demanda média, obtêm-se a quantidade mínima de capacitores a serem instalados.
- Horário de trabalho do cliente: este dado é importante para calcular a demanda média do cliente. Devemos ser atentos com falsas informações (muito comum).

Para clientes com medição horária:

Os valores indicados para correção do fator de potência (na média horária) são:

- Das 0h00 – 6h00 - de 0,00 ind a 0,92 cap
- Das 6h00 – 24h00 - de 0,00 cap a 0,92 ind

Dados adicionais do cliente:

Estas informações são indispensáveis para a determinação do local mais indicado para instalação dos capacitores, assim como o modelo e tipo de capacitor mais apropriado. Em geral, estão disponíveis no diagrama unifilar da instalação e deve apresentar as seguintes informações:

- Todos os transformadores (com tensões e potência definidas);
- Todos os capacitores fixos (com potência definida);
- Todos os bancos automáticos de capacitores (com potência definida);
- Todos os capacitores não fixos, em geral instalados junto a máquinas especiais, motores, etc. (com potência definida);
- Cargas especiais, fundamental para os circuitos onde pode haver a circulação de correntes harmônicas. Nestes casos, recomenda-se efetuar o estudo de penetração harmônica da instalação. Neste caso, o unifilar deve ser completo, constando os seguintes dados:
 - ✓ Impedância de todos os equipamentos;
 - ✓ Características das fontes geradoras de harmônicas;
 - ✓ Potência de curto circuito da concessionária;
 - ✓ Outros.

Definição do valor da compensação de reativos

O montante de compensação pode ser definido por meio dos dados disponibilizados pela fatura de energia elétrica ou ainda pelos dados disponibilizados pela concessionária de energia a partir da memória do medidor de energia (hora a hora). Dessa forma, pode-se obter o valor da compensação por meio da seguinte relação:

$$kVAR_c = KW \times K \quad (3)$$

Em que:

$$K = [tg(\phi)_r - tg(\phi)_d]$$

$tg(\phi)_r$ = tangente para fator de potência real;

$tg(\phi)_d$ = tangente para fator de potência desejado;

kW = Potência ativa em kilowatts.

Cliente com medição do tipo média mensal:

A utilização da demanda máxima registrada como potência ativa em (3) resulta no limite máximo de compensação que o cliente pode instalar. Logo:

$$kVAR_{c_{max}} = D_{max} \times K \quad (4)$$

Por outro lado, caso seja utilizada a demanda média como potência ativa em (4), a resposta será o limite mínimo de compensação, definido em (5).

$$kVAR_{c_{medio}} = D_{medio} \times K \quad (5)$$

No caso dos consumidores que trabalham no regime horosazonal, os cálculos anteriores devem considerar os consumos na ponta e fora da ponta.

Cliente com medição do tipo média horária:

No caso da utilização da demanda registrada em cada hora como referência para (3) e (4), o resultado é a definição da compensação a ser inserida na rede em cada hora em função do perfil de carregamento do consumidor. Logo, tem-se que:

$$kVAR_{hora} = D_{hora} \times K_{hora} \quad (6)$$

Aplicação de capacitores em circuitos com harmônicos

Pelas considerações estabelecidas nas normas mundialmente reconhecidas de especificação de capacitores de potência, existem restrições quanto à sua utilização em circuitos com condições anormais de operação (transitórios, sobretensões, harmônicos, etc.).

Tais restrições são decorrentes do fato de que o fabricante, ao projetar e fabricar um determinado tipo de capacitor, leva em consideração os valores normais de tensão e corrente a que ele estará submetido (valores nominais), não podendo prever de modo generalizado as possíveis condições adversas. Tais condições adversas, em muitos casos, ultrapassam os valores normalizados de suportabilidade do equipamento, sacrificando desta forma sua vida operacional.

Todo circuito que opera com dispositivos que alteram a forma de onda da corrente e da tensão fundamental de alimentação possui componentes harmônicos. A amplitude e a frequência destes harmônicos dependerão do tipo de equipamento utilizado, de sua potência e dos valores intrínsecos do circuito e equipamentos a ele conectados.

A impedância de qualquer tipo de capacitor (reatância capacitiva) é definida pela seguinte expressão:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Em que: ω - frequência angular da rede em radianos

f - frequência da rede em Hz.

Dessa forma pode-se concluir que a impedância dos mesmos será tanto menor quanto maior for a frequência da rede, uma vez tal impedância é inversamente proporcional à frequência. Tal efeito fará do capacitor um "caminho" de baixa impedância para a circulação de harmônicos, fazendo com que uma grande parte das correntes harmônicas geradas passem pelo capacitor.

Cabe salientar que os capacitores "não geram" harmônicas, mas, como outras cargas elétrica, sofrem seus efeitos. Observa-se também que determinados circuitos poderão ter seus valores de harmônicos amplificados em intensidade após a instalação de capacitores nos mesmos,

uma vez que estes tendem a diminuir a impedância geral do circuito para frequências acima da fundamental.

Ressonância série

Em relação à circulação de componentes harmônicos sobre os capacitores, ressalta-se que a condição mais severa ocorrerá quando for estabelecida uma sintonia em série entre os valores da impedância equivalente do sistema com o capacitor (ressonância série). Neste caso, a atenuação da amplitude do harmônico considerado é praticamente nenhuma, transferindo para o capacitor toda (ou quase toda) a energia corresponde à harmônica sintonizada. Neste caso, considera-se:

$$Z_r = R + j \left(\omega x L - \frac{1}{\omega x C} \right)$$

Em que: Z_r = Impedância Resultante

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Em que: f_r = Frequência de Ressonância

Contudo, uma estratégia comum é a utilização do efeito de ressonância em questão para a “filtragem” das harmônicas existentes em sistemas elétricos. Cria-se, dessa forma, o conceito de “Filtro de Harmônicos”.

Logicamente, o equipamento utilizado para tal proposição é dimensionado para suportar as adversidades de funcionamento (sobrecorrentes e sobretensões harmônicas), sendo aproveitada a sua potência de serviço na tensão fundamental para a correção do fator de potência no ponto de instalação do mesmo.

Ressonância paralela

Esta ressonância apresenta um elevado valor de impedância pela combinação em paralelo da reatância capacitiva com a reatância indutiva, na frequência em que ambas se equivalem. Isto pode representar um sério problema quando esta impedância for percorrida por uma corrente, mesmo que pequena, de mesma frequência, fazendo com que se elevem drasticamente as tensões em seus terminais e as correntes harmônicas desta ordem existentes no sistema, levando a danos aos equipamentos do sistema, principalmente aos bancos de capacitores instalados no ponto de ocorrência de tal ressonância.

Em sistemas de potência, a utilização de capacitores para correção do fator de potência pode caracterizar uma ressonância paralela no ponto de instalação à frequências harmônicas que estejam presentes no sistema. Desta forma, em sistemas onde existem cargas geradoras de harmônicas

significativas, é imprescindível a realização de estudos harmônicos para garantir a instalação segura dos bancos de capacitores para correção do fator de potência, evitando com isto danos a estes bancos e ao próprio sistema.

Para determinação da frequência de ressonância quando da instalação de bancos de capacitores, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$N = \sqrt{\frac{KVACC}{KVAR}}$$

Em que:

N - Ordem harmônica da ressonância;

KVAcc - Potência de curto-circuito no ponto de instalação do banco de capacitores em KVA;

KVAr - Potência do banco de capacitores em KVAR.

Efeitos das componentes harmônicas sobre capacitores

Os valores nominais de tensão de potência de operação são utilizados para o dimensionamento dos capacitores em sua utilização mais genérica, ou seja, funcionamento na frequência fundamental. Entretanto, em circuitos com presença de harmônicos os valores de suportabilidade dos capacitores ficarão prejudicados em função do acréscimo de corrente, tensão e potência introduzidos por este fenômeno.

Basicamente, os efeitos prejudiciais causados pelas componentes harmônicas podem ser explicados da seguinte forma:

a) Tensão: O isolamento entre placas, além de suportar a tensão fundamental, terá que suportar também as sobretensões causadas pelos harmônicos drenados pelo capacitor. Tal efeito é significativo em frequência de 120 Hz a 720 Hz, quando o produto da impedância do capacitor pela intensidade (amplitude) da corrente na frequência considerada tendem a assumir valores representativos.

Para a determinação do valor máximo de sobretensão, é necessário que se faça a computação instantânea dos valores de tensão de cada harmônica, em amplitude e fase.

Esta degradação também pode ser resultante das descargas parciais no dielétrico do capacitor. Quando o nível de descargas parciais atinge valores elevados, a vida útil do capacitor degrada-se rapidamente.

b) Corrente: Uma vez que os capacitores são associação em série e/ou paralelo de unidades capacitivas em (elementos capacitivos = bobina capacitiva = menor parte formadora do capacitor), existe a necessidade de fazer conexões elétricas com cabos/terminais/cordoalhas/soldas, etc. Com o acréscimo de corrente implementado pelas correntes

harmônicas, tais ligações deverão ser reforçadas, evitando sobrecarga nos condutores e placas.

c) Na prática, pode-se considerar que a média quadrática dos valores das correntes existentes, nos dará a noção apropriada da corrente resultante, para o dimensionamento dos condutores a placas associados ao capacitor.

$$I_{tef} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

Eventuais sobrecorrentes de frequência e intensidades não previstas geram sobrecarga nos condutores e placas com conseqüente aumento das perdas devido a aquecimento. Este processo leva ao sobreaquecimento dos materiais isolantes, o que resulta na diminuição da vida útil do capacitor.

d) Efeito combinado: tensão X corrente: este efeito, gerado a partir da presença de tensões e correntes harmônicas, leva à necessidade de estabelecer, com critérios, o adequado dimensionamento dos capacitores da instalação. Além disso, devem ser consideradas as variações bruscas na forma de onda distorcida da tensão sobre o capacitor, resultante das componentes harmônicas.

Neste caso, considere-se a que a corrente no capacitor é dada, em função de sua tensão, pela seguinte relação:

$$i(t) = Cx\left(\frac{dV(t)}{dt}\right)$$

Em que: C = capacitância
V(t) = tensão no capacitor

Observa-se que as bruscas variações de tensão provocam variações na corrente demandada pelo capacitor, e, por conseqüente, variações no campo elétrico existente entre as suas placas, resultando em danos ao dielétrico do mesmo.

Conclusão

Devido à severidade que os efeitos comentados poderão assumir, é inadmissível conceber que um capacitor dimensionado para funcionamento em circuitos convencionais possa suportar as condições adversas impostas pelas harmônicas.

Entretanto, conhecendo os níveis e ordem das harmônicas que o capacitor deverá suportar, é possível estabelecer um estudo para o seu correto dimensionamento. Tal capacitor tenderá a ter seu projeto sobredimensionado, a fim de suportar, além da contingência normal de funcionamento da frequência fundamental, todos os esforços eletromecânicos adicionais causados pelas harmônicas.

Invariavelmente, o “reforço” dos capacitores leva a um aumento no seu tamanho com a reavaliação de todas as suas características de projeto, repercutindo em acréscimos de custos e, possivelmente, prazos de entrega. Porém, paralelamente, tais inconvenientes são justificáveis em função dos benefícios obtidos com o aumento de vida útil alcançado, se comparados com capacitores convencionais.

Aconselha-se, em função da problemática que circuitos com harmônicos podem assumir, fazer um criterioso estudo de características, dando ao fabricante de capacitores os subsídios necessários para o correto dimensionamento de seu equipamento.

Referências

- [1] ARRILAGA, J., “Harmonic Elimination”, in *International Conference on Harmonics in Power Systems Proceedings, September 1981, Manchester, England*, pp. 37-75.
- [2] ARRILAGA, J., BRADLEY, P. S., BOGDER, P. S., “Power Systems Harmonics”, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [3] DUGAN, R. C., McGRANAGHAN, M. F., BEATY, H. W., “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill, USA, 1996.
- [4] MONTANARI, G.C. and FABIANI, D. “The Effect of Non-

Sinusoidal Voltage on Intrinsic Aging of Cable and Capacitor Insulating Materials”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 798-802, Dec. 1999.

[5] *Life Expectance Test Procedures – General Electric – Reactive Compensation Business.*

[6] GARCIA, F.R. “Procedimentos de Projeto de Capacitores e Bancos de Capacitores em Sistema com Harmônicos”, Inepar.

*GILSON PAULILO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em qualidade de energia elétrica pela universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Sua atuação é voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.

FLÁVIO RESENDE GARCIA é consultor técnico da empresa INEPAR S/A desde 1992. É engenheiro eletricista, com mestrado em Cargas Elétricas Especiais e Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência e especialização em “Power Quality Management” pela Westinghouse-USA.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br