



## **INJEÇÃO DE ENERGIA REATIVA E MANOBRA DE CAPACITORES EM MÉDIA TENSÃO**

A injeção de energia reativa em média tensão é um interessante e econômico recurso técnico para se compensar o consumo de energia reativa pela instalação, evitando a cobrança de reativo excedente por parte da concessionária, contudo em algumas situações tal decisão merece uma melhor avaliação.

1-Volume de energia reativa a ser injetado e manobra de capacitores.

Instalações que possuem perfis de carga constantes, com energia reativa sem grandes flutuações, são passíveis de compensação reativa efetuada por bancos fixos de capacitores. O balanço das energias ativa e reativa (consumida e compensada) mesmo nos limites máximos e mínimos apresenta valores de fator de potência adequados àqueles previstos pela resolução 456 (92% indutivo e 92% capacitivo durante a madrugada).

Há de se considerar a possibilidade de compensação mista composta por bancos de capacitores fixos e outros automáticos. Os bancos fixos seriam aplicados na compensação do consumo de reativos em vazio dos transformadores, somados ao consumo de alguma "carga de base", isto é, aquela mantida durante todo o período, definindo-se assim a energia reativa consumida fixa e a variável, compensada por bancos automáticos.

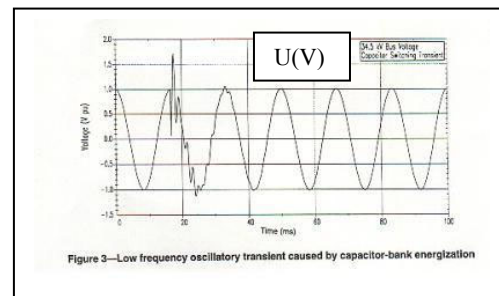
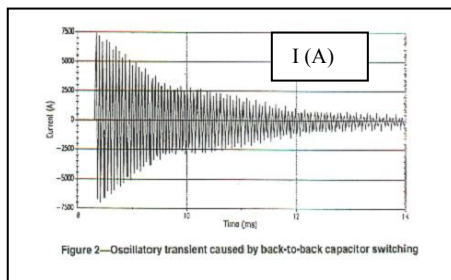
A instalação de bancos fixos na média tensão é uma solução clássica e com custo reduzido, contudo a necessidade de manobra merece algumas considerações. Alguns pontos sugeridos para análise são:

- Necessidade de manobra de capacitores em media tensão e transientes associados
- Presença de harmônicas e ressonância.
- Aspectos de regulação de tensão
- Aumento de perdas elétricas
- Capacidade de carga da instalação
- Flexibilidade para mudanças
- Aspectos operacionais e dificuldade de manutenção

## 2-Comentários sobre possíveis restrições

### a) Manobra e transientes

Os transientes elétricos gerados por manobra de capacitores é um dos mais conhecidos e documentados. A condição de manobra conhecida por “back to back” é reportada na citada norma IEEE 1159 e ilustrada na figura 1. A inserção de capacitores instalados em bancos, na condição em que algumas células já estejam energizadas gera correntes de “in rush” elevado causando severos efeitos na tensão de alimentação deste sistema.



FIGURAS 1A e 1B  
 Transiente de corrente e tensão causado por manobra de capacitor na condição “back to back”.  
 FONTE: IEEE 1159

Algumas soluções paliativas têm sido introduzidas. Contudo a solução definitiva é a aplicação de manobra dos capacitores na condição chamada de “zero crossing” isto é, os capacitores são desligados da rede elétrica quando suas correntes passam por zero e a conexão também é efetuada em condição específica isentando a rede dos transientes nas duas condições de manobra. Esta possibilidade que só pode se aplicada quando a manobra de capacitores é efetuada por elementos estáticos, é típica nos equipamentos de compensação de energia reativa tempo real, que possuem manobra por estes elementos semi-condutores, com alta precisão de manobra e tempo de comutação bastante reduzido.

Outra condição a ser considerada e nem sempre possível de ser evitada é a manobra acidental de capacitores pré-carregados ou energizados, com danos aos dispositivos de manobra eletro-mecânicos e aos próprios capacitores.



## b) Presença de harmônicas e ressonância

A instalação de capacitores em sistemas elétricos que alimentam cargas não lineares poderá causar ressonância harmônica. A ressonância ocorre quando a impedância do capacitor é similar (em módulo) a impedância da rede de alimentação (fonte).. O valor da impedância da fonte pode ser estimado através da impedância do transformador (ou gerador) e do circuito. Na ocorrência da ressonância, as correntes harmônicas (correntes cujas freqüências são freqüências múltiplas da freqüência fundamental) características da carga circularão pelos capacitores. A análise quantitativa destas correntes harmônicas que circularão nos capacitores dependerá da divisão de corrente que será estabelecida no circuito (capacitor e rede), considerando-se a análise do sistema elétrico em cada uma das freqüências consideradas, que são normalmente aquelas freqüências presentes no espectro de corrente da carga. Normalmente quanto menor for a impedância da rede, maior será a circulação de corrente pelos capacitores e o fenômeno de ressonância será observado.

Deve-se considerar que a circulação das correntes nos capacitores não ocorrerá somente na freqüência de ressonância, mas este é o ponto onde teoricamente a penetração das correntes harmônicas no capacitor é a máxima e limitada somente pela componente resistiva do circuito.

Em medições efetuadas verificaram-se circulação de correntes harmônicas em capacitores em situações em que as freqüências de ressonância calculadas do sistema não são exatamente iguais aquelas das correntes harmônicas presentes (mas apenas próximas) nas cargas e que circulam em parte pelos capacitores. Esta ocorrência é justificada pela divisão das correntes harmônicas da carga para a rede e para os capacitores em função de suas impedâncias ( modelo de divisor de corrente). Portanto a circulação de corrente nos capacitores não ocorre somente na situação exata do ponto da ressonância calculada, mas nas circunvizinhanças deste ponto.

A ocorrência de ressonância em média tensão será refletida e “sentida” para toda instalação, caso os capacitores sejam ligados nos primários dos trafos de entrada. Todos os barramentos do site ou da planta estarão sujeitos a situação de alta distorção de tensão, uma vez que a ocorrência de ressonância tem como efeito alta distorção de tensão que alimentará todos os transformadores.

Medições efetuadas em uma indústria de fundição com diversas subestações de distribuição, os capacitores ligados juntos ao secundário do trafo de entrada (88kV/13,2kV), apresentaram ressonância. Nesta situação, a distorção de tensão incrementada pelo fenômeno, foi verificada em todas as SE´s da planta.



Como resultado, todas as cargas da planta estavam sendo alimentadas com tensões distorcidas, causando com isso consecutivas queimas de placas de controle de tornos CNC, e outros equipamentos com controle micro-processado e com eletrônica digital embarcada.

A alternativa é de estabelecer um filtro sintonizado em frequência adequada em função da rede elétrica.

Com a redução da corrente no circuito, a redução de perdas (proporcionais ao quadrado da corrente) é expressiva.

### c) Capacitores e o desbalanceamento de Tensão

O desbalanceamento de tensão é um dos pontos importantes de perdas nos sistemas elétricos. A determinação do desbalanceamento é definida pela relação das componentes de seqüências negativa e positiva ou ainda a relação das componentes de seqüência zero e de seqüência positiva.

O desbalanceamento pode ainda ser estimado pela maior diferença entre as 3 tensões medidas e a média das mesmas, dividido pela própria média. Assim numa leitura instantânea de tensão entre fases ( tensões de linha) tomada com registros de 220V , 230V e 231 V ; a tensão media é de 227 V e o desbalanceamento estimado será de  $(7/227) = 3,08\%$ .

Valores acima de 1,0% de desbalanceamento de tensão passam a merecer cuidados especiais.

Uma das causas importantes da ocorrência do desbalanceamento de tensão, além da existência de cargas monofásicas e ligadas entre fases e neutro em sistemas estrela a quatro fios, é a queima de células capacitivas de forma não uniforme entre as fases e a queima de fusíveis de proteção dos bancos de capacitores. O que acaba ocorrendo é a injeção não uniforme de reativos entre as fases, causando o desequilíbrio de tensão. A solução é a correção do problema com substituição de células ou grupo de capacitores queimados ou fusíveis, além da pesquisa das razões do defeito, e ainda introduzindo técnicas conhecidas afim de evitar que o fenômeno volte a ocorrer. A figura 2 abaixo ilustra desbalanceamento de tensão causado por capacitores queimados de forma desigual entre as fases.

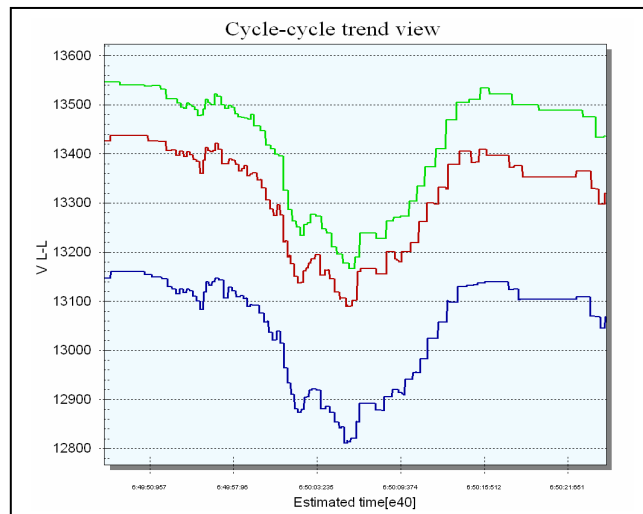


Figura 2 – Registro de tensão eficaz em sistema com células de capacitores queimadas

#### d) Uso de capacitores na regulação de tensão

A possibilidade do uso de sistemas de controle que injetem reativos no controle de tensão é uma ferramenta disponível e que pode ser eficiente por parte de concessionárias, indústrias e outras instalações de porte grande. Ao contrário do algoritmo clássico de injeção de reativos que quando do baixo fator de potência solicita a conexão de capacitores; o algoritmo específico de regulação de tensão comanda a manobra de capacitores independente do fator de potência da carga, pois a premissa é atender a esta característica de qualidade de energia.

Este sistema tem sido implementado com sucesso em locais supridos por turbinas eólicas compensadas (que possuem internamente sistemas de compensação reativa em tempo real) e que alimentam os “grids” das concessionárias, Apesar de originalmente o sistema de compensação reativa estar especificado para operação no nos instantes de conexão das turbinas ao “grid” ou mesmo em regime, a possibilidade da injeção de reativos no “socorro” ao sistema da concessionária trouxe grandes benefícios.



e) Alívio de carga nos transformadores.

Com a injeção reativa na baixa tensão, transformadores tem sua carga reduzida na mesma proporção dos fatores de potencia antes e depois da compensação, reduzindo investimentos futuros na ampliação da infra- estrutura.

### 3- Aplicação de sistema de compensação reativa na média tensão

Caso seja necessário a operação de bancos de capacitores manobrados na média tensão, como na compensação de grandes motores ligados em MT, sistemas de trens ou mesmo turbinas eólicas; é possível de instalar sistemas de compensação reativa construídos em 480V ou 690 V com manobra estática, alimentando um transformador elevador que injetará na MT reativo com controle absoluto e com todos os benefícios da compensação reativa na BT.

### 4- "Case" reportado no IEEE 1100

#### Problem: Capacitor bank switching

An industrial facility, served from a wye-connected 12.5 kV service and grounded through a resistor, had two 3600 kvar capacitor banks for voltage regulation. Plant personnel complained that a feeder circuit breaker would trip periodically from a ground fault relay. They would spend time inspecting the equipment downstream for ground fault but could never find the cause. After considerable investigation, the problem was discovered to be caused by the capacitor bank. Transient overvoltages created from capacitor switching would sometimes be high enough to cause a TVSS device on the high side of one of the downstream transformers to operate. The power-follow-through current through the TVSS device was enough to cause the ground relay to operate.

#### Solution.

After checking for a defective relay, consulting the coordination study, and reviewing the settings the easiest solution was to raise the current setting on the ground fault relay,



## 5-Conclusão

A compensação de energia reativa é uma excepcional ferramenta para otimização do uso das instalações elétricas, contudo sua especificação requer alguns cuidados, afim de não comprometer a continuidade operacional da planta e garantir os benefícios previstos e potencialmente garantidos.

Eng Jose Starosta, MSc.  
[jstarosta@acaoenge.com.br](mailto:jstarosta@acaoenge.com.br)