

Compensação reativa em grandes instalações e centro de dados; aspectos de má operação de UPS estático devido à ressonância harmônica.

Starosta, J. , IEEE member, Ação Engenharia e Instalações Ltda.

RESUMO: A proliferação do uso dos UPS (“*uninterruptible power supply*” ou “*uninterruptible power source*”) de alta capacidade em centro de dados (ou “*data centers*”) requer alguns cuidados na concepção do projeto elétrico que alimentará estes e outros equipamentos também aplicados nestes “*sites*” como os pesados sistemas de ar condicionado. Os cuidados a serem tomados dependerão das especificações destes equipamentos e de suas características de correntes harmônicas e, sobretudo, sua suportabilidade às distorções de tensão de alimentação. A compensação de energia reativa nestes locais pode comprometer a operação segura e confiável destes equipamentos reduzindo a confiabilidade e disponibilidade desejável ao sistema como um todo. Este estudo de caso apresenta as ocorrências e soluções corretivas em um grande centro de dados e a solução adotada com a compensação reativa tempo real isenta de transientes e dotada de sistema antirressonante. **PALAVRAS CHAVES:** Ressonância harmônica, Centro de dados, Compensação Reativa, Energia reativa, UPS, Qualidade de energia, Fator de potência, Harmônicas.

1. INTRODUÇÃO:

A infraestrutura elétrica de alimentação de centro de dados de grandes proporções pode atingir níveis de potência instalada que superem valores da ordem de 10 MVA; não significando, contudo, que a demanda elétrica atingirá esta ordem de grandeza. Devido à necessidade de contingência de fontes, esta demanda elétrica acaba por atingir valores menores que 50% da potência instalada, da mesma forma que o fator de utilização dos equipamentos e fontes. Em outras palavras o fator de utilização de equipamentos pode ser menor que 50% e nem sempre os filtros instalados operam adequadamente. O centro de dados possui como cargas típicas as chamadas “cargas de tecnologia de informação” (ou “cargas TI”), que são as cargas de informática (servidores, sistemas de comunicação e armazenamento; além de sistemas de refrigeração (ar condicionado) e cargas auxiliares como iluminação, algumas bombas, sistemas de segurança, etc. A necessidade de compensação reativa por razões de melhoria da qualidade de energia e regulação de tensão, isenção de cobrança de excedentes para as concessionárias, redução do carregamento dos transformadores e aspectos de redução das perdas /eficiência energética, faz com que sistemas de compensação de energia reativa baseado no uso de capacitores sejam incorporados a estas instalações. Devido a presença das componentes harmônicas de corrente geradas pelos UPS e pelos drivers dos sistemas de ar condicionado, bombas, elevadores e outros poderá ocorrer o fenômeno da ressonância harmônica devido a presença dos capacitores do sistema de compensação reativa. A ocorrência de ressonância harmônica tem como consequência o aumento da distorção de tensão no barramento de alimentação das cargas (incluem-se os UPS), impossibilitando a chave estática deste equipamento desempenhar o papel esperado comprometendo a confiabilidade de operação das cargas de TI alimentadas pelos UPS. Na sequência são detalhados

cada uma destas etapas de um caso pesquisado e solucionado.

II. DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DE UM UPS (“*uninterruptible power supply*”)

Uma das possíveis definições para um equipamento UPS seria: “um equipamento que mantém a alimentação elétrica de uma carga ou de um conjunto de cargas mesmo quando a fonte de energia principal (em geral a concessionária) apresenta qualquer tipo de falha ou anormalidade. O tempo de interrupção deve ser conhecido desde “sem nenhuma interrupção”, até alguns ciclos, dependendo da tecnologia dos equipamentos. A figura 1 apresenta o esquema genérico de um UPS estático⁽¹⁾ de larga aplicação em centro de dados e que será objeto de aplicação nos temas descritos na sequência. O UPS (parte esquerda da figura 1) é composto por um conjunto de retificador e inversor em série, sendo o ramo de interligação, associado a um sistema de corrente contínua (carregador e baterias) que alimentam a carga na falta ou irregularidade da alimentação principal. A autonomia do sistema dependerá fundamentalmente destas baterias. O UPS possui ainda em um segundo ramo de alimentação uma chave estática que tem a função de transferir a carga para a rede de alimentação quando a condição de saída do inversor não é adequada; esta característica aumenta significativamente a confiabilidade do sistema como um todo. No caso ilustrado na figura 1, o UPS recebe a mesma alimentação em AC para os ramos do retificador/inversor e chave estática (ou by-pass). Existem ainda diversas topologias para interligação de UPS entre si, de forma a garantir aumento de disponibilidade.

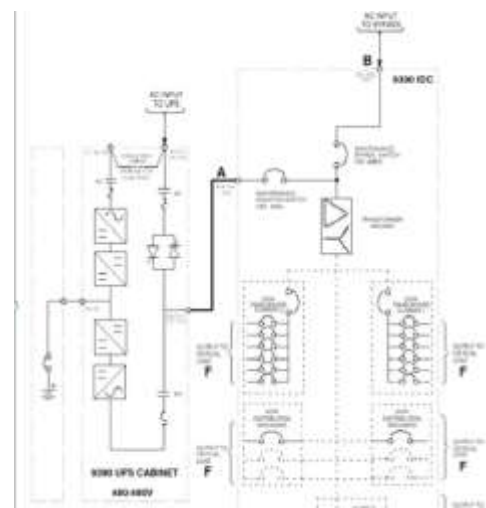


FIGURA 1: UPS estático e alimentação de cargas de missão crítica. Fonte: EATON

¹ Existem diversas formas construtivas e de interligação dos UPS (rotativos, estáticos, “*flywheel*”, etc). Neste documento só serão abordados os UPS estáticos. A referência [2] apresenta uma completa descrição destes sistemas

Distorção harmônica dos UPS

A distorção harmônica da corrente de entrada dos UPS dependerá da tecnologia do retificador; e segue a regra geral dos conversores trifásicos “ $h=kp\pm 1$ ” onde “ h ” são as harmônicas presentes, “ p ” o número de pulsos do conversor e “ k ” um número inteiro a partir de 1. Assim, se o UPS for construído com retificador de 6 pulsos, estarão presentes as harmônicas de ordens 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, etc; a distorção harmônica total de corrente (DTI) será da ordem de até 30%. Se o UPS for construído com retificador de 12 pulsos, as correntes harmônicas presentes serão a partir da 11^a harmônica (11^a, 13^a, 23^a, 25^a, etc), com DTI entre 10% e 15%. A tecnologia de UPS que possui retificador construído com IGBT (tecnologia PWM) possui baixa distorção harmônica de corrente com valores menores que 5% de DTI.

III- A SINCRONIZAÇÃO DO “BY-PASS” – CHAVE ESTÁTICA

A figura 2 ilustra a operação do “ramo de by-pass” com o suprimento de energia para a carga pelo inversor ou pela chave estática (rede). A chave estática possui duas entradas (rede e inversor). Na alimentação das cargas pelo inversor os SCR’s 1 e 2 deverão estar abertos, enquanto os SCR’s 3 e 4 deverão ser mantidos fechados. No instante em que o sistema nota alguma falha (por exemplo, sobrecarga, sobre/subtensão no inversor, ou ainda problemas no circuito de corrente contínua) a situação é invertida com tempo de interrupção restrita (no máximo 150µs), mantendo-se a partir do final da manobra a carga alimentada pela rede. No caso de outros tipos de transferências (como a transferência manual) a transferência conhecida como “make-before-break”, mantém as duas fontes operando durante alguns instantes alimentando a carga. Como existe um paralelismo momentâneo, as duas entradas deverão estar sincronizadas, ou seja, a qualquer instante o UPS poderá decidir por qual fonte a carga crítica estará sendo alimentada. Caso as duas fontes não estejam em sincronismo, o controle da chave estática não poderá permitir a transferência. O fabricante do equipamento informa os limites de tolerância para que ocorra o sincronismo e apesar da rede de alimentação da concessionária poder apresentar bons indicadores de qualidade de energia, o mesmo pode não ocorrer quando a fonte principal são os geradores de emergência que não possuem regulação de tensão igual a rede. A situação pode-se tornar dramática considerando que o sincronismo deve existir em todas as circunstâncias, incluindo os momentos de “degraus de carga” que tendem a desestabilizar a frequência de saída do inversor. Outro ponto crucial é que as próprias cargas de tecnologia de informação (TI) alimentada pelo UPS são distorcidas com fator de crista de até 3:1 e a distorção de tensão na saída do inversor em carga, deve ser próxima que a da chave estática (rede) sem carga. Em resumo, os limites de diferença da tensão de saída do inversor e a tensão presente na entrada da chave estática são bastante restritos e se não atendidos podem comprometer a

transferência, comprometendo a operação confiável da carga. Maiores informações sobre chaves estáticas poderão ser obtidas na referência [3].

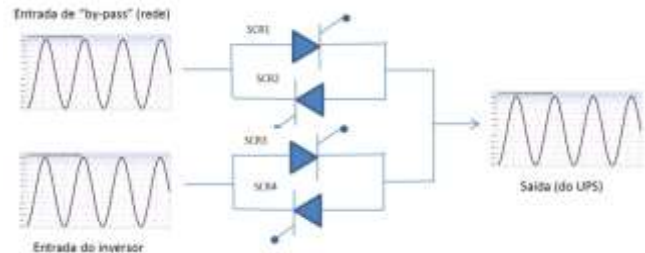


FIGURA 2 - Esquemático simplificado de uma fase da chave estática – fonte: Fonte: Bentley; Bond – The UPS Handbook

IV- DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO ELETRICA ONDE OS UPS'S FORAM INSTALADOS.

O sistema a ser analisado é representado na figura 3, onde se pode observar a alimentação de dois barramentos redundantes alimentados por transformadores independentes (TR1 e TR2) e contingenciados por sistema independente formado por geradores de emergência, de forma que na falta de alimentação de um dos barramentos pela fonte principal os geradores alimentam um ou ambos os barramentos, após o tempo típico de manobra, da ordem de dezenas de segundos. Os dois barramentos alimentam de forma “espelhada” os UPS, sistemas de ar condicionado e outras cargas do centro de dados. As cargas de tecnologia de informação são alimentadas pelos UPS's com uma particularidade que justifica este estudo.

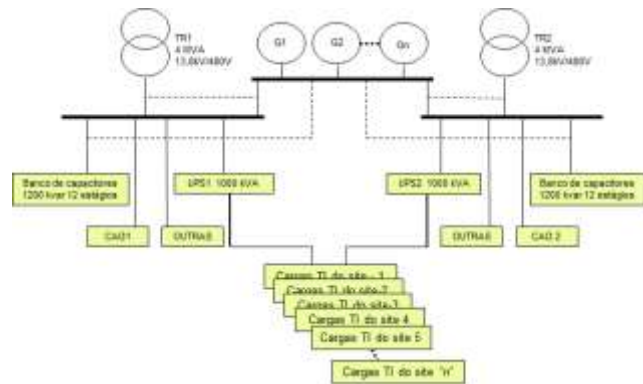


FIGURA 3 - Esquemático da instalação em análise.

Cada bloco de carga TI possui dupla alimentação, e chaves estáticas (sem nenhum vínculo àquelas citadas que incorporam os UPS) mantém uma das fontes alimentando as cargas, de forma que todo o sistema de alimentação é duplo e contingente. Em outras palavras cada um dos blocos de cargas TI é alimentado por uma fonte determinada e no caso esta fonte apresente má condição de operação, a chave estática transfere a alimentação sem prejuízo a carga. O dimensionamento de cada uma dos transformadores e UPS consideraram a capacidade em absorver os 100% da carga, apesar de operarem com carga máxima de 50% em condições

normais. Tal condição também foi observada no dimensionamento do banco de capacitores para a compensação reativa.

V- OCORRÊNCIA DE MÁ-OPERAÇÃO; FALTA DE SINCRONISMO DA CHAVE ESTÁTICA.

Sistemas elétricos com esta concepção são também chamados de “no-stop”, uma vez que as rotinas de manutenção podem ser efetuadas com as cargas operando normalmente e sem interferência na operação do “site”. O que se observou, contudo, é que durante uma destas manobras, onde todas as cargas são transferidas para um dos barramentos, enquanto os componentes do outro sistema eram submetidos às rotinas de manutenção foi a perda de sincronismo da chave estática do UPS que alimentava toda a carga, uma falha do inversor nesta situação seria fatal, pois a carga não seria transferida para a rede devido a desabilitação da transferência pelo controle da chave estática. Diante deste fato, a equipe de operação do “site” definiu pela pesquisa das razões da falha de transferência.

-Testes de operação e medições elétricas

A fim de se verificar o que estaria ocorrendo, foram programadas transferências de carga da mesma forma que a operação efetuada durante os serviços de manutenção; isto é, foram transferidas as cargas para somente um dos sistemas; simultaneamente foram efetuadas as medições das variáveis elétricas, notadamente as distorções harmônicas e formas de onda das tensões e correntes. Foram efetuadas medições na rede (secundário do transformador) e no banco de capacitores ligados ao mesmo barramento.

-Medições na rede.

O gráfico da figura 4 apresenta o comportamento geral das variáveis elétricas durante as variações de carga e de injeção de potencia reativa pelo banco de capacitores. No instante em que o banco de capacitores é desligado no final da medição, observa-se a significativa redução da distorção de tensão, indicando a ocorrência de ressonância harmônica com a presença do banco de capacitores na rede.

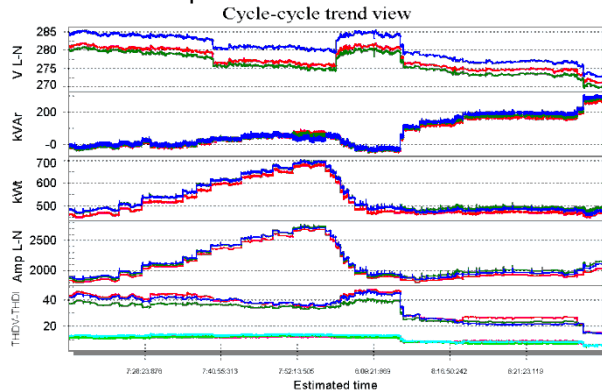


Figura 4 – comportamento das variáveis elétricas na rede

900 kvar (300kvar por fase) - banco de capacitores desligado; nesta situação a tensão é reduzida de 285V para 270 V (tensões de fase) ou 493V e 467 (tensões de linha). As distorções totais de corrente e tensão são sensivelmente reduzidas, sendo esta última, atingindo valores da ordem de 5%. A figura 8 apresenta o detalhe do comportamento da distorção total de tensão.



Figura 5 – Registro de Tensão de fase na rede

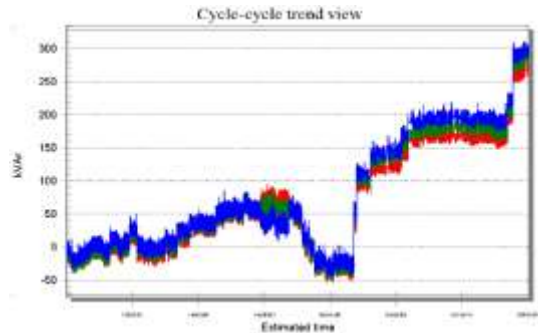


Figura 6 – Potência reativa consumida por fase



Figura 7 – Registros de DTT e DTI

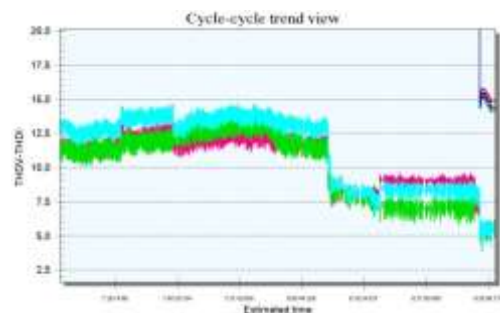


Figura 8 – Distorção Harmônica total de tensão.

As medições são pormenorizadas nas figuras 5 a 8; Observa-se no final do período da medição um consumo de potencia reativa total no transformador da ordem de

No instante de maior carga, ou seja, quando as cargas foram migradas de um sistema ao outro o espectro de correntes e tensões harmônicas apresentaram o

comportamento ilustrado na figura 9; observa-se a DTI superior a 30% por conta das 5ª e 7ª harmônicas e como resultado a distorção total de tensão **DTT** com valores superiores a 10%. A figura 10 apresenta as formas de onda de tensão e corrente correspondente a este instante.

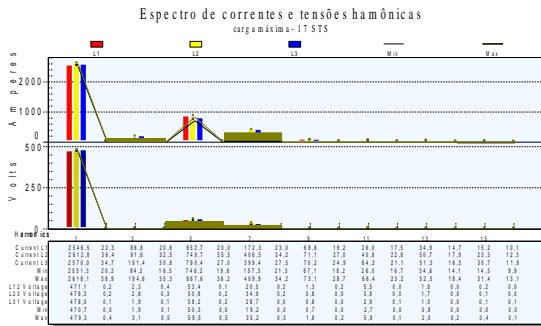


Figura 9 – Correntes e tensões harmônicas/ carga máxima

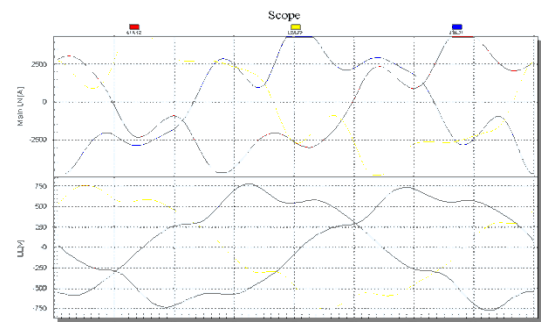


Figura 10 – Formas de onda de corrente e tensão/ carga máxima

As medições efetuadas nos capacitores simultaneamente às da rede, confirmam a ocorrência da ressonância, conforme ilustrado na figura 11. Observa-se a circulação de correntes harmônicas nos capacitores em função da carga e dos grupos inseridos automaticamente. A distorção de corrente atinge valores da ordem de 75%. Durante a operação de cargas e a conseqüente variação da potencia reativa injetada pelos bancos de capacitores, o espectro das harmônicas também variou em função da mudança da frequência de ressonância.

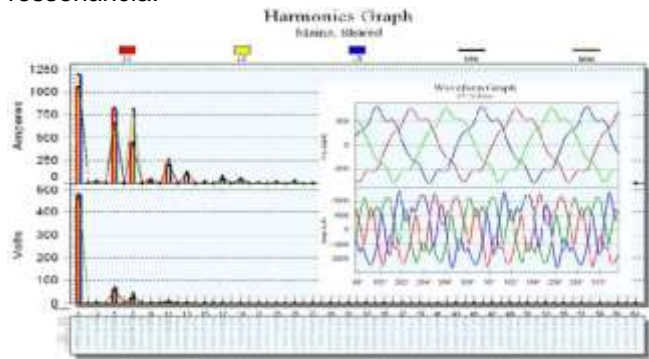


Figura 11–Espectro de correntes e tensões harmônicas no banco de capacitores/ carga máxima. Detalhe da forma de onda correspondente

VI-ASPECTOS DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

A inserção de capacitores em redes elétricas que alimentam cargas não lineares como os UPS de 6

pulsos incorrerá em ressonância harmônica. Por outro lado, os geradores podem apresentar má operação na alimentação de cargas capacitivas. Esta segunda situação foi evitada, uma vez que durante a operação dos geradores um comando elétrico restringe o uso do banco de capacitores. Já a análise da ressonância harmônica (paralela), apresenta os resultados ilustrados na figura 12.

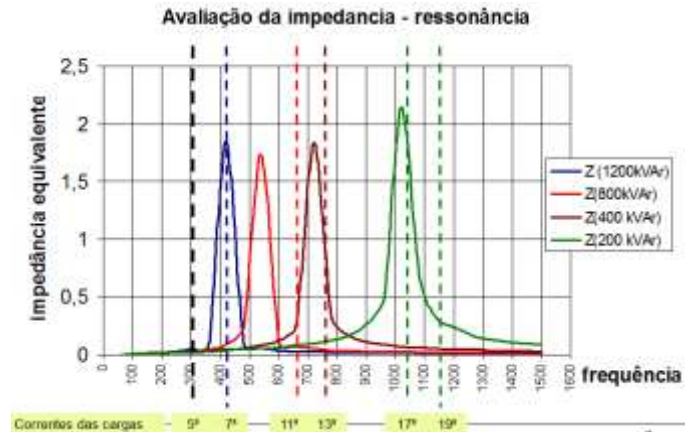


FIGURA 12– Avaliação da ressonância paralela

A estimativa da ressonância paralela considerando a injeção de potencia reativa com alguns dos estágios do banco de capacitor automático apresenta valores coincidentes com aqueles característicos das correntes harmônicas do UPS; esta situação apresenta uma potencial ressonância harmônica nestas frequências. O que se observa é que em regime de carga leve (reduzida injeção de potencia reativa pelo banco de capacitores) a ressonância harmônica ocorre em frequências superiores (acima da 13ª harmônica) em que as correntes harmônicas das cargas não são expressivas. Já, no instante em que a carga aumenta e o banco de capacitores injeta a energia reativa necessária à compensação; a frequência de ressonância é reduzida a valores típicos das correntes harmônicas presentes em clara situação de ressonância harmônica. Nesta situação de ressonância a tensão harmônica é sensivelmente incrementada motivando a perda de sincronismo pela chave estática do UPS, como verificado no gráfico da figura 8 o simples desligamento do banco de capacitores reduz a distorção de tensão a valores aceitáveis.

VII – SOLUÇÃO: Compensação Reativa com sistema antirressonante:

As possíveis soluções para o caso seriam a mudança da estrutura elétrica de forma a evitar a ressonância; a reforma do banco de capacitores, a aquisição de filtro ativo ou ainda a substituição para um novo sistema de compensação de energia reativa dotado de sistema antirressonante. Esta ultima opção foi adotada em função do aumento de confiabilidade, menor custos, e incremento na qualidade de energia além da solução para a ressonância com a isenção de transientes de

manobra dos capacitores, uma vez que o novo banco previa a construção com manobra estática com controle digital. A figura 12 apresenta o novo comportamento das variáveis elétricas, onde se pode observar que a injeção de energia reativa causa (ao contrário da situação anterior) a redução da distorção de tensão em função do dimensionamento e comportamento do filtro LC. Na medição apresentada, são injetados valores da ordem de 800 a 900 kvar e a distorção harmônica de tensão é reduzida de 8% para 6%. Nesta situação a chave estática do UPS é mantida sincronizada com a saída do inversor. A figura 13 indica que para qualquer composição de injeção reativa, a frequência de ressonância é sempre a mesma, esta condição é premissa no dimensionamento dos reatores [10].

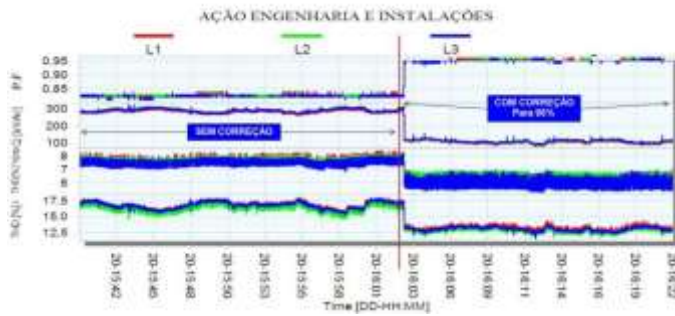


Figura 12 – Medições após a instalação do compensador estático de energia reativa.

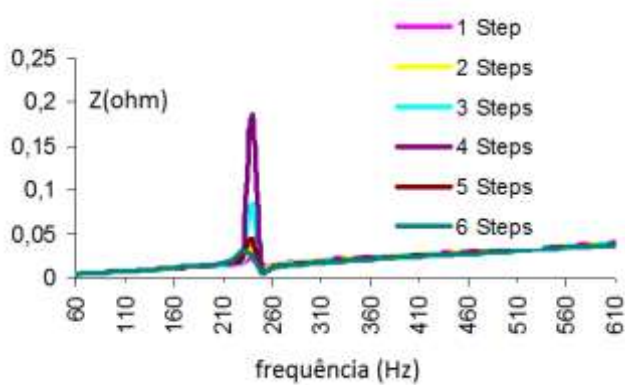


Figura 13 – comportamento da frequência de ressonância com a instalação de sistema antirressonante.

O sistema de compensação de energia reativa tempo real instalado tem por premissa de operação a manobra de grupos de capacitores ou grupos de filtros LC por meio de dispositivos de manobra estática, que são operados individualmente ou em grupos. O equipamento (figuras 14 e 15) é composto por grupos de indutores e capacitores manobrados por chaves estáticas que são acionadas por controlador digital ultrarrápido, e sistema de proteção com fusíveis ou disjuntores. Em função da aplicação, a manobra dos grupos pode ser feita em até um ciclo. Outras vantagens destes sistemas são a melhor regulação de tensão, sobretudo, para as cargas industriais de rápida variação.



Figura 14 – Compensadores de energia reativa instalado no centro de dados – 2 x 1125 kvar/480V.



Figura 15 – Detalhe dos reatores e capacitores; na parte superior as chaves estáticas.

A lógica de operação do equipamento depende do citado controlador que em função das informações das condições da carga e da rede, controla a manobra adequada dos grupos de capacitores (ou combinações de filtros LC). Nesta situação são manobrados (inseridos e desligados) a combinação de grupos mais adequada à compensação reativa. O equipamento não possui limitações quanto a manobra dos capacitores, não sendo necessário esperar que os capacitores descarreguem para voltarem a serem inseridos (como nos sistemas convencionais) [15]. De forma a manter os capacitores dos grupos sendo utilizados por períodos semelhantes, e com o objetivo de preservação da vida útil, é possível que se estabeleça a rotina, chamada de “scan” com o revezamento de grupos alternados em situação de baixa carga, em função da citada inexistência de limitações das manobras. Os custos de sistemas estáticos de compensação reativa dependem do conjunto controlador e elementos de manobra não sendo proporcionais às potências reativas como os equipamentos convencionais. Os custos são também inversamente proporcionais à tensão para a mesma potência reativa nominal e são de 10% a 30% superiores aos dos filtros manobrados por contatores.

VIII-CONCLUSÃO:

O uso de bancos de capacitores convencionais sem sistemas antirressonantes em instalações elétricas onde cargas não lineares (que geram harmônicas) estão instaladas pode operar em condições não adequadas; a situação dependerá do regime de carga que indiretamente acionará a operação dos capacitores. Em outras palavras um sistema poderá operar adequadamente por longos períodos, até que por alguma razão o regime de injeção de energia reativa

venha a ser variado, podendo ocorrer nesta situação condições típicas de ressonância harmônica. No caso estudado a transferência de toda a carga para uma das fontes condicionou a injeção de energia reativa pelo banco de capacitores de forma atípica, onde se notou a ocorrência de ressonância harmônica, inibindo a transferência na chave estática do UPS.

A solução encontrada foi a substituição dos capacitores por um compensador estático de energia reativa dotado de reatores antirressonantes e manobra digital estática isenta de transientes. Ainda, as cargas TI (tecnologia de informação) alimentadas pelos UPS são sensíveis a variações da qualidade da energia e a curva ITIC [8] define os parâmetros aceitáveis quanto a desvios da tensão nominal e tempos associados. A sensibilidade aos fenômenos de qualidade de energia e a isenção de transientes promovida pelo novo equipamento é um ponto importante a ser tratado. A compensação reativa tempo real é uma ferramenta interessante, sendo capaz de reduzir perdas elétricas, operacionais e de produção, sendo o investimento plenamente justificado. **O uso de capacitores em instalações elétricas sem a consideração e tratamento de determinadas condições operacionais, o tornam nocivos a tal ponto de ser melhor a não utilização dos mesmos.**

IX-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Starosta, José – Compensação estática de energia reativa tempo real e os aspectos de qualidade de energia, produtividade e redução de perdas elétricas, redução de investimentos em infraestrutura e isenção de cobranças de excedentes de energia reativa em cargas de ciclo variável. CBQEE – Santos-2007
- [2] Bentley; Bond – The UPS Handbook
- [3] Araujo de Deus, M.H. - Chave estática de transferência, estudo e soluções de casos focados na continuidade de fornecimento e aumento da confiabilidade do sistema- tese de mestrado UFMG.
- [4]-Dugan, Roger C.; McGranaghan ,Mark F.;Beaty, H.Wayne – Electrical Power Systems Quality
- [5]-Dias, Guilherme Alfredo Dentzien – Harmônicas em sistemas industriais
- [6] IEEE 1159-Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [7]IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [8]IEEE 1100-Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment
- [9]IEEE 141-1993-Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants
- [10] Nizemlat, Pol – ELSPEC; General Overview of Harmonics in Power Networks with PFC Capacitors
- [11]Moreno, Hilton; Starosta, José –Apostila de curso Harmonicas em Instalações Elétricas; Barreto Engenharia
- [12]Starosta, José – Avaliação de perdas nas instalações elétricas industriais- Enershow 2001
- [13]Ação Engenharia e Instalações Ltda.- relatórios técnicos de medições de parâmetros elétricos
- [14]Ação Engenharia e Instalações Ltda. – Sistemas de Compensação de Energia Reativa
- [15]Elspec Ltd– Fast Response, transient free, Reactive Power Compensation systems
- [16]Wodrick, Rudy T.- Compensation Systems for Welding Applications
- [17]ANEEL – Resolução 414
- [18]- ANEEL – modulo 8 - Prodist

- [19]Starosta, José- Distorções harmônicas:Evolução histórica e avaliação de casos práticos - Revista EM março/99
- [20] Starosta, Jose – Compensação de Energia reativa em instalações de grande porte; revista Eletricidade Moderna Julho /2002
- [21] Starosta, Jose –Mas afinal para que servem os capacitores em instalações elétricas de BT- Revista Setor Elétrico Fevereiro, Maio e Junho /2006.
- [22] Starosta, Jose –Qualidade de Energia nos processos industriais e produtividade- Revista Setor Elétrico Outubro de 2006.
- [23]-Freitas Jr, Nosor; Starosta, Jose - Aplicação de compensação reativa em terminal de containeres; revista Eletricidade Moderna Abril/2003
- [24]- O.N.S. "Sub módulo 2.2" - Padrões de Desempenho da Rede Básica
- [25]- Elspec Ltd- Equalizer controls 3 voltage levels and 4 different parameters-win power applications
- [26]- http://www.brasil.gov.br/navegue_por/aplicativos/reforma-ortografica

X-SOBRE O AUTOR

Nascido em 30/09/59; Engenheiro Eletricista pela Escola de Engenharia Mauá em 1982.,Mestre em engenharia pela Escola Politécnica USP em 1998. Diretor de Engenharia da Ação Engenharia e Instalações Ltda desde 1993. Atual presidente da ABESCO (associação brasileira das empresas de serviços de conservação de energia) e membro do IEEE. Autor de diversas publicações técnicas relacionadas aos assuntos de interesse. Áreas de Interesse: Instalações elétricas, Qualidade de Energia e Eficiência energética.