

Capítulo XI

Cortes de tensão (notching) e as respostas de UPSs estáticos

*Por Fabrício Douglas Gonçalves, Anésio de Leles Ferreira Filho, Felipe Tadeu Stemler, Luiz Valadão e Marcelo Leite Freire**

Com o crescente aumento de cargas não lineares no sistema elétrico, os fenômenos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), sobretudo em função dos efeitos que eles provocam, têm se tornado assuntos cada vez mais recorrentes na literatura atinente. Como consequência, os estudos acerca das causas, dos limites e das possíveis soluções para estes fenômenos revelam-se indispensáveis.

Neste ínterim, alguns dispositivos e equipamentos são sugeridos para mitigar ou até mesmo eliminar as indesejáveis distorções que surgem na forma de onda da tensão ou da corrente (ou das duas). Dentre as possibilidades que se apresentam no mercado, os Sistemas Ininterruptos de Energia (UPS) constituem uma alternativa que vem sendo empregada para solucionar estes problemas.

Mais conhecidos como no breaks, os UPSs estão presentes em diversas instalações elétricas de baixa tensão como instalações residenciais (urbana e rural), comerciais e industriais. Sua utilização se faz necessária pelo desejo do consumidor em evitar que a energia fornecida aos equipamentos eletrônicos essenciais seja interrompida ou que permaneça fora dos limites aceitáveis para o funcionamento adequado da carga. Com isso, a escolha de um UPS, dentre as diversas topologias existentes, pode ser fundamentada com base na sua resposta frente aos fenômenos de QEE. Desta

maneira, serão apresentadas neste trabalho três topologias diferentes de UPS estáticos e suas respostas a um problema de Qualidade da Energia Elétrica pouco abordado, porém consideravelmente presente nos sistemas elétricos atuais; o corte de tensão (notching).

Devido aos poucos estudos em torno deste fenômeno, faz-se necessário explicá-lo de maneira adequada, abordando seus principais conceitos, suas causas e as definições e os métodos de quantificação empregados por algumas normas que versam sobre o assunto. Além disso, são apresentados os principais efeitos deste fenômeno (de grande influência em cargas eletrônicas que utilizam a passagem pela tensão de nível zero como referência), tanto na rede elétrica como em aparelhos eletrônicos.

Conceituação (corte de tensão)

De acordo com a norma IEEE 1159-2009, o corte de tensão (notching) é um fenômeno de qualidade da energia elétrica caracterizado por ser uma distorção da forma de onda (podendo a tensão neste corte oscilar), com polaridade oposta à da mesma e duração inferior a meio ciclo. Os cortes de tensão ocorrem sempre de maneira periódica. A Figura 1 apresenta uma forma de onda típica de ambientes onde estes fenômenos se manifestam.

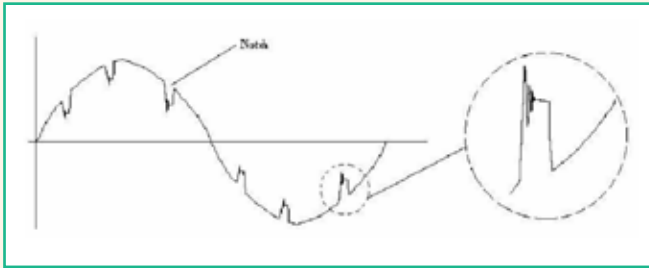


Figura 1 – Representação de cortes de tensão em uma onda senoidal.

Este fenômeno leva a uma distorção na tensão fornecida, como pode ser observado na Figura 1. Ele não possui uma classificação precisa, sendo especificado entre harmônicas e transitórios.

O corte de tensão é caracterizado, de acordo com a norma IEEE 519-1992 [1], por sua altura relativa (notch depth) e por sua área (notch area). A altura relativa do corte é definida pela razão entre o valor médio da profundidade do corte e a magnitude da onda de tensão no momento do corte. Alguns autores propõem revisões a esta norma e à forma de se calcular a altura relativa do corte, dando como exemplo um corte de tensão cuja profundidade atinja o nível referente à tensão zero; o que levará sempre a uma altura relativa do corte de 100%. Já a área do corte é calculada através do produto da profundidade média do

corte e do tempo durante o qual este ocorre. Os parâmetros dos cortes de tensão podem ser observados na Figura 2.

Um dos principais causadores dos cortes de tensão são os conversores retificadores trifásicos. Isto se dá devido ao fato dos cortes de tensão (notches) ocorrer quando a corrente comuta de uma fase para outra, uma vez que a presença de indutâncias entre a fonte e o ponto monitorado faz com que estas comutações não ocorram instantaneamente; gerando um curto-circuito momentâneo entre as fases. O tamanho destas reatâncias estabelece o quão rapidamente a corrente comutará entre duas linhas.

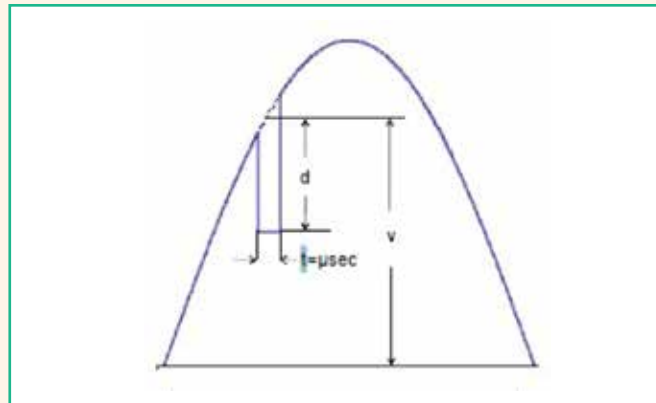


Figura 2 – Parâmetros de cortes de tensão.

Causas e o processo de comutação

A Figura 3 mostra o esquema elétrico de um retificador de seis pulsos, considerando as indutâncias presentes nas linhas de alimentação do retificador.

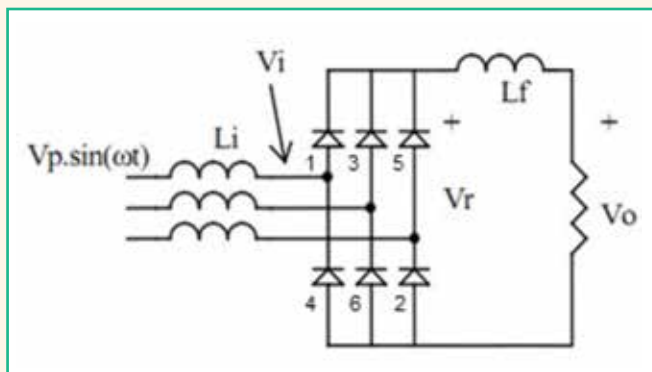


Figura 3 – Retificador trifásico de onda completa (seis pulsos).

Da Figura 3 pode-se observar que, se as indutâncias forem desconsideradas e os tiristores substituídos por diodos ideais, apenas dois diodos conduzirão ao mesmo tempo em lados opostos da ponte; o que impediria o surgimento do corte de tensão. Além disso, para que o retificador funcione de maneira adequada, os diodos que estão conduzindo devem estar em diferentes fases. Por esta razão, os diodos 1 e 4 não podem conduzir ao mesmo tempo.

A tensão DC aplicada à carga é composta por uma parte da tensão de linha da fonte trifásica. Na verdade, a tensão DC é constituída da tensão Vab enquanto os diodos 1 e 6 conduzem. Já a tensão Vba contribui para a tensão DC durante o período de condução dos diodos 3 e 4.

Os diodos que conduzem são determinados pela tensão de linha com maior magnitude naquele instante de tempo. Assim, no instante $t = 0$, a tensão Vcb possui a maior magnitude dentre as três tensões de linha e, em consequência, os diodos 5 e 6 estarão conduzindo. No instante 1,389 ms (30°), a tensão Vab torna-se maior que Vcb, causando a condução do diodo 1 e a reversão do diodo 5. Como resultado, a corrente é transferida do diodo 1 para o diodo 6. Como se considera comutações instantâneas, a saída DC para uma carga resistiva é composta pelos picos das seis tensões de linha, conforme mostra a Figura 4.

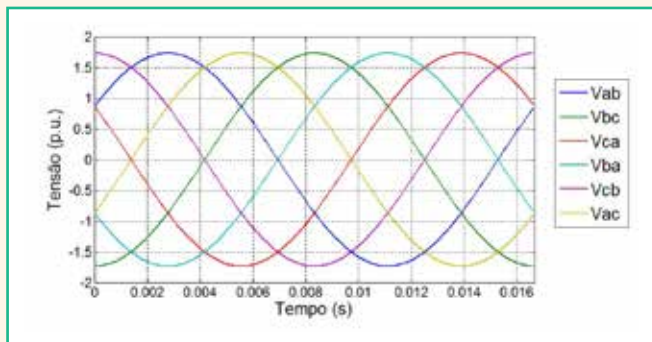


Figura 4 – Forma de onda de uma fonte trifásica.

Considerando-se os tiristores como não ideais e a presença de indutâncias do sistema, haverá queda de tensão na entrada do circuito, e ela será proporcional à corrente média da carga, à indutância de comutação e ao número de pulsos do retificador.

O ângulo de disparo α permite o funcionamento sequencial dos tiristores, ou seja, para um retificador de seis pulsos temos um ângulo de disparo de 30° , com intervalos de 60° entre os disparos. Desta maneira, ocorrem seis comutações em um ciclo, tornando os cortes de tensão periódicos.

O ângulo de comutação μ é definido como o período de duração em que dois tiristores conduzem simultaneamente. Ele depende das indutâncias de comutação e da corrente da carga. Portanto, pode-se concluir que a severidade dos cortes de tensão é determinada pela reatância indutiva e pela intensidade da corrente circulando no conversor.

Normas

A norma mais específica para cortes de tensão (notching) é a IEEE Std 519-1992. Nesta norma são apresentadas as definições do mencionado fenômeno e as suas causas. Além disso, são exibidos os limites de cortes devido a comutações. Esta norma propõe limites quanto à profundidade do corte, à distorção harmônica total (DHT) e à área do corte na tensão de linha no PAC (Ponto de Acoplamento Comum). Os limites são apresentados na Tabela 1 (baseada na tabela 10.2 da norma IEEE 519-1992).

TABELA 1 – LIMITES DE DISTORÇÃO

	Aplicações	Sistemas	Sistemas
	Especiais*	Gerais	Dedicados**
PROFUNDIDADE DO CORTE	10 %	20 %	50 %
DHT (TENSÃO)	3 %	5 %	10 %
ÁREA DO CORTE (AN)**	16.400	22.800	36.500

*Aplicações especiais incluem hospitais e aeroportos.

**Um sistema dedicado é exclusivamente dedicado à carga do conversor.

***Em volt-microsegundo na tensão e corrente nominal.

Observação: O valor de An para sistemas diferentes de 480 V devem ser multiplicados por $V/480$.

Estes limites são recomendados para sistemas de baixa tensão onde a área do corte pode ser medida com um osciloscópio.

Outra norma que faz referência ao estudo dos cortes de tensão é a IEEE Std 1159-2009 [2], cujo foco é estabelecer práticas para o correto monitoramento da qualidade da energia elétrica. Neste documento é feita apenas uma breve menção acerca dos cortes de tensão e estes são explicados de maneira bastante sucinta. Não é estabelecido nenhum limite com relação à profundidade e à área dos cortes.

A Engineering Recommendation G5/4 estabelece que a

profundidade do corte de tensão não deve ultrapassar 15% da tensão de pico nominal da onda e a amplitude de pico das oscilações (que se dão devido à comutação que ocorre entre o início e o fim do corte de tensão) não devem exceder 10% da tensão de pico nominal.

Efeitos dos cortes de tensão

Os efeitos dos cortes de tensão (notching) têm bastante influência em aparelhos eletrônicos, uma vez que estes se encontram no lado de baixa tensão dos sistemas de distribuição. Na verdade, os cortes de tensão introduzem frequências harmônicas e inter-harmônicas superiores às normalmente presentes em sistemas de distribuição. Isso pode provocar falhas no disparo ou na comutação do conversor. Estas frequências podem ultrapassar 3.600 Hz e também se localizar na faixa de rádio frequências (RF) e, portanto, podem ser bastante prejudiciais ao introduzir sinais RF espúrios no sistema. Os efeitos mais comuns causados por estes sinais são interferências em circuitos lógicos ou de comunicação. Por vezes, os cortes de tensão são capazes de sobrecarregar filtros de interferência eletromagnética e circuitos capacitivos de alta frequência.

Outro conhecido efeito de cortes de tensão é a desregulagem causada em aparelhos eletrônicos que utilizam como parâmetro para suas operações temporais o cruzamento do zero (zero crossing) na onda de tensão. Os cortes de tensão podem provocar cruzamentos extras no nível de referência, o que pode culminar em erros de sincronização de frequência. Dessa forma, os controladores eletrônicos do equipamento armazenarão informações de erros na frequência, apesar da fundamental permanecer inalterada. Isso dificultará a identificação correta do problema (notching), uma vez que o aparelho identificará o mesmo como tendo origem em erros de frequência, apesar desta não ter sofrido alteração alguma.

Topologia de UPSs Estáticos

Com a evolução da eletrônica, é cada vez maior a utilização de UPS (Uninterruptible Power Systems) para operação adequada e ininterrupta de sistemas essenciais.

Existem várias topologias distintas de UPS. Todas elas são compostas pela interconexão de quatro componentes: chave de transferência, retificador, bateria e inversor.

Para melhorar o desempenho destes equipamentos contra fenômenos de QEE, são utilizados outros componentes como supressores de surto, filtros de linha e transformadores isoladores.

A utilização de cada topologia deve ser analisada de acordo com o nível de proteção desejado, e o preço em relação às outras topologias.

UPS Passive Standby

Este tipo de UPS possui dois modos de operação: modo normal e modo bateria. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos deste tipo de equipamento.

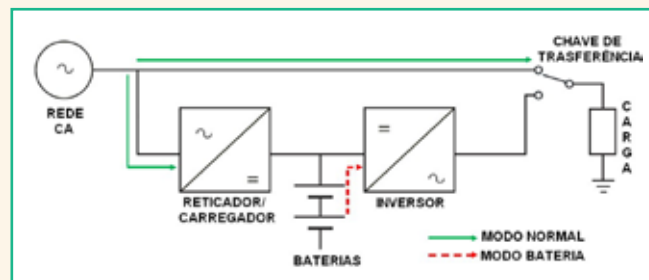


Figura 5 – Diagrama de blocos dos UPSs Passive Standby.

Como pode ser observado na Figura 5, ao funcionar no modo normal, este UPS permite a alimentação da carga diretamente pela rede elétrica, a qual também é responsável por carregar a bateria por meio de um retificador CA/CC.

A passagem do modo de operação normal para o modo bateria ocorre quando a tensão de entrada ultrapassa uma determinada faixa de tolerância ou quando há uma interrupção de energia, fazendo com que o circuito de controle do equipamento acione a chave de transferência para que a carga seja alimentada pela bateria por meio do inversor CC/CA.

As vantagens desta topologia são o projeto simplificado, o baixo custo, o tamanho reduzido e a alta eficiência de transferência de energia quando o UPS opera em modo normal.

As desvantagens são a não regulação de tensão e de frequência, a não isolamento da carga, a onda de saída aproximadamente quadrada, a baixa eficiência no suprimento de cargas não lineares e o tempo de transferência do modo normal para o modo bateria.

Estes equipamentos alimentam cargas normalmente abaixo de 2 kVA com fontes chaveadas que suportam pequenas variações de tensão e frequência.

UPS Linha Interativa

O UPS Linha Interativa possui três modos de operação: modo normal, modo bateria e modo by-pass. A Figura 6 apresenta o diagrama de blocos de um UPS linha interativa.

Pode-se observar na Figura 6 que, ao funcionar no modo normal, este UPS permite a alimentação da carga pela rede elétrica por um condicionador de energia; o qual também é responsável por carregar a bateria através de inversor bidirecional.

A passagem do modo de operação normal para o modo bateria ocorre quando a tensão de entrada ultrapassa uma determinada faixa de tolerância ou quando há uma interrupção de energia, fazendo com que o circuito de controle do equipamento acione a chave de transferência para que a carga seja alimentada pela bateria por meio do inversor bidirecional.

O modo by-pass pode ser acionado manualmente, para

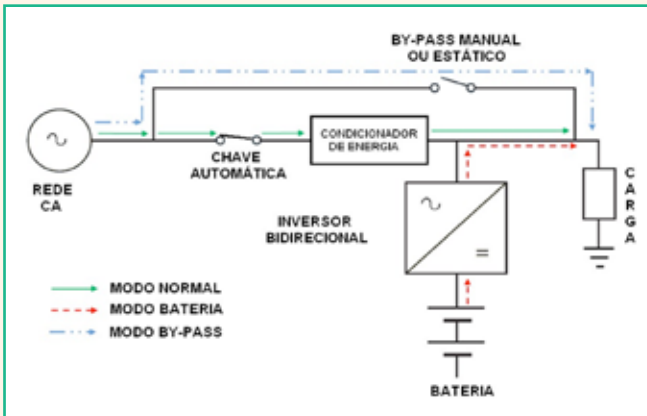


Figura 6 – Diagrama de blocos dos UPSs Linha Interativa.

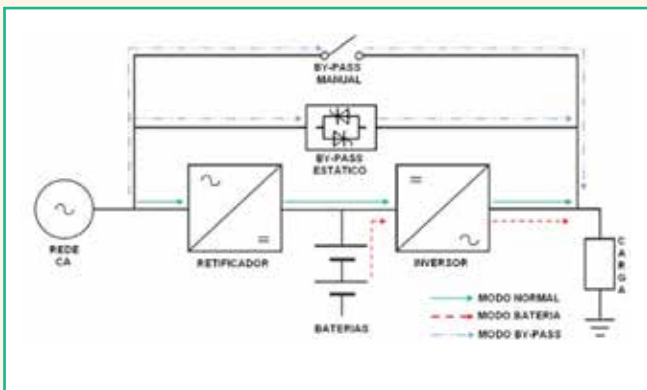


Figura 7 – Diagrama de blocos dos UPS Dupla Conversão

manutenção, ou automaticamente quando o UPS apresentar algum defeito interno ou sobrecarga.

Esta topologia de UPS oferece como vantagens a maior isolamento da carga, um melhor desempenho e regulação de tensão comparada a Passive Standby, dimensões reduzidas e alto rendimento na transferência de energia quando o UPS estiver operando em modo normal.

Já as desvantagens são a limitação da regulação de tensão na saída, a não regulação de frequência, a isolamento limitada da carga, uma baixa eficiência ao suprir cargas não lineares e o tempo de transferência do modo normal para o modo bateria.

Estes equipamentos alimentam cargas de baixa e média potência de até 10 kVA. Não são recomendados para alimentação de cargas sensíveis devido a falhas na proteção e não regulação de frequência.

UPS Dupla Conversão

Comumente conhecido e comercializado como UPS “on line” (apesar de não ser diretamente ligado à rede de energia), este UPS, assim como o de Linha Interativa, possui três modos de operação: modo normal, modo bateria e modo by-pass. A Figura 7 exhibe o diagrama de blocos do UPS Dupla Conversão.

A operação no modo normal ocorre da maneira representada na Figura 7. Observa-se que a energia elétrica é duas vezes

convertida, uma vez que quando atravessa o retificador é convertida de CA para CC e quando atravessa o inversor é convertida de CC para CA. Nota-se também que o inversor encontra-se conectado em série entre a rede elétrica e a carga (principal diferença desta topologia para as demais). A troca do modo de operação normal para o modo bateria ocorre quando a tensão de entrada ultrapassa uma determinada faixa de tolerância ou quando a mesma sofrer uma interrupção. Como a bateria está conectada em paralelo com o barramento CC, a carga não é afetada durante a transferência do modo normal para o modo bateria.

Esta topologia possui uma chave estática by-pass, que opera a transferência automática da carga para a rede elétrica CA em caso de falhas em dispositivos internos, distúrbios transitórios, subtensões ou falta de carga na bateria. A chave by-pass manual é utilizada em casos de manutenção no equipamento.

As vantagens oferecidas por esta topologia são a isolação contra fenômenos de QEE, limites maiores de tensão de entrada, ótima regulação de tensão na saída, excelente regulação de frequência, mudança do modo normal para o modo bateria imperceptível à carga (em caso de interrupção de energia) e transferência para modo by-pass também imperceptível à carga (em caso de defeito no equipamento).

As desvantagens do UPS Dupla Conversão são o alto custo devido à complexidade do projeto, menor eficiência devido aos conversores em série, e estando ausente a chave de transferência estática, o equipamento tem sua confiabilidade comprometida.

Esta topologia é considerada pela norma IEC 62040-3 como a mais completa, por suprir todas as necessidades de cargas sensíveis, como regulação de tensão e de frequência. Estes equipamentos são fabricados para potências acima de 10 kVA.

Avaliação dos UPSs Estáticos

Os ensaios com as topologias de UPSs estáticos apresentadas na seção anterior foram realizados por meio da montagem apresentada na Figura 8.



Figura 8 – Montagem utilizada para avaliação de UPSs estáticos frente aos cortes de tensão (notching).

Na Figura 8, a seta 1 (cor amarela) mostra a fonte geradora de distúrbios da série iX – California Instruments. A seta 2 (cor verde) indica o Sistema de Aquisição de Dados (SAD). A seta 3 (cor azul) indica o UPS analisado, a seta 4 (cor vermelha) a carga variável (década resistiva) em 20%, 50% e 100% da potência nominal do UPS, e a seta 5 (cor laranja) apresenta o computador empregado para programar a fonte de distúrbios e para exibir as formas de ondas da tensão processadas por um programa de processamento de sinais (Matlab®). Com isso, utilizando-se a fonte geradora de distúrbios, foram aplicadas nas entradas das topologias de UPSs as distorções causadas pelos cortes de tensão (notches). Nas entradas e saídas desses equipamentos foi capturada as formas de onda da tensão por meio de um SAD. A Figura 9 mostra a distorção na forma de onda da tensão devido a cortes de tensão (notches), gerada pela fonte de distúrbios.

Cortes de Tensão

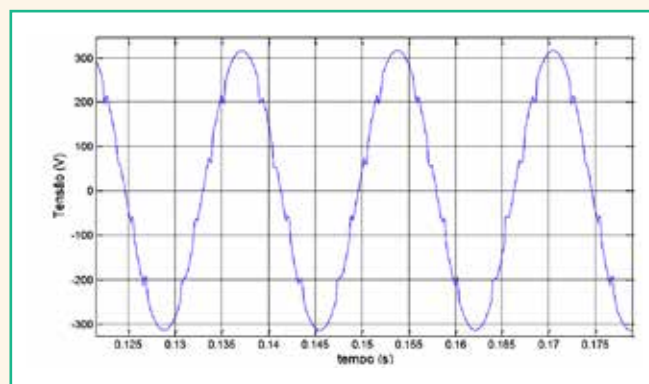


Figura 9 – Forma de onda da tensão distorcida com presença de cortes de tensão.

Da Figura 9 verifica-se que a forma de onda de tensão possui oito cortes de tensão em um ciclo. Esta forma de onda é aplicada nas entradas das topologias de UPSs já mencionadas e comparada com a forma de onda de saída, por meio de figuras capturadas pelo SAD.

As características dos cortes de tensão simulados para cada topologia são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS DOS CORTES DE TENSÃO (NOTCHES)

TOPOLOGIA DE UPS	Ângulos de disparo	Ângulo de comutação	Amplitude do corte
Passive Standby	30°, 60°, 120°, 150°, 210°, 240°, 300° e 330°	10°	10% (16,97 V)
Linha Interativa	30°, 60°, 120°, 150°, 210°, 240°, 300° e 330°	10°	10% (16,97 V)
Dupla Conversão	30°, 60°, 120°, 150°, 210°, 240°, 300° e 330°	10°	10% (31,1 V)

A seguir são apresentados os resultados das simulações efetuadas com as três topologias de UPSs estáticos.

UPS Passive Standby

A Figura 10 apresenta as formas de onda de entrada e saída obtidas nesta topologia.

Cortes de tensão

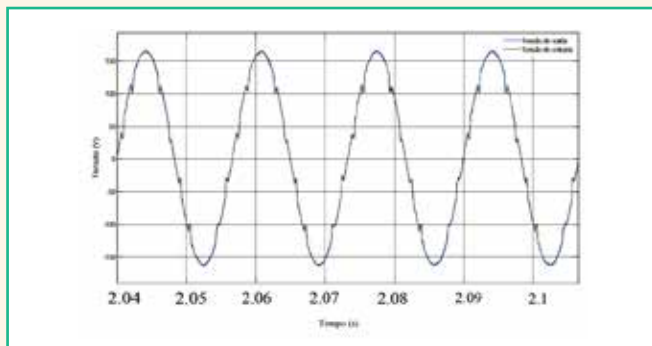


Figura 10 – Forma de onda da tensão de entrada e de saída (UPS Passive Standby).

Ao analisar-se a Figura 10, pode-se observar que as formas de onda da entrada e da saída são iguais. Também são observáveis as características dos cortes de tensão aplicados a este UPS.

Isto evidencia o fato de que este dispositivo não é resiliente aos cortes de tensão. Na verdade, um UPS é considerado resiliente se, diante de um distúrbio elétrico ou um fenômeno de QEE, a tensão entregue à carga estiver dentro dos limites de funcionamento adequado para a mesma, suprindo-a de maneira correta. Caso contrário, a carga irá sofrer consequências como parada ou até mesmo danos irreversíveis. Desta forma, conclui-se que as cargas alimentadas por este equipamento sofrem este fenômeno em sua totalidade, uma vez que o equipamento não é capaz de mitigar a distorção na forma de onda.

UPS Linha Interativa

São apresentadas na Figura 11 as formas de onda de entrada e saída para a topologia Linha Interativa.

Cortes de tensão. Linha Interativa

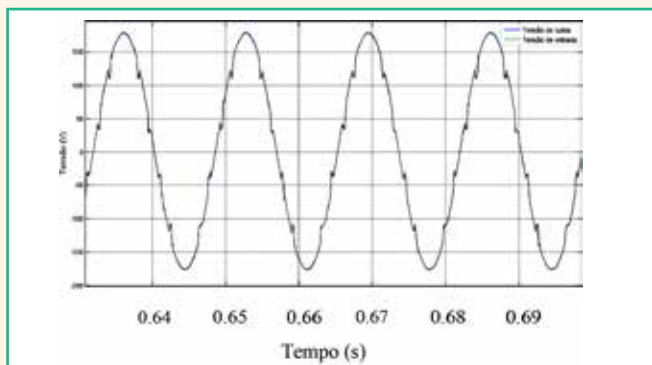


Figura 11 – Forma de onda da tensão de entrada e de saída (UPS Linha Interativa).

Observa-se da Figura 11 que as conclusões a respeito deste equipamento são idênticas às conclusões acerca do UPS Passive Standby, uma vez que este UPS também mostra não ser resiliente aos cortes de tensão.

UPS Dupla Conversão

A Figura 12 representa as formas de entrada e saída medidas na topologia Dupla Conversão.

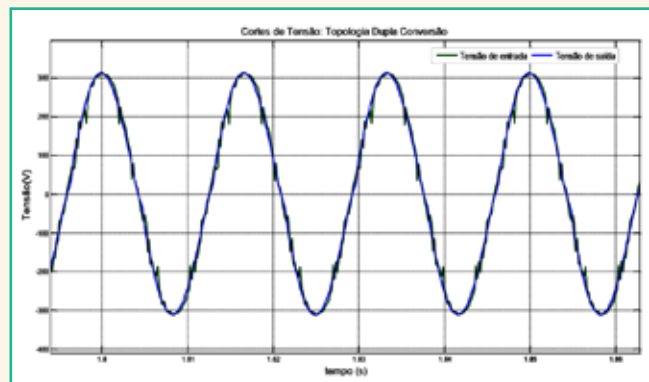


Figura 12 – Forma de onda da tensão de entrada e de saída (UPS Dupla Conversão).

Pode-se verificar por meio da Figura 12, que a forma de onda da tensão de saída é uma senoide perfeita. Portanto, este dispositivo é resiliente aos cortes de tensão. Isto significa que as cargas alimentadas por este equipamento não sofrem este fenômeno, uma vez que o equipamento mitiga a distorção na forma de onda.

Em todos os equipamentos testados, durante momento algum ocorre transferência do modo normal para o modo bateria.

Conclusão

Este documento apresentou as topologias e as principais características de Sistemas Ininterruptos de Energia (UPS) estáticos, mais conhecidos como no breaks. Foram exibidas as principais diferenças e as vantagens e as desvantagens de emprego de cada uma delas.

Este estudo foi realizado devido à necessidade de se avaliar opções para solucionar um fenômeno de Qualidade da Energia Elétrica bastante singular, o corte de tensão (notching). Uma vez que se tem hoje poucos trabalhos sobre o mencionado fenômeno, iniciou-se este trabalho expondo-se as principais causas do distúrbio, apresentando-se alguns conceitos acerca dos retificadores trifásicos com chaveamento por tiristores, e os efeitos do notching sobre algumas cargas. Baseando-se na principal norma a respeito do tema (IEEE 519-1992), foram exibidos os limites estabelecidos para os principais parâmetros dos cortes de tensão (notches).

Com a análise dos UPSs Estático, foi avaliada a

capacidade de cada topologia de mitigar o fenômeno de cortes de tensão (notching). Verificou-se que apenas o UPS Dupla Conversão é capaz de eliminar os cortes de tensão. Isso ocorre devido à sua topologia, que retifica e inverte a onda de tensão em seu modo normal de operação, desconstruindo a forma de onda com distúrbios e reconstruindo-a com características próximas às de um sinal senoidal ideal. Tal procedimento elimina os fenômenos indesejados e faz com que o sinal de saída tenha uma ótima qualidade.

Referências

IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, Nova York, EUA.

IEEE Std 1159-2009, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE, Nova York, EUA.

Engineering Recommendation G5/4, "Planning Levels for Harmonic Voltage Distortion and the Connection of non-linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in the United Kingdom", 2001.

BARROS, J.; APRAIZ, M. de; DIEGO, R. I. "Voltage notch detection and analysis using wavelets". IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, jul. 2008.

HIBBARD, J. F.; LOWENSTEIN, M. Z. "Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits Using HarmonicGuard® Passive Filters".

Controlled Power Company, "UK #21, Line Notching Attenuation", Michigan, EUA, maio 1998.

TANG, L.; MCCGRANAGHAN, M.; FERRARO, R.; MORGANSON, S.; HUNT, B. "Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short Circuit Capacities", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 3, p. 1.444-1.453, jul. 1996.

CONÇALVES, F. D. "Resposta de Sistemas Ininterruptos de Energia frente a fenômenos de Qualidade da Energia", Distrito Federal, Brasil, out. 2008.

POMILIO, J. A. "Eletrônica de Potência", FEEC 01/98, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, fev. 1998.

JESUS, N. C. et al. "Análise da influência de cargas não lineares: avaliação dos efeitos e limites de cortes de tensão (voltage notching)", V SBQEE, Sergipe, Brasil, ago. 2003.

*Fabrício Douglas Gonçalves, Anésio de Leles Ferreira Filho, Felipe Tadeu Stemler, Luiz Valadão e Marcelo Leite Freire são do Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte - Brasília (DF) e do Departamento de engenharia elétrica da Universidade de Brasília (DF).

Continua na próxima edição

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