

Índice

Harmónicas	2
Definição, origem e tipos de harmónicas	2
Valores característicos de harmónicas	5
Efeitos das harmónicas	7
Eliminação de harmónicas	11
Estratégias contra harmónicas	11
Viver com harmónicas	12
Soluções Schneider Electric para eliminar harmónicas	13
AccuSine	
Condicionadores activos de harmónicas	14
Procedimento para implementar condicionamento activo	21

Definição, origem e tipos de harmónicas

Harmónicas

Harmónicas são correntes ou tensões sinusoidais com uma frequência que é um múltiplo inteiro (k) da frequência do sistema de distribuição, designado por frequência fundamental (50 ou 60 Hz).

Quando combinadas, respectivamente, com a corrente ou tensão sinusoidal fundamental, as harmónicas distorcem a forma de onda da corrente ou da tensão (ver fig. 3.1).

Harmónicas são geralmente identificadas como H_k , em que k é a ordem da harmónica.

- I_{Hk} ou U_{Hk} indicam o tipo de harmónica (corrente ou tensão).
- I_{H1} ou U_{H1} designa a corrente ou tensão sinusoidal a 50 ou 60 Hz que existe quando não existem harmónicas (a corrente ou tensão fundamental).

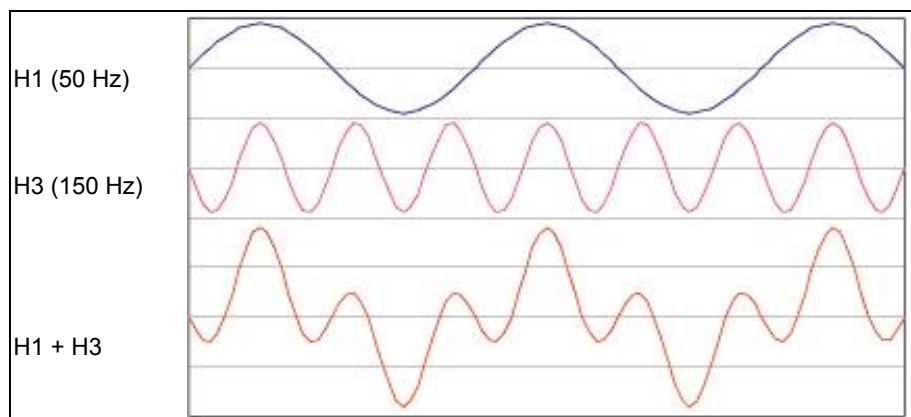


Fig. 3.1. Distorção de H_1 (a fundamental) por H_3 (harmónica de terceira ordem).

Cargas não lineares são a causa

Equipamento que implementa sistemas electrónicos de alimentação é a principal causa das harmónicas. Para alimentar o sistema electrónico com alimentação CC, o equipamento tem um sistema de comutação de alimentação de energia com um rectificador na entrada que absorve correntes harmónicas.

Exemplos deste equipamento são computadores, controladores de velocidade variável, etc.

Outras cargas distorcem a corrente devido ao seu princípio de funcionamento e também causam harmónicas.

Destas são exemplo lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga, máquinas de soldar e dispositivos com um núcleo magnético que pode estar saturado.

☞ Todas as cargas que distorcem a corrente sinusoidal normal causam harmónicas e são designadas por cargas não lineares.



Fig. 3.2. Exemplos de cargas não lineares que causam harmónicas.

Cargas lineares e não lineares

A energia de um utilitário fornece tensão sinusoidal de 50/60 Hz às cargas. A forma de onda da corrente fornecida pela fonte em resposta às necessidades da carga depende do tipo de carga.

Cargas lineares

A corrente absorvida é sinusoidal com a mesma frequência que a tensão. A corrente pode ser deslocada (ângulo ϕ) em relação à tensão.

- A lei de Ohm define uma relação linear entre a tensão e corrente ($U = ZI$) com um coeficiente constante, a impedância da carga. A relação entre a corrente e a tensão é linear.

São exemplos, as lâmpadas de iluminação padrão, unidades de aquecimento, cargas resistivas, motores, transformadores.

- Este tipo de carga não contém, componentes electrónicos activos, apenas resistências (R), indutores (L) e condensadores (C).

Cargas não lineares

- A corrente absorvida pela carga é periódica mas não sinusoidal. A forma de onda da corrente é distorcida por correntes harmônicas.
- A lei de Ohm que define a relação entre a tensão total e a corrente (1), deixa de ser válida porque a impedância da carga varia ao longo de um período (ver fig. 3.3). A relação entre a corrente e a tensão não é linear.
- A corrente absorvida pela carga é, de facto, a combinação de:

- uma corrente sinusoidal denominada a fundamental, à frequência de 50 ou 60 Hz. Harmônicas, que são correntes sinusoides com uma amplitude inferior da fundamental, mas a uma frequência que é múltipla da fundamental e que define a ordem harmónica (por exemplo, a Terceira ordem harmónica tem uma frequência 3 x 50 Hz (or 60 Hz)).

(1) A lei de Ohm aplica-se a cada tensão e corrente da mesma ordem harmónica, $U_k = Z_k I_k$, em que Z_k é a impedância de carga para a ordem em causa, mas já não é válida para a tensão ou corrente total.

→ Cargas lineares, cargas não lineares, consultar Cap. 1 p. 11 "Qualidade da potência da UPS".

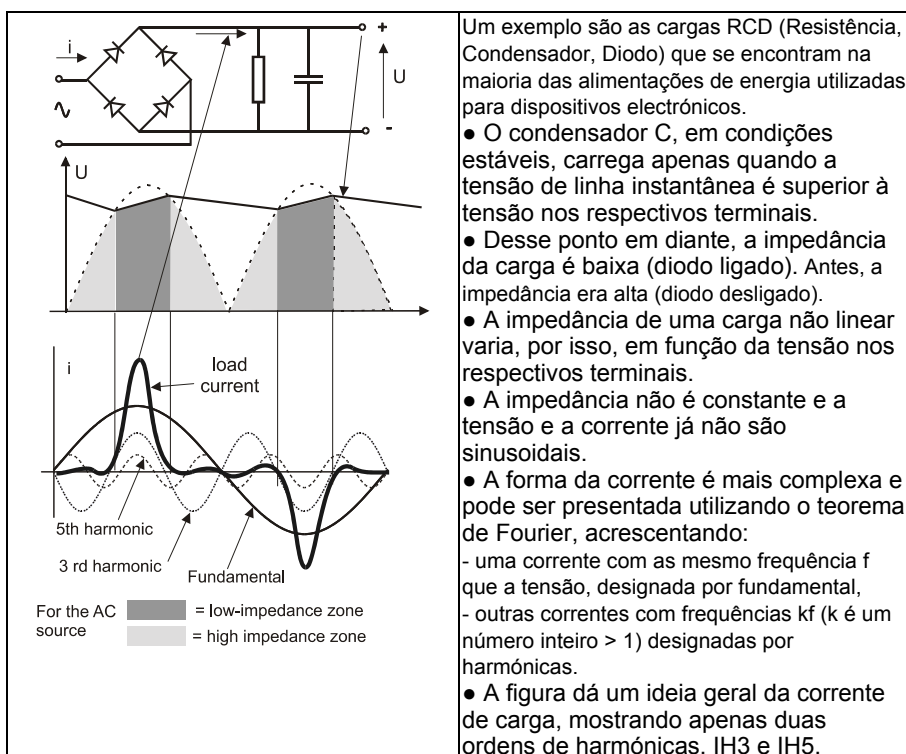


Fig. 3,3. Tensão e corrente para cargas não lineares

Tipos de harmônicas e aspectos específicos de harmônicas de sequência zero

Tipos de harmônicas

Cargas não lineares causam três tipos de correntes harmônicas, todas em ordens ímpares (porque a sinusoidal é uma função "ímpar").

- Harmônicas H7 - H13 - : sequência positiva.
- Harmônicas H5 - H15 - : sequência negativa.
- Harmônicas H3 - H9 - : sequência zero.

Aspectos específicos de harmônicas de sequência zero (H3 e múltiplos)

As correntes harmônicas de sequência zero (H3 e múltiplos ímpares, que se escreve $3(2k+1)$ em que k é um número inteiro) em sistemas trifásicos, acumulam no condutor neutro.

Isto acontece porque a respectiva ordem $3(2k+1)$ é um múltiplo do número de fases (3), o que significa que coincidem com a deslocação (um terço de um período) das correntes fásicas.

A Figura 3.4 ilustra este fenómeno ao longo de um período. As correntes das três fases estão deslocadas um terço de um período ($T/3$), isto é, as respectivas harmónicas I_{H3} estão em fase e os valores instantâneos acumulam.

Consequentemente:

- Quando não existem harmónicas, a corrente no neutro é igual a zero:

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

- Quando existem harmónicas, a corrente no neutro é igual a:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 3 I_{H3}$$

è, por isso, necessário prestar especial atenção a este tipo de harmónicas em instalações com um neutro distribuído (aplicações comerciais e de infra-estruturas).

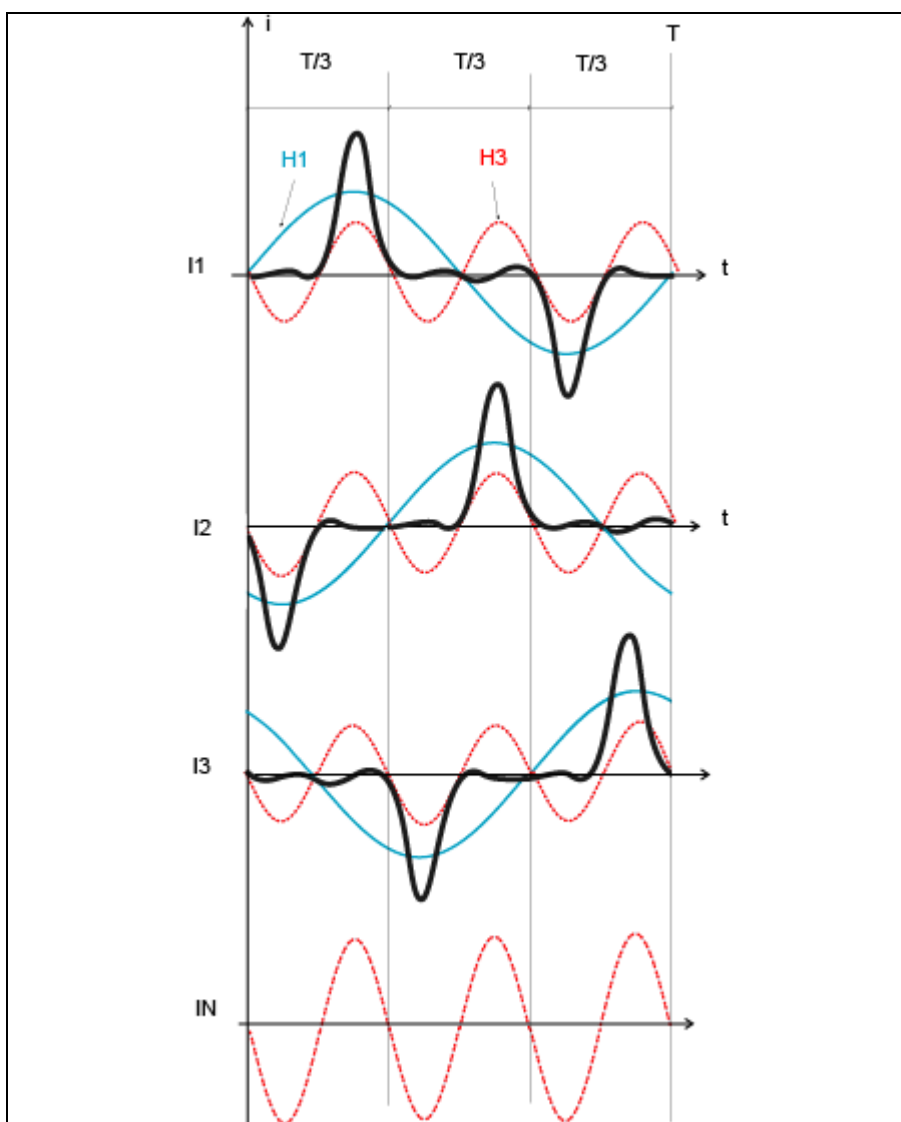


Fig. 3.4. As harmónicas de terceira ordem e respectivos múltiplos acumulam no neutro.

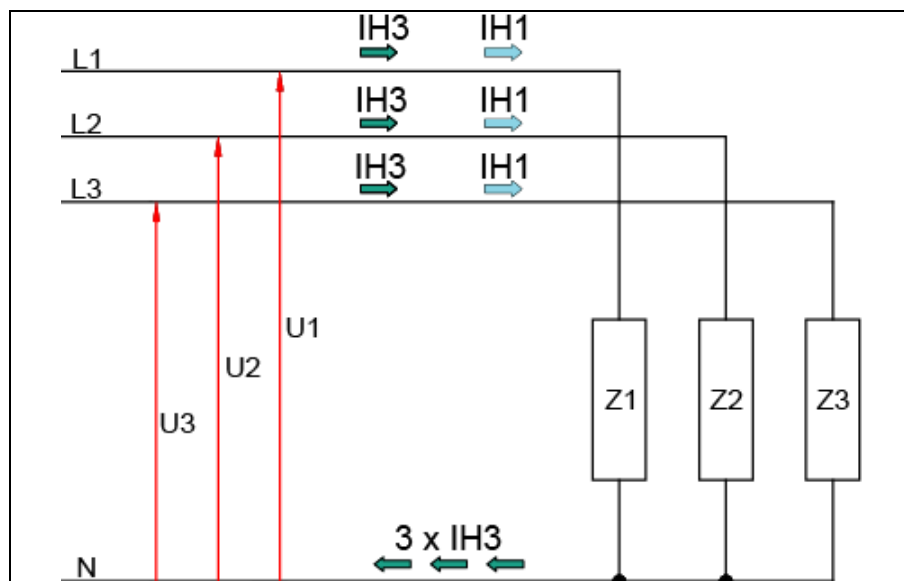
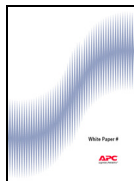


Fig. 3.5. Quando existem harmónicas H3 e respectivos múltiplos ímpares, a corrente no neutro já não é igual a zero, é a soma das harmónicas de sequência zero.

Valores característicos de harmónicas

See WP 17 →



A análise harmónica de uma corrente não linear consiste em determinar:

- as ordens harmónicas presentes na corrente,
- a importância relativa de cada ordem de harmónicas.

Abaixo encontram-se alguns valores harmónicos característicos e as relações fundamentais utilizadas na análise harmónica.

→ Para mais informações sobre harmónicas, consultar o Cap. 5 e as explicações na Nota de aplicação nº 17 "Compreender o factor de potência, o factor de crista e o factor de sobre-tensão".

Valores Rms das harmónicas

É possível medir o valor rms de cada ordem de harmónicas porque as várias correntes harmónicas são sinusoidais mas com diferentes frequências que são múltiplos da frequência fundamental.

- IH1 é o componente fundamental (50 ou 60 Hz).
- IHk é o componente harmónico em que k é a ordem da harmónica (k vezes 50 ou 60 Hz).

A análise harmónica é utilizada para determinar os valores.

Corrente rms total

$$I_{rms} = \sqrt{IH_1^2 + IH_2^2 + IH_3^2 + \dots + IH_k^2 + \dots}$$

Harmónicas individuais

Cada harmónica é expressa sob a forma de uma percentagem, isto é, a proporção do seu valor rms relativamente ao valor rms da fundamental. A proporção é o nível da harmónica individual.

$$Hk\% = \text{distorção da harmónica } k = 100 \frac{IH_k}{IH_1}$$

Distorção harmónica da tensão e corrente

As cargas não lineares causam harmónicas da tensão e corrente. Isto dá-se porque para cada harmónica de corrente de carga existe uma harmónica de tensão de alimentação com a mesma frequência. Em resultado, a tensão também é distorcida pelas harmónicas.

A distorção de um senóide é apresentada como uma percentagem.

$$THD^* \% = \text{distorção total} = 100 \frac{\text{rms value of all harmonics}}{\text{rms value of fundamental}}$$

* Distorção Harmónica Total.

Os seguintes valores estão definidos:

- TDHU % para a tensão, com base nas harmónicas de tensão,

- **TDHU % para a corrente, com base nas harmónicas de corrente,**
O THDI (ou o THDU utilizando os valores UHk) é medida utilizando a equação:

$$\text{THDI \%} = 100 \frac{\sqrt{I_{H2}^2 + I_{H3}^2 + I_{H4}^2 + \dots + I_{Hk}^2 + \dots}}{I_{H1}}$$

Factor de crista

O factor de crista (Fc), usado para caracterizar a forma do sinal (corrente ou tensão) é a proporção entre o valor de pico e o valor rms.

$$F_c = \frac{\text{peak value}}{\text{rms value}}$$

Abaixo encontram-se os valores normais para diferentes cargas:

- **carga linear:** $F_c = \sqrt{2} = 1,414$
- **estrutura principal:** $F_c = 2$ a $2,5$
- **microcomputadores:** $F_c = 2$ a 3 .

Espectro da corrente harmónica

Definir o espectro de uma corrente harmónica consiste em determinar a forma de onda da corrente e as harmónicas individuais, bem como determinados valores como THDI e Fc.

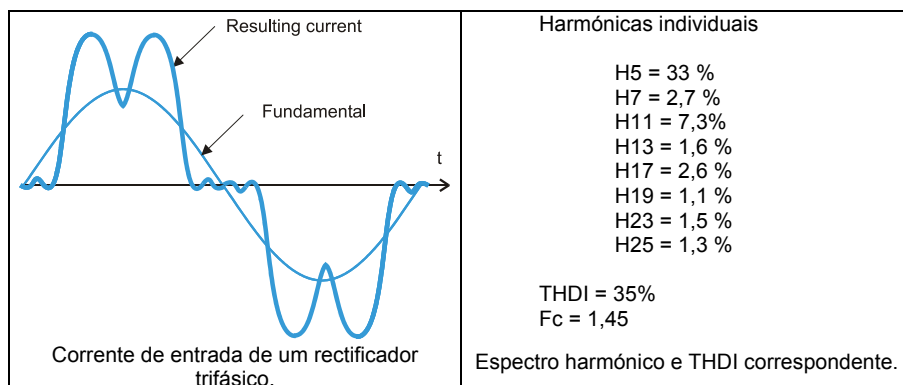


Fig. 3.6. O espectro harmónico da corrente absorvida por uma carga não linear

Factor de potência

Factor de potência

O factor de potência é a proporção entre a potência activa (kW) e a potência aparente S (kVA) nos terminais de uma dada carga não linear.

$$\lambda = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})}$$

Não é a deslocação da fase entre a tensão e a corrente porque estas já não são sinusoidais.

Deslocação entre a corrente e a tensão fundamentais

A deslocação da fase φ_1 entre a corrente e a tensão fundamentais, ambas sinusoidais, pode ser definida como:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1(\text{kW})}{S_1(\text{kVA})}$$

em que P1 e S1 são a potência activa e aparente, respectivamente, da fundamental.

Factor de distorção

O factor de distorção é definido como:

$$v = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \text{THDI}^2}} = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1} \quad (\text{conforme definido pela}$$

norma IEC 60146).

Quando não existem harmónicas, este factor é igual a 1 e o factor de potência é simplesmente o $\cos \varphi$.

Potência

Carga linear

Nos terminais de uma carga linear trifásica equilibrada, alimentada com uma tensão U fase-a-fase e uma corrente I , em que a deslocação entre U e I é φ , os valores de potência são:

- **P aparente** = $S = UI$, em kVA,
- **P activa** = $S \cos \varphi$, em kW,
- **P reactiva** = $Q = S \sin \varphi$, em kVAr,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Carga não linear

Nos terminais de uma carga não linear, a equação P é muito mais complexa porque U e I contêm harmónicas. Contudo, pode ser expressa simplesmente como:

- **P = $S \lambda$** (λ = factor de potência)

Para os fundamentais U_1 e I_1 , deslocados por φ_1 :

- **P fundamental aparente** = $S_1 = U_1 I_1 \sqrt{3}$
- **P fundamental activa** = $P_1 = S_1 \cos \varphi_1$
- **P fundamental reactiva** $Q_1 = S_1 \sin \varphi_1$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad \text{em que } D \text{ é o factor de distorção, devido às harmónicas.}$$

Efeitos das harmónicas

Perda de potência aparente

A Figura 3.7 mostra que o produto de uma tensão na frequência fundamental sem harmónicas, multiplicada por uma corrente harmónica terceira é zero no fim de um período. Isto é verdade seja qual for a fase e a ordem da harmónica.

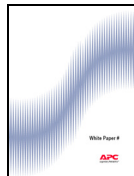
Isto é expresso pela relação $S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}$

Uma parte da potência aparente é consumida pelas harmónicas, sem produzir qualquer efeito.

- **Em máquinas rotativas, o binário de motor resultante é igual a zero e apenas existe um binário pulsátil parasita, criando vibrações.**
- **A única potência activa presente durante uma quebra de tensão é o aquecimento produzido pela corrente harmónica (I_{hk}) num condutor com uma resistência r ($r I_{hk}^2$).**

→ Ver Nota de aplicação n.º 26 "Perigos de sobrecargas de harmónicas e neutro" para mais informações.

See WP 26 →



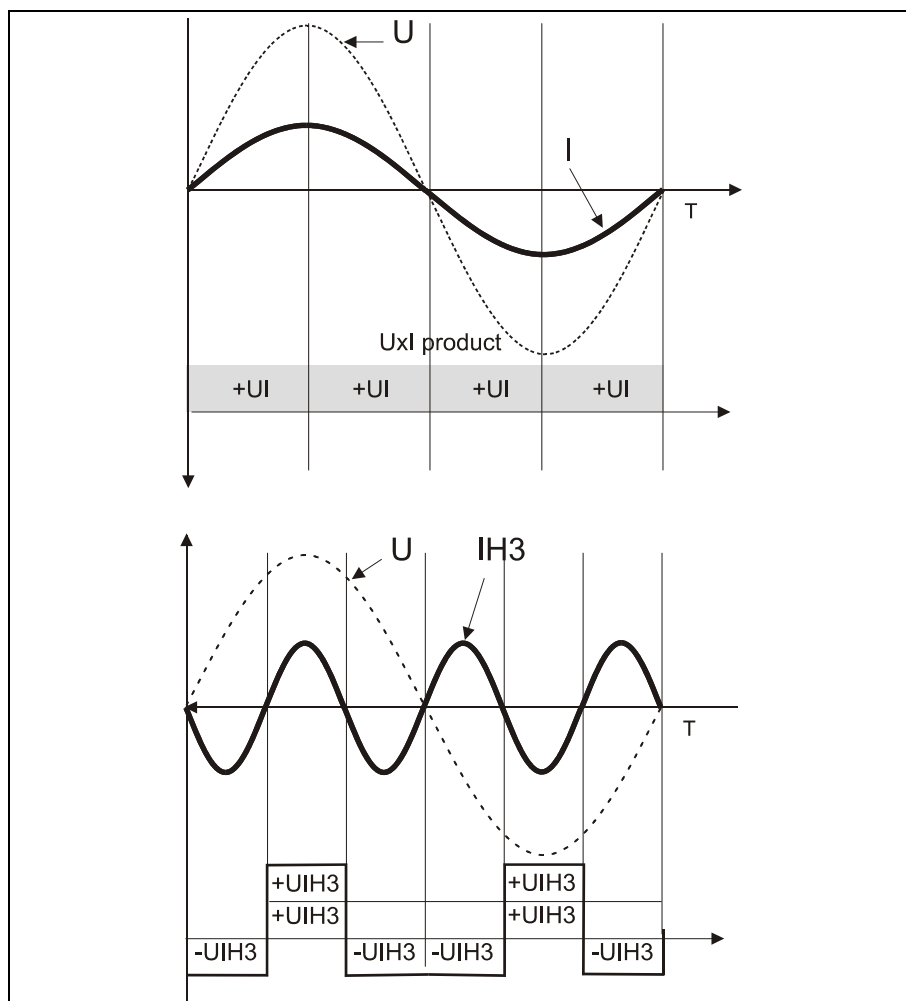


Fig. 3.7. Produtos de $U \times I$ para fundamentais (superior) e para fundamentais com harmónicas (inferior).

Subida de temperatura em cabos

A subida da temperatura em cabos é expressa como:

$$\text{Perdas} = r \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2$$

Corrente no neutro

Todas as harmónicas de terceira ordem e respectivos múltiplos ímpares acumulam no neutro (ver fig. 3.8). A corrente no neutro pode atingir 1,7 vezes a verificada nas fases.

Consequências

Perdas significativas no neutro

I_{neutral}^2 = aumento da temperatura no neutro.

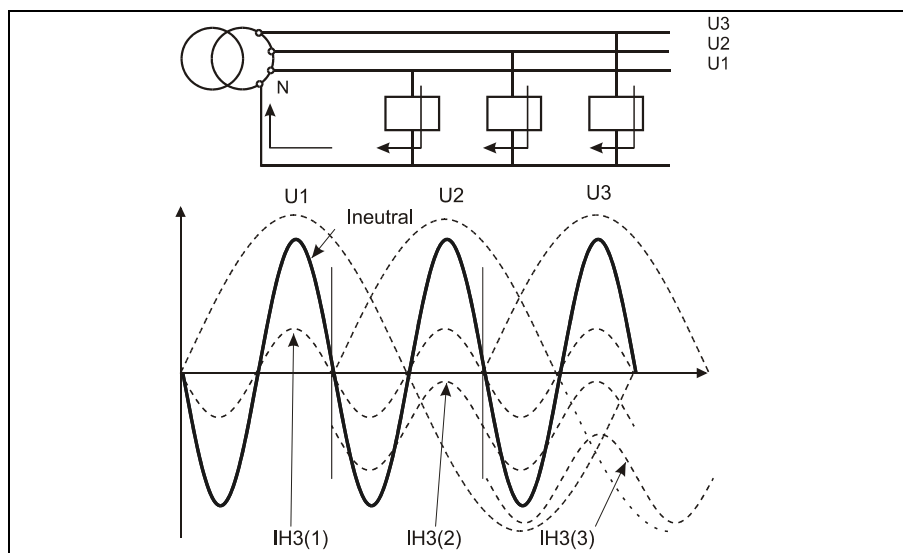


Fig. 3,8. As harmónicas de terceira ordem e respectivos múltiplos acumulam no neutro.

Cargas auto-poluentes

A distorção da corrente THDI, causada pela carga, resulta em distorção da tensão THDU causada pelas correntes harmónicas que fluem através das várias impedâncias provenientes da fonte a jusante. A Figura 3.9 mostra as várias formas de distorção ao longo de uma instalação eléctrica comum.

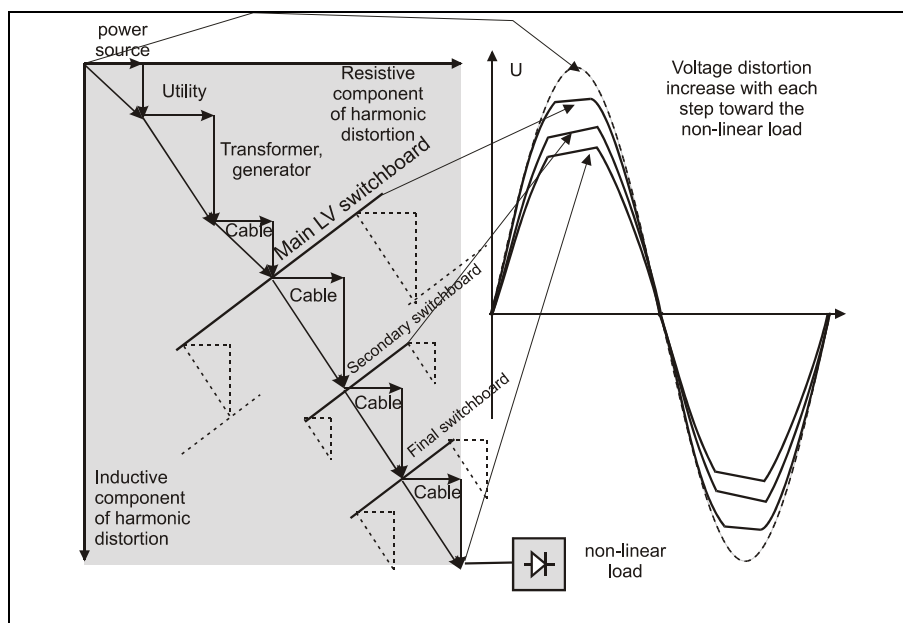


Fig. 3,9. Efeitos das harmónicas pelas instalações.

Risco de avaria do condensador

O valor de uma corrente num condensador é igual a:

$$I = U C \omega$$

Para uma corrente harmónica de ordem k, a frequência angular é igual a $\omega = 2\pi k f$ e a corrente é igual a:

$$I = 2\pi k f U C$$

em que f = a frequência fundamental e k = a ordem da harmónica.

Segue-se que o valor a corrente aumenta com k.

Além disso, para uma frequência harmónica, também poderá haver ressonância (1) do condensador (capacitância C) com a indutância equivalente (L) da fonte (transformador, essencialmente indutiva) em paralelo com a das outras cargas fornecidas. O circuito ressonante (ver fig. 3.10) amplifica significativamente a corrente harmónica da ordem correspondente, piorando, assim, a situação para o condensador.

(1) É este o caso se, para uma ordem de harmónicas k, com uma frequência $f_k = k \times 50$ (ou 60) Hz, $LC\omega_k^2 = 1$, em que $\omega = 2\pi f_k$.

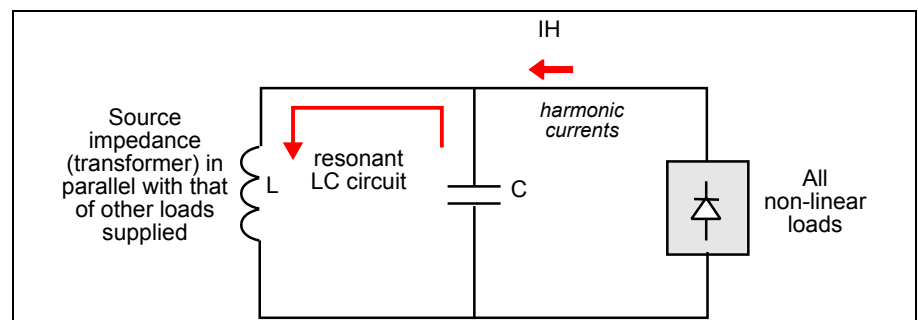


Fig. 3,10. Efeitos das harmónicas com condensadores, risco de ressonância.

Consequências

- Risco de avaria do condensador.
- Risco de ressonância devido à presença dos indutores.

Têm de ser respeitadas determinadas limitações:

- $U_{\text{máx}} = 1,1 U_n$
- $I_{\text{máx}} = 1,3 I_n$
- THDU máx = 8%
- Selecção do tipo de condensador, dependendo da situação, ou seja, padrão, classe h (isolamento reforçado), com indutores de harmónicas.

Redução da potência nominal de transformadores

Combinam-se diversos efeitos:

- devido ao efeito pele, a resistência do enrolamento de um transformador aumenta com a ordem das harmónicas.
- perdas devido a histerese são proporcionais à frequência,
- perdas devido a correntes Foucault são proporcionais ao quadrado da frequência.

Consequências

Em conformidade com a norma NFC 52-114, os transformadores têm de sofrer uma redução da potência nominal, aplicando-se um coeficiente k à potência nominal, de forma a que:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{\infty} H_n^2 n^{1,6}}}$$

Esta é uma equação empírica:

Outras normas nacionais recomendam a redução de potência utilizando um factor k similar que depende do país (por ex., BS 7821 Parte 4, IEE 1100-1992).

Exemplo

Um transformador de 1000 kVA alimenta uma ponte rectificadores de seis impulsos que absorve as seguintes harmónicas:

H5 = 25%, H7 = 14%, H11 = 9%, H13 = 8%.

O coeficiente de redução de potência é k = 0,91.

A potência aparente do transformador é, por isso, 910 kVA.

Risco de perturbação de geradores

De maneira semelhante aos transformadores, os geradores sofrem maiores perdas devido a histerese e correntes Foucault.

- **A reactância do subtransitário $X''D$ aumenta como uma função da frequência.**
- **O campo rotativo "harmónico" atinge o rotor a uma frequência diferente da frequência de sincronismo (50 ou 60 Hz).**

Consequências

- **Criação de um binário parasita, resultando em menor eficiência da conversão de mecânico para eléctrico.**
- **Perdas adicionais nos enrolamentos do indutor e do amortecedor do rotor.**
- **Presença de vibração e ruído anómalo.**

Perdas em motores assíncronos

As harmónicas produzem os seguintes efeitos em motores assíncronos:

- **aumentos nas perdas de Joule e ferro (perdas do estator),**
- **binário pulsátil (perdas do rotor com uma quebra na eficiência mecânica).**

☞ *O THDU tem de ser inferior a 10% para limitar estes fenómenos.*

Efeitos sobre outro equipamento

As harmónicas também podem causar distúrbios no seguinte equipamento:

- **unidades de disparo não rms, resultando em disparo anómalo dos disjuntores de circuitos,**
- **centrais telefónicas automáticas,**
- **alarmes,**
- **equipamento electrónico sensível,**
- **sistemas de controlo remoto.**

Efeito em sistemas de UPS recentes

Os sistemas de UPS modernos possuem frequências de corte elevadas (PWM) e uma impedância de saída muito baixa (equivalente a um transformador cinco vezes mais potente).

Quando confrontadas com cargas não lineares, estas UPSs proporcionam:

- **perdas limitadas,**
- **funcionamento com limitação de corrente,**
- **distorção de tensão muito baixa (THDU < 3%).**

☞ *As UPSs são um excelente meio de alimentar cargas não lineares.*

Conclusão

As harmónicas podem ter efeitos nocivos em instalações eléctricas e na qualidade do funcionamento.

É por esse motivo que as normas internacionais estipulam níveis de compatibilidade com harmónicas cada vez mais precisos para o equipamento e determinam limites para o conteúdo de harmónicas em sistemas de distribuição públicos.

➔ *Normas sobre harmónicas, consultar o Cap. 5, p. 28 "Normas para UPS".*

Nas páginas seguintes encontra-se uma apresentação das diversas estratégias relativas a harmónicas e a utilidade dos condicionadores activos de harmónicas AccuSine.

Existem duas estratégias:

- **aceitar e viver com harmónicas, o que significa, essencialmente, que é necessário sobredimensionar o equipamento para ter em conta os efeitos das harmónicas,**
- **eliminar as harmónicas, no todo ou em parte, utilizando filtros ou condicionares activos de harmónicas.**

Estratégias contra harmónicas

Viver com harmónicas

Sobredimensionar o equipamento

Tendo em conta que os efeitos negativos das correntes harmónicas aumentam com a impedância cumulativa de cabos e fontes, a solução óbvia é limitar a impedância total de forma a reduzir tanto a distorção da tensão como a subida da temperatura. A Figura 3.11 mostra os resultados quando as secções transversais dos cabos e a potência nominal fonte são duplicados.

dado que o THDU depende essencialmente do componente indutivo e, desta forma, do comprimento dos cabos, fica claro que a solução não é muito eficaz e tem como resultado limitar simplesmente a subida da temperatura.

A Figura 3.12 mostra que, para as correntes harmónicas mais fortes (H3 a H7), a proporção $L\omega/R$ é igual a 1 para os cabos com uma secção transversal de 36 mm². Consequentemente, acima de 36 mm², é necessário reduzir a impedância, utilizando um cabo de núcleos múltiplos para criar impedâncias paralelas.

➔ Para Centros de dados, consultar “Correntes harmónicas no centro de dados: Um estudo de caso”.

See WP 38 ➔

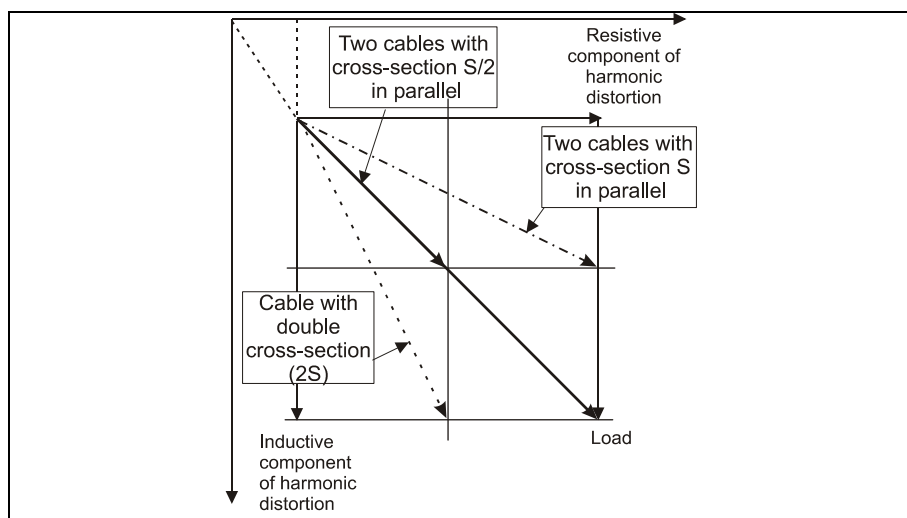
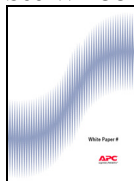


Fig. 3.11. Aumentar as secções transversais dos cabos para limitar a distorção e as perdas.

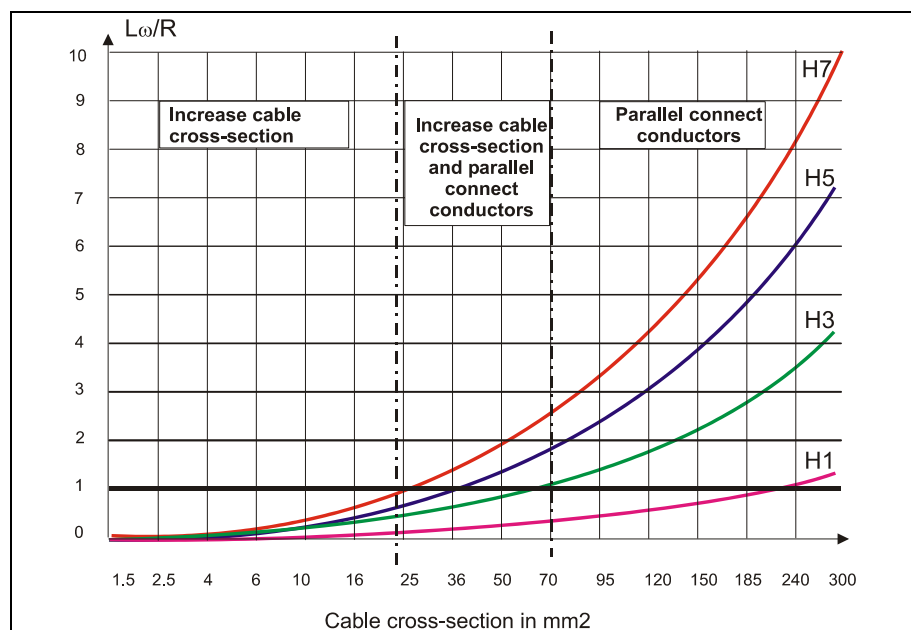


Fig. 3.12. Influência da secção transversal do cabo em $L\omega/R$.

Soluções Schneider Electric para eliminar harmónicas

Existem tipos diferentes de soluções para eliminar as harmónicas.

➔ *Filtros, ver Cap.1 p. 27 “ Seleção de um filtro”.*

Filtros passivos

Filtros passivos LC são sintonizados para a frequência que requer eliminação ou atenuam uma banda de frequências. Sistemas de recombinação de harmónicas (ponte dupla, comutação de fase) também podem ser agrupados nesta categoria.

• **A pedido, a Schneider Electric pode integrar este tipo de filtro nas suas soluções.**

Os filtros passivos têm duas desvantagens principais:

- **a eliminação de harmónicas é eficaz apenas para uma instalação específica, ou seja, a adição ou remoção de cargas pode perturbar o sistema de filtragem,**
- **é frequentemente difícil implementá-los numa instalação já existente.**

Filtros activos/condicionadores activos de harmónicas

Os filtros activos, também designados por condicionadores activos de harmónicas, como os AccuSine, cancelam harmónicas injectando correntes harmónicas iguais onde estas surgem. este tipo de filtro reage em tempo real ((ou seja, activamente) às harmónicas existentes para as eliminar. Mais eficazes e flexíveis que os filtros passivos, evitam as desvantagens destes e, em comparação, constituem uma solução que:

- **proporciona um melhor desempenho (a total eliminação das harmónicas é possível, até à 50ª ordem),**
- **é flexível, adaptável (a acção pode ser configurada) e reutilizável.**

Tabela que resume as possíveis estratégias contra harmónicas

Estratégia	Vantagens	Desvantagens	Soluções Schneider Electric
Viver com harmónicas			
Aumentar as potências nominais de fontes e/ou a secção transversal dos cabos	Redução no THDU de alimentação reduzindo a fonte de impedância. Redução em perdas de Joules.	Difícil nas soluções existentes. Solução dispendiosa, limitada à redução do componente resistivo para secções transversais pequenas (a indutância mantém-se constante). Requer cabos paralelos para secções transversais grandes. Não evita distúrbios a montante da instalação. Não está em conformidade com as normas.	
Alimentação especial para cargas não lineares.	Limita distúrbios em cargas próximas por meio de desacoplamento.	O mesmo que acima.	
Eliminar parcialmente as harmónicas			
Filtros passivos sintonizados.	Solução simples.	Apenas para uma ou duas ordens de harmónicas. Filtros de banda larga não são muito eficazes. Possibilidade de ressonância. Requer trabalho de planeamento dispendioso.	Gama de filtros passivos Incluindo soluções de ponte dupla e comutação de fase
Indutores a montante das cargas não lineares.	Redução em correntes harmónicas. Limita os efeitos de sobretensões transitórias.	Aumento em THDU nos terminais da carga.	
Transformadores especiais.		Eliminação de apenas determinadas ordens harmónicas. Construção não padronizada.	
Eliminar completamente as harmónicas			
Condicionadores activos de harmónicas.	Solução simples e flexível.	É possível a eliminação total de todas as harmónicas (até à 25ª ordem), sistema adaptável (acção configurada) e reutilizável.	AccuSine condicionadores activos

AccuSine Condicionadores activos de harmónicas

Características dos AccuSine

Condicionadores activos de harmónicas AccuSine

Os condicionadores activos de harmónicas **AccuSine** constituem uma abordagem mais geral aos problemas das harmónicas. Estes filtros activos não são apenas para uma unidade UPS mas são concebidos para eliminar as harmónicas em toda a instalação.

AccuSine é particularmente adequado a aplicações industriais e infra-estruturas de média potência, proporcionando condicionamento de correntes de 20 a 480 A em sistemas trifásicos com um neutro.

Estas soluções são apresentadas na secção que se segue.

A tabela abaixo resume as principais características.

Gama	Nível de potência	Sistemas de 50/60 Hz	Características principais	Aplicações
AccuSine	20 a 480 A	380 a 415 V 3 Ph+N e 3 Ph	<ul style="list-style-type: none"> Filtragem até H25 Condicionamento digital activo com: <ul style="list-style-type: none"> - análise e condicionamento de ordens individuais - tempo de resposta de 40 ms para flutuações de carga 	Filtragem de sistemas comerciais, de infra-estruturas e industriais de média potência, 3Ph+N e 3 Ph, cargas monofásicas

Vantagens do condicionamento activo de harmónicas AccuSine

- Solução de banda larga para H2 a H25 com condicionamento individual de cada fase.
- É possível seleccionar ordens individuais de harmónicas para condicionamento.
- Sem risco de sobrecargas, limites de condicionamento à máxima potência nominal, mesmo que a potência de carga ultrapasse a nominal.
- Adapta-se automaticamente a todos os tipos carga, monofásica e trifásica.
- Compatível com todos os esquemas de ligação à terra do sistema.
- Correção do factor de potência.
- Económico, quando as harmónicas são cortadas ao meio, as perdas são reduzidas em quatro.
- Pode ser reutilizado noutras instalações.
- Actualizável com unidades ligadas em paralelo.
- Muito compacto.
- Instalação simples, com transformadores de corrente a montante ou a jusante.

Princípio de funcionamento

A fonte alimenta exclusivamente o componente fundamental (IF) da corrente de carga.

O condicionador activo mede, em tempo real, as harmónicas (IH) absorvidas pela carga e alimenta-as.

A montante do ponto A, onde o condicionador está ligado, a corrente fundamental IF não é alterada, a jusante a carga absorve a corrente não linear IF+IH.

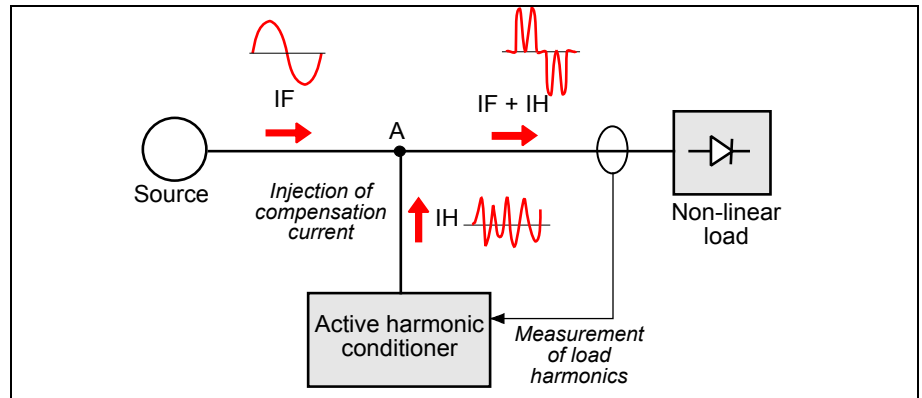


Fig. 3,13. Condicionamento de harmónicas pelo **AccuSine**.

Modos de funcionamento

Modo digital, condicionamento de ordens individuais

O modo de funcionamento básico do AccuSine é digital, com um sensor de corrente, conversão analógica/digital das medições de corrente e cálculo em tempo real do espectro de harmónicas. Esta informação é fornecida ao inversor para compensação das ordens individuais de harmónicas.

O tempo de resposta a flutuações de carga é de 40 ms (dois ciclos).

Diagrama de funcionamento

A potência necessária para o condicionamento é retirada do sistema de distribuição trifásico e armazenada no indutor L e os condensadores carregados a +Vm e -Vm respectivamente (ver fig. 3.14).

Dependendo do sinal da corrente harmónica necessária, é modulada a largura de impulso de um condensador ou do outro. Isto significa que a mesma ligação ao sistema de alimentação pode ser utilizada para extrair potência e injectar as harmónicas.

A potência enviada às cargas depende de:

- **Valores de harmónicas medidos.**
- **Necessidades do utilizador, estabelecidas durante a configuração do sistema: ordens de harmónicas a serem eliminadas e correcção do factor de potência (sim ou não).**

O transformador de corrente, combinando com um conversor analógico/digital, determina o espectro (fundamental e harmónicas) da corrente que alimenta a carga. Dependendo destes valores e do programa de selecção, um processador prepara os comandos para o inversor, para execução uma fase após as medições.

O factor de correcção de potência é obtido gerando uma corrente fundamental +90° fora de fase com a tensão

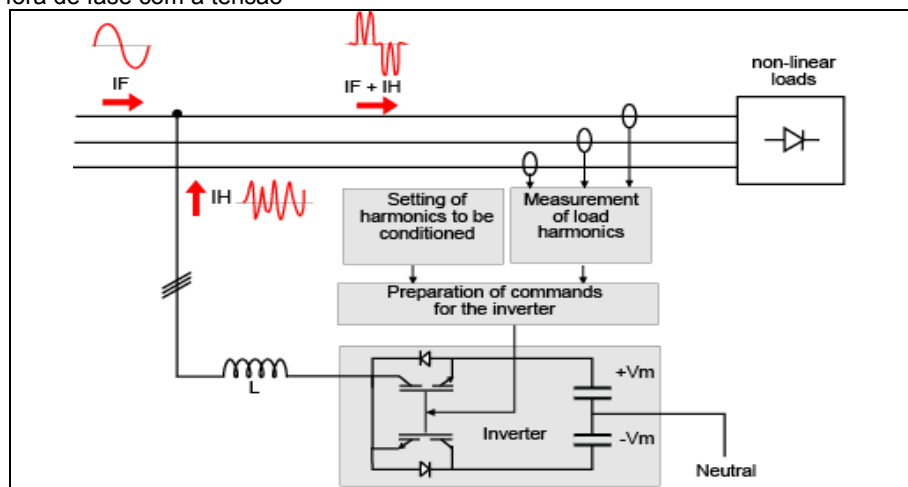


Fig. 3,14. Funcionamento do AccuSine.

Opções

Em sistemas 3Ph ou 3 ph+N, o utilizador pode decidir condicionar:

- **Todas ou apenas algumas harmónicas até H25.**
- **O factor de potência**

☞ AccuSine é sempre alimentado por potência trifásica mas pode condicionar cargas monofásicas, isto é, harmónicas 3 k de sequência zero.

Modos de instalação

Modo paralelo

Podem ligar-se em paralelo no mesmo ponto da instalação até quatro condicionadores activos de harmónicas AccuSine. Este é a forma de aumentar a capacidade de condicionamento de harmónicas e/ou a disponibilidade do sistema. Para instalações paralelas, é necessário um único conjunto de sensores no circuito condicionado e uma ligação por fio para enviar as medições da corrente de carga aos vários condicionadores. Se um condicionador se desligar, os restantes continuam a condicionar as harmónicas, dentro dos limites da respectiva capacidade nominal de condicionamento.

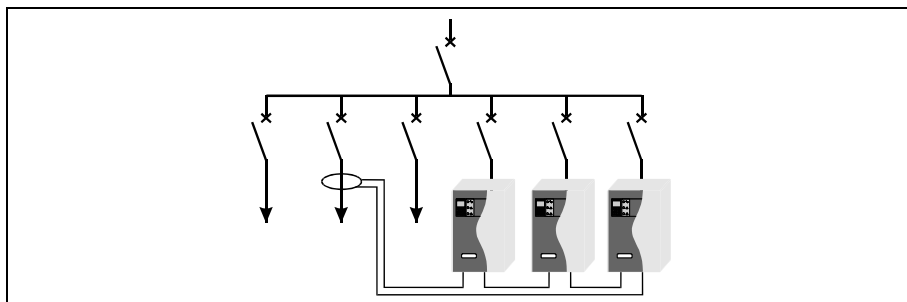


Fig. 3,15. Funcionamento em paralelo de três condicionadores activos de harmónicas AccuSine.

Modo cascata ou em série

É possível o funcionamento "em cascata" ou "em série", simplesmente requer definições especiais para evitar qualquer interacção entre os diferentes condicionadores.

O condicionador a jusante condiciona geralmente uma carga de alta potência. O dispositivo a montante condiciona outros circuitos de baixa potência e, nos casos aplicáveis, quaisquer harmónicas residuais não condicionadas pelo primeiro condicionador.

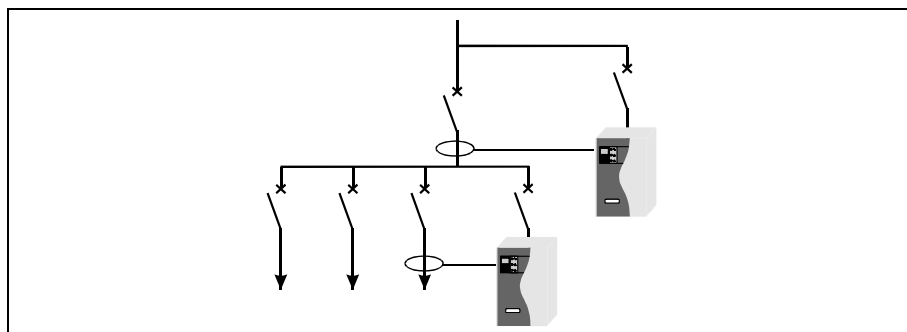


Fig. 3,16. Condicionadores activos de harmónicas AccuSine em modo cascata.

Modo multi-circuitos

Neste modo, um único condicionador pode condicionar até três circuitos de saída. É necessário um conjunto de sensores para cada circuito condicionado e todos são ligados ao AccuSine. Esta configuração é muito útil quando as harmónicas estão concentradas num pequeno número de circuitos.

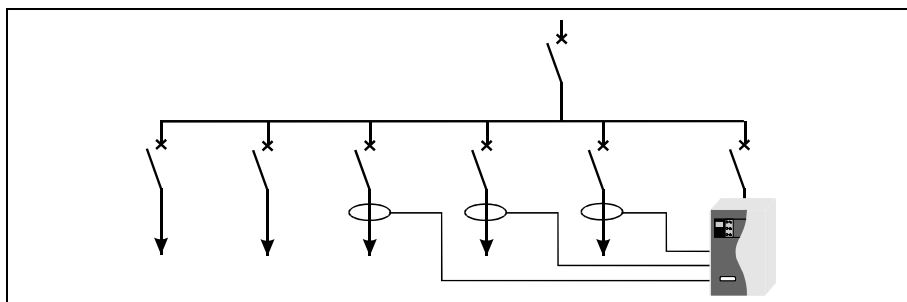


Fig. 3,17. Um condicionador activo AccuSine para vários circuitos.

Posição na instalação

Condicionamento total (ou centralizado)

O condicionador activo de harmónicas é ligado apenas a jusante das fontes, geralmente ao nível do quadro de comutação principal de baixa tensão (MLVS).

Condicionamento parcial

O condicionador activo de harmónicas está ligado ao nível do quadro de comutação primário ou secundário e condiciona um conjunto de cargas.

Condicionamento local

O condicionador activo de harmónicas é ligado directamente aos terminais de cada carga

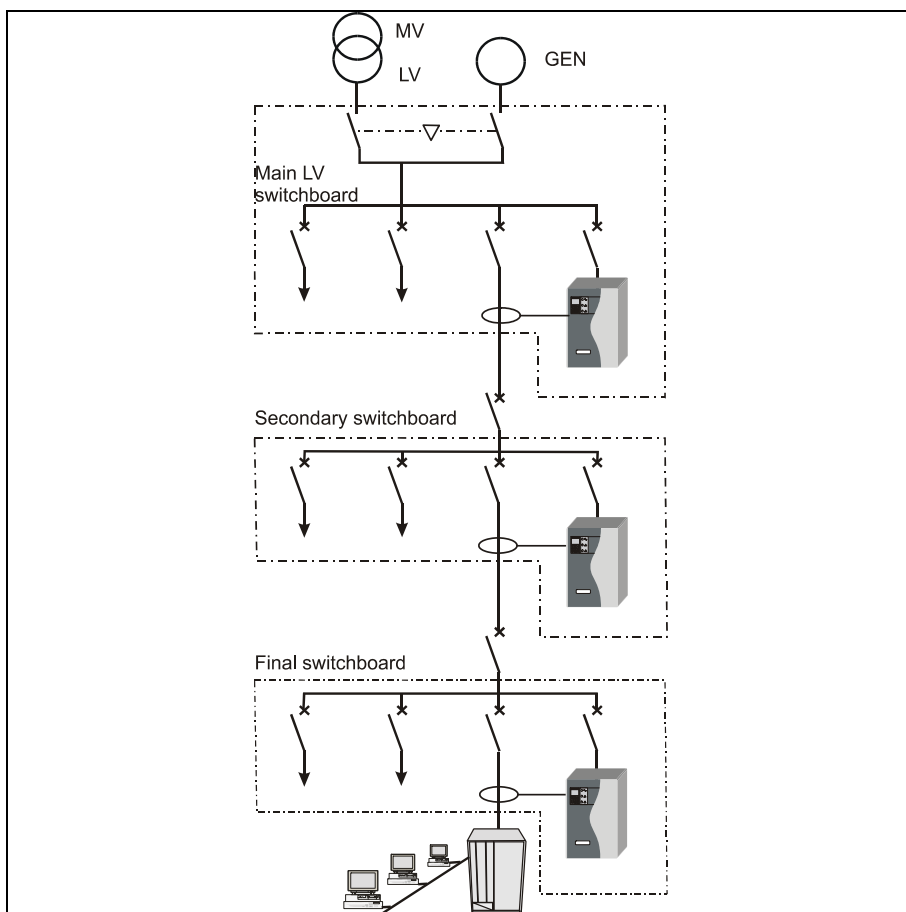


Fig. 3,18. Três pontos de instalação possíveis do AccuSine, dependendo das necessidades do utilizador.

Comparação das possibilidades de instalação

Tipo de condicionamento	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Total (Nível MLVS)	Económico. Liberta geradores (transformadores, geradores).	As harmónicas mantêm-se na parte a jusante da instalação. Os cabos têm de ser sobredimensionados.	Conformidade com os requisitos dos utilizadores. Evita injectar harmónicas a montante da instalação.
Parcial (nível de quadro de comutação secundário)	Evita sobredimensionamento dos cabos entre os quadros de comutação principal e secundário. A recombinação de determinadas harmónicas pode permitir reduzir a potência nominal do condicionador.	As harmónicas mantêm-se entre o quadro de comutação secundário e a carga não linear. O cabo de saída para a carga tem de ser sobredimensionado.	Edifícios de grandes dimensões. Condicionamento espaçado regularmente em cada piso ou conjunto de pisos. Vários circuitos a alimentar cargas não lineares.
Local (nível da carga)	Elimina harmónicas onde estas ocorrem. Reduz as perdas em todos os cabos, até à fonte.	Dispendiosos quando são necessários vários condicionadores.	Para instalações onde as cargas não lineares são em número inferior e de potência mais elevada relativamente a outras cargas. Exemplo, controladores de velocidade variável de grandes dimensões, UPSs de alta potência. Exemplos: núcleos de servidores, iluminação, UPSs de alta potência, sistemas de iluminação fluorescente.

Em termos práticos

- O condicionamento total não cria quaisquer problemas de cálculo.
- O condicionamento parcial requer algumas precauções.
- Para todas as cargas RCD não compensadas (controladores de velocidade variável e alta potência sem indutores para aplicações de binário variável), o condicionamento local pode garantir apenas um THDU que não ultrapasse determinados limites para garantir o funcionamento adequado da carga.

Posição de transformadores de corrente a montante ou a jusante

Na maioria dos modos de instalação acima, podem utilizar-se dois tipos diferentes de instalação de transformador de corrente (TC) com AccuSine.

TC a montante da carga

Esta é a situação mais frequente.

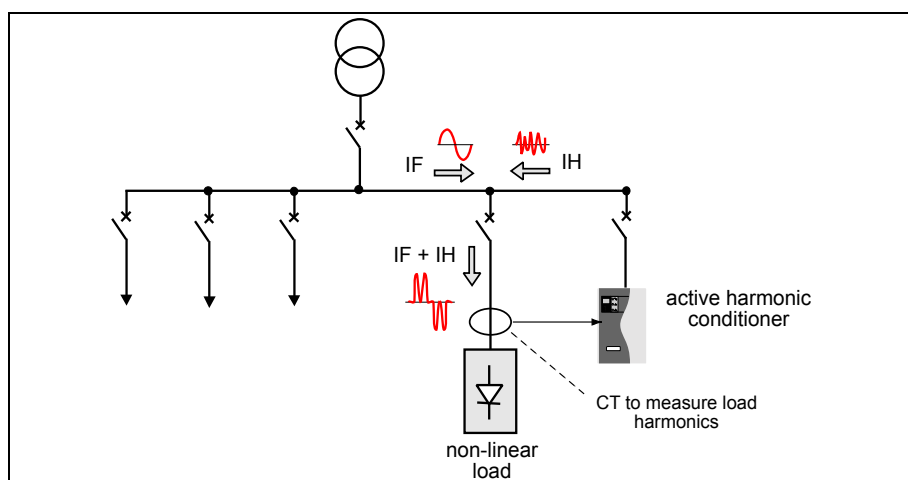


Fig. 3,19. Instalação com um TC a montante da carga.

Instalação com um TC a montante do AccuSine e um TC no ponto de entrada do quadro de comutação

Esta configuração simplifica as coisas quando é difícil instalar um TC na linha imediatamente a montante da carga. Os dois TCs têm de ter características compatíveis e complementares. A diferença entre as correntes medidas determina a corrente de compensação necessária.

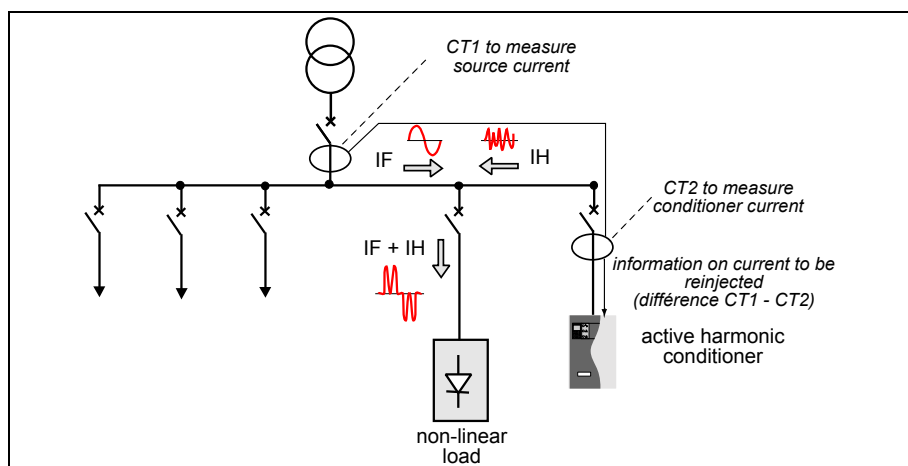


Fig. 3,20. Instalação com dois TCs, um na entra do quadro de comutação e o outro a montante do condicionador.

Vantagens do AccuSine.

Eliminação das correntes harmónicas condicionadas

Para as harmónicas seleccionadas, o AccuSine é concebido para proporcionar uma via para as correntes harmónicas com impedância virtualmente igual a zero relativamente à da fonte. Isto elimina o seu fluxo a montante em direcção à fonte. A Figura 3.21 mostra o AccuSine entre duas secções de linha ZL1 e ZL2, alimentando uma carga RCD padrão que pode ser mono ou trifásica (alimentação de potência em modo de comutação ou controlador de velocidade variável). As correntes harmónicas I_{Hn} que fluíam anteriormente através de impedâncias Z_s e ZL1 a montante do ponto de instalação do **AccuSine**, são eliminadas. A fonte alimenta agora exclusivamente a corrente fundamental I_f . É o **AccuSine** que alimenta as correntes harmónicas I_{Hn} à carga, medindo continuamente as harmónicas absorvidas pela carga.

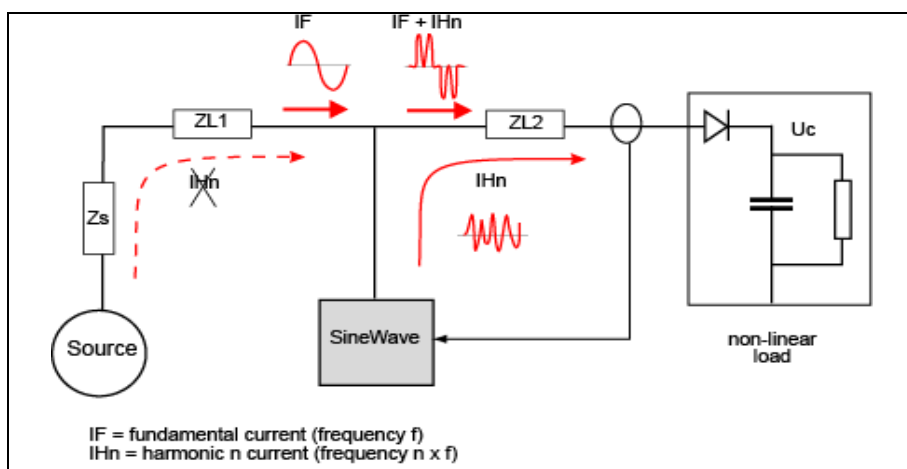


Fig. 3.21. **AccuSine** modifica a corrente a montante do seu ponto de instalação.

Redução do THDU no ponto de instalação

A montante do AccuSine, as correntes harmónicas I_{Hn} seleccionadas (todas ou apenas algumas até à 25ª) são eliminadas.

A distorção harmónica total a montante do ponto de instalação é calculada como (ver Cap. 4, p. 49):

$$THDU \% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{Hn}^2}}{U_{H1}}$$

em que U_{Hn} é a queda de tensão correspondente à harmónica I_{Hn} .

Eliminação da corrente harmónica para uma dada ordem, elimina a tensão harmónica para a mesma ordem (1).

O resultado é uma redução substancial na THDU, seleccionando as harmónicas mais significativas.

Dado que acima da 25ª ordem, as harmónicas individuais são negligenciáveis, o THDU é praticamente igual a zero e a distorção é totalmente eliminada se se decidir condicionar todas as harmónicas até à 25ª.

(1) Sendo que U_{Hn} e I_{Hn} são componentes sinusoidais à frequência (em que f é a frequência da fundamental), estão relacionadas pela lei de Ohm, tendo em conta o valor das impedâncias em causa (Z_s e ZL1) com uma frequência angular n .

Por isso:

$$U_{Hn} = (Z_s(n\omega) + ZL1(n\omega)) I_{Hn}.$$

Para todas as harmónicas condicionadas, $I_{Hn} = 0$ e, consequentemente, $U_{Hn} = 0$.

Procedimento para implementar condicionamento activo

Conclusão sobre o condicionamento activo

Cálculos de condicionamento exactos requerem:

- conhecimento exacto e aprofundado da instalação (fontes, linhas e método de instalação),
- conhecimento exacto das cargas (curvas de harmónicas e de deslocação, dependendo da impedância da fonte),
- ferramentas de cálculo especiais,
- análise e simulação.

Novas instalações

As regulamentações padrão que regem as instalações eléctricas continuam válidas mas é necessária uma avaliação da distorção da tensão (THDU) onde haja fluxo de correntes harmónicas.

Esta avaliação é muito complexa e requer software de cálculo especial bem como conhecimento aprofundado das cargas não lineares, em particular da distribuição de harmónicas como uma função da impedância a montante.

A Schneider Electric possui as ferramentas de simulação necessárias para estes cálculos.

Instalações existentes

Para instalações existentes, uma avaliação precisa do local é um pré-requisito indispensável para qualquer medida correctiva. A relação matemática entre a distorção da corrente e da tensão é complexa e depende de vários componentes presentes na instalação.

O controlo sobre os fenómenos harmónicos requer know-how e experiência bem como ferramentas e software especializados (analisador de espectro, software de cálculo para a distorção nos cabos, software de simulação, etc.).

No entanto, mesmo quando cada solução é específica de um dado local, técnicas profissionais e métodos rigorosos adequados asseguram a máxima probabilidade de a instalação funcionar correctamente.

Metodologia

Schneider Electric dominou todo o processo de eliminação de harmónicas e propõe uma abordagem em 3 passos:

1. auditoria do local,
2. determinação da solução mais adequada,
3. instalação e verificações do sistema.

1. Auditoria do local

Diagrama de instalação

Antes de iniciar uma série de medições, sugerimos que esboce um diagrama simplificado da instalação, indicando o seguinte:

- **tipos de equipamento**
 - geradores: tipo, potência nominal, tensão, Usc, X"d (conjunto gerador de motor).
 - transformadores de isolamento: tensão, potência nominal, tipo, Usc, acoplamento.
 - distribuição: tipo de cabos, comprimento, secção transversal, método de instalação.
 - cargas: potência nominal, tipo.
 - esquemas de ligação à terra do sistema nos vários pontos da instalação.
- **modos de funcionamento**
 - por alimentação do utilitário.
 - por conjuntos de geradores de motor (potência em standby ou co-geração).
 - por UPSs.
- **modos de funcionamento com redução da potência nominal**
 - sem redundância.
 - com potência de conjunto de geradores de motor.

Este diagrama deve permitir-lhe localizar os diferentes pontos de medição e identificar fases de operação críticas (para avaliação por simulação ou cálculo).

Medições

Na sequência do indispensável passo anterior, pode iniciar-se a fase de medição, começando, de preferência, na fonte e trabalhando para montante na direcção das cargas que atraem as harmónicas, para limitar o número de medições.

A qualidade das medições é mais importante que a quantidade e facilita o passo seguinte.

Estudo preliminar da instalação

Este primeiro passo termina com um estudo preliminar da instalação:

- **ponto(s) de instalação do(s) condicionador(es),**
- **condições de instalação para a protecção dos disjuntores de circuitos,**
- **instalação de sensores (energizados ou não),**
- **possibilidade de corte da carga,**
- **espaço disponível,**
- **evacuação de perdas (ventilação, ar condicionado, etc.),**
- **restrições ambientais (ruído, CEM, etc.).**

2. Determinação da solução mais adequada

Os elementos anteriores são utilizados para determinar a solução ideal por meio de:

- **análise dos resultados das medições,**
- **simulação das diferentes soluções encontradas para o problema,**
- **determinação da solução mais adequada,**
- **esboço de um relatório-resumo com as soluções propostas.**

3. Instalação e verificações do sistema

Este último passo inclui:

- **implementação das soluções escolhidas,**
- **verificações dos níveis de desempenho relativamente aos resultados garantidos,**
- **esboço de um relatório de arranque do sistema.**