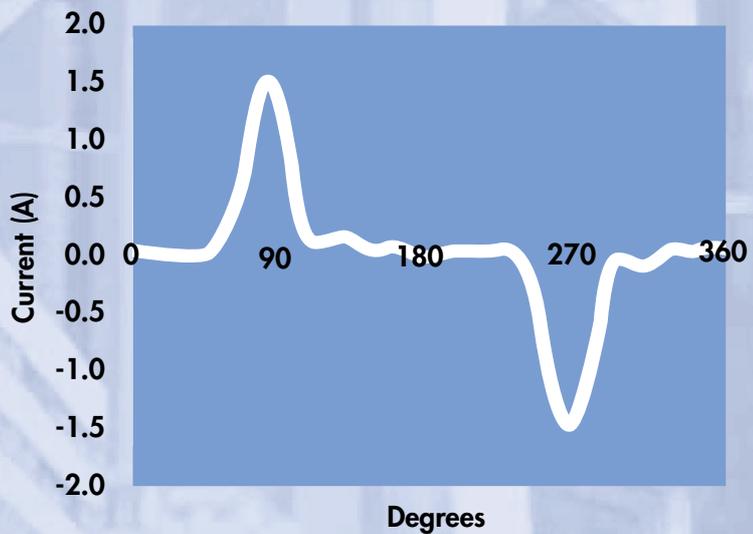
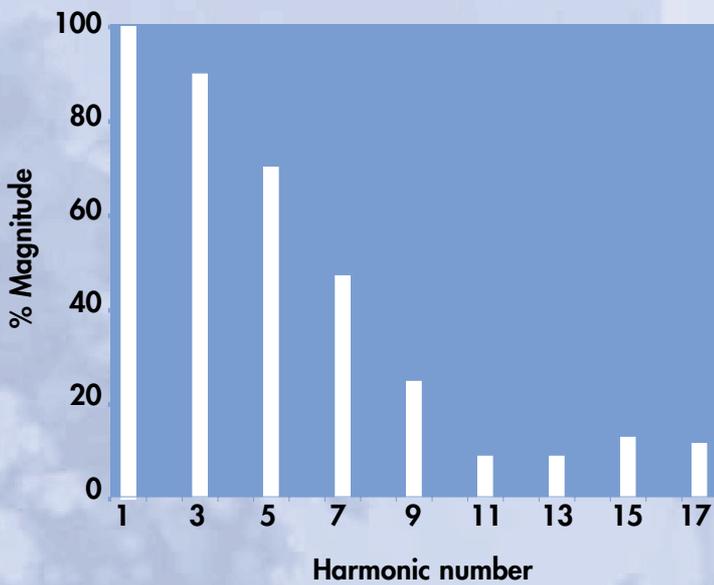


Guía de Calidad de la Energía Eléctrica

Armónicos *Causas y efectos*

3.1



Armónicos

Causas y Efectos

David Chapman
Copper Development Association UK
Marzo 2001

(Versión 0b Noviembre 2001)

European Copper Institute (ECI)

El European Copper Institute (ECI) es una joint venture formada por ICA (International Copper Association) y los miembros del IWCC (International Wrought Copper Council). Por medio de sus socios, ECI actúa en nombre de los principales productores mundiales de cobre y fabricantes europeos promoviendo la utilización del cobre en Europa. Fundado en Enero de 1996, ECI está respaldado por una red de diez Centros de Promoción del Cobre en Alemania, Benelux, Escandinavia, España, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Polonia y Reino Unido. ECI continúa los esfuerzos inicialmente emprendidos por la Copper Products Development Association, fundada en 1959, e INCRA (International Copper Research Association) fundada en 1961.

Centro Español de Información del Cobre (CEDIC)

CEDIC es una asociación privada sin fines de lucro que integra la práctica totalidad de las empresas fundidoras-refinadoras y semitransformadoras de cobre y de sus aleaciones en España. Su objetivo es promover el uso correcto y eficaz del cobre y sus aleaciones en los distintos subsectores de aplicación, mediante la compilación, producción y difusión de información.

Reconocimientos

Este proyecto ha sido llevado a cabo con el apoyo de la Comunidad Europea y la International Copper Association, Ltd

Responsabilidad

El contenido de este proyecto no refleja necesariamente la posición de la Comunidad Europea, y no supone ninguna responsabilidad por parte de la Comunidad Europea.

El European Copper Institute, la Copper Development Association UK y el Centro Español de Información del Cobre (CEDIC) rechazan toda responsabilidad por cualquier daño directo, indirecto, consecuente o incidental que pueda resultar del uso de la información, de la incapacidad para el uso de la información o de los datos contenidos en esta publicación.

Copyright© European Copper Institute y Copper Development Association UK.

Se autoriza la reproducción siempre y cuando ésta sea íntegra y se mencione la fuente.



Princesa, 79
28008 Madrid
Tel.: 91 544 84 51
Fax: 91 544 88 84



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Causas y efectos de los armónicos

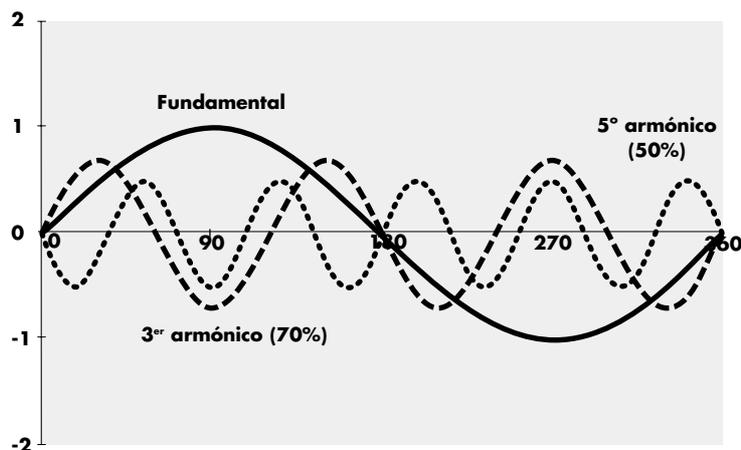


Figura 1 - Onda fundamental con 3º y 5º armónicos

tenerse en cuenta que la mayoría de las formas de onda de las corrientes distorsionadas serán mucho más complejas que la de este ejemplo, ya que contendrán muchos más armónicos con una relación de fase también más compleja.

Es evidente que esta forma de onda no es senoidal, lo que supone que los equipos de medida normales, tales como los polímetros previstos para dar lecturas de valor promedio, darán lecturas inexactas. Obsérvese también que, en cada ciclo, hay seis puntos de paso por cero en lugar de dos, de modo que cualquier equipo que utilizara como referencia el punto de paso por cero no funcionaría correctamente.

Esta forma de onda contiene frecuencias no fundamentales y debe ser tratada en consecuencia.

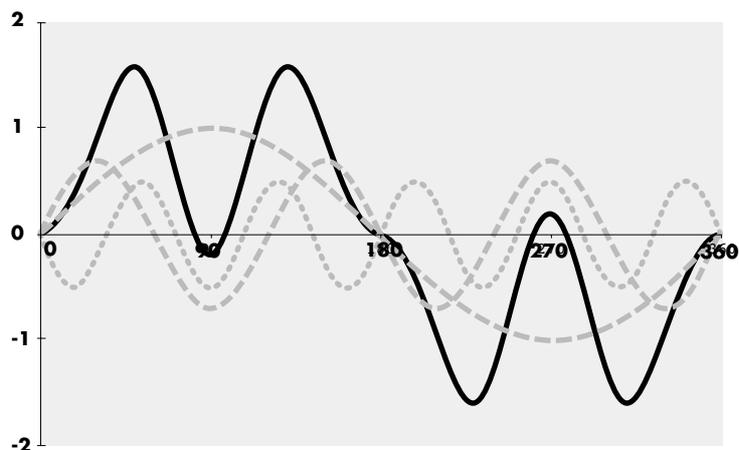


Figura 2 - Forma de onda de corriente distorsionada

Cuando se habla de los armónicos en las instalaciones de energía, son los armónicos de corriente los más preocupantes, puesto que los armónicos se originan como corrientes y la mayoría de sus efectos negativos se deben a estas corrientes. No se pueden sacar conclusiones útiles sin conocer el espectro de las corrientes armónicas presentes, a pesar de lo cual, es corriente trabajar únicamente con valores de las cifras correspondientes a la distorsión armónica total (THD). Cuando los armónicos se propagan por un sistema de distribución, es decir, a partes del circuito que no transportan corrientes armónicas, lo hacen en forma de tensión. Es muy importante que se midan los valores tanto de la tensión como de la corriente y que dichos valores estén indicados claramente como valores de tensión y de corriente. Normalmente, las medidas de distorsión de la corriente se identifican mediante el sufijo "I", por ejemplo, 35% THDI, y las de distorsión de tensión con el sufijo "V", por ejemplo, 4% THDV.

Las corrientes armónicas han estado presentes en los sistemas de suministro de electricidad desde hace muchos años. Al principio eran generadas por los rectificadores de arco de mercurio, empleados para transformar la corriente alterna en corriente continua, para la electrificación de líneas de ferrocarril y para la regulación de motores de corriente continua de velocidad variable en la industria. Más recientemente la gama de los tipos y el número de unidades de equipos que generan armónicos ha aumentado de forma arrolladora, y va a seguir aumentando, por lo que los proyectistas y los responsables del desarrollo de las especificaciones a que se deben ajustar las instalaciones deberán de tener muy en cuenta la existencia de los armónicos y sus efectos.

En esta sección se describe como y por qué se generan los armónicos, como afecta la presencia de armónicos a los sistemas y equipos eléctricos y como se ha de actuar para reducir al mínimo estos efectos.

Tipos de equipos que generan armónicos

Las corrientes de carga armónicas las generan las denominadas cargas no lineales. Entre ellas se incluyen:

Cargas monofásicas, por ejemplo:

- ◆ Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS).
- ◆ Estabilizadores electrónicos de dispositivos de iluminación fluorescente.
- ◆ Pequeñas unidades de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI o UPS).

Cargas trifásicas, por ejemplo:

- ◆ Motores de velocidad variable.
- ◆ Grandes unidades de UPS.

Cargas monofásicas

Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS)

La mayoría de los modernos equipos electrónicos utilizan fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado (SMPS). Se diferencian de los antiguos en que, el transformador reductor y el rectificador tradicionales, han sido reemplazados por una unidad de rectificación de control directo de la fuente de alimentación, para cargar un condensador de almacenamiento desde el cual se deriva la corriente continua hacia la carga mediante un método adecuado a la tensión y corriente de salida requeridas. La ventaja, para el fabricante del equipo, es que el tamaño, coste y peso se han reducido de una manera notable y que la unidad de potencia puede adaptarse a casi cualquier factor de forma que se requiera. El inconveniente, para todos los demás, es que, en lugar de obtener una corriente continua de la fuente de alimentación, el suministro de potencia genera pulsos de corriente que contienen gran cantidad de terceros armónicos y armónicos superiores, y unos importantes componentes de alta frecuencia (véase figura 3). A la entrada de la fuente de alimentación se coloca un filtro sencillo para derivar a tierra los componentes de alta frecuencia de la línea y el neutro, pero que no tiene efecto alguno sobre las corrientes armónicas que llegan de vuelta a la fuente de alimentación. Los efectos de las fugas a tierra de estos filtros se tratan en la sección 6.

Las unidades de UPS monofásicas presentan unas características muy parecidas a las de las SMPS.

Para las unidades de alimentación de gran potencia se ha desarrollado recientemente una tendencia hacia las denominadas fuentes de alimentación de factor de potencia corregido. Lo que se pretende es que la carga parezca una carga resistiva, de tal forma que la corriente de entrada presente una forma senoidal y en fase con la tensión aplicada. Esto se consigue aplicando la corriente de entrada como una forma de onda triangular de alta frecuencia, la cual es promediada por el filtro de entrada como una senoide. Este nivel adicional de sofisticación no se aplica todavía a las unidades de bajo coste que componen la mayor parte de la carga de las instalaciones comerciales e industriales. Queda por ver qué problemas puede implicar la aplicación de esta tecnología a gran escala.

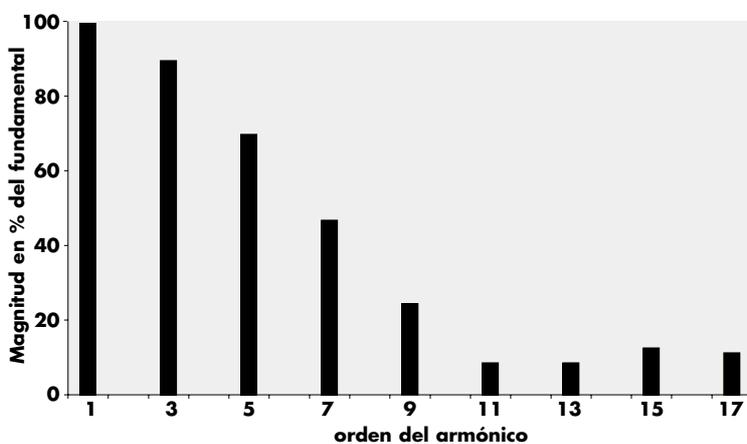


Figura 6 - Espectro armónico de un PC típico

Balastos de iluminación fluorescente

Los balastos electrónicos se han popularizado en los últimos años debido a su fama de mejorar el rendimiento de las instalaciones fluorescentes. En realidad sólo son un poco más eficientes que los buenos balastos magnéticos y, de hecho, la mayor parte de sus ventajas se deben a que la lámpara es más eficiente cuando trabaja a altas frecuencias más que al propio estabilizador electrónico. Su ventaja principal es que el nivel de luminosidad puede mantenerse durante una vida útil más larga mediante el control por realimentación de la corriente de funcionamiento; un método que reduce la eficiencia global de la vida útil. Su gran desventaja

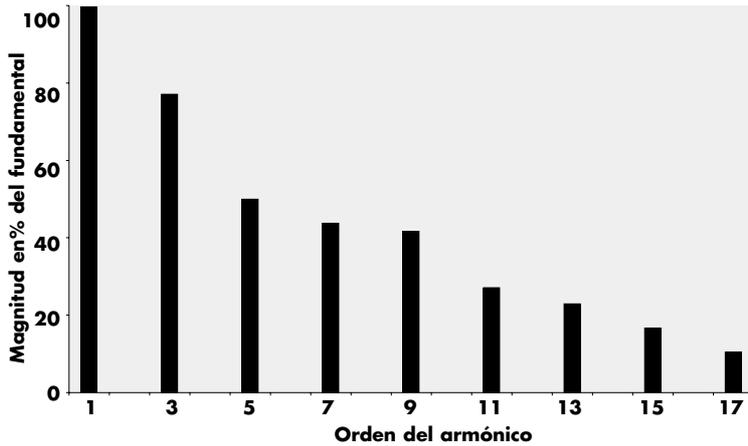


Figura 4 - Espectro armónico de una lámpara CFL

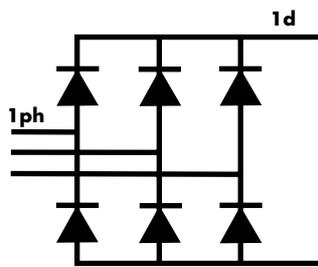


Figura 5 - Puente trifásico o de seis pulsos

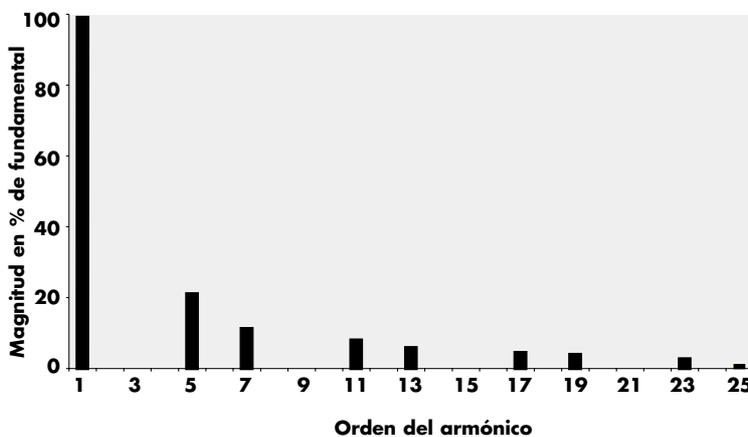


Figura 6 - Espectro armónico de un puente de seis pulsos

es que generan armónicos en la corriente de alimentación. Con mayores prestaciones, se encuentran en el mercado los tipos denominados de factor de potencia corregido, que reducen los problemas de los armónicos, a cambio de un mayor coste. Las unidades más pequeñas normalmente no disponen de corrección.

Actualmente se comercializan las lámparas fluorescentes compactas (CFL) como sustitutivas de las clásicas bombillas de filamento de tungsteno. Un balasto electrónico en miniatura, alojado en la carcasa de conexión, controla un tubo fluorescente curvado de 8 mm de diámetro. Los CFLs de 11 vatios de potencia nominal se venden en sustitución de las lámparas de filamento de 60 vatios, presentando una esperanza de vida de 8000 horas. En la figura 4 se presenta su espectro de corrientes armónicas. Se ha difundido el uso de estas lámparas en sustitución de las bombillas de filamento en el ámbito doméstico y especialmente en hoteles, donde han dado origen a serios problemas de armónicos.

Cargas trifásicas

Los controladores de velocidad variable, las unidades de UPS y, en general, los convertidores de corriente continua normalmente se basan en la utilización del puente trifásico, también conocido como puente de seis pulsos porque presenta seis pulsos por ciclo (uno por cada medio ciclo de cada fase) en la salida de corriente continua.

El puente trifásico produce armónicos a $6n \pm 1$, es decir, a uno más o a uno menos de cada múltiplo de seis. En teoría, la amplitud de cada armónico es la inversa de número del armónico, así habría un quinto armónico con una amplitud del 20% y un 11º armónico con una amplitud del 9%, etc.

En la figura 6 se muestra un ejemplo del espectro típico.

La amplitud de los armónicos se reduce significativamente mediante la utilización de un puente de doce pulsos. En realidad se trata de dos puentes de seis pulsos, alimentados a partir de un transformador bobinado en estrella y triángulo, lo que produce un desplazamiento de fase de 30° entre ambos.

De esta forma se suprimen teóricamente los armónicos múltiplos de seis pero, en la práctica, el grado de reducción depende del acoplamiento de los convertidores y normalmente será un factor entre 20 y 50. Los armónicos múltiplos de

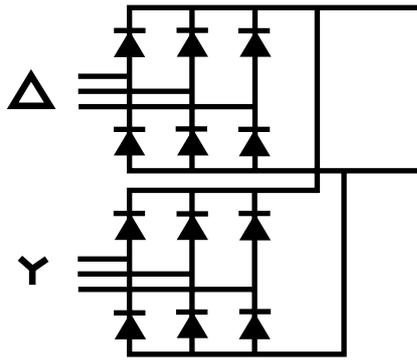


Figura 7 - Puente de doce pulsos

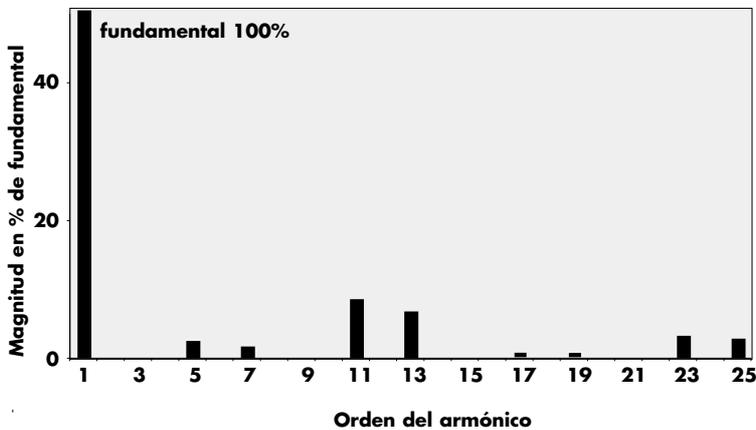


Figura 8 - Espectro armónico típico de un puente de doce pulsos

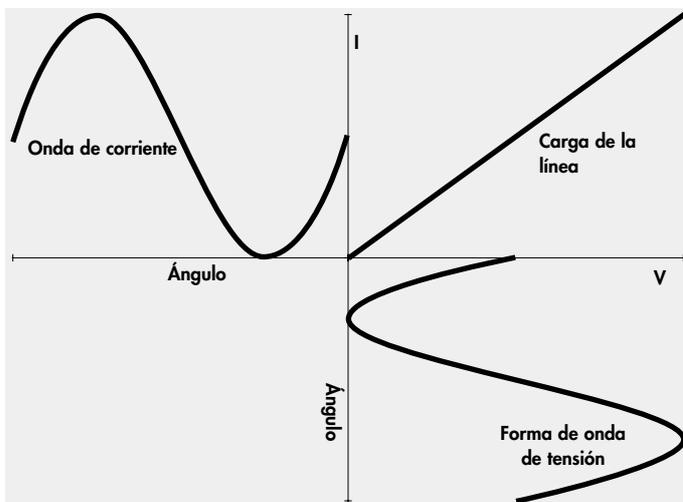


Figura 9 - Forma de onda en una carga lineal

doce permanecen sin cambio. No sólo se reduce la corriente armónica total, sino que, además, los armónicos que quedan son de un orden superior, lo cual hace más sencillo el diseño del filtro.

Generalmente, el fabricante del equipo habrá adoptado algunas medidas para reducir las magnitudes de las corrientes armónicas, quizás mediante la adición de un filtro o inductores en serie. En el pasado esto ha llevado a algunos fabricantes a afirmar que sus equipos cumplían la norma "G 5/3". Pero dado que "G 5/3" es una norma de planificación aplicable a una instalación completa, no puede decirse que una instalación se ajusta a ella sin conocer las características de cada equipo de la instalación una vez situado en su emplazamiento.

Un incremento del número de pulsos hasta 24, que se obtiene utilizando dos unidades de doce pulsos en paralelo, con un desplazamiento de fase de 15°, reduce la corriente armónica total hasta un 4,5%, aproximadamente. Por supuesto, esta sofisticación adicional eleva el coste, de modo que este tipo de limitador de armónicos solo se utiliza cuando es absolutamente necesario ajustarse a las especificaciones de las empresas suministradoras de electricidad.

Fundamentos teóricos - Cómo se generan los armónicos

En un sistema de alimentación ideal limpio de armónicos, las formas de onda de la corriente y la tensión son sinusoides puras. En la práctica se producen corrientes no senoidales cuando la corriente que pasa por la carga no tiene una relación lineal con la tensión aplicada. En un circuito simple que contenga sólo elementos lineales - resistencias, inductancias y capacitancias - la corriente que fluye es proporcional a la tensión aplicada, a una frecuencia determinada, de tal modo que si se aplica una tensión senoidal, se produce una corriente senoidal, como se ilustra en la figura 9. La línea de carga es la relación entre la tensión aplicada y la corriente que circula por la carga, tal como se muestra en la figura 9 correspondiente a una carga lineal. Téngase en cuenta que si está presente un elemento reactivo, se producirá un desplazamiento de fase entre las formas de onda de la tensión y de la corriente; el factor de potencia se reduce, pero el circuito sigue siendo lineal.

La figura 10 muestra la situación en la que la carga es un rectificador de onda completa y un condensador, como ocurre en la etapa de entrada de una fuente de alimentación típica de

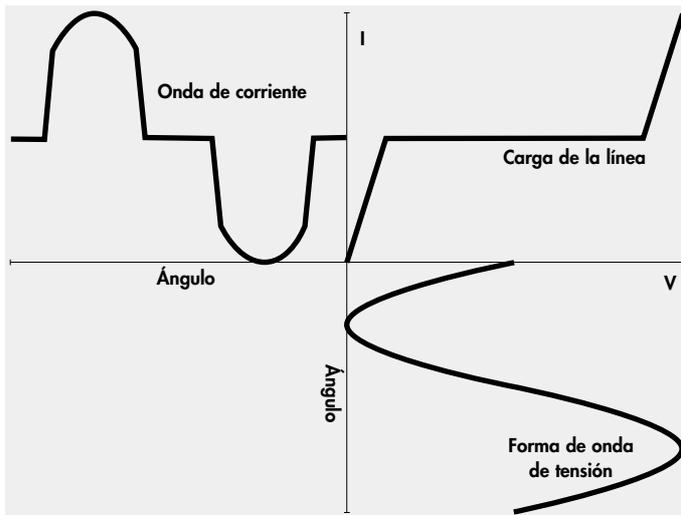


Figura 10 - Forma de onda de una carga no lineal

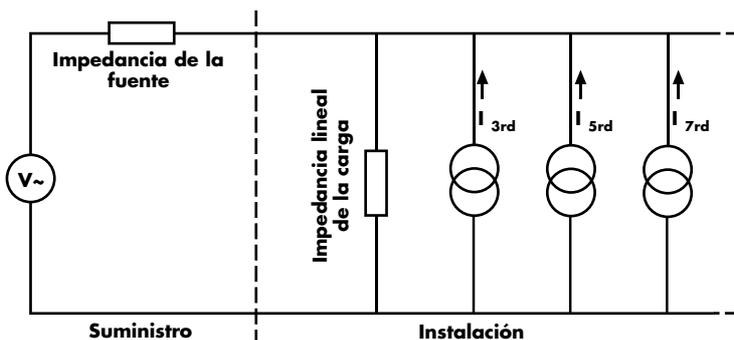


Figura 11 - Circuito equivalente de una carga no lineal

Las corrientes armónicas generadas por la carga o, para ser más exactos, convertidas por la carga, a partir de la corriente fundamental en corriente de contenido armónico, circulan por el circuito a través de la impedancia de la fuente y por todas las demás rutas en paralelo. Como consecuencia, aparecen tensiones armónicas a través de la impedancia de alimentación y están presentes en toda la instalación. Los generadores de armónicos pueden parecer a veces generadores de tensión; si esto fuera cierto, la impedancia de la fuente no tendría influencia alguna en la amplitud de la tensión armónica a través de la fuente. En realidad, la magnitud de esta tensión es proporcional, en un margen limitado, a la impedancia de la fuente, lo cual indica que el generador se comporta como una fuente de corriente.

Las impedancias de la fuente son muy bajas, por lo que la distorsión de la tensión armónica producida por una corriente armónica será también baja, y frecuentemente apenas supera el ruido de fondo de la red. Esto puede inducir a error, porque da la impresión de que no es probable que haya problemas producidos por los armónicos, cuando en realidad están presentes unas corrientes armónicas considerables. Esta situación es bastante parecida a intentar encontrar una corriente de tierra con un voltímetro. Siempre que se sospeche que existen armónicos, o cuando se intente verificar su ausencia, debe medirse el valor de la corriente.

Problemas producidos por los armónicos

Las corrientes armónicas ocasionan problemas tanto en el sistema de suministro de energía como dentro de la instalación. Los efectos y las soluciones a estos problemas son muy distintos en cada caso y deben abordarse por separado; es posible que medidas adecuadas para controlar los efectos de los armónicos dentro de la instalación no reduzcan necesariamente la distorsión producida en el suministro y viceversa.

funcionamiento conmutado. En este caso, la corriente sólo aparece cuando la tensión de alimentación supera la que está almacenada en el condensador de filtro, es decir, cuando está cerca del valor de pico de la onda senoidal de voltaje, como muestra la forma de la línea de carga.

En la práctica, la línea de carga y, por tanto, la forma de la onda de corriente, será probablemente mucho más compleja que la que se muestra en este ejemplo ilustrativo; pueden presentarse ciertas asimetrías e histéresis y los puntos de corte y las pendientes cambiarán con la carga.

Cualquier forma de onda cíclica puede descomponerse en una senoide a la frecuencia fundamental más cierto número de sinusoides a las frecuencias de sus armónicos. Por lo tanto, la forma de onda distorsionada de la figura 10 puede representarse mediante la onda fundamental más un porcentaje de la segunda armónica, más un porcentaje de la tercera armónica, etc., y así sucesivamente, hasta posiblemente la armónica decimotercera. En las formas de onda simétricas, es decir, en aquellas en las que los semiciclos positivo y negativo tienen la misma forma y amplitud, todos los armónicos pares son cero. Actualmente, los armónicos pares son relativamente raros, pero eran muy comunes cuando se utilizaba con profusión la rectificación de media onda.

En la figura 11 se muestra el circuito equivalente de una carga no lineal. Este circuito puede representarse como una carga lineal en paralelo con varias fuentes de corriente, una por cada frecuencia armónica.

Problemas producidos por los armónicos dentro de la instalación

Existen varias áreas comunes en los problemas producidos por los armónicos:

- ◆ Problemas causados por las corrientes armónicas:
 - ◆ Sobrecarga de los conductores neutros.
 - ◆ Sobrecalentamiento de los transformadores.
 - ◆ Disparos intempestivos de los interruptores automáticos.
 - ◆ Sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia.
 - ◆ Efecto superficial.
- ◆ Problemas causados por las tensiones armónicas:
 - ◆ Distorsión de la tensión.
 - ◆ Motores de inducción.
 - ◆ Ruido de paso por cero.
- ◆ Problemas que se producen cuando las corrientes armónicas llegan a la fuente de alimentación.

Cada una de estas áreas se tratará brevemente en los apartados siguientes.

Problemas causados por las corrientes armónicas

Sobrecalentamiento de los conductores neutros

En un sistema trifásico, la forma de onda de tensión de cada fase, entre fase y neutro, está desfasada 120° de forma que, cuando cada una de las fases tiene la misma carga, la corriente combinada en el neutro es cero. Cuando las cargas no están equilibradas, por el neutro sólo circulará la corriente neta correspondiente al desequilibrio de las cargas. En el pasado, los instaladores, con la aprobación de las autoridades que redactan los reglamentos industriales, han aprovechado esta circunstancia para colocar conductores neutros de sección mitad que la de los conductores de fase. Sin embargo, aunque las corrientes fundamentales se anulan entre sí, no ocurre lo mismo con las corrientes armónicas. De hecho, aquellas que son un múltiplo impar del triple de la fundamental, los denominados armónicos "triple-N", se suman en el conductor neutro. La figura 12 muestra este efecto. En este diagrama las corrientes de cada fase, que

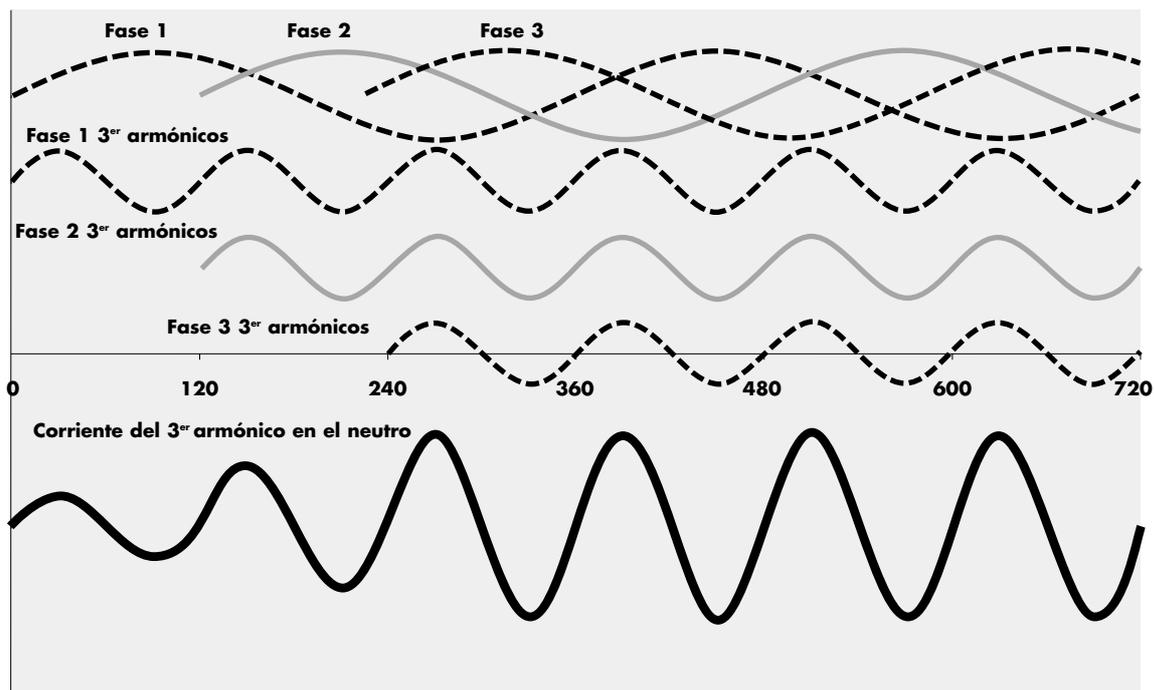


Figura 12 - Suma de las tres corrientes triple-N en el neutro

Causas y Efectos

se representan en la parte superior, están desfasadas 120°. El tercer armónico de cada fase es idéntico para las tres, siendo su frecuencia el triple de la fundamental y, por tanto, su periodo un tercio del de la onda fundamental. En la figura se muestra la corriente resultante de los tres terceros armónicos. En este caso una corriente del tercer armónico de una amplitud del 70% de la fundamental en cada fase da como resultado una corriente con una amplitud del 210% en el neutro.

Los casos encontrados en edificios comerciales, generalmente muestran corrientes en el neutro de magnitudes comprendidas entre el 150% y el 210% de las corrientes de fase ¡en muchos casos en un conductor de sección mitad que la de los conductores de fase!

Hay cierta confusión con respecto a la forma en que los proyectistas deben abordar este problema. La solución más sencilla, en aquellos casos en que se empleen cables unipolares, sería instalar conductores neutros de doble sección, bien como dos conductores paralelos separados o bien como un solo conductor de sección doble. La situación no es tan sencilla cuando se emplean cables multiconductores. Las secciones de los cables multipolares, por ejemplo, los

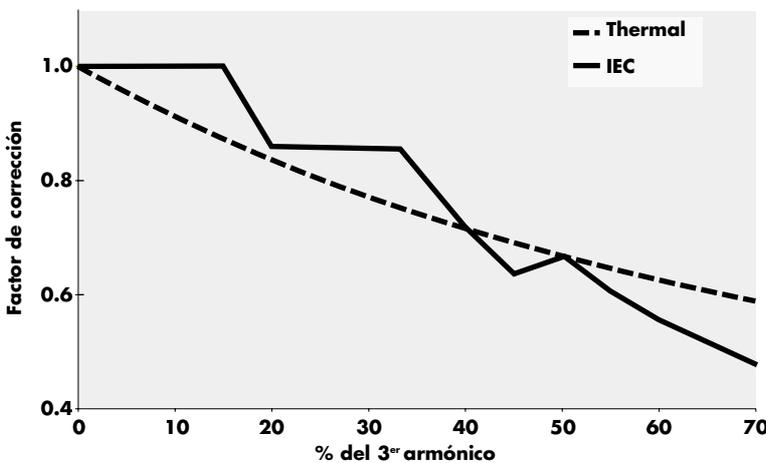


Figura 13 - Factor de corrección en función de la proporción del contenido de armónicos triple-N

que aparecen en la norma IEC 60364-5-523, tabla 52, (traspuesta a la normativa española en la norma UNE 20460-5-523) dan por supuesto que la carga está equilibrada y que el conductor neutro no lleva corriente, en otras palabras, sólo los tres conductores de fase de los cuatro o cinco cables de la canalización, según que incluya, o no, el conductor de protección además del neutro, llevan corriente y generan calor. Como la capacidad de transportar corriente de los cables está determinada únicamente por la cantidad de calor que son capaces de disipar a la máxima temperatura de servicio permanente admisible, se deduce que se deben redimensionar los cables por los que circulen corrientes triple-N. En el ejemplo que se ha ilustrado anteriormente, el cable transportaba cinco unidades de corriente - una por cada fase y dos en el

neutro - mientras que se había dimensionado para transportar tres unidades, una en cada conductor de fase y nada en el neutro. Debería haberse previsto un incremento de la sección total de las tres fases más neutro de un 60% del normal.

En la norma IEC 60364-5-523, anexo C (informativo) se sugiere una gama de factores de corrección de las secciones de los conductores considerando las corrientes armónicas triple-N presentes en la instalación. En la figura 13 se muestra el factor de corrección, en función del contenido de armónicos triple-N, descrito en la norma IEC 60364-5-523, anexo C y, de acuerdo con el método térmico citado anteriormente.

Esta normativa está siendo revisada y es probable que en un futuro próximo se introduzcan nuevos requisitos y notas orientativas en las normas nacionales de cableado (en España las UNE 21144, 20460, 20435 y otras).

Efectos sobre los transformadores

Los transformadores se ven afectados por los armónicos de dos maneras: en primer lugar, las pérdidas por corrientes parásitas, que normalmente representan un 10% aproximadamente de las pérdidas a plena carga, aumentan con el cuadrado del número de orden del armónico. En la práctica, en el caso de un transformador trabajando a plena carga alimentando equipos informáticos, las pérdidas totales serían el doble que en caso de una carga lineal equivalente. Esto origina una temperatura de funcionamiento mucho más elevada y, en consecuencia, una vida útil del equipo más corta. De hecho, en estas circunstancias, la vida útil del transformador se reduciría aproximadamente desde unos 40 años a algo así como ¡40 días!. Afortunadamente son pocos los transformadores que trabajan a plena carga, pero este efecto debe ser tenido en cuenta al seleccionar el equipamiento de una instalación.

El segundo efecto está relacionado con los armónicos triple-N. Cuando estos se reflejan en un bobinado en triángulo están todos en fase, así que las corrientes armónicas triple-N circulan por este bobinado. Los armónicos triple-N son absorbidos eficazmente en el bobinado y no se propagan aguas arriba a la línea de suministro, de modo que los transformadores con bobinado en triángulo son útiles como transformadores de aislamiento. Sin embargo, los

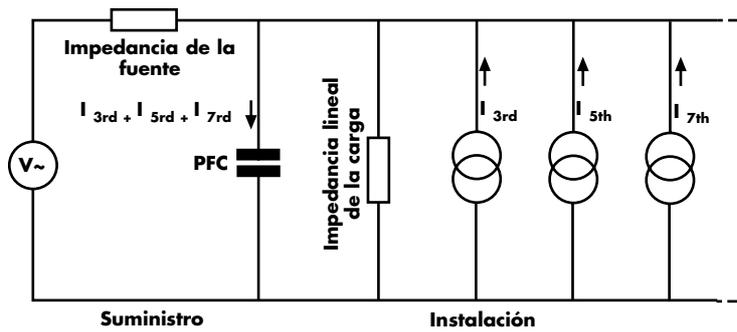


Figura 14 - Circuito equivalente de una carga no lineal con un condensador para la corrección del factor de potencia

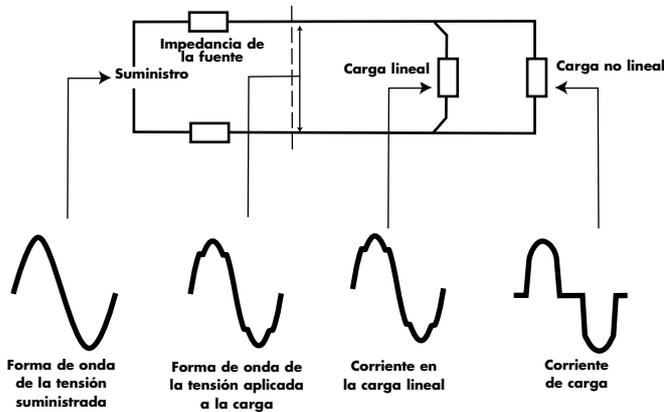


Figura 15 - Distorsión de la onda de tensión causada por una carga no lineal

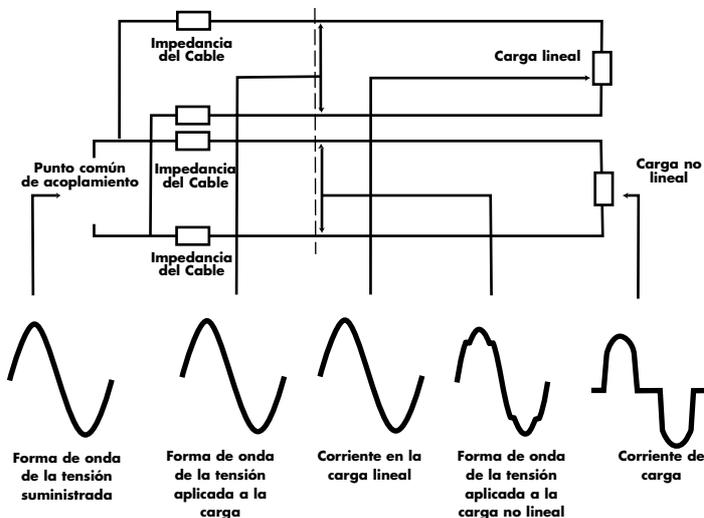


Figura 16 - Separación de las cargas lineales de las no lineales

armónicos que no son triple-N sí pasan el transformador. Deberá tenerse en cuenta la corriente de estos armónicos que circulan por el transformador a la hora de dimensionarlo.

En una sección posterior de esta Guía se trata en detalle el dimensionamiento de los transformadores según las corrientes armónicas previstas.

Disparos intempestivos de los interruptores automáticos

Los interruptores automáticos de corriente diferencial residual (ID) funcionan sumando la corriente presente en los conductores de fase y neutro, y si el resultado no está dentro del límite especificado, desconectan la energía de la carga. La desconexión anómala puede producirse en presencia de armónicos por dos razones. En primer lugar, como el ID es un dispositivo electromecánico, puede ocurrir que no sume correctamente los componentes de frecuencia más elevada y por lo tanto provoque una desconexión errónea. En segundo lugar, los equipos que generan armónicos, también generan ruido de conmutación que debe filtrarse en el punto de conexión de energía al equipo. Los filtros normalmente utilizados para este propósito disponen de un condensador entre la línea y el neutro a tierra, por el cual se derivan pequeñas corrientes de fuga a tierra. Las normas imponen que esta corriente esté limitada a un valor inferior a 3,5 mA, y normalmente es mucho menor, pero cuando el equipo está conectado a un circuito la corriente de fuga puede ser suficiente para provocar la desconexión del ID. Esta situación se resuelve fácilmente instalando más circuitos, cada uno de ellos alimentando a un número menor de cargas. En una sección posterior de esta Guía se trata en detalle el problema de las corrientes de fuga a tierra de valor elevado.

La desconexión anómala de los interruptores automáticos en miniatura se produce normalmente porque la corriente que circula por el circuito es superior a la que se preveía según los cálculos, o las simples mediciones, debido a la presencia de corrientes armónicas. La mayoría de los instrumentos de medida portátiles no miden valores eficaces reales y pueden subestimar las corrientes no senoidales en un 40%. La medición real de valores eficaces se trata en la sección 3.2.2.

Sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia

Los condensadores de corrección del factor de potencia (CFP) se utilizan para obtener una corriente con un adelanto de fase para compensar las corrientes con fase retrasada producidas por una carga inductiva, como podría ser un motor de inducción. La figura 14 muestra el circuito equivalente de un condensador de corrección del factor de potencia con una carga no lineal. La impedancia del condensador CFP disminuye al aumentar la frecuencia, mientras que la impedancia de la fuente es normalmente inductiva y aumenta con la frecuencia. Por lo tanto, es probable que el condensador deje pasar fuertes intensidades de armónicos orden superior y, a menos que haya sido diseñado específicamente para ello, puedan producirse daños.

Un problema potencialmente más grave es que el condensador y la inductancia parásita del sistema de alimentación puedan entrar en resonancia a una de las frecuencias armónicas, o a una frecuencia próxima lo que, como es de suponer, se presenta con intervalos de 100 Hz. Cuando esto sucede se pueden llegar a generar tensiones y corrientes muy grandes, que a menudo provocan averías catastróficas en la batería de condensadores.

La resonancia puede evitarse añadiendo una inductancia en serie con el condensador, de forma que la combinación sea sólo inductiva a la frecuencia del armónico significativo más bajo. Esta solución también limita la corriente armónica que puede circular a través del condensador. El tamaño físico del inductor puede suponer un problema, especialmente cuando se presentan armónicos de orden inferior.

Efecto superficial

La corriente alterna tiende a circular por la superficie exterior de los conductores. Esto se conoce como efecto piel o superficial y es más pronunciado a frecuencias altas. Normalmente se ignora el efecto superficial porque tiene un efecto muy reducido a las frecuencias fundamentales de la fuente de alimentación, pero cuando la frecuencia está sobre los 350 Hz, es decir, en valores correspondientes al séptimo armónico y superiores, el efecto superficial puede alcanzar valores importantes, produciendo pérdidas y calentamientos adicionales. Cuando estén presentes corrientes armónicas, los proyectistas deben tener en cuenta el efecto superficial y aplicar el adecuado dimensionado de los cables. Para contribuir a resolver este problema pueden utilizarse cables de alma constituidas por múltiples hilos o barras colectoras laminadas. También debe tenerse en cuenta que el montaje de sistemas de barras debe diseñarse de forma tal que se evite la resonancia mecánica a las frecuencias armónicas. Sobre estos dos temas se dan orientaciones en la publicación 22 del CDA titulada "Coopper for Busbars".

Problemas producidos por los armónicos de tensión

Debido a que la fuente de suministro de energía presenta una determina impedancia, las corrientes armónicas de la carga dan lugar a una distorsión armónica de la forma de la onda de tensión (este es el origen de las zonas planas de la onda). Esta impedancia consta de dos elementos: el que procede de la instalación interior, desde el punto de acoplamiento común (PCC), y el correspondiente a la fuente de suministro hasta el PCC. Por ejemplo, el transformador de alimentación local. En la figura 15 se muestra el primero de ellos.

La corriente de cargas distorsionada, producida por una carga no lineal, provoca una caída de tensión distorsionada en la impedancia del cable. La forma de onda de tensión distorsionada resultante, se aplica a todas las demás cargas conectadas al mismo circuito, haciendo que por ellas circulen corrientes armónicas, incluso si se trata de cargas lineales.

La solución consiste en separar los circuitos que alimentan a las cargas generadoras de armónicos de los que alimentan a las cargas que son sensibles a los armónicos, como se muestra en la figura 16. En este caso, circuitos separados alimentan a las cargas lineales y a las no lineales a partir del punto de acoplamiento común, de tal forma que la distorsión de tensión causada por las cargas no lineales no afecta a las cargas lineales.

Cuando se considere la magnitud de la distorsión armónica de tensión debe recordarse que cuando la carga se transfiera a una UPS o a un generador de emergencia durante un corte de energía, la impedancia de la fuente y la distorsión de tensión resultante serán mucho mayores.

Al instalar transformadores locales, se seleccionarán de tal forma que presenten una impedancia de salida lo suficientemente baja y una capacidad suficiente para soportar el calentamiento adicional, en otras palabras, se seleccionará un transformador adecuadamente sobredimensionado. Téngase en cuenta que no es conveniente elegir un tipo de transformador en el que el aumento de capacidad se consiga simplemente mediante un enfriamiento forzado. Una unidad de este tipo funcionará con temperaturas interiores más elevadas por lo que presentará una vida útil más reducida. El enfriamiento forzado deberá reservarse sólo para casos de emergencia y nunca para funcionamiento normal.

Motores de inducción

La distorsión armónica de tensión provoca un aumento de las pérdidas por corrientes parásitas en los motores lo mismo que en los transformadores. Pero, además, aparecen unas pérdidas adicionales debidas a la generación de unos campos magnéticos armónicos en el estator, cada uno de los cuales intenta hacer girar el motor a una velocidad diferente tanto en un sentido como en otro, según se trate de armónicos de secuencia positiva o negativa. Las corrientes de alta frecuencia inducidas en el rotor incrementan estas pérdidas todavía más.

Donde se presente esta distorsión armónica de tensión, se deberá reconsiderar el dimensionado de los motores para tener en cuenta estas pérdidas adicionales.

Ruido de paso por cero

Muchos controladores electrónicos detectan el punto en el cual la tensión de alimentación cruza la línea de cero voltios para determinar cuando deben activarse las cargas. Este procedimiento se emplea porque la conmutación de las cargas inductivas a una tensión cero no genera perturbaciones transitorias, reduciendo así las interferencias electromagnéticas (EMI) y las sobrecargas de los dispositivos de conmutación semiconductores.

Cuando en la fuente de alimentación están presentes armónicos o perturbaciones transitorias, el ritmo de variación de la tensión por el punto de paso por cero se hace más rápido y más difícil de identificar, provocando un funcionamiento errático. De hecho, hay varios puntos de paso por cero en cada semiciclo.

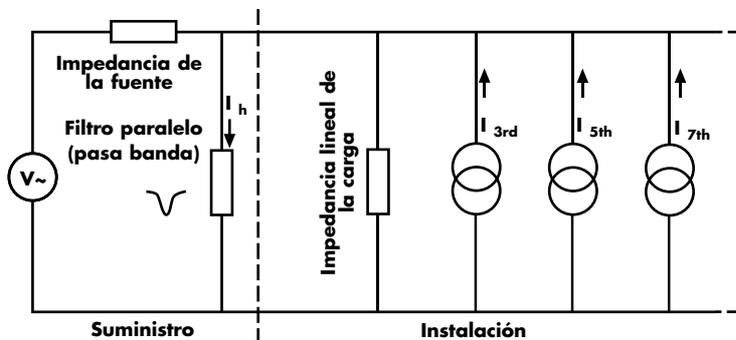


Figura 17 - Filtro pasivo de armónicos en paralelo con la carga

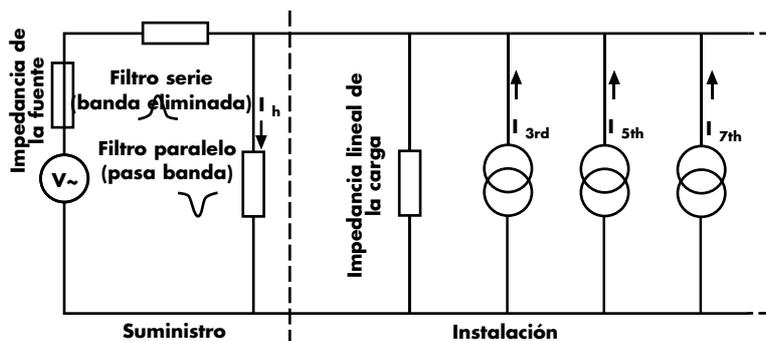


Figura 18 - Filtro pasivo de armónicos en serie y paralelo con la carga

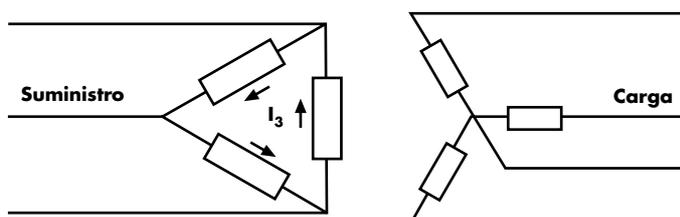


Figure 19 - Delta star isolation transformer

Problemas de los armónicos que afectan a la fuente de alimentación

Cuando una corriente armónica se genera en la fuente de alimentación, da lugar a una caída de tensión proporcional a la impedancia de la fuente en el punto de acoplamiento común (PCC) y a la corriente. Como la red de suministro generalmente es inductiva, la impedancia de la fuente es mayor a frecuencias elevadas. Por supuesto la tensión en el PCC ya viene distorsionada por las corrientes armónicas generadas por otros consumidores y por la distorsión propia de los transformadores. A esta distorsión se añade la contribución adicional de cada consumidor.

Está claro que no puede permitirse a los usuarios añadir más polución al sistema en detrimento de otros utilizadores, por lo que, en la mayoría de los países, las compañías suministradoras de energía eléctrica han establecido unas normas que limitan la magnitud de las corrientes armónicas que pueden generar los usuarios. Muchas de esas normas están basadas en la norma de la Asociación de Electricidad del Reino Unido G 5/3, promulgada en 1975, recientemente sustituida por la norma G 5/4 (2001). Esta norma se tratará en detalle en otra sección de esta Guía.

Medidas para reducir los armónicos

Las medidas disponibles para controlar la magnitud de las corrientes armónicas generadas se tratan en otras secciones de esta Guía. En esta sección se ofrece un breve resumen general. Los métodos para reducir los armónicos, de una manera genérica, se pueden clasificar en tres apartados: filtros pasivos; transformadores de aislamiento y de reducción de armónicos; y soluciones activas. Cada una de estas soluciones tiene ventajas e inconvenientes, por lo que no hay una solución que por sí sola pueda considerarse la mejor. Es muy fácil gastar una gran cantidad de dinero en una solución inadecuada e ineficaz, por lo que lo más prudente es llevar a cabo un estudio completo del problema. Las herramientas adecuadas para ello se describen en otra sección de esta Guía.

Filtros pasivos

Se emplean filtros pasivos para establecer un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas de forma que circulen por el filtro y no por la fuente de alimentación (figura 17). El filtro puede estar diseñado para un armónico determinado o para una banda ancha de armónicos, dependiendo de los exigencias del sistema.

A veces es preciso desarrollar un filtro más complejo para aumentar la impedancia en serie a las frecuencias armónicas y así disminuir la parte de corriente que fluye hacia la fuente de alimentación, como se muestra en la figura 18.

A veces se propone el empleo de filtros eliminadores de banda en serie, bien sobre la fase o en el neutro. Se coloca un filtro en serie para impedir el paso de las corrientes armónicas en lugar de establecer un camino controlado para ellas, con lo que se produce una gran caída de la tensión armónica a través de ellos. Esta tensión armónica aparece a través de la fuente de alimentación en el lado de la carga. Como la tensión de alimentación está muy distorsionada, ya no está dentro de los límites para los cuales está diseñado y garantizado el equipo. Algunos equipos son relativamente insensibles a esta distorsión, pero algunos son muy sensibles. Los filtros en serie pueden ser muy útiles en ciertas circunstancias, pero deben utilizarse con cuidado, por lo que no pueden recomendarse como solución de aplicación general.

Transformadores de separación

Como se ha mencionado anteriormente, por los bobinados en triángulo de los transformadores circulan corrientes armónicas triple-N. Aunque esto es un problema para los fabricantes y diseñadores de transformadores, que deben tener en cuenta la carga adicional, es beneficioso para los proyectistas de las redes de suministro porque separan los armónicos triple-N de la fuente de alimentación.

Puede conseguirse el mismo efecto utilizando transformadores con bobinado en "zig-zag". De hecho estos transformadores "zig-zag" son autotransformadores con configuración en estrella con una relación particular de fase entre sus bobinados que están conectados en paralelo con la fuente de alimentación.

Filtros activos

Las soluciones mencionadas hasta ahora son adecuadas solamente para determinados armónicos, el transformador de separación sólo es útil para confinar los armónicos triple-N y los filtros pasivos sólo son adecuados para las frecuencias armónicas para las que han sido diseñados. En algunas instalaciones el contenido de armónicos es impredecible. En muchas instalaciones informáticas, por ejemplo, la combinación de equipos y su situación está cambiando constantemente,

de forma que los armónicos también están en constante cambio. Una solución adecuada en estos casos es el filtro activo o compensador activo de armónicos.

Como se muestra en la figura 20, el filtro activo es un dispositivo conectado en paralelo. Un transformador de intensidad mide el contenido de armónicos de la corriente de carga y controla un generador de corriente que produce una réplica exacta de los mismos de signo opuesto, que es enviada a la fuente de alimentación en el ciclo siguiente. Como la corriente armónica es compensada por el filtro activo, sólo la corriente fundamental procede

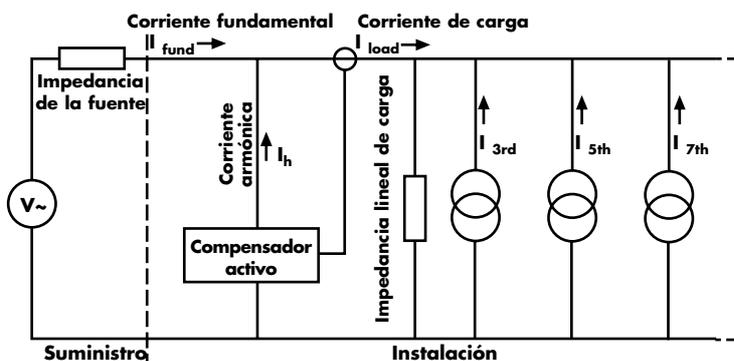


Figura 20 - Compensador activo de armónicos

de la fuente de alimentación. En la práctica, la magnitud de las corrientes armónicas se reducen en un 90% y, debido a que la impedancia de la fuente a las frecuencias armónicas es reducida, la distorsión de tensión también se reduce.

Conclusión

Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos modernos contienen una fuente de alimentación de funcionamiento conmutado o disponen de alguna forma de control de la alimentación y por lo tanto son cargas no lineales. Las cargas lineales son relativamente raras, siendo los únicos ejemplos comunes de ellas las lámparas de incandescencia de intensidad no regulable y las estufas no programables.

En otras secciones de esta Guía se tratarán en detalle las futuras especificaciones para equipos, pero éstas no se han establecido todavía de forma lo bastante precisa para conseguir un auténtico impacto sobre la contaminación producida por la generación de armónicos en los equipos electrónicos, como por ejemplo los PCs. Es esta clase de equipos la que produce muchos de los problemas de armónicos que se detectan hoy día en la industria y en el comercio, en parte debido a que hay un gran número de ellos instalados y en parte porque el tipo de armónicos que generan, los triple-N, provocan numerosos problemas.

Con el aumento de la cantidad de equipos electrónicos instalados, y sin disponer todavía de normas estrictas respaldadas por rígidas medidas de control, es probable que la contaminación de armónicos siga aumentando. Esto supone un riesgo para las empresas, que a causa de ello necesitan invertir en buenos procedimientos de diseño, equipos eléctricos adecuados y buenos programas de mantenimiento.

Red de Colaboradores

Copper Benelux

168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 7099
Email: mail@copperbenelux.org
Web: www.copperbenelux.org

Contact: Mr B Dôme

Copper Development Association

Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Webs: www.cda.org.uk & www.brass.org

Contact: Mrs A Vessey

Deutsches Kupferinstitut e.V

Am Bonnheshof 5
D-40474 Duesseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de

Contact: Mr S Fassbinder

ECD Services

Via Cardinal Maffi 21
I-27100 Pavia
Italy

Tel: 00 39 0382 538934
Fax: 00 39 0382 308028
Email: info@ecd.it
Web: www.ecd.it

Contact: Dr A Baggini

European Copper Institute

168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Web: www.eurocopper.org

Contact: Mr H De Keulenaer

Hevrox

Schoebroekstraat 62
B-3583 Beringen
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420
Fax: 00 32 11 454 423
Email: info@hevrox.be

Contact: Mr I Hendrikx

HTW

Goebenstrasse 40
D-66117 Saarbruecken
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279
Fax: 00 49 681 5867 302
Email: wlang@htw-saarland.de

Contact: Prof Dr W Langguth

Istituto Italiano del Rame

Via Corradino d'Ascanio 4
I-20142 Milano
Italy

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirednet.it
Web: www.iir.it

Contact: Mr V Loconsolo

KU Leuven

Kasteelpark Arenberg 10
B-3001 Leuven-Heverlee
Belgium

Tel: 00 32 16 32 10 20
Fax: 00 32 16 32 19 85
Email: ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be

Contact: Prof Dr R Belmans

Polish Copper Promotion Centre SA

PL.1 Maja 1-2
PL-50-136 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: copperpl@wroclaw.top.pl

Contact: Mr P Jurasz

TU Bergamo

Viale G Marconi 5
I-24044 Dalmine (BG)
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07
Fax: 00 39 035 56 27 79
Email: graziana@unibg.it

Contact: Prof R Colombi

TU Wroclaw

Wybrzeze Wyspianskiego 27
PL-50-370 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192
Fax: 00 48 71 32 03 596
Email: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Contact: Prof Dr H Markiewicz



David Chapman

 **Copper Development Association**

Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731200
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Websites: www.cda.org.uk
www.brass.org



Princesa, 79
28008 Madrid
Tel.: 91 544 84 51
Fax: 91 544 88 84



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org