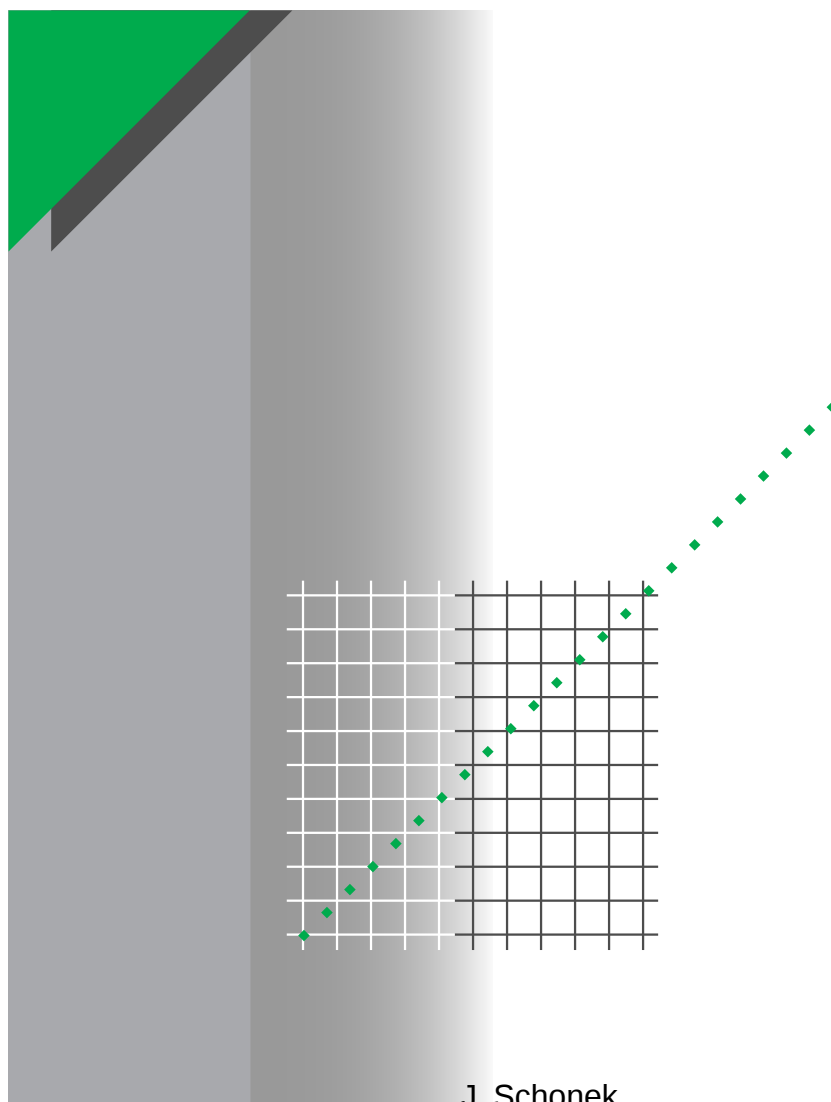


Cuaderno Técnico nº 202

Las peculiaridades del 3^{er} armónico



J. Schonek

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 202 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 202

Las peculiaridades del 3^{er} armónico



Jacques SCHONEK

Ingeniero ENSEIHT y Doctor-Ingeniero por la Universidad de Toulouse, participó desde 1980 a 1995 en el diseño de los variadores de velocidad de la marca Telemecanique.

A continuación se encargó de la actividad de Filtrado de Armónicos.

Actualmente es responsable de las Aplicaciones y Redes Electrotécnicas en el Bureau des Etudes Avancé de la División BT de Potencia de Schneider Electric.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: julio 2000

Versión española: febrero 2001



Las peculiaridades del 3^{er} armónico

En las instalaciones eléctricas con el neutro distribuido, las cargas no lineales pueden provocar en este conductor sobrecargas importantes debidas a la presencia del armónico de 3^{er} orden.

En este Cuaderno Técnico se explica este fenómeno y las posibles soluciones.

1 Origen de los armónicos	1.1 Corriente absorbida por las cargas no lineales	p. 5
	1.2 Cargas no lineales simétricas	p. 5
	1.3 Cargas trifásicas	p. 6
	1.4 Cargas monofásicas	p. 7
2 Sobrecarga del conductor neutro	2.1 Armónicos de 3^{er} orden y múltiplos de 3	p. 8
	2.2 Cálculo del valor eficaz de la corriente de neutro	p. 10
	2.3 Sobrecarga del conductor neutro en función de la distorsión de la corriente	p. 11
3 El 3^{er} armónico en los transformadores	3.1 Transformador triángulo-estrella	p. 13
	3.2 Transformador con el secundario en zigzag	p. 13
4 Las soluciones	4.1 Adaptar la instalación	p. 14
	4.2 Triángulo-estrella	p. 14
	4.3 Transformador con el secundario en zigzag	p. 14
	4.4 Reactancia de acoplamiento en zigzag	p. 15
	4.5 Filtro de rango 3 en el neutro	p. 15
	4.6 Dispositivos de filtro	p. 16
Anexo: Cálculo de los coeficientes de Fourier para una corriente rectangular		p. 18
Bibliografía		p. 20

1 Origen de los armónicos

1.1 Corriente absorbida por las cargas no lineales

Las cargas no lineales producen corrientes armónicas, es decir, absorben una corriente que no tiene la misma forma que la tensión que les alimenta. Las cargas que más frecuentemente producen este fenómeno son los circuitos rectificadores.

Una carga no lineal cualquiera, como la representada en la **figura 1**, absorbe una corriente que contiene todos los armónicos, pares e impares. En las **figuras 2 y 3** se representa la gráfica de la corriente absorbida, cuyas dos semiondas son diferentes, y el espectro de frecuencias de sus armónicos.

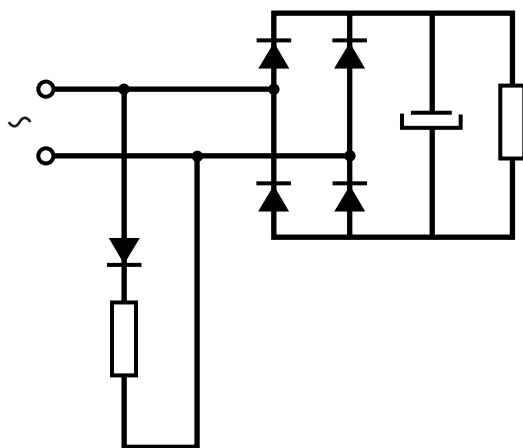


Fig. 1: Ejemplo de una carga cualquiera no lineal (no simétrica).

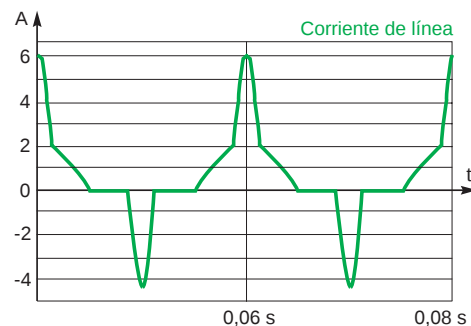


Fig. 2: Gráfica de la corriente absorbida.

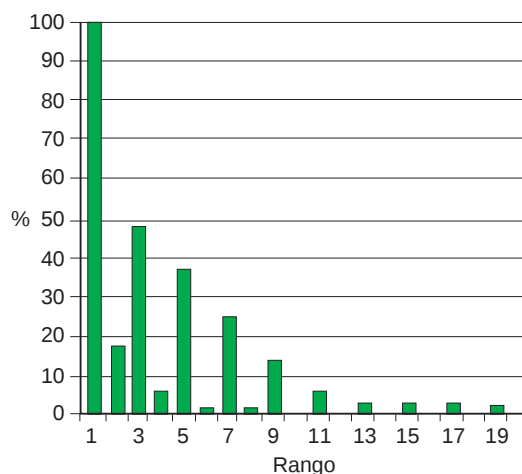


Fig. 3: Espectro de la corriente absorbida.

1.2 Cargas no lineales simétricas

La mayor parte de las cargas conectadas a la red son, sin embargo, simétricas, es decir, que las dos semiondas de corriente son iguales y opuestas. Esto se puede expresar matemáticamente por la expresión:

$$f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$$

En este caso, **los armónicos de orden par son nulos**. En efecto, si se supone que la corriente contiene un armónico de 2º orden, es posible escribir, por ejemplo:

$$I(\omega t) = I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t.$$

Por tanto:

$$I(\omega t + \pi) = I_1 \sin(\omega t + \pi) + I_2 \sin 2(\omega t + \pi)$$

$$I(\omega t + \pi) = -I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t.$$

Esta expresión no puede ser igual a $-I(\omega t)$ más que si I_2 (amplitud del 2º armónico) es nula.

Este razonamiento puede aplicarse a todos los armónicos de orden par.

1.3 Cargas trifásicas

Tenemos una carga trifásica, no lineal, equilibrada, simétrica, sin conexión del neutro, como la que representa la **figura 4**. Suponiendo que las corrientes absorbidas por esta carga contienen el 3^{er} armónico, las corrientes armónicas de 3^{er} orden de cada una de las fases pueden escribirse de este modo:

$$i_{r3} = I_3 \sin 3\omega t$$

$$i_{s3} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I_3 \sin (3\omega t - 2\pi) = i_{r3}$$

$$i_{t3} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I_3 \sin (3\omega t - 4\pi) = i_{r3}$$

$$i_{r3} = i_{s3} = i_{t3}$$

Por tanto, las corrientes armónicas de rango 3 son iguales.

Ahora bien, si no hay conductor neutro,

$$i_r + i_s + i_t = 0.$$

La suma de las corrientes armónicas de 3^{er} orden, en concreto, debe de ser nula, lo que sólo es posible si alguna de las componentes es nula.

Por tanto, **si no están conectadas a un cable de neutro, las cargas trifásicas, equilibradas, simétricas no producen armónico de 3^{er} orden.**

Este razonamiento puede aplicarse a todos los armónicos múltiplos de 3. Por tanto, las corrientes armónicas no nulas son las de orden 5, 7, 11, 13, ..., es decir, las de la forma $6k \pm 1$.

La demostración puede aplicarse a todos los sistemas que tienen rectificadores, controlados o no. Se demuestra también que el orden de armónicos se escribe $h = (n.p) \pm 1$, en donde n es un número entero (1, 2, 3, 4, 5, ...) y p el número de rectificadores que componen el equipo. Por ejemplo, un circuito con un único rectificador (rectificador de media onda) tiene armónicos de orden $n \pm 1$, y tiene todos los

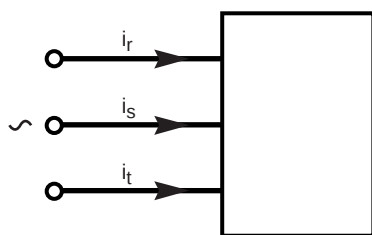


Fig. 4: Carga trifásica.

armónicos posibles desde 0, que es la corriente continua. Para un puente formado por 4 diodos, el primer armónico es el de 3^{er} orden, según la demostración del párrafo 1.2.

Este efecto se representa en el esquema formado por un rectificador a diodos con filtro capacitativo (**figura 5**), en el que la corriente absorbida se representa en la gráfica de la **figura 6** y su espectro en la **figura 7**.

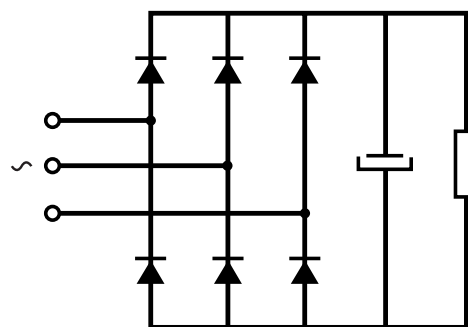


Fig. 5: Puente rectificador trifásico con filtro capacitativo.

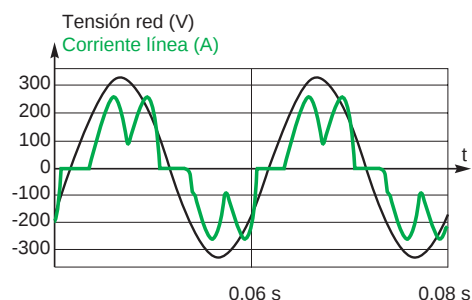


Fig. 6: Gráfica de la corriente absorbida en el esquema de la figura 5.

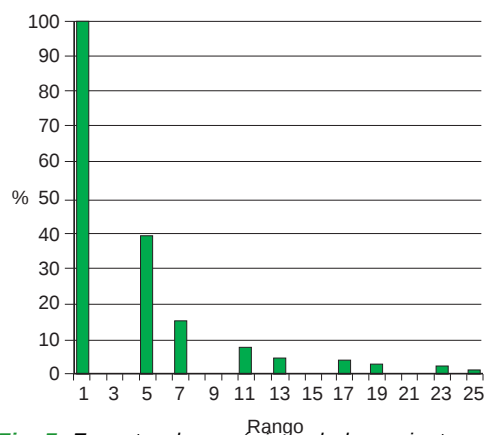


Fig. 7: Espectro de armónicos de la corriente absorbida en el ejemplo de la figura 5.

Este esquema se utiliza normalmente en los variadores de velocidad, las alimentaciones ininterrumpidas (SAI) y los sistemas de caldeo por inducción.

El lector encontrará en el anexo los cálculos de los coeficientes de Fourier para determinar las amplitudes de los armónicos de las corrientes absorbidas por un rectificador trifásico ideal.

1.4 Cargas monofásicas

Recordemos que las cargas simétricas no producen armónicos de orden par (apartado 1.2). Puesto que el espectro es decreciente, el armónico de 3^{er} orden predomina en las cargas monofásicas. Así, en las cargas de uso muy frecuente con rectificador monofásico a diodos con filtro capacitativo (figura 8), el armónico de 3^{er} orden puede

alcanzar el 80% de la fundamental. La forma de onda de la corriente que absorben y su espectro de frecuencias armónicas están representados en las figuras 9 y 10. En todo tipo de actividades, hay muchos aparatos con este tipo de circuito (figura 11). Son los principales generadores del armónico de 3^{er} orden.

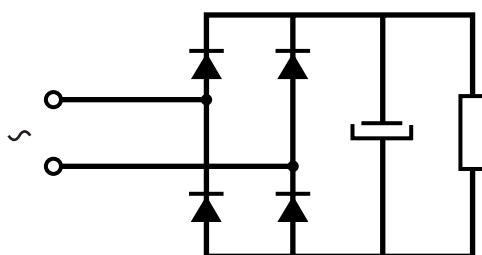


Fig. 8: Rectificador monofásico con filtro capacitativo.

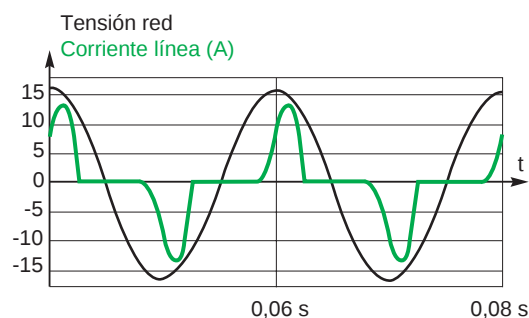


Fig. 9: Gráfica de la corriente absorbida en el esquema de la figura 8.

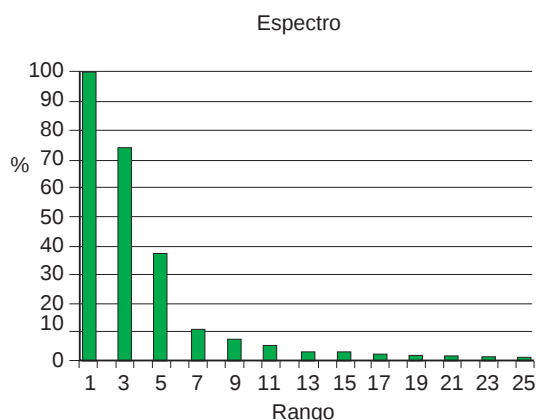


Fig. 10: Espectro de armónicos de la corriente absorbida en el esquema de la figura 8.

Actividad	Aparatos
Doméstica	TV, hi-fi, vídeo, horno microondas, ...
Terciaria	Micro-ordenadores, impresoras, fotocopadoras, fax, ...
Industrial	Alimentación conmutada, variadores de velocidad

Fig. 11: Algunos ejemplos de aparatos que tienen un rectificador monofásico con filtro capacitativo.

2 Sobrecarga del conductor neutro

2.1 Armónicos de 3^{er} orden y múltiplos de 3

Consideremos un sistema simplificado constituido por una fuente trifásica equilibrada y tres cargas monofásicas idénticas, conectadas entre fase y neutro (**figura 12**).

Si las cargas son lineales, las corrientes forman un sistema trifásico equilibrado. Por tanto, la suma de las corrientes de fase es nula y también la corriente de neutro.

$$i_n = \sum i_i = 0$$

En el caso de cargas no lineales, las corrientes de las fases no son senoidales y por tanto contienen armónicos, en especial del rango de los múltiplos de 3.

Puesto que las corrientes de las 3 fases son iguales, las corrientes armónicas de 3^{er} orden, por ejemplo, tienen la misma amplitud y se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} i_{r3} &= I_3 \sin 3(\omega t) \\ i_{s3} &= I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = \\ &= I_3 \sin (3\omega t - 2\pi) = i_{r3} \\ i_{t3} &= I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = \\ &= I_3 \sin (3\omega t - 4\pi) = i_{r3} \end{aligned}$$

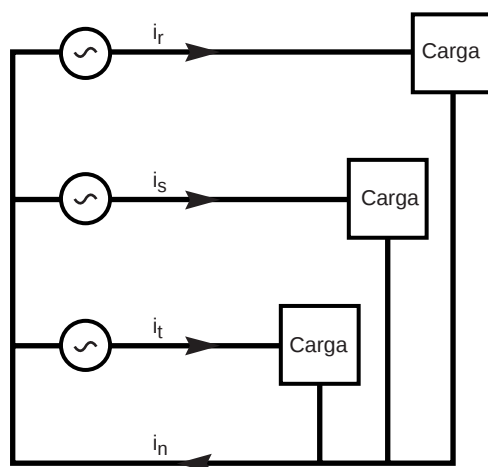


Fig. 12: Cargas monofásicas.

Por tanto, en este ejemplo simplificado, **las corrientes armónicas de 3^{er} orden de las 3 fases son idénticas**.

Puesto que la corriente en el neutro es igual a la suma de las corrientes de las fases, la componente de 3^{er} orden de la corriente de neutro es igual a la suma de las corrientes de 3^{er} orden, o sea: $i_{n3} = 3i_{r3}$.

Generalizando, con cargas equilibradas, las corrientes armónicas de rango múltiplo de 3 están en fase y se suman aritmeticamente en el conductor neutro, puesto que se anulan las componentes fundamentales y las armónicas de rango no múltiplo de 3.

Las corrientes armónicas de 3^{er} orden son por tanto corrientes homopolares, puesto que circulan en fase por las tres fases.

Razonamiento para la representación gráfica

■ Superposición de los armónicos de 3^{er} orden

La **figura 13** representa 3 corrientes senoidales trifásicas de 50 Hz y 3 corrientes senoidales de 150 Hz, en fase, cada una, con una de las corrientes de 50 Hz. Estas 3 corrientes (de 150 Hz) son iguales y, por tanto, se superponen.

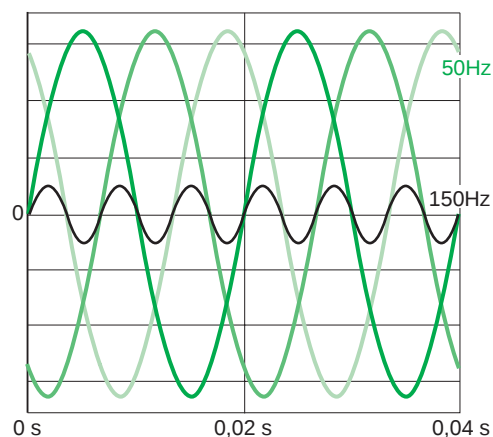


Fig. 13: Corrientes trifásicas a 50 Hz y 150 Hz absorbidas por cargas lineales.

■ Representación de la corriente de neutro

La **figura 14** representa las corrientes que circulan en las fases de las 3 cargas monofásicas no lineales idénticas, conectadas

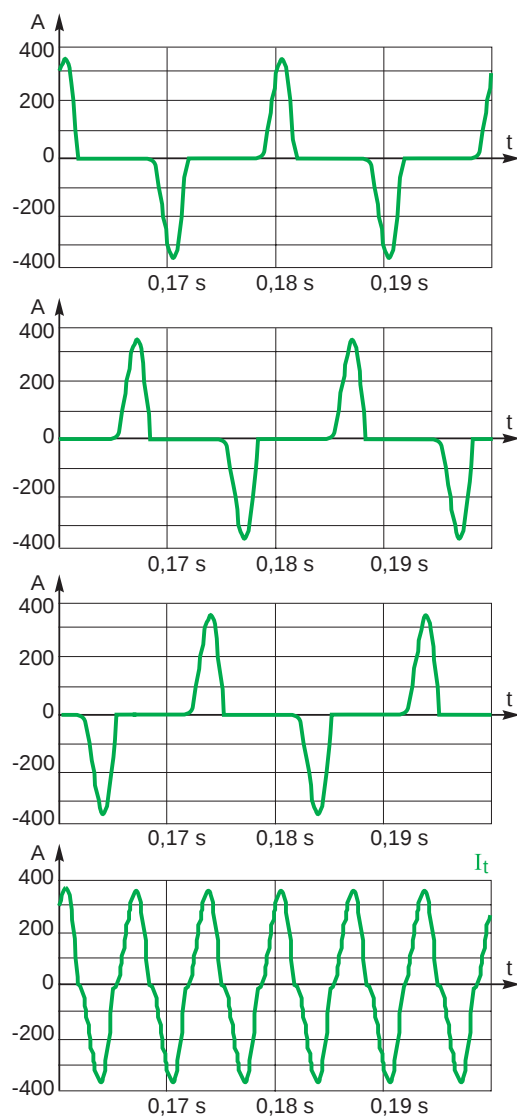


Fig. 14: Corrientes de las fases y de neutro que alimentan cargas monofásicas no lineales.

entre fase y neutro y también la corriente que resulta en el conductor neutro.

En las **figuras 15** y **16** se representan los espectros de frecuencia de estas corrientes. Nótese que la corriente de neutro sólo tiene las componentes impares múltiplos de 3 (3, 9, 15, ...), y por tanto sus amplitudes son 3 veces mayores que las corrientes de las fases.

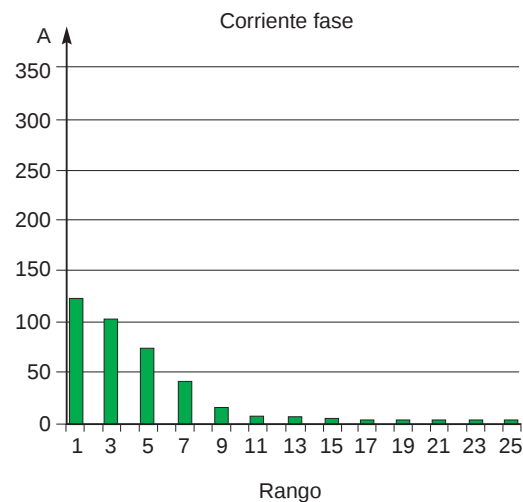


Fig. 15: Espectro de la corriente de fase que alimenta cargas monofásicas no lineales.

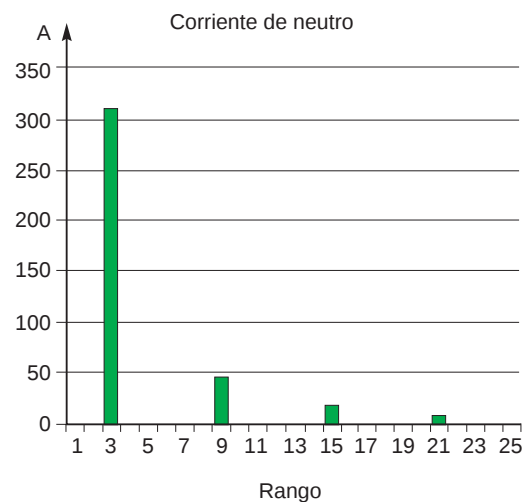


Fig. 16: Espectro de la corriente de neutro absorbida por cargas monofásicas no lineales.

2.2 Cálculo del valor eficaz de la corriente de neutro

Supongamos, como en la **figura 14**, que las ondas de las corrientes de las tres fases no se superpusieran.

En un período T de la fundamental, la corriente de una fase está constituida por una onda positiva y una onda negativa separadas un intervalo en el que la corriente es nula.

El valor eficaz de la corriente de línea puede calcularse mediante la fórmula:

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_l^2 dt}$$

El valor eficaz de la corriente de neutro puede calcularse para un intervalo igual a $T/3$.

En este intervalo, la corriente de neutro está también constituida por una onda positiva y una onda negativa, idénticas a las de la corriente de fase. Por tanto, el valor eficaz de la corriente de neutro puede calcularse de la siguiente manera:

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{T/3} \int_0^{T/3} i_n^2 dt}$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_n^2 dt}$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_l^2 dt} = \sqrt{3} I_L$$

Por tanto, la corriente en el conductor neutro tiene aquí un valor eficaz $\sqrt{3}$ veces superior a la corriente en una fase.

Cuando las ondas de corriente de las 3 fases se superponen, como en el ejemplo de la **figura 17**, el valor eficaz de la corriente en el neutro es menor de $\sqrt{3}$ veces el valor eficaz de la corriente (1) en una fase (**figura 18**).

En las instalaciones en las que existe un gran número de cargas no lineales, como las alimentaciones conmutadas de los equipos informáticos, la corriente en el neutro puede rebasar la corriente en cada fase. Esta situación, aunque poco frecuente, necesita un conductor de neutro sobredimensionado.

La solución que normalmente se utiliza es instalar un conductor de neutro de sección doble de la del conductor de fase. Los aparatos de protección y mando (interruptor automático, interruptores, contactores, ...) deben de estar dimensionados en función de la corriente en el neutro.

(1) NOTA DEL TRADUCTOR:

La demostración expuesta es solamente válida para las formas de onda que no se superponen. La limitación de la intensidad del neutro a 1,7 veces la intensidad de fase no es matemáticamente generalizable para todas las formas posibles de onda. Sin embargo, en la mayoría de los casos reales, la presencia de 3^{er} armónico viene acompañada de otros armónicos, especialmente el 5^o y el 7^o (**figura 15**), y las más de las veces se cumple que la intensidad del neutro es menor que 1,7 veces la intensidad de fase.

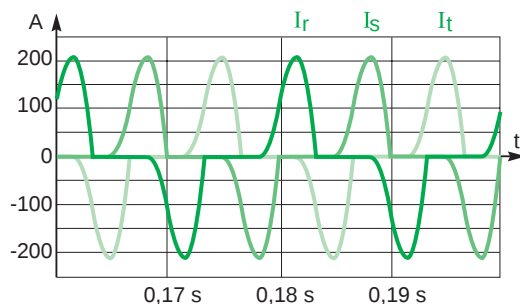


Fig. 17: Corrientes de las 3 fases.

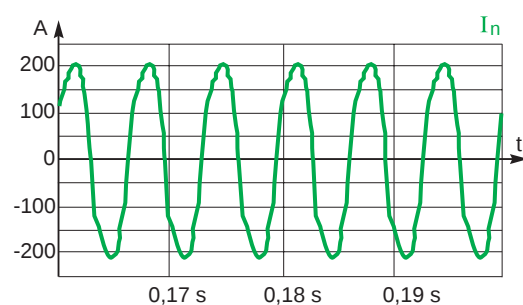


Fig. 18: Corriente en el neutro.

2.3 Sobrecarga del conductor neutro en función de la distorsión de la corriente

Cargas equilibradas

Teniendo presente que el armónico 3 es el armónico preponderante, la tasa de distorsión está muy próxima a la tasa de distorsión del armónico 3. Por tanto:

$$\text{THD} = i_3 (\%)$$

Por otra parte, como se indica en el apartado 2.1, el valor de la corriente en el neutro I_N está muy próximo a $3 I_3$.

O sea: $I_N \approx 3 I_3$ (A), que se puede expresar de la siguiente forma:

$$I_N \approx 3 \cdot i_3 \cdot I_1 \approx 3 \text{ THD } I_1.$$

Utilizando la fórmula general:

$$I_1 = \frac{I_L}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}},$$

$$\text{se obtiene: } I_N \approx 3 \text{ THD } \frac{I_L}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}$$

$$\Rightarrow \frac{I_N}{I_L} \approx \frac{3 \text{ THD}}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}.$$

Esta fórmula aproximada es únicamente válida si el resultado es inferior a $\sqrt{3}$. Por tanto, la

tasa de la carga de la corriente de neutro varía en función de la tasa de distorsión expresada en la curva de la **figura 19**.

Cargas desequilibradas

Consideremos el sistema simplificado constituido por una fuente trifásica equilibrada y por dos cargas monofásicas, conectadas entre fases y neutro (**figura 20**).

Se puede demostrar, de la misma manera que en el apartado 2.2 que el valor máximo de la corriente de neutro no puede sobrepasar $\sqrt{2}$ veces la corriente en cada fase.

Considerando solamente la corriente fundamental y la corriente armónica 3 de cada una de las cargas, la corriente en el neutro es la suma de una corriente fundamental y de una corriente armónica 3:

■ la corriente fundamental es la suma vectorial de las corrientes fundamentales en las dos cargas. Puesto que estas corrientes son iguales y están defasadas 120° , la corriente resultante es igual a la corriente fundamental de cada una de las cargas,

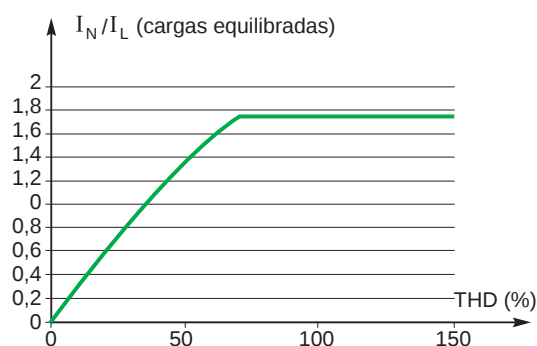


Fig. 19: Tasa de carga de la corriente de neutro (cargas equilibradas).

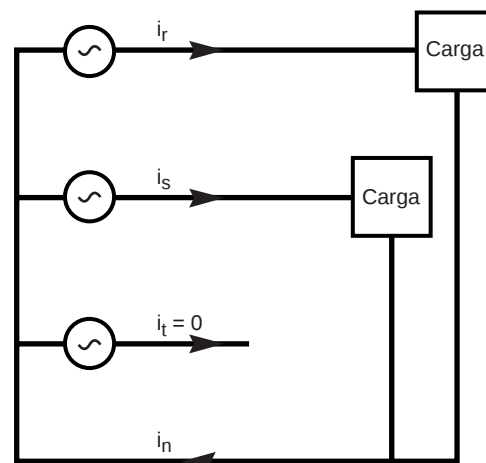


Fig. 20: Cargas desequilibradas.

■ la corriente armónica 3 es la suma de las corrientes armónicas 3 (que están en fase). Por tanto la corriente eficaz en el neutro es igual a: $I_N \approx \sqrt{I_1^2 + (2I_3)^2}$

Utilizando las mismas fórmulas que anteriormente, se tiene que:

$$I_N \approx \sqrt{I_1^2 + (2 \text{ THD } I_1)^2}$$

$$I_N \approx I_1 \sqrt{1 + 4 \text{ THD}^2}$$

$$I_N \approx \frac{I_L}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}} \sqrt{1 + 4 \text{THD}^2}$$

$$\Rightarrow \frac{I_N}{I_L} \approx \frac{\sqrt{1 + 4 \text{THD}^2}}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}$$

Esta fórmula aproximada es únicamente válida si el resultado es inferior a $\sqrt{2}$. Por tanto, la tasa de la carga de la corriente de neutro varía en función de la tasa de distorsión expresada en la curva de la **figura 21**.

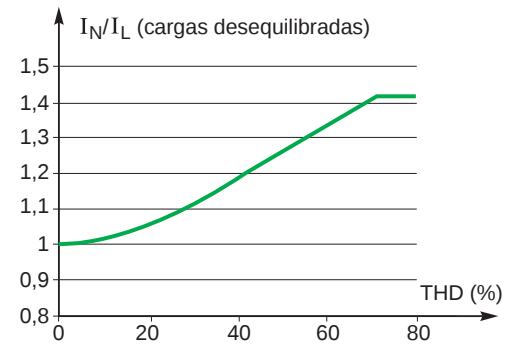


Fig. 21: Tasa de carga de la corriente de neutro (cargas desequilibradas).

3 El 3^{er} armónico en los transformadores

3.1 Transformador triángulo-estrella

Consideremos un transformador triángulo-estrella, que alimenta unas cargas no lineales, idénticas, conectadas entre fase y neutro (**figura 22**).

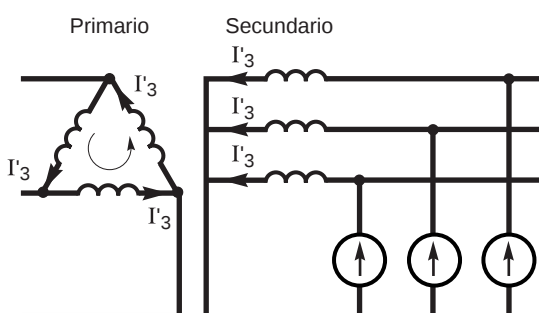


Fig. 22: Corrientes armónicas de 3^{er} orden en un transformador triángulo-estrella.

Cada una de las cargas produce una corriente armónica de rango 3. Recordemos que estas corrientes (I_3), armónicas de rango 3, son iguales.

Por tanto, las corrientes armónicas de rango 3 en los arrollamientos primarios del transformador, son también idénticas entre sí (I'_3).

En cada nudo del triángulo del primario, las corrientes armónicas de rango 3 se compensan y, por tanto, la corriente en la línea no contiene el armónico 3.

Por tanto, la corriente armónica de rango 3 no se transmite a la red. Pero estas corrientes circulan por los arrollamientos primarios del transformador y provocan calentamientos adicionales.

Por otra parte, la circulación de estas corrientes provoca una distorsión de la tensión en el primario debido a las impedancias de los arrollamientos del transformador.

3.2 Transformador con el secundario en zigzag

Consideremos ahora un transformador con el secundario en zigzag, que alimenta cargas no lineales, idénticas, conectadas entre fase y neutro (**figura 23**). Cada una de estas cargas produce una corriente armónica de rango 3 (representada por I_3 en el esquema). Recordemos que estas corrientes armónicas de rango 3 son iguales.

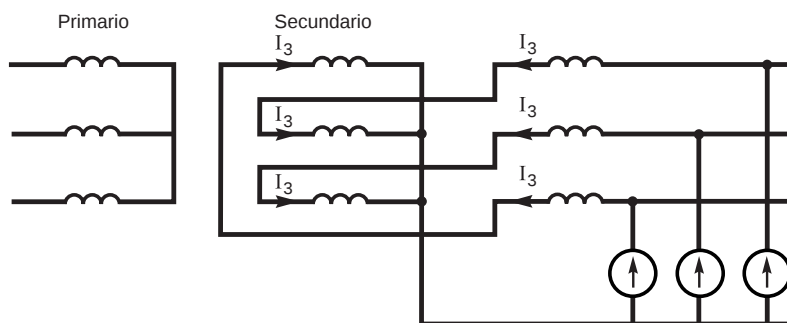


Fig. 23: Corrientes armónicas de 3^{er} orden en un transformador con el secundario en zigzag.

Se ve fácilmente en esta figura que en cada columna del secundario, se anulan los amperio-vueltas. De lo que se deduce que no circula ninguna corriente armónica de 3^{er} orden por el primario.

4 Las soluciones

En las instalaciones del sector terciario, las alimentaciones conmutadas y el alumbrado fluorescente con balastro electrónico son muy frecuentes. El alto porcentaje del 3^{er} armónico en este tipo de cargas puede tener una importancia significativa en el dimensionamiento del conductor neutro.

En un edificio de oficinas, la corriente en el conductor neutro puede alcanzar 1,4 a 1,7 veces la corriente de fase. Pueden utilizarse varios tipos de dispositivos diferentes para eliminar los efectos de las corrientes del 3^{er} armónico.

4.1 Adaptar la instalación

Las principales soluciones a la sobrecarga del conductor neutro son las siguientes:

- utilizar un conductor neutro separado para cada fase,
- duplicar la sección del conductor neutro.

Sabiendo que la corriente en el neutro no puede sobrepasar 1,7 veces la corriente en cada fase, ésta es una solución tecnológicamente simple para evitar la sobrecarga del conductor neutro.

4.2 Triángulo-estrella

Como se ha explicado en el párrafo 3.1, las corrientes armónicas de rango 3 que circulan por el secundario de un transformador triángulo-estrella no se transmiten a la línea de alimentación del transformador. Esta disposición se utiliza normalmente en la distribución, lo que evita la circulación de corrientes armónicas de 3^{er} rango en las líneas de transporte y distribución de energía.

Hay que tener presente que la eliminación de las corrientes armónicas de 3^{er} orden no es completa si las cargas no son totalmente iguales. Por tanto, si las corrientes armónicas de 3^{er} orden de las 3 fases no son idénticas, no se anulan totalmente en los vértices del triángulo.

4.3 Transformador con el secundario en zigzag

Según la explicación dada en el apartado 3.2, las corrientes armónicas de 3^{er} orden del secundario de un transformador con el secundario en zigzag no pasan a los arrollamientos del primario.

Esta disposición se utiliza normalmente aunque el transformador sea más pesado que el transformador triángulo-estrella.

Hay que decir también que la eliminación de las corrientes del 3^{er} armónico sólo es total si

las cargas están perfectamente equilibradas. En este caso, con el secundario en zigzag, si las corrientes armónicas de 3^{er} orden de las 3 fases no son idénticas, la compensación en amperios-vuelta en cada columna del secundario no es total: puede circular por el arrollamiento primario una corriente armónica de 3^{er} orden y por tanto pasar también a la línea de alimentación.

4.4 Reactancia de acoplamiento en zigzag

La **figura 24** representa el esquema de principio de esta reactancia en zigzag. Como en el caso de un transformador en zigzag, se ve fácilmente en esta figura que los amperios-vueltas de una misma columna se anulan. De ésto se deduce que la impedancia

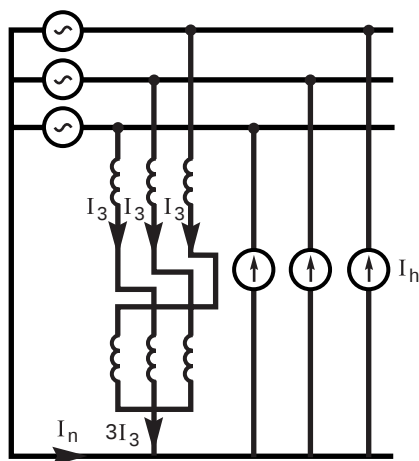


Fig. 24: Reactancia zigzag.

vista por las corrientes armónicas es muy baja (solamente la inductancia de fuga del bobinado). La reactancia en zigzag proporciona un camino de retorno de baja impedancia a las corrientes homopolares, armónicos de 3^{er} orden y múltiplos de 3. Por tanto, reducen la corriente I_n que circula por el neutro de la alimentación, como se ha citado en el caso de las cargas monofásicas (ver también la **figura 14**). La **figura 25** indica claramente la atenuación que se consigue.

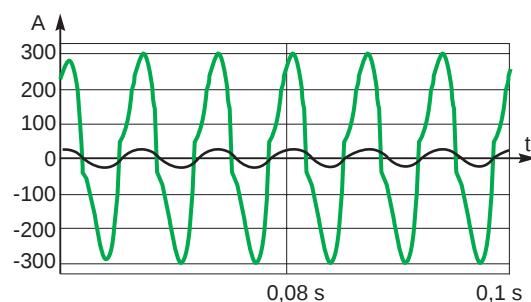


Fig. 25: Diferencia de amplitud de la corriente de neutro con y sin una reactancia en zigzag.

4.5 Filtro de rango 3 en el neutro

El principio de este dispositivo consiste en un circuito flotante o tampón sintonizado al armónico 3 en serie con el conductor neutro (**figura 26**).

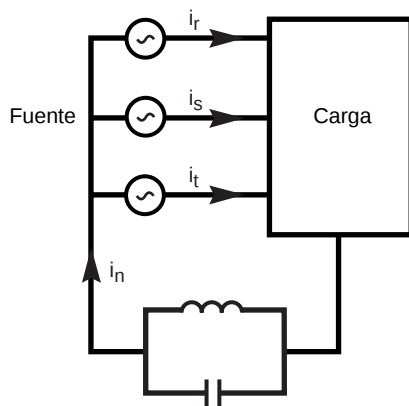


Fig. 26: Filtro de 3^{er} orden en el neutro.

En las **figuras 27 a 32** se representan las formas de onda obtenidas suponiendo que, entre las fases y el neutro, están conectadas las cargas monofásicas del tipo descrito en el apartado 1.4. Se representan sucesivamente: la corriente de fase, la corriente de neutro, la tensión fase-neutro, con y sin filtro.

Se observa una gran reducción de la corriente en el conductor neutro, provocando una distorsión importante de la tensión aplicada a la tensión entre fase y neutro.

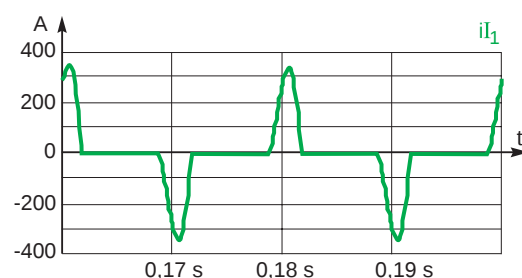


Fig. 27: Corriente de línea sin filtro.

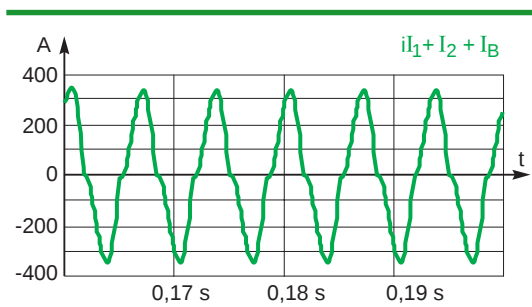


Fig. 28: Corriente de neutro sin filtro.

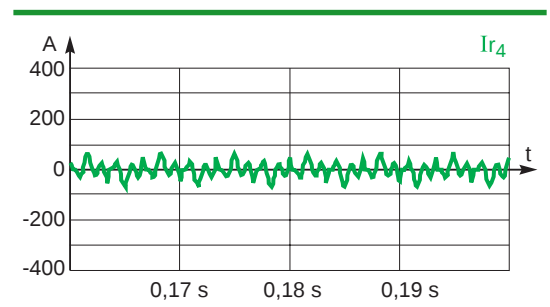


Fig. 31: Corriente de neutro con filtro.

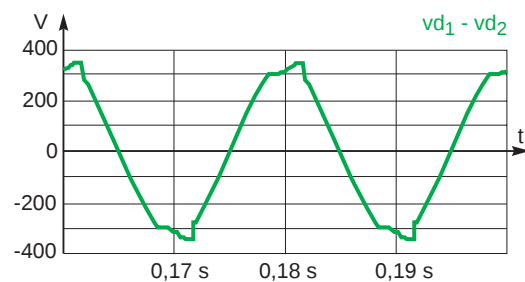


Fig. 29: Tensión simple sin filtro.

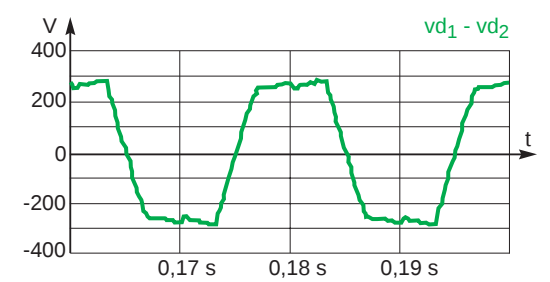


Fig. 32: Tensión simple con filtro.

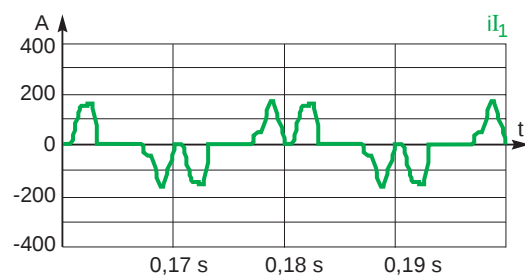


Fig. 30: Corriente de línea con filtro.

4.6 Dispositivos de filtro

■ Instalar un filtro pasivo sintonizado en el rango 3 en las proximidades de las cargas no lineales (**figura 33**).

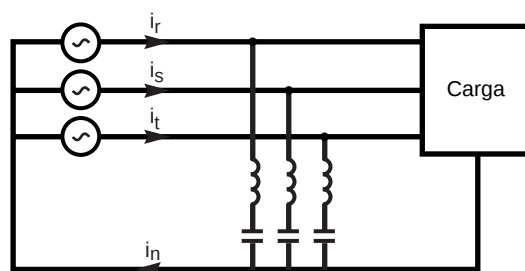


Fig. 33: Filtro pasivo de 3^{er} orden.

Esta solución, teniendo en cuenta la baja frecuencia de sintonía, requiere componentes relativamente pesados.

■ Utilizar un compensador activo situado cerca de las cargas no lineales (**figura 34**). Este tipo de dispositivo tiene la capacidad de compensar una corriente armónica en el neutro cuya amplitud es el triple de la corriente de fase.

Ejemplo: corriente armónica por fase 30 A
corriente armónica en el neutro 90 A.

■ Filtro híbrido (**figura 35**): asociación de un compensador activo que permite eliminar los armónicos de orden 3 y de un filtro pasivo que permite eliminar armónicos preponderantes (5 y 7 por ejemplo).

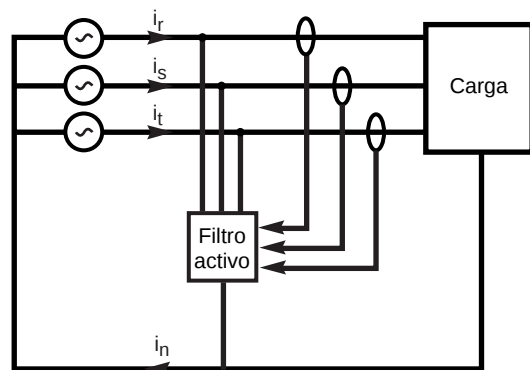


Fig. 34: Filtro activo.

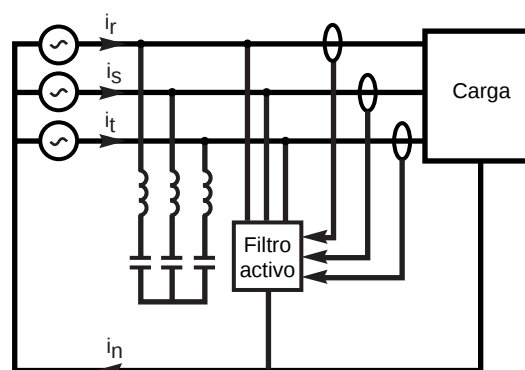


Fig. 35: Filtro híbrido.

Anexo: Cálculo de los coeficientes de Fourier para una corriente rectangular

Consideremos el esquema simplificado (figura 36) de un rectificador controlado, que alimenta una carga ideal y la corriente de cada una de las fases de alimentación (figura 37). Esta función puede expresarse bajo la forma de serie de Fourier:

$$I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

Puesto que la función es impar, todos los coeficientes a_n son nulos.

Los coeficientes b_n pueden calcularse por la relación:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I(t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$b_n = \frac{2I_{dc}}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$b_n = \frac{2I_{dc}}{\pi n} \left[-\cos(n\omega t) \right]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}}$$

$$b_n = \frac{2I_{dc}}{\pi n} \left[\cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(5n \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

Donde se tiene:

$$\begin{aligned} \cos\left(5n \frac{\pi}{6}\right) &= \cos\left(n\pi - n \frac{\pi}{6}\right) = \\ &= \cos(n\pi) \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) + \\ &+ \sin(n\pi) \sin\left(n \frac{\pi}{6}\right) = \\ &= (-1)^n \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) \end{aligned}$$

De donde:

$$b_n = \frac{2I_{dc}}{\pi n} \left[\cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) - (-1)^n \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$b_n = \frac{2I_{dc}}{\pi n} \left[\left(\cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) + (-1)^{n+1} \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right) \right) \right]$$

Si n es par: $b_n = 0$,

si n es impar: $b_n = \frac{4I_{dc}}{\pi n} \cos\left(n \frac{\pi}{6}\right)$,

si $n(\pi/6)$ es un múltiplo impar de $\pi/2$, entonces: $b_n = 0$.

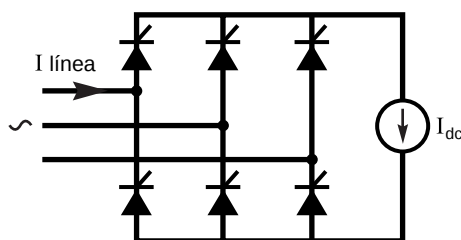


Fig. 36: Rectificador controlado que alimenta una carga que absorbe una corriente perfectamente plana.

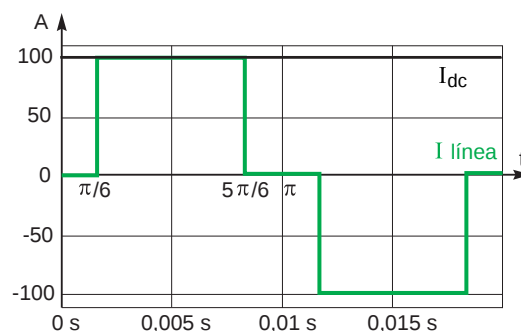


Fig. 37: Corriente de alimentación.

Es decir, para $n \frac{\pi}{6} = (2k+1) \frac{\pi}{2}$.

Sea: $n = 3 (2k + 1)$.

En otros términos, si n es un múltiplo impar de 3, los términos b_n son nulos.

Los únicos términos no nulos tienen la forma:

$$b_n = \frac{2\sqrt{3}I_{dc}}{n\pi} (-1)^m$$

siendo $n = 6m \pm 1$, $m = 0, 1, 2, \dots$

Se obtiene en concreto:

$$b_1 = \frac{2\sqrt{3}I_{dc}}{\pi}.$$

El valor eficaz de la fundamental es por tanto:

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}I_{dc}}{\pi}.$$

El valor eficaz de los armónicos no nulos es igual a:

$$I_n = \frac{I_1}{n}.$$

Bibliografía

Cuadernos Técnicos Schneider Electric

■ Perturbaciones armónicas en las redes perturbadas y su tratamiento.

Cuaderno Técnico nº 152.

C. COLLOMBET - J.M. LUPIN - J. SCHONEK

■ Armónicos: convertidores y compensadores activos.

Cuaderno Técnico nº 183.

E. BETTEGA - J.N. FIORINA

Otras publicaciones Schneider Electric

■ Les harmoniques et les installations électriques.

Ediciones técnicas de l'Institut Schneider Formation.

A. KOUYOUMDJIAN.