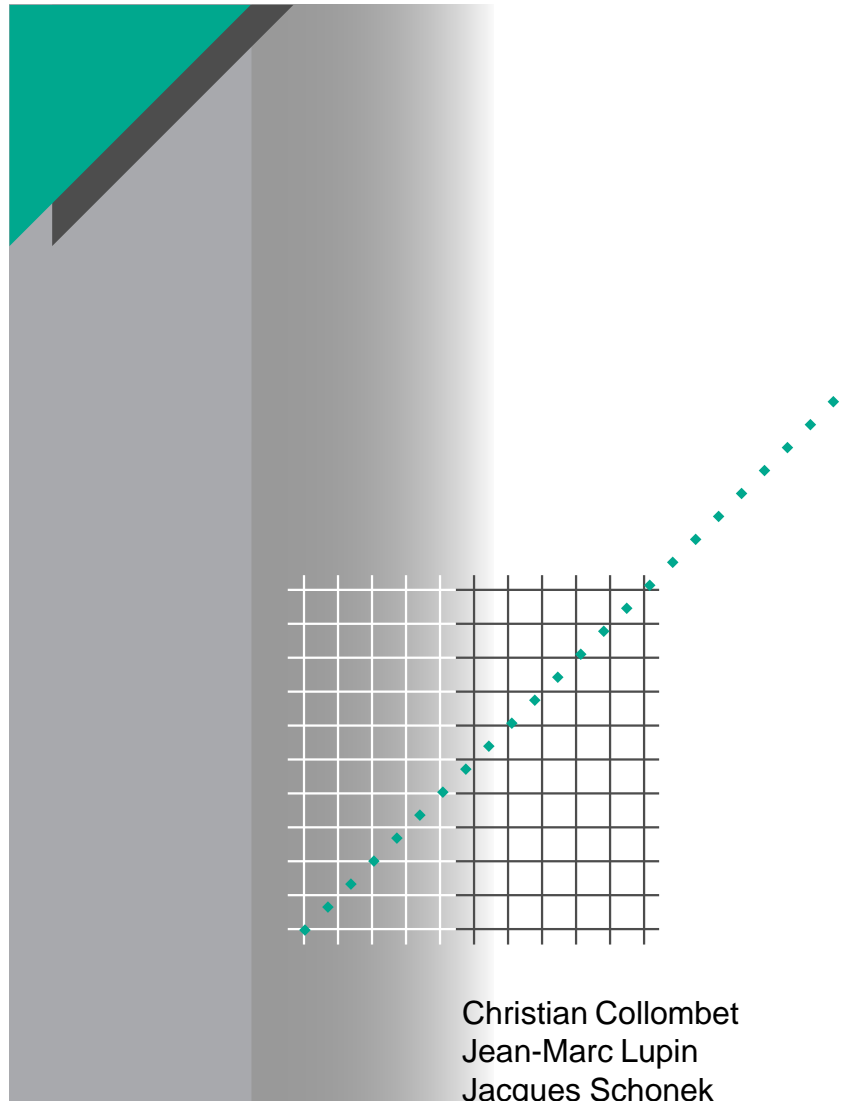


Cuaderno Técnico nº 152

Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento



Christian Collombet
Jean-Marc Lupin
Jacques Schonek



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.schneider-electric.com.ar>

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

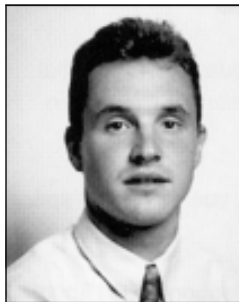
Advertencia

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 152 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 152

Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento



Christian COLLOBET

Ingeniero INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), 1994, realiza un DEA en colaboración con Schneider Electric sobre el cálculo de corrientes de cortocircuito en las redes industriales. En 1995 vuelve a colaborar con la Dirección Científica y Técnica donde realiza estudios sobre el funcionamiento de las redes eléctricas y su interacción con los materiales y equipos.



Jean-Marc LUPIN

Ingeniero Diplomado en la Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble en 1984. En 1985 colabora con Schneider Electric, en el Service Technique de Rectiphase donde participa activamente en la puesta a punto de los condensadores AT, desarrollando después baterías de condensadores y filtros de armónicos. Actualmente ocupa un puesto de experto técnico responsable de ensayos, normalización y previsión en el grupo de estudio de la compensación de energía y filtrado.



Jacques SCHONEK

Ingeniero ENEEHT y Doctor Ingeniero por la Universidad de Toulouse, ha participado desde 1980 a 1995 en el diseño de variadores de velocidad Telemecanique. Ha sido a continuación gerente de la actividad de filtrado de armónicos y actualmente es el responsable de las Aplicaciones y Redes Electrotécnicas en el grupo de BE Avancé de la División de Potencia BT.

Trad.: Elena de Castro, J.M. Giró

Original francesa: septiembre 1999

Versión española: diciembre 2000

Versión argentina: marzo 2003

Merlín Gerín

Modícon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Terminología

Símbolos:

BP: banda pasante de un filtro shunt resonante

C: capacidad de los condensadores. Los condensadores en general

IDA o THD: índice de distorsión armónica o total harmony distortion

δ : ángulo de pérdida de un condensador

f_1 : frecuencia fundamental

f_{ar} : frecuencia de la antirresonancia

f_n : frecuencia de la componente armónica

f_r : frecuencia de resonancia

φ_n : desfase de la componente armónica en el momento inicial

I_n : corriente eficaz de la componente armónica de rango n

j: operador complejo igual a $j^2 = -1$

L: inductancia

L_{cc}: inductancia de cortocircuito de una red, vista desde un punto específico, según el teorema de Thevenin

n: rango de la componente armónica

n_{ar} : rango de la antirresonancia, relación entre la frecuencia de la antiresonancia y la frecuencia fundamental

n_r : rango de la resonancia, relación entre la frecuencia de la resonancia y la frecuencia fundamental

k: entero positivo

p: número de ramas del rectificador

p_1 : pérdidas del filtro debidas únicamente a la corriente fundamental

p_n : pérdidas del filtro debidas únicamente a las corrientes armónicas

P (W): potencia activa

q: factor de calidad de una inductancia

Q: factor de calidad de un filtro

Q (VAR): potencia reactiva

r: resistencia

R: resistencia (o parte real de la impedancia)

espectro: conjunto de armónicos en valor relativo respecto a la fundamental, en un punto específico

S_{cc}: potencia de cortocircuito de una red, en un punto específico

T: periodo de una magnitud alterna

U: tensión eficaz entre fases

U_n : tensión simple eficaz de la componente armónica de rango n

X: reactancia

X_0 : inductancia o impedancia característica de un filtro

X_{cc} : reactancia de cortocircuito de una red, vista desde un punto específico, según el teorema de Thevenin

Y_0 : amplitud de la componente continua

Y_n : valor eficaz de la componente armónica de rango n

Z: impedancia

Siglas:

CIGRE: Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas

IEC: international electrotechnical commission

Perturbaciones armónicas en las redes perturbadas y su tratamiento

La energía eléctrica se distribuye generalmente en forma de tres tensiones que constituyen un sistema trifásico sinusoidal. Uno de los parámetros del sistema es la forma de onda, que debe ser lo más parecida posible a una senoide.

Es necesario corregir esta forma de onda, si su deformación sobrepasa ciertos límites, frecuentemente alcanzados en las redes que tienen fuentes de perturbaciones armónicas, como son: hornos de arco, convertidores estáticos de potencia, o incluso ciertos tipos de alumbrado, etc.

Con este fin, el presente documento pretende ser una contribución para un mejor conocimiento de los problemas de los armónicos, de sus causas, y de las soluciones más comúnmente utilizadas.

1	Las magnitudes de los armónicos	p. 6
2	Principales perturbaciones producidas por las corrientes y tensiones armónicas	p. 8
	2.1 Efectos instantáneos	p. 8
	2.2 Efectos retardados	p. 8
3	Límites aceptables, recomendaciones y normas	p. 10
	3.1 Valores dados a título indicativo	p. 10
	3.2 Límites normalizados	p. 10
4	Los generadores de magnitudes eléctricas armónicas o perturbadoras	p. 11
	4.1 Los convertidores estáticos en la red trifásica	p. 12
	4.2 El alumbrado	p. 13
	4.3 Los hornos de arco	p. 13
	4.4 Las inductancias saturables	p. 14
	4.5 Las máquinas rotativas	p. 14
	4.6 Modelo utilizado en los cálculos	p. 14
	4.7 Realización de los cálculos	p. 14
5	La resonancia: un problema en la ampliación de redes con perturbadores y condensadores	p. 15
	5.1 En ausencia de batería de condensadores, la polución armónica es limitada y proporcional a las corrientes de las fuentes perturbadoras	p. 16
	5.2 Las corrientes armónicas generadas por los dispositivos perturbadores pueden ser peligrosamente amplificadas por la presencia de una batería de condensadores	p. 16
6	La inductancia antiarmónica	p. 19
7	Los filtros	p. 20
	7.1 El shunt resonante	p. 21
	7.2 Filtros amortiguadores	p. 24
	7.3 Los filtros activos	p. 24
8	Ejemplo de estudio de una red simplificada	p. 26
	8.1 Montaje de la batería de condensadores	p. 27
	8.2 Montaje de un dispositivo con inductancia antiarmónica y condensadores	p. 28
	8.3 Montaje de un filtro shunt resonante en el rango 5 y de un filtro amortiguado en el rango 7	p. 28
9	Conclusión	p. 29
	Bibliografía	p. 30

1 Las magnitudes de los armónicos

He aquí algunas definiciones que serán necesarias para poder comprender el conjunto desarrollado en este Cuaderno Técnico. Los lectores con conocimientos técnicos podrán abordar directamente el capítulo siguiente.

La variación en función del tiempo, de las magnitudes eléctricas de corrientes y tensiones en las redes industriales alternas, se aparta bastante de una sinusoidal pura (**figura 1**). Esta variación se compone de un cierto número de sinusoides a diferentes frecuencias, que comprende entre otras, una sinusoide a frecuencia industrial llamada sinusoide fundamental o simplemente: la fundamental.

«Magnitud armónica» o simplemente «armónico»

Es una de las componentes sinusoidales de la variación de una magnitud física que tiene una frecuencia múltiplo de la componente fundamental. La amplitud del armónico es generalmente de un % de la fundamental.

Orden o rango del armónico

Es la relación que hay entre su frecuencia f_n y la frecuencia de la fundamental (generalmente la frecuencia industrial, 50 ó 60 Hz):

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Por principio, la fundamental f_1 tiene rango 1.

Espectro

Es el histograma que da la amplitud de cada armónico en función del rango (**figura 2**).

Expresión de la magnitud deformada

El desarrollo en serie de Fourier de todo fenómeno periódico es de la forma:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \operatorname{sen}(n\omega t - \varphi_n)$$

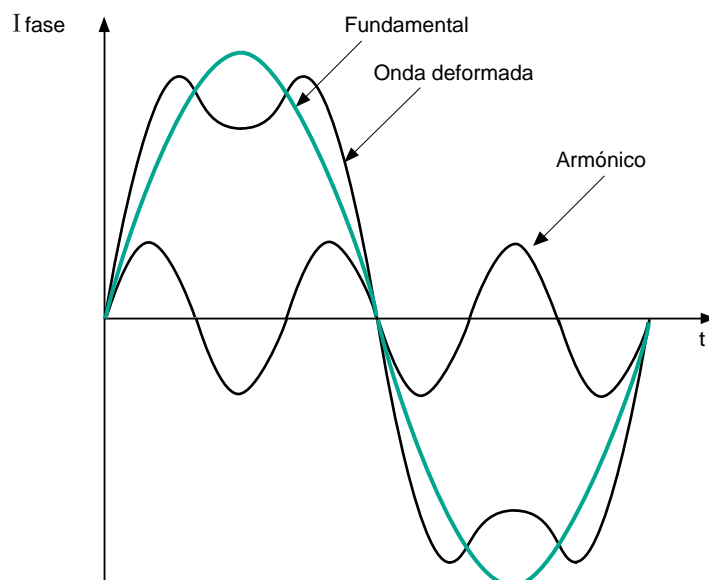


Fig. 1: Imagen de una onda deformada.

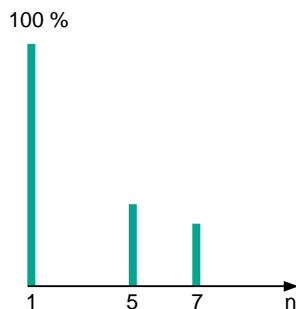


Fig. 2: Normalmente la amplitud viene dada respecto a la fundamental.

donde:

- Y_0 = amplitud de la componente continua, generalmente nula en distribución eléctrica en régimen permanente,
- Y_n = valor eficaz de la componente de rango n,
- φ_n = desfase de la componente armónica en el momento inicial.

Normalmente, la amplitud de los armónicos disminuye con la frecuencia. Según las normas, se toman en consideración los armónicos hasta el orden o rango 40.

Valor eficaz de una magnitud deformada

El valor eficaz de la magnitud deformada condiciona los calentamientos, pues habitualmente las magnitudes armónicas se expresan en valores EFICACES.

Para una magnitud sinusoidal, el valor eficaz es el valor máximo dividido por la raíz de dos.

Para una magnitud deformada y, en régimen permanente, la energía disipada por efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas, es decir:

$$RI^2 t = RI_1^2 t + RI_2^2 t + \dots + RI_n^2 t$$

de donde: $I^2 = I_1^2 + \dots + I_n^2$

o también: $I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2}$

supuesto que la resistencia se tome como una constante.

La medida del valor eficaz de la magnitud deformada se efectúa o bien directamente por los aparatos de verdadero valor eficaz o térmicos o bien por los analizadores de espectro.

Factor individual y factor de distorsión

Los IDA individuales y la distorsión en tensión son significativas de la polución de una red.

- «factor o IDA individual»

Da una medida de la importancia de cada armónico en relación a la fundamental.

El IDA individual es la relación entre el valor eficaz de la amplitud del armónico de rango n y el de la fundamental.

Ejemplo: IDA de I_n en % = $100 (I_n/I_1)$ (el subíndice "n" no significa valor nominal).

- «factor o IDA global de distorsión» o simplemente «distorsión»

Da una medida de la influencia térmica de la totalidad de los armónicos; es la razón entre el valor eficaz de los armónicos y el valor eficaz,

ya sea de la fundamental solamente (IEC 61 000-2-2), donde IDA > 0 puede ser muy grande:

$$I D A = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

ya sea (menos frecuentemente) de la magnitud deformada medida, de donde $0 < IDA < 1$:

$$I D A = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}$$

Salvo indicación en contra, nosotros utilizaremos la definición según IEC 61 000-2-2 que corresponde a la relación entre la carga armónica y la corriente no deformada a frecuencia industrial.

2 Principales perturbaciones producidas por las corrientes y tensiones armónicas

Las tensiones y corrientes armónicas superpuestas a la onda fundamental conjugan sus efectos sobre los aparatos y equipos utilizados.

Las magnitudes armónicas provocan diferentes efectos según los receptores encontrados:

- bien sean efectos instantáneos,
- bien sean efectos a largo plazo debidos a los calentamientos.

2.1 Efectos instantáneos

En los sistemas electrónicos, las tensiones armónicas pueden perturbar los dispositivos de regulación. También pueden influir en las condiciones de conmutación de los tiristores cuando desplazan el paso por cero de la tensión (IEC 60146-2).

Los contadores de energía de inducción presentan algunos errores suplementarios en presencia de armónicos: por ejemplo un contador clase 2 dará un error suplementario de 0,3% con una tasa del 5% para el 5º armónico en tensión y en corriente.

Los receptores de telemando centralizado a una frecuencia musical utilizada por los distribuidores de energía pueden ser perturbados por las tensiones armónicas de frecuencia próxima a la utilizada por el sistema. Veremos más adelante otras causas de perturbación de estos relés relacionadas con las impedancias armónicas de la red.

Vibraciones, ruido

Según los esfuerzos electrodinámicos, proporcionales a las corrientes instantáneas que aparezcan, las corrientes armónicas generarán vibraciones y ruidos acústicos, sobre todo en los aparatos electromagnéticos (transformadores, inductancias).

Los pares mecánicos pulsantes, debidos a los campos giratorios armónicos, darán lugar a vibraciones en las máquinas rotativas.

Perturbaciones inducidas sobre las líneas de pequeñas corrientes (teléfono, telemando)

Las perturbaciones se producen cuando una línea de señal está situada paralelamente a una canalización de distribución eléctrica con corrientes y tensiones deformadas.

Se han de tener en cuenta parámetros tales como: longitud del paralelo, distancia entre los dos circuitos, frecuencia de los armónicos (el acoplamiento aumenta con la frecuencia).

2.2 Efectos retardados

Si prescindimos de la fatiga mecánica de los materiales debida a las vibraciones, el efecto más importante a largo plazo producido por los armónicos, es el calentamiento.

Calentamiento de los condensadores

Las pérdidas, causadas por los calentamientos, se deben a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico.

En una primera aproximación, son proporcionales al cuadrado de la corriente eficaz.

Los condensadores son pues sensibles a las sobrecargas, bien sean debidas a una tensión fundamental demasiado elevada o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas se definen por el ángulo de pérdidas δ del condensador cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida (**figura 3**); se puede decir que las $\text{tg } \delta$ son del orden del 10^{-4} de la fundamental. Estos calentamientos pueden llegar a producir la perforación del dieléctrico.

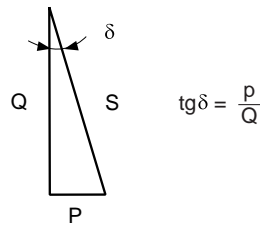


Fig. 3: Triángulo de potencias P, Q, S de un condensador.

Calentamiento debido a las pérdidas suplementarias de las máquinas y los transformadores

- pérdidas suplementarias en las máquinas, en su estator (cobre y hierro), y sobre todo en sus circuitos rotóricos (jaulas, amortiguadores, circuitos magnéticos) como consecuencia de las importantes diferencias de velocidad que hay entre los campos giratorios inductores armónicos y el rotor. Tengamos presente que las medidas rotóricas (temperatura, corrientes inducidas) son difíciles, por no decir imposibles,
- pérdidas suplementarias de los transformadores debidas al efecto corona (aumento de la resistencia del cobre con la frecuencia), a la histéresis y a las corrientes de Foucault (en el circuito magnético).

Calentamiento de los cables y de los equipos

Las pérdidas de los cables atravesados por las corrientes armónicas son superiores, por lo que se produce un aumento de la temperatura. Entre las causas de pérdidas suplementarias se pueden citar:

- el aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida,
- el aumento de la resistencia aparente del alma del cable con la frecuencia, fenómeno debido al efecto corona,
- el aumento de las pérdidas dieléctricas en el aislante con la frecuencia, si el cable es sometido a una distorsión de tensión no despreciable,
- los fenómenos de proximidad, de envolventes, de pantallas puestas a tierra en ambos extremos, etc. Los cálculos se hacen siguiendo la norma IEC 60287.

De una forma general todos los equipos (cuadros eléctricos) sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1,3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto corona en los conductores.

La evaluación de los factores de corrientes o tensiones armónicas, se hace con un analizador de espectros, el cual nos da la amplitud de cada componente armónica.

Es importante elegir los captadores (de corriente o de tensión) con una banda suficientemente ancha para la banda de frecuencias a medir.

El valor eficaz de la corriente (o de la tensión deformadas) puede:

- medirse con un aparato de verdadero valor eficaz,
- o reconstruirse a partir del espectro recogido por el analizador,
- o estimarse a partir de un osciloscopio.

3 Límites aceptables, recomendaciones, normas

3.1 Valores dados a título indicativo

- Máquina síncrona: distorsión en corriente estática admisible = 1,3 a 1,4%,
- máquina asíncrona: distorsión en corriente estática admisible = 1,5 a 3,5%,
- cables: distorsión admisible en tensión conductor-pantalla = 10%,
- condensadores de potencia: distorsión en corriente = 83%, lo que provoca una sobrecarga del 30% ($1,3 I_{\text{nominal}}$); la sobrecarga en tensión puede alcanzar el 10%,
- electrónica sensible: distorsión en tensión 5%, IDA individual 3% según el material.

3.2 Límites normalizados

La serie de normas de compatibilidad electromagnética (IEC 61000) definen ciertos límites que se refieren a los armónicos, especialmente:

- IEC 61000-3-2 que define los límites de emisión de corriente armónica por los aparatos que consumen menos de 16 A por fase (salvo ciertas categorías de aparatos: ver la norma). El caso de aparatos que consumen más de 16 A se examina en el documento técnico CEI 61000-3-4 y deberá precisarse mediante una norma CEI 61000-3-12, en preparación.

- IEC 61000-2-2 que define los niveles de compatibilidad de tensiones armónicas en las redes públicas BT (**figura 4**).

- IEC 61000-2-4 que define los niveles de compatibilidad en las redes de las instalaciones industriales. Recordemos que un nivel de compatibilidad no es un límite absoluto; puede sobrepasarse, aunque la probabilidad debe ser baja.

Armónicos impares no múltiplos de 3		Armónicos impares múltiplos de 3		Armónicos pares	
Rango armónico n	Tensión armónico %	Rango armónico n	Tensión armónico %	Rango armónico n	Tensión armónico %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
>25	$0,2 + 0,5 \times 25 / n$				

Fig. 4: Niveles de compatibilidad para las tensiones armónicas individuales en una red pública BT (IEC 61000-2-2).

4 Los generadores de magnitudes eléctricas armónicas o perturbadoras

En el ámbito industrial, estos generadores son:

- los convertidores estáticos,
- los hornos de arco,
- el alumbrado,

- las inductancias saturables,
- otros, tales como las ranuras de las máquinas rotativas (delgas), armónicos a menudo despreciables.

4.1 Los convertidores estáticos en la red trifásica

Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (diodos y tiristores) son generadores de corrientes armónicas.

Así, en un puente de Graetz, la corriente continua consumida hace aparecer una corriente

no senoidal, que cuando la carga es muy inductiva, tiene forma escalonada (**figura 5**), o que tiene unos picos cuando al puente de diodos le sigue un condensador, como en el caso de la (**figura 6**).

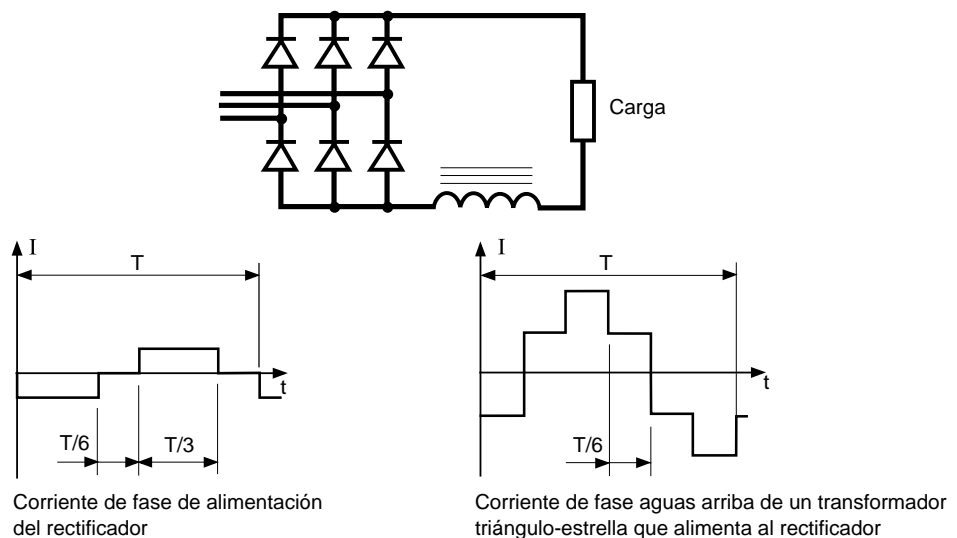


Fig. 5: Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz que produce una corriente continua perfecta sobre una carga muy inductiva.

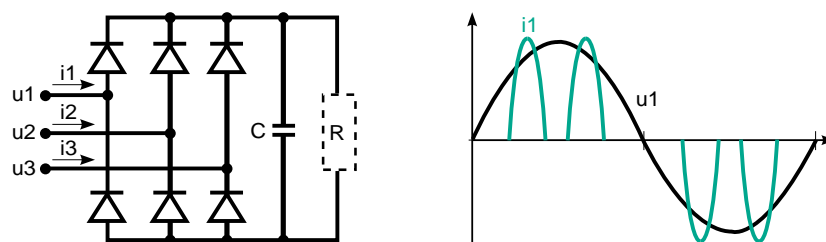


Fig. 6: Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz seguido de un condensador.

A pesar de tener forma diferente, las dos corrientes tienen las mismas componentes armónicas características.

Las componentes armónicas características de las crestas de la corriente de alimentación de los rectificadores tienen rango n (son de orden n), con $n = (k \cdot p) \pm 1$, donde:

- $k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$
- $p = n^\circ$ de ramas del rectificador, por ejemplo:
 - puente de Graetz $p = 6,$
 - puente hexafásico $p = 6,$
 - puente dodecafásico $p = 12.$

De este modo, para los rectificadores citados, los armónicos presentes serán de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc. con $p = 6$, y de orden 11, 13, 23, 25, etc., con $p = 12$.

Estos armónicos, llamados característicos, son de orden impar y sus intensidades, cuando están próximas a la forma ideal de la **figura 5** tienen, en una primera aproximación, el valor $I_n = I_1/n$, con $I_1 =$ corriente a frecuencia fundamental.

Entonces, es fácilmente constatable que los armónicos I_5 e I_7 tienen amplitudes bastante grandes, y que pueden ser suprimidas utilizando un puente dodecafásico ($p = 12$).

En la práctica, los espectros de corriente son sensiblemente diferentes. En efecto, aparecen nuevas componentes armónicas pares e impares, llamadas no características y de pequeña amplitud, y quedan modificadas las amplitudes características por diversos factores, como son:

- disimetría de construcción,
- imprecisión del instante de apertura de los tiristores,
- tiempo de conmutación,
- filtrado imperfecto.

Se puede observar, en el caso de puentes de tiristores, un desfase de los armónicos en función del ángulo de retardo del cebado.

Los puentes mixtos diodos-tiristores son generadores de armónicos de orden par. Su empleo se limita a pequeñas potencias ya que el armónico de orden 2 es muy molesto y difícil de eliminar.

Los otros convertidores de potencia tales como los graduadores (reguladores), los cicloconvertidores, etc., tienen espectros variables y más ricos en armónicos que los rectificadores. Destaquemos que se van sustituyendo por los rectificadores de técnica PWM (Pulse Width Modulation: modulación de ancho de impulso) que trabajan con una frecuencia de corte de unos 20 kHz y que están diseñados para producir un nivel de armónicos muy bajo.

Las corrientes armónicas de varios convertidores se suman vectorialmente en el juego de barras común de alimentación. Generalmente no se conocen sus fases, salvo en el caso de rectificadores con diodos. Esto permite, con dos puentes hexafásicos de diodos que tengan la misma carga, atenuar las corrientes armónicas de orden 5 y 7, si los dos transformadores de alimentación tienen los acoplamientos adecuadamente escogidos, (**figura 7**).

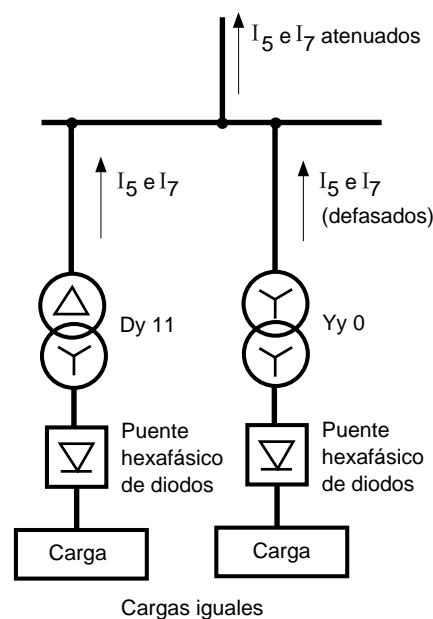


Fig. 7: Montaje atenuante de I_5 e I_7 .

4.2 El alumbrado

El alumbrado con lámparas de descarga y tubos fluorescentes, es generador de corrientes armónicas. El IDA individual del armónico 3º puede incluso sobrepasar el 100% para ciertas lámparas fluocompactas modernas, y por tanto

hay que prestar una atención especial en el cálculo de la sección y la protección del neutro que transporta la suma de las corrientes armónicas de 3º rango de las 3 fases, lo que implica un riesgo de calentamiento.

4.3 Los hornos de arco

Los hornos de arco utilizados en siderurgia pueden ser de corriente alterna o de corriente continua.

Caso del horno de arco de corriente alterna (figura 8)

El arco no es lineal, asimétrico, e inestable. Induce espectros que contienen bandas impares, pares y una componente continua (ruidos de fondo a frecuencias cualesquiera).

El nivel espectral es función del tipo de horno, de su potencia, del período de funcionamiento considerado: fusión, afinado, También en este caso, sólo la medida experimental permite determinar el espectro de manera precisa (ejemplo: figura 9).

Caso del horno de arco de corriente continua (figura 10)

El arco se alimenta entonces por medio de un rectificador.

El arco es más estable que en corriente alterna.

La corriente absorbida se descompone en:

- un espectro parecido al de un rectificador,
- un espectro continuo de nivel inferior al de un horno de corriente alterna.

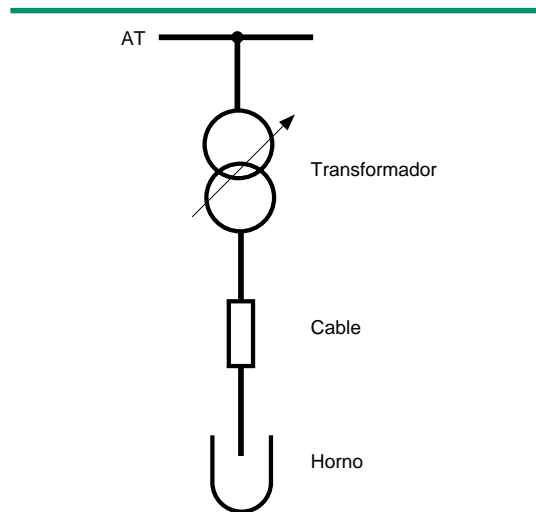


Fig. 8: Caso de un horno de arco alimentado con corriente alterna.

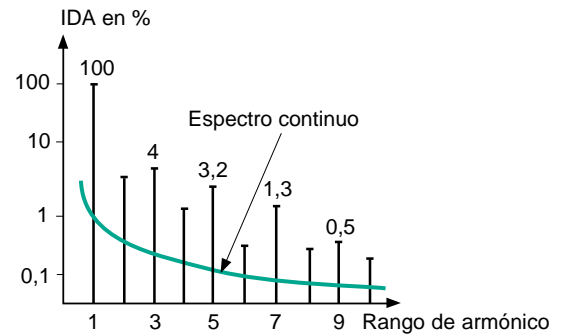


Fig. 9: Espectro de corriente que alimenta un horno en corriente alterna.

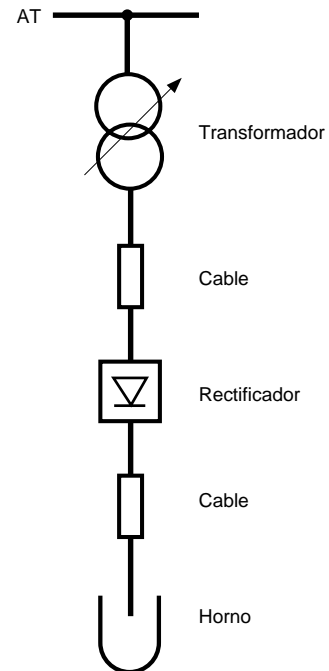


Fig. 10: Caso de un horno de arco alimentado con corriente continua.

4.4 Las inductancias saturables

La impedancia de estas inductancias depende de la amplitud de la corriente que las atraviesa y de hecho ellas mismas provocan deformaciones

importantes en esta corriente. Este es el caso en cierta medida de los transformadores en vacío sometidos a una sobretensión permanente.

4.5 Las máquinas rotativas

Las máquinas rotativas producen armónicos de ranura de rango elevado y de amplitud normalmente despreciable. Las pequeñas máquinas síncronas son sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3^{er} orden que pueden tener una incidencia sobre:

- el calentamiento permanente (aún sin defecto) de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores,
- el funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

4.6 Modelo utilizado en los cálculos

En la ejecución de los cálculos, las fuentes perturbadoras, convertidores estáticos y hornos de arco, se consideran como «generadores de corrientes» armónicas (**figura 11**).

En gran medida, las corrientes armónicas absorbidas por las fuentes perturbadoras son independientes de las otras cargas y del conjunto de las impedancias de la red. Estas corrientes pueden también considerarse como inyectadas: es suficiente cambiarles arbitrariamente el signo.

La aproximación es menos precisa para los hornos de arco. En este caso el modelo para la fuente de corriente debe de ser corregido mediante una impedancia en paralelo adecuadamente escogida.

Utilizando el modelo equivalente de Norton es posible también tener en cuenta los armónicos de tensión preexistentes en el punto de conexión con la red aguas arriba (**figura 12**). Para cada rango de tensión U_H se calcula una I_H teniendo en cuenta Z y la impedancia aguas abajo de la red.

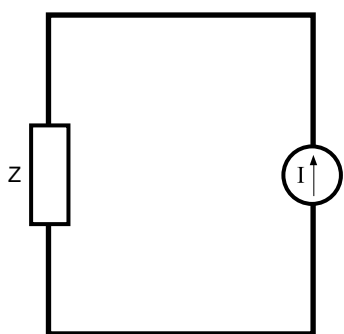


Fig. 11: La fuente de corriente es el modelo aplicado a los generadores de corrientes armónicas.

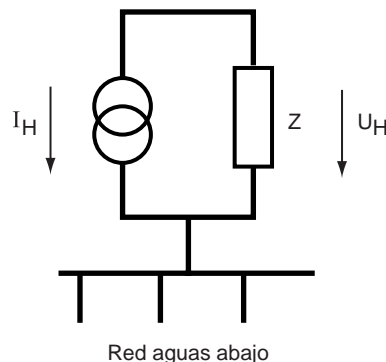


Fig. 12: Modelo equivalente de Norton.

4.7 Realización de los cálculos

Los argumentos (defasajes) de las corrientes armónicas, cuando se conocen, pueden utilizarse para el cálculo vectorial. Para ciertos elementos perturbadores (monofásicos) es interesante realizar una modelización teniendo en cuenta el desequilibrio de fases.

Cuando las corrientes armónicas generadas por los perturbadores no se conocen más que en amplitud, la norma técnica IEC 61 000-3-6 propone un proceso que permite superponer los efectos de varios elementos perturbadores.

5 La resonancia: un problema en la ampliación de redes con elementos perturbadores y condensadores

Debemos distinguir dos casos:

- la red no contiene condensadores de potencia,
- la red tiene este tipo de condensadores.

5.1 En ausencia de batería de condensadores, la polución armónica es limitada y proporcional a las corrientes de las fuentes perturbadoras

En principio, en cuanto a los armónicos, la red tiene carácter inductivo.

Su reactancia es proporcional a la frecuencia; en una primera aproximación el efecto de las cargas y de las resistencias es despreciable. La impedancia de la red vista desde un nudo, se limita pues a la reactancia de cortocircuito X_{cc} desde el nudo considerado.

Pueden estimarse los niveles de las tensiones armónicas a partir de la potencia de la fuente perturbadora y de la potencia de cortocircuito en el nudo (juego de barras) de conexión del elemento perturbador, considerando la reactancia de cortocircuito proporcional a la frecuencia (figura 13).

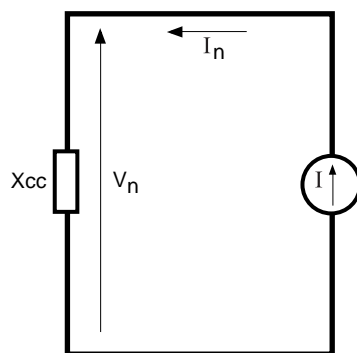


Fig. 13: La tensión armónica V_n es proporcional a la corriente I_n inyectada por la fuente perturbadora.

En el esquema de la **figura 13**:

L_{cc} = inductancia de cortocircuito de la red, vista desde el juego de barras sobre el cual se conectan la (o las) fuentes perturbadoras,

I_n = corrientes de las fuentes perturbadoras, de donde:

$$X_{cc_n} = L_{cc} \omega_n = L_{cc} n(2\pi f_1)$$

entonces:

$$V_n = X_{cc_n} I_n = L_{cc} n(2\pi f_1) I_n$$

La polución armónica es aceptable si la fuente perturbadora no sobrepasa una cierta potencia. A pesar de ello hay que ser prudente, ya que las resonancias (ver capítulo siguiente) pueden existir como consecuencia de condensadores instalados en una red próxima acoplada por medio de un transformador.

Nota: En realidad la inductancia armónica de la red X , sin condensadores (esencialmente de distribución), representada por L_{cc} , es sólo proporcional a la frecuencia en una primera aproximación; también, habitualmente en los cálculos, la impedancia de cortocircuito de la red se sobredimensiona por un factor 2 ó 3, especialmente si hay una duda importante sobre las características de la red.

De esta manera: $X_n = k \cdot n \cdot X_1$

con $K = 2$ ó 3 .

En efecto, las componentes de la impedancia armónica de una red son de diversos tipos: impedancias de cortocircuito de la red, cables, líneas, transformadores, condensadores alejados, máquinas, otras cargas (alumbrado, calefacción, ...).

5.2 Las corrientes armónicas generadas por los dispositivos perturbadores pueden ser peligrosamente amplificadas por la presencia de una batería de condensadores

Para ciertas frecuencias hay resonancia entre la batería de condensadores y la reactancia de la red vista desde los bornes de la batería.

Ello provoca una amplificación más o menos amortiguada de las magnitudes armónicas (corrientes y tensiones), si la resonancia se produce a la misma frecuencia que la de las corrientes inyectadas por la fuente perturbadora. Esta polución puede ser peligrosa para los equipos.

Hay pues un problema, estudiado en el párrafo siguiente: la resonancia paralela.

¿Qué es la resonancia paralela y por qué puede provocar una polución armónica peligrosa?

En la gama de frecuencias armónicas, la red se puede representar en una primera aproximación según el esquema de la **figura 14**.

En este esquema:

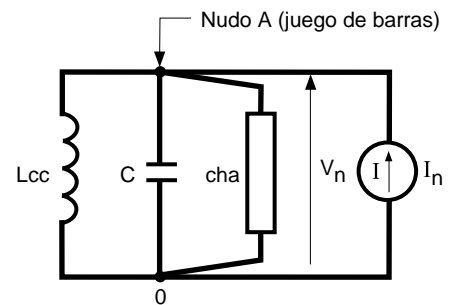
- L_{cc} = inductancia de cortocircuito de la red aguas arriba, vista desde el juego de barras sobre el cual se conectan la batería de condensadores y la fuente perturbadora,
- C = condensadores,
- I_n = corrientes absorbidas por la fuente perturbadora,
- CHA = cargas (efecto Joule, transmisión de energía mecánica).

En principio, se considera la reactancia armónica de cortocircuito vista desde el juego de barras, en el punto de conexión (A) de los condensadores, de las cargas y de la fuente perturbadora, de donde $V_n = Z_{AO} \cdot I_n$.

Las curvas de las impedancias en función de las frecuencias (**figura 15**) muestran que:

- para la frecuencia de resonancia f_{ar} , queda perfectamente compensado el efecto inductivo con el capacitivo,

a: representación eléctrica armónica de una fase



b: representación unifilar

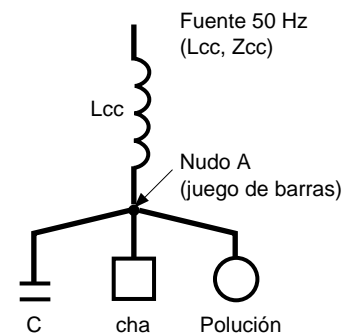


Fig. 14: Esquemas equivalentes de un circuito sometido a corrientes armónicas que incorporan una batería de condensadores.

- la reactancia del circuito tapón:
 - es inductiva para frecuencias bajas, y por lo tanto a la frecuencia fundamental,
 - aumenta con la frecuencia para hacerse muy grande y bruscamente capacitiva a la frecuencia de resonancia f_{ar} ,

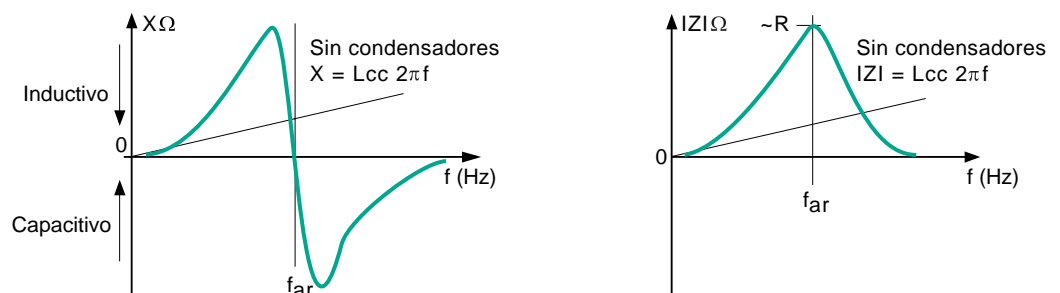


Fig. 15: Variación de la reactancia y del módulo de la impedancia del esquema equivalente.

■ el valor máximo obtenido de la impedancia es aproximadamente $R = U^2 / P$, donde P representa la suma de las potencias activas de los motores con carga distintos de los que están alimentados mediante un convertidor estático.

Si la fuente perturbadora inyecta una corriente armónica I_n de orden n, correspondiente a la frecuencia de resonancia paralelo f_{ar} , la tensión armónica correspondiente se puede estimar como $V_n = R I_n$, con $n = n_{ar} = f_{ar} / f_1$.

Estimación de n_{ar}

El orden n_{ar} de la resonancia paralela es el cociente entre la frecuencia de resonancia f_{ar} y la frecuencia fundamental f_1 (frecuencia industrial).

Sea la red industrial más elemental posible según el esquema equivalente de la **figura 16** que representa una batería de condensadores C alimentada por un transformador de inductancia de cortocircuito L_T , con L_{cc} que representa la inductancia de cortocircuito de la red de distribución vista en los bornes aguas arriba del transformador,

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{cc} + L_T)C}}$$

Como que $L_{cc} \ll L_T$, el rango de la resonancia paralela es muy parecido al de la impedancia de la red tanto en el punto A como en el punto B; este último podría representar, por ejemplo los bornes de conexión para la utilización.

Generalizando, se tiene:

$$n_{ar} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \text{ en la que:}$$

S_{cc} = potencia de cortocircuito en bornes de la batería de condensadores,

Q = potencia de esta batería a la tensión aplicada.

Generalmente, S se expresa en MVA y Q en MVAR.

Consecuencias prácticas:

■ si el orden de una corriente armónica inyectada por la fuente perturbadora corresponde al orden de la resonancia paralela, existe el riesgo de sobretensiones armónicas, particularmente cuando la red está poco cargada. Las corrientes armónicas son entonces intensas en los componentes de la red, y representan un cierto peligro para los condensadores.

■ Si el orden de la resonancia paralela corresponde al orden de la frecuencia de los equipos de telemando del distribuidor (de la compañía distribuidora), existe riesgo de perturbaciones en estos equipos.

Para evitar que una resonancia sea peligrosa, se ha de colocar fuera del espectro inyectado y/o amortiguarla.

La impedancia de cortocircuito de una red es a menudo poco conocida, y además varía mucho, por lo que se producen grandes variaciones de la frecuencia de la resonancia paralela.

Es importante, pues, estabilizar esta frecuencia a un valor diferente al correspondiente al de las corrientes armónicas inyectadas. Esto se consigue montando una inductancia en serie con la batería de condensadores. El circuito tampón creado de esta manera se representa en el esquema de la **figura 17** donde $V_n = Z_{AO} \cdot I_n$.

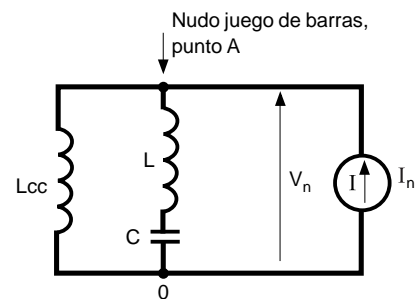


Fig. 17: Autoinducción puesta en serie con el condensador.

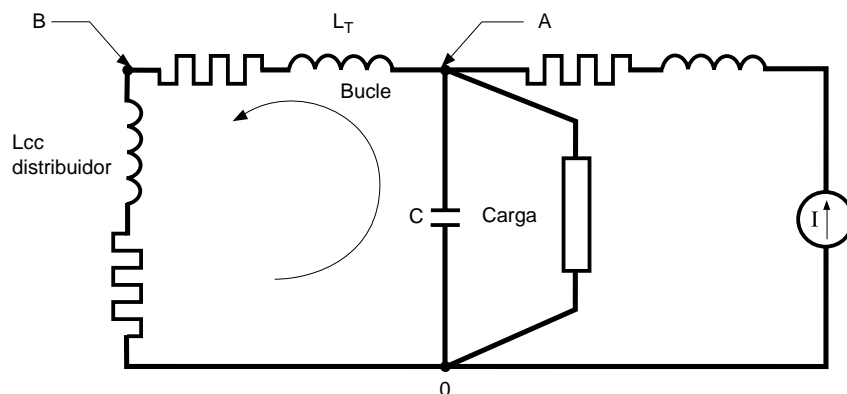


Fig. 16: El condensador constituye, con la suma de impedancias aguas arriba, un circuito resonante.

Aparece una resonancia serie entre L y C. Por oposición a esta resonancia que da una impedancia mínima, la resonancia paralela es llamada a menudo antirresonancia.

La fórmula que da la posición de la antirresonancia es:

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{cc} + L)C}}$$

Puesto que L_{cc} es generalmente menor que L, la fórmula muestra que la presencia de la inductancia L, puesta en serie con los condensadores, hace que la frecuencia f_{ar} pase a ser menos sensible a las variaciones de la inductancia de cortocircuito L_{cc} (vista desde los puntos de conexión = juego de barras A).

La resonancia serie

La rama constituida por la inductancia L y el condensador C (figura 18), forma un sistema resonante serie de impedancia:

$Z = r + j(L\omega - 1/C\omega)$ presentando:

- un valor mínimo resistivo r (resistencia de la bobina de inducción) para la frecuencia de resonancia f_r ,

- una reactancia capacitiva para valores por debajo de la frecuencia f_r ,

- una reactancia inductiva para valores por encima de la frecuencia f_r , con:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Las curvas de la figura 19 muestran el comportamiento de la inductancia de la red vista desde el juego de barras A, comprendiendo la impedancia de cortocircuito y la de la rama L-C.

La elección de f_{ar} depende de L_{cc} , de L, y de C, mientras que f_r sólo depende de L y de C; f_{ar} y f_r son pues tanto más próximas cuanto más pequeña es L_{cc} frente a L.

La compensación de la energía reactiva y la tensión aplicada a los condensadores son función entre otras cosas de L y C.

La introducción de la inductancia L se realiza de dos maneras diferentes según la posición de la resonancia serie respecto del espectro armónico, dando lugar a dos montajes:

- inductancia antiarmónica (resonancia serie fuera de las rayas del espectro),
- filtro (resonancia serie sobre una raya del espectro).

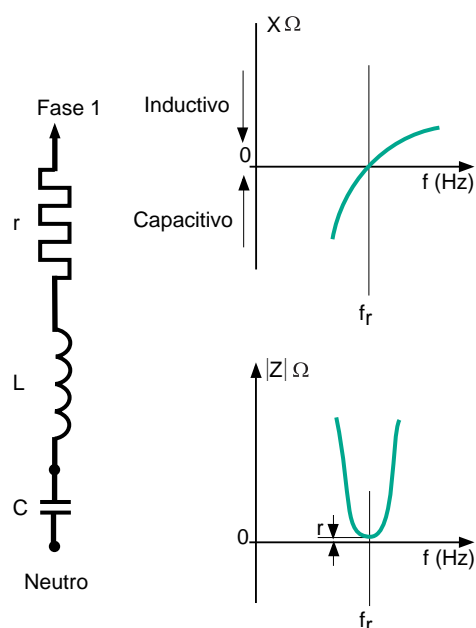


Fig. 18: Impedancia del circuito tampón.

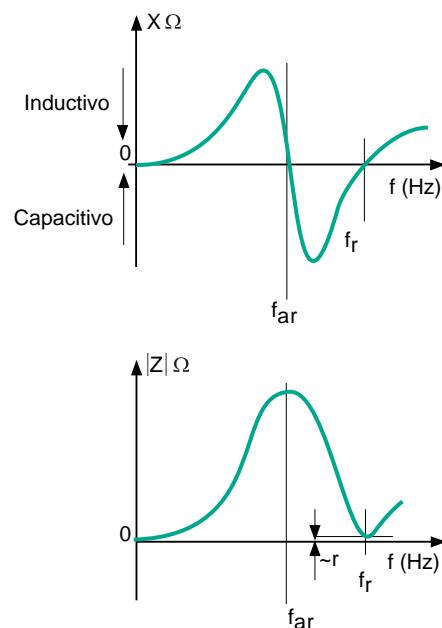


Fig. 19: Impedancia de la red en el punto A.

6 La inductancia antiarmónica

Permite proteger una batería de condensadores contra las sobrecargas armónicas.

El esquema de referencia es siempre el de la **figura 17**.

En este montaje, la elección de L es tal que la rama L-C (L inductancia antiarmónica y C condensadores de compensación de reactiva) tiene el carácter inductivo en la gama de frecuencias armónicas, dentro del margen del espectro.

Así por principio, la frecuencia de resonancia f_r de esta rama se situará por debajo de la gama de frecuencias del espectro de la fuente perturbadora.

La rama L-C y la red (L_{cc}) son entonces ambas inductivas en la gama de frecuencias del espectro, y las corrientes armónicas inyectadas por la fuente perturbadora se reparten en proporción inversa a las impedancias. Hay pues pocas corrientes armónicas circulando por la rama L-C, lo cual protege los condensadores, y la mayor parte de las corrientes armónicas circula por el resto de la red, sobre todo a través de la impedancia de cortocircuito.

La impedancia de la red vista desde el juego de barras de conexión de la rama L-C se comporta pues según nos muestra la curva de la **figura 20**.

Como hay más antirresonancia en el margen del espectro de corrientes, el empleo de una inductancia antiarmónicas, tiene dos ventajas:

- suprime el riesgo de fuertes corrientes armónicas en los condensadores,
- suprime correlativamente las fuertes distorsiones de tensión en la red, sin llevar, de todas maneras, los niveles a un valor bajo especificado.

Sin embargo, hay que tomar precauciones:

- no puede haber otras baterías de condensadores que puedan dar por antirresonancia, un carácter capacitivo a la red, inicial en la gama de frecuencias del espectro armónico,
- hay que evitar no colocar la antirresonancia a una frecuencia próxima a la de telemando del distribuidor (compañía eléctrica), porque provocaría un aumento de carga de los generadores de alta frecuencia (175 Hz, 188 Hz). Ahora bien, las frecuencias que concuerdan con f_r de las inductancias antiarmónicas están comprendidas entre 135 y 225 Hz para una red de 50 Hz,
- a causa del espectro continuo, la inductancia antiarmónica no se puede utilizar en el caso de hornos de arco más que con ciertas precauciones.

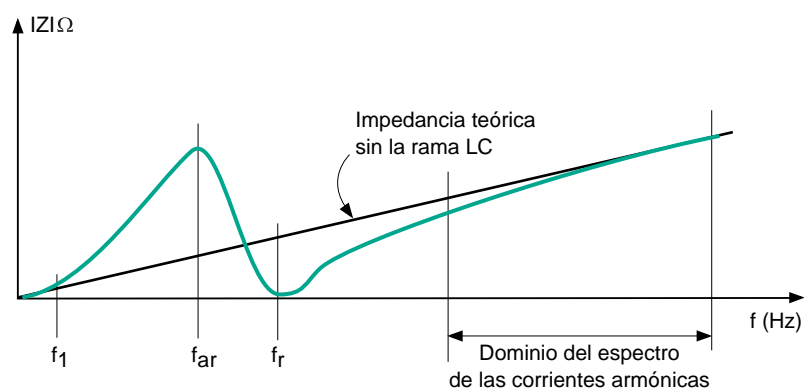


Fig. 20: Si f_r queda por debajo del espectro del armónico los condensadores están bien protegidos.

7 Los filtros

La limitación de las tensiones armónicas de la red a valores bajos específicos se consigue con el empleo de filtros.

Existen tres clases de filtros que permiten reducir las tensiones armónicas:

- el shunt resonante,
- los filtros amortiguadores,
- los filtros activos.

7.1 El shunt resonante

El filtro shunt resonante (**figura 18**) está constituido por una rama L-C cuya frecuencia de sintonización debe ser:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

y cuyo valor debe ser superior al de la frecuencia de la tensión armónica que se desea eliminar.

Esta finalidad difiere fundamentalmente de la inductancia antiarmónica.

El shunt resonante presenta a la frecuencia f_r una impedancia mínima que se reduce al valor de la resistencia r de la inductancia. Deriva hacia él casi la totalidad de las corrientes armónicas de frecuencia f_r inyectadas, con un nivel de tensión armónica de frecuencia f_r débil y proporcional al producto de la resistencia r por la corriente que circula por el shunt.

En principio, hay tantos shunts resonantes como armónicos a tratar, conectados en el juego de barras donde se especifica la tensión armónica admisible. El conjunto constituye una batería.

La **figura 21** representa la impedancia armónica de una red equipada con una batería de cuatro filtros de orden 5, 7, 11 y 13. Muestra que hay

tantas antirresonancias como filtros. Estas antirresonancias deben estar situadas en las marcas del espectro, lo que obliga a realizar un cuidadoso estudio, si es imprescindible hacer una segmentación de la batería.

Principales características de un shunt resonante

Son función de $n_r = f_r / f_1$ rango de sintonización del filtro con:

- f_r = frecuencia de sintonización,
- f_1 = frecuencia de la fundamental (o industrial, 50 Hz, por ejemplo).

Estas características son:

- La potencia reactiva de compensación: Q_{VAR} .

El shunt resonante, de carácter capacitivo por debajo de la frecuencia de sintonía, realiza la compensación de energía reactiva a la frecuencia industrial.

La potencia reactiva de compensación del shunt a la tensión de servicio U_1 aplicada en el juego de barras de conexión, viene dada por la fórmula:

$$Q_{VAR} = \frac{n_r^2}{n_{r-1}^2} U_1^2 C 2\pi f_1$$

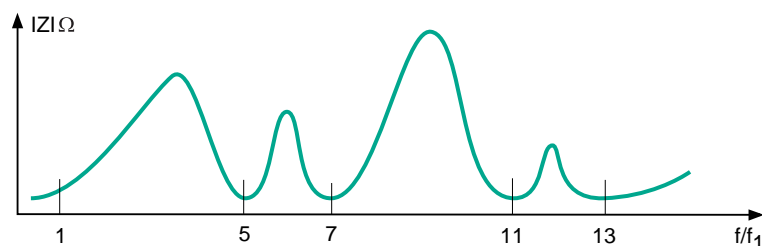


Fig. 21: Impedancia de una red equipada con filtros shunt.

(el subíndice 1 se refiere a la fundamental); siendo C la capacidad fase-neutro de una de las tres ramas de la batería vista en estrella.

A primera vista, parece paradójico que la presencia de la inductancia aumente la energía reactiva generada, sin embargo, esto se explica por el aumento de la tensión a la frecuencia industrial f_1 provocada por la inductancia en bornes de los condensadores.

■ la impedancia característica:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

■ el factor de calidad: $q = X_0 / r$.

Un filtro eficaz debe tener una inductancia que posea un factor q elevado, por tanto $r \ll X_0$, a la frecuencia f_r .

Orden de magnitud de q:

- 75 para las inductancias al aire,
- superior a 75 para las inductancias con núcleo.

■ La banda pasante (figura 22) en valor relativo es:

$$BP = \frac{1}{q} = 2 \frac{f - f_r}{f_r} = \frac{r}{X_0}$$

■ La resistencia de la inductancia $r = X_0 / q$

Está definida a la frecuencia f_r y es función del efecto corona. Es también la impedancia de sintonización del shunt resonante.

■ Las pérdidas debidas a la corriente capacitiva a frecuencia fundamental:

$$p_1 = \frac{Q_{var}}{q n_r}$$

con:

- Q_{VAr} = potencia reactiva de compensación reactiva del filtro,
- p_1 = pérdidas del filtro a frecuencia industrial en W.
- Las pérdidas debidas a las corrientes armónicas no se pueden expresar mediante

fórmulas sencillas; son superiores a la expresión:

$$p_n = \frac{U_{nr}^2}{r}$$

en la cual U_{nr} es la componente armónica de tensión de orden n_r sobre el juego de barras después del filtraje.

En la práctica, las características del shunt resonante se ven limitadas por el desacuerdo de sintonía del filtro y se pueden prever soluciones específicas:

■ para paliar de forma satisfactoria los inconvenientes de las tolerancias de fabricación, se pueden poner en la inductancia varias tomas de ajuste,

■ la sensibilidad a la no sintonía, provocada por las variaciones de f_1 (frecuencia de la red) y de f_r (provocadas por las variaciones de la capacidad de los condensadores en función de la temperatura) puede reducirse por un compromiso entre los valores del factor q y las características del filtrado.

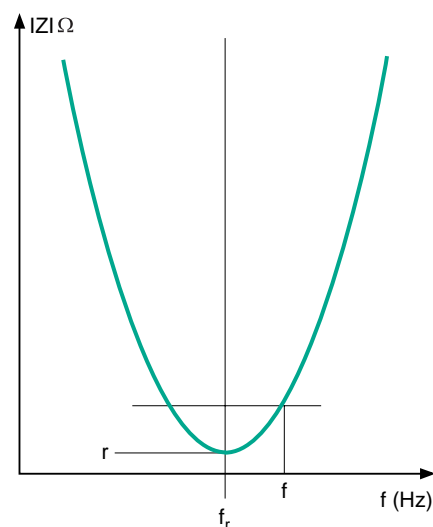


Fig. 22: Curva $Z = f(f)$ de un shunt resonante.

7.2 Filtros amortiguadores

Filtro amortiguador de segundo orden

En un horno de arco, el shunt resonante debe ser amortiguador.

En efecto, la banda continua del espectro producido por el horno de arco, crea una probabilidad de inyección de una corriente de frecuencia igual a la de antirresonancia. No

debemos pretender reducir sólo las tensiones armónicas de rango característico sino también amortiguar las antirresonantes.

Por otra parte, no resulta económicamente recomendable el montaje de múltiples shunts antirresonantes en batería, la solución consiste, a menudo, en utilizar un filtro de amplio espectro que posea las siguientes propiedades:

- amortiguar las antirresonancias,
- reducir las tensiones armónicas de frecuencias iguales o superiores a la de sintonía cuya función genera el nombre de «filtro amortiguador paso-alto»,
- amortiguar rápidamente el régimen transitorio debido a la conexión del filtro.

El filtro amortiguador del segundo orden está constituido por un shunt resonante sobre el que se conecta, en bornes de la inductancia, una resistencia de amortiguación R. La **figura 23** representa una de las tres fases del filtro.

El filtro amortiguador de segundo orden presenta una reactancia nula ante la frecuencia f_r , mayor que la frecuencia f con:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ y } f_r = \frac{1+Qq}{2\pi q\sqrt{(Q^2-1)LC}}$$

donde:

Q = factor de calidad del filtro amortiguador,

q = factor de calidad de la inductancia.

Habiendo estudiado el filtro para que f_r coincida con la primera banda característica del espectro a filtrar, esta banda es generalmente la más importante.

Cuando Q (o R) tiende a tomar valores altos, f_r tiende a f, en cuyo caso podemos decir que el shunt resonante es un caso límite de filtro amortiguador de segundo orden.

No debe confundirse Q, factor de calidad y $Q_{VA,r}$, potencia de compensación del filtro.

Funcionamiento de un filtro amortiguador de segundo orden:

- Por encima de f_r

La resistencia de amortiguación contribuye a la reducción de la impedancia de la red ante la antirresonancia ya que reduce las tensiones armónicas que eventualmente pueden producirse.

- Al valor f_r

La reducción del valor de la tensión armónica a un valor específico es posible ya que a esta frecuencia no puede existir resonancia entre la red y el filtro y en estas circunstancias, el filtro presenta una impedancia de carácter puramente resistivo.

Por ello, puesto que esta impedancia será mayor que la resistencia r de la inductancia, resulta una característica de filtrado inferior a la de del shunt resonante.

- Por debajo de f_r

El filtro presenta una reactancia inductiva de la misma naturaleza de la red (inductiva) que le permite una cierta absorción de las bandas del espectro, superiores a f_r y si está presente, un espectro continuo. Sin embargo, la presencia eventual de antirresonancias en la impedancia de la red sin filtro, debidas a las baterías de condensadores existentes, reduce las características de filtraje. Las baterías existentes también han de ser tenidas en cuenta en el estudio de la red, y algunas veces, se han de efectuar retoques en la instalación.

Las principales características eléctricas de un filtro amortiguador de segundo orden son función de $n_r = f_r / f_1$ orden de sintonización del filtro, con:

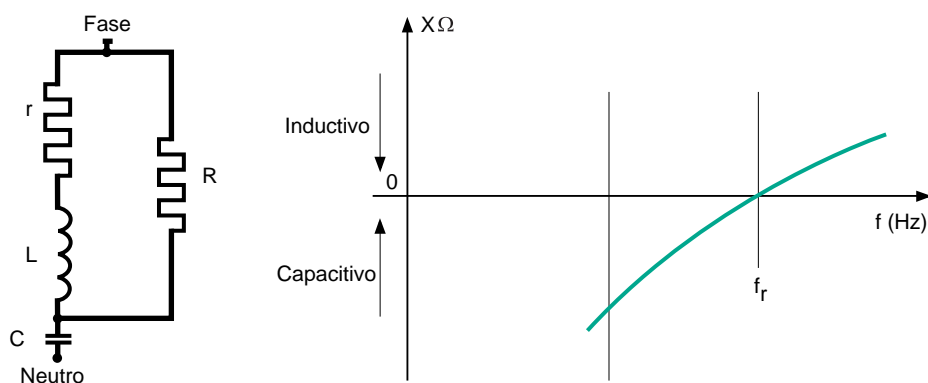


Fig. 23: Filtro amortiguado de segundo orden.

- f_r : frecuencia de sintonización,
- f_1 : frecuencia de la fundamental (o frecuencia industrial, por ejemplo 50 Hz).

Estas características son:

- La potencia reactiva de compensación

Para un filtro amortiguador de segundo orden sometido a una tensión de servicio U_1 (el subíndice 1 es relativo a la fundamental), la potencia reactiva de compensación es sensiblemente la del shunt resonante de igual inductancia y capacidad, prácticamente:

$$Q_{VAR} = \frac{n_r^2}{n_{r-1}^2} U_1^2 C 2\pi f_1$$

Siendo C la capacidad fase-neutro de una de las tres ramas de la batería vista en estrella.

- La impedancia característica:

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- El factor de calidad de la inductancia $q = X_0 / r$ donde r es la resistencia de la inductancia, función del efecto corona, a la frecuencia definida f_r .

- El factor de calidad del filtro $Q = R / X_0$

Los factores de calidad Q utilizados están generalmente comprendidos entre 2 y 10.

- Las pérdidas debidas a la corriente fundamental de compensación y a las corrientes armónicas: éstas son más elevadas que las del shunt resonante y no pueden ser determinadas por el estudio de la red.

El filtro amortiguador se utiliza solo, o bien en una batería de dos filtros, o bien asociado a un shunt resonante; en este caso el shunt resonante se sitúa (se sintoniza) sobre la más baja de las bandas del espectro.

La **figura 24** permite comparar la impedancia de una red en el caso de que contenga un filtro amortiguador de 2º orden en el caso de que se trate de un shunt resonante.

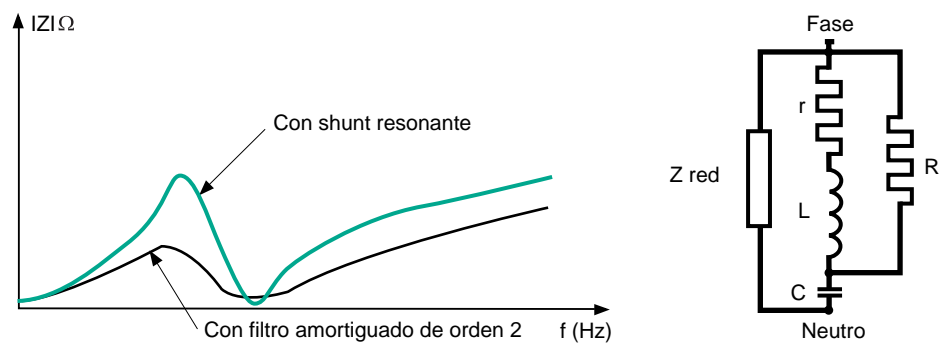


Fig. 24: Impedancia, vista desde el punto A, de una red que incluye un filtro de segundo orden, o sea, un shunt resonante.

Otros filtros amortiguadores

Existen otros filtros amortiguadores utilizados con menos frecuencia y derivados del filtro de segundo orden.

■ El filtro amortiguador de tercer orden (figura 25a)

El filtro de 3^{er} orden, de diseño más complejo que el de 2^o orden, se utiliza en casos de potencias de compensación elevadas.

El filtro de 3^{er} orden se obtiene a partir del filtro de 2^o orden añadiéndole una batería complementaria C2 en serie con la resistencia R, esta disposición permite la reducción de las pérdidas debidas a la fundamental.

La elección de C2 permite igualmente mejorar el comportamiento del filtro por debajo de la frecuencia de sintonización, lo cual favorece la reducción de la antirresonancia.

El filtro de tercer orden debe encontrarse sobre las primeras frecuencias del espectro.

Sin embargo, la complejidad de este filtro y el aspecto económico hace que a nivel industrial a menudo se prefiera el filtro de 2^o orden.

■ El filtro amortiguador tipo C (figura 25b)

En este filtro, la batería auxiliar C2, está en serie con la inductancia. Este filtro tiene unas pérdidas semejantes al filtro de tercer orden.

■ El filtro doble amortiguador (figura 25c)

Se compone de dos shunts resonantes conectados por una resistencia R, este filtro amortigua sobre todo la antirresonancia situada entre las dos sintonías.

■ El shunt resonante de baja q

Este filtro, que se comporta como un filtro amortiguador de banda ancha, tiene una utilización específica: sólo podrá utilizarse en unidades de pequeña potencia sin efectos de compensación reactiva, ya que, por su gran valor resistivo (normalmente por la adición de una resistencia en serie), las pérdidas por efecto Joule resultan prohibitivas en aplicaciones industriales.

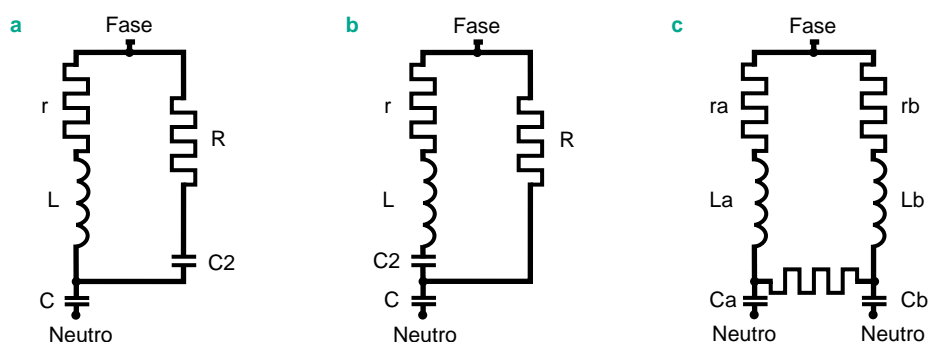


Fig. 25: Filtro amortiguado de tercer orden [a]; filtro C [b]; filtro doble amortiguado [c].

7.3 Los filtros activos

El filtro activo permite neutralizar el efecto de una perturbación inyectando un valor igual al de la perturbación pero opuesto en fase.

Los filtros activos se utilizan frecuentemente como complemento de los pasivos descritos en este capítulo, formando así un filtro híbrido.

8 Ejemplo de estudio de una red simplificada

El esquema de la **figura 26** muestra el modelo de una red simplificada que incluye un rectificador hexafásico de 2000 kVA que inyecta un espectro de corrientes armónicas y equipado sucesivamente:

- de una única batería de condensadores de 1000 kVAR,
- de un dispositivo de inductancia antiarmónica y condensadores de una potencia de 1000 kVAR,
- de una batería de dos filtros compuestos de un shunt resonante sintonizado en el armónico 5, y de un filtro amortiguado de segundo orden sintonizado en el armónico 7,

■ la potencia de compensación de 1000 kVAR es necesaria para situar el factor de potencia en un valor convencional,

■ las tensiones armónicas, que había en la red de distribución de 20 kV han sido despreciadas, por motivos de simplificación.

Mediante este ejemplo es posible comparar las prestaciones de las 3 soluciones, pero evidentemente es conveniente no generalizar los resultados numéricos.

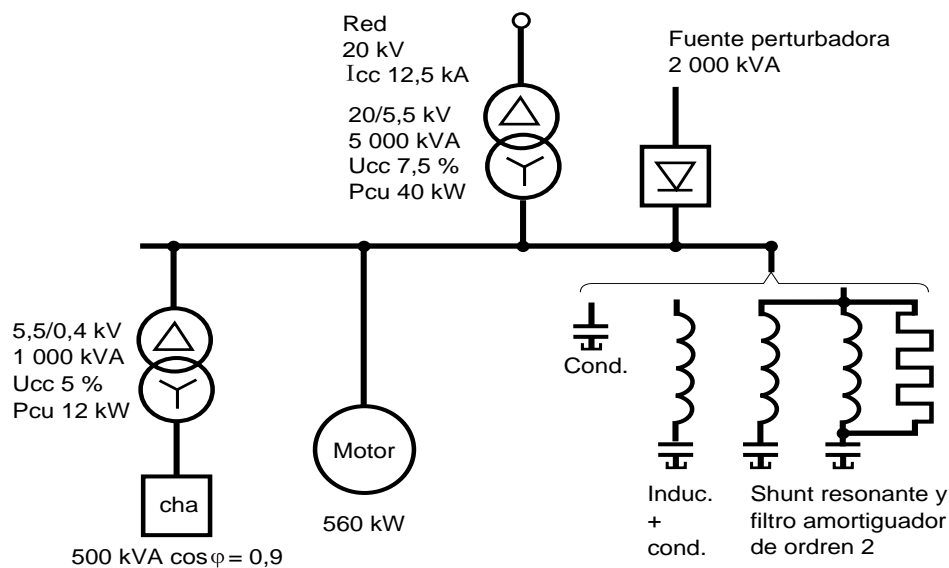


Fig. 26: Instalación con un elemento perturbador, condensadores y filtros.

8.1 Montaje de la batería de condensadores

La curva de impedancia armónica (figura 27) de la red, vista desde el nudo de inyección de corrientes armónicas, presenta un máximo (antirresonancia) en la proximidad del rango 7 del espectro de corrientes inyectadas. Resulta un IDA individual inaceptable del 11% de la tensión armónica de rango 7 (figura 28).

De la misma manera son inaceptables:

- la distorsión de la tensión de la red de 5,5 kV: 12,8 %, mientras que el máximo admisible sin especificación particular es del 5%,
- la carga en corriente eficaz global de los condensadores: 1,34 de la corriente nominal, sobrepasa el máximo admisible que es de 1,3 (figura 29).

De aquí se desprende que es inaceptable la solución de utilizar únicamente condensadores.

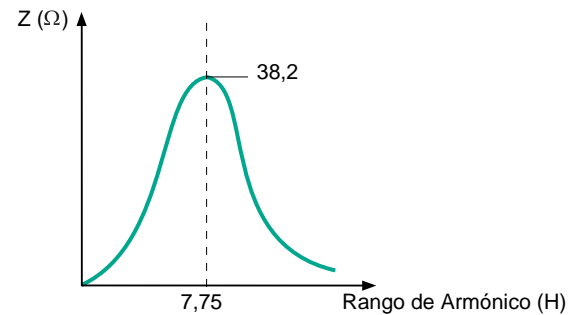


Fig. 27: Curva de impedancia armónica vista desde el nudo de inyección de las corrientes armónicas en una red equipada con una única batería de condensadores.

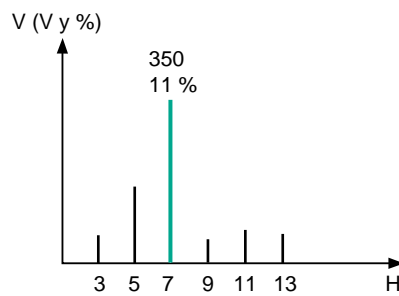


Fig. 28: Espectro de tensiones armónicas de una red de 5,5 kV equipada con una única batería de condensadores.

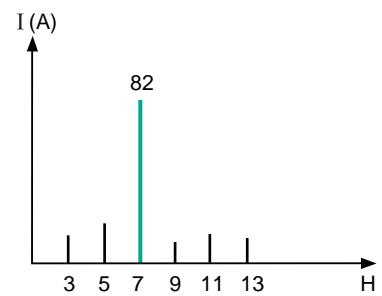


Fig. 29: Espectro de corrientes armónicas que atraviesan los condensadores en una red equipada con una única batería de condensadores.

8.2 Montaje de un dispositivo con inductancia antiarmónica y condensadores

El ajuste del dispositivo se sitúa arbitrariamente a $4,8 f_1$.

Impedancia armónica (figura 30)

La curva de impedancia armónica de la red, vista desde el nudo de inyección de corrientes armónicas, presenta un máximo de 16Ω

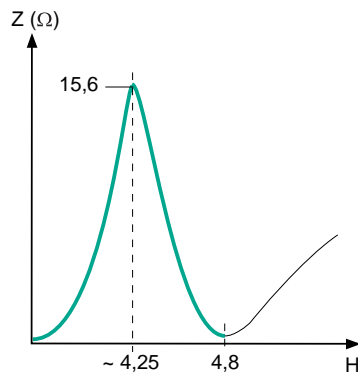


Fig. 30: Curva de la impedancia armónica vista desde el nudo de inyección de las corrientes armónicas en una red equipada con un dispositivo de inductancia antiarmónica.

(antirresonancia) alrededor del rango $4,25$. La baja impedancia, de carácter inductivo, en el rango 5 favorecerá el filtrado de magnitudes armónicas de este rango.

Deformación de tensiones (figura 31)

En la red de $5,5$ kV, las tasas individuales de tensiones armónicas del $1,58\%$ (rango 7), del $1,5\%$ (rango 11) y del $1,4\%$ (rango 13) pueden ser demasiado elevadas para ciertos consumidores sensibles. Pero en la mayoría de los casos la distorsión de la tensión del $2,63\%$ es aceptable.

A nivel de los 20 kV esta distorsión es sólo del $0,35\%$, aceptable para el distribuidor.

Carga en corriente de los condensadores (figura 32)

La carga en corriente eficaz global de los condensadores, que incluye las corrientes armónicas, es $1,06$ veces la corriente nominal, inferior al máximo de $1,3$. Tal como se ha visto anteriormente, lo realmente positivo es utilizar inductancias antiarmónicas en vez de simples condensadores.

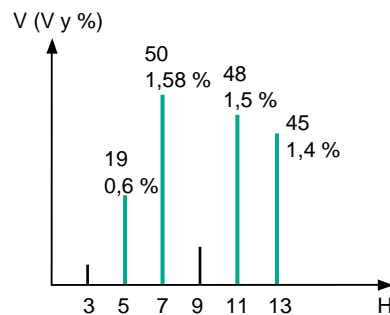


Fig. 31: Espectro de las tensiones armónicas de una red $5,5$ kV equipada con un dispositivo de inductancia antiarmónica. La amplitud de los armónicos se expresa aquí en voltios o en porcentaje de la tensión simple ($5,5 \text{ kV} / \sqrt{3}$).

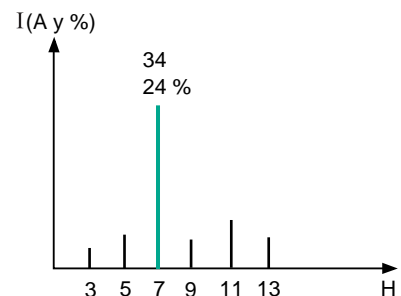


Fig. 32: Espectro de corrientes armónicas que atraviesan los condensadores en una red equipada con un dispositivo de inductancia antiarmónica.

8.3 Montaje de un filtro shunt resonante en el rango 5 y de un filtro amortiguado en el rango 7

En este ejemplo, el reparto de las potencias reactivas entre los dos filtros es tal que las tensiones armónicas filtradas de rango 5 y 7 tienen sensiblemente el mismo valor. En la realidad no es una obligación.

Impedancia armónica (figura 33)

La curva de la impedancia armónica de la red, vista desde el nudo de inyección de las corrientes armónicas, presenta un máximo de $9,5 \Omega$ (antirresonancia) en las proximidades del rango 4,7.

En el rango 5, esta impedancia se reduce a la resistencia de la inductancia, siendo favorable al filtrado de magnitudes armónicas de este rango.

En el rango 7, la baja impedancia puramente resistiva del filtro amortiguado es igualmente favorable a la reducción de la tensión armónica de este rango.

Y para rangos superiores a su sintonización, la curva de impedancia del filtro amortiguado favorece la reducción de las tensiones armónicas correspondientes.

Por tanto, esta curva representa una mejora respecto al dispositivo con inductancia antiarmónica y condensadores, estudiado anteriormente.

Deformación de las tensiones (figura 34)

En la red de 5,5 kV, las tasas individuales de las tensiones armónicas de rangos 5, 7, 11 y 13 son, respectivamente, del 0,96%, 0,91%, 1,05% y 1%, lo que es admisible para la mayoría de los receptores sensibles. La distorsión de tensión es del 1,96%.

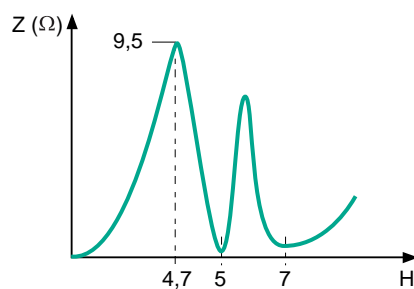


Fig. 33: Curva de la impedancia armónica vista desde el nudo de inyección de las corrientes armónicas en una red equipada con un filtro shunt resonante en el rango 5 y un filtro amortiguado en el rango 7.

A nivel de los 20 kV esta distorsión no es superior al 0,26%, aceptable por el distribuidor.

Carga en corriente de los condensadores

Los condensadores deben de estar especialmente dimensionados teniendo en cuenta la sobretensión a la frecuencia fundamental, las tensiones y las corrientes armónicas.

Este ejemplo muestra cómo puede conseguirse una primera aproximación a la solución; pero en realidad, además del cálculo de los elementos (L-r-C-R), antes que efectuar ningún otro cálculo, es indispensable tener en cuenta:

- espectros de corrientes que atraviesan las inductancias asociadas a los condensadores,
- globalización de tensiones en los bornes de los condensadores,
- tolerancias de fabricación y tomas de regulación de inductancias, si son necesarias,
- espectros de corrientes que atraviesan las resistencias de los filtros amortiguados y su valor eficaz global,
- sobreesfuerzos transitorios en tensión y en energía sobre los elementos de los filtros cuando se conectan a la alimentación.

Todos estos cálculos, muy delicados, que precisan a la vez un profundo conocimiento de las redes y de los materiales, tienen como objetivo final el definir todos los informes electrotécnicos detallados que componen el cuaderno de cargas necesario para la fabricación de filtros.

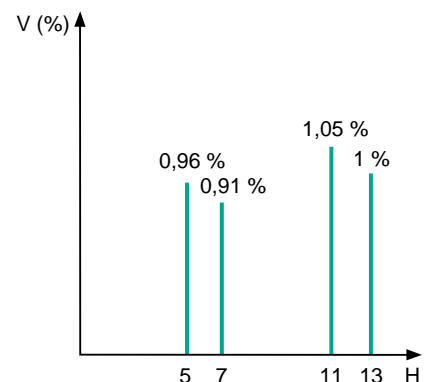


Fig. 34: Espectro de tensiones armónicas de una red de 5,5 kV equipada con un filtro shunt resonante en el rango 5 y un filtro amortiguado en el rango 7.

9 Conclusión

Los convertidores estáticos de potencia están cada vez más presentes como receptores-consumidores en la red de distribución industrial, y los hornos de arco están en pleno desarrollo en la siderurgia.

Todos estos consumidores producen una polución eléctrica armónica y precisan de una compensación de la energía reactiva que consumen, por lo que se instalan condensadores de compensación.

Desgraciadamente, estos condensadores, asociados a las inductancias de la red, provocan oscilaciones de alta frecuencia las cuales amplifican las perturbaciones armónicas.

Así, todo instalador y consumidor de una red industrial puede estar afectado por estas dificultades técnicas.

En este Cuaderno se han tratado las principales perturbaciones armónicas y los medios técnicos que permiten limitarlas.

Sin pretender ser un estudio técnico exhaustivo sobre el tema ni un compendio de todas las experiencias adquiridas, este Cuaderno debería permitir, si no resolver estas dificultades, sí por lo menos facilitar el diálogo entre los especialistas.

Recordemos que desde 1970 existe en la Dirección Científica y Técnica de Schneider Electric Francia un equipo especializado dedicado al estudio de fenómenos electrotécnicos en las redes y un grupo dedicado a la fabricación de filtros (Rectiphase).

Bibliografía

Normas y recomendaciones

- IEC 60 146: Convertidores con semiconductores.
- IEC 60 287: Cálculo de la corriente admisible en cables en régimen permanente.
- IEC 60 871: Condensadores de compensación de tensión superior a 660 V.
- IEC 61 000-2-2: Niveles de compatibilidad de las perturbaciones conducidas de BF en redes públicas de alimentación BT.
- IEC 61 000-2-4: Niveles de compatibilidad en instalaciones industriales de las perturbaciones conducidas de BF.
- IEC 61 000-3-2: Límites para las emisiones de corrientes armónicas de los aparatos que absorben hasta 16 A por fase.
- IEC 61 000-3-4: Limitación de emisiones de corrientes armónicas en las redes BT para materiales que tienen una corriente asignada superior a 16 A por fase.

Publicaciones diversas

- Direct current transmission. Volumen 1. E. W. KIMBARK. Ed. J. WILEY and SONS.
- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques.
Résonances en présence des harmoniques créés par le convertisseurs de puissance et les fours à arc associés à des dispositifs de compensation. Michel LEMOINE DER EDF. RGE T 87 n° 12, 12/78.

- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques.
Perturbations de tension affectant le fonctionnement des réseaux-fluctuations brusques, flicker, déséquilibre et harmoniques. M. CHANAS SER-DER EDF. RGE 187 n° 12, 12/78.
- Pollution de la tension. P. MEYNAUD SER-DER EDF. RGE T89 n° 9, 09/80.
- La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires. Cahiers de l'ingénierie EDF, 12/96 y 04/97.
- Origine et nature des perturbations dans les réseaux industriels et de distribution. Guy BONNARD SER-DER-EDF. RGE 1/82.
- Réduction des perturbations électriques sur le réseau avec le four à arc en courant continu. G. MAURET, J. DAVENE. IRSID SEE LYON 05/83.
- Line harmonics of converters with DC Motor Loads. A.DAVID GRAHAM and EMIL T. SCHONHOLZER. IEEE transactions on industry applications. Vol IA 19 n° 1, 02/83.
- Filtrage d'harmoniques et compensation de puissance réactive. Optimisation des installations de compensation en présence d'harmoniques. P. SGARZI, S.THEOLEYRE. Journée SEE RGE n° 6, 06/88.
- Electrical Power Systems Quality. DUGAN, MoGRANAGAN, BEATY. McGraw-Hill, 1996.
- Les harmoniques et les installations électriques. A. KOUYOUMDJIAN. SCHNEIDER ELECTRIC, 05/98 (réf. MD1HRM1F).