

Septiembre 2000

TÍTULO

Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos

Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo

Industrial a.c. networks affected by harmonics. Application of filters and shunt capacitors.

Réseaux industriels à courant alternatif affectés par les harmoniques. Emploi de filtres et de condensateurs shunt.

CORRESPONDENCIA

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 61642 de octubre 1997, que a su vez adopta la Norma Internacional CEI 61642:1997.

OBSERVACIONES

ANTECEDENTES

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 203 *Equipamiento Eléctrico y Sistemas Automáticos para la Industria* cuya Secretaría desempeña SERCOBE.

ICS 31.060.99; 31.160

Descriptor: Condensadores, condensadores de potencia, corriente alterna, filtro eléctrico, definición, generalidades.

Versión en español

**Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos
Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo
(CEI 61642:1997)**

**Industrial a.c. networks affected by harmonics. Application of filters and shunt capacitors.
(CEI 61642:1997).**

**Réseaux industriels à courant alternatif affectés par les harmoniques. Emploi de filtres et de condensateurs shunt.
(CEI 61642:1997).**

**Von Oberschwingungen beeinflusste industrielle Wechselstromnetze
Anwendung von Filtern und Parallelkondensatoren
(IEC 61642:1997).**

Esta norma europea ha sido aprobada por CENELEC el 1997-10-01. Los miembros de CENELEC están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CENELEC, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CENELEC en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CENELEC son los comités electrotécnicos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia y Suiza.

CENELEC
COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN ELECTROTÉCNICA
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 35 B-1050 Bruxelles

© 1997 Derechos de reproducción reservados a los Miembros de CENELEC.

ANTECEDENTES

El texto del documento 33/255 FDIS, futura edición 1 de la Norma CEI 61642, preparado por el TC 33 de CEI, "Condensadores de potencia", fue sometido al voto paralelo CEI-CENELEC y fue aprobado por CENELEC como EN 61642 el 1997-10-01.

Se fijaron las siguientes fechas:

- Fecha límite en la que la norma EN debe ser adoptada a nivel nacional por publicación de una norma nacional idéntica o por ratificación (dop) 1998-07-01
- Fecha límite de retirada de las normas nacionales divergentes (dow) 1998-07-01

Los anexos denominados "normativos" forman parte del cuerpo de la norma.

Los anexos denominados "informativos" se dan sólo para información.

En esta norma, el anexo ZA es normativo y el anexo A es informativo.

El anexo ZA ha sido añadido por CENELEC.

DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional CEI 61642:1997 fue aprobado por CENELEC como norma europea sin ninguna modificación.

En la versión oficial, en el anexo A, Bibliografía, se añaden las siguientes notas para las normas indicadas.

CEI 60110	NOTA – Armonizada como HD 207 S1:1997 (no modificada).
CEI 60143	NOTA – Armonizada en la serie EN 60143.
CEI 60358	NOTA – Armonizada como HD 597 S1:1992 (no modificada).
CEI 60252	NOTA – Armonizada como EN 60252:1994 (modificada).
CEI 61048	NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1992, como EN 61048:1993 (modificada).
CEI 61049	NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1992, como EN 61049:1993 (modificada).
CEI 60056	NOTA – Armonizada, junto con sus modificaciones A1:1992 y A2:1995, como HD 348 S6:1995.
CEI 60255-6	NOTA – Armonizada como EN 60255-6:1994 (modificada).
CEI 60265-1	NOTA – Armonizada, junto con sus modificaciones A1:1984 y A2:1994, como HD 335.1 S3:1995 (no modificada).
CEI 60265-2	NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1990, como EN 60265-2:1993 (no modificada).
CEI 60269	NOTA – Armonizada en la serie EN 60269 y en la serie HD 630.
CEI 60282	NOTA – Armonizada como EN 60282-1:1996 (no modificada), y como HD 636 S1:1996 (no modificada).
CEI 60289	NOTA – Armonizada como EN 60289:1994 (modificada).
CEI 60831-1	NOTA – Armonizada como EN 60831-1:1996 (no modificada).
CEI 60871-1	NOTA – Armonizada como HD 525.1 S1:1989 (no modificada).
CEI 60871-2	NOTA – Armonizada como HD 525.2 S1:1989 (no modificada).
CEI 60931-1	NOTA – Armonizada como EN 60931-1:1996 (no modificada).
CEI 61000-2-2	NOTA – Armonizada como ENV 61000-2-2:1993 (modificada).

ÍNDICE

	Página
1 GENERALIDADES	7
1.1 Objeto y campo de aplicación	7
1.2 Normas para consulta.....	7
1.3 Definiciones	8
1.4 Generalidades.....	9
1.4.1 Armónicos en corriente alterna	9
1.4.2 Potencia reactiva.....	9
2 PROBLEMAS Y SOLUCIONES CONCERNIENTES A LA RESONANCIA	9
2.1 Introducción	9
2.2 Impedancia vista desde el lado de la fuente de la alimentación, impedancia vista desde el embarrado del lado de carga	10
2.3 Ejemplo de resonancia serie.....	12
2.4 Ejemplo de resonancia paralelo.....	14
2.5 Soluciones para evitar resonancias.....	17
2.5.1 Conexión condensador-reactancia: resonancia serie.....	18
2.5.2 Conexión condensador-reactancia: resonancia paralelo.....	20
3 CONDENSADORES A INSTALAR EN PARALELO Y FILTROS PARA REDES CON TENSIÓN INFERIOR O IGUAL A 1 000 V	22
3.1 Introducción	22
3.2 Condensadores a instalar en paralelo	22
3.3 Filtros desintonizados	22
3.4 Filtro sintonizado	23
3.5 Elección de los componentes	23
3.5.1 Condensadores	24
3.5.2 Reactancias.....	24
3.5.3 Contactores y/o cortacircuitos	24
3.5.4 Protección contra cortocircuitos (fusibles)	25
3.6 Perturbaciones en el telemando centralizado provocadas por los condensadores instalados en paralelo y los filtros	25
3.6.1 Condensadores instalados en paralelo	25
3.6.2 Filtro desintonizado	26
3.6.3 Filtro sintonizado	26
4 CONDENSADORES A INSTALAR EN PARALELO Y FILTROS PARA REDES CON TENSIÓN SUPERIOR A 1 000 V	28
4.1 Introducción	28
4.2 Requisitos específicos.....	28
4.3 Elección del equipo de corrección del factor de potencia.....	28
4.4 Tipos de filtros.....	29

4.5	Elección de los componentes de los filtros	29
4.5.1	Cortacircuito	29
4.5.2	Condensadores	29
4.5.3	Reactancias.....	30
4.5.4	Resistencias.....	30
4.5.5	Protección por relés	30
4.6	Perturbaciones de los telemandos centralizados provocadas por condensadores instalados en paralelo y los filtros	30
ANEXO A (Informativo)	BIBLIOGRAFÍA.....	32

Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo

1 GENERALIDADES

1.1 Objeto y campo de aplicación

Esta norma internacional da las indicaciones para la utilización de filtros pasivos de armónicos de corriente alterna y de condensadores a instalar en paralelo destinados a la limitación de armónicos y a la corrección del factor de potencia en las instalaciones industriales de baja y alta tensión. Las disposiciones propuestas en esta norma son aplicables a los armónicos cuyo orden sea mayor que 1 e inferior o igual a 25.

Los siguientes condensadores están excluidos de esta norma:

- condensadores para las instalaciones de generación de calor por inducción sometidos a frecuencias comprendidas entre 40 Hz y 24 000 Hz (véase CEI 60110 [1]*);
- condensadores serie destinados a ser instalados en redes (véase CEI 60143 [2]);
- condensadores de acoplamiento y divisores capacitivos (véase CEI 60358 [3]);
- condensadores para electrónica de potencia (véase CEI 61071 [4]);
- condensadores para motores de corriente alterna (véase CEI 60252 [5]);
- condensadores destinados a ser utilizados en los circuitos de alimentación de lámparas fluorescentes tubulares y otros circuitos de lámparas de descarga (véase CEI 61048 [6] y CEI 61049 [7]);
- condensadores para la supresión de interferencias radioeléctricas;
- condensadores destinados a ser utilizados en diferentes tipos de equipos eléctricos y considerados por ello como componentes;
- condensadores destinados a ser utilizados en tensión continua superpuesta a una tensión alterna;
- condensadores destinados a ser utilizados en hornos de arco.

El objeto de esta norma es identificar los problemas y dar las recomendaciones para las aplicaciones generales de los condensadores y de los filtros de armónicos de corriente alterna en redes de energía de corriente alterna afectadas por la presencia de tensiones y corrientes armónicas.

1.2 Normas para consulta

Las normas que a continuación se relacionan contienen disposiciones válidas para esta norma internacional. En el momento de la publicación las ediciones indicadas estaban en vigor. Toda norma está sujeta a revisión por lo que las partes que basen sus acuerdos en esta norma internacional deben estudiar la posibilidad de aplicar la edición más reciente de las normas indicadas a continuación. Los miembros de CEI y de ISO poseen el registro de las normas internacionales en vigor en cada momento.

CEI 60050(131):1978 – *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 131: Circuitos eléctricos y magnéticos.*

CEI 60050(161):1990 – *Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética.*

* Las cifras entre corchetes se refieren a la bibliografía del anexo A.

1.3 Definiciones

Para el propósito de esta norma internacional, se aplicarán las siguientes definiciones:

1.3.1 armónico: Uno de los elementos que resultan de la descomposición en serie de Fourier de una onda periódica de una intensidad o de tensión [VEI 161 - 02 - 18 modificada].

1.3.2 rango de un armónico, h : Relación de la frecuencia de un armónico (f_h) respecto a la frecuencia fundamental (nominal) de la red (f_1). [VEI 161 - 02 - 19 modificada].

1.3.3 armónicos característicos: Armónicos producidos por convertidores estáticos en el transcurso de su funcionamiento teóricamente ideal. El orden de armónicos característicos de los convertidores estáticos c.a./c.c. viene dado por $h = mp \pm 1$, en donde p es el número de pulsos del convertidor y m es cualquier entero. Por ejemplo, un circuito convertidor de seis pulsos tiene unos armónicos característicos de orden $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19...$

1.3.4 armónicos no característicos: Armónicos que se producen como resultado del desequilibrio en la red de alimentación de c.a. o por un retraso asimétrico de ángulo de encendido del convertidor. Estos también pueden ser producidos por otros dispositivos no-lineales, o variables en el tiempo, por ejemplo los variadores de frecuencia, lámparas fluorescentes, hornos de arco, máquinas de soldadura eléctrica, etc.

1.3.5 factor de potencia: La relación entre la potencia activa con respecto a la potencia aparente. [VEI 131-03-20].

1.3.6 factor de desfase: La relación entre la potencia activa a la frecuencia fundamental con la potencia aparente a la frecuencia fundamental. [VEI 131-03-21 modificada].

1.3.7 factor de armónicos: La relación entre el valor eficaz del contenido de armónicos con respecto al valor eficaz a la frecuencia fundamental, expresada como porcentaje, respecto a este último. [VEI 131-03-04 modificada].

$$DF = \frac{(\text{suma de los cuadrados de los valores eficaces de los armónicos})^{1/2}}{\text{valor eficaz de la fundamental}} 100\%$$

1.3.8 filtro: Equipo constituido generalmente por reactancias, condensadores y resistencias si es necesario, sintonizado de tal forma que presenta una impedancia conocida sobre un rango de frecuencias dado.

1.3.9 frecuencia de sintonía: Frecuencia para la cual la impedancia del filtro, calculada a partir de los valores asignados, presenta un valor mínimo o un valor máximo.

1.3.10 filtro sintonizado: Filtro cuya frecuencia de sintonía no difiere en más del 10% de la frecuencia que se ha de filtrar.

1.3.11 filtro desintonizado:¹⁾ Filtro cuya frecuencia de sintonía es inferior al menos en un 10% respecto a la primera frecuencia del armónico que presenta una amplitud importante en corriente/tensión.

1.3.12 filtro de amortiguación: Filtro que presenta una baja impedancia, principalmente resistiva, en una banda ancha de frecuencias.

1.3.13 instalación de telemando centralizado: Instalación destinada a inyectar señales de audiofrecuencia en la red de alta tensión (AT) con el fin de controlar los receptores en la red de baja tensión (BT).

1.3.14 tensión de referencia: Tensión a la cual se refieren los cálculos de impedancia.

1) En español se puede emplear también el termino <<condensador con reactancia anti-armónicos>>.

1.4 Generalidades

1.4.1 Armónicos en corriente alterna. En general se producen corrientes armónicas en redes de potencia, cuando las cargas son no-lineales o son variables en función del tiempo. Una de las fuentes principales de armónicos en redes industriales son los convertidores estáticos.

Hay dos tipos de corrientes armónicas generadas por convertidores: los armónicos característicos y los no característicos. Los armónicos característicos dependen fuertemente del circuito del convertidor y tienen un espectro de frecuencia constante. Aproximadamente su amplitud es inversamente proporcional al rango del armónico.

Las fuentes principales de armónicos no característicos son los variadores de frecuencia, aunque pequeños porcentajes de armónicos no característicos pueden resultar por desequilibrios en red (tensión e impedancia) y por un desequilibrio del ángulo de encendido del convertidor.

Los rectificadores para reguladores de corriente continua producen principalmente armónicos característicos.

El efecto de las cargas no lineales o variables en función del tiempo, puede ser amplificado bajo ciertas condiciones dependientes de la configuración de la red de alimentación, por ejemplo por resonancias. En función del estado de la red y del efecto amplificador de las resonancias, la tensión de suministro puede estar sometida a distorsiones, incluso en instalaciones eléctricas donde no existen o representen una pequeña parte de la potencia total las cargas no lineales y las cargas variables en función del tiempo.

Los armónicos aumentan las pérdidas en las redes de potencia y pueden afectar al buen funcionamiento de diversos equipos, en particular los circuitos electrónicos.

Con el fin de mantener a un nivel aceptable las perturbaciones debidas a los armónicos, los reglamentos locales así como las normas nacionales e internacionales podrán especificar los límites admisibles en cuanto a la distorsión armónica. Se pueden utilizar filtros para la reducción de distorsión armónica.

1.4.2 Potencia reactiva. En general, la potencia reactiva fluye en redes debido a las cargas inductivas y a los convertidores estáticos.

En una red, el factor de potencia global está definido para la obtención de un uso lo más rentable posible de la instalación, o está impuesto por el distribuidor de energía. Las tarifas de energía pueden dar lugar a penalizaciones cuando existe un factor de potencia bajo. Por consiguiente es aconsejable compensar la potencia reactiva absorbida incorporando los equipos de compensación apropiados.

Para la corrección del factor de potencia se utilizan normalmente condensadores. Si hay armónicos en la red, pueden aparecer sobretensiones y/o sobreintensidades no deseables. Además, pueden ser perturbadas las instalaciones de control por telemando. En estos casos, se pueden utilizar filtros en lugar de utilizar únicamente condensadores.

2 PROBLEMAS Y SOLUCIONES CONCERNIENTES A LA RESONANCIA

2.1 Introducción

En redes eléctricas, se conectan conjuntamente diferentes componentes, por ejemplo generadores, líneas de potencia, cables, transformadores, condensadores y cargas.

La impedancia en cualquier punto de la red, depende de la frecuencia, de los componentes de la red y de su configuración.

La conexión en serie de una reactancia y una capacidad producirá una impedancia muy baja en una cierta banda de frecuencias, cerca de su frecuencia de resonancia. Este efecto se llama resonancia serie.

La conexión en paralelo de una reactancia y una capacidad producirá una impedancia muy alta en una cierta banda de frecuencias, cerca de la frecuencia de resonancia. Este efecto se llama resonancia paralelo.

Una resonancia serie y una resonancia paralelo pueden aparecer en la misma red en una gama amplia de frecuencias.

Si tales circuitos resonantes son excitados por fuentes de armónicos de corriente o de tensión, pueden producirse entonces amplificación de tensiones y corrientes que pueden perturbar, sobrecargar e incluso destruir componentes de la red.

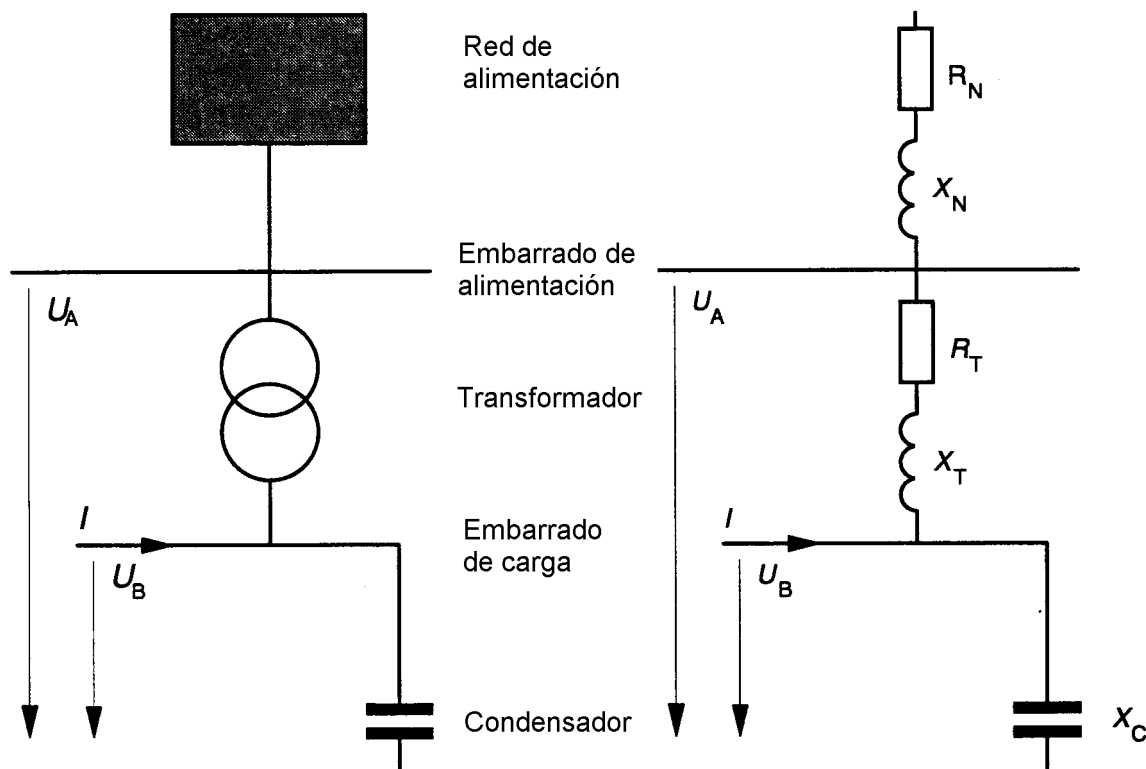


Fig. 1 – Red simplificada esquema unifilar

Este ejemplo consiste en una red de alimentación, de un embarrado de alimentación (lado de alta tensión), un transformador, un embarrado de baja tensión (lado de baja tensión) y un condensador. La fuente de corrientes armónicas puede ser un regulador que es controlado por un rectificador de seis pulsos. Además pueden estar presentes tensiones armónicas en la misma red debido a otras fuentes de armónicos de corriente.

2.2 Impedancia vista desde el lado de la fuente de alimentación, impedancia vista desde el embarrado del lado de carga

Para analizar el comportamiento de una red con respecto a los armónicos, es útil considerar por lo menos dos impedancias:

- la impedancia vista desde el lado de la fuente de alimentación (véase figura 2a).

Este aspecto es útil para el análisis de las cargas capacitivas y cargas inductivas bajo la presencia de tensiones y corrientes armónicas en los embarrados de alimentación, y para el cálculo de la impedancia a las frecuencias utilizadas para el control por telemando y para evaluar las tensiones armónicas resultantes (calidad de la tensión) que aparecen en los embarrados del lado de carga;

- la impedancia vista desde los embarrados del lado de carga (véase figura 2b).

Este aspecto es útil para el análisis de la carga capacitiva e inductiva en presencia de fuentes de corrientes armónicas sobre los embarrados del lado de carga y para el cálculo de las tensiones armónicas resultantes (calidad de la tensión) en estos embarrados.

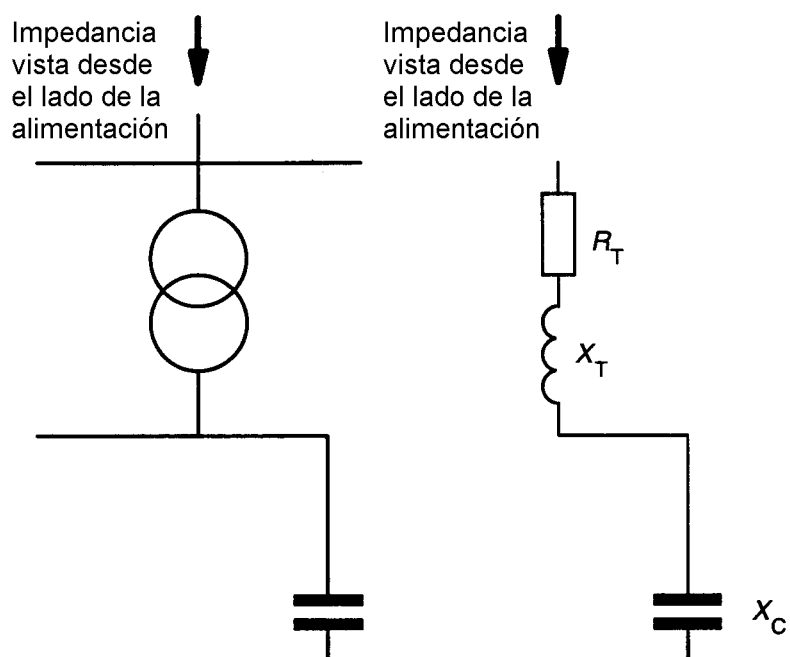


Fig. 2a – Impedancia vista desde el lado de la alimentación y esquema unifilar

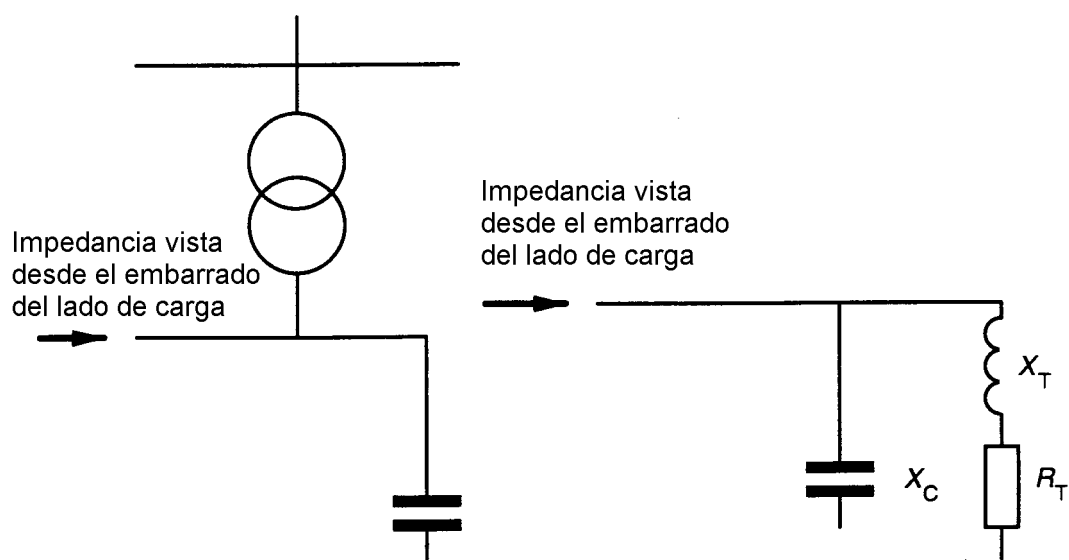


Fig. 2b – Impedancia vista desde el embarrado del lado de carga y esquema unifilar

2.3 Ejemplo de resonancia serie

En el ejemplo del cálculo siguiente, se analiza la conexión serie de un transformador (reactancia X_T y resistencia R_T) y un condensador. La figura 3a muestra el esquema unifilar y la figura 3b muestra la impedancia en función del rango del armónico. Este pone en evidencia una resonancia serie cerca del armónico 11. En la tabla 1 se muestran los resultados numéricos típicos de impedancias, tensiones e intensidades a las frecuencias de los armónicos característicos en la red mostrada según la figura 1, con una tensión de alimentación distorsionada [8].

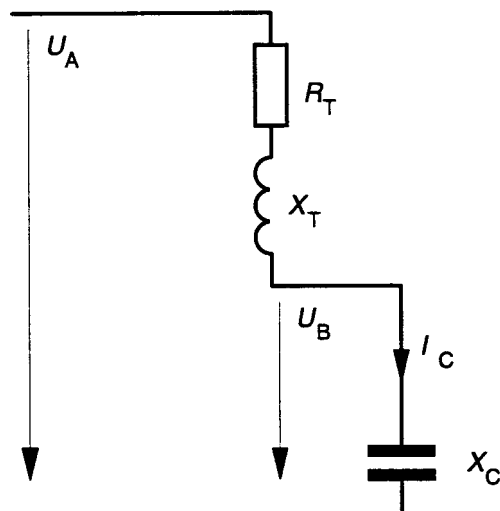


Fig. 3a – Esquema unifilar de un circuito de resonancia serie

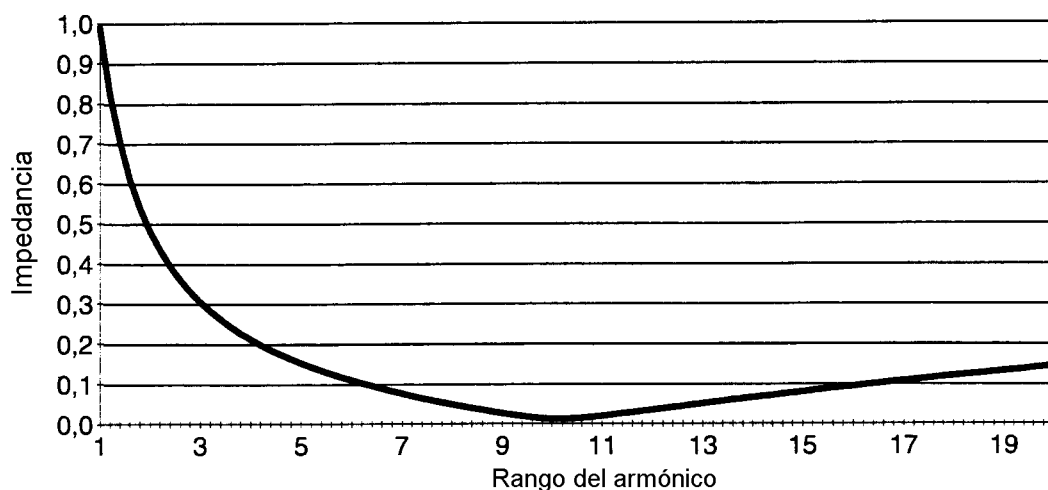


Fig. 3b – Impedancia en ohmios en función del rango del armónico, del circuito representado en la figura 3a

Explicación de los símbolos y valores utilizados en las figuras 3a, 3b, y en la tabla 1.

- U_N tensión de referencia (en el ejemplo: 400 V trifásica);
- $h = f_h / f_1$ rango del armónico, f_1 frecuencia fundamental, f_h frecuencia del armónico;
- $X_T = X_{T1} \cdot h$ reactancia de cortocircuito de un transformador de 1 000 kVA que tiene una tensión de cortocircuito del 6%;
- $Q_T = 8$ factor de calidad del transformador;
- $X_C = X_{C1} / h$ reactancia de un condensador de 160 kvar;
- Z impedancia equivalente (véase figura 3a);
- U_A tensión en el embarrado de alimentación. Los valores están tomados de un informe de la CIGRE sobre los armónicos aumentados en un 60% [8];
- $U_A (\%) = (U_A / U_N) \cdot 100$
- I_C corriente en el condensador;
- I_{CN} corriente asignada del condensador;
- U_B tensión resultante en el embarrado del lado de la carga;
- $U_B (\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$

Tabla 1
Resultados numéricos del cálculo de impedancias, tensiones e intensidades de los rangos de los armónicos característicos de un circuito de resonancia serie en una red con una tensión de alimentación distorsionada

h	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	U_A V	$U_A (\%)$ %	I_C A	U_B V	$U_B (\%)$ %
1	0,010	-1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	-0,200	0,152	12,0	3,0	46	16	3,9
7	0,067	-0,143	0,076	9,6	2,4	73	18	4,5
11	0,106	-0,091	0,020	6,0	1,5	175	28	6,9
13	0,125	-0,077	0,050	4,8	1,2	55	7	1,8
17	0,163	-0,059	0,106	2,4	0,6	13	1	0,3
19	0,182	-0,053	0,132	1,9	0,5	8	1	0,2
$R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (cálculo simplificado)				DF (A)% = 4,4		DF(B)% = 9,3		
						$I_{Cef} = 313$ A		
						$I_C / I_{CN} = 1,35$		

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de la tabla 1:

- si la frecuencia de armónico está próxima a la frecuencia de resonancia serie, una tensión relativamente baja en el embarrado de alimentación podrá causar una corriente elevada.

En el ejemplo, para $h = 11$, resulta una corriente en el condensador de 175 A que representa aproximadamente el 75% de su corriente fundamental;

- esta corriente causa una caída de tensión elevada sobre el embarrado de carga provocando una distorsión de la tensión sinusoidal.

En el ejemplo para $h = 11$, el factor de armónicos resultante es del 6,9%, aunque la tensión sea sólo del 1,5% sobre el embarrado de alimentación;

- la corriente eficaz del condensador es igual a 1,35 veces la corriente asignada del condensador. El condensador está pues sobrecargado puesto que el límite normal es de 1,3 veces su corriente asignada.

Es posible diseñar un condensador que pueda resistir esta corriente. Pero esto no soluciona el problema porque la distorsión de tensión en el embarrado de carga es aproximadamente del 7% para una sola frecuencia armónica ($h = 11$), que es muy alto para los niveles de compatibilidad normales.

Adicionalmente, puede verse que esta amplificación no sólo se obtiene cuando la frecuencia es igual a la frecuencia de resonancia, sino también cuando la frecuencia está próxima a esta frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia que da una impedancia resultante mínima es aproximadamente:

$$f_{\text{res}} = f_1 \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{T1}}}$$

2.4 Ejemplo de resonancia paralelo

En el ejemplo del cálculo presentado a continuación, se analiza el montaje paralelo de un transformador (reactancia X_T y resistencia R_T) y un condensador. La figura 4a muestra el esquema unifilar, y la figura 4b muestra la impedancia en función del rango del armónico. En la tabla 2 se muestran los resultados numéricos típicos de impedancias, tensiones e intensidades a las frecuencias de los armónicos característicos.

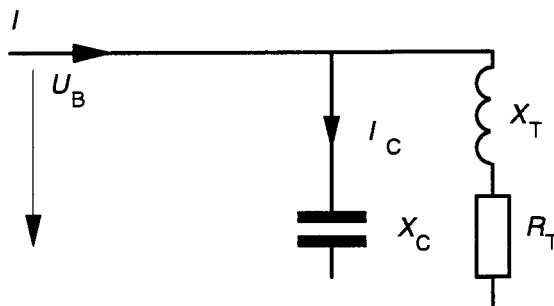


Fig. 4a – Diagrama unifilar de un circuito de resonancia paralelo

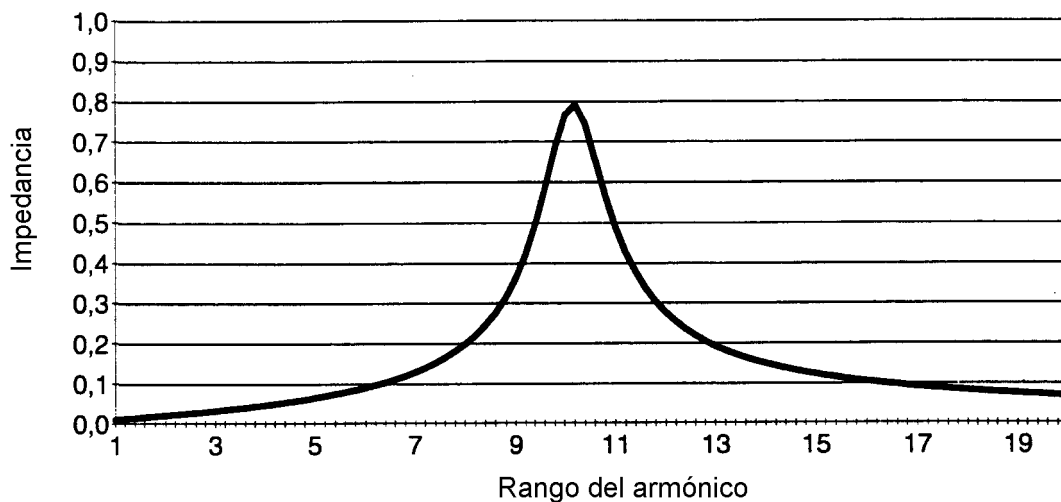


Fig. 4b – Impedancia en ohmios en función del rango del armónico, del circuito representado en la figura 4a

Explicación de los símbolos y valores usados en la figura 4a, 4b y tabla 2.

U_N tensión de referencia (en el ejemplo: 400 V trifásica);

$h = f_h / f_1$ rango del armónico, f_1 frecuencia fundamental, f_h frecuencia del armónico;

$X_T = X_{T1} \cdot h$ reactancia de cortocircuito de un transformador de 1 000 kVA que tiene una tensión de cortocircuito de 6%;

$Q_T = 8$ factor de calidad del transformador;

$X_C = X_{C1} / h$ reactancia de un condensador de 160 kvar;

Z impedancia equivalente (véase figura 4a);

$I, I (%)$ corriente en el embarrado del lado de carga. Los valores son los valores teóricos de un convertidor de 300 kVA;

U_B tensión resultante en el embarrado del lado de carga;

$$U_B (%) = (U_B / U_N) \cdot 100$$

I_C corriente en el condensador;

I_{CN} corriente asignada del condensador;

Tabla 2
Resultados numéricos del cálculo de impedancias, tensiones e intensidades de los rangos de los armónicos característicos de un circuito de resonancia paralelo en presencia de una fuente de armónicos de corriente

<i>h</i>	X_T Ω	X_C Ω	Z Ω	I A	I (%) %	U_B V	U_B (%) %	I_C A
1	0,010	-0,000	0,010	433	100,0	---	---	231
5	0,048	-0,200	0,064	87	20,0	10	2,4	28
7	0,067	-0,143	0,127	62	14,3	14	3,4	55
11	0,106	-0,091	0,490	39	9,1	33	8,3	212
13	0,125	-0,077	0,192	33	7,7	11	2,8	83
17	0,163	-0,059	0,091	25	5,9	4	1,0	39
19	0,182	-0,053	0,073	23	5,3	3	0,7	32
$R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (cálculo simplificado)						DF(B)% = 9,8		$I_{C\text{ef}} = 334$ A
								$I_C / I_{CN} = 1,45$

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de la tabla 2:

- si la frecuencia de armónico está próxima a la frecuencia de resonancia paralelo, una intensidad relativamente baja en el embarrado de carga puede causar una corriente alta en el condensador.

En el ejemplo, para $h = 11$, resulta una corriente en el condensador de 212 A que representa más del 90% de la corriente fundamental del condensador, aunque la corriente armónica en el embarrado de carga sea sólo 39 A;

- esta corriente elevada produce una gran caída de tensión en el embarrado de carga provocando una distorsión en la tensión sinusoidal.

En el ejemplo para $h = 11$, el factor de armónicos de tensión alcanza el 8,3%;

- la corriente eficaz del condensador es igual a 1,45 veces la corriente asignada del condensador. El condensador está pues sobrecargado puesto que el límite normal para su carga es 1,3 veces su corriente asignada.

Es posible diseñar un condensador que pueda resistir esta corriente. Pero esto no soluciona el problema, porque la distorsión de tensión en el embarrado de carga es aproximadamente del 8%, para una sola frecuencia armónica, que es muy alto para los niveles de compatibilidad normales.

Adicionalmente, puede verse que esta amplificación no sólo se obtiene cuando la frecuencia es igual a la frecuencia de resonancia, sino también cuando la frecuencia está próxima a esta frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia que da una impedancia resultante máxima es aproximadamente:

$$f_{\text{res}} = f_1 \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{T1}}}$$

NOTA – En la práctica, la impedancia de la red está conectada en serie con la impedancia del transformador. Esto afectará a la frecuencia de resonancia y a las amplitudes de la tensión y de corrientes armónicas en cierta forma.

2.5 Soluciones para evitar resonancias

El método principal usado para evitar los problemas de resonancia es mantener la frecuencia de resonancia tan lejos como sea posible de las frecuencias armónicas que tengan amplitudes considerables.

Esto se puede hacer cambiando la reactancia o la capacidad de los componentes de la red. No obstante, sus efectos serán pequeños si hay una configuración tal que la red está definida por la alimentación y por la compensación de potencia reactiva. En particular cuando se utiliza una batería automática de condensadores, se tendrán en cuenta numerosas resonancias.

La solución más corriente para evitar estos problemas de resonancia es la de conectar una reactancia en serie con el condensador, sintonizados a una frecuencia de resonancia serie inferior a la frecuencia más baja de las frecuencias de tensiones y corrientes armónicas presentes en la red. Por debajo de la frecuencia de sintonía, la impedancia del circuito reactancia-condensador es capacitiva, por encima de la frecuencia de sintonía será inductiva. La interacción de la reactancia de la red y de la impedancia (inductiva) del circuito reactancia-condensador no podrá crear una condición de resonancia, ni paralelo ni serie, a las frecuencias de las tensiones y corrientes armónicas presentes en la red. La reactancia puede ser definida por su impedancia relativa:

$$p = \left| \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \right|$$

El rango de sintonía es igual a:

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{1}{p}}$$

En la mayoría de las redes, el 5º armónico es la frecuencia más baja que puede tener una amplitud considerable. Para estas redes, es útil elegir un circuito reactancia-condensador que tenga una frecuencia de sintonización inferior a $5 \cdot f_1$, por ejemplo $p > 4\%$.

Si la red está cargada con elevadas tensiones del 3º armónico entre fases, como ocurre por ejemplo con puentes rectificadores monofásicos y con transformadores saturados, la frecuencia de sintonía será inferior a $3 \cdot f_1$, por ejemplo $p > 11\%$.

En los ejemplos siguientes de figuras 5a, 5b, 6a, 6b y en las tablas 3 y 4, se han retomado los mismos valores que antes, pero con un circuito reactancia-condensador sintonizado a $3,78 \cdot f_1$ con $p = 7\%$, conservando la misma potencia reactiva que anteriormente a la frecuencia fundamental.

2.5.1 Conexión condensador-reactancia: resonancia serie

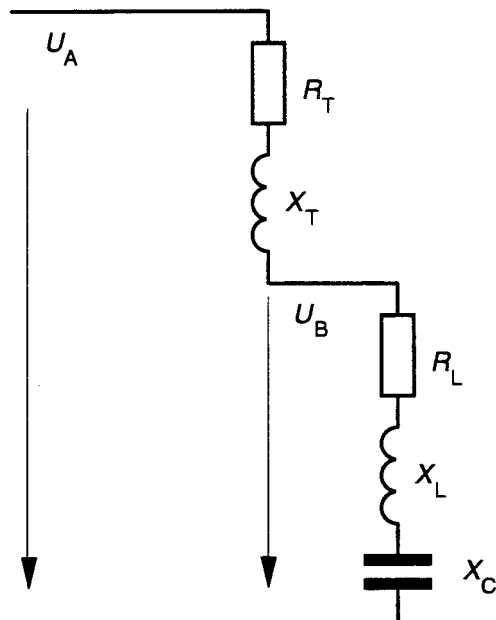


Fig. 5a – Esquema unifilar de un circuito resonante serie formado por la conexión de un condensador-reactancia

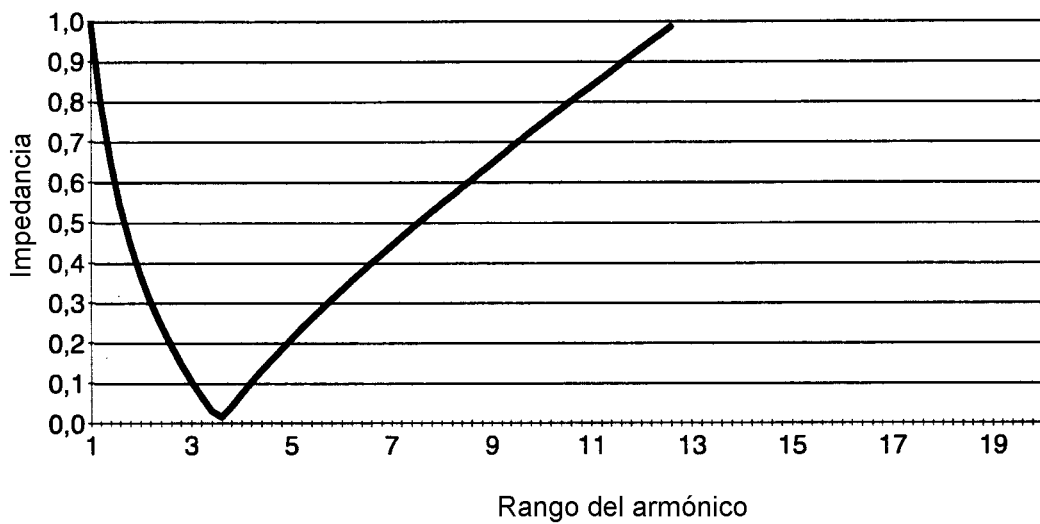


Fig. 5b – Impedancia en ohmios en función del rango del armónico h del circuito representado en la figura 5a

Explicación de los símbolos y valores utilizados en figuras 5a, 5b y en la tabla 3.

- U_N tensión de referencia (en el ejemplo: 400 V trifásicos);
- $h = f_h / f_1$ rango del armónico, f_1 frecuencia fundamental, f_h frecuencia del armónico;
- $X_T = X_{T1} \cdot h$ reactancia de cortocircuito de un transformador de 1 000 kVA que tiene una tensión de cortocircuito del 6%;
- $Q_T = 8$ factor de calidad de transformador;
- $X_L + X_C$ reactancia de un condensador con una reactancia con $p = 7\%$ para una potencia de compensación de 160 kvar;
- $Q_L = 30$ factor de calidad de la reactancia;
- Z impedancia equivalente (véase figura 5a);
- U_A tensión en el embarrado de alimentación. Los valores están tomados de un informe de la CIGRE sobre los armónicos aumentado en un 60% [8];
- $U_A (\%) = (U_A / U_N) \cdot 100$
- I_C corriente en el condensador;
- I_{CN} corriente asignada del condensador;
- U_B tensión resultante en el embarrado de carga;
- $U_B (\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$

Tabla 3
Resultados numéricos del cálculo de impedancias, tensiones e intensidades de los rangos armónicos característicos de un circuito de resonancia serie con conexión condensador-reactancia alimentado por una red con una tensión de alimentación distorsionada

h	X_T Ω	X_C+X_L Ω	Z Ω	U_A V	$U_A (\%)$ %	I_C A	U_B V	$U_B (\%)$ %
1	0,010	-1,000	0,990	400,0	100,0	233	404	101,0
5	0,048	0,161	0,212	12,0	3,0	33	9	2,3
7	0,067	0,373	0,443	9,6	2,4	13	8	2,0
11	0,106	0,730	0,840	6,0	1,5	4	5	1,3
13	0,125	0,896	1,026	4,8	1,2	3	4	1,0
17	0,163	1,216	1,386	2,4	0,6	1	2	0,5
19	0,182	1,374	1,563	1,9	0,5	1	2	0,4
				DF(A)% = 4,4		DF(B)% = 3,5		
$R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (cálculo simplificado)						$I_{C\text{ ef}} = 236$ A		
$R_L = X_L / Q_L = X_L / 30$ (cálculo simplificado)						$I_C / I_{CN} = 1,02$		

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de la tabla 3:

- la conexión condensador-reactancia permite evitar cualquier problema de resonancia que produzca una amplificación de tensiones y corrientes armónicas;
- el factor de armónicos de tensión en los embarrados de carga es del 3,5%, en vez del 9,3% del ejemplo de la tabla 1. La calidad de la tensión de embarrados es mejorada desde este punto de vista.

2.5.2 Conexión condensador-reactancia: resonancia paralelo

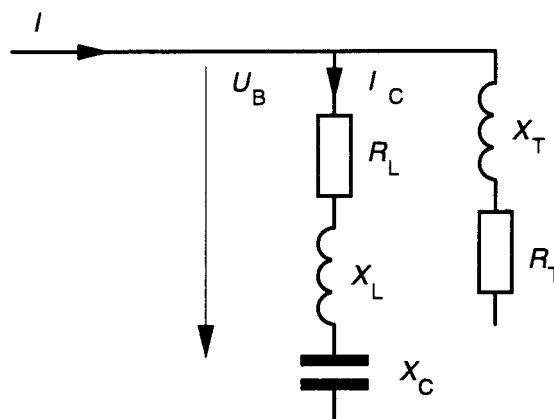


Fig. 6a – Esquema unifilar de un circuito resonante paralelo formado por la conexión de un condensador-reactancia

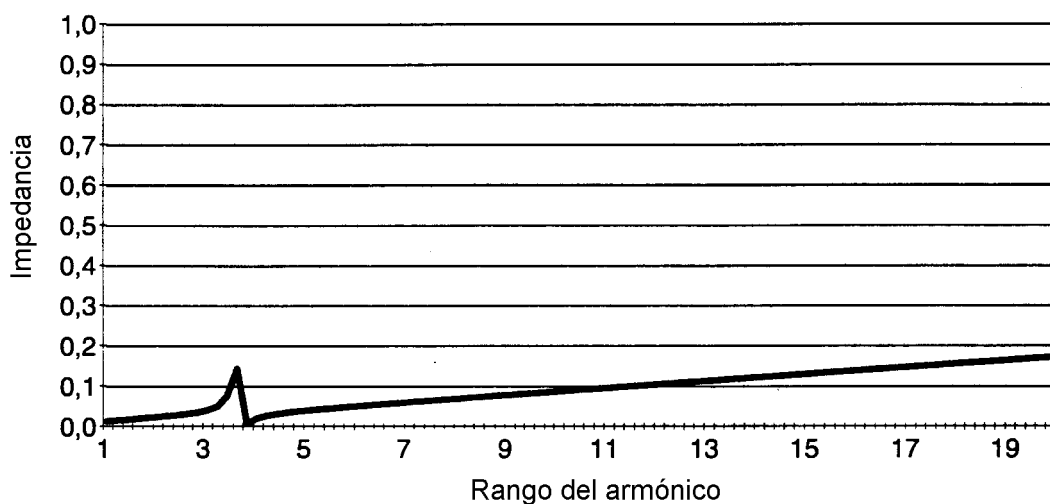


Fig. 6b – Impedancia en ohmios en función del rango del armónico del circuito representado en la figura 6a

Explicación de los símbolos y valores usados en figuras 6a, 6b y en la tabla 4.

- U_N tensión de referencia (en el ejemplo: 400 V trifásica);
- $h = f_h / f_1$ rango de armónico, f_1 frecuencia fundamental, f_h frecuencia del armónico;
- $X_T = X_{T1} \cdot h$ reactancia de cortocircuito de un transformador de 1 000 kVA que tiene una tensión de cortocircuito del 6%;
- $Q_T = 8$ factor de calidad del transformador;
- $X_L + X_c$ reactancia de un condensador con una reactancia $p = 7\%$, para una potencia de compensación de 160 kvar;
- $Q_L = 30$ factor de calidad de la reactancia;
- Z impedancia equivalente (véase figura 6a);
- $I, I (\%)$ corriente en el embarrado del lado de carga. Los valores son los valores teóricos de un convertidor de 300 kVA.
- U_B tensión resultante en el embarrado del lado de carga;
- $U_B (\%) = (U_B / U_N) \cdot 100$
- I_C corriente del condensador;
- I_{CN} corriente asignada del condensador.

Tabla 4
Resultados numéricos del cálculo de impedancias, tensiones e intensidades de los rangos de los armónicos característicos de un circuito de resonancia paralelo con conexión condensador-reactancia, en presencia de una fuente de armónicos de corriente

h	X_T Ω	X_L+X_C Ω	Z Ω	I A	$I (\%)$ %	B_B V	$U_B(\%)$ %	I_C A
1	0,010	-1,000	0,010	433	100	–	–	231
5	0,048	0,161	0,037	87	20,0	6	1,4	20
7	0,067	0,373	0,057	62	14,3	6	1,5	10
11	0,106	0,730	0,093	39	9,1	6	1,6	5
13	0,125	0,896	0,110	33	7,7	6	1,6	4
17	0,163	1,216	0,145	25	5,9	6	1,6	3
19	0,182	1,374	0,162	23	5,3	6	1,6	3
						DF(B)% = 3,8		
$R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (cálculo simplificado)						$I_{C\text{ef}} = 232$ A		
$R_L = X_L / Q_L = X_L / 30$ (cálculo simplificado)						$I_C / I_{CN} = 1,01$		

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de la tabla 4:

- la conexión condensador-reactancia permite evitar cualquier problema de resonancia que produzca una amplificación de tensiones y corrientes armónicas;
- el factor de armónicos de tensión en el embarrado de carga es del 3,8% en lugar del 9,8% del ejemplo de la tabla 2. La calidad de la tensión de la red queda mejorada.

NOTA – En la práctica, la impedancia de la red está conectada en serie con la impedancia del transformador. Esto afectará a la frecuencia de resonancia y a las amplitudes de tensión y de corrientes armónicas en cierta forma.

3 CONDENSADORES A INSTALAR EN PARALELO Y FILTROS PARA REDES CON TENSIÓN INFERIOR O IGUAL A 1 000 V

3.1 Introducción

Se describen a continuación tres métodos de utilización de los condensadores a instalar en paralelo sobre redes de baja tensión, junto con las indicaciones para las precauciones que se han de tomar en cada caso.

Para diseñar un equipo para la corrección del factor de potencia en una instalación, hay que tomar en consideración todas las configuraciones de la red, incluyendo los funcionamientos excepcionales y regímenes de emergencia, así como las posibles ampliaciones futuras.

3.2 Condensadores a instalar en paralelo

Este tipo de instalación para la corrección del factor potencia puede utilizarse cuando no sea necesario tomar medidas para evitar problemas de resonancia o reducir armónicos. Éste es generalmente el caso cuando la frecuencia de resonancia dada por la reactancia de la red y la capacidad para la corrección del factor de potencia de la instalación es relativamente alta y el contenido de armónicos de la red (por ejemplo las tensiones armónicas de la red y los armónicos de corriente generadas por las cargas) es muy bajo.

Deberá entenderse sin embargo que la posibilidad de tener problemas de resonancia está determinada por la capacidad total resultante de todas las instalaciones para la corrección del factor de potencia conectadas en el lado de baja tensión del transformador de distribución. Evitar dichos problemas cuando la instalación de corrección del factor de potencia está ya en servicio puede ser más difícil y costoso que en el momento de la instalación original, puesto que generalmente no es posible volver a utilizar los condensadores existentes, armarios, etc.

3.3 Filtros desintonizados

Como se ha indicado en el apartado 2.5, se pueden evitar los problemas de resonancia de armónicos, tanto desde el punto de vista técnico como económico, conectando una reactancia en serie con cada fase en cada escalón de condensadores del equipo de corrección del factor de potencia.

Este tipo de instalación de corrección del factor de potencia (filtros desintonizados), tiene también la ventaja de reducir las tensiones armónicas presentes en la red, absorbiendo parcialmente las intensidades armónicas de rango superior a la frecuencia de sintonía del conjunto reactancia-condensador.

La elección de la frecuencia de sintonía del conjunto reactancia-condensador dependerá de las amplitudes y frecuencias de las intensidades armónicas que circulan por la red, y eventualmente de la frecuencia de la señal de la instalación de telemando centralizado si este existe en la red (véase el apartado 3.6).

Típicamente, no se pueden añadir reactancias en serie con los condensadores existentes para hacer un filtro desintonizado por que estos condensadores ya instalados no están dimensionados para solicitudes suplementarias de tensión y/o de las intensidades resultantes por esta conexión de la reactancia serie.

Normalmente, no se deberá asociar a un equipo de compensación del factor de potencia que tenga una reactancia serie, con un equipo que no la lleve. Debería tenerse el mismo cuidado cuando un filtro desintonizado es conectado a un equipo sintonizado a diferente frecuencia de sintonía. En ambos casos pueden aparecer ciertos problemas, debidos al reparto desigual de la carga armónica y una eventual sobrecarga de un filtro o parte de él.

3.4 Filtro sintonizado

Para mantener las tensiones armónicas en la red dentro de un nivel aceptable, se pueden utilizar filtros sintonizados tal como se menciona en el apartado 1.4.1. Los filtros actúan como una carga en el generador de armónicos, absorbiendo las corrientes armónicas y reduciendo también los incrementos de la tensión armónica. Cuando se definan los requisitos del filtro sintonizado, es importante considerar el sistema de red completo.

Para diseñar un filtro sintonizado, es necesario conocer los valores de la impedancia armónica de la red, en particular la impedancia del transformador de distribución, así como el espectro de frecuencia de la fuente o de las fuentes de armónicos y las tensiones armónicas presentes en la red de alta tensión.

Un filtro sintonizado comprende una o varias unidades de filtros sintonizados (la conexión serie de una reactancia y de un condensador en cada fase), cada uno estando sintonizado de tal manera que presenten una impedancia relativamente baja a la frecuencia armónica considerada, comparada con la impedancia de la red a esta misma frecuencia. Las corrientes armónicas serán absorbidas así, en gran parte, por este filtro. A la frecuencia de la red el filtro actúa como un condensador, proporcionando una corrección del factor de potencia.

Generalmente, será preciso que las unidades del filtro sean diseñadas para los rangos de armónicos impares, estando excluidos los múltiplos de 3, por ejemplo para los ordenes 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc., en orden creciente. Normalmente, en instalaciones de baja tensión no se necesita que sea considerado el armónico de orden tres puesto que solo aparece entre la fase y neutro, ya que la mayor parte de los equipos de corrección del factor de potencia en instalaciones se conectan entre las fases (sin conexión al neutro). Sin embargo, en el caso de un desequilibrio de la carga, puede ser considerado un filtro del armónico de orden tres.

Normalmente, serán válidas las siguientes consideraciones:

- la potencia reactiva de cada filtro, a la frecuencia de la red, disminuye a medida que aumenta el rango de armónico;
- todas las unidades de un conjunto de filtros sintonizados se ponen simultáneamente bajo tensión. No obstante, si es necesario conectar separadamente cada unidad de filtro, estos deberán conectarse en orden ascendente 5, 7, 11, etc., y desconectarse en orden inverso;
- en general se elige como frecuencia de sintonía asignada de un filtro, una frecuencia ligeramente inferior a la frecuencia del armónico. Así, a esta frecuencia, la impedancia de la unidad de filtro sintonizado es inductiva.

Con el fin de evitar cualquier problema, conviene tomar precauciones cuando los filtros sintonizados deben estar asociados a equipos conectados a los arrollamientos del lado de baja tensión de un mismo transformador de distribución. Las unidades de filtro conectadas en paralelo para un mismo rango de armónico determinado no tendrán exactamente la misma frecuencia de sintonía debido a las tolerancias de sus componentes. Ello puede provocar problemas debidos, por ejemplo, a un reparto desigual de la carga de armónico y/o a resonancias en paralelo entre los filtros sintonizados. En estos casos, podrá ser útil utilizar contactos adicionales que permitan unir los puntos entre las reactancias y los condensadores de cada fase de las unidades del filtro del mismo rango de armónico que estén en servicio.

3.5 Elección de los componentes

Un equipo de compensación de baja tensión que está previsto para un montaje interior consta normalmente de algunos o todos de los componentes siguientes:

- condensadores;
- reactancias (por ejemplo en caso de los filtros);

- contactores y/o interruptores automáticos;
- protección contra cortocircuitos (fusibles o cortacircuitos).

El dimensionado de estos componentes, se basa normalmente en las solicitaciones calculadas basadas en las condiciones de servicio más severas. En el diseño de un equipo de compensación y/o de filtrado, será preciso tener en cuenta las corrientes armónicas generadas por las cargas así como cualquier armónico de corriente o de tensión que provenga de la red.

Deberán verificarse que las tolerancias de fabricación, la influencia de la temperatura y del envejecimiento, el funcionamiento eventual de fusibles internos o externos, la posible no linealidad de los componentes de los filtros así como la variación de la frecuencia de la red, no tengan repercusiones inaceptables en el funcionamiento del conjunto de filtros.

3.5.1 Condensadores. Los condensadores unitarios o las baterías de condensadores representan la parte fundamental del equipo de compensación del factor de potencia y/o de filtrado. Por consiguiente, conviene efectuar un estudio metódico con el fin de llegar a un diseño óptimo del condensador.

La corriente del condensador consiste en una componente fundamental y las componentes de frecuencia de armónicos. Como la amplitud de los componentes de armónicos puede ser muy alta, sobre todo en un filtro sintonizado, será necesario tenerlo en cuenta para definir los valores asignados de los condensadores.

Para los filtros, conviene tener en cuenta el aumento de tensión en el condensador debida a la conexión de la reactancia en serie.

3.5.2 Reactancias. La corriente de la reactancia consiste en una componente fundamental y las componentes a frecuencias de armónicos. Como la amplitud de las componentes de armónicos pueden ser muy alta, sobre todo en un filtro sintonizado, será necesario tenerlas en cuenta al definir valores asignados de las reactancias.

La reactancia será diseñada para soportar la carga térmica debida a los valores máximos de la componente a las corrientes fundamental y armónicas.

La tolerancia de fabricación para la reactancia se tendrá en cuenta en el diseño del filtro. Un valor de la tolerancia de fabricación de $\pm 3\%$ es aceptable para la mayoría de las aplicaciones del filtro.

La reactancia será capaz de resistir las intensidades del cortocircuito que puedan aparecer durante condiciones de defecto así como las intensidades y tensiones de maniobra.

El valor de la reactancia no variará en más del 5% entre su valor para la corriente asignada y el que toma para el valor más alto de carga dado por el valor de cresta de la corriente o de tensión (nivel de inducción debida a la suma aritmética de los valores máximos de las corrientes o tensiones fundamentales y armónicas).

Cuando se usan reactancias con núcleo de hierro (qué es el caso normal en filtros de baja tensión), deberán tomarse precauciones para evitar los problemas de saturación (que pueden producir variaciones importantes en el valor de la reactancia, la ferresonancia que aparece en la puesta en servicio que llevan a una sobrecarga excesiva de los componentes, etc.).

Las pérdidas de las reactancias deberán tenerse en cuenta.

3.5.3 Contactores y/o cortacircuitos. La conmutación en las instalaciones para corrección del factor de potencia, requieren algunas características especiales en cuanto a la conexión. Deberán ser considerados los siguientes aspectos:

- el contactor y el cortacircuito estarán libres de reencendidos y se adaptarán a las maniobras sobre condensadores;
- la tensión asignada del contactor y del cortacircuito deberá ser igual o mayor que la tensión máxima de la red con el equipo de corrección del factor de potencia y/o de filtrado conectado;

- el contactor y el cortacircuito estarán diseñados para la corriente permanente (incluyendo armónicos) capaz de pasar por el equipo de corrección de factor de potencia y/o de filtrado a la tensión máxima de la red, a la frecuencia máxima y en el extremo de las tolerancias de los componentes, sobre todo del condensador y la reactancia;
- el poder de corte asignado del cortacircuito deberá ser igual o superior a la mayor corriente de cortocircuito que pueda aparecer en la instalación donde el equipo de corrección del factor de potencia y/o de filtrado está conectado;
- el contactor y el cortacircuito deberán tener una corriente asignada de corta duración suficiente para soportar a la vez los defectos de cortocircuitos y las corrientes de conexión que se producen en la puesta en servicio.
- el tipo del contactor y de cortacircuito se seleccionará en relación con la frecuencia esperada de maniobras.

3.5.4 Protección contra cortocircuitos (fusibles). La tensión asignada para la protección contra cortocircuitos deberá ser igual o superior que la tensión máxima de la red, estando en servicio el equipo de corrección del factor de potencia y/o de filtrado.

La protección contra cortocircuitos será dimensionada para la corriente permanente (incluyendo armónicos) que pueda pasar a través de la instalación de corrección del factor de potencia y/o de filtrado, a la tensión máxima, a la frecuencia máxima y con las tolerancias extremas de los componentes, en particular del condensador y reactancia.

El poder de corte asignado deberá ser igual o superior a la intensidad de cortocircuito que pueda aparecer en la instalación donde está conectado el equipo de corrección del factor de potencia y/o de filtrado.

La protección contra cortocircuitos tendrá una corriente de corta duración asignada suficiente para soportar a la vez los cortocircuitos y las corrientes de conexión que puedan aparecer en la puesta en servicio.

3.6 Perturbaciones en el telemando centralizado, provocadas por los condensadores instalados en paralelo y los filtros

A continuación se describe la influencia de las instalaciones de corrección del factor de potencia y filtros, en el telemando centralizado para cada modo de utilización de los condensadores instalados en paralelo.

3.6.1 Condensadores instalados en paralelo. Para las señales a frecuencia de audio inyectadas en la red de alta tensión por la instalación de telemando centralizado, la capacidad del equipo de corrección del factor de potencia forma un circuito resonante serie con la reactancia del transformador de distribución. Cuando la frecuencia de resonancia de este circuito sea igual o próxima a la frecuencia de la señal de telemando, pueden aparecer problemas. La tensión de la señal de telemando en la red de baja tensión puede aumentar hasta un nivel inaceptable y, a esta frecuencia, la impedancia de la red de alta tensión puede ser reducida, produciendo una carga suplementaria del generador de la señal de telemando. Cuando la frecuencia de resonancia es muy inferior a la de la señal de telemando la tensión de esta señal puede quedar reducida a un nivel inaceptable.

Un ejemplo de estos fenómenos se muestra en las figuras 7b y 7c concernientes a un circuito compuesto por un transformador y un condensador que corresponde a la figura 7a, para cuatro frecuencias diferentes de señal de telemando. En la proximidad de la frecuencia de resonancia, la impedancia del circuito es muy inferior a la impedancia asignada de la carga, lo que puede llevar a una sobrecarga del generador de señal de telemando. Por otra parte, la tensión de esta señal puede ser aumentada o puede reducirse hasta niveles que puedan perturbar a los relés receptores de telemando.

Explicación de los símbolos usados en figuras 7a, 7b y 7c:

- Z_{RC} impedancia a la frecuencia de telemando del circuito transformador-condensador;
- Z_I impedancia asignada de la carga a frecuencia de la red;
- S potencia del transformador;

ϵ_k	tensión de cortocircuito del transformador en tanto por ciento;
Q	potencia del condensador paralelo;
U_{RC}	tensión de la señal de telemando en la red de baja tensión;
U_{RCO}	tensión de la señal de telemando sin ningún condensador conectado;
f_{RC}	frecuencia de la señal de telemando;
Q_{RC}	factor de calidad del transformador a la frecuencia de la señal de telemando.

3.6.2 Filtro desintonizado. Las reactancias conectadas en serie con los condensadores del equipo de corrección del factor de potencia impiden las perturbaciones que tales señales de telemando centralizado cuando la frecuencia de resonancia del circuito reactancia-condensador sea claramente inferior a la frecuencia de la señal de telemando.

Por ejemplo, la figura 5b muestra que para una señal cuya relación h entre la frecuencia de la señal de telemando y la frecuencia de la red valga aproximadamente 10 (por ejemplo para una frecuencia señal de 492 Hz en una red de 50 Hz) la impedancia a frecuencia de la señal no es muy diferente de la impedancia a la frecuencia fundamental. No hay entonces prácticamente influencia sobre el funcionamiento de la señal de telemando. Para una proporción h comprendida entre aproximadamente 2 y 6, la impedancia es relativamente baja. Por consiguiente, a la frecuencia de la señal, la tensión de la señal sobre la red de baja tensión y la impedancia de red de alta tensión serán reducidas, lo que puede perturbar el funcionamiento del telemando centralizado.

Si la frecuencia de resonancia del circuito reactancia-condensador es superior a la frecuencia de la señal, su impedancia será capacitiva a la frecuencia de la señal. Esto puede llevar a una resonancia con la impedancia inductiva del transformador de distribución y perturbar así al telemando centralizado, de una forma similar a como se describió en el apartado 3.6.1 para condensadores instalados sin reactancia.

3.6.3 Filtro sintonizado. Un filtro sintonizado pueden influir en la señal de telemando centralizado. La impedancia de un filtro sintonizado es capacitiva para todas las frecuencias inferiores a la frecuencia de sintonía e inductiva para todas las frecuencias más altas. En el primer caso la impedancia del transformador de distribución contribuye a reducir la impedancia de la red de alta tensión para la frecuencia de la señal y, en el segundo caso, a reducir la tensión de dicha señal en la red de baja tensión. En ambos casos, el telemando centralizado puede ser perturbado.

Si la frecuencia de la señal de telemando está situada entre las frecuencias de sintonización de dos unidades de filtro, la compensación total o parcial de la impedancia inductiva con respecto a la impedancia capacitiva de los dos filtros puede llevar a una impedancia relativamente alta a la frecuencia de la señal de telemando. Se puede evitar la perturbación de señal, por ejemplo por la elección cuidadosa de las frecuencias de sintonización y / o de los valores de la capacidad y la reactancia de las unidades del filtro unitarios sintonizados.

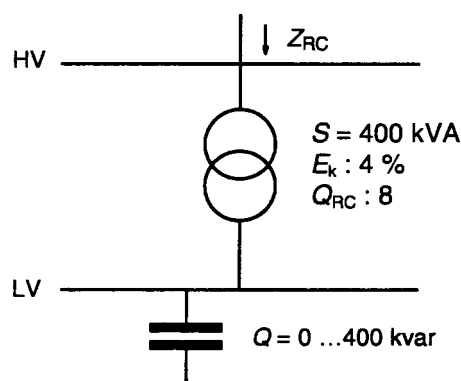


Fig. 7a – Diagrama unifilar de un circuito compuesto por un transformador y un condensador

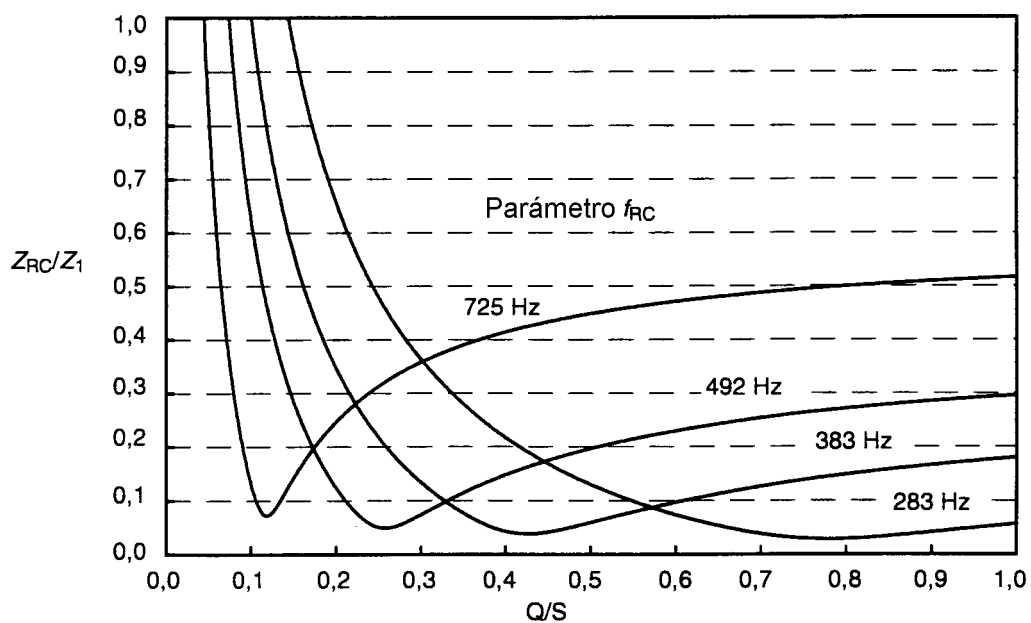


Fig. 7b – Impedancia relativa Z_{RC}/Z_1

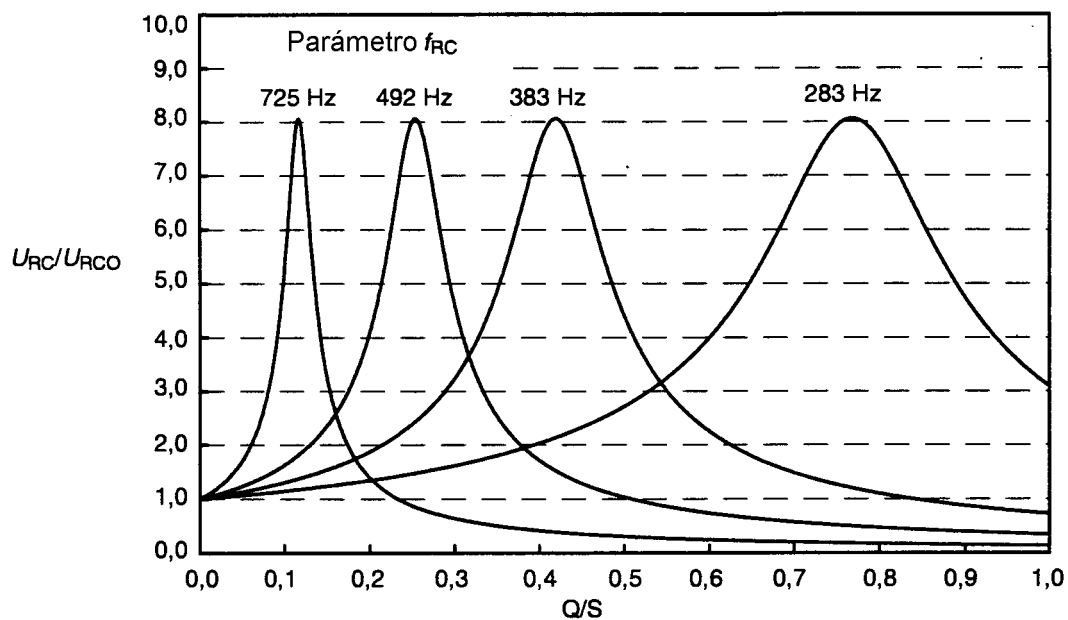


Fig. 7c – Tensión relativa de la señal U_{RC}/U_{RCO}

4 CONDENSADORES A INSTALAR EN PARALELO Y FILTROS PARA REDES CON TENSIÓN SUPERIOR A 1 000 V

4.1 Introducción

Todos los principios descritos en la parte concerniente a la baja tensión se aplican igualmente a las redes de alta tensión. No obstante hay requisitos específicos aplicables solamente a la alta tensión.

4.2 Requisitos específicos

La configuración de la red y, por consiguiente, la potencia de cortocircuito son generalmente variables en redes de alta tensión. Por consiguiente para el diseño del equipo se deberán tener en cuenta todas las configuraciones.

En alta tensión, el equipo de corrección del factor de potencia podrá instalarse en interior o exterior, y en su diseño se tendrán en cuenta los puntos siguientes:

- las condiciones atmosféricas adversas, la contaminación, etc. requerirán líneas de fuga y distancias de aislamiento superiores;
- las condiciones climáticas;
- las sollicitaciones mecánicas, fuerzas sísmicas;
- la radiación solar.

El equipo de compensación de corrección del factor de potencia deberá ser diseñado teniendo en cuenta los armónicos generados por las cargas eléctricas y cualquier armónico que exista en la red.

4.3 Elección del equipo de corrección del factor de potencia

Deberá llevarse a cabo un estudio de la red para determinar el equipo más apropiado que ha de ser instalado. Siempre que sea posible, se deberá medir la existencia de distorsión armónica aunque en la interpretación de los resultados deberá ser considerada con cuidado.

En el análisis de la red deberán tenerse en cuenta los puntos siguientes:

- el estudio de todas las configuraciones de la instalación, incluyendo los funcionamientos excepcionales y de emergencia así como también las posibles ampliaciones futuras. Se prestará atención especial a las máquinas eléctricas (generadores, los compensadores síncronos), capacidad del cable, impedancia de la línea, etc.;
- los armónicos generados (factor de armónicos) en todas las diferentes configuraciones de funcionamiento. Deberán tenerse en cuenta las fuentes de armónicos existentes en el sistema. Serán necesarias las mediciones y/o cálculo de las corrientes armónicas. Los valores obtenidos a partir sólo del cálculo de la tensión armónica no son exactos, puesto que los armónicos son generados por corriente y no por fuentes de tensión. Si un usuario plantea instalar un filtro en un sistema que no está separado de la red de servicio público por la interposición de un transformador o de otra impedancia significativa, tendrá que ser considerado el efecto de todos los otros condensadores paralelo y filtros alimentados por esta la red;
- la existencia de instalaciones de corrección del factor de potencia, filtros sintonizados y no sintonizados;
- la influencia de las instalaciones de corrección del factor de potencia y filtros sobre las señales de telemando centralizado se deben estudiar con el fin de asegurar un funcionamiento correcto del sistema.

4.4 Tipos de filtros

En general se utilizan filtros de primer, segundo, y tercer orden (véanse figuras 8a, 8b, 8c, 8d y 8e). El orden de un filtro puede ser definido por el número de componentes reactivos en el circuito. Consideraciones técnicas y/o económicas pueden conducir a utilizar circuitos de amortiguamiento. En este caso será necesaria una evaluación de las pérdidas. Normalmente, los filtros son sintonizados en los rangos de armónicos 5, 7, 11,13,17, 19, 23 y 25.

Cuando deba ser garantizado un límite de distorsión armónica, se tendrán en cuenta las tolerancias de fabricación del condensador y la reactancia. Cuando se utilizan filtros no es siempre posible mantener, a la vez, la distorsión armónica y el factor de potencia dentro de los límites preestablecidos.

4.5 Elección de los componentes de filtros

Un filtro de alta tensión consiste normalmente en los componentes siguientes:

- cortacircuito;
- condensadores;
- reactancias;
- resistencias;
- equipo de protección.

El dimensionado de estos componentes estará normalmente basado en las solicitaciones calculadas en las peores condiciones de servicio. En el diseño del equipo de compensación o de filtrado habrá que tener en cuenta las corrientes armónicas generadas por las cargas así como cualquier corriente o tensión armónica que exista en la red.

Conviene asegurarse que los factores siguientes no tengan repercusiones inaceptables en el funcionamiento del conjunto del filtro: las tolerancias de fabricación, la influencia de la temperatura y el envejecimiento, el funcionamiento eventual de fusibles internos o externos, la posible no linealidad de los componentes del filtro, así como las variaciones de la frecuencia de la red.

4.5.1 Cortacircuito. El conexionado de filtros requiere algunas características especiales para los dispositivos de conexión. Por consiguiente serán considerados los requisitos siguientes:

- el cortacircuito estará libre de reencendidos;
- la tensión asignada del cortacircuito deberá ser igual o superior a la tensión máxima de la red cuando los filtros estén en servicio;
- el cortacircuito estará dimensionado para soportar la corriente permanente que pueda pasar por el filtro a la tensión máxima, a la frecuencia máxima y con la tolerancia máxima de la capacidad;
- el poder de corte deberá ser igual o superior a la corriente de cortocircuito que pueda aparecer en el cortacircuito;
- el cortacircuito tendrá una corriente asignada de corta duración suficiente para resistir a la vez los defectos de cortocircuito y a las corrientes de conexión que se producen en la puesta en servicio.
- el tipo del cortacircuito se seleccionará en relación con la frecuencia esperada de maniobras.

4.5.2 Condensadores. La batería de condensadores es la parte fundamental del filtro. Por consiguiente conviene efectuar un estudio completo para llegar al diseño óptimo del condensador.

La corriente del filtro consiste en una componente a la frecuencia fundamental y las componentes con frecuencias armónicas. Como la amplitud de las componentes armónicas puede ser muy alta, será necesario tenerlas en cuenta al definir los valores asignados de los condensadores.

Las definiciones y criterios de diseño siguientes son los específicos para los condensadores para filtros:

- la tensión y corriente asignadas de los condensadores y las tolerancias: véase la norma particular de condensadores;
- conviene que en las características asignadas de un condensador unitario se tenga en cuenta el fallo uno de sus elementos o el funcionamiento de un fusible y que estén coordinadas con las protecciones del filtro. Si durante el funcionamiento, la variación de capacidad excede del margen aceptable para el filtro, debe ser desconectado de la red.

4.5.3 Reactancias. Al seleccionar las reactancias de los filtros, habrá que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- carga térmica debida a los valores máximos de las corrientes fundamental y las armónicas;
- la tolerancia de fabricación de la reactancia: para la mayor parte de las aplicaciones un valor del $\pm 3\%$ es aceptable. En ciertos casos puede ser necesario que tenga diversas tomas para el ajuste;
- la corriente de cortocircuito que se pueda producir durante las condiciones de fallo;
- la linealidad dentro del rango de corriente y frecuencia;
- las pérdidas por corrientes de Foucault en las partes metálicas próximas, por ejemplo en el chasis del equipo, en las tomas de tierra y en las estructuras en acero de los edificios.

4.5.4 Resistencias. Al seleccionar las resistencias del filtro, serán considerados los aspectos siguientes:

- la corriente eficaz total que atraviesa la resistencia;
- la reactancia de la resistencia;
- la tolerancia de fabricación y el coeficiente de temperatura de la resistencia.

4.5.5 Protección por relés. En general el dispositivo de protección comprende normalmente:

- protección contra la sobrecarga debida a los armónicos;
- protección contra sobre corrientes;
- protección contra pérdidas a tierra;
- protección contra tensiones bajas;
- protección contra el desequilibrio de la batería de condensadores.

4.6 Perturbaciones de los telemandos centralizados provocadas por condensadores instalados en paralelo y los filtros

La influencia de los equipos para corrección del factor de potencia y las instalaciones de filtros sobre las señales de telemando, deberá ser estudiada con el fin de asegurar un funcionamiento correcto del conjunto.

Las frecuencias de sintonía de los equipos de corrección del factor de potencia no deberán ser iguales que las de la señal de telemando, sino que estarán suficientemente alejadas de ellas. La impedancia inductiva de la línea entre el punto de inyección de la señal de factor de potencia puede reducir o aumentar la tensión de la señal de telemando centralizado y la del equipo de compensación del telemando centralizado. Se reducirá si la impedancia del equipo de corrección del factor de potencia es inductiva a la frecuencia de la señal de telemando y aumentará si es capacitiva. Deberá asegurarse que la influencia en la señal de telemando quede dentro de los límites aceptables, referidos en los requisitos generales del apartado 3.6.

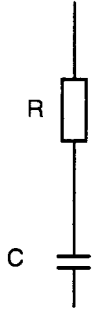


Fig. 8a – Filtro de 1^{er} orden

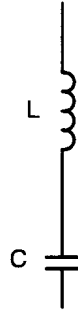


Fig. 8b – Filtro de 2^o orden -
filtro pasa banda

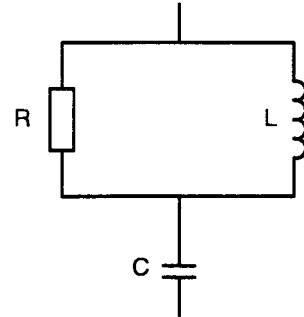


Fig. 8c – Filtro de 2^o orden - filtro
amortiguado con elemento resistivo

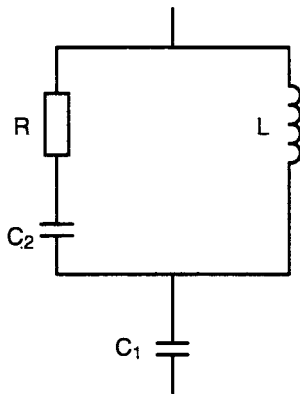


Fig. 8d – Filtro de 3^{er} orden -
filtro amortiguado

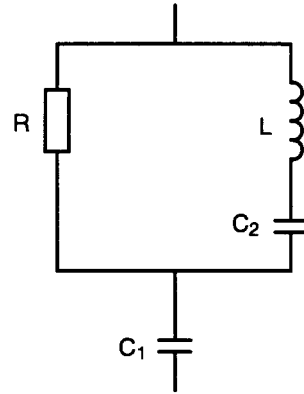


Fig. 8e – Filtro de 3^{er} orden -
filtro del tipo C

Fig. 8 – Tipos de filtros para las instalaciones de alta tensión

ANEXO A (Informativo)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CEI 60110:1973 – *Condensadores para instalaciones de generación de calor por inducción a frecuencias comprendidas entre 40 Hz y 24 000 Hz.*
NOTA – Armonizada como HD 207 S1:1997 (no modificada).
- [2] CEI 60143:1992 – *Condensadores serie destinados a ser instalados en redes.*
NOTA – Armonizada en la serie EN 60143.
- [3] CEI 60358:1990 – *Condensadores de acoplamiento y divisores capacitivos.*
NOTA – Armonizada como HD 597 S1:1992 (no modificada).
- [4] CEI 61071 – *Condensadores para electrónica de potencia.*
- [5] CEI 60252:1993 – *Condensadores para motores de corriente alterna.*
NOTA – Armonizada como EN 60252:1994 (modificada).
- [6] CEI 61048:1991 – *Condensadores para la utilización en los circuitos de lamparas fluorescentes tubulares y otras lámparas de descarga. Prescripciones generales y de seguridad.*
NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1992, como EN 61048:1993 (modificada).
- [7] CEI 61049:1991 – *Condensadores para la utilización en los circuitos de lamparas fluorescentes tubulares y otras lámparas de descarga. Prescripciones de funcionamiento.*
NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1992, como EN 61049:1993 (modificada).
- [8] *Armónicos, parámetros, características, métodos de estudio, estimaciones de los valores existentes en la red. CIGRE, WG 36-05, Electra n° 77.*
- CEI 60050(421):1990 – *Vocabulario Electrotecnico Internacional (VEI). Capítulo 421: Transformadores y reactancias de potencia.*
- CEI 60050(436):1990 – *Vocabulario Electrotecnico Internacional (VEI). Capítulo 436: Condensadores de potencia.*
- CEI 60056:1987 – *Interruptores automáticos de corriente alterna para alta tensión.*
NOTA – Armonizada, junto con sus modificaciones A1: 1992 Y A2:1995, como HD 348 S6:1995.
- CEI 60146 – *Convertidores a semiconductores.*
- CEI 60242:1967 – *Frecuencias normales para las instalaciones de telemando centralizados.*
- CEI 60255-6:1988 – *Relés Eléctricos. Parte 6: Relés de medida y equipos de protección.*
NOTA – Armonizada como EN 60255-6:1994 (modificada).

CEI 60265-1:1983 – *Interruptores de alta tensión. Parte 1: Interruptores de alta tensión para tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores a 52 kV.*

NOTA – Armonizada, junto con sus modificaciones A1: 1984 Y A2:1994, como HD 335.1 S3:1995 (no modificada).

CEI 60265-2:1988 – *Interruptores de alta tensión. Parte 2: Interruptores de alta tensión para tensiones asignadas iguales o superiores a 52 kV.*

NOTA – Armonizada, junto con su corrigendum de 1990, como EN 60265-2:1993 (no modificada).

CEI 60269 – *Fusibles de baja tensión. Reglas generales.*

NOTA – Armonizada en la serie EN 60269 y en la serie HD 630.

CEI 60282 – *Fusibles de alta tensión.*

NOTA – Armonizada como EN 60282-1:1996 (no modificada), y como HD 636 S1:1996 (no modificada).

CEI 60289:1988 – *Reactancias de potencia.*

NOTA – Armonizada como EN 60289:1994 (modificada).

CEI 60291:1969 – *Definiciones relativas a los fusibles.*

CEI 60549:1976 – *Cortacircuitos fusibles de alta tensión destinados a la protección externa de condensadores de potencia en derivación.*

CEI 60831-1:1996 – *Condensadores de potencia autorregenerables a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal inferior o igual a 1 000 V. Parte 1: Generalidades. Características de funcionamiento, ensayo y valores nominales. Prescripciones de seguridad. Guía de instalación y de explotación.*

NOTA – Armonizada como EN 60831-1:1996 (no modificada).

CEI 60871-1:1987 – *Condensadores a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal superior a 1 000 V. Parte 1: Generalidades, características de funcionamiento, ensayos, y valores nominales. Reglas para la seguridad. Guía de la instalación y explotación.*

NOTA – Armonizada como HD 525.1 S1:1989 (no modificada).

CEI 60871-2:1987 – *Condensadores a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal superior a 660 V. Parte 2: Ensayos de durabilidad.*

NOTA – Armonizada como HD 525.2 S1:1989 (no modificada).

CEI 60931-1:1996 – *Condensadores de potencia no autorregenerables a instalar en paralelo en redes de corriente alterna de tensión nominal inferior o igual a 1 kV. Parte 1: Generalidades. Características de funcionamiento, ensayo y valores nominales. Prescripciones de seguridad. Guía de instalación y de explotación.*

NOTA – Armonizada como EN 60931-1:1996 (no modificada).

CEI 61000-2-2:1990 – *Compatibilidad Electromagnética (CEM). Parte 2: Entorno. Sección 2: Niveles de compatibilidad de las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público.*

NOTA – Armonizada como ENV 61000-2-2:1993 (modificada).

ANEXO ZA (normativo)

**OTRAS NORMAS INTERNACIONALES CITADAS EN ESTA NORMA
CON LAS REFERENCIAS DE LAS NORMAS EUROPEAS CORRESPONDIENTES**

Esta norma europea incorpora disposiciones de otras normas por su referencia, con o sin fecha. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados del texto de la norma y se relacionan a continuación. Las revisiones o modificaciones posteriores de cualquiera de las normas referenciadas con fecha, sólo se aplican a esta norma europea cuando se incorporan mediante revisión o modificación. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de esta norma (incluyendo sus modificaciones).

NOTA – Cuando una norma internacional haya sido modificada por modificaciones comunes CENELEC, indicado por (mod), se aplica la EN/HD correspondiente.

Normas Internacionales	Fecha	Título	EN/HD	Fecha	Norma UNE correspondiente¹⁾
CEI 60050(131)	1978	Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 131: Circuitos eléctricos y magnéticos.	–	–	UNE 21302-131:1981
CEI 60050(161)	1990	Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). Capítulo 161: Compatibilidad electromagnética.	–	–	UNE-EN 21302-161:1992

1) Esta columna se ha introducido en el anexo original de la norma europea únicamente con carácter informativo a nivel nacional.

AENOR Asociación Española de
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32

AENOR AUTORIZA EL USO DE ESTE DOCUMENTO A UNIVERSIDAD DE VIGO