

Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 8

Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas

Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas

Índice

Introducción	2	8 Los armónicos en las instalaciones eléctricas	
1 Generalidades sobre la corrección del factor de potencia	3	8.1 Armónicos	20
2 Ventajas técnicas de la corrección del factor de potencia	4	8.2 Prescripciones de las normativas	21
2.1 Uso optimizado de las máquinas eléctricas	5	8.3 El efecto de los armónicos	21
2.2 Uso optimizado de las líneas eléctricas	5	8.3.1 Sobrecargas	21
2.3 Reducción de las pérdidas	6	8.3.2 Resonancia	22
2.4 Reducción de la caída de tensión	6	8.4 Filtros para armónicos	23
3 Ventajas económicas de la corrección del factor de potencia	7	9 Maniobra y protección de las baterías de condensadores	
4 Medios de producción de la potencia reactiva		9.1 Fenómenos eléctricos ligados a la inserción	25
4.1 Alternadores sincrónicos	8	9.2 Maniobra y protección	26
4.2 Compensadores sincrónicos	8	9.2.1 Elección del dispositivo de protección	26
4.3 Compensadores estáticos	8	9.2.2 Elección del dispositivo de maniobra (contactor)	26
4.4 Baterías de condensadores estáticos	9	9.2.3 Elección del condensador	27
5 Tipos de corrección		9.2.4 Descarga de los condensadores	28
5.1 Corrección distribuida	10	10 Oferta de ABB	
5.2 Corrección por grupos	11	10.1 Interruptores	30
5.3 Corrección centralizada	11	10.1.1 Interruptores en caja moldeada	30
5.4 Corrección mixta	11	10.1.2 Interruptores abiertos	32
5.5 Corrección automática	11	10.2 Contactores	33
6 Determinación del factor de potencia	12	10.2.1 Contactores UA...RA	33
7 Determinación de la potencia reactiva necesaria	13	10.2.2 Contactores UA	34
7.1 Corrección de motores trifásicos	14	10.2.3 Contactores A y AF	34
7.2 Corrección de transformadores trifásicos	17	10.3 Compensadores automáticos	35
		10.4 Filtros PQF	37
		Anexo A:	
		Tablas de selección de interruptores y contactores	42
		Anexo B:	
		Potencia reactiva con variación de tensión	45
		Anexo C:	
		Filtrado y corrección del factor de potencia en régimen deformado	46
		Anexo D:	
		Tensiones y corrientes de inserción y descarga de los condensadores	51
		Anexo E:	
		Corrección del factor de potencia en una instalación fotovoltaica	53
		Anexo F:	
		Armónicos en los sistemas trifásicos con neutro	54
		Glosario	56

Introducción

En una instalación eléctrica, los elementos que la componen pueden actuar como consumidores, que utilizan la potencia eléctrica (activa) de la red como fuente de energía de alimentación (ordenadores, impresoras, aparatos de diagnóstico, etc.), o como convertidor en otra forma de energía (p. ej., lámparas o estufas eléctricas) o en trabajo útil (p. ej., motores eléctricos). Para que esto ocurra, generalmente es necesario que el elemento de la instalación intercambie con la red (con un consumo neto nulo) energía reactiva principalmente de tipo inductivo. Esta energía, incluso si no se convierte inmediatamente en otras formas, contribuye a incrementar la potencia total que transita la red eléctrica, desde los generadores, a lo largo de todas las líneas eléctricas, hasta los elementos que la utilizan. Para atenuar este efecto negativo es necesaria la corrección del factor de potencia en las instalaciones eléctricas.

La corrección, mediante el uso de baterías de condensadores para generar in situ la energía reactiva necesaria para la transferencia de potencia eléctrica útil, permite una gestión técnico-económica mejor y más racional de las instalaciones.

Además, la actual difusión de equipos de corriente continua, como circuitos electrónicos y convertidores para accionamientos eléctricos, conlleva la generación de armónicos de corriente que se vierten en la red, con la consiguiente contaminación y distorsión de las formas de onda de otras cargas asociadas. Por ello, el uso de filtros para armónicos, ya sean pasivos o activos, contribuye a mejorar la calidad de potencia total de la red, efectuando también la corrección a la frecuencia de red si dichos filtros se encuentran debidamente dimensionados.

El presente cuaderno de aplicaciones técnicas no pretende analizar estas cuestiones tratando en profundidad los detalles técnicos sino que, partiendo de la definición de compensación, del análisis de las ventajas técnico-económicas

y describiendo las formas y los métodos de compensación, busca servir de guía para la adecuada elección de los dispositivos para el mando de las baterías de condensadores y dispositivos de filtrado de armónicos. Tras una primera parte descriptiva, se describe la oferta de ABB en términos de dispositivos para la corrección del factor de potencia, no sólo entendidos como condensadores apropiados, sino también como aquellos dispositivos capaces de efectuar la inserción y la protección de dichas baterías de condensadores. Además, se ofrecen soluciones para el filtrado, ya sea de manera pasiva o activa, de los armónicos de corriente causados por cargas distorsionantes no lineales.

Asimismo, a modo de compendio del cuaderno de aplicaciones técnicas, se incluyen seis anexos con:

- tablas para la selección y coordinación entre interruptores y contactores para la maniobra y la protección de baterías de condensadores de una determinada potencia;
- indicaciones sobre cómo varía la potencia reactiva producida al variar la tensión de alimentación y sobre cómo impedir que la potencia reactiva llegue a la red;
- consideraciones sobre la corrección del factor de potencia y el filtrado en régimen deformado, para poner en evidencia cómo la corrección por sí misma induce a una reducción del valor de los armónicos presentes en la red;
- descripciones del comportamiento de la tensión y la corriente durante la inserción y la descarga de las baterías de condensadores;
- consideraciones sobre la corrección en una instalación fotovoltaica;
- observaciones sobre la contribución de los armónicos en la evaluación de la corriente en el conductor de neutro en los sistemas trifásicos.

1 Generalidades sobre la corrección del factor de potencia

En los circuitos de corriente alterna, la corriente absorbida por una carga puede estar representada por dos componentes:

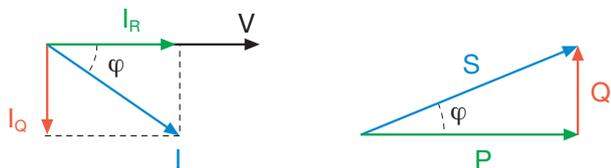
- La *componente activa* I_R , en fase con la tensión de alimentación, que está directamente relacionada con el trabajo útil desarrollado (y, por tanto, con la parte proporcional de energía transformada en energía de otro tipo: mecánica, lumínica, térmica...);
- La *componente reactiva* I_Q , perpendicular respecto a la tensión, que sirve para producir el flujo necesario para la conversión de las potencias a través del campo eléctrico o magnético y es un índice del intercambio energético entre la alimentación y el elemento de la instalación eléctrica. Sin esta componente no podría haber transferencia neta de potencia, por ejemplo, por intervención del acoplamiento magnético en el núcleo de un transformador o en el entrehierro de un motor.

Por lo general, en presencia de cargas de tipo óhmico-inductivo, la corriente total I se muestra desfasada y retardada respecto a la componente activa I_R .

Por lo tanto, en una instalación eléctrica es necesario generar y transportar, además de la *potencia activa útil* P , una cierta *potencia reactiva* Q , indispensable para la conversión de la energía eléctrica que no es utilizada por el elemento sino intercambiada con la red. El complejo de la potencia generada y transportada constituye la *potencia aparente* S .

El *factor de potencia* $\cos\varphi$ se define como la relación entre la componente activa I_R y el valor total de la corriente I , siendo φ el ángulo de fase entre la tensión y la corriente. Con una tensión V dada de fase resulta:

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{P}{S}$$



En la tabla 1.1 se muestran los factores de potencia típicos de algunos aparatos eléctricos.

Tabla 1.1

Carga	$\cos\varphi$ factor de potencia
Transformadores en vacío	0.1÷0.15
Motores	0.7÷0.85
Dispositivos para el tratamiento del metal:	
- soldadoras de arco	0.35÷0.6
- soldadoras de arco compensadas	0.7÷0.8
- soldadoras de resistencia	0.4÷0.6
- hornos de arco	0.75÷0.9
Lámparas fluorescentes:	
- compensadas	0.9
- no compensadas	0.4÷0.6
Convertidores de CA - CC	0.6÷0.95
Accionamientos de CC	0.4÷0.75
Accionamientos de CA	0.95÷0.97
Cargas resistivas	1

'Corregir' significa actuar para incrementar el factor de potencia en una sección específica de la instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria para reducir, a igual potencia útil requerida, el valor de la corriente y, por tanto, de la potencia que transita la red aguas arriba. De esta forma, las líneas, los generadores y los transformadores pueden ser dimensionados para un valor de potencia aparente inferior, tal y como se verá en el capítulo siguiente.

Desde el punto de vista estrictamente técnico, una instalación correctamente dimensionada puede funcionar con normalidad incluso en presencia de un bajo factor de potencia; por este motivo, no existen normas que indiquen el valor exacto del factor de potencia que debe tener una instalación eléctrica.

No obstante, efectuar la corrección representa una solución que permite obtener ventajas técnicas y económicas; de hecho, gestionar una instalación con un bajo $\cos\varphi$ implica un incremento de los costes para el distribuidor de energía eléctrica, que, consecuentemente, aplica un sistema de tarifas que sanciona el uso de la energía con bajos factores de potencia.

Las disposiciones legales existentes en los distintos países permiten que las compañías eléctricas nacionales puedan crear un sistema de tarifas más o menos detallado, estructurado de forma que la energía reactiva consumida que sobrepase la correspondiente a un $\cos\varphi$ igual a 0.9 ha de pagarse según determinados importes que dependen de la tensión del suministro (baja, media o alta) y del factor de potencia.

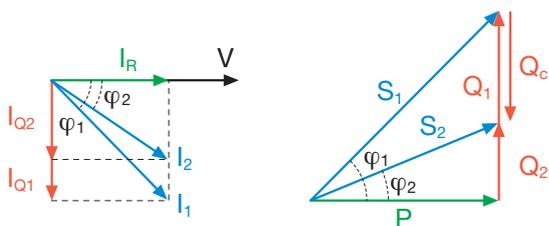
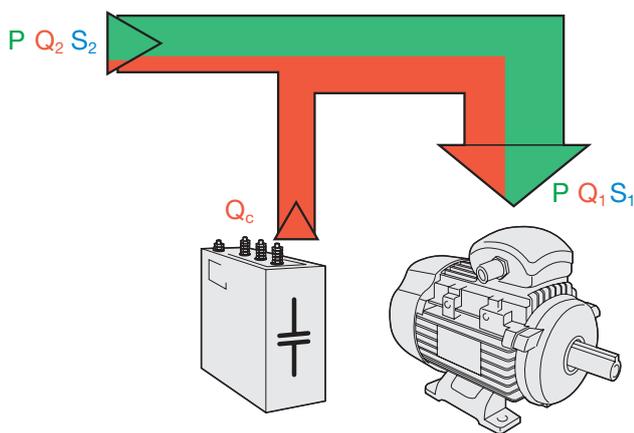
A partir del sistema de tarifas aplicado, el usuario puede determinar los importes que conlleva ese incremento y, por tanto, puede evaluar, frente al coste de una instalación de corrección, el ahorro en relación con el coste de las sanciones.

2 Ventajas técnicas de la corrección del factor de potencia

Tal y como se explicaba anteriormente, al aplicar la corrección en una instalación, proporcionando localmente la potencia reactiva necesaria, se reduce el valor de la corriente, (a igual potencia útil requerida), y, por tanto, la potencia global consumida aguas arriba; esto conlleva numerosas ventajas, entre ellas, un uso optimizado de las máquinas (generadores y transformadores) y de las líneas eléctricas (transmisión y distribución).

En el caso de formas de onda sinusoidales, la potencia reactiva necesaria para pasar de un factor de potencia $\cos\varphi_1$ a un factor de potencia $\cos\varphi_2$ es expresada por la relación (válida tanto para sistemas trifásicos como monofásicos):

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad [2.1]$$



donde:

- P es la potencia activa;
- Q_1, φ_1 son la potencia reactiva y el ángulo de desfase antes de la corrección;
- Q_2, φ_2 son la potencia reactiva y el ángulo de desfase tras la corrección;
- Q_c es la potencia reactiva de corrección.

Ejemplo

Supongamos que queremos incrementar el factor de potencia de una instalación trifásica ($U_n = 400 \text{ V}$) que consume de media 300 kW, de 0.8 a 0.93.

La corriente absorbida será:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 540 \text{ A}$$

Aplicando la fórmula anteriormente descrita se obtiene la potencia reactiva que debe producirse localmente Q_c :

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 300 \cdot (0.75 - 0.39) = 108 \text{ kvar}$$

Por efecto de la corrección, la corriente absorbida pasa de 540 A a:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.93} = 465 \text{ A}$$

(reducción del 15% aprox.)

Con todo ello, las ventajas principales de la corrección pueden resumirse de la siguiente manera:

- uso optimizado de las máquinas eléctricas;
- uso optimizado de las líneas eléctricas;
- reducción de las pérdidas;
- reducción de la caída de tensión.

2.1 Uso optimizado de las máquinas eléctricas

Los generadores y los transformadores son dimensionados a partir de la potencia aparente S. Ésta, a igual potencia activa P, es más pequeña cuanto menor es la potencia reactiva Q suministrada. Por lo tanto, compensando la instalación, las máquinas pueden ser dimensionadas en relación con una potencia aparente inferior, aun proporcionando la misma potencia activa.

A modo de ejemplo, la tabla 2.1 muestra la variación de la potencia transmitida para transformadores trifásicos MT/BT en función del $\cos\varphi$ del consumidor.

Tabla 2.1

Potencia del transformador [kVA]	Potencia activa transmitida [kW]					
	$\cos\varphi$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1000	500	600	700	800	900	1000
1250	625	750	875	1000	1125	1250

Según esta tabla, si se requiere alimentar una serie de cargas con una potencia total de 170 kW con $\cos\varphi=0.7$, hace falta un transformador de 250 kVA. Si las cargas absorbieran la misma potencia con $\cos\varphi=0.9$, en vez de 0.7, bastaría con utilizar un transformador de 200 kVA.

Con los generadores ocurre lo mismo.

2.2 Uso optimizado de las líneas eléctricas

La corrección del factor de potencia permite obtener ventajas también con respecto al dimensionamiento de los cables. Como se señalaba anteriormente, aumentándolo se reduce la corriente, a igual potencia útil.

Esta reducción de la corriente puede permitir la elección de conductores de sección inferior.

Para explicar esto mediante un ejemplo práctico, consideremos una carga que requiera una potencia P_n igual a 170 kW con $\cos\varphi$ igual a 0.7, con tensión U_n de 400 V; la corriente absorbida $I_{0.7}$ será:

$$I_{0.7} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.7} = 350,5 \text{ A}$$

Si se elige un tipo de cable unipolar de cobre aislado de EPR y tendido horizontalmente en bandeja perforada, en condiciones normales, es necesario utilizar una sección de 120 mm² (véase tabla 2.2).

Efectuando localmente una corrección para obtener un valor del $\cos\varphi$ igual a 0.9, la corriente necesitada será:

$$I_{0.9} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.9} = 272,6 \text{ A}$$

Con este valor de corriente, el cable puede tener una sección de 70 mm².

Tabla 2.2: Capacidad I_0 de los cables unipolares de cobre en bandeja perforada

S [mm ²]	Cu	
	XLPE/EPR	PVC
	I_0 [A]	
25	141	114
35	176	143
50	216	174
70	279	225
95	342	275
120	400	321
150	464	372
185	533	427
240	634	507
300	736	587
400	868	689
500	998	789
630	1151	905

2.3 Reducción de las pérdidas

Las pérdidas de potencia en un conductor eléctrico dependen de la resistencia del conductor y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa; dado que a igual potencia activa transmitida más alto es el $\cos\varphi$ y más baja es la corriente, al crecer el factor de potencia disminuyen las pérdidas en el conductor ubicado aguas arriba respecto al punto en el que se lleva a cabo la corrección.

En un sistema trifásico, las pérdidas se expresan de la siguiente manera:

$$p = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad [2.2]$$

dado que:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \rightarrow 3 \cdot I^2 = \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad [2.3]$$

donde:

- I es la corriente que atraviesa el conductor;
- R es la resistencia del conductor;
- S es la potencia aparente requerida por la carga;
- P es la potencia activa requerida por la carga;
- Q es la potencia reactiva requerida por la carga;
- U_n es la tensión nominal de alimentación.

La reducción de las pérdidas Δp , una vez efectuada la compensación, viene dada por¹:

$$\Delta p = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right] \quad [2.4]$$

donde:

- p_1 son las pérdidas antes de la corrección
- $\cos\varphi_1$ es el factor de potencia antes de la corrección
- $\cos\varphi_2$ es el factor de potencia tras la corrección

De esta fórmula se extrae que incrementando, por ejemplo, el factor de potencia de 0.7 a 0.9 se obtiene un ahorro en las pérdidas de cerca del 39,5%. La tabla 2.3 establece el ahorro en las pérdidas incrementando el factor de potencia de un valor inicial $\cos\varphi_1$ a un valor final 0.9 y 0.95.

Tabla 2.3

	$\cos\varphi_1$						
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
$\Delta p\%$ de $\cos\varphi_1$ a 0.9	80.2	69.1	55.6	39.5	20.9	-	-
$\Delta p\%$ de $\cos\varphi_1$ a 0.95	82.3	72.3	60.1	45.7	29.1	10.2	-

Corrigiendo el factor de potencia se obtiene una reducción de las pérdidas de potencia en todas las partes de la instalación ubicadas aguas arriba respecto al punto en el que se efectúa la corrección.

¹

$$p_1 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} = \frac{R}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_1)^2} \quad p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_2)^2}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_1)^2} - \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_2)^2} = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right]$$

2.4 Reducción de la caída de tensión

La caída de tensión concatenada en una línea trifásica puede expresarse del siguiente modo:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \operatorname{sen}\varphi) = \frac{P}{U_n} \cdot (R + X \operatorname{tg}\varphi) \quad [2.5]$$

donde:

- R y X son respectivamente la resistencia y la reactancia de la línea;
- P es la potencia activa transmitida;
- I es la corriente;
- U_n es la tensión nominal.

A igual potencia activa transmitida, la caída de tensión será menor cuanto mayor sea el factor de potencia².

Tal y como puede observarse en las siguientes figuras, en las que aparecen diagramas de la caída de la tensión de fase ΔV , la variación de dicha tensión es menor (a igual componente activa de corriente de carga y, por tanto, de la potencia activa) cuanto menor es el ángulo φ de desfase entre tensión y corriente; además, esta variación es mínima si no hay algún consumo de potencia reactiva (corriente de fase)³.

Figura 2.1: Diagrama de los vectores sin corrección para la visualización de la caída de tensión de línea

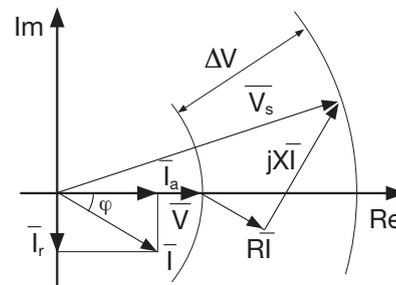
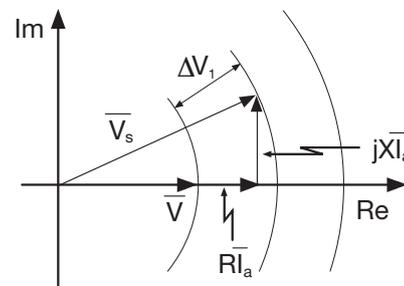


Figura 2.2: Diagrama de los vectores con corrección total para la visualización de la caída de tensión en la línea cuando la carga es puramente óhmica



² En las líneas de transmisión de muy alta tensión, diseñadas para que la potencia transportada por ellas sea igual a la potencia característica, la variación de tensión es ya de por sí muy limitada (ninguna si se adopta una línea sin pérdidas) y, además, el consumo de potencia reactiva inductiva debido al paso de corriente en la inductancia en serie es compensado de manera exacta por la producción de potencia reactiva capacitiva que tiene lugar en las capacidades derivadas.

³ Por definición y como puede observarse en los gráficos, la caída de tensión es la diferencia entre los módulos de la tensión de salida y de llegada. En el cálculo de la ΔV con la fórmula [2.5] no se indica ningún término adicional aproximado a 1/200 del valor de tensión que, por lo tanto, puede ser ignorado.

3 Ventajas económicas de la corrección del factor de potencia

Los distribuidores de energía eléctrica aplican un sistema de tarifas que sanciona el consumo de energía con un factor de potencia medio mensual inferior a 0.9.

Los contratos aplicados son diferentes dependiendo del país y también pueden variar en función del tipo de cliente: debido a ello, el texto siguiente debe considerarse a mero título didáctico e indicativo, con la intención de mostrar el ahorro económico que se obtiene con la corrección.

En líneas generales, las cláusulas contractuales de suministro de energía señalan el pago de la energía reactiva recogida si el factor de potencia está comprendido entre 0.7 y 0.9, mientras que no se debe pagar nada si es superior a 0.9. Para $\cos\varphi < 0.7$, los distribuidores de energía pueden obligar al usuario a realizar la corrección.

Tener un factor de potencia medio mensual superior o igual a 0.9 significa requerir a la red una energía reactiva inferior o igual al 50% de la energía activa:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \leq 0.5 \rightarrow \cos\varphi \geq 0.89 \quad [3.1]$$

Es decir, no se aplican sanciones si las exigencias de energía reactiva no superan el 50% de la activa.

El coste anual que el usuario soporta, consumiendo una energía reactiva que exceda de la correspondiente a un factor de potencia igual a 0.9, puede expresarse de la siguiente forma:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_p) \cdot c \quad [3.2]$$

donde:

- C_{EQ} es el coste de la energía reactiva en un año en €;
- E_Q es la energía reactiva consumida en un año en kvarh;
- E_p es la energía activa consumida en un año en kWh;
- $E_Q - 0.5 \cdot E_p$ es la cuota de energía reactiva sujeta al coste;
- c es el coste unitario de la energía reactiva en €/kvarh.

Si se compensa a 0.9, para no pagar el consumo de energía reactiva, el coste de la batería de condensadores y de su instalación es:

$$C_{Qc} = Q_c \cdot c_c \quad [3.3]$$

donde:

- C_{Qc} es el coste anual en € para tener un factor de potencia igual a 0.9;
- Q_c es la potencia de la batería de condensadores necesaria para que el $\cos\varphi$ sea de 0.9, en kvar;
- c_c es el coste de instalación anual de la batería de condensadores en €/kvar;

El ahorro para el usuario será:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = (E_Q - 0.5 \cdot E_p) \cdot c - Q_c \cdot c_c \quad [3.4]$$

Es preciso señalar que la batería de condensadores representa un "coste de instalación" oportunamente repartido en los años de vida de la instalación mediante uno o más coeficientes económicos; en la práctica, el ahorro que se obtiene realizando la corrección permite recuperar el coste de instalación de la batería de condensadores en los primeros años.

En realidad, en un análisis preciso de inversión entrarán en juego determinados parámetros económicos que se excluyen de los objetivos de este cuaderno técnico.

Ejemplo

Una sociedad consume energía activa y reactiva según la tabla 3.1:

Tabla 3.1

Mes	energía activa [kWh]	energía reactiva [kvarh]	fdp medio mensual
Ene	7221	6119	0.76
Feb	8664	5802	0.83
Mar	5306	3858	0.81
Abr	8312	6375	0.79
May	5000	3948	0.78
Jun	9896	8966	0.74
Jul	10800	10001	0.73
Ago	9170	8910	0.72
Sep	5339	4558	0.76
Oct	7560	6119	0.78
Nov	9700	8870	0.74
Dic	6778	5879	0.76
Total	93746	79405	-

Suponiendo un coste unitario de la energía reactiva de 0,0421 €/kvarh, el coste total anual será:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_p) \cdot c = (79405 - 0.5 \cdot 93746) \cdot 0.0421 = 1370 \text{ €}$$

La tabla 3.2 muestra la potencia reactiva necesaria para elevar el factor de potencia a 0.9.

Tabla 3.2

Mes	energía activa [kWh]	fdp medio mensual	horas funcionamiento	potencia activa P [kW]	$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - 0.484^1)$
Ene	7221	0.76	160	45.1	16.4
Feb	8664	0.83	160	54.2	10.0
Mar	5306	0.81	160	33.2	8.1
Abr	8312	0.79	160	52.0	14.7
May	5000	0.78	160	31.3	9.5
Jun	9896	0.74	160	61.9	26.1
Jul	10800	0.73	160	67.5	29.8
Ago	9170	0.72	160	57.3	27.9
Sep	5339	0.76	160	33.4	12.3
Oct	7560	0.78	160	47.3	15.4
Nov	9700	0.74	160	60.6	26.1
Dic	6778	0.76	160	42.4	16.2

¹ 0.484 es la tangente correspondiente al $\cos\varphi$ igual a 0.9

Si se elige una batería automática de corrección de potencia $Q_c = 30$ kvar con un coste de instalación c_c de 25 €/kvar, se obtiene un coste total de 750 €. El ahorro para el usuario, sin tener en cuenta la amortización y las cargas financieras, será:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = 1370 - 750 = 620 \text{ €}$$

4 Medios de producción de la potencia reactiva

Los principales medios para la producción de potencia reactiva son:

- alternadores sincrónicos;
- compensadores sincrónicos;
- compensadores estáticos;
- baterías de condensadores estáticos.

4.1 Alternadores sincrónicos

Los alternadores sincrónicos son las principales máquinas eléctricas utilizadas para la generación de energía eléctrica. Proporcionan potencia eléctrica al usuario final a través de los sistemas de transmisión y de distribución. Por otro lado, dejando de lado los detalles técnicos, se puede actuar sobre la excitación del alternador para variar el valor de la tensión generada y, con ello, regular las aportaciones de potencia reactiva en la red, con objeto de mejorar los perfiles de tensión del sistema y reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas.

4.2 Compensadores sincrónicos

Se trata de motores sincrónicos que funcionan en vacío, puestos en sincronismo con la red, cuya única función es absorber la potencia reactiva excedente (*funcionamiento en subexcitación*) o bien proporcionar la potencia que falta (*funcionamiento en sobreexcitación*).

Figura 4.1: Compensador sincrónico en sobreexcitación

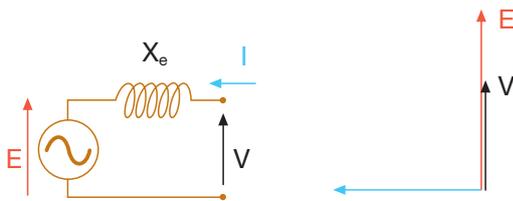
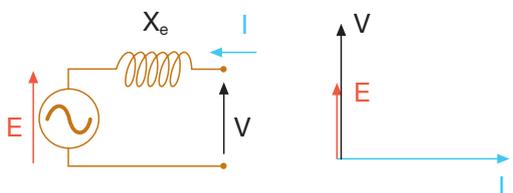


Figura 4.2: Compensador sincrónico en subexcitación



E : f.e.m. inducida en las fases de estátor
 V : tensión de fase impuesta por la red a los bornes del alternador
 I : corriente del estátor
 X_e : reactancia del estátor

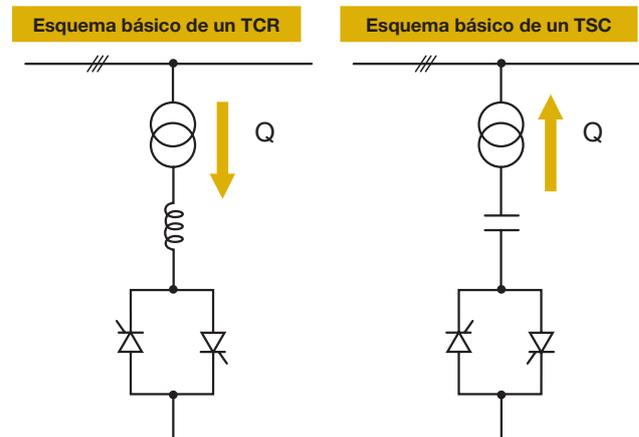
Principalmente, estos dispositivos son utilizados en determinados nodos de la red de transmisión y subtransmisión para la regulación de la tensión y de los flujos de potencia reactiva.

En las redes de distribución no resulta económicamente conveniente el uso de compensadores sincrónicos debido a sus altos costes de instalación y mantenimiento.

4.3 Compensadores estáticos

El notable desarrollo de la electrónica de potencia está favoreciendo la sustitución de los compensadores sincrónicos por sistemas estáticos para el control de la potencia reactiva como, por ejemplo, los TSC ("*thyristor switched capacitors*") y los TCR ("*thyristor controlled reactors*"), una versión electrónica de los sistemas de compensación de energía reactiva basados en componentes electromecánicos en los que, sin embargo, la inserción de los distintos condensadores no viene dada por la apertura y el cierre de contactores, sino por medio del control ofrecido por parejas de tiristores en antiparalelo.

Figura 4.3



Los TSC permiten un control escalonado de la potencia reactiva suministrada por grupos de condensadores, mientras que con los TCR se puede controlar con continuidad la potencia reactiva absorbida por las inductancias.

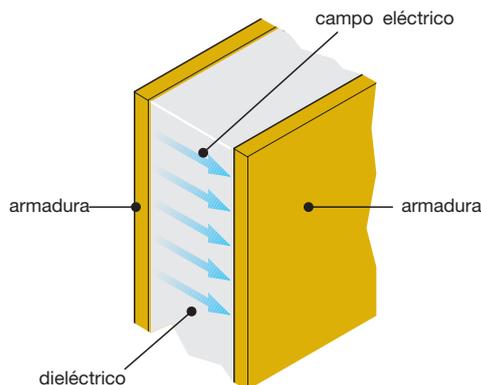
Con la instalación de un TSC y un TCR es posible llevar a cabo una regulación modulada con continuidad de la potencia reactiva producida/absorbida.

Desde el punto de vista aplicativo, estos dispositivos se emplean sobre todo en redes de alta y muy alta tensión.

4.4 Baterías de condensadores estáticos

El condensador es un bipolo pasivo constituido por dos superficies conductoras, llamadas armaduras, entre las cuales se interpone un material dieléctrico.

Figura 4.4



Este sistema queda impregnado con una sustancia que impide la penetración de humedad o la formación de burbujas que podrían dar lugar a descargas eléctricas.

Los condensadores de última generación son de tipo en seco, los cuales son sometidos a un tratamiento específico que mejora sus propiedades eléctricas.

Los condensadores en seco no presentan riesgos de contaminación por la eventual pérdida de la sustancia impregnante.

En función de la geometría de las armaduras metálicas, pueden ser:

- condensadores planos;
- condensadores cilíndricos;
- condensadores esféricos.

Las principales magnitudes que caracterizan a un condensador son:

- la *capacidad nominal* C_n : el valor de la capacidad obtenido de los valores nominales de la potencia, de la tensión y de la frecuencia del condensador;
- la *potencia nominal* Q_n : la potencia reactiva para la que el condensador ha sido diseñado;
- la *tensión nominal* U_n : el valor eficaz de la tensión alterna para la que el condensador ha sido diseñado;
- la *frecuencia nominal* f_n : la frecuencia para la cual el condensador ha sido diseñado.

Aplicando una tensión alterna entre las armaduras, el condensador está sometido a ciclos de carga y descarga durante los cuales acumula energía reactiva (carga del condensador) para luego inyectarla al circuito al que va conectado (descarga del condensador).

Esta energía se expresa con la relación:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

donde:

- C es la capacidad del condensador;
- U es la tensión aplicada en los extremos del condensador.

Debido a su capacidad de acumular y suministrar energía, el condensador se utiliza como elemento de base para la realización de las baterías de corrección del factor de potencia (en todos los niveles de tensión) y de los dispositivos estáticos de regulación de la potencia reactiva¹.

En concreto, los condensadores de corrección utilizados en baja tensión están constituidos por elementos monofásicos realizados con películas de polipropileno metalizado y pueden ser de tipo autorregenerables. En los condensadores de este tipo, la parte dieléctrica dañada por una descarga es capaz de regenerarse; en tales situaciones, la parte de la película de polipropileno afectada por la descarga se volatiliza por el efecto térmico causado por la misma descarga, restableciendo de este modo la parte dañada.

¹ En la práctica, los condensadores absorben potencia activa, si bien es mínima, a causa de la conductividad no nula del dieléctrico interpuesto y a las pérdidas por histéresis dieléctrica.

Figura 4.5



5 Tipos de corrección

En los capítulos anteriores se ha visto cuáles son las ventajas técnicas y económicas de la compensación.

Queda por explicar dónde se deben instalar los condensadores para sacar el máximo rendimiento de dichas ventajas.

Si bien no existen reglas específicas para los diferentes tipos de instalaciones y, en teoría, los condensadores pueden instalarse en cualquier punto, es preciso evaluar su ejecución práctica y económica.

A partir de las modalidades de ubicación de los condensadores, los principales métodos de corrección son:

- corrección del factor de potencia distribuida;
- corrección del factor de potencia por grupos;
- corrección del factor de potencia centralizada;
- corrección del factor de potencia mixta;
- corrección del factor de potencia automática.

5.1 Corrección distribuida

La corrección distribuida se realiza conectando una batería de condensadores debidamente dimensionada directamente a los terminales del dispositivo que necesita la potencia reactiva.

La instalación es sencilla y poco costosa: el condensador y la carga pueden beneficiarse de las mismas

protecciones contra sobrecorrientes y se insertan o desconectan a la vez.

Este tipo de corrección es aconsejable para grandes aparatos con carga y factor de potencia constantes y tiempos de conexión prolongados; por lo general, es utilizado para motores y lámparas fluorescentes.

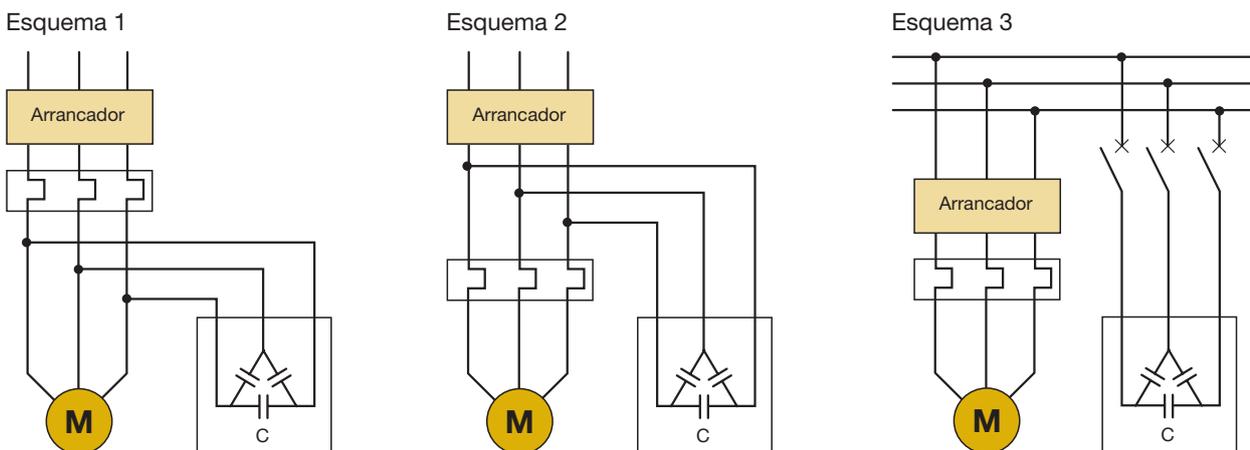
La figura 5.1 presenta los esquemas usuales de conexión para la corrección del factor de potencia de motores.

En caso de conexión directa (esquemas 1 y 2) se corre el riesgo de que, tras el corte de la alimentación, el motor, al continuar rotando (energía cinética residual) y autoexcitándose con la energía reactiva suministrada por la batería de condensadores, se transforme en un generador asíncrono. Si esto ocurre, la tensión se mantiene en el lado de carga del dispositivo de maniobra y control, con riesgo de peligrosas sobretensiones (hasta el doble de la tensión nominal).

Por medio del esquema 3, la batería de compensación se conecta al motor sólo cuando éste está en marcha y se desconecta del mismo antes de que se produzca el corte de la alimentación del motor.

Con este tipo de corrección, toda la red aguas arriba de la carga trabaja con un factor de potencia elevado; por el contrario, esta solución resulta costosa económicamente.

Figura 5.1

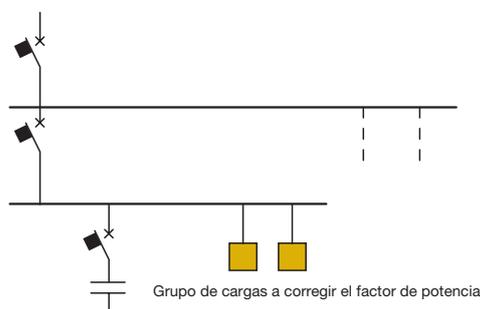


5.2 Corrección por grupos

Consiste en corregir localmente grupos de cargas con características de funcionamiento similares mediante la instalación de una batería de condensadores.

Este método se encuentra a medio camino entre la solución económica y el correcto servicio de la instalación, ya que los beneficios de la corrección afectan sólo a las líneas aguas arriba respecto al punto en el que se encuentra instalada la batería de condensadores.

Figura 5.2



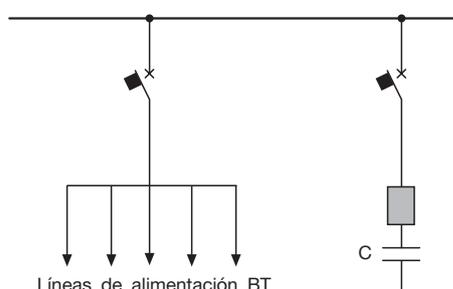
5.3 Corrección centralizada

El comportamiento diario de las cargas tiene una importancia fundamental para la elección del tipo de corrección más conveniente.

En instalaciones con muchas cargas, en las que todos sus elementos funcionan de forma simultánea y/o algunos están conectados sólo unas pocas horas al día, es evidente que la solución de la corrección distribuida resulta demasiado costosa, quedando durante largos periodos inutilizados muchos de los condensadores instalados.

Por tanto, el uso de un único sistema de corrección en el punto inicial de la instalación permite reducir notablemente la suma de potencias de los condensadores instalados.

Figura 5.3



En la corrección centralizada se emplean normalmente complejos automatismos (véase más adelante corrección automática), con baterías fraccionadas en más escalones, instalados directamente en los cuadros principales de distribución; el uso de una batería conectada permanentemente sólo es posible si la absorción de energía reactiva es lo suficientemente regular durante todo el día.

La solución centralizada permite optimizar los costes de la batería de condensadores, pero presenta la desventaja de que las líneas de distribución de la instalación aguas abajo del dispositivo de corrección deben estar dimensionadas teniendo en cuenta la totalidad de la potencia reactiva absorbida por las cargas.

5.4 Corrección mixta

Esta solución deriva de un compromiso entre las soluciones de corrección distribuida y centralizada, combinando las ventajas de ambos. De esta forma, se utiliza la corrección distribuida para los aparatos eléctricos de mayor potencia, y la centralizada para la parte restante.

La corrección mixta se emplea generalmente cuando en una instalación sólo se utilizan con frecuencia los equipos más pesados, de manera que éstos son compensados individualmente mientras que los demás aparatos son compensados de forma centralizada.

5.5 Corrección automática

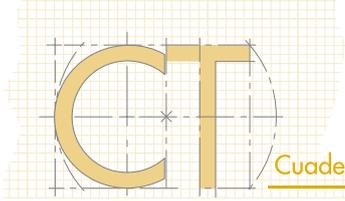
En la mayor parte de las instalaciones no tiene lugar una absorción constante de potencia reactiva, por ejemplo, a causa de ciclos de trabajo en los que se utilizan máquinas con diferentes propiedades eléctricas.

En dichas instalaciones se emplean sistemas de corrección automáticos que, por medio de un sistema de detección de tipo varimétrico y de un regulador del factor de potencia, permiten la inserción o la desconexión automática de las diferentes baterías de condensadores, siguiendo de esta forma las variaciones de la potencia reactiva absorbida y manteniendo constante el factor de potencia de la instalación.

Un sistema de corrección automática está compuesto por:

- sensores que detectan las señales de corriente y tensión;
- una unidad inteligente que compara el factor de potencia medido con el deseado y ejecuta la inserción o la desconexión de las baterías de condensadores en función de la potencia reactiva necesaria (regulador del factor de potencia);
- un cuadro eléctrico de potencia, que incluye los dispositivos de protección y maniobra;
- baterías de condensadores.

Con objeto de proporcionar una potencia lo más cercana posible a la requerida, la inserción de los condensadores tiene lugar de forma escalonada; la precisión de control será mayor cuanto más escalones haya y cuanto más pequeña sea la diferencia entre ellos.



6 Determinación del factor de potencia

Para dimensionar la batería de condensadores a instalar para corregir la instalación, hay que determinar de manera precisa el factor de potencia a partir de los consumos o del ciclo de carga de la instalación; así se evita la inyección de excesiva energía reactiva, condición que normalmente no está permitida por las compañías eléctricas.

Si se desea efectuar una corrección distribuida o por grupos, es necesario determinar el $\cos\varphi$ de la carga o del grupo de cargas (reparto); esto puede llevarse a cabo de los siguientes modos:

- directamente, mediante medida directa por medio de un cosfímometro;
- indirectamente, a través de la lectura de los contadores de energía activa y reactiva.

El *cosfímometro* es un instrumento de medida que permite visualizar el factor de potencia $\cos\varphi$ con el que la carga está absorbiendo energía. La lectura de dicho instrumento se efectuará en diferentes momentos del ciclo de carga para así poder extraer un factor de potencia medio.

Si se dispone de las lecturas de energía activa y reactiva absorbidas en un ciclo de trabajo por la carga o por el conjunto de las cargas que constituyen el reparto, el factor de potencia medio puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\cos\varphi = \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{E_{Qf} - E_{Qi}}{E_{Pf} - E_{Pi}} \right) \right)$$

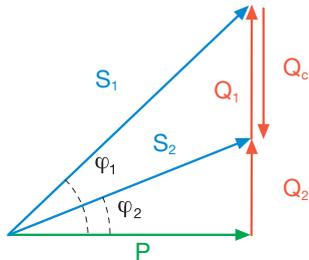
donde:

- E_{Pi} y E_{Qi} son los valores de la energía activa y reactiva leídos al comienzo del ciclo de trabajo;
- E_{Pf} y E_{Qf} son los valores de la energía activa y reactiva leídos al término del ciclo de trabajo.

Si se pretende efectuar una compensación centralizada, el factor de potencia medio mensual puede extraerse siguiendo el procedimiento descrito anteriormente o directamente de los recibos de la compañía eléctrica.

7 Determinación de la potencia reactiva necesaria

Una vez conocido el factor de potencia de la instalación ($\cos\varphi_1$) y el que se quiere obtener ($\cos\varphi_2$), es posible determinar la potencia reactiva necesaria de la batería de condensadores para alcanzar la corrección.



Siendo:

- P la potencia activa instalada
 - φ_1 el ángulo de desfase antes de la corrección
 - φ_2 el ángulo de desfase que se quiere obtener con la corrección
- la potencia de la batería de condensadores Q_c es igual a:

$$Q_c = (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \cdot P = K \cdot P \quad [7.1]$$

La tabla 7.1 permite calcular, dado el $\cos\varphi$ inicial, la potencia de la batería de condensadores en kvar por kW instalado necesaria para obtener un determinado factor de potencia. En un sistema trifásico, la batería de condensadores dimensionada, constituida por tres condensadores de igual capacidad, puede conectarse en triángulo o en estrella. A la hora de elegir la modalidad de conexión, hay que tener presente que en la conexión en triángulo cada capacidad está sujeta a la tensión de línea de alimentación, pero, a igual potencia reactiva generada, tiene un valor de un tercio del que tendría en la conexión en estrella:

$$Q_{cY} = Q_{cA} \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_A \quad [7.2]$$

En baja tensión, donde los problemas de aislamiento son menos relevantes, suele preferirse emplear la conexión en triángulo de la batería de condensadores, ya que permite un dimensionamiento inferior de las capacidades de cada fase.

$$Q_{cY} = 3 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)^2 = \omega \cdot C_Y \cdot U_n^2 = Q_{cA} = 3 \cdot \omega \cdot C_A \cdot U_n^2 \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_A$$

Tabla 7.1

Factor K (kvar/kW)

cosφ inicial	cosφ final												
	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

Ejemplo

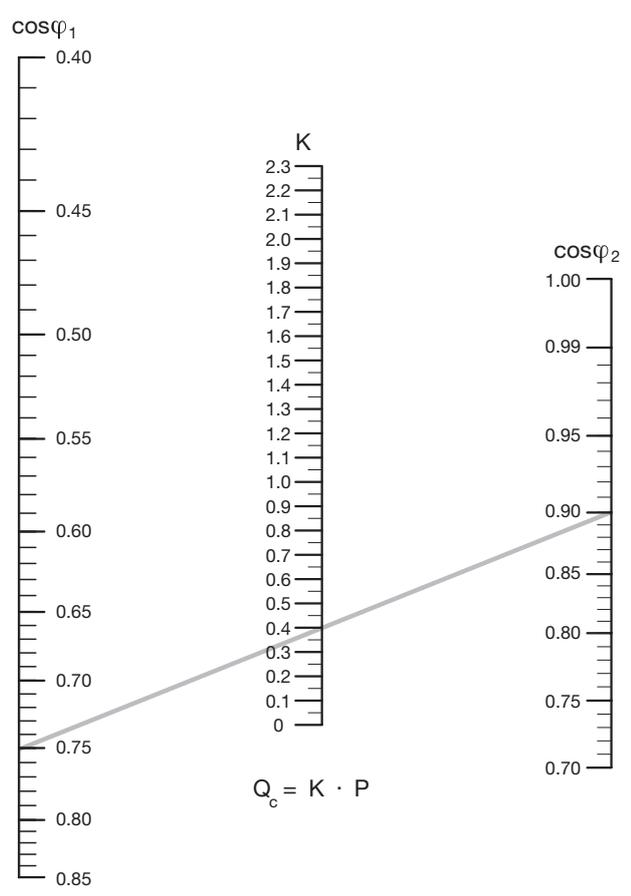
En una instalación con potencia activa de 300 kW a 400 V y con $\cos\varphi$ de 0.75, se quiere aumentar el factor de potencia a 0.90. De la tabla 7.1, al tomar la intersección del valor 0.75 de la columna "cosφ inicial" con el valor 0.9 de la columna "cosφ final", se obtiene un coeficiente K de 0.398.

Por tanto, se necesita una batería de condensadores de potencia Q_c igual a:

$$Q_c = K \cdot P = 0.398 \cdot 300 = 119.4 \text{ kvar}$$

El factor K también puede determinarse por medio del nomograma que aparece a continuación².

Figura 7.1: Nomograma para la determinación de la potencia de compensación



² Tal y como puede verse en la figura, se traza un segmento de línea recta del valor del $\cos\varphi$ inicial al final. De la intersección de la línea con la escala graduada central se obtiene el factor K que, multiplicado por la potencia activa P de la carga, determina la potencia reactiva necesaria Q_c .

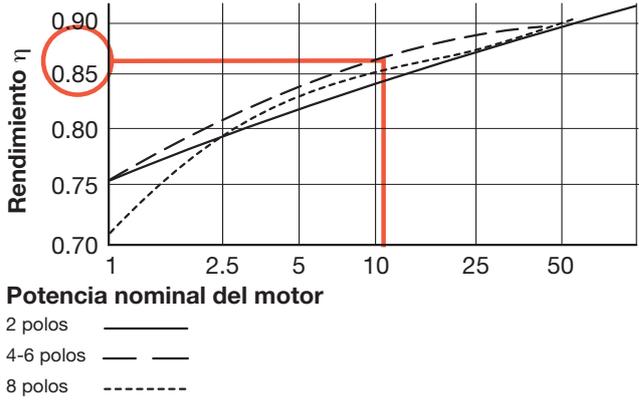
7.1 Corrección de motores trifásicos

La corrección de los motores asíncronos no puede ser dimensionada con gran precisión debido a que el factor de potencia se ve fuertemente influenciado por las condiciones de carga. De hecho, suponiendo el caso de un motor de 11 kW de 6 polos, de la tabla y del diagrama siguientes se deduce que el factor de potencia en condiciones nominales es de $\cos\varphi_n = 0.77$, mientras que el rendimiento nominal resulta $\eta_n \approx 0.86$.

Tabla 7.2

Potencia nominal		Número de polos			
kW	CV	2	4	6	8
1.1	1.5	0.85	0.79	0.75	0.75
1.5	2	0.85	0.79	0.75	0.75
2.2	3	0.85	0.79	0.75	0.75
3	4	0.86	0.80	0.75	0.75
4	5.5	0.86	0.82	0.76	0.76
5.5	7.5	0.87	0.85	0.76	0.76
7.5	10	0.88	0.85	0.76	0.76
11	15	0.88	0.85	0.77	0.80
1.5	20	0.88	0.85	0.80	0.80
18.5	25	0.88	0.85	0.82	0.81
22	30	0.88	0.85	0.83	0.82
30	40	0.88	0.86	0.84	0.83
45	60	0.89	0.87	0.86	0.84
55	75	0.89	0.88	0.87	0.85
75	100	0.89	0.88	0.88	0.86
90	125	0.89	0.88	0.88	0.86

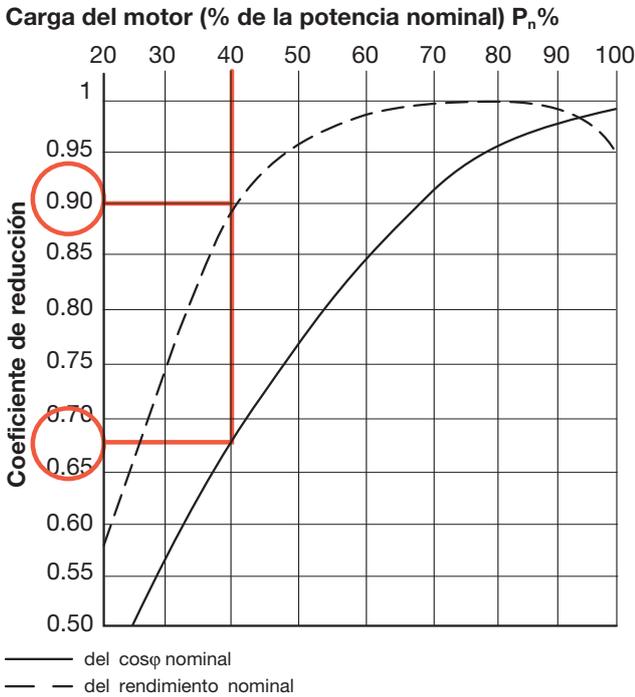
Rendimiento en función de la potencia



Si dicho motor funciona al 40% de la potencia nominal, del diagrama de coeficientes de reducción siguiente se deduce que:

$$\cos\varphi = \cos\varphi_n \cdot 0.67 = 0.52$$

$$\eta = \eta_n \cdot 0.9 = 0.77$$



Por tanto, la potencia activa P_a absorbida por la red es:

$$P_a = \frac{P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot 11}{0.77} = 5.68 \text{ kW}$$

mientras que la potencia reactiva Q_c necesaria para corregir a $\cos\varphi = 0.9$, con valor $K = 1.15$ resultante del nomograma anterior, es igual a:

$$Q_c = K \cdot P = 1.15 \cdot 5.68 = 6.53 \text{ kvar}$$

Como norma general, para desvincular la corrección del factor de potencia de las condiciones de utilización del motor, se debe utilizar para un motor de potencia P_n , una potencia reactiva de compensación Q_c no superior al 90% de la potencia reactiva absorbida por el motor en vacío Q_0 con una tensión nominal U_n , evitando así poseer un factor de potencia de forma anticipada. Además, se reduce la sobretensión por desconexión del motor de la red; de hecho, el motor, al seguir en rotación, puede funcionar como un generador autexcitado dando origen a tensiones considerablemente superiores a las de la red [IEC EN 60831-1]. Considerando que en vacío la corriente absorbida I_0 [A] es puramente reactiva ($\text{sen}\varphi = 1$), la potencia reactiva de corrección será:

$$Q_c = 0.9 \cdot Q_0 = 0.9 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0}{1000} \text{ [kvar]}$$

La corriente I_0 generalmente aparece en la documentación del fabricante del motor.

La tabla 7.3 indica los valores de la potencia reactiva para compensar algunos tipos de motores ABB, en función de la potencia y del número de polos.

Tabla 7.3: Potencia reactiva para corrección del factor de potencia de motores ABB

P_n [kW]	Q_c [kvar]	Antes de la corrección		Después de la corrección	
		$\cos\varphi_1$	I_n [A]	$\cos\varphi_2$	I_2 [A]
400 V / 50 Hz / 2 polos / 3000 rpm					
7.5	2.5	0.89	13.9	0.98	12.7
11	2.5	0.88	20	0.95	18.6
15	5	0.9	26.5	0.98	24.2
18.5	5	0.91	32	0.98	29.7
22	5	0.89	38.5	0.96	35.8
30	10	0.88	53	0.97	47.9
37	10	0.89	64	0.97	58.8
45	12.5	0.88	79	0.96	72.2
55	15	0.89	95	0.97	87.3
75	15	0.88	131	0.94	122.2
90	15	0.9	152	0.95	143.9
110	20	0.86	194	0.92	181.0
132	30	0.88	228	0.95	210.9
160	30	0.89	269	0.95	252.2
200	30	0.9	334	0.95	317.5
250	40	0.92	410	0.96	391.0
315	50	0.92	510	0.96	486.3

P_n [kW]	Q_c [kvar]	Antes de la corrección		Después de la corrección	
		$\cos\varphi_1$	I_n [A]	$\cos\varphi_2$	I_2 [A]
400 V / 50 Hz / 4 polos / 1500 rpm					
7.5	2.5	0.86	14.2	0.96	12.7
11	5	0.81	21.5	0.96	18.2
15	5	0.84	28.5	0.95	25.3
18.5	7.5	0.84	35	0.96	30.5
22	10	0.83	41	0.97	35.1
30	15	0.83	56	0.98	47.5
37	15	0.84	68	0.97	59.1
45	20	0.83	83	0.97	71.1
55	20	0.86	98	0.97	86.9
75	20	0.86	135	0.95	122.8
90	20	0.87	158	0.94	145.9
110	30	0.87	192	0.96	174.8
132	40	0.87	232	0.96	209.6
160	40	0.86	282	0.94	257.4
200	50	0.86	351	0.94	320.2
250	50	0.87	430	0.94	399.4
315	60	0.87	545	0.93	507.9
400 V / 50 Hz / 6 polos / 1000 rpm					
7.5	5	0.79	15.4	0.98	12.4
11	5	0.78	23	0.93	19.3
15	7.5	0.78	31	0.94	25.7
18.5	7.5	0.81	36	0.94	30.9
22	10	0.81	43	0.96	36.5
30	10	0.83	56	0.94	49.4
37	12.5	0.83	69	0.94	60.8
45	15	0.84	82	0.95	72.6
55	20	0.84	101	0.96	88.7
75	25	0.82	141	0.93	123.9
90	30	0.84	163	0.95	144.2
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	45	0.83	240	0.95	210.8
160	50	0.85	280	0.95	249.6
200	60	0.85	355	0.95	318.0
250	70	0.84	450	0.94	404.2
315	75	0.84	565	0.92	514.4
400 V / 50 Hz / 8 polos / 750 rpm					
7.5	5	0.7	18.1	0.91	13.9
11	7.5	0.76	23.5	0.97	18.4
15	7.5	0.82	29	0.97	24.5
18.5	7.5	0.79	37	0.93	31.5
22	10	0.77	45	0.92	37.5
30	12.5	0.79	59	0.93	50.0
37	15	0.78	74	0.92	62.8
45	20	0.78	90	0.93	75.4
55	20	0.81	104	0.93	90.2
75	30	0.82	140	0.95	120.6
90	30	0.82	167	0.93	146.6
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	50	0.8	250	0.93	214.6

Ejemplo

Para un motor asíncrono trifásico de 110 kW (400 V - 50 Hz - 4 polos), la potencia de corrección según la tabla es de 30 kvar.

7.2 Corrección de transformadores trifásicos

El transformador es una máquina eléctrica de fundamental importancia que, en muchas instalaciones, permanece constantemente en servicio.

Concretamente, en las instalaciones eléctricas constituidas por diferentes subestaciones de transformación y de alimentación de energía eléctrica, es aconsejable efectuar la corrección teniendo en cuenta la potencia reactiva del transformador, con objeto de mantener un factor de potencia medio de 0.9 para media tensión.

En general, la potencia de corrección Q_c en un transformador de potencia nominal S_r [kVA] no deberá ser superior a la potencia reactiva absorbida en condiciones de carga de referencia mínimas.

Extrayendo de los datos de la placa de características de la máquina el valor porcentual de la corriente en vacío $i_0\%$, el valor de la tensión de cortocircuito porcentual $u_k\%$, las pérdidas en el hierro P_{fe} y en el cobre P_{cu} [kW], la potencia de corrección requerida es:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} \approx \dots$$

$$\dots \rightarrow \left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right) \text{ [kvar]}$$

donde K_L es el factor de carga, definido como relación entre carga mínima de referencia y potencia nominal del transformador.

Ejemplo

Supongamos que se quiere compensar un transformador de aceite de 630 kVA que alimenta una carga igual al 60% de su potencia nominal.

Datos extraídos de la placa de características del transformador:

$$i_0\% = 1.8\%$$

$$u_k\% = 4\%$$

$$P_{cu} = 8.9 \text{ kW}$$

$$P_{fe} = 1.2 \text{ kW}$$

La potencia de corrección de la batería de condensadores conectada al transformador deberá ser:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} = \dots$$

$$\dots \rightarrow \sqrt{\left(\frac{1.8\%}{100} \cdot 630\right)^2 - 1.2^2} + 0.6^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{4\%}{100} \cdot 630\right)^2 - 8.9^2} = 19.8 \text{ kvar}$$

mientras que utilizando la fórmula simplificada resulta:

$$Q_c = \left(\frac{i_0\%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k\%}{100} \cdot S_r\right) = \left(\frac{1.8\%}{100} \cdot 630\right) + \dots$$

$$\dots \rightarrow 0.6^2 \cdot \left(\frac{4\%}{100} \cdot 630\right) = 20.4 \text{ kvar}$$

La tabla 7.4 indica la potencia reactiva de la batería de condensadores Q_c [kvar] que se deberá conectar al secundario de un transformador ABB en función del nivel

de carga previsto. Como puede observarse, la potencia reactiva de corrección varía en función del coeficiente de carga del transformador.

Tabla 7.4: potencia reactiva de corrección para transformadores ABB

Transformador					Q_c [kvar]				
S_r [kVA]	u_k % [%]	i_0 % [%]	P_{fe} [kW]	P_{cu} [kW]	factor de carga K_L				
					0	0.25	0.5	0.75	1
Transformador de distribución de aceite MT-BT									
50	4	2.9	0.25	1.35	1.4	1.5	1.8	2.3	2.9
100	4	2.5	0.35	2.30	2.5	2.7	3.3	4.3	5.7
160	4	2.3	0.48	3.20	3.6	4	5	6.8	9.2
200	4	2.2	0.55	3.80	4.4	4.8	6.1	8.3	11
250	4	2.1	0.61	4.50	5.2	5.8	7.4	10	14
315	4	2	0.72	5.40	6.3	7	9.1	13	18
400	4	1.9	0.85	6.50	7.6	8.5	11	16	22
500	4	1.9	1.00	7.40	9.4	11	14	20	28
630	4	1.8	1.20	8.90	11	13	17	25	35
800	6	1.7	1.45	10.60	14	16	25	40	60
1000	6	1.6	1.75	13.00	16	20	31	49	74
1250	6	1.6	2.10	16.00	20	24	38	61	93
1600	6	1.5	2.80	18.00	24	30	47	77	118
2000	6	1.2	3.20	21.50	24	31	53	90	142
2500	6	1.1	3.70	24.00	27	37	64	111	175
3150	7	1.1	4.00	33.00	34	48	89	157	252
4000	7	1.4	4.80	38.00	56	73	125	212	333
Transformador de distribución de resina MT-BT									
100	6	2.3	0.50	1.70	2.2	2.6	3.7	5.5	8
160	6	2	0.65	2.40	3.1	3.7	5.5	8.4	12
200	6	1.9	0.85	2.90	3.7	4.4	6.6	10	15
250	6	1.8	0.95	3.30	4.4	5.3	8.1	13	19
315	6	1.7	1.05	4.20	5.3	6.4	9.9	16	24
400	6	1.5	1.20	4.80	5.9	7.3	12	19	29
500	6	1.4	1.45	5.80	6.8	8.7	14	23	36
630	6	1.3	1.60	7.00	8	10	17	29	45
800	6	1.1	1.94	8.20	8.6	12	20	35	56
1000	6	1	2.25	9.80	9.7	13	25	43	69
1250	6	0.9	3.30	13.00	11	15	29	52	85
1600	6	0.9	4.00	14.50	14	20	38	67	109
2000	6	0.8	4.60	15.50	15	23	45	82	134
2500	6	0.7	5.20	17.50	17	26	54	101	166
3150	8	0.6	6.00	19.00	18	34	81	159	269

Ejemplo

Para un transformador de aceite ABB de 630 kVA con un factor de carga 0.5, la potencia de corrección necesaria es de 17 kvar. El regulador del $\cos\varphi$ en baja tensión debe calibrarse teniendo en cuenta esta potencia, además de la potencia reactiva requerida por la carga.

Por consiguiente, para tener un factor de potencia de 0.9 también en media tensión, el regulador deberá estar calibrado con un valor superior a 0.9. Suponiendo que el transformador funcione con un factor de carga del 50%, la potencia aparente suministrada será:

$$S = 0.5 \cdot S_r = 0.5 \cdot 630 = 315 \text{ kVA}$$

Si, hipotéticamente, la carga trabaja con un factor de potencia igual a 0.8, la potencia activa P absorbida resulta:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 315 \cdot 0.8 = 252 \text{ kW}$$

Si se quiere compensar dicha carga a 0.9, la potencia reactiva necesaria es:

$$Q_r = P \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.9))) = \dots \leftarrow$$

$$\dots \rightarrow 252 \cdot (0.75 - 0.48) = 68 \text{ kvar}$$

Si se tiene en cuenta también la potencia reactiva que necesita el transformador, la potencia total que debe suministrar el grupo de corrección es:

$$Q_c = Q_r + Q_t = 68 + 17 = 85 \text{ kvar}$$

Por tanto, el regulador del factor de potencia deberá ser calibrado a:

$$\cos\varphi' = \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \frac{Q_c}{P}\right)\right) = \dots \leftarrow$$

$$\dots \rightarrow \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(36.87^\circ) - \frac{85}{252}\right)\right) = \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}(0.75 - 0.34)\right) = 0.925$$

8 Los armónicos en las instalaciones eléctricas

8.1 Armónicos

El desarrollo tecnológico en el ámbito industrial y doméstico ha dado lugar a la difusión de aparatos electrónicos que, debido a su principio de funcionamiento, absorben una corriente no sinusoidal (cargas no lineales). Dicha corriente provoca, aguas arriba en la red, una caída de tensión también no sinusoidal y, consecuentemente, las cargas lineales se encuentran alimentadas por una tensión distorsionada. Los armónicos son las componentes de una forma de onda distorsionada y su utilización permite analizar cualquier forma de onda periódica no sinusoidal, descomponiéndola en distintas componentes sinusoidales.

Según el teorema de Fourier, cualquier función periódica de periodo T generalmente continua y limitada¹ puede representarse por la suma de infinitos términos sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la función original.

El armónico cuya frecuencia corresponde al periodo de la

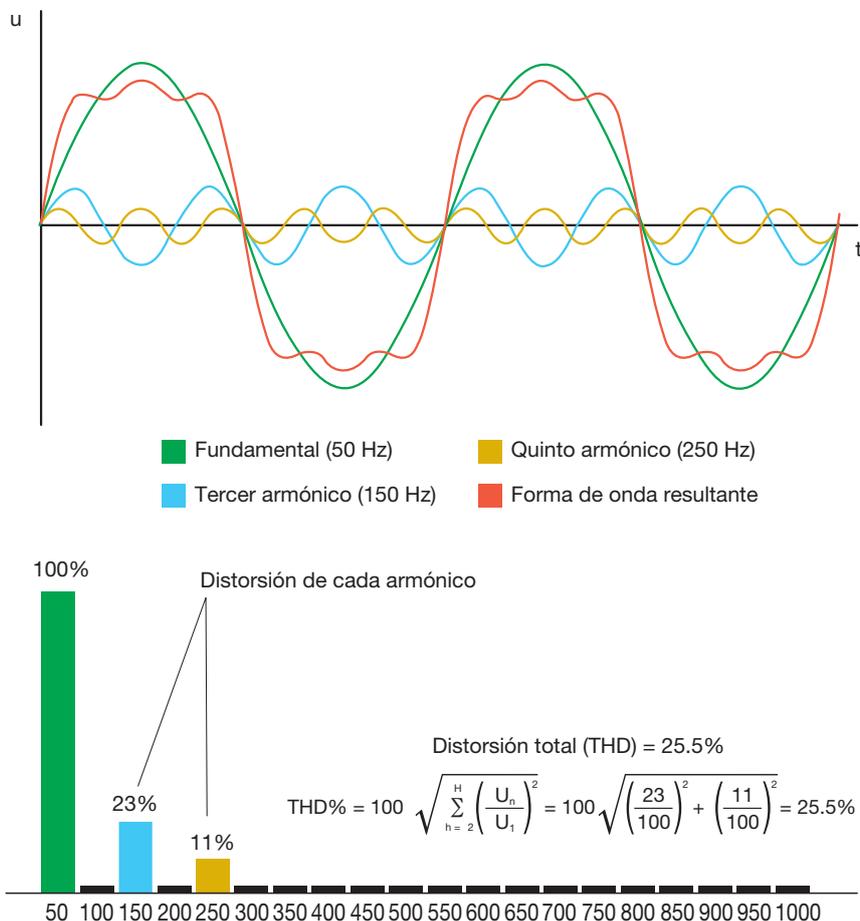
forma de onda original se llama *armónico fundamental* y el armónico con frecuencia igual a "n" veces la del fundamental se llama *armónico de orden "n"*.

Según el teorema de Fourier, una forma de onda perfectamente sinusoidal no presenta armónicos de orden diferente al fundamental.

La presencia de armónicos en un sistema eléctrico indica por tanto una deformación de la forma de onda de la tensión o de la corriente, lo que conlleva una distribución de energía eléctrica que podría provocar el funcionamiento deficiente de los equipos.

¹ Se define como periódica generalmente continua y limitada la función que alcanza el mismo valor tras un periodo T ($f(x+T) = f(x)$) y que tiene un número finito de discontinuidades no de segunda especie (es decir, que tiene un límite superior e inferior).

Figura 8.1



Los principales aparatos que generan armónicos son:

- ordenadores;
- lámparas fluorescentes y de descarga en gas;
- convertidores estáticos;
- grupos de continuidad;
- accionamientos de velocidad variable;
- soldadoras;
- hornos de arco y de inducción.

Generalmente, la distorsión de la forma de onda se debe a la presencia, en el interior de los aparatos, de impedancias no lineales o de tiempo variante² o de puentes rectificadores cuyos dispositivos semiconductores conducen sólo durante una fracción de todo el periodo, creando comportamientos discontinuos con la consecuente introducción de numerosos armónicos.

Como se verá en los apartados siguientes, la presencia de armónicos en la red eléctrica puede dañar la batería de condensadores.

8.2 Prescripciones de las normativas

Las normas técnicas establecen prescripciones concretas a seguir para la reducción de los efectos de los armónicos en los condensadores.

La norma IEC EN 61642 *Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos - Aplicación de filtros y de condensadores estáticos de corrección* identifica los problemas y proporciona recomendaciones para la aplicación general de los condensadores y los filtros de armónicos en las redes de energía de corriente alterna afectadas por la presencia de tensiones y de corrientes armónicas.

En particular, ilustra el problema de la resonancia en serie y en paralelo y ofrece ejemplos clarificadores.

8.3 Los efectos de los armónicos

8.3.1 Sobrecargas

La presencia de armónicos en la red eléctrica puede provocar un funcionamiento anómalo de los aparatos, como sobrecargas en el conductor de neutro, aumento de las pérdidas en los transformadores, daños en el par de los motores, etc.

En concreto, los armónicos son el fenómeno que más daños causa a los condensadores de compensación.

De hecho, se sabe que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia; por lo tanto, la impedancia producida en los armónicos de tensión disminuye al aumentar el orden de armónicos. Esto significa que los condensadores, al estar alimentados por una tensión deformada, pueden absorber una corriente con una magnitud que podría dañarlos seriamente.

Tabla 8.1

$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$
reactancia capacitiva	reactancia inductiva

Imaginemos que, en el caso de una batería de condensadores conectada en triángulo, es posible calcular la corriente de línea correspondiente al n-ésimo armónico según la siguiente relación:

$$I_n = \sqrt{3} \cdot n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n \quad [8.1]$$

donde:

- I_n es la corriente correspondiente al n-ésimo armónico;
- n es el orden de armónicos;
- ω es la pulsación del armónico fundamental;
- C es la capacidad del condensador;
- U_n es la tensión concatenada correspondiente al n-ésimo armónico.

La corriente total de línea absorbida por la batería de condensadores será³:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (n \cdot U_n)^2} \quad [8.2]$$

Esta relación evidencia que la corriente absorbida en presencia de armónicos de tensión es superior a la que se tendría en su ausencia. Por ello, las normas IEC EN 60831-1 e IEC EN 60931-1 establecen que los condensadores sean capaces de funcionar permanentemente con corriente superior a la corriente nominal de la batería (tal y como se detalla en el capítulo siguiente).

² Las cargas de tiempo variante, como los dispositivos para el control de las ondas completas o de fase, introducen no sólo armónicos múltiplos del fundamental, sino también interarmónicos.

³ Suma algebraica válida también con los valores eficaces, dado que las componentes armónicas de corriente se encuentran en fase entre sí y con el fundamental.

8.3.2 Resonancia

Un problema aún más importante se da cuando la distorsión en línea alcanza valores elevados, existiendo peligro de resonancia entre el sistema de corrección (capacidad equivalente de los condensadores) y la inductancia equivalente de la red.

La resonancia se presenta cuando la reactancia inductiva y capacitiva se igualan.

De esta forma, se hablará de circuito resonante serie cuando la inductancia y la capacidad estén conectadas en serie, o de circuito resonante paralelo si la inductancia y la capacidad se encuentran conectadas en paralelo. En una misma red, pueden darse al mismo tiempo una resonancia en serie y una resonancia en paralelo. La resonancia tiene lugar a una frecuencia concreta, llamada *frecuencia de resonancia* f_r ⁴

$$X_L = X_C \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [8.3]$$

Cuando se tiene resonancia en serie, la impedancia total teóricamente se anula⁵:

$$\bar{Z}_{tot} = j(X_L - X_C) = 0 \quad [8.4]$$

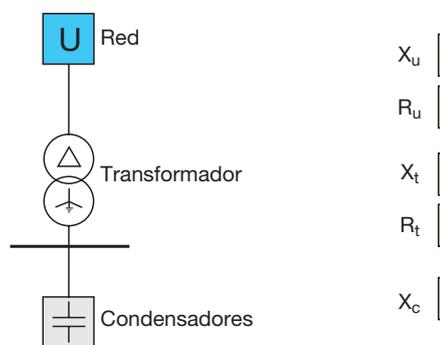
Contrariamente, en presencia de resonancia en paralelo, la impedancia total tiende al infinito:

$$\bar{Z}_{tot} = \frac{X_L \cdot X_C}{j(X_L - X_C)} \rightarrow \infty \quad [8.5]$$

Si un circuito resonante serie recibe alimentación de tensión alterna con una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia, puede tener lugar una amplificación de la corriente absorbida que puede provocar perturbaciones, sobrecorrientes e incluso daños en los componentes de la red.

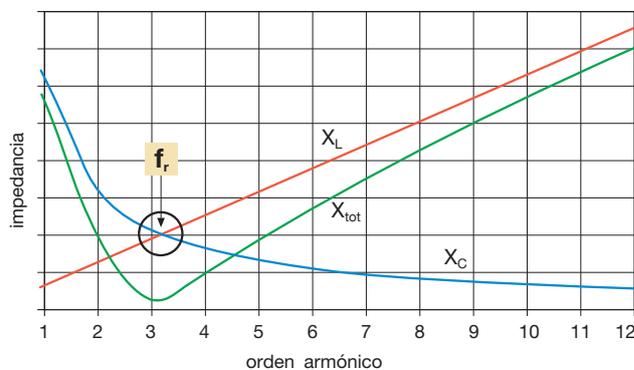
Por el contrario, si un circuito resonante paralelo recibe alimentación de armónicos de corriente de cargas de distorsión, podría tener lugar una sobretensión en el armónico de resonancia.

Figura 8.2: ejemplo de circuito resonante serie



El siguiente gráfico muestra el comportamiento de la reactancia capacitiva (decreciente con el orden de armónicos), inductiva (creciente con el orden de armónicos) y total de una red; la reactancia total en serie adquiere su valor mínimo en la frecuencia de resonancia (en el ejemplo del gráfico, unas tres veces la frecuencia fundamental).

Figura 8.3



La frecuencia de resonancia f_r también puede hallarse con la siguiente fórmula:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad [8.6]$$

donde:

- f_1 es la frecuencia fundamental;
- X_{C1} es la reactancia capacitiva del condensador a la frecuencia fundamental;
- X_{L1} es la reactancia inductiva (a la frecuencia fundamental) de la red aguas arriba respecto al punto de instalación del condensador.

⁴
 $X_L = X_C \rightarrow \omega_r \cdot L = \frac{1}{\omega_r \cdot C} \rightarrow \omega_r^2 \cdot L \cdot C = 1 \dots$
 $\dots \rightarrow (2 \cdot \pi \cdot f_r)^2 = \frac{1}{L \cdot C} \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$

⁵ A efectos prácticos, se reduce notablemente y corresponde únicamente a la componente resistiva de los cables de conexión.

En ausencia de armónicos y suponiendo que la frecuencia de resonancia difiera lo suficiente de la frecuencia fundamental del sistema de alimentación, no tendrán lugar sobrecorrientes en las líneas.

En presencia de armónicos, podría producirse una amplificación de la corriente en el armónico de orden cercano a la frecuencia de resonancia. Para más detalles, véase la norma IEC EN 61642, que incluye además un ejemplo numérico de un circuito resonante serie del que se concluye que cuando la frecuencia es cercana a la frecuencia de resonancia en serie, una tensión relativamente baja en las barras de alimentación puede dar lugar a una corriente elevada.

Para evitar este fenómeno de resonancia y, por tanto, para que la vida del condensador no se vea reducida, es preciso que la red tenga una frecuencia de resonancia lo más diferente posible de la de los armónicos presentes.

La solución más común, tal y como se indica en la norma IEC EN 61642, consiste en conectar debidamente una reactancia inductiva en serie al condensador (*reactancia de bloqueo*); la reactancia debe estar dimensionada con una frecuencia de resonancia inferior a la frecuencia armónica más baja de la tensión presente en el circuito.

Ejemplo

Supongamos que en el circuito resonante serie de la figura 8.2 el armónico más bajo de amplitud considerable es el quinto. De la relación anterior:

$$f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < f_5 \rightarrow \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < \frac{f_5}{f_1} = 5 \rightarrow X_{L1} > 4\% X_{C1} \quad [8.7]$$

donde:

- X_{C1} es la reactancia capacitiva del condensador a la frecuencia fundamental;
- X_{L1} es la reactancia insertada en serie con el condensador a la frecuencia fundamental.

Si el armónico más bajo de amplitud considerable fuese el tercero:

$$X_{L1} > 11.1\% X_{C1} \quad [8.7]$$

Dimensionando de esta forma la inductancia, la interacción de la inductancia de la red y de la impedancia (inductiva) de la conexión inductor-condensador ya no podrá dar lugar a condiciones de resonancia en las frecuencias de las tensiones y de las corrientes armónicas presentes en la red.

8.4 Filtros para armónicos

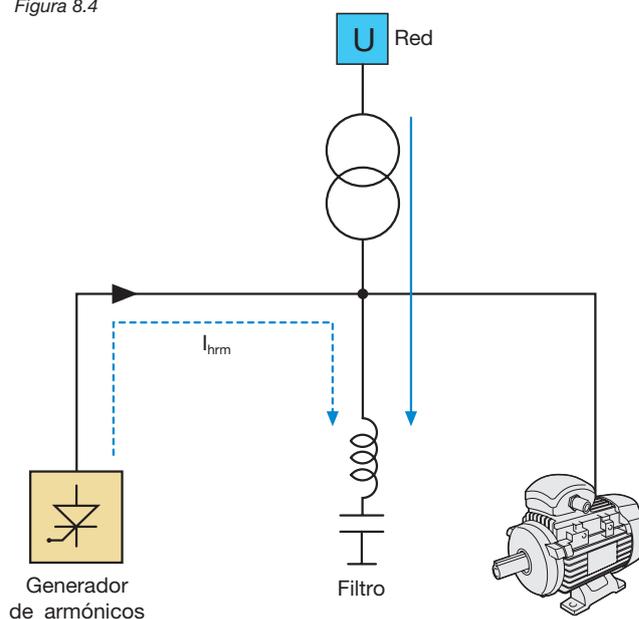
Junto con los inductores, y con objeto de limitar los efectos de los armónicos en una red, pueden emplearse los bancos de condensadores. De hecho, la combinación condensador-inductor constituye un filtro para armónicos.

Anteriormente hemos visto que, para evitar los efectos negativos de la resonancia, es necesario insertar un inductor en serie a un condensador.

Siguiendo esa misma lógica, se puede insertar en un punto específico de la red una combinación de un inductor y un condensador oportunamente dimensionados con una frecuencia de resonancia igual al orden del armónico de corriente que se quiere eliminar.

De esta forma, el bipolo inductor-condensador presenta una reactancia muy baja en el armónico que se desea eliminar, la cual permanecerá en el bipolo sin afectar al resto de la red.

Figura 8.4



El filtro, denominado *filtro pasivo*, está compuesto por un condensador conectado en serie a un inductor y su función es la de igualar la frecuencia de resonancia total a la frecuencia del armónico que se desea eliminar.

El filtro pasivo, que se determina en cada caso en función del armónico concreto que necesita ser filtrado, es económico al tiempo que fácil de conectar y de poner en funcionamiento.

El *filtro activo* es capaz de eliminar de forma automática los armónicos de corriente presentes en la red con una amplia gama de frecuencias. Su tecnología electrónica le permite generar un sistema de armónicos capaz de anular los armónicos presentes en la red.

La ventaja del filtro activo es que puede filtrar al mismo tiempo decenas de armónicos sin comportar costes de planificación para el dimensionamiento.

Figura 8.5

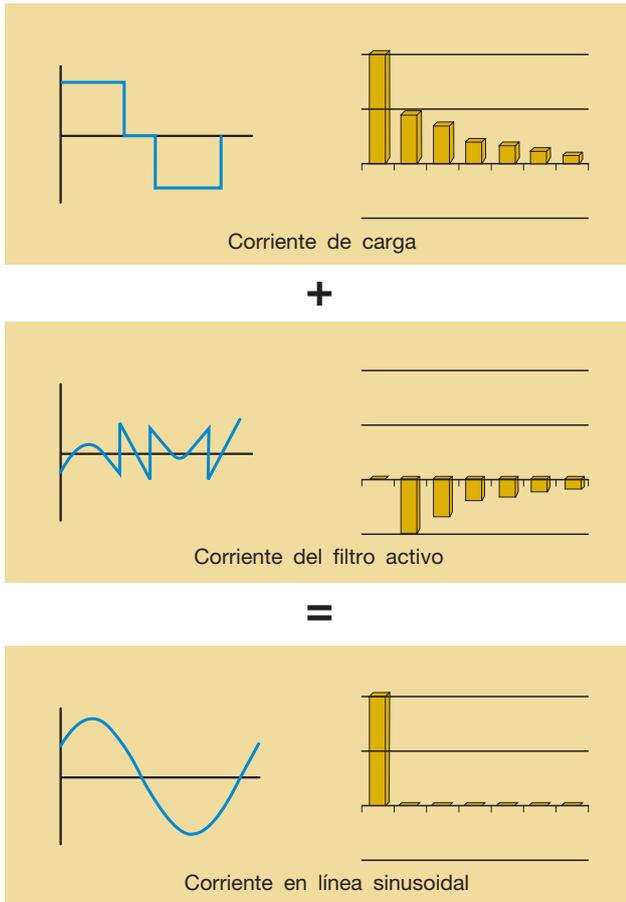
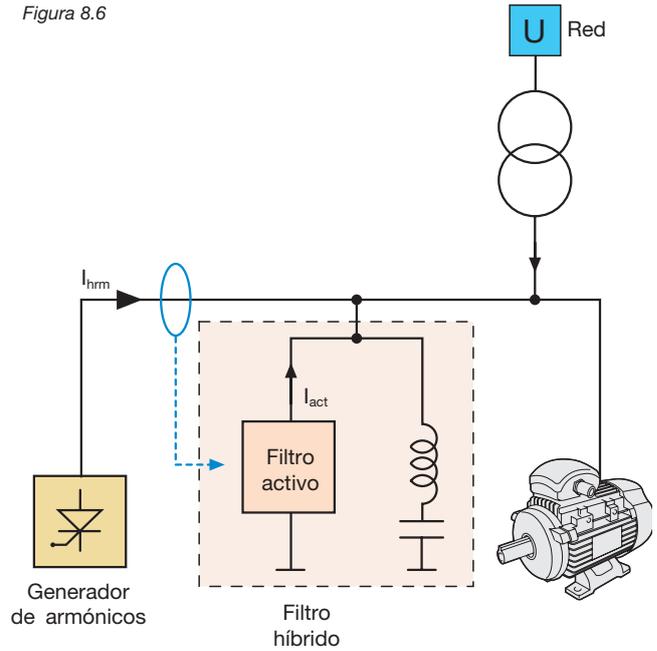


Figura 8.6



9 Maniobra y protección de las baterías de condensadores

9.1 Fenómenos eléctricos ligados a la inserción de condensadores

La inserción de una batería de condensadores determina un transitorio eléctrico debido a los fenómenos de carga eléctrica de la batería. De hecho, da lugar a una sobrecorriente de elevada frecuencia (equivalente en los primeros instantes a un cortocircuito de corta duración), cuya amplitud depende de los parámetros de la red aguas arriba y de las características de la batería.

La maniobra comporta además una sobretensión cuya onda de perturbación se propaga a lo largo de la red.

La magnitud de la sobretensión depende de la potencia reactiva Q_c suministrada por la batería de condensadores y del punto de instalación de la misma. En particular, pueden presentarse dos casos relevantes:

- instalación, inmediatamente después, aguas abajo de un transformador de potencia aparente S_r (alimentado por una red de potencia infinita) y con una tensión de cortocircuito porcentual $U_{cc}\%$. En este caso, tiene lugar una sobretensión cuyo valor puede ser hallado del siguiente modo¹:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q_c}{S_r} \quad [9.1]$$

- instalación en un punto de la red con potencia de cortocircuito S_{cc} . En este otro caso, la sobretensión puede calcularse según la relación²:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{Q_c}{S_{cc}} \quad [9.2]$$

Las sobrecorrientes que pueden tener lugar en el momento de la inserción dependen en gran medida de la inductancia de la red aguas arriba y del número de baterías de condensadores insertadas.

¹ La variación de tensión viene dada por:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_n^2}$$

En un transformador, la resistencia de los devanados es insignificante en relación con la reactancia de dispersión, lo que significa:

$$X_{cc} \approx Z_{cc}$$

Además, puesto que:

$$U_{cc}\% \approx Z_{cc}\% = \frac{Z_{cc}}{Z} \cdot 100 = \frac{Z_{cc}}{U_n^2} \cdot 100$$

la variación de tensión puede expresarse como:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{X_{cc} \cdot Q}{U_n^2} \approx \frac{Z_{cc} \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q}{S_n}$$

donde sustituyendo Q por la potencia reactiva de la batería de condensadores Q_c que se está insertando, se obtiene la sobretensión causada por la batería [9.1].

² Válida mientras que la red aguas arriba sea principalmente inductiva. Dado que:

$$S_{cc} = \frac{U_n^2}{X}$$

se tiene:

$$\frac{\Delta U}{U_n} \approx \frac{X \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

En el caso de una única batería, el pico de corriente de inserción depende en gran medida de la corriente de cortocircuito I_{cc} de la red aguas arriba, influenciada a su vez por la propia inductancia de la red L_0 según la relación:

$$L_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{cc}} \quad [9.3]$$

Las normas IEC EN 62271-100 e IEC-EN 60831-1 contienen las fórmulas para el cálculo del pico de corriente. En este caso se tiene:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0 + L}} \approx U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0}} \approx I_{cn} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{cc}}{Q_c}} \quad [9.4]$$

puesto que la inductancia de conexión de la batería de condensadores es muy inferior a la de la red aguas arriba $L \ll L_0$.

Por lo general, el pico de corriente en las instalaciones no supera el valor máximo establecido para la batería de condensadores (100 veces la corriente nominal de la batería); cuando el pico supera dicho valor máximo o, en cualquier caso, deba ser reducido para el correcto funcionamiento de los aparatos de maniobra, es preciso recurrir al uso de inductancias limitadoras en serie con la batería de condensadores³.

Si se inserta una batería con una o más baterías ya conectadas a la tensión, es preciso dotarlas en serie de oportunas inductancias limitadoras, ya que en este caso el pico de corriente es mucho más elevado a causa de la brusca transferencia de energía de la o las baterías ya en servicio a la que acaba de ser insertada.

Las relaciones proporcionadas por la norma anteriormente citada para el cálculo de los picos son, respectivamente:

- inserción cuando una batería ya está conectada

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C_1 \cdot C}{C_1 + C} \cdot \frac{1}{L_1 + L}} \quad [9.5]$$

Si $L_1 = L$ y $C_1 = C$ entonces:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{C}{6 \cdot L}} \quad [9.6]$$

- inserción cuando n baterías están ya conectadas

$$L' = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}} \quad [9.7]$$

Si $L_1 = L_2 = \dots = L$ y $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ entonces

$$i_p = U_n \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L}} \quad [9.8]$$

Las inductancias de limitación utilizadas son generalmente sin núcleo magnético, es decir, con núcleo de aire, y los valores más utilizados son: 50, 100 o 150 μH .

³ En cambio, no hay problemas cuando un condensador de compensación es insertado junto con la carga que debe compensar, como por ejemplo un motor, ya que la corriente del condensador es compensada por la componente inductiva de la corriente absorbida por el motor.

9.2 Maniobra y protección

Un sistema de corrección del factor de potencia está compuesto básicamente por:

- un dispositivo de protección;
- un aparato de maniobra (contactor);
- uno o más condensadores debidamente conectados;
- eventuales resistencias para la descarga del condensador.

Los sistemas de corrección automática, además, cuentan con un regulador del factor de potencia que controla la inserción y la desconexión de los condensadores.

9.2.1 Elección del dispositivo de protección

Los dispositivos empleados para la protección de las baterías de condensadores deben ajustarse a las siguientes condiciones:

1. soportar las corrientes transitorias que tienen lugar con la inserción y la desconexión de la batería. Particularmente, las protecciones instantáneas de los relés de protección termomagnéticos y electrónicos no deben interferir con las corrientes de inserción;
2. soportar las sobrecorrientes periódicas o permanentes debidas a los armónicos de tensión y a la tolerancia admitida respecto al valor nominal de la capacidad;
3. estar coordinados con los eventuales aparatos de maniobra externos (contactores).

Además, la capacidad de cierre y de corte del interruptor debe ser proporcional al nivel de cortocircuito de la instalación.

Las normas IEC EN 60831-1 e IEC EN 60931-1 afirman que:

- los condensadores deben poder funcionar a régimen con una corriente de valor eficaz de hasta un 30% superior a su intensidad nominal I_{cn} (esto se debe a la posible presencia de armónicos de tensión en la red);
- se admite una tolerancia (variante 1 de las susodichas normas) del +10% respecto al valor de la capacidad en baterías de hasta 100 kvar y del +5% para baterías superiores a 100 kvar.

Por tanto, la corriente máxima que puede absorber la batería de condensadores I_{cmax} será:

$$Q_c \leq 100 \text{ kvar} \rightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.1 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.43 \cdot I_{cn} \quad [9.9]$$

$$Q_c > 100 \text{ kvar} \rightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.05 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.365 \cdot I_{cn}$$

donde:

- Q_c es la potencia reactiva;
- U_n es la tensión de línea nominal;
- I_{cn} es la corriente nominal.

En resumen, dependiendo de la potencia reactiva nominal de la batería de condensadores, para la correcta protección contra las sobrecargas:

- la corriente nominal del interruptor deberá ser superior a dichos valores;
- la regulación de la protección contra sobrecargas deberá ser igual a los valores indicados.

La inserción de una batería de condensadores, comparable a un cierre de cortocircuito, va asociada a corrientes transitorias de elevada frecuencia (1÷15 kHz), de corta duración, con pico elevado ($25 \div 200 \cdot I_{cn}$).

Para la protección de la batería de condensadores:

- el interruptor deberá estar dotado de una adecuada capacidad de cierre;
- la regulación de la protección instantánea contra cortocircuitos no deberá generar disparos intempestivos.

La segunda condición es generalmente respetada:

- por los relés de protección termomagnéticos, regulando la protección magnética I_3 a valores no inferiores a $10 \cdot I_{cmax}$

$$I_3 \geq 10 \cdot I_{cmax} \quad [9.10]$$

- por los relés de protección electrónicos, desactivando la protección instantánea contra cortocircuitos ($I_3 = \text{OFF}$).

9.2.2 Elección del dispositivo de maniobra (contactor)

El condensador o la batería de condensadores normalmente es controlada por un contactor que, para que funcione correctamente, debe estar dimensionado de manera que pueda:

- soportar el paso permanentemente de una corriente igual a la I_{cmax} del banco de condensadores;
- soportar, sin sufrir daños, la corriente de inserción de los condensadores.

Además, el contactor debe estar protegido contra cortocircuitos mediante el dispositivo de protección.

9.2.3 Elección del condensador

El condensador proporciona la energía reactiva necesaria para elevar el factor de potencia al valor deseado.

En la placa de características del condensador figuran los siguientes datos:

- tensión nominal U_n ;
- frecuencia nominal f ;
- potencia nominal Q_c , expresada en kvar (potencia reactiva de la batería de condensadores).

Es preciso subrayar que la potencia reactiva suministrada relativa a la tensión de empleo difiere de la potencia nominal relativa a la tensión nominal; por medio de la siguiente fórmula se puede calcular la potencia efectiva de un condensador o de una batería de condensadores:

$$Q_{sum} = Q_c \cdot \left(\frac{U_e}{U_n} \right)^2 \quad [9.11]$$

donde:

- Q_c es la potencia relativa a la tensión nominal U_n ;
- Q_{sum} es la potencia efectiva relativa a la tensión de empleo U_e .

Por ejemplo, un condensador con una potencia reactiva nominal de 100 kvar a 500 V proporcionará una potencia de 64 kvar a 400 V.

De los datos de la placa de características se pueden obtener las magnitudes características del condensador:

Circuito monofásico

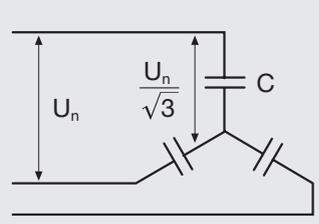
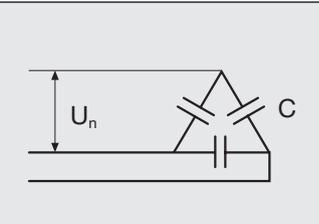
Tabla 9.1

Intensidad nominal	$I_{cn} = \frac{Q_c}{V_n}$
Reactancia	$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$
Capacidad	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2}$

Circuito trifásico

En un circuito trifásico, los condensadores pueden estar conectados entre sí en estrella o en triángulo; la siguiente tabla muestra los valores de potencia y de intensidad nominal según el tipo de conexión.

Tabla 9.2

	Intensidad nominal (de línea)	Corriente en los condensadores	Potencia
	$I_{cn} = \omega \cdot C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$	$I_c = I_{cn}$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = \omega \cdot C \cdot U_n^2$
	$I_{cn} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U_n$	$I_c = \omega \cdot C \cdot U_n$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_n^2$

9.2.4 Descarga de los condensadores

Antes de instalar un condensador, hay que verificar que en el momento de su desconexión éste pueda descargarse de manera que no presente en sus extremos una tensión peligrosa que pueda causar lesiones personales y materiales.

De acuerdo con la norma IEC EN 60252-2, en la corrección del factor de potencia de los motores generalmente no se requieren dispositivos de descarga, en particular cuando los condensadores están permanentemente conectados a los bornes de los devanados de la máquina, ya que hacen las veces de resistencias de descarga.

Cuando sea necesario el uso de un dispositivo de descarga, éste debe reducir la tensión nominal de los terminales del condensador del valor de pico de la tensión nominal a un valor inferior o igual a 50 V en máximo 1 min desde el momento de la desconexión. A veces, puede requerirse un dispositivo de descarga no por motivos de seguridad, sino para evitar un esfuerzo excesivo del condensador: esto ocurre cuando un condensador, desconectado pero aún cargado, es reconectado a otro condensador de diferente polaridad.

Las normas IEC 64-8/5 art. 559.7 prescriben el uso de resistencias de descarga con baterías de condensadores de compensación con una capacidad total superior a 0.5 μF (75/25 kvar con conexión en triángulo/estrella a 400 V).

Las resistencias anulan en un breve lapso de tiempo la carga residual de las armaduras del condensador una vez que éste ha sido desconectado de la red. Es conveniente prever resistencias de descarga para todos los condensadores de potencia superior a 0.5 kvar, independientemente de la tensión de alimentación.

De acuerdo con la norma IEC EN 60831-1 art. 22 "Cada unidad capacitiva y/o batería debe estar dotada de dispositivos que permitan la descarga de las unidades con una tensión igual o menor a 75 V en 3 min a partir de una tensión inicial de pico igual a $\sqrt{2}$ veces la tensión nominal U_n ", pero es preciso subrayar que en algunos países pueden requerirse tiempos de descarga diferentes.

La resistencia de descarga en una unidad monofásica o en una fase de unidad polifásica viene dada por:

$$R \leq \frac{t}{k \cdot C \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{U_r}\right)} \quad [9.12]$$

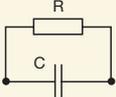
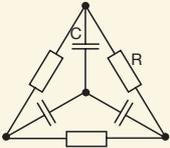
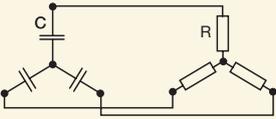
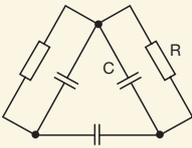
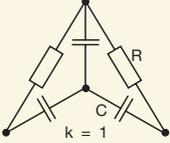
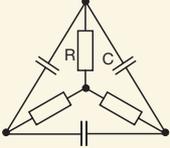
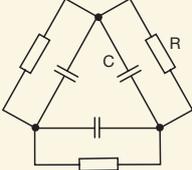
donde:

- R es la resistencia de descarga en $[\Omega]$;
- t es el tiempo de descarga de $\sqrt{2} U_n$ a U_r en [s];
- U_n es la tensión nominal en [V];
- U_r es la tensión residual admitida⁴ en [V];
- k es un coeficiente que depende del método de conexión de las resistencias con las unidades capacitivas (véase tabla 9.3);
- C es el valor de la capacidad de la batería de condensadores [F].

Para satisfacer las condiciones dictadas por la norma IEC EN 60831-1, en la fórmula anterior habrá que poner $t = 180$ s y $U_r = 75$ V.

⁴ La tensión residual, en el momento de excitación, no debe superar el 10% de la tensión nominal

Tabla 9.3

Conexión	k
	1
	$\frac{1}{3}$
	1
	3
	1
	3
	1

10 Oferta de ABB

10.1 Interruptores

ABB ofrece los siguientes tipos de interruptores automáticos en caja moldeada y abiertos para la protección contra sobrecorrientes y el seccionamiento de baterías de condensadores.

10.1.1 Interruptores en caja moldeada

Interruptores en caja moldeada trifásicos de la serie Tmax conformes a la norma IEC EN 60947-2, equipados con relé de protección termomagnético o electrónico, con un campo de aplicación de 1,6 A a 1600 A y capacidades de corte de 10 kA a 200 kA a 400 V.

Los interruptores en caja moldeada disponibles son:

- interruptores Tmax T1, T2, T3, T4 equipados con relés de protección termomagnéticos TMD con umbral térmico ajustable ($I_1=0.7..1xI_n$) y magnético fijo ($I_3=10xI_n$);
- interruptores Tmax T4, T5, T6 equipados con relés de protección termomagnéticos TMA con umbral térmico ajustable ($I_1=0.7..1xI_n$) y magnético ajustable ($I_3=5..10xI_n$);
- interruptores Tmax T2, T4, T5, T6 equipados con relés de protección electrónicos PR221DS;

- interruptores Tmax T4, T5, T6 equipados con relés de protección electrónicos PR222DS/P, PR222DS/PD, PR223DS;
- interruptores Tmax T7 equipados con relés de protección electrónicos PR231/P, PR232/P, PR331/P, PR332/P.



Características de los interruptores en caja moldeada Tmax para protección de baterías de condensadores

		T1			T2						T3	
		B	C	N	B	C	N	S	H	L	N	S
Corriente permanente asignada Iu	[A]	160			160						250	
Tensión de empleo Ue	[V]	690			690						690	
Tensión nominal soportada a impulso Uimp	[kV]	8			8						8	
Tensión de aislamiento Ui	[V]	800			800						800	
Tensión de prueba a frecuencia industrial durante 1 min	[V]	3000			3000						3000	
Poder de corte último en cortocircuito Icu		B	C	N	B	C	N	S	H	L	N	S
220-230 V 50-60 Hz	[kA]	25	40	50	25	40	65	85	100	120	50	85
380-400-415 V 50-60 Hz	[kA]	16	25	36	16	25	36	50	70	85	36	50
440 V 50-60 Hz	[kA]	10	15	22	10	15	30	45	55	75	25	40
500 V 50-60 Hz	[kA]	8	10	15	8	10	25	30	36	50	20	30
690 V 50-60 Hz	[kA]	3	4	6	3	4	6	7	8	10	5	8
Categoría de uso (IEC 60947-2)		A			A						A	
Aptitud al seccionamiento		■			■						■	
Relé de protección: termomagnético												
T ajustable, M fijo	TMD	■			■						■	
T ajustable, M ajustable (5..10 x In)	TMA	-			-						-	
Relé de protección: electrónico												
PR221DS		-			■						-	
PR222DS		-			-						-	
PR223DS		-			-						-	
PR231/P		-			-						-	
PR232/P		-			-						-	
PR331/P		-			-						-	
PR332/P		-			-						-	
Intercambiabilidad		-			-						-	
Ejecuciones		F			F-P						F-P	

(1) Icw = 5 kA - (2) Icw = 7,6 kA (630 A) - 10 kA (800 A) - (3) Sólo para T7 800/1000/1250 A - (4) Icw = 20 kA (versión S,H,L) - 15 kA (versión V)

Intensidades nominales disponibles para interruptores con los dos tipos de relé termomagnético

In [A]	T1 160	T2 160	T3 250	T4 250-320		T5 400-630	T6 630-800
	TMD	TMD	TMD	TMD	TMA	TMA	TMA
1,6		■					
2		■					
2,5		■					
3,2		■					
4		■					
5		■					
6,3		■					
8		■					
10		■					
12,5		■					
16	■	■					
20	■	■		■			
25	■	■					
32	■	■		■			
40	■	■					
50	■	■		■			
63	■	■	■				
80	■	■	■		■		
100	■	■	■		■		
125	■	■	■		■		
160	■	■	■		■		
200			■		■		
250			■		■		
320						■	
400						■	
500						■	
630							■
800							■

TMD relé de protección termomagnético con umbral térmico ajustable y magnético fijo
 TMA relé de protección termomagnético con umbrales térmico y magnético ajustables

T4					T5					T6				T7			
250/320					400/630					630/800/1000				800/1000/1250/1600			
690					690					690				690			
8					8					8				8			
1000					1000					1000				1000			
3500					3500					3500				3500			
N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V ⁽³⁾
70	85	100	200	200	70	85	100	200	200	70	85	100	200	85	100	200	200
36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	50	50	85	100
20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
A					B (400 A) ⁽¹⁾ - A (630 A)					B (630 A-800 A) ⁽²⁾ - A (1000 A)				B ⁽⁴⁾			
■					■					■				■			
■ (hasta 50 A)					-					-				-			
■ (hasta 250 A)					■ (hasta 500 A)					■ (hasta 800 A)				-			
■					■					■				-			
■					■					■				-			
■					■					■				-			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
-					-					-				■			
■					■					■				■			
F-P-W					F-P-W					F-W				F-W			

10.1.2 Interruptores abiertos

Interruptores automáticos abiertos de la serie Emax E1..E6, conformes a la norma IEC EN 60947-2, con un campo de aplicación de 400 A a 6300 A, capacidades de corte de 42 kA a 150 kA a 400 V y equipados con relés de protección electrónicos PR121/P, PR122/P y PR123/P.

Interruptores automáticos Emax X1, con un campo de aplicación de 400 A a 1600 A, capacidades de corte de 42 kA a 65 kA a 400 V y equipados con relés de protección electrónicos PR331/P, PR332/P y PR333/P.



Características de los interruptores abiertos Emax para protección de baterías de condensadores

		E1		E2			E3				E4			E6		X1	
Tensión de empleo Ue	[V]	690		690			690				690			690		690	
Tensión nominal soportada a impulso Uimp	[kV]	12		12			12				12			12		12	
Tensión de aislamiento Ui	[V]	1000		1000			1000				1000			1000		1000	
Corriente permanente asignada Iu		B	N	B	N	S	N	S	H	V	S	H	V	H	V	B	N
	[A]	800	800	1600	1000	800	2500	1000	800	800	4000	3200	3200	4000	3200	630	630
	[A]	1000	1000	2000	1250	1000	3200	1250	1000	1250		4000	4000	5000	4000	800	800
	[A]	1250	1250		1600	1250		1600	1250	1600				6300	5000	1000	1000
	[A]	1600	1600		2000	1600		2000	1600	2000					6300	1250	1250
	[A]					2000		2500	2000	2500						1600	1600
	[A]							3200	2500	3200							
Poder nominal de corte último en cortocircuito Icu																	
220-230-380-400-415 V 50-60 Hz	[kA]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65
440 V 50-60 Hz	[kA]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65
500 V 50-60 Hz	[kA]	42	50	42	65	65	65	75	100	100	75	100	130	100	130	42	55
690 V 50-60 Hz	[kA]	42	50	42	65	65	65	75	85	100	75	85	100	100	100	42	55
Corriente nominal admisible de corta duración (1 s) Icw	[kA]	42	50	42	55	65	65	75	75	85	75	100	100	100	100	42	42
Categoría de uso (IEC 60947-2)		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Aptitud al seccionamiento		■		■			■				■			■		■	
Ejecuciones		F-W		F-W			F-W				F-W			F-W		F-W	

Intensidades nominales disponibles para interruptores con los diferentes tipos de relé electrónico

		In [A]	10	25	63	100	160	250	320	400	630	800	1000	1250	1600
PR221DS	T2	■	■	■	■	■	■								
	T4				■	■	■	■							
	T5							■	■	■					
	T6									■	■	■	■		
PR222DS/P	T4				■	■	■	■							
PR222DS/PD	T5							■	■	■					
PR223DS	T6									■	■	■	■		
PR231/P PR232/P PR331/P PR332/P	T7									■	■	■	■	■	■

		In [A]	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300
PR121/P PR122/P PR123/P	E1	■	■	■	■	■	■	■						
	E2	■	■	■	■	■	■	■	■					
	E3	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
	E4			■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	E6			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
PR331/P PR332/P PR333/P	X1	■	■	■	■	■	■	■						
		■	■	■	■	■	■	■						
		■	■	■	■	■	■	■						

10.2 Contactores

ABB ofrece tres versiones de contactores en función del valor del pico de corriente en el momento de la inserción y de la potencia de la batería de condensadores:

- *contactores tripolares UA..RA* con corriente de pico ilimitada;
- *contactores tripolares UA* con corriente de pico igual o menor a 100 veces el valor eficaz de la intensidad nominal;
- *contactores tripolares normales A y AF* para inserción de baterías individuales con corriente de pico inferior o igual a 30 veces el valor eficaz de la intensidad nominal.

10.2.1 Contactores UA..RA

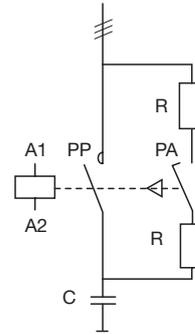
Se utilizan en instalaciones con corrientes de pico de más de 100 veces el valor eficaz de la intensidad nominal e incluyen resistencias de amortiguamiento, por lo que no necesitan ser empleados con inductancias limitadoras. Los condensadores deben descargarse (máxima tensión residual en los bornes ≤ 50 V) antes de volver a ser excitados con el cierre de los contactores.

Su durabilidad eléctrica es de 250.000 maniobras para $U_e < 500$ V y 100.000 maniobras para $500 \text{ V} \leq U_e \leq 690$ V.

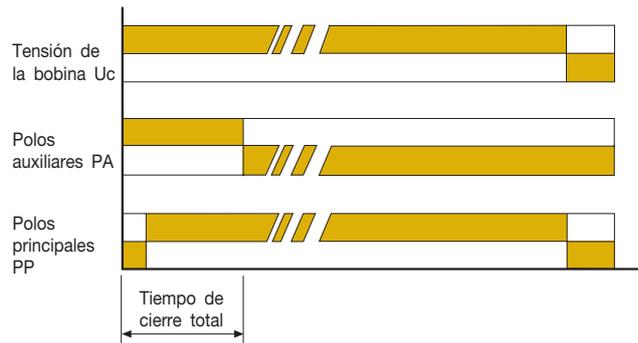
Los contactores UA..RA están equipados con un bloque especial, instalado en la parte frontal, que permite la inserción en serie en el circuito, de tres resistencias que limitan el primer pico de corriente de alimentación de la batería de condensadores y, al favorecer la precarga de los condensadores, atenúan el segundo pico de corriente en el momento del cierre de los polos principales.

Como puede verse en el esquema siguiente, cuando se excita la bobina, los contactos auxiliares de cierre anticipado PA conectan el condensador a la red mediante las resistencias en serie.

Figura 10.1



Cuando los polos principales PP se encuentran en posición de cerrado, se produce la apertura automática de los polos auxiliares desconectando las resistencias, tal y como se muestra en el diagrama siguiente.



Contactores UA...RA para inserción de condensadores (UA16RA...UA110RA)

El incluir resistencias de amortiguamiento protege el contactor y el condensador de las corrientes de inserción más elevadas.



10.2.2 Contactores UA

Se utilizan para la inserción de baterías de condensadores con picos de corriente en el momento de la inserción de hasta 100 veces la intensidad nominal. Los condensadores deben descargarse y la durabilidad eléctrica de estos contactores es de 100.000 maniobras.

10.2.3 Contactores A y AF

Resultan indicados para la inserción de baterías individuales con corrientes de pico inferiores a 30 veces la intensidad nominal. Los condensadores deben descargarse antes de ser reexcitados por el cierre de los contactores y su durabilidad eléctrica es de 100.000 maniobras.

Contactores UA para inserción de condensadores (UA16 ... UA110)

Máxima corriente de pico admisible $\hat{I} \leq 100$ veces el valor eficaz de la intensidad nominal del condensador.



Contactores A y AF (A12 ... A300 y AF50 ... AF750)

Máxima corriente de pico admisible $\hat{I} < 30$ veces el valor eficaz de la intensidad nominal del condensador.



10.3 Compensadores automáticos

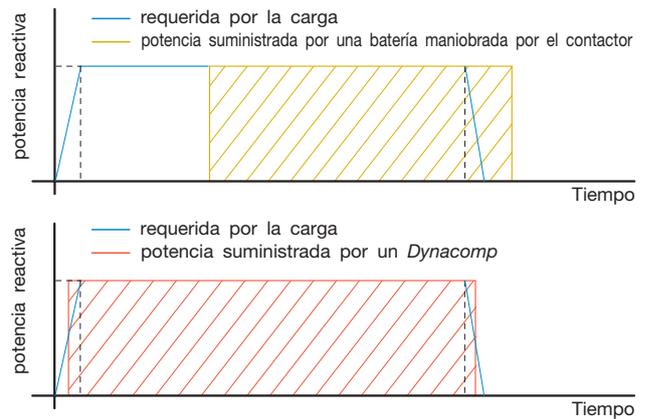
La gama de productos ABB para la corrección automática del factor de potencia incluye:

- la *serie APC*, compensadores estáticos equipados con contactores para la inserción de las baterías de condensadores. Estos dispositivos, disponibles con o sin reactancias de bloqueo, son la solución ideal para la corrección de cargas lentamente variables. Pueden producir una potencia reactiva de 25 a 800 kvar, con factor de potencia programable de 0.7 inductivo a 0.7 capacitivo y con una tensión nominal de hasta 690 V.
- la *serie Dynacomp*, compensadores estáticos constituidos por condensadores e inductores conectados a la red mediante interruptores estáticos de potencia. Los *Dynacomp* están diseñados para satisfacer todas las posibles exigencias relacionadas con las cargas rápidamente variables. Pueden producir una potencia reactiva de hasta 400 kvar por unidad, con una tensión nominal de hasta 690 V.

En los *Dynacomp* los tiristores, montados en antiparalelo, se controlan en tiempos tan cortos que no llegan a causar transitorios elevados de corriente. Además, gracias a este control no se generan armónicos indeseados en la red. Las baterías de condensadores tradicionales están dotadas de resistencias de descarga para limitar la tensión residual una vez que son desconectadas de la red.

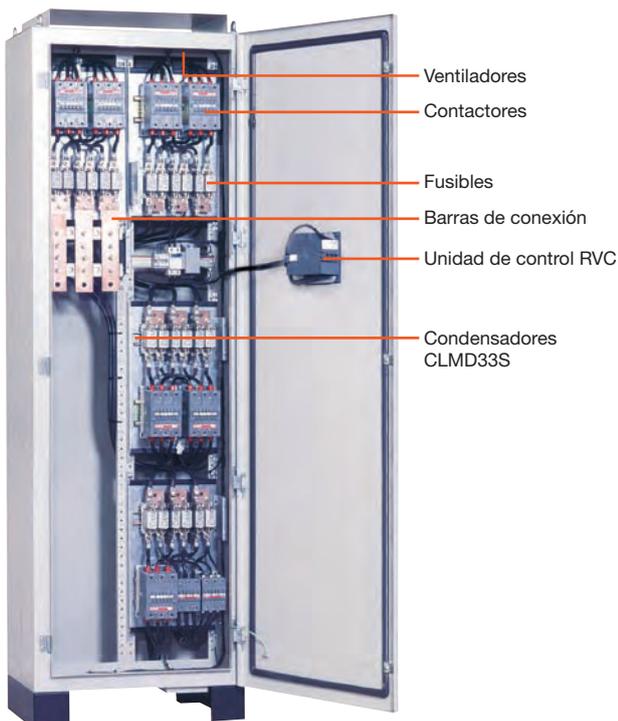
Esta maniobra puede llevar algunos segundos, de manera que la respuesta a los requerimientos de potencia reactiva de la red puede resultar insuficientemente lenta, en especial si hay cargas cuya absorción de potencia reactiva varía frecuentemente.

El mando mediante tiristores y el control del cierre de los mismos, en los *Dynacomp*, acorta bastante el tiempo de respuesta al requerimiento de potencia reactiva, como puede verse en los dos gráficos siguientes.

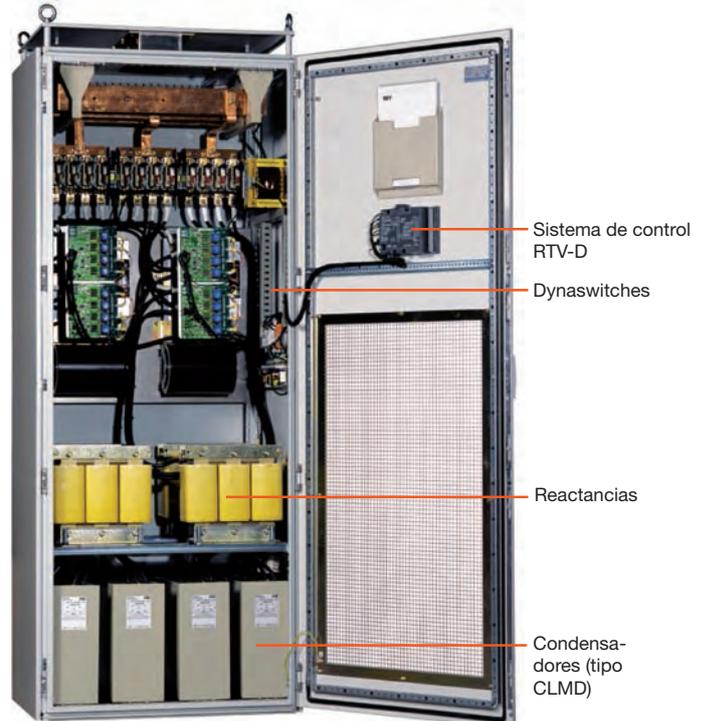


Tal y como ilustra la figura, el *Dynacomp* está compuesto por condensadores, reactancias, dynaswitches y sistemas de control electrónicos. Estos componentes se encuentran encapsulados junto con un aparato auxiliar, conformando un sistema ensamblado y probado.

APC



Dynacomp



El *Dynacomp* ofrece, entre otras cosas, una amplia variación de la tensión de la red, una variación flexible de la potencia, un diseño modular y la elección de las inductancias de desacoplamiento, convirtiéndose en la solución ideal para todas aquellas aplicaciones que requieren un veloz y suave cambio de potencia reactiva.

Los condensadores CLMD están constituidos por una serie de elementos bobinados y por un dieléctrico con película de polipropileno metalizada.

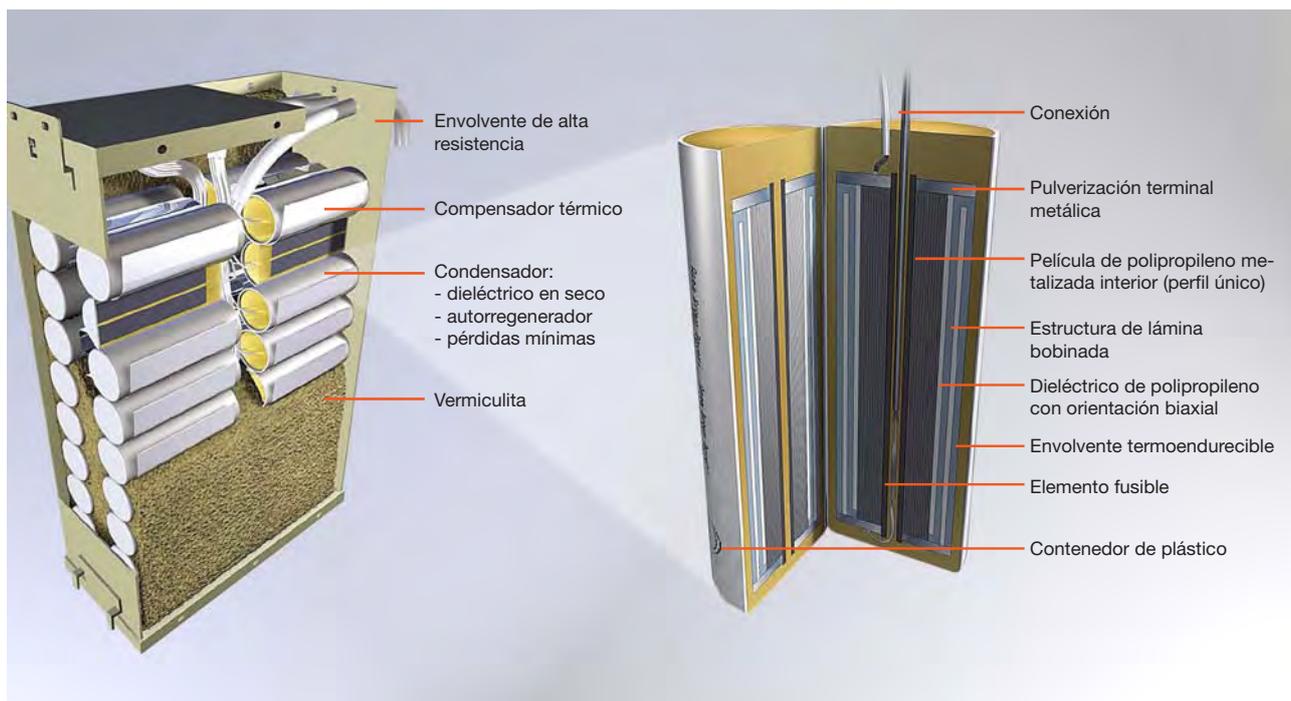
Están equipados con resistencias de descarga (<50 V en un minuto) y pueden utilizarse sin necesidad de instalar otras resistencias de descarga adicionales.

Ofrecen las siguientes ventajas: diseño en seco, de forma que no hay riesgos de dispersión o contaminación del ambiente; la película metalizada de polipropileno garantiza

la capacidad de soportar tensiones elevadas y picos de corriente, una elevada capacidad de autorregeneración, unas pérdidas contenidas y una elevada estabilidad del valor de capacidad.

Los elementos que lo componen, montados en un contenedor de plástico hermético, se someten a un tratamiento en vacío que mejora sus propiedades eléctricas y cada uno de ellos cuenta con un sistema de protección que garantiza un seccionamiento seguro y selectivo al término del ciclo de vida.

Estos elementos vienen montados en el interior de un cilindro de plancha de acero relleno de material inerte y resistente al fuego, conectados (monofásico o trifásico) de manera que suministran la potencia requerida en función de los valores de tensión/frecuencia asignados.



10.4 Filtros PQF

Los filtros PQF (*Power Quality Filters*) de ABB ofrecen la triple función de: filtrado de los armónicos, compensación de la potencia reactiva y balance de carga.

Los PQF, insensibles a grandes cambios de la impedancia de red, monitorizan la corriente de línea en tiempo real y convierten los armónicos medidos en señales digitales; éstas son procesadas por un controlador digital que genera señales de control PWM (*Pulse Width Modulation*, modulación por anchura de pulsos) que controlan desde los convertidores de potencia a los IGBT, los cuales, a través de los condensadores de corriente continua, introducen en la red armónicos de corriente de fase opuesta a la de las componentes que se quieren filtrar.

Además, los PQF ofrecen posibilidad de comunicación: de hecho, dependiendo de si existe o no una red de comunicación por parte del cliente, existen diferentes soluciones: desde contactos digitales de E/S hasta una interfaz de comunicación Modbus RTU.

En las dos figuras siguientes se ilustra el principio de funcionamiento.

La función de balance de carga permite repartir de manera ecuánime la corriente de carga en las tres fases, reduciendo la corriente que circula en el neutro.

El sistema de compensación de la energía reactiva permite compensar con precisión el factor de potencia prefijado, tanto para cargas inductivas como capacitivas.

El sistema de control de anillo cerrado ofrece como ventaja adicional un funcionamiento preciso y fiable, sin la necesidad de utilizar dispositivos especiales de medida.

Las principales ventajas técnicas de los PQF son:

- filtrado de hasta 20 armónicos simultáneamente;
- filtrado de hasta el quincuagésimo armónico;
- factor de atenuación de armónico superior al 97%;
- funcionamiento en anillo cerrado para una mayor precisión;
- autoadaptación a la variación de la impedancia de red;
- posibilidad de filtrado sin generación de potencia reactiva;
- posibilidad de generación de potencia reactiva y control del factor de potencia;
- posibilidad de balance de carga entre las fases y entre fases y neutro.

Figura 10.2

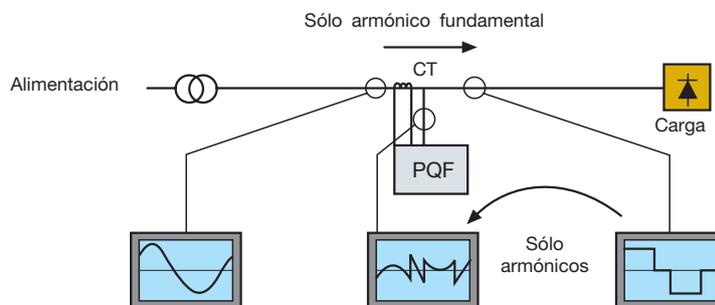


Figura 10.3



Los PQF se dividen en:

- **PQFI – Filtros activos para grandes cargas industriales**
Se trata de filtros activos para redes trifásicas con o sin neutro para filtrado de armónicos no homopolares y para corrección con balance de carga. La figura muestra el cuadro que compone el PQFI, con sus principales componentes y sus características técnicas más notables.

Estos filtros presentan las siguientes características técnicas principales:

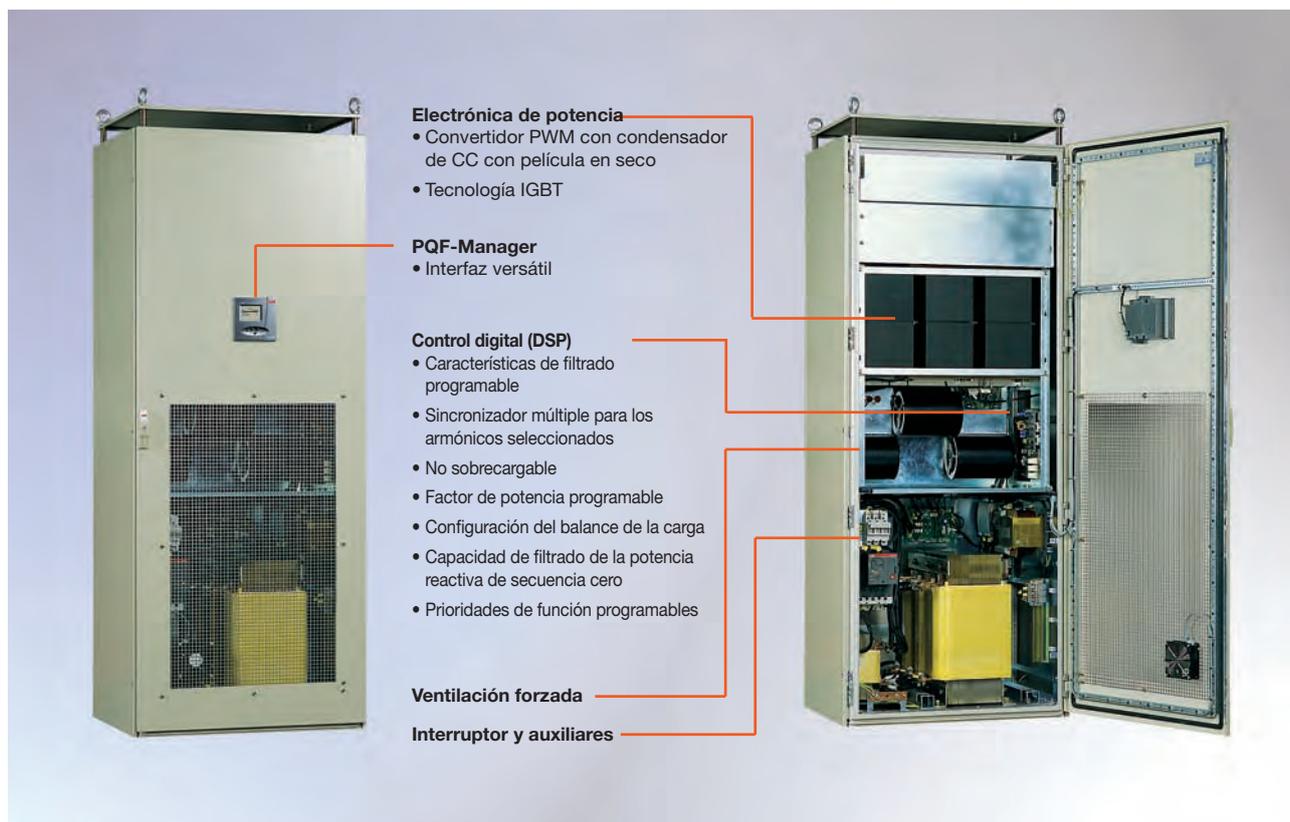
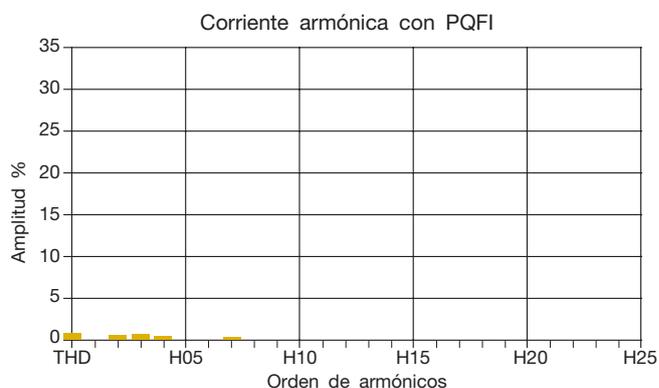
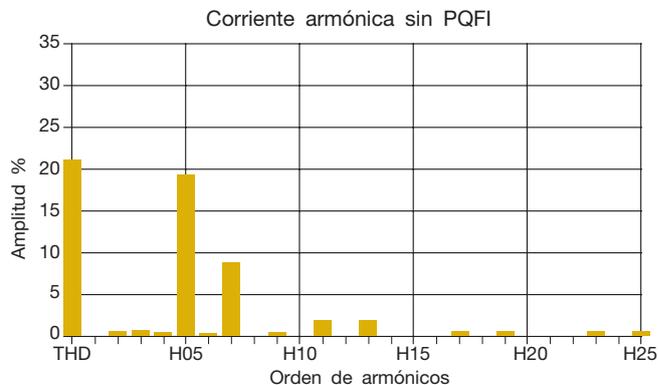
- Intensidad nominal:

208 V ≤ U ≤ 480 V	480 V ≤ U ≤ 690 V
250 A	180 A*
450 A	320 A*

* si la tensión nominal es superior a 600 V, la intensidad nominal de la unidad de PQFI puede reducirse automáticamente según las condiciones de carga para una temperatura ambiente superior a 30 °C.

- Armónicos filtrables: 20 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo.
- Potencia reactiva: factor de potencia objetivo programable de 0.6 inductivo a 0.6 capacitivo.

Resultado típico de una aplicación con PQFI



- **PQFM – Filtros activos para cargas industriales de potencia limitada.** Filtros activos para redes trifásicas con o sin neutro para filtrado de armónicos no homopolares y para corrección con balance de carga.

Estos filtros presentan las siguientes características técnicas principales:

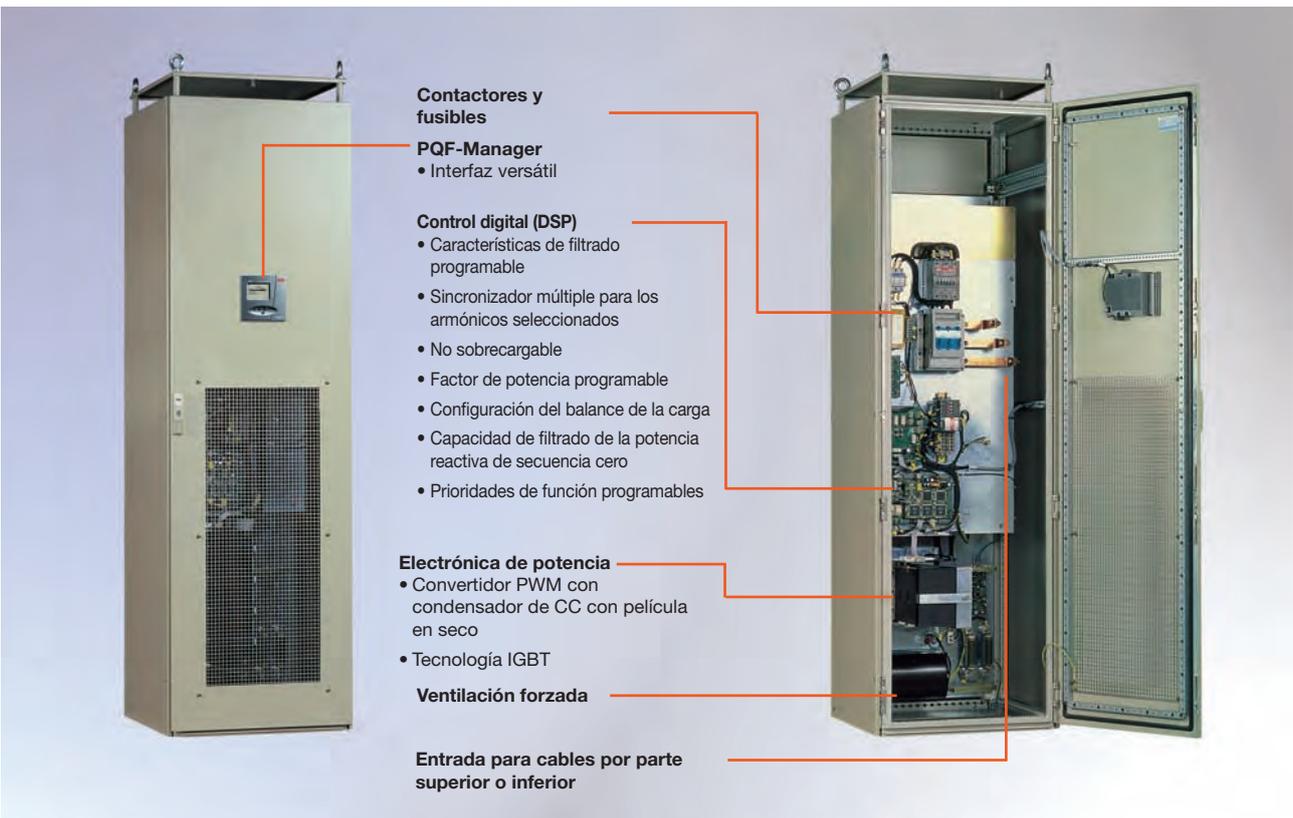
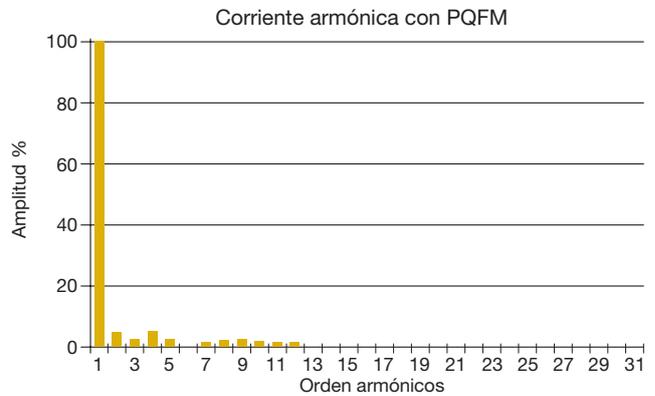
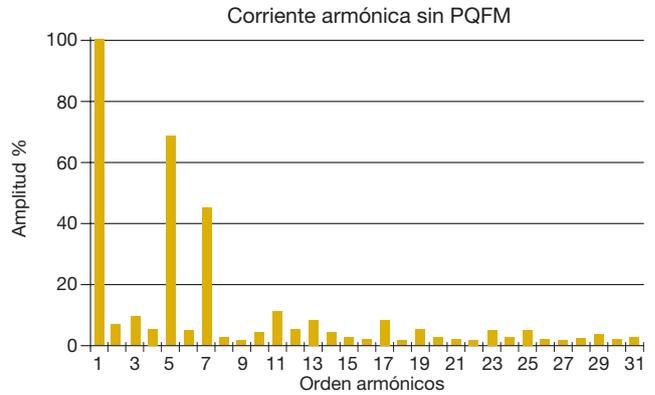
- Intensidad nominal:

208 V ≤ U ≤ 480 V	480 V ≤ U ≤ 690 V
70 A	100 A*
100 A	-
130 A	-
150 A	-

* si la tensión nominal es superior a 600 V, la intensidad nominal de la unidad de PQFM puede reducirse automáticamente según las condiciones de carga para una temperatura ambiente superior a 30 °C.

- Armónicos filtrables: 20 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo.
- Potencia reactiva: factor de potencia objetivo programable de 0.6 inductivo a 0.6 capacitivo.

Resultado típico de una aplicación con PQFM



- **PQFK – Filtros activos para cargas comerciales con armónicos homopolares en el neutro.**
Filtros activos para redes trifásicas con cable de neutro, para el filtrado de armónicos, incluidos los armónicos homopolares, para la compensación de la potencia reactiva y para el balance fase/fase y fase/neutro.

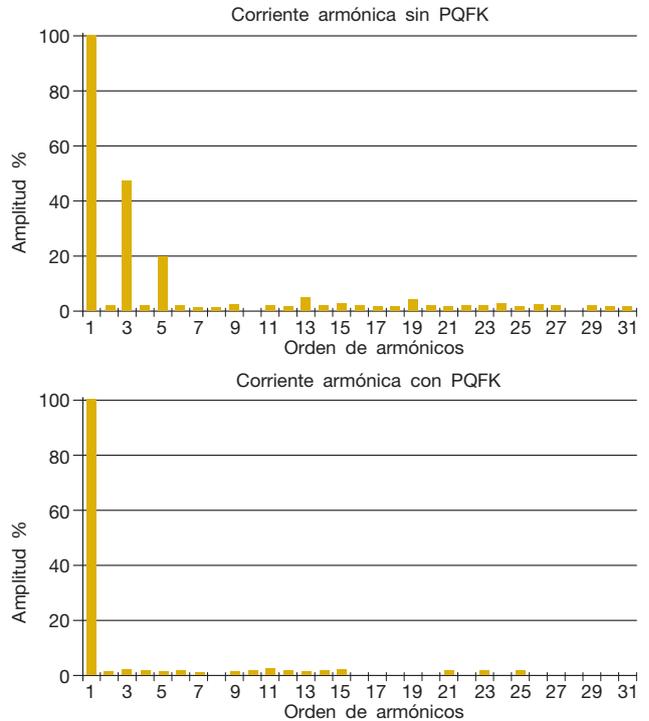
Estos filtros presentan las siguientes características técnicas principales:

- Intensidad nominal:

208 V ≤ U ≤ 415 V
70 A
100 A

- Armónicos filtrables: 15 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo.
- Potencia reactiva: factor de potencia objetivo programable de 0.6 inductivo a 0.6 capacitivo.

Resultado típico de una aplicación con PQFK



- **PQFS – Filtros activos para cargas comerciales, de uso doméstico y para luces industriales, con o sin neutro.**
Filtros activos para redes trifásicas con o sin cable de neutro, para el filtrado de armónicos incluidos los armónicos homopolares, para la compensación de la potencia reactiva y para el balance entre fases y entre fase y neutro.

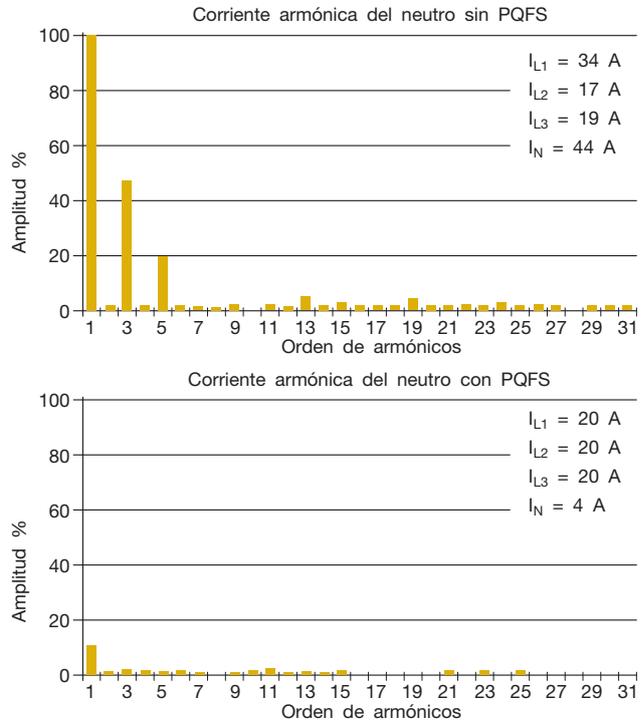
Estos filtros presentan las siguientes características técnicas principales:

- Intensidad nominal:

208 V ≤ U ≤ 240 V	380 V ≤ U ≤ 415 V
30 A	30 A
45 A	45 A
60 A	60 A
70 A	70 A
80 A	80 A
90 A	90 A
100 A	100 A

- Armónicos filtrables:
 - conexión tripolar: 20 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo;
 - conexión tetrapolar: 15 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo.
- Potencia reactiva: factor de potencia objetivo programable de 0.6 inductivo a 0.6 capacitivo.

Resultado típico de una aplicación con PQFS





Versión compacta de pared apta para el funcionamiento con 3 o 4 hilos

PQF-Manager

- Interfaz versátil

Control digital (DSP)

- Características de filtrado programable
- Sincronizador múltiple para los armónicos seleccionados (incluida la secuencia homopolar)
- No sobrecargable
- Factor de potencia programable
- Configuración del balance de la carga
 - Fase/fase
 - Fase/neutro
- Capacidad de filtrado de la potencia reactiva de secuencia cero
- Prioridades de función programables

Electrónica de potencia

- Convertidor PWM con condensador de CC con película en seco
- Tecnología IGBT

Entrada de cables por parte inferior

Anexo A

Tablas de selección de interruptores y contactores

Las siguientes tablas determinan la coordinación entre los interruptores en caja moldeada de la serie Tmax y los contactores ABB para maniobra y protección de baterías de condensadores de hasta 400 kvar de potencia. Se presupone una corriente prevista de cortocircuito de 50 kA para tensiones de hasta 500 V y de 10 kA para tensiones de 690

V, con una coordinación de tipo 2¹.

Las corrientes asignadas del interruptor y del contactor se determinan en función de la corriente máxima que puede absorber la batería de condensadores (I_{cmax}), según lo establecido por la norma IEC EN 60831-1 A1.

Es necesaria la instalación de inductancias de limitación con objeto de reducir la corriente de inserción.

¹ Nótese que en la coordinación de tipo 2 se permite la soldadura de los contactos del contactor siempre que sean fácilmente separables (por ejemplo, con un destornillador) sin deformación significativa.

Tabla A.1

Coordinación tipo 2 interruptor-contactor para inserción de baterías de condensadores a 400 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruptor Tmax	I_n [A]	Contactador
10	14	21	T2S160 TMD 25	25	A30
15	22	31	T2S160 TMD 40	40	A/AF50
20	29	41	T2S160 TMD 50	50	A/AF50
30	43	62	T2S160 TMD 80	80	A/AF63
40	58	83	T2S160 TMD 100	100	A/AF63
50	72	103	T2S160 TMD 125	125	A/AF95
60	87	124	T2S160 TMD 160	160	A/AF95
70	101	144	T2S160 TMD 160*	160	A/AF110
80	115	165	T3S250 TMD 200	200	A/AF145
90	130	186	T3S250 TMD 200	200	A/AF145
110	159	217	T3S250 TMD 250	250	A/AF185
130	188	256	T4S320 PR221LI In=320	320	A/AF210
150	217	296	T4S320 PR221LI In=320	320	A/AF260
180	260	355	T5S400 PR221LI In=400	400	AF400
200	289	394	T5S400 PR221LI In=400	400	AF400
250	361	493	T6S630 PR221LI In=630	630	AF580
280	404	552	T6S630 PR221LI In=630	630	AF580
300	433	591	T6S630 PR221LI In=630	630	AF750
350	505	690	T6S800 PR221LI In=800	800	AF750
400	577	788	T6S800 PR221LI In=800	800	AF750

* Para la ejecución enchufable, disminuir en un 10% la potencia de la batería de condensadores

Tabla A.2

Coordinación tipo 2 interruptor-contactor para inserción de baterías de condensadores a 440 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruptor Tmax	I_n [A]	Contactador
10	13	19	T2H160 TMD 25	25	A/AF50
15	20	28	T2H160 TMD 32	32	A/AF50
20	26	38	T2H160 TMD 40	40	A/AF50
30	39	56	T2H160 TMD 63	63	A/AF50
40	52	75	T2H160 TMD 100	100	A/AF95
50	66	94	T2H160 TMD 125	125	A/AF95
60	79	113	T2H160 TMD 125	125	A/AF95
70	92	131	T2H160 TMD 160	160	A/AF110
80	105	150	T2H160 TMD 160*	160	A/AF145
90	118	169	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF145
110	144	197	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF185
130	171	233	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF210
150	197	269	T4H320 PR221LI In=320	320	A/AF260
180	236	322	T5H400 PR221LI In=400	400	A/AF300
200	262	358	T5H400 PR221LI In=400	400	AF400
250	328	448	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
280	367	502	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
300	394	537	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
350	459	627	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750
400	525	716	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750

* Para la ejecución enchufable, disminuir en un 10% la potencia de la batería de condensadores

Tabla A.3

Coordinación tipo 2 interruptor-contactor para inserción de baterías de condensadores a 500 V, 50 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruptor Tmax	I_n [A]	Contactador
10	12	17	T2L160 TMD 20	20	A/AF50
15	17	25	T2L160 TMD 32	32	A/AF50
20	23	33	T2L160 TMD 40	40	A/AF50
30	35	50	T2L160 TMD 63	63	A/AF63
40	46	66	T2L160 TMD 80	80	A/AF75
50	58	83	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
60	69	99	T2L160 TMD 125	125	A/AF95
70	81	116	T2L160 TMD 125	125	A/AF95
80	92	132	T2L160 TMD 160	160	A/AF110
90	104	149	T2L160 TMD 160*	160	A/AF145
110	127	173	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF145
130	150	205	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF185
150	173	236	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF210
180	208	284	T4H320 PR221LI In=320	320	A/AF260
200	231	315	T5H400 PR221LI In=400	400	A/AF300
250	289	394	T5H400 PR221LI In=400	400	AF400
280	323	441	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
300	346	473	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
350	404	552	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
400	462	630	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750

* Para la ejecución enchufable, disminuir en un 10% la potencia de la batería de condensadores

Tabla A.4

Coordinación tipo 2 interruptor-contactor para inserción de baterías de condensadores a 690 V, 10 kA

Q_c [kvar]	I_{cn} [A]	I_{cmax} [A]	Interruptor Tmax	I_n [A]	Contactador
10	8	12	T2L160 TMD 16	16	A/AF50
15	13	18	T2L160 TMD 20	20	A/AF50
20	17	24	T2L160 TMD 25	25	A/AF50
30	25	36	T2L160 TMD 40	40	A/AF50
40	33	48	T2L160 TMD 50	50	A/AF63
50	42	60	T2L160 TMD 63	63	A/AF63
60	50	72	T2L160 TMD 80	80	A/AF75
70	59	84	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
80	67	96	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
90	75	108	T2L160 TMD 125	125	A/AF110
110	92	126	T2L160 TMD 160	160	A/AF145
130	109	148	T2L160 TMD 160*	160	A/AF185
150	126	171	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF210
180	151	206	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF260
200	167	228	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF260
250	209	286	T4N320 PR221LI In=320	320	AF400
280	234	320	T5N400 PR221LI In=400	400	AF400
300	251	343	T5N400 PR221LI In=400	400	AF400
350	293	400	T6N630 PR221LI In=630	630	AF460
400	335	457	T6N630 PR221LI In=630	630	AF580

* Para la ejecución enchufable, disminuir en un 10% la potencia de la batería de condensadores

En la siguiente tabla se utiliza la siguiente simbología relativa a la maniobra y la protección de condensadores mediante interruptores abiertos:

- N_{mec} número de maniobras mecánicas;
- f_{mec} frecuencia de maniobra para las maniobras mecánicas [op/h];
- N_{el} número de maniobras eléctricas referentes a una tensión de 440 V;
- f_{el} frecuencia de maniobras para las maniobras eléctricas [op/h].

En este caso, dado el gran tamaño de la batería de condensadores, no se tiene en cuenta la maniobra de inserción mediante contactor sino la maniobra directa

mediante interruptor, debido también a que el número de maniobras deberá ser limitado y, por tanto, el propio interruptor abierto podrá controlarlas.

Por otro lado, no se fija un valor concreto de la corriente prevista de cortocircuito y, por consiguiente, para cada valor de la potencia nominal de la batería se ofrecen los diferentes poderes de corte de cada interruptor.

También en este caso, si la corriente de inserción resulta excesiva, es preciso instalar inductancias de limitación.

Tabla A.5

Interruptor	I_{CBn} [A]	I_{cn} [A]	Q_c [kvar]				N_{mec}	f_{mec} [op/h]	N_{el}	f_{el} [op/h]
			400 V	440 V	500 V	690 V				
X1 B-N	630	421	291	320	364	502	12500	60	6000	30
X1 B-N	800	533	369	406	461	637	12500	60	6000	30
X1 B-N	1000	666	461	507	576	795	12500	60	4000	30
X1 B-N	1250	834	578	636	722	997	12500	60	4000	30
X1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	12500	60	3000	30
E1 B-N	800	533	369	406	461	637	25000	60	10000	30
E1 B-N	1000	666	461	507	576	795	25000	60	10000	30
E1 B-N	1250	834	578	636	722	997	25000	60	10000	30
E1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	10000	30
E2 B-N-S	800	533	369	406	461	637	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1000	666	461	507	576	795	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1250	834	578	636	722	997	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	12000	30
E2 B-N-S	2000	1334	924	1017	1155	1594	25000	60	10000	30
E3 N-S-H-V	800	533	369	406	461	637	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1000	666	461	507	576	795	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1250	834	578	636	722	997	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1600	1067	739	813	924	1275	20000	60	10000	20
E3 N-S-H-V	2000	1334	924	1017	1155	1594	20000	60	9000	20
E3 N-S-H-V	2500	1667	1155	1270	1444	1992	20000	60	8000	20
E3 N-S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	20000	60	6000	20
E4 S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	15000	60	7000	10
E6 H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	12000	60	5000	10

Anexo B

Potencia reactiva con la variación de tensión

La potencia reactiva suministrada por una batería trifásica de condensadores conectados en triángulo o en estrella viene dada respectivamente por:

$$Q_{c\Delta} = 3 \cdot \frac{U_n^2}{X_c} \quad Q_{cY} = \frac{U_n^2}{X_c} \quad [B.1]$$

Para modificar la potencia reactiva producida, una vez fijada la tensión, es necesario cambiar los valores de reactancia capacitiva X_c y en consecuencia las capacidades de los condensadores insertados. En cambio, una vez fijada la capacidad de la batería de condensadores, la potencia reactiva varía con el cuadrado de la tensión.

Efectuando un dimensionamiento para tener una potencia reactiva prefijada Q_{c1} con un valor de tensión U_{n1} , con un valor U_{n2} la potencia reactiva varía según la relación⁷:

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 \quad [B.2]$$

Válida independientemente del tipo de conexión de la batería de condensadores.

En cambio, si se quiere mantener constante la potencia reactiva producida al variar la tensión, es preciso cambiar la capacidad de los condensadores según la relación:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2 \quad [B.3]$$

Presuponiendo una variación de la tensión de alimentación dentro de los límites del $\pm 10\%$ del valor nominal, cuando se pretenda lograr un factor de potencia de 0.9 también con el valor mínimo de tensión, hay que dimensionar la batería de condensadores (a igual potencia reactiva requerida por la carga) con una capacidad aproximada del 124% de la que se tendría con tensión nominal. Por tanto, de la relación anterior:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{0.9 \cdot U_{n1}} \right)^2 \rightarrow C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{1}{0.81} \right) \rightarrow C_2 = 1.24 \cdot C_1 \quad [B.4]$$

Sin embargo, con dicho valor de capacidad es necesario verificar que cuando la tensión aumenta más de un 10% respecto al valor nominal, la potencia reactiva generada no supera la requerida por la carga.

Para ello se toma un factor de potencia² igual a 0.9 con tensión al 90% de la tensión nominal y se expresa la potencia activa P absorbida por la carga, que no varía, en función de las potencias reactivas Q (de carga) y Q_c (de corrección)³:

$$Q - Q_{c_{90\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi \rightarrow P = \frac{Q - Q_{c_{90\%}}}{0.49} = \frac{Q - Q_c}{0.49} \quad [B.5]$$

Con tensión igual o superior al 10% y con una capacidad igual o superior al 24%, presuponiendo una conexión en triángulo, la potencia reactiva resulta:

$$Q_{c_{110\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = \dots \quad [B.6]$$

$$\dots \rightarrow 1.24 \cdot 1.1^2 \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot V_n^2 = 1.5 \cdot Q_c$$

Para no introducir potencia reactiva en la red debe ser:

$$Q - Q_{c_{110\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi' \rightarrow \operatorname{tg}\varphi' = \frac{Q - Q_{c_{110\%}}}{P} > 0 \quad [B.7]$$

Sustituyendo P por la expresión [B.5] e introduciendo la [B.6] se obtiene:

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c)}{Q - Q_c} > 0 \quad [B.8]$$

Ya que el denominador es positivo para el dimensionamiento, la relación es positiva si también lo es el numerador, es decir:

$$0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.66 \cdot Q \quad [B.9]$$

Por tanto, se determina inicialmente el valor de Q_c para efectuar la corrección al valor de la tensión nominal; se extrae el correspondiente valor de capacidad C_1 y se multiplica por 1.24 para obtener el valor real de la capacidad cuando se quiere compensar al valor mínimo de la variación de tensión; por último, por medio de la desigualdad [B.9] se verifica que con un aumento del 10% de la tensión de alimentación no tendría lugar la introducción de potencia reactiva en la red.

Si se compensa al 100% de la tensión nominal, como sucede normalmente, en vez de al 90%, la relación [B.6] pasa a ser:

$$Q_{c_{100\%}} = 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = 1.21 \cdot Q_c \quad [B.10]$$

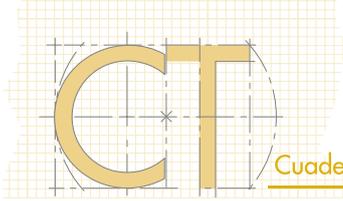
y, consecuentemente, la [B.9], para no verter potencia reactiva en la red, pasa a ser:

$$0.49 \cdot (Q - 1.21 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.83 \cdot Q \quad [B.11]$$

⁷ $Q_{c1} = 3 \frac{U_{n1}^2}{X_c}$ $Q_{c2} = 3 \frac{U_{n2}^2}{X_c}$
tomando la reactancia capacitiva como invariable e igualando las dos relaciones se obtiene la [B.2]

² $\cos\varphi = 0.9 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi = 0.49$

³ $Q_{c_{90\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (0.9 \cdot V_n)^2 = Q_c$



Anexo C

Filtrado y corrección del factor de potencia en régimen deformado

C.1 Introducción

Las instalaciones de las aplicaciones actuales conllevan a menudo la presencia de cargas no lineales que generan armónicos de corriente, lo que puede dar origen a condiciones que necesiten una compensación en régimen no sinusoidal.

Si la presencia de armónicos supera los niveles aceptables, teniéndose que proceder a la inserción de filtros L-C para compensar uno o más de los mismos, se puede aprovechar la capacidad de corrección a la frecuencia fundamental de dichos filtros ya que, debidamente dimensionados, pueden suministrar íntegramente la potencia reactiva requerida, evitándose así la instalación de baterías de condensadores específicas.

A continuación se analizarán y desarrollarán, también por medio de un ejemplo de aplicación, dichas condiciones de funcionamiento y el respectivo dimensionamiento de los filtros; para ello, preliminarmente se presentarán algunas fórmulas y definiciones de magnitudes útiles para el análisis en cuestión.

C.2 Análisis de las magnitudes en régimen deformado

Según el desarrollo en serie de Fourier, una magnitud periódica generalmente continua y limitada puede expresarse por medio de la relación:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sin nx) \quad [C.1]$$

donde el primer término de la ecuación representa el valor medio de la función en un periodo T, es decir:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) \cdot dx \quad [C.2]$$

mientras que los coeficientes a_n y b_n de la serie son determinados mediante:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \cos nx \cdot dx \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \sin nx \cdot dx \quad [C.3]$$

El desarrollo en serie de Fourier también puede ser expresado únicamente en términos de cosenos del modo siguiente (en el ámbito del tiempo):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad [C.4]$$

Pasando de magnitudes genéricas a magnitudes eléctricas alternas (valor medio nulo $\frac{a_0}{2} = 0$), como son las tensiones y corrientes, éstas, en régimen deformado, pueden venir expresadas en la serie de armónicos con frecuencias que son múltiplos de la fundamental según las relaciones¹:

$$v = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad i = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k - \varphi_k) \quad [C.5]$$

cuyos valores eficaces de fase, se definen como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de cada armónico:

$$V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \quad I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.6]$$

Para obtener información acerca del contenido armónico de las formas de onda de la tensión y la corriente, y para poder adoptar medidas cuando dichos valores sean elevados, hay que definir la tasa de *distorsión armónica total THD (Total Harmonic Distorsion)*:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad \text{THD en corriente} \quad [C.7]$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad \text{THD en tensión} \quad [C.8]$$

Si $THD_i < 10\%$ y $THD_v < 5\%$, la tasa armónica es considerada aceptable y no es necesario tomar medidas; en caso contrario, se puede prever el uso de uno o más filtros para los armónicos de amplitud mayor con objeto de devolver los valores de las tasas de distorsión armónica a los límites aceptables.

¹ El ángulo φ_k representa el desfase del k-ésimo armónico de corriente respecto al k-ésimo armónico de tensión.

C.3 Potencias en régimen deformado

En régimen deformado, tiene lugar una ampliación de la definición de potencias en régimen sinusoidal. De hecho, la *potencia aparente total* S , indicadora del riesgo térmico al cual está sometido un componente eléctrico de un sistema trifásico, se define del modo siguiente:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.9]$$

Cuando existen armónicos de tensión y corriente superpuestos al armónico fundamental, las *potencias activa* P y *reactiva* Q pasan a expresarse así²:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad [C.10]$$

a partir de lo cual la *potencia aparente* A se define así:

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [C.11]$$

Dicha potencia difiere de la potencia aparente total definida en la [C.9]; en este caso, equivale a la relación:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad [C.12]$$

donde el término D (definido como *potencia deformadora*) tiene en cuenta la deformación de las formas de onda de tensión y corriente³.

La suma de los cuadrados de la potencia reactiva Q y de la potencia deformadora D , es igual al cuadrado de la *potencia no activa* N :

$$N^2 = Q^2 + D^2 \quad [C.13]$$

Se define como no activa debido a que también es igual a la diferencia de los cuadrados de la potencia aparente total S y de la potencia activa P :

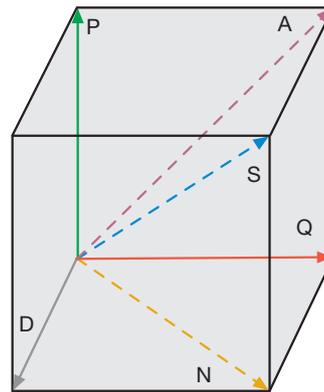
$$N^2 = S^2 - P^2 \quad [C.14]$$

² Según la teoría de Budeanu, las potencias activa y reactiva absorbidas por una carga en presencia de distorsiones armónicas son la suma de las potencias en el armónico k -ésimo, donde sólo se encuentran los productos de tensión y corriente del mismo armónico y no productos "mixtos" de armónicos diferentes.

³ Las potencias aparentes S y A difieren debido a que la primera, por definición, tiene también en cuenta los productos "mixtos" entre armónicos diferentes de los valores eficaces de tensión y corriente.

La interpretación gráfica de la figura C.1, una reproducción tridimensional del triángulo bidimensional de las potencias en régimen sinusoidal, puede ayudar a aclarar el concepto. Como puede verse, P , Q y D representan los vértices de un paralelepípedo que tiene en S su diagonal principal, en A la diagonal de la cara que tiene por aristas P y Q , y en N la diagonal de la cara que tiene por aristas Q y D .

Figura C.1



Por la línea de alimentación de un receptor, que funciona con una potencia activa P , en régimen deformado transita la corriente definida en [C.6], con una tensión definida en la misma, por tanto, el *factor de desfase total* $\cos \phi$ entre la potencia activa P y aparente total S en la red es por definición:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad [C.15]$$

En la corrección se hace referencia a dicha magnitud pre-fijando como objetivo el valor 0.9; de esta forma, a igual potencia activa absorbida por la carga, la potencia aparente total de la red disminuye y, en consecuencia, también la corriente que la transita. El factor de desfase total es una ampliación al régimen deformado del habitual *factor de potencia* $\cos \varphi$ del régimen sinusoidal, que también en este caso es igual a:

$$\cos \varphi = \frac{P}{A} \quad [C.16]$$

Si no hay deformación de las formas de onda de tensión y corriente, los factores que aparecen en las dos ecuaciones anteriores coinciden; por el contrario, en presencia de armónicos, éstos difieren según la relación:

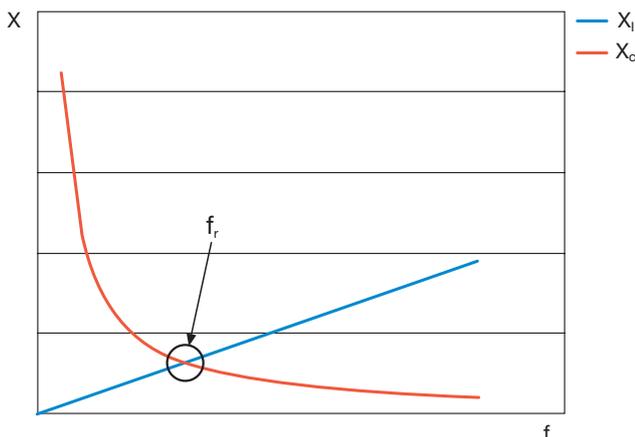
$$\cos \phi = \cos \varphi \cdot \cos \psi \quad [C.17]$$

donde el *factor de deformación* $\cos \psi$ tiene en cuenta la presencia de la potencia deformadora y se define como:

$$\cos \psi = \frac{A}{S} \quad [C.18]$$

C.4 Filtros L-C con funciones de condensador

Tomando en consideración un ramal de un filtro L-C serie pasivo resonante a una determinada frecuencia, pueden representarse gráficamente (véase la siguiente ilustración) las reactivancias capacitiva e inductiva relativas a esa frecuencia.



Tal y como se muestra en el gráfico, puede considerarse que por debajo de la *frecuencia de resonancia*⁴ $f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ predomina la reactivancia capacitiva y, consecuentemente, la potencia reactiva producida respecto a la absorbida, es decir:

$$Q = Q_L - Q_C = \omega \cdot L \cdot I^2 - \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I^2 < 0 \quad [C.19]$$

Por tanto, utilizando filtros pasivos para el filtrado de los armónicos de corriente de las frecuencias de resonancia, se obtiene la corrección a las frecuencias inferiores y, por este motivo, es preciso tener en cuenta los filtros para el dimensionamiento de las baterías de condensadores. En otras palabras, en el dimensionamiento de los filtros L-C se pueden seleccionar al mismo tiempo valores de inductancia y de capacidad, de manera que la suma de la potencia reactiva generada en el armónico fundamental por todos los filtros instalados corresponda a la potencia reactiva requerida para corregir a 0.9 el factor de desfase total de la red aguas arriba.

Con frecuencias mayores a las de resonancia predomina el efecto inductivo, pero la amplitud de los armónicos presentes en la forma de onda de corriente distorsionada, en las aplicaciones comunes, disminuye al aumentar la frecuencia; consecuentemente, la potencia reactiva absorbida por el filtro por encima de la frecuencia de resonancia disminuye al aumentar el orden de armónicos

⁴ La frecuencia de resonancia es un determinado valor de frecuencia para el que las reactivancias inductiva y capacitiva coinciden (véase cap. 8). En la fórmula:

$$X_L = X_C \rightarrow 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \rightarrow 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C = 1 \rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

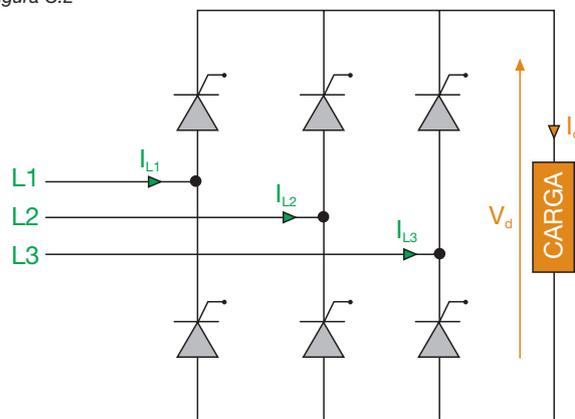
Si la inductancia y la capacidad están en serie, tiene lugar la anulación de la impedancia total y, por tanto, un cortocircuito por el armónico de corriente con frecuencia igual a la de resonancia. Por el contrario, si la inductancia y la capacidad están en paralelo, la impedancia total tiende idealmente al infinito con una consecuente sobretensión en los extremos.

y, además, con frecuencias superiores, la batería de compensación actúa en la red como una inductancia, eliminando la posibilidad de resonancia en paralelo con la inductancia de red.

Ejemplo de aplicación

Supongamos que se tiene que alimentar un rectificador estático trifásico de puente de Graetz totalmente controlado⁵, mediante una red de alimentación a 50 Hz con una potencia de cortocircuito lo suficientemente elevada como para poder despreciarse la distorsión de las tres tensiones, causada por la corriente distorsionada introducida en la red por el rectificador.

Figura C.2



La corriente en cada fase de la línea (presuponiendo un valor elevado de la inductancia en continua) posee una forma de onda rectangular con frecuencia, del armónico fundamental, igual a la de la tensión sinusoidal. El desarrollo en serie de Fourier de esta forma de onda sólo proporciona armónicos⁶ de orden $k = 6n \pm 1$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), cuya amplitud teórica es inversamente proporcional al orden k de armónicos⁷, o sea:

$$I_k = \frac{I_1}{k} \quad [C.20]$$

donde I_1 es la amplitud del armónico fundamental (en el caso supuesto, 50 Hz).

Puesto que, según la hipótesis inicial, la forma de onda de tensión no sufre distorsión, su desarrollo en serie se reduce únicamente en el armónico fundamental y, conse-

⁵ Esto significa que, tal y como se muestra en la figura, todas las válvulas de silicio son tiristores, los cuales pueden ser controlados con un retardo del cierre (ángulo de control de fase α); de esta forma, es posible cambiar el valor de la tensión rectificadora V_d y los valores de potencia P según las relaciones:

$$V_d = V_{do} \cdot \cos \alpha \quad P = P_{do} \cdot \cos \alpha$$

donde V_{do} y P_{do} son respectivamente el valor medio de la tensión rectificadora y la potencia en continua en ausencia de control de fase ($\alpha = 0$).

El efecto en alterna del ángulo de control de fase α causa un desfase φ entre tensión y corriente, lo que conlleva una absorción de potencia reactiva Q . A este respecto, se tiene en cuenta la relación ($\alpha = \varphi$).

⁶ Depende del tipo de puente rectificador (monofásico, trifásico, hexafásico) y del tipo de control (no controlado, semicontrolado o híbrido, totalmente controlado).

⁷ En la práctica, la conmutación no instantánea y un ángulo de control de fase no nulo reducen la amplitud de los armónicos respecto al valor teórico.

cuentemente, las potencias activa y reactiva absorbidas por el rectificador (supuesto sin pérdidas), calculadas según [C.10], son iguales a⁸:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_1 = V_{do} \cdot I_d \cdot \cos \alpha = P_d \quad [C.21]$$

$$Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \alpha = Q_1 \quad [C.22]$$

donde:

V_{do} valor de la tensión en continua;

I_d valor de la corriente en continua.

A dichas potencias corresponde una potencia aparente:

$$A = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = A_1 \quad [C.23]$$

Dado que la potencia aparente total en la red de alimentación es igual a:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{V_1^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.24]$$

se da la presencia de una potencia deformadora debida a la forma de onda distorsionada de corriente:

$$D = \sqrt{S^2 - A_1^2} \quad [C.25]$$

Supongamos que el puente rectificador tiene una potencia nominal P_{do} suministrada en continua de 140 kW y es alimentado por una red con tensión nominal no distorsionada $U_n = 400$ V.

Presuponiendo que la conmutación sea instantánea y que el ángulo de control de fase α sea tal que $\cos \varphi = \cos \alpha = 0.8$, se obtienen los siguientes valores de potencias en alterna:

$$P = P_d = P_{do} \cdot \cos \alpha = 140 \cdot 0.8 = 112 \text{ kW}$$

a partir de los cuales se obtiene una corriente de primer armónico:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{112 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 202 \text{ A}$$

y, como resultado, una potencia reactiva y aparente⁹:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 202 \cdot 0.6 = 84 \text{ kvar}$$

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} = 140 \text{ kVA}$$

⁸ No existiendo armónicos de orden superior en la tensión, son nulos todos los sumandos de la sumatoria para $k > 1$. Además, puesto que el ángulo de desfase φ y el ángulo de control de fase α (instante en el que se ordena el cierre de los tiristores) coinciden, puede constatar que al aumentar éste último aumenta la absorción de potencia reactiva por parte del puente.

⁹ $\cos \varphi = 0.8 \rightarrow \varphi = 36.9^\circ \rightarrow \sin \varphi = 0.6$

Desarrollando en serie de Fourier la forma de onda distorsionada de la corriente en alterna se obtienen, según [C.20], los siguientes valores de amplitudes de los armónicos (considerando hasta el armónico 25):

Tabla C.1

k	I_k [A]	I_k/I_1 %
1	202	100
5	40	20
7	29	14
11	18	9
13	15	8
17	12	6
19	11	5
23	9	4
25	8	4

Por tanto, aguas arriba en la red circularía, en ausencia de filtros para los armónicos, una corriente con valor eficaz total igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores eficaces de los distintos armónicos ilustrados en la tabla anterior:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{25} I_k^2} = 210 \text{ A}$$

con una potencia aparente total:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 210 = 146 \text{ kVA}$$

y una tasa de distorsión armónica total igual a:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=5}^{25} I_k^2}}{I_1} = 29\%$$

Por consiguiente, se tendría un factor de deformación

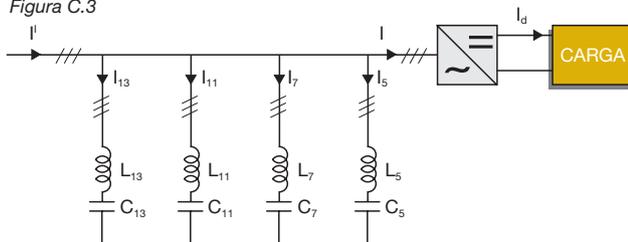
$$\cos \psi = \frac{A}{S} = 0.96 \text{ y un factor de desfase aguas arriba en la}$$

red $\cos \phi = \cos \varphi \cdot \cos \psi = 0.8 \cdot 0.96 = 0.77$.

El objetivo que se propone es obtener un factor de desfase total igual a $\cos \phi' = 0.9$ y se establece, para tal fin, dimen-

cionar e insertar en paralelo filtros L-C para el 5^{to}, 7^{mo}, 11^{mo} y 13^{er} armónico, tal y como se ilustra en la siguiente figura.

Figura C.3



El valor del $\cos\varphi'$ final será, por tanto, superior a 0.9. Suponiendo que se fije dicho valor a 0.91, se obtiene una potencia reactiva de compensación igual a:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi') = 112 \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.91))) = 33 \text{ kvar}$$

cuya potencia reactiva Q' final una vez efectuada la corrección:

$$Q' = Q - Q_c = 84 - 33 = 51 \text{ kvar}$$

Utilizando el método de ensayo y programando valores de inductancia relativos a los armónicos que se desean filtrar, se obtienen los siguientes valores de capacidad que causan resonancia en serie:

$$C_k = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L_k}$$

Tabla C.2

k	f [Hz]	L _k [mH]	C _k [μF]
5	250	1	406
7	350	2	103
11	550	1	84
13	650	1	6

La potencia reactiva a 50 Hz suministrada, por ejemplo, por el filtro L-C resonante al quinto armónico es calculada del siguiente modo:

$$I_{1,5} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \left(2\pi 50 \cdot L_5 - \frac{1}{2\pi 50 \cdot C_5} \right)}$$

$$Q_{1,5} = 3 \cdot \left(\frac{1}{2\pi 50 \cdot C_5} - 2\pi 50 \cdot L_5 \right) \cdot I_{1,5}^2$$

Las contribuciones del resto de armónicos se calculan de la misma forma. La suma de las potencias reactivas de compensación a 50 Hz es muy similar a la preestablecida (con los valores de inductancia y capacidad que aparecen en la tabla C.2); considerando el valor de la potencia aparente A' (a igual potencia activa P absorbida):

$$A' = \sqrt{P^2 + Q'^2} = 123 \text{ kVA}$$

el valor eficaz de la corriente de primer armónico pasa a ser:

$$I_1' = \frac{A'}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{123 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 177 \text{ A}$$

que es aproximadamente un 12% inferior respecto al valor inicial de I_1 , al cual corresponden los valores de corriente de los armónicos no filtrados:

Tabla C.3

k	I _k [A]	I _k /I ₁ %
17	10	6
19	9	5
23	8	4
25	7	4

Como puede constatar, comparando los valores absolutos de los valores eficaces de las tablas C.1 y C.3, la compensación a 50 Hz determina una reducción del valor eficaz del primer armónico de corriente, lo que da lugar a la reducción de armónicos no filtrados (ya que $I_k' = \frac{I_k}{k}$). Esto conlleva además una posterior disminución de la corriente total aguas arriba en la red, pasando a ser igual a $I' = 178 \text{ A}$ (16% menos respecto a la corriente total inicial I) con una potencia aparente total S' :

$$S' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I' = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 178 = 124 \text{ kVA}$$

El factor de deformación pasa de 0.96 a:

$$\cos\psi' = \frac{A'}{S'} = \frac{123}{124} = 0.99$$

y el factor de desfase total resulta:

$$\cos\phi' = \cos\varphi' \cdot \cos\psi' = 0.91 \cdot 0.99 = 0.906$$

Por lo tanto, se ha alcanzado el objetivo prefijado; de no ser así, se hubiera tenido que aumentar el valor programado de $\cos\varphi'$ y repetir todo el procedimiento anterior.

La tasa de distorsión armónica total disminuye a $\text{THD}' = 9.6\%$ (inferior al 10% de lo deseable).

Resumiendo, a través de este ejemplo se ha podido constatar que, en régimen deformado, dimensionando debidamente las inductancias y las capacidades de los filtros pasivos, pueden obtenerse dos efectos adicionales, además del filtrado de los armónicos para lo cual se han insertado los filtros:

- corrección canónica a 50 Hz, puesto que en la frecuencia fundamental predomina el efecto capacitivo respecto al inductivo y, por consiguiente, la potencia reactiva generada respecto a la absorbida;
- reduciendo, por medio de la corrección, el valor eficaz del armónico fundamental de la corriente, se reducen también los valores eficaces de los armónicos no filtrados; por lo tanto, se obtiene una posterior disminución de la corriente total que circula por la red y del THD total, lo que significa una reducción de la deformación de la forma de onda de la corriente.

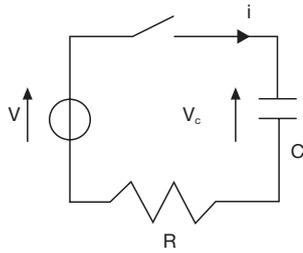
Anexo D

Tensiones y corrientes de inserción y descarga de los condensadores

D.1 Inserción de batería de condensadores

Consideremos un circuito equivalente monofásico en serie con un condensador y una resistencia cableados tal y como se indica en el esquema siguiente:

Figura D.1



con:

$$v = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \psi) \quad [D.1]$$

se aplica la ecuación:

$$R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i dt = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \psi) \quad [D.2]$$

Poniendo como incógnita la tensión en el condensador v_c y sabiendo que $i = i_c = C \cdot \frac{dv_c}{dt}$ se obtiene:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \psi) \quad [D.3]$$

La solución de la anterior ecuación diferencial lineal de primer orden es la suma de dos componentes, la solución en régimen v_c' (*integral particular*) y una componente unidireccional y exponencial atenuada v_c'' (*integral general*), es decir:

$$v_c = v_c' + v_c'' \quad [D.4]$$

de donde:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c'}{dt} + v_c' = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \psi) \quad R \cdot C \cdot \frac{dv_c''}{dt} + v_c'' = 0 \quad [D.5]$$

Ya que, en régimen, la corriente que circula por el circuito es la siguiente¹:

$$i' = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.6]$$

¹ $I = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

de la primera ecuación de [D.5] se obtiene la tensión en régimen en el condensador:

$$v_c' = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i' dt = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.7]$$

La tensión v_c'' viene dada por²:

$$v_c'' = V_c'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.8]$$

Poniendo como condición inicial la tensión nula en el condensador $t=0$:

$$v_{c0} = v_{c0}' + v_{c0}'' = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) + V_c'' = 0 \quad [D.9]$$

de donde:

$$V_c'' = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \quad [D.10]$$

y por tanto:

$$v_c = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \left[\cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.11]$$

Para la corriente, también puede obtenerse de la misma forma la suma de las componentes de régimen y transitoria:

$$i = i' + i'' \quad [D.12]$$

La componente de régimen viene dada por [D.6], mientras que la componente transitoria se halla derivando respecto al tiempo [D.8], o sea:

$$i'' = C \cdot \frac{dv_c''}{dt} = C \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(-\frac{1}{R \cdot C} \right) = \dots \rightarrow -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.13]$$

de donde:

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \left[-\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \text{sen}(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.14]$$

La componente unidireccional se anula cuando:

$$\cos(\psi + \varphi) = 0 \rightarrow \psi = 90^\circ - \varphi$$

es decir, cuando el ángulo de inserción de la tensión es complementario al ángulo de desfase entre tensión y corriente en régimen. En tal caso, no se tienen picos de corriente ni sobretensiones de inserción. Por el contrario, si:

$$\cos(\psi + \varphi) = 1 \rightarrow \psi = -\varphi$$

se tendrá el máximo valor de la componente unidireccional con el máximo pico de corriente y la mayor sobretensión.

² Se define τ como la constante de tiempo del sistema en cuestión igual a $\tau = RC$

Ejemplo

Supongamos que se quiere insertar una batería trifásica de condensadores de 50 kvar conectados en estrella, alimentada por una red de potencia infinita a 400 V y 50 Hz y por un cable tripolar de PVC de 10 m de longitud. La capacidad por fase resulta:

$$Q_c = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)^2 \rightarrow C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U_n^2} = \frac{50 \cdot 10^3}{314 \cdot 400^2} = 1 \text{ mF}$$

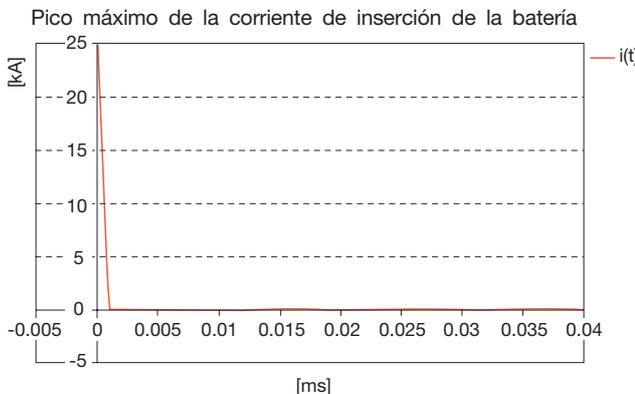
El valor eficaz de la corriente nominal absorbida en régimen es:

$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72 \text{ A}$$

Con dicho valor de corriente nominal, se elige un cable, tendido en bandeja, de 16 mm² con una resistencia total por fase de 15 mΩ. Por tanto, la constante de tiempo τ del circuito RC es de 15 μs, mientras que el ángulo de desfase entre corriente y tensión resulta:

$$\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{1}{314 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}\right) = 89.73^\circ \text{ (anticipo)}$$

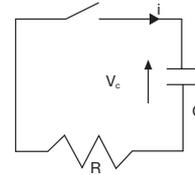
Sustituyendo en [D.13] a l (error insignificante) por los valores de resistencia, de capacidad y de I_n, se obtiene que el pico máximo de la corriente de inserción (presuponiendo ψ = -φ) es de aproximadamente 22 kA, es decir, unas 300 veces la corriente nominal de la batería, tal y como indica el gráfico siguiente. En la práctica, la impedancia de la red aguas arriba contribuye a limitar dicho pico. Si, de todas formas, resultase demasiado elevado para los aparatos eléctricos insertados, sería preciso intercalar más inductancias limitadoras, como se sugiere en el capítulo 9.



D.2 Descarga de los condensadores

Consideremos un condensador cargado con una tensión inicial V_{c0} conectado a una resistencia de descarga R, tal y como se indica en el siguiente esquema:

Figura D.2



En ausencia de una tensión fija, en función de la tensión en el condensador resultará:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = 0 \tag{D.15}$$

cuya solución nos da:

$$v_c = V_{c0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.16}$$

que en el peor de los casos se convierte en:

$$v_c = \sqrt{2} \cdot V_n \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.17}$$

Además, sabiendo que i = i_c = C $\frac{dv_c}{dt}$, para la corriente se tiene que:

$$i = -\frac{V_{c0}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{D.18}$$

Poniendo en [D.17], según las prescripciones de la norma IEC EN 60831-1, t=180 s, v_c=75 V y resolviendo respecto a R, se extrae el valor máximo de la resistencia de descarga, tal y como se indica en la fórmula [9.12] del capítulo 9.

Ejemplo

Supongamos que se quieren dimensionar las resistencias de descarga para la batería de condensadores del ejemplo anterior. Partiendo de [D.17] y sustituyendo los valores en cuestión, se obtiene (poniendo el coeficiente k = 1):

$$75 \geq \sqrt{2} \cdot 230 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 60}{R \cdot 10^{-3}}} \rightarrow R'' = \frac{180}{10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot 230}{75}\right)} = 123 \text{ k}\Omega$$

Eligiendo una resistencia de valor igual al indicado, ya que en 3 min la energía electrostática acumulada por cada condensador se disipa en calor, la potencia máxima desarrollada resulta:

$$P = \frac{V_{c0}^2}{R} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 230)^2}{123 \cdot 10^3} = 0.86 \text{ W}$$

Como puede comprobarse, si bien el valor de resistencia es del orden de centenares de kΩ, la potencia máxima disipada en calor es menor de 1 W, cuando el valor máximo de la corriente de descarga es de:

$$I = \frac{V_{c0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{123 \cdot 10^3} = 2.6 \text{ mA}$$

Esto conlleva una limitada sección de los cables de conexión, así como limitados fenómenos térmicos.

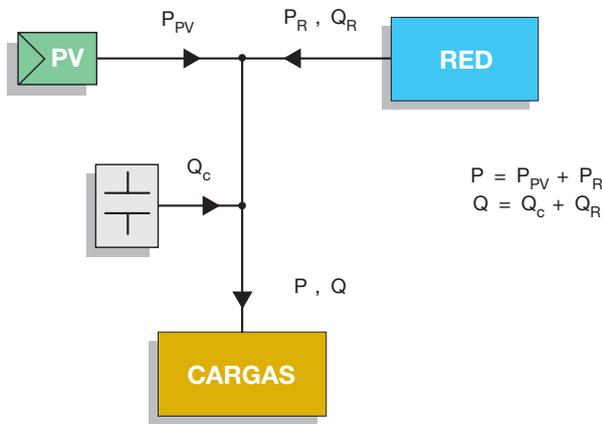
Anexo E

Corrección del factor de potencia en una instalación fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica proporciona generalmente sólo potencia activa, por lo que es preciso tomar de la red la potencia reactiva que necesitan las cargas de la instalación eléctrica.

Cuando se incorpora una instalación fotovoltaica a un consumidor preexistente, si bien la potencia reactiva tomada de la red no varía, la activa se ve reducida proporcionalmente respecto a la suministrada por el generador fotovoltaico, como se indica en la figura siguiente:

Figura E.1



Desde el punto de vista de la red, el conjunto que surge de la unión de un generador fotovoltaico y una instalación eléctrica debe tener, para no incurrir en sanciones, un factor de potencia medio de 0.9, de donde:

$$\cos\varphi_R \geq 0.9 \rightarrow \text{tg}\varphi_R \leq 0.5 \rightarrow \frac{Q_R}{P_R} \leq 0.5 \quad [E.1]$$

Teniendo en cuenta las indicaciones de la figura, la fórmula anterior puede ser representada como:

$$\frac{Q - Q_C}{P - P_{PV}} \leq 0.5 \quad [E.2]$$

por lo que:

$$Q_C \geq Q - 0.5 \cdot (P - P_{PV}) = P \cdot \left(\text{tg}\varphi_1 - 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right) \right) = \dots \quad [E.3]$$

..... $\rightarrow P \cdot (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$

donde:

$$\text{tg}\varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right) \quad [E.4]$$

En ausencia de la instalación fotovoltaica ($P_{PV} = 0$):

$$\text{tg}\varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0}{P} \right) = 0.5 \rightarrow \cos\varphi_2 = 0.9 \quad [E.5]$$

por lo que el regulador del factor de potencia es programado canónicamente a 0.9.

En presencia de la instalación fotovoltaica se genera potencia activa, por lo que el regulador del factor de potencia deberá programarse a un valor superior a 0.9. Si, por ejemplo, la potencia generada es igual a la mitad de la absorbida por las cargas ($P_{PV} = 0.5 \cdot P$), se tendrá:

$$\text{tg}\varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.5 \cdot P}{P} \right) = 0.25 \rightarrow \cos\varphi_2 = 0.97 \quad [E.6]$$

En última instancia, si la instalación fotovoltaica suministra toda la potencia activa requerida por las cargas ($P_{PV} = P$), se deberá programar el regulador del factor de potencia con un valor de:

$$\text{tg}\varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P}{P} \right) = 0 \rightarrow \cos\varphi_2 = 1 \quad [E.7]$$

y, por consiguiente, la batería de condensadores deberá proporcionar toda la energía reactiva requerida por las cargas.

Anexo F

Armónicos en los sistemas trifásicos con neutro

F.1 Introducción

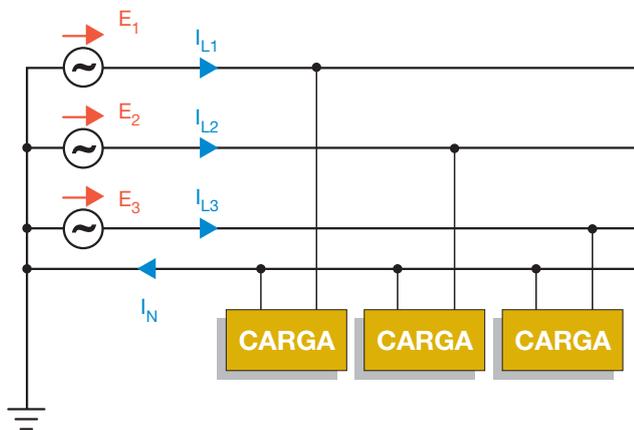
En los sistemas trifásicos con neutro pueden existir aplicaciones con instalaciones que conlleven la circulación, en el conductor de neutro, de una corriente con un valor eficaz superior al de las corrientes de fase.

De ahí surge la necesidad de dimensionar el conductor de neutro con una sección mayor respecto a la de las fases y de realizar una configuración diferente entre las protecciones contra sobrecarga de las fases y del neutro, en los interruptores automáticos tetrapolares.

Por tanto, el uso de filtros para armónicos y las técnicas de corrección anteriormente descritas contribuyen a reducir el valor de la corriente en el neutro, cuya relación con la corriente de las fases será analizada, según diferentes condiciones de contaminación armónica, en los casos siguientes.

F.2 Sistema de alimentación trifásico simétrico y tres cargas monofásicas equilibradas pero no lineales

Figura F.1



Consideremos la presencia en las tres corrientes de fase de sólo el tercer armónico, además del fundamental, con un valor igual al proporcionado por la norma IEC EN 60947-2 Apéndice F opción b):

$$I_3 = 0.6 \cdot I_1$$

El valor eficaz de la corriente de fase en función del primer armónico resulta:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.6^2)} = 1.17 \cdot I_1 \quad [F.1]$$

En el neutro circula una corriente igual a la suma algebraica de los valores eficaces de las tres componentes de tercer armónico que están en fase entre sí:

$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.6 \cdot I_1 = 1.8 \cdot I_1 \quad [F.2]$$

de donde, expresando la corriente del neutro en función de la corriente de fase, resulta:

$$I_N = 1.8 \cdot I_1 = 1.8 \cdot \frac{I_L}{1.17} = 1.54 \cdot I_L \approx 160\% I_L \quad [F.3]$$

Sin embargo, tomando como valor del tercer armónico el indicado en la norma IEC EN 60947-2 Apéndice F opción a):

$$I_3 = 0.88 \cdot I_1$$

las relaciones anteriores pasan a ser:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.88^2)} = 1.33 \cdot I_1 \quad [F.4]$$

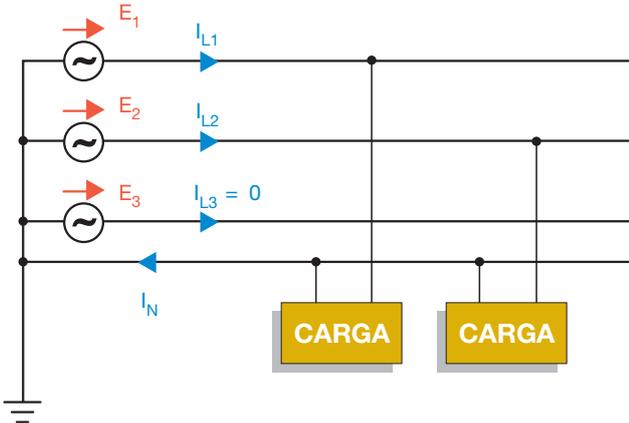
$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.88 \cdot I_1 = 2.64 \cdot I_1 \quad [F.5]$$

$$I_N = 2.64 \cdot I_1 = 2.64 \cdot \frac{I_L}{1.33} = 1.98 \cdot I_L \approx 200\% I_L \quad [F.6]$$

Como puede verse, en el neutro puede circular una corriente de, incluso, el doble de la de fase, con la consecuente repercusión en el dimensionamiento de la sección del conductor y en las regulaciones de las protecciones contra sobrecargas. La relación entre la corriente de neutro y de fase tendería a aumentar si se presentasen además armónicos múltiplos del tercero. Por otro lado, haber supuesto la ausencia de otros armónicos no múltiplos del tercero podría crear una situación agravante: ya que su presencia reduciría la relación anterior, pues tales armónicos no circularían por el neutro dando lugar a ternas simétricas equilibradas.

F.3 Sistema de alimentación trifásico simétrico y dos cargas monofásicas equilibradas pero no lineales

Figura F.2



Consideremos, en primer término, la presencia de sólo el tercer armónico además del fundamental. En este caso, respecto al caso anterior, la corriente que circula en el neutro es la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de la componente fundamental y del cuadrado de la suma de los dos terceros armónicos, es decir:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot I_3)^2} \quad [F.7]$$

En este caso particular, la componente fundamental de la corriente en el neutro es la suma vectorial de las componentes fundamentales en las fases; puesto que estas últimas son iguales en cuanto a coeficiente y tienen un mismo desfase de 120°, la suma da como valor eficaz el de la componente fundamental de la misma fase.

Suponiendo que $I_3 = 0.88 \cdot I_1$ (que se puede verificar en los puentes rectificadores monofásicos), se tiene:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot 0.88 \cdot I_1)^2} = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0.88)^2} = 2.02 \cdot I_1 \quad [F.8]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.88^2)} = 1.33 \cdot I_1 \quad [F.9]$$

$$I_N = \frac{2.02}{1.33} \cdot I_L = 1.52 \cdot I_L \quad [F.10]$$

En presencia también del quinto y séptimo armónico, con los siguientes valores extraídos de la norma IEC EN 60947-2 Apéndice F:

- $I_5 = 0.55 \cdot I_1$
- $I_7 = 0.07 \cdot I_1$

la relación entre la corriente de neutro y de fase pasa a ser:

$$I_N = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0.88)^2 + 0.55^2 + 0.07^2} = 2.1 \cdot I_1 \quad [F.11]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = I_1 \cdot \sqrt{1 + 0.88^2 + 0.55^2 + 0.07^2} = 1.44 \cdot I_1 \quad [F.12]$$

$$I_N = \frac{2.1}{1.44} \cdot I_L = 1.46 \cdot I_L \quad [F.13]$$

Como puede verse, al comparar [F.13] con [F.10], también en este caso la presencia de armónicos no múltiplos del tercero reduce la relación entre la corriente de neutro y de fase.

Glosario

I	valor eficaz de la corriente total
I_r	componente de la corriente en fase con la tensión
I_q	componente de la corriente en cuadratura con la tensión
I_1	valor eficaz del primer armónico de corriente
I_k	valor eficaz del k-ésimo armónico de corriente
U	valor eficaz de la tensión de línea
V	valor eficaz de la tensión de fase total
V_1	valor eficaz del primer armónico de tensión
V_k	valor eficaz del k-ésimo armónico de tensión
P	potencia activa absorbida por la carga
Q	potencia reactiva absorbida por la carga
Q_1	potencia reactiva total antes de la corrección del factor de potencia
Q_2	potencia reactiva total tras la corrección del factor de potencia
A	potencia aparente absorbida por la carga
D	potencia deformadora
N	potencia no activa
S	potencia aparente total
S_1	potencia aparente total antes de la corrección del factor de potencia
S_2	potencia aparente total tras la corrección del factor de potencia
Q_c	potencia reactiva de la batería de condensadores
I_{cn}	Intensidad nominal del condensador
I_{cmax}	corriente máxima absorbida por el condensador
$\cos\varphi$	factor de potencia
$\cos\psi$	factor de deformación
$\cos\phi$	factor de desfase
$\cos\varphi_1$	factor de potencia antes de la corrección
$\cos\varphi_2$	factor de potencia tras la corrección
THD	tasa total de distorsión armónica
f_r	frecuencia de resonancia
P_{PV}	potencia activa suministrada por un generador fotovoltaico
P_R	potencia activa suministrada por la red
Q_R	potencia reactiva suministrada por la red

Contacte con nosotros

Asea Brown Boveri, S.A.
Low Voltage Products
Torrent de l'Olla 220
08012 Barcelona
Tel. 93 484 21 21
Fax 93 484 21 90
www.abb.es/bajatension



1TXA9SB004B0701-0405