

Capítulo L

Mejora del factor de potencia y filtrado de armónicos

Índice

| | | |
|-----------|---|------------|
| 1 | Energía reactiva y factor de potencia | L2 |
| | 1.1 Naturaleza de la energía reactiva | L2 |
| | 1.2 Equipos que requieren energía reactiva | L2 |
| | 1.3 Factor de potencia | L3 |
| | 1.4 Valores prácticos del factor de potencia | L4 |
| 2 | Por qué se debe mejorar el factor de potencia | L5 |
| | 2.1 Reducción en el coste de la electricidad | L5 |
| | 2.2 Optimización técnica y económica | L5 |
| 3 | Cómo se mejora el factor de potencia | L7 |
| | 3.1 Principios teóricos | L7 |
| | 3.2 Qué equipos se utilizan | L7 |
| | 3.3 Elección entre compensación fija o automática | L9 |
| 4 | Dónde se deben instalar los equipos de compensación | L10 |
| | 4.1 Compensación global | L10 |
| | 4.2 Compensación por grupos | L10 |
| | 4.3 Compensación individual | L11 |
| 5 | Cómo se decide el nivel óptimo de compensación | L12 |
| | 5.1 Método general | L12 |
| | 5.2 Método simplificado | L12 |
| | 5.3 Método basado en la reducción de las penalizaciones en las facturas eléctricas | L14 |
| 6 | Compensación en bornes de un transformador | L15 |
| | 6.1 Compensación para aumentar la potencia activa disponible | L15 |
| | 6.2 Compensación de la energía reactiva absorbida por el transformador | L16 |
| 7 | Mejora del factor de potencia en motores asíncronos | L18 |
| | 7.1 Compensación fija de motores y ajustes en la protección | L18 |
| | 7.2 Cómo evitar la autoexcitación de un motor de inducción | L19 |
| 8 | Ejemplo de una instalación antes y después de la compensación de la energía reactiva | L20 |
| 9 | Efectos de los armónicos | L21 |
| | 9.1 Problemas ocasionados por los armónicos | L21 |
| | 9.2 Posibles soluciones | L21 |
| | 9.3 Elección de la solución óptima | L23 |
| 10 | Instalación de baterías de condensadores | L24 |
| | 10.1 Elementos del condensador | L24 |
| | 10.2 Elección de dispositivos de protección, mando y cables de conexión | L25 |

L1

1 Energía reactiva y factor de potencia

Los sistemas de corriente alterna suministran dos formas de energía:

■ Energía "activa" medida en kilovatios hora (kWh) que se convierte en trabajo mecánico, calor, luz, etc.

■ Energía "reactiva" que toma de nuevo dos formas:

□ Energía "reactiva" necesaria para circuitos inductivos (transformadores, motores, etc.),

□ Energía "reactiva" necesaria para circuitos capacitivos (capacidad de cables, condensadores de potencia, etc.).

1.1 Naturaleza de la energía reactiva

Todas las máquinas eléctricas (motores, transformadores...) se alimentan, en corriente alterna, para dos formas de consumo: el que transforman en potencia activa, con las correspondientes pérdidas por efecto Joule (calentamiento), y el correspondiente a la creación de los campos magnéticos, que denominamos reactiva.

La energía activa corresponde a la potencia activa dimensionada en W, y se transforma íntegramente en energía mecánica (trabajo) y en calor (pérdidas térmicas).

Los receptores que absorben únicamente este tipo de energía se denominan resistivos.

La energía reactiva corresponde a la energía necesaria para crear los campos magnéticos que necesitan ciertos receptores para su funcionamiento (motores, transformadores).

Esta energía es suministrada por la red de alimentación o por los condensadores instalados para dicha función.

En la práctica, los elementos reactivos de las corrientes de carga son inductivos, mientras que las impedancias de las líneas de transporte y distribución son capacitivos.

La combinación de una corriente inductiva que pasa a través de una reactancia inductiva produce las peores condiciones posibles de caídas de tensión (es decir, en oposición de fase directa con la tensión del sistema).

Debido a:

- Pérdidas eléctricas en los cables.
- Caídas de tensión.

Las compañías eléctricas intentan reducir, en sus redes de transporte, en la medida de lo posible, la corriente reactiva.

Las corrientes capacitivas tienen el efecto inverso en los niveles de tensión y producen aumentos de tensión.

La potencia (kVAr) asociada con la energía activa se representa normalmente mediante la letra *P*.

La potencia reactiva (kvar) se representa mediante *Q*.

La potencia inductivamente reactiva suele ser positiva de manera convencional (+ *Q*) mientras que la potencia capacitivamente reactiva aparece como una cantidad negativa (- *Q*).

El subapartado 1.3 muestra la relación entre *P*, *Q* y *S*.

S representa los kVAr de potencia aparente. La energía aparente es la resultante de dos energías vectoriales, la activa y la reactiva.

La **Figura L1** muestra que los kVA de potencia aparente son la suma vectorial de los kW de potencia activa más los kVAr de potencia reactiva.

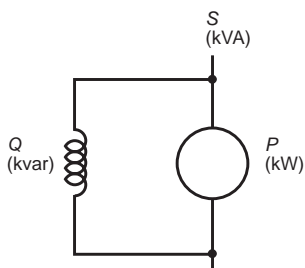


Fig. L1: Un motor eléctrico requiere potencia activa *P* y potencia reactiva *Q* de la red.

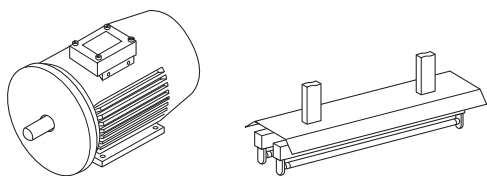
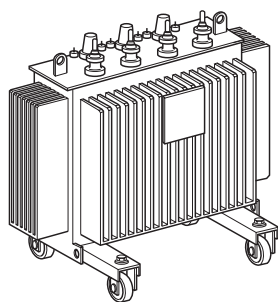


Fig. L2: Elementos que consumen energía que requieren igualmente energía reactiva.

1.2 Equipos que requieren energía reactiva

Todas las instalaciones y equipos de corriente alterna que tengan dispositivos electromagnéticos, o devanados acoplados magnéticamente, necesitan corriente reactiva para crear flujos magnéticos.

Los elementos más comunes de esta clase son los transformadores inductancias, motores y lámparas de descarga (sus balastos) (consulte la **Figura L2**).

La proporción de potencia reactiva (kVAr) con respecto a la potencia activa (kW), variará en función del tipo de receptor; a modo de aproximación se puede decir que:

- Un 65-75% para motores asíncronos.
- Un 5-10% para transformadores.

El factor de potencia es la relación entre kW y kVA. Cuanto más se acerca el factor de potencia al máximo valor posible de 1, mayor es el beneficio para el consumidor y el proveedor.

$$P_{fdp} = P \text{ (kW)} / S \text{ (kVA)}.$$

P = Potencia activa.

S = Potencia aparente.

1.3 Factor de potencia

Definición del factor de potencia

El factor de potencia de una carga, que puede ser un elemento único que consume energía o varios elementos (por ejemplo, toda una instalación), lo da la relación de P/S, es decir, kW divididos por kVA en un momento determinado.

El valor de un factor de potencia está comprendido entre 0 y 1.

Si las corrientes y tensiones son señales perfectamente sinusoidales, el factor de potencia es igual a $\cos \varphi$.

Un factor de potencia cercano a la unidad significa que la energía reactiva es pequeña comparada con la energía activa, mientras que un valor de factor de potencia bajo indica la condición opuesta.

Diagrama vectorial de potencia

■ Potencia activa P (en kW):

□ Monofásico (1 fase y neutro): $P = V \times I \times \cos \varphi$.

□ Monofásico (fase a fase): $P = U \times I \times \cos \varphi$.

□ Trifásico (3 hilos o 3 hilos + neutro): $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$.

■ Potencia reactiva Q (en kVAr):

□ Monofásico (1 fase y neutro): $Q = V \times I \times \sin \varphi$.

□ Monofásico (fase a fase): $Q = UI \sin \varphi$.

□ Trifásico (3 hilos o 3 hilos + neutro): $Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi$.

■ Potencia aparente S (en kVA):

□ Monofásico (1 fase y neutro): $S = VI$.

□ Monofásico (fase a fase): $S = UI$.

□ Trifásico (3 hilos o 3 hilos + neutro): $S = \sqrt{3} \times U \times I$.

donde:

V = Tensión entre fase y neutro.

U = Tensión entre fases.

□ Para cargas equilibradas y casi equilibradas en sistemas de 4 hilos.

Vectores de corriente y de tensión, y derivación del diagrama de potencia

El diagrama "vectorial" de potencia es un truco útil, que se deriva directamente del auténtico diagrama vectorial giratorio de corriente y de tensión, del modo siguiente:

Las tensiones del sistema de alimentación se toman como cantidades de referencia y sólo se tiene en cuenta una única fase basándose en la suposición de una carga trifásica equilibrada.

La tensión de fase de referencia (V) coincide con el eje horizontal y la corriente (I) de esa fase, prácticamente para todas las cargas del sistema de alimentación retrasa la tensión en un ángulo φ .

El componente de I que está en fase con V es el componente activo de I y es igual a $I \cos \varphi$, mientras que $VI \cos \varphi$ es igual a la potencia activa (en kW) del circuito, si V está expresado en kV.

El componente de I desfasado 90 grados respecto a la V es el componente reactivo de I y es igual a $I \sin \varphi$, mientras que $VI \sin \varphi$ es igual a la potencia reactiva (en kVAr) del circuito, si V está expresado kV.

Si se multiplica el vector I por V , expresado en kV, entonces VI es igual a la potencia aparente (en kVA) para el circuito.

Los valores kW, kVAr y kVA por fase, cuando se multiplican por 3, pueden representar convenientemente las relaciones de kVA, kW, kVAr y el factor de potencia para una carga trifásica total, tal como se muestra en la **Figura L3**.

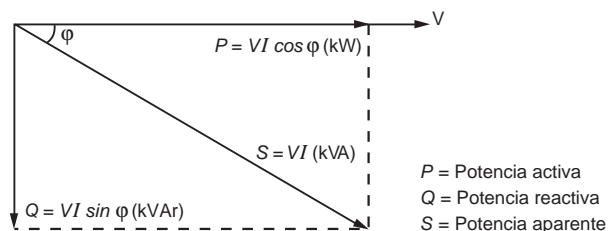


Fig. L3: Diagrama de potencia.

1 Energía reactiva y factor de potencia

Ejemplo de cálculos de potencia (consulte la **Figura L4**)

| Tipo de circuito | Potencia aparente S (kVA) | Potencia activa P (kW) | Potencia reactiva Q (kvar) |
|--|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Monofásico (fase y neutro) | $S = VI$ | $P = VI \cos \varphi$ | $Q = VI \sin \varphi$ |
| Monofásico (fase a fase) | $S = UI$ | $P = UI \cos \varphi$ | $Q = UI \sin \varphi$ |
| Ejemplo 5 kW de carga $\cos \varphi = 0,5$ | 10 kVA | 5 kW | 8,7 kVAr |
| Trifásico 3 hilos o 3 hilos + neutro | $S = \sqrt{3} UI$ | $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ | $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$ |
| Ejemplo Motor $P_n = 51$ kW $\cos \varphi = 0,86$ $\rho = 0,91$ (eficiencia del motor) | 65 kVA | 56 kW | 33 kVAr |

Fig. L4: Ejemplo en el cálculo de potencia activa y reactiva.

1.4 Valores prácticos del factor de potencia

Los cálculos para el ejemplo trifásico anterior son los siguientes:

P_n = potencia en eje suministrada = 51 kW.

P = potencia activa consumida =

$$\frac{P_n}{\rho} = \frac{51}{0,91} = 56 \text{ kW}$$

S = potencia aparente =

$$\frac{P}{\cos \varphi} = \frac{56}{0,86} = 65 \text{ kVA}$$

Por lo tanto, si se refiere a la **Figura L5**, el valor de $\tan \varphi$ correspondiente a un $\cos \varphi$ de 0,86 resulta ser 0,59

$Q = P \tan \varphi = 56 \times 0,59 = 33 \text{ kVAr}$ (consulte la **Figura L15**).

o bien

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{65^2 + 56^2} = 33 \text{ kVAr}$$

Valores del factor de potencia medios para las cargas más comunes (consulte la **Figura L6**)

| Tipo de carga | $\cos \varphi$ | $\tan \varphi$ |
|---|----------------|----------------|
| ■ Motor de inducción común cargado al | 0% | 0,17 |
| | 25% | 0,55 |
| | 50% | 0,73 |
| | 75% | 0,80 |
| | 100% | 0,85 |
| ■ Lámparas incandescentes | 1,0 | 0 |
| ■ Lámparas fluorescentes (no compensadas) | 0,5 | 1,73 |
| ■ Lámparas fluorescentes (compensadas) | 0,93 | 0,39 |
| ■ Lámparas de descarga | de 0,4 a 0,6 | de 2,29 a 1,33 |
| ■ Hornos que utilizan elementos de resistencia | 1,0 | 0 |
| ■ Hornos de calentamiento por inducción (compensados) | 0,85 | 0,62 |
| ■ Hornos de calentamiento de tipo dieléctrico | 0,85 | 0,62 |
| ■ Máquinas de soldar de tipo resistencia | de 0,8 a 0,9 | de 0,75 a 0,48 |
| ■ Conjunto monofásico fijo de soldadura por arco | 0,5 | 1,73 |
| ■ Conjunto generado por motor de soldadura por arco | de 0,7 a 0,9 | de 1,02 a 0,48 |
| ■ Conjunto rectificador transformador de soldadura por arco | de 0,7 a 0,8 | de 1,02 a 0,75 |
| ■ Horno de arco | 0,8 | 0,75 |

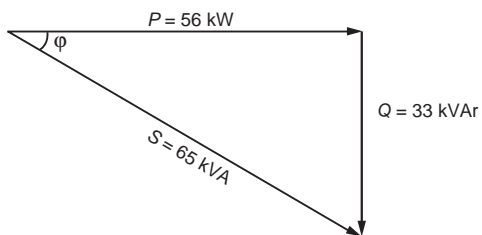


Fig. L5: Diagrama de potencia de cálculo.

Fig. L6: Valores de $\cos \varphi$ y $\tan \varphi$ para las cargas más comunes.

2 Por qué se debe mejorar el factor de potencia

La mejora del factor de potencia de una instalación presenta varias ventajas técnicas y económicas, sobre todo en la reducción de las facturas eléctricas.

2.1 Reducción en el coste de la electricidad

Una buena gestión del consumo de energía reactiva proporciona ventajas económicas.

La instalación de condensadores de potencia permite al consumidor reducir la factura eléctrica al mantener el nivel de consumo de potencia reactiva por debajo del valor penalizable, según el sistema tarifario en vigor.

Generalmente, la energía reactiva se factura en función del criterio $\tan \varphi$ o $\cos \varphi$, tal como se ha observado con anterioridad.

En España, a fecha de salida de este documento, nos encontramos ante un mercado regulado (a tarifa) y un mercado liberalizado.

En el mercado liberalizado se establecen unas tarifas de acceso que son el precio por el uso de las redes eléctricas. Estas tarifas de acceso se aplican entre otros a los consumidores cualificados. La última modificación referente a las tarifas de acceso es el Real Decreto 1164/2001, con fecha 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. En el artículo 9.3 se hace referencia al término de facturación de energía reactiva, y dice: "El término de facturación por energía reactiva será de aplicación a cualquier tarifa... excepto en el caso de la tarifa simple de baja tensión (2.0A).

Este término se aplicará sobre todos los períodos tarifarios, excepto en el período 3, para las tarifas 3.0 A y 3.1 A, y en el período 6, para las tarifas 6.-, siempre que el consumo de energía reactiva exceda del 33% del consumo de activa durante el período de facturación considerado ($\cos \varphi 0,95$) y únicamente afectará a dichos excesos.

El precio de kVArh de exceso se establecerá en céntimos de euro/kVArh...".

Para el mercado regulado (a tarifa), la penalización, por consumo de energía reactiva, es a través de un coeficiente de recargo que se aplica sobre el importe en pesetas del término de potencia (potencia contratada) y sobre el término de energía (energía consumida). Este recargo se aplica para todas las tarifas superiores a la 3.0 (trifásicas de potencia contratada superior a 15 kW).

El coeficiente de recargo (K_r) se obtiene a partir del $\cos \varphi$ medio de la instalación según la siguiente fórmula:

$$K_r (\%) = (17 / \cos^2 \varphi) - 21$$

- El recargo máximo ($K_r = 47\%$) correspondería a un $\cos \varphi = 0,5$ o inferior.
- No existe recargo ($K_r = 0\%$) para un $\cos \varphi = 0,9$.
- El recargo se convierte en bonificación para $\cos \varphi$ superiores a 0,9.
- La máxima bonificación (-4%) correspondería a un $\cos \varphi = 1$.

Frente a las ventajas económicas de una facturación reducida, el consumidor debe tener en cuenta el coste de la compra, la instalación y el mantenimiento del equipo de compensación.

2.2 Optimización técnica y económica

Un factor de potencia alto permite la optimización de los diferentes componentes de una instalación. Se evita el sobredimensionamiento de algunos equipos; pero sin embargo para lograr los mejores resultados, a nivel técnico, la corrección debe llevarse a cabo lo más cerca posible de los receptores demandantes de reactiva.

Reducción de la sección de los cables

La **Figura L7** muestra el aumento de la sección de los cables cuando se reduce el factor de potencia de la unidad a 0,4.

| | | | | |
|---|---|------|------|-----|
| Factor de multiplicación para el área de la sección transversal de los cables | 1 | 1,25 | 1,67 | 2,5 |
| $\cos \varphi$ | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |

Fig. L7: Factor de multiplicación para el tamaño de los cables en función de $\cos \varphi$.

La mejora del factor de potencia permite el uso de transformadores, aparatos y cables, etc. optimizados, así como la reducción de las pérdidas de energía y de las caídas de tensión en una instalación.

2 Por qué se debe mejorar el factor de potencia

Reducción de las pérdidas (P, kW) en cables

Las pérdidas en los cables son proporcionales a la corriente al cuadrado y se cuantifican en kWh. La reducción de la corriente total en un conductor en un 10%, por ejemplo, reducirá las pérdidas en casi un 20%.

Reducción de las caídas de tensión

Los condensadores de potencia reducen o incluso eliminan por completo la corriente reactiva en los conductores aguas arriba del equipo de compensación, por lo que se reducen o eliminan las caídas de tensión.

Nota: la sobrecompensación producirá un aumento de la tensión en los condensadores.

Aumento de la potencia disponible

Al mejorar el factor de potencia de la instalación, se reduce la corriente que pasa a través del transformador, lo que permite optimizar el transformador y añadir más receptores.

En la práctica, puede resultar menos costoso mejorar el factor de potencia, instalando equipos de compensación, que sustituir el transformador.

En el apartado 6 se trata esta cuestión más detalladamente.

3 Cómo se mejora el factor de potencia

Mejorar el factor de potencia de una instalación requiere una batería de condensadores que actúa como fuente de energía reactiva. Se dice que esta disposición proporciona una compensación de energía reactiva.

3.1 Principios teóricos

Una carga inductiva con un bajo factor de potencia hace que los generadores y los sistemas de transmisión/distribución entreguen la corriente reactiva (retrasando la tensión del sistema en 90 grados) con pérdidas de energía asociadas y caídas de tensión.

Si se añade a la carga una batería de condensadores, su corriente reactiva (capacitiva) recorrerá la misma trayectoria a través del sistema de alimentación que la de la corriente reactiva de carga. Como esta corriente capacitiva I_C (que desfasa la tensión 90 grados) está en oposición de fase directa a la corriente reactiva de carga (I_L), los dos componentes que fluyen a través de la misma trayectoria se anularán mutuamente, de tal forma que si la batería de condensadores es suficientemente grande e $I_C = I_L$, no habrá flujo de corriente reactiva en el sistema aguas arriba de los condensadores.

Es decir, si añadimos a la instalación una batería de condensadores con una potencia reactiva igual o mayor que la demandada por la instalación, aguas arriba de la batería de condensadores no habrá demanda de energía reactiva.

Esto se ve gráficamente en la **Figura L8 (a)** y **(b)**

Donde:

R representa los elementos de potencia activa de la carga.

L representa los elementos de potencia reactiva (inductiva) de la carga.

C representa los elementos de potencia reactiva (capacitiva) del equipo de corrección del factor de potencia.

Se observa en el diagrama **(b)** de la **Figura L9** que la batería de condensadores C aparece como suministradora de toda la corriente reactiva de la carga.

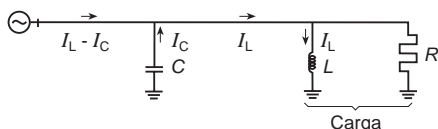
En el diagrama **(c)** de la **Figura L9**, se ha añadido el componente de corriente de potencia activa y se indica que la carga (totalmente compensada) tiene en el sistema de alimentación un factor de potencia de 1.

La **Figura L9** utiliza el diagrama de potencia tratado en el subapartado 1.3 (ver la **Figura L3**) para ilustrar el principio de compensación al reducir una potencia reactiva Q a un valor más pequeño Q' mediante una batería de condensadores que tiene una potencia reactiva Q_c . Con esto, se observa que la magnitud de la potencia aparente S se reduce a S' .

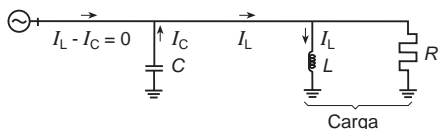
Ejemplo

Un motor consume 100 kW con un factor de potencia de 0,75 (es decir, $\tan \phi = 0,88$). Para mejorar el factor de potencia a 0,98 (por ejemplo, $\tan \phi = 0,2$), la potencia reactiva de la batería de condensadores debe ser: $Q_c = 100 (0,88 - 0,2) = 68 \text{ kVAr}$.

a) Patrón de flujo de los componentes de corriente reactiva



b) Cuando $I_C = I_L$, la batería de condensadores suministra toda la potencia reactiva



c) Con la corriente de carga añadida al caso (b)

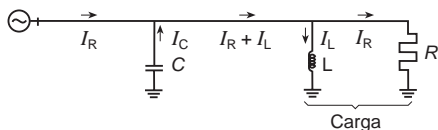


Fig. L8: Muestra las características esenciales de la corrección del factor de potencia.

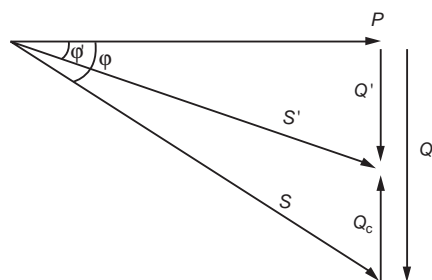


Fig. L9: Diagrama que muestra el principio de compensación: $Q_c = P (\tan \phi - \tan \phi')$.

3.2 Qué equipos se utilizan

Compensación en baja tensión

En baja tensión, la compensación de la energía reactiva se puede realizar con:

- Condensadores fijos.
- Baterías automáticas de condensadores.

3 Cómo se mejora el factor de potencia

Condensadores fijos (consulte la Figura L10)

En esta configuración se utilizan uno o varios condensadores para obtener la potencia reactiva necesaria.

La conexión se puede realizar:

- Por interruptor de corte en carga o interruptor automático.
- Por contactor.
- Directamente a bornes del receptor a compensar y maniobrado conjuntamente.

La utilización de esta configuración se suele aplicar en:

- En bornes de los dispositivos inductivos (motores y transformadores).
- En los casos en los que el nivel de carga es razonablemente constante, y no hay riesgo de sobrecompensación.

En el REBT en la ITC-BT 43 - Apartado 2.7, Compensación del factor de potencia, se deduce que:

- Se podrá realizar la compensación de la energía reactiva pero en ningún momento la energía absorbida por la red podrá ser capacitiva.
- Se podrá realizar la compensación fija para uno o varios receptores siempre que funcionen por medio de un único interruptor, es decir simultáneamente.
- Para compensar la totalidad de la instalación se deberá instalar un equipo automático.

En la práctica se realiza la compensación fija de algunos motores y de transformadores y una compensación automática para la compensación global en cabecera de la instalación.

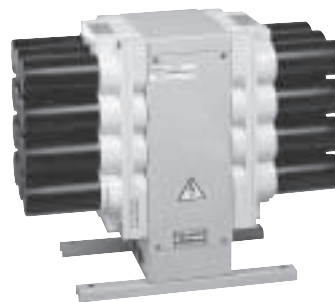


Fig. L10: Ejemplo de condensadores de compensación de valor fijo.

Baterías de condensadores automáticos (consulte la Figura L11)

Este tipo de equipos proporciona a la instalación la reactiva necesaria dentro de unos límites cercanos a un nivel seleccionado del factor de potencia.

Generalmente se instalan en los puntos de una instalación en los que las variaciones de potencia activa o reactiva son importantes, por ejemplo:

- En la cabecera de la instalación en el embarrado del CGBT.
- En la salida de un cuadro secundario muy cargado.



Fig. L11: Ejemplo de equipos de regulación de compensación automática.

Las baterías de condensadores reguladas automáticamente permiten una adaptación inmediata de la compensación para que coincida con el nivel de la carga.

Principios y motivos del uso de la compensación automática

Un equipo de compensación automática debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia reactiva de la instalación para conseguir mantener el $\cos \varphi$ objetivo de la instalación.

Un equipo de compensación automática está constituido por 3 elementos principales:

El regulador: cuya función es medir el $\cos \varphi$ de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al $\cos \varphi$ objetivo, conectando los distintos escalones de potencia reactiva.

Los contactores: son los elementos encargados de conectar los distintos condensadores que configuran la batería. El número de escalones que es posible disponer en un equipo de compensación automática depende de las salidas que tenga el regulador.

Los condensadores: son los elementos que aportan la energía reactiva a la instalación.

Además para el correcto funcionamiento de un equipo de compensación automática es necesaria la toma de datos de la instalación; son los elementos externos que le permiten actuar correctamente al equipo:

- La lectura de intensidad: se debe conectar un transformador de intensidad que lea el consumo de la totalidad de la instalación (ver **Figura L12**).
- La lectura de tensión: normalmente se incorpora en la propia batería de manera que al efectuar la conexión de potencia de la misma ya se obtiene este valor.

Esta información de la instalación (tensión e intensidad) le permite al regulador efectuar el cálculo del $\cos \varphi$ existente en la instalación en todo momento y le capacita para tomar la decisión de introducir o sacar escalones de potencia reactiva. La batería de condensadores Thyrimat mostrada en la **Figura L12** es un equipo de corrección del factor de potencia automática que incluye contactores estáticos (tiristores) en vez de contactores electromecánicos.

La corrección estática es particularmente adecuada para algunas instalaciones que utilizan equipos con ciclos rápidos o sensibles a las sobretensiones de transitorios.

Las ventajas de los contactores estáticos son:

- Respuesta inmediata a todas las fluctuaciones del factor de potencia (tiempo de respuesta de 2 s o 40 ms según la opción del regulador).
- Número ilimitado de maniobras.
- Eliminación del fenómeno de transitorios en la red durante la conexión del condensador.
- Funcionamiento totalmente silencioso.

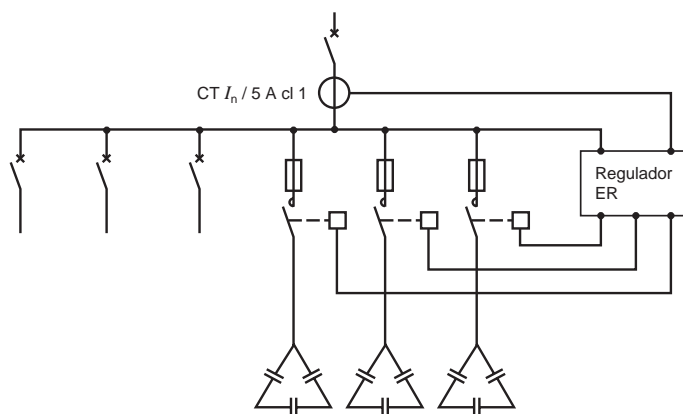


Fig. L12: Principio de control de compensación automática.

3.3 Elección entre compensación fija o automática

Normas aplicadas habitualmente

Cuando la demanda de kVAR es inferior o igual al 15% de la potencia nominal del transformador de potencia, es posible la utilización de condensadores fijos. Para valores superiores al 15%, es recomendable instalar una batería de condensadores automática.

La ubicación de los equipos de compensación dentro de una instalación puede ser:

- Global (un equipo para toda la instalación).
- Parcial (grupo a grupo de receptores).
- Individual (en cada receptor).

En principio, la compensación ideal, a nivel técnico, es aquella que se aplica en el mismo punto de demanda.

En la práctica, los factores técnicos y económicos determinarán la elección del equipo.

4 Dónde se deben instalar los equipos de compensación

Con la compensación global, obtenemos la mejor solución prestaciones-precio.

4.1 Compensación global (consulte la [Figura L13](#))

Principio

La batería de condensadores está conectada al embarrado del cuadro de distribución principal de baja tensión y permanece en servicio durante el periodo de carga normal.

Ventajas

- Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.
- Ajusta la potencia aparente (S en kVA) a la necesidad real de la instalación.
- Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).

Observaciones

- La corriente reactiva (I_r) está presente en la instalación desde el nivel 1 hasta los receptores.
- Las pérdidas por efecto Joule en los cables no quedan disminuidas.

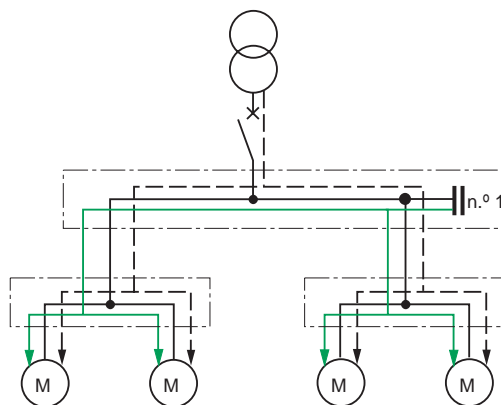


Fig. L13: Compensación global.

L10

Se recomienda la compensación por grupos cuando la instalación es amplia y cuando los patrones de carga/tiempo difieren entre una parte de la instalación y otra.

4.2 Compensación por grupos (consultar la [Figura L14](#))

Principio

Los equipos de compensación están conectados en el embarrado de cada cuadro de distribución local, tal como se muestra en la [Figura L14](#).

Una parte significativa de la instalación se ve beneficiada por este tipo de compensación, sobre todo los cables de alimentación del CGBT y cada uno de los cuadros de distribución secundarios en los que se aplican las medidas de compensación.

Ventajas

- Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.
- Optimiza una parte de la instalación, la corriente reactiva no se transporta entre los niveles 1 y 2.
- Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).
- Reducción de la sección de cables aguas arriba.

Observaciones

- La corriente reactiva (I_r) está presente en la instalación desde el nivel 2 hasta los receptores.
- Las pérdidas por efecto Joule en los cables disminuyen.
- Riesgo de sobrecompensación, si hay grandes variaciones de carga.

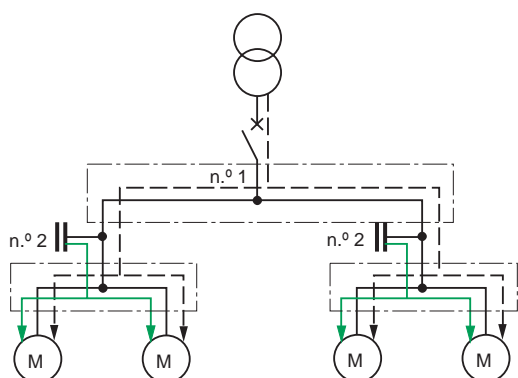


Fig. L14: Compensación por grupos.

Se debe considerar la compensación individual cuando la potencia del motor es significativa con respecto a la potencia de la instalación.

4.3 Compensación individual

Principio

Los condensadores se conectan directamente en bornes de los receptores (especialmente motores, consulte información adicional en el apartado 7).

Es recomendable utilizar la compensación individual cuando la potencia del motor es significativa con respecto al conjunto de la potencia total demandada por la instalación. Generalmente la potencia reactiva a compensar está sobre un 25% de la potencia del motor, en kW.

Igualmente se recomienda utilizar la compensación fija para compensar el transformador de potencia; tanto para vacío o como para plena carga.

Ventajas

- Suprime las penalizaciones por un consumo excesivo de energía reactiva.
- Optimiza toda la instalación eléctrica. La corriente reactiva I_r se abastece en el mismo lugar de su consumo.
- Descarga el centro de transformación (potencia disponible en kW).

Observaciones

- La corriente reactiva no está presente en los cables de la instalación.
- Las pérdidas por efecto Joule en los cables se suprimen totalmente.

5 Cómo se decide el nivel óptimo de compensación

5.1 Método general

Relación de demandas de potencia reactiva en la fase de diseño

Esta relación se puede hacer del mismo modo (y al mismo tiempo) que para las cargas de potencia descrita en el capítulo A. Se pueden determinar los niveles de la carga de potencia activa y reactiva en cada nivel de la instalación (en general, en puntos de distribución y subdistribución de circuitos).

Optimización técnica y económica de una instalación existente

Se puede determinar la especificación óptima de los condensadores de compensación para una instalación existente a partir de las siguientes consideraciones principales:

- Facturas de electricidad anteriores a la instalación de los condensadores.
- Estimación de las próximas facturas eléctricas.
- Costes de:
 - Adquisición de condensadores y equipos de control (contactores, reguladores, armarios, etc.).
 - Costes de instalación y mantenimiento.
 - Coste de las pérdidas de calor dieléctricas en los condensadores frente a las pérdidas reducidas en los cables, transformador, etc., tras la instalación de los condensadores.

5.2 Método simplificado

Principio general

Un cálculo aproximado suele ser suficiente para la mayoría de los casos prácticos y puede basarse en la suposición de un factor de potencia de 0,8 (inductivo) antes de la compensación.

Para mejorar el factor de potencia con un valor suficiente a fin de evitar penalizaciones en la factura eléctrica (esto dependerá de las estructuras tarifarias en vigor) y reducir las pérdidas, caídas de tensión, etc. en la instalación, se puede hacer referencia a la **Figura L15** en la página siguiente.

En la tabla, se puede ver que, para aumentar el factor de potencia de la instalación de 0,8 a 1, se van a necesitar 0,750 kVAr por kW de carga. La potencia de la batería de condensadores a instalar en el embarrado del cuadro de distribución principal de la instalación sería $Q \text{ (kVAr)} = 0,750 \times P \text{ (kW)}$.

Este planteamiento permite una rápida elección de los condensadores de potencia para la compensación requerida, ya sea en modo general, parcial o individual.

Ejemplo

Es necesario mejorar el factor de potencia de una instalación de 666 kVA de 0,75 inductivo a 1. La demanda de potencia activa es $666 \times 0,75 = 500 \text{ kW}$.

En la **Figura L16** de la página L15, la intersección de la fila $\cos \varphi = 0,75$ (antes de la corrección) con la columna $\cos \varphi = 1$ (después de la corrección) indica un valor de 0,882 kVAr de compensación por kW de carga.

Para una carga de 500 kW, por lo tanto, se requiere $500 \times 0,882 = 441 \text{ kVAr}$ de potencia reactiva.

Nota: este método es válido para cualquier nivel de tensión.

5 Cómo se decide el nivel óptimo de compensación

| Antes de la compensación | | Especificación de kVAR de una batería de condensadores que se van a instalar por kW de carga para mejorar $\cos \varphi$ (el factor de potencia) o $\tan \varphi$ con un valor determinado | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | $\tan \varphi$ | 0,75 | 0,59 | 0,48 | 0,46 | 0,43 | 0,40 | 0,36 | 0,33 | 0,29 | 0,25 | 0,20 | 0,14 | 0,0 |
| $\tan \varphi$ | $\cos \varphi$ | $\cos \varphi$ | 0,80 | 0,86 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1 |
| 2,29 | 0,40 | | 1,557 | 1,691 | 1,805 | 1,832 | 1,861 | 1,895 | 1,924 | 1,959 | 1,998 | 2,037 | 2,085 | 2,146 | 2,288 |
| 2,22 | 0,41 | | 1,474 | 1,625 | 1,742 | 1,769 | 1,798 | 1,831 | 1,840 | 1,896 | 1,935 | 1,973 | 2,021 | 2,082 | 2,225 |
| 2,16 | 0,42 | | 1,413 | 1,561 | 1,681 | 1,709 | 1,738 | 1,771 | 1,800 | 1,836 | 1,874 | 1,913 | 1,961 | 2,022 | 2,164 |
| 2,10 | 0,43 | | 1,356 | 1,499 | 1,624 | 1,651 | 1,680 | 1,713 | 1,742 | 1,778 | 1,816 | 1,855 | 1,903 | 1,964 | 2,107 |
| 2,04 | 0,44 | | 1,290 | 1,441 | 1,558 | 1,585 | 1,614 | 1,647 | 1,677 | 1,712 | 1,751 | 1,790 | 1,837 | 1,899 | 2,041 |
| 1,98 | 0,45 | | 1,230 | 1,384 | 1,501 | 1,532 | 1,561 | 1,592 | 1,628 | 1,659 | 1,695 | 1,737 | 1,784 | 1,846 | 1,988 |
| 1,93 | 0,46 | | 1,179 | 1,330 | 1,446 | 1,473 | 1,502 | 1,533 | 1,567 | 1,600 | 1,636 | 1,677 | 1,725 | 1,786 | 1,929 |
| 1,88 | 0,47 | | 1,130 | 1,278 | 1,397 | 1,425 | 1,454 | 1,485 | 1,519 | 1,532 | 1,588 | 1,629 | 1,677 | 1,758 | 1,881 |
| 1,83 | 0,48 | | 1,076 | 1,228 | 1,343 | 1,370 | 1,400 | 1,430 | 1,464 | 1,497 | 1,534 | 1,575 | 1,623 | 1,684 | 1,826 |
| 1,78 | 0,49 | | 1,030 | 1,179 | 1,297 | 1,326 | 1,355 | 1,386 | 1,420 | 1,453 | 1,489 | 1,530 | 1,578 | 1,639 | 1,782 |
| 1,73 | 0,50 | | 0,982 | 1,232 | 1,248 | 1,276 | 1,303 | 1,337 | 1,369 | 1,403 | 1,441 | 1,481 | 1,529 | 1,590 | 1,732 |
| 1,69 | 0,51 | | 0,936 | 1,087 | 1,202 | 1,230 | 1,257 | 1,291 | 1,323 | 1,357 | 1,395 | 1,435 | 1,483 | 1,544 | 1,686 |
| 1,64 | 0,52 | | 0,894 | 1,043 | 1,160 | 1,188 | 1,215 | 1,249 | 1,281 | 1,315 | 1,353 | 1,393 | 1,441 | 1,502 | 1,644 |
| 1,60 | 0,53 | | 0,850 | 1,000 | 1,116 | 1,144 | 1,171 | 1,205 | 1,237 | 1,271 | 1,309 | 1,349 | 1,397 | 1,458 | 1,600 |
| 1,56 | 0,54 | | 0,809 | 0,959 | 1,075 | 1,103 | 1,130 | 1,164 | 1,196 | 1,230 | 1,268 | 1,308 | 1,356 | 1,417 | 1,559 |
| 1,52 | 0,55 | | 0,769 | 0,918 | 1,035 | 1,063 | 1,090 | 1,124 | 1,156 | 1,190 | 1,228 | 1,268 | 1,316 | 1,377 | 1,519 |
| 1,48 | 0,56 | | 0,730 | 0,879 | 0,996 | 1,024 | 1,051 | 1,085 | 1,117 | 1,151 | 1,189 | 1,229 | 1,277 | 1,338 | 1,480 |
| 1,44 | 0,57 | | 0,692 | 0,841 | 0,958 | 0,986 | 1,013 | 1,047 | 1,079 | 1,113 | 1,151 | 1,191 | 1,239 | 1,300 | 1,442 |
| 1,40 | 0,58 | | 0,665 | 0,805 | 0,921 | 0,949 | 0,976 | 1,010 | 1,042 | 1,076 | 1,114 | 1,154 | 1,202 | 1,263 | 1,405 |
| 1,37 | 0,59 | | 0,618 | 0,768 | 0,884 | 0,912 | 0,939 | 0,973 | 1,005 | 1,039 | 1,077 | 1,117 | 1,165 | 1,226 | 1,368 |
| 1,33 | 0,60 | | 0,584 | 0,733 | 0,849 | 0,878 | 0,905 | 0,939 | 0,971 | 1,005 | 1,043 | 1,083 | 1,131 | 1,192 | 1,334 |
| 1,30 | 0,61 | | 0,549 | 0,699 | 0,815 | 0,843 | 0,870 | 0,904 | 0,936 | 0,970 | 1,008 | 1,048 | 1,096 | 1,157 | 1,299 |
| 1,27 | 0,62 | | 0,515 | 0,665 | 0,781 | 0,809 | 0,836 | 0,870 | 0,902 | 0,936 | 0,974 | 1,014 | 1,062 | 1,123 | 1,265 |
| 1,23 | 0,63 | | 0,483 | 0,633 | 0,749 | 0,777 | 0,804 | 0,838 | 0,870 | 0,904 | 0,942 | 0,982 | 1,030 | 1,091 | 1,233 |
| 1,20 | 0,64 | | 0,450 | 0,601 | 0,716 | 0,744 | 0,771 | 0,805 | 0,837 | 0,871 | 0,909 | 0,949 | 0,997 | 1,058 | 1,200 |
| 1,17 | 0,65 | | 0,419 | 0,569 | 0,685 | 0,713 | 0,740 | 0,774 | 0,806 | 0,840 | 0,878 | 0,918 | 0,966 | 1,007 | 1,169 |
| 1,14 | 0,66 | | 0,388 | 0,538 | 0,654 | 0,682 | 0,709 | 0,743 | 0,775 | 0,809 | 0,847 | 0,887 | 0,935 | 0,996 | 1,138 |
| 1,11 | 0,67 | | 0,358 | 0,508 | 0,624 | 0,652 | 0,679 | 0,713 | 0,745 | 0,779 | 0,817 | 0,857 | 0,905 | 0,966 | 1,108 |
| 1,08 | 0,68 | | 0,329 | 0,478 | 0,595 | 0,623 | 0,650 | 0,684 | 0,716 | 0,750 | 0,788 | 0,828 | 0,876 | 0,937 | 1,079 |
| 1,05 | 0,69 | | 0,299 | 0,449 | 0,565 | 0,593 | 0,620 | 0,654 | 0,686 | 0,720 | 0,758 | 0,798 | 0,840 | 0,907 | 1,049 |
| 1,02 | 0,70 | | 0,270 | 0,420 | 0,536 | 0,564 | 0,591 | 0,625 | 0,657 | 0,691 | 0,729 | 0,769 | 0,811 | 0,878 | 1,020 |
| 0,99 | 0,71 | | 0,242 | 0,392 | 0,508 | 0,536 | 0,563 | 0,597 | 0,629 | 0,663 | 0,701 | 0,741 | 0,783 | 0,850 | 0,992 |
| 0,96 | 0,72 | | 0,213 | 0,364 | 0,479 | 0,507 | 0,534 | 0,568 | 0,600 | 0,634 | 0,672 | 0,712 | 0,754 | 0,821 | 0,963 |
| 0,94 | 0,73 | | 0,186 | 0,336 | 0,452 | 0,480 | 0,507 | 0,541 | 0,573 | 0,607 | 0,645 | 0,685 | 0,727 | 0,794 | 0,936 |
| 0,91 | 0,74 | | 0,159 | 0,309 | 0,425 | 0,453 | 0,480 | 0,514 | 0,546 | 0,580 | 0,618 | 0,658 | 0,700 | 0,767 | 0,909 |
| 0,88 | 0,75 | | 0,132 | 0,282 | 0,398 | 0,426 | 0,453 | 0,487 | 0,519 | 0,553 | 0,591 | 0,631 | 0,673 | 0,740 | 0,882 |
| 0,86 | 0,76 | | 0,105 | 0,255 | 0,371 | 0,399 | 0,426 | 0,460 | 0,492 | 0,526 | 0,564 | 0,604 | 0,652 | 0,713 | 0,855 |
| 0,83 | 0,77 | | 0,079 | 0,229 | 0,345 | 0,373 | 0,400 | 0,434 | 0,466 | 0,500 | 0,538 | 0,578 | 0,620 | 0,687 | 0,829 |
| 0,80 | 0,78 | | 0,053 | 0,202 | 0,319 | 0,347 | 0,374 | 0,408 | 0,440 | 0,474 | 0,512 | 0,552 | 0,594 | 0,661 | 0,803 |
| 0,78 | 0,79 | | 0,026 | 0,176 | 0,292 | 0,320 | 0,347 | 0,381 | 0,413 | 0,447 | 0,485 | 0,525 | 0,567 | 0,634 | 0,776 |
| 0,75 | 0,80 | | | 0,150 | 0,266 | 0,294 | 0,321 | 0,355 | 0,387 | 0,421 | 0,459 | 0,499 | 0,541 | 0,608 | 0,750 |
| 0,72 | 0,81 | | | 0,124 | 0,240 | 0,268 | 0,295 | 0,329 | 0,361 | 0,395 | 0,433 | 0,473 | 0,515 | 0,582 | 0,724 |
| 0,70 | 0,82 | | | 0,098 | 0,214 | 0,242 | 0,269 | 0,303 | 0,335 | 0,369 | 0,407 | 0,447 | 0,489 | 0,556 | 0,698 |
| 0,67 | 0,83 | | | 0,072 | 0,188 | 0,216 | 0,243 | 0,277 | 0,309 | 0,343 | 0,381 | 0,421 | 0,463 | 0,530 | 0,672 |
| 0,65 | 0,84 | | | 0,046 | 0,162 | 0,190 | 0,217 | 0,251 | 0,283 | 0,317 | 0,355 | 0,395 | 0,437 | 0,504 | 0,646 |
| 0,62 | 0,85 | | | 0,020 | 0,136 | 0,164 | 0,191 | 0,225 | 0,257 | 0,291 | 0,329 | 0,369 | 0,417 | 0,478 | 0,620 |
| 0,59 | 0,86 | | | | 0,109 | 0,140 | 0,167 | 0,198 | 0,230 | 0,264 | 0,301 | 0,343 | 0,390 | 0,450 | 0,593 |
| 0,57 | 0,87 | | | | 0,083 | 0,114 | 0,141 | 0,172 | 0,204 | 0,238 | 0,275 | 0,317 | 0,364 | 0,424 | 0,567 |
| 0,54 | 0,88 | | | | 0,054 | 0,085 | 0,112 | 0,143 | 0,175 | 0,209 | 0,246 | 0,288 | 0,335 | 0,395 | 0,538 |
| 0,51 | 0,89 | | | | 0,028 | 0,059 | 0,086 | 0,117 | 0,149 | 0,183 | 0,230 | 0,262 | 0,309 | 0,369 | 0,512 |
| 0,48 | 0,90 | | | | | 0,031 | 0,058 | 0,089 | 0,121 | 0,155 | 0,192 | 0,234 | 0,281 | 0,341 | 0,484 |

Fig. L15: kVAR que se deben instalar por kW de carga para mejorar el factor de potencia de una instalación.

L13

En el caso del cálculo a partir de facturas eléctricas, un examen de varios recibos que cubren el periodo de mayor carga del año permite determinar el nivel de kVAr de potencia reactiva necesario para evitar el consumo de energía reactiva de las cargas en kVArh. El periodo de amortización de una batería de condensadores para la mejora del factor de potencia y equipos asociados es, en general, de entre 6 y 12 meses.

5.3 Método basado en la reducción de las penalizaciones en las facturas eléctricas

El siguiente método permite un cálculo de la especificación de una batería de condensadores, basándose en los detalles de facturación a partir de la tarifa eléctrica.

Este sistema determina la potencia reactiva mínima de la batería de condensadores requerida por las cargas que consumen kVArh.

El procedimiento es el siguiente:

- Consultar las facturas disponibles de varios periodos, con especial atención a los recibos de mayor gasto energético.

Nota: en climas cálidos, los meses de verano pueden constituir el periodo de carga más elevado (debido a los equipos de aire acondicionado).

- Identificar los apartados en las facturas que hacen referencia a la "energía reactiva consumida/exceso de energía reactiva" y "kVArh".

- Elegir la factura con el consumo más elevado de kVArh (tras comprobar que no se debe a una situación excepcional). Por ejemplo: 15.966 kVArh en enero.

- Evaluar el periodo total de horas en funcionamiento de la instalación para ese mes, por ejemplo: 220 horas (22 días × 10 horas), teniendo en cuenta los periodos horarios donde se factura por energía reactiva, sin contar los periodos de tarificación donde no se penaliza el consumo de reactiva, dependiendo del contrato establecido.

- El valor de compensación necesario en kVAr = kVArh facturados/número de horas de funcionamiento⁽¹⁾ = Q_c .

La potencia de la batería de condensadores instalada se elige en general para que sea ligeramente más grande que la calculada.

Algunos fabricantes proporcionan "reglas de cálculo" o programas informáticos, especialmente diseñados para facilitar este tipo de cálculo. Ofreciendo además diferentes opciones en la elección del equipo y la posibilidad de tener en cuenta los armónicos presentes en la instalación.

(1) En el periodo de facturación, durante las horas en las que se carga la energía reactiva para el caso anterior considerado:

$$Q_c = \frac{15,996 \text{ kVArh}}{220 \text{ h}} = 73 \text{ kVAr}$$

6 Compensación en bornes de un transformador

La instalación de una batería de condensadores puede evitar la necesidad de cambiar un transformador en el caso de un aumento de carga.

6.1 Compensación para aumentar la potencia activa disponible

Como se ha visto anteriormente, la compensación de una instalación puede permitir el disponer de una potencia suplementaria en bornes del transformador. Los cálculos de necesidades de reactiva han sido realizados hasta ahora teniendo en cuenta únicamente el consumo total de los receptores de una instalación.

Pero en el caso de que se deseen compensar también las pérdidas inductivas del transformador en BT, por ejemplo si se tiene una contratación de potencia en MT, la manera de realizarlo es incorporando un equipo de compensación fija en los bornes de baja del transformador, de tal manera que la instalación quede "sobrecompensada" en la parte de BT y dicha sobrecompensación sirva para compensar el trafo.

Existe la posibilidad de evitar la sustitución de un transformador por otro de mayor potencia, proporcionando la potencia activa debida a un aumento de cargas, mediante la instalación de una batería de condensadores.

La **Figura L16** muestra la potencia entregada en kW de los transformadores a plena carga con diferentes factores de potencia inductivos. A medida que mejora el coseno de la instalación, aumenta la potencia activa disponible del transformador:

| tan φ | cos φ | Potencia aparente del transformador (en kVA) | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| | | 100 | 160 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1.000 | 1.250 | 1.600 | 2.000 |
| 0,00 | 1 | 100 | 160 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1.000 | 1.250 | 1.600 | 2.000 |
| 0,20 | 0,98 | 98 | 157 | 245 | 309 | 392 | 490 | 617 | 784 | 980 | 1.225 | 1.568 | 1.960 |
| 0,29 | 0,96 | 96 | 154 | 240 | 302 | 384 | 480 | 605 | 768 | 960 | 1.200 | 1.536 | 1.920 |
| 0,36 | 0,94 | 94 | 150 | 235 | 296 | 376 | 470 | 592 | 752 | 940 | 1.175 | 1.504 | 1.880 |
| 0,43 | 0,92 | 92 | 147 | 230 | 290 | 368 | 460 | 580 | 736 | 920 | 1.150 | 1.472 | 1.840 |
| 0,48 | 0,90 | 90 | 144 | 225 | 284 | 360 | 450 | 567 | 720 | 900 | 1.125 | 1.440 | 1.800 |
| 0,54 | 0,88 | 88 | 141 | 220 | 277 | 352 | 440 | 554 | 704 | 880 | 1.100 | 1.408 | 1.760 |
| 0,59 | 0,86 | 86 | 138 | 215 | 271 | 344 | 430 | 541 | 688 | 860 | 1.075 | 1.376 | 1.720 |
| 0,65 | 0,84 | 84 | 134 | 210 | 265 | 336 | 420 | 529 | 672 | 840 | 1.050 | 1.344 | 1.680 |
| 0,70 | 0,82 | 82 | 131 | 205 | 258 | 328 | 410 | 517 | 656 | 820 | 1.025 | 1.312 | 1.640 |
| 0,75 | 0,80 | 80 | 128 | 200 | 252 | 320 | 400 | 504 | 640 | 800 | 1.000 | 1.280 | 1.600 |
| 0,80 | 0,78 | 78 | 125 | 195 | 246 | 312 | 390 | 491 | 624 | 780 | 975 | 1.248 | 1.560 |
| 0,86 | 0,76 | 76 | 122 | 190 | 239 | 304 | 380 | 479 | 608 | 760 | 950 | 1.216 | 1.520 |
| 0,91 | 0,74 | 74 | 118 | 185 | 233 | 296 | 370 | 466 | 592 | 740 | 925 | 1.184 | 1.480 |
| 0,96 | 0,72 | 72 | 115 | 180 | 227 | 288 | 360 | 454 | 576 | 720 | 900 | 1.152 | 1.440 |
| 1,02 | 0,70 | 70 | 112 | 175 | 220 | 280 | 350 | 441 | 560 | 700 | 875 | 1.120 | 1.400 |

Fig. L16: Potencias activas de transformadores a plena carga para distintos factores de potencia.

L15

Nota: en una instalación cuyo factor de potencia es 1, el transformador entrega toda su potencia aparente (kVA) en potencia activa (kW).

Ejemplo (consulte la **Figura L17**)

Una instalación se alimenta desde un transformador de 630 kVA cargado con 450 kW (P_1) con un factor de potencia medio de retraso de 0,8. La potencia aparente:

$$S_1 = \frac{450}{0,8} = 562 \text{ kVA}$$

La potencia reactiva correspondiente:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 337 \text{ kVAr}$$

El aumento de carga previsto $P_2 = 100$ kW con un factor de potencia de retraso de 0,7.

La potencia aparente: $S_2 = \frac{100}{0,7} = 143 \text{ kVA}$

La potencia reactiva correspondiente:

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102 \text{ kVAr.}$$

¿Cuál es el valor mínimo de kVAr capacitivos que se debe instalar para evitar un cambio de transformador?

Potencia total que se debe proporcionar ahora:

$$P = P_1 + P_2 = 550 \text{ kW.}$$

La capacidad de potencia reactiva máxima del transformador de 630 kVA cuando proporciona 550 kW es:

$$Q_m = \sqrt{S^2 - P^2} \quad Q_m = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{ kVAr.}$$

La potencia reactiva total requerida por la instalación antes de la compensación:

$$Q_1 + Q_2 = 337 + 102 = 439 \text{ kVAr.}$$

Por ello, el tamaño mínimo para la batería de condensadores que se debe instalar:

$$Q_{\text{kVAr}} = 439 - 307 = 132 \text{ kVAr.}$$

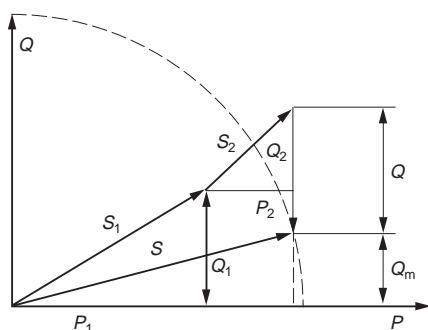


Fig. L17: La compensación Q permite añadir la extensión de carga de instalación S2, sin necesidad de sustituir el transformador existente, cuya salida está limitada a S.

Al realizar una medición en el lado de AT de un transformador, puede resultar necesario compensar las pérdidas de energía reactiva en dicho transformador (dependiendo de las tarifas vigentes).

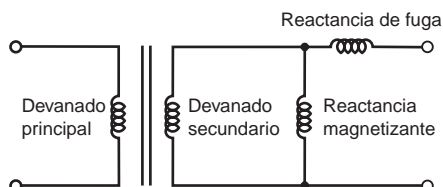


Fig. L18: Esquema equivalente de un transformador de potencia.

La potencia reactiva absorbida por un transformador no debe ser despreciada, ya que puede ascender hasta un 5% de la potencia del transformador cuando éste trabaja a plena carga. En los transformadores, la potencia reactiva es absorbida por reactancias en paralelo (magnetizantes) y en serie (flujo de fuga). Una batería de condensadores de BT puede proporcionar una compensación completa.

L16

Se debe observar que en este cálculo no se han tenido en cuenta las cargas de picos ni su duración.

La mejora más sobresaliente posible, es decir, una corrección que alcanza un factor de potencia de 1, permitiría una reserva de potencia para el transformador de $630 - 550 = 80$ kW. La batería de condensadores se debería determinar entonces en 439 kVAR.

6.2 Compensación de la energía reactiva absorbida por el transformador

Naturaleza de las reactancias inductivas del transformador

Hasta ahora sólo se había tenido en cuenta la reactancia inductiva de las cargas en paralelo; sin embargo, las reactancias conectadas en serie, como las de las líneas de potencia y los arrollamientos del primario de los transformadores, también absorben energía reactiva.

Para determinar dichas pérdidas de energía reactiva se puede representar el esquema equivalente de un transformador ideal como el de la **Figura L18**, la corriente magnetizante tiene un valor prácticamente constante (entorno al 1,8% de la intensidad a plena carga) desde que el transformador trabaja en vacío hasta que está a plena carga.

Por esta razón, y ya que va a existir un consumo prácticamente constante de kVAR independientemente de las condiciones de carga, se suele realizar la compensación en vacío de los transformadores mediante un condensador fijo en bornes de BT (o AT dependiendo de la instalación).

Sin embargo, también hay un consumo de reactiva variable con las condiciones de carga del transformador; por lo que está representada en la **Figura L18** una reactancia en serie que daría las pérdidas por el flujo de fuga.

Absorción de potencia reactiva X_L en reactancia (flujo de fuga) conectada en serie

Una simple ilustración de este fenómeno la proporciona el diagrama vectorial de la **Figura L19**.

El componente de corriente reactiva a través de la carga = $I \text{ sen } \phi$ para que $\text{kVAR}_L = VI \text{ sen } \phi$.

El componente de corriente reactiva de la fuente = $I \text{ sen } \phi'$ para que

$$\text{kVAR}_s = EI \text{ sen } \phi',$$

donde V y E se expresan en kV.

Se puede ver que $E > V$ y $\text{sen } \phi' > \text{sen } \phi$.

La diferencia entre $EI \text{ sen } \phi'$ y $VI \text{ sen } \phi$ da los kVAR por fase absorbidos por X_L .

Se puede observar que este valor de kVAR es igual a $I^2 X_L$ (que es análogo a las pérdidas de potencia activa de $I^2 R$ (kW) debidas a la resistencia en serie de las líneas eléctricas, etc.).

A partir de la fórmula $I^2 X_L$ es muy simple deducir los kVAR absorbidos con cualquier valor de carga para un transformador determinado, del modo siguiente:

Si se utilizan valores por unidad (en lugar de valores porcentuales), se puede realizar la multiplicación directa de I y X_L .

Ejemplo

Un transformador de 630 kVA con una tensión de reactancia de cortocircuito del 4% está plenamente cargado.

¿Cuál es la pérdida (kVAR) de potencia reactiva?

$$4\% = 0,04 \text{ pu } I_{pu} = 1$$

$$\text{pérdida} = I^2 X_L = 1^2 \times 0,04 = 0,04 \text{ pu kVAR},$$

donde 1 pu = 630 kVA.

Las pérdidas de kVAR trifásicos son $630 \times 0,04 = 25,2$ kVAR (o, más simplemente, un 4% de 630 kVA).

A media carga, es decir, $I = 0,5$ pu las pérdidas serán $0,5^2 \times 0,04 = 0,01$ pu = $630 \times 0,01 = 6,3$ kVAR, etc.

Este ejemplo y el diagrama vectorial de la **Figura L21** de la página siguiente muestran que:

- El factor de potencia en el lado primario de un transformador cargado es diferente (normalmente más bajo) que en el lado secundario (debido a la absorción de vars).
- Las pérdidas de kVAR de plena carga debidas a la reactancia de fuga son iguales a las de reactancia porcentual del transformador (una reactancia del 4% significa una pérdida de kVAR igual al 4% de la especificación de kVA del transformador).
- Las pérdidas de kVAR debidas a la reactancia de fuga varían en función de la corriente (o carga de kVA) al cuadrado.

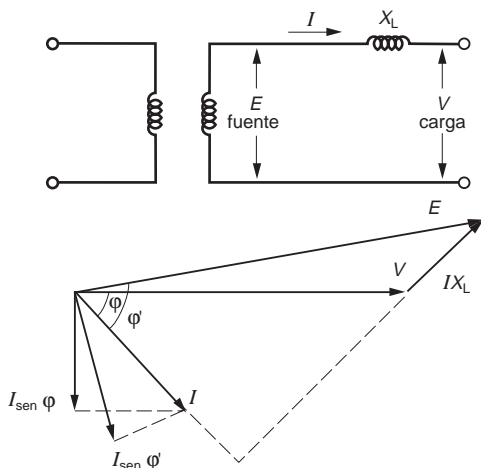


Fig. L19: Absorción de potencia reactiva por inductancia en serie.

6 Compensación en bornes de un transformador

Para determinar las pérdidas totales de un transformador (en kVAr), se deben añadir las pérdidas del circuito de corriente magnetizante constante (aproximadamente un 1,8% de la potencia nominal del transformador) a todas las pérdidas anteriormente calculadas. La **Figura L20** muestra las pérdidas en kVAr sin carga y a plena carga para transformadores de distribución típicos.

En principio, estas pérdidas se pueden compensar mediante condensadores fijos (como suele suceder para las líneas de transmisión de AT de gran longitud).

| Potencia nominal (kVA) | Potencia reactiva (kVAr) que se debe compensar | |
|------------------------|--|-------------|
| | Sin carga | Plena carga |
| 100 | 2,5 | 6,1 |
| 160 | 3,7 | 9,6 |
| 250 | 5,3 | 14,7 |
| 315 | 6,3 | 18,4 |
| 400 | 7,6 | 22,9 |
| 500 | 9,5 | 28,7 |
| 630 | 11,3 | 35,7 |
| 800 | 20 | 54,5 |
| 1.000 | 23,9 | 72,4 |
| 1.250 | 27,4 | 94,5 |
| 1.600 | 31,9 | 126 |
| 2.000 | 37,8 | 176 |

Fig. L20: Consumo de potencia reactiva de los transformadores de distribución con devanados primarios de 20 kV.

Cabe destacar que las pérdidas de kVAr en un transformador pueden compensarse por completo ajustando la batería de condensadores para dar a la carga un (ligero) factor de potencia capacitivo. En estos casos, todos los kVAr del transformador se proporcionan desde la batería de condensadores, mientras que la entrada al lado de AT del transformador está en el factor de potencia de la unidad, tal como se muestra en la **Figura L21**.

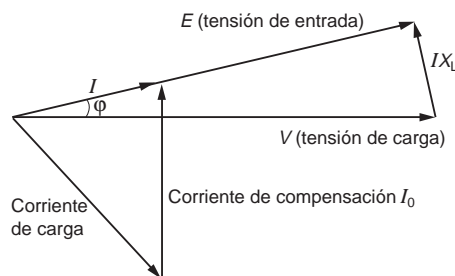


Fig. L21: Sobrecompensación de la carga para compensar las pérdidas del transformador.

En términos prácticos, la compensación de la potencia reactiva absorbida por el transformador está incluida en los condensadores previstos principalmente para la corrección del factor de potencia de la carga, ya sea en modo global, parcial o individual.

A diferencia de la mayoría de los elementos que absorben reactiva, la absorción del transformador (es decir, la parte debida a la reactancia de fuga) cambia significativamente con las variaciones de nivel de carga, de modo que si se aplica la compensación individual al transformador, se debe suponer entonces un nivel medio de carga.

Afortunadamente, este consumo de kVAr sólo constituye en general una parte relativamente pequeña de la potencia reactiva total de una instalación, por lo que una desigualdad de compensación durante el cambio de carga no resulta ser un problema.

7 Mejora del factor de potencia en motores asíncronos

Se recomienda compensar un motor de forma individual, cuando su potencia nominal respecto a la potencia declarada de la instalación es relativamente grande en comparación con el resto de cargas.

7.1 Compensación fija de motores y ajustes en la protección

Precauciones generales

Debido al reducido consumo de kW, el factor de potencia de un motor es muy bajo en regímenes de vacío (sin carga) o con una carga débil. La corriente reactiva que absorbe un motor asíncrono es prácticamente constante y tiene un valor aproximado del 90% de la intensidad de vacío.

Como regla general, se recomienda desconectar todo motor que trabaje en vacío y no sobredimensionarlos. Asimismo, las características constructivas del mismo, tales como potencia, número de polos, velocidad, frecuencia y tensión, influyen en el consumo de kVAr.

Se puede realizar la compensación fija en bornes de un motor siempre que se tomen las precauciones siguientes:

- Nueva regulación de las protecciones.
- Evitar la autoexcitación.
- No compensar motores especiales.

Conexión

Si se realiza un compensación fija del motor, el condensador fijo debe estar directamente conectado a los terminales de dicho motor.

Compensación de motores accionados mediante arrancador

Si el motor arranca con ayuda de algún dispositivo especial, tal como resistencias, inductancias, estrella triángulo o autotransformadores, es recomendable que los condensadores sean conectados después del arranque del motor. Por esta razón no se deberá realizar una compensación fija y se utilizarán condensadores accionados por contactores.

Motores especiales

Se recomienda no compensar de forma individual los equipos especiales como por ejemplo: arrancadores escalonados, motores reversibles (2 sentidos de marcha) o similares.

Efecto en los ajuste de protección

Después de realizar la compensación fija de un motor, la intensidad eficaz consumida por el conjunto motor-condensador es inferior a la intensidad inicial antes de la compensación. Esto es así porque una parte significativa de la componente reactiva de la corriente del motor se proporciona desde el condensador, tal como se muestra en la **Figura L22**.

En consecuencia, debido a que los dispositivos de protección de máxima intensidad se encuentran aguas arriba de la conexión del condensador y del motor, los ajustes de los relés de máxima intensidad se deben reducir en la relación:

Factor de reducción = $\cos \varphi$ antes de la compensación / $\cos \varphi$ después de la compensación.

Para los motores a los que se ha aplicado una compensación individual según las potencias reactivas indicadas en la **Figura L23** (potencia reactiva máxima recomendada para evitar la autoexcitación de motores, ver subapartado 7.2, el factor de reducción tendrá un valor similar al indicado para la velocidad del motor correspondiente en la **Figura L24** de la página siguiente.

L18

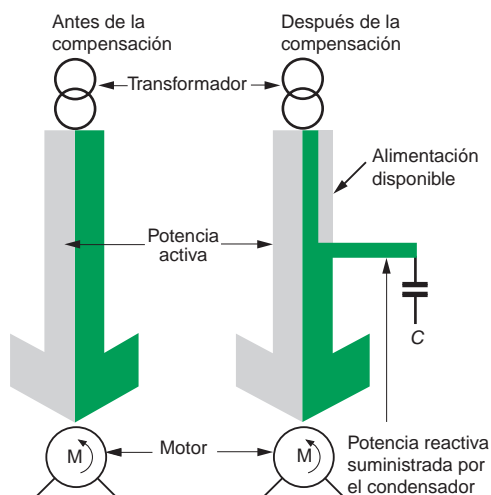


Fig. L22: Antes de la compensación, el transformador proporciona toda la potencia reactiva; después de ella, el condensador proporciona una gran parte de la potencia reactiva.

| Motores trifásicos de 230/400 V | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----------------------------|-------|-------|------|
| Potencia nominal | | kVAr que se deben instalar | | | |
| kW | CV | Velocidad de rotación (rpm) | | | |
| | | 3.000 | 1.500 | 1.000 | 750 |
| 22 | 30 | 6 | 8 | 9 | 10 |
| 30 | 40 | 7,5 | 10 | 11 | 12,5 |
| 37 | 50 | 9 | 11 | 12,5 | 16 |
| 45 | 60 | 11 | 13 | 14 | 17 |
| 55 | 75 | 13 | 17 | 18 | 21 |
| 75 | 100 | 17 | 22 | 25 | 28 |
| 90 | 125 | 20 | 25 | 27 | 30 |
| 110 | 150 | 24 | 29 | 33 | 37 |
| 132 | 180 | 31 | 36 | 38 | 43 |
| 160 | 218 | 35 | 41 | 44 | 52 |
| 200 | 274 | 43 | 47 | 53 | 61 |
| 250 | 340 | 52 | 57 | 63 | 71 |
| 280 | 380 | 57 | 63 | 70 | 79 |
| 355 | 482 | 67 | 76 | 86 | 98 |
| 400 | 544 | 78 | 82 | 97 | 106 |
| 450 | 610 | 87 | 93 | 107 | 117 |

Fig. L23: Potencia reactiva máxima recomendada para compensación fija de motor sin riesgo de autoexcitación.

7 Mejora del factor de potencia en motores asíncronos

Cuando se compensa individualmente un motor mediante un condensador fijo, es importante comprobar que la potencia reactiva del mismo sea inferior a aquella en la que puede producirse la autoexcitación.

| Velocidad en min ⁻¹ | Factor de reducción |
|--------------------------------|---------------------|
| 750 | 0,88 |
| 1.000 | 0,90 |
| 1.500 | 0,91 |
| 3.000 | 0,93 |

Fig. L24: Factor de reducción para protección de máxima intensidad después de compensación.

7.2 Cómo evitar la autoexcitación de un motor de inducción

Cuando un motor impulsa una carga de gran inercia, el motor seguirá girando (a menos que se frene deliberadamente) después de que se haya apagado la fuente de alimentación del motor. La "inercia magnética" del circuito del rotor significa que se generará una fuerza electromotriz en los devanados del estator durante un corto periodo de tiempo después del apagado y que se debería reducir normalmente a cero después de 1 o 2 ciclos, en el caso de un motor sin compensación. Los condensadores de potencia para la corrección del factor de potencia constituyen una carga reactiva trifásica para esta fuerza electromotriz decreciente, que provoca corrientes capacitivas circulantes a través de los devanados del estator. Estas corrientes del estator van a producir un campo magnético giratorio en el rotor que actúa exactamente a lo largo del mismo eje y en la misma dirección que el campo magnético decreciente.

En consecuencia, el flujo del rotor se eleva, las corrientes del estator aumentan y la tensión en los terminales del motor se incrementa, a veces hasta niveles peligrosos, pasando por lo tanto a funcionar como generador asíncrono.

Este fenómeno se conoce como autoexcitación del motor en vacío y es uno de los motivos por los cuales los generadores de corriente alterna no suelen operar con equipos de compensación fijos, ya que existe una tendencia a la autoexcitación espontánea.

Notas

1. El comportamiento de un motor arrastrado por la inercia de la carga no es idéntico al comportamiento del motor en vacío. Esta suposición, no obstante, es lo suficientemente precisa para fines prácticos.

2. Con el motor trabajando como generador, las corrientes en circulación poseen una componente reactiva elevada, por lo que el efecto de frenado en el motor se debe únicamente a la carga debida al sistema de refrigeración del motor.

Para evitar la autoexcitación tal como se ha descrito anteriormente, la potencia reactiva de la batería de condensadores (en kVAr) debe limitarse al máximo valor obtenido de:

$$Q_c \leq 0,9 \times I_o \times U_n \times \sqrt{3} \text{ donde } I_o = \text{corriente en vacío del motor y } U_n = \text{tensión nominal fase-fase del motor en V.}$$

La **Figura L26** de la página siguiente proporciona valores adecuados de Q_c correspondientes a este criterio.

Ejemplo

Un motor trifásico de 75 kW, 3.000 rpm, 400 V, puede compensarse de forma fija (en bornes) con un condensador de potencia no superior a 17 kVAr según la **Figura L24**. Los valores de la tabla son, en general, demasiado pequeños para compensar al motor hasta un nivel del $\cos \phi$ aceptable que se requiere normalmente (dependiendo de las tarifas vigentes). Se puede aplicar al sistema, no obstante, una compensación adicional, por ejemplo una batería de condensadores automática (con varios escalones) instalada en el embarrado principal para una compensación global de la instalación eléctrica.

Motores y cargas de gran inercia

En cualquier instalación donde existan cargas impulsadas por motores de gran inercia, los interruptores automáticos o contactores que controlan estos motores deben, en el caso de pérdida total de la alimentación, dispararse con rapidez. Si no se toman estas precauciones, es probable que se produzca una autoexcitación en tensiones muy altas, ya que todos los condensadores de la instalación estarán, de hecho, en paralelo con aquellos de los motores de gran inercia.

El esquema de protección para estos motores debería incluir un relé de disparo de sobretensión, junto con los contactos que comprueban la alimentación inversa (el motor transmitirá la alimentación al resto de la instalación hasta que se disipe la energía de inercia almacenada).

Si la potencia reactiva del condensador asociado al motor de gran inercia es más grande que la recomendada en la **Figura L26**, entonces es necesario controlar por separado dicho condensador mediante un interruptor automático o contactor, que se dispara de forma conjunta con el interruptor automático o contactor que controla el motor principal, tal como se muestra en la **Figura L25**.

El contactor principal está normalmente asociado al contactor del condensador.

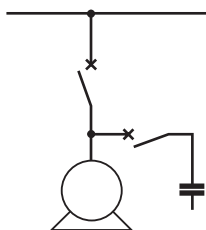
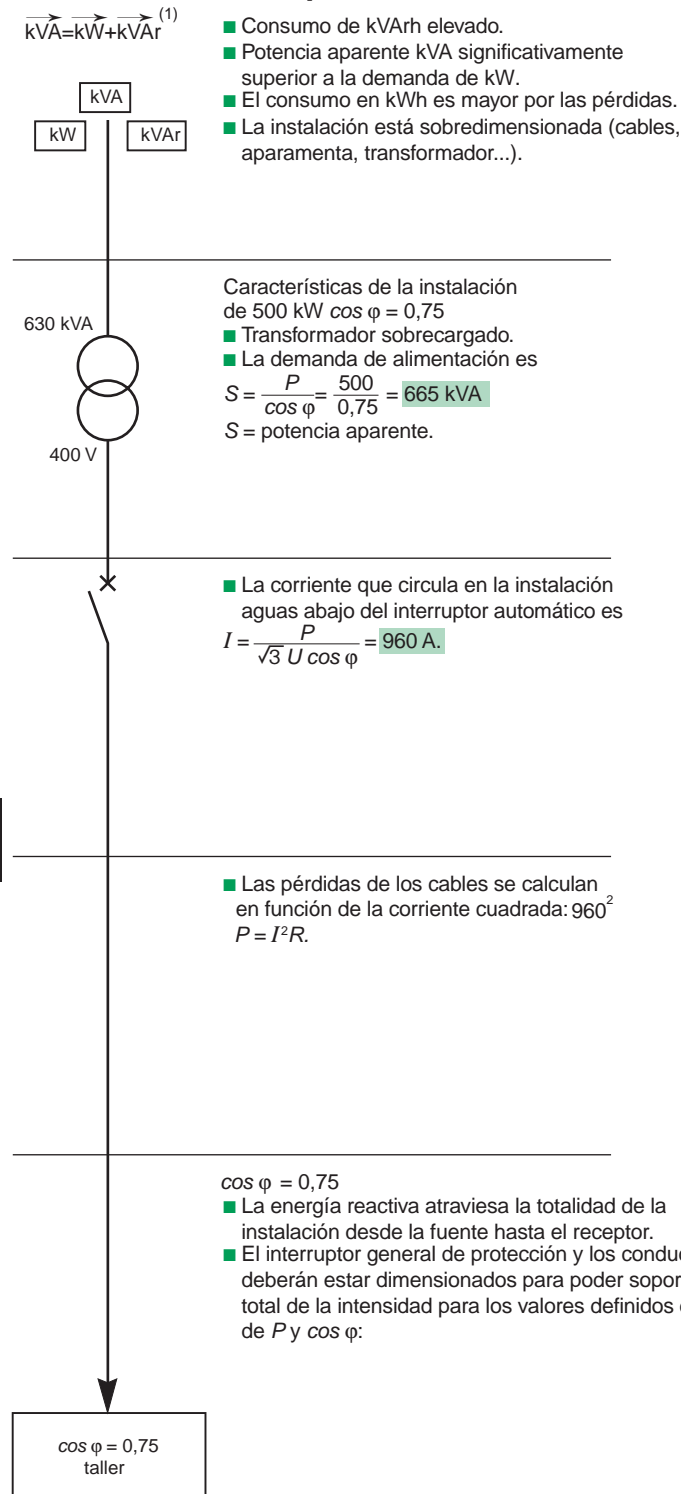


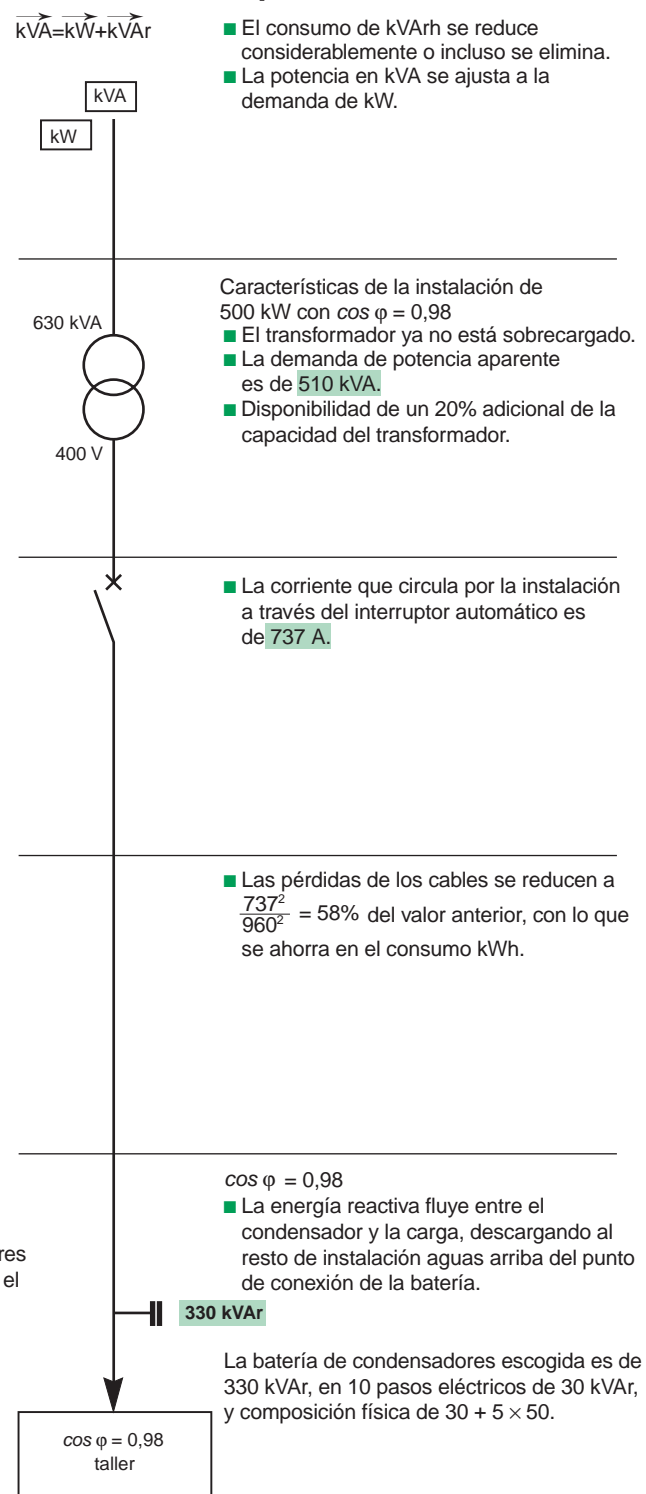
Fig. L25: Conexión de la batería de condensadores al motor.

8 Ejemplo de una instalación antes y después de la compensación de la energía reactiva

Instalación sin compensar



Instalación compensada



Nota: en realidad, el $\cos \varphi$ del taller, se mantiene en 0,75, pero el $\cos \varphi$ aguas arriba de la batería de condensadores es 0,98. Tal como se menciona en el subapartado 6.2, el $\cos \varphi$ en el lado de MT del transformador, punto de lectura de la compañía, es ligeramente inferior, debido a las pérdidas de potencia reactiva en el transformador.

Fig. L26: Comparación técnico-económica de una instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

(1) Las flechas indican cantidades vectoriales.
 (2) Moreso en el caso previamente corregido.

9.1 Problemas ocasionados por los armónicos

Los equipos que utilizan componentes electrónicos de alimentación (controladores de motores de velocidad variable, rectificadores controlados por tiristores) han aumentado considerablemente los problemas provocados por los armónicos en las instalaciones eléctricas.

Los armónicos siempre han existido y los provocaban (y siguen provocándolos) las impedancias magnetizantes no lineales de transformadores, reactores, resistencias de lámparas fluorescentes, etc.

Los armónicos en sistemas de alimentación trifásicos simétricos suelen ser en general impares: tercero, quinto, séptimo, noveno... y la magnitud disminuye al ir aumentando el orden del armónico.

Conociendo las características y singularidades de los diferentes generadores de armónicos se pueden reducir los armónicos a valores insignificantes: la eliminación total casi es imposible.

En este apartado, se recomiendan medios prácticos para reducir la influencia de los armónicos, con una referencia particular a las baterías de condensadores.

Los condensadores son especialmente sensibles a los componentes armónicos de la tensión suministrada debido al hecho de que la reactancia capacitiva se reduce según va aumentando la frecuencia. En la práctica, esto significa que un porcentaje relativamente pequeño de tensión armónica puede provocar que circule una corriente elevada por el condensador.

La presencia de componentes armónicos provoca que se distorsione la forma de onda (normalmente sinusoidal) de tensión o corriente; cuanto mayor sea el contenido de armónicos, mayor será el grado de distorsión.

Si la frecuencia de resonancia del conjunto batería de condensadores/inductancia de la red es cercana a un armónico en particular, se producirá una resonancia parcial, con valores amplificados de tensión y corriente en la frecuencia del armónico en cuestión. En este caso, el aumento de corriente provocará el sobrecalentamiento del condensador, con la degradación del dieléctrico, lo que puede provocar la destrucción del condensador.

Existen varias soluciones:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos.
- Filtros híbridos.

9.2 Posibles soluciones

Filtro pasivo (véase la [Figura L27](#))

Contrarrestar los efectos de los armónicos

La presencia de armónicos de tensión produce niveles de corriente anormalmente altos a través de los condensadores. Por normativa, los condensadores deben de soportar $1,3 I_n$ en permanencia; por lo que todos los componentes que estén asociados a los condensadores, como fusibles, contactores, cables, aparamenta están sobredimensionados de forma similar, entre 1,3 y 1,5 la I_n del condensador. La distorsión armónica de la onda de tensión produce con frecuencia una forma de onda de "pico", en la que aumenta el valor del pico de la onda sinusoidal a la frecuencia fundamental.

Esta posibilidad se tiene en cuenta, junto con otras condiciones de sobretensión que se producen cuando se contrarrestan los efectos de resonancia, aumentando el nivel de tensión de los condensadores.

En algunos casos, con estas dos contramedidas, sobredimensionamiento en corriente y tensión, es suficiente para lograr un funcionamiento satisfactorio.

Contrarrestar los efectos de la resonancia

Los condensadores son dispositivos reactivos lineales y, por consiguiente, no generan armónicos. La instalación de condensadores en una instalación (en el que las impedancias son predominantemente inductivas) puede, no obstante, producir resonancia total o parcial en una de las frecuencias armónicas.

El rango armónico h_0 de la frecuencia de resonancia natural entre la inductancia del sistema y la batería de condensadores lo proporciona

$$h_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

S_{sc} = Potencia de cortocircuito, kVA, del sistema en el punto de conexión de la batería de condensadores.

Q = Potencia de la batería de condensadores en kVAR.

h_0 = rango armónico.

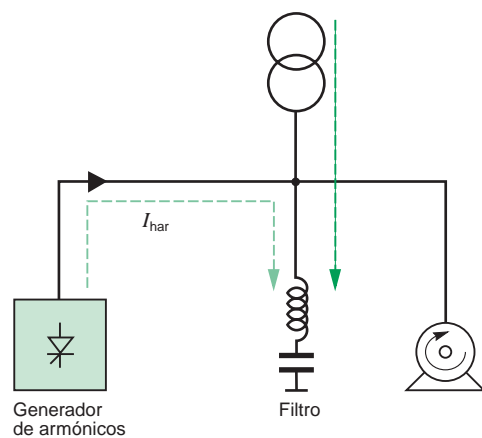


Fig. L27: Principio de funcionamiento del filtro pasivo.

L21

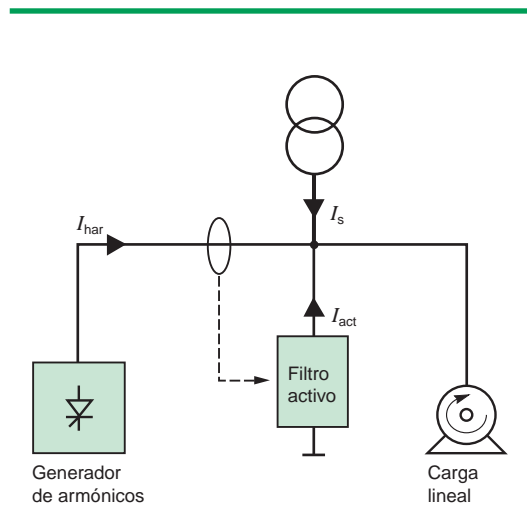


Fig. L28: Principio de funcionamiento del filtro activo.

Por ejemplo: $h_o = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$ con un valor de 2,93, indica que la frecuencia de resonancia del conjunto condensador - inductancia de la red está próxima a la frecuencia del tercer armónico.

Cuando más se acerca la frecuencia de resonancia a uno de los armónicos presentes en el sistema, más probabilidades de sufrir las consecuencias negativas de los armónicos. En el ejemplo anterior, se van a producir con seguridad fuertes condiciones de resonancia con la componente del tercer armónico.

En estos casos, se debe cambiar la frecuencia de resonancia por un valor que no presente resonancia con ninguno de los armónicos que se sabe que estarán presentes.

Esto se consigue añadiendo una inductancia antiarmónicos en serie con los condensadores.

En redes de 50 Hz, el conjunto condensador inductancia se sintoniza a una frecuencia de resonancia entre 189-215 Hz.

La frecuencia de sintonía del conjunto L_C aumenta el nivel de tensión en bornes del condensador, en torno a un 7-8%; por lo que la tensión asignada de los condensadores debe ser como mínimo de 440 v, para redes de 400 V.

Filtro activo (véase la Figura L28)

Los filtros activos están basados en la tecnología electrónica de potencia. Normalmente se instalan en paralelo a las cargas no lineales.

Los filtros activos analizan los armónicos generados por las cargas no lineales e inyectan a la red la misma corriente armónica desfasada 180°. En consecuencia, las corrientes armónicas se neutralizan por completo; es decir que ya no circulan aguas arriba del filtro activo.

Una de las ventajas de los compensadores activos es que siguen garantizando una compensación de armónicos eficaz incluso cuando se realizan modificaciones en la instalación.

Generalmente, son también fáciles de utilizar ya que presentan:

- Autoconfiguración para cargas de armónicos independientemente del orden de magnitud.
- Eliminación de riesgos de sobrecarga.
- Compatibilidad con generadores eléctricos.
- Conexión en cualquier punto de la red eléctrica.
- Se pueden utilizar varios compensadores activos en la misma instalación para aumentar el rango de corrientes armónicas a eliminar.

Los filtros activos proporcionan también la corrección del factor de potencia, si se utilizan los amperios "sobrantes" para ese cometido, no siendo recomendable este uso por el elevado coste del amperio reactivo.

Filtro híbrido (véase la Figura L29)

Este tipo de filtro combina ventajas de filtros activos y pasivos. Se puede filtrar una frecuencia mediante un filtro pasivo, y un filtro activo filtra todas las demás frecuencias.

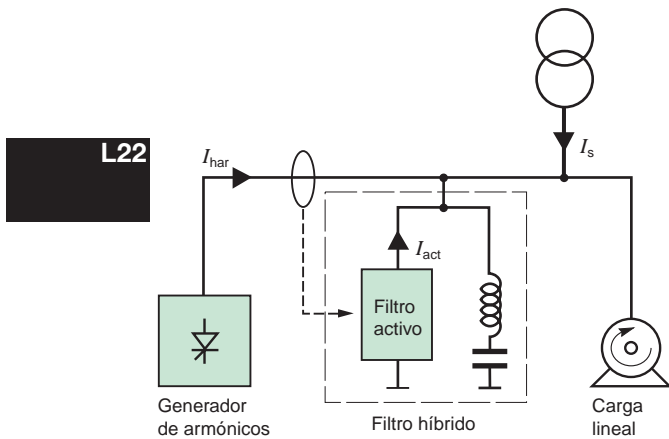


Fig. L29: Principio de funcionamiento del filtro híbrido.

9.3 Elección de la solución óptima

En la **Figura L30** se muestran los criterios a tener en cuenta para seleccionar la tecnología más adecuada en función de la aplicación.

| | Filtro pasivo | Filtro activo | Filtro híbrido |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Aplicaciones | Industrial | Sector terciario | Industrial |
| ...con potencia total de cargas no lineales (variador de velocidad variable, SAI, rectificador...) | Superior a 200 kVA | Inferior a 200 kVA | Superior a 200 kVA |
| Corrección del factor de potencia | | No | |
| Necesidad de reducir la distorsión armónica en la tensión para cargas sensibles | | | |
| Necesidad de reducir la distorsión armónica en la corriente para evitar sobrecarga del cable | | | |
| Necesidad de cumplir los límites estrictos de armónicos rechazados | No | No | |

Fig. L30: Selección de la tecnología más adecuada en función de la aplicación.

Para la elección del filtro pasivo, se realiza una elección a partir de los siguientes parámetros:

- G_h = la suma de potencia en kVA de todos los generadores de armónicos (convertidores estáticos, inversores, controladores de velocidad, etc.) conectados al mismo embarrado que alimenta a la batería de condensadores. Si la potencia de estos dispositivos está en kW, suponer un factor de 0,7 para obtener los valores en kVA.
- S_{sc} = Potencia de cortocircuito, kVA, del sistema en el punto de conexión de la batería de condensadores.
- S_n = la suma de las potencias en kVA de todos los transformadores del sistema a analizar.

Si hay transformadores en paralelo, la eliminación de uno o varios de ellos cambiará significativamente los valores de S_{sc} y S_n .

- Regla general válida para cualquier tamaño de transformador

| $G_h \leq \frac{S_{sc}}{120}$ | $\frac{S_{sc}}{120} < G_h \leq \frac{S_{sc}}{70}$ | $G_h > \frac{S_{sc}}{70}$ |
|-------------------------------|--|--|
| Condensadores estándar | Especificación de tensión de condensadores aumentada en un 10% (excepto unid. 230 V) | Especificación de tensión de condensadores aumentada en un 10% + reactor de eliminación de armónicos |

- Regla simplificada en caso de especificación de transformadores $S_n \leq 2$ MVA

| $G_h \leq 0,15 S_n$ | $0,15 S_n < G_h \leq 0,25 S_n$ | $0,25 S_n < G_h \leq 0,60 S_n$ | $G_h > 0,60 S_n$ |
|------------------------|--|--|------------------|
| Condensadores estándar | Especificación de tensión de condensadores aumentada en un 10% (excepto unid. 230 V) | Especificación de tensión de condensadores aumentada en un 10% + reactor de eliminación de armónicos | Filtros |

Fig. L31: Elección de soluciones para limitar los armónicos asociados con una batería de condensadores de BT alimentados a través de los transformadores.

Con la **Figura L31**, se puede realizar una elección rápida del equipo más adecuado en función de la relación existente entre la potencia de los generadores de armónicos y la potencia de cortocircuito de la instalación.

L23

10 Instalación de baterías de condensadores

10.1 Elementos del condensador

Tecnología

La utilización de un film de polipropileno metalizado evita la necesidad de cualquier impregnante, proporcionando la ventaja de la autocicatrización.

■ El sistema de protección HQ, que integra cada elemento monofásico, avala la seguridad en su utilización al proteger frente a los dos tipos de defectos que se pueden dar en el fin de vida de los condensadores:

- La protección contra los defectos de elevada intensidad se realiza por un fusible interno de alto poder de corte.
- La protección contra los defectos de baja intensidad se realiza por la combinación de una membrana de sobrepresión asociada al fusible interno APR.

■ Para ambos defectos es un fusible APR normalizado el que asegura el corte del circuito eléctrico.

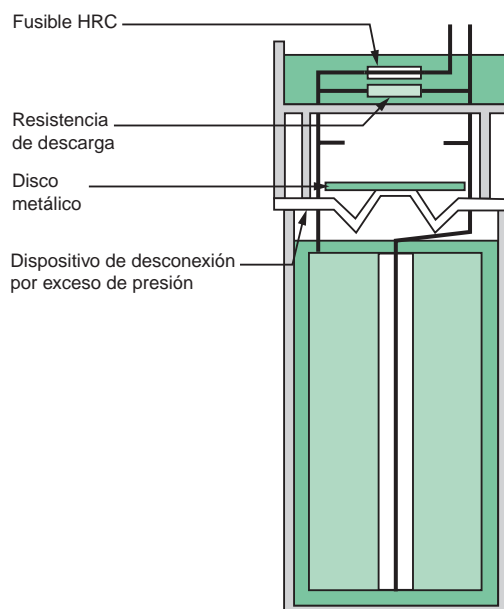
■ La envolvente plástica de los condensadores Varplus posee doble aislamiento eléctrico y ofrece unas excelentes propiedades mecánicas y una máxima autoextinguibilidad (certificación UL 94 5 VA) (consulte la [Figura L32](#)).

El film plástico aislante, polipropileno, está recubierto con una capa metálica, zinc, que constituye un electrodo. Esta capa metálica confiere al film la propiedad de autocicatrización.

En caso de perforación del aislante, causada por un defecto en el film, la energía desprendida en el punto de defecto hace evaporarse el depósito metálico alrededor del defecto, lo que reconstituye el aislamiento.

Sin embargo, la propiedad autocicatrizante tiene límites, en particular si el defecto en el film es demasiado importante: el film alrededor del defecto está deteriorado y pierde sus propiedades aislantes, esto puede implicar un aumento de temperatura y presión en el interior del bote. En este momento el sistema HQ comienza a actuar.

a)



b)

| Características eléctricas | | |
|--|--------------------------------|---|
| Estándares | | Normas IEC 60439-1, NFC 54-104, VDE 0560 CSA, pruebas UL |
| Margen de funcionamiento | Tensión nominal | 400 V |
| | Frecuencia nominal | 50 Hz |
| Tolerancia de capacidad | | de - 5% a + 10% |
| Margen de temperaturas (hasta 65 kVAr) | Temperatura máxima | 55 °C |
| | Temperatura media durante 24 h | 45 °C |
| | Temperatura anual media | 35 °C |
| | Temperatura mínima | - 25 °C |
| Nivel de aislamiento | | Tensión de resistencia de 1 min de 50 Hz: 6 kV Tensión de resist. impulsos de 1,2/50 ms: 25 kV |
| Sobrecarga de corriente permisible | Margen estándar | 30% |
| | Margen H | 50% |
| Sobrecarga de tensión permisible | Margen estándar | 10% |
| | Margen H | 20% |

Fig. L32: Elemento de condensador, (a) sección transversal, (b) características eléctricas.

L24

10 Instalación de baterías de condensadores

10.2 Elección de dispositivos de protección, mando y cables de conexión

La elección de los cables de acometida y de los dispositivos de protección y control depende de la carga prevista.

Para los condensadores, la corriente está en función de la tensión aplicada, las componentes armónicas y de la capacidad del condensador.

La corriente nominal I_n (A) de un condensador de potencia reactiva (VAR) de un sistema trifásico con una tensión fase/fase de U_n (V) viene dada por la ecuación:

$$I_n > \frac{Q}{U_n \sqrt{3}}$$

El margen permitido de tensión aplicada a la frecuencia fundamental, además de los componentes armónicos, y las tolerancias de fabricación de la capacidad real pueden provocar un aumento de un 50% por encima del valor de corriente calculado. Aproximadamente el 30% de este aumento se debe a los aumentos de tensión, mientras que otro 15% es debido al margen de tolerancias de fabricación, de modo que $1,3 \times 1,15 = 1,5 I_n$.

Los cables de potencia se deberán sobredimensionar para una corriente de $1,5 I_n$ mínimo.

Todos los componentes que transmiten la corriente del condensador deben ser adecuados para cubrir la condición de "en el peor de los casos", en una temperatura ambiente de 50 °C máximo. En el caso de que se produzcan temperaturas más altas (superiores a 50 °C) en locales, etc., será necesaria la disminución de potencia de los componentes.

Protección

Los calibres de los interruptores automáticos de protección deben ser elegidos de forma que permitan un reglaje de la protección térmica de la batería de condensadores a:

- $1,36 \times I_n$ para el tipo estándar.
- $1,50 \times I_n$ para la clase H.
- $1,12 \times I_n$ para la clase SAH, sintonización 135 Hz (filtrado a partir del armónico rango 3).
- $1,31 \times I_n$ para la clase SAH, sintonización 215 Hz (filtrado a partir del armónico rango 5).

El reglaje de las protecciones de cortocircuito (magnéticas / corto retardo) deberá permitir el paso de los transitorios de conexión. El ajuste será $10 \times I_n$ para los tipos estándar, H y SAH.

Ejemplo 1

Batería de condensadores estándar Merlin Gerin de:

50 kVAR – 400 V – 50 Hz – tipo estándar: $I_n = 72$ A.

Ajuste de temporización de largo retardo: $1,36 \times I_n = 1,36 \times 72 = 98$ A.

Ajuste de temporización de corto retardo: $10 \times I_n = 10 \times 72 = 720$ A.

Ejemplo 2

Batería de condensadores clase SAH Merlin Gerin de:

50 kVAR – 400 V – 50 Hz – tipo SAH (sintonización 215 Hz): $I_n = 72$ A.

Ajuste de temporización de largo retardo: $1,31 \times I_n = 1,31 \times 72 = 94$ A.

Ajuste de temporización de corto retardo: $10 \times I_n = 10 \times 72 = 720$ A.

¿Qué dice el Reglamento BT?

ITC BT48

Los aparatos de corte y protección de los condensadores deberán soportar en régimen permanente de 1,5 a 1,8 veces la I_n asignada a cada condensador.

Fusibles de protección

Los fusibles APR de protección de los condensadores y escalones de condensadores deben ser de tipo Gg y calibrados a $1,5 I_n$.

Los fusibles de la acometida general de la batería de condensadores deben ser de tipo Gg y calibrados a $1,8 I_n$.

En la **Figura L33** de la página siguiente se proporciona la sección transversal mínima del cable aguas arriba para condensadores.

L25

10 Instalación de baterías de condensadores

| Potencia de la batería (kVAr) | Sec. transversal (mm ²) | |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | 230 V | 400 V |
| 5 | 10 | 2,5 |
| 10 | 20 | 4 |
| 15 | 30 | 6 |
| 20 | 40 | 10 |
| 25 | 50 | 16 |
| 30 | 60 | 25 |
| 40 | 80 | 35 |
| 50 | 100 | 50 |
| 60 | 120 | 70 |
| 70 | 140 | 95 |
| 90-100 | 180 | 120 |
| | 200 | 150 |
| 120 | 240 | 185 |
| 150 | 250 | 240 |
| | 300 | 2 × 95 |
| 180-210 | 360 | 2 × 120 |
| 245 | 420 | 2 × 150 |
| 280 | 480 | 2 × 185 |
| 315 | 540 | 2 × 240 |
| 350 | 600 | 2 × 300 |
| 385 | 660 | 3 × 150 |
| 420 | 720 | 3 × 185 |

Fig L33: Sección del cable de conexión para condensadores y baterías de condensadores, a verificar según las condiciones de la instalación y de acuerdo al RBT.

Cables para el circuito de mando

El área de sección transversal mínima de estos cables es de 1,5 mm² para 230 V. Para el lado del secundario del transformador, la sección recomendada es de $\geq 2,5$ mm².

Transitorios de tensión

Cuando entra en servicio un condensador descargado, se produce un transitorio de tensión.

El pico que se crea nunca debe ser superior a dos veces la tensión nominal, si el sistema se encuentra libre de armónicos.

En el caso que un condensador ya estuviera cargado, en el momento del cierre de la conexión, el transitorio de tensión puede alcanzar un valor máximo próximo a tres veces el valor del pico nominal normal de la tensión.

Esta condición máxima se produce sólo si:

- La tensión existente en el condensador es igual al valor máximo de la tensión nominal.
- Los contactos de la conexión se cierran en el momento de valor de tensión máximo.
- La polaridad de la tensión del sistema de alimentación es opuesta a la del condensador cargado.

En esta situación, el transitorio de corriente llegará a su máximo valor posible.

Para cualquier otro valor de tensión y polaridad en el condensador precargado, los picos de transitorios de tensión y corriente serán inferiores a los mencionados anteriormente.

Si se tiene en cuenta la conexión automática de escalones de condensadores, hay que asegurarse de que el condensador que vaya a entrar esté totalmente descargado.

Generalmente las baterías automáticas están controladas por un regulador de energía reactiva que asegura que, a la conexión de un escalón, el condensador está descargado.

Los cálculos se han realizado para cables unipolares al aire libre a 30 °C.