



MANUAL DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Autor: Peter Riese

$$P = \left(\frac{10 \cdot f_n}{f_r} \right)^2$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} U_n^2}}{U_1}$$

$$Q_c = C \cdot S \cdot U^2 \cdot \omega$$

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

$\sqrt{3}$

Información • Tablas • Fórmulas

Todo lo que tiene que ver con la corrección del factor de energía y calidad de la energía para ingenieros y usuarios

Tecnología de vanguardia para sistemas de energía fiables

En FRAKO nuestra misión es proporcionar sistemas diseñados y optimizados para satisfacer las necesidades de nuestros clientes. Utilizamos nuestros conocimientos expertos y riqueza de experiencia en el trabajo de desarrollo y fabricación para lograr esto. La fiabilidad operativa de nuestros productos es tan conocida internacionalmente como lo es nuestra trayectoria en el desarrollo de soluciones innovadoras.

Cada esfera, cada actividad y cada operación de nuestra empresa se caracterizan por la calidad. Esto da sus frutos en la reconocida calidad del producto de FRAKO, así como en la calidad de nuestros servicios de asesoramiento y de campo. Valoramos la fiabilidad, la puntualidad y la transparencia con el mismo compromiso que tenemos con la durabilidad y el rendimiento del producto. Por esta razón, FRAKO es hoy un líder de mercado a nivel mundial en nuestras áreas de negocio:

- Condensadores de alta calidad
- Sistemas de corrección de factor de energía especificados individualmente
- Instrumentación eficiente de la calidad de la energía
- Sistemas inteligentes de gestión de la energía
- Servicio al cliente fiable antes y después de la venta

Nuestros clientes y socios comerciales saben que FRAKO significa calidad, y que calidad significa seguridad y confiabilidad. Debido a esto, podemos asumir la responsabilidad del rendimiento, la rentabilidad y la compatibilidad ambiental de nuestros productos, y podemos garantizar su seguridad para la vida, la integridad física y los bienes materiales. Estamos en condiciones de cumplir con los requisitos más exigentes y desarrollar soluciones innovadoras para satisfacer necesidades individuales.

Nuestros excelentemente capacitados y motivados trabajadores tienen la competencia técnica y la experiencia profunda para diseñar e implementar nuevas instalaciones con éxito. Nosotros mismos también tenemos especial cuidado en garantizar que la energía se utilice con moderación y eficiencia en la fabricación y operación de nuestros productos. Nuestro propio consumo de energía y emisiones generadas se monitorizan continuamente con nuestro sistema interno de gestión de la energía para garantizar que alcancemos los más altos niveles de eficiencia energética y compatibilidad ambiental.

Para el futuro, tenemos un compromiso con un esfuerzo continuo e intenso a fin de mantener nuestra posición de liderazgo y justificar la confianza depositada en nosotros por nuestros clientes en los campos de la calidad de la energía, la minimización de sus costes y la eficiencia energética.

La calidad de nuestros productos y nuestra experiencia en su aplicación son la base para proporcionar los mejores beneficios posibles a nuestros clientes. Este manual describe para los lectores interesados los fundamentos técnicos, nuestra filosofía de fabricación y nuestro compromiso continuo. Proporciona los conocimientos básicos necesarios para seleccionar, instalar y operar nuestros sistemas de corrección de factor de energía y calidad de energía.

Teningen, enero 2021

Dr. Matthias Sehmsdorf
Director Gerente

Contenido

Sección 1: Teoría básica

■ Energía activa / energía activa y reactiva	4
■ Energía reactiva / energía aparente / factor de energía (cos ϕ)	5
■ ¿Por qué corregir el factor de energía?	6

Sección 2: Métodos de corrección del factor de energía

■ Corrección individual del factor de energía	7
■ Corrección del factor de energía de grupo	7
■ Corrección del factor de energía central	8
■ Corrección del factor de energía híbrida	8

Sección 3: Determinación de la capacitancia requerida

■ Tarifas eléctricas / Estimaciones aproximadas / Listado de las cargas	9
■ Determinación a través de mediciones	10
■ Determinación a partir de la factura de la empresa de servicios públicos	13

Sección 4: Aplicaciones

■ Corrección del factor de energía para lámparas de descarga / Tabla de selección para lámparas de descarga	14
■ Corrección individual del factor de energía para transformadores / motores	16
■ Sistemas de corrección del factor de energía	20

Sección 5: Características del producto

■ Condensadores de energía	21
■ Relés de control de energía reactiva	24

Sección 6: Instalación

■ Transformadores de corriente	26
■ Protección contra sobrecorriente y cables	27
■ Protección contra ingresos	29

Sección 7: Fórmulas de cálculo

	30
--	----

Sección 8: Calidad de la energía

■ ¿Qué son los armónicos?	32
■ ¿Dónde se producen los armónicos?	34
■ ¿Qué efecto tiene un sistema PFC en una red con armónicos?	35
■ ¿Cuándo pueden producirse resonancias de red peligrosas?	36
■ ¿Qué efecto tiene la configuración del sistema en el problema de los armónicos?	37

Sección 9: Diseñar para sistemas con armónicos

■ Planificación para sistemas PFC en redes con armónicos	38
■ Medidas para contrarrestar las resonancias esperadas	39
■ Niveles máximos admisibles de armónicos	41

Sección 10: Diseñar para redes con sistemas de control remoto de audiofrecuencia

■ Efecto de los sistemas PFC sin desintonización	42
■ Efecto de los sistemas PFC desintonizados	43
■ Versiones de sistemas PFC desintonizados	44
■ Monitorización de sistemas PFC en funcionamiento	45

Sección 11: Medición y análisis de la calidad de la energía

	46
--	----

Sección 12: Sistemas de filtros armónicos

■ Sistemas de filtro pasivos	51
■ Sistemas de filtro activos	52

Sección 13: Temas destacados

■ Filtros activos (controlados por corriente) 'Activos contra armónicos'	53
■ Filtros activos (controlados por tensión) 'También para la energía del generador de reserva'	57
■ Corrección del factor de energía inductiva para parques solares 'Un caso especial'	59

Sección 1: Teoría básica

Antes de aventurarse en los detalles del diseño de sistemas de corrección del factor de energía (PFC), primero nos gustaría presentar un breve repaso de la teoría básica de los circuitos de corriente alterna.

■ 1.1: Potencia activa

Con una carga puramente resistiva que no tiene componentes inductivos o capacitivos, como en un calentador eléctrico, las curvas de tensión y corriente se cruzan con la coordenada cero en el mismo punto (Fig. 1). Se dice que la tensión y la corriente están "en fase". La curva de energía (P) se calcula a partir del producto de los valores momentáneos de tensión (V) y corriente (I). Tiene una frecuencia que es el doble que la de la fuente de tensión y está totalmente en el área positiva del gráfico, ya que el producto de dos números negativos es positivo, puesto que, por supuesto, es el producto de dos números positivos.

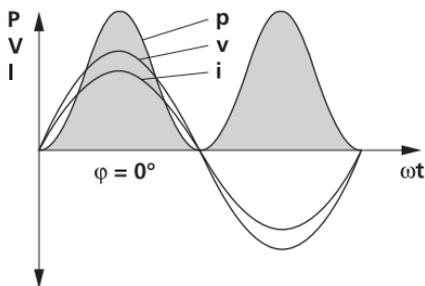


Fig. 1: Tensión, corriente y energía para una carga puramente resistiva ($\varphi = 0^\circ$)

En este caso: $(-V) \cdot (-I) = (+P)$

La energía activa o "real" se define como el componente de la energía que se convierte en otra forma (por ejemplo, calor, luz, energía mecánica) y es registrada por el medidor. Con una carga puramente resistiva (u 'óhmica') se calcula multiplicando la tensión RMS* [V] por la corriente RMS [I]:

$$P = V \cdot I$$

[W] [V] [A]

*RMS = raíz-media-cuadrada

■ 1.2: Energía- activa y reactiva

En la práctica, sin embargo, es inusual encontrar cargas puramente óhmicas, ya que también está presente un componente inductivo. Esto se aplica a todas las cargas que utilizan un campo magnético para funcionar, por ejemplo, motores de inducción, inductores y transformadores. Los convertidores de energía también necesitan corriente reactiva para fines de conmutación. La corriente utilizada para crear e invertir el campo magnético no se disipa, sino que fluye hacia adelante y hacia atrás como corriente reactiva entre el generador y la carga.

Como muestra la Fig. 2, las curvas de tensión y corriente ya no se cruzan con la coordenada cero en los mismos puntos. Se ha producido un desplazamiento de fase. Con las cargas inductivas, la corriente se retrasa detrás de la tensión, mientras que con las cargas capacitivas la corriente conduce la tensión. Si los valores momentáneos de energía se calculan ahora con la fórmula $P = V \cdot I$, se obtiene un producto negativo siempre que uno de los dos factores es negativo.

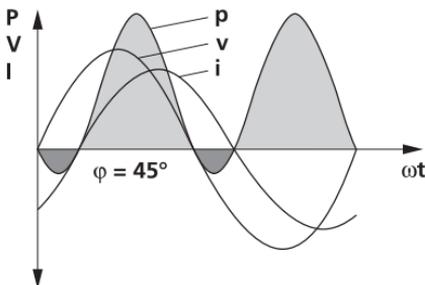


Fig. 2: Tensión, corriente y energía para una carga resistiva e inductiva ($\varphi = 45^\circ$)

En esta fase de ejemplo se ha elegido un desplazamiento $\varphi = 45^\circ$. Esto corresponde a un cos φ inductivo de 0,707. Se puede ver que parte de la curva de energía está en el área negativa. La energía activa en este caso viene dada por la fórmula:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

[W] [V] [A]

■ 1.3: Energía reactiva

La energía reactiva inductiva se produce en motores y transformadores cuando funcionan en condiciones de no carga, si se ignoran el cobre, el hierro y, en su caso, las pérdidas por fricción. Con los condensadores de energía FRAKO podemos pensar en términos de energía reactiva capacitiva prácticamente pura cuando éstos muestran pérdidas extremadamente bajas (menos del 0,05%).

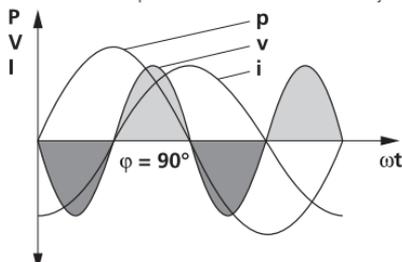


Fig. 3: Tensión, corriente y energía para una carga puramente reactiva ($\varphi = 90^\circ$)

Si las curvas de tensión y corriente están 90° fuera de fase, una mitad de la curva de energía se encuentra en el área positiva, con la otra mitad en el área negativa (Fig. 3). Por lo tanto, la energía activa es cero, ya que las áreas positiva y negativa se cancelan entre sí. La energía reactiva se define como la energía que fluye hacia adelante y hacia atrás entre el generador y la carga a la misma frecuencia que la tensión de alimentación para que el campo magnético o eléctrico crezca y decaiga.

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$

[VA] [V] [A]

■ 1.4: Energía aparente

La energía aparente es fundamental para la clasificación de las redes de energía eléctrica. Los generadores, transformadores, aparata, fusibles, disyuntores y secciones transversales de conductores deben dimensionarse adecuadamente para la energía aparente que resulte del sistema. La energía aparente es el producto obtenido multiplicando la tensión por la corriente sin tener en cuenta el desplazamiento de fase.

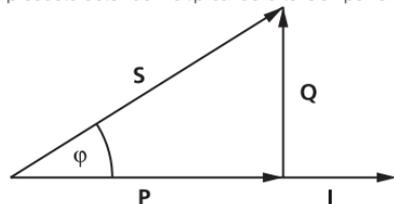


Fig. 4: Diagrama eléctrico

$$S = V \cdot I$$

[VA] [V] [A]

La energía aparente también viene dada por la adición pitagórica de la energía activa y la energía reactiva:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

[VA] [W] [VA]

■ 1.5: Factor de energía ($\cos \varphi$ y $\tan \varphi$)

El coseno (\cos) del ángulo φ de desplazamiento de fase ('ángulo de fase') entre corriente y tensión es un parámetro conveniente para calcular los componentes activos y aparentes de energía, tensión y corriente. En la práctica de la ingeniería eléctrica, este parámetro se ha denominado el "factor de energía".

El factor de energía a plena carga se da normalmente en las placas de identificación de las máquinas eléctricas.

La tangente (\tan) del ángulo de fase φ es una forma conveniente de expresar la relación entre la energía reactiva y la activa:

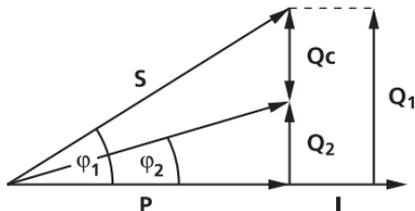
Estas dos ecuaciones muestran la relación entre el coseno y la tangente del ángulo de fase:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [W] / [VA]$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad [VA] / [W]$$

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi}} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$$

Como el sistema de distribución de energía debe dimensionarse para llevar la energía aparente, se hacen esfuerzos para mantenerla lo más baja posible. Si se instalan condensadores adecuadamente dimensionados en paralelo con las cargas, la corriente reactiva circula de un lado a otro entre el condensador y las cargas. Esto significa que el resto de la red de distribución no está sometida a esta corriente adicional. Si se alcanza un factor de energía de 1 mediante esta medida, la única corriente que fluye en el sistema de distribución es la corriente activa.



La energía reactiva Q_c corregida por el condensador está dada por la diferencia entre la energía reactiva inductiva Q_1 antes de la corrección y la energía reactiva Q_2 después de la corrección, es decir, $Q_c = Q_1 - Q_2$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

[VA] [W]

Fig. 5: Triángulo de energía que muestra el efecto de la corrección

■ 1.6: ¿Por qué corregir el factor de energía?

La corriente reactiva que circula entre el generador de la compañía de servicios públicos y el consumidor convierte la energía eléctrica en calor dentro del sistema de distribución de energía, y hay una carga adicional sobre los generadores, transformadores, cableado y aparata. Se incurre en pérdidas de energía y caídas de tensión. Si hay una alta proporción de corriente reactiva, las secciones transversales del conductor instalado no se pueden utilizar completamente para transmitir energía útil, o deben sobredimensionarse de modo correspondiente. Desde el punto de vista de la empresa de servicios públicos y el operador de la red de suministro, un factor de energía deficiente aumenta los costes de inversión y mantenimiento del sistema de distribución de energía, y estos costes adicionales se transfieren a los responsables, es decir, a los consumidores de energía que tienen factores de energía deficientes. Por lo tanto, se instala un medidor de energía reactiva además del de energía activa.

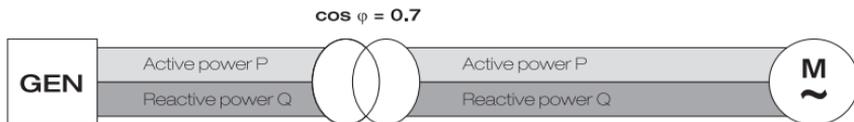
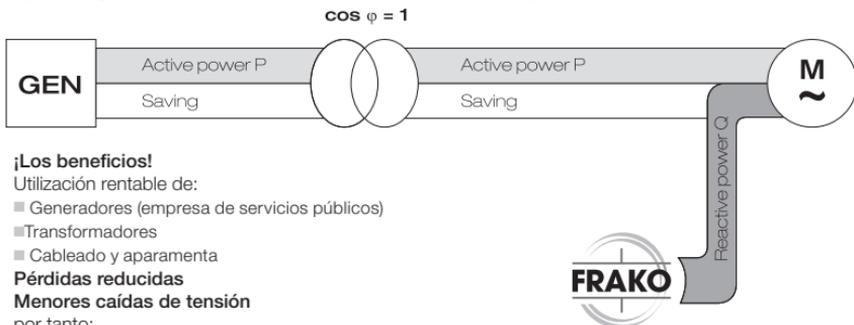


Fig. 6: Energía activa y reactiva en el sistema de distribución de energía: sin PFC



¡Los beneficios!

Utilización rentable de:

- Generadores (empresa de servicios públicos)
- Transformadores
- Cableado y aparata

Pérdidas reducidas

Menores caídas de tensión

por tanto:

¡Menores costes de la energía!



Fig. 7: Energía activa y reactiva en el sistema de distribución de energía: con PFC

Sección 2: Métodos de corrección del factor de energía

■ 2.1: Corrección individual del factor de energía

En el caso más sencillo, se instala un condensador del tamaño adecuado en paralelo con cada carga inductiva individual. Esto elimina por completo la carga adicional sobre el cableado, lo que incluye al cable que alimenta la carga compensada. La desventaja de este método, sin embargo, es que el condensador solo se utiliza durante el tiempo en que su carga asociada está en funcionamiento. Además, no siempre es fácil instalar los condensadores directamente adyacentes a las máquinas que compensan (limitaciones de espacio, costes de instalación).

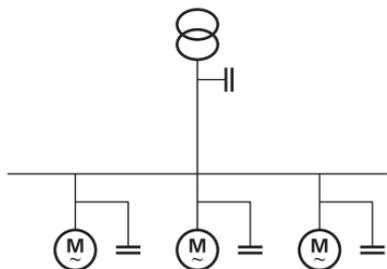


Fig. 8: Corrección típica individual del factor de energía

Aplicación:

- Para compensar la energía reactiva sin carga de los transformadores
- Para accionamientos en funcionamiento continuo
- Para accionamientos con cables de alimentación largos o cables cuya sección transversal no permite margen de error

Ventajas:

- La energía reactiva se elimina por completo del sistema interno de distribución de energía
- Bajos costes por kVAr

Desventajas:

- El sistema PFC se distribuye por toda la instalación
- Altos costes de instalación
- Se requiere una mayor energía correctora global, ya que no se puede tener en cuenta el factor de coincidencia

■ 2.2: Corrección del factor de energía de grupo

Las máquinas eléctricas que siempre están encendidas al mismo tiempo se pueden combinar como grupo y tener un condensador de corrección conjunto. Por lo tanto, se instala una unidad de tamaño adecuado en lugar de varios condensadores individuales más pequeños.

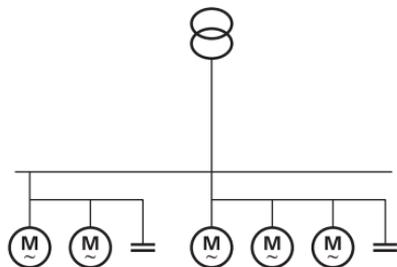


Fig. 9: Corrección típica del factor de energía de grupo

Aplicación:

- Para varias cargas inductivas, siempre que éstas se accionen siempre juntas

Ventajas:

- Similares a las de la corrección individual del factor de energía, pero más rentable

Desventajas:

- Sólo para grupos de cargas que siempre se accionan al mismo tiempo

■ 2.3: Corrección del factor de energía central

La capacitancia PFC está instalada en un punto central, por ejemplo, en la placa principal de distribución de baja tensión. Este sistema cubre la demanda total de energía reactiva. La capacitancia se divide en varias secciones que se activan y desactivan automáticamente mediante relés y contactores automáticos de control de energía reactiva con objeto de adaptarse a las condiciones de carga.

Este método se utiliza hoy en día en la mayoría de los casos. Un sistema PFC de ubicación central es fácil de monitorizar. Los modernos relés de control de energía reactiva permiten monitorizar continuamente el estado del contactor, $\cos \varphi$, las corrientes activas y reactivas y los armónicos presentes en el sistema de distribución de energía. Por lo general, la capacitancia general instalada es menor, dado que el factor de coincidencia de toda la operación industrial se puede tener en cuenta al diseñar el sistema. Esta capacitancia instalada también se utiliza mejor. Sin embargo, no elimina la corriente reactiva que circula en el sistema interno de distribución de energía del usuario; pero, si se instalan secciones transversales de conductor adecuadas, esto no tiene por qué ser una desventaja.

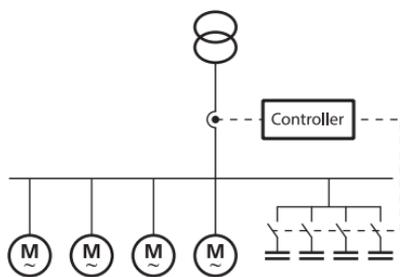


Fig. 10: Sistema típico de corrección del factor de energía central

Aplicación:

- Siempre se puede utilizar cuando el sistema de distribución de energía interno del usuario no está infradimensionado

Ventajas:

- Concepto claro y fácil de monitorizar
- Buena utilización de la capacitancia instalada
- Instalación en general relativamente simple
- Menos capacitancia total instalada, ya que se puede tener en cuenta el factor de coincidencia
- Menos costoso para sistemas de distribución de energía con problemas debidos a armónicos, ya que las unidades controladas son más fáciles de desintonizar

Desventajas:

- Las corrientes reactivas dentro del sistema interno de distribución de energía del usuario no se reducen
- Costes adicionales para el sistema de control automático

■ 2.4: Corrección del factor de energía híbrida

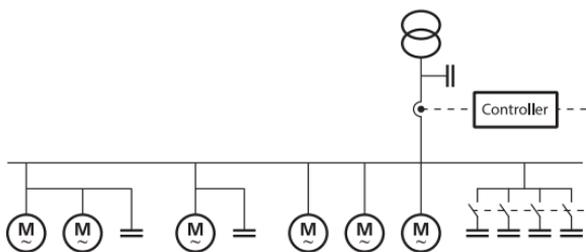


Fig. 11: Sistema típico de corrección del factor de energía híbrido

Las consideraciones económicas a menudo muestran que es ventajoso combinar los tres métodos antes descritos.

Sección 3: Determinación de la capacitancia requerida

■ 3.1: Tarifas eléctricas

Las compañías de servicios públicos, por regla general, tienen tarifas fijas para sus consumidores de energía más pequeños, mientras que los contratos de suministro individuales se negocian con los clientes más grandes.

Con la mayoría de los contratos de suministro de energía, los costes de la energía eléctrica comprenden:

- Potencia [kW], medida con un medidor de demanda máxima, por ejemplo, demanda máxima mensual o incluso anual, por regla general durante un período de 15 minutos.
- Energía activa [kWh], medida con un medidor de corriente activo, generalmente se divide en tarifas ordinaria y fuera de horas pico.
- Energía reactiva [kVarh], medida con un medidor de corriente reactiva, a veces dividida en tarifas ordinaria y fuera de horas pico.

Es una práctica normal facturar los costes de la energía reactiva sólo cuando esta supera el 50% de la energía activa extraída. Esto corresponde a un factor de energía $\cos \varphi = 0,9$. No se estipula que el factor de energía nunca deba caer por debajo de este valor de 0,9. La facturación se basa en el promedio mensual del factor de energía. Las empresas de servicios públicos en algunas áreas estipulan otros factores de energía, por ejemplo, 0,85 o 0,95.

Con otras tarifas, la energía no se factura como kW sino como kVA, por lo que los costes de la energía reactiva se incluyen en el precio de la energía. Para minimizar los costes operativos en este caso, se debe buscar tener un factor de energía de $\cos \varphi = 1$. En general, se puede suponer que, si un sistema PFC está correctamente dimensionado, se pueden ahorrar todos los costes de energía reactiva.

■ 3.2: Cálculos aproximados

Los métodos precisos para determinar el poder correctivo requerido se dan en una sección posterior. A menudo, sin embargo, es deseable estimar rápidamente el orden aproximado de magnitud. La situación también puede ocurrir cuando un ingeniero ha realizado un cálculo preciso pero luego no está muy seguro del resultado, en caso de que en algún momento se haya producido un error en su razonamiento. Se puede usar entonces una estimación aproximada para verificar que los resultados calculados estén en el orden correcto de magnitud.

Consumo	Energía correctiva del condensador
→ Motores con PFC individual	→ 35 – 40 % de la energía nominal del motor
→ Transformadores con PFC individual	→ 2,5 % de energía nominal del transformador → 5 % para transformadores más antiguos
→ PFC central	→ 25 – 33% de la energía nominal del transformador en el $\cos \varphi$ objetivo = 0,9 → 40 – 50% de la energía nominal del transformador en el $\cos \varphi$ objetivo = 1

Tabla 1: Estimaciones aproximadas para la energía correctiva requerida

■ 3.3: Enumeración de las cargas

Al diseñar una nueva instalación para una nueva planta o una sección de una planta, es práctico hacer primero una estimación aproximada de los requisitos. Una imagen más precisa se logra enumerando las cargas a instalar, junto con sus datos eléctricos, teniendo en cuenta el factor de coincidencia. En los casos en que se pueda plantear una extensión posterior, el sistema PFC debe diseñarse e instalarse de modo que la extensión no implique grandes gastos. El cableado y los circuitos protegidos del sistema PFC deben dimensionarse con objeto de atender a la expansión, y debe reservarse espacio para unidades condensadoras adicionales.

■ 3.4: Determinación mediante mediciones de corriente y factor de energía

Los amperímetros y los medidores de factor de energía a menudo se instalan en la placa principal de distribución de baja tensión, pero los medidores de abrazadera son igualmente efectivos para medir la corriente. Las mediciones se realizan en la línea de suministro principal (por ejemplo, desde el transformador) o en la línea de alimentación del equipo cuyo factor de energía debe corregirse. La medición de la tensión en el sistema de distribución de energía al mismo tiempo mejora la precisión del cálculo o simplemente se puede usar la tensión nominal (por ejemplo, 380 o 400 V).

La energía activa **P** se calcula a partir de la tensión medida **V**, la corriente aparente **I_s** y el factor de energía:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_s \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}$$

[kW] [V] [A]

Si se ha especificado el factor de energía objetivo $\cos \varphi$, la energía correctora se puede calcular a partir de la siguiente fórmula. Sin embargo, es más sencillo leer el factor "**f**" de la Tabla 2 (en [Seite 10](#)) y multiplicarlo por la energía activa calculada.

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_{\text{ist}} - \tan \varphi_{\text{soll}})$$

[VAr] [W]

O:

$$Q_C = P \cdot f$$

[VAr] [W]

Ejemplo:

■ Corriente aparente medida I_s :	248 A
■ Factor de energía medido $\cos \varphi_{\text{real}}$:	0,86
■ Objetivo $\cos \varphi_{\text{objetivo}}$:	0,92
■ Voltaje V:	397 V

Cálculo:

$$P = \sqrt{3} \cdot 397 \cdot 248 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}$$
$$P = 146,6 \text{ kW}$$

Leer de la Tabla 2:

Factor $f = 0,17$

Energía correctiva requerida:

$$Q_C = 146,6 \cdot 0,17 = \underline{24,9 \text{ kVAr}}$$

Nota:

Las mediciones realizadas, como se describió antes, naturalmente sólo dan valores momentáneos. Sin embargo, las condiciones de carga pueden variar considerablemente dependiendo de la hora del día y la estación del año. Por lo tanto, las mediciones deben ser llevadas a cabo por alguien que esté familiarizado con la instalación. Se deben hacer varias mediciones, asegurándose de que las cargas cuyo factor de energía debe corregirse estén realmente encendidas. Las mediciones también deben hacerse rápidamente –si es posible, leer todos los instrumentos simultáneamente– para que cualquier cambio repentino de carga no distorsione los resultados.

■ 3.5: Determinación mediante el registro de mediciones de energía activa y reactiva

Los resultados más fiables se obtienen con instrumentos de grabación; ya que las variables se pueden registrar durante un período de tiempo más largo, también se incluyen los valores máximos. El poder correctivo requerido se calcula entonces de la siguiente manera:

Q_C : energía correctiva requerida

Q_L : energía reactiva medida

P : energía activa medida

$\tan \varphi_2$: el valor de $\tan \varphi$ correspondiente al $\cos \varphi$ objetivo (se puede obtener de la Tabla 2, por ejemplo, cuando $\cos \varphi = 0,92$, la $\tan \varphi$ correspondiente = 0,43)

$$Q_C = \frac{Q_L}{[\text{VA}]} - \frac{(P \cdot \tan \varphi_2)}{[\text{W}]}$$

■ 3.6: Determinación mediante la lectura de los contadores

Los contadores de energía activa y reactiva se leen al comienzo de un turno. Ocho horas después se vuelven a leer ambos contadores. Si ha habido una interrupción en la operación durante este tiempo, las ocho horas deben ampliarse en la duración de esta interrupción.

RM_1 : lectura del contador de energía reactiva al inicio

RM_2 : lectura del contador de energía reactiva al final

AM_1 : lectura del contador de energía activa al inicio

AM_2 : lectura del contador de energía activa al final

$$\frac{RM_2 - RM_1}{AM_2 - AM_1} = P \cdot \tan \varphi$$

Usando este valor calculado de $\tan \varphi$ y el $\cos \varphi$ objetivo, podemos obtener el factor f en la Tabla 2. La energía correctiva requerida se puede calcular a partir de la siguiente ecuación, donde k es la relación CT de los transformadores de corriente para los contadores:

$$Q_C = \frac{(AM_2 - AM_1) \cdot k}{8} \cdot f$$

Ejemplo:

Se han obtenido las siguientes lecturas de contadores:

■ Contador de energía activa: $(AM_1) \dots 115,3$
 $(AM_2) \dots 124,6$

■ Contador de energía reactiva: $(RM_1) \dots 311,2$
 $(RM_2) \dots 321,2$

■ Tiempo entre lecturas: 8 Stunden

■ Relación CT (transformador de corriente) k :
150/5 A (=30)

Cálculo:

$$\tan \varphi = \frac{321,2 - 311,2}{124,6 - 115,3} = 1,08$$

Para un objetivo $\cos \varphi$ de 0,92, la

Tabla 2 da un factor f 0,65.

El poder correctivo requerido es, por lo tanto:

$$Q_C = \frac{(124,6 - 115,3) \cdot 30}{8} \cdot 0,65 = \underline{\underline{22,7 \text{ kVAR}}}$$

Tabla 2: Factor f ($f = \tan \varphi_{\text{real}} - \tan \varphi_{\text{objetivo}}$)

Objetivo no corregido	cos φ objetivo				← inductivo (l)				capacitivo (c) →			
	tan $\varphi \leftrightarrow$ cos φ	0,80i	0,85i	0,90i	0,92i	0,95i	0,98i	1,00	0,98c	0,95c	0,92c	0,90c
3,18 ↔ 0,30	2,43	2,56	2,70	2,75	2,85	2,98	3,18	3,38	3,51	3,61	3,66	
2,96 ↔ 0,32	2,21	2,34	2,48	2,53	2,63	2,76	2,96	3,16	3,29	3,39	3,45	
2,77 ↔ 0,34	2,02	2,15	2,28	2,34	2,44	2,56	2,77	2,97	3,09	3,19	3,25	
2,59 ↔ 0,36	1,84	1,97	2,11	2,17	2,26	2,39	2,59	2,79	2,92	3,02	3,08	
2,43 ↔ 0,38	1,68	1,81	1,95	2,01	2,11	2,23	2,43	2,64	2,76	2,86	2,92	
2,29 ↔ 0,40	1,54	1,67	1,81	1,87	1,96	2,09	2,29	2,49	2,62	2,72	2,78	
2,16 ↔ 0,42	1,41	1,54	1,68	1,73	1,83	1,96	2,16	2,36	2,49	2,59	2,65	
2,04 ↔ 0,44	1,29	1,42	1,56	1,61	1,71	1,84	2,04	2,24	2,37	2,47	2,53	
1,93 ↔ 0,46	1,18	1,31	1,45	1,50	1,60	1,73	1,93	2,13	2,26	2,36	2,41	
1,83 ↔ 0,48	1,08	1,21	1,34	1,40	1,50	1,62	1,83	2,03	2,16	2,25	2,31	
1,73 ↔ 0,50	0,98	1,11	1,25	1,31	1,40	1,53	1,73	1,94	2,06	2,16	2,22	
1,64 ↔ 0,52	0,89	1,02	1,16	1,22	1,31	1,44	1,64	1,85	1,97	2,07	2,13	
1,56 ↔ 0,54	0,81	0,94	1,07	1,13	1,23	1,36	1,56	1,76	1,89	1,98	2,04	
1,48 ↔ 0,56	0,73	0,86	1,00	1,05	1,15	1,28	1,48	1,68	1,81	1,91	1,96	
1,40 ↔ 0,58	0,65	0,78	0,92	0,98	1,08	1,20	1,40	1,61	1,73	1,83	1,89	
1,33 ↔ 0,60	0,58	0,71	0,85	0,91	1,00	1,13	1,33	1,54	1,66	1,76	1,82	
1,27 ↔ 0,62	0,52	0,65	0,78	0,84	0,94	1,06	1,27	1,47	1,59	1,69	1,75	
1,20 ↔ 0,64	0,45	0,58	0,72	0,77	0,87	1,00	1,20	1,40	1,53	1,63	1,68	
1,14 ↔ 0,66	0,39	0,52	0,65	0,71	0,81	0,94	1,14	1,34	1,47	1,56	1,62	
1,08 ↔ 0,68	0,33	0,46	0,59	0,65	0,75	0,88	1,08	1,28	1,41	1,50	1,56	
1,02 ↔ 0,70	0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02	1,22	1,35	1,45	1,50	
0,99 ↔ 0,71	0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99	1,19	1,32	1,42	1,48	
0,96 ↔ 0,72	0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96	1,17	1,29	1,39	1,45	
0,94 ↔ 0,73	0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94	1,14	1,26	1,36	1,42	
0,91 ↔ 0,74	0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91	1,11	1,24	1,33	1,39	
0,88 ↔ 0,75	0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88	1,08	1,21	1,31	1,37	
0,86 ↔ 0,76	0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86	1,06	1,18	1,28	1,34	
0,83 ↔ 0,77	0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83	1,03	1,16	1,25	1,31	
0,80 ↔ 0,78	0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80	1,01	1,13	1,23	1,29	
0,78 ↔ 0,79	0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78	0,98	1,10	1,20	1,26	
0,75 ↔ 0,80	-	0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75	0,95	1,08	1,18	1,23	
0,72 ↔ 0,81	-	0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72	0,93	1,05	1,15	1,21	
0,70 ↔ 0,82	-	0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70	0,90	1,03	1,12	1,18	
0,67 ↔ 0,83	-	0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67	0,88	1,00	1,10	1,16	
0,65 ↔ 0,84	-	0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65	0,85	0,97	1,07	1,13	
0,62 ↔ 0,85	-	-	0,14	0,19	0,29	0,42	0,62	0,82	0,95	1,05	1,10	
0,59 ↔ 0,86	-	-	0,11	0,17	0,26	0,39	0,59	0,80	0,92	1,02	1,08	
0,57 ↔ 0,87	-	-	0,08	0,14	0,24	0,36	0,57	0,77	0,90	0,99	1,05	
0,54 ↔ 0,88	-	-	0,06	0,11	0,21	0,34	0,54	0,74	0,87	0,97	1,02	
0,51 ↔ 0,89	-	-	0,03	0,09	0,18	0,31	0,51	0,72	0,84	0,94	1,00	
0,48 ↔ 0,90	-	-	-	0,06	0,16	0,28	0,48	0,69	0,81	0,91	0,97	
0,46 ↔ 0,91	-	-	-	0,03	0,13	0,25	0,46	0,66	0,78	0,88	0,94	
0,43 ↔ 0,92	-	-	-	-	0,10	0,22	0,43	0,63	0,75	0,85	0,91	
0,40 ↔ 0,93	-	-	-	-	0,07	0,19	0,40	0,60	0,72	0,82	0,88	
0,36 ↔ 0,94	-	-	-	-	0,03	0,16	0,36	0,57	0,69	0,79	0,85	
0,33 ↔ 0,95	-	-	-	-	-	0,13	0,33	0,53	0,66	0,75	0,81	
0,29 ↔ 0,96	-	-	-	-	-	0,09	0,29	0,49	0,62	0,72	0,78	
0,25 ↔ 0,97	-	-	-	-	-	0,05	0,25	0,45	0,58	0,68	0,73	
0,20 ↔ 0,98	-	-	-	-	-	-	0,20	0,41	0,53	0,63	0,69	
0,14 ↔ 0,99	-	-	-	-	-	-	-	0,14	0,35	0,47	0,57	
0,00 ↔ 1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,33	0,43	

■ 3.7: Determinación a partir de la factura de la empresa de servicios públicos

La energía correctiva requerida se puede determinar con relativa facilidad y precisión a partir de la factura mensual de la compañía de suministro de energía. Si el consumo de energía es constante durante todo el año, se puede tomar como base el consumo anual de electricidad, o cualquier factura mensual que se desee (pero no para el mes en el que se produce el apagado anual). Si las variaciones estacionales son evidentes, por supuesto, se debe seleccionar una factura de la "temporada alta". Si las tarifas ordinarias y las de fuera de horas pico se miden por separado, las tarifas ordinarias se utilizan generalmente a efectos de cálculo. Se puede suponer que la energía correctiva así derivada será adecuada para cubrir la corriente reactiva que fluye en las horas valle. Sin embargo, en casos especiales, donde se utiliza predominantemente energía fuera de pico menos costosa, el consumo fuera de pico no puede descuidarse.

■ 3.7.1: Tarifa kilovatio-hora

Con la tarifa kilovatio-hora, la demanda potencial máxima, la energía activa y la energía reactiva se facturan como artículos separados. Con la mayoría de los contratos de suministro de energía, no se cobra por la energía reactiva si su magnitud es de hasta el 50% de la energía activa. Solo se deben pagar las cantidades que superen esta cifra. Esto corresponde aproximadamente a un $\cos \varphi$ de 0,9. Sin embargo, se recomienda utilizar una cifra ligeramente superior, por ejemplo, 0,92, a efectos del cálculo, con objeto de disponer de un pequeño margen de reserva en el poder corrector disponible.

Cálculo de muestras utilizando cifras de la factura de la empresa de servicios públicos:

- Energía activa: 99 kW
- Energía activa (tarifa ordinaria): 17.820 kWh
- Energía reactiva (tarifa ordinaria): 19.245 kVarh

$$\tan \varphi = \frac{\text{Energía reactiva}}{\text{Energía activa}} = \frac{19.245 \text{ kVarh}}{17.820 \text{ kWh}} = 1,08$$

El valor real de $\cos \varphi$ ahora se puede obtener de la Tabla 2, ya que la $\tan \varphi$ calculada de 1,08 corresponde a un $\cos \varphi$ real de 0,68. Para un $\cos \varphi$ objetivo de 0,92, ahora se obtiene un factor $f = 0,65$ de la Tabla 2.

A continuación, se calcula la energía correctiva requerida, es decir, la energía activa x factor f :

$$99 \text{ kW} \cdot 0,65 = 64,35 \text{ kVA}$$

En este caso, se debe seleccionar un valor nominal de condensador de 75 kVA. Si también se tiene en cuenta una posible ampliación futura de la instalación, se podría seleccionar una capacitancia algo mayor (por ejemplo, 100 kVA).

■ 3.7.2: Tarifa de demanda

Con esta tarifa, la compañía de servicios públicos basa su factura en la cantidad máxima de energía consumida por el usuario durante el mes dado. Como la que se mide para este fin no es la energía activa sino la energía aparente, es recomendable seleccionar una energía correctiva que logre un $\cos \varphi$ de 1.

Cálculo de muestras utilizando cifras de la factura de la empresa de servicios públicos:

- Energía activa máxima: 104 kW
- Factor de energía $\cos \varphi_{\text{real}} = 0,62$

$$\frac{\text{Energía activa máxima}}{\cos \varphi} = \frac{104 \text{ kW}}{0,62} = 168 \text{ kVA}$$

De la Tabla 2, con un $\cos \varphi_{\text{real}}$ no corregido = 0,62 y un $\cos \varphi_{\text{objetivo}} = 1$, se lee un factor f de 1,27. La energía correctiva requerida se calcula entonces de la siguiente manera:

energía activa x factor f

$$104 \text{ kW} \cdot 1,27 = 132,08 \text{ kVA}$$

Para este deber es adecuado un sistema de corrección del factor de energía con una energía correctiva de 150 a 175 kVA dispuesta en etapas finamente ajustables.

Sección 4: Aplicaciones

■ 4.1: Corrección del factor de energía de grupo para lámparas de descarga

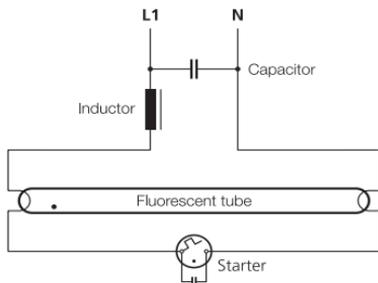


Fig. 12: Corrección individual con el condensador en paralelo con la lámpara (condensador de derivación con valor nominal de 230 V)

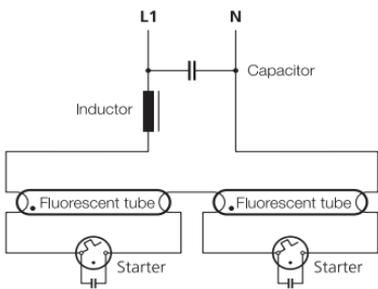


Fig. 13: Dos lámparas conectadas en tándem con el condensador en paralelo con ellas (condensador de derivación con valor nominal de 230 V)

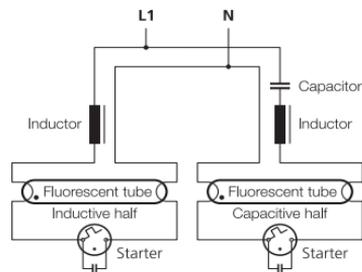


Fig. 14: Circuito dual (avance-retroceso) con el condensador en serie con una lámpara, (condensador de serie con valor nominal de 450 V)

Las lámparas de descarga deben funcionar con un balastro a fin de limitar la corriente que fluye a través de ellas. Los transformadores de alta reactancia se utilizan principalmente para lámparas de vapor de sodio de baja presión, mientras que todas las demás lámparas de descarga están equipadas con inductores como balastos. Esta reactancia inductiva da como resultado un factor de energía φ de aproximadamente 0,5 con inductores y de aproximadamente 0,3 con transformadores de alta reactancia.

Los condensadores monofásicos se pueden conectar en paralelo o en serie para corregir el factor de energía reducido causado por el balastro inductivo.

En un circuito de una sola lámpara y un circuito en serie con dos lámparas en tándem, el condensador se conecta en paralelo con las lámparas. El valor nominal de tensión del condensador de 230 V es el mismo que el de la tensión de alimentación.

Nota: Los condensadores dispuestos en paralelo con la fuente de alimentación forman un circuito oscilante junto con la impedancia de la red. Esto puede amplificar cualquier armónico que esté presente y causar interferencias en los sistemas de control remoto de audiofrecuencia (descritos por separado en la [página 42](#)). El llamado circuito de avance-retroceso es particularmente rentable y sólo necesita un condensador para dos lámparas. Un circuito de lámpara permanece puramente inductivo, mientras que el segundo balastro está en serie con un condensador. Este condensador debe estar diseñado para una tensión nominal más alta (450 V), ya que el hecho de estar en serie con el inductor aumenta la tensión que pasa a través de él. No ocurren perturbaciones debidas a la resonancia, como las que se experimentan con condensadores dispuestos en paralelo. Además, se mejora el efecto dominó de las dos lámparas individuales, reduciendo así el riesgo de que haya un efecto estroboscópico peligroso en la maquinaria giratoria. Éste es el motivo por el cual muchas compañías de suministro de energía estipulan que los usuarios dispongan el condensador y el balastro en serie, y este método generalmente se recomienda.

Los balastos electrónicos para lámparas fluorescentes o **unidades de fuente de alimentación** para lámparas LED **no requieren corrección del factor de energía**. Sin embargo, su consumo de corriente no lineal, especialmente cuando se instala un gran número de lámparas, significa que se deben esperar niveles de armónicos aumentados (consulte la sección sobre la calidad de la energía, desde la [página 32](#) en adelante).

■ 4.1.1: Tabla de selección para lámparas de descarga

Esta tabla indica los condensadores adecuados para los diversos tipos de lámparas.

Nota: En el caso de los balastos de baja pérdida, se organizan en serie condensadores más pequeños que los especificados en la tabla. La capacitancia recomendada puede variar de un fabricante de lámparas a otro, pero la capacitancia indicada en el inductor siempre es definitiva.

Éstos son los condensadores más comunes utilizados en series con balastos de baja pérdida:

- 18 W 2,7 μF / 480 V
- 36 W 3,4 μF / 450 V 3,5 μF / 450 V
- 58 W 5,3 μF / 450 V 5,4 μF / 450 V

Valor nominal de la lámpara en W	Capacitancia del condensador de derivación en μF	Capacitancia del condensador en serie en μF
----------------------------------	---	--

Lámparas fluorescentes

4 a 16	2,0 / 230 V	-
18 a 20	4,5 / 230 V	2,9 / 450 V
36 a 40	4,5 / 230 V	3,6 / 450 V
58 a 65	7,0 / 230 V	5,7 / 450 V

Lámparas de halogenuros metálicos

35	6,0 / 230 V	-
70	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	35,0 / 230 V	-
1000	85,0 / 230 V	-
2000	60,0 / 380 V	-
3500	100,0 / 380 V	-

Valor nominal de la lámpara en W	Capacitancia del condensador de derivación en μF
----------------------------------	---

Lámparas de mercurio de alta presión

50	7,0 / 230 V
80	8,0 / 230 V
125	10,0 / 230 V
250	18,0 / 230 V
400	25,0 / 230 V
700	40,0 / 230 V
1000	60,0 / 380 V

Lámparas de sodio de baja presión

18	5,0 / 230 V
35	20,0 / 230 V
55	20,0 / 230 V
90	25,0 / 230 V
135	45,0 / 230 V
150	20,0 / 230 V
180	40,0 / 230 V

Lámparas de sodio de alta presión

50	8,0 / 230 V
70	12,0 / 230 V
100	12,0 / 230 V
150	20,0 / 230 V
250	32,0 / 230 V
400	50,0 / 230 V
1000	100,0 / 230 V

■ 4.1.2: Corrección del factor de energía de grupo para lámparas de descarga

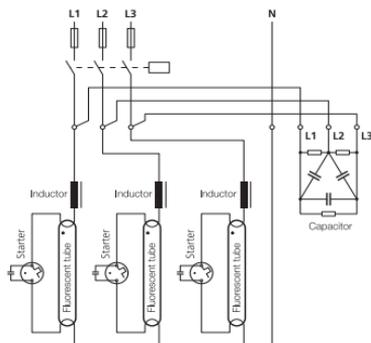


Fig. 15: Corrección de grupo para lámparas de descarga distribuidas entre las tres fases (por ejemplo, con un condensador de energía tipo LKT)

Si varias lámparas de descarga se encienden y apagan juntas y están dispuestas simétricamente, se puede usar un conjunto de condensadores trifásico común con una tensión nominal de 440 V.

Energía correctiva:

$$Q_C = n \cdot C \cdot 0,015$$

- Q_C : Energía correctiva en kVar
- n : Número de lámparas, distribuidas entre las tres fases
- C : Capacitancia de derivación por lámpara en μF

Ejemplo: 24 lámparas fluorescentes de valor nominal de 58 W cada una

$$24 \cdot 7 \mu\text{F} \cdot 0,015 = 2,52 \text{ kVar}$$

■ 4.2: Corrección individual del factor de energía para transformadores

Las regulaciones de la compañía de servicios públicos para el tamaño permitido de condensadores conectados permanentemente a un transformador varían según la región. Por lo tanto, antes de instalar un sistema PFC de este tipo, es aconsejable consultar a la empresa de servicios públicos en cuestión. El diseño moderno del transformador presenta laminaciones de núcleo que solo requieren una pequeña cantidad de energía para revertir la magnetización. Si la energía correctiva es demasiado alta, pueden ocurrir condiciones de sobretensión durante la operación sin carga.

Los condensadores con seccionadores de interruptores con fusibles integrados son adecuados para esta tarea. Si los condensadores con seccionadores de interruptores con fusibles están conectados directamente a los terminales del transformador, el diseñador debe estar consciente del hecho de que las líneas hacia el condensador deben dimensionarse de acuerdo con la energía de cortocircuito completa.

Energía nominal del transformador [en kVA]	Energía correctiva [en kVAr]
100 – 160	2,5
200 – 250	5,0
315 – 400	7,5
500 – 630	12,5
800	15,0
1000	20,0
1250	25,0
1600	35,0
2000	40,0

Tabla 3: Requisitos aproximados de energía correctiva para la corrección individual del factor de energía de los transformadores según lo especificado por la Asociación Alemana de Industrias de Energía y Agua (BDEW)

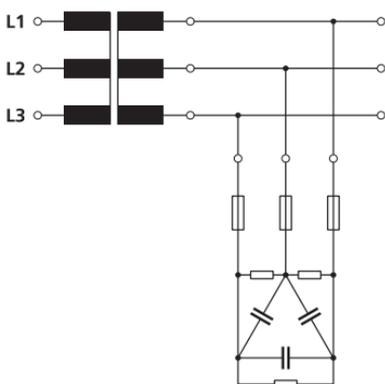


Fig. 16: Transformador típico con corrección permanente del factor de energía

El condensador con un interruptor-seccionador con fusible se puede conectar directamente a los terminales del transformador. Esto significa que las líneas al condensador deben dimensionarse de acuerdo con la energía de cortocircuito completa.

Nota: Estos seccionadores de interruptores con fusibles se accionan bajo carga puramente capacitiva. ¡Por lo tanto, nunca deben retirarse cuando estén bajo carga, pues en tal caso puedan producirse arcos peligrosos.

Si se desea desconectar el condensador incluso cuando el transformador está encendido, se debe utilizar un condensador de energía con un cortacircuitos automático.

■ 4.3: Corrección individual del factor de energía para motores

La energía correctiva debe ser de alrededor del 90% de la energía aparente del motor en condiciones de ausencia de carga.

Energía correctiva requerida:

$$Q_C = 0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot V \cdot I_0$$

I_0 = Corriente de motor sin carga

Esto logra un factor de energía de aproximadamente 0,9 a plena carga y 0,95 - 0,98 en condiciones de ausencia de carga. La Asociación Alemana de las Industrias de la Energía y el Agua (BDEW) recomienda los valores nominales aproximados de condensadores en la Tabla 4 que aparece abajo para motores de inducción que funcionen a 1500 min⁻¹. Los valores indicados en el cuadro deben incrementarse en un 5% para motores que funcionen a 1000 min⁻¹, o en un 15% para motores que funcionen a 750 min⁻¹.

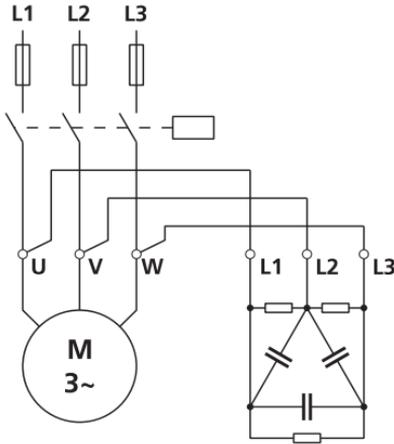
Energía nominal del motor [en kW]	Energía correctiva [en kVar]
1 a 1,9	0,5
2 a 2,9	1,0
3 a 3,9	1,5
4 a 4,9	2,0
5 a 5,9	2,5
6 a 7,9	3,0
8 a 10,9	4,0
11 a 13,9	5,0
14 a 17,9	6,0
18 a 21,9	7,5
22 a 29,9	10,0
30 a 39,9	aprox. 40% de la energía del motor
40 o más	aprox. 35% de la energía del motor

Tabla 4: Valores aproximados especificados por la BDEW para la corrección individual del factor de energía de motores

Nota: En el caso de máquinas eléctricas con corrección del factor de energía individual, en las que el condensador está conectado directamente a los terminales del motor, la energía correctora no debe sobredimensionarse en ningún caso. Esto se aplica en particular si el motor tiene una masa centrífuga alta con tendencia a funcionar después de apagarse. El condensador de derivación puede entonces excitar a la máquina para que actúe como generador, produciendo sobretensiones peligrosas. Estos pueden causar daños no solo al condensador sino también al motor.

En el caso más sencillo, el condensador está conectado directamente a los terminales del motor. No es necesario proporcionar una protección especial contra sobrecorriente para el condensador, porque la protección del motor también cubre al condensador. Si se instala un interruptor de protección del motor, es aconsejable reajustar la configuración de disparo actual a un valor inferior.

Nota: Los accionamientos de frecuencia variable requieren poca o ninguna energía reactiva, dependiendo de la tecnología empleada. Como estos dispositivos electrónicos no consumen energía sinusoidal del suministro, dan lugar a corrientes armónicas considerables, que se retroalimentan al sistema de suministro (consulte la sección sobre calidad de la energía, de la [página 32](#)).



Motor de inducción de 25 kW funcionando a 1500 min⁻¹ Condensadores de energía de 10 kVar, por ejemplo, tipo LKN 10-400-D32

Fig. 17: Corrección típica del factor de energía instalada permanentemente en un motor

Corriente de disparo reducida:

$$I_{th} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \cdot I_n$$

donde

- I_{th} : nuevo ajuste de disparo actual [en A]
- I_n : corriente nominal del motor según la placa de identificación [en A]
- $\cos \varphi_1$: $\cos \varphi$ según la placa de identificación
- $\cos \varphi_2$: $\cos \varphi$ con PFC (aprox. 0,95)

El condensador trifásico descarga directamente a través de la baja resistencia óhmica del bobinado del motor. Por lo tanto, las resistencias de descarga no son absolutamente necesarias.

■ 4.3.1: Corrección individual del factor de energía para motores de ascensores y polipastos

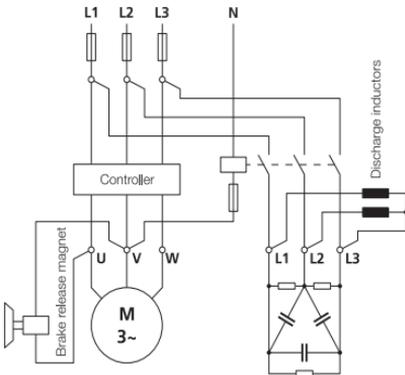


Fig. 18: Motor de elevador con su propio controlador de conmutación de condensadores y dispositivo de descarga rápida

Los motores de elevadores y polipastos funcionan con dispositivos de seguridad, como el imán de liberación de frenos, que acciona un freno de acción rápida si se produce un corte de energía.

Si el condensador trifásico estuviera directamente en paralelo con el motor, su energía residual podría retrasar este frenado de emergencia o incluso impedir que sea efectivo. ¡Por tanto, el condensador solo debe conectarse al circuito **antes** de la apartamiento.

Se debe proporcionar un contactor independiente para el condensador, que debe tener su propio dispositivo de descarga rápida, realizado por inductores de descarga conectados directamente al condensador o por resistencias de descarga rápida activadas por el contactor del condensador.

Se debe incorporar un enclavamiento en el sistema de control a fin de evitar que los condensadores se vuelvan a conectar antes de que haya transcurrido el tiempo de descarga. Debido a la frecuencia de conmutación y el desgaste resultante de los contactores, es aconsejable utilizar etapas de condensador con interruptores de estado sólido. Estos activan y desactivan los condensadores a corriente cero, siendo alcanzables tiempos de respuesta en el orden de milisegundos.

■ 4.3.2: Interruptores en estrella-delta

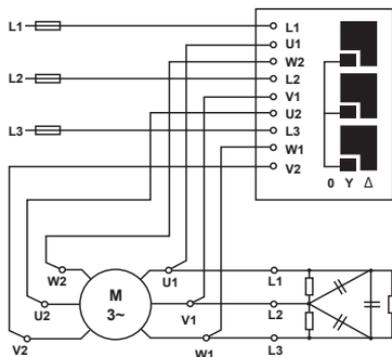


Fig. 19: Interruptor estrella-delta accionado manualmente: versión especial para motores con corrección individual del factor de energía

Si se van a utilizar interruptores en estrella-delta accionados manualmente con condensadores de energía trifásicos, debe seleccionarse una versión diseñada para controlar motores con corrección individual del factor de energía.

Los puentes de contacto deben diseñarse de manera que, al cambiar de estrella a delta, **no** se produzca una interrupción corta para conmutar el condensador a 'oposición de fase'.

Esto implicaría corrientes de recarga excesivamente altas, lo que podría dañar no solo al condensador sino también al interruptor.

Cuando el interruptor está en la posición OFF (motor apagado), el puente de contacto en estrella no debe cerrarse, de modo que el condensador no se cortocircuite.

■ 4.3.3: Grupos de contactores estrella-delta

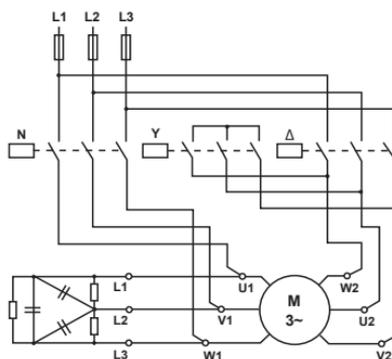


Fig. 20: Motor con corrección de factor de energía individual y contactor estrella-delta

Con los grupos de contactores estrella-delta debe garantizarse, al igual que con los interruptores estrella-delta, que no se produzca una interrupción corta durante el cambio de estrella a delta, es decir, que el contactor de línea debe permanecer energizado. Cuando el motor está apagado, el puente de contacto en estrella debe estar abierto. El condensador se puede conectar al lado de carga del contactor de línea o a los terminales U, V y W del motor, pero no a sus terminales X, Y y Z, ya que estos están cortocircuitados por el puente de contacto en estrella.

Nota: El poder correctivo no debe sobredimensionarse en ningún caso. Esto se aplica en particular si el motor tiene una masa centrífuga alta con tendencia a funcionar después de apagarse. El condensador de derivación puede entonces excitar a la máquina para que actúe como generador, produciendo sobretensiones peligrosas. Por esta razón, cuando se utiliza el arranque en estrella-delta, el puente de contacto en estrella no debe permanecer cerrado cuando el interruptor está APAGADO. Si la máquina se excita como generador con la conexión en estrella hecha, se pueden esperar voltajes aún más altos que aquellos con conexión delta.

■ 4.4: Sistemas de corrección del factor de energía

Los sistemas PFC constan de los componentes siguientes:

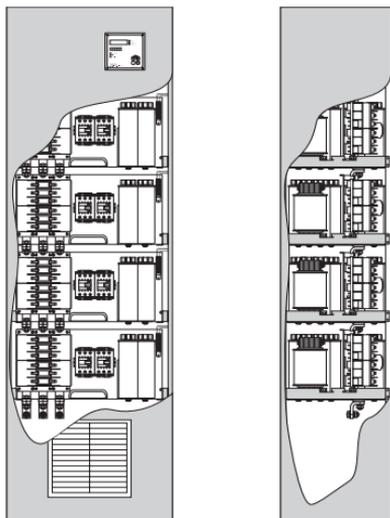


Fig. 21: Diseño modular típico de un sistema PFC

- Relé de control de energía reactiva
- Bancos de condensadores conmutados por contactores o interruptores de estado sólido
- Reactores de filtro (inductores), si se requiere desajuste
- Protección contra sobrecorriente de grupo
- Sistema de ventilación controlado termostáticamente, si se instala desintonización

Los componentes pueden montarse en una placa de montaje o, si se solicita un sistema modular capaz de ampliarse en una fecha posterior, en un armario de control.

Los sistemas PFC se instalan en redes de distribución de energía donde la demanda de energía reactiva fluctúa constantemente. La energía correctiva del condensador se divide en varias etapas que se pueden activar y desactivar mediante un relé de control de energía reactiva automático a través de contactores o interruptores de estado estacionario para adaptarse a las condiciones de carga.

Un sistema PFC centralizado es fácil de monitorizar. Los relés de control de energía reactiva de última generación permiten monitorear continuamente el estado del interruptor, el $\cos \varphi$, la corriente activa, la corriente reactiva y los armónicos presentes en el sistema. Por

lo general, la energía nominal total del condensador puede ser menor que con la corrección del factor de energía individual, ya que el factor de coincidencia se puede tener en consideración al diseñar la instalación industrial completa. Por lo tanto, se hace un uso óptimo de la energía correctiva del condensador instalado.

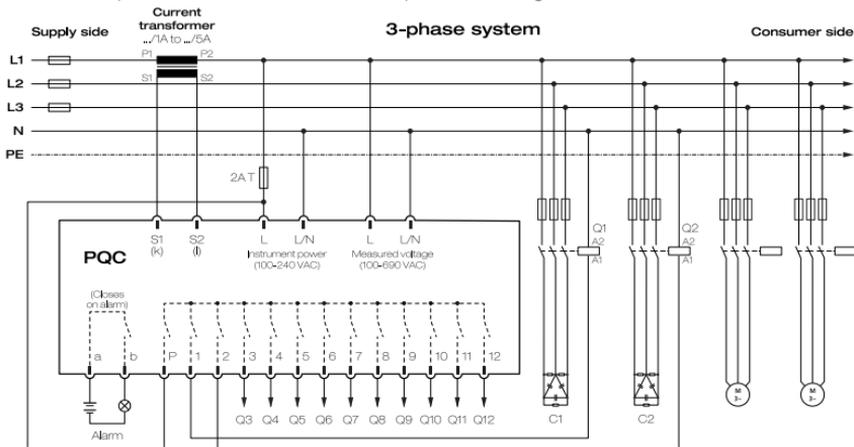


Fig. 22: Diagrama típico de circuito para un sistema corrección de factor de energía

Sección 5: Características del producto

■ 5.1: Condensadores de energía

Fabricados en Alemania en nuestra propia fábrica, los condensadores de energía **FRAKO** son los componentes centrales óptimos para bancos de condensadores fijos hechos a pedido y sistemas automáticos de corrección del factor de energía. Las cuatro características de seguridad de su diseño maximizan la seguridad y la confiabilidad. En todo el mundo, nuestros condensadores de energía son la primera opción siempre que deba reducirse la demanda de energía reactiva, mejorar la calidad de la energía del sistema y evitar cargos por energía reactiva.

Beneficios clave de nuestros condensadores de energía:

- Alta capacidad de sobrecarga
- Larga vida útil
- Máxima seguridad y fiabilidad

Además, el diseño patentado del anillo de contacto ha permitido a FRAKO fabricar un condensador sin plomo, otra contribución a la mejora de la fiabilidad. Los condensadores de energía FRAKO están disponibles en 4 versiones, Basic, Standard, Premium y Heavy Duty, para brindarle a usted el condensador ideal a fin de satisfacer sus especificaciones de capacidad de carga de corriente, temperatura ambiente y vida útil.

Cada condensador de energía FRAKO se identifica de forma única por su número de serie individual, que incorpora datos relevantes para su fabricación y lo vincula a los resultados de prueba y medición de la inspección de garantía de calidad.

Cuatro características de diseño de seguridad garantizan un funcionamiento ininterrumpido

La fiabilidad de los condensadores de energía es de crucial importancia para el funcionamiento sin problemas de los sistemas de corrección del factor de energía y los filtros pasivos. Las medidas adoptadas por FRAKO para garantizar esto son cuádruples:

■ Factor de seguridad 1:

Película de polipropileno autorregenerativa

Su propiedad autorregenerativa garantiza que la película dieléctrica aisle automáticamente cualquier punción que pueda ocurrir.

■ Factor de seguridad 2:

Conexiones sin soldadura

El innovador anillo de contacto patentado por FRAKO elimina totalmente el posible riesgo de dañar el bobinado como ocurre en los diseños de condensadores convencionales. Además, el bobinado está soldado por puntos al cableado interno, creando una conexión permanente, vital para la acción del fusible mecánico que protege contra una presión interna excesiva (ver factor de seguridad 3).

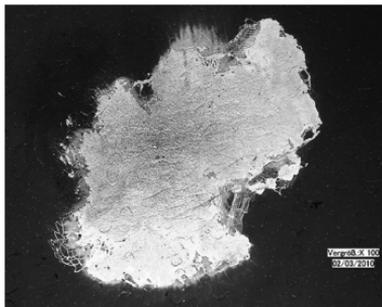


Fig. 23: Película de polipropileno autorregenerativa

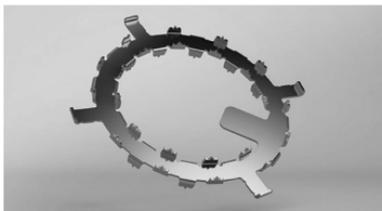


Fig. 24: Anillo de contacto patentado

■ Factor de seguridad 3:

Fusible mecánico contra presión excesiva

El fusible mecánico desconecta el condensador de forma segura y sin interrumpir la fuente de alimentación si se desarrolla una presión interna excesiva debido a una sobrecarga o al final de su vida útil.

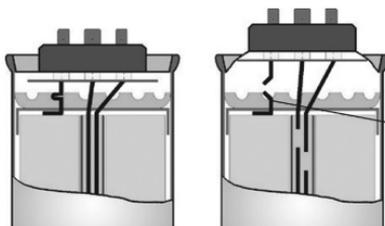


Fig. 25: Acción mecánica del fusible bajo exceso de presión

■ Factor de seguridad 4:

Metalización segmentada

La película segmentada es un valioso complemento de la propiedad de autorregeneración y el fusible mecánico. Si se producen varios pinchazos en un área mayor de película metalizada, la cantidad de energía involucrada podría ser demasiado para la acción de autorregeneración por sí sola. En este caso, la película segmentada proporciona una función EXTRA a prueba de fallos, ya que el segmento severamente sobrecargado está completamente aislado de la fuente de alimentación.



Fig. 26: Metalización segmentada

Características técnicas especiales

En nuestro continuo trabajo de desarrollo de los condensadores de energía FRAKO, siempre nos centramos en aquellos atributos que se solicitan en las aplicaciones actuales. Los tres requisitos siguientes son particularmente importantes:

- Tolerancia a la sobretensión
- Capacidad de carga de corriente
- Resistencia térmica

Tolerancia a la sobretensión

Como lo exigen las normas IEC 60831-1 y -2, también EN 60831-1 y -2, todos los condensadores de energía FRAKO están diseñados para soportar las siguientes sobretensiones.

- 8 horas al día: 1,10 x tensión nominal del condensador
- 30 minutos diarios: 1,15 x tensión nominal del condensador
- 5 minutos: 1,20 x tensión nominal del condensador
- 1 minuto: 1,30 x tensión nominal del condensador

La siguiente tabla muestra una selección de clasificaciones de tensión nominal y sobretensiones máximas.

Tensión nominal del condensador	240 V	400 V	440 V	480 V	525 V	600 V	690V	760V	800V
8 horas diarias	264 V	440 V	484 V	528 V	578 V	660 V	759 V	836 V	880 V
30 minutos diarios	276 V	460 V	506 V	552 V	604 V	690 V	794 V	874 V	920 V
5 minutos	288 V	480 V	528 V	576 V	630 V	720 V	828 V	912 V	960 V
1 minuto	312 V	520 V	572 V	624 V	683 V	780 V	897 V	988 V	1040 V

Capacidad de carga de corriente

En todo el mundo moderno, los armónicos están contaminando los sistemas de suministro de electricidad. El creciente uso de dispositivos como los convertidores de frecuencia tiene un impacto creciente sobre los condensadores. Si estos se operan en un sistema de alimentación contaminado por armónicos, pueden dar como resultado resonancias peligrosas, que a su vez aumentan significativamente las corrientes que los condensadores deben soportar.

Las normas aplicables exigen una capacidad de carga de corriente continua de al menos 1,3 veces la corriente nominal que debe atenderse en los condensadores de energía. En realidad, sin embargo, incluso este valor puede verse superado en condiciones con niveles extremos de armónicos. Por esta razón, todos los condensadores de energía FRAKO están diseñados para una capacidad de carga de corriente continua de al menos 1,5 veces y hasta 2,7 veces la corriente nominal, dependiendo de la versión del condensador.

Resistencia térmica

Las temperaturas excesivas también tienen un impacto negativo en la vida útil de un condensador. El almacenamiento o la operación de condensadores por encima de sus límites de temperatura permitidos da como resultado una drástica reducción de su vida útil. Los condensadores de energía se asignan a diferentes clases de temperatura de acuerdo con la temperatura ambiente máxima permitida de la siguiente manera:

Clases de temperatura	Temperaturas ambiente máximas		
	Temperatura absoluta máxima	Promedio durante 1 día	Promedio durante 1 año
B	45 °C	35 °C	25 °C
C	50 °C	40 °C	30 °C
D	55 °C	45 °C	35 °C

Las temperaturas indicadas anteriormente se refieren al entorno directo de los condensadores. Esto significa la temperatura interna del recinto o armario de control que los alberga. La experiencia demuestra que los límites dados en la tabla para las clases de temperatura se pueden superar fácilmente en la práctica. Cabe esperar temperaturas más altas, en particular en el caso de sistemas de corrección del factor de energía equipados con reactores de filtro.

Por lo tanto, los condensadores de energía FRAKO en las versiones Standard, Premium y Heavy Duty están diseñados para temperaturas ambiente continuas de al menos 60 °C.

Esta resistencia térmica nominalmente continua recibe ayuda de la construcción compacta de los condensadores, que es propicia para una disipación óptima del calor.

Conector del condensador sin mantenimiento

El conector AKD se basa en la bien probada WAGO CAGE CLAMP®. Estos utilizan un diseño especial de abrazadera de resorte que garantiza un contacto eléctrico sencillo, resistente a las vibraciones y sin mantenimiento con el condensador. Se pueden usar para conectar cables de cobre de un solo núcleo, trenzados o de filamento fino. Los conectores AKD cumplen con los requisitos IP20 (EN 60529) y, por lo tanto, proporcionan protección contra objetos tales como dedos que toquen inadvertidamente conductores vivos.



Fig. 27: Bloque de conectores de condensador patentado

■ 5.2: Relés de control de energía reactiva



Fig. 28: Controlador de calidad de la energía PQC

- Los relés de control de energía reactiva FRAKO son instrumentos inteligentes programados para ajustarse a sí mismos a fin de adaptarse al sistema de corrección del factor de energía y al sistema de fuente de alimentación que debe corregirse, evitando así automáticamente una configuración defectuosa.
- Las conexiones incorrectas o los transformadores de instrumentos mal ubicados se identifican y muestran automáticamente, haciendo así innecesaria una resolución de problemas que requiere mucho tiempo y mano de obra.
- Las curvas características de control universal ofrecen estrategias de corrección del factor de energía para cada requisito imaginable en los 4 cuadrantes de control. Además de prevenir los costes de la energía reactiva, estos instrumentos proporcionan otros beneficios, tales como:
 - Reducción de las pérdidas en la instalación del consumidor y el sistema de suministro de energía
 - Aumento de la producción de las instalaciones de generación de energía
 - Minimización del desgaste de los equipos eléctricos.

El principio de funcionamiento inteligente garantiza que el factor de energía objetivo se alcance y se mantenga con el menor número posible de ciclos de conmutación. Esto reduce al mínimo el desgaste del sistema de corrección del factor de energía y reduce la distorsión del lado de la oferta. Algunas versiones de estos instrumentos protegen el sistema de corrección contra niveles armónicos excesivamente altos apagándolo. El funcionamiento fácil de usar de los instrumentos también es muy valorado por nuestros clientes.

Relé de control de energía reactiva con monitorización de calidad de la energía

El controlador de calidad de la energía PQC agrega una nueva y poderosa funcionalidad a las fortalezas comprobadas de los relés de control de energía reactiva FRAKO para enfrentar los desafíos planteados por los sistemas de calidad de la energía de última generación.

Con su microprocesador incorporado, el PQC maneja tareas más allá de la corrección clásica del factor de energía. En concreto, se han incorporado nuevos mecanismos de protección para salvaguardar no solo la instalación en sí sino también el sistema que corrige su factor de energía. De este modo, el PQC monitoriza las variables relevantes que pueden causar interrupciones en la red y ofrece alarmas si van más allá de los límites establecidos para garantizar el cumplimiento de las normas técnicas. Además, el PQC también protege el sistema de corrección del factor de energía responsable de la red, apagándolo si se sobrecarga. Esto reduce significativamente el riesgo de que ocurran trastornos dentro de ese sistema. Las etapas defectuosas o parcialmente defectuosas de los condensadores se identifican y se retiran del proceso de corrección del factor de energía. Una función de gestión de alarmas extremadamente flexible garantiza que las notificaciones de alarma adecuadas al evento se envíen a donde se necesiten. La capacidad de configurar cada controlador individual permite que el PQC se utilice en cualquier lugar, lo que lo convierte en el mejor instrumento posible para controlar la calidad de la energía en sistemas de suministro industrial contemporáneos.

El PQC se caracteriza por características fáciles de usar, como una instalación sencilla, un funcionamiento intuitivo y el arranque automático ya bien conocido debido a los relés de control de energía reactiva FRAKO. Su función integrada de automonitorización mejora la fiabilidad operativa a largo plazo, lo que ayuda a reducir los costes y minimizar el riesgo de interrupciones del sistema.

Principales características

- Mediciones monofásicas o trifásicas
- Control de 4 cuadrantes
- 6 o 12 salidas de control + 1 contacto de alarma
- 5 curvas características de control configurables
- Menú en lenguaje sencillo (alemán, inglés o francés) con diálogo gráfico para el usuario
- Monitorización integrada de variables del sistema con procesamiento de datos en la gestión de alarmas

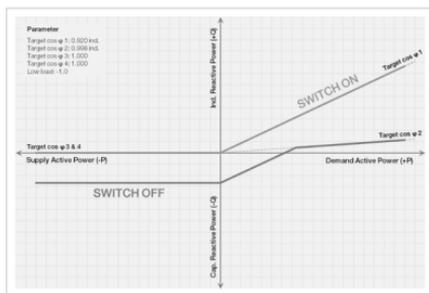


Fig. 29: Curva característica de control típica para la corrección del factor de energía de desgaste reducido con $\cos \varphi$ objetivo inductivo cuando se importa energía pero capacitivo cuando se exporta energía.

Aplicaciones recomendadas

El PQC es adecuado para la corrección del factor de energía de 4 cuadrantes en:

- Sistemas de energía de consumo
- Redes de generadores
- Redes de baja y media tensión
- Sistemas PFC con o sin desintonización

Funcionamiento del PQC

El PQC tiene una pantalla LCD monocromática retroiluminada con 128 x 64 píxeles, junto con 5 teclas para navegar por los menús de lenguaje simple (alemán, inglés o francés).

Los menús están estructurados de una forma intuitiva que facilita la configuración del instrumento. Una descripción general del PQC en la pantalla muestra la información clave para las fases individuales junto con el estado de conmutación de las salidas de control. Por lo tanto, el operador recibe toda la información relevante sobre el estado del sistema de corrección del factor de energía de un vistazo. Una función inteligente de gestión de alarmas alerta al operador de condiciones críticas, ya sea mediante notificaciones en la pantalla o a través del contacto de alarma.

Puesta en marcha del PQC

Cuando se arranca por primera vez, el PQC determina automáticamente la configuración del sistema al que está conectado más las salidas de control en uso con sus respectivos valores nominales de capacitancia (energía correctiva en kVAR). El operador selecciona el perfil de control de características adecuado para la aplicación o configura el PQC de modo que cumpla con las especificaciones requeridas. Cinco perfiles de control –desarrollados especialmente para las aplicaciones más frecuentes– se guardan en el instrumento antes de que salga de fábrica. Al finalizar el procedimiento de arranque, el PQC activa o desactiva las etapas de entrada o salida del condensador conectado de acuerdo con la curva de control seleccionada.

System data			
cos φ	0.986	$\frac{W}{VA}$	
V	225.8V	I	486.4A
P	108.3kW	S	109.9kVA
Q	18.2kvar		
Σ	L		

Fig. 30: Visualización PQC de variables del sistema

Switching Outputs						
Stage	1	2	3	4	5	6
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	x	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	$\frac{2}{7}$	8	9	10	11	12
	x	$\frac{1}{2}$	x	x	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

Fig. 31: Visualización PQC del estado de salida del control

Sección 6: Instalación

■ 6.1: Transformadores de corriente

Es necesario un transformador de corriente para operar los sistemas PFC. Esto no está incluido en el ámbito del suministro, pero se puede proporcionar con el sistema después de la aclaración de los requisitos del usuario. La corriente principal del transformador está determinada por la entrada de corriente del usuario, es

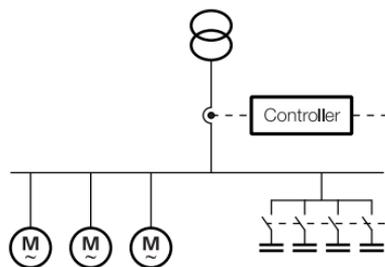


Fig. 32: Un transformador de corriente correctamente instalado registra la corriente de carga y la corriente del condensador.

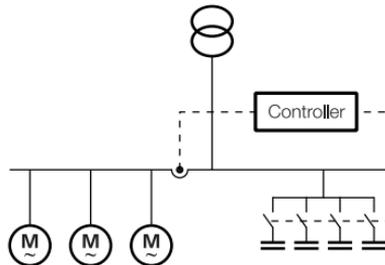


Fig. 33: ¡Incorrecto! El transformador de corriente sólo registra la corriente de carga: ¡el banco de condensadores está activado pero no se desactiva de nuevo (¡no se puede medir la corriente del condensador)!

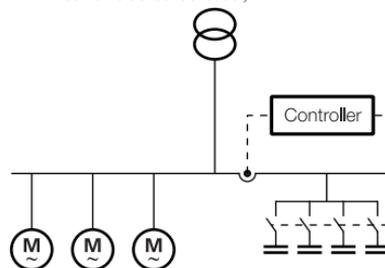


Fig. 34: ¡Incorrecto! El transformador de corriente sólo registra la corriente del condensador: ¡el banco de condensadores no está activado (no hay corriente en el circuito del transformador)!

decir, esta unidad está diseñada para la carga máxima de corriente o la carga instalada conectada al transformador de energía. El circuito de corriente de relé de control de energía reactiva está diseñado para un transformador de corriente de .../1 A a .../5 A con un valor nominal de 5 VA y precisión de Clase 3. Si hay amperímetros instalados en serie con el relé de control, el valor nominal del transformador de corriente debe aumentarse de modo correspondiente. El consumo de energía interno en el circuito de corriente del relé de control asciende a unos 1,8 VA para un transformador de corriente con un valor nominal de corriente secundaria de 5 A.

Si es necesario alimentar más instrumentos desde el mismo transformador de corriente, esto debe tenerse en cuenta al especificar su valor nominal (carga de salida).

También se producen pérdidas en el cableado del transformador de corriente, y éstas también deben tenerse en cuenta si hay largos tramos de cable entre el transformador de corriente y el relé de control de energía reactiva.

Pérdidas de energía en conductores de cobre de un transformador de corriente con corriente secundaria de 5 A:

Sección transversal en mm ²	Pérdidas por metro de línea de dos hilos en VA
2,5	0,36
4,0	0,22
6,0	0,15
10,0	0,09

La **fórmula para dimensionar** los transformadores de corriente se da en la [página 31](#).

Nota: El transformador de corriente debe instalarse en una de las tres fases para que toda la corriente hacia las cargas que requieren PFC más la corriente del condensador fluyan a través de él (como se muestra en los diagramas de la izquierda). El terminal P1 (K) está conectado al lado de suministro, el terminal P2 (L) al lado de carga.

Precaución: Cuando se rompe el circuito primario, se producen sobretensiones que podrían destruir el transformador de corriente. Por lo tanto, los terminales S1 (k) y S2 (l) deben cortocircuitarse antes de que se rompa el circuito del transformador.

■ 6.2: Protección contra sobrecorriente y cables

Cuando se realizan trabajos de instalación, se deben cumplir las regulaciones VDE 0100 y VDE 0105 de la Asociación Alemana de Tecnologías Eléctricas, Electrónicas y de la Información, las directrices generales de la BDEW (Asociación Alemana de las Industrias de la Energía y el Agua) y las condiciones de suministro de la empresa de servicios públicos en cuestión. VDE 0560 Parte 46 establece que las unidades de condensador deben ser adecuadas para una corriente RMS continua de 1,3 veces la corriente que se extrae a la tensión nominal sinusoidal y la frecuencia nominal. Si también se tiene en cuenta la tolerancia de capacitancia de $1,1 \times C_N$, la corriente máxima permitida puede alcanzar valores de hasta $1,38 \times I_N$. Esta capacidad de sobrecarga, junto con la alta corriente de entrada a los condensadores, debe tenerse en consideración al dimensionar los dispositivos de protección y las secciones transversales de los cables.

Nota: Los condensadores de energía FRAKO ofrecen una capacidad de carga de corriente de hasta $2,7 \times I_N$.

Tabla 5: Protección contra sobrecorriente (OCP) y secciones transversales de cables de suministro según VDE 0298, Parte 4, método de diseño C

Energía en kVA	400 V/50 Hz			525 V/50 Hz			690 V/50 Hz		
	Corriente en A	OCP en A	Sección transversal en mm ²	Corriente en A	OCP en A	Sección transversal en mm ²	Corriente en A	OCP en A	Sección transversal en mm ²
2,5	3,6	10	4 x 1,5	2,7	10	4 x 1,5	2,1	10	4 x 1,5
5	7,2	10	4 x 1,5	5,5	10	4 x 1,5	4,2	10	4 x 1,5
6,25	9,0	16	4 x 2,5	6,9	10	4 x 1,5	5,2	10	4 x 1,5
7,5	10,8	16	4 x 2,5	8,2	16	4 x 2,5	6,3	10	4 x 1,5
10	14,4	20	4 x 2,5	11,0	16	4 x 2,5	8,4	16	4 x 2,5
12,5	18,0	25	4 x 4	13,7	20	4 x 2,5	10,5	16	4 x 2,5
15	21,7	35	4 x 6	16,5	25	4 x 4	12,6	20	4 x 2,5
17,5	25,3	35	4 x 6	19,2	35	4 x 6	14,6	25	4 x 4
20	28,9	50	4 x 10	22,0	35	4 x 6	16,7	25	4 x 4
25	36,1	50	4 x 10	27,5	50	4 x 10	20,9	35	4 x 6
27,5	39,7	63	4 x 16	30,2	50	4 x 10	23,0	35	4 x 6
30	43,3	63	4 x 16	33,0	50	4 x 10	25,1	35	4 x 6
31,25	45,1	63	4 x 16	34,4	50	4 x 10	26,1	50	4 x 10
37,5	54,1	80	3 x 25/16	41,2	63	4 x 16	31,4	50	4 x 10
40	57,7	80	3 x 25/16	44,0	63	4 x 16	33,5	50	4 x 10
43,75	63,1	100	3 x 35/16	48,1	80	3 x 25/16	36,6	63	4 x 16
45	65,0	100	3 x 35/16	49,5	80	3 x 25/16	37,7	63	4 x 16
50	72,2	100	3 x 35/16	55,0	80	3 x 25/16	41,8	63	4 x 16
52,5	75,8	125	3 x 50/25	57,7	80	3 x 25/16	43,9	63	4 x 16
60	86,6	125	3 x 50/25	66,0	100	3 x 35/16	50,2	80	3 x 25/16
62,5	90,2	125	3 x 50/25	68,7	100	3 x 35/16	52,3	80	3 x 25/16
67,5	97,4	160	3 x 70/35	74,2	125	3 x 50/25	56,5	80	3 x 25/16
68,75	99,2	160	3 x 70/35	75,6	125	3 x 50/25	57,5	80	3 x 25/16
75	108,3	160	3 x 70/35	82,5	125	3 x 50/25	62,8	100	3 x 35/16
87,5	126,3	200	3 x 95/50	96,2	160	3 x 70/35	73,2	125	3 x 50/25
93,75	135,3	200	3 x 95/50	103,1	160	3 x 70/35	78,4	125	3 x 50/25
100	144,3	200	3 x 95/50	110,0	160	3 x 70/35	83,7	125	3 x 50/25
112,5	162,4	250	3 x 120/70	123,7	200	3 x 95/50	94,1	160	3 x 70/35
125	180,4	250	3 x 120/70	137,5	200	3 x 95/50	104,6	160	3 x 70/35
150	216,5	315	3 x 185/95	165,0	250	3 x 120/70	125,5	200	3 x 95/50
175	252,6	400	2x 3 x 95/50	192,5	315	3 x 185/95	146,4	250	3 x 120/70
200	288,7	400	2x 3 x 95/50	219,9	315	3 x 185/95	167,3	250	3 x 120/70
225	324,8	500	2x 3 x 120/70	247,4	400	2x 3 x 95/50	188,3	315	3 x 185/95
250	360,8	500	2x 3 x 120/70	274,9	400	2x 3 x 95/50	209,2	315	3 x 185/95
275	396,9	630	2x 3 x 185/95	302,4	500	2x 3 x 120/70	230,1	400	2x 3 x 95/50
300	433,0	630	2x 3 x 185/95	329,9	500	2x 3 x 120/70	251,0	400	2x 3 x 95/50
350	505,2	800	2x 3 x 240/120	384,9	630	2x 3 x 185/95	292,9	500	2x 3 x 120/70
375	541,3	800	2x 3 x 240/120	412,4	630	2x 3 x 185/95	313,8	500	2x 3 x 120/70
400	577,4	800	2x 3 x 240/120	439,9	630	2x 3 x 185/95	334,7	500	2x 3 x 120/70
500	721,7	1000	3x 3 x 185/95	549,9	800	2x 3 x 240/120	418,4	630	2x 3 x 185/95

Tabla 6: Diámetros exteriores de cables y conductores

Sección transversal en mm ²	NYM Ø en mm	NYY Ø en mm	NYCY/NYCWY Ø en mm	H05VV-F Ø en mm	H07RN-F Ø en mm
2 x 1,5	9,0	11,0	12,0	10,5	11,5
2 x 2,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
3 x 1,5	10,0	11,0	13,0	11,0	12,5
3 x 2,5	11,0	13,0	14,0	13,0	14,5
3 x 4,0	12,5	15,0	16,0	-	16,0
3 x 6,0	14,0	16,0	17,0	-	20,0
3 x10,0	17,0	19,0	18,0	-	25,5
3 x16,0	20,0	21,0	21,0	-	29,0
4 x 1,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
4 x 2,5	12,0	14,0	15,0	14,0	15,5
4 x 4,0	14,0	16,0	17,0	-	18,0
4 x 6,0	15,0	17,0	18,0	-	22,0
4 x10,0	18,0	20,0	20,0	-	28,0
4 x16,0	23,0	23,0	23,0	-	32,0
4 x25,0	27,5	27,0	28,0	-	37,0
4 x35,0	31,0	30,0	29,0	-	42,0
4 x50,0	-	35,0	34,0	-	48,0
4 x70,0	-	40,0	37,0	-	54,0
4 x95,0	-	45,0	42,0	-	60,0
4 x120,0	-	50,0	47,0	-	-
4 x150,0	-	53,0	52,0	-	-
4 x185,0	-	60,0	60,0	-	-
4 x240,0	-	71,0	70,0	-	-
5 x 1,5	11,0	13,5	15,0	13,5	15,0
5 x 2,5	13,0	15,0	17,0	15,5	17,0
5 x 4,0	15,0	16,5	18,0	-	19,0
5 x 6,0	18,0	19,0	20,0	-	24,0
5 x10,0	20,0	21,0	-	-	30,0
5 x16,0	24,0	23,0	-	35,0	-
7 x 1,5	-	13,5	-	-	-
10 x 1,5	-	17,0	-	-	-
12 x 1,5	-	17,5	-	-	-
14 x 1,5	-	18,0	-	-	-
16 x 1,5	-	19,0	-	-	-
24 x 1,5	-	23,0	-	-	-

NYM: Cable ligero con revestimiento de plástico

NYY: Cable con funda de polímero

NYCY: Cable con conductor concéntrico y funda de polímero

NYCWY: Cable con conductor concéntrico, conductor tipo wavecon y funda de polímero

H05VV-F: Cable flexible ordinario con cubierta de goma (NLH. NMH)

H07RN-F: Cable flexible ordinario con cubierta de goma gruesa (NSH).

Tabla 7: Entrada de cable con prensaestopas

Rosca métrica	PG	Diámetro de cable exterior en mm	Diámetro del orificio en mm
M 16 x 1,5	11	6,5- 10,5	19,0
-	13,5	8,0- 12,5	21,0
M 20 x 1,5	16	10,0- 15,0	23,0
M 25 x 1,5	21	12,0- 20,0	29,0
M 32 x 1,5	29	19,0- 26,5	38,0
M 40 x 1,5	36	29,0- 34,0	48,0
-	42	34,0- 41,0	55,0
M 50 x 1,5	48	40,0- 45,0	60,0

■ 6.3: Protección contra ingresos

La norma EN 60529 especifica el grado de protección de los recintos eléctricos mediante dos letras y un número de dos dígitos. IP significa protección contra ingresos.

Las siguientes son las combinaciones que se encuentran más comúnmente:

Tabla 8: Códigos comunes de protección contra ingresos

Protección	Contra el contacto accidental	Contra objetos sólidos	Contra líquidos
IP00	ninguno	ninguno	ninguno
IP10	contra contacto accidental o inadvertido	de más de 50 mm de diámetro	ninguno
IP20	contra dedos y objetos de hasta 80 mm de largo	de más de 12,5 mm de diámetro	ninguno
IP30	contra herramientas y cables de más de 2,5 mm de grosor	de más de 2,5 mm de diámetro	ninguno
IP31	contra herramientas y cables de más de 2,5 mm de grosor	de más de 2,5 mm de diámetro	gotas de agua que caen verticalmente
IP40	contra herramientas o tiras de más de 1 mm de grosor	de más de 1 mm de diámetro	ninguno
IP41	contra herramientas o tiras de más de 1 mm de grosor	de más de 1 mm de diámetro	gotas de agua que caen verticalmente
IP42	contra alambres o tiras de más de 1 mm de grosor	de más de 1 mm de diámetro	gotas de agua que caen a hasta 15° desde la vertical
IP43	contra alambres o tiras de más de 1 mm de grosor	de más de 1 mm de diámetro	agua rociada a hasta 60° desde la vertical
IP54	protección completa	depósitos de polvo	salpicaduras de agua desde todas las direcciones
IP65	protección completa	ingreso de polvo	chorros de agua desde todas las direcciones

Sección 7: Fórmulas de cálculo

Símbolos:

Q_C = Energía correctiva en VAr

V = Voltaje en V

f_n = Frecuencia de alimentación en Hz

n = Número de condensadores

C = Capacitancia de un condensador en F (farads)

π = Pi (3,1415926...)

p = Factor de desintonización

Energía correctiva monofásica

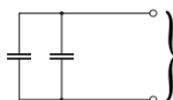


$$Q_C = C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Ejemplo: 83 μ F a 400V/50 Hz

$$0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 4.172 \text{ VAr} = 4,17 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, monofásica, n condensadores, en paralelo



$$Q_C = n \cdot C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Ejemplo: 2x83 μ F a 400V/50 Hz

$$2 \cdot 0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 8.344 \text{ VAr} = 8,34 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, monofásica, n condensadores, en serie



$$Q_C = \frac{C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{n}$$

Ejemplo: 2x83 μ F a 400V/50 Hz

$$0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 2 = 2.086 \text{ VAr} = 2,09 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, monofásica, desintonizada

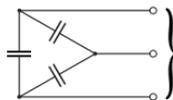


$$Q_C = \frac{C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1 - p}$$

Ejemplo: 171,3 μ F a 400 V / 50 Hz, con un 14% de desintonización

$$0,0001713 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,86 = 10 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, 3 fases, conectada en delta

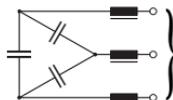


$$Q_C = 3 \cdot C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Ejemplo: 3x332 μ F a 400V/50 Hz

$$3 \cdot 0,000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 50 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, 3 fases, conectada en delta, desintonizada

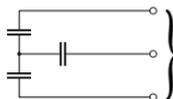


$$Q_C = \frac{3 \cdot C \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1 - p}$$

Ejemplo: 3x332 μ F a 400 V / 50 Hz, con un 7% de desintonización

$$3 \cdot 0,000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,93 = 53,8 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, 3 fases, conectada en estrella



$$Q_C = C_{3 \text{ fases}} \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Ejemplo: 3x1x124,4 μ F a 400V/50 Hz

$$0,0001244 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 6,25 \text{ kVAr}$$

Energía correctiva, 3 fases, conectada en estrella, desintonizada



$$Q_C = \frac{C_{3 \text{ fases}} \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1 - p}$$

Ejemplo: 3x1x115,7 μ F a 400V/50 Hz, con 7% de desintonización

$$0,0001157 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,93 = 6,25 \text{ kVAr}$$

Simbolos: V = Tensión en V
 I = Corriente de fase en A
 P = Energía activa en W
 Q = Energía reactiva en VAr

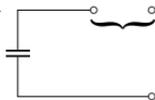
f_n = Frecuencia de alimentación en Hz
 f_r = Frecuencia de resonancia en serie en Hz
 p = Factor de desintonización en %
 l = Longitud del conductor (cable de 2 núcleos)

en m

S = Energía aparente en VA
 Q_c = Energía correctiva en VAr

q_{cu} = Sección transversal del conductor en mm²
 P_v = Pérdida de energía del conductor en VA

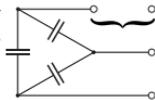
Corriente del condensador conductor en fase, monofásico



$$Q_c = I \cdot V \quad \text{oder:} \quad I = \frac{Q_c}{V}$$

Ejemplo: 25 kVAr a 400V
 $25.000 / 400 = 62,5 A$

Corriente del condensador conductor en fase, 3 fases



$$Q_c = I \cdot V \cdot \sqrt{3} \quad \text{oder:} \quad I = \frac{Q_c}{V \cdot \sqrt{3}}$$

Ejemplo: 25 kVAr a 400V
 $25.000 / (400 \cdot 1,73) = 36 A$

Factor de energía y relación entre $\cos \varphi$ y $\tan \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{B}{S} \quad \text{e:} \quad \cos \varphi = \frac{I}{\sqrt{I + \tan^2 \varphi}} \quad \text{e:} \quad \cos \varphi = \frac{I}{\sqrt{I + \left(\frac{Q}{B}\right)^2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{B} \quad \text{e:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\cos^2 \varphi} - I} \quad \text{e:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{I}{\left(\frac{P}{S}\right)^2} - I}$$

Frecuencia de resonancia en serie (f_r) y factor de desintonización (p) de los condensadores desintonizados

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{1}{p}} \quad \text{e:} \quad p = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2$$

Ejemplo: $p = 0,07$ (7% desintonización) en un sistema de 50 Hz
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

Transformador de corriente
 Cálculo de pérdida de energía (carga de salida)

$$P_v = \frac{I^2 \cdot l \cdot 2}{q_{cu} \cdot 56}$$

Ejemplo 1 proporción CT: ... / Cable de medición de cobre de 5A de 20 m (2 núcleos), relé de control de 2,5 mm² con consumo de alimentación de 1,8 VA en la entrada de medición:
 $(5^2 \cdot 40 / 2,5 / 56) + 1,8 = 8,94 \text{ VA} = \text{transformador: } 10 \text{ VA}$

Ejemplo 2 proporción CT: ... / Cable de medición de cobre de 1A de 150 m (2 núcleos), Instrumento de 2,5 mm² con consumo de alimentación de 1,2 VA en la entrada de corriente:
 $(1^2 \cdot 300 / 2,5 / 56) + 1,2 = 3,34 \text{ VA} = \text{transformador: } 5 \text{ VA}$

Sección 8: Calidad de la energía

■ 8.1: ¿Qué son los armónicos?

Los sistemas modernos de baja tensión tienen cada vez más cargas instaladas que consumen corrientes no sinusoidales del sistema de distribución de energía. Estas corrientes de carga causan caídas de tensión a través de las impedancias del sistema, distorsionando la tensión sinusoidal original de suministro. Se puede utilizar el análisis de Fourier para separar estas formas de onda superpuestas en la oscilación básica (frecuencia de suministro) y los armónicos individuales. Las frecuencias de los armónicos son múltiplos integrales de la oscilación básica y se denotan por el número ordinal 'n' o 'v'. (Ejemplos: frecuencia de suministro = 50 Hz → 5.º armónico = 250 Hz; frecuencia de suministro = 60 Hz → 5.º armónico = 300 Hz).

Las cargas lineales son:

- Resistencias óhmicas (elementos calefactores eléctricos, bombillas incandescentes, etc.)
- Motores trifásicos
- Condensadores

Las cargas no lineales (generadoras de armónicos) son:

- Transformadores e inductores
- Convertidores electrónicos de energía
- Rectificadores y convertidores, especialmente cuando controlan motores de inducción de velocidad variable
- Hornos de inducción y arco eléctrico, equipos de soldadura
- Fuentes de alimentación ininterrumpida (sistemas UPS)
- Unidades de fuente de alimentación monofásica conmutada (SMPS) para cargas electrónicas modernas, como televisores, cargadores de baterías, ordenadores, monitores, impresoras, máquinas de telefax, balastos electrónicos, lámparas de bajo consumo, fuentes de alimentación para lámparas LED, etc.

Toda señal periódica con una frecuencia f (independientemente de la forma de onda) consta de la suma de lo siguiente:

- La componente sinusoidal de la frecuencia f , conocida como la componente fundamental o h_1
- Las componentes sinusoidales de los múltiplos integrales de la frecuencia f , conocidas como armónicos h_n
- Cualquier componente de CC que en algunos casos también puede estar presente.

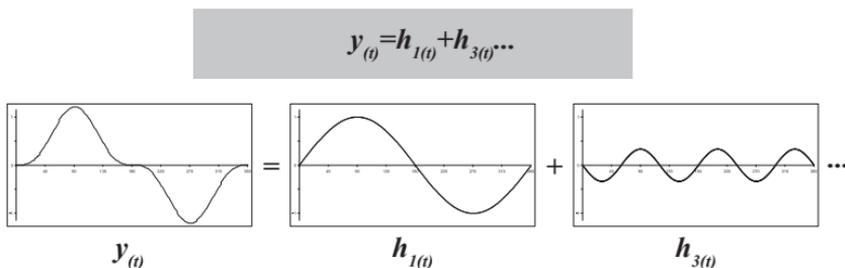


Fig. 35: Análisis de una señal periódica en sus armónicos componentes

Los armónicos se pueden dividir en:

■ **Armónicos pares** (2.º, 4.º, 6.º, etc.)

Éstos ocurren debido a variaciones repentinas de la carga o fallas en los convertidores

■ **Armónicos impares** (3.º, 5.º, 7.º, etc.)

→ **Armónicos divisibles por 3** (3.º, 9.º, 15.º, etc.)

Éstos ocurren debido a cargas asimétricas y fuentes monofásicas de armónicos

Fuentes típicas: Edificios de oficinas, hospitales, empresas de software, bancos, etc.

Fábricas con equipos de soldadura de 2 fases

Problema: ¡Estas corrientes armónicas en el conductor neutro son acumulativas!

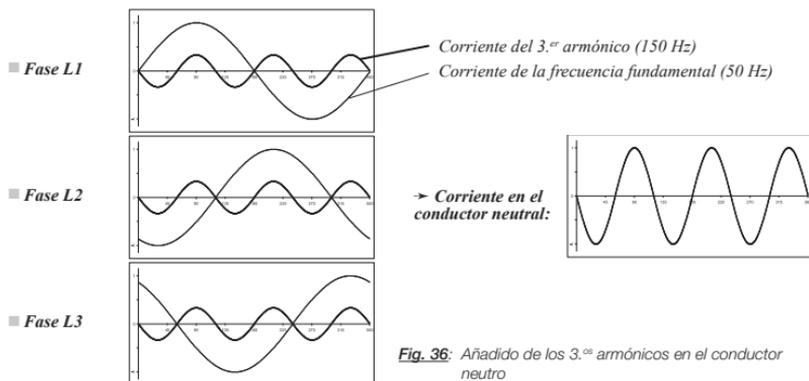


Fig. 36: Añadido de los 3.º armónicos en el conductor neutro

→ **Armónicos no divisibles por 3** (5.º, 7.º, 11.º, 13.º, etc.)

Éstos ocurren debido a fuentes trifásicas de armónicos.

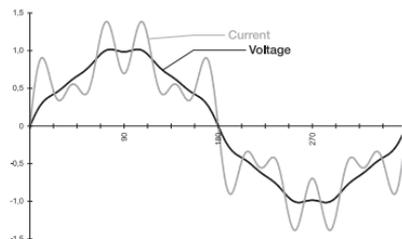
Armónicos 5.º y 7.º: de convertidores de 6 pulsos

Armónicos 11.º y 13.º: de convertidores de 12 pulsos

Problema: ¡Los armónicos se transmiten a través del transformador!

La distorsión armónica total **THD** es resultado de la adición vectorial de todos los armónicos presentes y, por regla general, se expresa como una proporción de la frecuencia fundamental, proporcionando así una visión general rápida de la calidad de la energía de la red.

¡Cada armónico puede considerarse como un sistema individual con su propio ángulo de fase! Esto da como resultado una diferencia básica entre **cos φ** (frecuencia fundamental) y **PF** (o λ , es decir, el factor de energía como la suma vectorial por todos los armónicos).



Los armónicos se generan no solo en instalaciones industriales, sino también, cada vez más, en hogares privados.

Como regla general, los dispositivos que generan estos armónicos sólo se alimentan en los órdenes impares, de modo que solo se encuentran los armónicos 3.º, 5.º, 7.º, 9.º, 11.º, etc.

Fig. 37: Corriente y tensión de red superpuestas con los siguientes armónicos: 5% del 5.º armónico, 4% del 7.º armónico y 2,5% del 11.º armónico

■ 8.2: ¿Dónde se producen los armónicos?

En sistemas industriales de baja tensión, especialmente cuando se instalan accionamientos de velocidad variable, y en todos los hogares: en todos los televisores, ordenadores y lámparas compactas de bajo consumo con balastro electrónico. El gran número de estas cargas en las noches con las corrientes en fase a menudo da lugar a altos niveles de armónicos en las redes de tensión media.

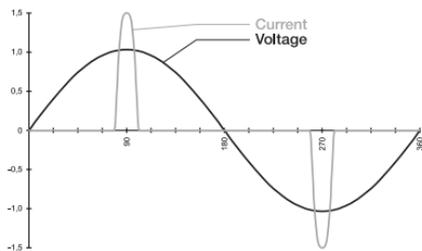


Fig. 38: Corriente y tensión en una unidad SMPS

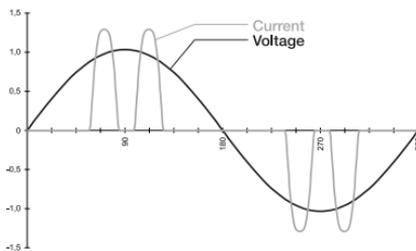


Fig. 39: Corriente y tensión en un convertidor B6

■ 8.3: ¿Cuál es el nivel de estos armónicos si aún no se ha instalado un sistema PFC?

a) En el propio sistema de baja tensión de una instalación:

depende de la energía de los convertidores y rectificadores instalados.

Si, por ejemplo, se instala un convertidor grande de 6 pulsos en el sistema y su energía nominal es del 50% de la nominal del transformador, esto da lugar a aproximadamente

- 4% del 5.º armónico (250 Hz) y
- 3% del 7.º armónico (350 Hz)

Es más habitual, sin embargo, que se instalen en un sistema varios convertidores pequeños que no estén vinculados entre sí. El hecho de que las corrientes a los rectificadores individuales no estén todas en fase significa que los voltajes armónicos resultantes son menores que en el caso anterior.

Si, por ejemplo, se instalan varios rectificadores con una energía combinada de alrededor del 25% de la clasificación nominal del transformador, esto da lugar a aproximadamente

- 1 - 1,5% del 5.º armónico y
- 0,7 - 1% del 7.º armónico.

Estos son valores aproximados para ayudar en la evaluación inicial de si es necesario instalar un sistema PFC desintonizado.

b) En la red de media tensión:

Hoy en día, la mayoría de estos sistemas se ven afectados predominantemente por los dispositivos de los hogares privados (principalmente televisores) que producen armónicos. Esto es claramente evidente cuando se examina la curva diaria del 5.º armónico:

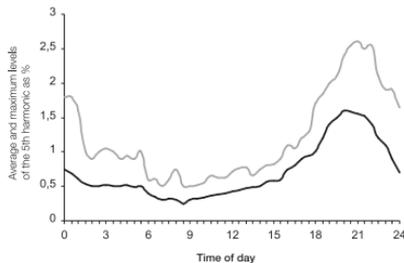


Fig. 40: Niveles medios y máximos del 5.º armónico como % en una red municipal de media tensión

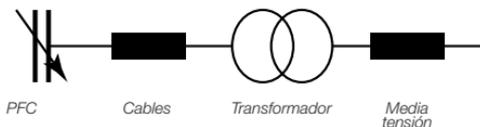
En el gráfico se muestra el nivel de armónicos en el sistema de media tensión de una fuente de alimentación municipal con cargas industriales en días laborables.

Estos niveles medios y máximos se determinaron en una serie de mediciones realizadas entre 1985 y 1987 por FGH, una organización alemana de investigación de la industria del suministro de energía, y ciertamente deben ser mucho más altos hoy en día. El aumento en las noches se debe a los numerosos televisores y otras cargas no lineales en los hogares particulares.

En áreas densamente pobladas por las noches, las frecuencias de más del **4% 250 Hz** y hasta aproximadamente el **1,5% 350 Hz** se pueden superponer en el sistema de suministro de media tensión. Los armónicos más altos suelen ser despreciables. ¡Los niveles armónicos solo se pueden predecir con una precisión limitada!

■ 8.4: ¿Qué efecto tiene un sistema PFC en una red con armónicos?

Un sistema PFC sin desintonización forma un circuito oscilatorio con impedancias reactivas de línea. La frecuencia resonante está dada por una sencilla regla general:



$$f_r = 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}}$$

- f_r : Frecuencia resonante
- S_{sc} : Energía de cortocircuito en el punto donde está conectado el sistema de corrección
- Q_c : Energía correctiva PFC

La energía de cortocircuito S_{sc} en el punto donde está conectado el sistema PFC está

- determinada esencialmente por el transformador (S_{sc} / v_{sc}),
- reducida en aproximadamente un 10% por la impedancia del sistema de media tensión
- posiblemente más reducida por largas longitudes de cable entre el transformador y el sistema PFC.

Ejemplo:

- Transformador de 1000 kVA, $v_{sc} = 6\%$
- Energía de cortocircuito del sistema de media tensión 150 MVA, $S_{sc} \approx 2,6 \text{ MVA}$
- Sistema PFC 400 kVAr en 8 etapas, no desintonizado

Energía correctiva PFC (Q_c)	Frecuencia resonante (f_r)
100 kVAr	562 Hz
250 kVAr	355 Hz
400 kVAr	281 Hz

Cuando se activan las etapas del condensador del sistema de corrección, la frecuencia de resonancia del sistema f_r cambia considerablemente y, a veces, está cerca de la frecuencia de un armónico del sistema.

Si la resonancia natural de este circuito oscilatorio está cerca de un armónico del sistema que esté presente, es de esperarse que la resonancia aumente los voltajes armónicos. Bajo ciertas condiciones, éstos pueden multiplicarse por una cantidad que se acerque al factor Q del sistema (en sistemas industriales alrededor de 5-10!):

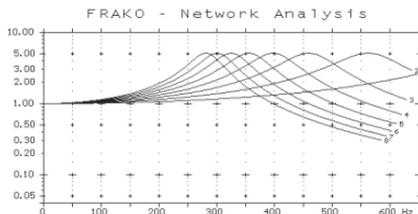


Fig. 41: Factor de amplificación para tensiones armónicas en un sistema PFC sin desintonización en una red de baja tensión

■ 8.5: ¿Cuándo pueden producirse resonancias de red peligrosas?

A partir de la tabla anterior se puede ver que es posible evaluar si pueden presentarse problemas de resonancia con los armónicos. Bastan unas reglas sencillas para esto:

1.) Si la frecuencia resonante está

- 10 % por debajo o por encima de un armónico de red, este último se **amplificará** en una red con un factor Q alto (por ejemplo, por las tardes y por la noche) **por un factor de hasta 4**.
- 20 % por encima de un armónico de red, este último se amplificará en una red con un factor Q alto **por hasta 2,5 veces**.
- 30 % por encima de un armónico de red, este último se amplificará sólo levemente, **por un factor de hasta más o menos 1,7**.

2.) En una red sin generador armónico propio, pero con armónicos pronunciados presentes en el sistema de media tensión, puede ocurrir lo siguiente

- a una frecuencia de resonancia inferior a 400 Hz: picos de resonancia del 7.º armónico,
- a una frecuencia resonante inferior a 300 Hz: picos de resonancia peligrosos del 5.º armónico (250 Hz).

■ 8.6: ¿Qué efecto tiene la configuración del sistema en el problema de los armónicos?

La energía de cortocircuito del sistema determina la frecuencia de resonancia y, donde hay generadores armónicos presentes en esa red, la amplitud de los armónicos en la tensión de la red.

- Si la **energía de cortocircuito del sistema** en el punto donde está conectado el sistema PFC es **demasiado baja**, esto causa problemas.
- Si la energía del **cortocircuito se cambia radicalmente** debido a condiciones de conmutación alteradas, esto causa problemas.

Ejemplo:

En muchas grandes instalaciones comerciales, la continuidad del suministro de energía se logra conectando los puntos de distribución de baja tensión a través de un circuito de anillo. Este sistema tiene una alta energía de cortocircuito incluso con grandes sistemas PFC y altas cargas rectificadoras sin que surjan apenas problemas de armónicos, ya que la frecuencia de resonancia es alta y las corrientes armónicas se disipan con caídas de baja tensión en el sistema de media tensión. Si se realiza una interrupción en el circuito de anillo, por ejemplo, para trabajos de mantenimiento, la energía del cortocircuito puede disminuir considerablemente bajo ciertas condiciones, ¡de modo que la frecuencia de resonancia puede caer por debajo de 300 Hz!

■ 8.7: Cargas de tensión y corriente en sistemas PFC sin desintonización

Cuando se produce resonancia, la tensión RMS de la red solo aumenta ligeramente, pero el valor RMS de la corriente del condensador aumenta considerablemente. En el caso de resonancia con el 5.º armónico, esto puede alcanzar un nivel de, digamos, 15%, en cuyo caso:

- La tensión RMS del sistema aumenta en un 1%
- La tensión de la línea de trabajo de la cresta aumenta en un 10-15% (en función del ángulo de fase)
- **¡El valor RMS de la corriente del condensador aumenta en un 25%!**

En el caso de resonancia con el 11.º armónico, esto puede alcanzar un nivel de, digamos, 10%, en cuyo caso:

- La tensión RMS del sistema aumenta en un 0,5%
- El valor pico de la tensión de suministro aumenta en un 6-10%
- **¡El valor RMS de la corriente del condensador aumenta en un 50%!**

¡Por esta razón, una alta **capacidad de carga de corriente** es una de las características de calidad más importantes para un condensador!

¡Los condensadores **FRAKO** pueden soportar una sobrecorriente de hasta **2,7 veces la corriente nominal** como carga continua!

Sección 9: Diseñar para sistemas con armónicos

■ 9.1: ¿Qué se debe hacer si la resonancia es posible pero más bien improbable?

Una proporción considerable de las instalaciones que se diseñan hoy en día entran en esta categoría, por ejemplo:

- No hay generadores armónicos internos instalados en la red, no hay armónicos en el sistema de media tensión, pero hay una frecuencia resonante inferior a 400 Hz.
- Si se realizan cambios en la configuración de la red, por ejemplo, durante los trabajos de mantenimiento, la frecuencia de resonancia puede caer por debajo de los 400 Hz. Los armónicos están presentes en el sistema de distribución de media tensión.
- Está previsto construir instalaciones con rectificadores en una fecha posterior.

Para proteger una instalación no desintonizada de la aparición de resonancias, incluso si esto solo puede suceder ocasionalmente, es muy ventajoso utilizar un **instrumento de monitoreo de red de suministro FRAKO**. Estos dispositivos monitorizan las tres fases del sistema de suministro de energía, apagan la instalación si se excede un nivel peligroso de armónicos y lo vuelven a encender automáticamente cuando este nivel cae por debajo del valor crítico. Sin embargo, los valores máximos que se han producido se almacenan y se pueden recuperar a través de una interfaz de bus.

Para los sistemas de distribución que están cargados simétricamente, también se puede instalar un **relé de control de energía reactiva FRAKO**. Estos instrumentos monitorizan el sistema con objeto de detectar cualquier resonancia que pueda ocurrir. Determinan los voltajes armónicos en las fases medidas y calculan la corriente RMS a los condensadores. Si se supera un límite máximo programado, la instalación se apaga y se vuelve a encender cuando el nivel cae por debajo de su valor crítico.

■ 9.2: Planificación para sistemas PFC en redes con armónicos

La mejor información sobre las características operativas de un sistema PFC planificado se obtiene mediante una combinación de dos actividades de planificación:

- Medición de las tensiones y corrientes armónicas durante varios días sin sistema PFC instalado.
- Cálculo teórico de las características de resonancia de la red.

In dem gemessenen Netz sind dann folgende Oberschwingungspegel zu erwarten:

El valor máximo de la medición sin PFC multiplicado por el factor de resonancia del análisis del sistema

Ejemplo:

Un sistema de baja tensión de tamaño medio con un transformador de 1000 kVA. La instalación, completa con el sistema PFC, se conecta a través de dos cables de 20 m de longitud colocados en paralelo (equivalente a la impedancia de un cable de 10 m). Solo se pueden tener en cuenta las cargas puramente óhmicas, ya que equipos como los motores de inducción no tienen ningún efecto amortiguador sobre los armónicos. Con una instalación de 400 kVAr y todas las etapas del condensador conmutadas, el 5.º armónico (250 Hz) se amplifica por un factor de aproximadamente 3. ¡A 250 kVAr, el 7.º armónico se amplifica por un factor de aproximadamente 4!

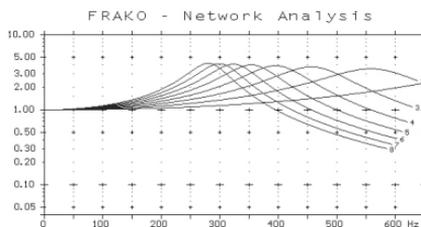


Fig. 42: Amplificación de tensiones armónicas como función del número de etapas del condensador activadas

Durante el día, con el aumento de la amortiguación de la red, estos factores son más bajos, pero por las noches y los fines de semana el factor de amplificación para el 7.º puede ser mayor.

■ 9.3: Medidas para contrarrestar las resonancias esperadas

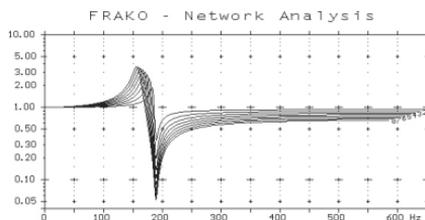
Si, cuando se planifica un sistema PFC, se esperan armónicos con altos niveles de tensión, tales como:

4,0%	del 3.º armónico (150 Hz)
5,0%	del 5.º armónico (250 Hz)
4,0%	del 7.º armónico (350 Hz)
3,0%	del 11.º armónico (550 Hz)
2,1%	del 13.º armónico (650 Hz)

debidos a una amplificación inducida por resonancia, pueden producirse interrupciones graves en el sistema de distribución de baja tensión:

- Problemas con los sistemas informáticos y las máquinas CNC
- Daños en rectificadores o convertidores
- Disparo incontrolado de la apartamentación y los disyuntores
- Apagado de los sistemas PFC no desintonizados
- Picos de tensión en el sistema de distribución
- Aumento de las pérdidas de corriente de Foucault en transformadores y motores de inducción

Si el nivel de armónicos individuales sin sistema PFC asciende a más del 1,5% (armónicos 7.º y superiores) o 2% (5.º armónico) y la frecuencia resonante de la red puede estar cerca de estos armónicos, entonces se debe suponer que estos límites permisibles serán superados por la amplificación inducida por resonancia. En situaciones de este tipo, sólo se deben utilizar sistemas PFC desintonizados para no poner en peligro la fiabilidad del sistema de distribución de baja tensión.



La desintonización reduce la frecuencia de resonancia a un valor inferior a 250 Hz. Todos los armónicos por encima de la frecuencia resonante del sistema desintonizado están atenuados.

Fig. 43: Amortiguación de los voltajes armónicos como función del número de etapas de condensador desintonizadas

Un condensador desintonizado consta de un condensador en serie con un reactor de filtro (inductor). Su frecuencia de resonancia en serie se ajusta mediante el diseño pertinente del reactor de filtro de modo que esté por debajo de la frecuencia del 5.º armónico (250 Hz). Por lo tanto, esta combinación tiene una característica inductiva para todas las frecuencias que están por encima de la frecuencia resonante en serie. Ya no es posible la resonancia entre los condensadores y las impedancias reactivas de la red. Un sistema desintonizado suprime algunas de las corrientes armónicas. Para evitar sobrecargas debidas al 5.º armónico aún presente en la red, es práctica actual ajustar la frecuencia de resonancia del circuito desafinado a 189 Hz o menos.

El circuito desintonizado se caracteriza por la frecuencia de resonancia del condensador-reactor f_r o por el cociente de p entre la caída de tensión a través del reactor y la que se da a través del condensador. Estos dos parámetros se relacionan mediante la siguiente fórmula:

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{1}{p}}$$

Ejemplo: $p = 0,07$ (7% desintonización) en un sistema de 50 Hz
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

La impedancia del condensador desintonizado a 250 Hz es menor que la impedancia del condensador sin desintonización por un factor x.

El sistema PFC desintonizado tiene las siguientes características para el 5.º armónico:

- Características del circuito aceptador cuando $x > 1$
- Características del circuito rechazador cuando $x < 1$

Con características de circuito aceptador fuerte (circuito resonante en serie), el nivel máximo permitido del armónico de 250 Hz debe limitarse para no sobrecargar el reactor del filtro.

→ p = 5,7 %	fr = 210 Hz	x = 2,4	→ $v_{250\text{máx}} = 4\%$
→ p = 7 %	fr = 189 Hz	x = 1,33	→ $v_{250\text{máx}} = 5\%$
→ p = 8 %	fr = 177 Hz	x = 1,0	→ $v_{250\text{máx}} = 5\%$
→ p = 14 %	fr = 134 Hz	x = 0,42	→ $v_{250\text{máx}} = 5\%$

Ejemplo: Si el 4% del 5.º armónico se superpone a la tensión de red, un sistema PFC desintonizado atenúa el 5.º armónico de la siguiente manera:

→ al 7 % de desintonización:	por $4\% \times 5$	$\times 1,33 = 0,27 \times I_n$
→ al 5,7 % de desintonización:	por $4\% \times 5$	$\times 2,40 = 0,48 \times I_n$
→ a 14 % desintonización:	por $4\% \times 5$	$\times 0,42 = 0,08 \times I_n$

(I_n = corriente nominal del sistema a 50 Hz)

Cuando se diseña un sistema PFC desintonizado, siempre se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Los condensadores con y sin desintonización nunca deben funcionar en paralelo en el mismo sistema de baja tensión.
- Es posible el funcionamiento paralelo de los sistemas de circuitos de filtros con diferentes factores de desintonización (p), pero la carga de los circuitos de filtro es diferente y debe analizarse con precisión para detectar altos niveles de armónicos.
- Si los sistemas de baja tensión están aislados eléctricamente entre sí (los transformadores no pueden acoplarse en el lado de baja tensión), entonces, si es necesario, un sistema puede desintonizarse mientras que el otro sistema tiene una corrección del factor de energía sin desintonización.
- El tipo de instalación seleccionado debe cumplir los requisitos de la empresa de servicios públicos de que se trate.

■ 9.4: Niveles máximos admisibles de armónicos

Se puede consultar una serie de normas al evaluar la calidad de la energía, y la norma relevante dependerá de la aplicación en particular. Para los suministros normales de baja tensión conectados a redes públicas de distribución, se aplican generalmente dos normas:

- **EN 50160** 'Características de tensión de la electricidad suministrada por las redes eléctricas públicas' que cubre las tensiones armónicas hasta el orden 25.º.
- **EN 61000-2-2** 'Niveles de compatibilidad para perturbaciones conducidas de baja frecuencia y señalización en sistemas públicos de suministro de energía de baja tensión' que cubre las tensiones armónicas hasta el orden 50.º.

Tabla 9: Comparación de los niveles máximos de armónicos admisibles según EN 50160 y EN 61000-2-2

	EN 50160	EN 61000-2-2	EN 50160	EN 61000-2-2
Armónicos pares:				
2.º (100 Hz)	2,00 %	2,00 %		
4.º (200 Hz)	1,00 %	1,00 %		
6.º (300 Hz)	0,50 %	0,50 %		
8.º (400 Hz)	0,50 %	0,50 %		
10.º (500 Hz)	0,50 %	2,50 %		
12.º (600 Hz)	0,50 %	2,13 %		
14.º (700 Hz)	0,50 %	1,86 %		
16.º (800 Hz)	0,50 %	1,66 %		
18.º (900 Hz)	0,50 %	1,50 %		
20.º (1000 Hz)	0,50 %	1,38 %		
22.º (1100 Hz)	0,50 %	1,27 %		
24.º (1200 Hz)	0,50 %	1,19 %		
26.º (1300 Hz)	-	1,12 %		
28.º (1400 Hz)	-	1,05 %		
30.º (1500 Hz)	-	1,00 %		
32.º (1600 Hz)	-	0,95 %		
34.º (1700 Hz)	-	0,91 %		
36.º (1800 Hz)	-	0,88 %		
38.º (1900 Hz)	-	0,84 %		
40.º (2000 Hz)	-	0,81 %		
42.º (2100 Hz)	-	0,79 %		
44.º (2200 Hz)	-	0,76 %		
46.º (2300 Hz)	-	0,74 %		
48.º (2400 Hz)	-	0,72 %		
50.º (2500 Hz)	-	0,70 %		
			Armónicos impares: (divisibles por 3)	
			3.º (150 Hz)	5,00 % 5,00 %
			9.º (450 Hz)	1,50 % 1,50 %
			15.º (750 Hz)	0,50 % 0,40 %
			21.º (1050 Hz)	0,50 % 0,30 %
			27.º (1350 Hz)	- 0,20 %
			33. ^{er} (1650 Hz)	- 0,20 %
			39.º (1950 Hz)	- 0,20 %
			45.º (2250 Hz)	- 0,20 %
			Armónicos impares: (no divisibles por 3)	
			5.º (250 Hz)	6,00 % 6,00 %
			7.º (350 Hz)	5,00 % 5,00 %
			11.º (550 Hz)	3,50 % 3,50 %
			13.º (650 Hz)	3,00 % 3,00 %
			17.º (850 Hz)	2,00 % 2,00 %
			19.º (950 Hz)	1,50 % 1,76 %
			23. ^{er} (1150 Hz)	1,50 % 1,41 %
			25.º (1250 Hz)	1,50 % 1,27 %
			29.º (1450 Hz)	- 1,06 %
			31.º (1550 Hz)	- 0,97 %
			35.º (1750 Hz)	- 0,83 %
			37.º (1850 Hz)	- 0,77 %
			41.º (2050 Hz)	- 0,67 %
			43.º (2150 Hz)	- 0,63 %
			47.º (2350 Hz)	- 0,55 %
			49.º (2450 Hz)	- 0,52 %
Lo mismo para ambas normas:				
- Distorsión armónica total de la tensión THDv: máx. 8%				
- Distorsión armónica total de la corriente THDi: máx. 20% recomendado.				

Sección 10: Diseñar para redes con sistemas de control remoto de audiofrecuencia

■ 10.1: Corrección del factor de energía en redes con sistemas de control remoto de audiofrecuencia

Los sistemas de control remoto de audiofrecuencia (AF) se instalan en las redes de suministro de las empresas de servicios públicos a fin de realizar funciones de conmutación (como el cambio de tarifa) mediante receptores especiales en el circuito del consumidor. Para hacer esto, los voltajes de control a alta frecuencia (pulsos AF) se superponen al sistema de distribución de energía. Estas frecuencias suelen estar en el rango de 166 a 1350 Hz.

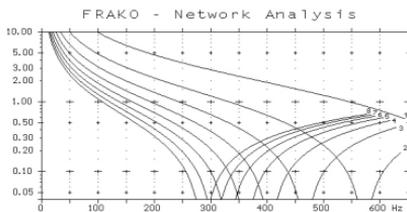
Para no interferir con el funcionamiento de estos sistemas de control remoto, el nivel de tensión de control no debe verse perturbado indebidamente por la instalación del cliente. Para garantizar esto, los miembros de la Asociación Alemana de Industrias de Energía y Agua (BDEW), la Asociación de Empresas Austríacas de Seguridad (VSÖ) y la Asociación de Empresas Eléctricas Suizas (VSE) produjeron recomendaciones conjuntas para prevenir perturbaciones inadmisibles en los sistemas de control remoto AF.

Se utiliza un factor de impedancia α^* para la evaluación de las redes con sistemas PFC instalados. ¡En un factor de impedancia $\alpha^* \geq 0,5$ no se espera ninguna interferencia con los sistemas de control remoto!

El factor de impedancia α^* es la relación entre la impedancia de la instalación del consumidor (carga más el sistema PFC) en la frecuencia de control remoto y la impedancia nominal del transformador.

■ 10.2: Efecto de los sistemas PFC sin desintonización

Un sistema PFC sin desintonización junto con las impedancias de la red reactiva constituye un circuito oscilatorio cuya frecuencia resonante f_r disminuye con el aumento de la energía PFC correctiva. Cerca de la frecuencia resonante, la impedancia del circuito oscilatorio está en un valor muy bajo y puede atenuar considerablemente el nivel de tensión del sistema de control AF.



Cuando el sistema PFC está completamente conmutado, un factor de impedancia $\alpha^* \geq 0,5$ solo se puede lograr para una frecuencia de control remoto de 166 Hz.

Fig. 44: El factor de impedancia α^* en función del número de etapas de condensador conmutadas

Si no se puede mantener el factor de impedancia, se debe seleccionar un sistema desintonizado. ¡La instalación de un circuito de rechazo AF en serie con el sistema PFC para aumentar la impedancia ya no puede recomendarse para sistemas modernos plagados de armónicos!

■ 10.3: Efectos de los sistemas PFC desintonizados

La desintonización de los sistemas PFC reduce la frecuencia resonante (como ya se ha descrito con más detalle desde [Seite 43](#) en adelante) a un valor inferior a 250 Hz. Todos los armónicos por encima de la frecuencia resonante del circuito desintonizado ya no se amplifican sino que se atenúan. Esto rinde valores adecuados del factor de impedancia α^* para frecuencias de control remoto suficientemente lejos de la frecuencia de resonancia del circuito desintonizado.

En función del diseño exacto del circuito, las frecuencias de control remoto se pueden bloquear de manera confiable cuando se utilizan sistemas PFC desintonizados, incluso sin necesidad de un circuito de rechazo AF.

En vista de la máxima fiabilidad requerida de los sistemas PFC y la transmisión sin interferencias de señales de control remoto requeridas por las empresas de servicios públicos, recomendamos los siguientes diseños para un factor de corrección (proporción entre la energía del transformador y la energía correctiva PFC) de hasta el 50%:

Control remoto del servicio público (en Hz)	Diseño de PFC (factor de desintonización)	... la frecuencia más importante Principales ventajas y desventajas
≥ 166	$p = 14\%$ ($f_r = 134$ Hz)	Solo ofrece efecto de bloqueo sobre armónicos, idóneo para sistemas con armónicos de órdenes divisibles por 3, pero instalación costosa.
$\geq 216,67$	$p = 8\%$ ($f_r = 177$ Hz)	Efecto de extracción moderado sobre armónicos, no idóneo para sistemas con armónicos de órdenes divisibles por 3, instalación relativamente costosa.
≥ 228	$p = 7\%$ ($f_r = 189$ Hz)	Instalación económica, efecto de extracción adecuado sobre armónicos, no apto para sistemas con armónicos de órdenes divisibles por 3.
≥ 270	$p = 5,67\%$ ($f_r = 210$ Hz)	Efecto de extracción sobre armónicos a menudo demasiado grande, no adecuado para sistemas con armónicos de órdenes divisibles por 3, no recomendado sin análisis previo del sistema.

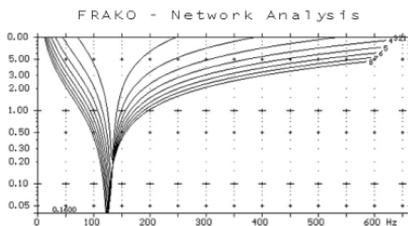


Fig. 45: El factor de impedancia α^* como función del número de etapas de condensador conmutadas, con un 14% de desintonización

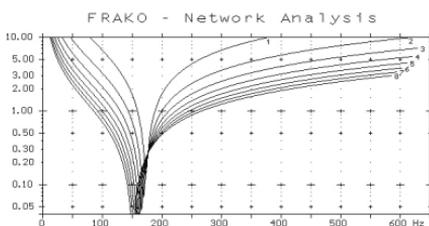


Fig. 46: El factor de impedancia α^* como función del número de etapas de condensador conmutadas, con un 8% de desintonización

Estas recomendaciones se basan en muchos años de experiencia práctica y están en concordancia con las recomendaciones para prevenir perturbaciones inadmisibles en los sistemas de control remoto AF redactadas conjuntamente en 1993 por miembros de la Asociación Alemana de Industrias de Energía y Agua (BDEW), la Asociación de Empresas Austríacas de Seguridad (VSÖ) y la Asociación de Empresas Eléctricas Suizas (VSE).

■ **10.4: Versiones de sistemas PFC desintonizados**

■ **12,5 a 14% de desintonización:**

Una versión con 12,5 a 14% de desintonización es adecuada, incluso sin circuito de rechazo AF, para sistemas de distribución con frecuencias de control remoto de 166 Hz en adelante. Las desventajas de esta versión son los mayores costes de los inductores y condensadores, y su muy baja capacidad de extracción para armónicos industriales. En redes de baja tensión con altos niveles del 5.º armónico, no se debe considerar el uso de estas versiones, especialmente para sistemas > 200 kVAr. En su lugar, se debe seleccionar una versión con $p = 7\%$ u 8% . Las redes de baja tensión con niveles extremadamente altos del 3.º armónico (150 Hz) son, sin embargo, una excepción. El 3.º armónico se ve producido, como regla general, por un sistema de baja tensión con carga altamente asimétrica o una gran cantidad de generadores armónicos monofásicos, que a menudo se encuentran en sitios como complejos de oficinas, bancos, hospitales y grandes almacenes. Para evitar la resonancia a esta frecuencia, en tales casos se debe instalar un sistema desintonizado con una frecuencia resonante inferior a 150 Hz, siendo las versiones con un 14% de desintonización las más adecuadas. En general, las versiones con 7 u 8% de desintonización no deben utilizarse para estos sistemas.

■ **7 y 8% de desintonización:**

Los sistemas de PFC con un 7% de desintonización tienen un historial comprobado para la mayoría de las aplicaciones industriales. La frecuencia resonante está en un nivel óptimo para suprimir los armónicos (principalmente el 5.º y el 7.º) que se encuentran, mientras que al mismo tiempo ofrece suficiente margen para no sobrecargarse. En el caso de redes industriales que están más o menos cargadas simétricamente, con niveles normales de armónicos y frecuencias de control remoto por encima de 228 Hz, ésta es la solución ideal! Las versiones con 8% de desintonización son para redes que utilizan una frecuencia de control remoto de 216,67 Hz.

■ **5 a 5,67% de desintonización:**

Como regla general, estas versiones se utilizan debido a su mayor extracción de armónicos. Sin embargo, si se alimenta al sistema un alto nivel de armónicos desde la red de distribución de media tensión, no se debe considerar el uso de la versión desintonizada de 5 a 5,67%, a fin de evitar condiciones de sobrecarga y, en su lugar, se debe seleccionar una versión con $p = 7\%$. A niveles extremos de armónicos, también se pueden diseñar circuitos de filtro especialmente personalizados. Consulte la Sección 12.1, **Sistemas de filtro pasivo**, en la [página 51](#).

■ **Desintonización combinada:** Esta variante del sistema PFC está construida con etapas de circuito de filtro de diferentes frecuencias resonantes (por regla general 12,5 / 14% y 5 / 5,67%). El número y las clasificaciones de las etapas del circuito de filtro se seleccionan de modo que la relación de energía se acerque a 1:1. Los circuitos desintonizados combinados se usaban anteriormente en redes con frecuencias de control remoto de empresas de servicios públicos en el rango de 166 a 190 Hz como una variante más sencilla en lugar de usar sistemas desintonizados con circuitos de rechazo AF. Hoy en día, debido a las limitaciones del sistema de control, las diferentes cargas térmicas en etapas individuales y el riesgo agudo de sobrecarga en redes plagadas de armónicos, ya no se recomienda la desintonización combinada.

■ **Sistemas PFC inductivos:** En sistemas con un factor de energía capacitivo (por ejemplo, parques solares, redes donde predominan las fuentes de alimentación en modo conmutado, etc.) se requieren inductancias en lugar de condensadores. FRAKO también ha desarrollado sistemas controlados para satisfacer esta necesidad. Se ofrece más información sobre esto en el tema destacado **Corrección del factor de energía inductiva** en la [página 59](#).

■ 10.5: Monitoreo de sistemas PFC en funcionamiento

El mantenimiento de los sistemas PFC después de su instalación es tan importante como el trabajo previo de planificación y diseño. Una vez que se ha puesto en marcha un sistema PFC, con frecuencia se olvida. Por lo general, no se recuerda al usuario el hecho de que los contactores del condensador son componentes sujetos a desgaste hasta que se hayan experimentado los efectos desagradables de la falla del contactor. **Los contactores están sujetos a altos niveles de tensión al conmutar cargas capacitivas.** Los contactos de conmutación centelleantes dan como resultado altas corrientes de carga y descarga en los condensadores y un gran desgaste de los propios contactos de conmutación. La sustitución a tiempo de los contactores prolonga considerablemente la vida útil del sistema PFC. **Los contadores de ciclo de conmutación** se han integrado en los relés de control de energía reactiva de última generación de FRAKO a fin de brindar **información temprana** sobre el desgaste de los contactores. El relé de control de energía reactiva indica el punto óptimo en el tiempo en el que los contactores deben reemplazarse y, por lo tanto, ayuda a reducir los costes. Para fines de mantenimiento preventivo, el usuario puede mostrar el total acumulado de ciclos de conmutación para cada etapa individual.

Las condiciones cambiadas en la red también pueden provocar perturbaciones en todo el sistema de energía de baja tensión. El propósito del monitoreo del sistema es identificar estas perturbaciones en una etapa temprana. Los instrumentos de monitoreo de calidad de energía de FRAKO ofrecen la opción de alarmas tempranas antes de que fallen el sistema o sus componentes. Todos los parámetros relevantes para la seguridad y la fiabilidad en sistemas de media y baja tensión, las temperaturas de los componentes sensibles del sistema y el consumo de energía activa y reactiva se registran, analizan, monitorizan y reportan.

■ 10.6: ¿Qué se debe hacer si los niveles armónicos son altos, pero la demanda de energía reactiva es baja?

En tales casos existen varias soluciones para limitar las corrientes armónicas causadas por el funcionamiento de las cargas que las generan.

Las medidas más conocidas para solucionar este problema son mediante:

- Varios filtros pasivos sintonizados de modo que trabajen juntos (circuitos de filtro sintonizados) o
- Asignación de cargas altamente no lineales y consumidores sensibles en grupos separados, alimentando a cada grupo a través de un transformador independiente.

Sin embargo, estas soluciones implican dos desventajas principales:

- La mejora de las características de perturbación del sistema se aplica únicamente a la instalación concreta de que se trate. Cada extensión posterior puede significar que la inversión inicial se vuelva inútil.
- A menudo es muy difícil implementar estas soluciones en la práctica para una instalación ya existente.

Para problemas con:

- Niveles excesivamente altos de los armónicos 3.º, 9.º y 15.º y de la alta corriente neutra del conductor a la que dan lugar, o
- La demanda de circuitos aceptadores sintonizados para mantener la corriente armónica que se devuelve al sistema de media tensión por debajo de un límite especificado, o
- Baja demanda de energía reactiva pero altas corrientes armónicas, por ejemplo, debido a una gran proporción de motores de inducción controlados por convertidor,

los filtros armónicos activos o combinaciones de sistemas de circuitos de filtro con filtros activos FRAKO a menudo presentan las soluciones óptimas.

Sección 11: Medición y análisis de la calidad de la energía

Implementación de análisis y requisitos de informes con respecto a la calidad de la energía de la red y las cargas de los equipos (Obtenido de la publicación Recomendaciones para mediciones armónicas y de energía en redes eléctricas por ZVEI, la Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos).

■ 11.1: Introducción

Alemania tiene una de las redes más confiables del mundo en lo que respecta al suministro de energía eléctrica. Pero la alta confiabilidad del servicio no es necesariamente sinónimo de alta calidad de la energía, que se ve afectada por desviaciones de la forma de onda puramente sinusoidal en la tensión de la red, o fluctuaciones de tensión. Por lo tanto, garantizar el suministro de energía con suficiente calidad desempeña un papel importante en las redes de distribución industriales y, cada vez más, también en las públicas. El número y la variedad de convertidores electrónicos de energía ha aumentado significativamente en los últimos años: desde fuentes de alimentación de modo conmutado hasta potentes accionamientos de los laminadores. Además, se están utilizando nuevas líneas HVDC, tanto en el continente como para conectar parques eólicos marinos. En consecuencia, la electrónica de energía representa una gran proporción de toda la energía eléctrica que se genera y consume. Hoy en día, las mediciones de la calidad de la energía se han convertido en una herramienta esencial para operar y diseñar redes de energía. Estas recomendaciones tienen por objeto establecer requisitos mínimos para los informes técnicos relativos a la medición y el análisis de la calidad y clasificación de la energía.

■ 11.2: Calidad de la energía

El término calidad de la energía se utiliza a menudo para describir los diferentes tipos de perturbaciones que afectan la calidad del suministro, tales como:

- Armónicos de hasta 2,5 kHz en la tensión de alimentación o corriente de alimentación
- Cambios rápidos de tensión (por ejemplo, parpadeo), así como cambios de tensión lentos e infracciones de la banda de tensión
- Muestras de conmutación, que a veces únicamente son perceptibles junto con oscilaciones de resonancia de cable
- Tensiones y corrientes interarmónicas de hasta 2,0 kHz y tensiones y corrientes supraarmónicas (> 2,0 kHz)
- Desequilibrios de corriente y tensión
- Señales de audiofrecuencia

■ 11.3: Componentes de la energía

Al medir la calidad de la energía, es necesario diferenciar entre el componente de frecuencia fundamental (por ejemplo, 50 Hz en Alemania) y los componentes armónicos superiores u otros elementos causados por desequilibrio o modulación, tales como:

- Energía activa, energía reactiva de desplazamiento y energía reactiva de distorsión
- Energía reactiva causada por desequilibrio o modulación
- Energía reactiva (incluye todas las formas anteriores de energía reactiva y siempre es positiva)
- Energía aparente fundamental
- Energía aparente teniendo en cuenta todos los componentes de energía anteriores
- Factor de energía λ y factor de energía de desplazamiento $\cos \varphi$

Se deben seleccionar intervalos de 10 minutos para grabar los armónicos. Los instrumentos de medición modernos a menudo también ofrecen la opción de registrar intervalos adicionales. En muchos casos, es necesario analizar los valores medios de 10 minutos para comprobar la presencia de eventos altamente dinámicos en la red eléctrica. Por esta razón, los instrumentos de medición proporcionan datos de valor máximo durante períodos de 10 o 200 ms, según el tipo de dispositivo. Esto debe evaluarse con respecto a su impacto en la calidad de la energía.

■ 11.4: Base de la evaluación

Las mediciones de la calidad de la energía y la relación de los componentes de energía generalmente se analizan de acuerdo con los siguientes estándares o pautas:

- IEC 61000 para los límites de calidad de la energía en sistemas de alimentación de media y baja tensión públicos e industriales (solo tensiones)
- EN 50160 para redes públicas que suministran electricidad de alta, media y baja tensión (solo tensiones)
- D-A-CH-CZ Normas técnicas para la evaluación de perturbaciones de la red (tensiones y corrientes)
- Guías de aplicación VDE 41XX para electricidad de alta, media y baja tensión (solo tensiones)
- IEC 60871 para condensadores de energía de alta tensión
- IEC 60831 para condensadores de energía de BT
- DIN EN 61800 para accionamientos de velocidad variable
- Otras normas mundiales: IEEE 519, GB/T 15543, GOST 13109, Recomendaciones de ingeniería G5/4-1 y P28
- Contrato de conexión de red que detalla el factor de energía de desplazamiento entre φ y otras condiciones acordadas

Los valores medidos deben estar dentro de los límites establecidos durante el 95 o 100 por ciento del tiempo de medición (generalmente una semana), en función del estándar en cuestión.

■ 11.5: Tareas de medición

La siguiente información debe registrarse en el informe final después de medir la calidad de la energía de una red eléctrica:

- Nombre exacto de la empresa, ubicación y subestación
- Motivo de la medición (comprobación rutinaria, perturbación, base para la expansión de la red o diseño de la planta)
- Período exacto de medición
- Diagrama de circuito (simplificado o detallado) que especifica el punto de medición y el estado de conmutación
- Condiciones de carga (carga normal o condiciones de desviación)
- Consumidor expuesto (por ejemplo, convertidor de accionamiento o máquina de soldadura), especificación de los datos y, posiblemente, del perfil de carga
- Equipos PFC y estados de conmutación pertinentes
- Filtros de red
- Equipos de generación de energía y sistemas de energía de emergencia
- Base de análisis de medición (normas, directrices)
- Quién realizó qué medición del operador de la red de distribución
- Nombre del operador de la red de distribución

■ 11.6: Idoneidad de los equipos de medición

Es esencial mantener una reunión técnica con el cliente para determinar las condiciones subyacentes a las mediciones necesarias. Sobre la base de los resultados de la reunión, se pueden extraer conclusiones sobre el equipo de medición que se utilizará.

Se debe hacer una distinción entre tareas de medición simples con instrumentos de medición para registrar datos estadísticos y mediciones para análisis de red técnicamente exigentes con instrumentos que tienen una resolución de frecuencia de 20 a 150 kHz y pueden registrar fallas activables. Esto es particularmente esencial para la última generación de convertidores y resonancias de red debido a las capacitancias de los instrumentos (por ejemplo, sistemas PFC no desafinados, filtros de entrada, cables de alimentación).

Medición de la calidad de la energía

Para las mediciones de la calidad de la energía, siempre se deben utilizar instrumentos de clase A según se definen en IEC 61000-4-30. Esto garantiza que los resultados de la medición cumplan con las normas pertinentes y sean adecuados para un uso sin restricciones. A fin de evaluar el punto de conexión en redes públicas, se debe utilizar un intervalo de tiempo de 10 minutos para la medición. A fin de analizar las características de carga, este intervalo se puede reducir o bien se pueden crear oscilogramas, por ejemplo, para detectar muescas de conmutación. A fin de determinar los valores de parpadeo correctos, la tensión de alimentación nominal pertinente debe indicarse en los parámetros de medición.

Señales de audiofrecuencia

Antes de fijar los parámetros de medición, es necesario averiguar e introducir las señales de audiofrecuencia utilizadas en la red del cliente u operador de la red de distribución. La frecuencia y el nivel de la señal son importantes a la hora de especificar las medidas necesarias para reducir los armónicos.

Medición de las corrientes

Las corrientes se pueden medir con transformadores de corriente de núcleo dividido o bobinas de Rogowski, teniendo en cuenta la relación del transformador y el ángulo de fase con respecto a la tensión relevante. Si el instrumento presenta un diagrama de fasor, éste debe usarse para evitar errores de medición. Los instrumentos de medición modernos también ofrecen posibilidades para el posprocesamiento de datos si se identifican configuraciones de parámetros defectuosas.

Medición de energía

En muchos casos, se deben seleccionar mediciones de energía con una resolución de tiempo correspondiente a un intervalo de sondeo del medidor de 15 minutos. Se deben tener en cuenta las características de transmisión de los transformadores de tensión, especialmente en redes de media y alta tensión. En función del transformador, pueden producirse distorsiones significativas de los valores medidos desde 1,0 kHz hacia arriba debido a resonancias internas en el transformador inductivo. Hoy en día, se utilizan cada vez más dispositivos electrónicos de energía que generan incluso armónicos e interarmónicos. Por esta razón, los modos de análisis relevantes de los instrumentos de medición deben evaluarse y, de ser necesario, presentarse en el informe. La exactitud de los resultados medidos siempre debe evaluarse antes o después de las mediciones, teniendo en cuenta la clase de precisión, el transformador y los datos técnicos de los instrumentos de medición. La posición física de las bobinas de Rogowski, por ejemplo, también afecta en gran medida la precisión y puede causar errores de hasta el 20 por ciento.

■ 11.7: Implementación del cliente

Antes de que comiencen las mediciones, deben aclararse con el operador del sistema las variaciones de carga necesarias o los estados de conmutación. El operador de la red debe documentarlos si esta información no es claramente evidente a partir de los resultados de la medición.

La duración de las mediciones, que normalmente deberían cubrir todas las condiciones de carga, también puede basarse en esta información. Solo entonces se pueden derivar medidas apropiadas para la gestión operativa de una red, por ejemplo, si se alcanzan o superan los límites establecidos por las normas.

Es posible que se requieran disparadores para las operaciones de conmutación o los cambios de carga si se toman mediciones de perturbaciones aleatorias.

Para mediciones más largas y sin supervisión, solo se deben usar equipos aprobados, cables de instrumentos y adaptadores con objeto de prevenir lesiones personales.

■ 11.8: Formato del informe y recomendaciones

Hay dos opciones para los informes técnicos que presentan los resultados de las mediciones:

- Resumen ejecutivo con resultados de medición seleccionados
- Informe completo con una sección teórica (que explique la aparición de fenómenos como parpadeo, armónicos, caídas de tensión), una sección que describa los procedimientos de medición y varios anexos para los puntos de medición individuales

En ambos casos, debe garantizarse que las mediciones se evalúen en relación con su conformidad con las normas o especificaciones del operador de red, o su salida de los límites establecidos. Por lo tanto, la persona que encarga el análisis de la red, que a menudo no es un experto probado en el campo de la calidad de la energía, tiene la oportunidad de evaluar las mediciones realizadas y sacar conclusiones para el funcionamiento de su red eléctrica.

Si se superan los límites establecidos, por ejemplo, para armónicos, parpadeo (fluctuaciones rápidas de tensión) y energía reactiva, el informe siempre deberá contener recomendaciones sobre las medidas correctoras que deben adoptar los operadores de red y los consumidores:

- Aumento de la energía de cortocircuito cambiando la energía del transformador o aumentando la capacidad de conexión de red
- Cambio de la frecuencia de pulso de los sistemas convertidores de energía
- Cambio de diodo a extremo frontal activo en el circuito del lado de suministro
- Sistemas PFC capacitivos con control de contactor o interruptores semiconductores de baja tensión para dinámicas de alta carga, pero a veces también sistemas inductivos
- Circuitos de filtro pasivos (prestando atención a la energía reactiva capacitiva)
- Filtros de energía activos
- Sistemas de filtros dinámicos que pueden generar energía reactiva inductiva y capacitiva

También es necesario abordar los cambios futuros en la red del cliente (aumento de la demanda, instalación de más unidades convertidoras, etc.). Sin embargo, las recomendaciones únicamente deben dar una descripción objetiva de la eficacia de las medidas individuales del lado de la oferta o del lado del consumidor, al igual que los aspectos económicos, como las pérdidas de energía, manteniendo al mismo tiempo una posición neutral sobre proveedores.

■ 11.9: Lista de comprobación del informe de mediciones

-
- Nombre exacto de la empresa, ubicación, subestación y punto de medición
-
- Motivo de la medición
- Medición operativa/comprobación rutinaria
 - Diagnóstico de fallos/resolución de problemas
 - Adquisición de datos para el diseño de nuevas instalaciones/ampliación
-
- Período de medición
-
- Información sobre el instrumento de medición utilizado
-
- Información sobre las normas y directrices utilizadas, así como los requisitos del operador de la red de distribución, si se especificó
-
- Diagrama de circuito que indica el punto de medición y los estados de conmutación (interruptores abiertos / cerrados)
-
- Información sobre cargas
- Cargas no lineales (con componentes activos y consumo de corriente no sinusoidal, por ejemplo, todos los tipos de convertidores de energía y unidades de alimentación)
 - Cargas lineales (con componentes pasivos y consumo de corriente sinusoidal)
 - Generación interna (generadores de energía de emergencia, CHP, sistemas fotovoltaicos)
 - Sistemas/filtros PFC (activos/pasivos)
-
- Condiciones de carga (con especificación de tiempo)
- Operación de turno
 - Turnos de mantenimiento
 - Condiciones de carga que se desvían de lo normal
-
- Informe con los resultados y su evaluación
-
- Conclusiones y cualquier acción recomendada
-

■ ¡FRAKO está allí para ayudarle!

Siempre estamos más que dispuestos a visitar sus instalaciones y escuchar sus inquietudes y problemas sobre temas como la calidad de la energía, la confiabilidad de la instalación, las perturbaciones durante la operación, la eficiencia energética, la gestión de servicios públicos y la reducción de los costes de la energía. Trabajando junto con usted, nuestros técnicos e ingenieros seguramente desarrollarán soluciones para sus problemas.

Ofrecemos mediciones y análisis completos de los sistemas, o proporcionamos instrumentos de nuestro grupo de equipos prestados para este propósito. Cuando se nos devuelve el instrumento, nuestros especialistas preparan un análisis detallado por escrito de los resultados, que incluye sugerencias para mejorar su sistema.

Hay más información disponible en nuestro sitio web, donde también se pueden reservar instrumentos de análisis cuando sea necesario: www.frako.com/en/service/consulting/

Sección 12: Sistemas de filtros armónicos

■ 12.1: Sistemas de filtro pasivo

Filtros pasivos - también conocidos como circuitos resonantes en serie o filtros sintonizados - se sintonizan directamente para armónicos individuales. No se instalan principalmente para corregir la energía reactiva sino para extraer los armónicos. Como sólo se requiere poca energía reactiva capacitiva en las instalaciones industriales modernas, el desafío es filtrar tantos armónicos como sea posible al tiempo que se tiene la menor energía reactiva posible. Los filtros pasivos FRAKO tienen una clasificación de unos 300 A para solo 100 kVAr de energía reactiva y, por lo tanto, ofrecen una excelente relación coste-beneficio.

Este efecto de mitigación de armónicos extremos alberga un alto riesgo de sobrecarga del sistema si las condiciones de este último cambian. Para obtener una mitigación óptima de los armónicos al tiempo que se supera el riesgo de sobrecarga del sistema, los innovadores sistemas de filtro están equipados con un dispositivo automático para desintonizar las etapas de carga individuales. Esto permite fortalecer o debilitar el efecto de extracción, ajustándose así el sistema al grado óptimo de desintonización.

Un sistema de filtro pasivo con desintonización automática consta esencialmente de los siguientes componentes:

- Circuito de carga con varios **módulos de etapa de filtro** (condensadores de energía, inductores, aparamenta, protección contra sobrecorriente)
- Hasta 3 **etapas de desintonización** por etapa de filtro (condensadores de desintonización, aparamenta, protección contra sobrecorriente)
- Un **sistema de control** de nivel superior (instrumento de análisis del sistema con función de controlador)

El sistema de control de nivel superior analiza y guarda los datos sobre la calidad de la energía y la carga de las etapas del filtro. Sobre la base de los datos analizados, controla las etapas de filtro y desintonización, siendo las variables controladas habituales los niveles armónicos y la carga del sistema.



Fig. 47: Sistema de filtro pasivo con una clasificación de corriente de hasta 400 A

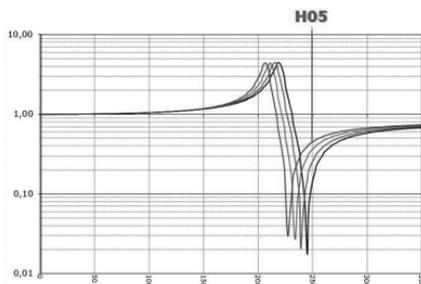


Fig. 48: Curva de impedancia para cuatro grados controlados de desintonización

Si la energía reactiva del sistema da como resultado factores de energía capacitiva indeseables, o si el sistema ya es capacitivo, se deben instalar sistemas de filtro activo; vea la Sección 12.2, **Sistemas de filtro activo**, en la [página 52](#).

■ 12.2: Sistemas de filtro activo

La ventaja crucial de un filtro activo es que mitiga los armónicos sin el indeseable efecto secundario de impactar en el factor de energía a 50 Hz. Además, la corrección de las perturbaciones de la red sigue siendo eficaz si se realizan ampliaciones posteriores de la instalación. El diseño modular del filtro activo FRAKO significa que la clasificación nominal requerida se puede seleccionar de manera bastante sencilla para satisfacer necesidades actualizadas, atendiendo a las extensiones de la instalación en cualquier momento añadiendo más módulos de filtro. ¡Esto significa que la inversión inicial en equipos no se desperdicia!

Principio de funcionamiento de los filtros armónicos activos

El filtro activo se instala en paralelo a los generadores armónicos. Analiza la corriente armónica producida por las cargas no lineales y suministra una corriente compensadora fuera de fase de 180° , ya sea en todo el espectro desde el armónico 2.º hasta el 50.º o dirigida especialmente a un armónico. Esta acción neutraliza completamente las corrientes armónicas afectadas en el punto de conexión, siempre que el sistema se haya dimensionado adecuadamente.

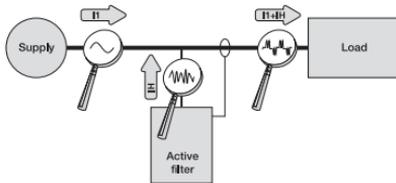


Fig. 49: Principio de funcionamiento del filtro activo I:
Corriente fundamental
IH: Corriente armónica

La combinación de filtro armónico y carga armónica aparece para la red como una carga lineal global que dibuja una corriente sinusoidal. La instalación es bastante sencilla. Es necesario disponer de un alimentador de 3 fases con o sin conductor neutro. El transformador de corriente se instala entonces en la línea sobre la carga no lineal.

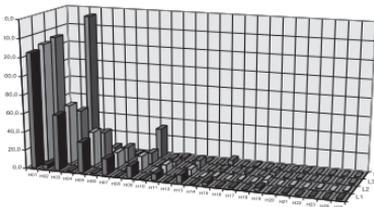


Fig. 50: Armónicos medidos sin filtro

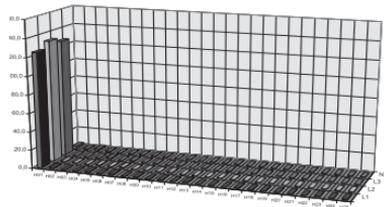


Fig. 51: Armónicos medidos con filtro

Tenemos aplicaciones comunes en:

- Sistemas de baja tensión con muchos convertidores que tienen la obligación de devolver sólo corrientes armónicas limitadas a la red precedente, donde, por ejemplo, las largas líneas de derivación hacia instalaciones remotas están involucradas con una baja energía de cortocircuito correspondiente.
- Accionamientos convertidores modernos que devuelven altos niveles de armónicos al sistema de distribución, pero con solo una baja demanda de energía reactiva.
- Redes de baja tensión con una alta proporción del 3.º armónico debido a la instalación de dispositivos monofásicos generadores de armónicos. Vea la descripción de los problemas en el conductor neutro en la [página 33](#).

Además de neutralizar armónicos, los filtros activos FRAKO poseen otras funciones, como la **corrección dinámica del factor de energía** y el **equilibrio de carga**.

Los sistemas especiales altamente dinámicos y controlados por tensión mitigan los armónicos hasta el 100.º orden por medio de la impedancia del sistema. Consulte el tema destacado **Filtros activos** (controlados por tensión) desde la [página 57](#) adelante.

Sección 13: Temas destacados

■ 13.1: Tema destacado: Filtros activos (controlados por corriente) 'Activos contra armónicos'

Hasta la fecha, a los consumidores de energía apenas se les ha ofrecido algún medio de minimizar los armónicos en sus sistemas de distribución a un coste razonable. El método habitual ha sido intentar eliminar o atenuar los armónicos en el dispositivo que los genera mediante la instalación de elementos pasivos en el circuito. Esto significa, empero, que se debe instalar un circuito aceptador sintonizado con inductancia y capacitancia para cada armónico a fin de reducir sus efectos indeseables. El problema ahora se puede resolver de manera más conveniente con la ayuda de un filtro armónico activo.



Filtro de armónicos activos en un sistema de carcasa modular

Todos los múltiplos integrales de una frecuencia fundamental se conocen como armónicos. Es práctica común etiquetar cada armónico individual con el número ordinal n . Cuando la frecuencia de la red es de 50 Hz, el 5.º armónico tiene así una frecuencia de 250 Hz. El análisis matemático ha revelado que cualquier forma de onda completa y repetitiva se compone de un conjunto de numerosas frecuencias puramente sinusoidales. Estos armónicos se generan cuando se opera con cargas en el circuito de consumo que no consumen corriente de forma sinusoidal. La forma de onda para la corriente dibujada por estas cargas determina el número y la amplitud de los armónicos. Cuanto mayor es la desviación del ideal sinusoidal, más armónicos devuelve el consumidor a la red de suministro y mayor es la amplitud de los armónicos individuales. La técnica matemática de análisis de Fourier se utiliza para dividir la forma de onda compleja en un conjunto de armónicos, a cada uno de los cuales se le asigna el valor n correspondiente y su amplitud.

Un método sencillo para determinar armónicos individuales es medir con un medidor de pinza que pueda filtrar y mostrar armónicos individuales de la señal de medición. Aunque solo se puede mostrar un armónico a la vez con este método, es relativamente rápido y sencillo obtener una visión general aproximada de las amplitudes de los armónicos individuales. Hay diversos síntomas que indican la presencia de armónicos en un sistema: Los PC se bloquean, se producen errores

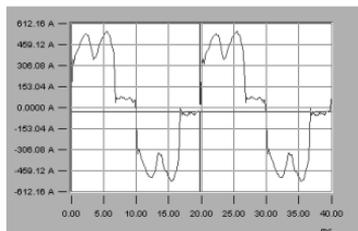
en el disco duro, los monitores parpadean, el conductor neutro se sobrecalienta, se producen daños en los sistemas PFC o se detecta corrosión en otras partes de la instalación.

■ Principio de funcionamiento de un filtro armónico

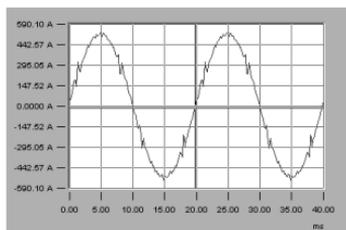
El concepto subyacente del filtro armónico es el uso de una función de corrección activa. Esto no se hace extrayendo corrientes, sino inyectando corrientes adicionales siempre que sea necesario. Un transformador de corriente mide primero la corriente que está consumiendo momentáneamente la carga. La unidad de control del filtro armónico analiza la amplitud y los armónicos de esta corriente. En consecuencia, alimenta al sistema de suministro una corriente cuya amplitud y número armónico individual es exactamente igual a la corriente extraída por la carga, pero desfasada de ella 180°. Así, las corrientes armónicas se cancelan entre ellas y la red de suministro sólo tiene que suministrar la frecuencia fundamental y no está contaminada con armónicos. Una gran ventaja del filtro activo en comparación con las técnicas convencionales es su flexibilidad para adaptar el poder correctivo. En función de los requisitos, el filtro puede suministrar más o menos corriente correctiva. Incluso si se produce una sobrecarga, el filtro no se apaga, sino que asume

un modo de limitación de corriente, es decir, el filtro suministra su corriente máxima y, al hacerlo, neutraliza una gran proporción de los armónicos. Por lo tanto, la interacción con otros componentes del sistema, como los sistemas PFC desintonizado o las unidades UPS, se reduce a un mínimo que no resulta crítico. No es ningún problema extender el sistema o instalar una combinación de varios filtros. Si cambian las condiciones de funcionamiento o de red, el filtro se adapta automáticamente a las nuevas condiciones dentro del ámbito de su clasificación nominal.

■ Importancia de la instalación eléctrica



Forma de onda de la corriente *sin* filtro armónico



Forma de onda de la corriente *con* filtro armónico

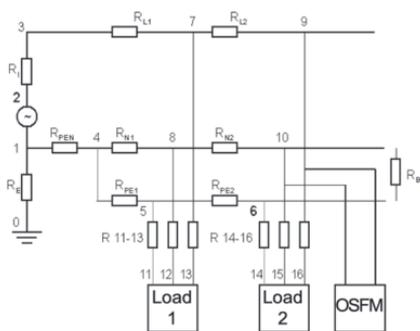
La instalación correcta del sistema eléctrico es de fundamental importancia para el funcionamiento satisfactorio de una unidad de mitigación de armónicos. Tanto el tipo de sistema como la forma en que se ha instalado no solo pueden restar efectividad al filtro armónico, sino que también pueden alentar o incluso causar perturbaciones en la fuente de alimentación eléctrica. Toda instalación eléctrica depende fundamentalmente de su puesta a tierra. Un sistema de puesta a tierra eficaz y aplicado de manera consistente es la base de toda instalación de fuente de alimentación. Si hay un 'gremlin' en el sistema de puesta a tierra, se presentan las condiciones ideales para que haya tensiones parasitarias, perturbaciones electromagnéticas y, por supuesto, para que los armónicos se propaguen sin obstáculos. La función principal del sistema de puesta a tierra es garantizar que, si se produce una falla, no puedan surgir voltajes peligrosos donde el contacto pueda causar lesiones o la muerte, y que la corriente pueda fluir a tierra sin obstáculos. Esta es la única forma de garantizar que un dispositivo de protección contra sobrecorrientes en la corriente de alimentación pueda responder y cortar el circuito dentro del límite de tiempo prescrito. Además, el sistema de puesta a tierra está ahí para mantener los diversos elementos de los aparatos eléctricos en un potencial uniforme que sea lo más bajo posible y para corregir cualquier diferencia en el potencial que pueda surgir de otro modo.

■ Separación estricta de N y PE

Si no se logra esta separación, por ejemplo, porque hay corrientes de carga fluyendo en el conductor de PE, se forman entonces campos electromagnéticos alrededor de los conductores de puesta a tierra y eualización de potencial, lo que puede tener efectos negativos considerables. Dado que estos campos también podrían formarse en el blindaje de los cables de datos, la interferencia producida podría provocar la pérdida de datos. La conexión del conductor de PE a otros sistemas conductores, como instalaciones de agua, gas o calefacción central, provoca corrientes de carga adicionales en estas partes del sistema. Las consecuencias son tensiones parásitas y corrosión.

Por esta razón, es un requisito importante para los sistemas modernos de suministro de energía que se preste atención lo antes posible para garantizar que haya una separación clara entre los conductores N y PE, y que siempre permanezcan aislados entre sí una vez que se haya comenzado el trabajo en su instalación.

En un caso específico, los teléfonos se vieron afectados y las pantallas de los monitores parpadearon debido a los efectos de los armónicos. La medición de estos armónicos reveló una fuerte proporción del tercer armónico, que ascendía hasta el 35% de la corriente nominal; no sólo en el conductor N, sino también en el conductor PE.



Esquema de un sistema monofásico simulado

Antes de que se puedan tomar medidas para contrarrestar los armónicos en tales casos, el cableado debe optimizarse para cumplir con los criterios anteriores. Lamentablemente, las normas vigentes en Alemania en 2001 no prescribieron categóricamente la separación de N y PE. Solo hay recomendaciones derivadas principalmente de la industria de TI y telecomunicaciones, y de VdS (una subsidiaria de GDV, la Asociación Alemana de Seguros) para que los cables de suministro utilicen consistentemente el sistema de 5 hilos. Las corrientes de filtro no pueden, por supuesto, evitarse en el conductor de PE, pero se pueden tolerar siempre que no haya corrientes de carga o armónicos también presentes. Las directivas actuales de EMC significan que los diseñadores de instalaciones eléctricas y dispositivos tienen que lidiar con una compensación técnica. Por un lado,

los instrumentos e instalaciones deben alimentar la menor interferencia posible en la red; por otro lado, ellos mismos deben funcionar sin interferencias y cualquier corriente de interferencia generada debe dispersarse. Esto se consigue principalmente mediante la fuga a través de condensadores de filtro directamente al conductor de tierra. Con sistemas conectados permanentemente, esta fuga también puede ser al conductor neutro. Sin embargo, esto no es posible con dispositivos que estén equipados con enchufes alemanes con conexión a tierra, ya que se pueden girar a través de 180° y, por lo tanto, su polaridad no está definida.

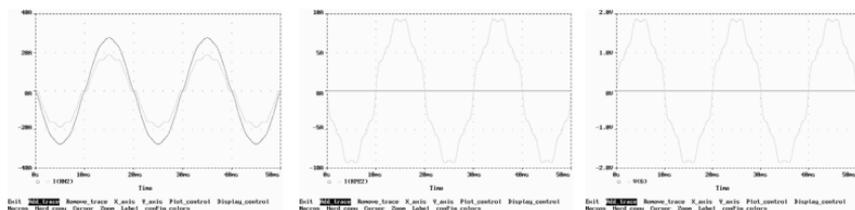
■ Un ejemplo típico

Un PC convencional con un adaptador de CA de 250 W tiene una corriente de fuga de aproximadamente 1 mA. Ésta se encuentra formada por un componente fundamental de 50 Hz y varios armónicos. Las corrientes de fuga 'contaminan' el conductor de PE que, en general, no es crítico para la fiabilidad de un sistema. Con 100 PC, esto da lugar a una corriente de fuga de aproximadamente 0,1 A. Suponiendo que la resistencia del conductor de PE es de aproximadamente 1Ω , la caída de tensión resultante es de 0,1 V. Todo el sistema de puesta a tierra suele tener una baja resistencia. (Un conductor con un área de sección transversal de 10 mm^2 tiene una resistencia de $0,0012 \Omega$ por metro). Por el contrario, sin embargo, en un sistema que tiene una corriente de carga nominal de 100 A, el tercer armónico puede dar como resultado fácilmente una corriente armónica de 40 A, dando lugar así a una caída de tensión de no menos de 40 V.

Esta es una aplicación clásica para un filtro armónico activo. Al compensar las cargas que generan corrientes armónicas pesadas, el filtro elimina los armónicos del sistema de distribución y protege a otros consumidores de los efectos de los armónicos. Sin embargo, esto solo puede funcionar si hay una separación estricta de los conductores N y PE. En la práctica, se ha demostrado que el uso de filtros activos permite reducir los armónicos de más del 30% a alrededor del 5%. Esto se logró con cargas que tenían curvas de entrada de corriente altamente distorsionadas y, además, sujetas a picos de corriente.

La simulación de diferentes condiciones en los sistemas de distribución puede ofrecer una imagen clara del efecto que tienen sobre el contenido de armónicos. En aras de la sencillez, basta ilustrar esto con una red monofásica con conductores N y PE. Hay dos cargas conectadas al sistema, la primera de las cuales devuelve armónicos al sistema de suministro de energía, mientras que la segunda carga no genera armónicos o bien éstos los neutraliza un filtro armónico. En el caso ideal, la única corriente que fluye en el conductor de PE consta de las corrientes del filtro de carga causadas, por ejemplo, por unidades de fuente de alimentación de modo conmutado o filtros de entrada de red.

Los armónicos, por supuesto, también se descargan al conductor de PE a través de estos filtros. Para llevar a cabo la simulación en condiciones lo más realistas posibles, se adoptaron la amplitud y el número armónico de cada componente a partir de un análisis del sistema.



Corriente en R_{N2} con y sin resistencia puente R_B

Corriente en R_{PE2} con y sin resistencia puente R_B

Potencial en el conductor de PE a la carga 2 en relación con la tierra

El perfil de la curva de corriente es una aproximación a las condiciones que realmente ocurren en un sistema de suministro de energía bajo carga. La corriente de fuga del filtro es del orden de miliamperios, a pesar de la presencia de armónicos, y por lo tanto solo tiene un ligero impacto negativo en el funcionamiento del conductor PE. Si la separación estricta de N y PE se elimina ahora, por ejemplo, instalando un puente entre las barras colectoras N y PE en una placa de subdistribución, entonces las corrientes de carga fluyen en el conductor PE. Dado que los conductores N y PE están efectivamente dispuestos en paralelo, las corrientes se distribuyen entre los dos en proporción inversa a sus resistencias relativas.

Esta conexión entre los conductores N y PE significa que, en el blindaje de cables, los conductos y las tuberías para agua, calefacción central y gas se desarrollan voltajes y, en consecuencia, campos electromagnéticos. Todos los componentes metálicos del edificio pueden convertirse así en fuentes de interferencia. El conductor de tierra ahora está cargado con corrientes de carga y su potencial en relación con la tierra se ve elevado. Dependiendo de las magnitudes de la corriente y la resistencia, pueden ocurrir tensiones de hasta el orden de 100 V. Cuando las corrientes armónicas también fluyen en el conductor de tierra, el amperaje puede elevarse a niveles considerablemente más altos que la corriente nominal real de la carga. Además de causar un mal funcionamiento del sistema, esto también puede dar como resultado un aumento de temperatura inadmisibles en los conductores PE / N. En el peor de los casos, esto puede incluso causar un incendio. La tensión en el conductor de PE aumenta naturalmente en proporción a la corriente, desarrollando así un alto potencial en relación con la tierra. Como el conductor de PE ya no tiene el potencial de tierra, no puede cumplir con la tarea para la que se proporcionó en primer lugar.

■ Resumen

Una medida eficaz para reducir los armónicos y sus efectos indeseables en el sistema de distribución de energía es instalar filtros armónicos activos. Sin embargo, es igualmente importante tener un sistema eléctrico que se haya instalado correctamente y sea lo más transparente posible. Por lo tanto, en la práctica, es imperativo medir las corrientes en el conductor de tierra. Esto significa que se pueden detectar inmediatamente las corrientes inadmisibles. Sin embargo, hay mucho más esfuerzo involucrado en la localización de las conexiones superfluas entre los conductores N y PE. Esto requiere un conocimiento exacto de los diseños de los cables y la construcción del edificio. Solamente siguiendo de modo sistemático las directrices mencionadas anteriormente es posible 'limpiar' el sistema de distribución de energía y mejorar la calidad de la tensión de alimentación.

■ 13.2: Tema destacado: Filtros activos (controlados por tensión) 'También para la energía del generador de reserva'

Hoy en día, casi todos los consumidores conectados a la red de suministro eléctrico constituyen cargas no lineales. Su consumo de corriente no sinusoidal distorsiona la tensión de la red de suministro y, por lo tanto, genera armónicos. Esto da como resultado una sobrecarga de los dispositivos e instalaciones conectados, lo que puede interrumpir la infraestructura de una empresa incluso hasta el punto de poner en peligro la confiabilidad operativa. Los sistemas de filtro pasivo o activo proporcionan un remedio para esta situación.



*Filtro activo de alta velocidad
en un sistema de carcasa*

Se presentan dificultades con los sistemas de infraestructura vitales en los que siempre se debe garantizar la estabilidad de la red, no sólo cuando funciona con la fuente de alimentación normal, sino también cuando se alimenta de generadores de reserva. Estas instalaciones de infraestructura crítica tienen una gran relevancia social y merecen salvaguardias especiales. Como ejemplos tenemos sistemas de TI y telecomunicaciones, redes de distribución eléctrica y suministro de agua, servicios médicos y de emergencia, y sistemas financieros, por nombrar solo algunos.

Un organismo de radiodifusión de servicio público instaló nuevos transmisores al pasar del DVB-T al estándar DVB-T2 HD, que prometía proporcionar más programas con una calidad de imagen mucho mejor. Dado que la radiodifusión de servicio público también se considera una infraestructura vital, el equipo de transmisión debe poder emitir en todo momento sin interrupción. Además de funcionar desde la fuente de alimentación normal, el sistema también debe funcionar correctamente cuando un generador de emergencia está proporcionando la energía. FRAKO se encargó del análisis de las mediciones de calidad de energía realizadas durante la operación tanto con la energía de la utilidad externa como con el generador de reserva, a fin de identificar cualquier problema de armónicos o rangos resonantes.

Resultados: El nuevo sistema transmisor con una energía nominal total de 150 kW no es un consumidor particularmente potente. Su factor de energía (cos phi, inductivo) es mayor que 0,95 y, por lo tanto, no se necesita corrección del factor de energía. Todos los voltajes armónicos hasta el 50.^o, y su suma vectorial THDv, estaban dentro de los límites establecidos por la Clase 2 de la norma EN 61000-2-4 cuando la instalación funcionaba con energía eléctrica externa. Sin embargo, cuando funcionaba con energía del generador de reserva, se identificaron altos niveles armónicos por arriba de 25, es decir, muy por encima de 1 kHz. Estos fueron el resultado de puntos de resonancia alrededor del armónico 29.^o; las mediciones revelaron un aumento abrupto en los armónicos de orden superior.

■ Problemas con los armónicos cuando se utiliza un generador de reserva

Los puntos de resonancia están causados por las capacitancias en los sistemas transmisores que no están desintonizados. Dan lugar a una resonancia del sistema a unos 1450 Hz y, por lo tanto, deben mitigarse con un filtro. Sin embargo, la frecuencia de resonancia varía mucho, en función de la energía de cortocircuito de la instalación completa. Cuando se acciona con energía de la empresa de servicios públicos externa, su energía de cortocircuito es alta dado que la frecuencia de resonancia es superior a 3 kHz, pero cuando se alimenta con un generador de reserva, la energía de cortocircuito es mucho menor y la frecuencia de resonancia cae a solo 1,5 kHz.

Cuando se seleccionó el sistema de filtro, el objetivo principal era obtener un funcionamiento sin interrupciones cuando se ejecutaba ya fuera con energía externa o con el generador de reserva. Además, los armónicos, que por regla general son audibles, ¡no debían ser emitidos por el sistema transmisor!

■ Solo los filtros activos controlados por tensión son adecuados

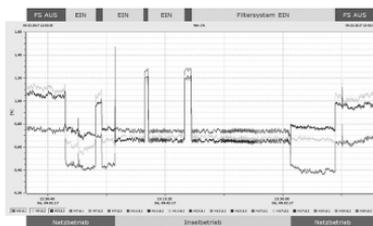
Los sistemas de filtros pasivos actúan inductivamente a frecuencias por encima de su frecuencia de sintonización, mostrando una baja impedancia a los armónicos y, por lo tanto, extrayéndolos efectivamente de forma selectiva. Su desventaja es que sólo están diseñados para un cierto rango de frecuencias, y crean una energía reactiva fundamental adicional, que en este caso habría dado lugar a un factor de energía capacitiva. Ésta, sin embargo, no era la única razón por la que no eran adecuados para la aplicación: el espectro de armónicos cuando se opera con energía del generador también es muy diferente.

Los sistemas de filtro activo proporcionan una corriente compensadora en oposición de fase para neutralizar los armónicos. Pueden adaptarse automáticamente a las frecuencias que se van a neutralizar. Se hace una distinción entre filtros activos controlados por corriente y filtros activos controlados por tensión. Los primeros miden la corriente de carga y utilizan el análisis de Fourier para calcular la corriente de compensación requerida en la oposición de fases. Pueden neutralizar varios órdenes de armónicos simultáneamente a la vez que corrigen dinámicamente la energía reactiva. Los filtros controlados por tensión pueden ser regulados mediante impedancia, es decir, no solo neutralizan los armónicos, sino que también suprimen activamente la resonancia. Como no se necesitan transformadores de corriente, estos sistemas funcionan significativamente más rápido que los filtros controlados por corriente. En el caso de la aplicación del transmisor, un filtro activo controlado por tensión fue la solución óptima. Si se hubiera utilizado un filtro activo controlado por corriente, podría haber habido inestabilidad entre la función reguladora de corriente del filtro y el control del generador de reserva cuando éste estaba funcionando.

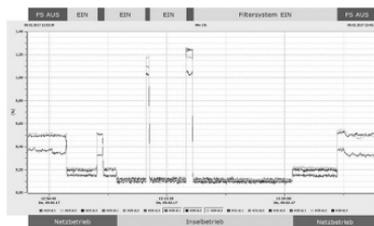
■ La solución: un filtro activo de alta velocidad

FRAKO suministró a la emisora un filtro activo controlado por tensión. Este dispositivo de 3 hilos con una energía nominal de 70 kVA puede mitigar armónicos hasta el 100.°, es decir, hasta 5 kHz, ya sea neutralizando todo el espectro o sólo frecuencias seleccionadas. Además, la resonancia se amortigua ampliamente. Un tiempo de respuesta inferior a 20 µs hace que el filtro sea especialmente adecuado para cambios de carga rápidos y sustanciales. Este sistema de filtro activo no requiere transformadores de corriente, lo que en este caso simplificó la instalación eléctrica.

La unidad de filtros controlada por tensión cumple con los requisitos especificados cuando el sistema funciona con energía externa o con el generador de reserva, lo que ahora reduce considerablemente el impacto en la red de suministro de energía. Los niveles de todos los armónicos superiores antes críticos se han reducido significativamente. Esto es particularmente evidente en la energía en espera, ya que se puede escuchar mucho menos ruido del generador. Además, en ambos modos de funcionamiento, los armónicos típicos 5.º y 7.º del convertidor de energía se han reducido a niveles acrílicos inferiores al 1%.



5.º armónico de tensión [250 Hz]



29.º armónico de tensión [1450 Hz]

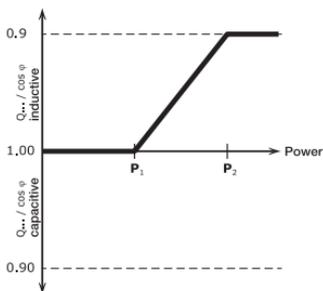
■ 13.3: Tema destacado: Corrección del factor de energía inductiva para parques solares 'Un caso especial'

En las últimas décadas, el impulso para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía ha dado como resultado que los parques solares, también conocidos como plantas de energía fotovoltaica o simplemente sistemas fotovoltaicos, se instalen como una fuente confiable de energía eléctrica. En el caso de los sistemas más grandes, la maximización de su eficiencia general es un aspecto importante para garantizar que la energía generada siga siendo no solo confiable sino también asequible. Además de las medidas habituales tomadas para mejorar el rendimiento de los propios módulos solares, existe un mayor potencial en la optimización de la energía que producen.

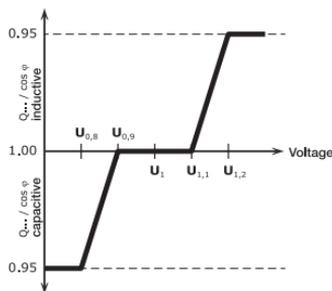
En Alemania, la mayoría de los parques solares suelen generar entre 1 MW y 20 MW y, por lo tanto, se rigen por los reglamentos técnicos de la Asociación Federal de las Industrias Alemanas de Energía y Agua (BDEW): 'Directriz para la conexión y el funcionamiento en paralelo de las instalaciones de generación en la red de media tensión'. Desde 2008, esta directriz ha establecido los puntos clave que deben tenerse en cuenta cuando un sistema de generación de energía se conecta a la red de media tensión de un operador de distribución de energía.

Estos requisitos incluyen un factor de energía compatible con la red en el punto de alimentación. Esto significa que al suministrar energía activa, la planta de generación debe ser capaz, en todas las condiciones de carga, de operar con una energía reactiva correspondiente a un factor de energía de $\cos \varphi$ entre 0,95 de retraso y 0,95 de adelanto en el punto de entrada de la red. La operación sobreexcitada (capacitiva) aumentaría la tensión, mientras que la operación subexcitada (inductiva) la reduciría → los sistemas de generación, por tanto, deben ayudar a mantener un tensión de red constante.

Las diversas configuraciones de red y condiciones de carga dan lugar a diversas necesidades, por lo que los operadores de distribución de energía estipulan requisitos individuales para la sección de red en cuestión. Éstos pueden variar mucho de un operador a otro, y se expresan en forma de una curva característica donde el factor de energía se indica ya sea en función de la energía activa (la característica $\cos \varphi (P)$) o directamente como una función de la tensión (la característica $Q (V)$). La directriz BDEW exige que el factor de energía se regule al valor objetivo así estipulado en un plazo de 10 segundos.



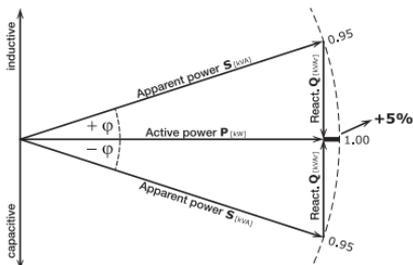
Característica típica de $\cos \varphi (P)$



Característica típica de $Q (V)$

■ **Potencial de optimización 1:** Los inversores modernos son "capaces de energía reactiva" y pueden convertir la energía capturada por los módulos solares y alimentarla a la red de servicios públicos de acuerdo con las curvas características. Sin embargo, esto tiene una gran desventaja: los inversores entregan energía aparente, es decir, ¡la suma pitagórica de la energía activa y reactiva! Cuanto peor sea el factor de energía requerido especificado, menor será la energía activa generadora de ingresos que un inversor puede suministrar, sin importar si se trata de la región inductiva o capacitiva.

Ejemplo: Si se estipula un factor de energía de 0,95, los inversores deben suministrar una cantidad de energía reactiva equivalente al 33% de la energía activa. Sin embargo, si esta energía reactiva requerida la suministra un sistema de corrección de factor de energía adecuado, permitiendo que los inversores funcionen a un factor de energía de 1, ¡esto produce un 5% más de energía activa facturable para la misma energía aparente del inversor!



Triángulo de energía, la relación entre la energía activa, la reactiva y la aparente

Para hacer posible que los sistemas fotovoltaicos más grandes se alimenten hacia las redes de media tensión existentes, algunos operadores actuales incluso están especificando factores de energía que pueden llegar a 0,90. En este caso, la cantidad de energía reactiva requerida es equivalente al 48% de la energía activa. ¡El suministro de esta energía reactiva desde el sistema PFC puede aumentar la energía activa facturable exportada en un 11%!

Por lo tanto, es una propuesta valiosa el proporcionar la energía reactiva por separado, ¡para que los inversores puedan entregar la máxima energía activa posible!

■ **Potencial de optimización 2:** Cuando los inversores modernos operan en condiciones sin carga (particularmente por la noche o si los paneles solares se ven privados de luz solar por las nubes, la niebla, la nieve, etc.), la energía reactiva total sin carga de todos los inversores le impone una carga capacitiva pesada a la red. Para suprimir este efecto, los inversores a menudo se apagan durante dichos períodos, pero esto reduce considerablemente su vida útil. En este caso también, un sistema de corrección del factor de energía por separado ofrece un potencial significativo para la optimización del sistema.

■ **Potencial de optimización 3:** La longitud del cableado entre un parque solar y el punto de entrada de la red de media tensión puede ascender fácilmente a varios kilómetros. Como los conductores se colocan muy cerca unos de otros, los cables subterráneos largos tienen un efecto capacitivo, mientras que las líneas aéreas tienen un efecto inductivo. Por lo tanto, un kilómetro de cableado subterráneo puede dar lugar a varios kVAR de energía reactiva capacitiva, que, dado que se desarrolla en el camino hacia el parque solar y, por lo tanto, no puede ser ni detectada ni medida por el sistema de control del inversor, debe corregirse por separado.

■ **El problema:** Las especificaciones del operador de la red se refieren al punto de entrada del sistema fotovoltaico a la red de media tensión, que con frecuencia se encuentra a varios kilómetros del propio parque solar. Esto significa que estas especificaciones y la directriz BDEW deben cumplirse no directamente en el parque solar, ¡sino en la conexión de alimentación!

■ **La solución:** Hace algún tiempo, FRAKO llevó a cabo un estudio en profundidad de un parque solar de tamaño medio, aplicando los tres enfoques de optimización descritos anteriormente. A continuación, se diseñó, instaló y puso en marcha un sistema de corrección del factor de energía adecuado.

Datos clave del parque solar:

- Energía nominal del sistema:3.122 kWp
- Producción anual: 2.849.400 kWh
- Área de la superficie: 4,7 ha
- Ahorro anual de CO₂: 1.710 t
- Distancia del parque desde el punto de alimentación: 5 km

Especificaciones del operador de red:

- El factor de energía objetivo debe ser 0,95 inductivo durante el funcionamiento de alimentación de la red.
- El factor de energía nunca debe ser capacitivo cuando se toma energía de la red.
- El factor de energía debe ajustarse al valor objetivo en un plazo de 10 segundos según la directriz BDEW.

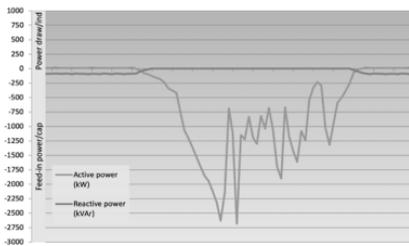
Estas especificaciones conducen al requisito de que se realice la corrección adecuada del factor de energía: durante el día para la energía reactiva dinámica necesaria de todo el parque solar más la capacitancia del cableado, y por la noche para la energía reactiva sin carga de los inversores más la capacitancia del cableado.

Energía reactiva determinada:

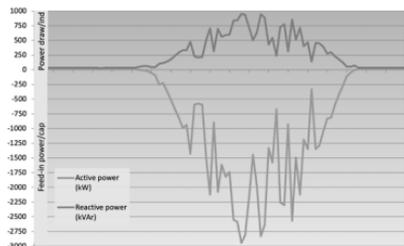
- La energía reactiva necesaria para corregir $\cos \varphi$ en los inversores a 1,00 equivale a un total de 950 kVAr inductivos (equivalente a aproximadamente 1/3 de la energía activa).
- Total de energía reactiva sin carga de los 141 inversores: Capacitiva de 98 kVAr.
- Energía reactiva del cableado bajo carga parcial y sin condiciones de carga: 45 - Capacitiva de 90 kVAr.

Como las tres circunstancias anteriores requerían que se proporcionara energía reactiva inductiva, se instaló un sistema de corrección de factor de energía con un total de 990 kVAr de energía reactiva inductiva, distribuido en siete gabinetes con bahías. El sistema se diseñó con etapas de diferentes tamaños, que comprenden inductores de baja pérdida, aparamenta y protección de sobrecorriente en grupo. Era esencial medir y evaluar los diversos requisitos de energía reactiva. Esto se hizo vinculando las mediciones en el punto de alimentación remoto con las tomadas directamente en el parque solar y transmitiendo sus lecturas a un relé reactivo de control de energía inteligente, que cambiaba las etapas del sistema de corrección del factor de energía dentro o fuera en los 10 segundos estipulados, asegurando así el cumplimiento continuo de las especificaciones.

- **El resultado:** Gracias al rendimiento adicional de la energía activa facturable logrado por el sistema de corrección de factor de energía, la inversión se pagó a sí misma por completo en 22 meses, y ahora continúa aumentando los ingresos del parque solar en un 5%.



Energía reactiva y activa **sin** PFC



Energía reactiva y activa **con** PFC



FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH
Tscheulinstrasse 21a
79331 Teningen
Telefon: +49 7641 453-0
Fax: +49 7641 453-535
info@frako.com
www.frako.com