

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



USO DE FILTROS DE ARMÓNICAS EN LAS INDUSTRIAS

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JORGE ANGEL NINAHUANCA TORRES

**PROMOCIÓN
2002 - I**

**LIMA – PERÚ
2009**

USO DE FILTROS DE ARMÓNICAS EN LAS INDUSTRIAS

A mis padres y hermanos que me apoyaron durante mis estudios y a mi esposa que me apoyó en lograr culminar este informe.

SUMARIO

En la actualidad numerosas instalaciones industriales tienen implementados controles automáticos en sus procesos. Por citar un par de casos tenemos el uso de variadores de velocidad y el requerimiento de tensiones estabilizadas (UPS) para la alimentación de los controladores lógicos programables. La utilización de estos equipos trae consigo perturbaciones y defectos en la red eléctrica de sus instalaciones que pueden propagarse por la red de distribución de energía y por consiguiente extenderse también a otros usuarios.

Una de las razones por las que los propietarios no invierten en modernizar sus plantas para la reducción de estas armónicas es porque la legislación peruana no establece límites ni sanciones a los usuarios que generan corrientes armónicas. Sólo cuando las instalaciones sufren las consecuencias de este fenómeno como fallas momentáneas o incluso paradas de planta los propietarios buscan soluciones concretas.

El presente trabajo busca tomar conciencia sobre el uso de componentes que mejoren la calidad de la energía en las instalaciones industriales.

INDICE

PROLOGO	1
CAPITULO I	2
FUNDAMENTOS TEORICOS	2
1.1 Armónicas	2
1.2 Cargas no lineales	2
1.2.1 Electrónica de Potencia	2
1.2.2 Aparatos ferromagnéticos	2
1.2.3 Aparatos de arco	2
1.3 Efectos de las armónicas en las industrias	2
1.4 Efectos de las armónicas en sistemas con CFP	2
1.4.1 Sobrecarga de condensadores	4
1.4.2 Resonancia Serie	4
1.4.3 Presencia de resonancia serie en sistemas de potencia	4
1.4.4 Resonancia Paralelo	5
1.4.5 Presencia de resonancia paralelo en sistemas de potencia	6
1.4.6 Amplificación de armónicas con CFP sin filtros desintonizados	7
1.4.7 Análisis de riesgo de amplificación de corrientes	7
1.4.8 Generación de tensiones armónicas	8
1.5 Solución para reducir el efecto de las armónicas en sistemas con CFP	9
1.5.1 Filtros desintonizados	9
1.5.2 Comportamiento de un circuito de filtro resonante serie	10
1.5.3 El factor de desintonía	11
1.5.4 Absorción armónica	11
1.5.5 Selección del factor de desintonía para el uso de filtros desintonizados	12
1.5.6 Armónicas dominantes	12
1.5.7 Cálculo del aumento de la tensión por la reactancia en serie	13
1.5.8 Calculo de la inductancia de la reactancia	13
CAPITULO II	14
NORMATIVIDAD	14
2.1 Estándar IEEE 519 – 1992	14

CAPITULO III	17
FILTROS Y REACTANCIAS	17
3.1 Calidad de la energía	17
3.2 Reactancias	18
3.2.1 Reactancias para CFP desintonizada	18
3.2.2 Reactancias de red	19
3.2.3 Reactancias de salida	20
3.2.4 Reactancias de absorción	20
3.3 Filtros	21
3.3.1 Filtros antiparásitos	21
3.3.2 Filtros du/dt	22
3.3.3 Filtros sinusoidales	23
CAPITULO IV	24
DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACION DE ENERGIA REACTIVA CON FILTROS DESINTONIZADOS	24
4.1 Planteamiento de ingeniería del problema	24
4.2 Solución con bancos de condensadores sin reactancia en serie	24
4.3 Solución con bancos de condensadores con reactancia en serie	28
4.4 Comparación económica	32
4.5 Criterios para la construcción de filtros desintonizados	32
CONCLUSIONES	34
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS	35
ANEXO B: CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE REACTANCIAS Y FILTROS	37
ANEXO C: HOJAS DE DATOS TÉCNICOS PARA SELECCIONAR REACTANCIAS Y FILTROS	43
BIBLIOGRAFÍA	49

PROLOGO

Este trabajo tiene por finalidad mostrar las diferentes soluciones tecnológicas con las que actualmente se pueden utilizar para contrarrestar los problemas generados por las armónicas en las instalaciones industriales.

El informe empieza con un repaso teórico de los conceptos y definiciones relacionados con las armónicas. Luego se da una revisión a la normativa referente a las responsabilidades de los usuarios respecto a la inyección de corrientes armónicas en las redes eléctricas. También se presentan los diversos equipos tecnológicos que brindan soluciones para la reducción de armónicas. Finalmente se presenta el estudio y selección de equipos para el desarrollo de un sistema de compensación reactiva en una red con elevados índices de armónicas.

El capítulo I servirá para tener un mejor entendimiento de los efectos provocados por las armónicas originadas por cargas no lineales presentes en instalaciones industriales automatizadas y los riesgos que implican instalar un banco de condensadores sin tomar en cuenta las precauciones ante este fenómeno. Finalmente se analizará la solución a este problema.

El capítulo II se refiere a las recomendaciones y requerimientos hechas por el IEEE con su estándar 519 publicada en 1992. El análisis se centrará en los límites de corrientes armónicas que los usuarios pueden inyectar a una red eléctrica menor a 69KV.

En el capítulo III se mostrará soluciones para la reducción de armónicas generadas por el uso de VFD y en soluciones para poder compensar energía reactiva en presencia de armónicas utilizando diferentes equipos con los que en la actualidad se cuentan para mejorar la calidad de la energía eléctrica en una instalación industrial.

El capítulo IV tratará la selección de equipos para compensar energía reactiva en una instalación eléctrica en presencia de armónicas. Se comparará los efectos de instalar bancos de condensadores con y sin reactancias en serie así como la evaluación económica que estas soluciones. Finalmente se indicará criterios a tomar en cuenta cuando se construya gabinetes con filtros desintonizados.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

Este capítulo tiene por finalidad dar un repaso a los términos técnicos y conceptos esenciales que se utilizarán en los siguientes capítulos y que están relacionados principalmente con los efectos, causas, consecuencias y soluciones de las armónicas en instalaciones eléctricas industriales.

1.1 Armónicas

En los sistemas eléctricos se denominan armónicas a las ondas de tensión o de corriente cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la red (60Hz) que dan lugar a una señal distorsionada (onda no sinusoidal) [1]

1.2 Cargas no lineales

Son aquellas cargas que presentan una característica de tensión y corriente no lineal. Estas cargas al ser conectadas a un suministro sinusoidal provocan corrientes no sinusoidales [2]. Se pueden clasificar en tres categorías:

1.2.1 Electrónica de Potencia

Es la más importante fuente de armónicas en el sistema. Entre sus aplicaciones tenemos a los rectificadores, variadores de velocidad, inversores y sistemas UPS.

1.2.2 Aparatos ferromagnéticos

Los transformadores generan armónicas como resultado de características magnetizantes no lineales.

1.2.3 Aparatos de arco

Los aparatos de arco generan armónicas debido a las características no lineales del arco en si mismo.

1.3 Efectos de las armónicas en las industrias

En la tabla 1.1 se muestran los efectos de las armónicas en las instalaciones eléctricas.

1.4 Efectos de las armónicas en sistemas con CFP

En una red eléctrica, uno de los elementos más sensibles a las armónicas son los condensadores ya que aparte de disminuir su tiempo de vida útil puede también llegar a amplificar las armónicas existentes debido a que su impedancia se va disminuyendo ante el aumento de la frecuencia. Para entender mejor estos efectos se estudiará los circuitos con resonancia en serie y en paralelo.

Tabla N°1.1 Efectos, causas y consecuencias debido a la presencia de armónicas. [3]

Efectos de las armónicas	Causas	Consecuencias
en los conductores.	<p>Las corrientes armónicas provocan el aumento de la I_{RMS}.</p> <p>El efecto "skin" reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia.</p>	<p>Disparos intempestivos de las protecciones.</p> <p>Sobrecalentamiento de los conductores.</p>
en el conductor neutro.	Cuando existe una carga trifásica más neutro equilibrada que genera armónicas impares múltiplos de 3.	Cierre de las armónicas homopolares sobre el neutro que provoca calentamientos y sobrecorrientes.
en los transformadores.	<p>Aumento de la I_{RMS}.</p> <p>Las pérdidas por Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia.</p>	<p>Aumento de los calentamientos por efecto Joule en los devanados.</p> <p>Aumento de las pérdidas en el hierro.</p>
en los motores.	Análogas a las de los transformadores y generación de un campo adicional al principal.	Análogas a las de los transformadores más pérdidas de rendimiento.
en los condensadores.	Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia.	Envejecimiento prematuro, sobrecarga de los condensadores, amplificación de las armónicas existentes.

1.4.1 Sobrecarga de condensadores

La corriente a través de los condensadores se calcula de la siguiente forma:

$$I_c = \frac{U}{X_c} \quad (1.1)$$

$$I_c = U \times 2 \times \pi \times f \times C \quad (1.2)$$

La impedancia capacitiva disminuye con el aumento de la frecuencia y esto ocasiona un aumento de la corriente que pasa por los condensadores (sobrecarga) [2]

1.4.2 Resonancia Serie

La combinación de una impedancia inductiva y una capacitiva como en se muestra en la figura 1.1 forma un circuito en serie.

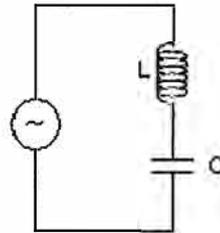


Figura 1.1. Circuito con reactancia y condensador en serie

A la llamada frecuencia de resonancia, la impedancia equivalente se reduce a un valor mínimo y de naturaleza resistiva. El circuito ofrece una impedancia muy baja lo cual causa un aumento de la corriente.

La frecuencia de resonancia se determina por:

$$f_s = \frac{1}{2 \times \pi \sqrt{L \times C}} \quad (1.3)$$

El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la figura 1.2. [2]

1.4.3 Presencia de resonancia serie en sistemas de potencia

En sistemas de potencia es frecuente que las armónicas están presentes en el lado de alta tensión del transformador. El transformador junto con los condensadores ubicados en el lado secundario actúan como un circuito resonante serie para el lado primario del transformador. Si una frecuencia armónica existente coincide con la frecuencia de

resonancia de la combinación L y C pueden sobrecargarse estos equipos. Como resultado de esta resonancia se distorsiona la tensión del lado secundario del sistema. [2]

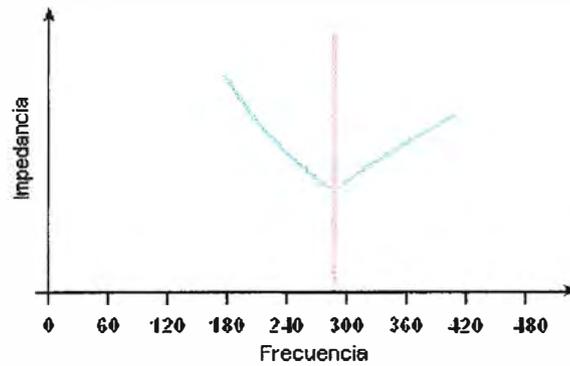


Figura 1.2. Comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia en un circuito serie

1.4.4 Resonancia Paralelo

La combinación de una impedancia inductiva y una capacitiva como la que se muestra en la figura 1.3 forma un circuito en paralelo.

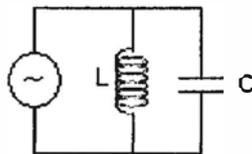


Figura 1.3. Circuito con reactancia y condensador en paralelo

El comportamiento de la impedancia de este circuito se ilustra en la figura 1.4.

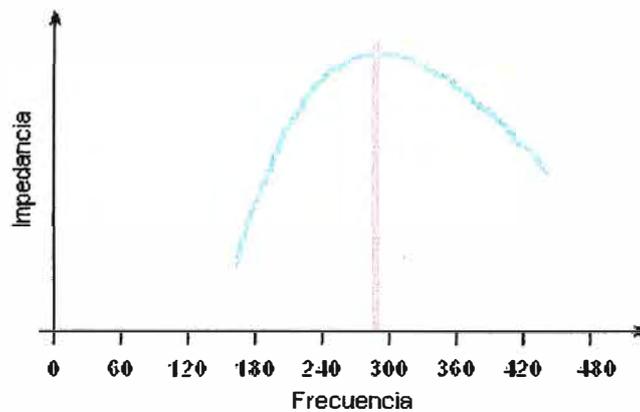


Figura 1.4. Comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia en un circuito paralelo. [2]

A la frecuencia de resonancia la impedancia equivalente del circuito aumenta a valores muy altos causando tensiones y corrientes muy altas.

1.4.5 Presencia de resonancia paralelo en sistemas de potencia

La instalación eléctrica de la figura 1.5 se puede simplificar según lo mostrado en la figura 1.6, teniendo en cuenta que todos los elementos situados aguas arriba del transformador son vistos como una impedancia inductiva:

Se observa que al instalar bancos de condensadores para compensación reactiva, se forma un circuito resonante paralelo que puede ser excitado por corrientes armónicas existentes, creando un alto riesgo para todos los componentes de la instalación.

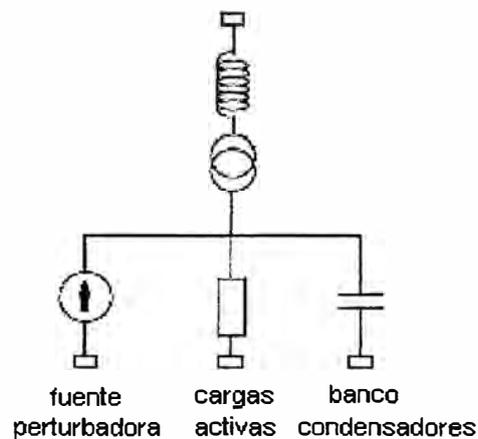


Figura 1.5. Instalación eléctrica industrial típica

Entre la red y el condensador fluyen corrientes que pueden llegar a sobrecargar a los transformadores y condensadores.

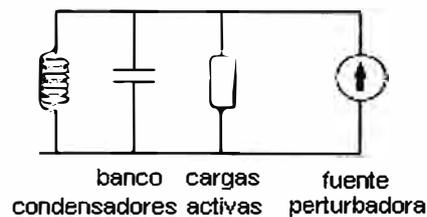


Figura 1.6. Instalación eléctrica industrial típica simplificada [1]

La distorsión armónica de corriente se calcula como:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.4)$$

En la figura 1.7 se observa la representación de la impedancia en función de la frecuencia

para un sistema que presenta resonancia paralelo con y sin bancos de condensadores.

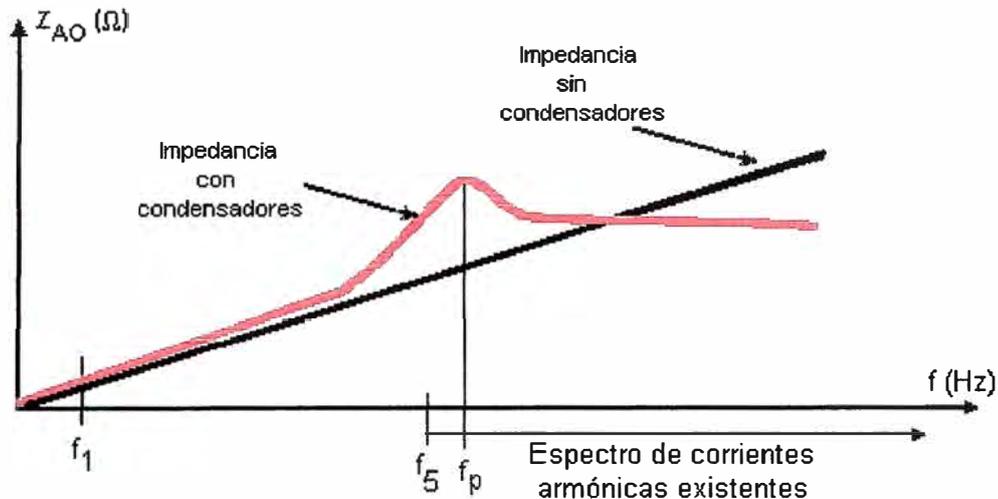


Figura 1.7 Impedancia en función de la frecuencia en un CFP sin utilizar filtros desintonizados [2]

Este circuito resonante se caracteriza por una frecuencia de resonancia dada por:

$$f_p = \frac{1}{2 \times \pi \sqrt{L_{eq} \times C}} \quad (1.5)$$

1.4.6 Amplificación de armónicas con CFP sin filtros desintonizados

El factor de amplificación se puede observar en la figura 1.8 es la diferencia entre los valores de la impedancia del sistema con banco de condensadores (Z_2) y la impedancia del sistema sin banco de condensadores (Z_1). [2]

1.4.7. Análisis de riesgo de amplificación de corrientes

Para determinar si existe riesgo de amplificación de corrientes armónicas se debe analizar dos casos:

a) Caso 1: Que existan armónicas que puedan ser amplificadas. [3]

De la ecuación 1.5, es difícil calcular el valor de L_{eq} ya que depende de la carga conectada a la red. Sin embargo la correspondiente frecuencia de resonancia depende de la potencia de cortocircuito del transformador y de la potencia del banco de condensadores y se puede calcular por:

$$f_p = 60 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (1.6)$$

donde:

f_p : rango de la frecuencia de resonancia paralelo.

S_{cc} : potencia de cortocircuito en el punto de conexión del banco de condensadores.

Q_c : potencia del banco de condensadores.

Para evitar la condición de resonancia, la potencia de salida de los condensadores deberá ser menor que la potencia crítica calculada por:

$$Q = \frac{S_{cc}}{h^2} \quad (1.7)$$

donde:

h : orden de la armónica.

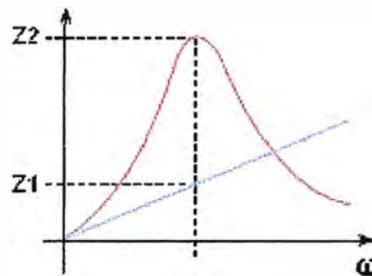


Figura 1.8. Impedancia del sistema amplificada en presencia de un CFP sin filtros desintonizados [3]

b) Caso 2: Que el factor de amplificación tenga un valor importante. [3]

Este valor se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$FA = \sqrt{\frac{Q_c \times S_{cc}}{P}} \quad (1.8)$$

donde:

FA: factor de amplificación

P: Potencia activa de la instalación (kW)

1.4.8 Generación de tensiones armónicas

Las corrientes armónicas I_h circulan por toda la instalación eléctrica generando a la vez sobretensiones armónicas V_h como se muestra en la figura 1.9 [2]

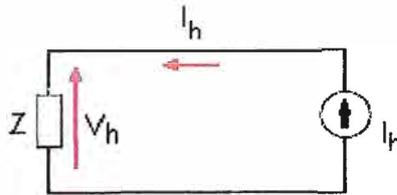


Figura 1.9. Tensiones armónicas

Las tensiones armónicas se calculan mediante:

$$V_h = Z \times I_h \quad (1.9)$$

La distorsión armónica de tensión se calcula como:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1.10)$$

1.5 Solución para reducir el efecto de las armónicas en sistemas con CFP

Los efectos de las armónicas en las redes eléctricas donde se instalan sistemas de compensación reactivas pueden ser mitigados mediante el uso de filtros.

1.5.1 Filtros desintonizados

Se denomina filtro desintonizado al circuito compuesto por reactancias en serie con condensadores mostrado en la figura 1.10 cuya frecuencia de resonancia está desviada de la frecuencia de las armónicas existentes en el sistema. [2]

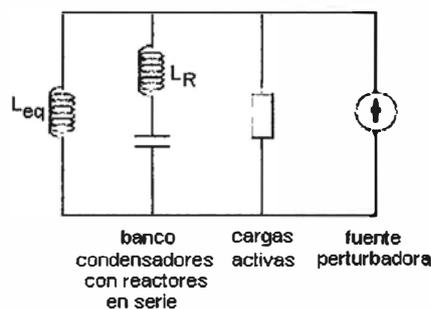


Figura 1.10. Filtro desintonizado

La representación de la impedancia en función de la frecuencia, para un sistema que presenta resonancia paralelo con y sin bancos de condensadores y con filtro desintonizado se muestra en la figura 1.11.

Este circuito resonante se caracteriza por una frecuencia de resonancia dada por:

$$f_p = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{(L_{eq} + L_R) \times C}} \quad (1.11)$$

1.5.2 Comportamiento de un circuito de filtro resonante serie

La figura 1.12 muestra el comportamiento de las impedancias inductiva y capacitiva, así como de la impedancia resultante ($Z = X_L - X_C$) del circuito resonante serie. [2]

Se observa que con el incremento de la frecuencia la impedancia inductiva aumenta y la impedancia capacitiva disminuye. Esto está dado por:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (1.12)$$

y por:

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \quad (1.13)$$

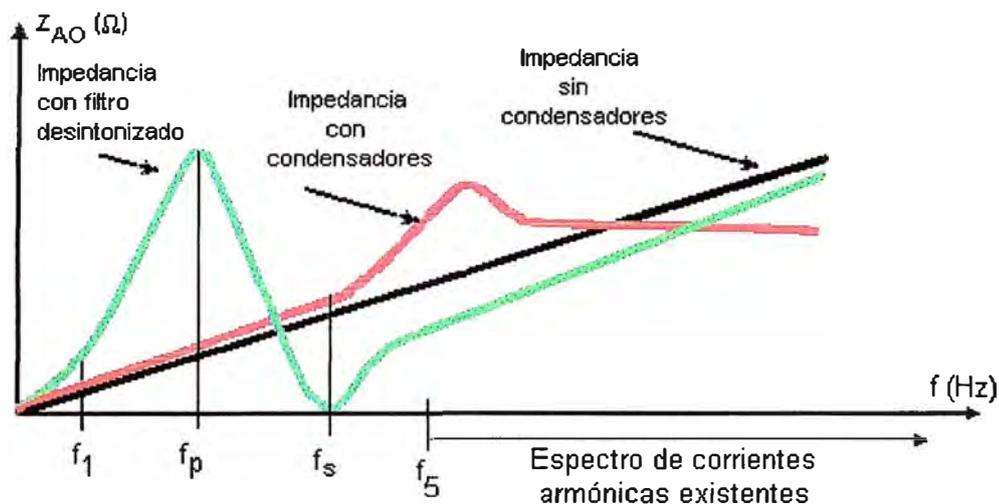


Figura 1.11. Impedancia en función de la frecuencia en un CFP con el uso de filtros desintonizados [2]

De lo mostrado en la figura 1.12 analizamos los distintos rangos de frecuencias:

$F < f_r$

En este rango de frecuencias, el circuito provee potencia reactiva para la compensación de la energía reactiva a 60Hz por ser la impedancia resultante de naturaleza capacitiva formando un circuito resonante paralelo con las impedancias de la red y de la carga. La frecuencia de resonancia de este circuito resonante paralelo es menor que la frecuencia de resonancia propia del circuito de filtro. Si no existen armónicas en este rango de frecuencias, no se observan efectos de resonancia.

$F = f_r$

A esta frecuencia, la reactancia capacitiva e inductiva son iguales. La impedancia resultante es de naturaleza óhmica y de magnitud muy pequeña. Pequeñas tensiones armónicas causarían corrientes de inserción muy altas.

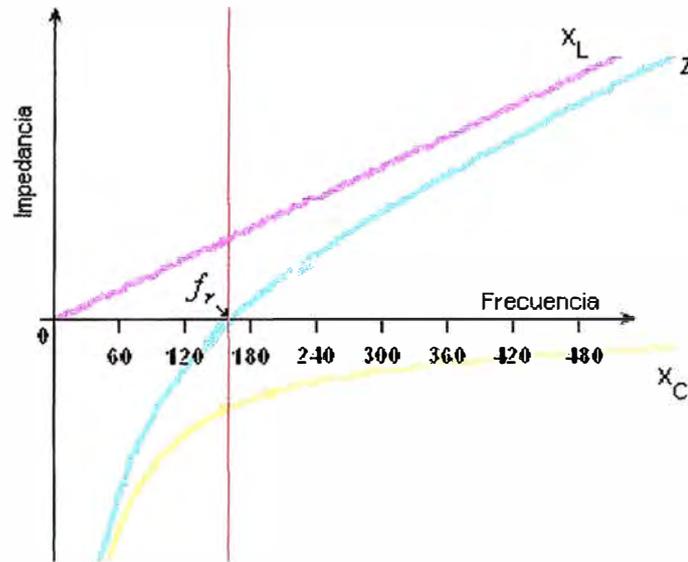


Figura 1.12. Impedancias en función de la frecuencia [2]

$F > f_r$

Para frecuencias por encima de la frecuencia de resonancia, la impedancia resultante es de naturaleza inductiva por lo que no forma ningún circuito resonante con las impedancias de la red ni de la carga quedando la posibilidad de resonancia descartada.

1.5.3 El factor de desintonía

Este factor refleja la relación entre la impedancia inductiva y capacitiva a la frecuencia fundamental: [2]

$$P = \frac{X_L}{X_C} \quad (1.14)$$

Indirectamente, el factor de desintonía indica la frecuencia de resonancia de un circuito filtro resonante serie, llamado también frecuencia de desintonía:

$$f_R = \frac{60}{\sqrt{P}} \quad (1.15)$$

1.5.4 Absorción armónica

Los filtros desintonizados absorben corrientes armónicas. Su grado de absorción de las

armónicas está determinado por la frecuencia de resonancia del circuito resonante serie y va en aumento a medida que la frecuencia se corre hacia la armónica vecina. La figura 1.13 muestra la distribución de una corriente armónica. A menor factor de desintonía, mayor el grado de absorción de la corriente armónica. [2]

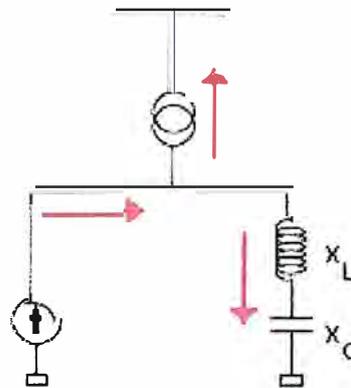


Figura 1.13. Distribución de una corriente armónica en una instalación eléctrica

1.5.5 Selección del factor de desintonía para el uso de filtros desintonizados

El punto de resonancia paralelo se mueve constantemente debido a la continua variación de las condiciones de carga. Para evitar que la frecuencia de resonancia del circuito de filtro iguale a la frecuencia de una armónica presente, el filtro se sintoniza por debajo de la menor armónica presente en el sistema. [2]

Siguiendo las recomendaciones del fabricante EPCOS [4], seleccionamos el factor de desintonía según el rango de armónicas presentes en el sistema:

- Si $\text{THD}_{V_{sc}} < 3\%$ y $\text{THD}_{I_{sc}} < 10\%$:
Usar CFP estándar (sin reactancias en serie) y verificar resonancia. Es importante considerar que la tensión nominal del condensador debe ser mayor a la tensión de servicio.
- Si $3\% < \text{THD}_{V_{sc}} < 5\%$ ó $10\% < \text{THD}_{I_{sc}} < 30\%$:
Usar CFP desintonizada de acuerdo a la armónica dominante:
 - Si es la 3ra armónica usar $p=14\%$
 - Si es la 5ta armónica o superior usar $p=7\%$
- Si $\text{THD}_{V_{sc}} > 5\%$ ó $\text{THD}_{I_{sc}} > 30\%$
Usar CFP sintonizada a la armónica dominante.

1.5.6 Armónicas dominantes

Con el paso de los años se ha observado lo siguiente:

- En plantas industriales generalmente predomina la 5ta. armónica debido al control de

cargas trifásicas; y,

- En edificios comerciales predomina la 3ra. armónica por el uso de dispositivos electrónicos monofásicos. [2]

1.5.7 Cálculo del aumento de la tensión por la reactancia en serie

Las reactancias conectadas en serie con los condensadores originan un aumento de la tensión sobre el condensador, por lo tanto estos equipos deben ser seleccionados a una tensión nominal mayor que la tensión nominal de la red [2]. Dicho aumento de tensión sobre los condensadores se calcula por:

$$V_C = V_N \left(\frac{1}{1-p} \right) \quad (1.16)$$

1.5.8 Calculo de la inductancia de la reactancia

El valor de la inductancia para lograr un factor de desintonía se calcula con la siguiente fórmula: [2]

$$L = \frac{P}{4 \times \pi^2 \times f^2 \times C} \quad (1.17)$$

En este capítulo se ha revisado como las armónicas ocasionan serios daños en los equipos conectados a la red eléctrica de una instalación industrial. También se ha analizado como estas armónicas llegan a ser amplificadas en presencia de un banco de condensadores y como instalando reactancias en serie con estos condensadores se logra evitar tales efectos.

CAPITULO II NORMATIVIDAD

Este capítulo se refiere a las recomendaciones y requerimientos hechas por el IEEE en su estándar 519 del año 1992 para el control de armónicas en sistemas de potencia donde se establece las responsabilidades de los usuarios y de los distribuidores. Para fines del presente informe, el análisis se centrará en los límites de corrientes armónicas que los usuarios pueden inyectar a una red eléctrica menor a 69KV.

2.1 Estándar IEEE 519 – 1992

El estándar IEEE 519 – 1992 titulado “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System” en su sección 10 “Recommended Practices for Individual Consumers” establece límites de distorsión armónica según dos criterios: [5]

- Un consumidor puede inyectar una cantidad de corriente armónica limitada en la red de distribución eléctrica según los valores indicados en la tabla 2.1.
- Una compañía de distribución eléctrica puede suministrar al consumidor un nivel de voltaje armónico limitado.

Tabla 2.1. Límites de distorsión de corriente (armónicas impares) para sistemas de distribución abarcando desde 120V hasta 69KV [5]

I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100<1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Donde:

I_{sc} : máxima corriente de cortocircuito en Pcc.

I_L : Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida (Pcc) y puede calcularse como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación.

Para las armónicas pares se debe tener en cuenta que estas se limitan al 25 % del límite de la armónica impar superior.

Como límite primario de los usuarios tenemos la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. El tamaño del consumidor lo define la corriente total de la frecuencia fundamental en la carga, I_L (incluye todas las cargas lineales y no lineales). El tamaño del sistema de abastecimiento se define por el nivel de la corriente de cortocircuito, I_{SC} , al PCC. Estas dos corrientes definen la relación de cortocircuito, el SCR, que representa el tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente (el PCC):

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (2.1)$$

La tabla también identifica niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2.2)$$

donde:

I_h : Magnitud de la armónica individual

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga

h: orden armónico impar

Con respecto a los límites de duración, los límites de distorsión especificados por IEEE 519 están para condiciones normales que duran períodos mayores de hora. Para períodos más cortos, durante arranques o condiciones inusitadas, los límites pueden ser excedidos hasta un 50%.

Las tablas de distorsión de corriente son aplicables para rectificadores de 6 pulsos y situaciones generales de distorsión. Sin embargo, cuando se usan variadores con número de pulsos (q) de más de 6, los límites para las armónicas características son incrementados por un factor equivalente a:

$$\sqrt{\frac{q}{6}} \quad (2.3)$$

Las amplitudes de las armónicas no-características deben ser menores que el 25% de los límites especificados en las tablas.

Finalmente el estándar indica que regirse estrictamente a estas recomendaciones no garantiza que los problemas se eviten, sobretodo si los valores están próximos a los límites. Por esta razón se deben realizar mediciones de armónicas cada cierto periodo para determinar el comportamiento del sistema así como el rendimiento de los equipos.

Además el usuario de la red eléctrica debe confirmar lo siguiente:

- Que los condensadores usados para corregir el factor de potencia o los filtros de armónicas no estén sobrecargados por un exceso de armónicas.
- Que las perjudiciales resonancias series o paralelas, no están presentes.
- Que el nivel de armónicas en PCC y en puntos de utilización no sea excesivo.

La presente norma restringe los valores de corrientes armónicas que los usuarios pueden inyectar en la red eléctrica definiendo límites de distorsión de corriente. Sin embargo advierte que cumplir estas recomendaciones no evita la aparición de problemas por lo que también recomienda realizar mediciones de armónicas cada cierto tiempo.

CAPITULO III FILTROS Y REACTANCIAS

En este capítulo se mostrarán los diferentes equipos con los que actualmente se cuentan para mejorar la calidad de la energía eléctrica en una instalación industrial enfocándose en soluciones para la reducción de armónicas generadas por el uso de VFD y en soluciones para poder compensar energía reactiva en presencia de armónicas.

3.1 Calidad de la energía

Las reactancias y los filtros se utilizan para reducir las armónicas y para aumentar la disponibilidad de los sistemas y aparatos. Estos equipos son esenciales para obtener la calidad de la energía y están diseñados y optimizados para la aplicación con accionamientos tanto de corriente alterna y como en corriente continua [6]. En la figura 3.1 se indica dónde se emplea cada aparato:

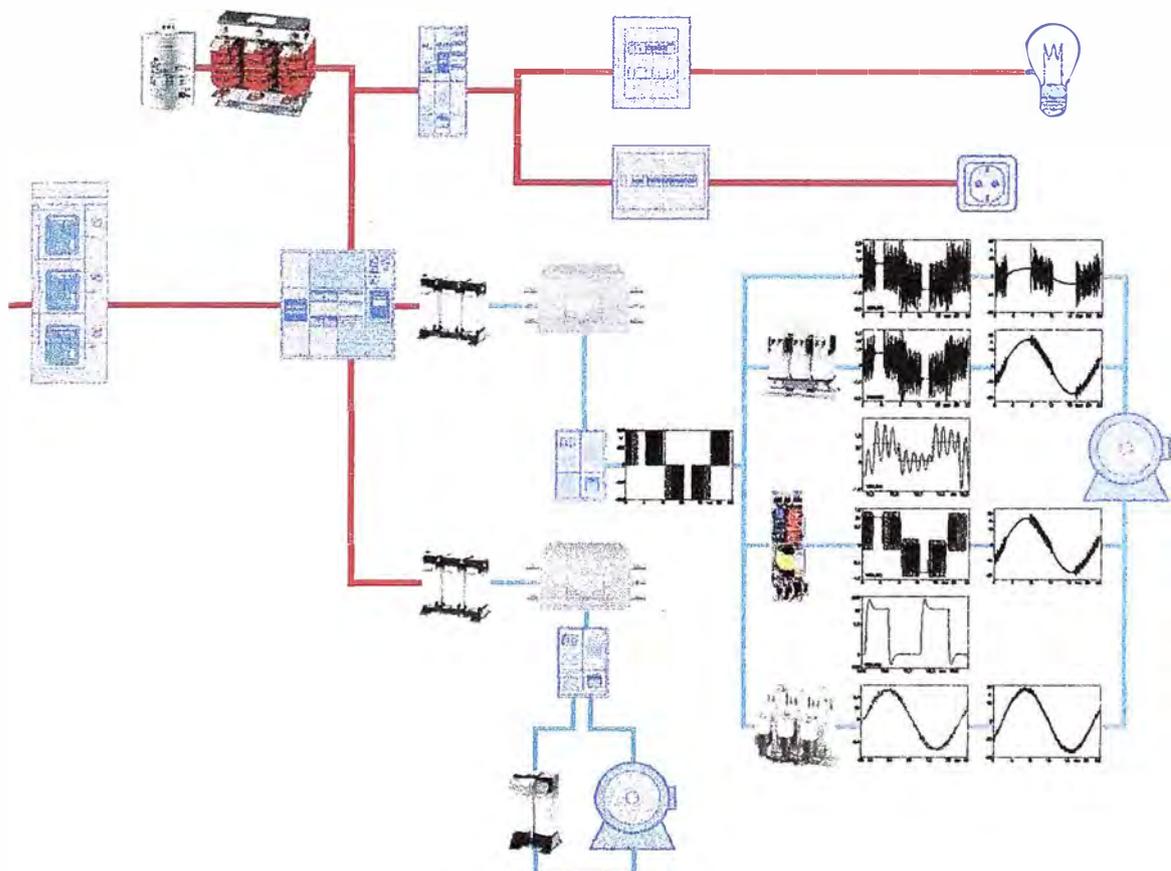


Figura 3.1. Empleo de reactancias y filtros en una instalación industrial [6]

Los consumidores, como son los sistemas de automatización o los sistemas de procesamiento de datos, son muy sensibles a las interferencias radioeléctricas y a las desviaciones de la forma sinusoidal de la onda de la tensión de red. [6]

Con la creciente utilización de consumidores no lineales en la red, los problemas generados por estos equipos van en aumento en los últimos años siendo necesario aumentar la disponibilidad utilizando reactancias o filtros. [6]

Ya sea de la industria de productos eléctricos como de construcción de maquinaria o en la industria de procesos, en ventiladores, cintas transportadoras o dispositivos elevadores, en todos los sectores y en todas las aplicaciones en las que se emplean variadores de frecuencia, los filtros y reactancias resultan apropiados. Estos equipos reducen las armónicas de la red así como los efectos de la alimentación por variador de frecuencia sobre el motor, protegen y preservan al variador y, por tanto, aseguran el funcionamiento sin perturbaciones de sus máquinas e instalaciones. [6]

3.2 Reactancias

Se usan para alisar la corriente, por ejemplo en accionamientos, o si se han de suprimir señales perturbadoras. Se han desarrollado de forma óptima para su aplicación específica y para sus condiciones de uso. La utilización de materiales de alta calidad y su perfecto procesamiento aseguran un servicio exento de perturbaciones de las instalaciones y soluciones de accionamiento. [6]

Con el uso de estas reactancias se tienen las siguientes ventajas:

- Reducción de las armónicas.
- Proporcionan una alimentación limpia de motores alimentados por VFD.
- Aumentan la fiabilidad de las aplicaciones y aseguran la disponibilidad de las instalaciones y sistemas. [6]

3.2.1 Reactancias para CFP desintonizada

Las reactancias en serie con condensadores para CFP desintonizados como los mostrados en la figura 3.2 se utilizan para evitar el riesgo de resonancia paralelo así como el filtrado de corrientes armónicas. [4]

Entre sus principales características tenemos:

Alta linealidad

Debido a que las reactancias tienen riesgo de saturación magnética son dimensionados de tal forma que sus características magnéticas se mantengan en la zona lineal (L es constante). Si la suma aritmética de todas las corrientes máximas existentes superan el valor del límite de la linealidad del núcleo (I_{LIN}), la reactancia saturada ocasionaría la disminución de su inductancia provocando que la frecuencia de desintonía aumente aproximándose al valor de una frecuencia armónica.

Incluyen protección térmica

Un microswitch térmico se coloca dentro del bobinado de la reactancia para que pueda ser conectado en serie con la bobina del contactor para desconectar el circuito de filtro en caso de sobretensión y así evitar daños eléctricos y accidentes.

Las reactancias para la aplicación de filtros son diseñados para una clase de temperatura particular. Esta clase de temperatura determina la máxima temperatura permisible de la reactancia. La temperatura de la reactancia puede subir a mayores niveles debido a la carga de armónicas y a mayores temperaturas ambiente.

Con un correcto dimensionamiento en la fase de diseño y una correcta ventilación durante la operación la temperatura de la reactancia se mantiene dentro de los límites permitidos.

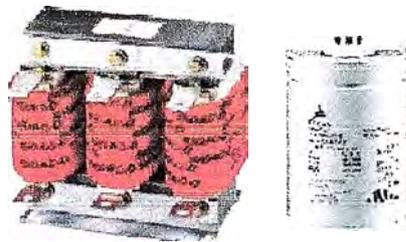


Figura 3.2. Filtro desintonizado conformado por una reactancia y un condensador para CFP

Las reactancias para filtros desintonizados pueden someterse a sobrecarga continua hasta el 105 %.

Las tensiones armónicas tomadas en cuenta según EN 61000-2-2 para redes públicas de baja tensión y EN 61000-2-4 para redes industriales son:

- 110 % de sobretensión de red en la armónica dominante,
- 5 % de V_N con 5ª armónica (300 Hz),
- 6 % de V_N con 7ª armónica (4200 Hz),
- 3,5 % de V_N con 11ª armónica (660Hz),
- 3 % con V_N con 13ª armónica (780 Hz)

3.2.2 Reactancias de red

Esta reactancia (figura 3.3) resiste las corrientes armónicas de alta frecuencia. Las componentes de 60Hz pasan a través del inductor con poca oposición, pero a los componentes de más alta frecuencia les resulta más difícil pasar. Con esto, las corrientes armónicas disminuyen cuando una reactancia se instala en la entrada del variador.

Para redes con una impedancia de red muy pequeña existen reactancias de 4% de la tensión de cortocircuito y para todas las aplicaciones estándar existen reactancias con

caída de tensión referida al 2% de la tensión de cortocircuito. La inductancia de las reactancias se caracteriza por su excelente linealidad, lo cual permite evitar oscilaciones en el circuito intermedio originadas por las variaciones de carga. Las tensiones asignadas de las reactancias de red son por lo menos unos 40% más altas que la tensión de empleo. [6]

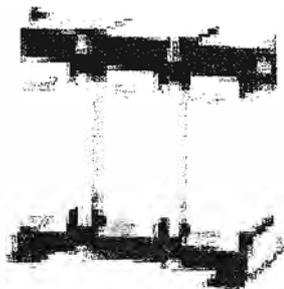


Figura 3.3. Reactancia de red

3.2.3 Reactancias de salida

Las reactancias de salida (figura 3.4) reducen de forma óptima los picos de corriente de carga producidos por la señal de pulsación y la capacidad de los cables. En la práctica: para cable no apantallado se utilizan longitudes del cable del motor de hasta 300 m; para cable apantallado, de hasta 200 m.

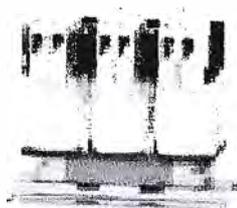


Figura 3.4. Reactancia de salida

Minimizan de un modo excelente los picos de la corriente de carga. [6]

3.2.4 Reactancias de absorción

Se instalan en el lado de corriente continua de los variadores de velocidad. Su empleo es necesario para conseguir una conmutación correcta y reducir las pérdidas del motor cuando el circuito del variador utilizado genera un rizado excesivo de la corriente continua para los motores. Las reactancias de absorción (figura 3.5) tienen una inductancia L casi constante hasta la intensidad continua asignada I_{dn} .

Las reactancias reducen de forma óptima los picos de corriente de carga producidos por la señal de pulsación y la capacidad de los cables. [6]

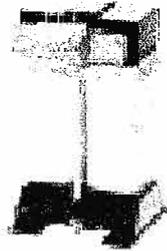


Figura 3.5. Reactancia de absorción

3.3 Filtros

Hoy día, las máquinas y los procesos industriales modernos ya no se conciben sin accionamientos de velocidad variable. Sin embargo, debido a la complejidad y al alto grado de automatización, muchos sistemas electrónicos modernos son especialmente vulnerables a las señales perturbadoras generadas por los accionamientos u otros consumidores no lineales. Son vulnerables, por ejemplo, a las tensiones de interferencia o las desviaciones de la tensión de red de la forma de onda sinusoidal.

Esto puede ir en detrimento de la disponibilidad, pero no tiene por qué. Si además del óptimo diseño de los sistemas de aparatos se emplean componentes fiables no hay ningún impedimento para conseguir un servicio exento de perturbaciones. [6]

Con el uso de estos filtros se tienen las siguientes ventajas:

- Amortiguación, bloqueo o supresión de perturbaciones eléctricas conducidas.
- Reducción de las armónicas y mejora de la calidad de la red.
- Seguridad de obtención de corrientes y tensiones de forma de onda prácticamente sinusoidal en motores alimentados por variador y de funcionamiento silencioso.
- Aumento de la fiabilidad de las aplicaciones, con lo que aseguran la disponibilidad de las instalaciones y sistemas.

3.3.1 Filtros antiparásitos

Se utilizan cuando se requiere una óptima supresión de interferencias de los variadores de velocidad. Los filtros antiparasitarios (figura 3.6) para VFD se instalan en los cables que van a la red para suprimir tensiones perturbadoras hasta los valores requeridos.

Utilizando un filtro antiparasitario es posible obtener el grado de protección antiparasitaria A o B según la norma EN 50081. Además, cumpliendo los límites establecidos por la norma EN 50081 hay la posibilidad de utilizar cables de conexión de motor mucho más largos.

Las variantes personalizadas ofrecen la posibilidad de encontrar soluciones perfectamente adaptadas a la aplicación de cada cliente. Por ejemplo, los filtros combinados (filtro antiparasitario y reactancia de salida) permiten aumentar la longitud del cable de alimentación del motor con el grado antiparasitario deseado. En caso de combinar el filtro antiparasitario con una reactancia de red se obtiene un desparasitaje aún mejor del sistema eléctrico (la reactancia de entrada limita las corrientes armónicas, a expensas de una distorsión en el voltaje) [6]

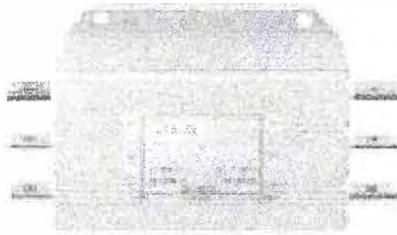


Figura 3.6. Filtro antiparásito

3.3.2 Filtros du/dt

Los filtros du/dt (figura 3.7) se emplean a menudo en VFD para la industria de procesos. El filtro se instala a la salida de los VFD y permiten reducir picos de tensión transitoria hasta un valor definido y mantener limitadas las pendientes de tensión en el devanado del motor en valores no críticos. Además, cuando se utilizan cables de motor largos, el filtro du/dt reduce los picos de la corriente de carga resultantes de la capacitancia del cable de alimentación del motor. [6]

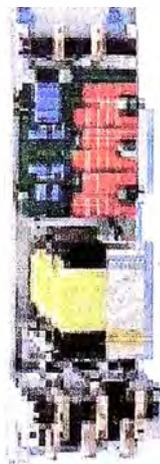


Figura 3.7. Filtro du/dt

3.3.3 Filtros sinusoidales

Se emplean cuando el motor se debe de alimentar con una tensión prácticamente sinusoidal. El filtro sinusoidal (figura 3.8) se instala en la salida de los VFD y por él pasan las corrientes del motor. Las magnitudes de salida del variador se filtran hasta tal punto que las tensiones y corrientes del motor llegan a ser casi sinusoidales. Por consiguiente se reducen las pérdidas adicionales del motor y éste funciona notablemente más suave.

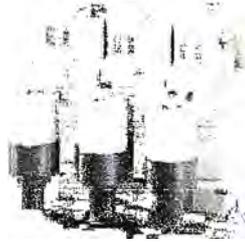


Figura 3.8. Filtro sinusoidal

Son especialmente idóneos para zonas sensibles a los ruidos, ya que reducen los ruidos de origen magnético de los motores. [6]

En este capítulo se ha observado como las reactancias y los filtros ayudan a la reducción de las armónicas y como aseguran la disponibilidad de las instalaciones eléctricas. El uso de reactancias para CFP desintonizada se verá en el siguiente capítulo.

CAPITULO IV

DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACION DE ENERGIA REACTIVA CON FILTROS DESINTONIZADOS

Este capítulo tratará la selección de equipos para compensar energía reactiva en una instalación eléctrica en presencia de armónicas. Se comparará los efectos de instalar bancos de condensadores con y sin reactancias en serie así como la evaluación económica que estas soluciones. Finalmente se indicará criterios a tomar en cuenta cuando se construya gabinetes con filtros desintonizados.

4.1 Planteamiento de ingeniería del problema

En una planta industrial (figura 4.1) se tiene un transformador de 1250kVA ($V_{cc} = 5\%$) que alimenta en 480V a un centro de control de motores con una carga instalada de 750kW.

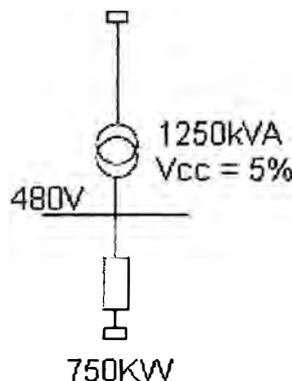


Figura 4.1. Instalación industrial con 750KW de potencia instalada

Todos los días entre las 10am y 6pm la planta trabaja al 80% de su plena carga, es decir 600KW con un factor de potencia de 0.70. El resto del tiempo la planta trabaja con menos potencia y en forma variable con un factor de potencia de 0.88 en promedio.

Esta operación origina altos costos de facturación por consumo de energía reactiva mensualmente.

4.2 Solución con bancos de condensadores sin reactancia en serie

Instalando un sistema de compensación de energía reactiva global en base a un banco de condensadores automático conectado en paralelo con el centro de control de motores (figura 4.2) se deberá corregir el factor de potencia a un valor mayor de 0.96 para evitar

que la compañía eléctrica penalice a la planta industrial por el consumo excesivo de energía reactiva.

Corrigiendo el factor de potencia a 0.98 se estará evitando dicha penalidad.

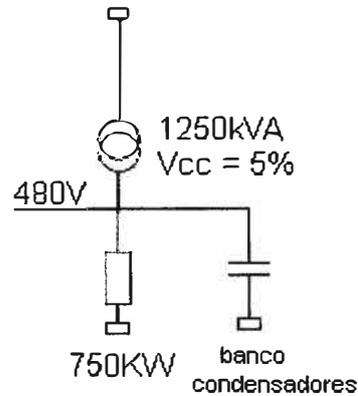


Figura 4.2. Instalación industrial con CFP

De los datos actuales del factor de potencia:

$$\cos\phi_{actual} = 0.7 \quad (4.1)$$

podemos calcular:

$$\tan\phi_{actual} = 1.02 \quad (4.2)$$

De la misma forma para los valores objetivos del factor de potencia:

$$\cos\phi_{objetivo} = 0.98 \quad (4.3)$$

se puede calcular:

$$\tan\phi_{objetivo} = 0.20 \quad (4.4)$$

Utilizando (4.2) y (4.4), el banco de condensadores deberá ser de la siguiente potencia:

$$Q_c = P \times [\tan\phi_{actual} - \tan\phi_{objetivo}] \quad (4.5)$$

$$Q_c = 600 \times (1.02 - 0.20) = 490 \text{KVAR} \quad (4.6)$$

Usando la tabla 4.1 del fabricante de condensadores EPCOS para una tensión de 480V, seleccionamos el condensador B25667A4287A375 de 25KVAR a 60Hz

Tabla 4.1 Datos de condensadores a una tensión nominal de 480VAC [4]

Type	50 Hz		60 Hz		C _n	d x h	Weight	Ordering code
	Output kvar	I _r A	Output kvar	I _r A	μF	mm	kg	
MKK480-D-05-01	5.0	6.0	6.0	7.2	3 * 23	121 x 164	1.1	B25667A4696A375
MKK480-D-06.5-01	6.5	7.5	7.8	9.0	3 * 29	121 x 164	1.2	B25667A4866A375
MKK480-D-08.3-01	8.3	10.0	10.0	12.0	3 * 38	121 x 164	1.2	B25667A4117A375
MKK480-D-10-01	10.4	12.5	12.5	15.0	3 * 48	121 x 164	1.3	B25667A4147A375
MKK480-D-12.5-01	12.5	15.1	15.0	18.1	3 * 58	121 x 164	1.5	B25667A4177A365
MKK480-D-15-01	15	18.1	18.0	21.7	3 * 69	121 x 200	1.7	B25667A4207A365
MKK480-D-16.7-01	16.7	20.0	20.1	24.0	3 * 77	121 x 200	1.8	B25667A4237A355
MKK480-D-20-01	20.8	25.0	25.0	30.1	3 * 96	142 x 200	2.2	B25667A4287A375
MKK480-D-25-01	25.0	30.0	30.0 ¹⁾	36.1 ¹⁾	3 * 115	142 x 200	2.4	B25667A4347A365

Diseñando 2 pasos de 50KVAR y 4 pasos de 100KVAR, se tendrá un banco de condensadores de 500KVAR, el cual deberá contar con los siguientes equipos:

- Un controlador de factor de potencia, modelo BR6000 de 6 pasos
- Dos pasos de 50KVAR / 480V / 60Hz. Cada paso equipado con:
 - 1 Seccionador fusible hasta 160A.
 - 3 Fusibles tipo HRC 100A 600V.
 - 1 Contactor 50KVAR - 400V 50/60HZ con resistencia de precarga.
 - 2 Condensadores trifásicos 25.00 kVAR 480V 60Hz.
- Cuatro pasos de 100KVAR / 480V / 60Hz. Cada paso equipado con:
 - 2 Seccionador fusible hasta 160A.
 - 6 Fusibles tipo HRC 100A 600V.
 - 2 Contactores 50KVAR - 400V 50/60Hz con resistencia de precarga.
 - 4 Condensadores trifásicos 25.00 kVAR 480V 60Hz.

Este banco de condensadores forma un circuito en paralelo con las impedancias de las cargas y del transformador por lo que se deberá analizar si existe la posibilidad de amplificación de corrientes armónicas.

Para saber si existen corrientes armónicas que puedan ser amplificadas, calculamos el rango de la frecuencia de resonancia en paralelo:

$$h_{rp} = \sqrt{\frac{1250}{500 \times 0.05}} \approx 7 \quad (4.7)$$

entonces:

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{1250}{500 \times 0.05}} = 424 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

Es decir por ejemplo, que con la aparición de una corriente armónica del 7mo orden y el banco de condensadores entregando 500KVAR se produciría una resonancia amplificando dicha corriente armónica en:

$$FA = \frac{\sqrt{500 \times \frac{1250}{0.05}}}{600} \approx 6 \text{ veces} \quad (4.9)$$

Ahora se tomará en cuenta que existe una corriente armónica del 7mo orden de 110A.

Con:

$$P = 600kW, \cos \phi = 0.7$$

Se tiene:

$$S = \frac{600}{0.7} = 857.14KVA \quad (4.10)$$

$$I_1 = \frac{857.14}{\sqrt{3} \times 0.48} = 1031A \quad (4.11)$$

Finalmente:

$$I_{rms} = \sqrt{1031^2 + 110^2} = 1037A \quad (4.12)$$

$$THD_I = \frac{110}{1031} = 10.61\% \quad (4.13)$$

Con instrumentos de medición se observa la distorsión de la tensión en esta armónica:

$$THD_V = 3.5\% \quad (4.14)$$

Corrigiendo con el banco de condensadores de 500KVAR, se tiene:

$$I_c = \frac{500}{\sqrt{3} \times 0.48} = 601A \quad (4.15)$$

Con:

$$P = 600kW, \cos \phi = 0.983$$

Se tiene:

$$S = \frac{600}{0.983} = 610.38 \text{KVA} \quad (4.16)$$

$$I_1 = \frac{610.38}{\sqrt{3} \times 0.48} = 734 \text{A} \quad (4.17)$$

Usando (4.17) y considerando la amplificación de 6 veces la corriente armónica debido a la resonancia en 7º, tenemos:

$$I_{t_{rms}} = \sqrt{734^2 + (6 \times 110)^2} = 979 \text{A} \quad (4.18)$$

Siendo:

$$THD_I = \frac{6 \times 110}{734} = 88\% \quad (4.19)$$

Usando (4.15), en el banco de condensadores, tenemos:

$$I_{c_{rms}} = \sqrt{601^2 + (6 \times 110)^2} = 884 \text{A} \quad (4.20)$$

Con:

$$THD_{I_c} = \frac{6 \times 110}{601} \approx 108\% \quad (4.21)$$

La corriente armónica origina sobrecarga de los condensadores:

$$\frac{I_{c_{rms}}}{I_c} = \frac{884}{601} = 1.5 \quad (4.22)$$

4.3 Solución con bancos de condensadores con reactancia en serie

Para reducir el efecto de la corriente de 7ma armónica se diseñará un banco de condensadores con filtros (figura 4.3) que sintonicen por debajo de esta armónica.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante EPCOS para la selección del factor de desintonía en función de la tasa de distorsión armónica de corriente y de tensión de nuestro circuito según (4.13) y (4.14) respectivamente seleccionamos el factor de desintonía $p = 7\%$

Aunque la red es de 480V, por la desintonía la tensión sobre los condensadores será:

$$V_c = 480 \times \frac{1}{1 - 0.07} = 516V \quad (4.23)$$

Por lo se deberá seleccionar los condensadores a una tensión nominal mayor que la tensión de la red.

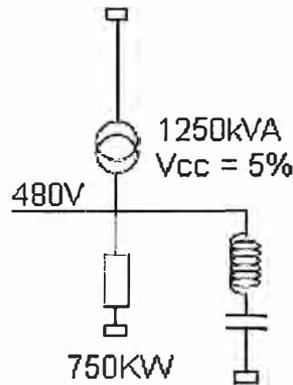


Figura 4.3. Instalación industrial con CFP desintonizada

Usando la tabla 4.2 del fabricante de condensadores EPCOS para una tensión de 525V, seleccionamos el condensador B25667A5287A375 de 30KVAR a 60Hz

Tabla 4.2 Datos de condensadores a una tensión nominal de 525VAC [4]

Type	50 Hz		60 Hz		G _n	d x h	Weight	Ordering code
	Output kvar	I _n A	Output kvar	I _n A				
MKK525-D-06.3-01	6.3	6.9	7.5	8.3	3 × 24	121 x 164	1.1	B25667A5726A375
MKK525-D-08.3-01	8.3	9.2	10.0	11.0	3 × 32	121 x 164	1.2	B25667A5986A375
MKK525-D-10-01	10.4	11.5	12.5	13.7	3 × 40	121 x 164	1.4	B25667A5127A375
MKK525-D-12.5-01	12.5	13.8	15.0	16.5	3 × 48	121 x 164	1.5	B25667A5147A375
MKK525-D-15-01	15.0	16.5	18.0	19.8	3 × 58	121 x 200	1.7	B25667A5177A375
MKK525-D-18.7-01	16.7	18.4	20.0	22.1	3 × 64	121 x 200	1.8	B25667A5197A375
MKK525-D-20-01	20.8	22.9	25.0	27.5	3 × 80	142 x 200	2.2	B25667A5247A375
MKK525-D-25-01	25.0	27.5	30.0 ^{II}	33.0 ^{II}	3 × 96	142 x 200	2.5	B25667A5287A375

Manteniendo la configuración anterior de la compensación de energía reactiva sin filtros conectamos dos condensadores en paralelo:

$$C_{eq} = 2 \times (3 \times 96) = 576 \mu F \quad (4.24)$$

Con este valor de la capacitancia obtenemos el valor de la inductancia de la reactancia necesario para la desintonía:

$$L = \frac{0.07}{4 \times \pi^2 \times 60^2 \times 576 \times 10^{-6}} = 0.855mH \quad (4.25)$$

Tabla 4.3 Datos de reactancias a una tensión nominal de 480VAC y 60Hz [4]

Inductance mH	I_{max} (I_{rated}) A	Losses W	Weight kg	Drawing number	Terminal	Ordering code
3.68	17.0	71	6.5	1c	4 mm ² Kl.	B44066D7012S481
1.84	34.2	103	13.2	1e	10 mm ² Kl.	B44066D7025S481
0.92	68.4	240	24.2	3b	M6 Al-Flat	B44066D7050S481
0.61	102.4	270	32	3c	M8 Al-Flat	B44066D7075S481
0.46	136.7	270	35	3c	M8 Al-Flat	B44066D7100S481

De lo observado en la tabla 4.3 del fabricante de reactancias EPCOS para CFP, utilizamos la inductancia mas cercana a 0.855mH que corresponde al equipo B44066D7050S481 y que cuenta con un valor de 0.92mH para una tensión de 480V, 60Hz y $p=7\%$

El factor de desintonía final será entonces:

$$p = 4 \times \pi^2 \times 60^2 \times 576 \times 10^{-6} \times 0.92 \times 10^{-3} = 7.53\% \quad (4.26)$$

y la frecuencia de desintonía será:

$$f_R = \frac{60}{\sqrt{0.0753}} = 219Hz \quad (4.27)$$

La potencia efectiva del filtro desintonizado a 480V a 60Hz se calcula teniendo la reactancia equivalente:

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 576 \times 10^{-6}} = 4.61\Omega \quad (4.28)$$

$$X_L = 2 \times \pi \times 60 \times 0.92 \times 10^{-6} = 0.35\Omega \quad (4.29)$$

$$|X_{eq}| = |0.35 - 4.61| = 4.26\Omega \quad (4.30)$$

La potencia efectiva del filtro desintonizado será:

$$Q_e = \frac{480^2}{4.26} \approx 54KVAR \quad (4.31)$$

Análogamente al primer diseño del banco de condensadores sin considerar las corrientes armónicas se tendría 2 pasos de 54KVAR y 4 pasos de 108KVAR, sumando en total

540KVAR cuando solamente se requieren 500KVAR.

Disminuyendo una etapa a 27KVAR la reactancia a seleccionar para este paso según la tabla 4.3 deberá ser el B44066D7025S481, que cuenta con un valor de 1.84mH

Con esto, el factor de desintonía se mantiene igual a (4.26) :

$$p = 4 \times \pi^2 \times 60^2 \times 288 \times 10^{-6} \times 1.84 \times 10^{-3} = 7.53\% \quad (4.26)$$

Las impedancias capacitiva, inductiva y la equivalente se duplican:

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 288 \times 10^{-6}} = 9.21\Omega \quad (4.33)$$

$$X_L = 2 \times \pi \times 60 \times 1.84 \times 10^{-3} = 0.69\Omega \quad (4.34)$$

$$|X_{eq}| = |0.69 - 9.21| = 8.52\Omega \quad (4.35)$$

Finalmente la potencia efectiva del filtro desintonizado se reduce a la mitad:

$$Q_e = \frac{480^2}{8.52} \approx 27KVAR \quad (4.36)$$

Entonces el banco de condensadores con filtros desintonizados de 513KVAR deberá contar con los siguientes equipos:

- Un controlador de factor de potencia, modelo BR6000 de 6 pasos.
- Un paso de 27KVAR / 480V / 60Hz. Cada paso equipado con:
 - 1 Seccionador fusible hasta 160A.
 - 3 Fusibles tipo HRC 63A 600V.
 - 1 Contactor 25KVAR - 400V 50/60HZ con resistencia de precarga.
 - 1 Reactancia trifásica 1.84mH 480V 60Hz
 - 1 Condensador trifásico 30.00 kVAR 525V 60Hz
- Un paso de 54KVAR / 480V / 60Hz. Cada paso equipado con:
 - 1 Seccionador fusible hasta 160A.
 - 3 Fusibles tipo HRC 125A 600V.
 - 1 Contactor 50KVAR - 400V 50/60HZ con resistencia de precarga.
 - 1 Reactancia trifásica 0.92mH 480V 60Hz.
 - 2 Condensadores trifásicos 30.00 kVAR 525V 60Hz
- Cuatro pasos de 108KVAR / 480V / 60Hz. Cada paso equipado con:
 - 2 Seccionadores fusible hasta 160A.

6 Fusibles tipo HRC 125A 600V.

2 Contactores 50KVAR - 400V 50/60Hz con resistencia de precarga.

2 Reactancias trifásicas 0.92mH 480V 60Hz.

4 Condensadores trifásicos 30.00 kVAR 525V 60Hz.

4.4 Comparación económica

Según los equipos seleccionados para cada tipo de banco de condensadores, los suministros valen alrededor de:

- CFP sin filtros desintonizados: US\$8000
- CFP con filtros desintonizados: US\$17000

Ambos bancos de condensadores se pagan con los ahorros generados en la planta industrial al no consumir energía reactiva en un plazo de 6 a 9 meses aproximadamente en el caso de bancos de condensadores sin filtros y en un doble de tiempo para los bancos de condensadores con filtros.

Una decisión correcta debe analizar que existe un alto riesgo de que la inversión realizada aumente mes a mes en vista que un banco de condensadores sin filtros desintonizados instalado en una red contaminada de armónicas ocasionará fallos tanto en los condensadores como en toda la instalación eléctrica lo que conllevará a realizar mayores gastos en mantenimiento, continuo cambio de equipos en la instalación y hasta alguna parada de planta no prevista. A esto se debe contemplar que, en condiciones normales de operación (ver anexos), un condensador tiene un tiempo de vida de 115000 horas que equivalen a 13 años y que con los filtros desintonizados ayudan a mantener este largo periodo.

4.5 Criterios para la construcción de filtros desintonizados

Para optimizar la construcción de filtros desintonizados en un gabinete (figura 4.4) se debe tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Condensadores preferentemente montados en posición horizontal en bandeja sin conducción térmica a la reactancia y en distinta línea vertical
- Reactancia montada sobre perfiles para permitir circulación de aire entre los núcleos.
- Ventilación forzada abundante 2.5 m³/h por KVAR
- Medición de tensión y corriente en los cables de alimentación al tablero general incluyendo las armónicas. Esta medición se debería realizar antes y después de la instalación del banco de condensadores para comparar si los niveles de armónicas se incrementaron o disminuyeron. [2]

En este capítulo se ha seleccionado los equipos para dos tipos de soluciones de sistemas de compensación de energía reactiva en presencia de armónicas. Se ha comparado que instalar un sistema de CFP con filtros desintonizados cuesta aproximadamente el doble

que instalar un típico banco de condensadores sin reactancias. La decisión de la inversión no sólo deberá apreciar este factor sino también deberá evaluar los riesgos que implican instalar un sistema de compensación.

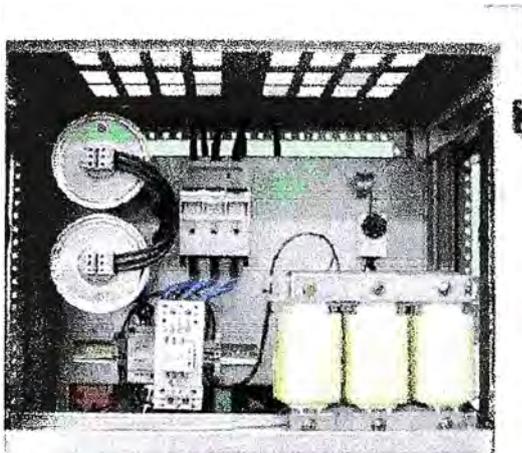


Figura 4.4. Montaje de un filtro desintonizado en gabinete

CONCLUSIONES

1. El estándar IEEE-519 proporciona recomendaciones para mantener los niveles de distorsión dentro de límites aceptables en sistemas eléctricos de potencia siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.
2. Los usuarios deben asegurar que la generación de corrientes armónicas se ubique dentro de los límites establecidos en el punto de acoplamiento común.
3. La presencia de resonancia serie o paralelo puede causar sobretensiones y sobrecorrientes de niveles peligrosamente altos.
4. Un sistema de compensación de energía reactiva con filtros desintonizados a una frecuencia menor a la de la frecuencia armónica más baja elimina la posibilidad de resonancia.
5. Una de las razones del uso del factor de desintonía 7% es la optimización de componentes a esta frecuencia de resonancia así como también una reducción de las armónicas.
6. La decisión de invertir en un sistema de CFP con filtros desintonizados se justifica con el tiempo debido a que se reduce los riesgos de fallo tanto en condensadores como en toda la instalación eléctrica.

ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS

CFP	Corrección del Factor de Potencia
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
PCC	Point of common coupling
TDD	Total demand distorsion
THD	Total harmonic distorsion
UPS	Uninterruptible power supply
VFD	Variable frequency drive

ANEXO B: CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE REACTANCIAS Y FILTROS

Configuration Notes

Overview

Why use reactors and filters?

Reactors and filters

- Reduce system harmonics
- Protect and save wear and tear of the converter
- Reduce the negative effects of converter feed on the motor, such as high voltage rising edges at the motor terminals or non-sinusoidal motor currents

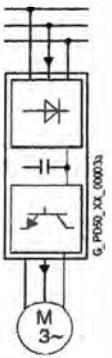
Using reactors and filters enables compliance with current standards and regulations, such as on circuit feedback.

- EN 50178
Electronic equipment for use in power installations

- EN 61000-3-2
Electromagnetic compatibility Part 3-2: Limits for harmonic current emissions
- EN 61000-2-2
Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
- EN 61800-3
Adjustable speed electrical power drive systems Part 3: EMC product standard including specific test methods
- EN 61000-3-12 (draft)
Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current < 75 A per phase and which are subject to special terminal conditions

What information do we require for the selection of components for converters?

You require the following key data of the drive for further planning:

Drive system	Ratings	Data source ¹⁾	
	System short-circuit power	$u_{K \text{ line}} = \dots \%$	P
	Voltage (phase-to-phase)	$U_{\text{line}} = \dots \text{ V}$	P
	Frequency	$f = \dots \text{ Hz}$	P
	Line current	$I_{\text{line}} = \dots \text{ A}$	U/P
	Input voltage	$U_{\text{conv}} = \dots \text{ V}$	U/P
	Rated converter output = drive power	$\approx P_{\text{motor}}$	U
	Clock frequency of the converter	$f_{\text{clock}} = \dots \text{ kHz}$	U
	Rated output current	$I_{\text{out}} = \dots \text{ A}$	U
	Motor cable length	$l_{\text{MC}} = \dots \text{ m}$ (shielded / unshielded)	P
	Motor output (rated output, P_{rat})	$P_{\text{motor}} = \dots \text{ kW}$	P
	Maximum motor frequency	$f_{\text{max}} = \dots \text{ Hz}$	P

1) The ratings can be taken or calculated from the project or plant data (P) or the converter data sheets (U).

The components used between the converter and the motor depend strongly on the following parameters: Motor cable length l_{MC} , Clock frequency f_{clock} , Motor frequency f_{max} and Operational voltage.

The output reactors and sinewave filters contained in the assignment tables are generally subject to the following generic parameters, which must not be exceeded:

- Maximum motor cable length 200 m, shielded cable
- Maximum motor cable length 300 m, unshielded cable
- Maximum motor cable cross-sections for performance class:
 - up to 2.2 kW 1.5 mm²,
 - > 2.2 kW ≤ 7.5 kW/2.5 mm²
 - > 7.5 kW ≤ 11 kW/4 mm²
 - > 11 kW ≤ 22 kW/10 mm²
 - > 22 kW ≤ 30 kW/16 mm²
 - > 30 kW ≤ 37 kW/25 mm²
 - > 37 kW ≤ 50 kW/35 mm²
 - > 50 kW ≤ 75 kW/70 mm²
- Maximum clock frequency 8 kHz
- Maximum motor frequency of output reactor 200 Hz
- Maximum motor frequency of sinewave filter 100 Hz
- U_N 3 AC 500 V +5% (+ 10% sinewave filter)

If these do not meet your requirements, customised solutions are available.

For further information contact:

E-mail: MD_Anfrage@brmr.siemens.de

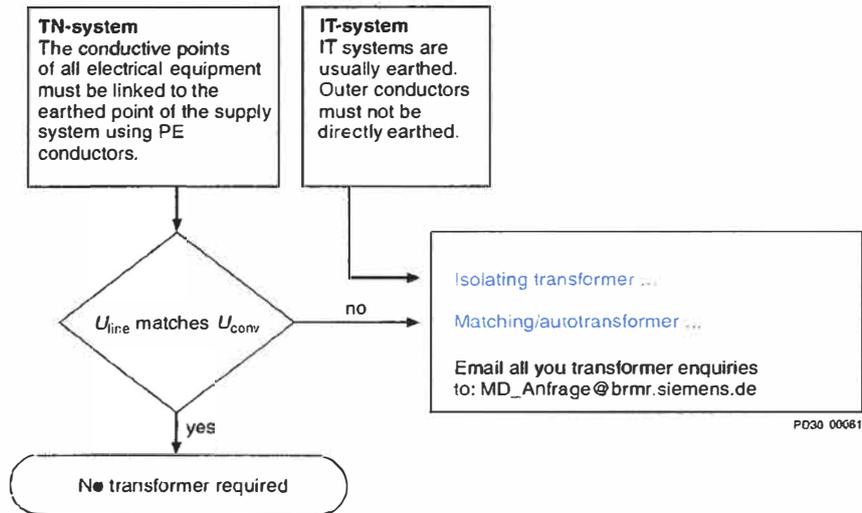
How do I choose the right components for my drive system?

- The selection of the components necessary for converters is described on the flow diagrams on the following pages.

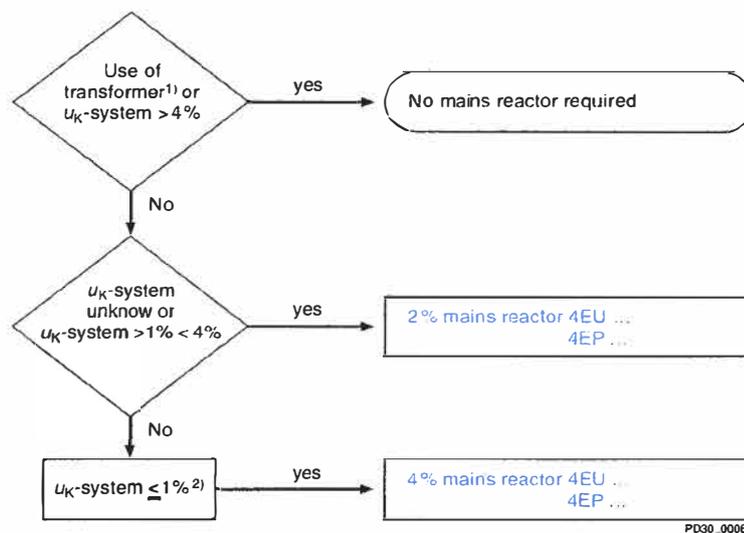
When should I use which component in the converter system?

- Components on the line-side of the frequency converter

- Line adaptation



- Mains reactors for frequency converters

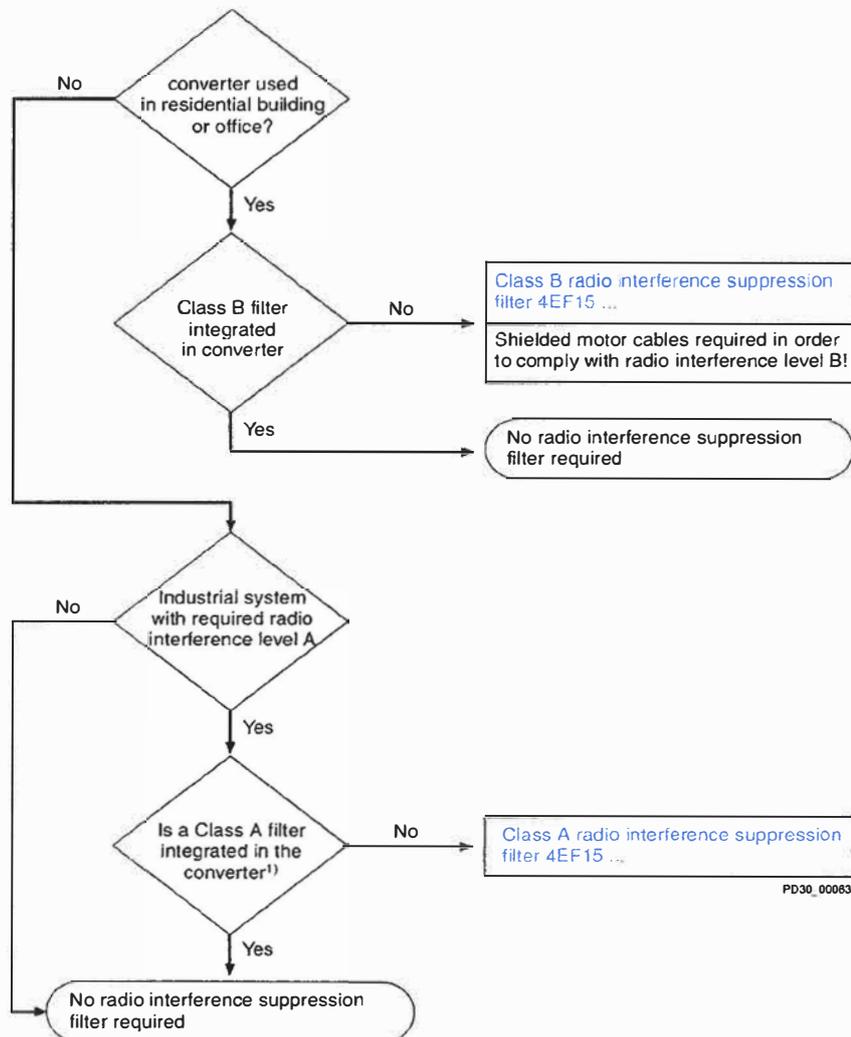


1) Transformer directly assigned to the converter. $u_{Kmin} \geq 3\%$

2) Apparent power of the upstream transformer
 $S_{trans} / P_{motor} > 100$

Configuration Notes

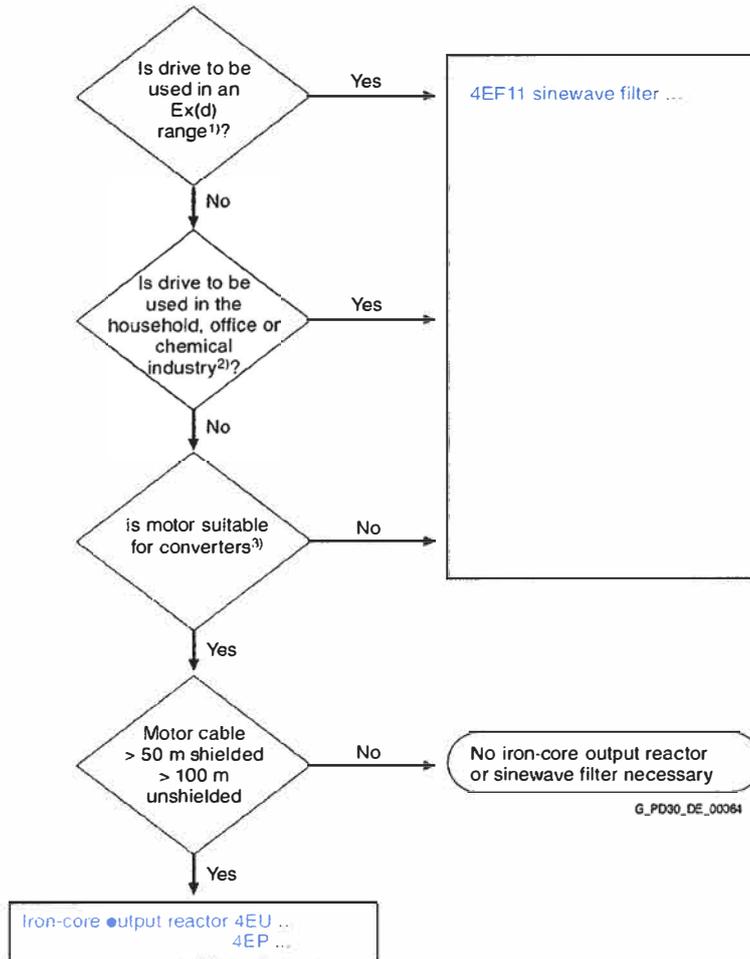
-Radio interference suppression filters



PD30_00063

1) If a Class A radio interference suppression filter is already integrated in the converter, no further Class A radio interference suppression filters may be connected upstream. This would cause a malfunction of the converter system, which, in turn could damage components or even the converter itself.

- Components on the load-side of the frequency converter
 - Selection of output reactor, sinewave filter



1) If a sinewave filter is placed upstream of the Ex(d) motor at the converter, please contact us to find out more about the operating conditions.

2) Household, office: low-noise, motor-driven, Chemistry: $dv/dt \leq 500 \text{ V}/\mu\text{s}$, total harmonic distortion < 10%

3) Siemens 1LA motors are suitable for converters. If there are no data on the dielectric properties of the motor, a sinewave filter should be used.

SIDAC Components for Converters

Configuration Notes

Which reactor and which filter is the right one for my application?

The correct reactors and filters for converters are assigned by means of assignment lists.

Sample selection with project and converter data:

System voltage 3 AC 400 V 50 Hz

30 kW asynchronous motor
at 30 kW frequency converter with $f_{\text{clock}} = 6 \text{ kHz}$,
3 AC 400 V maximum 150 Hz

Motor cable 200 m, shielded

Motor electrically loads the output of the frequency converter with 25 kW

p.f. ~ 0.75 assumed

Calculation of electrical values: values in bold print have been calculated

	$P = U_{\text{line}} \times I_{\text{out}} \times \sqrt{3} \times \text{p.f.}$	$I_{\text{line}} \approx I_{\text{out}} \times 1.1$	$I_{\text{line dr}} \approx I_{\text{out}} \times 0.9$
	Electrical load of the converter. I_{out} calculated according to conversion of the formula	Increased input current due to harmonics. Line current converter input without reactors and filters	Using the reactor reduces the line current to at least 90% of the value without reactor
Actual values	400 V x 48.1 A x $\sqrt{3}$ x 0.75 = 25 kW	48.1 A x 1.1 = 52.9 A	52.9 A x 0.9 = 47.6 A
Max. values	400 V x 57.7 A x $\sqrt{3}$ x 0.75 = 30 kW	57.7 A x 1.1 = 63.5 A	63.5 A x 0.9 = 57.2 A

Drive system	Converter data ¹⁾	Project data	Calculated	
	System short-circuit power	$u_{\text{K line}}$ -	unknown	
	Voltage (phase-to-phase)	U_{line} -	400 V	
	Frequency	f 50/60 Hz	50 Hz	
	Line current	I_{line} 63 A	-	$I_{\text{line reactor}}$ 47.6 A
	Input voltage	U_{conv} 380 ... 480 V	400 V	
	Rated converter output = drive power	P_{motor} 30 kW	-	
	Clock frequency of the converter	f_{clock} 2 ... 16 kHz	6 kHz	
	Rated output current	I_{out} 60 A 400 V 4 kHz	-	I_{out} 48.1 A
	Motor cable length	l_{MC} -	200 m	
	Motor output (rated output, P_{rel})	P_{motor} -	30 kW	
	Maximum motor frequency	f_{max} 200 Hz	150 Hz	
	Electrical load	P_{elec} -	25 kW	

1) Typical values of a standard converter, may vary from manufacturer to manufacturer.

**ANEXO C: HOJAS DE DATOS TÉCNICOS PARA SELECCIONAR REACTANCIAS Y
FILTROS**

Query

Specification sheet for customised reactors

Recipient

Magnetronic Devices
 Fax: +49 421 5125-333
 Tel: +49 421 5125-528/-616/-644
 E-mail: MD_Anfrage@brmr.siemens.de

Sender

Company: _____
 Department: _____
 Name: _____
 City: _____
 Tel: _____
 Fax: _____
 E-mail: _____

Date: _____

Application:

1-phase 3-phase

Please specify all currents and voltages as r.m.s. values!

DC reactors (smoothing/ DC-link reactors) Commutation reactors Output reactors Filter reactors

L_1 [mH]: _____	U_{Dr} [V]: _____	L_n [mH]: _____	Q_c [kvar]: _____
I_{d1} [A]: _____	u_D [%]: _____	P_{nMol} [kW]: _____	L_n [mH]: _____
L_2 [mH]: _____	I_n [A]: _____	f_{max} [Hz]: _____	$I_{n,eff}$ [A]: _____
I_{d2} [A]: _____	I_{max} [A]: _____	U_{line} [V]: _____	U_{line} [V]: _____
I_{therm} [A]: _____	U_{line} [V]: _____	f_{cock1} [Hz]: _____	f_{line} [Hz]: _____
U_{line} [V]: _____	f_{line} [Hz]: _____	I_{n1} [A]: _____	Reactance [%]: _____
Ripple	Harmonics *)	f_{cock2} [Hz]: _____	Fundamental and harmonic component
DC link	I_1 [A]: _____ f_1 [Hz]: _____	I_{n2} [A]: _____	$U_{1[%]}$ = _____ $I_{1[%]}$ = _____
<input type="checkbox"/> 300 Hz <input type="checkbox"/> _____	I_2 [A]: _____ f_2 [Hz]: _____	f_{cock3} [Hz]: _____	$U_{3[%]}$ = _____ $I_{3[%]}$ = _____
<input type="checkbox"/> 30 % <input type="checkbox"/> _____	I_3 [A]: _____ f_3 [Hz]: _____	I_{n3} [A]: _____	$U_{5[%]}$ = _____ $I_{5[%]}$ = _____
	I_4 [A]: _____ f_4 [Hz]: _____		$U_{7[%]}$ = _____ $I_{7[%]}$ = _____
	I_5 [A]: _____ f_5 [Hz]: _____		$U_{11[%]}$ = _____ $I_{11[%]}$ = _____
	*) List other currents and frequencies below		$U_{13[%]}$ = _____ $I_{13[%]}$ = _____

General Information

Ambient temperature: 40°C 55°C _____
 Operating mode: Continuous duty ON-time [%] _____
 Degree of protection: IP00 IP23 IP _____
 Design: Book size Footprint Acc. to customer specifications
 Varying load according to specifications

Please enter any alternative or supplementary data on converters and motors:

<u>Converter</u>	<u>Motor</u>
Rated power P_n [kW]: _____	P_n [kW]: _____ η : _____
$I_{nOutput}$ [A]: _____	Operating load in [%] of P_n : _____ U_N [V] = _____ I_n [A] = _____ p.f.: = _____
$U_{DC link}$ [V]: _____	M = constant
Permitted overload in [%] of $I_{nOutput}$: _____	M ~ n^2 (fan, pump)
	r.p.m.: _____
	r.p.m.operation: _____ from: _____ to: _____

Special features/comments:

Scheduled delivery date: _____ No. of items: _____ per annum/per order Target price: _____

Documents: Dimensional drawings Load cycle Electrical data of drive _____

Specification sheet for customised smoothing reactors, selectable inductance and current

Recipient

Magnetronic Devices
 Fax: +49 421 5125-333
 Tel: +49 421 5125-528/-616/-644
 E-mail: MD_Anfrage@brmr.siemens.de

Sender

Date: _____
 Company: _____
 Department: _____
 Name: _____
 City: _____
 Tel: _____
 Fax: _____
 E-mail: _____

Application:

Smoothing reactors with selectable inductance and current

Please specify all currents and voltages as r.m.s. values!

	Iron-core smoothing reactors $I_x = I_{dn} \quad L_x = L_0$	Iron-core smoothing reactors $I_x > I_{dn} \quad L_x \leq L_0$	Smoothing air-core reactors
Rated direct current I_{dn} [A]			
Inductance [mH] for I_{dn}		_____	
Inductance L_x [mH] for $I_x (I_{max})$	_____		_____
Inductance L_0 [mH] for $I_d = 0A$	_____		_____
Connection of converter			
No-load voltage of converter U_{di} [V]			
Line frequency f [Hz]			
Ambient temperature			
Additional information ¹⁾	mandatory	mandatory	mandatory

1) If you have any special requirements with regard to degree of soiling, reference voltage for the rating of insulation, etc., please enter in the Comments box

Special features/comments:

Scheduled delivery date: _____ No. of items: _____ per annum/per order Target price: _____

Documents: Dimensional drawings Load cycle Electrical data of drive _____

Query

Specification sheet for customised radio interference suppression filters

Recipient

Magnetronic Devices
Fax: +49 421 5125-333
Tel: +49 421 5125-528/-616/-644
E-mail: MD_Anfrage@brmr.siemens.de

Sender

Company: _____
Department: _____
Name: _____
City: _____
Tel: _____
Fax: _____
E-mail: _____

Date: _____

Application:

Please specify currents and voltages as r.m.s. values!

Radio interference suppression filters DIN EN 133200

P_{nFu} [kW]: _____
 I_n [A]: _____
 U_{line} [V]: _____
 I_{deriv} [mA]: _____
 f_{line} [Hz]: _____

Adherence to interference level:

- A Industry, DIN EN 50081-2 "Second environment"
 B Living and business, DIN EN 50081-1 "First environment"

Optional

Commutation reactors:

$u_D = 2\%$ $u_D = 4\%$ $u_D = \text{---}\%$

Optional

Output reactors:

f_{max} [Hz]: _____ f_{clock} [Hz]: _____

Maximum desired length of motor supply cable [m]:

Shielded cable Unshielded cable Cable type = _____
Capacitance if known: L' [mI/m] = _____ C' [nF/m] = _____

General Information:

Ambient temperature:

- 40°C 55°C

Operating mode:

- Continuous duty ON-time [%] _____
 IP _____

Varying load according to specifications

Degree of protection:

- IP00 IP23
 IP _____

Design:

- Book size
 Footprint
 Acc. to customer specifications

Please enter any alternative or supplementary data on converters and motors:

Converters

Rated power P_n [kW]: _____
 $I_{noutput}$ [A]: _____
 $U_{DC link}$ [V]: _____
Permitted overload in [%] of $I_{noutput}$: _____

Motor

P_n [kW]: _____ η : _____
Operating load in [%] of P_n : _____ U_n [V]: _____ I_n [A]: _____ p. f.: _____
M = constant
M ~ n^2 (fan, pump)
r.p.m.: _____
r.p.m. operation: _____ from: _____ to: _____

Special features/comments:

Scheduled delivery date: _____ No. of items: _____ per annum/per order Target price: _____

Documents: Dimensional drawings Load cycle Electrical data of drive _____

Recipient

Magnetronic Devices
 Fax: +49 421 5125-333
 Tel: +49 421 5125-528/-616/-644
 E-mail: MD_Anfrage@brmr.siemens.de

Sender

Date: _____

Company: _____
 Department: _____
 Name: _____
 City: _____
 Tel: _____
 Fax: _____
 E-mail: _____

Application:

Please specify currents and voltages as r.m.s. values!

dv/dt filters

P_{nFu} [kW]: _____
 I_n [A]: _____
 U_{sys} [V]: _____
 f_{max} [Hz]: _____
 f_{clock} [Hz]: _____

Maximum desired length of motor supply cable [m]:

Shielded cable Unshielded cable Cable type = _____
 Capacitance if known: L' [mH/m]= _____ C' [nF/m] = _____

General Information

Ambient temperature:	Operating mode:	Degree of protection:	Design:
<input type="checkbox"/> 40°C <input type="checkbox"/> 55°C	<input type="checkbox"/> Continuous duty	<input type="checkbox"/> IP00 <input type="checkbox"/> IP23	<input type="checkbox"/> Book size
<input type="checkbox"/> _____	<input type="checkbox"/> ON-time [%] _____	<input type="checkbox"/> IP _____	<input type="checkbox"/> Footprint
	Varying load according to specifications		<input type="checkbox"/> Acc. to customer specifications

Please enter any alternative or supplementary data on converters and motors:

<u>Converters</u>	<u>Motor</u>
Rated power P_n [kW]: _____	P_n [kW]: _____ η : _____
$I_{nOutput}$ [A]: _____	Operating load in [%] of P_n : _____ U_n [V]: _____ I_n [A]: _____ p. f.: _____
$U_{DC link}$ [V]: _____	M = constant
Permitted overload in [%] of $I_{nOutput}$: _____	M ~ n^2 (fan, pump)
	r.p.m.: _____
	r.p.m. operation: _____ from: _____ to: _____

Special features/comments:

Scheduled delivery date: _____ No. of items: _____ per annum/per order Target price: _____

Documents: Dimensional drawings Load cycle Electrical data of drive _____

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Energía y Minas, "Libro de eficiencia energética", Perú, 1999
- [2] Elecond Capacitadores S.A., "Armónicas y Corrección del Factor de Potencia", Argentina, <http://www.elecond.com.ar/pdf/armonicas.pdf>
- [3] Schneider Electric, "Manual Teórico Práctico Baja Tensión", España, 2008
- [4] Epcos AG, "Power Quality Solutions", Alemania, 2009
- [5] IEEE Standards Board, "IEEE Std 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", E.E.U.U., 1993
- [6] Siemens AG, "SIDAC Reactors and filters", Automation and Drives - Alemania, 2005