

Introducción

Desde principios de los 90, el concepto de “*calidad de potencia*” ha ido ganando cada vez más notoriedad dentro del ámbito de la Ingeniería Eléctrica, y hoy día, se ha convertido en una cuestión de sumo interés tanto para las compañías productoras y distribuidoras, como para los fabricantes de equipos y los consumidores finales.

Aunque el término “*calidad de potencia*” resulta familiar entre los ingenieros eléctricos, su uso no está exento de críticas, ya que no se puede hablar de la calidad de una magnitud física como es la potencia.

En el IEEE (IEEE – *Institute for Electrical and Electronics Engineers*), el término *calidad de potencia* ha ganado un estatus oficial, como lo refleja el comité IEEE SCC22 (IEEE SCC-22 – *IEEE Standards Coordinating Committee on Power Quality*), el cual coordina las necesidades de estandarización en este área [1.1]. El diccionario del IEEE [1.2], basándose en el estándar IEEE 1100-1999 [1.3], ofrece la siguiente definición para este término:

“La calidad de potencia es el concepto de alimentación y puesta a tierra de un equipo sensible en la manera apropiada para la operación de aquel equipo.”

A pesar de que esta definición resulta algo restrictiva, el IEEE utiliza el concepto de *calidad de potencia* de una manera más general, y el SCC-22 también cubre los estándares relacionados con la polución armónica creada por las cargas [1.4].

Por otro lado, el organismo internacional para el desarrollo de normativa en Ingeniería Eléctrica, el IEC (IEC – *International Electrotechnical Commission*), no suele hablar de *calidad de potencia* en sus estándares, y en su lugar utiliza el término “*compatibilidad electromagnética, EMC*” (EMC – *Electro-Magnetic Compatibility*). Aunque el significado de ambos términos es diferente, existe un marcado solapamiento entre ellos.

En el estándar IEC 61000-1-1 [1.5] se ofrece la siguiente definición de *EMC*:

“La compatibilidad electromagnética es la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético, sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables a ningún otro dentro de aquel entorno.”

Esta última definición refleja que el correcto funcionamiento de los sistemas de potencia no sólo depende de la calidad de la tensión suministrada desde el lado de fuente, sino que también es necesario tener en cuenta la calidad de las corrientes solicitadas por la carga.

En [1.6], a partir de un extracto de la nomenclatura utilizada en las publicaciones técnicas, se propone la siguiente terminología:

- ✓ *Calidad de tensión.* Está relacionada con las desviaciones de la tensión respecto a la ideal. La tensión ideal en un sistema trifásico consiste en tres sinusoides equilibradas de secuencia positiva con magnitud y frecuencia constante. La calidad de tensión puede ser interpretada como la calidad del producto ofrecido por la compañía suministradora a los consumidores.
- ✓ *Calidad de corriente.* Es complementaria a la definición anterior, y está relacionada con las desviaciones de la corriente respecto a la ideal. Nuevamente, la corriente ideal de un sistema trifásico sería aquella constituida por tres sinusoides equilibradas de secuencia positiva con magnitud y frecuencia constante, existiendo el requisito adicional de que dichas sinusoides deberían estar en fase con las de las tensiones de red. Por tanto, la calidad de corriente tiene que ver con la forma en que el consumidor adquiere el producto suministrado por la compañía.
- ✓ *Calidad de potencia.* Es la combinación de la calidad de tensión y la calidad de corriente. Por tanto la calidad de potencia está relacionada con las desviaciones de la tensión y/o corriente respecto a las de la situación ideal. Hay que resaltar que calidad de potencia no tiene nada que ver con la desviación de la potencia instantánea suministrada o consumida respecto a una hipotética potencia ideal.
- ✓ *Calidad de suministro.* Está relacionada tanto con aspectos técnicos, ligados principalmente a la fiabilidad del suministro (duración y número de cortes, interrupciones y paradas), como con aspectos no técnicos, relacionados con la calidad del servicio al cliente. La calidad de suministro delimita perfectamente las responsabilidades de la compañía suministradora. En España estas responsabilidades vienen reguladas por el Real Decreto 1955/2000 [1.7].
- ✓ *Calidad de consumo.* Es complementaria a la definición anterior, y también presenta aspectos técnicos, ligados principalmente con la variación e interrupción del consumo, y no técnicos, relacionados con la relación contractual suministrador-cliente. La calidad de consumo cualifica a los clientes a la hora de analizar la rentabilidad de las inversiones y de la actividad económica desempeñada por la compañía suministradora.

1.1. El creciente interés en la calidad de potencia

El hecho de que la calidad de potencia haya pasado a ser un tema de emergente interés entre los ingenieros eléctricos, no significa que no fuese importante en el pasado. Los armónicos de tensión y corriente se convirtieron en una cuestión tangible en el momento en que se energizó el primer sistema de potencia de corriente alterna. Las formas de onda de tensión de los primeros generadores distaban mucho de ser perfectamente sinusoidales, y desde el principio, los efectos de los armónicos desconcertaron y atormentaron a los encargados de controlar y mantener dichos sistemas, a la vez que desafiaron y deleitaron a ingenieros y matemáticos [1.8].

En 1881, *Gaulard y Gibbs* patentaron el concepto de un sistema de transmisión en corriente alterna [1.9], y en 1891, *Westinghouse* instaló uno de los primeros sistemas de transmisión monofásicos comerciales en corriente alterna [1.10], el cual poseía dos máquinas síncronas idénticas, una actuando como generador, y la otra como motor. El hecho de que los diseñadores de este sistema eligiesen dos máquinas gemelas no fue fortuito, ya que eran conscientes de los problemas que aparecían cuando la forma de la tensión inducida de ambas máquinas era diferente. En 1884, *Hopkinson* resolvió y explicó el problema, indicando que la sincronización y operación estable de alternadores en paralelo sólo era posible cuando las tensiones de salida de éstos tenían la misma frecuencia, la misma polaridad (secuencia de fases) y formas de onda prácticamente idénticas [1.11].

Un efecto aún más sorprendente, causado por las tensiones alternas distorsionadas, era la misteriosa aparición de valores de tensión superiores a los que existían en los terminales del generador. En 1893, *Steinmetz* describió el fenómeno de la resonancia eléctrica, y realizó los cálculos y comprobaciones pertinentes sobre una línea de transmisión real [1.12].

Uno de los primeros documentos que utiliza el término “*armónicos*”, en el contexto de las series de *Fourier* aplicadas a sistemas eléctricos, fue escrito en 1894 por *Houston y Kennelly* [1.8]. Este documento describe, de una manera concisa, y sin el uso de ecuaciones, las propiedades básicas de las ondas periódicas distorsionadas, y en él se presentan conceptos revolucionarios para su tiempo, como son el incremento de las pérdidas en las máquinas eléctricas a consecuencia de los armónicos, o el origen de la resonancia eléctrica cuando las ondas de corriente se encontraban distorsionadas.

Estas breves referencias históricas deben resultar suficientes como para justificar que el área que hoy día apasiona a investigadores e ingenieros eléctricos, la *calidad de potencia*, encuentra sus orígenes en un pequeño grupo de ingenieros, los cuales, armados únicamente con tablas logarítmicas y con primitivos instrumentos de medida, pero con una curiosidad, intuición y perseverancia dignas de elogio, consiguieron comprender con detalle una serie de conceptos que durante décadas fueron considerados un capítulo oscuro y prohibido de la Ingeniería Eléctrica.

Una de las primeras menciones conocidas del término “*calidad de potencia*” data de una publicación de 1968 [1.13]. Este artículo ofrece una remarcable revisión de conceptos en el terreno de la calidad de potencia, incluyendo el uso de equipos de monitorización. Poco después, aparecieron varias publicaciones que utilizan este concepto en sistemas aeronáuticos [1.14][1.15]. Ya en 1970, los conceptos de “*alta calidad de potencia*”, “*seguridad*”, “*fiabilidad de servicio*” y “*bajo coste de instalación y operación*”, pasaron a formar parte de los objetivos en el diseño de los modernos sistemas de potencia [1.16].

Para mostrar el creciente interés en la calidad de potencia, se ha realizado una búsqueda de referencias en la base de datos *IEEE Xplore* [1.17] utilizando “*power quality*” como clave de búsqueda en revistas especializadas, actas y estándares. En la Tabla 1.1 se muestran el número de referencias encontradas para los diferentes periodos de búsqueda.

Periodo	Nº de referencias
Antes de 1988	<i>no disponibles</i>
1988-1990	34
1991-1995	232
1996-2000	952
2001-2004	1164

Tabla 1.1. Referencias al término “*power quality*” en el *IEEE Xplore*.

La atención despertada por la calidad de potencia en los últimos años tiene su origen en factores tecnológicos y coyunturales. Sin intentar realizar una clasificación de la importancia de dichos factores, a continuación se enumeran los más relevantes:

- ✓ **Los equipos son más sensibles a las perturbaciones.** Los equipos de control basados en microprocesadores y los sistemas electrónicos de potencia son más sensibles a las perturbaciones que sus antecesores de hace 10 o 20 años. El artículo usualmente citado por haber introducido el término de “*calidad de potencia*” [1.18] trataba el incremento de sensibilidad los ordenadores ante perturbaciones de la tensión. Además, cuanto más sofisticado es un equipo, mayores suelen ser las consecuencias económicas de las anomalías en su funcionamiento.
- ✓ **Los equipos causan más perturbaciones.** Los modernos sistemas basados en electrónica de potencia no sólo resultan sensibles a una mala calidad de tensión, sino que también causan perturbaciones que afectan al resto de los consumidores. El creciente énfasis en conseguir sistemas de mayor eficiencia y mejores prestaciones ha dado lugar a un desmesurado crecimiento de los equipos alimentados o accionados mediante convertidores estáticos de potencia. En una previsión realizada por el EPRI (EPRI – *Electric Power Research Institute*), se estimaba que en el año 2000, un 60% de la energía eléctrica consumida sería procesada mediante convertidores estáticos [1.19]. Estos convertidores absorben corrientes no-sinusoidales, o lo que es lo mismo inyectan armónicos de corriente en la red, lo cual da lugar a una serie de

efectos nocivos en el sistema de potencia. Estos efectos se comentan con más detalle en el Apartado 1.3. Dentro de este grupo de sistemas electrónicos de potencia, los equipos que más proliferan son los rectificadores (controlados o no controlados), las fuentes de alimentación interrumpida, los variadores de velocidad, las reactancias electrónicas y las fuentes de alimentación conmutadas. Aunque la acción individual de cada uno de estos equipos no provoca unos niveles alarmantes de corrientes armónicas, la acción conjunta de todos ellos causa una seria distorsión en la tensión de alimentación. En emplazamientos específicos pueden existir sistemas que inyectan elevados niveles de corrientes armónicas en la red, creando individualmente distorsión en la tensión del sistema de potencia. Entre estos equipos se encuentran los grupos de lámparas de descarga, las máquinas de soldadura por puntos, las fundiciones por arco, los hornos de inducción y los dispositivos de corte con plasma [1.20].

- ✓ **Necesidad de reglamentación.** En el pasado, las compañías suministradoras trataban a los consumidores de energía eléctrica como “*cargas*”. Las interrupciones y otras perturbaciones en la tensión formaban parte de este trato, y eran las compañías suministradoras la que decidían aquello que debía ser mejorado en cada momento. La Directiva Europea 85/374/EC [1.21] catalogó a la Electricidad como un producto, y sus productores-suministradores quedaban sujetos a las responsabilidades asociadas a los daños causados por un producto defectuoso. Hoy día, esto ha desembocado en que los consumidores sean tratados como “*clientes*”, a los que se les suministra un producto con unas determinadas características, las cuales deben ser medidas, predichas, garantizadas, mejoradas, etc. Por este motivo, se hace necesaria toda una reglamentación que regule las características de dicho producto, la forma en que el mismo debe ser adquirido por el consumidor, y las responsabilidades de cada una de las partes.
- ✓ **La liberalización del mercado eléctrico aumenta la competitividad.** Son muchos los gobiernos de todo el mundo que han revisado las leyes reguladoras del mercado eléctrico en pos de conseguir una mayor competitividad en el mismo [1.22]. El hecho de poder seleccionar el agente comercializador que suministrará finalmente la energía, y la existencia de una relación contractual particularizada con el agente distribuidor, ha dado lugar a que la calidad en el suministro de energía eléctrica se convierta en un factor diferenciador entre las distintas compañías, lo que ha incentivado el aumento de atención sobre esta cuestión.
- ✓ **La desregulación del mercado ha complicado el problema de la calidad de potencia.** En muchas áreas geográficas, la desregulación ha dado lugar a que el control del flujo de energía eléctrica, desde el productor hasta el usuario final, no quede rigurosamente coordinado. Mientras que los organismos reguladores pueden cambiar las leyes que

determinan el flujo del dinero, las leyes físicas que determinan el flujo de la energía no pueden ser alteradas. Por este motivo, para evitar un deterioro en la calidad de potencia de los consumidores, los organismos reguladores han tenido que expandir su política más allá del control de los tradicionales índices de fiabilidad, incentivando económicamente a las compañías de transmisión y distribución para que generen informes completos acerca de la calidad de potencia.

- ✓ **Los sistemas de generación distribuida modifican la topología del sistema de potencia.** En una concepción tradicional, los conductores de un sistema de distribución transportan la energía eléctrica desde una fuente hacia múltiples cargas. En Europa, la política de promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovable establece que, en el horizonte del 2010, el 22,1% de la energía eléctrica consumida por la Comunidad debe provenir de este tipo de fuentes [1.23]. En el terreno de la calidad de potencia, esta política da lugar a nuevos temas de estudio relacionados con la existencia de múltiples fuentes de baja potencia dispersas a lo largo del sistema de distribución.
- ✓ **La globalización evidencia las diferencias en la calidad de potencia.** La globalización de la industria ha aumentado la conciencia acerca de las diferencias existentes en la calidad de la potencia en distintos países. Las multinacionales implantan sus factorías en nuevas áreas geográficas, y súbitamente, se encuentran con problemas inesperados en el suministro eléctrico debidos a la existencia de sistemas de potencia más débiles, o circunstancias climáticas. Las interrupciones de larga duración en el suministro eléctrico son relativamente inusuales en los países industrializados (Europa, América del Norte y Asia del Este), y el consumidor tiene la errónea impresión de que la electricidad es algo que siempre está disponible, y que siempre es de alta calidad, o que al menos así debería de ser. Sin embargo, los esfuerzos para controlar los índices de calidad de potencia no han sido iguales en todo el Mundo. Los requisitos energéticos impuestos por las multinacionales para mantener los nuevos emplazamientos de sus plantas de producción han dado lugar a que, en determinadas regiones, como pueden ser ciertos puntos del sureste asiático, la calidad de potencia haya pasado a ser una cuestión de crucial importancia en el desarrollo económico.

1.2. Clasificación de las perturbaciones en la tensión y en la corriente

Un problema de calidad de potencia se puede entender como una perturbación que hace que la tensión, o corriente, del sistema difiera de su apariencia ideal. Sin embargo, es necesario disponer de una catalogación más detallada de dichas perturbaciones para poder clasificar sus medidas y describir cada fenómeno electromagnético que provoca problemas en la calidad de potencia.

En base a su espectro armónico, a su duración y a su amplitud, los fenómenos electromagnéticos que provocan las perturbaciones en la calidad de potencia se pueden catalogar como sigue [1.24][1.25][1.26]:

1. **Transitorios.** Son variaciones de muy corta duración en las tensiones o corrientes del sistema, y pueden ser clasificados en dos categorías:
 - 1.1. **Impulsionales.** Correspondientes a respuestas sobreamortiguadas que duran desde algunas decenas de nanosegundos hasta algunos milisegundos. Un ejemplo típico de esta perturbación es la corriente impulsional provocada por el impacto de un rayo.
 - 1.2. **Oscilantes.** Correspondientes a respuestas subamortiguadas que duran desde algunos microsegundos hasta algunas decenas de milisegundos, y cuyas frecuencias abarcan desde algunos centenares de hertzios hasta algunos megahertzios. Un ejemplo típico de esta perturbación son las oscilaciones transitorias de tensión y corriente que aparecen en la carga inicial de bancos de condensadores.
2. **Variaciones de corta duración.** Están ligadas con variaciones de corta duración en la tensión, y son causadas por fallas en las líneas, por las elevadas corrientes de energización de grandes cargas, o por fallos en las conexiones del sistema. Según su duración se clasifican en:
 - 2.1. **Interrupciones.** Consisten en descensos de la tensión por debajo de un 10% de su valor nominal, con una duración que no excede el minuto (tres minutos en España [1.7]). A estas perturbaciones también se les conoce como “microcortes”. Las interrupciones de corta duración pueden ser causadas por faltas en el sistema de potencia, por fallos en la aparamenta, o por disfunciones en el control. Generalmente, la duración de las interrupciones debidas a faltas en el sistema viene determinada por el tiempo de respuesta y rearme de las protecciones. El rearme instantáneo generalmente limitará la duración de la interrupción causada por una falta no permanente a menos de 30 ciclos. El rearme retardado extenderá la duración de la interrupción.
 - 2.2. **Huecos.** Son descensos de la tensión entre un 90% y un 10% de su valor nominal, con una duración que abarca desde medio ciclo hasta un minuto. En el ámbito de IEEE, este tipo de fenómenos son conocidos como “sags”, y en el ámbito del IEC como “dips”. Los huecos son usualmente asociados a cortocircuitos en las líneas, a la energización de grandes cargas, o al arranque de grandes motores. Cuando el hueco es debido a un cortocircuito, el tiempo de respuesta de la protección de sobrecorriente limita la duración del mismo a un periodo comprendido entre 3 y 30 ciclos. Un hueco debido al arranque de grandes motores puede durar varios segundos.
 - 2.3. **Sobretensiones momentáneas.** Se trata de subidas de la tensión entre un 110% y un 180% de su valor nominal, con una duración que abarca desde medio ciclo hasta un minuto. En la literatura anglosajona, la sobretensión momentánea es conocida como “swell”. Estas

sobretensiones momentáneas son usualmente asociadas a fallas en el sistema, aunque no son tan frecuentes como los huecos. Un ejemplo de este tipo de fenómeno sería la sobretensión que aparece en las fases “sanas” cuando se produce un cortocircuito monofásico a tierra.

3. **Variaciones de larga duración.** Están ligadas con variaciones en la tensión que duran más de un minuto. Generalmente, estas variaciones no son debidas a fallas en las líneas, sino que suelen estar originadas por las variaciones de carga y por operaciones de reconexión en el sistema.
 - 3.1. **Sobretensiones.** Consisten en subidas de la tensión más allá del 110% de su valor nominal durante más de un minuto. Las sobretensiones suelen ser debidas a la desconexión de grandes cargas, o a fallos en la regulación de la tensión.
 - 3.2. **Subtensiones.** Son bajadas de la tensión más allá del 90% de su valor nominal durante más de un minuto. Las subtensiones, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, suelen aparecer en la conexión de grandes cargas, o en la energización de bancos de condensadores, y se mantienen hasta que el sistema de regulación lleva la tensión a su nivel de referencia.
 - 3.3. **Interrupciones mantenidas.** Son cortes absolutos de la alimentación durante periodos de tiempo superiores a un minuto. Este tipo de perturbaciones de suelen producir cuando la restauración del sistema requiere de la intervención humana (generalmente para su reparación).
4. **Desequilibrio de tensión.** Está ligado a la aparición de componentes de secuencia negativa y/o homopolar de frecuencia fundamental en las tensiones de red. Este tipo de perturbaciones suelen deberse a la conexión de cargas monofásicas en sistema trifásicos, o a la desconexión de una fase en un banco de condensadores (posiblemente por que se funda un fusible).
5. **Distorsión de las formas de onda.** Se da cuando los efectos de los armónicos dan lugar a que la forma de onda de tensión o corriente de régimen permanente difiera de la puramente sinusoidal. En general, existen cinco tipos elementales de distorsión de la forma de onda, que son:
 - 5.1. **Armónicos.** Son tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental. La combinación de los armónicos y de la senoide de frecuencia fundamental da lugar a formas de onda distorsionadas. Generalmente, las carga no lineales dan lugar a la inyección de armónicos de corriente, los cuales, al circular por el sistema de potencia, dan lugar a distorsión armónica en las tensiones.
 - 5.2. **Interarmónicos.** Son componentes armónicas de la tensión o de la corriente, cuya frecuencia no es un múltiplo entero de la fundamental. Los interarmónicos pueden presentarse a frecuencias discretas, o distribuidos a lo largo de una determinada banda del espectro. Las principales fuentes generadoras de interarmónicos son los convertidores

- estáticos de frecuencia, los cicloconvertidores, los hornos de inducción y los dispositivos generadores de arco eléctrico.
- 5.3. **Microcortes.** Son huecos estrechos, que aparecen periódicamente en la forma de onda de la tensión como consecuencia de la conmutación de la corriente entre las fases de los convertidores estáticos conectados en la red. En la literatura anglosajona, este fenómeno es conocido como “*notch*”. La duración de estos *notches* suele ser de algunas centenas de microsegundos, y generalmente son provocados por la conmutación de los rectificadores controlados y no controlados.
 - 5.4. **Componentes de continua.** Consisten en la aparición de componente de continua en las formas de onda de tensión o corriente. Estas componentes continuas pueden ser originadas a perturbaciones geomagnéticas o a asimetrías en los convertidores estáticos de potencia.
 - 5.5. **Ruido de alta frecuencia.** Son señales indeseables con un espectro armónico disperso, cuya frecuencia suele ser inferior a 200kHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente, y suelen estar originadas por sistemas electrónicos de potencia.
6. **Fluctuaciones de la tensión.** Son variaciones asimétricas de la envolvente de la tensión, las cuales pueden ser continuas o aleatorias. Las cargas que provocan variaciones continuas y rápidas en la corriente pueden causar fluctuaciones en la tensión, que a menudo son conocidas como “*flicker de tensión*”.
 7. **Variaciones de frecuencia.** Consisten en desviaciones de la frecuencia fundamental del sistema de potencia respecto de su valor nominal. Estas variaciones de frecuencia suelen ser debidas a desequilibrios bruscos entre la producción y la carga, y son más importantes en sistemas débiles o aislados.

Una vez presentados los conceptos fundamentales referentes a la calidad de potencia, centraremos nuestra atención en el estudio de los efectos, causas y medidas de mitigación de los armónicos de corriente, los cuales delimitan el ámbito de este trabajo de Tesis.

1.3. Efectos y origen de los armónicos de corriente

Hoy en día, las tensiones en la cabecera de los sistemas de potencia (a la salida de los generadores) pueden ser consideradas como sinusoides perfectas y equilibradas. De hecho, las tensiones existentes en la mayoría de los sistemas de transmisión presentan una distorsión inferior al 1%. No obstante, la distorsión de estas formas de onda de tensión se incrementa a medida que nos aproximamos a las cargas finales del sistema. La forma de onda de la corriente solicitada por determinadas cargas dista mucho de ser sinusoidal, lo cual da lugar a una serie de efectos que desembocan en la distorsión de la tensión anteriormente mencionada.

A pesar de que en determinadas ocasiones las formas de onda de corriente pueden considerarse aleatorias, en la mayoría de los casos exhiben un carácter eminentemente periódico, con lo que es posible su descomposición armónica mediante series de *Fourier*. En el diseño convencional de los sistemas de potencia, se supone la existencia de formas de onda sinusoidales de frecuencia fundamental, por lo que la circulación de corrientes armónicas en dichos sistemas atenta contra diferentes reglas de funcionamiento de los mismos.

Para explicar someramente la relación entre los armónicos de tensión y de corriente, consideremos el sistema de potencia simplificado de la Figura 1.1. Los sistemas de potencia son principalmente inductivos a frecuencia fundamental, despreciándose normalmente los efectos capacitivos de las líneas de distribución, y su impedancia equivalente es conocida como *impedancia de cortocircuito* (Z_S). Cuando los armónicos de corriente generados por alguna carga (en este caso L_1 y L_2) circulan a través de esta impedancia, se produce una caída de tensión en la misma, y como resultado, aparece distorsión en la tensión del punto de acople común con el resto de cargas del sistema (PCC – *Point of Common Coupling*).

Aunque las corrientes armónicas de la carga sean finalmente las responsables de la distorsión de la tensión, una carga individual no puede controlar dicha distorsión, ya que también depende de las corrientes solicitadas por el resto de cargas y de la impedancia del sistema de potencia. Es más, una misma carga provocará diferentes niveles de distorsión en la tensión en función de su punto de conexión dentro del sistema de potencia. El reconocimiento de esta circunstancia da lugar a la división de las responsabilidades en el control de la distorsión armónica. El estándar IEEE 519-1992 [1.27], que establece una serie de recomendaciones y requisitos en el control de los armónicos en sistemas eléctricos de potencia, especifica lo siguiente:

- i) El control sobre la cantidad de armónicos de corriente inyectados en el sistema tendrá lugar en el punto final de consumo.
- ii) Si se asume que la inyección de armónicos de corriente se encuentra dentro de unos límites razonables, el control sobre la distorsión de tensión será ejercido por la entidad que tiene el control sobre la impedancia del sistema, la cual generalmente es la compañía suministradora.

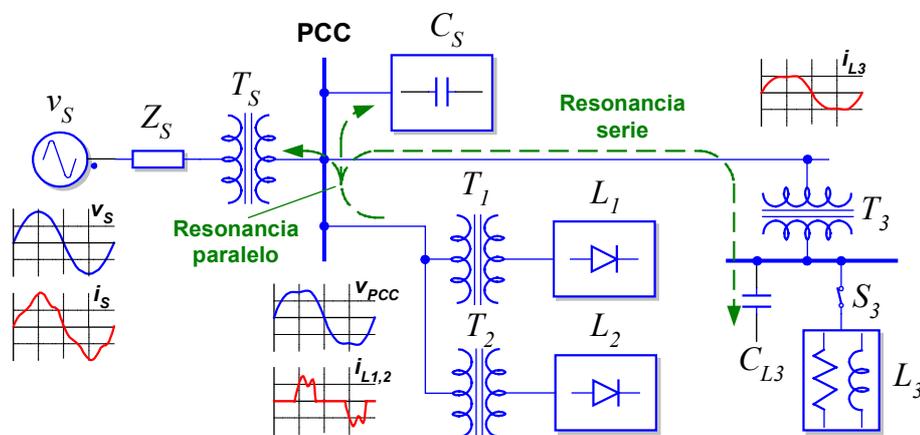


Figura 1.1. Distorsión de tensión debida al flujo de armónicos de corriente.

Cuando en el sistema de potencia se insertan bancos de condensadores, ya sea en el lado del consumidor para corregir el factor de potencia (C_{L3}), o en el embarrado de la subestación para controlar el nivel de tensión (C_S), la impedancia de cortocircuito pasa a ser un parámetro decisivo en el análisis de la respuesta frecuencial del sistema resultante. En si misma, la inserción de condensadores en el sistema de potencia no genera armónicos, sin embargo su presencia puede ocasionar situaciones de severa distorsión. Como es sabido, los circuitos que contienen múltiples condensadores e inductancias presentan más de una frecuencia natural de resonancia. En un sistema de potencia, cuando una de esas frecuencias de resonancia coincide con alguna de las frecuencias de los armónicos de tensión o corriente, se puede desencadenar una situación de resonancia, y las tensiones y corrientes a esa frecuencia pueden alcanzar valores peligrosamente elevados. Esta es la raíz de la mayoría de los problemas relacionados con la distorsión armónica en sistemas de potencia.

Las situaciones de resonancia resultan más acuciadas en condiciones de baja carga en el sistema. Si en un caso extremo consideramos que el interruptor S_3 de la Figura 1.1 se encuentra abierto, nos podríamos encontrar con dos tipos de resonancias. La combinación paralelo de Z_S+Z_{TS} , C_S y $Z_{T3}+C_{L3}$ podría dar lugar a un circuito “tapón” para una determinada frecuencia armónica, la cual podría coincidir con alguna de las frecuencias de las corrientes armónicas inyectadas por las cargas L_1 y L_2 . Esto se traduciría en una elevada tensión en el PCC. De la misma forma, la frecuencia natural de resonancia de la impedancia serie $Z_{T3}+C_{L3}$ podría dar lugar a un circuito “trampa” para alguna de las frecuencias armónicas de las corrientes inyectadas por L_1 y L_2 . Esto se traduciría en una elevada tensión en el embarrado de alimentación de la carga L_3 .

Un análisis detallado de los fenómenos de resonancia en sistemas de potencia escapa del objetivo de este trabajo, existiendo publicaciones donde esta cuestión queda perfectamente cubierta [1.26], por este motivo, a continuación se procederá a enumerar, de manera descriptiva, los principales efectos que producen los armónicos de corriente sobre el sistema de potencia, sobre la aparamenta, y sobre el resto de cargas en él conectadas.

1.3.1. Efectos de los armónicos de corriente en sistemas de potencia

Seguidamente se detallan los efectos más importantes de los armónicos de corriente sobre el sistema de potencia y sobre los equipos conectados al mismo.

- i)* La circulación de armónicos de corriente por las líneas de transporte y distribución da lugar a la aparición de caídas de tensión armónicas en las impedancias de éstas, lo que se traducirá en la existencia de tensiones armónicas en los embarrados.
- ii)* En los conductores, los armónicos de corriente generan un incremento de las pérdidas por efecto *Joule*. Hay que destacar que las corrientes de alta

frecuencia, debido al efecto pelicular, sólo circulan por la superficie de los conductores, concentrando el calentamiento en esas zonas.

- iii)* En el sistema de potencia, los armónicos provocan resonancias serie y paralelo entre las impedancias propias del sistema y los elementos capacitivos conectados al mismo (generalmente bancos de compensación de reactiva y filtros pasivos), lo que puede dar lugar a la aparición de tensiones excesivas en los embarrados, y a la circulación de corrientes elevadas por los condensadores.
- iv)* En los bancos de condensadores, la existencia de tensiones armónicas en la red da lugar a la circulación de corrientes armónicas en los mismos. Aunque no aparezcan resonancias, la circulación de una corriente excesiva por los bancos de condensadores aumentará el calentamiento, provocará fallos de aislamiento, y disminuirá la vida útil de los mismos.
- v)* En transformadores y reactancias, los armónicos de corriente aumentarán las pérdidas en el cobre, mientras que los armónicos de tensión aumentarán las pérdidas en el hierro, incrementándose estas últimas aproximadamente con el cuadrado de la frecuencia. Ambas pérdidas producen calentamientos, que además de acortar la vida del equipo y provocar fallos de aislamiento, reducen la potencia útil del mismo.
- vi)* En motores y generadores, al igual que ocurre en los transformadores, las corrientes y tensiones armónicas aumentan las pérdidas de la máquina. Además, la presencia de armónicos provoca la aparición de pares parásitos que generan oscilaciones electromecánicas y que reducen el par útil de la máquina.
- vii)* Los sistemas de protección experimentan efectos indeseables como consecuencia de los armónicos, generando disparos intespectivos y retardos en la actuación de dichas protecciones. En interruptores automáticos, el aumento del valor de pico de la corriente asociado con la presencia de armónicos puede dificultar la extinción del arco eléctrico.
- viii)* La existencia de armónicos de tensión y corriente da lugar a errores en los equipos de medida y contadores de energía, ya que muchos de estos equipos están pensados para trabajar con ondas de tensión y corriente prácticamente sinusoidales, o con un espectro frecuencial en muy estrecho. Un ejemplo es el de los contadores de disco, los cuales no miden con precisión las potencias debidas a los armónicos.
- ix)* En los equipos electrónicos y domésticos que utilizan la onda de tensión para sincronizarse, la presencia de armónicos generará disfunciones en los mismos.
- x)* Los sistemas de comunicaciones experimentarán interferencias debidas a la existencia de armónicos, las cuales dependerán del grado de

acoplamiento, del espectro frecuencial de los armónicos, y de la susceptibilidad de los equipos de comunicaciones.

1.3.2. Elementos generadores de armónicos

Los armónicos de corriente tienen su origen en la existencia de cargas no lineales conectadas al sistema de potencia. Hay que tener en cuenta que todas las cargas reales son, en mayor o menor medida, no lineales, aunque en muchos casos, existe un alto grado de homogeneidad entre la tensión y la corriente asociadas a las mismas (dentro de sus condiciones nominales de funcionamiento), por lo que su característica no lineal resulta despreciable. Sin embargo, existe otro grupo de cargas en las que su característica no lineal resulta predominante dentro de su rango de operación, lo cual las convierte en fuentes perturbadoras del sistema de potencia. A continuación se detallarán las cargas más relevantes dentro de esta última categoría.

- i)* Los rectificadores monofásicos constituyen la principal fuente de distorsión de los consumos domésticos. Estos rectificadores dan lugar a formas de onda de corriente severamente distorsionadas, y se usan como etapa de entrada de la mayoría de los equipos electrónicos domésticos para obtener un bus de continua. Las fuentes de alimentación conmutada de los ordenadores, las reactancias electrónicas para alumbrado con lámparas fluorescentes, las cocinas de inducción y los reguladores de velocidad de los sistemas de aire acondicionado son un claro ejemplo de estos equipos electrónicos de uso masivo que utilizan un rectificador como etapa de entrada. Aunque la corriente solicitada por cada uno de estos rectificadores no puede considerarse como inaceptable, su acción conjunta da lugar a una fuerte distorsión en las corrientes del sistema de potencia, y originan la circulación de grandes corrientes armónicas en el conductor de neutro. Dentro de este grupo de cargas también habría que incluir los rectificadores monofásicos de gran potencia que se utilizan en la tracción eléctrica, los cuales, además de provocar una elevada distorsión de corriente, también dan lugar a severos desequilibrios en la red.
- ii)* Los rectificadores polifásicos son una fuente importante de distorsión armónica dentro de las cargas industriales. Estos rectificadores se usan para obtener un bus de continua en los inversores de los sistemas electrónicos de potencia. El principal exponente de este tipo de equipos lo constituyen los variadores de velocidad para motores. La potencia de estos equipos industriales suele ser superior a los del sector doméstico, y la amplitud de los armónicos que inyectan en la red dependen de la impedancia del lado de alterna y del tipo de filtrado utilizado en el lado de continua (capacitivo, inductivo, o ambos). En aplicaciones de gran potencia, como pueden ser los procesos electroquímicos, la transmisión en alta tensión continua, o grandes inversores utilizados en prensas y molinos, se utilizan rectificadores de 12 pulsos o más [1.28]. Hay que resaltar que tanto los rectificadores monofásicos como los trifásicos, sean

controlados o no controlados, generan microcortes en la tensión a consecuencia de los cortocircuitos instantáneos que se producen en las fases del sistema de potencia cuando la corriente conmuta de una fase a otra del rectificador.

- iii)* Los convertidores alterna-alterna basados en el recorte de la onda de tensión mediante tiristores o triacs se utilizan de forma extensiva en los compensadores estáticos de reactiva, en los arrancadores suaves de motores de inducción, y en los reguladores de lámparas de incandescencia. En estos sistemas, los armónicos de corriente aparecen como consecuencia de que no existe conducción durante todo el periodo de la onda de tensión.
- iv)* Los hornos de arco presentan una característica tensión-corriente severamente no lineal, que además es muy variable en el tiempo, en función del estado de fusión del material, del refinado de éste y de la longitud del arco eléctrico dentro del horno. Según lo expuesto, estos dispositivos no presentan una distribución armónica constante de régimen permanente, y su característica se describe a partir de valores probabilísticos.
- v)* Las lámparas de descarga se basan en la existencia de arco eléctrico controlado en su interior, por lo que también presentan una característica tensión-corriente altamente no lineal. Aunque los fluorescentes son lámparas de descarga, en este caso se está haciendo alusión a lámparas de vapor de sodio o vapor de mercurio, que suelen ser de mayor potencia y se utilizan principalmente en la iluminación de grandes locales, áreas extensas y espacios públicos. La concentración de este tipo de lámparas conectadas entre fase y neutro da lugar a serios problemas relacionados con la corriente circulante por el conductor de neutro.
- vi)* Los transformadores generan armónicos de corriente debido a la característica no lineal de su núcleo ferromagnético. Para que exista un flujo sinusoidal en el núcleo de los transformadores, es preciso que las corrientes magnetizantes presenten distorsión, principalmente de tercer armónico, que da lugar a un sobrepico en las mismas, más algo de quinto y séptimo armónico. Este fenómeno se ve agravado con el grado de saturación del núcleo del transformador, principalmente si las corrientes circulantes presentan alguna componente continua. Hay que indicar que los transformadores dan lugar a otro fenómeno de suma importancia, que está ligado con las elevadas corrientes de irrupción que se producen, de manera transitoria, durante la energización de éstos.
- vii)* Las máquinas rotativas también pueden generar armónicos, aunque en menor medida que los transformadores. Un estudio detallado del origen de los armónicos en máquinas rotativas escapa del objetivo de este trabajo, pero se puede apuntar que dichas corrientes armónicas se deben principalmente a las variaciones periódicas de velocidad o de carga, a la

saturación de la máquina, a la disposición de los bobinados o de las ranuras, y a las imperfecciones en los polos de las máquinas síncronas.

1.3.3. Dos tipos de fuentes de armónicos

Las cargas podrán ser consideradas como fuentes de corriente distorsionada, o como fuentes de tensión distorsionada, en función del comportamiento de las variables asociadas a dicha carga al variar los parámetros de la red.

(A) Carga no lineal en fuente de corriente

Como se comentó anteriormente, los rectificadores (controlados y no controlados) son una típica fuente de armónicos de corriente. La Figura 1.2a muestra un rectificador que alimenta una carga en la que se supone que la inductancia L_L es lo suficientemente grande como para conseguir una corriente prácticamente constante en el lado de continua. Las tensiones en el PCC (punto de acoplo común) de esta carga se muestran en la Figura 1.3a, y las corrientes que suministra la fuente en la Figura 1.3b.

En este caso, la inductancia en el lado de continua es mucho mayor que la inductancia de la red, por lo que la corriente absorbida por la carga no experimentará grandes variaciones ante cambios razonables de esta última inductancia. Teniendo en cuenta que la corriente absorbida por la carga, y las características del sistema, prácticamente no varían ante cambios en el lado de fuente, se puede entender que dicha carga se comporta como una fuente de corriente armónica. Por tanto, en aquellas cargas en las que exista una inductancia que tienda a mantener constante el valor de la corriente, se podrá utilizar el circuito equivalente de la Figura 1.2b para representar el comportamiento del sistema. Según este circuito equivalente, para anular la circulación de corrientes armónicas en el lado de fuente, sería necesario cortocircuitar la corriente i_L mediante un camino que ofreciese baja impedancia a dichas frecuencias armónicas y alta impedancia a la frecuencia fundamental.

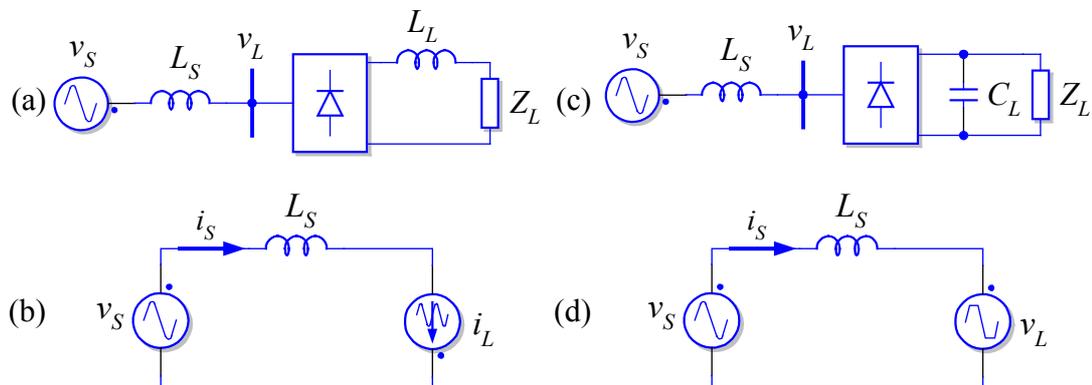


Figura 1.2. Cargas no lineales en fuente de corriente y tensión.

(a) Rectificador alimentando una carga inductiva, (b) Circuito equivalente por fase del rectificador con carga inductiva, (c) Rectificador alimentando una carga capacitiva, (d) Circuito equivalente por fase del rectificador con carga capacitiva.

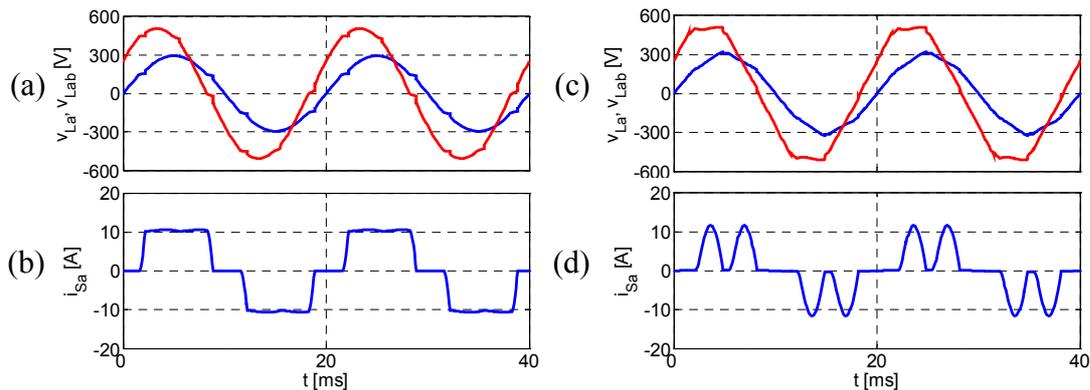


Figura 1.3. Tensiones, corrientes de las cargas no lineales.
(a) Tensiones en el *PCC* de la carga en fuente de corriente, **(b)** Corriente en el lado de fuente debida a la carga en fuente de corriente, **(c)** Tensiones en el *PCC* de la carga en fuente de tensión, **(d)** Corriente en el lado de fuente debida a la carga en fuente de tensión.

(B) Carga no lineal en fuente de tensión

Los rectificadores no siempre alimentan cargas inductivas, sino que como muestra la Figura 1.2c, en muchas ocasiones poseen un gran condensador de filtrado (C_L) conectado en su salida para conseguir una tensión prácticamente constante en el lado de continua. La Figura 1.3c muestra las formas de onda de tensión en el *PCC* de esta carga, y la Figura 1.3d representa la corriente suministrada por la fuente.

En este caso, la impedancia del lado de continua es mucho menor que la impedancia de red, por lo que la corriente absorbida por la carga se verá fuertemente afectada por el valor de la inductancia de la red. Sin embargo, la tensión de salida del rectificador, y la tensión en el *PCC*, prácticamente no variarán ante cambios razonables de la impedancia del lado de fuente, pudiéndose entender que esta carga se comporta como una fuente de tensión armónica conectada a la red. Por tanto, en aquellas cargas en las que exista un condensador que tienda a mantener constante el valor de la tensión, se podrá utilizar el circuito equivalente de la Figura 1.2d para representar el comportamiento del sistema. Según este circuito equivalente, para anular la circulación de corrientes armónicas en el lado de fuente, sería necesario conectar en serie con L_S algún elemento que ofrezca alta impedancia a dichas frecuencias armónicas y baja impedancia a la frecuencia fundamental.

1.4. Normativa reguladora de la emisión de armónicos de corriente

El mundo moderno es sumamente dependiente de la energía eléctrica, y esta dependencia se incrementará en un futuro. Un informe del EPRI [1.29] prevé que el consumo de energía eléctrica, como fuente primaria, será de un 80% en el año 2010. Por este motivo, existen varias organizaciones nacionales e internacionales dedicadas a la elaboración de normativa que regule los límites armónicos en los sistemas de potencia, y a establecer una serie de recomendaciones prácticas para asegurar la

compatibilidad necesaria entre los equipos de los consumidores finales y el sistema de potencia.

Esta introducción no pretende revisar toda la normativa existente en esta materia [1.30][1.31], sino que únicamente persigue mostrar someramente los límites de inyección de corrientes armónicas establecidos por los estándares internacionales de mayor relevancia a modo de ofrecer una idea acerca de la estructura de los mismos.

1.4.1. Estándar IEC-61000-3-2

Esta norma internacional [1.32] regula los límites de emisión de corrientes armónicas para equipos que tengan una corriente de entrada menor o igual a 16A por fase, y que se pretendan conectar a redes públicas de baja tensión. En ella, se clasifican los equipos según el diagrama de flujo mostrado den la Figura 1.4. La forma de onda “especial” de corriente es aquella cuya envolvente se encuentra, al menos durante el 95% del tiempo, dentro de la “T invertida” mostrada en esta figura.

Para las diferentes categorías de los equipos, los límites de corriente muestran en la Tablas 1.2, 1.3 y 1.4, debiéndose resaltar que los límites para equipos de Clase B se obtienen a partir de la multiplicación por 1,5 de los límites de corriente armónica para los equipos de Clase A.

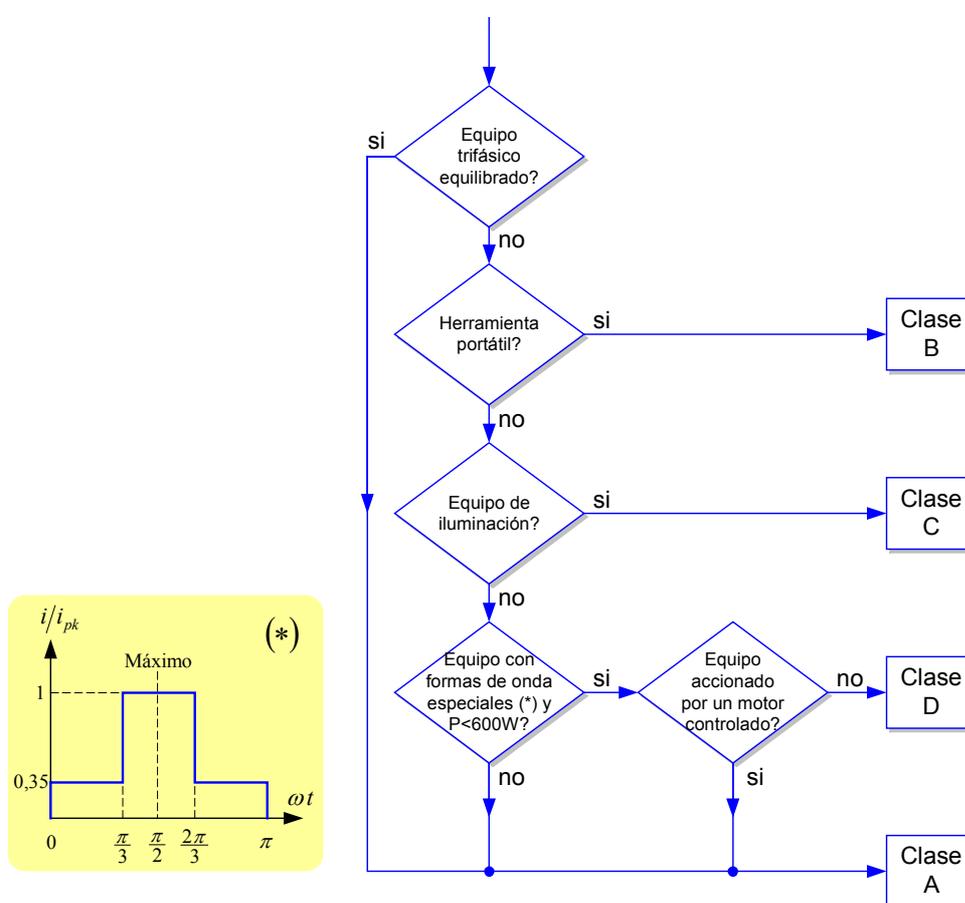


Figura 1.4. Clasificación de equipos con $I \leq 16A$ según IEC 61000-3-2 .

En estas tablas sólo se muestran los detalles generales de la normativa, siendo necesaria una lectura detenida de la misma para determinar los límites ante situaciones particulares, por ejemplo en los equipos de iluminación cuando su potencia es inferior a 25W, o cuando son regulados mediante *dimmers* disparados por ángulo de fase. Así mismo, hay que indicar que esos límites no se aplican a equipos de gran potencia ($P > 1\text{kW}$) de uso profesional, los cuales no están concebidos para venderse al público en general.

Orden de armónicos impares (h)	Máxima corriente admisible (A)	Orden de armónicos pares (h)	Máxima corriente admisible (A)
3	2,30	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	$8 \leq h \leq 40$	1,84/ h
11	0,33		
13	0,21		
$15 \leq h \leq 39$	2,25/ h		

Tabla 1.2. Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de Clase A.

Orden armónico (h)	Máxima corriente admisible ⁽¹⁾ (%)
2	2
3	$30 \times \lambda$ ⁽²⁾
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$	3

(1) Porcentaje de la corriente de frec. fundamental.

(2) λ es el factor de potencia del circuito.

(*) La potencia de las luminarias debe ser $P > 25\text{W}$

Tabla 1.3. Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de Clase C.

Orden armónico (h)	Máxima corriente admisible	
	(mA/W) ⁽¹⁾	(A)
3	3,40	2,30
5	1,90	1,14
7	1,00	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
$15 \leq h \leq 39$	3,85/ h	2,25/ h

(1) Corrientes relativas a la potencia del equipo (P)

(*) No existen límites para equipos con $P < 75\text{W}$.

Tabla 1.4. Límites de emisión de corrientes armónicas para equipos de Clase D.

1.4.2. Estándar IEC-61000-3-4

Esta norma internacional [1.33] extiende el ámbito de aplicación de la IEC 61000-3-2 para regular los límites de emisión de equipos eléctricos y electrónicos con una corriente nominal que excede los 16A por fase que se pretendan conectar a redes públicas de baja tensión (principalmente industriales) de corriente alterna a 50-60Hz de las siguientes maneras: *i)* conexión monofásica a redes de hasta 240V de tensión nominal de 2 o 3 conductores, *ii)* conexión trifásica a redes de hasta 600V de tensión nominal de 3 o 4 conductores. Es interesante resaltar que el ensayo de cumplimiento de esta normativa por parte de un equipo se puede realizar a partir de medidas directas de su emisión armónica, o mediante simulación por ordenador.

En la norma IEC 61000-3-4 existen algunas definiciones que deben ser revisadas para el correcto entendimiento de los límites que en ella se especifican. Estas definiciones son:

- ✓ **Punto de acoplo común (PCC – *Point of Common Coupling*):**
Punto de la red pública que está más próximo al consumidor afectado y en el cual están, o pueden estar, conectados otros consumidores.

- ✓ **Tasa de distorsión armónica (THD – *Total Harmonic Distortion*):**

$$THD(\%) = 100 \sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (1.1)$$

- ✓ **Distorsión armónica parcial ponderada (PWHD – *Partial Weighted Harmonic Distortion*):**

$$PWHD(\%) = 100 \sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (1.2)$$

- ✓ **Potencia de cortocircuito (S_{sc} – *Short-circuit power*):**
Se calcula a partir de la tensión nominal de línea a línea (U_{nom}) y de la impedancia (Z) en el PCC.

$$S_{sc} = \frac{U_{nom}^2}{Z} \quad (1.3)$$

- ✓ **Potencia aparente nominal (S_{equ} – *Rated apparent power*):**
Se calcula a partir del valor eficaz de la corriente nominal del equipo (I_{equ}) y de la tensión nominal (U_p entre fase y neutro, U_i entre fases).

$$S_{equ} = U_p I_{equ} \quad \text{en equipos conectados entre fase y neutro,} \quad (1.4a)$$

$$S_{equ} = U_i I_{equ} \quad \text{en equipos conectados entre fase y fase,} \quad (1.4b)$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} U_i I_{equ} \quad \text{en equipos trifásicos equilibrados,} \quad (1.4c)$$

$$S_{equ} = 3U_p I_{equ-max} \quad \text{en equipos trifásicos desequilibrados } (I_{equ-max} \text{ es el máximo valor eficaz de corriente que (1.4d) fluye en cualquiera de las tres fases).}$$

✓ **Relación de cortocircuito (R_{sce} – *Short-circuit ratio*):**

Relación entre la potencia de cortocircuito en el punto de acoplo a red (S_{sc}) y la potencia aparente nominal del equipo a conectar (S_{equ}). Donde:

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{3S_{equ}} \text{ para equipos conectados entre fase y neutro,} \quad (1.5a)$$

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{2S_{equ}} \text{ para equipos conectados entre fase y fase,} \quad (1.5b)$$

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \text{ para todos los equipos trifásicos.} \quad (1.5c)$$

A partir del valor de la relación de cortocircuito (R_{sce}), existen diferentes procedimientos de conexión a la red que definen las siguientes etapas:

Etapa 1. *Conexión simplificada:* Los equipos que cumplen con los límites de la *Etapa 1* (Tabla 1.5) pueden ser conectados en cualquier punto del sistema de potencia donde la relación de cortocircuito sea $R_{sce} \geq 33$.

Etapa 2. *Conexión basada en los datos de la red y del equipo:* En los equipos que no cumplan con los límites de la *Etapa 1*, se podrán permitir valores superiores de emisión armónica (Tablas 1.6 y 1.7), en base al estudio de las características del enlace a red, siempre y cuando la relación de cortocircuito sea $R_{sce} \geq 33$.

Etapa 3. *Conexión basada en la potencia declarada del consumidor:* si no se satisfacen las condiciones impuestas en las *Etapas 1* y *2*, o si la corriente del equipo excede de 75A, la autoridad suministradora puede aceptar la conexión del equipo en base a la potencia activa declarada en la instalación del consumidor. En este caso se aplicarán los requisitos impuestos por la autoridad suministradora.

Armónicos no múltiplos de 3		Armónicos múltiplos de 3	
Orden armónico	Máx. corriente	Orden armónico	Máx. corriente
(h)	I_h/I_1 (%)	(h)	I_h/I_1 (%)
5	10,7	3	21,6
7	7,2	9	3,8
11	3,1	15	0,7
13	2,0	21	$\leq 0,6$
17	1,2	27	$\leq 0,6$
19	1,1	≥ 33	$\leq 0,6$
23	0,9		
25	0,8		
29	0,7		
31	0,7		

(*) Para armónicos pares: $\leq 8/h$ ó $\leq 0,6$.

(**) I_1 corriente nominal de frecuencia fundamental.

Tabla 1.5. Límites de emisión para equipos de la *Etapa 1* ($S_{equ} \leq S_{sc}/33$).

Mín. $R_{sce}^{(1)}$	Tasa total admisible (%)		Tasa individual admisible (%)					
	THD	PWHD	I_3/I_1	I_5/I_1	I_7/I_1	I_9/I_1	I_{11}/I_1	I_{13}/I_1
	66	25	25	23	11	8	6	5
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

(1) Para valores intermedios de R_{sce} se puede interpolar.

(*) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar 16/h %.

(**) En caso de sistema trifásicos desequilibrados, estos valores se aplican a cada fase.

Tabla 1.6. Límites de emisión para equipos de la *Etapa 2* conectados entre fase y neutro, entre fase y fase, y trifásicos desequilibrados ($R_{sce} \geq 33$).

Mín. $R_{sce}^{(1)}$	Tasa total admisible (%)		Tasa individual admisible (%)			
	THD	PWHD	I_3/I_1	I_5/I_1	I_{11}/I_1	I_{13}/I_1
	66	16	25	14	11	10
120	18	29	16	12	12	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

(1) Para valores intermedios de R_{sce} se puede interpolar.

(*) El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar 16/h %.

Tabla 1.7. Límites de emisión para equipos de la *Etapa 2* con conexión trifásica equilibrada ($R_{sce} \geq 33$).

En la medida de las corrientes, se despreciarán los armónicos de corriente inferiores a un 0,6% de la corriente de frecuencia fundamental. Así mismo, las emisiones armónicas con duración inferior a 10 segundos que aparecen cuando un equipo es puesto en funcionamiento, o cuando es desconectado, ya sea manual o automáticamente, no excederán en más de 1,5 veces los valores límites establecidos en la etapa correspondiente. Por último, hay que indicar que los límites de corriente se aplicarán sobre cualquier transitorio que aparezca durante la evaluación del equipo, o parte del mismo. Para los armónicos pares cuyos órdenes estén comprendidos entre el 2 y el 10, y para los armónicos impares cuyos órdenes estén comprendidos entre el 3 y el 19, se permitirán valores que no superen en más de 1,5 veces los límites establecidos para cada armónico durante un máximo de un 10% de un periodo de observación de 2,5 minutos.

1.4.3. Estándar IEEE 519-1992

Esta norma, originaria de Estados Unidos [1.27], resulta más generalista y didáctica que las anteriormente expuestas, y ofrece abundante información acerca de las causas y efectos de las perturbaciones armónicas en sistemas de potencia. La filosofía que subyace detrás de este estándar busca, por un lado, limitar la inyección de corrientes armónicas por parte de los consumidores individuales para que no creen unos niveles inaceptables de distorsión en la tensión del sistema de potencia en condiciones normales de funcionamiento, y por otro, acotar la distorsión armónica de la tensión ofrecida por la compañía suministradora.

En esta norma, al igual que ocurría en la IEC 61000-3-4, los límites de inyección de corriente armónica en el *PCC* se fijan en función de la relación entre la potencia de la carga y la potencia de cortocircuito en el punto de acoplo. A continuación se muestran las definiciones de interés utilizadas en la IEEE 519-1992 para determinar estos límites.

- ✓ **Tasa de distorsión en la demanda (TDD – Total Demand Distortion):**
Expresa la distorsión de corriente en relación a la demanda de corriente de la carga.

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (1.6)$$

En esta expresión, I_L es la máxima corriente de frecuencia fundamental demanda por la carga (durante 15 o 30 minutos) en el *PCC*, y se calcula a partir de la media de los máximos en la corriente demandada durante los últimos 12 meses. Así mismo, h_{\max} indica el orden armónico máximo que debe ser considerado en los cálculos. La única referencia que existe en la norma acerca de este valor especifica que $h_{\max} = 50$.

- ✓ **Relación de cortocircuito (R_{sc} – Short-circuit ratio):**

$$R_{sc} = \frac{I_{sc}}{I_L}, \quad (1.7a)$$

donde:
$$I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3}U_{nom}} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3}Z}, \quad (1.7b)$$

siendo U_{nom} la tensión nominal de línea a línea, y Z la impedancia de la red en el *PCC*.

De una manera general, el objetivo de esta norma es limitar la inyección de corrientes armónicas para que la tensión en el *PCC* no presente ningún armónico individual con una amplitud superior a un 3% de la componente fundamental, y que globalmente, el *THD* de tensión no sea superior al 5% en sistemas en los que no existe una resonancia paralelo a una frecuencia específica.

La Tabla 1.8 muestra las bases para la limitación de corrientes armónicas en función del valor de R_{sc} en el PCC.

R_{sc} (en el PCC)	Máx. en las armónicos individuales de la tensión ⁽¹⁾ (%)	Suposición relacionada
10	2,50 – 3,00	Sistema dedicado.
20	2,00 – 2,50	1 – 2 consumidores grandes.
50	1,00 – 1,50	Algunos consumidores relativamente grandes.
100	0,50 – 1,00	5 – 20 consumidores de tamaño medio.
1000	0,05 – 0,10	Muchos consumidores pequeños.

(1) Porcentaje de la tensión de frecuencia fundamental.

Tabla 1.8. Bases para la limitación de corrientes armónicas en IEEE 519-1992.

En la Tabla 1.9 se muestran los límites de inyección de corriente armónica especificados en la IEEE 519-1992.

Sistemas de distribución (120V – 69kV)						
I_{sc}/I_L	Tasa individual admisible en relación a I_L (%)					TDD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 20 ⁽¹⁾	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20 – 150	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50 – 100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100 – 1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
> 1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00
Sistemas de subtransmisión (69kV – 161kV)						
< 20 ⁽¹⁾	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20 – 150	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50 – 100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100 – 1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
> 1000	7,00	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00
Sistemas de transmisión (> 161kV)						
< 50 ⁽¹⁾	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
≥ 50	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

(1) Todos los equipos de generación están limitados a estos valores de distorsión de corriente, con independencia del valor de I_{sc}/I_L .

(*) Los armónicos pares están limitados a un 25% de los límites para los armónicos impares.

(**) No está permitida la inyección de componentes de corriente continua.

Tabla 1.9. Límites de inyección de corriente armónica según la IEEE 519-1992.

Los límites mostrados en la Tabla 1.9 deben ser usados en el diseño de sistemas considerando el peor de los casos en condiciones normales de funcionamiento (condiciones que duren más de una hora). Para periodos más cortos, durante arranques o en condiciones inusuales, estos límites pueden ser superados en un 50%.

1.5. Mitigación de los armónicos de corriente

La distorsión armónica de la corriente existe, en mayor o menor medida, en todos los sistemas de potencia. Generalmente, los armónicos de corriente deben ser controlados sólo cuando éstos llegan a ser problemáticos. Las tres causas más comunes que hacen problemática la circulación de armónicos de corriente son:

- i)* La fuente de generación de corrientes armónicas es demasiado grande.
- ii)* El *PCC* de la carga está lejano, con lo que el camino seguido por los armónicos de corriente es demasiado largo. Este problema se agrava cuando la línea de suministro es débil, presentando una elevada impedancia aguas arriba del *PCC*. En este caso, la circulación de los armónicos de corriente crea una elevada distorsión en la tensión del sistema, e interfiere sobre los sistemas de comunicaciones.
- iii)* La respuesta del sistema de potencia a uno o varios de los armónicos inyectados da lugar a situaciones de resonancia. En este caso, las tensiones o corrientes armónicas se ven magnificadas, alcanzando niveles superiores a los límites tolerables.

Las opciones básicas para controlar la circulación de corrientes armónicas son:

- i)* Modificar la respuesta frecuencial del sistema de potencia.
- ii)* Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga.
- iii)* Añadir filtros que permitan derivar o bloquear los armónicos de corriente.

Seguidamente se comenta con cierto grado de detalle cada una de estas opciones.

1.5.1. Modificar la respuesta frecuencial del sistema de potencia

Las medidas comúnmente adoptadas para modificar la respuesta adversa del sistema de potencia ante los armónicos son:

- i)* Añadir inductancias en serie con los condensadores de los bancos de compensación de potencia reactiva para que la frecuencia de resonancia no coincida con ninguno de los armónicos presentes en el sistema.
- ii)* Cambiar la capacidad del condensador de los bancos de compensación de potencia reactiva. Generalmente esta es la solución más barata tanto para consumos industriales como domésticos y de servicios.
- iii)* Mover la batería de condensadores a otro punto del sistema de potencia donde la impedancia de cortocircuito sea diferente, o donde existan

mayores pérdidas, lo cual dará lugar a un mayor coeficiente de amortiguamiento. Esta solución no suele ser adecuada para consumidores industriales, ya que la batería de condensadores no se puede alejar lo suficiente como para notar diferencias apreciables.

- iv) Añadir filtros pasivos paralelo para cambiar la respuesta frecuencial del sistema. Esta técnica se presenta con más detalle en el Apartado 1.5.3, siendo preciso remarcar aquí que la existencia de múltiples filtros pasivos en sistemas complejos puede dar lugar a la aparición de resonancias anómalas, que finalmente empeoren el comportamiento del sistema.
- v) Eliminar algunas baterías de condensadores. Esta medida es aplicable cuando se admite que el incremento de las pérdidas, la bajada en la tensión de la red, y la penalización en el factor de potencia, son efectos aceptables en pos de resolver el problema de la resonancia armónica en el sistema de potencia.

1.5.2. Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga

Para describir las medidas que permiten modificar la distribución armónica de las corrientes solicitadas por la carga, se supondrá la situación de carga representada en la Figura 1.5, la cual da lugar a las formas de tensión y corriente de la Figura 1.6. En este escenario existen tres cargas distorsionantes monofásicas conectadas entre fase y neutro, que dan lugar a una composición armónica trifásica sumamente heterogénea. Estas cargas consisten en: un rectificador monofásico que posee una elevada inductancia en el lado de continua, el cual se puede considerar como una fuente de corriente distorsionante; un rectificador monofásico con un gran condensador en el lado de continua, el cual se puede tratar como una fuente de tensión distorsionante; y un regulador de una lámpara de incandescencia basado en un triac (*dimmer*), el cual se puede considerar como una carga resistiva no lineal. Respecto a las formas de onda asociadas a estas cargas, la Figura 14.6a representa las tensiones en el PCC, la Figura 14.6b representa las corrientes en las diferentes fases, y la Figura 14.6c

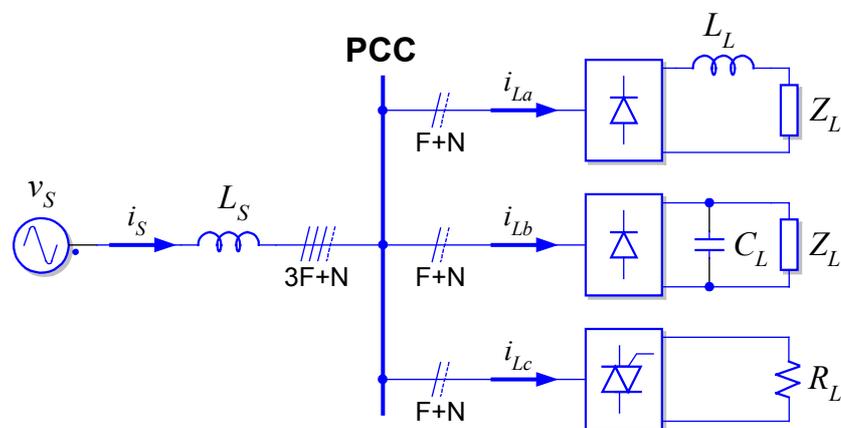


Figura 1.5. Composición de cargas en un situación genérica.

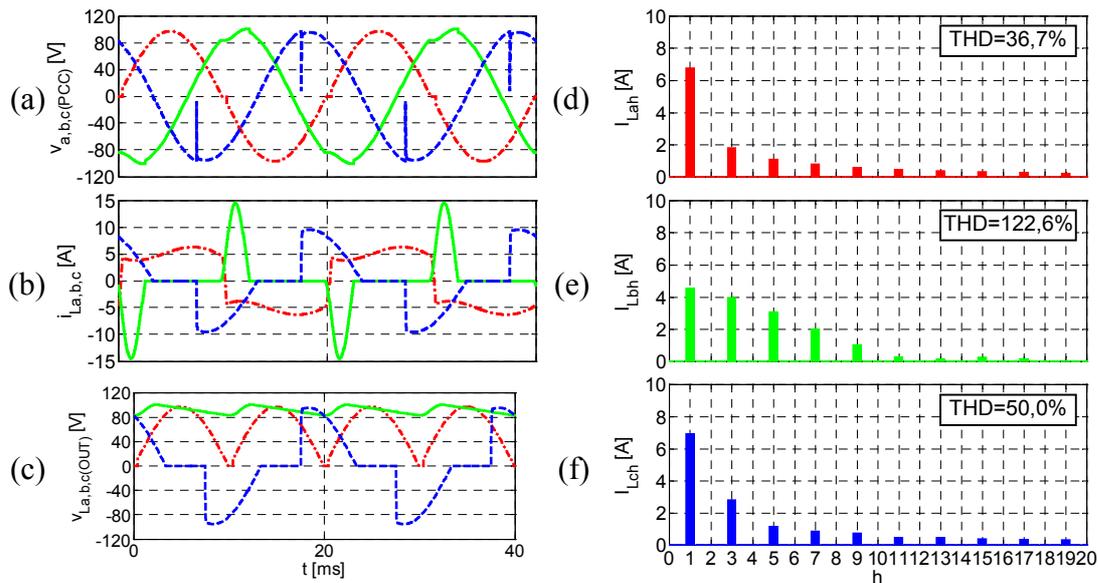


Figura 1.6. Tensiones, corrientes de las tres cargas distorsionantes monofásicas.

muestra las tensiones de salida de los convertidores estáticos. En las Figuras 1.6d, e, y f se representa la distribución armónica de las corrientes solicitadas por las cargas.

Las medidas comúnmente adoptadas para modificar la corriente solicitada por estas cargas son:

- i)* Colocar inductancias limitadoras (L_C – Chokes) en el lado de lado de alterna de los convertidores, véase la Figura 1.7. Esta solución resulta sencilla, fiable y relativamente barata, aunque su efectividad es limitada, necesiéndose inductancias de grandes dimensiones, y aumentando las caídas de tensión en las líneas.

En la Figura 1.8 se muestra el resultado de insertar las mencionadas inductancias en el sistema de la Figura 1.5, pudiéndose apreciar cómo las corrientes en el lado de fuente se ven amortiguadas debido al incremento de la impedancia de la línea, y cómo las tensiones en el PCC han mejorado respecto a la situación original. En esta figura se observa como esta solución resulta adecuada tanto para el rectificador con carga capacitiva, como para el *dimmer*, sin embargo, en el rectificador con carga inductiva, el aumento de la impedancia de la línea da lugar que se alarguen los tiempos de conmutación de la corriente entre las diferentes ramas del convertidor, lo cual repercute negativamente en la forma de tensión que recibe la carga conectada en su lado de continua.

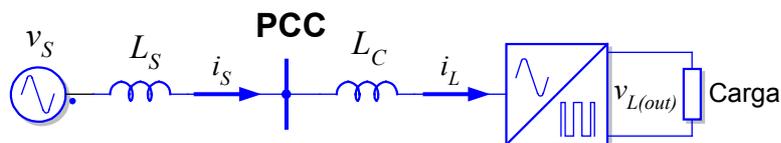


Figura 1.7. Inserción de una inductancia limitadora en el lado de alterna.

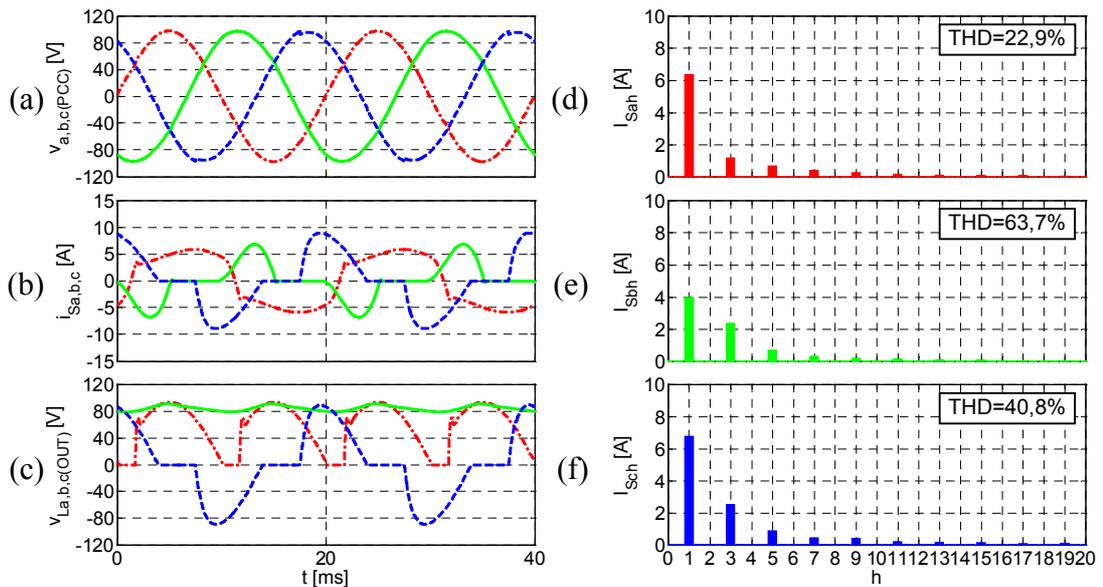


Figura 1.8. Tensiones, corrientes cuando se insertan inductancias limitadoras.

ii) Alimentar la carga mediante un transformador con el primario en triángulo [1.28], véase la Figura 1.9. Con esta solución se impedirá la circulación de corrientes homopolares en el lado de primario del transformador. Si las corrientes consumidas por las cargas no lineales estuviesen perfectamente equilibradas, esta solución eliminaría la circulación de los armónicos múltiplos de 3 por el lado de fuente. En el escenario de la Figura 1.5, debido a su heterogeneidad, los armónicos múltiplos de 3 no son exclusivamente homopolares, por lo que existen componentes de corriente con dicha frecuencia en el primario del transformador, véase la Figura 1.10. De manera general, el transformador Δ -Y lo que está consiguiendo es la cancelación de las corrientes circulantes por el conductor de neutro del lado de carga.

Un montaje clásico, que se basa en “encerrar” los armónicos homopolares en el primario del transformador (conectado en triángulo), consiste en la alimentación de dos puentes rectificadores trifásicos de igual potencia mediante un transformador con dos devanados secundarios, uno en estrella y otro en triángulo. Esta disposición produce un desfase de 30° entre las tensiones de los dos secundarios del transformador. Mediante cálculos, se puede demostrar que los armónicos de orden $6h \pm 1$, con h impar, se cancelan en el primario del transformador. Según esto, los primeros armónicos eliminados son el 5º y el 7º, que son precisamente los más importantes por su amplitud. Los primeros armónicos que

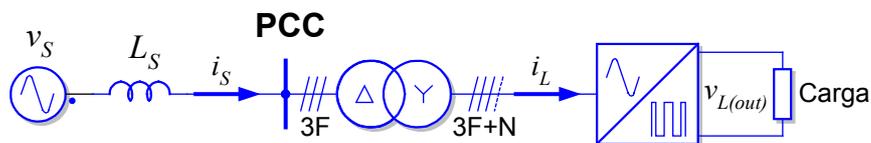


Figura 1.9. Inserción de un transformador Δ -Y.

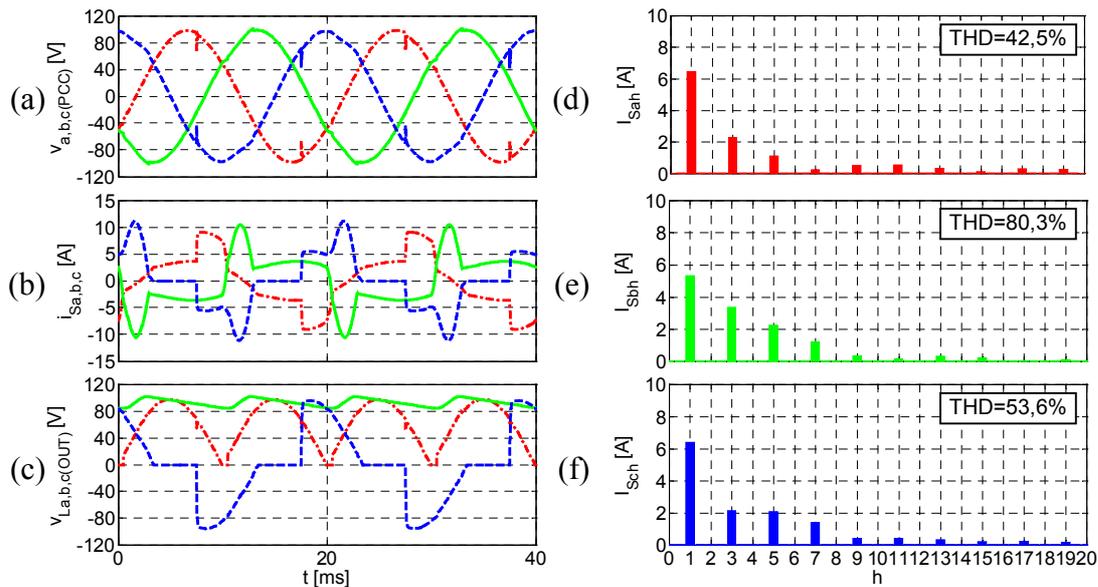


Figura 1.10. Tensiones, corrientes con transformador Δ -Y.

aparecerían en el lado de primario serían el 11° y el 13°. Esta solución se usa mucho en rectificadores de alta potencia, donde se aumenta el número de rectificadores y devanados secundarios, con su adecuado desfase relativo, llegándose a montajes de hasta 72 fases, como los utilizados en aplicaciones de electrólisis.

Dentro de esta categoría, otra solución interesante consiste en la utilización de un transformador con el primario en estrella (sin neutro) y el secundario en zig-zag. Si las cargas alimentadas mediante este transformador son idénticas, los amperio-vueltas de orden $3h$ se ven compensados en el secundario del mismo, no circulando dichas corrientes por el primario. Este montaje reporta la ventaja de que la impedancia ofrecida por el transformador a estos armónicos es baja, ya que sólo depende de la impedancia de los devanados secundarios. Lógicamente, si las corrientes consumidas por las fases de la carga con índice $3h$ no son idénticas, su compensación no será perfecta.

- iii)* Insertar una reactancia en zig-zag en paralelo con la carga trifásica, véase la Figura 1.11. La reactancia en zig-zag presenta una impedancia muy baja ante componentes homopolares, coincidente con la inductancia de dispersión de las bobinas, y una impedancia elevada ante componentes de secuencia positiva y negativa. Por tanto, la conexión de esta reactancia en paralelo con la carga ofrece un camino de baja impedancia a las corrientes homopolares solicitadas por ésta, con lo que la corriente de neutro aguas arriba de su punto de conexión se verá fuertemente atenuada. Lógicamente, la efectividad de esta solución depende de la impedancia que presente la red en el *PCC*. En el supuesto de que las corrientes solicitadas por la carga sean equilibradas, la reactancia en zig-zag cancelará la circulación de armónicos con índice $3h$ en el lado de fuente.

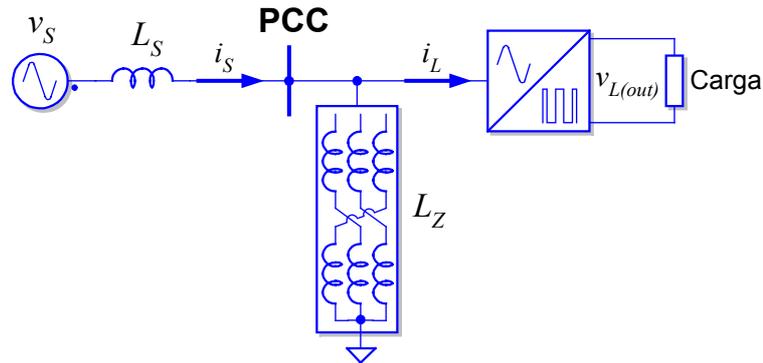


Figura 1.11. Inserción de una reactancia en zig-zag en paralelo con la carga.

En la Figura 1.12 se muestran las formas de onda resultantes cuando la reactancia en zig-zag se conecta en paralelo con las cargas de la Figura 1.5. En este caso, debido al gran desequilibrio existente en las corrientes solicitadas por dichas cargas, los armónicos con índice $3h$ no se cancelan en el lado de fuente, aunque sí es cierto que la corriente que circula por el conductor de neutro de dicha fuente es prácticamente nula.

En los espectros armónicos de la Figura 1.12 se aprecia como la componente de frecuencia fundamental de la corriente en ciertas fases ha aumentado respecto a la situación original. Esto se debe a que el conjunto de cargas de la Figura 1.5 absorbían cierta cantidad de corriente de secuencia homopolar y frecuencia fundamental. El hecho de “cortocircuitar” dichas corrientes homopolares mediante la reactancia en zig-zag da lugar a que la magnitud de la corriente de frecuencia fundamental que circula por el lado de fuente aumente en determinadas fases del sistema.

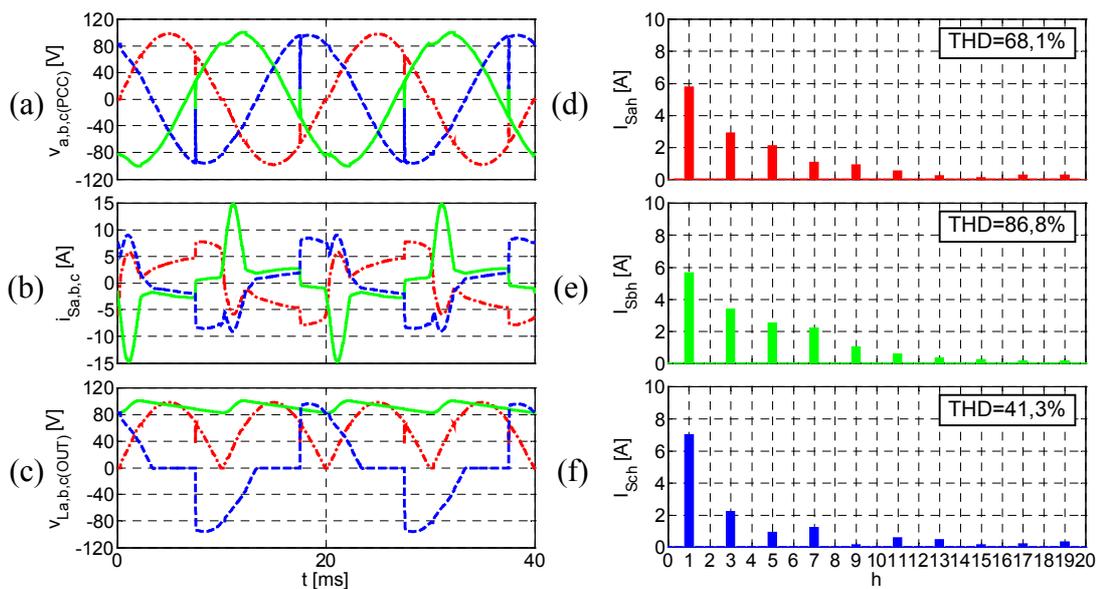


Figura 1.12. Tensiones, corrientes con reactancia en zig-zag.

- iv) Adaptar la instalación. Esta solución realmente no modifica la corriente solicitada por las cargas, aunque sí permite que el sistema soporte la circulación de los armónicos de corriente. Dentro de esta categoría de soluciones se pueden adoptar medidas como son: la utilización de conductores con neutros separados para cada fase, el sobredimensionamiento del conductor de neutro, el cambio de tomas en los transformadores, o el correcto dimensionamiento de dichos transformadores en función del contenido armónico de la corriente (descalificación del transformador).

1.5.3. Utilización de filtros de armónicos

En una primera aproximación, un filtro de armónicos se puede entender como un dispositivo que presenta una severa variación de su impedancia en función de la frecuencia. Lógicamente, la inserción de estos dispositivos en el sistema de potencia modificará la respuesta frecuencial del mismo, con lo que se podrá alterar el camino de circulación de los armónicos de corriente. En base a esta concepción, los filtros de armónicos se podrán clasificar en dos categorías fundamentales:

- ✓ **Filtros paralelo**, que presentarán baja impedancia en un determinado rango de frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en paralelo con la carga permitirá establecer un camino de baja impedancia para los armónicos de corriente seleccionados, evitándose así que éstos fluyan por el lado de fuente.
- ✓ **Filtros serie**, que son complementarios a los anteriores, y ofrecen alta impedancia a determinadas frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en serie con la carga aumentará la impedancia que ofrece el sistema a los armónicos seleccionados, con lo que su amplitud se verá atenuada.

Cada uno de estos filtros presenta un campo de aplicación específico. Retomando los modelos simplificados de las cargas no lineales que se mostraron en la Figura 1.2, en los cuales se modelaban dichas cargas mediante fuentes de corriente o fuentes de tensión, es posible dibujar las topologías de filtrado mostradas en la Figura 1.13. Como muestra la Figura 1.13a, cuando la carga no lineal tiende a imponer la corriente solicitada de la red (rectificador con inductancia en lado de continua), el uso de un filtro paralelo será la mejor opción posible. La correcta sintonización del filtro

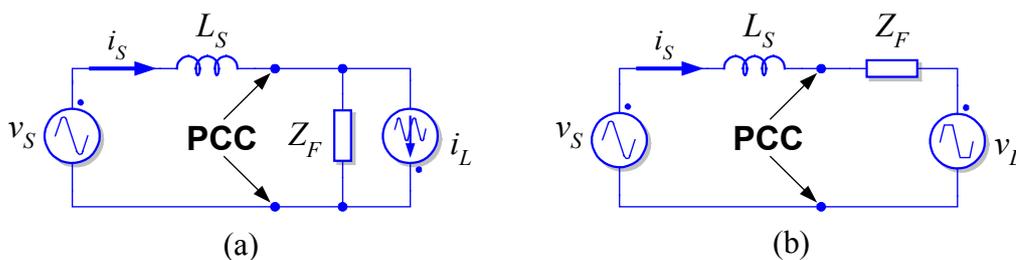


Figura 1.13. Circuito equivalente por fase de conexión del filtro de armónicos. (a) Conexión paralelo. (b) Conexión serie.

paralelo, el cual puede estar constituido por varias células de filtrado, permitirá que los armónicos seleccionados circulen mayoritariamente a través del mismo. La inserción del filtro paralelo disminuirá la impedancia que presenta la red a las frecuencias seleccionadas, con lo que mejorará la forma de onda de tensión en el PCC. La Figura 1.13b muestra una topología de filtrado basada en un filtro serie, la cual es idónea para cargas no lineales que tienden a mantener constante la tensión en su punto de conexión a la red (rectificador con un gran condensador en el lado de continua). La correcta sintonización del filtro serie aumentará la impedancia de la línea para las frecuencias seleccionadas, con lo que los armónicos de corriente a dichas frecuencias se verán fuertemente atenuados. La inserción del filtro serie aumentará la impedancia de la línea aguas abajo del PCC, lo cual mejorará la forma de onda de la tensión en dicho punto.

Si en la Figura 1.13a se hubiese utilizado un filtro serie (en lugar de uno paralelo) es posible que la carga dejase de funcionar correctamente. La inserción de una impedancia elevada (a las frecuencias armónicas) en serie con la fuente de corriente daría lugar a una excesiva caída de tensión en extremos de dicha impedancia para las frecuencias armónicas, lo que implicaría que la forma de onda de la tensión en la carga presentaría una distorsión intolerable para el correcto funcionamiento de la misma. De la misma manera, la inserción de un filtro paralelo en el circuito de la Figura 1.13b (en lugar de uno serie) podría resultar destructivo para la carga. La inserción de una impedancia muy baja (a las frecuencias armónicas) en paralelo con la fuente de tensión de la carga disminuiría enormemente la impedancia vista por dicha carga a las frecuencias armónicas, lo cual daría lugar a la circulación de elevadas corrientes armónicas a través de la misma, pudiéndose alcanzar niveles de corriente que resultasen destructivos.

La manera más simple para conseguir una impedancia que resulte selectiva en frecuencia consiste en la utilización de células de filtrado pasivas basadas en circuitos resonantes L - C [1.34]. Pasemos a continuación a evaluar el efecto de estos filtros pasivos sobre el sistema de potencia que se mostraba en la Figura 1.5.

- i) Inserción de filtros pasivos paralelo. Los filtros pasivos paralelo pueden presentar diferentes estructuras [1.35], y como se ha comentado anteriormente, su misión es la de ofrecer un camino de baja impedancia a los armónicos de corriente. La Figura 1.14 muestra la estructura típica de

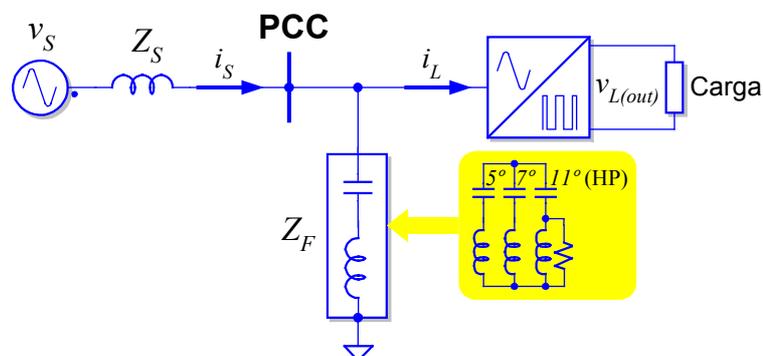


Figura 1.14. Inserción de un filtro pasivo paralelo.

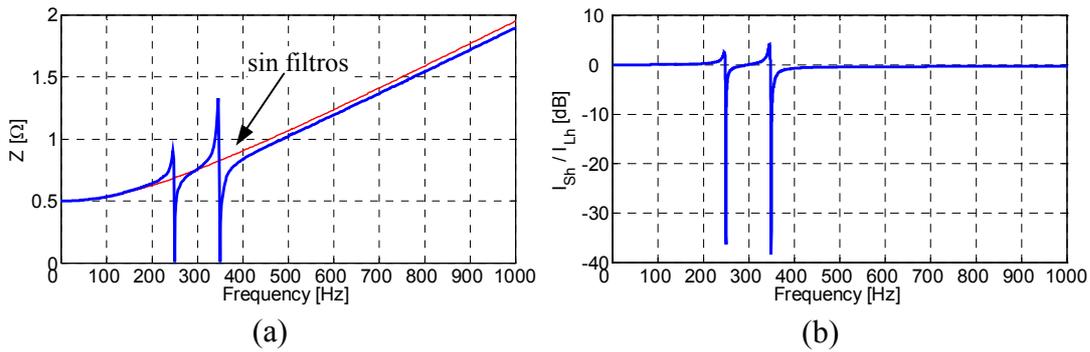


Figura 1.15. Respuesta frecuencial de la red con el filtro pasivo paralelo.

un filtro pasivo paralelo, el cual suele estar constituido por varias células L - C sintonizadas que actúan como “trampas” para armónicos específicos (el 5° y 7° en la Figura 1.14), junto con una célula pasa-altas que suele estar sintonizada entre el 9° y el 11° armónico. Para el ejemplo que aquí nos ocupa se han utilizado únicamente dos células sintonizadas al 5° y 7° armónico. En la Figura 1.15 se muestra como se ha alterado la respuesta frecuencial del sistema de potencia, representándose el módulo de la impedancia que ofrece la red a la carga (Z), y de la función de transferencia que relaciona los armónicos de la fuente con los de la carga (I_{Sh}/I_{Lh}), es decir:

$$Z = \frac{Z_S Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (1.8a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (1.8b)$$

En la Figura 1.15 se observa como las células diseñadas para este filtro paralelo presentan un elevado factor de calidad, lo cual da lugar a una elevada atenuación de los armónicos seleccionados, y a una estrecha banda pasante. En este ejemplo se ha elegido un elevado factor de calidad para evitar que el filtro paralelo absorba corriente reactiva de frecuencia fundamental. Aunque desde un punto de vista teórico esta elevada sintonización resulta factible, en la práctica será necesario disminuir el factor de calidad de dichos filtros para evitar sobretensiones destructivas en los condensadores y pérdidas de efectividad debida a las tolerancias de los componentes. De hecho, como especifica el estándar IEEE 1531-2003 [1.36], gracias a los condensadores, el filtro paralelo permite aportar potencia reactiva capacitiva de frecuencia fundamental al sistema de potencia. Con el objetivo de optimizar el coste del filtro, es importante conocer cuánta potencia reactiva de frecuencia fundamental es necesaria, y cuál es el ahorro obtenido mediante la aportación de dicha potencia reactiva al sistema.

En la Figura 1.16 se muestran las formas de onda resultantes de la aplicación del filtro pasivo paralelo sobre el sistema de la Figura 1.5. En los espectros armónicos de esta figura se aprecia como los armónicos 5° y

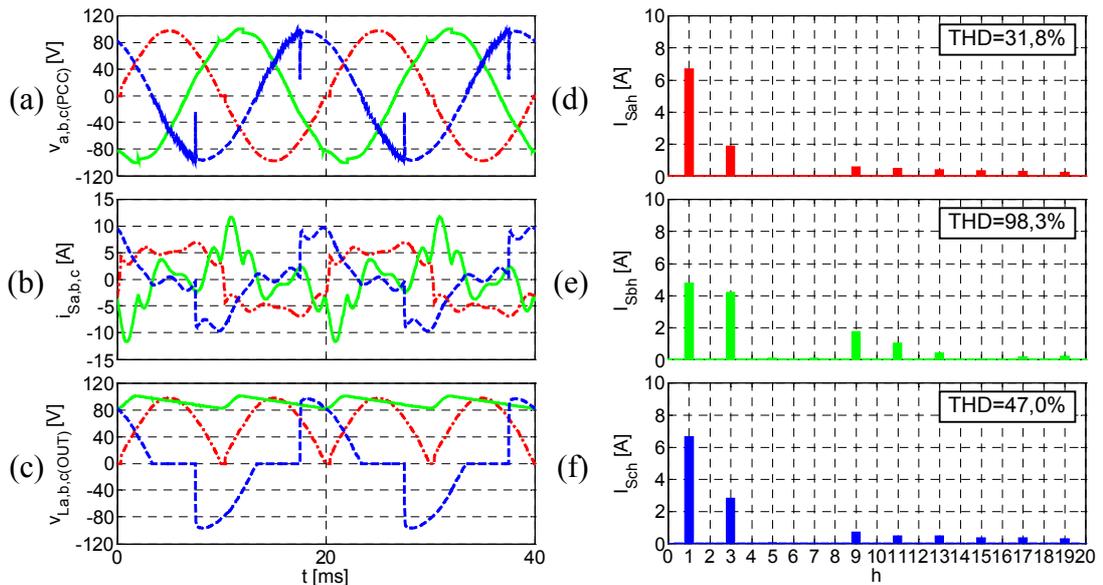


Figura 1.16. Tensiones, corrientes usando un filtro pasivo paralelo sintonizado al 5° y 7° armónico.

7° han sido completamente cancelados en el lado de fuente para todas las fases.

En la Figura 1.16a, es necesario reparar en el detalle de que la tensión en el *PCC* correspondiente a la fase donde está conectado el rectificador con filtro capacitivo en el lado de continua, prácticamente no ha variado respecto a la situación en que el filtro paralelo no estaba conectado, sin embargo, la impedancia de la red a las frecuencias armónicas seleccionadas ha disminuido mucho. Esto da lugar a que la corriente armónica absorbida por este rectificador aumente. En la Figura 1.17 se muestra la forma de onda de la corriente a la entrada del mencionado rectificador para diferentes condiciones de filtrado. En esta figura se aprecia como a medida que disminuye la impedancia para las diferentes frecuencias armónicas aguas arriba del rectificador, también aumenta el pico de la corriente absorbida por el mismo, pudiéndose alcanzar, en un caso extremo, situaciones que resultasen destructivas para la carga.

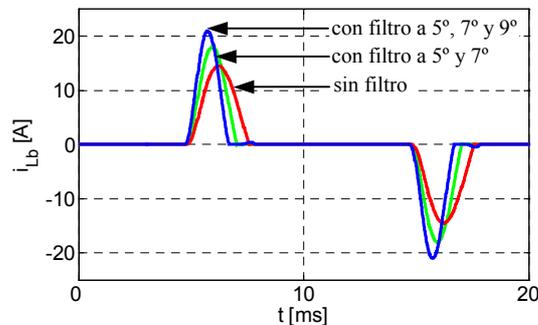


Figura 1.17. Efecto del filtro pasivo paralelo sobre la corriente absorbida por el rectificador con elevada capacidad en el lado de continua.

- ii) Inserción de filtros pasivos serie. Los filtros pasivos serie pueden presentar diferentes estructuras [1.37], y su misión es ofrecer una elevada impedancia a la circulación de los armónicos de corriente. La Figura 1.18 muestra la estructura típica de un filtro pasivo serie, el cual suele estar constituido por varias células L - C sintonizadas que actúan como un “tapón” para armónicos específicos (el 5° y el 7° en la Figura 1.18), junto una célula pasa-bajas que suele estar sintonizada entre el 9° y el 11° armónico.

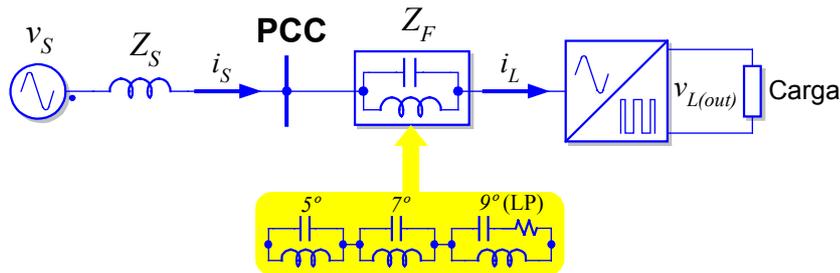


Figura 1.18. Inserción de un filtro pasivo serie.

En la Figura 1.19 se muestra como se ha alterado la respuesta frecuencial del sistema de potencia, representándose el módulo de la impedancia que ofrece la red a la carga (Z), y de la función de transferencia que relaciona los armónicos de corriente en la fuente con los armónicos de tensión en la carga (I_{Sh}/V_{Lh}), es decir:

$$Z = Z_S + Z_F \quad (1.9a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{V_{Lh}} = -\frac{1}{Z_S + Z_F} \quad (1.9b)$$

En la Figura 1.19 se aprecia como en el ejemplo que nos ocupa se ha elegido un elevadísimo factor de calidad para las diferentes células del filtro pasivo serie. Esto es así para conseguir que la impedancia de la red a frecuencia fundamental no aumente respecto a la situación en la que el filtro serie no estaba conectado. Este elevado factor de calidad puede dar lugar a elevadas corrientes en los componentes de células de filtrado, y a una pérdida de efectividad cuando los valores de los componentes variaran ligeramente debido al envejecimiento. Lógicamente, en un caso

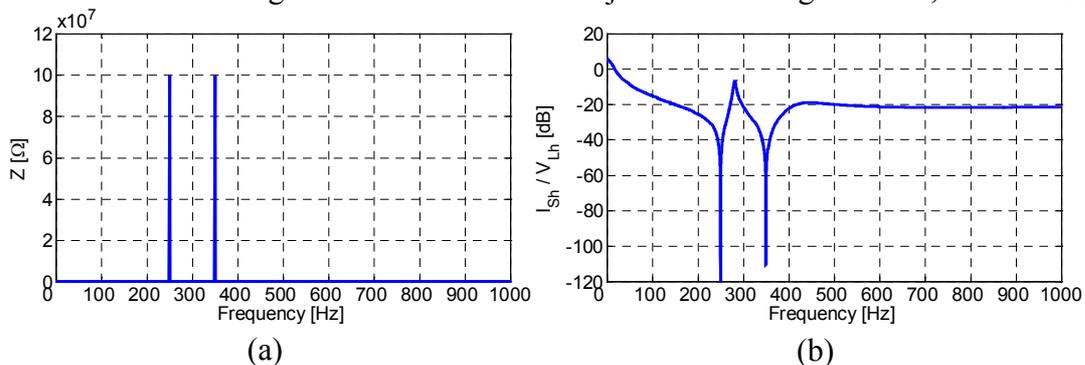


Figura 1.19. Respuesta frecuencial de la red con el filtro pasivo serie.

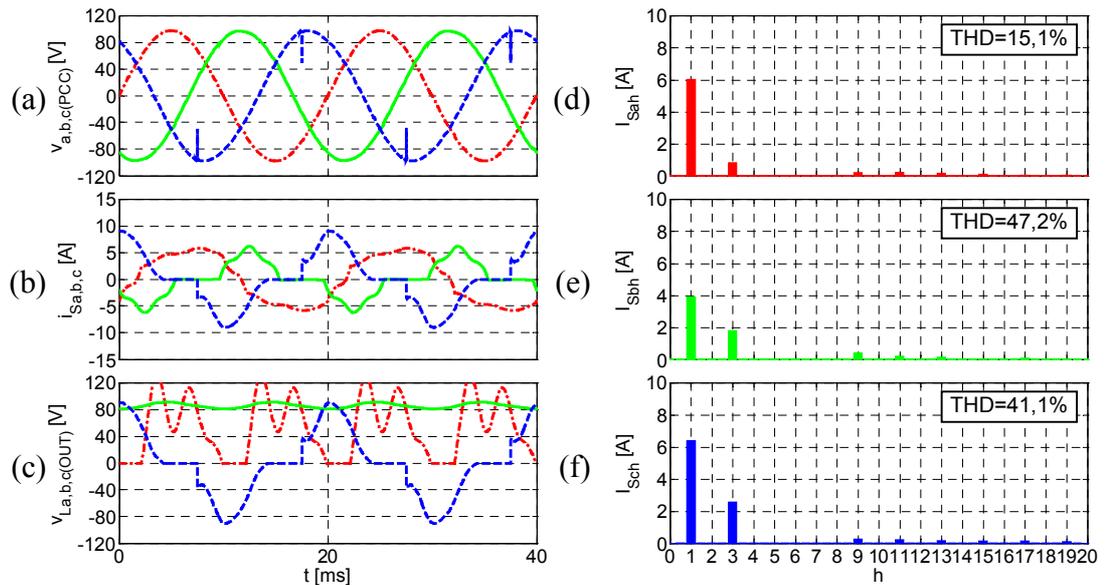


Figura 1.20. Tensiones, corrientes usando un filtro pasivo serie sintonizado a los armónicos 5°, 7° y 9° (pasa-bajas).

práctico, este factor de calidad sería inferior, existiendo cierta atenuación en la tensión de frecuencia fundamental que llegaría a la carga.

En la Figura 1.20 se muestran las formas de onda resultantes de la inserción del filtro pasivo serie en el sistema que se mostraba en la Figura 1.5. Como se puede apreciar en los espectros armónicos de las corrientes de fuente, los armónicos 5° y 7° han sido completamente cancelados, y los armónicos de orden 9 y superiores han sido atenuados. Así mismo, las formas de onda de tensión en el *PCC* han mejorado respecto a la situación original. El rectificador con filtrado capacitivo se ve claramente favorecido por el uso del filtro serie, ya que además de disminuir el contenido armónico de su corriente de entrada, se reduce el rizado de su tensión de salida. Sin embargo, el rectificador con filtrado inductivo y el *dimmer* se ven afectados de forma negativa por la inclusión de dicho filtro serie, ya que el aumento de la impedancia de red a las frecuencias armónicas seleccionadas da lugar a que la tensión a la entrada de dichos convertidores se vea claramente deteriorada, lo cual desvirtúa la tensión a la salida de los mismos, pudiendo aparecer defectos en el funcionamiento de dichas cargas.

En esta breve exposición de los filtros pasivos serie y paralelo se habrá podido observar que las células de filtrado no se han sintonizado al 3^{er} armónico. Esto se debe fundamentalmente a que la baja frecuencia de este armónico da lugar a filtros muy pesados y voluminosos. Aunque resulta factible la utilización de filtros paralelo para la cancelación del 3^{er} armónico, que además actúan como compensadores de potencia reactiva de frecuencia fundamental, o de circuitos “tapón” insertados en el conductor de neutro, generalmente se opta por utilizar otras técnicas, como son el uso de transformadores con acoplamientos adecuados, el uso de reactancias en zig-zag, o el uso de filtros híbridos, los cuales se presentarán a continuación, en los que se

mejoran las prestaciones del filtro pasivo mediante la utilización de elementos activos.

Sin realizar un análisis exhaustivo, debe resultar sencillo intuir que la acción combinada de los filtros serie y paralelo mejorará las prestaciones del sistema de filtrado de armónicos. Lógicamente, en una carga no lineal en fuente de corriente, el filtro paralelo se conectará a los terminales de entrada de ésta, mientras que el filtro serie actuará como enlace entre la carga y la red. En una carga en fuente de tensión, los filtros serie y paralelo se dispondrán de una manera inversa a la anteriormente descrita, es decir, con el filtro paralelo conectado en el lado de red.

Los filtros pasivos pueden ser diseñados para la compensación de armónicos sistemas de gran potencia, permitiendo una instalación sencilla, y resultando más robustos y económicos que otras opciones más avanzadas. Sin embargo, el hecho de que estos filtros carezcan de ningún tipo de “inteligencia” da lugar a que, una vez instalados, resulte imposible modificar sus parámetros de sintonización, viéndose su capacidad de filtrado severamente afectada por la impedancia de la red. Esto se traduce en un serio inconveniente para su instalación en sistemas de potencia con condiciones cambiantes. Así mismo, en sistemas complejos, es posible que aparezcan situaciones de resonancia que pueden dar lugar a una peligrosa amplificación de los armónicos, característicos y no característicos, de tensión y de corriente. El envejecimiento, el deterioro y el efecto de la temperatura pueden dar lugar a que los valores de los componentes se encuentren fuera de tolerancias, con lo que el filtro puede perder su efectividad. Por último, es necesario destacar que los filtros pasivos no permiten seleccionar la fuente de armónicos que debe ser filtrada, lo cual se puede traducir en una destrucción de los mismos como consecuencia una sobrecarga originada por la inyección adicional de armónicos por parte de terceras fuentes.

Los dispositivos electrónicos de potencia permiten el diseño de inversores que pueden actuar como fuentes de corriente (CSI – *Current Source Inverter*) o fuentes de tensión (VSI – *Voltage Source Inverter*) controlables. La inyección de “contra-armónicos” en la red mediante estos sistemas electrónicos de potencia da lugar a lo que se conoce como *filtros activos*. Un filtro activo es un dispositivo sumamente versátil, con el que, mediante un control adecuado, es posible conseguir que la respuesta frecuencial del sistema de potencia sea prácticamente ideal, obteniéndose además prestaciones adicionales como son el equilibrado de las fases, o la compensación de potencia reactiva [1.38]. Sin embargo, un filtro activo es un dispositivo relativamente complejo y costoso, sobre todo cuando trabaja en sistemas de gran potencia. Esto da lugar a que exista de otro tipo de sistemas, conocidos como *filtros híbridos*, en los que los inversores de tensión o corriente trabajan en colaboración con los filtros pasivos, mejorando la respuesta frecuencial de estos últimos [1.39]. Aunque los filtros híbridos no pueden ofrecer las mismas prestaciones que los filtros activos, el correcto diseño y control de los mismos, permite obtener excelentes sistemas de filtrado que utilizan inversores de baja potencia basados en topologías convencionales. Esta simplicidad en el diseño de los filtros híbridos se traduce en una reducción de su coste, lo cual les otorga una posición privilegiada en aquellos escenarios en los que la relación coste-prestaciones del filtro activo alcanza cotas inaceptables.

La topología de un filtro híbrido depende del tipo de filtro pasivo utilizado, del tipo de inversor, y del tipo de carga a acondicionar. Tal y como se muestra en [1.40], combinando estas tres variables es posible obtener diferentes configuraciones de filtros híbridos. En la Figura 1.21 se muestran, a modo de ejemplo, algunas topologías simplificadas de este tipo de filtros. En esta figura, las fuentes dependientes (v_F e i_F) representan a los inversores en fuente de tensión o corriente. En el sistema de la Figura 1.21a, la acción del filtro pasivo paralelo (Z_F) se ve reforzada por un inversor en fuente de tensión (v_F) para el acondicionamiento de una carga no lineal en fuente de corriente [1.41]. Si se hace que $v_F = k \cdot i_{Sh}$, donde i_{Sh} representa a las corrientes armónicas en el lado de fuente, se conseguirá que dicha fuente de tensión se comporte como una resistencia que se opone al paso de los armónicos de corriente. La inclusión de esta resistencia virtual reporta las siguientes ventajas: *i)* se aumenta el amortiguamiento de la red a frecuencias armónicas, con lo que se disminuye el riesgo de resonancias, *ii)* se hace que la característica de filtrado sea prácticamente independiente de la impedancia de red, *iii)* se aumenta la capacidad de absorción de armónicos del filtro pasivo paralelo, *iv)* se mejora la forma de onda de tensión en el PCC. Además, la introducción de nuevas funcionalidades en el control de v_F puede hacer que la tensión recibida por la carga quede protegida ante posibles perturbaciones en la tensión de red.

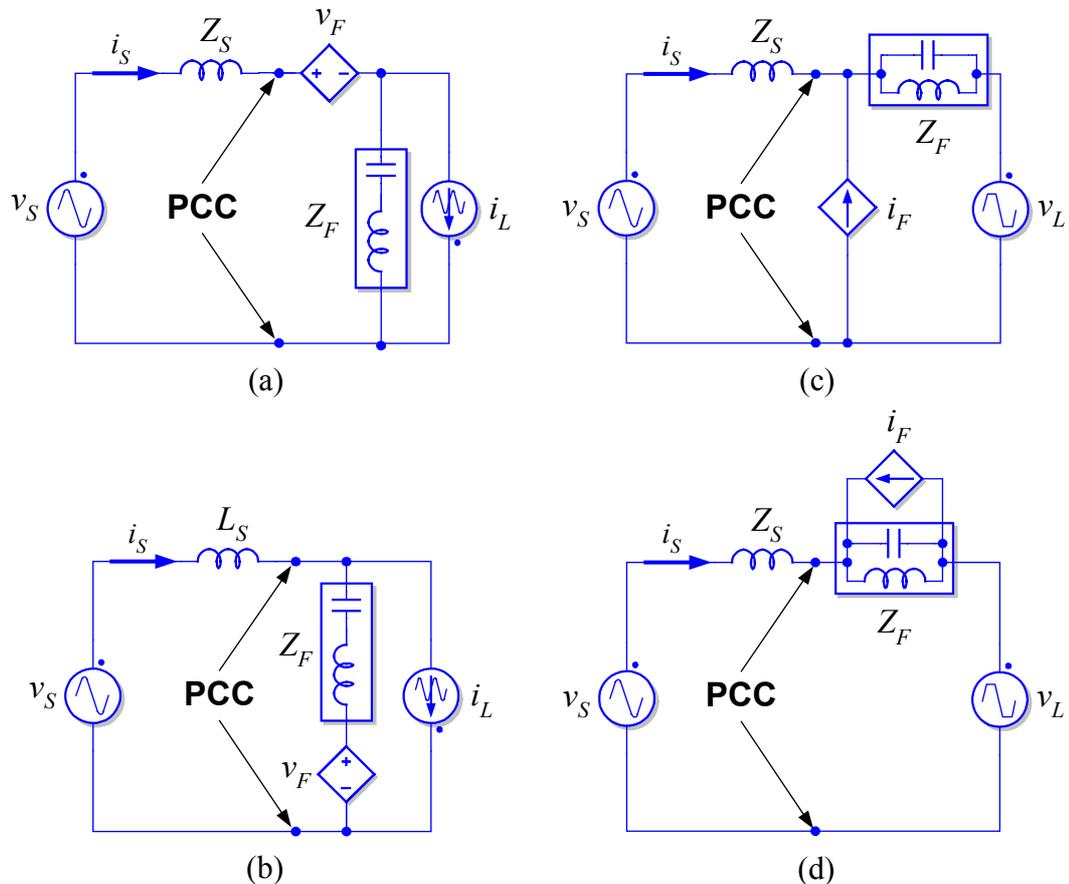


Figura 1.21. Circuito equivalente por fase de varios filtros híbridos.
(a) y (b) Filtro híbrido paralelo (carga en fuente de corriente). **(c) y (d)** Filtro híbrido serie (carga en fuente de tensión).

Un simple análisis del circuito de Figura 1.21a permite llegar a las siguientes expresiones para la impedancia vista desde la carga (Z), y para la función de transferencia que relaciona los armónicos de la fuente con los de la carga (I_{Sh}/I_{Lh}):

$$Z = \frac{Z_F(Z_S + k)}{Z_F + Z_S + k} \quad (1.10a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S + k} \quad (1.10b)$$

Cuando la función de transferencia de (1.10b) se compara con la mostrada en (1.8b), correspondiente a la acción individual del filtro pasivo paralelo, se llega fácilmente a la conclusión de que la respuesta frecuencial del filtro híbrido es mejor a la del filtro pasivo paralelo. Sin embargo, la topología de la Figura 1.21a no es la óptima. Esto es debido a que el inversor en fuente de tensión se ve atravesado por la totalidad de la corriente solicitada por la carga (incluyendo la componente de frecuencia fundamental), lo cual lógicamente incrementa su potencia y su coste. Manteniendo inalterada la ley de control del inversor, un análisis del filtro híbrido de la Figura 1.21b permite llegar a las siguientes expresiones:

$$Z = \frac{Z_F Z_S}{Z_F + Z_S + k} \quad (1.11a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_S + k} \quad (1.11b)$$

Como se puede apreciar, la función de transferencia de (1.11b) es idéntica a la de (1.10b), lo que indica que, a nivel de atenuación armónica, las topologías de filtro híbrido de las Figuras 1.21a y 1.21b son equivalentes, existiendo únicamente diferencias en lo referente a la impedancia vista desde la carga, la cual, además, es inferior en el segundo caso analizado. La principal ventaja que aporta la topología de la Figura 1.21b es que el inversor en fuente de tensión únicamente se verá recorrido por componentes armónicas de corriente, y no por la componente fundamental. Teniendo en cuenta que la tensión que deberá aportar dicho inversor será muy reducida, su potencia será realmente baja, y su grado de complejidad será mínimo. Estos factores evidencian la idoneidad de la topología la Figura 1.21b para ser utilizada en aplicaciones filtrado activo de elevada potencia [1.42].

En la Figura 1.22 se muestra el módulo de las expresiones de (1.11) para diferentes valores de k , considerándose que el filtro pasivo paralelo (Z_F) se encuentra sintonizado en el 7° armónico. En esta figura, se aprecia como el aumento del valor de k amplía el ancho de banda del sistema de filtrado, mejorándose claramente las prestaciones respecto a la situación en la que el filtro pasivo paralelo trabajaba de manera independiente. Lógicamente, en el sistema en lazo cerrado resultante, el valor de k presenta un valor límite que garantiza un comportamiento estable. Dicho valor viene determinado por los retardos asociados al proceso de cálculo y al periodo de conmutación del inversor. En la Figura 1.22 se puede apreciar como la respuesta frecuencial del sistema de filtrado presenta un punto de convergencia a la frecuencia fundamental. Esto se debe a que la variable de realimentación (i_{Sh}), la cual se utiliza para controlar el inversor en fuente de tensión, se obtiene a partir de un filtro de corte

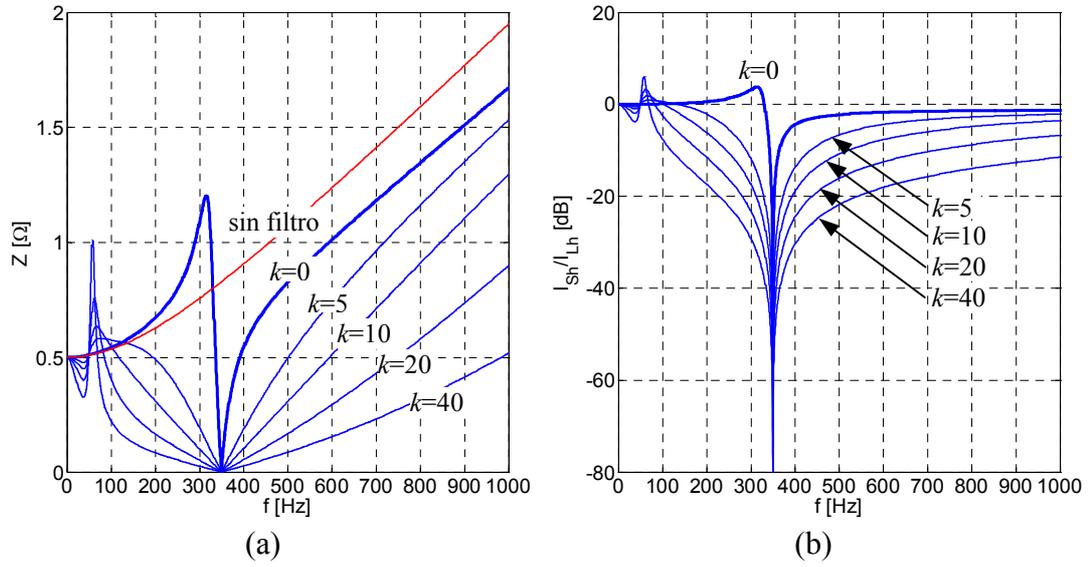


Figura 1.22. Respuesta frecuencial del filtro híbrido con $v_F = k \cdot i_{Sh}$.

de banda sintonizado a la frecuencia fundamental. Por tanto, con independencia del valor de k , el efecto del inversor será nulo a frecuencia fundamental, lo cual origina la convergencia de todas las curvas para dicha frecuencia.

El filtro híbrido de la Figura 1.21c es dual al del la Figura 1.21a, y se utiliza para el acondicionamiento de cargas no lineales en fuente de tensión. En este caso se utiliza un inversor en fuente de corriente que tiene por objeto reforzar la capacidad de bloqueo de los armónicos de corriente que presenta el filtro pasivo serie. Si se hace que $i_F = k \cdot i_{Sh}$, el inversor en fuente de corriente se comportará como una impedancia de valor Z_S/k , con lo que se conseguirá atenuar los armónicos de corriente en el lado de fuente. Un análisis del filtro híbrido de la Figura 1.21c permite llegar a las siguientes expresiones:

$$Z = Z_F + \frac{Z_S}{k+1} \quad (1.12a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{V_{Lh}} = -\frac{1}{Z_S + Z_F(k+1)} \quad (1.12b)$$

Si la expresión (1.12b) se compara con la (1.9b), correspondiente a la acción individual del filtro pasivo serie, se llega a la conclusión de que el filtro híbrido presenta una mejor respuesta frecuencial. Sin embargo, la topología de este filtro no es la más óptima, ya que el inversor en fuente de corriente debe soportar la totalidad de la tensión de la red, lo cual se traducirá en una mayor complejidad en dicho convertidor y en un mayor coste. Si se mantiene la ley de control del inversor en fuente de corriente, un análisis del filtro híbrido de la Figura 1.21d permite llegar a las expresiones mostradas en (1.13). En ellas, se puede apreciar como, a nivel de atenuación armónica, los filtros híbridos de las Figuras 1.21c y 1.21d son equivalentes, diferenciándose exclusivamente en la impedancia vista por la carga, la cual, resulta superior en el filtro de Figura 1.21d. La topología del filtro híbrido de la

$$Z = Z_S + Z_F(k+1) \quad (1.13a)$$

$$\frac{I_{Sh}}{V_{Lh}} = -\frac{1}{Z_S + Z_F(k+1)} \quad (1.13b)$$

Figura 1.21d presenta la ventaja de que el inversor en fuente de corriente no debe soportar la totalidad de la tensión de red, sino únicamente la pequeña tensión resultante de la diferencia entre ésta y la tensión en la entrada de la carga. Este factor, unido al hecho de que dicho inversor únicamente inyectará componentes armónicas de corriente, y no la componente de frecuencia fundamental, da lugar a que la potencia del mismo sea muy baja, lo que implica un abaratamiento del sistema.

En la Figura 1.23 se muestra el módulo de las expresiones de (1.13) para diferentes valores de k , considerándose que el filtro pasivo serie (Z_F) se encuentra sintonizado en el 7º armónico. En esta figura se aprecia como el aumento del valor de k amplía el ancho de banda del sistema de filtrado, mejorándose la respuesta frecuencial del mismo respecto a la situación en la que el filtro pasivo serie trabajaba en solitario.

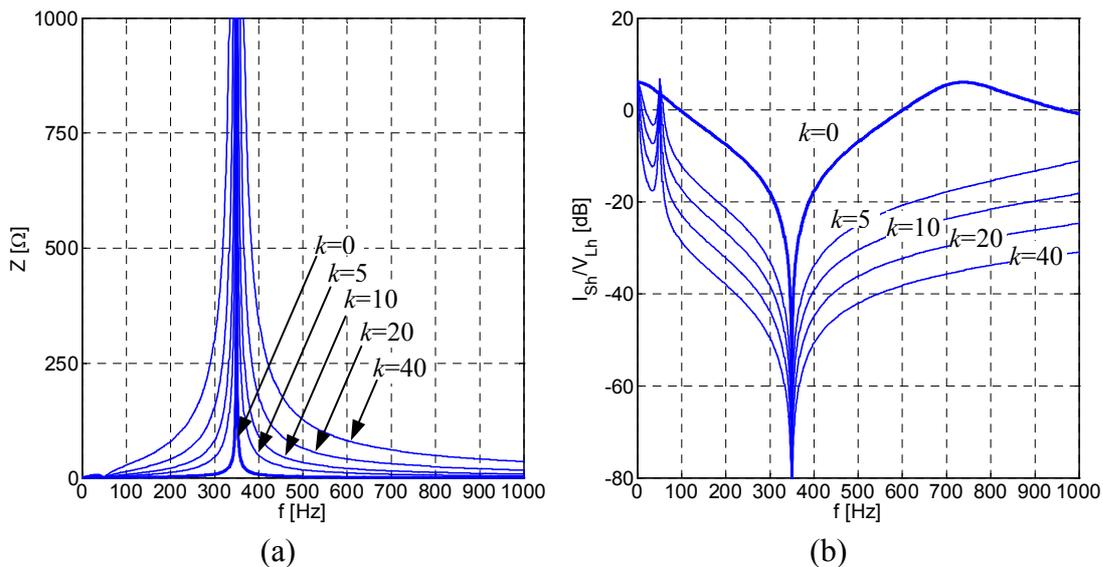


Figura 1.23. Respuesta frecuencial del filtro híbrido con $i_F = k \cdot i_{Sh}$.

Una vez que el filtro híbrido ha sido convenientemente presentado, pasaremos a evaluar el comportamiento de una de las topologías anteriores en el acondicionamiento de las corrientes del sistema de la Figura 1.5. Por tanto, como tercera opción de filtrado se propone:

- iii) Utilización de filtros híbridos. En este caso se evaluará el comportamiento de un filtro híbrido paralelo que responde a la topología mostrada en la Figura 1.21b, lo cual da lugar al sistema de filtrado de la Figura 1.24. En este caso, el tanque resonante $L-C$ se sintoniza en el 7º armónico, y la ley de control del inversor es $v_F = k \cdot i_{Sh}$, siendo $k=40$. En la Figura 1.25 se muestran las formas de onda resultantes de la aplicación de este filtro híbrido sobre el sistema de la Figura 1.5.

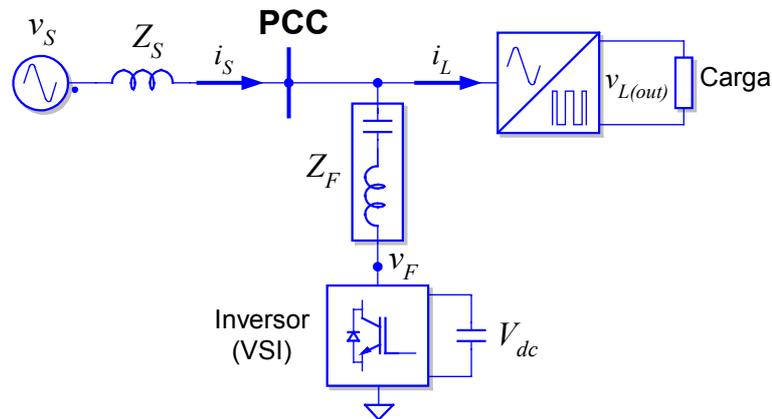


Figura 1.24. Utilización de un filtro híbrido paralelo con $v_F = k \cdot i_{Sh}$.

Las formas de onda de la corriente de fuente, así como su espectro armónico, revela que el filtro híbrido consigue resultados sumamente satisfactorios en el acondicionamiento de las corrientes solicitadas por las cargas. En este caso, la respuesta frecuencial del tanque resonante $L-C$ es menos estrecha que cuando se simuló el caso del filtro pasivo paralelo, por este motivo, el filtro absorbe una cantidad de corriente reactiva capacitiva de frecuencia fundamental superior a la que se necesita para compensar la potencia reactiva de la carga, lo que se traduce en un aumento de la componente de corriente de frecuencia fundamental que circula por el lado de fuente. Es importante reparar en que la acción del filtro híbrido paralelo ha disminuido severamente la impedancia vista desde la carga para las frecuencias armónicas. Si se considera la carga constituida por un rectificador con elevada capacidad en el lado de continua, este decremento de la impedancia armónica del sistema se

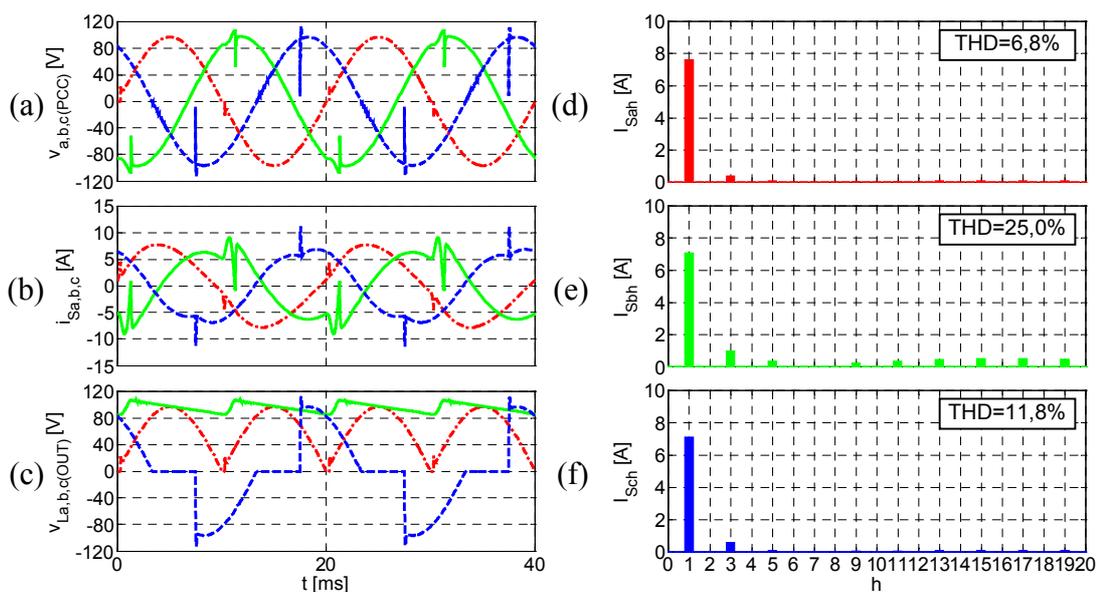


Figura 1.25. Tensiones, corrientes usando un filtro híbrido paralelo con el tanque resonante sintonizado al 7º armónico y una ganancia $k=40$.

traduce en elevados valores de cresta en la corriente de entrada al mismo (la corriente de carga del condensador está débilmente limitada). Este efecto se puede apreciar en la elevada pendiente de subida que presenta la forma de onda de tensión a la salida de dicho rectificador, la cual se asemeja mucho a un diente de sierra. Para evitar estos grandes picos de corriente, los cuales podrían llegar a ser destructivos tanto para el rectificador como para el propio filtro, se aconseja la inserción de una inductancia limitadora de corriente a la entrada de dicho rectificador.

Sin necesidad de realizar una simulación específica, se debe intuir que la utilización de un filtro híbrido serie estaría indicada cuando la carga no lineal se comportase como una fuente de tensión. Para las cargas en fuente de corriente, la acción de dicho filtro serie mejoraría las formas de onda de corriente la red, pero daría lugar a que la tensión a la entrada de dichas cargas estuviese sumamente deformada, lo cual podría dar lugar a disfunciones en las mismas. De la misma forma, en esta introducción no se estima oportuno justificar, ni analíticamente, ni mediante simulación, que la acción combinada de los filtros híbridos serie y paralelo mejorará la característica de filtrado del sistema resultante.

Para acabar con esta presentación de las técnicas de filtrado se describirán brevemente los filtros activos. En esencia, un filtro activo no es más que una fuente de tensión o corriente controlable que se conecta directamente, o a través de un transformador, al sistema de potencia. En la práctica, dichas fuentes se implementan mediante inversores electrónicos de potencia que trabajan en bucle cerrado para conseguir la máxima fidelidad en la inyección de la tensión o corriente aportada como referencia. En el enlace a red de dichos inversores, es preciso utilizar un pequeño filtro pasivo que evita que las componentes de tensión o corriente debidas a la conmutación sean inyectadas en la red. Como se verá en el Capítulo 4, estos inversores en fuente de tensión o corriente pueden presentar diferentes topologías, lo cual determina en gran medida las prestaciones de filtrado del sistema. Al contrario de lo que ocurría con los filtros híbridos anteriormente presentados, un filtro activo debe soportar la totalidad de la tensión de la red, o la totalidad de la corriente de la carga, lo cual complica y encarece el inversor de potencia. Si se usan transformadores para el enlace del inversor a la red, el coste y las pérdidas de este dispositivo han de ser tenidas en cuenta. Este aumento en el coste de la fuente de inyección de “contra-armónicos” en la red va acompañado de una serie de prestaciones que no se pueden alcanzar por un filtro híbrido. Entre estas prestaciones adicionales se pueden destacar las siguientes: *i)* equilibra las corrientes de frecuencia fundamental que son suministradas por cada fase de la fuente, *ii)* regula completamente la cantidad de potencia reactiva suministrada a la red, *iii)* compensa corrientes armónicas en un rango más amplio de frecuencias, *iv)* presenta una rápida respuesta dinámica, pudiendo compensar perturbaciones transitorias y no periódicas, *v)* con un diseño adecuado, y disponiendo de una fuente de energía en el lado de continua, puede trabajar como un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS – *Uninterruptible Power System*), *vi)* puede extender sus prestaciones de compensación hacia tareas de regulación de tensiones en embarrados, y control del flujo de potencia en las líneas, siendo la base los *sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna* (FACTS – *Flexible AC Transmission Systems*).

Aunque los principios del filtrado activo de fueron establecidos en 1976 por Gyugyi [1.43], la evolución de este tipo de dispositivos se extiende hasta nuestros días, investigándose en cuestiones tales como su aplicación en sistemas de transmisión de gran potencia, en sistemas de generación distribuida, en sistemas de distribución de cuatro hilos, y en redes que trabajan en condiciones adversas debido a fallas, sobrecargas, desequilibrios, contaminación, etc [1.44].

La Figura 1.26 muestra el circuito equivalente simplificado de un filtro activo paralelo, más conocido como filtro activo en derivación (SAPF – *Shunt Active Power Filter*), y de un filtro activo serie. En éste último, la inserción en serie con la red del convertidor en fuente tensión se realiza generalmente mediante el uso un transformador. Después de lo expuesto con anterioridad en este apartado, debe resultar sencillo entender que, mediante un control adecuado, las fuentes i_F y v_F de la Figura 1.26 se pueden comportar como impedancias prácticamente ideales, ofreciendo respectivamente una impedancia nula o infinita a determinadas frecuencias, con lo que teóricamente se podría conseguir una atenuación absoluta de los armónicos de corriente generados por la carga. Lógicamente, el comportamiento real del sistema de filtrado diferirá en cierta medida del ideal debido a las limitaciones inherentes de los convertidores y del control (máxima tensión y corriente admisible, tiempo de respuesta, etc), aunque la calidad de las corrientes finalmente resultantes en el lado de la fuente superará con creces los niveles establecidos por la normativa de compatibilidad electromagnética. Aunque el control de los filtros activos se puede realizar en el dominio frecuencial, analizando la frecuencia de la perturbación armónica e inyectando selectivamente los “contra-armónicos” correspondientes, la elevada velocidad de respuesta de este tipo de filtros permite el diseño de sistemas que trabajan en el dominio temporal, lográndose además la compensación de perturbaciones transitorias y no periódicas.

La configuración de filtrado de la Figura 1.26b permite, además de limitar la circulación de corrientes armónicas, aislar a la carga de las perturbaciones de tensión existentes en el lado de fuente. Esta funcionalidad da lugar al dispositivo conocido como *restaurador dinámico de tensión* (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*), el cual, debido a su alta velocidad de respuesta, es capaz de proteger a la carga de las perturbaciones, permanentes y transitorias, que puedan aparecer en la red, como son los huecos de tensión originados por fallas fase-fase o fase tierra en un punto relativamente cercano de la red (fallas generalmente debidas al impacto de un rayo en las líneas del sistema de potencia).

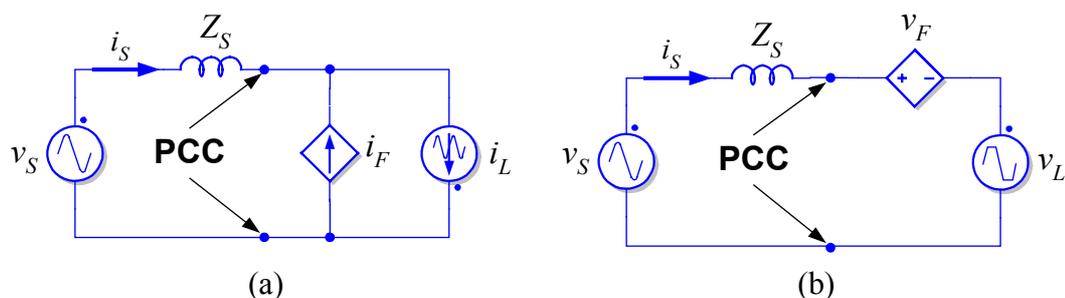


Figura 1.26. Circuito equivalente por fase de filtros activos.
(a) Filtro activo paralelo (carga en fuente de corriente). **(b)** Filtro activo serie (carga en fuente de tensión).

Tras lo expuesto, se procederá a evaluar el comportamiento de un filtro activo en el acondicionamiento de las corrientes del sistema de la Figura 1.5. Por tanto, como cuarta opción de filtrado se propone:

- iv)* Utilización de filtros activos. En este caso se utilizará un filtro activo en derivación como el mostrado en la Figura 1.27. Como se puede apreciar, la fuente de corriente controlable se obtiene mediante un inversor en fuente de tensión (VSI) regulado en corriente, el cual utiliza una inductancia relativamente pequeña para su enlace a red.

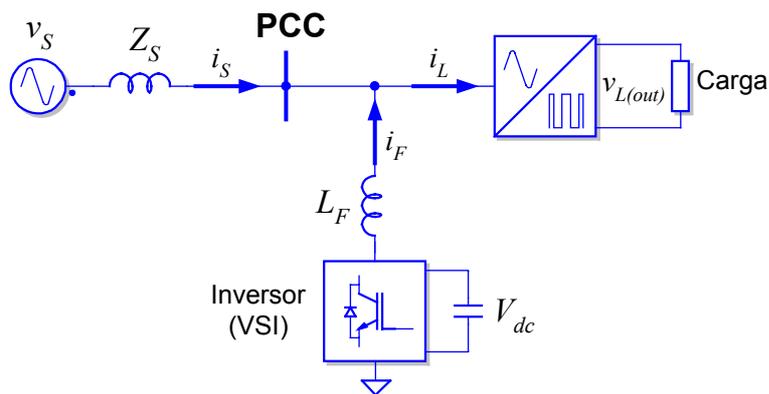


Figura 1.27. Utilización de un filtro activo en derivación (SAPF).

En la Figura 1.28 se muestran las formas de onda resultantes de la aplicación de este filtro activo paralelo sobre el sistema de la Figura 1.5. En la Figura 1.28b se aprecia la excelente calidad de las formas de onda de corriente resultantes en el lado de fuente. En este ejemplo, el filtro activo, además de cancelar la circulación de corrientes armónicas, está compensando exactamente la potencia reactiva asociada a la carga, y está equilibrando las corrientes en las diferentes fases del sistema trifásico.

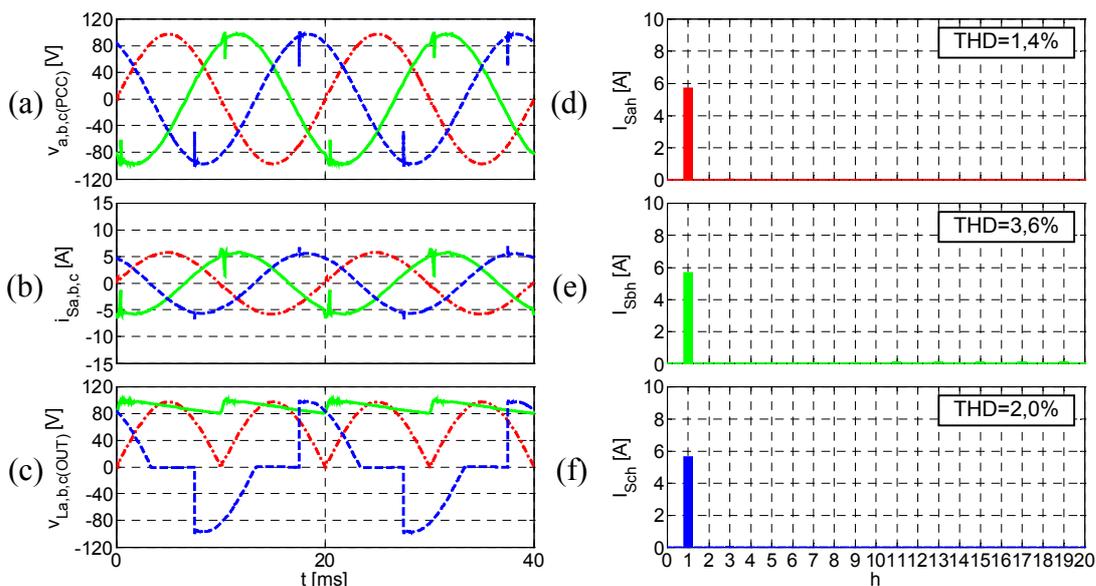


Figura 1.28. Tensiones, corrientes usando un filtro activo en derivación.

Cuando se utiliza un filtro activo paralelo se evidencia aún más la necesidad de tomar las correspondientes precauciones cuando entre las cargas a acondicionar existe algún rectificador con un gran filtro capacitivo en el lado de continua. Si este rectificador se encuentra muy próximo al punto de instalación del filtro activo paralelo, la inductancia parásita que existirá entre dicho punto de conexión y los bornes de entrada del rectificador será mínima. Esto dará lugar a que la impedancia a frecuencias armónicas (incluso de orden elevado), vista desde los terminales de entrada de dicho rectificador, sea realmente baja, por lo que la corriente de carga del condensador del lado de continua presentará una elevada pendiente de subida, lo que puede dar lugar a un valor de pico en la misma que resulte destructivo tanto para el rectificador como para el filtro. Este efecto queda patente en la forma de onda de tensión a la salida del rectificador capacitivo de la Figura 1.28c, la cual tiene una forma de diente de sierra, con un flanco de subida, prácticamente vertical. La inserción de una pequeña inductancia limitadora conectada en serie con las cargas en fuente de tensión resuelve este problema.

La combinación de filtros activos serie y paralelo da lugar a sistemas universales de acondicionamiento con excelentes prestaciones, los cuales garantizan tanto la circulación de corrientes sinusoidales equilibradas en el lado de fuente, como la inmunidad de la carga ante perturbaciones de red. Estos sistemas avanzados de acondicionamiento se muestran de manera simplificada en la Figura 1.29. El sistema de la Figura 1.26a se denomina *acondicionador unificado de calidad de potencia* (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*) [1.45][1.46]. En él, el inversor en fuente de corriente se encargará del acondicionamiento de las corrientes de carga (cancelación de armónicos, reactiva y equilibrado), mientras que el inversor en fuente de tensión de encargará de obstaculizar la circulación de armónicos de corriente hacia red, y de la cancelación de las perturbaciones de tensión en la carga. En caso de que se interrumpa la alimentación por parte de la red, el inversor de corriente puede ser reconfigurado para trabajar como inversor de tensión, pasando a comportarse como un *sistema de alimentación ininterrumpida* (UPS – *Uninterruptible Power Supply*) [1.47]. Lógicamente, para que este modo de funcionamiento pueda mantenerse a lo largo del tiempo es preciso que exista una fuente adicional de energía en el sistema de filtrado. Esta fuente adicional de energía se obtiene generalmente a través de baterías. El sistema de la figura 1.29b es dual al anterior, siendo denominado *sistema de alimentación ininterrumpida interactivo con la red* (LIUPS).

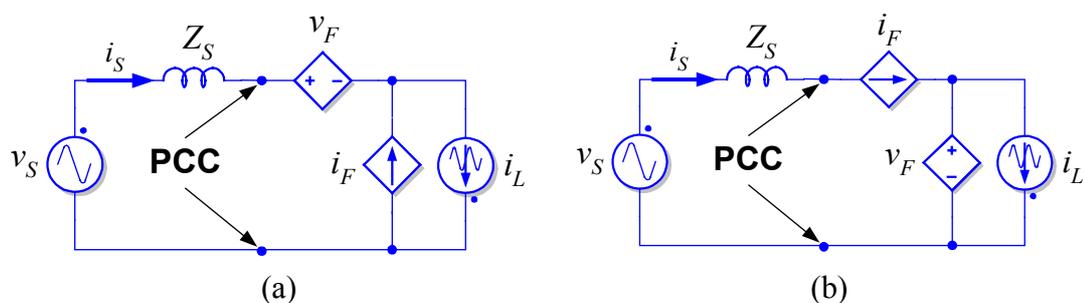


Figura 1.29. Circuito equivalente por fase de acondicionadores activos universales. **(a)** Acondicionador unificado de calidad de potencia (UPQC). **(b)** Sistema de alimentación ininterrumpida interactivo con la red (LIUPS).

red (LIUPS – *Line-Interactive UPS*) [1.48][1.49]. En este caso, el inversor en fuente de tensión se encarga de suministrar a la carga unas tensiones sinusoidales y equilibradas, mientras que el inversor en fuente de corriente se encarga de solicitar de la red unas corrientes también sinusoidales y equilibradas. Según lo expuesto, las corrientes armónicas, corrientes de desequilibrio, y corrientes reactivas se ven obligadas a circular a través del inversor en fuente de tensión, mientras que las perturbaciones de la tensión de red quedarán retenidas en extremos del inversor en fuente de corriente. En esta configuración, si aparece una interrupción en la tensión de red, el paso al funcionamiento como sistema de alimentación ininterrumpida es automático, siendo únicamente necesario anular la consigna al inversor en fuente de corriente.

Antes de acabar con esta presentación, es necesario indicar que la inserción en la red de equipos basados en electrónica de potencia, que pueden actuar como fuentes de tensión o corriente controlables en tiempo real, da lugar al desarrollo de los modernos *sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna* (FACTS – *Flexible AC Transmission Systems*). En estos sistemas, es posible aumentar la capacidad de transmisión de energía, regular la tensión en los embarrados, e incrementar la estabilidad general. Hasta el momento, los inversores en fuente de tensión y corriente que se mostraban en la Figura 1.26 se han utilizado principalmente para la cancelación de las perturbaciones armónicas de la carga o de la red, sin embargo, la capacidad de dichos inversores para suministrar corrientes y tensiones controlables de frecuencia fundamental abre un nuevo campo de aplicación de los mismos. En este sentido, el inversor en fuente de corriente de la Figura 1.26a se puede comportar como un *compensador síncrono estático* (STATCOM – *Static Compensator*) [1.50] [1.51] que permite regular la tensión en un embarrado (*PCC*), mediante la inyección de corriente reactiva en el sistema de potencia. En la Figura 1.26a, la inyección de una corriente adelantada o retrasada 90° respecto a la tensión en el *PCC* no da lugar a consumo de potencia activa por parte del inversor, sin embargo, mediante dicha corriente se puede modificar la caída de tensión en la impedancia equivalente del lado de fuente (Z_S), la cual es predominantemente inductiva, consiguiéndose de esta forma la regulación de la tensión en el embarrado del *PCC*. De la misma manera, el inversor en fuente de tensión de la Figura 1.26b se puede comportar como un *compensador estático síncrono conectado en serie* (SSSC – *Static Synchronous Series Compensator*) [1.52][1.53] que permite regular la potencia activa y reactiva suministrada por la fuente mediante la variación del módulo y la fase de la tensión en el *PCC*. Esta regulación resulta posible gracias al hecho de que en una línea de transmisión que presente una reactancia X_L , y cuyos voltajes eficaces en los embarrados de origen y destino sean respectivamente V_S y V_L , las potencias activa y reactivas suministradas por la misma valen:

$$P = \frac{V_S V_L}{X_L} \cos \delta \quad ; \quad Q = \frac{V_S V_L}{X_L} (1 - \cos \delta), \quad (1.14)$$

donde δ representa el desfase entre los fasores \vec{V}_S y \vec{V}_L . Por tanto, mediante el inversor en fuente de tensión de la Figura 1.26b, es posible modificar el módulo y la fase de la tensión en el *PCC*, con lo que resulta posible regular la potencia activa y reactiva suministrada por la fuente. Lógicamente, si en el circuito de la Figura 1.26,

la potencia activa resultante en el lado de fuente no coincide con la de carga, es preciso que el inversor sea capaz de absorber o suministrar la diferencia existente.

La combinación de los dos dispositivos anteriormente descritos da lugar al sistema conocido como *controlador unificado de flujo de potencia* (UPFC – *Unified Power Flow Controller*), el cual fue propuesto por Gyugyi en 1992 [1.54] y que hoy día resulta el principal exponente de los FACTS [1.55][1.56]. La Figura 1.30 muestra de manera esquemática la estructura del UPFC. Según lo expuesto anteriormente, el inversor en fuente de tensión (VSI) de esta figura estará regulando la potencia activa y reactiva suministrada por la fuente v_{S1} , mientras que el inversor en fuente de corriente (CSI) estará regulando la tensión en el embarrado v_{T2} .

Cuando el UPFC incorpora las funciones del filtrado y acondicionamiento que se expusieron anteriormente, se consigue un sistema denominado *acondicionador universal de líneas de potencia* (UPLC – *Universal Power Line Conditioner*) [1.57], el cual, adicionalmente, aísla a la carga de las perturbaciones de la red, e impide la circulación de corrientes distorsionadas y desequilibradas por esta última, mejorando así la estabilidad general del sistema de potencia.

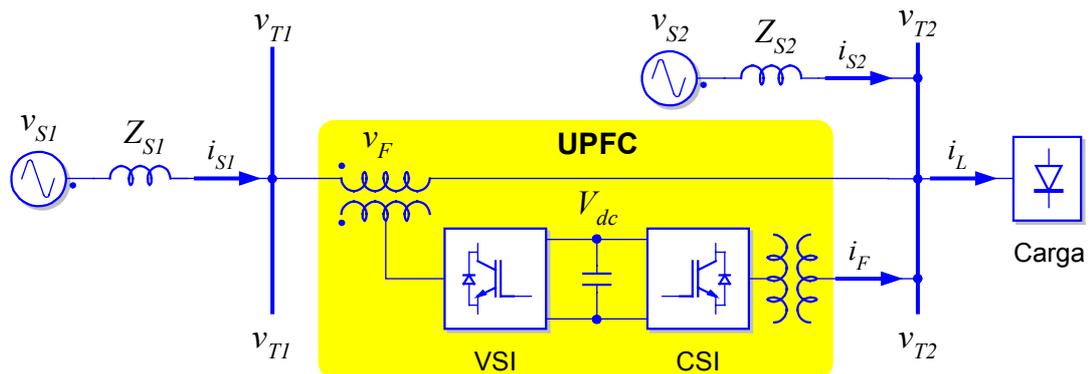


Figura 1.30. Esquema simplificado del UPFC.

1.6. Síntesis de conceptos fundamentales

Como síntesis de esta introducción, seguidamente se enumeran una serie de conceptos fundamentales relacionados con el estudio y mejora de la calidad de potencia en sistemas eléctricos:

- i) La calidad de potencia de un sistema eléctrico describe y valora la idoneidad de las formas de onda de tensión y corriente en el mismo con el objetivo de conseguir un funcionamiento compatible de los diferentes equipos y sistemas que lo constituyen. El ámbito de la calidad de potencia abarca desde el estudio y medida de las causas y efectos de las perturbaciones electromagnéticas, hasta el diseño de medidas mitigadoras de las mismas. Conseguir un nivel óptimo de calidad de potencia requiere la colaboración de los diferentes actores que intervienen en el sistema eléctrico. Es importante no confundir el concepto de calidad de potencia,

- que está relacionado con la calidad del “producto eléctrico”, con el de calidad de suministro eléctrico, que guarda relación con la fiabilidad en el suministro de dicho producto.
- ii)* En un Mundo que cada día depende más de la energía en general, y de la energía eléctrica en particular, existen diferentes factores, sociales y tecnológicos, que hacen que la preocupación por aspectos cruciales, como la calidad de potencia y la eficiencia energética, colabore a un desarrollo perdurable y sostenible de la Sociedad.
 - iii)* Las perturbaciones de tensión y corriente en sistemas eléctricos se catalogan, según el caso, mediante parámetros temporales o frecuenciales, y sus límites quedan regulados por normativas internacionales.
 - iv)* Las perturbaciones que afectan a un consumidor en concreto pueden ser originadas por el sistema de generación, transmisión y distribución, por el propio consumidor, o por otros consumidores cercanos a éste. Las consecuencias de estas perturbaciones varían según el contexto económico y el área de aplicación, pudiéndose encontrar situaciones en las que se ponga en peligro la seguridad de las personas (hospitales, aeropuertos, etc).
 - v)* Aunque existen sistemas universales que permiten alcanzar unos niveles óptimos de calidad de potencia tanto en el lado del suministrador, como del consumidor, su coste es hoy día elevado. Encontrar una solución óptima a cada problema requiere un estudio técnico particularizado.
 - vi)* Los filtros pasivos de armónicos de corriente, aunque no consiguen resultados óptimos, son una solución simple y económica. Su utilización debe ir acompañada de un estudio pormenorizado de la instalación, y no se puede garantizar su efectividad ante condiciones cambiantes en la red o ante envejecimientos. En algunos casos particulares, la instalación de filtros pasivos puede llegar a ocasionar graves problemas en la red.
 - vii)* Los filtros híbridos son una solución efectiva y relativamente económica al problema de la polución armónica, sobre todo en aplicaciones de gran potencia. Estos filtros aprovechan las ventajas de los filtros pasivos y activos para el acondicionamiento de armónicos, obteniéndose sistemas con una buena respuesta frecuencial de régimen permanente que utilizan dispositivos electrónicos de potencia convencionales y económicos.
 - viii)* Los filtros activos presentan excelentes prestaciones en el acondicionamiento de tensiones y corrientes. Mediante estos sistemas, no sólo se consigue reducir las perturbaciones armónicas de la red con un elevado ancho de banda y gran velocidad de respuesta, sino que también es posible actuar sobre las componentes de tensión y corriente de frecuencia fundamental, ofreciendo prestaciones adicionales como son el equilibrado de las fases y la compensación precisa de la potencia reactiva.
 - ix)* La inclusión en la red de sistemas activos basados en electrónica de potencia, además de atenuar las perturbaciones, permite un control en tiempo real de las tensiones en los embarrados y del flujo de potencia en las líneas, lo cual da lugar a los modernos sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS).

1.7. Referencias del Capítulo 1

- [1.1] IEEE Standards Development: *Standards Coordinating Committee on Power Quality (SCC-22)*, in website <http://grouper.ieee.org/groups/scc22/>.
- [1.2] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, 7th ed., *IEEE Std. 100-1996*, IEEE, New York, 2000.
- [1.3] IEEE Std. 1100-1996: *IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment*. IEEE, 1999.
- [1.4] IEEE Standards Development: *Harmonics Working Group and Task Forces*, in website <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/index.html>.
- [1.5] Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 1: General, Section 1: *Application and interpretation of fundamental definitions and terms*, IEC-61000-1-1, 1992.
- [1.6] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*, New York: IEEE Press, 2000.
- [1.7] Real Decreto 1955/2000, de 1 de Diciembre, Ministerio de Economía, BOE num. 310, 27/12/2000.
- [1.8] A. E. Emanuel, "Harmonics in the early years of electrical engineering: a brief review of events, people and documents," in *Proc. IEEE ICHQP'2000*, Oct. 2000, pp. 1-7.
- [1.9] B. Brower, *A History of Light and Power, IEEE History of Technology Series*, New York: Peter Peregrinus, 1982.
- [1.10] J. D. Ryder and D. G. Fink, *Engineers and Electrons: A Century of Electrical Progress*, New York: IEEE Press, 1984.
- [1.11] J. Hopkinson, "Some points in electric lighting," *Jour. Soc. Tel. Eng.*, vol. 13, pp. 496, 1884.
- [1.12] E. L. Owen, "A history of harmonics in power systems," *IEEE Ind. App. Magazine*, pp. 6-12, Jan. 1998.
- [1.13] H. H. Kajihara, "Quality power for electronics," *Electro-Tech.*, vol. 82, pp. 46, Nov. 1968.
- [1.14] D. L. Plette, "The effects of improved power quality on utilization equipment," in *Proc. IEEE. Nat. Aerospace Elec. Conf.*, May 1969, pp. 243-250.
- [1.15] D. J. Hucker, "Aircraft a.c. electric system power quality," in *Proc. IEEE. Nat. Aerospace Elec. Conf.*, May 1970, pp. 426-430.
- [1.16] R. H. McFadden, "Power system analysis – what it can do to industrial plants," *IEEE. Trans. Ind. and Gen. App.*, vol. 7, pp. 181-188, 1971.
- [1.17] IEEE Xplore, in website <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [1.18] T. S. Key, "Diagnosing power-quality related computer problems," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 5, pp. 381-393, July 1979.
- [1.19] D. A. Paice, *Power Electronic Converter Harmonics*, New York: IEEE Press, 1995.
- [1.20] R. Lawrence and B. Moncrief, "Compatibility saves money," *IEEE Ind. App. Magazine*, vol. 10, pp. 10-17, March/Apr. 2004.
- [1.21] Directive 85/374/EC: *Liability for Defective Products*, Council of the European Community, 25 July 1995.
- [1.22] Ley 54/1997, de 27 de Noviembre, *del sector eléctrico*, Jefatura del Estado, BOE num. 285, 28/11/1997.
- [1.23] Directive 2001/77/EC: *Promotion of electricity produced from renewable energy sources*, Council of the European Community, 27 Sept. 2001.
- [1.24] European Standard EN-50160: *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*, CENELEC, 1994.
- [1.25] IEEE Std. 1195-1995: *IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality*. IEEE, 1995.
- [1.26] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality, 2nd edition*, New York: McGraw Hill, 2002.
- [1.27] IEEE Std. 519-1992: *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*. IEEE, 1992.
- [1.28] T. Tanaka, N. Koshio, H. Akagi, and A. Nabae, "Reducing supply current harmonics," *IEEE Ind. App. Magazine*, vol. 4, pp. 31-37, Sept.-Oct. 1998.
- [1.29] A. Nabae, "Environmental issues and power electronics," in *Proc. IEEE ISIE'2000*, July 2000, pp. PL1-PL5.
- [1.30] IEEE Standards Development: *Working Groups on Power Quality and Power Systems*, in website <http://grouper.ieee.org/groups/index.html>.

- [1.31] IEC Electromagnetic Compatibility: *EMC Zone*, in website <http://www.iec.ch/zone/emc/>.
- [1.32] Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 2: *Limits for harmonics current emissions (equipment input current $\leq 16A$ per phase)*, IEC-61000-3-2, 1997.
- [1.33] Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 4: *Limitation of emissions of harmonics currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated currents greater than 16A*, IEC-61000-3-4, 1998.
- [1.34] D. A. González and J. C. McCall, "Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. IA-23, pp. 504-512, May/June 1987.
- [1.35] J. C. Das, "Passive filters – potentialities and limitations," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 40, pp. 232-241, Jan./Feb. 2004.
- [1.36] IEEE Std. 1531-2003: *IEEE Guide for application and specifications of harmonic filters*. IEEE, 2003.
- [1.37] F. Z. Peng and G. J. Su, "A series LC filter for harmonic compensation of ac drives," in *Proc. IEEE. Power Elect. Specialist Conf.(PESC'99)*, 1999, pp. 213-218.
- [1.38] H. Akagi, "New trends in active filters for improving power quality," in *Proc. PEDES'96*, 1996, pp. 410-416.
- [1.39] M. Rastogi, N. Mohan, and A. A. Edris, "Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, pp. 1994-2000, Oct. 1995.
- [1.40] F. Z. Peng, "Harmonic sources and filtering approaches," *IEEE Ind. App. Magazine*, vol. 7, pp. 31-37, July-Aug. 2001.
- [1.41] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and serie-active filters," in *Proc. IEEE/IAS Annu. Meeting*, 1989, pp. 959-966.
- [1.42] S. Srianthumrong and H. Akagi, "A medium-voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and shunt hybrid filter," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 39, pp. 874-882, May/June 2003.
- [1.43] L. Gyugyi and E. C. Strycula, "Active ac power filters," in *Proc. IEEE Ind. App. Ann. Meeting*, vol. 19-c, 1976, pp. 529-535.
- [1.44] B. Sing, K- A'-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, pp. 960-971, Oct. 1999.
- [1.45] H. Fujita and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, pp. 315-322, March 1998.
- [1.46] L.F.C. Monteiro, M. Aredes, and J.A. Moor Neto, "A control strategy for unified power quality conditioner," in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 1, 2003, pp. 391-396.
- [1.47] F. Barrero, S. Martinez, F. Yeves, F. Mur, P. M. Martinez, "Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, pp. 283-290, Jan. 2003.
- [1.48] S. A. O. da Silva, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, P. F. Seixas, "A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities," *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 38, pp. 1581-1590, Nov./Dec. 2003.
- [1.49] S. Muthu, "Análisis and Control of Unified Active Power Filter," Ph D. dissertation, Univ. of Victoria, British Columbia - Canada, 1998.
- [1.50] C. K. Lee, J. S. K. Leung, S. Y. R. Hui, H. S. -H. Chung, "Circuit-level comparison of STATCOM technologies," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, pp. 1084 - 1092, July 2003.
- [1.51] Q. Yu, P. Li, W. Liu, and X. Xie, "Overview of STATCOM technologies", in *Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Utility Dereg. Restruct. And Power Tech. (DRPT'2004)*, vol. 2, 2004, pp. 647-652.
- [1.52] K. K. Sen, "SSSC-static synchronous series compensator: theory, modelling, and application", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, pp. 241-246, Jan. 1998.
- [1.53] S. Lee, H. Kim, S. -K. Sul, and F. Blaabjerg, "A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 814 - 827, May 2004.
- [1.54] L. Gyugyi, "Unified power flow control concept for flexible AC transmission systems," in *Proc. IEE C.*, vol. 139, no. 4, July 1992, pp. 323-331.
- [1.55] A. Edris, "FACTS technology development: an update," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 20, pp. 4-9, Mar. 2000.
- [1.56] P. Garcia, A. Garcia, "Detailed analysis and experimental results of the control system of a UPFC," in *Proc. IEE Gener. Transmis. Distrib.*, vol. 150, 2003, pp. 147-154.
- [1.57] M. Aredes, K. Heumann, and E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, pp. 545-551, April 1998.