

# Diseño de filtros pasivos, activos e híbridos para la compensación armónica de cargas trifásicas no lineales

Jesús R. Vázquez, J. L. Flores, Patricio Salmerón, Salvador P. Litrán

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Térmica  
Escuela Politécnica Superior. Universidad de Huelva  
Campus de la Rábida. 21819 Huelva (España)  
Tel.:+34 959 217585, fax:+34 959 217304

e-mail: vazquez@uhu.es, juanluis.flores@uhu.es, patricio@uhu.es, salvador@uhu.es

## Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento de distintos compensadores de potencia de conexión paralela para la mitigación de armónicos de corriente en cargas trifásicas no lineales. Conocido el espectro armónico de la intensidad de una carga, el uso de filtros pasivos sintonizados a los armónicos de interés ofrecen una solución económica al problema planteado, aunque pueden aparecer problemas de resonancia en el sistema. La utilización de filtros activos paralelos evita que aparezcan los problemas de los filtros pasivos, aunque en principio podría ser una solución de mayor coste. No obstante, en este último caso, es posible implementar estrategias de control más completas, pudiéndose añadir a los objetivos de compensación la corrección de potencia reactiva o el equilibrado de la carga. Como extensión de las dos soluciones anteriores, existen configuraciones híbridas con filtros activos y pasivos como la que se propone en este trabajo, esto es, un filtro híbrido paralelo, compuesto por un filtro pasivo en serie con uno activo, figura 1c. En esta configuración, se solucionan los problemas de los filtros pasivos usando un filtro activo de pequeña potencia, y por lo tanto de bajo coste. Con el objetivo de analizar los distintos tipos de acondicionadores, se ha realizado una comparativa, donde se presentan los resultados de simulación de un caso práctico, la compensación de un rectificador trifásico de potencia con una rama inductiva en el lado dc.

**Palabras clave:** Armónicos, filtros pasivos, filtros activos, filtros híbridos, calidad de la potencia.

## 1. Introducción

En los sistemas eléctricos, la existencia de cargas no lineales implica la aparición de corrientes y tensiones armónicas. Las cargas que implican la aparición de armónicos de corriente, como los rectificadores con alta inductancia en el lado dc, son denominadas cargas tipo fuente de corriente. Por otra parte, cuando hacen aparecer armónicos de tensión, como es el caso de los rectificadores con una rama dc altamente capacitiva, las cargas se denominan tipo fuente de tensión.

Según el tipo de armónicos a eliminar, se han propuesto diferentes esquemas de compensación, [1-5], desde filtros pasivos y/o activos conectados en serie o en paralelo, hasta filtros híbridos pasivos-activos con distintas topologías, [7-13].

La comparativa realizada en este trabajo se centra en propuestas de acondicionadores de conexión paralela, usados para la compensación de cargas de tipo fuente de corriente. En la figura 1 se muestran las tres soluciones ensayadas: un filtro pasivo con ramas LC sintonizadas a los armónicos de mayor magnitud de la carga, figura 1a, un filtro activo de conexión paralela, figura 1b, y un filtro híbrido paralelo, constituido por uno pasivo en serie con uno activo, figura 1c.

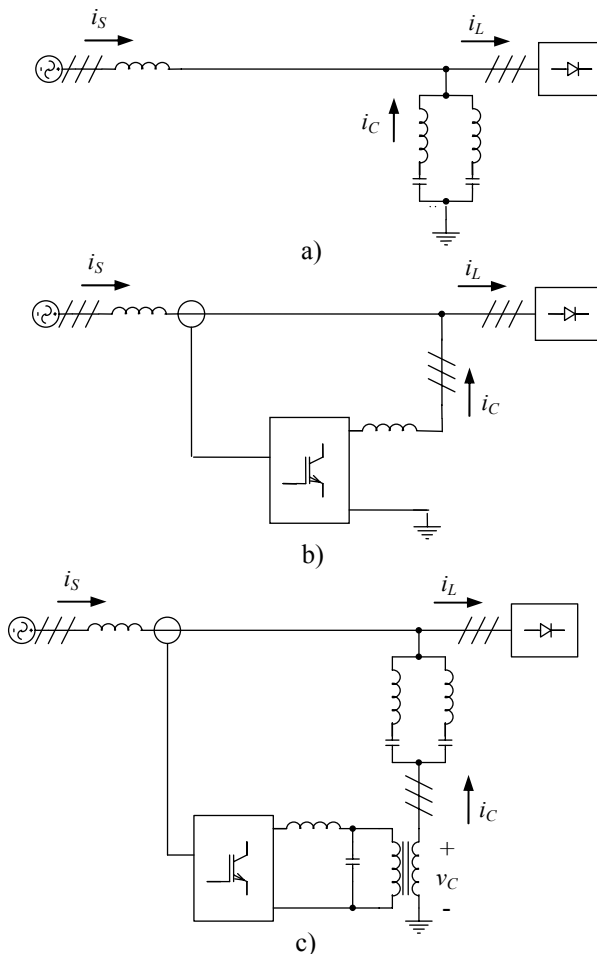


Figura 1. Esquemas de compensación paralela, a) con filtro pasivo, b) con filtro activo y c) con filtro híbrido

Se estudia el comportamiento estacionario y dinámico de los tres esquemas de compensación presentados. En el filtro activo, las intensidades de compensación se obtuvieron con la teoría vectorial de la potencia, [6]. En el filtro híbrido, las tensiones de compensación suministradas por el filtro activo son proporcionales a los armónicos de las intensidades de alimentación.

El análisis teórico ha sido contrastado mediante la simulación de un caso práctico en el entorno Matlab-Simulink.

## 2. Estrategias de compensación

### A. Filtro pasivo de conexión paralela

En cargas no muy fluctuantes, es posible emplear distintas ramas LC conectadas en paralelo con la carga y sintonizadas a las frecuencias de los armónicos de corriente que se deseen retirar del sistema, figura 1a.

A partir del espectro de la intensidad de la carga que se desea compensar, se escogen los armónicos más relevantes. Para compensar cada uno de ellos, por ejemplo el de orden  $n$ , se eligen valores de  $L_n$  y  $C_n$  que satisfagan la ecuación (1), donde  $f$  es el valor de la frecuencia fundamental, 50 Hz en este trabajo.

$$\omega_n = 2\pi f n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \quad (1)$$

La ecuación (1) implica una sola restricción para los valores  $L$  y  $C$  de cada rama. Se puede añadir como restricción adicional para la elección de esos parámetros que las distintas ramas suministren la potencia reactiva consumida por la carga a la frecuencia fundamental.

El filtro pasivo así diseñado presenta varias carencias. No pueden lograrse objetivos de compensación más complejos, no es posible modificar sus parámetros para ajustarse a variaciones de la carga, y pueden aparecer problemas de resonancia, como se muestra en el apartado de resultados del caso práctico estudiado en el presente trabajo.

### B. Filtro activo de conexión paralela

Este filtro activo, figura 1b, puede ser modelado como una fuente de corriente controlada que suministra una intensidad de compensación en paralelo con la carga, figura 2. El compensador incluiría una etapa de control, que calcula la referencia de la intensidad de compensación a inyectar en el sistema, y una etapa de potencia, un inversor constituido por dispositivos interruptores, que sigue esa intensidad de referencia.

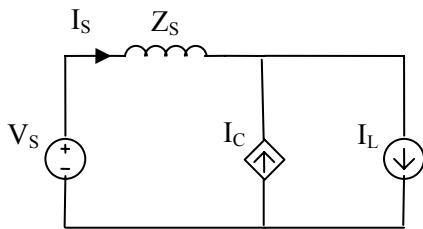


Figura 2. Circuito equivalente del sistema compensado con un filtro activo paralelo

Pueden utilizarse distintas estrategias de compensación para el control del filtro activo. La más básica sería la de suministrar los armónicos de corriente de la carga. La estrategia utilizada en este trabajo se basa en la teoría vectorial de la potencia eléctrica. La intensidad de referencia usada para el control del inversor se muestra en la ecuación (2).

$$\mathbf{i}_{C,ref} = \mathbf{i}_L - \frac{P}{V^2} \mathbf{v} \quad (2)$$

siendo

$\mathbf{i}_L$ : vector de intensidades de la carga

$P$ : potencia media consumida por la carga

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{i}) dt$$

$\mathbf{u}$ : vector de tensiones de alimentación

$\mathbf{v}$ : vector de tensiones sin componente homopolar

$V^2$ : norma de  $\mathbf{v}$

$$V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{v}) dt$$

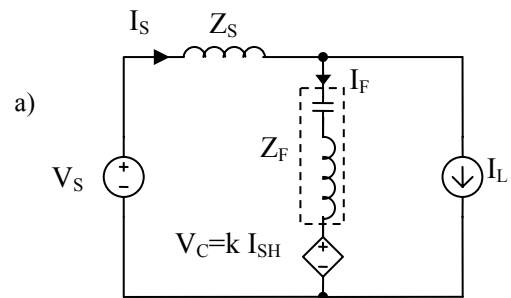
La etapa de potencia del filtro activo, un inversor dc-ac, sigue esta señal de referencia e inyecta en el sistema unas intensidades de compensación que consiguen que las intensidades de alimentación resulten sinusoidales, equilibradas, y en fase con las tensiones.

Las prestaciones de este filtro activo en cuanto a la posibilidad de establecer estrategias de compensación complejas son muy altas. No aparecen problemas de resonancias, y el comportamiento dinámico es muy adecuado.

### C. Filtro híbrido de conexión paralela

El filtro híbrido paralelo ensayado en el presente trabajo está constituido por un filtro pasivo, con distintas ramas LC sintonizadas a las frecuencias de los armónicos de corriente más relevantes de la carga, en serie con un filtro activo, figura 1c.

El filtro activo indicado puede ser modelado como una fuente de tensión controlada. Para obtener la tensión de compensación a suministrar,  $v_C$  en la figura 1c, se pueden emplear diferentes estrategias. Si la tensión  $v_C$  es proporcional a la corriente armónica de la fuente,  $I_{SH}$ , se modifica la impedancia del compensador paralelo y se mejora el funcionamiento del filtro pasivo. La figura 3a muestra el circuito monofásico equivalente para el sistema compensado. La carga no lineal se ha modelado mediante una fuente de corriente. Para cualquier armónico determinado de orden  $H$ , el circuito equivalente queda como se muestra en la figura 3b.



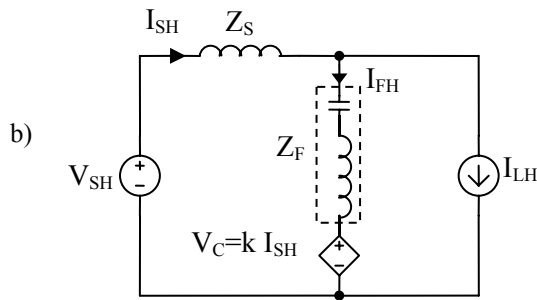


Figura 3. a) Circuito equivalente para el sistema compensado, b) Circuito equivalente para un armónico de orden H.

Del circuito 3b se puede obtener la siguiente expresión para la intensidad armónica de alimentación,

$$I_{SH} = \frac{Z_F}{(Z_S + Z_F + K)} I_{LH} + \frac{1}{(Z_S + Z_F + K)} V_{SH} \quad (3)$$

De la ecuación (3) se puede observar que idealmente las intensidades de corriente armónicas serían nulas si  $K = \infty$ . Es suficiente que  $K \gg (Z_S + Z_F)$  para que esta estrategia permita reducir la resonancia serie entre la fuente y el filtro. Esto evita que el filtro pasivo reciba corrientes armónicas del resto del sistema. No es necesario que K tenga un valor muy elevado, siendo suficiente en los casos prácticos simulados en este trabajo  $K=2$ .

Para lograr otros objetivos de compensación, se pueden usar distintas estrategias de control. Así, utilizando la teoría vectorial indicada anteriormente, la tensión de compensación del filtro activo sería proporcional a la intensidad activa fundamental de la corriente de alimentación, ecuación (2), lo que permitiría obtener corrientes de alimentación sinusoidales y equilibradas en el sistema compensado.

El esquema híbrido presentado evita los problemas del filtro pasivo con un filtro activo de pequeña potencia, y por lo tanto de coste reducido.

### 3. Descripción de un caso práctico

Para comparar los resultados de las tres configuraciones distintas bajo estudio en este trabajo, se ha realizado la compensación de un rectificador de diodos trifásico mediante las tres configuraciones paralelas propuestas. En la figura 4 se presenta el esquema de la carga empleada.

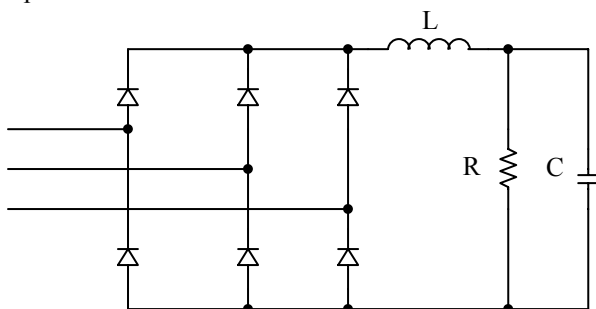


Figura 4. Esquema de un rectificador de diodos trifásico

Los principales armónicos de corriente que genera son de orden 5 y 7, según se muestra en el espectro armónico de corriente, figura 5. Por ello, se utilizarán dos ramas LC sintonizadas a esos armónicos en el filtro pasivo estudiado.

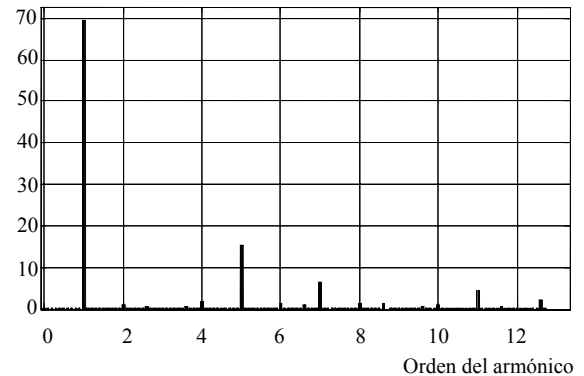


Figura 5. Espectro armónico de la intensidad de una fase de la carga.

La tensión de alimentación es de 400 V fase-fase y 50 Hz, e incluye una distorsión del 2% en los armónicos de orden 4 y 6, para estudiar la posible aparición de resonancias en los distintos esquemas de filtros.

En la tabla I se indican los valores de los principales parámetros del sistema compensado: la impedancia de fuente, los valores de L y C para las dos ramas del filtro pasivo, y el nivel de potencia requerido tanto para el filtro activo de potencia (APF) de conexión paralela como para el filtro activo de potencia usado en la configuración híbrida.

Como se puede observar en la tabla I, la potencia requerida para el APF del filtro híbrido es mucho menor que la del APF paralelo, lo que conlleva un menor coste.

Tabla I. Parámetros del circuito de potencia y de los tres tipos de filtros

Fuente del circuito de potencia	Tensión de fase a fase = 400 V <sub>RMS</sub> Frecuencia = 50 Hz Armónico de orden 4 = 2% of fund. Armónico de orden 6 = 2% of fund. Resistencia de fuente = 0.002 Ω Inductancia de fuente = 2 mH
Carga	Potencia aparente = 45 kVA Resistencia carga lado dc R = 6 Ω Inductancia carga lado dc L = 0,4 mH Capacidad carga lado dc C = 1 μF
Filtro pasivo	Inductancia rama orden 5 L <sub>5</sub> = 4,05 mH Capacidad rama orden 5 C <sub>5</sub> = 100 μF Inductancia rama orden 7 L <sub>7</sub> = 2,07 mH Capacidad rama orden 7 C <sub>7</sub> = 100 μF
APF en filtro híbrido	Potencia aparente = 0,24 kVA
APF paralelo	Potencia aparente = 25 kVA

Para realizar la comparativa, se ha realizado la simulación del sistema en el entorno Matlab-Simulink, con ayuda del Power Systems Blockset. El esquema incluye interruptores que permiten forzar cambios bruscos en el sistema, como la conexión/desconexión de

la rama paralela de compensación y el cambio en los parámetros de la carga, de forma que pueda estudiarse el comportamiento dinámico de las distintas configuraciones ensayadas. Los filtros activos empleados han sido diseñados con un seguimiento ideal de la referencia calculada en cada caso por la etapa de control.

#### 4. Resultados de la comparativa

Al conectar los distintos filtros, la intensidad de compensación suministrada ha de lograr que la intensidad de alimentación resultante transporte la potencia activa de la carga y se aproxime a una senoide.

Para comparar las prestaciones de las tres configuraciones ensayadas, además de mostrar las formas de onda y los espectros armónicos de las señales más relevantes, se ha analizado la distorsión total de la corriente de alimentación ( $THD_{iS}$ ) en el sistema compensado.

Se estudia también el comportamiento dinámico de las distintas configuraciones de filtro pasivo, activo e híbrido.

##### A. Resultados de la compensación con un filtro pasivo

En este caso sólo las ramas pasivas LC están conectadas en paralelo con la carga. En la figura 6 se muestran las formas de onda de las corrientes de carga, de compensación y de alimentación en una de las fases.

Las figuras 7a y 7b muestran los espectros de las corrientes de compensación y de alimentación. Se observa resonancia serie entre la impedancia de fuente y cada rama LC, entorno al 4º y al 6º armónico. Una impedancia mínima en esas frecuencias implica la aparición de armónicos de corriente de esos órdenes en la corriente de alimentación resultante, que no llega a ser sinusoidal.

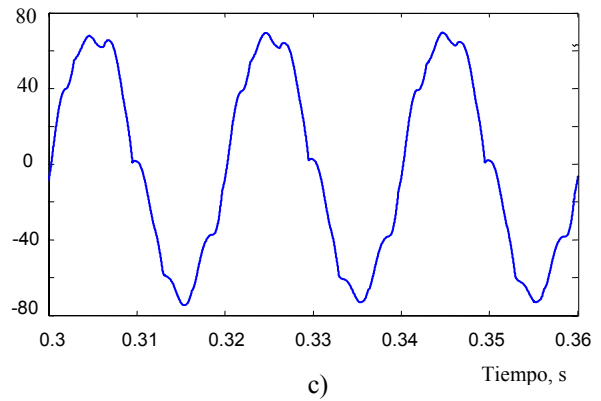
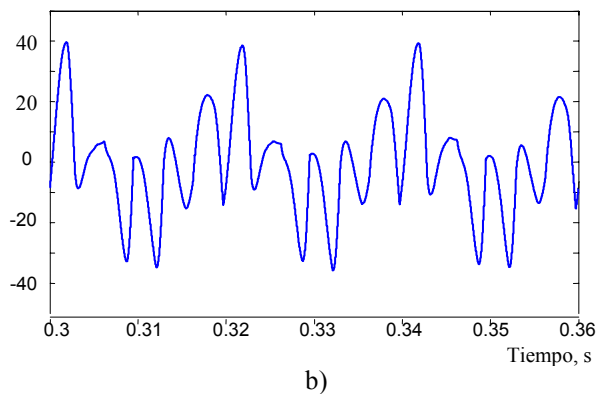
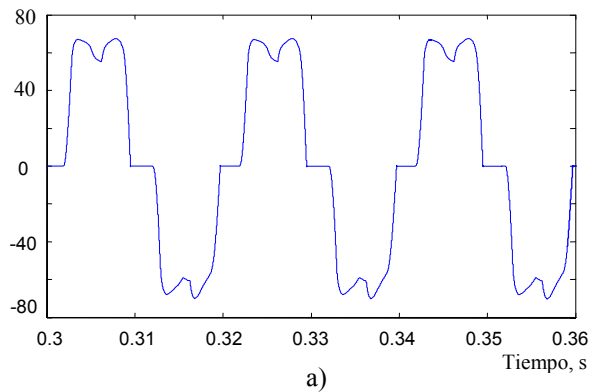


Figura 6. Corrientes en el sistema con un filtro pasivo conectado, a) de compensación, b) de alimentación

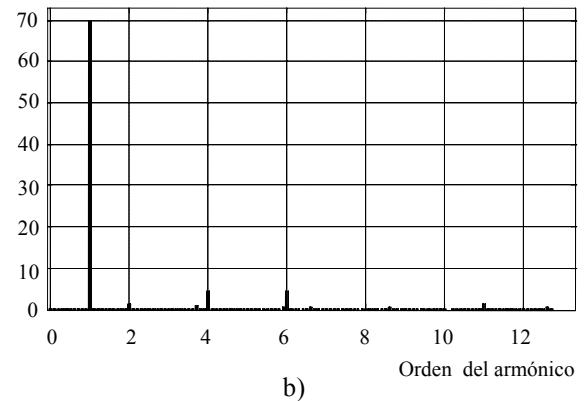
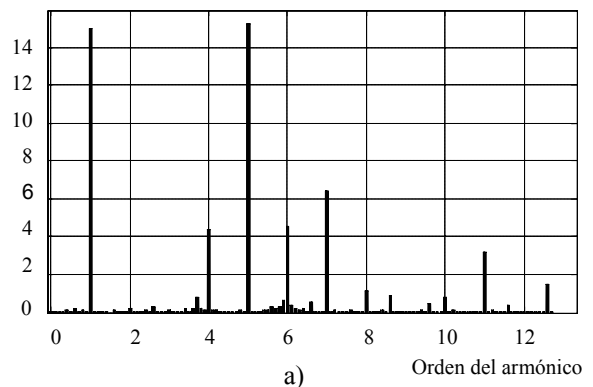


Figura 7. Espectros armónicos de una fase con el filtro pasivo: a) corriente del filtro, b) corriente de alimentación.

Aunque no existan armónicos que impliquen la aparición de resonancias durante el régimen estacionario, pueden aparecer durante los distintos transitorios del sistema. Para contrastar esto, en la figura 8 se muestra la evolución de distintos armónicos de la intensidad de alimentación durante el transitorio de conexión del compensador, y durante un cambio brusco de la carga, en los instantes  $t=0.2$  s y  $t=0.8$  s respectivamente. Se observa cómo los armónicos 4º y 6º cercanos a las frecuencias de resonancia del sistema, en 185 y 580 Hz, hacen que el tiempo de establecimiento del filtro sea elevado.

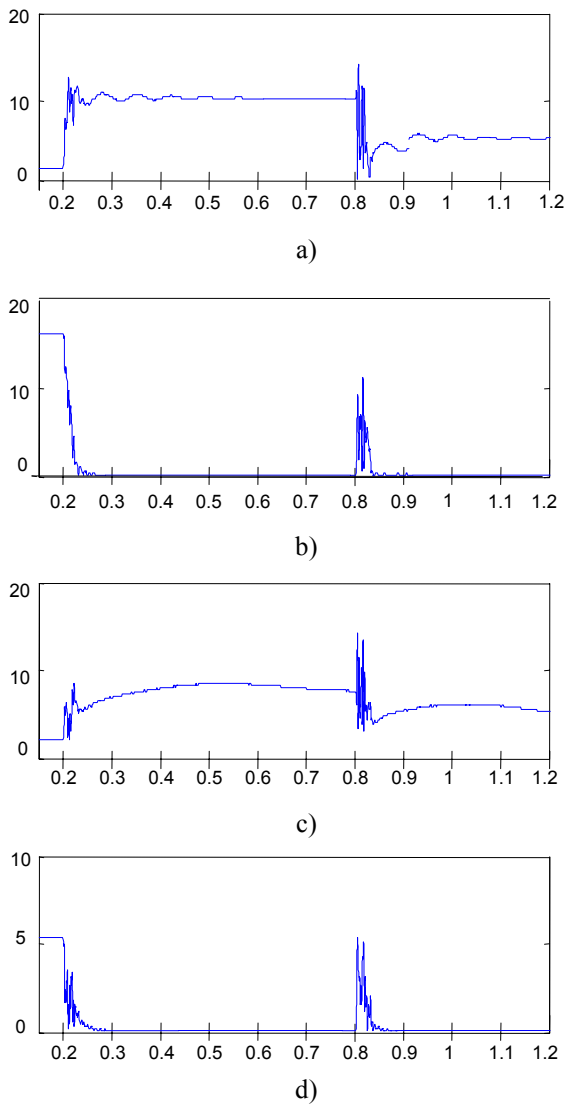


Figura 8. Evolución transitoria de distintos armónicos de la corriente de alimentación, a) de orden 4, b) de orden 5, c) de orden 6, y d) de orden 7

En este trabajo la carga es equilibrada, por lo que los resultados en las otras fases son idénticos. En la figura 9 se muestran las intensidades de alimentación del sistema sin compensar, igual a la intensidad de la carga, y la resultante tras la compensación en régimen estacionario.

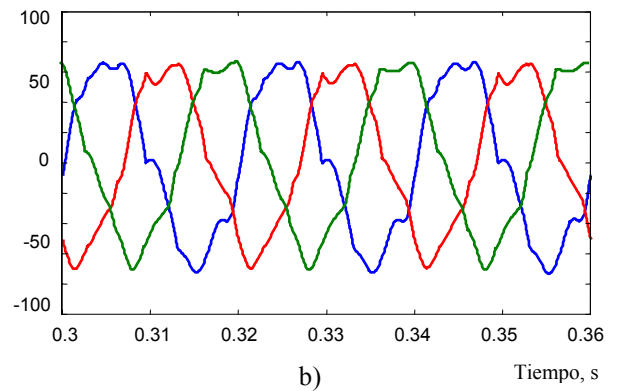
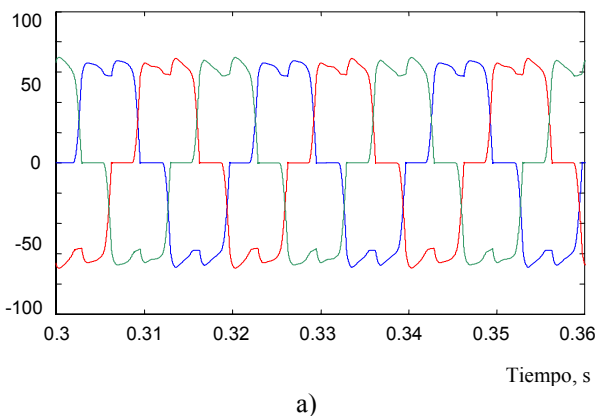


Figura 9. Intensidades de alimentación en el sistema: a) sin compensar, y b) tras la compensación

En la tabla II se muestran los valores de THD de la intensidad de alimentación, antes y después de la compensación. Se observa que el THD se ha reducido, aunque la resonancia indicada limita la efectividad de este filtro.

Tabla II. Valores de THD de la corriente de alimentación en el sistema compensado con un filtro pasivo

Corriente de alimentación	THD
Antes de la compensación	25,49 %
Después de la compensación	9,13 %

### B. Resultados de la compensación con un filtro activo

El control de la intensidad de compensación en el caso de un filtro activo paralelo, permite inyectar al sistema la corriente deseada, no pudiendo aparecer en la rama de compensación ninguna corriente no deseada, es decir, no hay en este caso problemas de resonancia.

Con el control indicado en la sección anterior, el filtro suministra todos los armónicos de la carga, por lo que la corriente de alimentación en el sistema compensado resulta prácticamente sinusoidal. En la figura 10 se muestra el espectro de la intensidad de alimentación resultante.

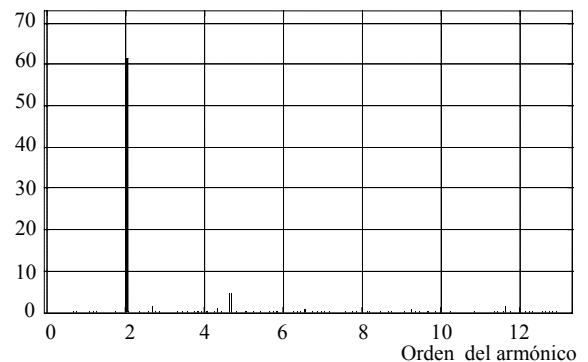


Figura 10. Espectro armónico de una fase de la corriente de alimentación con el filtro activo paralelo

La figura 11 muestra las formas de onda de las intensidades de alimentación de las tres fases en el sistema compensado.

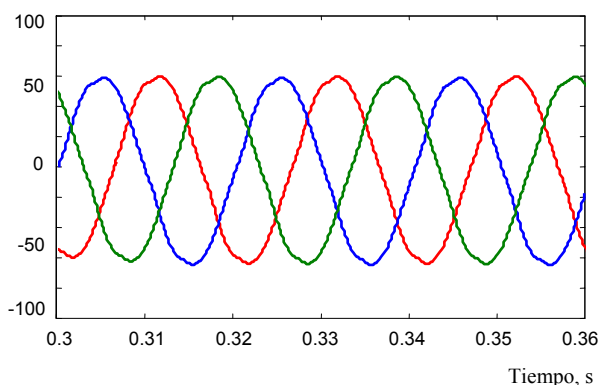


Figura 11. Intensidades de alimentación en el sistema compensado con un filtro activo paralelo

En la tabla III se muestran los valores de THD de la intensidad de alimentación del sistema. Se reduce de un % a un 2,4%.

Tabla III. Valores de THD de la intensidad de alimentación en el sistema compensado con filtro activo

Intensidad de alimentación	THD
Antes de la compensación	25,6 %
Después de la compensación	2,3 %

En este esquema de compensación, la respuesta dinámica del compensador es del orden de dos periodos. En la figura 12 se muestra la evolución del THD de la intensidad de alimentación durante el transitorio inicial de conexión.

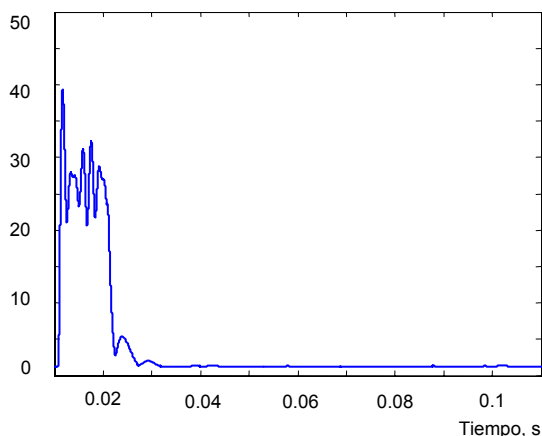


Figura 12. Evolución transitoria del THD de la intensidad de alimentación

### C. Resultados de la compensación con un filtro híbrido

En el caso del filtro híbrido, las resonancias que afectaban al filtro pasivo son claramente atenuadas. Los espectros de corriente de compensación y de fuente,

figura 13, no presentan prácticamente armónicos de orden 4 y 6.

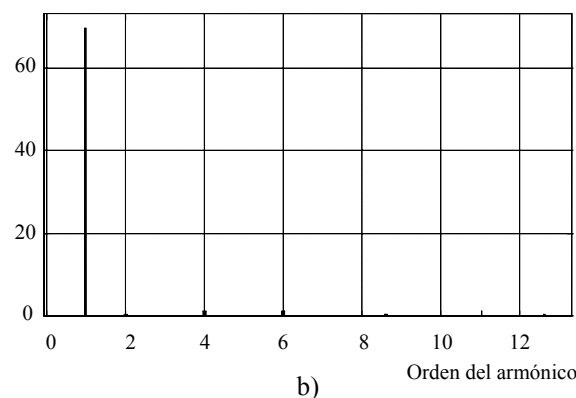
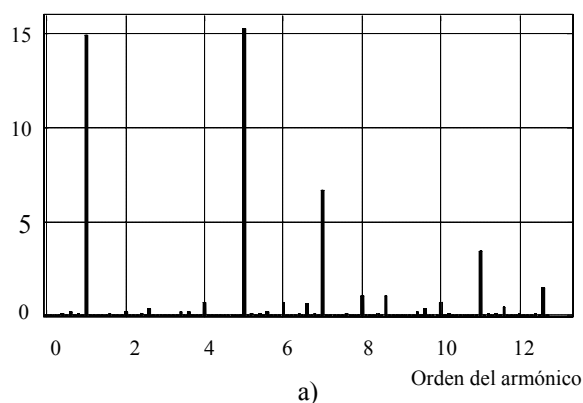


Figura 13. Espectros armónicos de una fase con el filtro híbrido: a) corriente del filtro, b) corriente de fuente.

En la figura 14 se muestra la evolución de los armónicos de orden 4 y 6, los más críticos según se mostró al estudiar el filtro pasivo anteriormente, durante los transitorios de conexión del compensador y ante un cambio en la carga. Se observa que el tiempo de establecimiento del compensador es ahora del orden de 4 periodos.

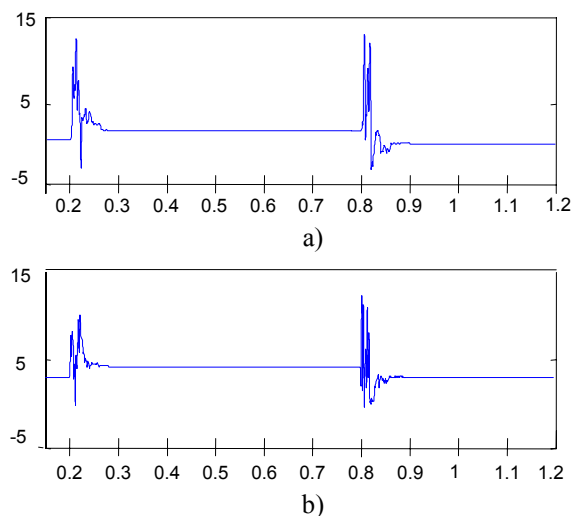


Figura 14. Evolución transitoria de distintos armónicos de la corriente de compensación, a) de orden 4, b) de orden 6

El filtro híbrido permite compensar la mayor parte de los armónicos de la intensidad de carga, resultando una intensidad de fuente casi sinusoidal. La figura 15 muestra las formas de onda de las intensidades de alimentación de las tres fases en el sistema compensado.

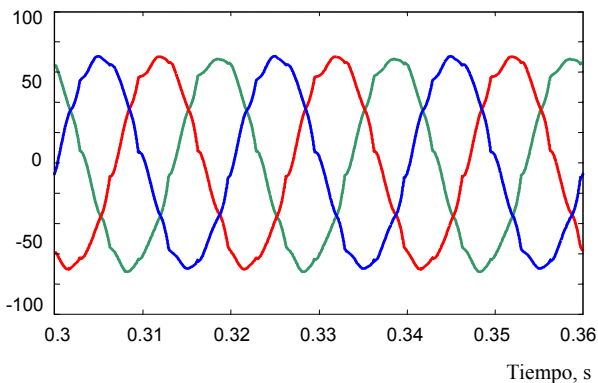


Figura 15. Intensidades de alimentación en el sistema compensado con un filtro híbrido

No se alcanza el nivel de corrección del APF paralelo, pero su THD es bastante inferior al del filtro pasivo. Así, los valores de distorsión antes y después de la compensación se presentan en la tabla IV. El THD se reduce de un 26% a un 3%.

Tabla III. Valores del THD de la intensidad de alimentación en el sistema compensado con filtro híbrido

Intensidad de alimentación	THD
Antes de la compensación	25,8 %
Después de la compensación	3,3 %

## 5. Conclusiones

Se ha realizado la compensación de una carga de tipo fuente de corriente con tres tipos de acondicionadores de potencia paralelos, un filtro pasivo, uno activo y uno híbrido. Se han mostrado algunas ventajas de la configuración híbrida frente a los otros dos filtros. Se observa que mejora las características del filtro pasivo por la eliminación del problema de la resonancia que aparece entre fuente y filtro, y aunque es una solución más costosa y compleja que un filtrado pasivo, supone un coste inferior al APF paralelo, ya que éste ha de suministrar al sistema una potencia mucho mayor. Para implementar una estrategia de compensación más compleja y tener una respuesta dinámica mejor, puede ser ventajosa la aplicación del filtro activo paralelo.

## Referencias

- [1] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A novel harmonic power filter," in *Proc. IEEE/PESC*, April, 1988, pp. 1151-1159.
- [2] F. Z. Peng and D. J. Adams, "Harmonics sources and filtering approaches," *Proc. Industry Applications Conference*, October 1999, Vol. 1, pp. 448-455.
- [3] H. Fujita, H. Akagi, "A practical approach to harmonic compensation in power systems: series connection of passive and active filters", *IEEE / IAS Ann. Conf. Rec.*, pp. 1107 - 1112, 1990.
- [4] W. M. Grady, M. J. Samotyj, A. H. Noyola. "Survey of Active Power Line Conditioning Methodologies". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, Julio 1990, pp. 1536-1542.
- [5] Akagi, H. "New trends in active filters for power conditioning", *Industry Applications*, *IEEE Transactions on*, Vol. 32, Issue 6, Pages 1312-1322, Nov.-Dec. 1996.
- [6] P. Salmerón and J. C. Montaña, "Instantaneous power components in polyphase systems under nonsinusoidal conditions," *Proc. Inst. Elect. Eng. Sci. Meas. Technol.* Vol. 143, pp. 151-155, Marz. 1996.
- [7] H. Fujita, T. Yamasaki, H. Akagi, "A hybrid active power filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, No. 2, pages 215 - 222, March 2000.
- [8] H.L. Jou, J.C. Wu, K.D. Wu, "Parallel operation of passive power filter and hybrid power filter for harmonic suppression", *Generation, Transmission and Distribution*, *IEE Proceedings*, Vol. 148, Issue 1, Pages 8-14, January 2001.
- [9] B-R. Lin, B-R. Yang, H-R. Tsai, "Analysis and operation of hybrid active filter for harmonic elimination", *Electric Power Systems Research* 62, Elsevier Science B.V., pages 191 - 200, 2002.
- [10] D. Rivas, L. Morán, J. Dixon, J. Espinoza, "A simple control scheme for hybrid active power filter", *Generation, Transmission and Distribution*, *IEE Proceedings*, Vol. 149, Issue 4, pgs 485 - 490, July 2002.
- [11] D. Rivas, L. Morán, J. Dixon, J. Espinoza, "Improving passive filter compensation performance with active techniques", *Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on*, Vol. 50, Issue 1, Pages 161 - 170, February 2003.
- [12] Y. Wang, Z. Wang, J. Yang, J. Liu, Y. Duan, Z. Fu, Y. Hua, "A new hybrid parallel active filter", *Power Electronics Specialist, PESC'03*, *IEEE 34th Annual Conference on*, Vol. 3, Pages 1049 - 1054, June 2003.
- [13] P. Salmerón, J.C. Montaña, J. R. Vázquez, J. Prieto and A. Pérez, "Compensation in Nonsinusoidal, Unbalanced Three-Phase, Four-Wire Systems With Active Power-Line Conditioner", *IEEE Trans. On Power Delivery* Vol.19, No. 4 October-2004, pp. 1968-1974.