

Aplicación de los filtros híbridos en la mejora de la calidad de la potencia eléctrica

Salvador P. Litrán, Patricio Salmerón, Jaime Prieto, Jesús R. Vázquez

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: salvador@uhu.es, patricio@uhu.es, jpthomas@uhu.es, vazquez@uhu.es

Resumen. Se analiza el funcionamiento de dos filtros combinados, una configuración con filtro activo en serie con la fuente y filtro pasivo en paralelo con la carga, y otra con una rama de filtro pasivo y activo en serie, y en paralelo con la carga. Para ello, se determinan las expresiones de la corriente de fuente, tensión en la carga y tensión en el punto de conexión común de la red para dos cargas no lineales, una tipo fuente de armónicos de corriente y otra tipo fuente de armónicos de tensión. El análisis teórico realizado ha sido verificado mediante la simulación del sistema utilizando la plataforma MATLAB-Simulink, en el que se ha aplicado la teoría vectorial de la potencia eléctrica para la obtención de las señales de referencia del control de los dispositivos de potencia.

Palabras llave: Armónicos, filtros activos, filtros híbridos, calidad de la potencia.

1. Introducción

La proliferación de cargas no lineales ha supuesto un serio problema en los sistemas eléctricos de potencia, ya que como consecuencia de la distorsión en las señales de tensión y/o de intensidad se produce una degradación de la calidad de la potencia eléctrica. Estas cargas, en función del tipo de armónicos que producen, se pueden clasificar en fuente de armónicos de corriente (HCS) o fuente de armónicos de tensión (HVS).

Para la eliminación de armónicos ya sean de tensión o de intensidad, se han propuesto diferentes topologías [1], que incluyen filtros pasivos o activos conectados en serie o en paralelo, dependiendo de los armónicos a eliminar, o también basadas en una combinación de filtros pasivos con filtros activos [2,8].

En este artículo se analizan dos configuraciones de filtros híbridos, una en la que el filtro activo es conectado en serie con la impedancia de fuente y el filtro pasivo en paralelo con la carga, tal como se muestra en la figura 1, y otra en la que los dos filtros se conectan en serie entre sí y a su vez en paralelo con la carga (figura 2). En ambas

configuraciones el objetivo de control del filtro activo es generar una tensión proporcional a los armónicos de la intensidad de fuente. Se presenta, para las dos topologías, el estudio teórico desde el punto de vista de la corriente de fuente, tensión en la carga y tensión en el punto de conexión común de la red para los dos tipos de cargas no lineales, HCS y HVS. El análisis teórico ha sido verificado mediante simulación utilizando la plataforma MATLAB-Simulink, obteniéndose las señales de referencia para el disparo de los dispositivos de potencia mediante la teoría vectorial de la potencia eléctrica [9].

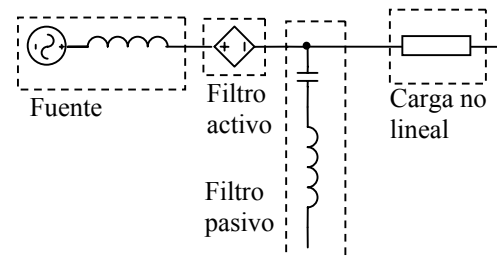


Fig. 1. Topología filtro activo en serie con la fuente

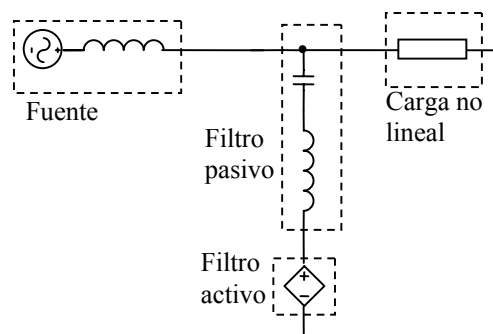


Fig. 2. Topología filtro activo en serie con el filtro pasivo

2. Comportamiento del filtro serie

En esta sección se analiza el comportamiento del filtro activo serie ante dos tipos de cargas diferentes: HCS y HVS.

A. Cargas tipo HCS

En la figura 3 se muestran los circuitos monofásicos equivalentes para una carga de este tipo, incluyendo el filtro activo, como una fuente de tensión controlada, tanto para la frecuencia fundamental como para un armónico cualquiera. Estos circuitos permiten, de forma simple, analizar su comportamiento mediante superposición.

Del análisis del circuito 3b, se puede obtener para el armónico n , el valor de la intensidad de fuente, que vendrá dado por

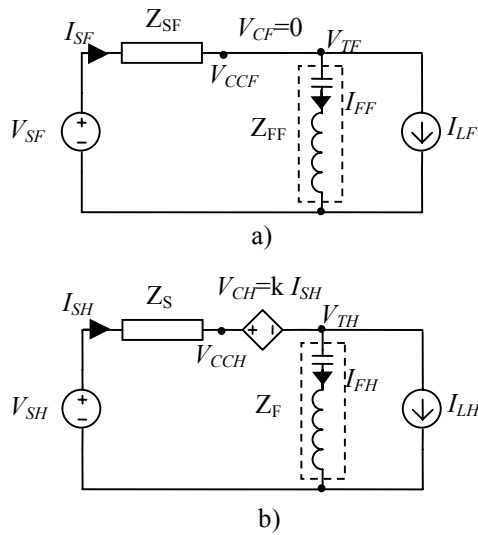


Fig. 3. Circuito monofásico equivalente para filtro serie y carga tipo CSNL: a) para la frecuencia fundamental, b) para las frecuencias armónicas

$$I_{SHn} = \frac{Z_{Fn}}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} I_{LHn} + \frac{1}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} V_{SHn}$$

Donde Z_{Fn} y Z_{Sn} son las impedancias del filtro pasivo y de la fuente a la frecuencia del armónico n .

En el caso ideal en el que $k=\infty$, es posible eliminar los armónicos de la intensidad de fuente, es decir $i_{SF}=0$.

Respecto a la tensión en los terminales de la carga (v_{TH}) para un determinado armónico n , se puede establecer en el circuito 3b

$$V_{THn} = \frac{Z_{Sn} + k}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} I_{LHn} + \frac{1}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} V_{SHn}$$

Por lo que para la misma condición ideal, $k=\infty$, los armónicos de tensión en los terminales de la carga valdrán

$$V_{TH} = I_{LH}$$

Por tanto, la distorsión de la tensión en los terminales de la carga dependerá de los armónicos de la intensidad de carga, pero no de los armónicos de fuente, por lo que se puede decir que “aisla” a la carga de los armónicos de la tensión de fuente.

Respecto de la tensión en el punto de conexión común de la red (v_{cc}), se puede obtener para un armónico n ,

$$V_{CCHn} = \frac{Z_{Fn} + k}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} V_{SHn} - \frac{Z_{Sn} Z_{Fn}}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} I_{LHn}$$

Cuando $k=\infty$, se cumple

$$V_{CCH} = V_{SH}$$

Por lo que en el punto de conexión a la red se tendrán los mismos armónicos presentes en la tensión de fuente.

B. Cargas tipo HVS

En la figura 4, se muestran los circuitos monofásicos equivalentes para una carga tipo HVS, con un filtro activo serie, para el armónico fundamental (figura 4a) y para un armónico cualquiera (figura 4b).

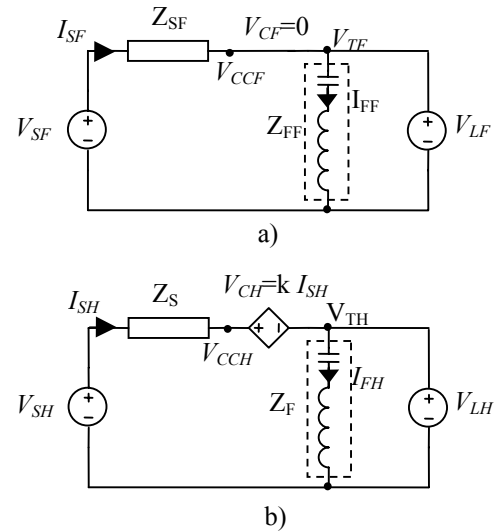


Fig. 4. Circuito monofásico equivalente para filtro serie y carga tipo VSNL: a) para la frecuencia fundamental, b) para las frecuencias armónicas

Para un armónico n , la intensidad de fuente se puede obtener mediante

$$I_{SHn} = \frac{1}{(Z_{Sn} + k)} V_{SHn} - \frac{1}{(Z_{Sn} + k)} V_{LHn}$$

Por tanto, es posible eliminar los armónicos de la intensidad de fuente si se cumple la condición ideal $k=\infty$.

Por otro lado la tensión en los terminales de la carga V_{TH} , contendrá los armónicos de tensión generados por la misma, ya que

$$V_{TH}=V_{LH}.$$

La tensión en el punto de conexión común, para un armónico n viene dada por

$$V_{THn} = \frac{k}{(Z_{Sn} + k)} V_{SHn} + \frac{Z_{Sn}}{(Z_{Sn} + k)} V_{LHn}$$

Con lo que si $k=\infty$, los armónicos de tensión en el punto de conexión común valdrán

$$V_{THn} = V_{SHn}$$

Por tanto, en el punto de conexión común, sólo estarán presentes los armónicos debidos a la fuente, no a los de la carga.

3. Comportamiento del filtro híbrido

Se analizan el comportamiento del filtro híbrido, pasivo y activo en serie, para los dos tipos de cargas propuestas.

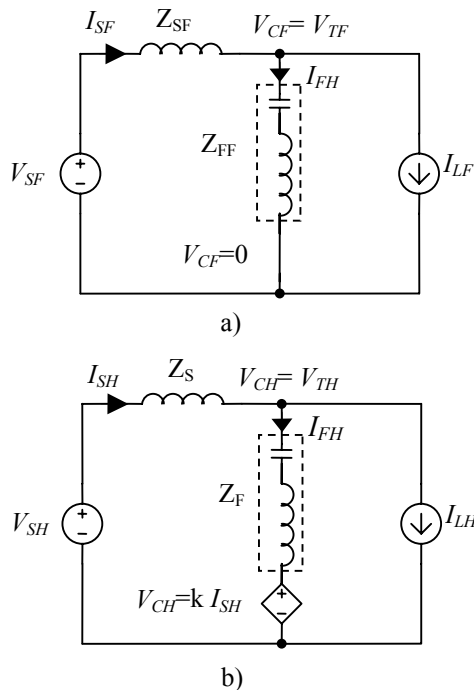


Fig. 5. Circuito monofásico equivalente para un filtro pasivo-activo serie y carga tipo CSNL a) para la frecuencia fundamental b) para armónicos distintos del fundamental.

A. Cargas tipo HCS

En la figura 5 se muestra el circuito monofásico equivalente para el armónico fundamental (Figura 5a) y

para un armónico cualquiera (figura 5b), con una carga tipo HCS compensada por un filtro híbrido.

Para el armónico n , la intensidad de fuente se puede obtener mediante

$$I_{SHn} = \frac{Z_{Fn}}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} I_{LHn} + \frac{1}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} V_{SHn}$$

Expresión idéntica a la obtenida para el mismo tipo de carga compensada con el filtro serie, por lo que se pueden compensar los armónicos de la intensidad de fuente con la misma condición $k=\infty$.

Tal como se muestra en la figura 5, el punto de conexión común de la red y los terminales de la carga en este tipo de configuración coinciden. La tensión en este punto, puede ser determinada mediante

$$V_{THn} = \frac{Z_{Fn} + k}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} V_{SHn} - \frac{Z_{Sn} Z_{Sn}}{(Z_{Sn} + Z_{Fn} + k)} I_{LHn}$$

Para la condición $k=\infty$, se obtiene

$$V_{THn} = V_{SHn}$$

En los terminales de la carga están presentes los mismos armónicos de la fuente de tensión, por que con esta configuración y estrategia, no es posible actuar sobre los armónicos de tensión presentes en la carga y debidos a la fuente.

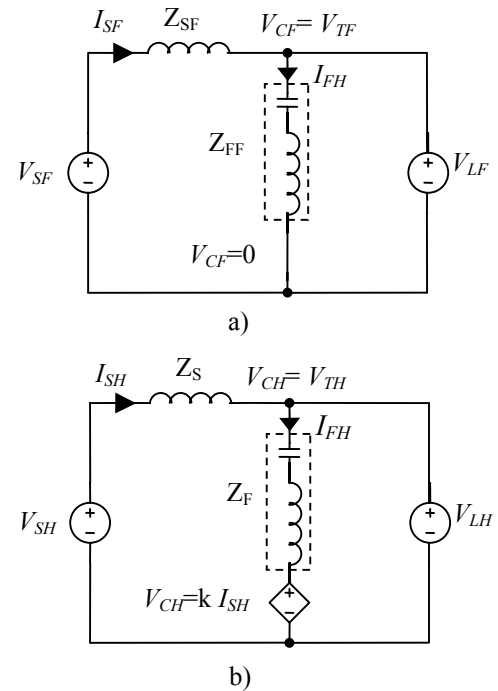


Fig. 6. Circuito monofásico equivalente para un filtro pasivo-activo serie y carga tipo VSNL a) para la frecuencia fundamental b) para armónicos distintos del fundamental.

B. Cargas tipo HVS

La figura 6 muestra el circuito equivalente monofásico cuando la carga es del tipo HVS.

La intensidad de fuente para un armónico n se puede obtener mediante

$$I_{SHn} = \frac{V_{SHn}}{Z_{Sn}} - \frac{V_{LHn}}{Z_{Sn}}$$

Por tanto, al no depender de k, con la estrategia seguida no es posible compensar los armónicos de la corriente de fuente con este tipo de configuración.

Respecto a la tensión en el punto de conexión común, a la vista del circuito, no es posible actuar sobre ella con el filtro híbrido propuesto.

4. Configuración y sistema de control

En las figuras 7 y 8 se muestran los esquemas simulados en Simulink, de las dos topologías que se analizan. El sistema utilizado, consiste en una distribución a cuatro hilos, con una fuente trifásica real con 230 V de tensión simple para el armónico fundamental, y un tercer armónico de 30 V de valor rms. Se ha incluido también una inductancia de fuente de 2 mH.

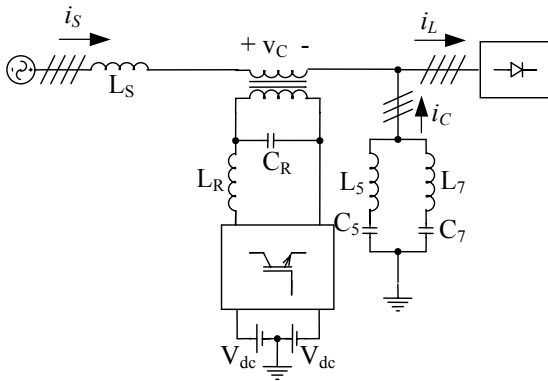


Fig. 7. Circuito simulado para filtro activo en serie con la fuente

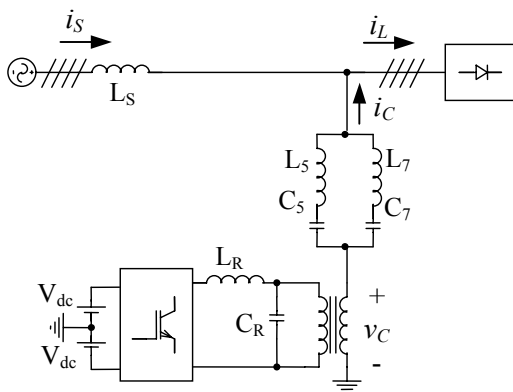


Fig. 8. Circuito simulado para filtro activo en serie con el filtro pasivo

El inversor está constituido por un puente de IGBT, según el modelo que se incluye en la librería SimPowerSystems de MATLAB-Simulink. En el lado dc, se han dispuesto dos fuentes de corriente continua de 100 V, con el punto central a tierra. En la salida del inversor se ha conectado un filtro LC para eliminar componentes de alta frecuencia. Este conjunto se conecta al sistema de potencia través de tres transformadores monofásicos.

En ambas topologías, se ha utilizado un filtro pasivo para eliminar el 5° y el 7° armónico y compensar la potencia

TABLA I.- Valores de los elementos pasivos

| Fuente | $L_S = 1 \text{ mH}$ | |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Filtro pasivo | $L_5 = 6.22 \text{ mH}$ | $C_5 = 65 \text{ } \mu\text{F}$ |
| | $L_7 = 3.17 \text{ mH}$ | $C_7 = 65 \text{ } \mu\text{F}$ |
| Filtro de rizado | $L = 1.49 \text{ mH}$ | $C = 10 \text{ } \mu\text{F}$ |

reactiva a la frecuencia fundamental. Los elementos pasivos utilizados tienen los mismos valores en las dos configuraciones, siendo los presentados en la tabla I.

La carga está compuesta por tres rectificadores monofásicos. Según el tipo de elemento pasivo que se incluya en su lado DC, permite configurar una carga tipo HCS o HVS.

El filtro activo debe generar una tensión proporcional a los armónicos de intensidad de fuente, esto es

$$v_c = k i_{\text{ref}}$$

Siendo k la constante de proporcionalidad para los armónicos de intensidad de fuente. Las simulaciones han sido obtenidas para una $k=10$, aunque este valor dependerá de las impedancias del filtro pasivo y fuente. En general, para las dos configuraciones se ha de elegir de forma que se cumpla que $k \gg Z_{Sn}$ y $k \gg Z_{Fn}$.

Los armónicos de intensidad, son obtenidos aplicando la teoría vectorial de la potencia eléctrica, por tanto

$$i_{\text{ref}} = i_L - \frac{P}{v^2} v \quad (6)$$

Donde

i_L : vector de intensidad de carga y filtro activo

P: potencia media definida por $P = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{i}) dt$

\mathbf{u} : vector de tensiones antes del filtro activo.

\mathbf{v} : vector de tensiones de secuencia directa.

v^2 : norma de \mathbf{v} , definida por $v^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{v}) dt$.

T es el periodo fundamental y “ \cdot ” indica el producto de vectores.

En la figura 9 se muestra el diagrama de bloques para el cálculo de la señal de referencia. Esta señal será generada por el inversor mediante un control PWM.

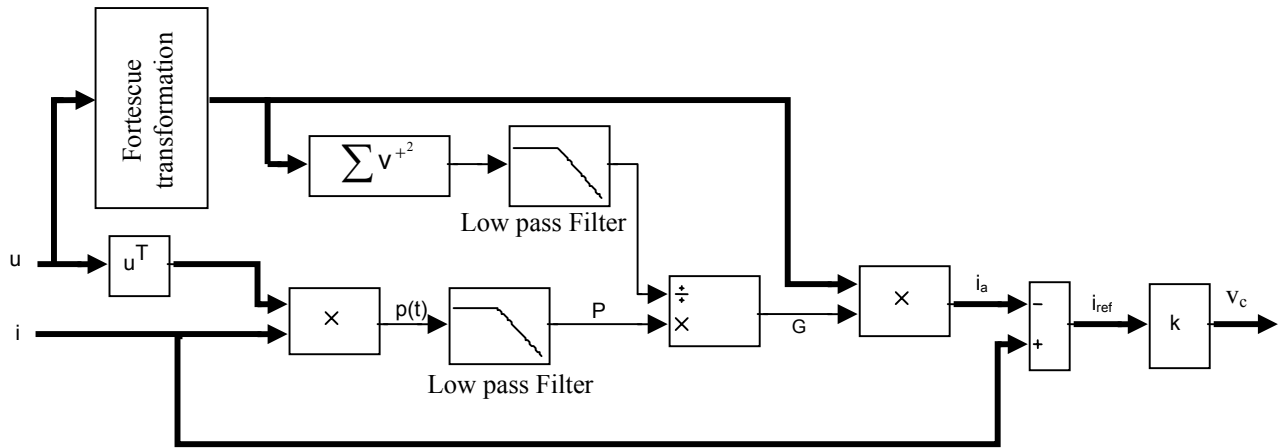


Fig. 9. Diagrama de bloques del esquema de control.

5.- Resultados de simulación

En la figura 10a se muestra la corriente absorbida por una carga tipo HCS. Cuando se conecta un filtro pasivo para eliminar el 5° y el 7° armónico y la potencia reactiva,

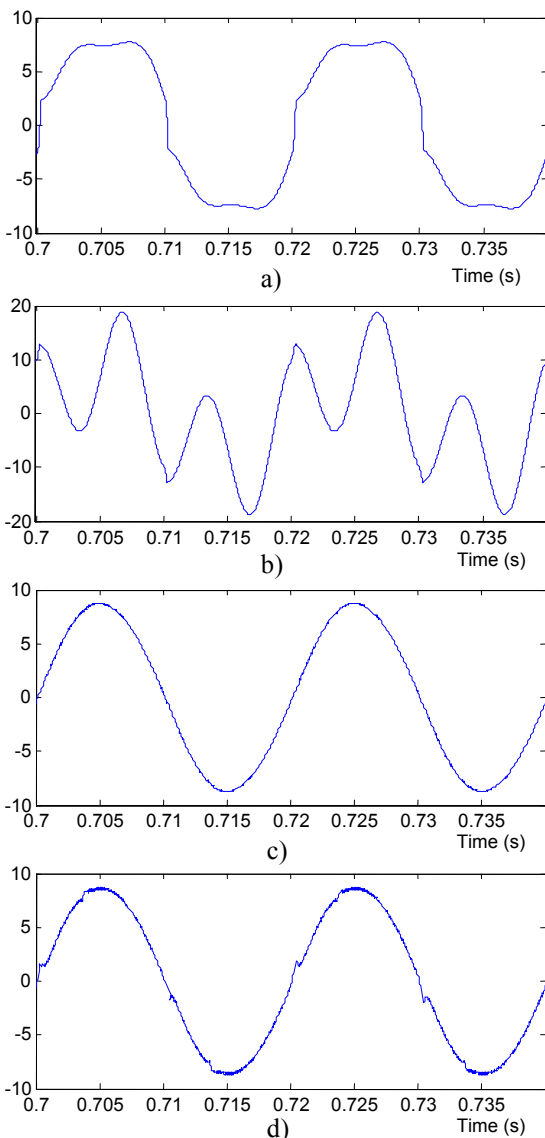


Fig. 10. Intensidad de fuente de una carga tipo fuente de corriente: a) sin compensar, b) cuando actúa sólo el filtro pasivo, c) cuando actúa el filtro activo serie, d) cuando actúa la rama de filtro activo en serie con el pasivo

se obtiene la forma de onda mostrada en la figura 10b. Con los filtros activos conectados, para las dos topologías analizadas, es posible obtener una señal de intensidad de fuente senoidal, tal como se muestran en las figuras 10c y 10d.

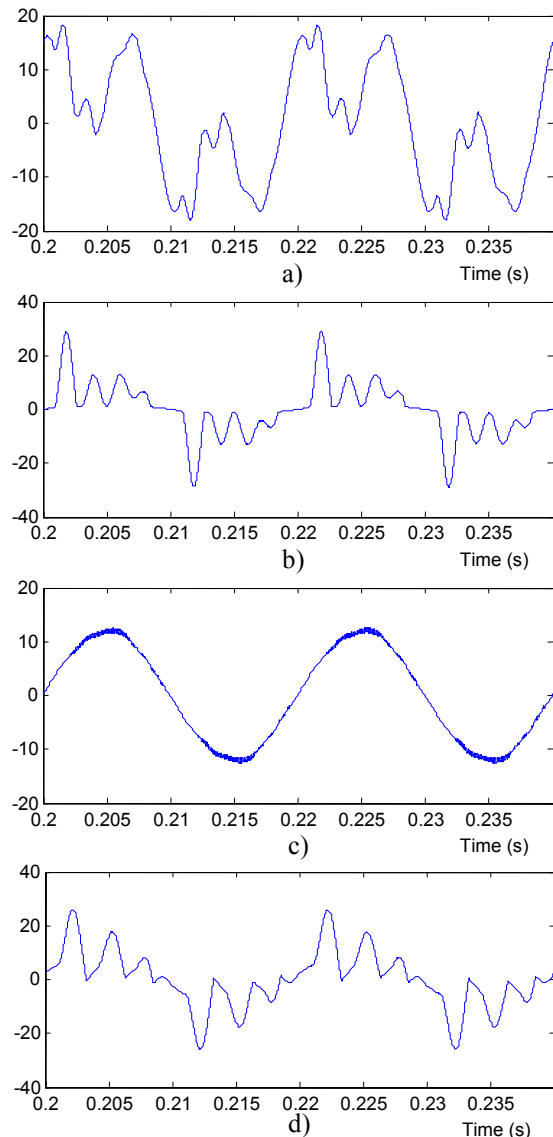


Fig. 11. Corriente de fuente de una carga tipo fuente de tensión: a) sin compensar, b) cuando actúa sólo el filtro pasivo, c) cuando actúa el filtro activo serie, d) cuando actúa la rama de filtro activo en serie con el pasivo

Para una carga tipo fuente de tensión (HVS), la corriente de fuente sólo puede ser compensada mediante la configuración filtro activo en serie con la impedancia de fuente, como se muestra en la figura 11.

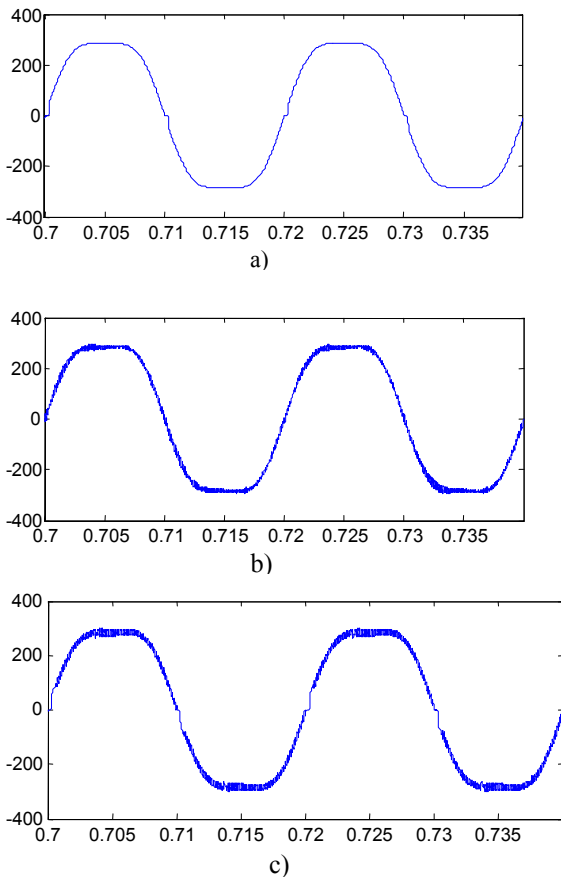


Fig. 12. Tensión en el punto de conexión común para una carga tipo fuente de corriente: a) sin compensar, b) cuando actúa el filtro activo serie, c) cuando actúa la rama de filtro activo en serie con el pasivo

En lo que respecta a las tensiones en el punto de conexión común, la figura 12, muestra la tensión sin compensar el sistema (figura 12a), compensado con el filtro serie (figura 12b) y con el filtro pasivo y activos en serie (figura 12c). Se puede comprobar cómo la tensión en el punto de conexión común es la misma en los tres casos, siendo la distorsión la debida al tercer armónico presente en la fuente.

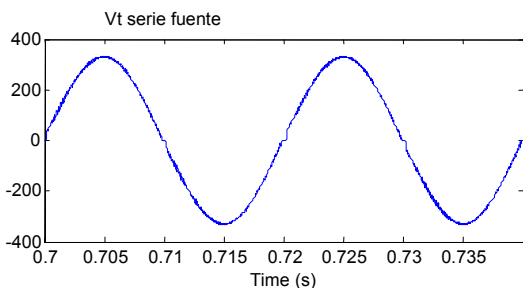


Fig. 13. Tensión en los terminales de una carga tipo CSNL cuando actúa el filtro serie.

En el caso del filtro serie la tensión en los terminales de la carga es diferente de la tensión del punto de conexión común, siendo la mostrada en la figura 13, la cual puede considerarse, a simple vista, prácticamente senoidal, incluye armónicos del mismo orden que la corriente de carga, aunque sus amplitudes son muy pequeñas respecto al fundamental.

En la figura 14, se muestra la tensión en el punto de conexión común para una carga tipo fuente de armónicos de tensión (HVS), para el circuito sin compensar (figura 14a), compensada con el filtro serie (figura 14b) y con la topología filtro activo y pasivo conectados en serie (figura 14c). Cuando el sistema no es compensado, se aprecia cómo la tensión está distorsionada no sólo por el tercer armónico presente en la fuente sino también por los introducidos por la carga, lo que también se produce para la última configuración, sin embargo cuando actúa el filtro serie, sólo está presente el tercer armónico, que es generado por la fuente.

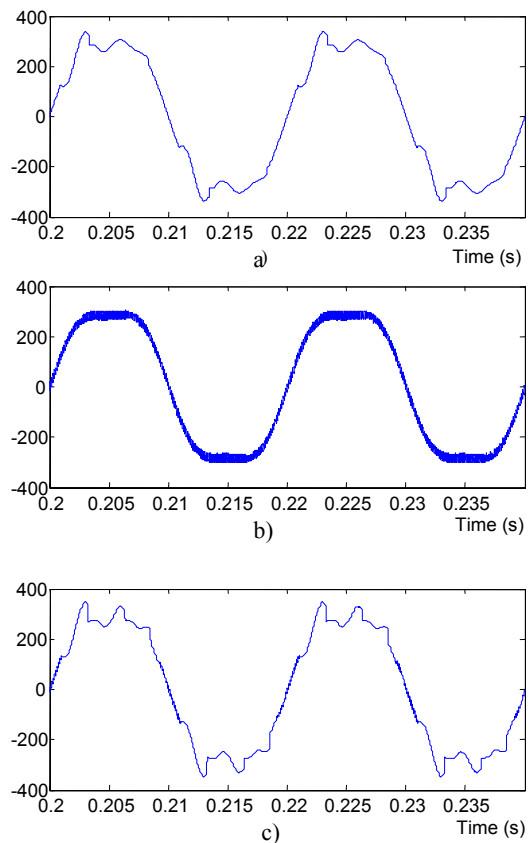


Fig. 14. Tensión en el punto de conexión común para una carga tipo fuente de tensión: a) sin compensar, b) cuando actúa el filtro activo serie, c) cuando actúa la rama de filtro activo en serie con el pasivo

Cuando se compensa con el filtro serie, la tensión en los terminales de la carga (figura 15), se distorsiona debido a los armónicos introducidos por la carga, pero no se ve afectado por el tercer armónico, sólo presente en la tensión de fuente.

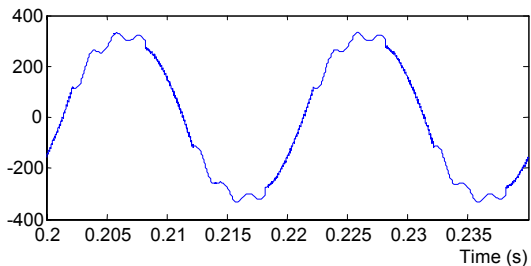


Fig 15. Tensión en la carga tipo VSNL cuando actúa el filtro serie.

4. Conclusiones

Se han obtenido las expresiones de la intensidad de fuente, tensión en la carga y en el punto de conexión común para dos topologías de filtros híbridos, verificándose posteriormente los resultados mediante simulación.

Con los dos filtros es posible eliminar los armónicos de la corriente de fuente cuando se trata de cargas del tipo fuente de armónicos de corriente, no así para cargas del tipo de fuente de tensión, donde sólo es posible con la topología de filtro activo en serie con la impedancia de fuente.

Cuando la carga es del tipo HCS, la configuración del filtro activo en serie con la fuente, distorsiona la tensión en los terminales de la carga con los mismos armónicos que la intensidad de carga, sin embargo, la "aisla" de los armónicos presentes en la fuente. La otra topología no afecta a la tensión en los terminales de la carga, apareciendo los mismos armónicos de la tensión de fuente. Ninguna de las dos configuraciones distorsionan la tensión en el punto de conexión común de la red.

Cuando la carga es del tipo HVS, sólo es posible compensar los armónicos de la corriente de fuente con la configuración filtro activo en serie con la fuente. Con esta topología se consigue además, aislar al punto de conexión común de los armónicos de tensión producidos por la carga, al igual que a la carga de los armónicos de la fuente de tensión.

Agradecimientos

Este trabajo se incluye en el proyecto "Compensación de la distorsión armónica en instalaciones eléctricas usando diferentes configuraciones de filtros activos de potencia" DPI2003-01336, financiado por la CICYT (Ministerio de Ciencia y Tecnología, España).

Referencias

[1] F. Z. Peng and D. J. Adams, "Harmonics sources and filtering approaches," in *Proc. Industry Applications Conference*, October 1999, Vol, 1, pp. 448-455
 [2] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A novel harmonic power filter," in *Proc. IEEE/PESC*, April, 1988, pp. 1151-1159.

[3] J. W. Dixon, G. Venegas and L.A. Morán, "A series active power filter based on a sinusoidal current-controlled voltage-source inverter," *IEEE Trans. Industrial Electronics*. Vo, 44, no. 5, October 1997, pp. 612-620
 [4] Z. Wang, Q. Wang, W. Yao and J. Liu, "A series active power filter adopting hybrid control approach," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 16, no. 3, May 2001, pp. 301-310
 [5] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power systems-a combined system of shunt passive and series active filters," *IEEE Trans. Industry Applications*. Vol, 26, no. 6, Nov/Dec 1990, pp. 983-990
 [6] Y. S. Kim, J. S. Kim and S. H. Ko, "Three-phase three-wire series active power filter, which compensates for harmonics and reactive power," *IEE proc. Electr. Power Appl.*, Vol, 151, no. 3, May 2004, pp. 276-282
 [7] H. Akagi, "Trends in active power line conditioners," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 9, no. 3, May 1994, pp. 263-268
 [8] A. Ghosh, A. K. Jindal, A. Joshi, "Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads," *IEEE Trans. Power delivery*. Vo, 19, no.1, January 2004, pp. 405-413
 [9] P. Salmerón, J. C. Montaña, J. R. Vázquez, J. Prieto, A. Pérez, "Compensation in Nonsinusoidal, Unbalanced Three-Phase Four-Wire Systems with Active Power Line Conditioner," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19 (4), pp. 1968-1974, Oct. 2004.