

FILTRO ACTIVO HIBRIDO PARA ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS A TENSIONES MEDIAS

Hybrid power active filter for harmonic cancelation at medium voltages

RESUMEN

Se analiza el proceso de diseño y la simulación de un esquema de filtro activo híbrido aplicable a tensiones medias sin necesitar de transformadores reductores para tal fin. Se muestra el desarrollo del método de compensación usado y los resultados obtenidos cuando se aplica en un sistema de conversión de alterna a continua basado en tiristores. El sistema se simula para diferentes niveles de tensión de alimentación.

PALABRAS CLAVES: Filtro activo híbrido, convertidor C.A.-C.C., tiristores

ABSTRACT

It is analyzed the design process and the simulation of one scheme based in an hybrid active filter to be used in medium voltages and transformerless. The compensation method used is showed and the results obtained when this system is applied in a converter form C.A. to C.C. based in thyristors. The systems is simulated to different levels of the voltage source.

KEYWORDS: Hybrid active filter, C.A.-C.C. converter, thyristors

ALFONSO ALZATE GÓMEZ

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

CARLOS ANDRÉS TORRES P.

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Estudiante de Doctorado
Universidad Rovira Virgili
Tarragona (España)

Grupo de investigación en Electrónica de Potencia

1. INTRODUCCIÓN

La creciente implementación de elementos de electrónica moderna, tiene como consecuencia directa un incremento en el contenido armónico en el fluido eléctrico, lo cual trae dificultades tanto para el usuario como para el distribuidor, dado que estos fenómenos se reflejan en el sistema eléctrico de la siguiente manera: aumento de la potencia reactiva, operación inadecuada de elementos de protección, variaciones en la amplitud y frecuencia de las ondas de tensión y corriente en general.

Las soluciones planteadas han dado como resultado una serie de topologías para filtros pasivos, filtros activos y filtros híbridos con el fin de llegar a soluciones más eficientes y viables para eliminar esas perturbaciones [1].

La solución propuesta en este trabajo consiste en un filtro híbrido, formado por un filtro pasivo conectado en serie con un filtro activo, siendo el conjunto en paralelo con la fuente de alimentación sin necesidad de un transformador adaptador. La función de esta topología es la de permitir

la acción del filtro activo a tensiones menores a las de operación de la carga y la red, por lo cual los elementos requeridos para este son menos exigentes en cuanto a tensión y tamaño y costos. Se analizan las características del circuito de control para el filtro activo, el cual sensa las corrientes de la fuente y de la carga para realizar compensaciones que permitan disminuir el contenido armónico inyectado hacia la red de alimentación.

2. Modelo del Sistema de Potencia.

Se propone como topología para el análisis la conexión del filtro híbrido en paralelo con el sistema de potencia que alimenta el convertidor AC/DC. El sistema de potencia está conformado por la fuente de alimentación trifásica, la línea de transmisión con sus respectivas impedancias, el convertidor trifásico de seis pulsos a base de diodos rectificadores, el cual actúa como carga generadora de armónicos y el filtro híbrido conectado en paralelo. Además de realizar la simulación del sistema a mediana tensión (3.3 KV), se hace la extensión a niveles de tensión industriales (220 V, 440 V).

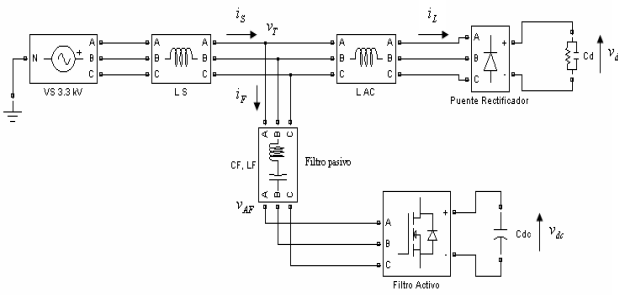


Figura 1. Topología del sistema estudiado.

3. Metodología de Control para el Filtro Activo Híbrido

3.1 Sistema Síncrono de Referencia

Se utiliza la transformación del sistema trifásico abc al sistema de ejes $dq0$ los cuales rotan a determinada velocidad angular haciendo uso de la transformación de Park. Esta conlleva a una técnica de compensación que con respecto a las teorías cruz y PQ modificadas derivadas de la teoría general de la potencia reactiva instantánea [2,3], necesita menos cálculos computacionales ya que está dirigida a la compensación expresa de corriente mediante cálculos de corrientes activas y reactivas instantáneas [4, 5] como se definió en el capítulo anterior, pero sin pasar por calcular las potencias relacionadas proporcionalmente a estas corrientes.

Se hace necesario para realizar esta transformación contar con un detector de frecuencia **Phase Lock Loop PLL**, cuya función es la de detectar la frecuencia fundamental de los sistemas de corrientes y/o tensiones que se tomen como entrada a las transformaciones, los cuales pueden ser desbalanceados y contener armónicos.

A estos ejes se les aplica un proceso de sincronización, consistente en alinear el eje d del sistema móvil de coordenadas con la tensión de red y girando a la misma velocidad que esta respecto a los ejes fijos abc . Todas las componentes de tensión o corriente que giren a la misma velocidad que los ejes en movimiento se perciben como valores constantes, mientras que los armónicos, y las componentes de secuencia negativa de esas tensiones y corrientes, aparecen como componentes alternas, permitiendo de este modo su discriminación. Esto se logra con el uso del sistema PLL descrito anteriormente.

Para la aplicación del método es necesario hacer:

- Conversión directa del sistema de corrientes de red al sistema $d-q-0$ mediante la transformación de Park.
- Orientación del sistema de ejes $d-q-0$ con la componente directa de la tensión de una fase de red.

- Obtención de las componentes continuas de corriente según el eje d o según el eje q , según convenga, mediante filtrado de la corriente total según ese eje.

- Conversión inversa del sistema $d-q-0$ al sistema trifásico en ejes $a-b-c$ para la obtención de las tres corrientes de fase.

3.2 Control por Realimentación

Este subsistema de control mediante realimentación recibe como señales de entrada el conjunto de corrientes trifásico de la fuente de alimentación i_{s_u}, i_{s_v} e i_{s_w} y parte de allí realizando la transformación de este sistema trifásico al sistema rotacional síncrono de referencia $d-q$ mediante la transformación de Park la cual brinda las corrientes activas y reactivas instantáneas.

La componente fundamental en el sistema de corrientes trifásico es equivalente a la componente continua de las corrientes i_d e i_q después de la transformación, y las componentes de frecuencias diferentes (Componentes armónicos) incluidas las de secuencia negativa equivalen a las componentes alternas de las mismas corrientes i_d e i_q . Estas componentes alternas son extraídas pasando las corrientes i_d e i_q cada una a través de un filtro pasa alto de primer orden con una frecuencia de corte de 16 Hz, luego del filtrado las corrientes \tilde{i}_d e \tilde{i}_q las cuales contienen la información de los componentes de armónicos presentes en el lado de la fuente de alimentación son transformadas a un sistema de corrientes trifásico por medio de la transformación inversa de Park; posteriormente cada armónico de corriente es amplificado por una ganancia K teniendo así el primer voltaje a ser aplicado al inversor tipo PWM que controla el inversor trifásico.

$$V^* af_{fb} = K.i_{sh} \quad (1)$$

El rango de variación de esta constante K es un parámetro importante para la correcta operación de compensación de corrientes armónicas de la parte activa de este filtro híbrido [6]; se obtuvo experimentalmente que para valores de la constante K superiores a 150 se empieza a tener una correcta respuesta en la operación del sistema de filtrado. Cabe anotar que la cota máxima del intervalo de variación para esta constante puede estar limitada en la práctica. Sin embargo en la simulación se encontró que tanto para valores muy cercanos a 150 como para valores mucho mayores tales como 300 o 500 no hay diferencias considerables en las formas de onda obtenidas.

Evidentemente, es necesario conseguir discriminar la componente fundamental de tensión y generar, a nivel de control, un sistema de tensiones equilibradas de

secuencia positiva. La obtención de este sistema de tensiones es fundamental para poder discriminar las componentes activa y reactiva de potencia ya que el filtro activo debe generar corrientes en cuadratura con estas tensiones para hacer la compensación de la energía reactiva. Esta sincronización se logra a través del bloque PLL como lo muestra el diagrama de control.

Mediante este procedimiento se logra que la red sea perfectamente sinusoidal, equilibrada y sin componente de secuencia cero de tensión para lo concerniente a las transformaciones de coordenadas. La componente alterna de potencia activa y la potencia reactiva, incluirá la potencia activa fundamental de secuencia negativa, la componente de potencia reactiva fundamental y la potencia de armónicos. La corriente de red será sinusoidal y estará constituida únicamente por la componente activa de la corriente fundamental en fase con la componente fundamental de tensión de red de secuencia positiva. En todo este proceso se ha omitido la compensación de la potencia de secuencia cero al ser alimentado el control mediante un sistema de tensiones equilibradas calculado.

Los errores debidos a la no perfecta compensación de las componentes de secuencia negativa, puede subsanarse mediante el regulador de la tensión en el condensador del filtro activo, con el que se controla el flujo de potencia activa entre este y la red. Este control se hace a través de un lazo de realimentación adicional, que sensa la tensión en el barraje y la compara con una tensión de referencia, alrededor de un 10% de la tensión de línea en la fuente, y usa un controlador tipo PI el cual se encarga de realizar la regulación entregando una señal de control que se suma a la componente reactiva de corriente \tilde{i}_{q1} la cual posteriormente será transformada en las señales de control para el inversor PWM utilizado.

Los errores en la compensación, así como la no consideración de la potencia de secuencia cero, provocan la descarga del condensador de c.c., lo cual es detectado por el regulador de tensión y, como reacción, incrementa el valor de la potencia de pérdidas con objeto de recuperar el valor de la tensión prevista en el.

3.3 Control por Alimentación Directa

Este subsistema de control tiene como propósito a partir de las componentes pasivas (inductancia y capacitancia) del filtro híbrido hacer que la totalidad de la componente del quinto armónico pase por esta parte pasiva y así no genere contaminación en las tensiones y corrientes de la red. La tensión y la corriente en el marco de referencia síncrono dq utilizado en esta estrategia de control para la frecuencia del quinto armónico, puede ser calculado a partir de las señales en un marco de referencia estacionario a-b así:

$$V_{dq5} = V_{\alpha\beta} e^{-jw_5 t} \quad (2)$$

$$V_{dq5} = V_{\alpha\beta} e^{-jw_5 t} \quad (3)$$

Donde $w_5 = -5w_1$, con w_1 la frecuencia fundamental (60 Hz). Es de notar que el quinto armónico de tensión o corriente corresponde a una componente de secuencia negativa en un sistema trifásico balanceado. En un marco de referencia estacionario a-b la impedancia que presenta la parte pasiva del filtro híbrido está dada por:

$$Z_F(s) = R_F + sL_F + \frac{1}{sC_F} \quad (4)$$

Realizando la transformación al sistema síncrono de referencia $d-q$ utilizado en el algoritmo de control se tendrá dicha impedancia como función de la frecuencia angular w . Por consiguiente la impedancia del filtro pasivo en el marco rotacional $d-q$ para la componente del quinto armónico se puede calcular como sigue

$$Z_{F_{dq5}}(s) = R_F + (s + jw_5)L_F + \frac{1}{(s + jw_5)C_F} \quad (5)$$

Siendo esta impedancia en estado estacionario ($s=0$) obtenida por

$$Z_{F_{dq5}}(0) = R_F + jw_5L_F + \frac{1}{jw_5C_F} \quad (6)$$

Por lo tanto conocido el valor de esta impedancia para la componente del quinto armónico y la corriente del mismo proveniente de la transformación d-q se puede calcular el voltaje de referencia aportado por el subsistema de control de alimentación directa así:

$$V_{dq5}^* = \left\{ R_F + j(w_5L_F - \frac{1}{w_5C_F}) \right\} \bar{i}_{L_{dq5}} \quad (7)$$

El sistema trifásico de corrientes en la carga, es decir después del punto de conexión común PCC i_{l_u}, i_{l_v} e i_{l_w} es transformado al sistema rotacional síncrono en la frecuencia del quinto armónico. La frecuencia de referencia se obtiene del generador de señales sinusoidales del PLL y es fundamental realizar la sincronización para conseguir así la transformación selectiva para esta componente de quinto orden. La componente del quinto armónico en el sistema de corrientes mencionado es equivalente a la componente DC en id_5 e iq_5 . Esta componente es extraída por medio de un par de filtros de primer orden pasa bajo con frecuencia de corte de 16 Hz. La obtención del voltaje de referencia como aporte de este subsistema de control al inversor PWM se hace por medio de la implementación de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_{d5}^* \\ V_{q5}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_F & -w_5 L_F + \frac{1}{w_5 C_F} \\ -w_5 L_F + \frac{1}{w_5 C_F} & R_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld5} \\ \bar{i}_{Lq5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Al aplicar la transformación inversa del sistema síncrono rotacional $dq0$ al sistema estacionario $a-b-c$ se obtienen las tensiones de referencia que aporta al circuito de control del inversor esta parte del sistema de control.

Las señales que finalmente son llevadas al PWM se obtienen sumando las contribuciones de las dos partes de control realimentado y por realimentación directa. Estas señales son comparadas en el sistema inversor con una señal triangular de referencia de frecuencia igual a 10 KHZ. Produciéndose así finalmente las señales de control aplicadas a las compuertas de los dispositivos activos.

3.4 Esquema de Control

La figura 2 muestra en forma de diagramas de bloques el esquema de control utilizado en la implementación del filtro activo híbrido propuesto.

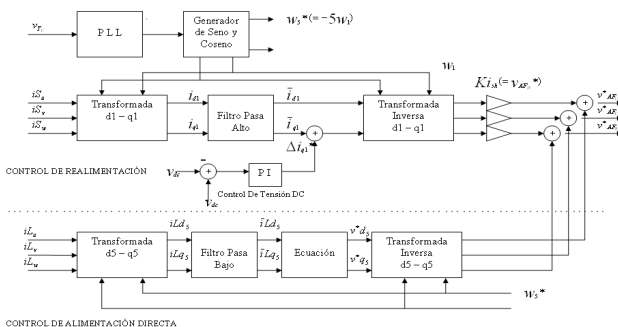


Figura 2. Esquema de control utilizado.

La forma en la que opera el sistema es la siguiente: Una de las tensiones de fase en este caso la fase u se utiliza para dar referencia al sistema PLL tomando como base la frecuencia de su tensión de entrada para generar los parámetros (valores de frecuencia), que se asignan a un generador de funciones el cual genera las señales sinusoidales de referencia con frecuencia igual a la fundamental y con frecuencia igual a menos 5 veces la fundamental para las transformaciones de coordenadas directas e inversas que requieren los controles por realimentación y por alimentación directa respectivamente.

Control por Realimentación (Segundo nivel)

Se aplica la transformación de Park al sistema trifásico de corrientes de la fuente I_s , transformando este sistema al marco de referencia sincronizado con la frecuencia fundamental, seguido las corrientes I_d e I_q se hacen pasar

por medio de un filtro pasa alto de primer orden con frecuencia de corte alrededor de los 16 Hz esto como se fundamenta en la teoría del sistema síncrono de referencia con el fin de obtener las componentes AC de estas corrientes, corrientes de distorsión adicionadas con la corriente de pérdidas que circula por el inversor trifásico.

Las tensiones de referencia resultado del nivel de control por realimentación se obtienen al aplicar la transformación inversa de Park a estas corrientes $d-q$ alternas y multiplicarlas por la ganancia K cuyo valor es un parámetro preestablecido.

A la componente de corriente en dirección al eje q se adiciona la señal de control para controlar la tensión en el lado DC del inversor PWM. Dicha señal proviene de un controlador tipo PI el cual ha sido diseñado con base en lo propuesto para mantener la estabilidad del sistema en [6]. De acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I \leq \frac{(K_p)(V) \cos \phi}{2RK_p + K_i} \quad (9)$$

Siendo los valores para la corriente de fase, ángulo de la corriente de fase, tensión del inversor e impedancia los siguientes:

Asumiendo para efectos prácticos que la constante de proporcionalidad K_p sea de 0.2 se encuentra que al valor aproximado para la constante integral K_i es aproximadamente 20.

3.5 Diseño del filtro pasivo.

El sistema de filtro activo híbrido propuesto contiene en su parte pasiva un filtro LC por fase. La característica principal de este filtro pasivo es que esta sintonizado a la frecuencia de la componente armónica número 7 del sistema (420 Hz) El cual es segundo armónico más dominante. Algunas de las razones por las cuales se toma como frecuencia de referencia para la parte pasiva del filtro híbrido la frecuencia del séptimo armónico son las siguientes:

- El filtro LC sintonizado a la frecuencia del séptimo armónico es menos robusto y menos costoso que una combinación LC para filtrar la componente del quinto armónico.
- El filtro sintonizado con la frecuencia del séptimo armónico presenta una impedancia más baja para las componentes de orden 11 y 13. [7].
- El quinto armónico es eliminado en casi su totalidad con la implementación del control por realimentación, dejando así como componente de mayor peso a la componente de orden 7.

Finalmente teniendo como referencia para el diseño de la parte pasiva del filtro híbrido la frecuencia del armónico

numero 7 se tienen los siguientes valores para la inductancia del filtro L_f y para la capacitancia del mismo C_f respectivamente 5 mH Y 41 uF

4. RESULTADOS

La simulación realizada en el software MatLab, verifica la viabilidad y eficacia del filtro hibrido propuesto. La carga consiste en un elemento resistivo de 60Ω ; la ganancia de realimentación del filtro activo K es igual a $500 \Omega (= 14pu)$, y el bus DC de tensión en el filtro activo posee un valor de 300V. Se realizaron tres simulaciones manteniendo fija la frecuencia del sistema en 60 Hz, variando la magnitud de la tensión del generador de corriente alterna, los valores empleados fueron 3300V, 440V y 220V. De las figuras 3 a la 5 se muestran las formas de onda resultantes en la simulación a 3300V, cuando solo el control por realimentación es aplicado al filtro activo.

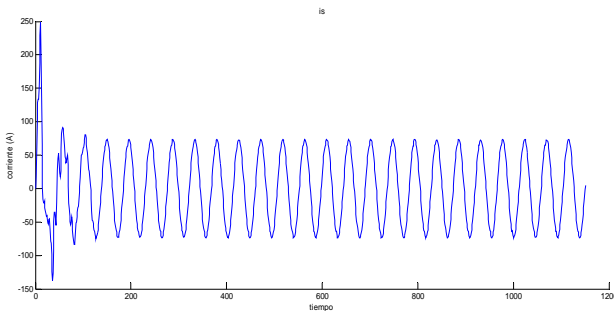


Figura 3. Corriente de la fuente de alimentación a 3300 voltios.

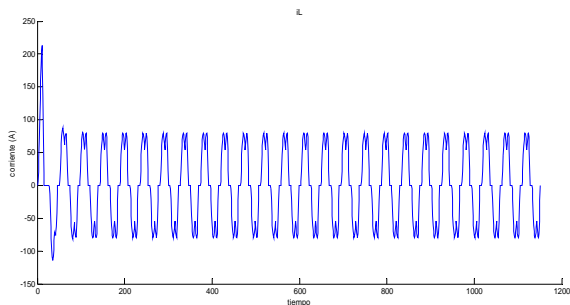


Figura 4. Corriente en la carga a 3300 voltios

Cuando el control por realimentación es aplicado al filtro activo, el filtro hibrido puede reducir la distorsión total armónica (THD) en la corriente de carga a 2.5 %. La corriente en la fuente tiene un factor de potencia de 0.99.

Por otro lado el filtro hibrido con la realimentación mas el control feedforward, tiene la capacidad de compensar en un mayor porcentaje la magnitud de los armónicos en la corriente de la fuente. En las figuras 6 y 7 se muestran las formas de onda obtenidas en la simulación a 3300V.

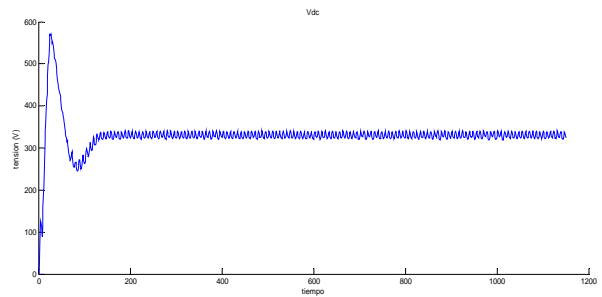


Figura 5. Tensión en la barra D.C. a 300 Voltios.

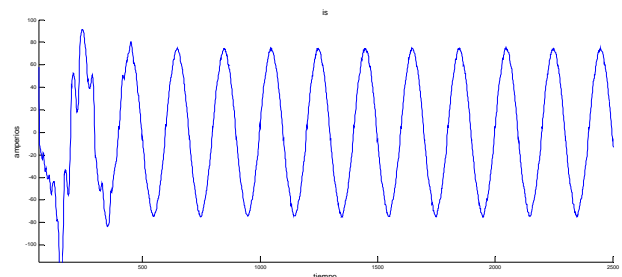


Figura 6. Corriente de la fuente de alimentación a 3300 Voltios con doble control

La corriente en la carga no cambia pues esta sigue siendo la misma del caso anterior.

En la tabla 1 se muestra la distorsión total armónica (THD) para corriente de carga (IL) y la corriente de la fuente (Is) además la magnitud de cada corriente armónica con respecto a la corriente fundamental. Como consecuencia se obtuvo un factor de potencia alto de 0.99 y una forma de onda cercana a la sinusoidal.

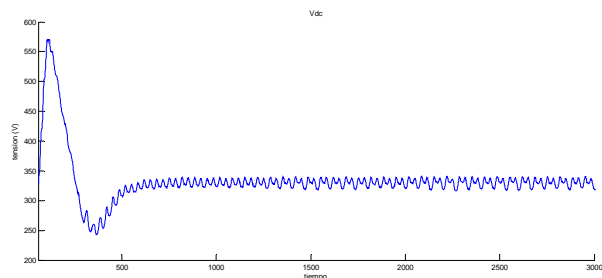


Figura 7. Tensión en el condensador usando doble control.

Estos resultados también verifican que la tensión DC de 300V es suficiente para que el filtro activo posea un funcionamiento satisfactorio, por lo tanto para los sistemas de 440 y 220 se usan tensiones de 44V y 22V respectivamente con resultados similares. Del comportamiento observado se infiere que la tensión DC requerida es aproximadamente 10 % de la tensión nominal de la fuente. Esto se muestra en las tablas 2 y 3.

Tabla 1. Tensión 3300V

	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th	THD %
i_L	18	5.7	2.8	2.2	1	0.8	25
I_S Sin FF	4.9	1.9	2	1.2	0.2	0.6	5.9
I_S	1.2	0.4	0.7	0.5	0.2	0.4	3.2

Tabla 2. Tensión 440V

	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th	THD %
i_L	2.4	0.8	0.4	0.3	0.1	0.1	25
I_S sin FF	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	2.8
I_S	0.2	0.1	0.02	0.1	0.03	0.04	2.5

Tabla 3. Tensión 220V

	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th	THD %
i_L	1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	25
I_S Sin FF	0.1	0.1	0.01	0.02	0.02	0.02	5.4
I_S	0.6	0.05	0.007	0.008	0.009	0.01	2.7

5. CONCLUSIONES

Las corrientes de compensación obtenidas con la implementación del algoritmo basado en el método de sistema síncrono de referencia, en todos los casos eliminan en un buen porcentaje la distorsión armónica total en la corriente de la fuente de alimentación, lo cual confirma la funcionalidad de dicho método.

El sistema estudiado es muy versátil en cuanto a su funcionamiento para diferentes niveles de tensión para lo cual es necesario solamente ajustar en cada caso el valor en por unidad de la tensión de alimentación y el valor de referencia para la tensión del inversor la cual es de alrededor del 10% de la tensión de la fuente.

Con la inclusión del lazo de control por alimentación directa (Feedforward) se puede observar una reducción significativa en la magnitud de la componente armónica de orden 5, comparado con el valor de la misma para la simulación cuando solo opera el control por realimentación. Para todos los casos simulados la magnitud de la componente armónica de orden 7 es correctamente reducida por la operación de la parte pasiva del filtro híbrido propuesto, lo cual era de esperarse dado que dicho filtro LC se sintoniza a esta frecuencia.

6. REFERENCIAS

[1] PENG, Fang. Harmonic sources and filtering approaches. IEEE Industry Applications Magazine. July/August 2001, pp 18-25.

[2] PENG, Fang and LAI, Jih. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power System. En: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 45, No. 1 (feb. 1996); pp 293-297.

[3] WILLEMS, Jacques L. A new interpretation of Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations. En: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 41, No. 4 1992; pp 523-527.

[4] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y. and NABAE, A. Generalized Theory of the Instantaneous reactive Power in Three-Phase Circuits. IPEC' 83-Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983; p. 1375-1386.

[5] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y. and NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. En: IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 1A-20 (may-jun 1984), pp 625.

[6] SUNT, Srianthumrong; AKAGI, Hirofumi. A medium voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter. En: IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 39, No. 3 (may. 2003); pp 874-882.

[7] PENG, Fang; OTT, George and ADAMS, Donald. Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire System. En: IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 13, No. 6 (nov. 1998); pp 1174-1181.