

FILTRO HIBRIDO DE POTENCIA

POWER HIBRID FILTER

Teresa Núñez Z.¹, Rodolfo Moreno M.², Jorge Ramos C.³ Alberto Soto L.⁴

RESUMEN

En el presente artículo se muestran los resultados de simulación obtenidos del estudio de un sistema electrónico de potencia, que mejora significativamente el desempeño del filtro pasivo trifásico convencional que normalmente se utiliza para la compensación del factor de potencia de cargas no lineales. Esta mejora se logra, conectando un filtro activo trifásico (FA) (o unidad activa) en serie con el filtro pasivo a (FP) través de tres transformadores de acoplamiento y controlando al filtro activo de manera que obligue a las componentes armónicas generadas por el rectificador a pasar por el filtro pasivo. A esta topología en la que se combina un filtro pasivo con un filtro activo se le conoce como Filtro Híbrido de Potencia.

Palabras clave.- Armónicos, Filtros pasivos de potencia, Filtros activos de potencia, Teoría de la potencia instantánea.

ABSTRAC

This paper deals about study and simulation of an Power Hybrid Filter for three phase industrial power system, this filter improves the filtering characteristics of the conventional passive filter increasing its performance. This results in a great reduction of the required rating of the active filter and in eliminating all the limitations faced by using only the passive filter, leading to a practical and economical system.

Key words.- Armónicos, Filtros pasivos de potencia, Filtros activos de potencia, Teoría de la potencia instantánea.

INTRODUCCIÓN

El aumento indiscriminado en la conexión de cargas no lineales en la red, trae consigo un sin número de serios problemas relacionados con la distorsión de corriente, tensión y pérdida de eficiencia, por el bajo factor de potencia que operan estas cargas [12] (las cargas no lineales que consumen corrientes que no son senoidales, produciendo distorsión en la forma de onda de la tensión en los puntos de conexión de los equipos).

Los filtros activos de potencia y las combinaciones de filtros pasivos y activos de potencia (Filtro

Híbridos de Potencia), son una forma de superar estos problemas, tecnologías que en estos últimos años han venido desarrollando, generándose nuevas y distintas estructuras [4, 5, 6 y 7].

Los filtros pasivos, compuestos por elementos L y C en serie, sintonizados y; filtro pasa-altos, son usados ampliamente para la supresión de armónicas producidos por las cargas no lineales, debido a su bajo costo inicial y a su relativa eficiencia [3].

Sin embargo, los filtros pasivos presentan los siguientes problemas como son:

¹Dra. Docente investigadora de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²MSc. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ³Ingeniero Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ⁴M.S.c. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

- La característica del filtrado está afectada por la impedancia equivalente de la red, la que no se conoce exactamente y varía con la configuración del sistema
- La resonancia paralela entre la impedancia de la fuente AC y la impedancia presentada por un filtro pasivo, causan la amplificación de corrientes armónicas a frecuencias específicas en el lado de la red.
- Un filtro pasivo puede entrar en resonancia serie con la fuente de alimentación, de tal forma que la distorsión de tensión produce excesivas corrientes armónicas, las que fluirán a través del filtro pasivo.

Por su parte los filtros activos de potencia, que utilizan convertidores electrónicos de potencia con conmutación PWM y controlados por tensión o por corriente, realizarán las siguientes funciones [12]:

- Reduce el flujo de armónicos de corriente por la red, restringiendo su circulación entre el FA y los centros de generación.
- Reduce la corriente por neutro.
- Reduce los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.
- Corrige del factor de potencia
- Equilibra las corrientes que circulan por las diferentes fases
- Equilibra las tensiones entre fase y neutro
- Regula la tensión
- Reduce los flickers

Los filtros activos sin embargo, también presentan ciertas limitaciones como son:

- El costo inicial de su implementación, es alto.
- Dificultades para construir fuentes de corriente de gran potencia con respuesta rápida de corriente.

Por las razones expuestas, se propone una nueva alternativa para los filtros, la que utiliza una combinación de un filtro activo de pequeña potencia con un filtro pasivo. Como se sabe los filtros activos son una alternativa de solución muy interesante para compensar sistemas de distribución [3 y 4], mientras que las características de compensación de los filtros pasivos existentes, podrían mejorarse significativamente, tal como se verá más adelante al conectarseles con un filtro activo de potencia dándole una mayor flexibilidad a la compensación.

Filtros pasivos

En la Fig.1, se presenta el esquema de una instalación industrial en la que se muestra un rectificador a tiristores conectado a la red mediante un transformador y un filtro pasivo (condensadores de compensación sintonizados). Este sistema es usado para alimentar una carga en corriente continua, el rectificador es la carga generadora de armónicos de tipo corriente los que son inyectados a la red. Se sabe también, que en la operación del rectificador se consume potencia reactiva fundamental, cuya magnitud depende del ángulo α (de encendido) y del ángulo μ (de conmutación) de los tiristores, este ultimo a su vez depende de la reactancia L_c acumulada desde la fuente AC de alimentación hasta los terminales de entrada del rectificador.

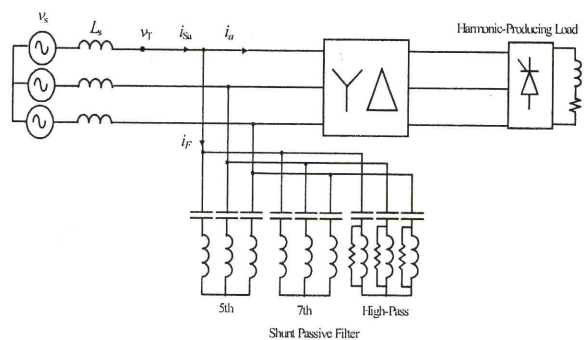


Fig. 1 Carga no lineal y filtro pasivo.

Para compensar el factor de potencia del sistema, es necesario hacer la compensación del factor de desplazamiento y del factor de distorsión armónica total de la corriente [14].

Para la compensación del factor de

desplazamiento, que significa compensar la componente reactiva fundamental absorbida por el rectificador, se coloca un banco de condensadores cuya potencia reactiva está determinada por la ecuación (1) para el máximo factor de desplazamiento que se quiere lograr.

$$Q_c = P [tg\phi_1 - tg\phi_2] \quad (1)$$

- Q_c Potencia reactiva suministrada por el banco de condensadores
 P Potencia activa consumida por la carga
 ϕ_1 Angulo del Factor de Desplazamiento original
 ϕ_2 Angulo del Factor de Desplazamiento mejorado

Por otro lado, la colocación del banco de condensadores [1] requiere de la verificación de la frecuencia de la posible resonancia paralela con la reactancia de corto circuito de la red

$$h_r = \frac{f_r}{f_0} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (2)$$

- h_r Orden del armónico
 f_0 Frecuencia de la red
 f_r Frecuencia de resonancia
 S_{cc} Potencia de corto circuito del sistema
 Q_c Potencia reactiva suministrada por el banco de condensadores

Como se sabe, el rectificador controlado de seis pulsos, es una carga generadora de armónicos de tipo corriente que presenta un espectro armónico, cuyo orden de cada componente está determinada por la ecuación:

$$h_r = 6n \pm 1 \quad (3)$$

Donde n es un número entero

Para la compensación de la distorsión de corriente se parte de la potencia reactiva necesaria para la compensación del factor de desplazamiento ($\cos\phi$), potencia que se distribuye en diferentes sub-bancos de condensadores y luego conectando cada sub-banco en serie con reactores, como se muestra en la Fig. 1 y sintonizado cada conjunto

(Filtro) a una determinada frecuencia armónica generada por el rectificador. De esta forma se reduce la distorsión inyectada por la carga a la red, aumentando el factor de potencia y reduciendo también la posibilidad de resonancia paralela a las frecuencias de los armónicos generados por el rectificador. Una referencia usada para el proyecto de los filtros pasivos es la IEEE 519 [14], en la que se establece los límites para distorsión total de corriente y para las amplitudes de las componentes armónicas que pueden ser inyectados a la red.

Como ejemplo, en la Fig.2 se muestra el esquema eléctrico correspondiente a una instalación que consta de un rectificador controlado de seis pulsos que alimenta una carga con una tensión V_{dc} de 553 V y corriente I_{dc} de 1000 A que corresponde a una potencia de 553 kW. Si el nivel de corto circuito y máxima demanda en la barra de 10 KV establecida como el punto de acoplamiento común (PCC), corresponde a 3 kA y 35 A, respectivamente, se calcula el factor de influencia armónica con el que se determinará los límites de las amplitudes de las componentes armónicas, así como de la distorsión total de corriente recomendada por IEEE 519.

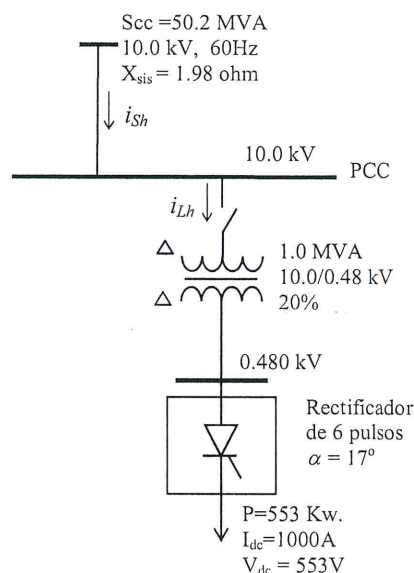


Fig. 2 Diagrama unifilar del sistema de rectificación sin compensación reactiva.

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = 85.7$$

Si el ángulo α de encendido de los tiristores es 17° y el ángulo de conmutación μ es 24° , cuando el

rectificador es operado sin el sistema de compensación los resultados son los siguientes (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Límites de distorsión de corriente total y para cada armónica.

h	5	7	11	TDD (%)	PF
IEEE 519	10.0	10.0	4.5	12.0	
Límites (%)					
Sin banco de Condensad.	I_{sh}/I_s 6.778	4.158	1.82		
	18.16	11.14	4.88	22.14	0.85

De los resultados mostrados en la Tabla 1 se concluye que tanto la distorsión total de corriente así como la amplitud relativa de los armónicos, son mayores que el sugerido por la IEEE 519 y el factor de potencia es bajo.

Para mejorar el factor de potencia se colocarán filtros sintonizados que compensarán el factor de desplazamiento y la distorsión de corriente.

En la Fig.3 se muestra la estructura del sistema de compensación conectado en el PCC a ser calculado.

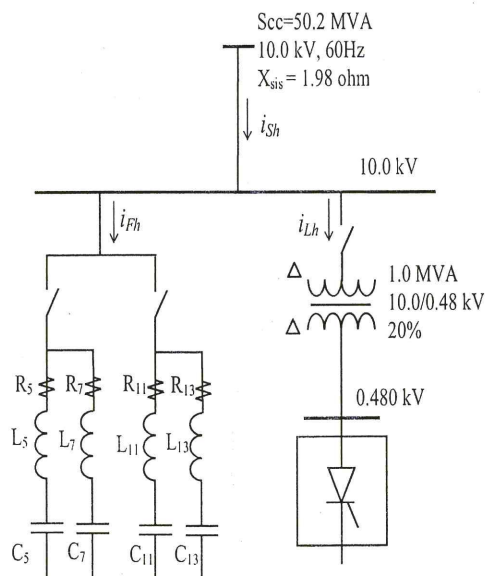


Fig. 3 Carga no lineal y filtro pasivo.

El factor de desplazamiento del rectificador correspondiente a las condiciones de operación de la carga, esto es:

$$\cos \phi_1 = 0.855$$

Mediante la ecuación (1) se calcula la potencia del banco trifásico de condensadores que aumentara el factor de desplazamiento de 0.855 para 0.95 ($\cos \phi_2 = 0.95$).

$$Q_c = 153.6 \text{ Kvar.}$$

Luego, se procede a la verificación de la frecuencia de resonancia con la impedancia equivalente del sistema de la ecuación (2).

$$h_r = 18.0$$

El banco de condensadores es dividido en tres bancos, cada uno sintonizado a las frecuencias armónicas de 5, 7 y 11 orden respectivamente. El resultado del diseño de los filtros es mostrado en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Resultado del diseño de los filtros pasivos.

Banco	h_r	Q_c (Mvar)	Q	R(ohm)
1	5	0.090	100	1.11
2	7	0.045	100	1.585
3	11	0.022	100	2.065

Tabla 3. Resultado del diseño de los filtros pasivos.

Banco	X_L (ohm)	X_C (ohm)	L (mH)	C (uF)
1	44.44	1,111.0	117.8	2.387
2	45.35	2,222.2	120.29	1.1935
3	37.56	4,545.45	99.628	0.5835

La potencia reactiva fundamental suministrada por los tres bancos de condensadores se calcula por la relación:

$$Q_{\text{Filtro}} = \sum \frac{h_r^2}{h_r^2 - 1} \cdot Q_c = 0.1618 \text{ Mvar}$$

Mediante este procedimiento se determina los elementos del sistema de compensación del factor de potencia para el caso de cargas que generan armónicos de corriente. Sin embargo, el desempeño presentado por los filtros sintonizados se ve afectado por factores que fueron mencionados anteriormente y que llevan a

proponer una solución al problema utilizando una combinación de un filtro pasivo con un filtro activo trifásico conocida como filtro híbrido, como se mostrará a continuación.

Filtro híbrido

En la Fig.4 se muestra la estructura de un Filtro Híbrido cuya configuración [2 y 9] sirve para la compensación de los armónicos.

La función del filtro activo serie, en este caso no es la compensación directa de los armónicos producidos por el rectificador, sino más bien, la de mejorar la característica de filtrado del filtro pasivo paralelo. Con esta estructura, los armónicos presentes en la fuente AC no se presentaran en los terminales de la carga, ni los armónicos de la carga podrán fluir por la fuente AC ya que el filtro activo serie, actúa como un aislador entre los armónicos presentes en la fuente AC y los producidos por la carga. Como consecuencia de esta nueva función, la potencia del filtro activo resulta ser mucho menor que la de un filtro activo paralelo convencional.

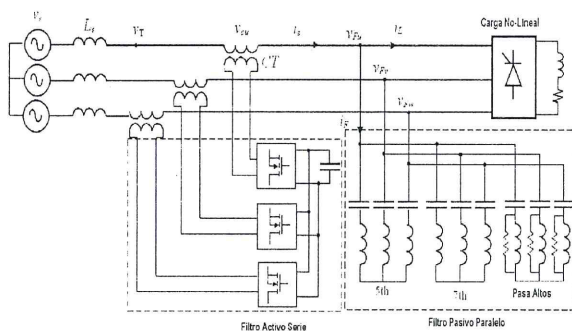


Fig. 4 Estructura de filtro híbrido.

En la Fig. 5 se muestra una nueva propuesta para la estructura de filtro híbrido [3], compuesta por un banco de filtros pasivos (en paralelo) conectados en serie con un filtro activo y el conjunto en paralelo con la carga generadora de armónicos. Esta topología busca mejorar de la misma forma que la anterior, la característica de compensación del filtro pasivo viabilizando el uso de filtros activos para grandes potencias y al mismo tiempo con bajo costo.

En esta nueva estructura, la unidad activa del filtro híbrido consta de un inversor PWM trifásico tipo fuente de tensión que opera a frecuencia de

conmutación constante, conectado en serie con el filtro pasivo a través de transformadores de acoplamiento.

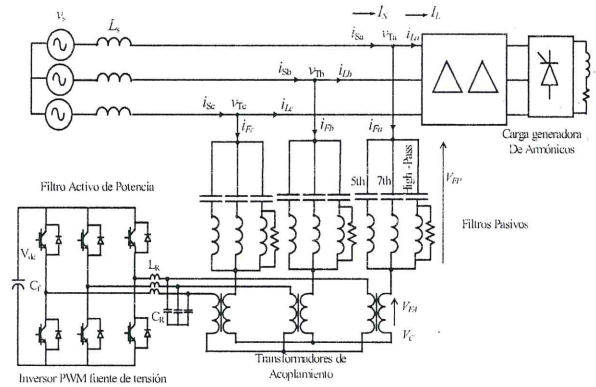


Fig. 5 Configuración del filtro híbrido de potencia.

Entre las estructuras híbridas de la Fig.4 y Fig.5 se pueden mencionar las siguientes diferencias: a) En la primera estructura, la corriente que pasa por la unidad activa (FA) está compuesta por la componente fundamental activa de la corriente de carga y la corriente fundamental en adelanto del filtro pasivo, mientras que en la segunda estructura, la corriente por el FA está compuesta por los armónicos de carga y la componente fundamental en adelanto de la corriente por el filtro pasivo, b) En cuanto a mantener constante la tensión del condensador del inversor mediante un lazo de control, resulta más fácil realizar esta función en la segunda estructura, ya que con la primera, la corriente que pasa a través del filtro activo varía con la variación de la carga, c) En cuanto a la protección del filtro activo, con la segunda estructura resulta más fácil aislar y proteger el FA que en la primera estructura, donde el FA se encuentra en serie con la fuente y la carga. Esto convierte a la segunda estructura (Fig.5) en la más recomendable a ser utilizada en los sistemas de potencia.

El principio de operación de esta unidad en la estructura híbrida, se basa en que el inversor debe inyectar una determinada tensión de manera que fuerce a todas las componentes armónicas de la corriente de la carga, a pasar por el filtro pasivo y no por la red. Cuando el filtro activo es controlado como una fuente de tensión, siguiendo la relación (4)

Donde:

- I_{F1} : Componente fundamental de corriente por el filtro pasivo.
 I_{Lh} : Componente armónica de corriente de la carga
 Z_{Fh} : Impedancia presentada por el filtro pasivo para el armónico h
 V_{Sh} : Componente armónica en la tensión de alimentación

El filtro pasivo utilizado es el mostrado en la Fig.9 que está compuesto por dos unidades resonantes serie para los armónicos de 5^{to} y 7^{mo} orden y un filtro pasa altos sintonizado a partir del armónico de orden 11.

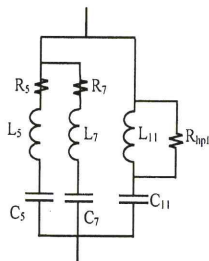


Fig. 9 Filtro pasivo sintonizado y pasa altos.

En la Fig.10 se muestra la variación de la impedancia del filtro pasivo con la frecuencia, con la que se podrá calcular el valor eficaz de la tensión en los terminales del FA.

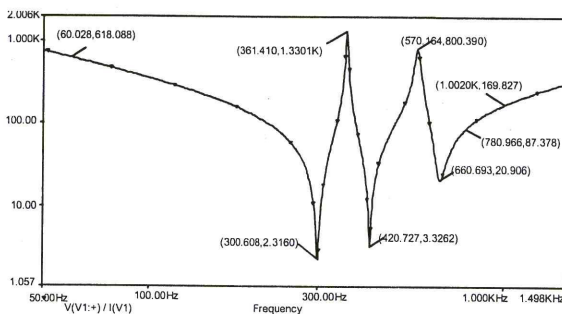


Fig. 10 Respuesta en frecuencia de la impedancia " Z_F " presentada por el filtro pasivo.

De los resultados obtenidos solo con el filtro pasivo y usando las ecuaciones (11), (12) y (13) se calcula la potencia y se determinan las magnitudes de tensión y corriente de la unidad activa (FA) así como de los transformadores de acoplamiento. La potencia mínima del filtro activo en este caso es

de $S_{FA} = 6$ kVA y el valor eficaz de la tensión y corriente por fase en el lado de alta tensión del transformador de acoplamiento es de $V_{FA} = 160$ V (r.m.s.) y $I_{Fa} = 12.4$ A (r.m.s.) respectivamente.

Considerando un factor de cresta de 2.5 para el caso de la tensión se puede estimar el valor del pico que se producirá y que en este caso será de 400 V en el lado de alta tensión. Siendo el transformador de relación 1:2 esto significa que el pico de tensión esperado será 200 V en el lado de baja tensión. Para determinar el nivel de tensión necesario en el condensador del circuito DC link del inversor se establecerá como criterio que el índice de modulación (IM) sea igual a 0.7, obteniéndose así una tensión $V_{dc}/2 = 287.5$ V, que en forma práctica corresponde a $V_{dc} = 600$ V.

Con el valor de tensión de 600 V y con el valor de la corriente por fase del inversor la que debido a la relación del transformador de acoplamiento será $I_{aFA} = 24.8$ A (r.m.s.), se seleccionan el tipo de llave semiconductor de potencia, que podrá ser utilizada como IGBT o MOSFET. La elección entre las dos tecnologías dependerá de la frecuencia de conmutación f_{sw} , potencia con la que operara el modulador y pérdidas del inversor. En este caso se usará una frecuencia de conmutación de 18 Khz porque permitirá reducir las dimensiones del filtro pasa bajos (L_R , C_R) colocado a la salida del inversor.

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El sistema de la Fig.5 (o Fig.8 sistema unifilar) que corresponde a una parte de un sistema industrial en 10KV, fue simulado en el programa PSCAD/EMTDC [11] para su evaluación.

CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA UTILIZADO

Filtro pasivo (FP)

- Potencia del filtro pasivo trifásico = 161.8 Kvar.
- Nivel de tensión: 10 KV.
- Frecuencia: 60 Hz.

- Filtro resonante para el 5^{to} armónico:
 $C_5 = 2.387\mu\text{F}$, $L_5 = 117.8\text{mH}$, $R_5 = 1.11\text{ohm}$, $Q = 100$
- Filtro resonante para el 7^{mo} armónico:
 $C_7 = 1.193\mu\text{F}$, $L_7 = 120.3\text{mH}$, $R_7 = 1.585\text{ohm}$, $Q = 100$
- Filtro resonante para 11^{avo} armónico y pasa altos:
 $C_{11} = 0.5835\mu\text{F}$, $L_{11} = 99.63\text{mH}$, $R_{11} = 0.5835\text{ohm}$, $Q = 100$

Filtro activo (FA)

- Potencia del filtro activo = 6 Kvar
- Inversor trifásico compuesto por seis IGBT's de 1200 V y 50A c/u
- Tensión del DC link: $V_{dc} = 600\text{ V}$
- Condensador del circuito del DC link: $C_f = 1000\mu\text{F}$, 1000V
- Frecuencia de conmutación: $f_{sw} = 18\text{kHz}$
- Filtro pasa bajos: $C_R = 0.33\mu\text{F}$, $L_R = 1\text{mH}$
- Transformador de acoplamiento de 10 Kvar y relación 1:2
- Control PI de tensión Vdc, $K_p = 1$, $\tau_i = 0.01\text{ (s)}$
- Ganancia $k = 300$

Carga

- Rectificador trifásico controlado de seis pulsos (a tiristores).
- Corriente de carga $I_{dc} = 1000\text{ A (DC)}$, tensión media de salida del rectificador $E_{dc} = 553\text{ V (DC)}$.
- Angulo de control $\alpha = 17^\circ$.
- Potencia Activa = 553 Kw.
- Potencia Reactiva = 335.4 Kvar.

- Transformador trifásico de 1 MVA, 10.0/0.480 KV, 60 Hz, $X_{dis} = 0.2\text{ (p.u.)}$, conexión delta-delta.

Red de alimentación

- Tensión: 10 kV, (trifásico)
- Frecuencia: 60 Hz.
- Potencia de cortocircuito: 50 Mva.

RESULTADOS

En la Fig.11(a) se muestra la forma de onda de la corriente de línea y la tensión por fase de la fuente de alimentación. En este caso solo está funcionando el filtro pasivo, obteniéndose una distorsión para la corriente de $\text{THDi} = 7.0\%$ y un factor de potencia de 0.93.

En la Fig.11 (b) se muestra la corriente absorbida por la carga y en la Fig.11(c) se muestra la corriente que pasa por el filtro pasivo y su valor eficaz.

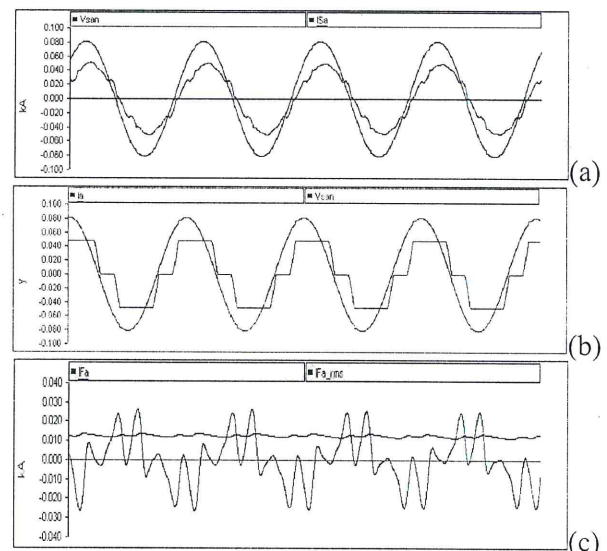


Fig. 11 Operación del sistema de rectificación sólo con el pasivo (a) Tensión y corriente de la fuente i_{sa} (b) Corriente absorbida por el rectificador i_s (c) Corriente por el filtro pasivo i_{Fa} y su valor eficaz.

En la Fig.12 se muestran el resultado cuando la unidad activa del filtro híbrido entra en operación. En la Fig.12(a) se muestra la corriente de línea de la fuente de alimentación que presenta una distorsión $\text{THDi} = 3.7\%$ lográndose una considerable reducción del valor obtenido con solo el filtro pasivo.

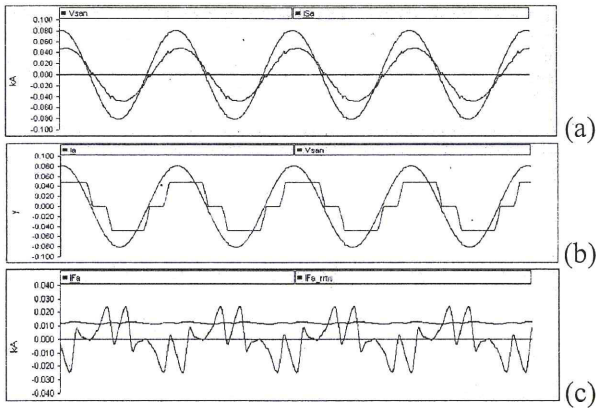


Fig. 12 Operación del filtro híbrido con la actuación del FA (a) Tensión y corriente de la fuente i_{sa} (b) Corriente de carga en primario del transformador de potencia i_a (c) Corriente por el filtro pasivo i_{Fa} y su valor eficaz.

En la Fig.13(a) se muestran las tensiones V_{PF} por fase del filtro pasivo y la tensión V_{AF} inyectada por el filtro activo. Aquí claramente se observa que la tensión producida por el filtro activo corresponde a la caída de tensión en el filtro pasivo producida sólo por las componentes armónicas de la corriente de carga, esto significa que el filtro activo actúa compensando esas distorsiones de manera que la impedancia presentada para las corrientes armónicas de la carga por los dos filtros en conjunto es cero, la impedancia vista por los armónicos de corriente de la carga es cero.

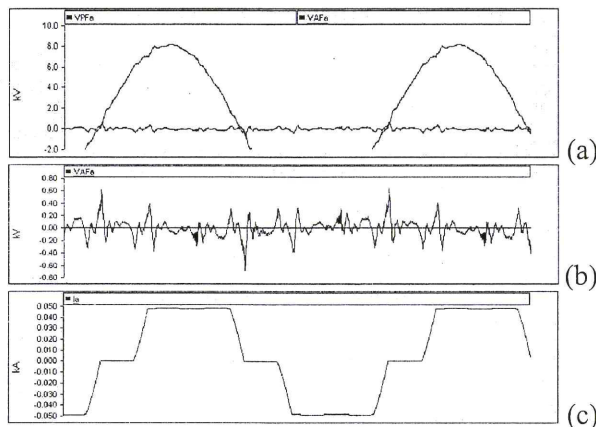


Fig. 13 Operación del filtro híbrido con la actuación del FA (a) Tensión por fase del filtro pasivo V_{PF} y del filtro activo V_{AF} (b) Ampliación de la tensión inyectada por del filtro activo (c) Corriente de la carga no lineal.

En la Fig.14 se muestra la tensión V_{dc} en el condensador C_f del inversor (Fig.5 o Fig. 8), tensión que se mantiene constante durante la operación del filtro en el nivel de 600 V por el lazo de control, luego del transitorio inicial de carga.

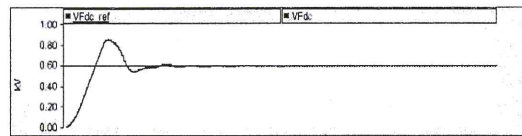


Fig. 14 Tensión en los terminales del condensador V_{dc} del inversor del FA.

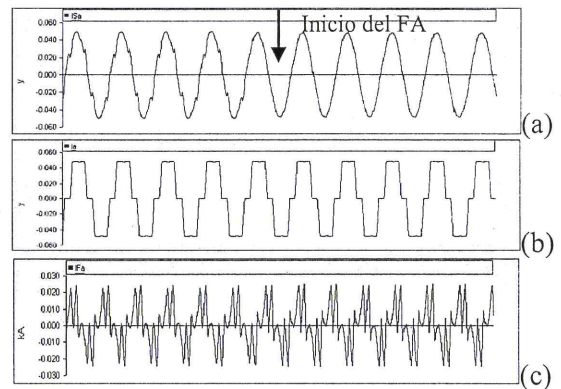


Fig. 15 Operación de filtro híbrido con filtro pasivo de factor de calidad $Q = 50$ (a) Corriente i_{SA} en el sistema de potencia (b) Corriente de carga i_a en el primario del transformador (c) Corriente i_{Fa} del filtro híbrido.

En la Fig.15 se muestra la corriente de alimentación i_s cuando solo el filtro pasivo con factor de calidad $Q = 50$ está actuando. La corriente presenta un THDi del 10.95% mostrando el efecto que tiene el factor de calidad en la eficiencia del filtro pasivo. Luego cuando el filtro activo (FA) entra en funcionamiento la distorsión de la corriente se reduce a 3.4% mejorando el desempeño de la compensación del filtro pasivo a pesar de usar un factor de calidad menor.

EFFECTO DE LA DISTORSIÓN EN LA TENSIÓN DE LA RED SOBRE EL FILTRO HÍBRIDO

En este caso, el sistema de compensación es probado cuando la tensión de la red presenta una distorsión del 5^{to} armónico con amplitud igual al 1% de la amplitud de la tensión fundamental. La distorsión de la tensión genera en la corriente i_{SA} una distorsión del 20.61% como se muestra en la Fig. 16(a) cuando sólo está presente el filtro

pasivo. La distorsión luego se reduce a 3.26% cuando el FA del filtro híbrido comienza a funcionar. Como el filtro pasivo tiene una rama sintonizada para atrapar el 5to armónico de la corriente de carga, esta rama presenta también mínima impedancia para el quinto armónico presente en la tensión de la red, produciéndose una resonancia serie y una sobrecarga de corriente del 5to armónico. Con la operación del FA este efecto queda amortiguado como se muestra en la Fig.16(a).

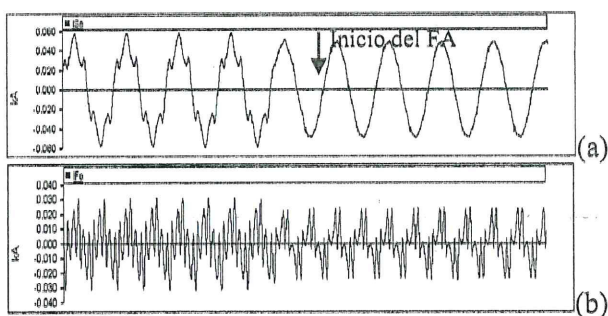


Fig.16 Operación de filtro híbrido considerando que la tensión de alimentación presenta distorsión (a) Corriente i_{sa} en el sistema de potencia (b) Corriente i_{Fa} del filtro híbrido.

En la Fig. 16(b) se observa que antes de la operación del FA del filtro híbrido, existe una corriente de sobre carga producida por la resonancia serie entre el armónico de tensión presente en la fuente y una de las ramas del filtro pasivo. Con la actuación del FA esta corriente es eliminada debido a que los efectos de los armónicos presentes en la tensión de alimentación son aislados de la carga.

EFEECTO DE LA PÉRDIDA DE SINTONIZACIÓN DE LOS FILTROS PASIVOS DEL FILTRO HÍBRIDO

Para simular la pérdida de sintonía, los valores originales de los condensadores son incrementados en 5% y de los reactores son incrementados en 2%. Esto hace que las frecuencias de resonancia de los filtros sufran variaciones del 3%, 2% y 6.7% respecto a las frecuencias de resonancia original de cada filtro para el 5to 7mo y 11avo armónico respectivamente. Esto hace que los filtros pierdan eficiencia en el filtrado de los armónicos presentes en la corriente de carga. En la Fig.17(a) se muestra la corriente de la fuente con la distorsión del 15.9%

producida por la variación de los valores del filtro pasivo. Se observa que luego de la operación del FA la distorsión se reduce a 4.79%, mejorando el desempeño del filtro pasivo

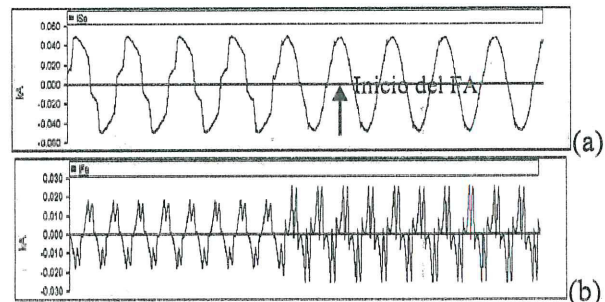


Fig. 17 Efecto de la variación de los valores de los componentes del filtro pasivo (a) Corriente i_{sa} en el sistema de potencia (b) Corriente i_{Fa} del filtro híbrido.

EFEECTO DE LA VARIACIÓN DE LA POTENCIA DE CORTO CIRCUITO DEL SISTEMA

Como se mostró anteriormente, una impedancia de cortocircuito del sistema muy pequeña dificulta el buen desempeño del filtro pasivo sin embargo, es recomendable para una buena regulación de la tensión. En la Fig.18 se muestra la corriente de la fuente cuando la impedancia de cortocircuito del sistema de potencia se reduce y en consecuencia con la reducción de la capacidad de filtrado del filtro pasivo. La corriente de la fuente presenta una distorsión armónica de 21.77% valor, que luego de la entrada en operación del FA se reduce a 5.26% como se muestra en la Fig.18(a).

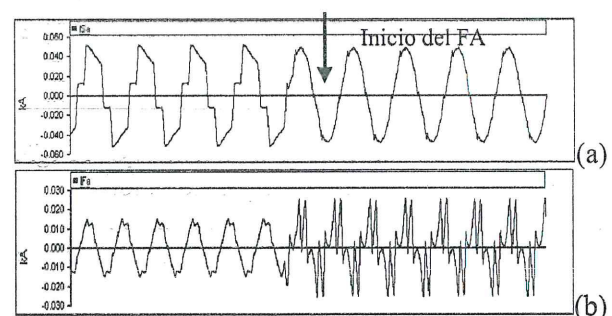


Fig. 18 Efecto del aumento de la potencia de cortocircuito o equivalentemente a una disminución de la impedancia de cortocircuito pasivo (a) Corriente i_{sa} en el sistema de potencia (b) Corriente i_{Fa} del filtro híbrido.

CONCLUSIONES

De los resultados de simulación se confirman cómo el desempeño del filtro pasivo se mejora ampliamente cuando es agregada una unidad activa o filtro activo. Las conclusiones respecto a la topología del filtro híbrido de potencia son las siguientes:

- Las características del filtro híbrido son independientes de la impedancia de la fuente de alimentación.
- Los efectos de los armónicos de la fuente y de la carga quedan aislados.
- Las resonancias serie o paralelo entre la impedancia de la fuente y del filtro pasivo son amortiguadas por la unidad activa del filtro híbrido.
- La potencia requerida para el filtro activo en la topología de filtro híbrido es mucho menor que la necesaria para un único filtro activo equivalente paralelo convencional.
- La potencia de la unidad activa está en relación inversa al factor de calidad del filtro pasivo.
- Con este esquema se puede mejorar significativamente el desempeño de los filtros pasivos existentes en la industria, mediante la conexión de un filtro activo en serie, eliminando los problemas por el uso de filtros pasivos únicamente.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue financiado con los fondos del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

REFERENCIAS

1. **Das, J. C.**, "Passive Filters – Potentialities and Limitations". IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 40, No. 1, pp. 232-241, January/February 2004, EEUU.
2. **Fang Zheng, H. A., Nabae, A.** "A New Approach to Harmonic Compensation in Power System-Acombined System of Shunt Passive and Series Active Filters". IEEE Transaction on Industry Applications; Vol. 26. No. 6, November/December 1990; pp. 983-990, EEUU.
3. **Fujita, H., Akagi, H.**, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-Series Connection of Passive and Active Filters". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 27 N°6, November/December 1991, pp. 1020 -1025, EEUU.
4. **Rivas, D., Moran, L., Dixon, J., Espinoza, J.**, "A Simple Control Scheme for Hybrid Active Power". IEE Proceedings Online N° 20020213, Publicación 27 de Mayo del 2002. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol.149.N° 4, July 2002, pp. 485-490, EEUU.
5. **Afonso, J., Couto, C., Martins, J.**, "Active Filters with Control Based on p-q Theory". IEEE Industrial Electronic Society News letter September 2000, pp. 5-11, EEUU.
6. **Zheng Peng, F.**, "Application Issues of Active Power Filters". IEEE Industry Applications Magazine September/October 1998. Pp. 21-30, EEUU.
7. **Zheng Peng, F., Jih-Sheng, L.**, "Application Considerations and compensation Characteristics of Shunt Active and Series Active Filters in Power Systems". Proceedings 7^{ma} Int. Conference on Harmonics and Quality of Power. Las Vegas Nevada, 1996. pp. 12-20, EEUU.
8. **Akagi, H., Nabae, A.**, "The pq Theory in Three-Phase Systems under Non-sinusoidal Conditions." ETEP Vol.3 N°1 January/February 1993, pp. 27-31, EEUU.
9. **Zheng Peng, F., Akagi, H., Nabae, A.**, "Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.29. N°1. January/February 1993, pp. 144-152, EEUU.
10. **Rivas, D., Moran, L., Dixon, J., Espinoza, J. R.**, "Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques". IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 50. N° 1. February 2003, pp. 161-170, EEUU.
11. **Software de Simulación PSCAD, V4.1.** Manitota, 2003, Canadá.
12. **Bhim Sing, Kamal Al-Haddad, Ambrish, Ch.**, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement" IEEE Transactions on

- Industrial Electronics, Vol.46 N^o5 October 1999, pp.960-971, EEUU.
13. **Núñez Z, T., Soto Lock, A., Ramos C, J., Moreno M, R.**, “Diseño y Simulación de un Filtro Híbrido de Potencia”. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Diciembre 2005. Lima-Perú.
 14. **IEEE Std 519-1992** “IEEE practicas recomendadas y requerimientos para control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia”, pp.1, 1992, EEUU.
 15. **Wakileh, G. J.**, “Power System Harmonics, Fundamentals, Analysis and Filter Deign”. Ed. Springer, 2001, ISBN 3-540-42238-2, pp. 81-90, Alemania.

Correspondencia: nunezuniga@yahoo.es

Recepción de originales: agosto 2007

Aceptación de originales: octubre 2007