

# Filtro Híbrido de Potencia

## Hybrid Power Filter

Teresa Núñez-Zúñiga<sup>1</sup>, Rodolfo Moreno-Martínez<sup>2</sup>, Jorge Ramos-Carrión<sup>2,3</sup> y Alberto Soto-Loc<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú

**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 (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.

**Abstract**— In this paper we show the simulation results obtained from a study of power electronic system, which significantly improves the performance of the conventional three-phase passive filter normally used for power factor compensation of nonlinear loads. This improvement is achieved by connecting a three phase active filter (AF) (or active unit) in series with a passive filter (PF) through three coupling transformers and controlling the active filter in such a way that forces the harmonic components generated by the rectifier to pass through the passive filter. In this topology, which combines a passive filter with an active filter is called Hybrid Power Filter.

**Palabras Clave**— armónicos, filtros pasivos, filtros activos, teoría de la potencia instantánea.

**Key Words**— harmonics, passive filters, active filters, the instantaneous power theory.

### I. 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 [1]. (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 Híbrido de Potencia) son una forma de superar estos problemas, tecnologías que en estos últimos años han venido desarrollando, generándose nuevas y distintas estructuras [2], [3], [4], [5].

Los filtros pasivos, compuestos por elementos L y C en serie y sintonizado y/o 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 [6]. Sin embargo los filtros pasivos presentan las siguientes desventajas:

- La característica del filtrado está afectada por la impedancia de la fuente, 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 fuente.
- Un filtro pasivo puede caer en resonancia serie con la fuente de alimentación, de tal forma que la distorsión de tensión produce una excesiva corrientes armónicas 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 que pueden ser controlados por tensión o por corriente, realizarán las siguientes funciones [1]:

- Reducción de armónicos de corriente que circulen por la red, restringiendo su circulación entre el FA y los centros de generación.
- Reducción de la corriente por neutro.
- Reducción de los armónicos de tensión en los puntos de conexión de las cargas.
- Corrección del factor de potencia.

<sup>1</sup>Teresa Núñez-Zúñiga, e-mail: tnunez@unmsm.edu.pe

<sup>2</sup>Rodolfo Moreno Martínez, e-mail: rmorenom@uni.edu.pe

<sup>3</sup>Jorge Ramos-Carrión, e-mail: jramosc@uni.edu.pe

<sup>4</sup>Alberto Soto-Loc, e-mail: asoto@uni.edu.pe

Recepción: Febrero de 2009 / Abril de 2009



- Equilibrar las corrientes que circulan por las diferentes fases.
- Equilibrar las tensiones entre fase y neutro.
- Regulación de la tensión.
- Reducción del flicker.

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 tecnología para los filtros, la cual 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 de potencia [6], [2]), mientras que las características de compensación de los filtros pasivos existentes podrían mejorarse significativamente, como se verá más adelante, al conectárseles con un filtro activo de potencia dándole una mayor flexibilidad a la compensación.

## II. FILTROS PASIVOS

En la Fig.1, se presenta el esquema de una instalación industrial en la que se muestra un rectificador controlado a tiristores conectado a la red mediante un transformador y con 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 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  $\alpha$  (de encendido) y del ángulo  $\mu$  (de conmutación) de los tiristores este último a su vez depende de la reactancia  $L_c$  acumulada desde la fuente AC de alimentación hasta los terminales de entrada del rectificador.

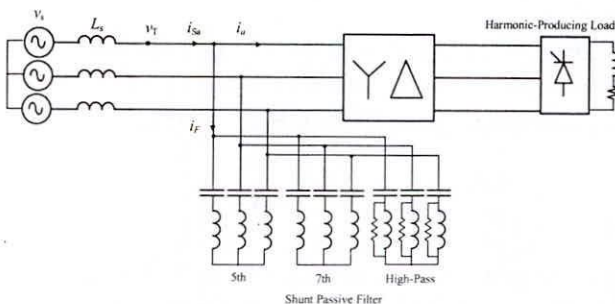


Fig. 1. Carga no lineal y filtro pasivo.

Para la compensación del factor de potencia del sistema, es necesario hacer la compensación del factor de desplazamiento y del factor de distorsión armónica total de la corriente [7].

Para la compensación del factor de desplazamiento, que en el fondo significa compensar la componente reactiva fundamental absorbida por el rectificador en su operación, se necesita de un banco de condensadores cuya potencia reactiva está determinada por (1), que establece el máximo valor para el factor de desplazamiento que se quiere lograr.

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

$Q_c$  potencia reactiva suministrada por el banco de condensadores

$P$  potencia activa consumida por la carga

$\phi_1$  ángulo del factor de desplazamiento original

$\phi_2$  ángulo 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 en este caso, la carga generadora de armónicos de tipo corriente es el rectificador controlado de seis pulsos, este convertidor presenta un espectro armónico conocido, cuyo orden de cada componente esta determinada por (3):

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

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 subdivide en diferentes subbancos de condensadores y conectando en serie con cada subbanco un reactor y sintonizado cada conjunto (filtro) a



una determinada frecuencia armónica generada por el rectificador, como se muestra en la Fig. 1. 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 [7], en la que se establece los límites 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 el PCC (punto de acoplamiento común) que en este caso se considera en la barra de 10 kV, corresponde a 3 kA y 35 A, respectivamente, de estos valores se determina el factor

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

con el que se encontrarán los límites en la amplitud de las componentes armónicas así como de la distorsión total de corriente recomendada por IEEE 519.

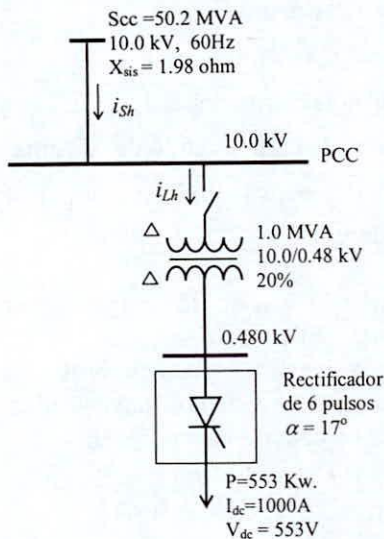


Fig. 2. Diagrama unifilar del sistema de rectificación sin compensación reactiva.

Si el ángulo  $\alpha$  de encendido de los tiristores es de  $17^\circ$  y el ángulo de conmutación  $\mu$  es de  $24^\circ$ , cuando el rectificador es operado sin el sistema de compensación los resultados se muestran en la tabla I:

TABLA I  
DISTORSIÓN TOTAL DE CORRIENTE Y AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS.

h		5	7	11	TDD (%)	PF
IEEE 519 Límites (%)		10.0	10.0	4.5	12.0	
Sin banco de Condensad.	$I_{Sh}$ (A)	6.778	4.158	1.82		
	$I_{Sh}/I_{S1}$ (%)	18.16	11.14	4.88	22.14	0.85

De los resultados mostrados en la Tabla I, se concluye que tanto la distorsión total de corriente así como la amplitud relativa de los armónicos son mayores que la sugerida 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 el sistema de compensación conectado en el PCC a ser calculado. El factor de desplazamiento del rectificador correspondiente a las condiciones de operación de la carga es:

$$\cos \phi_1 = 0.855$$

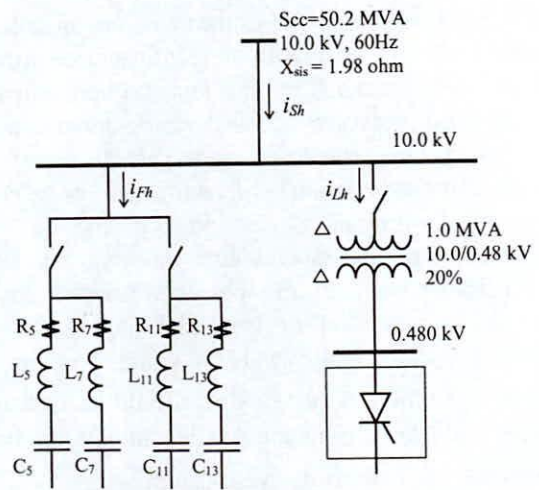


Fig. 3. Carga no lineal y filtro pasivo.

Mediante la (1) se establece la potencia del banco trifásico de condensadores que aumentará el factor de desplazamiento 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 dado por (2):

$$h_r = 18.0$$



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

TABLA II  
RESULTADO DE LA RESISTENCIAS DEL FILTRO PASIVO

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 III  
RESULTADO DEL BANCO CONDENSADORES E INDUCTANCIAS DEL FILTRO PASIVO

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 como:

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

Mediante este procedimiento, se determina el sistema de compensación del factor de potencia para el caso de generación de armónicos de corriente por la carga, que lleva a la colocación de filtros sintonizados para los armónicos generados y cuyo desempeño será afectado por factores que ya fueron mencionados y que serán mostrados en la simulación.

Esto lleva a proponer otra solución, utilizando una combinación de un filtro pasivo con un filtro activo trifásico que se detallará a continuación.

### III. FILTRO HÍBRIDO

En la Fig. 4 se muestra la estructura de un Filtro Híbrido cuya configuración [2], [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. El filtro activo serie, en este caso, actúa como un aislador de armónicos de la fuente AC y de 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. Con esta estructura los armónicos presentes en la fuente AC no aparecerán en

los terminales de la carga, ni los armónicos generados por la carga podrán fluir por la fuente AC.

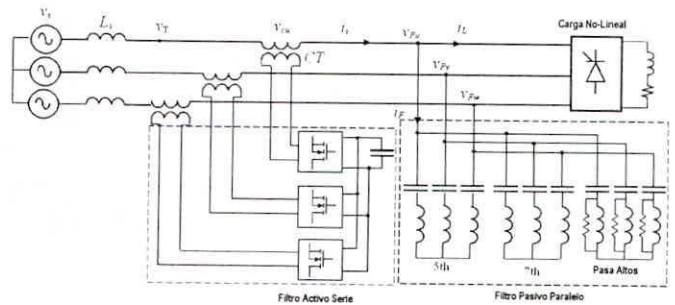


Fig. 4 Estructura de filtro híbrido.

En la Fig. 5 se muestra una nueva propuesta de estructura para el filtro híbrido [6], 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.

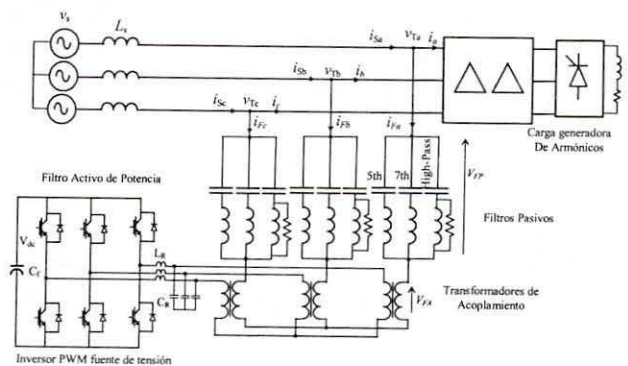


Fig. 5. Configuración del filtro híbrido de potencia.

Esta topología busca, de la misma forma que la anterior, mejorar la característica de compensación del filtro pasivo viabilizando el uso de filtros activos para grandes potencias y al mismo tiempo a bajo costo. Con este esquema [11] se mejora significativamente el desempeño de los filtros pasivos ya instalados o existentes en la industria, mediante la conexión de un filtro activo (unidad activa) en serie con los filtros pasivos, añadiéndole mayor flexibilidad a la compensación armónica y eliminando muchos de los problemas presentados por los filtros pasivos.

La unidad activa del filtro híbrido consta de un inversor PWM trifásico tipo fuente de tensión en serie con un filtro pasa bajos, que opera a frecuencia de conmutación constante y que está conectado en serie con el filtro pasivo a través de transformadores de acoplamiento. El principio de operación de esta unidad se basa en que el inversor debe inyectar una tensión de manera de forzar a todas las componentes armónicas de corriente de la carga a pasar por el filtro pasivo y no por la fuente AC.



Asumiendo que el filtro activo es una fuente de tensión ideal controlada  $V$ , y que la carga es una fuente de corriente  $I_L$ , la Fig. 5 se puede representar por la Fig. 6 (a), donde  $Z_S$  es la impedancia de la fuente y  $Z_F$  es la impedancia total del filtro pasivo. Cuando el filtro activo no está funcionando ( $K = 0$ ), la corriente armónica de la carga  $I_{Lh}$  es compensada solo por el filtro pasivo; las características de filtrado dependen de la relación de  $Z_S$  y  $Z_F$ . De la Fig. 6 la corriente armónica  $I_{Sh}$  que pasa por la fuente está dada por la relación:

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} I_{Lh} \quad (4)$$

Si la impedancia de la fuente es pequeña  $|Z_S| \approx 0$ , a menos que el filtro pasivo esté sintonizado a las frecuencias armónicas generadas por la carga ( $|Z_F| \gg |Z_S|$ ), las características deseables de filtrado podrían no obtenerse, además ocurrirán resonancias paralelas entre  $Z_F$  y  $Z_S$  a frecuencias específicas ( $|Z_F + Z_S| \approx 0$ ) causando el fenómeno de amplificación armónica, estableciéndose en consecuencia un flujo mucho mayor de armónicas por la fuente AC que los producidos por la carga.

Cuando el filtro activo es controlado como una fuente de voltaje siguiendo la relación

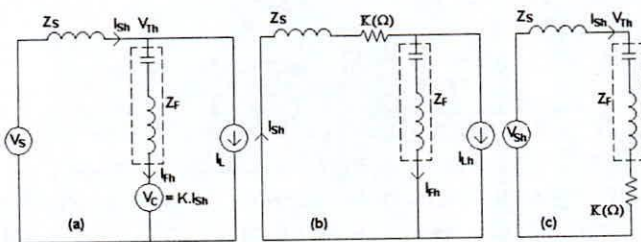


Fig. 6. Muestra un circuito equivalente monofásico del sistema propuesto.

$$V_C = k I_{Sh} \quad (5)$$

forzará a todas las armónicas contenidas en la corriente de carga a fluir por el filtro pasivo de tal manera que ninguna componente pase por la fuente AC. La función del filtro activo es resolver los problemas inherentes al filtro pasivo, cuando son utilizados como único elemento de compensación. En suma, el filtro activo nunca entregará voltaje fundamental, dando como resultado una gran reducción en el valor eficaz de la tensión que el filtro activo deberá generar.

Entre las diferencias entre las estructuras híbridas de las Fig. 4 y 5, se puede mencionar que en la primera

estructura la corriente que pasa por la unidad activa 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 la unidad activa está compuesta por los armónicos de carga y la componente en adelanto fundamental de la corriente por el filtro pasivo. En cuanto a mantener la tensión en el condensador del inversor, resulta más fácil en el caso de la segunda estructura que para la primera estructura, ya que en este caso la componente fundamental de la corriente que fluye a través del filtro activo varía con la variación de la corriente de carga. En relación a la protección del filtro activo en la primera estructura es más difícil aislar y proteger la unidad activa, debido a que se encuentra en serie con la fuente; en la segunda estructura resulta más fácil proteger y aislar la unidad, convirtiendo la segunda estructura en la más aplicable a los sistemas de potencia en alta tensión.

#### A. Características del filtro híbrido

En las referencias [4] y [6] se indica que la característica del filtro híbrido para la corriente armónica de la carga  $I_{Lh}$  (asumiendo que la tensión de la fuente de tensión  $V_S$  es sinusoidal) cuando se hace:

$$K \gg |Z_F|$$

es que  $K$  domina la característica del filtrado, actuando como una resistencia que amortigua la resonancia paralela entre  $Z_S$  y  $Z_F$ .

La característica del filtro ante la presencia de armónicas en la fuente de tensión, asumiendo que no hay carga ( $I_{Lh}=0$ ), hace que el filtro activo se comporte solo como una resistencia  $K$  ( $\Omega$ ), como se muestra en la Fig. 6 (c).

Si  $K \gg |Z_F + Z_S|$ , la tensión  $V_{Sh}$  se aplicaría en los terminales del filtro activo. Esto previene la aparición de corrientes armónicas causadas por  $V_{Sh}$ , sin embargo  $V_{Sh}$  aparecerá en la tensión terminal  $V_T$ .

Asumiendo que  $K=\infty$  se obtienen las siguientes características del filtrado ideal:

$$I_{Sh} = 0 \quad (6)$$

$$V_{Th} = V_{Sh} \quad (7)$$

$$V_C = Z_F I_{Lh} + V_{Sh} \quad (8)$$

Este resultado indica que no existirá corriente armónica por la fuente de alimentación alterna, y que si existe distorsión en la tensión de alimentación esta aparecerá en los terminales de la carga. Finalmente, la



tensión en los terminales del filtro activo es igual a la caída de tensión producida en el filtro pasivo más la tensión de distorsión presente en la alimentación.

**B. Control del filtro híbrido**

El esquema del sistema de control es mostrado en la Fig. 7. Las corrientes  $i_{Sa}$ ,  $i_{Sb}$  y  $i_{Sc}$  que fluyen de la fuente son detectadas y las armónicas  $i_{Sh}$  de estas corrientes son calculadas aplicando la teoría de la potencia instantánea [12]. En este método de cálculo, se utiliza las tensiones  $e_a$ ,  $e_b$  y  $e_c$  que son las componentes fundamentales de las tensiones  $V_{Ta}$ ,  $V_{Tb}$  y  $V_{Tc}$  respectivamente y las corriente  $i_s$  de la fuente (Fig. 5). Con esta información las potencias instantáneas real  $p$  e imaginaria  $q$  son calculadas, a partir de ellas son extraídas las componentes armónicas  $\tilde{p}$  y  $\tilde{q}$  mediante filtros pasa altos, las que luego son transformadas en las componentes armónicas de las corrientes  $i_{Sha}$ ,  $i_{Shb}$  e  $i_{Shc}$ .

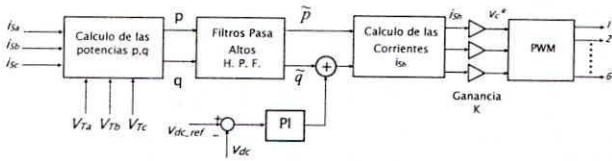


Fig. 7. Esquema de control de la unidad activa (FA) del filtro híbrido.

Finalmente, cada corriente es amplificada por una ganancia  $K$  y posteriormente transformada en la señal de control del modulador PWM. La señal de control será comparada con una onda portadora de tipo triangular con una frecuencia determinada de conmutación  $f_{sw}$ . La salida del modulador es aplicada a cada una de las llaves del inversor del FA.

La unidad activa del filtro híbrido, además de inyectar tensiones armónicas para la compensación, también deberá mantener la tensión constante en el condensador  $C_f$  a través de un lazo de control (Fig. 5 y 7) de manera que no sea necesaria una fuente adicional.

**C. Potencia de la unidad activa (filtro activo) del filtro híbrido**

En este punto es necesario, entonces, estimar la capacidad de potencia, corriente y tensiones del filtro activo (FA) o unidad activa a partir de la función que desempeña. En el esquema de la Fig. 8 o Fig. 5 el FA está compuesto por un inversor de IGBT y un pequeño filtro pasa bajos conectado en los terminales de salida para suprimir los armónicos de alta frecuencia presentes en la forma de onda de tensión PWM.

De las ecuaciones que caracterizan la operación del filtro híbrido, se puede calcular la potencia mínima necesaria del filtro activo. La corriente por el filtro FA está compuesta por la corriente a frecuencia funda-

mental, la cual está adelantada a la tensión AC, absorbida por el filtro pasivo y por las componentes armónicas de la corriente de carga. De esta forma, el cálculo de la potencia  $S_{FA}$  del FA se obtiene de las siguientes ecuaciones:

Corriente por el filtro híbrido:

$$I_{Fa} = \sqrt{I_{F1}^2 + \sum_{h=5,7,\dots} I_{Lh}^2} \tag{9}$$

Tensión en los terminales del filtro activo:

$$V_{FA} = \sqrt{\sum_{h=5,7,\dots} (Z_{Fh} \cdot I_{Lh})^2 + V_{Sh}^2} \tag{10}$$

Potencia aparente del filtro activo:

$$S_{FA} = 3 V_{FA} \cdot I_{Fa} \tag{11}$$

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

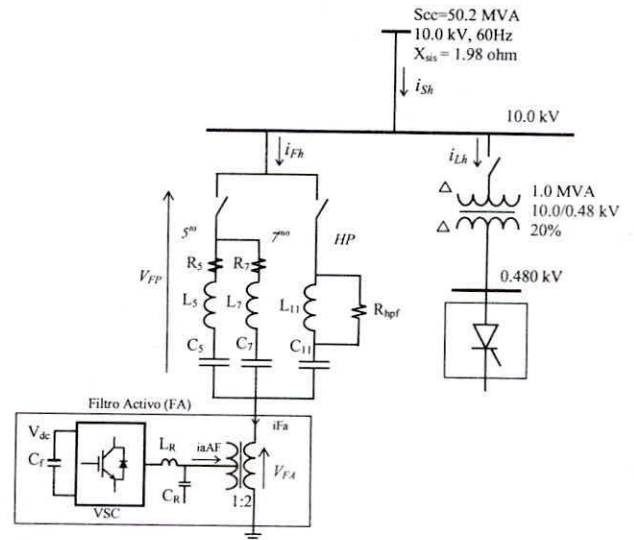


Fig. 8. Esquema unificar de la carga no lineal y filtro híbrido (FP +FA).

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



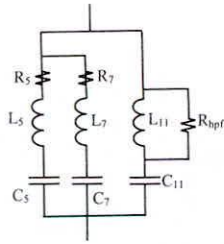


Fig. 9. Filtro Pasivo sintonizado y pasa altos.

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.

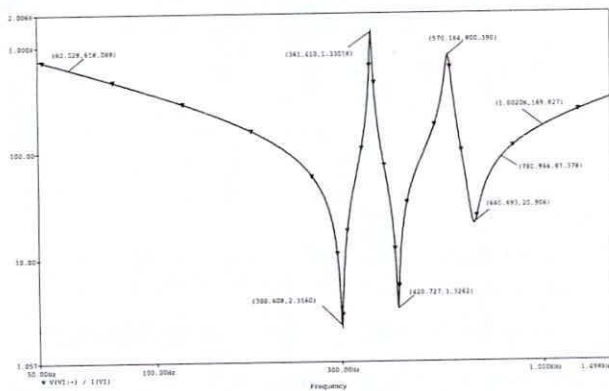


Fig. 10. Respuesta en frecuencia de la impedancia "ZF" presentada por el filtro pasivo.

De los resultados obtenidos solo con el filtro pasivo y usando (9), (10) y (11) se calcula la potencia y se determinan las magnitudes de tensión y corriente de la unidad activa (FA) así como la 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  $I_{FA} = 24.8$  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 produciría, y que en este caso sería 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.

Finalmente, con este valor de tensión de 600 V y con el valor de la corriente por fase del inversor, que debido a la relación del transformador de acoplamiento será  $I_{aFA} = 49.6$  A (r.m.s.), se seleccionan las

llaves semiconductoras de potencia que pueden ser utilizadas y que en este caso podría ser IGBT o MOSFET. La elección entre las dos tecnologías dependerá de la frecuencia de conmutación  $f_{sw}$  con la que operará el modulador y las pérdidas del inversor. En este caso se usará una frecuencia de conmutación de 18 KHz. porque permitirá reducir las dimensiones del filtro pasa bajos ( $L_R$ ,  $C_R$ ) que se coloca a la salida del inversor.

#### IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

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

##### A. 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<sup>to</sup> armónico:  
 $C_5 = 2.387\mu\text{F}$ ,  $L_5 = 117.8\text{mH}$ ,  $R_5 = 2.22\text{ohm}$ ,  $Q = 50$
- Filtro resonante para el 7<sup>mo</sup> armónico:  
 $C_7 = 1.193\mu\text{F}$ ,  $L_7 = 120.3\text{mH}$ ,  $R_7 = 3.17\text{ohm}$ ,  $Q = 50$
- Filtro pasa altos a partir del armónico de orden 11:  
 $C_{11} = 0.5835\mu\text{F}$ ,  $L_{11} = 99.63\text{mH}$ ,  $R_{hpF} = 10064\text{ohm}$ ,  $Q = 50$

###### Filtro activo (FA)

- Potencia del filtro activo = 6 Kvar
- Inversor trifásico compuesto por seis IGBT de 1200 V y 200A c/u
- Tensión del DC link:  $V_{dc} = 600$  V
- Condensador del circuito del DC link:  $C_f = 1000$  uF, 1000V
- Frecuencia de conmutación:  $f_{sw} = 18\text{kHz}$
- Filtro pasa bajos:  $C_R = 0.33$  uF,  $L_R = 1\text{mH}$ ,
- Transformador de acoplamiento de 10 Kvar y relación 1:2
- Control PI de tensión Vdc,  $K_p = 1$ ,  $\tau_i = 0.01$  (s)

###### Carga

- Rectificador trifásico controlado de seis pulsos (a tiristores)
- Corriente de carga  $I_{dc} = 1000$  A (DC), tensión media de salida del rectificador  $E_{dc} = 553$  V (DC)
- Ángulo 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,  $X_{dis} = 0.2$  (p.u.), conexión delta-delta



Red de alimentación

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

B. 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  $THDi=7.0\%$  y un factor de potencia de 0.93. En la Fig.11 (b) se muestra la corriente de absorbida por la carga y en la Fig. 11(c) se muestra la corriente que pasa por el filtro pasivo y su valor eficaz.

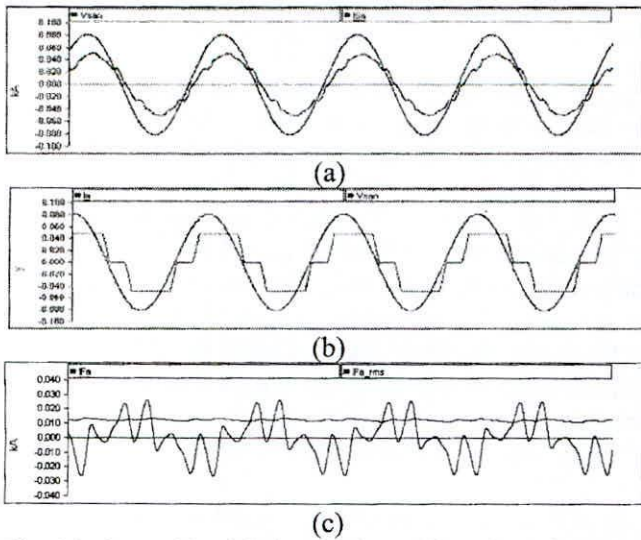


Fig. 11. Operación del sistema de rectificación solo con el pasivo. (a) Tensión y corriente de la fuente isa. (b) Corriente absorbida por el rectificador is. (c) Corriente por el filtro pasivo iFa y su valor eficaz.

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

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 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.

En otras palabras la impedancia vista por los armónicos de corriente de la carga es cero.

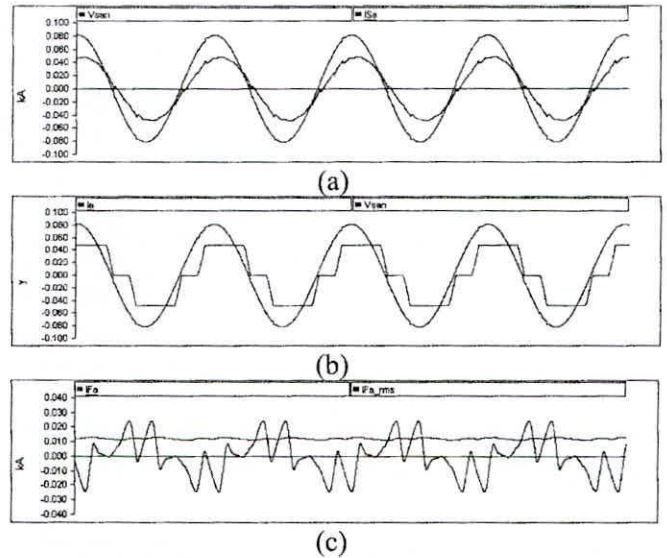


Fig. 12. Operación del filtro híbrido con la actuación del FA. (a) Tensión y corriente de la fuente isa (b) Corriente de carga en primario del transformador de potencia ia (c) Corriente por el filtro pasivo iFa y su valor eficaz.

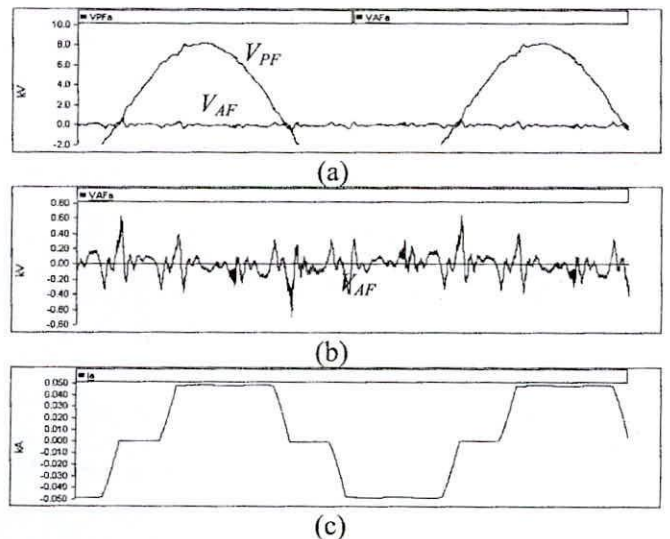


Fig. 13. Operación del filtro híbrido con la actuación del FA. (a) Tensión por fase del filtro pasivo VPF y del filtro activo VAF (b) Ampliación de la tensión inyectada por del filtro activo (c) Corriente de la carga no lineal.

En la Fig. 14 se muestra la tensión  $V_{dc}$  del 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 proceso transitorio inicial de carga.



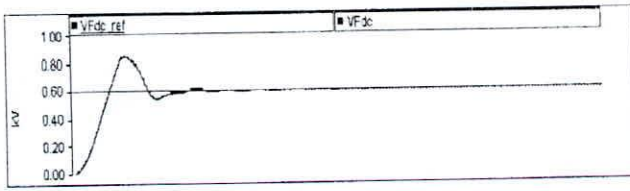


Fig. 14. Tensión en los terminales del condensador  $V_{dc}$  del inversor del FA.

En la Fig. 15 se muestra la corriente de alimentación  $i_s$  cuando sólo 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 3.4% mejorando el desempeño de la compensación del filtro pasivo a pesar de usar un factor de calidad menor.

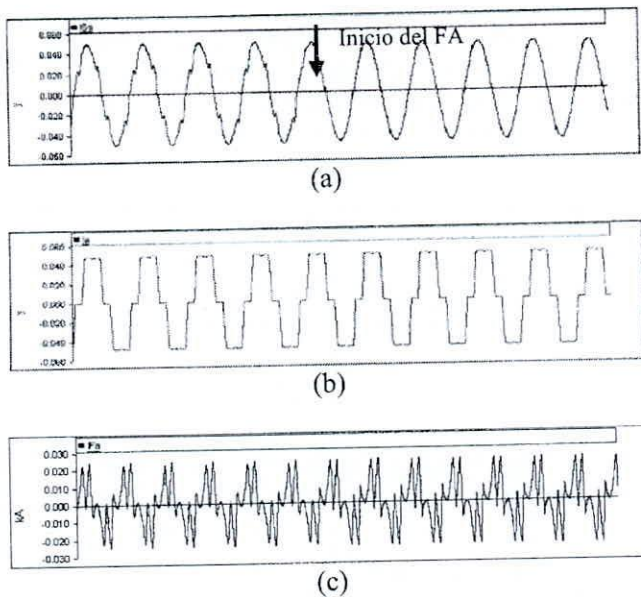


Fig. 15. Operación de filtro híbrido con filtro pasivo de factor de calidad  $Q = 50$  (a) Corriente  $i_{sA}$  en el sistema de potencia (b) Corriente de carga  $i_a$  en el primario del transformador (c) Corriente  $i_{Fa}$  del filtro híbrido.

1) Efecto 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<sup>to</sup> armónico con amplitud igual al 1% de la amplitud de la tensión fundamental, esta 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 que FA (unidad activa) del filtro híbrido comienza a funcionar, se reduce a 3.26%. Como el filtro pasivo tiene una rama sintonizada para atrapar el 5<sup>to</sup> 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 5<sup>to</sup> armónico, pero que con la operación del FA, este efecto queda amortiguado como se muestra en la Fig.16(a).

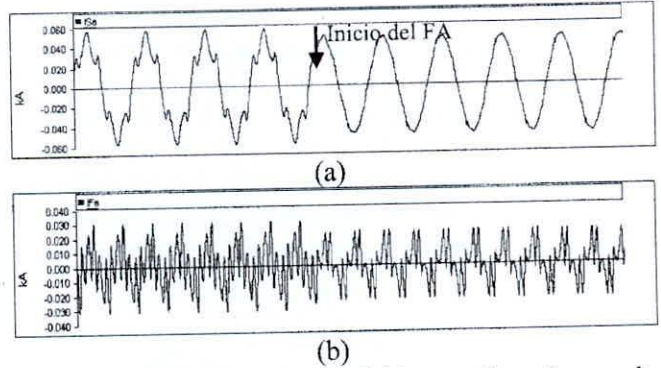


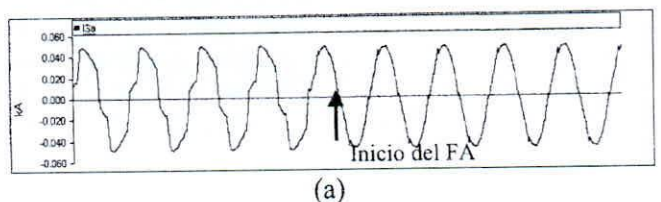
Fig. 16. Operación de filtro híbrido considerando que la tensión de alimentación presenta distorsión. (a) Corriente  $i_{sA}$  en el sistema de potencia. (b) Corriente  $i_{Fa}$  del filtro híbrido.

En la Fig. 16(b) se observa que, antes de la operación de la unidad activa (FA) en el filtro híbrido, existe una corriente de sobrecarga 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 ya que la influencia de los armónicos que están presentes en la tensión de alimentación sus efectos son aislados de la carga.

2) Efecto de la pérdida de sintonización de los filtros pasivos del filtro híbrido

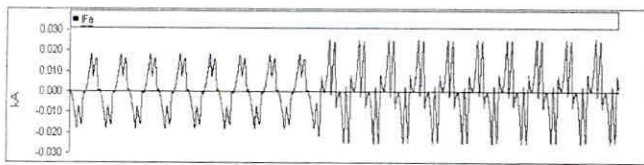
Si los valores originales de los condensadores son incrementados en 5% y de los reactores son incrementados en 2%, se logra que las frecuencias de resonancia de los filtros, sufran variaciones del 3%, 2% y 6.7% respecto a las frecuencias de resonancia original de cada filtro para el 5<sup>to</sup>, 7<sup>mo</sup> y 11<sup>avo</sup> 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 presenta la corriente de la fuente con la distorsión del 15.9% producida por la variación de los valores del filtro pasivo, para simular la pérdida de sintonía. Se observa que, luego de la operación del FA (unidad activa del filtro híbrido), la distorsión se reduce a 4.79%, mejorando el desempeño del filtro pasivo.



(a)





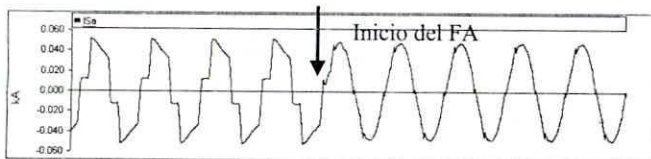
(b)

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.

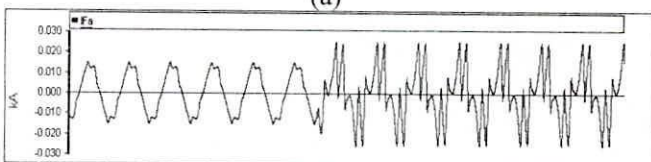
### 3) Efecto de la variación de la potencia de corto circuito del sistema

Como se mostró anteriormente, una impedancia de cortocircuito del sistema muy pequeña dificulta el buen desempeño del filtro pasivo pero 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, con la consecuencia de que el filtro pasivo reduce su capacidad de filtrado.

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).



(a)



(b)

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.

## V. CONCLUSIONES

De los resultados de simulación, se confirma cómo el desempeño del filtro pasivo 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.
- La resonancia serie o paralelo entre la impedancia de la fuente y del filtro pasivo son

amortiguadas por la unidad activa del filtro híbrido.

- La potencia del 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.
- Los filtros pasivos ya existentes en la industria podrían ser adaptados a la topología de filtro híbrido de potencia propuesta, beneficiando tanto al usuario como al suministrador de la energía.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue financiado con los fondos del Instituto de Investigación de la FIEE-UNI.

## REFERENCIAS

- [1] Bhim Sing, Kamal Al-Haddad y Ambrish Chandra "A review of active filters for power quality improvement". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46 N° 5 October 1999.
- [2] D Rivas, L Moran, J. Dixon and J. Espinoza. "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.
- [3] Joao Afonso, Carlos Couto y Julio Martins. "Active filters with control based on p-q Theory". IEEE Industrial Electronic Society News letter September 2000.
- [4] Fang Zheng Peng. "Application issues of active power filters". IEEE Industry Applications Magazine September/October 1998. pp 21-30.
- [5] F. Z. Peng, y Jih-Sheng Lai, "Application Considerations and compensation characteristics of shunt active and series active filters in power systems" Proceedings 7<sup>ma</sup> Int. Conference Harmonics and Quality of Power. Las Vegas Nevada, 1996. pp 12-20.
- [6] Hideaki Fujita and Hirofumi Akagi. "A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters". Transactions on Industry Applications. Vol. 27 N° 6, November/December 1991, pp. 1020-1025.
- [7] IEEE Std 519-1992 "IEEE prácticas recomendadas y requerimientos para control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia".



- [8] J.C. Das, "Passive filters-potentialities and Limitations". IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 40, N° 1, pp. 232-241, January/February 2004.
- [9] Fang Zheng, Hirofumi Akagi and Akira Nabae. "A new approach to harmonic compensation in power system-a combined system of shunt passive and series active filters". IEEE Transaction on Industry Applications; Vol. 26. N° 6, November/December 1990; page 983-990.
- [10] Fang Zheng Peng, Hirofumi Akagi and Akira Nabae. "Compensacion characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29. N° 1. January/February 1993.
- [11] Darwing Rivas, Luis Moran, Juan Dixon and José R. Espinoza. "Improving passive filter compensation performance with active techniques". IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 50. N° 1. February 2003.
- [12] H Akagi, A. Nabae "The pq theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions." ETEP Vol. 3 N°1 January/ February 1993, pp, 27-31.
- [13] Software de Simulación PSCAD V4.1. Manitota Canadá.