

**SHUNT ACTIVE POWER FILTER: ANALYSIS AND DESIGN****FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN PARALELO: ANALISIS Y DISEÑO**

**MSc. Pedro Fabian Cárdenas\*, MSc. Fabian Jimenez\*\*  
MSc. César Augusto Peña Cortes\*\*\***

\* **Universidad Nacional de Colombia**, Bogotá.  
Cra. 30 No. 45-03, Edificio 453; E-mail: pfcardenash@unal.edu.co.  
\*\* **Universidad Santo Tomas**, Tunja.  
Tel: 057-7440404-Ext. 1050; E-mail: fjimenez@ustatunja.edu.co.  
\*\*\* **Universidad de Pamplona**, Pamplona.  
Ciudadela Universitaria, E-mail: cesarapc@unipamplona.edu.co.

**Abstract:** The power active filters have been a viable alternative for controlling harmonic levels in industrial and commercial applications. This paper presents a brief operation analysis discusses the detailed study of the Shunt Active Power Filter structure (APF). The analysis of some definition of power and currents, it needs to filter operation. In order to validate and discuss the details and the criterion design of an APF, it was made simulations using the proposed.

**Resumen:** Los Filtros activos de potencia han sido una alternativa viable para el control de nivel de armónicos en aplicaciones industriales y comerciales. Se realiza un breve análisis de la operación y las partes más importantes de un Filtro Activo Paralelo (FAP). Para discutir y validar los detalles y los aspectos relacionados con el diseño de un (FAP), se presentan simulaciones del modelo diseñado.

**Keywords:** Active Power Filter, Harmonics, Active Compensation.

**1. INTRODUCCION**

Este documento proporciona inicialmente la descripción de un Filtro Activo de Potencia (FAP) en configuración paralela, utilizado para reducir los componentes armónicos en las cargas del sistema de potencia trifásico seguido por el diseño y la simulación de un modelo del filtro.

Los armónicos de corriente son originados por la existencia de cargas no lineales conectadas en el sistema de potencia (Christopher y McGranaghan. 1992). Se dice que una carga es lineal cuando existe una relación lineal entre la tensión y corriente, es decir una carga lineal absorbe una corriente sinusoidal cuando se alimenta con una

tensión sinusoidal, aun presentado un desfase de  $j$  grados respecto a la tensión. Cuando esta relación no se cumple, se habla de una carga no lineal. Ésta absorbe una corriente no sinusoidal que va acompañada de corrientes armónicas, a pesar de estar alimentada por una tensión puramente sinusoidal. En (Collombet *et. al*, 2003) se presentan diferentes tipos de cargas y posibles soluciones para la reducción de armónicos en sistemas de potencia. En (Bettega y Fiorina 2003) se describen los problemas en cargas activas y la utilización de compensadores activos.

En la Fig. 1. se muestra el principio de operación de un filtro activo paralelo. Un FAP puede verse simplemente como una fuente de corriente o

tensión controlable, que se conecta directamente o a través de un transformador al sistema de potencia. FAP se basa en un control de lazo cerrado de un convertidor electrónico de potencia (Inversor), que inyecta en el sistema una corriente o tensión lo más fiel posible a una referencia dada. Esta corriente o tensión mantiene activamente la corriente que circula por la fuente libre de armónicos (Akagi 1995).

Hoy en día es posible realizar un dispositivo que cumpla con la acción de inyectar corriente o tensión en un sistema de potencia, éste se logra gracias a la electrónica de potencia y los sistemas de control automático. Con la utilización de convertidores en diferentes configuraciones y formas de operación, se pueden obtener dichas acciones.

En general existen dos tipos de convertidores operando en modo inversor, inversor por fuente de corriente (CSI - *Current Source Inverter*) o inversor fuente de tensión (VSI - *Voltage Source Inverter*), con estos dispositivos es posible inyectar armónicos de una manera especial (contra fase), logrando que la frecuencia de la señal de corriente que suministra la fuente de alimentación sea única.

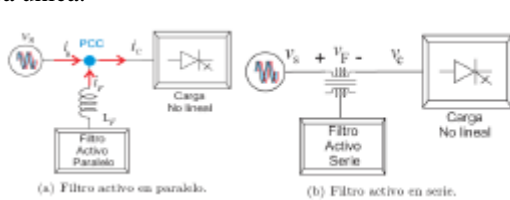


Fig. 1 Filtro activo paralelo, principio de operación

Con la inserción de un FAP en un sistema de potencia y un control adecuado es posible compensar la energía reactiva de la carga (Rossetto 1992), al igual que el desbalance de corriente entre fases (Akagi 1995; Akagi 1996), también presenta una rápida respuesta dinámica, que logra compensar perturbaciones transitorias y no periódicas, por último presenta un amplio ancho de banda de compensación de las corrientes armónicas.

Los FAPs en paralelo representan un campo de aplicación extremadamente exigente para los convertidores de modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM - Sinusoidal Pulse Wide Modulation). Independientemente de lo que suceda en los variadores de velocidad ajustable o en las aplicaciones de rectificadores por PWM, el control de corriente de los FAP se requiere para generar

una forma de onda de corriente que sea caracterizada por un contenido armónico que compense la corriente distorsionada generada por las cargas no lineales (Mohan, 2003).

## 2. ANÁLISIS Y OPERACIÓN

### 2.1 Principio de Operación de un FAP

Los desarrollos en la teoría e implementación de los FAPs han propuesto un gran número de topologías. Dentro de cada topología existen características requeridas en cuanto a componentes, aplicaciones y estrategias de control, por lo cual es importante saber seleccionar el filtro apropiado para asegurar que los efectos de las cargas contaminantes sean totalmente compensados.

El objetivo principal del filtro activo paralelo es lograr que la corriente de la fuente  $i_s$  se mantenga lo más parecida a una onda sinusoidal. El filtro activo paralelo instantáneamente inyecta una corriente ( $i_s$ ) cuya componente armónica es de la misma amplitud que la de la carga pero en oposición de fase, entonces la suma algebraica en el punto (PCC) ( $i_{carga} = i_s + i_f$ ) garantiza que la corriente entregada por la fuente sea una señal sinusoidal pura (Malesani *et al.* 1986).

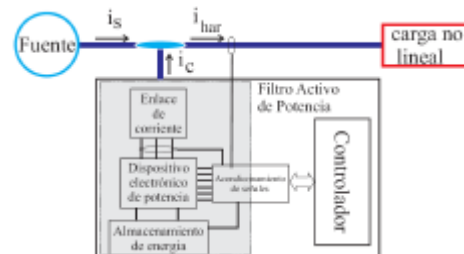


Fig. 2 Estructura básica de un FAP

### 2.2 Estructura Básica del FAP

En la Fig. 2. se observa un filtro activo de potencia en paralelo genérico, utilizado para la compensación o eliminación de las corrientes no activas que circulan por la fuente. El filtro está conformado por cinco bloques funcionales: El convertidor de potencia, el enlace de corriente entre el convertidor y el punto de conexión con la red, el dispositivo de almacenamiento de energía, los dispositivos de acondicionamiento de señales provenientes del sistema de potencia y el controlador. Los cuatro primeros bloques se pueden agrupar en una sola unidad denominada unidad de potencia, mientras que el controlador es un gran bloque encargado de la generación de

referencias, la regulación del voltaje del lado de DC y de corriente inyectada, y por supuesto el seguimiento del convertidor.

### 2.3 Bloque de Potencia

Es el encargado de realizar la inyección de las corrientes de compensación en la red, éste se logra gracias a un adecuado sistema de control que garantice que las corrientes inyectadas realmente sigan las señales aportadas como referencia. Idealmente, el conjunto de convertidor (condensadores, inductancias y dispositivos de conmutación) más controlador de corriente, pueden comportarse como una fuente lineal, capaz de inyectar en todo momento las corrientes de compensación que se le aporten como referencia. Este comportamiento es imposible de ser alcanzado debido a las características no lineales del convertidor, sin embargo en cierto rango de operación el convertidor tendrá un comportamiento lineal.

En lo que se refiere al convertidor hay dos topologías de inversores (CSI y VSI), las cuales han sido ampliamente estudiadas, para el desarrollo de filtros activos, siendo la más utilizada la configuración en VSI, debido a su eficiencia y costos de fabricación (Akagi 1996). Dentro de las topologías de inversores por VSI están: convertidor de tres ramas en puente completo (TLBF - Three-Leg Full-Bridge) o el inversor de tres ramas con condensador repartido (TLSC - Three Leg Split-Capacitor), ver Fig. 3. Entre otros. EL TLSC tiene conectado el neutro de la carga con el punto intermedio del bus de DC (punto  $n$ ) y las tres ramas pueden trabajar de manera independiente, es decir, el voltaje de salida de cada rama depende únicamente del estado de los dos transistores de su rama. Y es el convertidor más utilizado en aplicaciones de filtrado activo de potencia a nivel industrial (Kazmierkowski y Malesani 1998).

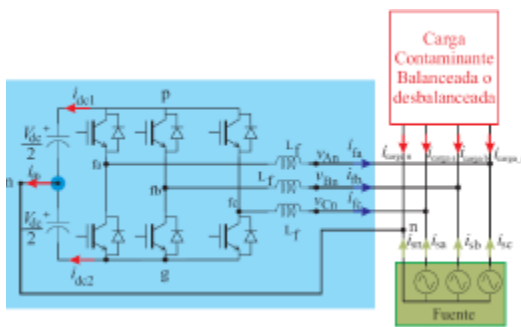


Fig. 3 Convertidor como Inversor VSI con condensador repartido. Conectado en paralelo, con carga y sistema trifásico de 4 hilos

### 2.4 Sistema de control del FAP

El sistema de control de un FAP se encarga de determinar las corrientes de referencia que el FAP debe inyectar en la red. A través de la referencias se debe conseguir la compensación de las corrientes solicitadas por la carga, y el mantenimiento de las condiciones adecuadas de operación del FAP. Normalmente el sistema de control del FAP consta de dos lazos de regulación con funciones claramente diferenciadas (Simona *et al.* 1998).

El lazo interno de control determina que componentes de la corriente debe ser compensada, normalmente se aplica alguna de las teorías de potencia instantánea. Aplicar una teoría de potencia instantánea para lograr una compensación consiste en calcular las diferentes componentes de potencia instantánea demandadas por la carga, separar aquellas componentes que son entregadas por la fuente y las deben ser entregadas por el FAP. Las referencias de corriente de compensación se obtienen mediante la correspondiente transformación, de potencia a corriente, claro está de las componentes previamente separadas (Akagi *et al.* 1984). Adicional al lazo de control principal, es necesario un lazo de control secundario que se encarga de mantener el voltaje absoluto del bus de DC entorno a un valor establecido como referencia. El lazo exterior de control modifica las referencias de corriente de compensación, variando el valor medio de la potencia activa instantánea desarrollada por el FAP, y consiguiendo regular el voltaje absoluto del bus de continua.

En condiciones estacionarias, el flujo de potencia activa en el FAP es constante, pero ante transitorios, ocasionado por variaciones de potencia activa de la carga, el lazo de control interno, tendrá que detectar las nuevas componentes de corriente de la carga que deben ser compensadas por el FAP. Este proceso lleva un cierto tiempo de retardo asociado a la dinámica propia del lazo; implicando que la potencia activa desarrollada por el FAP en ese instante sea errada, dando lugar a una caída en el voltaje de DC del convertidor. Bajo esta situación el lazo de control externo entra en acción para eliminar esta variación en el voltaje de DC. Obtener una expresión analítica para el proceso de compensación explicado anteriormente (dinámica de voltaje de DC) resulta sumamente complicado dado su comportamiento no lineal.

## 2.5 Control de Corriente

El control de corriente del FAP tiene como objetivo conseguir que las corrientes de salida sigan las referencias aportadas a él (ver Fig. 4.). El control de la corriente de inyección de un FAP se puede plantear de forma no lineal, o realizar una aproximación. Dado que los semiconductores de potencia operan a muy alta frecuencia en comparación con las señales aportadas como referencia, es posible realizar una linealización a baja frecuencia. Independientemente de la técnica de control utilizada y suponiendo que no existe filtro a la salida del FAP, la corriente inyectada en la red tendrá un rizado de alta frecuencia superpuesto a la onda de baja frecuencia aportada como referencia.

Existen dos tendencias de controladores de corriente los lineales y los no lineales. Los controladores lineales normalmente utilizan una modulación PWM (PWM - Pulse Width Modulation) estándar o modificada, en los cuales la señal portadora proveniente de un regulador lineal que se compara con una moduladora triangular en el modulador (Brod y Novotny, 1985), para obtener la variación en los anchos de pulso de las señales de activación de los interruptores del convertidor. En aplicaciones del FAP, el regulador lineal más utilizado es el Proporcional-Integral ((PI) ver Fig. 5a y 5b) o en su defecto el proporcional (P) con prealimentación (ver Fig. 5c y 5d).

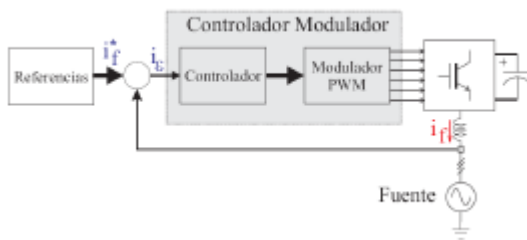


Fig. 4. Esquema Simplificado del Control de Corriente Trifásico en un FAP

En cuanto a los controladores no lineales de corriente, el regulador y el modulador se encuentran integrados, la acción de compensación o señal de control y modulación es propia del esquema de control, dentro de estas técnicas se destacan el control por histéresis de corriente y el control por modos deslizantes (Kawabata, *et al.* 1990; Kawamura y Hoft, 1984; Radulovic y Sabanovic 1994).

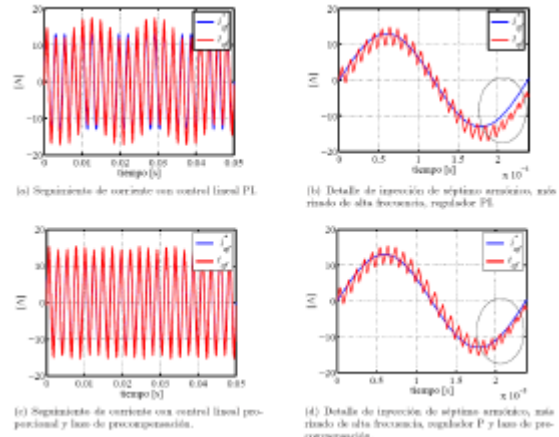


Fig. 5. Referencia de corriente y corriente inyectada, para un séptimo armónico con controlador lineal de corriente

## 3. DISEÑO FAP

El diseñar un FAP como el de la Fig. 2 para cualquier tipo de carga no lineal, resulta ser una labor muy dispendiosa debido a la variedad de cargas contaminantes y a las formas de onda de corriente en exceso complicadas. Para solucionar este inconveniente se desarrollan los siguientes apartados, donde se describen algunas aproximaciones y un método para el diseño de filtros activos de potencia en paralelo.

Un filtro activo tiene una serie de elementos constitutivos que determinan las condiciones de operación y rendimiento del filtro. Las diferentes aproximaciones que se exponen nacen de la facilidad para realizar diseños, reduciendo la complejidad de otro tipo de análisis sin afectar la confiabilidad de la operación final de los dispositivos. El método para diseñar una FAP se puede dividir en:

- Descripción del tipo de carga a compensar.
- Diseño del convertidor.

### 3.1 Carga a compensar

En la Fig. 6 se observa la conexión de la carga no lineal y la fuente de alimentación. Como carga se ha utilizado un rectificador trifásico en puente con carga RL.

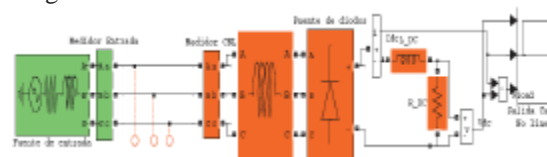


Fig. 6. Sistema de potencia, fuente-carga no lineal. Utilizando PowerSym de Matlab®

Los valores de cada uno de los elementos de la Fig. 6, se resumen en la Tabla I. En la Fig. 7 se observa la corriente fundamental, la corriente de la carga y la corriente no activa.

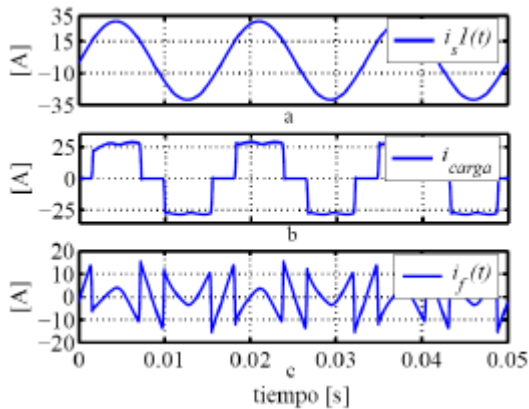


Fig 7. Componentes de corriente. a) Fundamental de la fuente. b) Carga. c) Corriente no activa, que debe ser entregada por el FAP

### 3.2 Diseño del Convertidor

Para dimensionar la cantidad de potencia en VA, se realiza un análisis preliminar de la potencia activa requerida por la carga no lineal, a partir de ésta se determina la magnitud de la componente fundamental de entrada a la carga no lineal. Con dicha amplitud y el ángulo del factor de desplazamiento de la fundamental se realiza el cálculo de la corriente de compensación. Se determina el valor efectivo (rms) de la corriente de compensación gracias a la propiedad de ortogonalidad que existe entre la corriente fundamental y las demás componentes de corriente. De otro lado se determina el voltaje a la entrada del convertidor, por último se determina la potencia “aparente” de entrada al FAP.

Tabla 1: Valores de los elementos de la fuente y la carga no lineal

| Carga no Lineal (Rectificador Trifásico) |               |  |
|--|---------------|--|
| Elemento                                 | Valor         | Descripción  |
| $V_s$                                    | 120 V         | Fuente Trifásica de entrada (rms)                      |
| $L_s$                                    | 76 $\mu$ H    | Inductancia de la fuente                               |
| $R_s$                                    | 39 m $\Omega$ | Resistencia de la red                                  |
| $L_{carga}$                              | 1 mH          | Inductancia entrada rectificador                       |
| $R_{forward}$                            | 1 m $\Omega$  | Resistencia de encendido Rectificador                  |
| $L_{DC}$                                 | 29 mH         | Inductancia del lado de DC                             |
| $R_{DC}$                                 | 10 $\Omega$   | Resistencia de carga de DC                             |
| $P_{out}$                                | 7248 W        | Potencia de salida DC                                  |
| $V_{dc}$                                 | 271.7 V       | Voltaje de salida lado DC                              |
| $I_{dc}$                                 | 26.64 A       | Corriente de salida lado DC                            |
| $\hat{V}_f$                              | 207.8 V       | Voltaje de línea a línea (rms)                         |
| $i_p$                                    | 21.75 A       | Corriente de entrada al rectificador (medidor CNS)     |
| $i_1$                                    | 20.98 A       | Corriente Fundamental DE entrada al rectificador (rms) |
| $\phi_1$                                 | -14.24 grados | ángulo de retraso de la corriente fundamental          |
| S  | 7830 VA       | Potencia aparente a la entrada del rectificador        |

Para el diseño del filtro activo de potencia con convertidor TLSC, se utiliza un modelo simplificado de cada una de las ramas de conmutación. Ver Fig. 8.

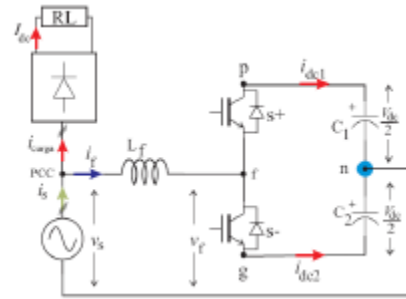


Fig. 8 Una rama del convertidor VSI en topología TLSC

### 3.2 Selección del Voltaje de DC

El voltaje de DC en asocio con la funciones de conmutación del inversor son las variables de control que hacen que la corriente entregada por el FAP siga la referencia. Por consiguiente el voltaje en el lado de DC debe ser mayor al pico de voltaje del lado de AC ( $\hat{v}_f$ ) del FAP. Para la elección del voltaje de DC se asumen las siguientes condiciones de diseño:

- Variación del voltaje de alimentación en un 20 %. Es decir  $V_s = 120 \pm 20\% V$  rms
- Índice de modulación de amplitud  $m_a = 0.8$ .

Para las máximas condiciones de diseño el voltaje de DC se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$V_{dc(FAP)} = \frac{2}{m_a} \hat{v}_f$$

$$V_{dc(FAP)} = \frac{2}{0,8} \sqrt{\frac{2}{3}} (207,8 + 20\%) = 510V_{dc}$$

El voltaje de DC del FAP, debe tener un nivel lo suficientemente alto como para considerar los picos de voltaje en la conmutación. En casos prácticos de diseño el voltaje de DC se selecciona despreciando los efectos debidos a la conmutación, pero precisamente en las conmutaciones es donde se presentan los mayores picos de voltaje. Si el voltaje de DC es menor al nivel de voltaje requerido en los instantes de conmutación, el FAP perderá el control en el seguimiento de la corriente de referencia y éste se repetirá en todos los instantes de conmutación siguientes, originando huecos en la corriente de la fuente. El pico de voltaje depende del valor de la inductancia, si se aumenta su valor, el pico de voltaje, también aumenta. Lo que se convierte en otra restricción en la selección del valor de la inductancia.

### 3.3 Cálculo de la inductancia de enlace (reactor)

La inductancia de enlace o también conocida como reactor, es el elemento que se coloca entre el inversor VSI y la red de suministro, para permitir que el filtro activo inyecte la corriente de compensación al sistema, es decir el intercambio de energía entre la fuente y el FAP. El valor de la inductancia es crítico pues de este depende el desempeño del FAP, en lo que se refiere al seguimiento de las corrientes de referencia y la relación con el valor de la energía almacenada en el condensador del lado de DC. Los criterios para el dimensionamiento de la inductancia son:

- La máxima corriente instantánea entrega por el filtro: Para una carga específica ver Tabla 1, y según la Fig. 7 la máxima corriente suministrada por el filtro es  $i_f = 17.6$  A
- La pendiente de la onda de corriente: que circula por la inductancia debe ser menor o igual a la pendiente de la onda moduladora, para el caso de un controlador lineal; la pendiente de la onda triangular resulta:  $\lambda = 4V_r f_i$ . Donde  $V_r$  es el valor pico de la rampa,  $f_i$  es la frecuencia de la moduladora triangular.
- Filtro para la corriente de salida del FAP. Debido al control por PWM la corriente de salida del FAP contiene rizado de alta frecuencia, el cual es necesario eliminarlo. Sí se selecciona una inductancia muy grande (por ejemplo: 10 mH) de forma que se elimine el rizado de alta frecuencia, el seguimiento de las corrientes de referencia se ve afectado, pues el voltaje pico en el terminal  $f$  de la Fig. 8 debe ser muy elevado, implicando que el voltaje del lado de DC sea mucho mayor, para forzar los cambios de corriente en la inductancia; con lo que se desmejora la respuesta dinámica del sistema.
- Voltaje en la inductancia. El voltaje de caída en los terminales del reactor debe ser lo menor posible, como condición de diseño se recomienda que este valor para la componente fundamental no sea mayor a un 2% del voltaje rms de fase.

Se asume que el inversor por VSI está operando en lazo cerrado y sin carga, se desprecia las pérdidas y el rizado de alta frecuencia en la inductancia y se toma como parámetro de diseño el pico del rizado de corriente por tanto el valor de la inductancia está dado por la siguiente ecuación:

$$L_f = \frac{V_{ll}}{6\sqrt{2} f_s \hat{i}_{\text{rizado}}} \quad L_f = 2,448 \mu\text{H} \approx 2,45 \mu\text{H}$$

Donde  $f_s = 10$  kHz es la frecuencia de conmutación; con un rizado pico  $\hat{i}_{\text{rizado}} = 1$  A, que

corresponde a un 6.5% del pico de corriente que entrega el FAP.

Tabla 2. Componentes FAP

| Descripción                         | Elemento          | Valor                |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Entrada<br>Filtro                   | $L_{in}$          | 750 $\mu\text{H}$    |
|                                     | $R_{in}$          | 100 $\text{m}\Omega$ |
|                                     | $L_h$             | 109 $\mu\text{H}$    |
|                                     | $R_h$             | 8 $\text{m}\Omega$   |
|                                     | $C_h$             | 2,2 $\mu\text{F}$    |
| Inductancia de acople               | $L_f$             | 2,44 $\text{mH}$     |
| Pérdidas de acople                  | $R_f$             | 400 $\text{m}\Omega$ |
| Condensador del lado de DC $V_{p0}$ | $C_{1\text{FAP}}$ | 1100 $\mu\text{F}$   |
| Condensador del lado de DC $V_{s0}$ | $C_{2\text{FAP}}$ | 1100 $\mu\text{F}$   |

### 3.4 Calculo del Condensador de DC

Para dimensionar el condensador de DC del FAP, se toma como variable de diseño el voltaje de rizado sobre el condensador. El factor de rizado se define como la amplitud de las oscilaciones permitidas en el nivel de voltaje de DC; Si la amplitud del rizado en el lado de DC es muy grande se introduce componentes armónicas no deseadas en la corriente de inyección lo que perjudica en últimas la operación del convertidor. Por tanto se selecciona un pico de rizado máximo de 2 V, con lo que se tiene la siguiente expresión:

$$r_{dc} = \frac{\Delta v_{dc}}{V_{dc}} \quad r_{dc} = \frac{2}{510} \approx 0,3\%$$

Un inconveniente en la selección de la amplitud del rizado es el desbalance en el voltaje de DC de cada uno de los condensadores, debido la configuración TLSC. Este desbalance ocasiona circulación de corriente de secuencia homopolar por la red. El cálculo del valor del condensador se hace con base en el pico de corriente que entra al FAP y que a su vez deben soportar los interruptores del convertidor; logrando la expresión:

$$C_{FAP} = \frac{P_{out}}{V_{ll}} \frac{\cos(\varphi_1 - \pi/3)}{\sqrt{6} r_{dc} V_{dc(FAP)} f_i} \quad \text{si } 0 \leq \varphi_1 \leq \cos^{-1} \sqrt{\frac{\pi}{2\sqrt{3}}}$$

$$C_{FAP} = 497,66 \mu\text{F} \approx 500 \mu\text{F}$$

### 3.5 Filtro de Entrada

Adicional a la inductancia de enlace es necesario instalar un filtro de entrada AC para reducir el rizado de corriente de alta frecuencia y la distorsión de voltaje en el punto de conexión común. Para eliminar el rizado de alta frecuencia ocasionado por la conmutación del FAP, se diseña un filtro serie RLC sintonizado a 10 KHz, conectado en paralelo con el FAP.

Tabla 3. Parámetros del Modelo  $LM_{pq}$ 

| Controlador                        | $LM_{pq}$  |        |
|------------------------------------|------------|--------|
| Control corriente de inyección FAP | $K_p$      | 0.23   |
| Control de voltaje lado DC del FAP | $K_p$      | 80     |
|                                    | $K_i$      | 20     |
|                                    | $V_{dc}^*$ | 510 V  |
| FPB                                | orden      | 5      |
|                                    | $f_c$      | 120 Hz |

Debido a la inductancia de entrada  $L_{in}$ , el valor del condensador se escoge de forma que la resonancia con dicha inductancia sea superior al armónico 50 de la frecuencia fundamental. Para lograr una buena atenuación de la componente de corriente de alta frecuencia inyectada por el FAP se ha tomado un factor de atenuación  $k_{ati} = 6.5$  (Bernet *et al.* 2002). El valor de  $L_h$  se obtiene a partir de la frecuencia de conmutación:

$$C_h = \frac{k_{ati}}{4\pi^2 f_s^2 L_{in}} = 2,2 \mu F$$

Para eliminar los huecos en el voltaje del PCC, según el estándar alemán VDE (Association for Electrical, Electronic & Information Technologies) se recomienda instalar una inductancia de entrada entre el punto de conexión y el dispositivo a conectarse, en este caso el FAP. El valor de la inductancia esta dado por:

$$L_{in} = \frac{1 - \delta}{\delta} L_f$$

Se observa que ésta depende de reactor del FAP ( $L_f$ ) (Mohan, 2003). Para un valor  $d=0.23$ , sugerido por el estándar IEEE-519 aplicado a sistemas generales, resulta una inductancia  $L_{in}=750 \mu H$ .

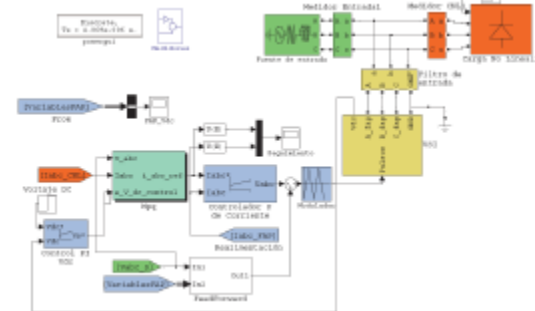
#### 4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

A continuación se presenta un modelo desarrollado de un filtro activo en paralelo para la eliminación de armónicos en sistemas de potencia. Para todas las simulaciones se utilizaron los valores de la fuente-carga no lineal y el FAP establecidos en la Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente.

##### 4.1 FAP con control lineal y cálculo de corrientes $M_{pq}$

El método se ha denominado  $LM_{pq}$ , debido a que se utiliza un controlador lineal para el seguimiento de la corriente de referencia. Y para el cálculo de la corriente de referencia se utilizó la teoría  $p-q$  ( $M_{pq}$ ); Dentro del bloque  $M_{pq}$  se utilizó un filtro pasa bajo para realizar la implementación de un filtro pasa

alto. El bloque  $M_{pq}$  permite calcular las componentes armónicas de la potencia instantánea, las cuales se utilizan para determinar la corriente de compensación. También se incluye un lazo externo de control que mantiene constante el voltaje en el condensador del lado DC del FAP. Los valores asociados a este modelo se pueden observar en la Tabla 3.

Fig. 9 Modelo completo FAP, con control lineal y cálculo de corrientes  $M_{pq}$ . Simulink®

##### 4.2 Descripción de la simulación

La simulación del FAP se realizó en el entorno de Simulink de Matlab. Se modela el sistema de potencia, la carga no lineal, y el filtro activo con cada uno de sus bloques internos, ver Fig. 9. El objetivo de estas simulaciones es determinar el buen uso de las consideraciones de diseño aplicadas en el FAP. Algunos índices son corrección del factor de potencia, la distorsión armónica total de la corriente entregada por la fuente ( $THDi$ ), el tiempo de respuesta del voltaje del lado de DC FAP, y la potencia "reactiva" generalizada  $q$  (Cardenas, 2008), ésta componente de potencia no corresponde con ninguna de las definiciones convencionales de potencia, bien sea activa, reactiva, no activa etcétera. A continuación se describen las pruebas realizadas.

- Sin variaciones en la corriente de la carga. La prueba está dividida en dos partes. La primera de ellas consiste en observar el comportamiento del FAP, la fuente y el rectificador, todos ellos conectados en un mismo punto (en paralelo) como se observa en la Fig. 10. La segunda consiste en dar inicio a la simulación con la fuente y la carga conectadas, y el FAP desconectado. Luego de transcurridos tres períodos de la onda fundamental, aproximadamente 50 ms, se hace la conexión del FAP al circuito, la respuesta se observa en la Fig. 11. La corriente que circula por el rectificador, tiene un  $THDi = 23.3\%$ . En la Tabla 5, se observan los valores de los índices de desempeño para la prueba realizada.

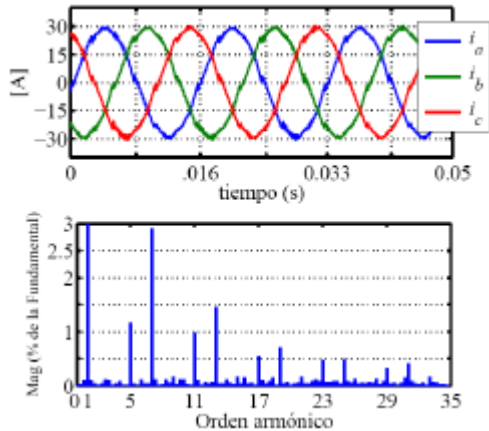


Fig. 10 Corrientes de la fuente, bajo la acción del FAP y conectada a la carga, Contenido armónico. Método LMPq

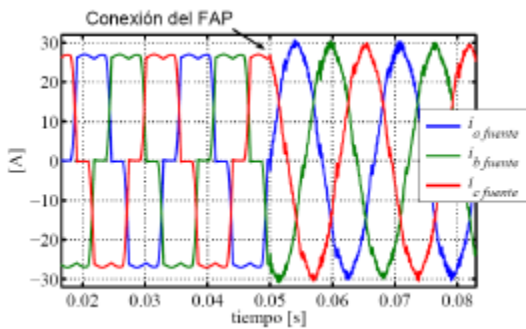


Fig. 11 Conexión del FAP en el Sistema de Potencia

- Con variaciones en la corriente de la carga no lineal: Carga Variable.

La prueba consiste en realizar una variación (escalón) de la corriente de carga en un 30%. Ésta se logra modificando la resistencia de salida del rectificador (carga no lineal). La variación de la corriente de la carga se realiza a los 66,6 ms de iniciada la simulación

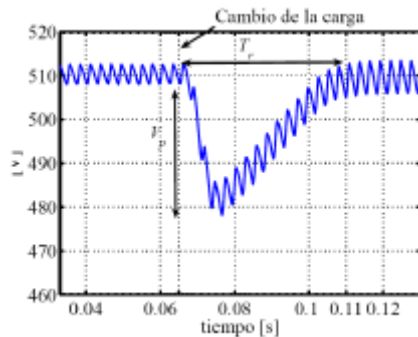


Fig. 12. Respuesta del voltaje en DC del FAP, ante variaciones de la carga a compensar

El objetivo de la prueba planteada es determinar la respuesta dinámica del FAP ante variaciones de la carga no lineal. Se aumenta la corriente de la carga no lineal (rectificador) de 29.5 A pico a 40 A pico. En términos de potencia supone pasar de 7243 W a 9513 W que corresponde a un aumento del 30% de la potencia nominal de la carga, con un nuevo valor  $\varphi_l = -17,26$  grados, y pasara a un factor de potencia de 0,95 en atraso.

En la Fig. 12. se observa la respuesta del voltaje absoluto en el lado de DC del FAP, la variación tiene amplitud  $V_p = 30V$  y el tiempo de establecimiento es de  $T_r = 44ms$ , equivalente a tres y medio veces el periodo de la fundamental. Ver a la derecha de Tabla 5.

Tabla 5. Índices de desempeño para FAP. Carga constante y carga variable

|             | LMPq   | LMPq               |
|-------------|--------|--------------------|
| $THD_i$     | 3,82 % | $THD_i$ 3,46 %     |
| $\eta_h$    | 0,6952 | $\eta_h$ 0,699     |
| $\eta_{FP}$ | 0,9997 | $\eta_{FP}$ 0,9996 |
| $q$ [VAR]   | 293,89 | $q$ [VAR] 420,51   |
| $i_1$ [A]   | 28,83  | $i_1$ [A] 39,93    |
|             |        | $T_r$ 50 ms        |

## 5. CONCLUSIONES

El método y las consideraciones de diseño se verificaron satisfactoriamente a través de las diferentes simulaciones. Las pruebas realizadas permitieron observar el comportamiento del FAP bajo diferentes condiciones de operación, lo cual confirma, desde el punto de vista de la simulación, que el diseño es confiable.

Los FAP tienen la capacidad de adaptarse a variaciones de las condiciones de la red, así mismo los FAP con convertidor TLSC presentan un control sencillo, debido a que existe un nodo intermedio en el lado de DC, y éste se conecta al terminal de neutro del sistema. Logrando que cada rama del convertidor opere de manera independiente.

## REFERENCIAS

- Christopher J., M, y McGranaghan M., F. Interpretation and analysis of power quality measurements. IEEE Trans. on Ind. Applicat., 31(6):1363–1379, Nov/Dec.



- Bettega, E. y Fiorina J. (2003). *Cuaderno técnico n° 183 armónicos: rectificadores y compensadores activos*. Cuaderno Técnico 183, Schneider-Electric.
- Collombet, C. y Lupin J-M, y Schonek J. (2003). *Cuaderno técnico no 152, los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. Schneider-Electric.
- Akagi, H. (1995) Trends In Active Power Line Conditioners. IEEE Trans. on Power Electron., 1994, 3, 263-268.
- Akagi, H. (1996) New trends in active filters for power conditioning. IEEE Trans. on Ind. Applicat., 32, 1312-1322
- Rossetto, L. y Tenti, P. (1992). *Using Ac-FedPWM Converters as Instantaneous Reactive Power Compensators*. IEEE Trans. on Power Electron., 7, 224-230.
- Mohan, N. (2003). *Power Electronics and Drives*, New York.
- Malesani, L. y Rossetto, L. and Tenti, P. (1986). *Active filter for reactive power and harmonics compensation*. in Proc. IEEE PESC'86, 1986, pp. 321-330.
- Kazmierkowski M. y Malesani L (1998). *Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 45(5):691-700, Oct.
- Akagi H., Kanazawa Y. y Nabae A. (1984) *Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components*. IEEE Trans. on Ind. Applicat., IA-20:625-630, May/June.
- Buso S., Malesani L. y Mattavelli P. (1998) *Comparison of current control techniques for active filter applications*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 45(5):722-729, Oct.
- Brod, D. y Novotny, D. (1985) *Current Control Of VSI-PWM Inverters*. IEEE Trans. Ind. App., vol. IA-21, pp. 562-570, July/Aug.
- Holmes, D. y Martin, D. (1996). *Implementation of direct digital predictive current controller for single and three phase voltage source inverters*. in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, pp. 906-913.
- Kawamura, A. and Hoft, R. G. (1984). *Instantaneous feedback controlled PWM inverters with adaptive hysteresis*. IEEE Trans. Ind. App., vol. IA-20, July/Aug.
- Kawabata, T. M., y Yamamoto, Y. (1990). *Dead beat control of three phase PWM inverter*. IEEE Trans. Power Elect., vol. 5, Jan.
- Radulovic, Z. y Sabanovic, A. (1994). *Active filter control using a sliding mode approach*. in Proc. IEEE PESC'94.
- Ponnaluri S. y Vaidyanathan K. (2000). *Generalized system design of voltage source converter*. IEEE IAS 2000 Conferece, Roma(2), Oct.
- Bernet S. y Ponnaluri S. y Teichmann R. (2002) *Desing and loss comparison of matriz converters and voltage-source converters for modern ac drives*. IEEE Trans. on Ind. Elect., 49(2):304-314, Apr.
- Cardenas P. (2008). *Diseño y Simulación de un filtro activo para la eliminación de armónicos en sistemas de potencia*. MSc. Tesis, Universidad Nacional de Colombia.