



## **FILTROS ACTIVOS EN LA COMPENSACIÓN DE REACTIVO Y ARMÓNICAS EN MEDIA TENSIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN**

**V. F. Corasaniti\*    M. B. Barbieri\*    P. L. Arnera\*    M. I. Valla\*\***

**\* IITREE-LAT FI-UNLP (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos-Laboratorio de Alta Tensión  
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata)**

**\*\* LEICI FI-UNLP (Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e Instrumentación)**

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta el diseño de un Filtro Activo Shunt, para compensar el reactivo y las armónicas en el nivel de media tensión de un sistema de distribución de energía eléctrica. La reconfiguración de la red eléctrica de una empresa distribuidora de energía impone nuevas restricciones en una estación transformadora (ET) de forma tal que debe aumentarse la compensación de reactivo en la misma. Una primera propuesta sugería aumentar la compensación de reactivo tradicional existente, con bancos de capacitores de 3 MVAR a 6 MVAR, pero dicha solución introduce resonancias cerca de la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónica resultando en niveles de distorsión inaceptables. En este trabajo se analiza la alternativa de compensación con un filtro activo shunt conectado en 13.8 kV. Dos alternativas son propuestas, la primera considera la compensación total con el filtro activo shunt y la segunda utiliza el banco de capacitores actual e implementa la compensación complementaria con el filtro activo shunt. En el último caso el banco de capacitores es transformado en un filtro de 5<sup>ta</sup> armónica para evitar resonancias en el sistema. Ambas propuestas muestran muy buenos resultados.

### **PALABRAS-CLAVE**

Compensación de Reactivo. Estudios de armónicas. Resonancias. Armónicas. Filtros Activos.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El incremento de las cargas no lineales y equipamientos utilizados actualmente en los sistemas eléctricos, están exigiendo la compensación de las perturbaciones causadas por ellos. La distorsión de la tensión debido a la circulación de las corrientes armónicas se está convirtiendo en uno de los mayores problemas para las empresas distribuidoras de energía eléctrica en los niveles de distribución. La presencia de armónicas en las redes eléctricas, originan inconvenientes a las empresas distribuidoras, ya que son el origen de elevadas pérdidas en líneas y transformadores, aumento de potencia reactiva circulante, aparición de posibles resonancias, pérdida del rendimiento del equipamiento de distribución, reducción de la estabilidad y de los márgenes seguros de operación del sistema [4] [7]. El uso de compensación tradicional con bancos de capacitores y filtros pasivos dan lugar a la propagación de armónicas, ante la posible resonancia entre el capacitor shunt y la inductancia de la red. Debido a ello, alternativas de solución considerando compensación activa, han sido analizadas en los últimos años. Una de las topologías más comúnmente empleada para la compensación de armónicas es el Filtro Activo de Potencia

Shunt (FAPS) [7] [8]. Básicamente funciona como una fuente de corriente controlada, la cual suministra las corrientes armónicas necesarias y/o las corrientes reactivas en un cierto punto de la red. Varias estrategias de control han sido propuestas para los FAPS siendo la más popular aquella basada en la teoría generalizada de la potencia reactiva [9-11].

En este trabajo, se considera el problema particular de una red de distribución de energía. La reconfiguración de la red impone nuevas restricciones en diferentes ET. Estudios de armónicas han sido realizados considerando la compensación futura en la red. Las distorsiones de tensión en diferentes puntos de la red y las condiciones de funcionamiento de los bancos de capacitores fueron verificadas a través de flujo de armónicas [1]. Una propuesta preliminar sugería incrementar la compensación actual de reactivo con bancos de capacitores de 3 MVAR a 6 MVAR, pero dicha solución introducía resonancias cercanas a la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónica resultando en niveles de distorsión inaceptables. Por ello, la alternativa de una compensación activa es propuesta aquí.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA RED

En la Fig.1 se presenta un esquema geográfico de la red eléctrica de la empresa distribuidora de energía.

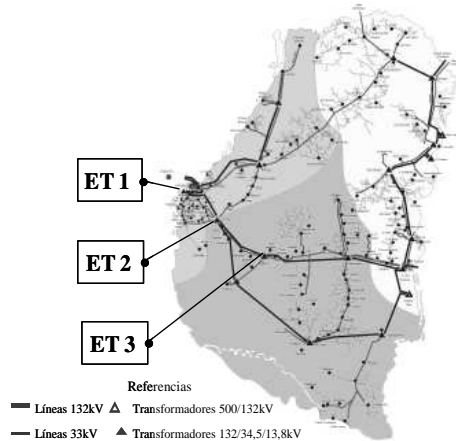


Fig.1- Red eléctrica de la distribuidora de energía

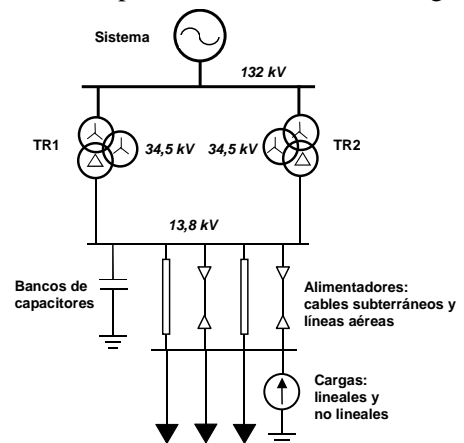


Fig.2- Diagrama unifilar de la red modelada

La red eléctrica de 132 kV, a la cual se conectan las ET en estudio, funciona mallada y se encuentra conectada a través de dos nodos del sistema de 500 kV. En el futuro, dicha red deberá funcionar en forma radial conectada a un sólo nodo de 500 kV. Los requerimientos para mejorar los perfiles de tensión en 132 kV establecen nueva compensación en las diferentes ET. El diagrama unifilar del modelo de red adoptada para la ET en estudio se muestra en la Fig. 2. Se implementa el modelo digital trifásico de la red, en MATLAB/Simulink Power System Blockset (PSB). El sistema es representado por una fuente ideal de tensión en el nivel de 132 kV al cual se conectan 2 transformadores, TR1 y TR2, de similares características, 132/34,5/13,8 kV y 15/10/15 MVA. No existen cargas ni compensación en 34,5 kV. Ambos transformadores se encuentran conectados en paralelo en 13,8 kV, donde se conecta la compensación tradicional de reactivo a través de banco de capacitores. La potencia de cortocircuito en el nivel de 13,8 kV es de aproximadamente 150 MVA.

Basados en estudios de flujos de carga y armónicas realizados sobre la red [1], la carga futura considerada en 13,8 kV es de 23 MVA con un  $\cos \phi = 0.8$  y con las siguientes corrientes armónicas (valores pico):  $i_5 = 60$  A,  $i_7 = 48$  A,  $i_{11} = 27$  A e  $i_{13} = 23$  A; estableciendo una distorsión total armónica de corriente,  $THDi = 7$  %. La compensación de reactivo de 6 MVAR resultará en un  $\cos \phi = 0,92$  en 13,8 kV, el cual es el objetivo del compensador propuesto.

### 2.1 Armónicas

La interacción entre la capacidad equivalente del banco de capacitores y la inductancia de cortocircuito de la red establecen posibles resonancias paralelo a las frecuencias

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \quad (1)$$

donde f: 50 Hz,  $S_{cc}$ : potencia de cortocircuito del sistema en el Punto de Acoplamiento Común (PAC),  $Q_c$ : potencia reactiva de los bancos de capacitores en el PAC. Considerando  $Q_c = 3$  MVar y  $Q_c = 6$  MVar, resultan los valores de frecuencias de resonancias mostrados en la Tabla I. Dichos resultados son confirmados obteniendo la respuesta en frecuencia sobre el modelo de red mostrados en la Fig.3. En ambos casos es evidente que las frecuencias de resonancias, coinciden con las armónicas más críticas existentes en la red, 5<sup>ta</sup> (250 Hz) y 7<sup>ma</sup> (350 Hz), armónicas de mayor amplitud.

Tabla I- Resonancias en 13,8 kV

Compensación (MVar)	$f_r$ (Hz.)	Armónica (orden)
3	353	7
6	250	5

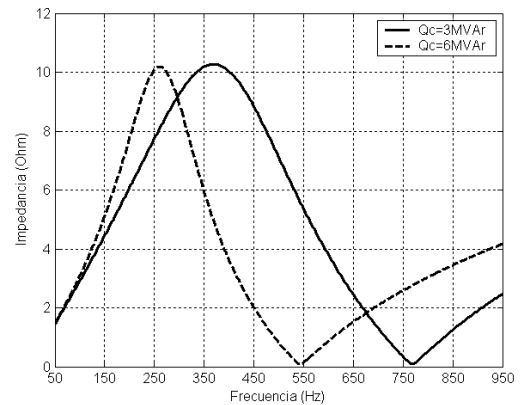
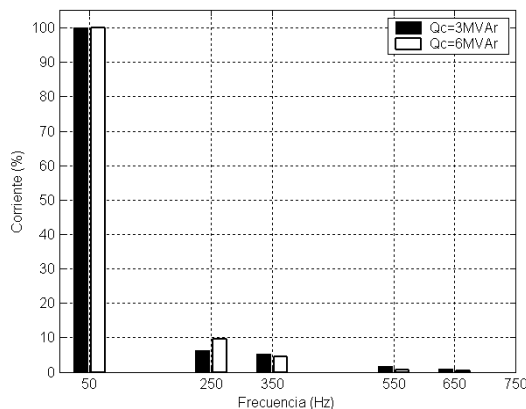


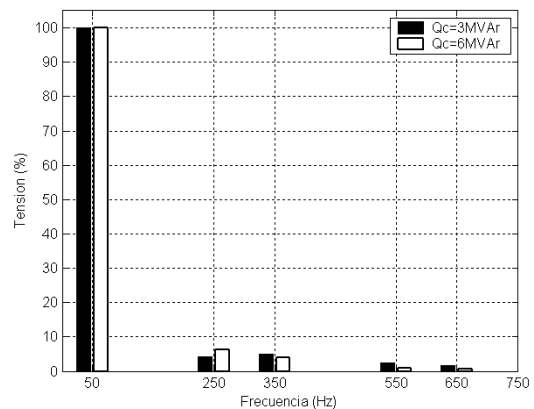
Fig.3- Respuesta en frecuencia en 13,8 kV

Considerando las características de la carga mencionadas anteriormente se realizaron flujos de armónicas para ambas alternativas de compensación (actual y futura). Los resultados del contenido armónico de la corriente y la tensión en 13,8 kV, relativos a la componente de 50 Hz, se presentan en la Fig.4 y Fig.5.



Fundamental = 1138 peak (804.6 rms)  
 Total Harmonic Distortion (THD) = 10.61%

Fig.4- Espectro de la corriente (%) en 13,8 kV



Fundamental = 1.133e+004 peak (8010 rms)  
 Total Harmonic Distortion (THD) = 7.38%

Fig.5- Espectro de la tensión (%) en 13,8 kV

En la Tabla II, se resumen las distorsiones de tensión en 13,8 kV para ambos casos y se las verifica con los establecidos por las normativas en Argentina [2] y los de la IEEE [3]. En ambos casos se superan los niveles de distorsión individuales, con lo cual una compensación diferente debe ser considerada.

Tabla II- Resultados y verificaciones

Tensiones armónicas	$Q_c = 3$ MVar	$Q_c = 6$ MVar	Límite ENRE	Límite IEEE
$U_5$ (%)	4,24	<b>6,15</b>	6	3
$U_7$ (%)	<b>5,03</b>	3,91	5	3
$U_{11}$ (%)	2,42	0,99	3,5	3
$U_{13}$ (%)	1,61	0,65	3	3
THD (%)	7,2	7,38	8	5

### 3. COMPENSACIÓN CON FILTRO ACTIVO SHUNT

Una de las topologías más adecuada para la compensación de las armónicas y reactivo es el denominado Filtro Activo de Potencia Shunt (FAPS) [7] [8]. En la Fig.6, se presenta una estructura general de un FAPS. El mismo consiste de un Inversor Fuente de Tensión trifásico Controlado en Corriente (IFTCC) conectado a la red a través de un inductor de acoplamiento y un transformador. El inductor de acoplamiento podría ser no considerado si la inductancia de dispersión del transformador es suficiente para limitar las corrientes de ripple a niveles aceptables. Las referencias de corriente del IFTCC son generadas por el sistema de control basado en la teoría de la potencia reactiva instantánea. Entonces el análisis del FAPS es dividido en dos principales secciones: el IFTCC y el bloque de control para obtener las corrientes deseadas y mantener la tensión de continua del IFTCC.

#### 3.1 Inversor Fuente de Tensión Controlado en Corriente (IFTCC)

El IFTCC es un inversor fuente de tensión estándar de dos niveles con IGBTs [5] [6] [7]. El lazo de corriente es implementado con un controlador por histéresis o banda de histéresis. La corriente de salida a través del inductor de acoplamiento es muestreada a una frecuencia fija con el fin de limitar la frecuencia de conmutación del inversor. El inversor es conectado al PAC a través de un inductor de acoplamiento. El valor de la inductancia resulta de un compromiso entre el filtrado de las altas frecuencias producidas por la conmutación del convertidor y admitir un alto di/dt sobre el inductor que permitan la compensación de las corrientes armónicas a ser atenuadas o eliminadas [15]. Las frecuencias de conmutación son fuertemente filtradas con un filtro paralelo de segundo orden el cual deriva las corrientes de altas frecuencias del PAC [4]. El lado de continua del convertidor (CC) está formado sólo con un capacitor con un valor apropiado. La capacidad es calculada de forma tal de mantener un bajo ripple de la tensión de CC, 1%. El valor de la tensión de CC de diseño es tal que el convertidor pueda suministrar las derivadas temporales de la corriente demandadas por las armónicas a ser compensadas. Entonces cuando más altas sean las armónicas requeridas al FAPS, más alto es el nivel de tensión necesario en el lado de CC, y más alta es la tensión de bloqueo requerida a los IGBTs de potencia y más alta es la frecuencia de conmutación necesaria para el seguimiento de las corrientes de referencia. La tensión de CC es controlada con un controlador proporcional el cual modifica la potencia activa de referencia en el convertidor la cual es analizada en el próximo punto. Finalmente el transformador de acoplamiento adapta los niveles de tensión de la red de potencia (13,8 kV) al nivel de tensión alterna obtenido del IFTCC con 6,5 kV del lado CC. A su vez, este transformador provee filtrado adicional de las frecuencias de conmutación.

#### 3.2 Sistema de control, generador de corriente de referencias

Fundamentalmente el sistema de control mide las tensiones de fase ( $v_a v_b v_c$ ) y corrientes de fase ( $i_a i_b i_c$ ) en la carga y calcula las corrientes de referencia para el IFTCC usando la teoría general de la potencia reactiva instantánea en sistemas trifásicos, denominada “teoría pq” [9] [10] [11]. Primeramente las variables medidas son transformadas al marco estacionario  $\alpha\beta\theta$  a través de la transformada de Clarke (2).

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Luego son calculadas las potencias instantáneas,  $p$ : potencia activa,  $q$ : potencia imaginaria y  $p_o$ : potencia de secuencia cero

$$\begin{bmatrix} p_o \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_o \\ \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \check{p}_o \\ \check{p} \\ \check{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_o & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

El sistema en estudio es un sistema de tres hilos con lo cual la secuencia cero puede ser despreciada, entonces en lo sucesivo se consideran sólo  $p$  y  $q$ . En el caso general de cargas no lineales,  $p$  y  $q$  poseen

componentes de continua (CC) y de alterna (CA). El valor medio de la potencia activa instantánea ( $\bar{p}$ ) es igual a tres veces la potencia activa por fase, mientras que el valor medio de la potencia imaginaria instantánea ( $\bar{q}$ ) es igual a tres veces la potencia reactiva por fase. Las componentes de CA de ambas potencias instantáneas corresponden a la contribución de las armónicas. En general la red debería abastecer el valor de CC de la potencia activa mientras que su componente de CA también como la potencia imaginaria completa debería ser abastecida por el FAPS. Luego la potencia activa instantánea es filtrada de forma tal de separar ambas componentes y calcular los valores de referencias  $p^*$  y  $q^*$ . Luego los valores de las corrientes de referencia en el marco  $\alpha\beta$  y de fase instantáneas ( $i_{ca}$   $i_{cb}$   $i_{cc}$ ) del IFTCC deberían ser

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cuando las tensiones de la red son distorsionadas, las corrientes calculadas con las ecuaciones previas no compensaran exactamente las armónicas. Luego es deseable obtener tensiones puramente sinusoidales en lugar de las directamente medidas. Esto es realizado con un lazo de enganche de fase (Phase Locked Loop o PLL) el cual sincroniza con las tensiones de secuencias positiva sinusoidales de fase [12] [13] [14]. La salida del PLL son tensiones de fase puramente sinusoidales ( $v_{\alpha}$   $v_{\beta}$   $v_c$ ) las cuales son utilizadas para sincronizar las corrientes del filtro y también para calcular las potencias instantáneas. La Fig. 7 muestra el diagrama en bloques del control implementado para el FAPS.

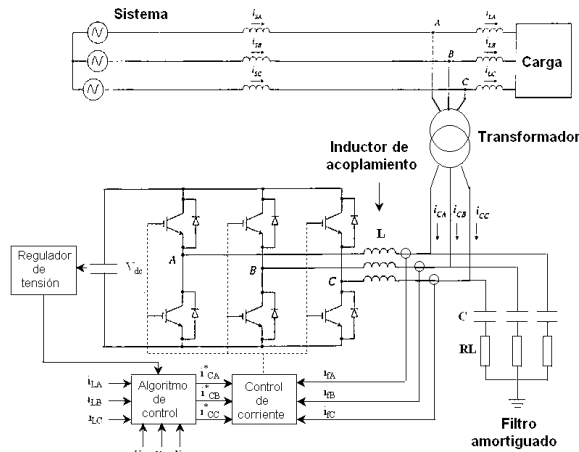


Fig.6- Estructura general de un FAPS

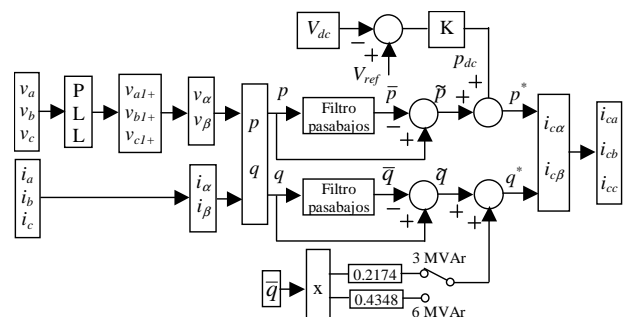


Fig. 7- Diagrama en bloques del control del FAPS.

#### 4. ALTERNATIVAS DE COMPENSACIÓN

Son consideradas dos alternativas diferentes para la compensación con el FAPS. La primera alternativa, donde la compensación es completamente realizada con el FAPS. En este caso, la compensación de reactivo es limitada a 6 MVar lo que permite obtener un  $\cos \phi$  aceptable y limitar la corriente aportada por el FAPS. Las corrientes armónicas son completamente provistas por el FAPS.

La segunda alternativa, aprovecha el banco de capacitores actual de 3 MVar instalado en la ET en estudio. Luego 3 MVar son compensados por el banco de capacitores y menor corriente es provista por el FAPS o con el mismo FAPS un  $\cos \phi$  más elevado puede ser obtenido. Nuevamente las corrientes armónicas son provistas por el FAPS. Para evitar posibles resonancias con el banco de capacitores este es transformado en un filtro pasivo de 5<sup>ta</sup> armónica. Los parámetros de diseño de ambos filtros son resumidos en la Tabla III. En los siguientes puntos se presentan los resultados obtenidos con ambas alternativas.

Tabla III- Parámetros de diseño del FAPS y el filtro pasivo

Alternativa 2				
Transformador	Filtro amortiguador	Filtro pasivo	Transformador	
S (MVA)	6500	R (Ω)	S (MVA)	150,14
U <sub>1</sub> (kV)	5000/13,8	f <sub>c</sub> (Hz)	U <sub>2</sub> (kV)	23/13,8
X (%)	0,5	L (mH)	R (Ω)	0,42
				10

### 6.1 Alternativa 1 – Sólo FAPS

En las Figs. 7 y 8 se muestran las formas de onda de una fase de la corriente y la tensión en 13,8 kV, en el sistema, instantes previos y posteriores a la conexión del FAPS. El FAPS es conectado en t = 0,2 s.

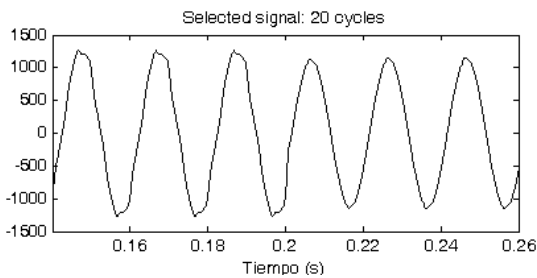


Fig.7- Corriente en el sistema

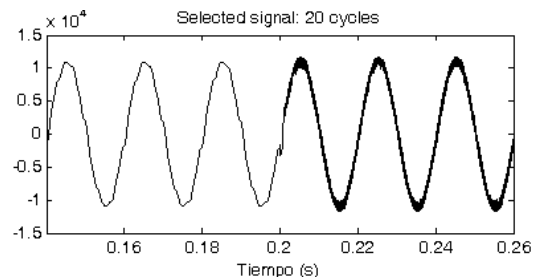


Fig.8- Tensión en el sistema

De la Fig.7, se observa como las corrientes distorsionadas resultan prácticamente sinusoidales y de menor valor en el sistema, dada la compensación de armónicas y reactivo a 50 Hz, cuando el FAPS es conectado. De la Fig.8, se puede observar un pequeño ripple de alta frecuencia en la tensión de fase. Es difícil filtrar dicho ripple sin afectar las corrientes a compensar ya que las armónicas a compensar están cerca de las frecuencias de conmutación las cuales tiene un valor medio de 2 kHz. En las Figs. 9 y 10 se muestran las formas de onda de la potencia activa y reactiva instantánea en el sistema.

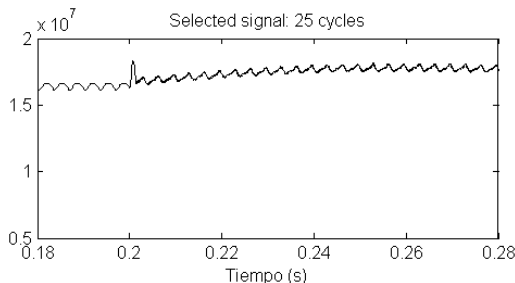


Fig.9- Potencia activa en el sistema

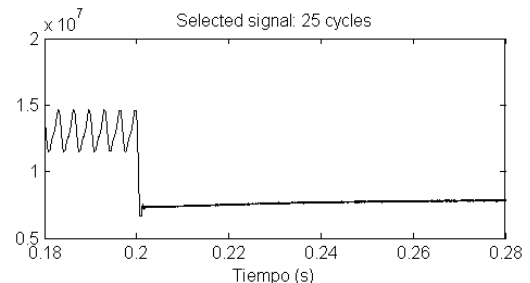


Fig.10- Potencia reactiva en el sistema

De la Fig.9 se observa un aumento de la potencia activa instantánea en el sistema debido al aumento de la tensión en el PAC, dada la compensación de los 6 MVar de reactivo. Además se observa la parte oscilante, de 6<sup>a</sup> armónica (300Hz.) debidas a las armónicas. La compensación de reactivo es presentada en la Fig.10. En t = 0,2 s. la componente de CC es reducida en 6 MVar mientras que la componente de CA es prácticamente eliminada. El espectro de la corriente y la tensión, se presentan en las Figs.11 y 12.

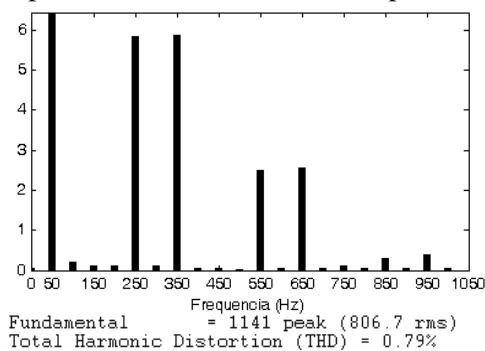


Fig.11- Espectro de la corriente

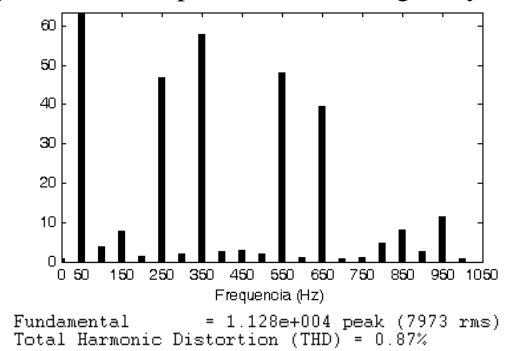


Fig.12- Espectro de la tensión

De la Fig.11, se observa como ha sido reducido el valor de THDi original de 10,6 % al 0,79 %, con un valor eficaz de corriente de 50 Hz de  $I_{1ef} = 806,7$  A. En la Fig.12, se observa como ha sido reducido el valor de THD original de 7,38 % al 0,87 %, con un valor eficaz de tensión de 50 Hz de  $U_{1ef} = 7973$  V. En lo que respecta a los resultados en el IFTCC, en las Figs.13 y 14 se muestran las formas de onda de una de las fases de la corriente inyectada por el FAPS en el PAC y la tensión de CC del inversor. En la Fig.13 se observa la forma de onda compuesta por el valor de corriente de 50 Hz correspondiente a los 6 MVar de compensación de reactivo, las armónicas de corriente requeridas por la carga y un pequeño ripple dado por la frecuencia de conmutación del inversor. También, se observa claramente en la Fig.14, el comportamiento transitorio de la tensión de CC en el instante de conexión del FAPS y su restablecimiento alrededor de su valor medio de 6,5 kV con una oscilación de 6<sup>ta</sup> armónica (300Hz.) debida a la componente de CA de la potencia activa instantánea.

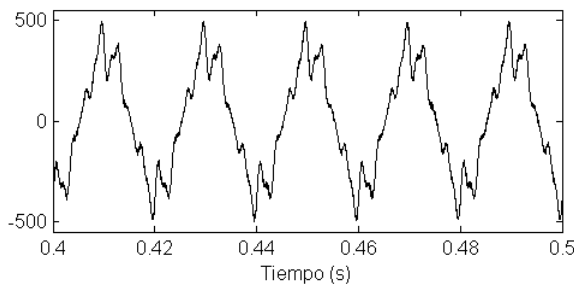


Fig.13- Corriente inyectada por el FAPS

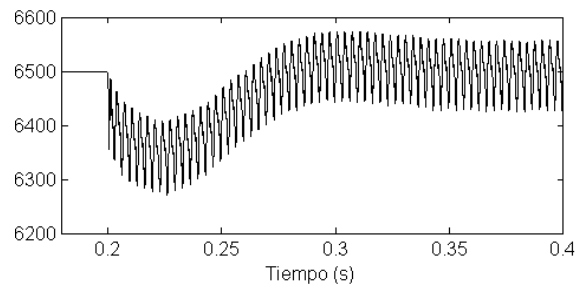


Fig.14- Tensión de CC en el inversor

## 6.2 Alternativa 2 – Filtro pasivo y FAPS

En las Figs. 15 y 16 se muestran las formas de onda de una fase de la corriente total compensada por el filtro pasivo y el FAPS y la tensión de 13,8 kV, en el sistema. El filtro pasivo se encontraba conectado. El FAPS es conectado en  $t = 0,2$  s. De ambas figuras se determinan conclusiones similares a la alternativa 1. En las Figs. 17 y 18 se muestran las formas de onda de la potencia activa y reactiva instantánea en el sistema. En ambas figuras se aprecia el transitorio producido por el filtro pasivo al conectarse el FAPS. De la Fig.17 se determinan conclusiones similares a la Fig. 9 correspondientes a la alternativa 1. La compensación de reactivo es presentada en la Fig.18. En  $t = 0,2$ s, la componente de CC es reducida en 3 MVar mientras que la componente de CA es prácticamente eliminada.

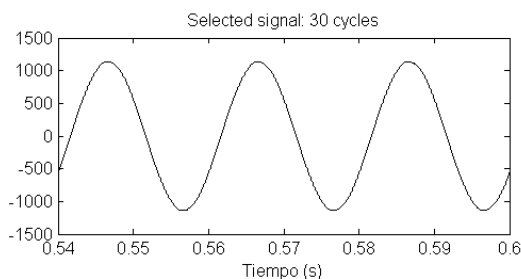


Fig.15- Corriente total en el sistema

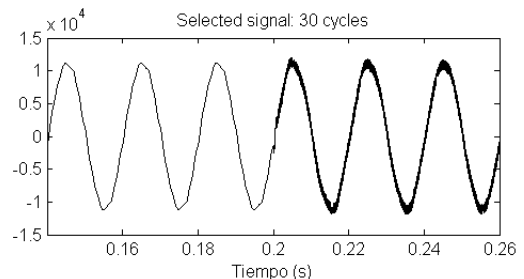


Fig.16- Tensión en el sistema

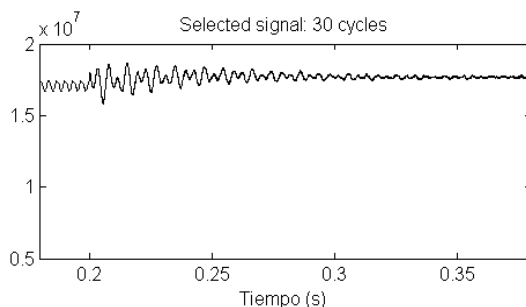


Fig.17- Potencia activa en el sistema

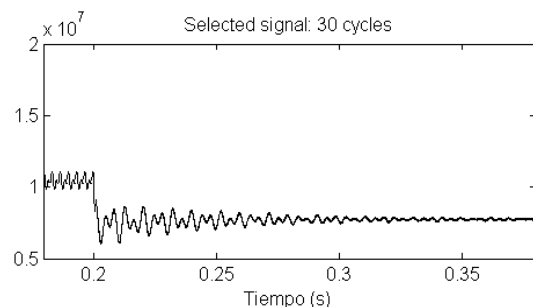


Fig.18- Potencia reactiva en el sistema

En lo que respecta a los resultados en el IFTCC, en las Figs.19 y 20 se muestran los mismos resultados que en la alternativa 1 y se determinan conclusiones similares a las Figs. 13 y 14.

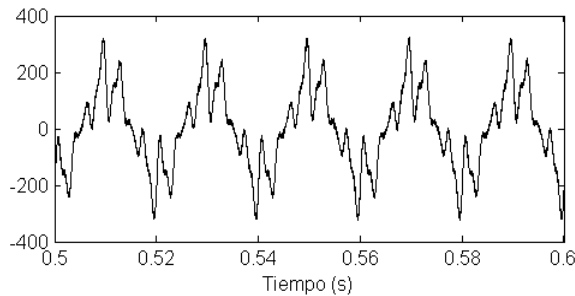


Fig.19-Corriente inyectada por el FAPS

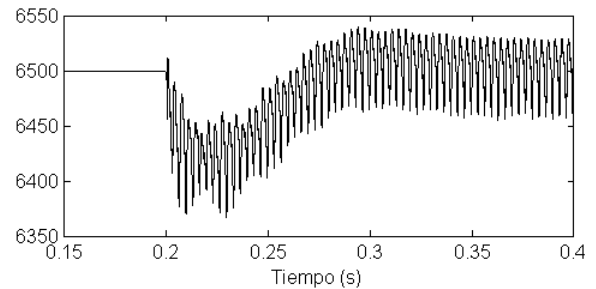


Fig.20- Tensión de CC en el inversor

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño del filtro activo shunt para compensar potencia reactiva y armónicas en el nivel de media tensión de una red de distribución eléctrica. Dos alternativas fueron propuestas, la primera considera la compensación totalmente realizada por el filtro activo mientras que la segunda utiliza el banco de capacitores actual y complementa la compensación con el filtro activo. En el último caso el banco de capacitores es transformado en un filtro de 5<sup>ta</sup> armónica para evitar resonancias con el sistema. Ambas propuestas establecen muy buenos resultados. La segunda puede ser una propuesta más económica aunque presenta los problemas de las posibles resonancias entre el capacitor y el sistema.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. Arnera, M. I. Valla "Load characterization in Medium Voltage of an Electric Distribution Utility Related to Active Filters" 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America. Caracas, Venezuela, agosto de 2006.
- [2] Anexo a la Res. ENRE 184/00. Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2.
- [3] IEEE Std.519-1992. "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems".
- [4] Power System Harmonics. J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger. Wiley & Sons Ltd., 1985.
- [5] Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Wiley-IEEE Press 1999. ISBN-0780334558
- [6] Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems. R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. IEEE Press and Wiley & Sons, Inc. 2002. ISBN 0-471-20643-1.
- [7] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller. Power Electronic Control in Electrical Systems. Newnes Power Engineering Series, 2002.
- [8] H. Akagi. "New Trends In Active Filters for Power Conditioning," IEEE Trans.Ind.Appl., 1996, Vol. 32, No. 6, pp: 1312-1322.
- [9] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," IPEC'83-Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
- [10] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans.Ind.Appl., 1984, Vol.2, pp:625-630.
- [11] E.H. Watanabe, R.M. Stephan and M. Aredes, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, April 1993.
- [12] G. Hsieh, and J.C. Hung, "Phase-locked loop techniques – a survey," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43, no. 6, pp. 609-615, 1996.
- [13] L.N. Arruda, S.M. Silva, and B.J.C. Filho, "PLL structures for Utility Connected Systems," IEEE/IAS'01, pp. 2655-2660, 2001.
- [14] M. Aredes, Luis F.C. Monteiro and Jaime M. Miguel, "Controls Strategy for Serie and Shunt Active Filters," IEEE PowerTech Conf., Bologna, Italy, June 2003.
- [15] S.Bhattacharya, T.M. Frank, D.M. Divan, and B. Banerjee, "Active Filter System Implementation," IEEE Industry Applications Magazine, pp. 47-63, September/October, 1998.