

Análisis de Armónicos en un Compensador Estático de VAR's (SVC) Usando Modelado en Dominio Armónico (Harmonic Domain).

Francisco David Pérez Acuña
Universidad Tecnológica de Panamá
José Armando Jiménez Zavala

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN – Guadalajara

ABSTRACT

Usually electronic devices, the same as non linear elements of power systems, generate harmonic signals. These harmonics might generate resonance and stability problems in power systems, making necessary the installation of filters, compensator or additional generators. The time domain analysis of systems with harmonics implies long simulation times since the stability has to be reached. On the contrary, techniques using the frequency domain offer an efficient alternative in determining the periodic steady state of power systems with non linear components. The right knowledge of harmonic generation and interactions helps in the system's improvement and optimizes de harmonic filter design process. The Flexible AC Transmission Systems (FACTS) use electronic devices based on diodes, thyristors and GTOs to modify the network parameters providing the power flow in the transmission lines and the voltage at the bars. In the present work the Harmonic Domain is using to obtain a stable state representation of a Static Compensator of VAR's. The goodness of this method is that it provides and effective, easy and fast manner of obtaining the harmonic contents of the variables.

Keywords: Harmonics, Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Static Var's Compensator (SVC), Harmonic Domain (HD),

RESUMEN

Usualmente los dispositivos electrónicos, al igual que los elementos no-lineales de los sistemas de potencia, generan armónicos. Estos armónicos pueden generar problemas de resonancia y estabilidad en los sistemas de potencia, por lo cual se requiere la instalación de filtros, compensadores o generadores adicionales. El análisis en el dominio del tiempo de sistemas que incluyen armónicos implica tiempos largos de simulación cuando se busca obtener el estado estable del sistema. En cambio, las técnicas del dominio de la frecuencia ofrecen una alternativa eficiente en la determinación del estado estable periódico de sistemas de potencia que contienen componentes no-lineales. El conocimiento acertado de la generación e interacción de armónicos ayuda a mejorar el control del sistema y a optimizar el diseño de los filtros de armónicos. Los Sistemas de Transmisión Flexibles en AC (FACTS) utilizan dispositivos electrónicos basados en diodos, tiristores y GTO para modificar los parámetros de la red y con ello controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión y el voltaje en barras. En el presente trabajo se utiliza el Dominio Armónico (HD) para obtener la representación en estado estable de un Compensador Estático de VAR's. La bondad de este método está en el hecho de que permite determinar los contenidos armónicos de las variables de una manera rápida, fácil y efectiva.

Palabras claves: Armónicos, Sistemas de Transmisión Flexibles en AC (FACTS), Compensador Estático de Var's (SVC), Dominio Armónico (DA).

1. INTRODUCCIÓN

Los FACTS son sistemas de transmisión de corriente alterna que tienen incorporados controladores basados en electrónica de potencia y otros controladores estáticos para mejorar su operación, contribuyendo a la generación de armónicos en la red.

Algunos de los efectos nocivos de los armónicos son el sobrecalentamiento en conductores del neutro, sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores y cables, vibración en motores y generadores, falla de bancos de capacitores, falla de transformadores y efectos de resonancia que pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.

Por tal razón es necesario hacer análisis de los armónicos generados por estos dispositivos y procurar que los mismos no excedan los límites establecidos en las normas (IEEE 519, 1992), tal como la distorsión armónica total de corriente THD_I .

Por otra parte, las redes eléctricas están en franca expansión pero existen restricciones para la instalación de nuevas vías para líneas de transmisión. La tecnología FACTS es hoy una opción para incrementar la potencia transmitida y mejorar el control de los parámetros que gobiernan la operación cambiándolos de manera flexible; no consiste de un solo controlador electrónico para varias aplicaciones sino de un conjunto de controladores que proporcionan un universo de soluciones, algunas en aplicación hoy en día y otras en estudio.

2. EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR'S(SVC)

Las primeras aplicaciones de electrónica de potencia en las redes eléctricas preceden a la introducción de concepto FACTS. Entre ellos destaca el Compensador Estático de VARs, o SVC por sus siglas en inglés, instalado para el control de voltaje. Los primeros SVC se comercializaron en 1974 por GE y en 1975 por Westinghouse (Enrique Acha et al, 2004b).

En la práctica, el dispositivo SVC suele estar compuesto por una capacitancia C en paralelo con una reactancia X_R gobernadas por controladores o interruptores a base de tiristores e interruptores mecánicos. Estos compensadores pueden entregar (capacitivo) o absorber (inductivo) potencia reactiva de la red, para poder regular el voltaje, mejorar la estabilidad (estado estable y dinámico), evitar sobre voltajes, reducir "flicker", reducir desbalances de corriente y en HVDC provee la potencia reactiva y el amortiguamiento ante oscilaciones subarmónicas.

La utilidad o ventaja del SVC estriba en su capacidad para cambiar su capacitancia-inductancia a alta velocidad, haciendo uso de electrónica de potencia. La Fig. 1 muestra un dispositivo SVC monofásico básico compuesto en este caso por una capacitancia C con interruptor de tiristores TS en paralelo con una reactancia X_R controlada por tiristores TC. Su denominación es SVC/TCR-TSC (StaticVar Compesators,ThyristorControlledReactor-ThyristorSwitchedCapacitor).

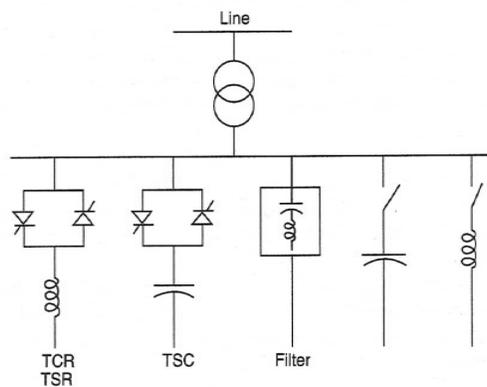


Figura 1: Esquema de un SVC/TCR-TSC

Cada tiristor conduce en uno de los medios ciclos, dependiendo del ángulo de disparo (α), el cual se mide a partir del cruce por cero del voltaje. La conducción parcial (σ) se logra con ángulos de disparo entre 90° y 180° grados (Ver figura 2), ángulos entre $0^\circ - 90^\circ$ producirían corrientes asimétricas.

Los ángulos de conducción y disparo están relacionados por:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (1)$$

La corriente instantánea está dada por:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos\alpha - \cos\omega t) & \text{para } \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \sigma \\ 0 & \text{para } \alpha + \sigma \leq \omega t \leq \alpha + \pi \end{cases} \quad (2)$$

El análisis de Fourier de la onda anterior, da como resultado que la magnitud de la corriente para la componente fundamental es (Enrique Acha et al, 2004b):

$$I_1 = \frac{V(\sigma - \sin\sigma)}{\pi X_L} \quad (3)$$

I_1 y V son valores RMS y X_L es la reactancia del reactor a frecuencia fundamental. El efecto de incrementar el ángulo de disparo α (que equivale a disminuir σ) es el reducir la componente fundamental I_1 , esto equivale a incrementar la inductancia efectiva del reactor. A medida que α se incrementa de 90° a 180° la onda de corriente distorsiona su forma sinusoidal, es decir, el TCR genera armónicos.

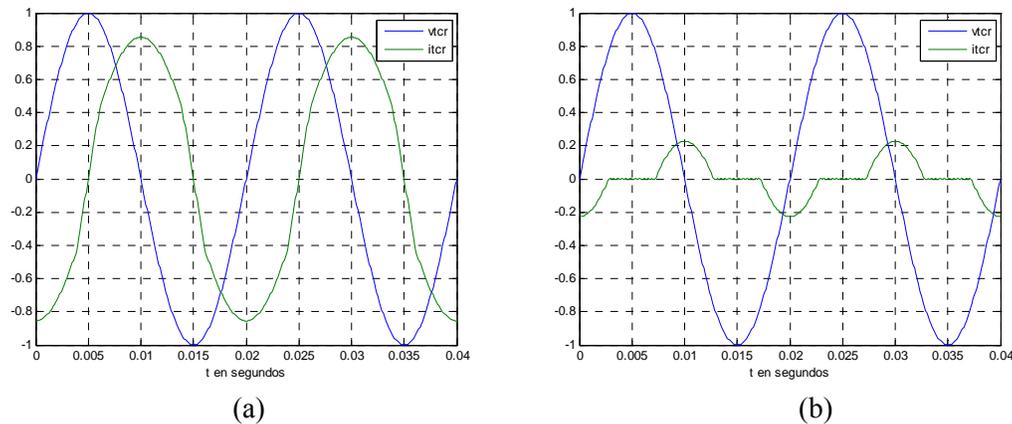


Figura 2: Corrientes en el TCR para diversos ángulos de disparo (α) y de conducción (σ) frente a una entrada sinusoidal de voltaje. a) $\alpha = 80^\circ$, $\sigma = 200^\circ$; b) $\alpha = 130^\circ$, $\sigma = 100^\circ$.

De acuerdo a lo anterior, y debido a que la única componente de interés es la fundamental, el TCR, se convierte en una reactancia controlable, donde la reactancia efectiva es función del ángulo de disparo α .

El valor de la reactancia efectiva (X_{TCR}) es a conducción total ($\alpha=90^\circ$) e igual a X_L y de circuito abierto (no conducción $X_{TCR} = \infty$) con $\alpha=180^\circ$. La reactancia efectiva en función del ángulo de disparo es:

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (4)$$

A esta forma de control de la reactancia, se le conoce con el nombre de “Control de Fase”.

Para una combinación en paralelo con un capacitor (no controlado) de capacitancia C se obtiene un valor de impedancia total para el SVC de (Enrique Acha et al, 2004b):

$$X_{SVC} = \frac{\pi X_L X_C}{X_C(2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) - \pi X_L} \quad (5)$$

Y la potencia reactiva que entrega o absorbe el SVC estaría dada por:

$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_{SVC}} \quad (6)$$

La impedancia característica y la potencia reactiva del SVC están representadas en la figura 3. Dentro del diseño del SVC existen dos regiones de operación: una región inductiva y una región capacitiva. Dependiendo de la región de operación del SVC absorbe o entrega potencia reactiva al nodo en el que se encuentra conectado.

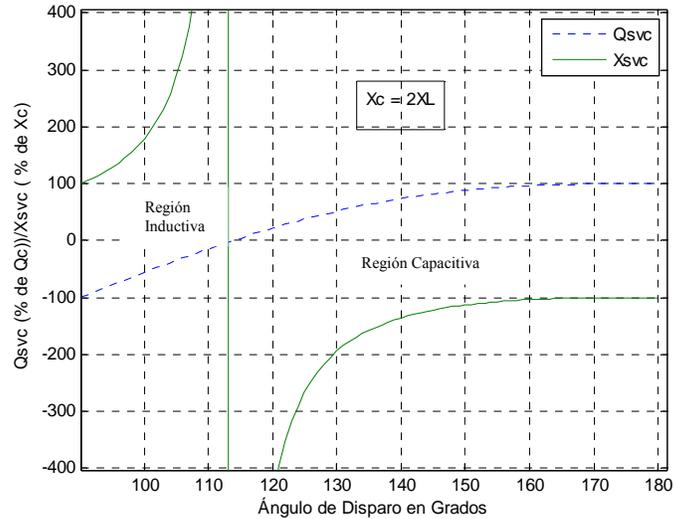


Figura 3: Impedancia Característica y Potencia Reactiva del SVC como función del ángulo de disparo.

La corriente i en el TCR, indicada previamente, puede expresarse como una serie de Fourier y sus contenidos armónicos en términos del ángulo de disparo estarían dados por la expresión (Enrique Acha et al, 2001a):

$$I(\alpha)_h = \frac{4V}{\pi X_L} \left(\frac{h \operatorname{sen} \alpha \cos(h\alpha) - \cos \alpha \operatorname{sen}(h\alpha)}{h(h^2 - 1)} \right) \quad (7)$$

Donde, h representa el número del componente armónico en la corriente del SVC y, $h=2k+1$, con $k=1, 2, 3, \dots$

De la expresión para los contenidos armónicos de la corriente del TCR monofásico se puede observar que el mismo genera armónicos de tipo impar. Esto ocurrirá siempre que el ángulo de disparo sea simétrico.

El TCR requiere un sistema de control que determine el instante de disparo (ángulo). Tipos:

- Susceptancia deseada
- Señales de error (voltaje)
- Señales de estabilización auxiliares.

El resultado es una característica de estado estable V/I , que obedece a la siguiente ecuación (Enrique Acha et al, 2004b):

$$V = V_{ref} + X_{ls} I_1 \quad (8)$$

Para un sistema trifásico se prefiere conexión delta de los reactores ya que, bajo condiciones balanceadas, se eliminarían los armónicos triples: 3, 9, 15, etc. Para eliminarlos otros armónicos (5ta, 7ma, etc.) se utilizan filtros sintonizados adecuadamente según la armónica que se desea eliminar.

3. MODELADO EN EL DOMINIO ARMÓNICO DE SISTEMAS FÍSICOS

El análisis de sistemas físicos utilizando el Dominio Armónico (**DA**) está fundamentado en las series de Fourier, esta técnica ha sido utilizada para el manejo de armónicos en estado estable de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Si se considera una ecuación diferencial, en la que $x(t)$ es la salida y $v(t)$ la entrada:

$$\dot{x}(t) = a(t)x(t) + b(t)v(t) \quad (20)$$

Donde $a(t)$, $b(t)$ y $v(t)$ son funciones periódicas con período T . Empleando las ecuaciones (13), (14) y (17) se obtiene la representación en DA de este sistema (A. Ramírez, 2009):

$$DX = A_{TTP}X + B_{TTP}V \quad (22)$$

En (21) A_{TTP} y B_{TTP} son matrices Toeplitz formadas con los contenidos armónicos de $a(t)$ y $b(t)$, y V es un vector que contiene los coeficientes armónicos de $v(t)$. Al resolver (21) se obtiene la respuesta en estado estable del sistema.

4. MODELADO EN EL DOMINIO ARMÓNICO DEL SVC MONOFÁSICO.

Considerando el caso de un dispositivo SVC monofásico que posee un TCR y un capacitor en paralelo y que opera a una frecuencia determinada. En el TCR, la función denominada función de "Switch" es la que gobierna el voltaje que aparece en el reactor (inductancia) del TCR, cuando esta función está en "on" deja pasar la corriente y el voltaje del reactor es igual al voltaje del TCR; si la función de está en "off" no pasa corriente por el reactor y su voltaje es cero. Entonces, el voltaje en el reactor es el producto del voltaje en el TCR por la función de "Switch".

La función de "Switch" depende del ángulo de disparo de los tiristores y representa una onda cuadrada que recorta la onda de voltaje del TCR. El voltaje en el reactor estaría dado por las ecuaciones (Enrique Acha et al, 2001):

$$V_r(t) = s(t)V_{TCR}(t) \quad (22)$$

$$V_r(t) = L \frac{di_{TCR}(t)}{dt} \quad (23)$$

Al expresar las ecuaciones (22) y (23) en el DA se obtienen las siguientes expresiones (Enrique Acha et al, 2001; A. Ramírez et al, 2007):

$$V_R = SV_{TCR} \quad (24)$$

$$V_R = LD(jh\omega_p)I_{TCR} \quad (25)$$

Al combinar estas ecuaciones se obtiene la admitancia del TCR, la cual está dada por la ecuación (A. Ramírez et al, 2007):

$$Y_{TCR} = \frac{I_{TCR}}{V_{TCR}} = \frac{1}{L} D^{-1}(jh\omega_p)S \quad (26)$$

La matriz de admitancias Y_{TCR} incluye los acoplamientos entre frecuencias obteniendo una representación completa del TCR durante su operación en estado estable.

5. CASO DE ESTUDIO DE UN DISPOSITIVO SVC MONOFÁSICO

A continuación se realizará el análisis de armónicos para un dispositivo SVC monofásico, utilizando el modelado en dominio armónico y así poder determinar los contenidos armónicos de la corriente del TCR y de la corriente del SVC como porcentaje de la componente fundamental de cada corriente.

En el caso que se va a analizar se tendrá un voltaje de entrada en el SVC de $V_{SVC} = 1 \text{ p.u.}$, operando a una frecuencia de 50 Hz con una inductancia en el TCR de $L = 1 \text{ mH}$ y un capacitor en paralelo de $C = 20 \text{ mF}$.

Cabe destacar que el voltaje en el SVC es el mismo voltaje en el TCR, ya que el SVC que estamos analizando se

compone de un TCR con un capacitor en paralelo, por lo que la admitancia del SVC es la combinación de la admitancia del TCR en paralelo con la admitancia del capacitor, que en el dominio armónico está dada por:

$$Y_{SVC} = Y_{TCR} + Y_C \tag{27}$$

$$Y_C = CD(jh\omega_p) \tag{28}$$

Es importante, en el análisis de los armónicos del SVC, considerar la acción de los tiristores en su estado de conducción y de bloqueo. En la figura 4 se observa la función de “Switch” del TCR para un ángulo de disparo $\alpha = 120^\circ$, cuando los tiristores se encuentran en conducción existe un voltaje en el reactor igual al voltaje del TCR y cuando los tiristores están en bloqueo el voltaje en el reactor es cero.

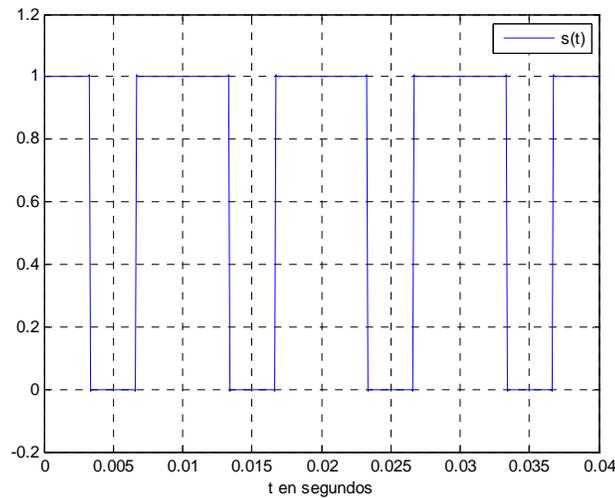


Figura 4: Función de “Switch” para el TCR del SVC con ángulo de disparo de 120° .

En la figura 5 se observa la onda de voltaje en el reactor causada por la función de “Switch”.

Utilizando el modelado en DA y resolviendo la ecuación (25) para obtener la corriente en el TCR, se pueden determinar los contenidos armónicos de dicha corriente. La expresión para la corriente del TCR está dada por:

$$I_{TCR} = Y_{TCR} V_{TCR} = \frac{1}{L} D^{-1}(jh\omega_p) S V_{TCR} \tag{29}$$

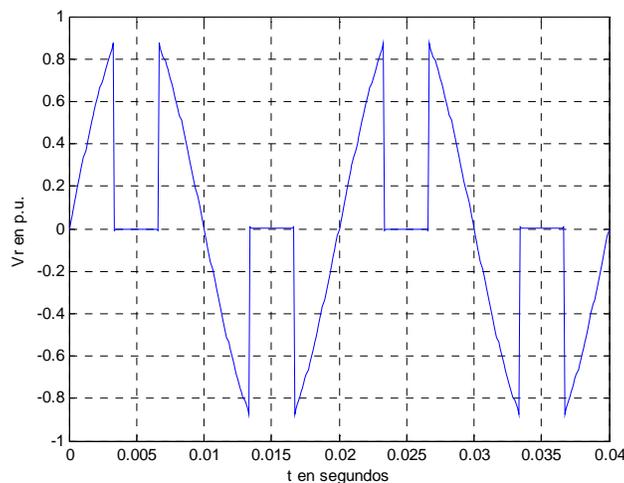


Figura 5: Voltaje en el Reactor para un ángulo de disparo de 120° .

A continuación se puede observar en la figura 6 la forma de onda del voltaje de entrada y corriente de salida del

TCR para el caso en cuestión.

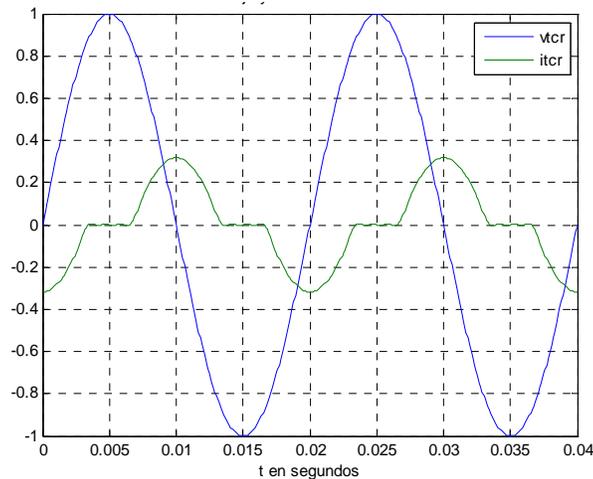


Figura 6: Voltaje de Entrada y Corriente de Salida en el TCR del SVC.

Al hacer el análisis de armónicos en las corrientes del TCR y del SVC se debe considerar los límites de distorsión armónica total de corriente y, en cada caso, para procurar que los mismos no excedan lo establecido por las normas de calidad de la energía (IEEE 519, 1992).

La distorsión armónica total de corriente está definida según la ecuación:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}} \quad (30)$$

Según las normas existentes (IEEE 519, 1992), los límites de distorsión de armónicas, bajo cualquier tipo de alimentación, no deben exceder de un 15%.

En la figura 7 se observan los contenidos armónicos de la corriente del TCR como porcentaje del valor de la componente fundamental, destacando el hecho de que la 3ra y 5ta son de cerca de un 35% y 7% y su THD_I es de un 36%, por lo que se debe agregar filtros que eliminen estas armónicas.

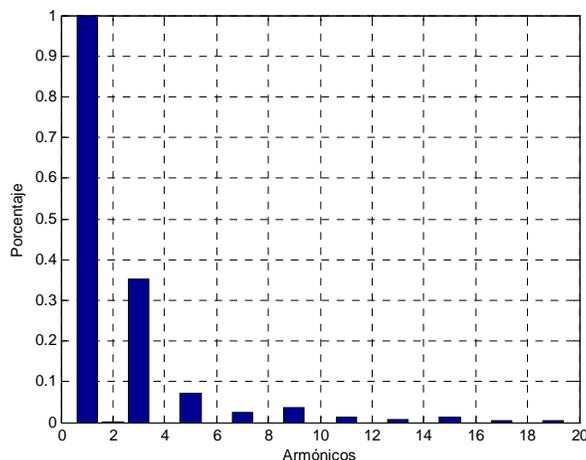


Figura 7: Contenidos Armónicos de la Corriente en el TCR

La corriente en el SVC se obtiene al multiplicar el voltaje en el TCR por la admitancia del SVC de la manera siguiente:

$$I_{SVC} = Y_{SVC} V_{TCR} = \left(\frac{1}{L} D^{-1}(h\omega_p) S + CD(h\omega_p) \right) V_{TCR} \quad (81)$$

En la figura 8 se puede apreciar la onda de voltaje del TCR y la onda de corriente del SVC:

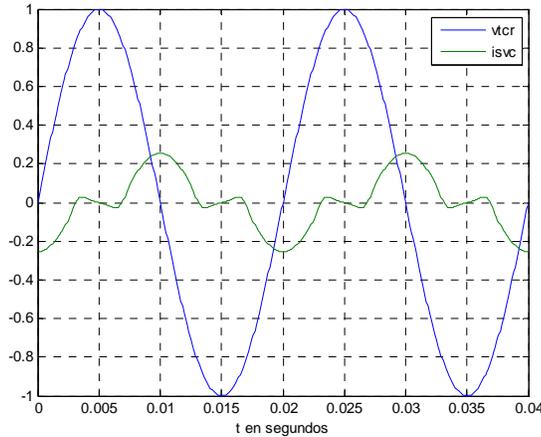


Figura 8: Voltaje de entrada y Corriente de Salida en el SVC

Finalmente, se observa en la figura 9 los contenidos armónicos de la corriente del SVC observando el hecho que los porcentajes de la 3ra y 5ta armónica, son de cerca de 48% y 10% de la fundamental respectivamente y la THD_i es de cerca de un 49%, por lo que se debe aplicar algún tipo de filtrado para corregir dicha situación.

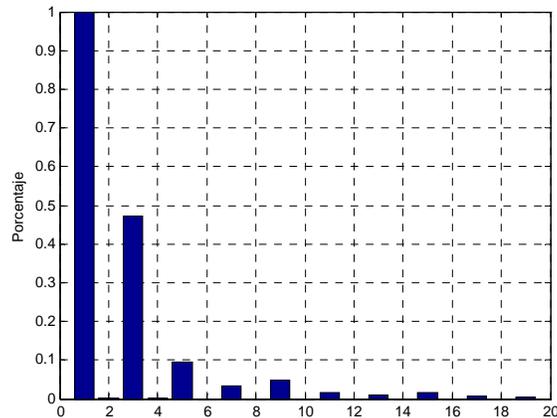


Figura 9: Contenidos Armónicos de la Corriente en el SVC

6. CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que la técnica de análisis en el DA es una herramienta útil para la identificación efectiva de los contenidos armónicos en las variables de un dispositivo SVC, como la corriente en el TCR y en el SVC.

Es importante poder identificar adecuadamente los contenidos armónicos provocados por dispositivos de control hechos a base de electrónica de potencia como lo es el SVC. Observar que no se sobrepasen los límites establecidos por las normas y en caso contrario hacer los correctivos necesarios.

Partiendo de la metodología presentada es posible analizar los armónicos en un SVC trifásico, considerando desbalances en las fases, ángulos de disparo diferentes en los tiristores o teniendo entradas no sinusoidales.

REFERENCIAS

- A. Ramirez, "Frequency-domain computation of steady and dynamic states including nonlinear elements", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no 3, pp. 1609-1615, July 2009.
- E. Acha and M. Madrigal, *Power system harmonics: Computer modeling and analysis*, Jhon Wiley & Sons Ltd 2001.
- F. C. De La Rosa, *Harmonic and power systems*, Taylor & Francis Group, 2006.
- J. Jesus Chavez and A. Ramirez, "Dynamic harmonic Domain modeling of transients in three phase transmission lines", *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol 23, no 4, pp. 2294-2301, October 2007.
- J. Jesus Rico, M. Madrigal, and E. Acha, "Dynamic harmonic evolution using the extended harmonic domain," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 18, no. 2, pp 587-594, Apr. 2003.
- M. Madrigal and E. Acha, "Harmonic modeling of voltage source converters for HVDC stations", *Proc. IEE AC-DC PowerTransmission Conf.*, pp. 125-131, 2001.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito