

Harmonic Reduction in Reactive Power Compensator Unbalanced, Tuning Shooting Angles Thyristors

Francisco D. Pérez Acuña, M.Sc.¹, José A. Jiménez Zavala, M.Sc.², Roberto R. Matheus, M.Sc.¹

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, francisco.perez@utp.ac.pa, Roberto.matheus@utp.ac.pa

² Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, México, armandojz@gmail.com

Abstract— The present work aims to demonstrate the effect of appropriate tuning of the thyristor firing angles in a reactive power compensator on the reduction of the harmonics, produced due to the imbalance in the supply voltages of the compensator.

Keywords— Reactive power compensator, thyristor, firing angles, imbalance, harmonics.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.227>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.227>

Disminución de armónicos en un compensador de potencia reactiva desbalanceado, sintonizando los ángulos de disparo en los tiristores

Francisco D. Pérez Acuña, M.Sc.¹, José A. Jiménez Zavala, M.Sc.², Roberto R. Matheus, M.Sc.³

¹Universidad Latina de Panamá, Panamá, francisco.perez@utp.ac.pa,

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara, México, armandojz@gmail.com

³Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, Roberto.matheus@utp.ac.pa

Abstract— The present work aims to demonstrate the effect of appropriate tuning of the thyristor firing angles in a reactive power compensator on the reduction of the harmonics, produced due to the imbalance in the supply voltages of the compensator.

Keywords—Reactive power compensator, thyristor, firing angles, imbalance, harmonics.

Resumen—En el presente trabajo se pretende demostrar el efecto de disminución de los armónicos que puede producir la sintonización apropiada de los ángulos de disparo en los tiristores de un compensador de potencia reactiva, debidos al desbalance en los voltajes de alimentación de dicho compensador.

Palabras clave—Compensador de potencia reactiva, Tiristores, ángulos de disparo, desbalance, armónicos.

I. INTRODUCCIÓN

El compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC por sus siglas en inglés – *Static Var's Compensator*) es un tipo de dispositivo FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que tiene incorporado controladores basados en electrónica de potencia y otros controladores estáticos para mejorar su operación, contribuyendo a la generación de armónicos en la red [1].

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 en banco de capacitores, falla de transformadores y efectos de resonancia que pueden provocar mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control[2]. Por estas razones se hace necesario un análisis de los armónicos generados por estos tipos de componentes, procurando que los mismos se mantengan dentro de los límites que permitan un funcionamiento adecuado del sistema, tal y como se encuentra establecido en las normas IEEE [3],[4]. Usualmente un SVC trifásico consiste en la conexión de tres SVC monofásicos, los cuales pueden ser conectados en estrella o en delta [5]. Para un sistema que se supone balanceado la conexión en delta es la más apropiada, ya que en dicha conexión se podrá observar que quedan atrapadas las componentes armónicas múltiplos de tres (3ra, 6ta, 9na, etc.) [5], [6].

Para sistemas desbalanceados la conexión en delta no es capaz de filtrar plenamente las componentes armónicas múltiplos de tres. Adicionalmente, no siempre es posible tener un sistema completamente balanceado, dando como

consecuencia que no se pueda lograr el filtrado de los componentes armónicos múltiplos de tres. Por tal razón se incorporan filtros de armónicos para eliminar los componentes armónicos de mayor magnitud, resultando en costos adicionales en la implementación de dichos filtros. Usualmente se suele sintonizar los ángulos de disparo de cada SVC por fase al mismo valor [5], [7], [8], bajo el supuesto de que el sistema se encuentra balanceado, lo cual, como ya se mencionó, no siempre ocurre. Otros enfoques emplean circuitos adicionales a modo de filtros conectados en paralelo al SVC con la intención de eliminar los componentes armónicos y se realizan pruebas cambiando por igual el valor del ángulo de disparo [9].

En el presente trabajo, se adopta un enfoque diferente realizando un estudio mediante variaciones en el ángulo de disparo para cada fase, donde los ángulos pueden o no ser iguales, con la finalidad de contrarrestar los efectos del desbalance.

II. COMPOSICIÓN Y OPERACIÓN DEL SVC

Los dispositivos SVC normalmente están compuestos por bancos de capacitores y reactores controlados por tiristores e interruptores mecánicos, por lo que los mismos representan especies de cargas conectadas en paralelo a algún nodo y entregan o absorben potencia reactiva al sistema dependiendo de su modo de operación para así lograr, principalmente, controlar el voltaje en el nodo en el que se encuentra conectado. La utilidad del SVC estriba en su capacidad para cambiar su capacitancia-inductancia a alta velocidad, haciendo uso de electrónica de potencia. La Figura 1, [1],[10], 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_L controlada por tiristores TC . Su denominación es SVC/TCR-TSC (*Static Var Compensator, Thyristor Controlled Reactor- Thyristor Switched Capacitor*).

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. Haciendo el análisis de Fourier de la onda de corriente, se obtiene como resultado que la magnitud de la misma para la componente fundamental es [10]:

$$I_1 = \frac{V(\sigma - \text{sen}\sigma)}{\pi X_L} \quad (1)$$

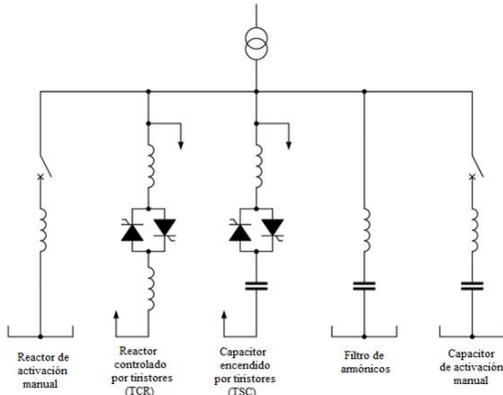


Fig. 1 Esquema de un SVC/TCR-TSC.

El valor de la reactancia efectiva (X_{TCR}) es a conducción total ($\alpha=90^\circ$) es igual a X_L y de circuito abierto ($X_{TCR} = \infty$) con $\alpha=180^\circ$. La reactancia del SVC en función de α sería:

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

La reactancia total por la conexión en paralelo con un capacitor (que puede ser controlado o no) está dada por:

$$X_{SVC} = \frac{\pi X_L X_C}{X_C(2\pi - 2\alpha + \text{sen}2\alpha) - \pi X_L} \quad (3)$$

Los contenidos armónicos de la corriente en el TCR en términos del ángulo de disparo estarían dados por la expresión:

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

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.

II. OPERACIÓN DEL SVC CONECTADO EN DELTA EN CONDICIONES DE BALANCE Y DESBALANCE

Observaremos ahora el comportamiento de los armónicos en el SVC trifásico conectado en delta bajo condiciones de balance y desbalance.

El dispositivo SVC trifásico usualmente se conecta en forma de delta bajo el supuesto de que el sistema se encuentra balanceado y así procurar atrapar los componentes armónicos múltiplos de tres. (3ra, 6ta, 9na, etc.), ya que éstas son de secuencia cero.

El esquema de conexión en delta del SVC para el TCR y el TCS se muestra a continuación en la Figura 2 (a) y 2(b) respectivamente, y para nuestro análisis se tomará en consideración un SVC compuesto de un TCR y un banco

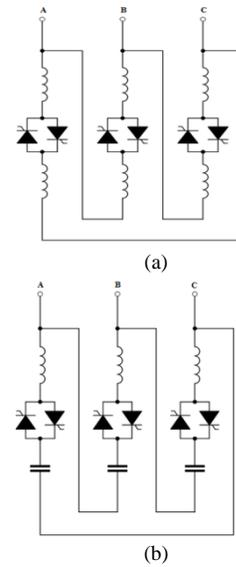


Fig. 2 Esquema de conexión en delta (a) de los reactores TCR y (b) de los capacitores TSC en el SVC.

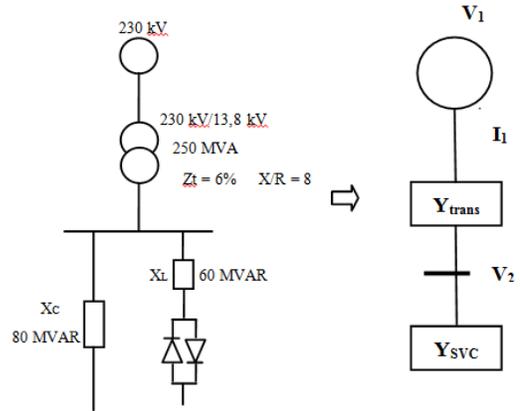


Fig. 3 Diagrama unifilar del SVC conectado a un nodo por medio de un transformador reductor.

capacitivo no controlado conectado a una barra por medio de un transformador, tal como se muestra en la Figura 3 [1],[10].

Para el esquema unifilar del sistema presentado en la Figura 3, el sistema de ecuaciones nodales del circuito equivalente sería el siguiente:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{t,11} & Y_{t,12} \\ Y_{t,21} & Y_{t,22} + Y_{SVC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Resolviendo en términos de V_2 , obtenemos la siguiente expresión:

$$V_2 = (Y_{t,22} + Y_{SVC})^{-1} Y_{t,21} V_1 \quad (6)$$

A continuación se hará un análisis de los contenidos armónicos en la corriente del TCR, en el Voltaje del SVC y en

la corriente del capacitor en los casos de balance y desbalance de voltaje, para observar que, a pesar de la conexión en delta, cuando existe desbalance de voltaje en la barra no se filtran las armónicas múltiplos de 3 [5].

A. Con balance de voltaje en la barra

Para este caso se consideró un ajuste en los ángulos de disparo igual en todas las fases y con un valor de $\alpha=100^\circ$. Los contenidos armónicos de la corriente en el TCR, en el voltaje del SVC y de la corriente del capacitor se muestran en las figuras 4, 5 y 6 respectivamente.

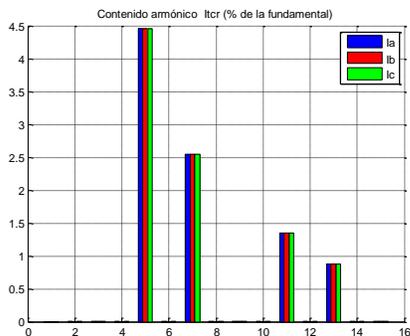


Fig. 4 Contenido armónico de la corriente en el TCR.

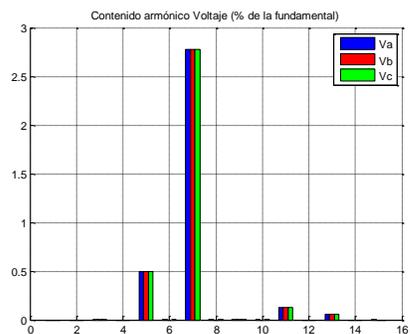


Fig. 5 Contenido armónico del voltaje en el SVC.

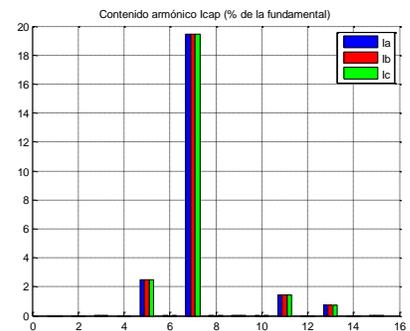


Fig. 6 Contenido armónico de la corriente en el capacitor.

B. Con desbalance de voltaje en la barra

Ahora consideremos el caso de desbalance de voltaje, para lo cual usaremos un desbalance por fases con voltajes de: $V_a=1.0$ p.u., $V_b=0.95$ p.u.; $V_c=1.08$ p.u. (en valores por unidad); Adicionalmente, y como es común, se ajustará el ángulo de disparo para las tres fases a un valor igual y de $\alpha=100^\circ$. Con estos nuevos datos, observaremos los contenidos armónicos de la corriente en el TCR, en el voltaje del SVC y de la corriente del capacitor tal como se muestran en las figuras 7, 8 y 9 respectivamente.

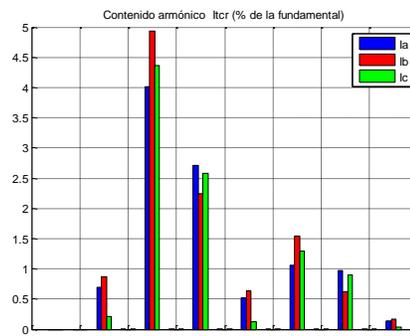


Fig. 7 Contenido armónico de la corriente en el TCR.

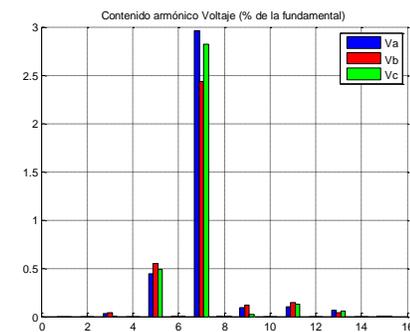


Fig. 8 Contenido armónico del voltaje en el SVC.

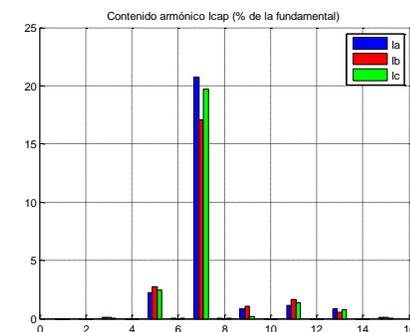


Fig. 9 Contenido armónico de la corriente en el capacitor.

Como se puede observar en el caso desbalanceado, los armónicos múltiplos de 3 no desaparecen, por lo que, dependiendo de su magnitud, se pueden requerir filtros adicionales que eliminen dichas armónicas y que el dispositivo opere dentro del rango establecido por las normas IEEE [3]. Es posible que sólo se requiera un filtro para la tercera armónica por ser la de mayor magnitud, sin embargo estos filtros son bastante costosos, incrementando el costo total de la incorporación de este dispositivo a la red eléctrica.

La norma también establece los límites permitidos de distorsión armónica total (THD) de voltaje y de corriente para este tipo de dispositivos. Estos índices THD para corriente y voltaje están definidos como:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_2^n I_h^2}{I_1^2}} \quad (7)$$

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_2^n V_h^2}{V_1^2}} \quad (8)$$

Donde el subíndice I y V indican corriente y voltaje, respectivamente. Para nuestro análisis tomaremos este índice como una referencia para el nivel de armónicos que existe por fase en cada caso. Se presenta a continuación en la TABLA I el porcentaje de THD de voltajes y corrientes; se presenta la corriente en el TCR, corriente en el capacitor y el voltaje en la barra, para el caso balanceado y el desbalanceado.

Como se puede observar, en el caso desbalanceado se incrementó el THD en algunas de las fases, pudiendo incluso sobrepasar los valores permitidos por las normas. Siendo de especial interés el incremento del THD en el voltaje de la barra.

III. SINTONIZACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE DISPARO EN SITUACIÓN DE DESBALANCE

Bajo la situación de desbalance, que es la más común en las redes eléctricas, se propone en este trabajo hacer una conexión en delta, sin embargo, también se aplica un enfoque de “desbalance” en los ángulos de disparo, para generar otros componentes armónicos en contrafase o armónicos negativos.

TABLA I

A. CASO BALANCEADO			
FASE	I_{tr}	I_{cap}	V_{svc}
A	5.3774	19.638	2.8208
B	5.3774	19.638	2.8208
C	5.3774	19.638	2.8208
B. CASO DESBALANCEADO			
FASE	I_{tr}	I_{cap}	V_{svc}
A	5.1335	20.9032	2.9971
B	5.3911	17.3696	2.5015
C	5.1901	19.9228	2.8606

A este fenómeno, le llamaremos “armónicos destructivos”. Como los armónicos no son más que ondas de frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental, se trata de generar otras ondas de iguales frecuencias pero de amplitudes tales que, al ser sumadas con las armónicas producto del desbalance de voltaje, den como resultado la disminución en magnitud o la anulación de las mismas. En otras palabras, se pretende que las armónicas producidas por el “desbalance” en los ángulos de disparo por fase contrarresten a las producidas por el desbalance de voltaje.

Hemos considerado dos casos de “desajuste” en los ángulos de disparo en una conexión en delta, o más bien dos casos de sintonización de los ángulos de disparo por fase para generar estos armónicos destructivos en el mismo caso de desbalance presentado anteriormente.

A. Caso de sintonización 1: $\alpha_a = 100^\circ$, $\alpha_b = 99^\circ$, $\alpha_c = 98^\circ$

En este primer caso, se pretende variar sólo ligeramente el valor del ángulo de disparo. Al ajustar los ángulos a los valores mencionados, obtenemos los contenidos armónicos en la corriente del TCR, en la corriente en el capacitor y en el voltaje del SVC que se muestran en las figuras 10 a 12, respectivamente.

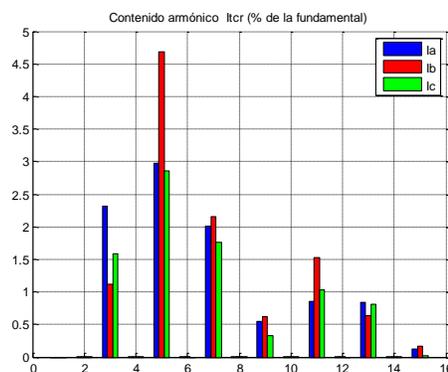


Fig. 10 Contenido armónico de la corriente en el TCR.

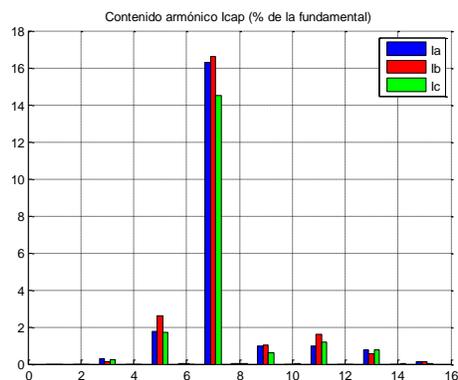


Fig. 11 Contenido armónico de la corriente en el capacitor.

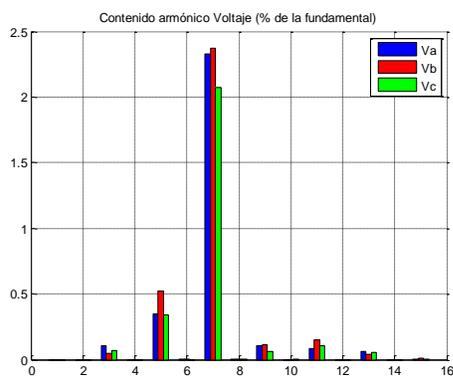


Fig. 12 Contenido armónico del voltaje en el SVC.

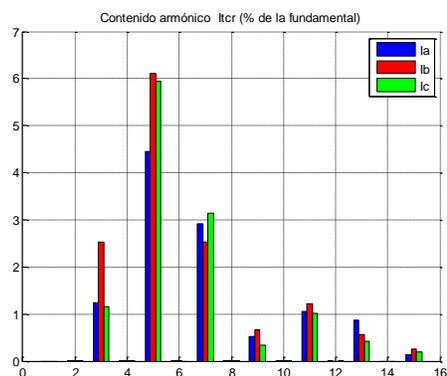


Fig. 14 Contenido armónico de la corriente en el TCR.

B. Caso de sintonización 2: $\alpha_a = 100^\circ$, $\alpha_b = 105^\circ$, $\alpha_c = 98^\circ$

Ahora ajustaremos los ángulos de disparo a estos nuevos valores para observar la variación en los contenidos armónicos en la corriente del TCR, en la corriente en el capacitor y en el voltaje del SVC. Estos contenidos armónicos como porcentaje de la fundamental se muestran en las figuras 14 a 16 respectivamente.

En la Tabla II se muestran los índices de distorsión armónica, donde se han sintonizado los ángulos de disparo a valores diferentes en cada fase frente a una situación de desbalance de voltaje. Se muestran los valores de TDH para la corriente en el TCR, la corriente en el capacitor y el voltaje en el SVC. Se puede observar que en el segundo caso los índices del THD de voltaje y de corriente son mucho mayores que en el caso 1. Además la situación con respecto al caso original de desbalance y ajuste de los ángulos de disparo iguales por fase se empeora en el caso 2, sin embargo hay considerables mejorías en el THD en el caso 1 con respecto a la situación original.

Por lo tanto, sintonizando de manera apropiada los ángulos de disparo por fase en los tiristores se puede disminuir los armónicos producidos por la situación de desbalance de voltaje por fase. Una sintonización no apropiada de los ángulos de disparo puede provocar un efecto contrario en la generación de armónicos, es decir que en vez de disminuir, los mismos pueden aumentar y empeorar el problema.

La sintonización apropiada de estos ángulos de disparo puede evitar la necesidad de agregar filtros para eliminar las armónicas múltiplos de 3 que se originan por el desbalance de fase, economizando un poco la implementación del dispositivo

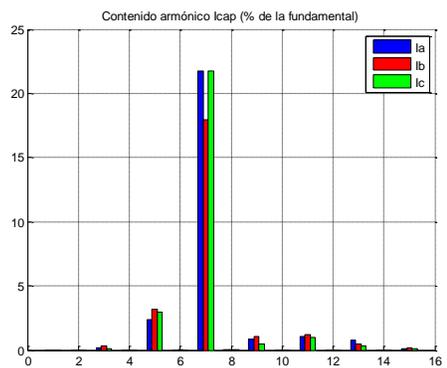


Fig. 15 Contenido armónico de la corriente en el capacitor.

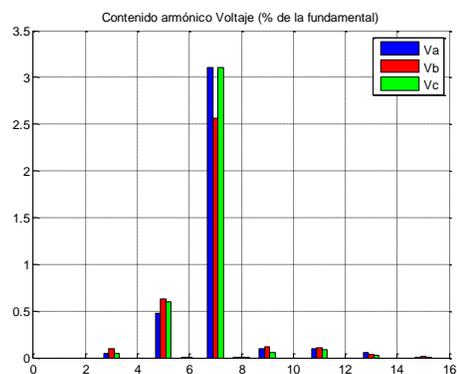


Fig. 16 Contenido armónico del voltaje en el SVC.

TABLA II

A. SINTONIZACIÓN DE α POR FASE, CASO 1			
FASE	I_{tr}	I_{cap}	V_{svc}
A	4.4749	16.4652	2.3609
B	4.9476	16.9176	2.4355
C	3.9298	14.6981	2.1078
B. SINTONIZACIÓN DE α POR FASE, CASO 2			
FASE	I_{tr}	I_{cap}	V_{svc}
A	5.6697	21.9082	3.1437
B	6.9401	18.2707	2.6430
C	6.2912	21.9454	3.1606

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los compensadores de potencia reactiva, al ser dispositivos de tipo no lineal basados en electrónica de potencia, producen armónicos. La conexión en delta de dichos dispositivos trifásicos en la red eléctrica produce la supresión de las armónicas múltiplos de 3 en condiciones de balance en las fases [5]. Sin embargo, en la mayoría de los casos el balance por fase puede no lograrse por lo que se observa la

REFERENCIAS

presencia de dichas armónicas, que pueden ocasionar muchos problemas al aumentar el índice de THD de voltaje o de corriente pudiendo superar los límites permitidos por las normas IEEE y provocando gastos adicionales como la incorporación de filtros para mantener una operación adecuada.

En el presente trabajo se ha podido observar que al sintonizar apropiadamente los ángulos de disparo en los tiristores esta situación se mejora considerablemente, sin embargo la sintonización no apropiada de los mismos puede agravar el problema.

Como líneas futuras de investigación, se propone ahora el desarrollo de los modelos matemáticos apropiados, fundamentados en el conocimiento del comportamiento de este dispositivo, para diseñar un control automático que pueda medir los niveles de desbalance de voltaje por fase y producir el ajuste o la sintonización apropiada de los ángulos de disparo en los tiristores, de manera tal que se reduzca el nivel de armónicos producido por dicho desbalance y no se tenga que recurrir a la incorporación de filtros. Además, en esta misma dirección de ideas, se propone utilizar dicho modelo para estudiar el efecto en los contenidos de 5ta y 7ma armónica que son muy comunes en estos dispositivos en situaciones incluso de balance de voltaje por fase.

- [1] F.D. Pérez Acuña, R.R. Matheus and N. A. Manduley Rivas, "El compensador estático de potencia reactiva y su efecto en la red eléctrica en estado estable", CIINDET IEEE, marzo 2015, Cuernavaca, México
- [2] F. C. De La Rosa, *Harmonics and Power Systems*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1992.
- [4] T. M. Blooming and D. J. Carnovale, "Application of IEEE Std 519-1992 harmonic limits," Proc. IEEE Pulp Paper Ind. Tech. Conf., 2006, pp. 1-9.
- [5] F.D. Pérez Acuña and R.R. Matheus "Análisis de armónicos de un compensador estático de potencia reactiva bajo diferentes condiciones conexión y operación" CIINDET IEEE, marzo 2015, Cuernavaca, México
- [6] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 2003.
- [7] D. R. Patil and U. Gudar, "Firing angle range control for minimizing harmonics in TCR employed SVCs," World Academy of Science, Engineering & Technology, Vol. 5, No. 8, pp. 99-108 Aug. 2011.
- [8] F.D. Pérez Acuña and J. A. Jiménez Zavala, "Análisis de armónicos en un compensador estático de VAR's (SVC) usando modelado en dominio armónico (HarmonicDomain)," LACCEI Aug. 2013, Cancún, México.
- [9] A. M. Obais and J. Pasupuleti, "Design of an almost harmonic-free TCR," Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 288-395, 2014.
- [10] E. Acha and M. Madrigal, *Power System Harmonics: Computer Modeling and Analysis*, Jhon Wiley & Sons Ltd, 2001.