

ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN STATCOM MONOFÁSICO UTILIZADO PARA MEJORAR LAS CARACTERÍSTICAS DE ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Miguel Ángel Hernández Figueroa¹, Jesús Martínez Patiño², Heriberto Gutiérrez Martín^{1,2}, Ana Isabel Orozco García¹, Bárbara González Rolón², Eduardo Lujan Villalpando¹.

¹Universidad DeLaSalle Campus Salamanca Escuelas de Ingeniería.

²Universidad de Guanajuato División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca

Email: mahfigueroa@gmail.com.mx, aiorozco@delasalle.edu.mx, hgmartin@ugto.mx

RESUMEN.

El enfoque de este trabajo esta orientado a la descripción sobre el análisis para obtener el modelo matemático y realizar la simulación de los Sistemas STATCOM. Se desarrolla el modelo matemático, se comprueba basándose en software especializado y se corroboran las técnicas de control empleadas, haciéndose énfasis en las que se basan en la Modulación de Ancho de Pulso (PWM). A su vez se realiza la una comparación con los Compensadores estáticos de Var (SVC), para realizar una recomendación a la hora de decidir cual emplear. Se hace un uso extensivo de las potencias reactivas en el sistema para mejorar el factor de potencia (FP).

Palabras Clave: Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS), Inversor Alimentado por Voltaje (VSI), Compensador Estático de Var (SVC), Modulación de Ancho de Pulso (PWM).

1. INTRODUCCIÓN.

En un sistema eléctrico de potencia existe una estrecha relación entre las características de carga conectadas al sistema y las variables que definen su punto de operación. Cuando en el sistema eléctrico de potencia se tienen cargas inductivas y/o capacitivas conectadas produce un deterioro en la eficiencia de operación del sistema, elevando las pérdidas en las líneas de transmisión las cuales repercuten en desviaciones de voltaje y del factor de potencia. En tal caso es necesario corregir el factor de potencia realizando la compensación de la potencia reactiva del sistema [1].

Tradicionalmente, los capacitores síncronos y bancos de capacitores/inductores conmutados mecánicamente han sido usados para compensar los Var (Voltajes-Corrientes Reactivos) y corregir el factor de potencia (FP). A sus sucesores, los compensadores estáticos de Var ya basados en tiristores, se les considera como si se trataran de reactancias variables, los cuales se comportan como fuentes controladas [2].

El avance tecnológico que experimentaron los tiristores en alta potencia y de los circuitos electrónicos, provocó el desarrollo de estas fuentes estáticas controladas para compensar Var, las cuales fueron llamadas generadores de Var [3]. Estos sistemas usan capacitores o inductores en unión con tiristores de encendido/apagado o de interruptores controlados por fase. Su aceptación ha sido grande debido principalmente a su costo, además de las características técnicas tales como: su rápida respuesta en el tiempo, flexibilidad de control y una operación

continua, y reducción en mantenimiento del sistema [4]. La aplicación de arreglos relativamente simples con interruptores a base de tiristores para variar la impedancia efectiva de una red pasiva, se llevaron acabo durante el fin de los 70s y principios de los 80s, con el fin de corregir el factor de potencia, conectando o desconectando bancos de capacitores/inductores, o controlando el flujo de corriente en la red.

Los trabajos relacionados con el desarrollo de sistemas de compensación de Var para la década de los 80s se enfocaron al análisis y diseño de compensadores síncronos trifásicos de Var de estado sólido (SSVC), los cuales empleaban la modulación en ancho de pulso (PWM) como una parte de la técnica de control y al inversor trifásico alimentado por voltaje (VSI) o por corriente (CSI) como parte de la estructura principal del compensador. Estos sistemas SSVC presentan la capacidad de compensar y mejorar los factores de potencia de las líneas de transmisión las cuales presentan factores con desplazamientos de atraso o de adelanto dependiendo del tipo de carga conectada a esta. Después de varios años se llego al desarrollo de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) y dentro de estos se encuentra el compensador síncrono estático (STATCOM) el cual es objeto de estudio y análisis de este trabajo.

Un STATCOM es un dispositivo de compensación estático, cuyo funcionamiento se basa en un convertidor que modula una fuente de tensión de la amplitud y frecuencia deseada. A través del control del convertidor, esta fuente se construye de manera que genera o consume la potencia reactiva requerida. Estos dispositivos son capaces de generar o absorber potencia reactiva sin necesidad de contar, dentro de su estructura, con elementos que almacenen potencia reactiva, como es el caso del compensador estático de Var (SVC) [5].

En este trabajo se presenta el modelo matemático general de un SVC y las diversas maneras de controlarlo, se detalla a su vez diferentes enfoques de funcionamiento y se enfatizan recomendaciones para trabajos futuros en esta área.

1.1. Estructura del Compensador STATCOM.

El presente trabajo esta enfocado al análisis de un compensador monofásico alimentado por voltaje (SVC), el cual esta basado para su operación en un inversor alimentado por voltaje (VSI) y que en conjunto se denomina STATCOM.

El análisis a su vez esta basado en un modelo de capacitancia infinita y es considerado como un modelo ideal. En la figura 1, se muestra el circuito equivalente para el STATCOM monofásico basado en un inversor alimentado por voltaje VSI.

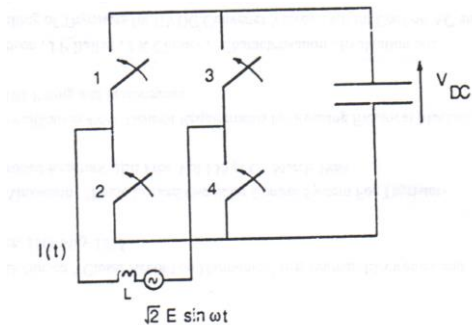


Figura 1 Circuito equivalente para el STATCOM monofásico basado en un VSI.

Se considera que el capacitor que alimenta al inversor es infinito y por consecuencia el voltaje del lado de CD es constante. El voltaje en las terminales del inversor es una onda cuadrada de magnitud V_{CD} como se muestra en la figura 2.

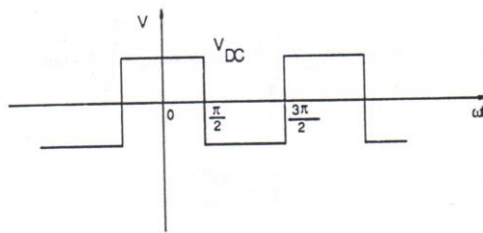


Figura 2 Forma de onda de voltaje del inversor con capacitancia infinita.

A su vez cuando se observa desde el sistema de potencia de corriente alterna (CA) el circuito inversor funciona como una fuente de voltaje de CA la cual produce la señal de voltaje fundamental y a su vez las armónicas, esto puede ser observado a manera de diagrama en la figura 3.

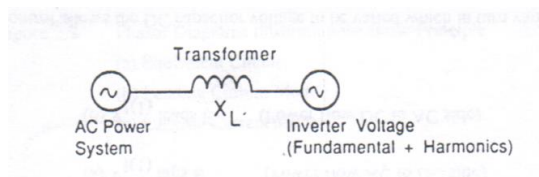


Figura 3 VSI-SVC conectado a un sistema de potencia de CA.

La estructura fundamental del dispositivo STATCOM esta conformada por un VSC y un transformador de acoplamiento que se utiliza como enlace con el sistema eléctrico de potencia SEP, como se muestra en la figura 4.

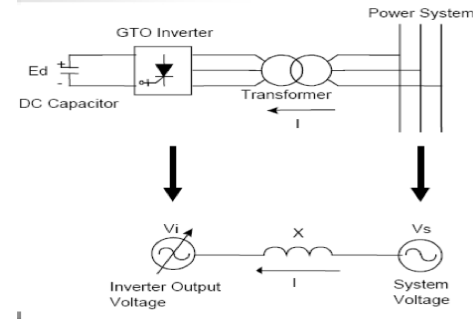


Figura 4 Estructura fundamental de un STATCOM.

Una manera de ilustrar gráficamente este procedimiento es por medio del diagrama fasorial mostrado en la figura 5.

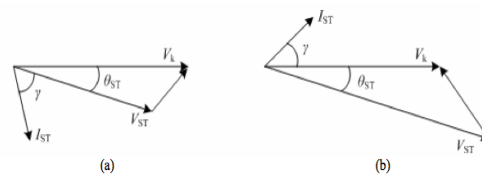


Figura 5 Funcionamiento básico de un STATCOM.
 a) comportamiento inductivo b) comportamiento capacitivo.

En base a la figura 5, si el voltaje generado en las terminales del STATCOM es menor que el voltaje existente en el nodo del SEP donde se conecta, el comportamiento del STATCOM será similar al de una carga inductiva, consumiendo potencia reactiva del SEP[6]. Por el contrario, el STATCOM se comportará como una carga capacitiva, suministrando potencia reactiva al SEP [7]. Sería impropio conectar las terminales del VSC directamente al SEP, el cual generalmente tiene una capacidad de corto-circuito mucho más grande que la del VSC. Por esta razón, siempre existe un transformador de acoplamiento entre las terminales del STATCOM y nodo del SEP. Con este modelo se puede realizar todo el análisis matemático el cual se encuentra detallado en el siguiente punto.

2. Desarrollo Analítico y Resultados.

Para poder comprender el comportamiento general del sistema es importante comprender las señales que están siendo utilizadas. Resulta evidente que la señal de CA esta conformada primordialmente por la componente fundamental pero a su vez existen otras señales llamadas armónicas, estas pueden manifestarse de diversas maneras por ejemplo, calor vibraciones, ruido, etc.

Cualquier forma de onda cuya característica sea periódica puede ser descrita por la serie de Fourier la cual contiene componentes de CD y un número de términos de senos y coseno.

La expresión general de la serie de Fourier es:

$$F(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + b_n \sin nx \quad (1)$$

La forma de onda también muestra media simetría de la onda por lo tanto:

$$a(n) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v(wt) \cos nwt dwt \quad (2)$$

donde $v(wt)$ es el voltaje en las terminales del inversor.

$$\begin{aligned} a(n) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_{CD} \cos nwt dwt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} -V_{CD} \cos nwt dwt \\ &= \frac{4V_{CD}}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

La componente fundamental *rms* del voltaje en las terminales del inversor:

$$(n = 1) = \frac{4V_{CD}}{\sqrt{2}\pi} = 0.9V_{CD} \quad (4)$$

La *n*-armónica del voltaje en las terminales del inversor es:

$$= \frac{0.9V_{CD}}{n} \quad (5)$$

para $n = 3, 5, 7, 9$ etc.

Componente Fundamental de la Corriente Reactiva de CA.

En la figura 6 se muestra el circuito equivalente del STATCOM para una frecuencia fundamental. Se considera que el sistema de CA tiene una capacidad infinita y por lo tanto una impedancia cero.

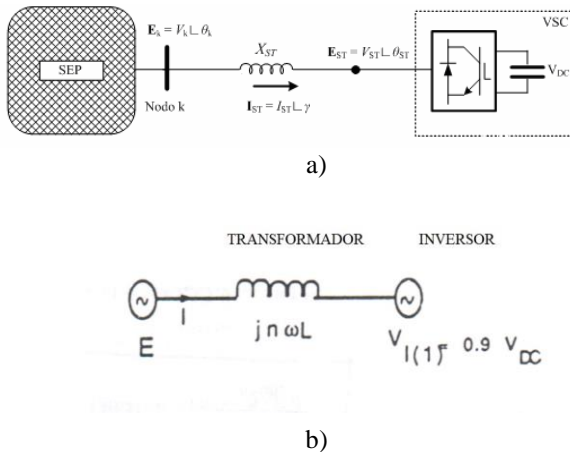


Figura 6 a) Estructura fundamental de un STATCOM, b) Circuito equivalente para una frecuencia fundamental.

En este circuito se considera que no existen pérdidas y por lo tanto el voltaje de salida del inversor y el voltaje del sistema de CA casi están en fase. La componente fundamental *rms* de la corriente reactiva está dada por:

$$I(1) = \frac{\text{Voltaje del sistema de CA} - \text{Voltaje en las Terminales del Inversor}}{\text{Reactancia del Transformador}} \quad (6)$$

$$I(1) = \frac{E - 0.9V_{CD}}{j\omega L} \quad (6)$$

Corrientes Armónicas de CA.

A_0 es cero para los valores pares de n . Para valores *impares* de n , la magnitud de las armónicas del voltaje (*rms*) en las terminales del inversor están dadas por la ecuación 6.

La magnitud de las armónicas de corriente generadas por el SVC están dadas por:

$$|I(n)| = \frac{0.9V_{CD}}{n^2 \omega L} \quad (7)$$

La figura 7 muestra la gráfica de la componente fundamental de la corriente reactiva y sus armónicas que la acompañan.

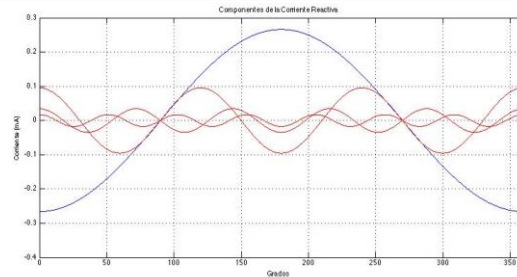


Figura 7 Componente fundamental y armónicas.

En la figura 8 se puede observar que seleccionando un valor de voltaje se pueden obtener las corrientes de atraso y de adelanto respectivamente.

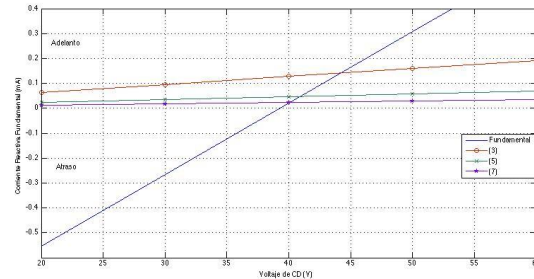


Figura 8 Corrientes y Armónicas vs voltajes de CD.

Formas de Onda de las Corrientes de CA.

Una expresión que describa las formas de onda de las corrientes de CA se encuentra considerando el voltaje a través de la inductancia del transformador. Sobre el periodo $0 < wt < \pi$ el voltaje a través del circuito de inductancia es:

$$V_L = \sqrt{2}E \sin wt - V_{CD} = L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}E \sin wt - V_{CD} \quad (9)$$

por lo tanto.

$$i(t) = \frac{-\sqrt{2}E \cos wt}{\omega L} - \frac{V_{CD} t}{L} + K \quad (10)$$

K se obtiene dado que la componente fundamental y las armónicas de corriente son iguales a cero en $wt = \frac{\pi}{2}$ por lo que $i(t) = 0$ en $wt = \frac{\pi}{2}$, por lo tanto es posible determinar a

$K = \frac{V_{CD}\pi}{2wL}$. La forma de onda de la corriente de CA para el periodo $0 < wt < \pi$ esta dada por:

$$i_1(t) = \frac{-\sqrt{2}E\cos wt}{wL} - \frac{V_{CD}t}{L} + \frac{V_{CD}\pi}{2wL} \quad (11)$$

Para el periodo $\pi < wt < 2\pi$, será la negativa de la corriente descrita por la ecuación 11 debido a que el voltaje a través del circuito inductivo es inverso por lo que se tiene:

$$i_2(t) = \frac{-\sqrt{2}E\cos(wt-\pi)}{wL} - \frac{V_{CD}(t-\frac{\pi}{\omega})}{L} + \frac{V_{CD}\pi}{2wL} \quad (12)$$

de acuerdo a la simulación realizada con el programa Matlab las formas de onda esperadas son las que se muestran en la figura 9.

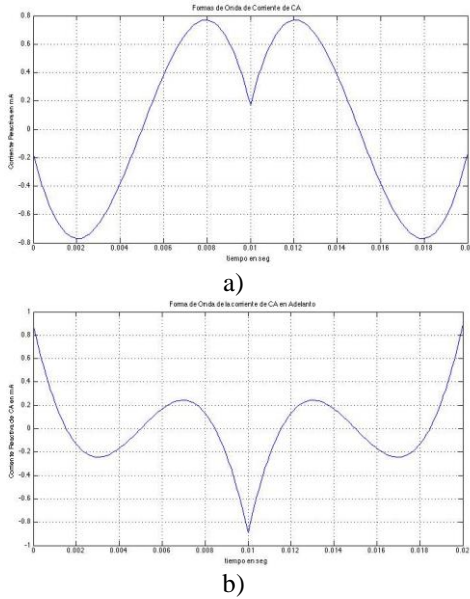


Figura 9 Formas de onda de la Corriente esperadas a) atraso, b) adelanto.

La corriente de apagado de los elementos de conmutación (operación de corriente en adelanto) se obtiene de la ecuación 11, sustituyendo a $t = 0$ por lo cual resulta.

$$I_{t_{off}} = \frac{1}{wL} \left(\frac{V_{CD}\pi}{2} - \sqrt{2}E \right) \quad (13)$$

Corriente del Capacitor de CD.

La corriente del capacitor es igual a la corriente de CA para el periodo $0 < wt < \pi$ e igual a la corriente negativa de CA para el periodo $\pi < wt < 2\pi$. Consecuentemente la corriente del capacitor es repetitivamente el doble para la frecuencia del sistema de CA y un periodo de la forma de onda esta dada por la ecuación 11 y 12. El pico de la corriente del capacitor esta dado por la ecuación 13.

Voltaje del Capacitor de CD.

El análisis anterior está basado en la consideración de que el valor de la capacitancia usada es infinita y que el capacitor no presenta voltajes de rizo. En la practica el valor del capacitor debe ser muy grande pero no infinito. Se ha derivado una

ecuación aproximada que describe la forma de onda del capacitor considerando que la corriente del capacitor no cambia significativamente por la obtenida de la ecuación 11 y 12.

El voltaje del capacitor de CD está dada por:

$$v_C = V_0 + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (14)$$

donde V_0 es el voltaje del capacitor en $t = 0$.

El voltaje del capacitor se encuentra integrando la ecuación 11. Sobre el periodo $0 < wt < \pi$, el voltaje CD del capacitor es igual a:

$$v_C = V_0 - \frac{\sqrt{2}E\cos wt}{w^2LC} - \frac{V_{CD}t^2}{2LC} + \frac{V_{CD}\pi t}{2wLC} \quad (15)$$

El valor de V_0 se encuentra integrando la ecuación 15, obteniéndose la componente del voltaje promedio y la equivalencia de V_{CD} .

$$V_{CD} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (16)$$

donde T es el periodo de la forma de onda por lo tanto:

$$V_{CD} = \frac{w}{\pi} \int_0^{\pi} V_0 - \frac{\sqrt{2}E\cos wt}{w^2LC} - \frac{V_{CD}t^2}{2LC} + \frac{V_{CD}\pi t}{2wLC} dt \quad (17)$$

$$= \frac{w}{\pi} \left[V_0 t + \frac{\sqrt{2}E\cos wt}{w^3LC} - \frac{V_{CD}t^3}{6LC} + \frac{V_{CD}\pi t^2}{4wLC} \right] \frac{\pi}{w} \quad (18)$$

$$V_0 = V_{CD} + \frac{2\sqrt{2}E}{\pi w^2LC} - \frac{V_{CD}\pi^2}{12w^2LC} \quad (19)$$

Para realizar las pruebas se evaluaron los valores de voltaje que podrían ser observados en el capacitor usando diversos valores, el rango de alimentación fue igual a $\frac{50}{\sqrt{2}}V_{CA}$, el inductor utilizado fue de 150 mH, al observar las curvas obtenidas se predice un atraso a 30.1V y un adelanto de 40.7V en estos valores se realizaron las pruebas y con estos se obtuvieron las curvas, para todos los otros valores intermedios se tiene un suministro de o absorción menor o mayor dependiendo de la situación y se observa el punto de inflexión a los 40.1V, allí se tendrá en teoría un balance y el STATCOM estaría en un estado de reposo u observación en espera de algún cambio. Al revisar lo anterior resulta evidente que para lograr el suministro o absorción de la energía en el sistema tiene que existir un indicador que le diga al STATCOM que hacer, diversas técnicas han sido usadas, la que se aplica en este caso fue la basada en la selección de armónicas para su eliminación denominada SHEM por sus siglas en ingles. Esta técnica va acompañada de PWM, esta modulación de ancho de pulso permite de acuerdo a las necesidades seleccionar lo que se requiera hacer, puede hacerlo de diversas maneras, la que se empleo fue basada en un selector de patrones predefinidos, estos patrones tienen la información necesaria para indicar el porcentaje de carga o suministro que se tiene que realizar, estos patrones van desde el 30% hasta el 91% del valor de la componente fundamental del voltaje, estos patrones se cargan en una memoria EPROM o en una PIC. Las variables de control para esto son los voltajes (ya sea en la carga o en el bus de comunicación) y la fase θ_{ST} . La figura 10, muestra las señales de voltaje-corriente

y el ángulo de desfase θ_{ST} que existe entre ellas y que en conjunto se pueden tomar como variables de control [8].

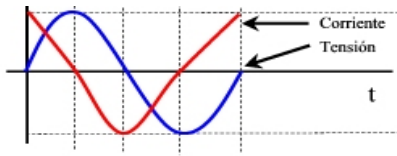


Figura 10 Señales que pueden ser utilizadas para control

Es importante comentar el efecto de las armónicas en la señal y porque la eliminación de las armónicas impares, esto es debido a que la señal que acompañan es una señal impar, por lo mismo se selecciona las de tercer, quinto, séptimo..., etc. La figura 11, muestra los porcentajes de la componente fundamental de voltaje de acuerdo con el patrón seleccionado.

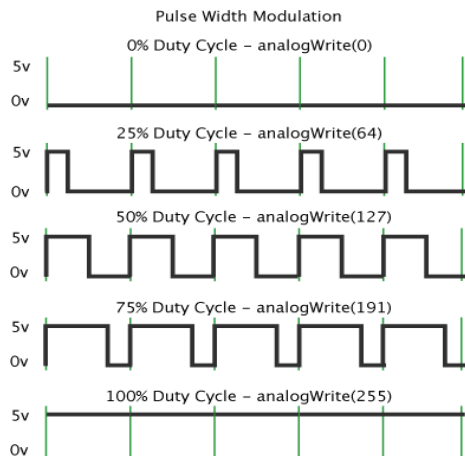


Figura 11 patrón predeterminado con valores de carga de 30% a 91%, permitirá compensar o absorber la potencia reactiva.

Para trabajos futuros en este campo. Con el fin de complementar de mejor manera esta selección de armónicas en conjunto con la técnica de control se puede hacer la recomendación de utilizar el empleo de **Lógica Difusa**, o en un nivel más básico la integración de componentes en un micro-controlador, para poder observar el comportamiento a nivel local.

3. CONCLUSIONES.

El estudio de sistemas de alto perfil como lo es el análisis y el conocimiento del principio de operación de un STATCOM que brinda una capacidad de servicio tan grande es algo que nos presenta un escenario muy amplio sobre su estudio y aplicación en el área de la Ingeniería. En ocasiones se piensa que son aspectos y estudios que están fuera de nuestro alcance por lo cual se importa la tecnología de dicho sistema, cuando los estudiantes de licenciatura en Ingeniería se enfrentan a este tipo de estudios con la finalidad de resolver un problema real se sorprenden cuando los resultados que arrojan tanto la teoría

como la práctica coinciden en un alto grado. En base al trabajo realizado se puede decir que un STATCOM posee mejores características que un Compensador Estático de Voltaje (SVC). En un STATCOM la corriente de salida no está afectada por el voltaje, este suministra corriente de manera constante y su salida reactiva no es afectada, a diferencia de un SVC donde la salida reactiva es proporcional al cuadrado de la magnitud de voltaje. Esto se traduce en menor estabilidad, también la emisión armónica en un STATCOM es menor que un SVC pero entonces ¿por qué existen más SVC que STATCOM? la respuesta es muy sencilla, el costo. Refiriéndose a la parte técnica la comprobación del modelo matemático es muy prometedora se planea continuar con esta línea y armar un prototipo físico para comprobar la parte real. Otro punto importante es el hecho de que la selección de patrones puede no ser lo óptimo e investigando se pueden observar otras técnicas de control más avanzadas van desde el empleo de sensores de alta tecnología y selectores basados en inteligencia artificial.

4. Referencias.

- [1] Hernández Figueroa Miguel Ángel Diseño e implementación del prototipo de un ASVC con seccionador de voltaje de CD. Instituto Tecnológico de Morelia Michoacán. Tesis de Doctorado. Año 2007.
- [2] Laszlo Gyugyi Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits, IEEE Transaction Ind. Appl., vol. IA-15 no. 5, pp. 521-532, Sep/Oct 1979.
- [3] C.W. Edward K.E. Mattern, E.J. Stacey, P.R. Nannery, and J. Gubernick, Advancesd Static VAR generator employing GTO Thyristor, IEEE Trans., Power Delivery, vol. 3, no.4, pp. 1622-1627. Oct 1998.
- [4] D. West Static Reactive Power Compensator with Self-Commutated Inverter at a Low Switching Frequency. In Euro Power Eletron. Conf. Rec., Firence, vol. 3, pp. 70-75, año 1991.
- [5] N.G. Hingorani and L. Gyugyi Understanding FACT; Concepts and Technology of Flexible AC transmission. Institute of Electrical and Electronic Engineers. New York. Año 2000.
- [6] Murillo Pérez José Luis, Análisis del STATCOM trifásico en estado estacionario y dinámico para la estabilidad, CINVESTAV Guadalajara, Tesis de maestría, Año 2005.
- [7] Y.H. Song and A.T. Johns editors, Flexible AC Transmission System (FACTS).The Institution of Electrical Engineers. United Kingdom. Año 1999.
- [8] Calvillo González Sergio, Hernández Figueroa Miguel Ángel Hernández Figueroa, Estudio y Desarrollo del Control para un STATCON utilizado en la calidad de la energía de los sistemas eléctricos y energéticos. Veranos de la Investigación Científica Universidad de Guanajuato. Año 2011.