

CAPÍTULO IV

EL COMPENSADOR ESTÁTICO (STATCOM)

4.1 Introducción.

Debido al complejo crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia alrededor del mundo y a la gran necesidad de suministrar una energía segura, estable, controlada, económica y de alta calidad se considera que los controladores FACTS tomarán un papel muy relevante en la evolución y desarrollo de los sistemas de potencia en un futuro no muy lejano.

En capítulos anteriores se ha hecho referencia a la tecnología de los compensadores de potencia y se ha estudiado al Compensador Estático de VAR's (SVC), como una de las distintas alternativas con las que se cuenta para dar solución a los problemas relacionados con la compensación de potencia reactiva dentro de un SEP. En la actualidad, se cuenta con herramientas más poderosas que han surgido a raíz de los constantes avances técnicos y tecnológicos.

Pertenecientes a la familia de los controladores FACTS encontramos nuevas alternativas capaces de cubrir las necesidades del sistema tal como son los compensadores que basan su construcción y funcionamiento en fuentes conmutada de voltaje (VSC), entre estos podemos encontrar:

- El Compensador Estático Síncrono (STATCOM).
- El Compensador Estático Síncrono Serie (SSSC).
- El Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC).
- La Transmisión de Alto voltaje en Corriente Directa (HVDC)

En este capítulo se presenta la descripción y el principio de operación del Compensador Estático Síncrono.

4.2 FACTS Basados en Dispositivos Semiconductores Controlables.

Los circuitos electrónicos de potencia conformados por tiristores convencionales se han utilizado ampliamente en aplicaciones de transmisión de potencia desde los años

setenta [4]. Las primeras aplicaciones fueron empleadas en el área de transmisión HVDC, pero la compensación rápida de potencia reactiva en derivación, usando inductores y condensadores controlables, pronto ganó una gran aceptación [18].

Actualmente, se ha aprovechado la velocidad de respuesta de los compensadores que emplean tiristores, para variar la longitud de líneas de transmisión eléctrica, logrando una compensación casi sin retardo, en lugar del clásico capacitor en serie el cual es controlado mecánicamente. En las aplicaciones dentro de una red de distribución, la transferencia de potencia empleando elementos de estado sólido es utilizada para mejorar la fiabilidad del suministro a cargas críticas [19].

Los sistemas modernos de controladores de potencia están basados en convertidores de CA/CD y/o convertidores de CD/CA y/o en interruptores de alta corriente, y demás dispositivos auxiliares. En conjunto, estos elementos son capaces de generar potencia reactiva y/o potencia activa, sin la necesidad de implementar grandes bancos para el almacenamiento de energía, como en el caso de los sistemas SVC. [4]

Los transformadores, interruptores y demás dispositivos son conectan en serie o paralelo para obtener el controlador deseado. Los dispositivos semiconductores empleados en esta nueva generación de convertidores electrónicos de potencia tienen un control total, puesto que basan su construcción en dispositivos controlables tales como el Transistor Bipolar con Compuerta Aislada, (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor), y el Tiristor con Compuerta de Apagado, (GTO, Gate Turn-off). La capacidad nominal de los controladores de electrónica de potencia se encuentra dentro del rango de 8 kV a 10kV para el tiristor, 5 kV a 8kV para el GTO y de 3 kV a 5 kV para los IGBT's. En la Figura 4.1a) y 4.1b) se muestra el símbolo para el GTO e IGBT respectivamente.

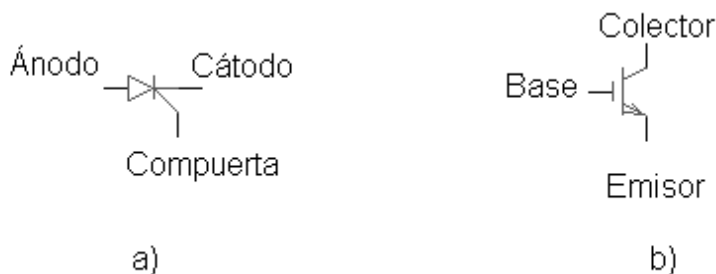


Figura 4.1 Símbolo general de: a) GTO e b) IGBT.

El GTO es una versión más avanzada del tiristor convencional, ya que ofrece la ventaja de que puede ser encendido por un solo pulso positivo en la compuerta (gate), y apagarse por un pulso negativo en la misma terminal. En la actualidad, la máxima frecuencia de conmutación de un GTO es posible en el orden de 1kHz. [20]

En cambio, el IGBT es uno de los elementos más desarrollados dentro de la familia de los transistores que son empleados para la transmisión de energía. Es el dispositivo más popular y utilizado en el ámbito de CA. Los convertidores destinados a aplicaciones dentro de sistemas de potencia han comenzado a utilizar IGBT's, debido a la velocidad de transición del estado de conducción al estado de bloqueo. En la Tabla 4.1 se muestran las principales características de ambos dispositivos.

Característica	GTO	IGBT
Voltaje pico de bloqueo kV	6.0	3.3
Corriente controlable/ kA	6.0	1.2
Pérdidas de voltaje V	4.0	4.4~4.8
Tiempo de encendido μ s	6.0	3.0
Tiempo de apagado μ s	30.0	2.5
Diámetro in	6	

Tabla 4.1 Características principales de funcionamiento de los GTO e IGBT convencionales.

En base a su principio de funcionamiento, el cual detallaremos más adelante, los convertidores pueden ser agrupados como una fuente de voltaje (normalmente un capacitor) o una fuente de corriente (normalmente una fuente de tensión en serie con un inductor), debido a que su entrada es una señal de CD. Por razones económicas y por su rendimiento, la mayoría de los controladores de potencia reactiva basan su operación en la “Fuente Conmutada de Voltaje” (VSC, Voltage Source Converter).

4.3 Fuente Conmutada de Voltaje, (VSC).

En la actualidad se utilizan diferentes VSC para la operación de los sistemas de transmisión como: el convertidor de una fase de dos niveles, el convertidor trifásico de dos niveles y el convertidor trifásico de tres niveles. Otros tipos de VSC se basan en combinaciones de la topología de punto natural anclado y en sistemas basados en anclaje multinivel [6,30]. El principio de operación de los convertidores es el de reducir al mínimo la frecuencia de operación de los semiconductores dentro del VSC para producir una forma de onda de tensión senoidal de alta calidad con los

mínimas o nulos requerimientos de filtrado. A modo de ejemplo, de un VSC trifásico de tres niveles con conmutadores IGBT se ilustra en la Figura 4.2 [20, 22].

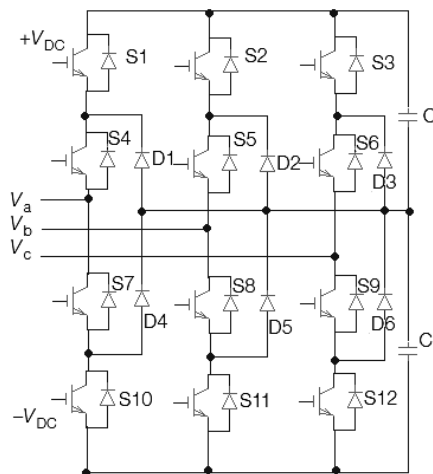


Figura 4.2 VSC trifásico de tres niveles con conmutadores IGBT.

Esta configuración consiste en doce conmutadores (S1-S12) de semiconductores de tipo auto conmutable, cada uno de los cuales es puesto en derivación por un diodo conectado en paralelo, y seis diodos (D1-D6) conectados en derivación entre el punto medio del capacitor y el punto medio de cada par de conmutadores. Conectando la fuente de DC secuencialmente a las terminales de salida, el convertidor puede producir un conjunto de tres formas de tensión cuasicuadradas de una frecuencia determinada.

La frecuencia, amplitud y fase de la tensión de AC puede ser variada mediante un control adecuado de los conmutadores. Por consiguiente, la fuente conmutada de tensión puede ser considerada como una fuente de tensión controlable.

Las válvulas de un convertidor de tensión actúan como conmutadores. Los voltajes de fase con respecto al punto medio del condensador pueden tener tres valores distintos:

1. $V = +V_{DC}$
2. $V = 0$
3. $V = -V_{DC}$

Debe tenerse en cuenta que, por cada una de las fases, sólo uno de los dos conmutadores puede estar activado en un momento dado, ya que de lo contrario el enlace de DC sufriría un cortocircuito. [22].

Las estrategias actuales de conmutación de la VSC pueden ser clasificadas en dos principales categorías: [23]

- Frecuencia de conmutación fundamental: La conmutación de cada dispositivo semiconductor se limita a un encendido y un apagado por ciclo. Con éste método de conmutación se produce una onda cuasicuadrada la cual tiene un alto contenido armónico inaceptable, por lo que es habitual utilizar varias fuentes conmutadas de voltaje de seis pulsos (Figura 4.3), dispuestas a formar una estructura multi-pulsos y con ello lograr mejor calidad en la forma de onda, como las que se muestran en la Figura 4.4.

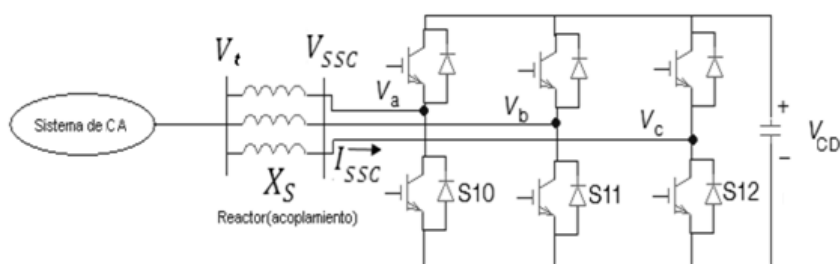


Figura 4.3 VSC de seis pulsos.

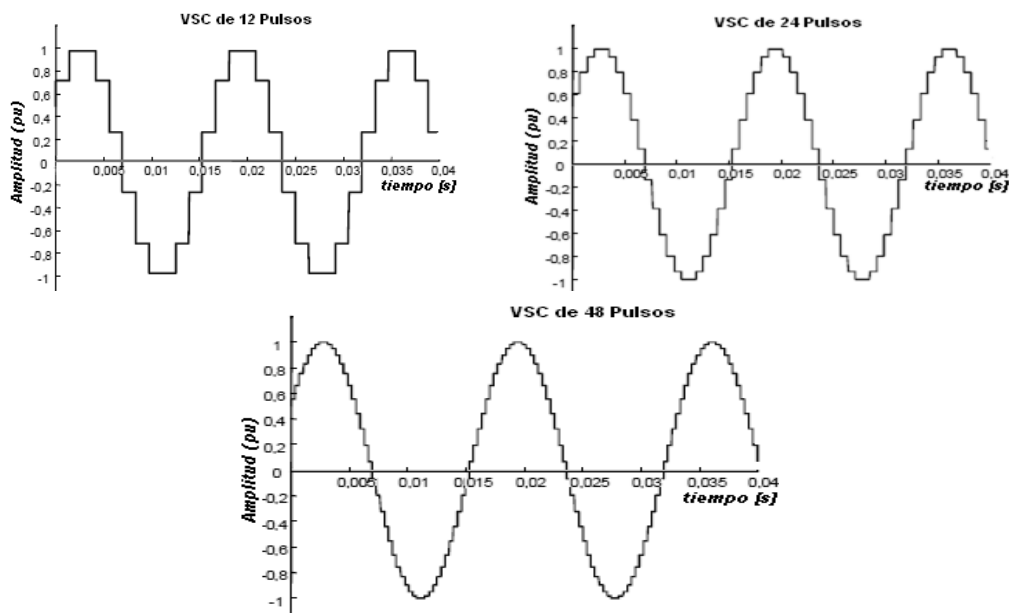


Figura 4.4 Formas de onda para distintas configuraciones de VSC.

Además de conseguir una mejor señal, cabe mencionar que entre mayor sea el número de pulsos de la fuente conmutada, se reducirá de una manera muy significativa el contenido de armónicos de bajo orden, reduciendo así el factor de

distorsión armónica (TDH), esto impactará directamente en el aspecto económico del equipo. [4, 7, 26].

La conmutación, debido a la frecuencia fundamental, requiere de complejos arreglos de transformadores para conseguir un nivel de distorsión aceptable en la forma de onda. Esta desventaja es compensada por la velocidad de conmutación de los semiconductores y por las bajas pérdidas de energía que se presentan.

- Modulación por ancho de pulso: También conocida como PWM (Pulse Width Modulation), permite controlar la conmutación en el encendido y el apagado de los semiconductores. Señales senoidales son usadas como referencia para construir la señal de potencia y la diente de sierra para establecer en qué instantes se deben encender y apagar los dispositivos, ver Figura 4.5. Como resultado de la modulación, los armónicos indeseables en la onda se desplazan a frecuencias más altas y los requisitos de filtrado son mucho más reducidos. Por su simplicidad y eficacia, la técnica de control PWM ha sido la más empleada para las VSC. [20].

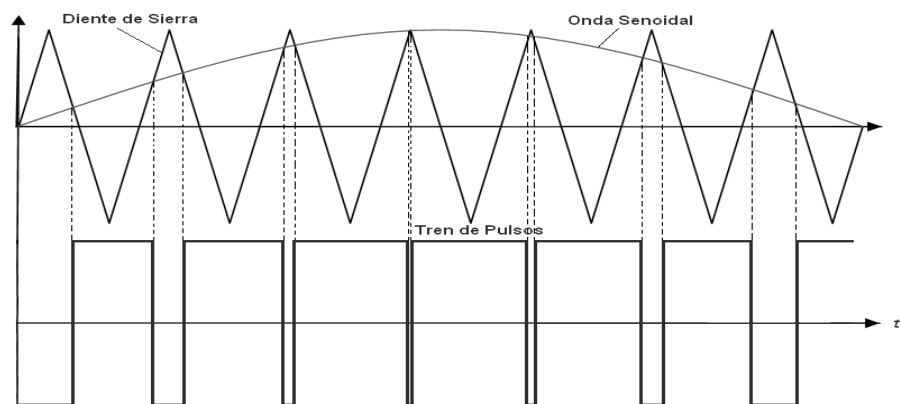


Figura 4.5 Modulación por ancho de pulso.

4.4 El Compensador Estático (STATCOM).

Dado el breve preámbulo de dispositivos semiconductores y lo que podemos llegar obtener con las VSC podemos entrar en materia de la tecnología denominada STATCOM citando primeramente su definición de acuerdo al IEEE:

Se define al STATCOM como: Un generador estático síncrono operado como un compensador estático de VAR's, en conexión paralelo en el cual la corriente de

salida, ya sea capacitiva o inductiva, puede ser controlada de forma independiente del voltaje del sistema. [7,13]. Dentro del texto también se identificará al STATCOM por las siglas SSC (*Static Synchronous Compensator*).

4.5 Elementos y Principio de Operación del STATCOM.

De manera general, podemos considerar al STATCOM como un dispositivo conformado por un transformador asociado a una VSC, cuya entrada es una señal de voltaje de CD y a la salida tenemos una señal trifásica de voltaje, cada señal está en fase y acoplada a la correspondiente señal de CA del sistema y donde cada una de estas presenta un valor relativamente pequeño de reactancia debida a los reactores y al acoplamiento magnético. Ésta señal de salida puede ser variada para controlar parámetros específicos de un SEP. El voltaje de CD necesario para la operación del SSC será suministrado por un capacitor capaz de almacenar la energía necesaria. [7] La Figura 4.6 presenta el diagrama unifilar del STATCOM.

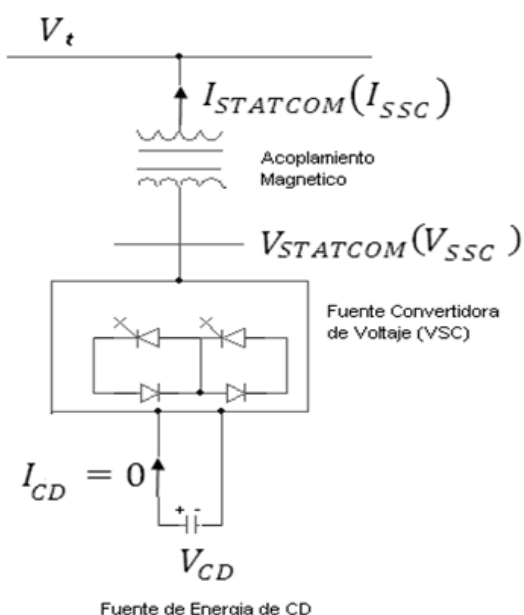


Figura 4.6 Diagrama unifilar del STATCOM.

Es por ello que el STATCOM o SCC es análogo a una máquina rotatoria síncrona ideal, debido a que genera tres señales de voltaje, cada una a la frecuencia fundamental de la red, donde se puede variar la magnitud de la onda y el ángulo de fase de la señal generada. Debido a que el compensador estático está compuesto por elementos de estado sólido, no tiene inercia, lo cual representa una de las ventajas más significativas, ya que hace que tenga una respuesta prácticamente inmediata.

La Figura 4.7 considera el circuito equivalente para el diagrama unifilar del STATCOM, el compensador estático es representado por una fuente de voltaje variable conectada en serie con una reactancia. El SSC cuenta con un diseño compacto a comparación del SVC al no necesitar de bancos de capacitores o reactores conectados en derivación, también presenta un bajo ruido e impacto magnético.

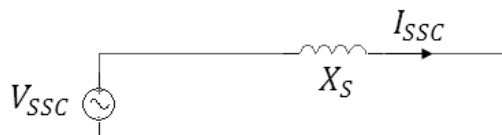


Figura 4.7 Circuito equivalente del STATCOM.

El intercambio de potencia reactiva entre el convertidor y el sistema de CA, puede ser controlado variando la amplitud de la salida trifásica de voltaje, (V_{SSC}), del convertidor tal y como se ilustra en la Figura 4.8.

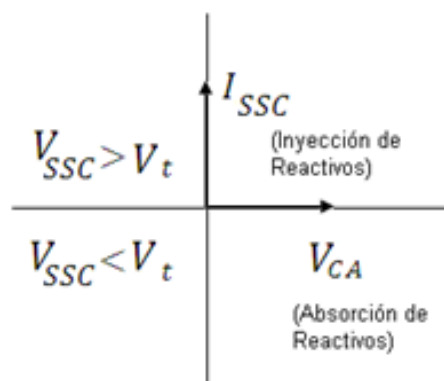


Figura 4.8 Intercambio de potencia reactiva entre el STATCOM y el sistema de CA.

De la Figura 4.8 se puede observar que si la amplitud en la salida de voltaje (V_{SSC}), es incrementada por encima del valor del voltaje de la barra (V_t), entonces se presentara un flujo de corriente por la reactancia del convertidor hacia el sistema es decir, el convertidor genera potencia reactiva capacitiva para entregarla al sistema.

Por otro lado, si la amplitud de la salida de voltaje (V_{SSC}), se encuentra por debajo del valor del voltaje de la barra (V_t), entonces se presenta un flujo de corriente del sistema hacia el convertidor, el cual absorberá la potencia reactiva inductiva del sistema.

Considerando que para condiciones ideales de factor de potencia igual a 1 y que tanto V_t como V_{SSC} estén en fase, dicho análisis para la expresión de la inyección de potencia reactiva del STATCOM sólo depende de su voltaje de salida es el siguiente:

$$Q_{SSC} = \frac{V_t * V_{SSC}}{X_S} \cos\delta - \frac{V_{SSC}^2}{X_S} \quad (4.1)$$

Siendo el desfase $\delta = 0$ entre V_{SSC} y V_t se tiene;

$$Q_{STATCOM} = \frac{V_{SSC} - V_t}{X_S} V_{SSC} \quad (4.2)$$

En resumen, cuando $Q_{STATCOM}$ es positiva significa que el STATCOM inyecta potencia reactiva, por otro lado, si es negativa quiere decir que la absorbe. [24]

La fórmula para la magnitud de la corriente del compensador síncrono queda definida como:

$$|I_{SSC}| = \frac{|V_{SSC} - V_t|}{X_S} \quad (4.3)$$

Si consideramos que la salida de voltaje tiene el mismo valor que el voltaje del sistema el intercambio de potencia reactiva será nulo, en este caso se dice que el STATCOM se encuentra en estado flotante.

Cabe mencionar que si se ajusta el ángulo (desfasamiento), entre la salida de voltaje del convertidor y el voltaje del sistema también se puede controlar el intercambio o flujo de potencia activa entre el convertidor y el sistema. Es decir, se suministra potencia activa al sistema cuando la salida de voltaje del convertidor se adelanta a la salida del sistema, por el contrario cuando la salida del convertidor se logra atrasar, estaremos hablando de una absorción de potencia activa. [7]. La expresión para el intercambio de potencia activa es:

$$P_{SSC} = \frac{V_{SSC} * V_t}{X_S} \sin\delta \quad (4.4)$$

4.6 Curvas Características de Operación $V-I$ y $V-Q$ del STATCOM.

La Figura 4.9 muestra la curva característica $V-I$ de operación del SSC. En ella se observa como el STATCOM puede suministrar una compensación de tipo capacitivo e inductiva, el compensador puede controlar independientemente las salidas de corriente, también se puede observar que el STATCOM puede ser operado por encima del rango de corriente de salida tanto en la región de operación inductiva como capacitiva, aún en sistemas de niveles de voltaje muy bajos.

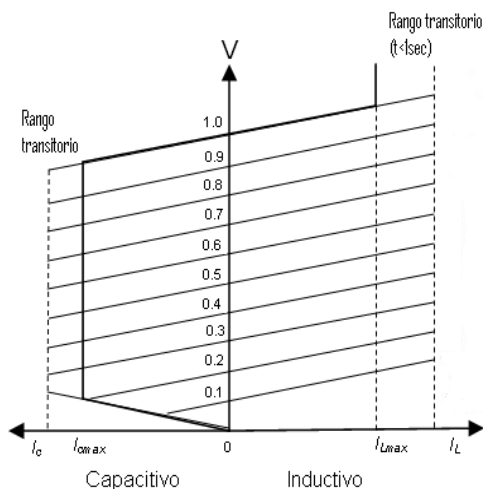


Figura 4.9 Curva característica $V-I$ del STATCOM.

La máxima sobre-corriente transitoria alcanzable por el compensador en la región capacitiva está determinada por la capacidad de corriente máxima de apagado de los semiconductores de potencia, en cambio, en la región de operación inductiva el rango de valores de corriente transitoria del STATCOM está teóricamente limitado solamente por las temperaturas de juntura de los semiconductores.

La curva característica $V-I$ del SSC permite observar otra ventaja de esta tecnología, ya que el compensador es capaz de entregar una salida completa de generación capacitiva casi independientemente del voltaje del sistema, es decir el STATCOM produce una salida de corriente capacitiva alta y constante aun cuando se tenga un voltaje bajo del sistema. Esta capacidad es muy útil en situaciones en donde el STATCOM es empleado para soportar el voltaje del sistema durante y después de una falla. Una ventaja adicional del compensador es que el intercambio de potencia tanto activa como reactiva entre el SSC y el sistema de CA puede ser controlado independientemente uno de otro. [4, 7, 13].

En la Figura 4.10 se muestra la característica de operación $V-Q$ del STATCOM, en la cual se puede distinguir como es que también se presentan rangos de operación para transitorios, además de contar con una respuesta casi inmediata.

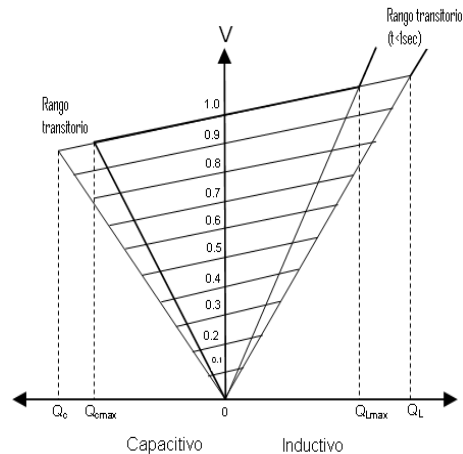


Figura 4.10 Característica voltaje-potencia reactiva del STATCOM.

El compensador estático es capaz de proporcionar una salida reactiva linealmente decreciente con la tensión del sistema. [25]

4.7 Aplicaciones.

Cuando el SSC es instalado dentro de un sistema de potencia, puede mejorar el funcionamiento del mismo en las siguientes áreas:

- El control de voltaje dinámico en sistemas de distribución y transmisión;
- El amortiguamiento de las oscilaciones en los sistemas de transmisión;
- La estabilidad transitoria;
- Contener el “*flicker*” de voltaje;
- El control de pequeñas caídas de voltaje;
- El control, no solo de potencia reactiva, si es necesario también podrá inyectar potencia activa en la línea donde se encuentra conectado.

Además el STATCOM:

- Físicamente ocupa un menor espacio, puesto que sustituye los elementos pasivos del circuito por convertidores electrónicos mas compactos;

- Utiliza compactos módulos electrónicos encapsulados, minimizando el impacto ambiental.

Un ejemplo real de aplicación de la tecnología del compensador estático la podemos encontrar dentro de la subestación Teine, perteneciente la compañía eléctrica Hokkaido en Japón, el cual fue instalado en el año de 1993 para mitigar los efectos del 'flicker' en el voltaje, ocasionador por la operación de los hornos de arco eléctrico de una compañía metalúrgica. Figura 4.11.



Figura 4.11 Subestación Teine, Japón.

El compensador está dividido en dos grupos de VSC de 4 x 2.5 MVA. Los semiconductores empleados fueron GTO's con una capacidad de 4.5 kV y 3 A, la frecuencia de conmutación del equipo es de 500 Hz. Cada uno de los convertidores fue conectado a una barra de 66 kV por medio de un acoplamiento magnético delta-delta. Los dos grupos de VSC son operados por un controlador en común.

Otro ejemplo del compensador estático es el mostrado en la Figura 4.12 el cual fue instalado dentro de la subestación Sullivan cerca de la ciudad de Johnson en Tennessee, Estados Unidos. El proyecto estuvo a cargo de la corporación Westinghouse, la instalación de este dispositivo represento un gran avance para la tecnología FACTS puesto que demostró la viabilidad de este tipo de equipos dentro de largos sistemas de transmisión, y sirvió para aclarar muchas de las dudas que se tenían respecto a esta tecnología.



Figura 4.12 Subestación Sullivan, Tennessee, USA.

El compensador está formado por 8 fuentes conmutadas de 12.5 MVA conectadas a un bus de 161 kV por medio de un transformador. El SSC instalado reemplazó a un MSC con una capacidad MVA. A parte de mantener el voltaje dentro de un rango el STATCOM fue diseñado para prevenir el colapso del voltaje bajo condiciones de contingencia del sistema.

4.8 Conclusiones.

Con éste capítulo pudimos observar que la nueva generación de controladores FACTS que basa su operación en esquemas del tipo VSC presenta características operativas que la hacen sumamente atractivos, dada su rapidez de respuesta y la posibilidad de aportar su capacidad nominal ante condiciones severas de funcionamiento. Esto hace que la tecnología de FACTS sea cada vez más aceptada en la industria eléctrica, visualizándose un futuro promisorio para tal tecnología.

En éste caso, estudiamos al STATCOM, cuyo principio de funcionamiento obedece a dos métodos de operación, en donde observamos que el más usual es en el que se aplica la técnica PWM debido su gran eficacia reduciendo en gran parte la generación de armónicos a lo obtenible por el método de frecuencia conmutada.

Las curvas características de operación tanto $V-I$ como $V-Q$ que se obtiene, hacen ver que el STATCOM tiene una capacidad transitoria tanto capacitiva como inductiva adicional lo cual nos representa en términos prácticos que a pesar de que el compensador ha violado sus límites de operación, la magnitud de voltaje es incrementada del STATCOM hacia el sistema de potencia. Por otro lado el suministro de potencia reactiva por parte del STATCOM no se ve influenciado por la presencia de bajos voltajes en el sistema.

Finalmente se expusieron dos ejemplos de aplicación, en donde además de mencionar todas sus cualidades técnicas, este dispositivo es muy fácil y sencillo de instalar, ya que ocupa menor espacio y utiliza dispositivos electrónicos encapsulados haciéndolo una vez más una opción más viable a considerar en los proyectos de sistemas eléctricos de potencia de futuros en nuestro país.