



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

***Modelado y control de compensadores estáticos  
síncronos en sistemas de potencia***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

JIMÉNEZ GONZÁLEZ ANA BERTHA

Director de Tesis

Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

Co-director

Dr. Gerardo R. Espinosa Pérez



México, D.F. 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

PRESIDENTE	M.I. RICARDO GARIBAY JIMÉNEZ
VOCAL	DR. PAUL ROLANDO MAYA ORTIZ
SECRETARIO	ING. JULIO CARLOS LUNA CASTILLO
1er. SUPLENTE	DR. GERARDO ESPINOSA PÉREZ
2do. Suplente	CÉSAR ANGELES CAMACHO

Este trabajo de tesis fue desarrollado con apoyo del proyecto DGAPA-UNAM PAPIIT IN112108, “Control no Lineal de Dispositivos FACTS en Sistemas de Potencia” a cargo del Dr. Paul Rolando Maya Ortiz.

Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Gerardo Espinosa Pérez

CO-DIRECTOR DE TESIS

## **Agradecimientos**

A mis papás Roberto y Maura ya que su esfuerzo, cariño y ejemplo son y serán la base de todos mis logros; a mis hermanas Tere y Clau, por ser el hombro incondicional que me ha soportado; a Edith Jiménez, por su generosidad y su fe en mí.

A José Antonio por acompañarme en este el camino, por tantas cosas aprendidas juntos, por su apoyo, su comprensión y su amor, por darme un motivo más para alcanzar mis metas.

A mi familia y amigos que siempre han estado conmigo brindándome una palabra de aliento, el ánimo para seguir adelante y aportando grandes cosas a cada momento de mi vida.

Al Dr. Paul Maya y al Dr. Gerardo Espinosa mil gracias por su apoyo y guía y sobretodo su enorme paciencia durante la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación recibida y por la oportunidad de ser parte de ella.

# Índice

<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Motivación	1
I.2 Antecedentes	2
I.3 Formulación del problema	7
I.4 Organización de la tesis	8
<b>II. FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO</b>	<b>10</b>
II.1 Funcionamiento	10
II.2 Estructura	13
II.2.1 Convertidor de onda completa puente monofásico	15
II.2.2 Convertidor de onda completa puente	16
II.2.3 Convertidores de 12, 24 y 48 pulsos	18
II.2.4 Convertidor de tres niveles	19
II.2.5 Convertidor con modulación por ancho de pulso	20
<b>III. MODELOS</b>	<b>21</b>
III.1 Modelo de retraso del ángulo de disparo	21
III.2 Modelo de balance de energías	24
III.3 Modelo dinámico detallado	33
<b>IV. CONTROL</b>	<b>39</b>

<b>V. SIMULACIONES</b>	<b>47</b>
IV.1 Simulación y respuesta del sistema en condiciones ideales	49
IV.2 Simulación y respuesta del sistema frente a una perturbación	54
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>61</b>

# CAPÍTULO I.

## **INTRODUCCIÓN**

### I.1 MOTIVACIÓN

Muchos de los sistemas de suministro de energía en el mundo están constituidos como una red, con gran número de interconexiones, esto se hace principalmente por razones económicas, para reducir el costo de la electricidad y mejorar la confiabilidad del suministro de energía.

Sin embargo existen problemas en el diseño de una red que deben ser considerados. Por ejemplo si un sistema de entrega de energía es radial, con generadores locales, sin que sea parte de una red, son necesarios muchos más recursos de generación para servir a la carga con la misma confiabilidad y el costo de la electricidad será mucho más alto. El costo de las líneas de transmisión, las pérdidas, así como las dificultades para la construcción de nuevas líneas de transmisión frecuentemente limitan la disponibilidad de la capacidad de transmisión. El ejemplo anterior ilustra la necesidad de contar con una red eléctrica efectiva, la cual es vital para un servicio eléctrico competitivo y confiable [1].

En la actualidad existen dispositivos electrónicos que ofrecen la ventaja de trabajar a altas velocidades y ser confiables además de que permiten proponer una variedad de innovadores circuitos basados en ellos y aumentar el valor de la energía eléctrica, en este sentido son enormes las oportunidades en reducción de costos, tamaño y pérdidas por medio de electrónica de potencia.

Dentro de la industria eléctrica, la electrónica de potencia está tomando importancia en todas las áreas en las que se divide.

En el área de generación se aplica la electrónica de potencia por ejemplo en la generación con energías renovables, donde es necesaria conversión tanto de corriente directa (*dc*) como de corriente alterna (*ac*). En esta área se usan convertidores *ac/ac*, *ac/dc*, *dc/dc*, *dc/ac* según la función que se requiera.

En el área de distribución, se presentan soluciones para entregar a los consumidores industriales y comerciales energía de calidad, libre de distorsiones, reducciones en el voltaje y sobre-voltajes incorporando controladores electrónicos y equipo de conmutación para dar un valor agregado al servicio prestado a los consumidores, todo esto dentro del concepto “Custom Power”.

En el área de transmisión, la aplicación de la electrónica de potencia también puede ser usada para la Transmisión de Corriente Directa a Alto Voltaje (HVDC por sus siglas en inglés) y FACTS. HVDC es frecuentemente un camino económico para interconectar sistemas eléctricos que están situados en diferentes regiones separados por largas distancias o que operan a diferentes frecuencias; HVDC involucra conversión de *ac* a *dc* en un extremo y conversión de *dc* a *ac* en el otro; los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS por sus siglas en inglés) tienen como función principal aumentar el control y capacidad de transmisión de energía en sistemas de *ac*. [2]

## I.2 ANTECEDENTES

Actualmente existe una gran presión sobre las redes de transmisión debida al aumento de carga que continúa incrementándose, además de la

dificultad de adquirir nuevos derechos de vía, la ausencia de planeación a largo plazo y la necesidad de dar acceso a compañías generadoras y consumidores han creado tendencias hacia la baja seguridad y reducción de la calidad del suministro.

Además al crecer la cantidad de energía transmitida, el sistema de energía se hace cada vez más complejo para operar, lo cual puede conducir a grandes flujos de energía con control inadecuado, excesiva energía reactiva, largas oscilaciones dinámicas entre diferentes partes de la red y cuellos de botella, impidiendo que el potencial de transmisión sea utilizado del todo.

La mayoría de los sistemas de transmisión de hoy son controlados y protegidos principalmente de forma electromecánica. Un problema con los dispositivos electromecánicos es que el control de disparo no puede ser usado frecuentemente porque estos dispositivos tienden a gastarse muy rápidamente comparados con los interruptores de estado sólido, además de que la velocidad de respuesta es baja.

Si la corriente que circula en una línea puede ser controlada a un costo razonable es posible incrementar la capacidad de las líneas existentes. Al usar alguno de los dispositivos FACTS la energía fluirá mediante tales líneas bajo condiciones normales y contingencias debido a la habilidad de estos dispositivos para controlar los parámetros interrelacionados que gobiernan la operación de los sistemas de transmisión incluyendo impedancias en serie y paralelo, corriente, voltaje y ángulo de fase mejorando el amortiguamiento de oscilaciones a varias frecuencias sobre la frecuencia nominal. Muchas de las limitaciones de la capacidad de transmisión no pueden ser superadas manteniendo la confiabilidad del sistema con medios electromecánicos sin bajar la capacidad de transmisión.

Los FACTS son una colección de dispositivos, que pueden ser aplicados individualmente o en coordinación con otros, usados para el control de uno o más de los parámetros del sistema de transmisión antes mencionados [3].

En general la energía fluye de acuerdo con la impedancia de las líneas de transmisión. Si un capacitor a frecuencia de sincronía se introduce en una línea, éste reduce la impedancia de la línea y si el capacitor es variable entonces el flujo de energía se controla y puede ser transmitida de acuerdo con los contratos, reduciendo las pérdidas de transmisión y pudiendo cargar las líneas de transmisión hasta su límite térmico y variarlas dentro un amplio rango de esquemas de carga.

Aunque el capacitor pueda ser modulado y conmutado, el número de operaciones puede ser muy limitado si se usan componentes electromecánicos tomando en cuenta que las cargas de las líneas varían continuamente con diferentes condiciones de carga, esquemas de generación y cortes de electricidad en líneas. Si el capacitor en serie es controlado mecánicamente puede inducir resonancias subsíncronas, provocar daños en los equipos y hasta un colapso en el sistema; por otro lado, si todos o parte de los capacitores son conmutados con tiristores controlados, éstos pueden variarse tan frecuentemente como sea necesario, lo que permitiría llevar al sistema desde una condición de estabilidad a otra reduciendo el riesgo de colapso.

De acuerdo a la forma en que son conectados al sistema de transmisión, los dispositivos FACTS pueden clasificarse en varias categorías. Principalmente se dividen en los conectados en serie, en derivación, combinados serie-serie y serie-derivación [2].

Una buena elección de un dispositivo FACTS puede superar limitaciones específicas de una línea de transmisión.

La tecnología FACTS también se presta para extender los límites de transmisión incrementando la inversión según se requiera. Un planeador puede anticipar un escenario futuro del promedio de interruptores electromecánicos y posibilitar el uso de dispositivos FACTS, tal que las líneas de transmisión involucren una combinación de controladores FACTS y electromecánicos para lograr el objetivo de control apropiado y organizar la inversión.

Como los dispositivos electrónicos continúan mejorando, particularmente los dispositivos con capacidad de apagado, el costo de los controladores FACTS continuarán decreciendo y su uso irá en aumento.

Con respecto a los controladores en derivación, la energía transmisible puede ser aumentada y el perfil del voltaje a lo largo de la línea controlado. El propósito de realizar una compensación reactiva en derivación es cambiar las características eléctricas naturales de la línea de transmisión para hacerla más compatible con la demanda de carga prevaleciente [4].

Como un tipo importante de dispositivo FACTS, el Compensador Estático de VARs (SVC) es muy usado en sistemas de potencia para compensación reactiva en derivación pero puede introducir resonancia armónica en el sistema, en cambio el Compensador Estático Síncrono (STATCOM) realiza la misma acción sólo que cuenta con una mayor capacidad de compensación, rápida respuesta, menos armónicas y menor tamaño que los SVC's convencionales.

El STATCOM es uno de los dispositivos FACTS clave, puede estar basado sobre un convertidor alimentador de corriente o voltaje, desde el punto de

vista del costo se ha preferido basarlos en convertidores alimentadores de voltaje (VSC) en los cuales su voltaje de salida de *ac* es controlada para que sólo fluya la corriente reactiva requerida por cualquier bus. Un STATCOM puede ser diseñado para actuar además como un filtro activo que absorba las armónicas del sistema [4].

La capacidad de proveer máxima compensación de corriente a voltaje reducido del sistema posibilita que el STATCOM funcione en una gran variedad de aplicaciones de compensación dinámica y le permite tener un mayor margen de estabilidad con lo cual se mejora la estabilidad transitoria.

La repuesta en el tiempo alcanzable y el ancho de banda de la regulación de voltaje en lazo cerrado del STATCOM es significativamente mejor que la del SVC, esto es importante ya que el ancho de banda de la frecuencia alcanzable también es mayor y permite operación estable a velocidad considerable sobre una variación muy amplia de la impedancia de la red de transmisión.

Para aplicaciones que requieren compensación de potencia real, el STATCOM es capaz de conducir potencia real controlada desde una fuente de energía conectada a su terminal de *dc* y entregarla como energía de *ac* al sistema, esta capacidad provee una herramienta para lograr compensación dinámica, mejorar la eficiencia del sistema y prevenir cortes en el suministro de energía.

Desde el punto de vista de la instalación física, no son necesarios grandes capacitores y bancos de inductores así como su equipo de conmutación y protección para el STATCOM por lo que su tamaño es reducido así como su instalación y costo, esto lo hace deseable para instalarse en áreas

donde el costo de la tierra es muy alto y en aplicaciones donde pueden funcionar como solución temporal [2].

### I.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta que los Sistemas Eléctricos de Potencia cada vez son más complejos y por lo tanto más difíciles de manejar y menos seguros, es necesario encontrar estrategias mediante las cuales se mejore la calidad de la energía eléctrica entregada a los consumidores e incremente la capacidad de transmisión de la red.

Considerando que el flujo de corriente y potencia en una línea puede controlarse si se controlan los parámetros de ésta (magnitud de los voltajes de bus de las subestaciones conectadas a ella, el ángulo de fase entre dichas subestaciones o la impedancia de la línea) y que en la actualidad esto puede hacerse (sin necesidad de cambiar la topología del sistema, incrementar el número de líneas de transmisión o las unidades generadoras) incorporando elementos FACTS, el problema que se aborda en este trabajo de tesis es:

Evaluar los efectos de la implementación de uno de los controladores FACTS más usados, denominado Compensador Estático Síncrono (STATCOM por sus siglas en inglés), en relación a si es capaz o no de suministrar o absorber de manera rápida la potencia reactiva en una falla en el sistema para regular el voltaje y así mantenerlo estable.

Proponer un modelo más completo en el que sea considerada la dinámica del convertidor dentro del modelado del sistema, lo cual no se encontró reportado en la literatura de potencia.

Incorporar el esquema de Control Basado en Pasividad para realizar el diseño del control que será utilizado para lograr el funcionamiento deseado del STATCOM.

#### I.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el Capítulo I se describen algunos de los problemas frecuentes en los sistemas de transmisión de energía eléctrica y se presenta una alternativa para su solución basada en electrónica de potencia mediante la utilización de dispositivos FACTS, se hace una breve descripción de los mismos, se plantean los beneficios de su uso y se presenta particularmente al STATCOM.

El funcionamiento del STATCOM así como su estructura básica y algunas de las posibles topologías y técnicas de control más usadas se abordan en el Capítulo II.

En el Capítulo III se abordan dos de los modelos más comunes encontrados en la literatura para representar el STATCOM, uno de ellos basado en un criterio de balance de energía, otro modelo presenta la regulación de voltaje fundamentada en un retraso en el ángulo de disparo del dispositivo. Los modelos antes mencionados no toman en cuenta el comportamiento dinámico del compensador por lo cual también se presenta un tercer modelo dinámico mediante el cual se muestra la capacidad del compensador como regulador de voltaje.

En el Capítulo IV se detalla el sistema de estudio con su comportamiento dinámico, los objetivos de control y cómo se logran mediante el planteamiento de las leyes de control basados en el concepto de pasividad.

En el Capítulo V se presentan las simulaciones tanto en condiciones ideales como en el caso de perturbaciones en el sistema que producirán cambios en el voltaje de la red y se presentan los resultados mediante gráficas y su interpretación.

Finalmente en el Capítulo VI se dan las conclusiones basadas en el análisis de los resultados y observaciones importantes acerca de la implementación de los dispositivos FACTS formuladas a partir del estudio e investigación hecha para la conformación del presente trabajo.

## CAPÍTULO II.

# **FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO**

Los convertidores *dc/ac* también reciben el nombre de inversores, y en general su función es generar una señal de corriente alterna, lo más cercana posible a una senoidal, a partir de una fuente de corriente directa, existen varias topologías y diversas técnicas de control con las cuales lo anterior es posible y dependiendo de las características de los dispositivos electrónicos con las cuales estén contruidos es posible incorporarlos a sistemas de alta potencia.

### II.1 FUNCIONAMIENTO

En los sistemas de potencia el objetivo de uso del STATCOM es que, al conectarse en derivación, produzca un cambio en las características naturales de la línea tal que se ajuste a los requerimientos de la red de transmisión sin usar elementos mecánicos ni bancos de capacitores o reactores que sean conectados y desconectados de la red.

Su operación es similar a la de un generador síncrono por lo que se les conoce como Static Synchronous Generator (SSG); si opera sin fuente de energía alguna y con controles propios para funcionar como un compensador reactivo en derivación, se denomina STATCOM.

Considere un sistema trifásico balanceado cuyo diagrama unifilar es el mostrado en la Figura 2.1 donde el flujo de potencia es puramente reactiva y se tiene que las fuerzas electromecánicas inducidas (FEM's) de la

máquina síncrona están en fase con los voltajes del sistema. La corriente reactiva  $I$  debida al compensador síncrono la determina la magnitud del voltaje del sistema  $V$ , el voltaje interno  $E$  y la reactancia total del circuito,  $X$ , formada por la suma de la reactancia de la máquina síncrona, las pérdidas en la reactancia del transformador y las reactancia de corto circuito del sistema:

$$I = \frac{V - E}{X}$$

La correspondiente potencia reactiva intercambiada es

$$Q = \frac{1 - \frac{E}{V}}{X} V^2$$

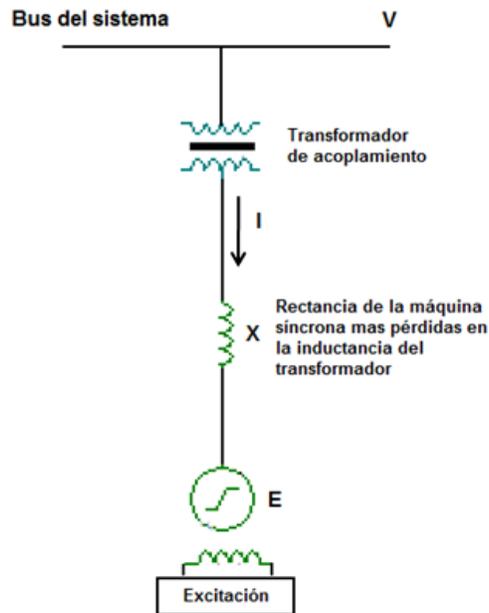


Figura. 2.1 Generación de potencia reactiva por un compensador síncrono

Controlando la excitación de la máquina y por lo tanto  $E$  y  $V$  se puede controlar el flujo de potencia reactiva. Si se incrementa  $E > V$  resulta en una corriente adelantada y entonces es considerada por el sistema como un elemento capacitivo. Si  $E < V$  entonces resulta una corriente atrasada y el sistema la considera como un elemento inductivo.

El esquema básico de un VSC para generación de potencia reactiva puede representarse con el diagrama unifilar de la Figura 2.2.

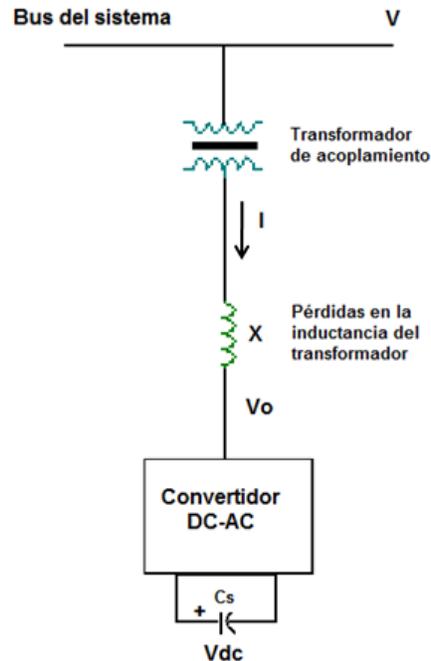


Figura. 2.2 Generación de potencia reactiva por un VSC conmutado.

Desde una fuente de voltaje de  $dc$  de entrada provista por un capacitor cargado  $C_s$ , el convertidor produce un conjunto de voltajes de salida trifásicos con la frecuencia del sistema de  $ac$ . Cada salida de voltaje está en fase y acoplada con el sistema mediante una reactancia. Variando la amplitud del voltaje producido, la potencia reactiva intercambiada con el sistema puede controlarse.

Si la amplitud del voltaje de salida se incrementa sobre el voltaje del sistema de  $ac$  la corriente fluye desde el convertidor hacia el sistema y el convertidor genera potencia reactiva (capacitiva), en caso contrario, es decir, cuando la amplitud del voltaje de salida es disminuida por debajo del voltaje del sistema la corriente reactiva fluye desde el sistema al convertidor y el convertidor absorbe potencia reactiva (inductiva) pero si la

amplitud del voltaje de salida es igual a la del sistema entonces el intercambio de potencia reactiva es cero.

Desde el punto de vista de una caja negra el generador tipo VSC puede ser considerado como una fuente de voltaje síncrono la cual produce corriente reactiva desde un sistema de *ac* de acuerdo a una referencia externa la cual varía en un rango definido entre el máximo capacitivo e inductivo, independientemente del sistema de voltaje. El área de operación V-I de este generador de VAR es limitada solo por los rangos de voltaje y corriente del convertidor [6].

## II.2 ESTRUCTURA

Los VSC son el bloque de construcción del STATCOM y de otros dispositivos, éstos a su vez están constituidos por dispositivos electrónicos cuyas órdenes de compuerta son generadas por un control interno en respuesta a la demanda de potencia de la señal de referencia que provee un control externo o un sistema.

Los convertidores aplicados a dispositivos FACTS son del tipo autoconmutados y se dividen en dos categorías básicas:

1. Convertidores alimentadores de corriente
2. Convertidores alimentadores de voltaje

Por razones económicas y de funcionamiento, los convertidores alimentadores de voltaje se prefieren sobre los convertidores alimentadores de corriente para aplicaciones en FACTS.

Los interruptores del convertidor alimentador de voltaje son hechos con dispositivos asimétricos con un diodo conectado en antiparalelo como se muestra en la Figura 2.3.

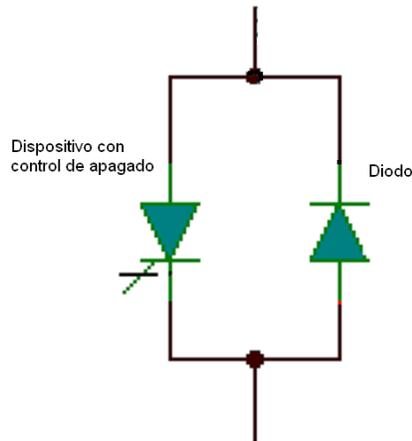


Figura 2.3 Interruptores de un convertidor alimentador de voltaje.

La Figura 2.4 muestra el funcionamiento básico de un convertidor alimentador de voltaje. Sobre el lado de *dc*, el voltaje es unipolar y mantenido por un capacitor, en este lado la corriente puede fluir en cualquier dirección y puede intercambiar energía con el sistema conectado en cualquier dirección. En el lado de *ac* se muestra el voltaje generado, conectado al sistema de *ac* mediante un inductor.

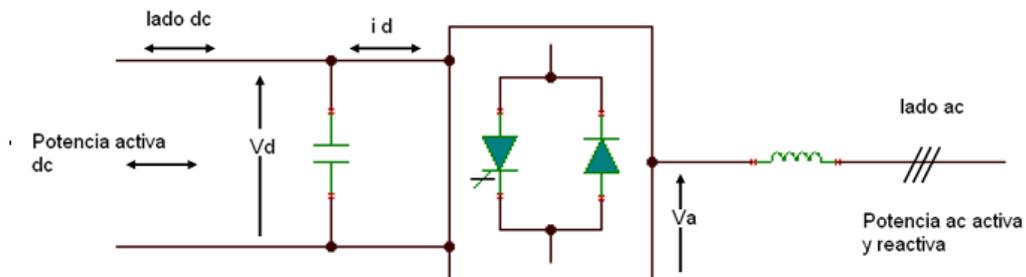


Figura 2.4 Funcionamiento de un VSC .

El diagrama de la operación de un interruptor simple es el presentado en la Figura 2.5, en este caso se asume  $V_d$  constante, mantenido por un

capacitor grande, con el lado de polaridad positiva conectado al ánodo del dispositivo con capacidad de apagado. Cuando el dispositivo es encendido, la terminal positiva de *dc* es conectada a la terminal de *ac*, *A*, y el voltaje de *ac* puede pasar a  $V_d$ . Si la corriente fluye de  $V_d$  a *A* (mediante el dispositivo) la potencia puede fluir desde el lado de *dc* al lado de *ac* (acción inversora). Si sucede que la corriente fluye de *A* a  $V_d$  ésta fluirá por el diodo aún si el dispositivo esta encendido y la potencia puede fluir del lado de *ac* al de *dc* (acción rectificadora).

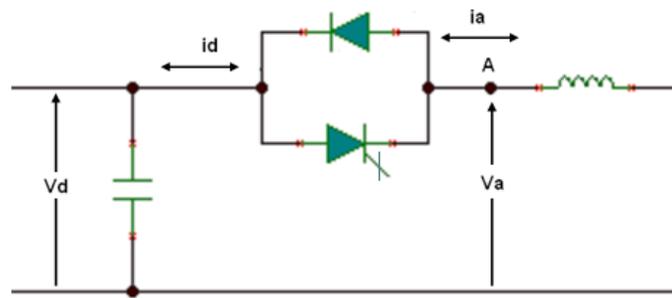


Figura. 2.5 Diagrama de operación de un interruptor simple.

Un interruptor que combina un dispositivo con capacidad de apagado con un diodo puede manejar flujo de potencia en cualquier dirección, esta capacidad de actuar como rectificador o como inversor con el flujo de corriente instantánea en dirección positiva (del lado de *ac* al de *dc*) o negativa, respectivamente, es el concepto básico del convertidor alimentador de voltaje.

Existen diferentes tipos de convertidores, los más comunes se describen a continuación:

**II.2.1 Convertidor de onda completa puente monofásico.** Consiste de cuatro interruptores, un capacitor que provee el voltaje constante de *dc* y dos puntos de conexión con el lado de *ac* como se muestra en la Figura

2.6(a). El voltaje de  $dc$  es convertido a voltaje de  $ac$  con la secuencia correcta de encendido y apagado de los interruptores, Figura 2.6(b) .

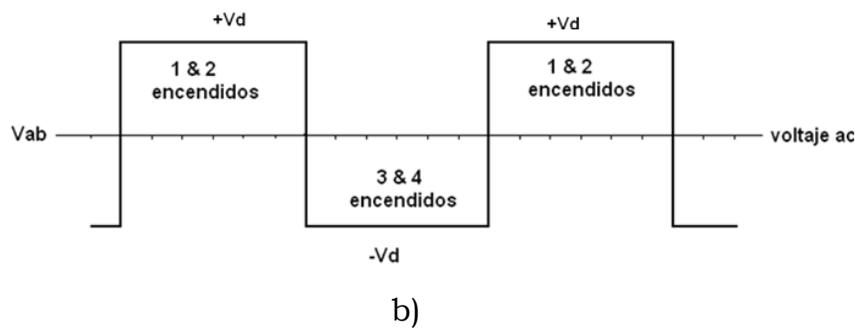
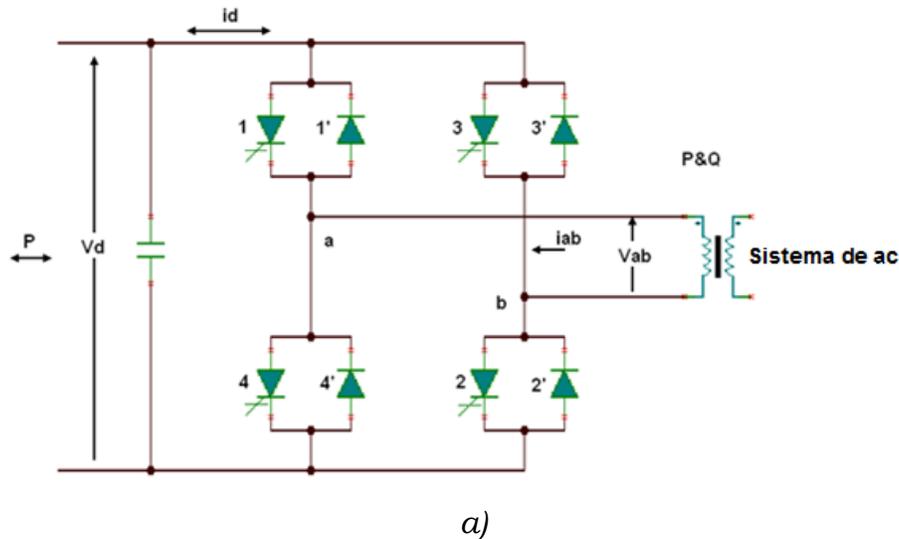
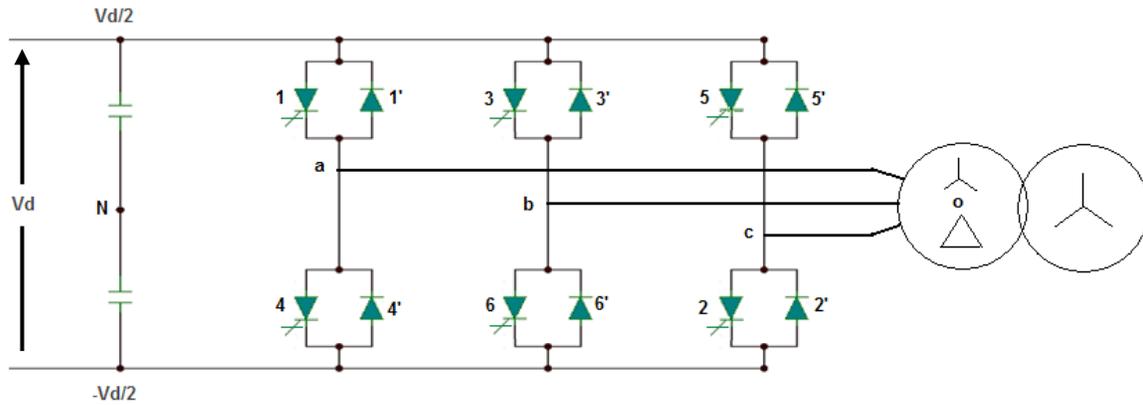
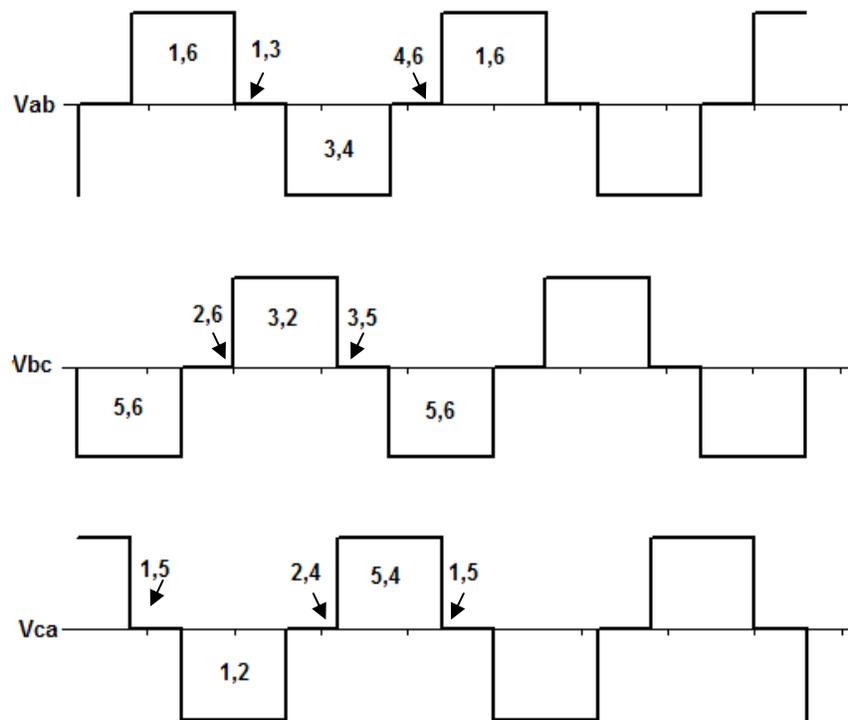


Figura 2.6 (a) Convertidor de onda completa, (b) Voltaje de salida del convertidor de onda completa.

**II.2.2 Convertidor de onda completa puente trifásico.** Está formado por seis interruptores, como se muestra en la Figura 2.7 a), el orden asignado representa su secuencia de operación, las tres ramas operan desfasadas 120 grados una de otra. En la Figura 2.7 b) se muestran los voltajes entre fases  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$ ,  $v_{ca}$  , los períodos de 60 grados en los que el voltaje es cero, representan la condición cuando dos interruptores en el mismo lado del bus de  $dc$  están cerrados.



a)



b)

Fig. 2.7 a) Convertidor de onda completa puente trifásico,  
b) Voltajes de fase a fase del convertidor de onda completa.

Un punto importante es que en este convertidor el voltaje de salida es función estrictamente del voltaje de  $dc$ . Para una interacción efectiva con el sistema de  $ac$ , muchas veces es necesario variar la salida de voltaje de  $ac$  del convertidor, lo cual significa que el voltaje de  $dc$  se variará según se

requiera. La velocidad con la que el voltaje de  $dc$  puede ser cambiado determina la respuesta en el tiempo del convertidor.

**II.2.3 Convertidores de 12, 24 y 48 pulsos.** En la Figura 2.8 a) se representan dos convertidores de 6 pulsos, involucrando un total de 3 ramas de fase conectadas en paralelo en el mismo bus de  $dc$ , y trabajando juntas como un convertidor de 12 pulsos. Con este arreglo resulta la forma de onda de la Figura 2.8 b), más cercana a una onda senoidal que la del convertidor de seis pulsos.

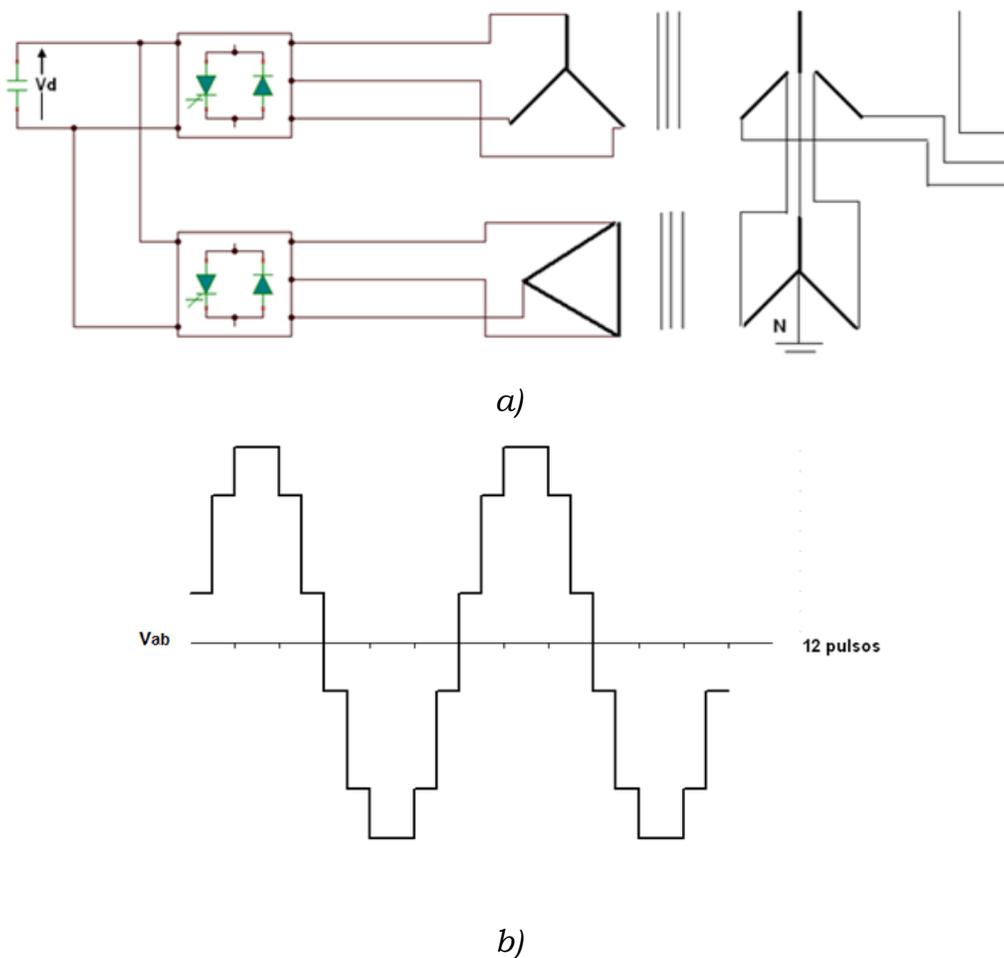
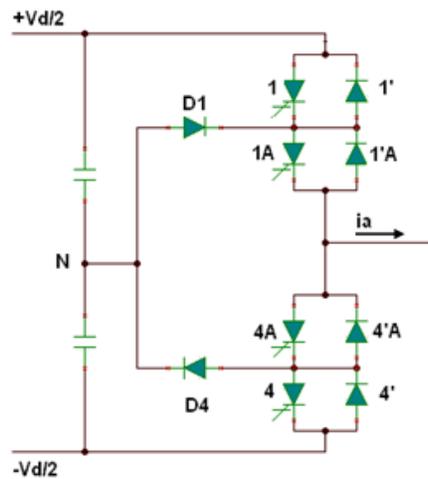


Figura. 2.8 a) Diagrama del convertidor de 12 pulsos, b) Voltaje de salida de una fase del convertidor de 12 pulsos.

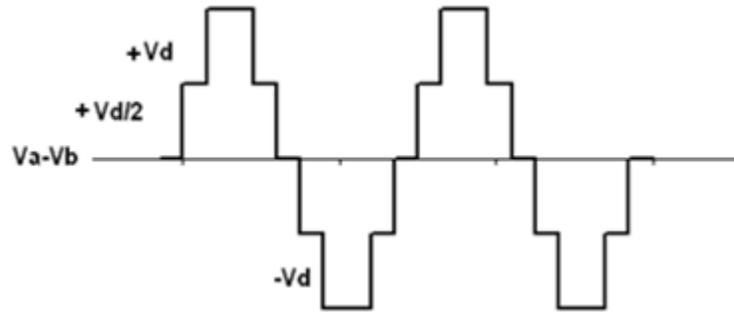
Dos convertidores de 12 pulsos desfasados  $15^\circ$  uno de otro pueden proveer un convertidor de 24 pulsos. La operación de 48 pulsos se logra con 8 convertidores de 6 pulsos y un grupo de 24 transformadores desfasados  $7.5^\circ$  uno de otro.

**II.2.4 Convertidor de tres niveles.** Este concepto puede lograr variar la magnitud del voltaje de salida de *ac* sin tener que cambiar la magnitud del voltaje de *dc*. La rama de una de las fases es la que se muestra en la Figura 2.9 a), cada rama cuenta con 4 interruptores y dos diodos más. Doblando el número de interruptores con la misma capacidad de voltaje se puede duplicar el voltaje de *dc* y por lo tanto la capacidad de manejo de potencia del convertidor.

La Figura 2.9 b) muestra el voltaje de salida que corresponde a una rama de fase de tres niveles.



a)



b)

Figura. 2.9 a) Diagrama de la rama de una de las fases del convertidor de tres niveles, b) Voltaje de salida de una fase del convertidor de tres niveles

Se puede pensar en topologías de más niveles pero éstos pueden llevar a mayores problemas de balance de voltaje entre los capacitores.

**II.2.5 Convertidor con modulación por ancho de pulso (PWM).** Con estos convertidores, el voltaje de salida de *ac* puede controlarse, variando el ancho de los pulsos y/o la amplitud del voltaje de bus de *dc*. Otra forma es tener múltiples pulsos por cada medio ciclo y luego variar el ancho de los pulsos. La principal razón para hacer esto es variar el voltaje de salida de *ac* y reducir las armónicas de menor orden. Es necesario decir que más pulsos significan más pérdidas por conmutación así que las ganancias de usar PWM deben de ser suficientes para justificar dichas pérdidas [2].

En el capítulo siguiente se analizarán algunos de los modelos mediante los cuales se representa el STATCOM, se describirán sus características y se propondrá un modelo más con el cual sea posible incorporar la dinámica del convertidor en el análisis.

## CAPÍTULO III

# MODELOS DEL COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO

A continuación se presentará el análisis de algunos modelos usados para representar al STATCOM, el primero presenta el retraso en el ángulo de disparo del dispositivo como técnica para regular el voltaje en la línea, un segundo modelo utiliza un criterio de balance de energías entre el lado de *ac* y el de *dc* del convertidor, finalmente el modelo propuesto para esta tesis incorpora además la dinámica del convertidor lo cual nos permite obtener un análisis más detallado.

### III.1 Modelo de retraso del ángulo de disparo

A partir del esquema básico de control de la Figura 3.1, se deriva el comportamiento dinámico del compensador en el rango de compensación normal.

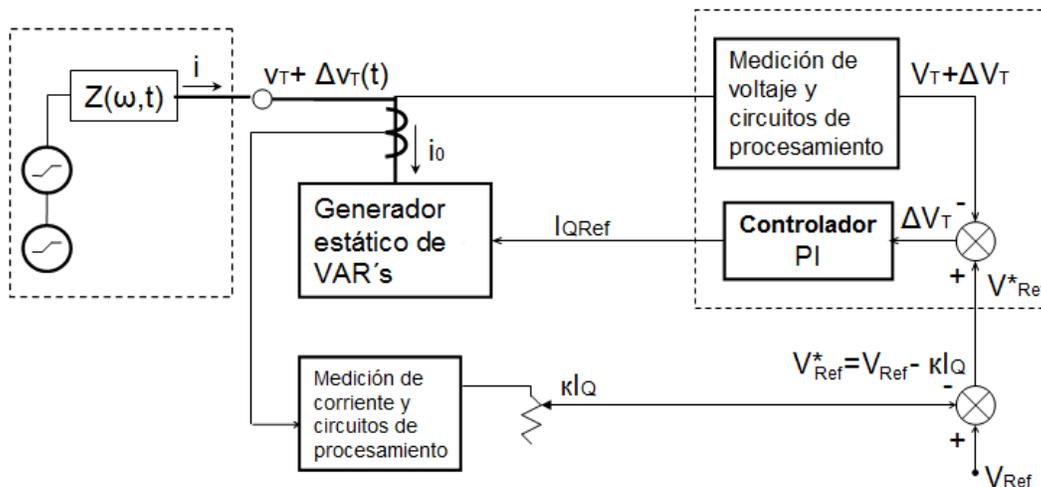


Figura 3.1 Comportamiento dinámico del STATCOM.

Éste puede caracterizarse por la función de transferencia del diagrama de bloques de la Figura 3.2.

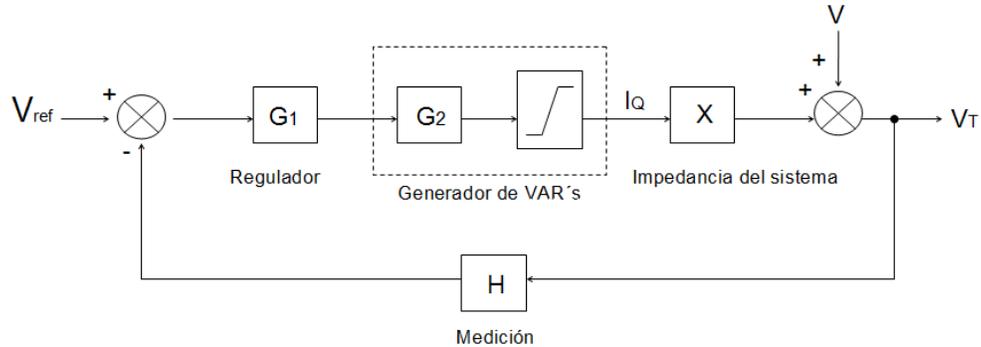


Figura. 3.2 Diagrama de bloques del STATCOM.

Para este modelo la corriente se varía por el método del retraso del ángulo de disparo que permite que los dispositivos electrónicos que forman el controlador comiencen a trabajar en un momento determinado.

En este caso se asume que el sistema trabaja a frecuencia fundamental, se encuentra balanceado y solo se compensa la parte reactiva.

El funcionamiento dinámico del generador VAR está limitado por el control del retraso del ángulo de disparo el cual resulta en un atraso de tiempo con respecto a la señal de referencia. La función de transferencia del generador de VAR puede expresarse con el atraso de la siguiente forma:

$$G(s) = ke^{-T_d s} \quad (3.1)$$

En el que  $k$  es una ganancia constante,  $s$  es el operador de Laplace y  $T_d$  es el atraso correspondiente al retraso del ángulo de disparo.

En el rango de operación lineal del compensador el voltaje  $V_T$  se expresa en función del voltaje interno  $V$  y del voltaje de referencia  $V_{ref}$

$$V_T = V \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} + V_{ref} \frac{G_1 G_2 X}{1 + G_1 G_2 H X} \quad (3.2)$$

Ya que el objetivo es establecer qué tan bien se regula el voltaje terminal  $V_T$  con la variación del voltaje del sistema,  $V$ , se considerará  $V_{ref}=0$  y solo una pequeña variación de  $V$

La variación de la amplitud del voltaje terminal contra la variación del voltaje del sistema se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} = \frac{1}{1 + G H X} \quad (3.3)$$

Donde

$$G_1 = \frac{1/\kappa}{1 + T_1 s}$$

$$G_2 = e^{-T_d s}$$

$$G = G_1 G_2 = \frac{1/\kappa}{1 + T_1 s} e^{-T_d s}$$

$$H = \frac{1}{1 + T_2 s}$$

$$\kappa = \frac{\Delta V_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta V_{Lmax}}{I_{Lmax}}$$

De las expresiones anteriores se tiene que  $T_1$  representa la constante de tiempo del controlador PI,  $T_2$  es la amplitud de la constante de tiempo del circuito de medición,  $T_d$  representa el retraso del generador, la regulación

de la pendiente se presenta con  $\kappa$  y  $X$  es la parte reactiva de la impedancia del sistema.

Utilizando el teorema del valor final que permite usar la transformada de Laplace para determinar el valor final en estado estacionario de una función, esto es, cuando  $s \rightarrow 0$  entonces:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + \frac{X}{\kappa}} \quad (3.4)$$

El funcionamiento dinámico del compensador está en función de la impedancia del sistema por lo que la respuesta en el tiempo y la estabilidad del control también dependen de ella [2].

### **III.2 Modelo de balance de energía**

El estudio de este modelo se basa en un criterio de balance de energía

$$P = P_{dc} + P_{loss} \quad (3.5)$$

La ecuación (3.5) permite representar al STATCOM bajo esquemas de control PWM y de fase, en dicha ecuación,  $P$  representa la potencia en el lado de *ac* del convertidor, la cual debe ser igual a la potencia del lado de *dc* ( $P_{dc}$ ) más las pérdidas del convertidor para que el sistema se encuentre balanceado.

Si se asume que el sistema se encuentra balanceado y trabaja a frecuencia fundamental, el STATCOM puede representarse mediante el siguiente modelo:

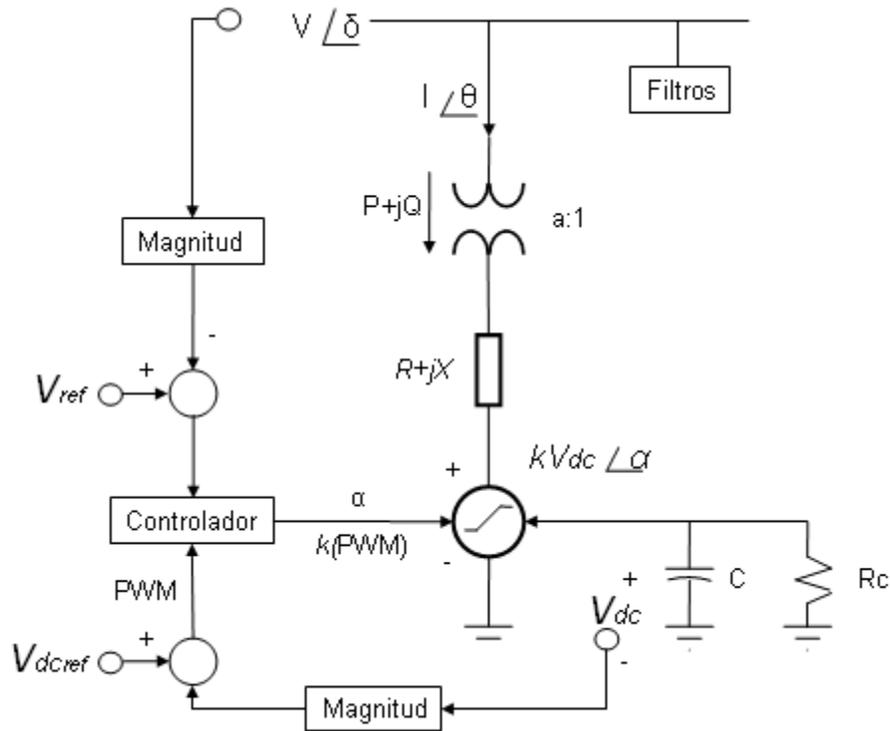


Figura. 3.3 Representación básica del STATCOM.

### Modelo dinámico

Las ecuaciones algebrodiferenciales correspondientes a este modelo se describen a continuación.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f_c(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref}) \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) describe las variables,  $(x_c)$  y las funciones del sistema de control interno  $(f_c)$  y su variación depende de la técnica control (PWM o de fase) aplicada al STATCOM [7].

El circuito de la Figura 3.4 es equivalente a la representación de la Figura 3.3 y a partir de él se analizará la dinámica del dispositivo y el flujo de potencias.

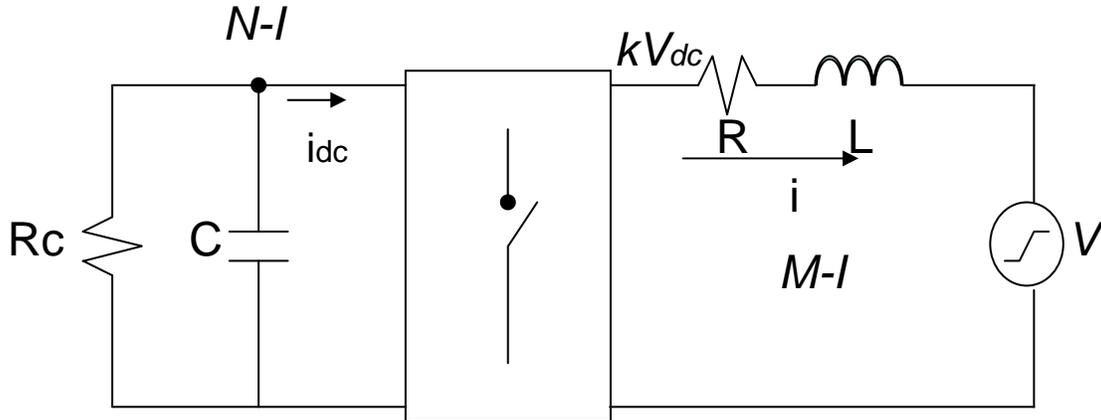


Figura. 3.3 Circuito equivalente del modelo de STATCOM.

De la Figura. 3.3 se tiene, para el lado de *ac* del convertidor, analizando la malla *M-I*:

$$Li + Ri + kV_{dc} = V \quad (3.7)$$

para el lado de *dc* del convertidor, en el nodo *N-I*:

$$C\dot{v}_{dc} + R_C^{-1}v_{dc} = i_{dc} \quad (3.8)$$

Si se toman en cuenta las pérdidas del STATCOM (*R*) y no se consideran las pérdidas del transformador de acoplamiento (*L*), entonces la ecuación (3.7) queda:

$$Ri + kV_{dc} = V \quad (3.9)$$

Las estructuras propuestas para la corriente  $i = I(\cos\theta + j\text{sen}\theta)$ , para el voltaje de la línea  $V = V(\cos\delta + j\text{sen}\delta)$ , que al ser sustituidas en la ecuación (3.9).

$$RI(\cos\theta + j\text{sen}\theta) + kV_{dc} = V(\cos\delta + j\text{sen}\delta) \quad (3.10)$$

Si se multiplica la ecuación (3.10) por  $I^*$  para obtener la potencia del lado de *ac* del STATCOM resulta la expresión siguiente

$$RI^2 + kV_{dc} \cos\theta + jkV_{dc} \text{sen}\theta = VI \cos(\delta - \theta) + jVI \text{sen}(\delta - \theta) \quad (3.11)$$

Por otro lado al multiplicar la ecuación (3.8) por  $V_{dc}$  se obtiene la potencia del lado de *dc*

$$CV_{dc} \dot{V}_{dc} + R_c^{-1} V_{dc}^2 = V_{dc} i_{dc} \quad (3.12)$$

La potencia del lado de *dc* es igual a la parte real de la potencia del lado de *ac* del STATCOM, es decir

$$V_{dc} i_{dc} = \text{Re}(kV_{dc} I^*) \quad (3.13)$$

Por lo que

$$cV_{dc} \dot{V}_{dc} + R_c^{-1} V_{dc}^2 = VI \cos(\delta - \theta) \quad (3.14)$$

Despejando de (3.12) para conocer la dinámica del capacitor a partir de  $\dot{V}_{dc}$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (3.15)$$

Para la siguiente ecuación del modelo se hará el análisis la malla del circuito y tomando en cuenta las pérdidas en el transformador de acoplamiento se tiene que:

$$Z_T I_T + kV_{dc} = V \quad (3.16)$$

de donde

$$I_T = \frac{V - kV_{dc}}{Z_T} \quad (3.17)$$

Si la impedancia del transformador puede representarse como una suma de la parte real y la reactiva,  $Z_T = (G + jB)^{-1}$ , con la estructura propuesta con anterioridad para el voltaje de la línea y proponiendo a  $V_{dc} = V_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)$ , entonces la ecuación (3.17) se convertirá en la expresión:

$$I_T = [V(\cos\delta + j\text{sen}\delta) - kV_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)](G + jB) \quad (3.18)$$

De (3.18) en (3.16) se tiene

$$[(G + jB)^{-1}[V(\cos\delta + j\text{sen}\delta) - kV_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)](G + jB) + kV_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)] = V \quad (3.19)$$

Para obtener el balance de potencias entre el STATCOM y el sistema de *ac*, se multiplica la ecuación (3.16) por el conjugado de la corriente correspondiente

$$Z_T I_T I_T^* + kV_{dc} I_T^* = VI^* = P + jQ \quad (3.20)$$

Si  $I = I(\cos\theta + j\text{sen}\theta)$ , al sustituir las estructuras de la corriente y los voltajes resulta la expresión:

$$\begin{aligned} & [V(\cos\delta + j\text{sen}\delta) - kV_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)][V(\cos\delta - j\text{sen}\delta) - kV_{dc}(\cos\alpha - j\text{sen}\alpha)](G - jB) + \\ & + kV_{dc}(\cos\alpha + j\text{sen}\alpha)[V(\cos\delta - j\text{sen}\delta) - kV_{dc}(\cos\alpha - j\text{sen}\alpha)](G - jB) = V(\cos\delta + j\text{sen}\delta)I \\ & = P + jQ \end{aligned}$$

Utilizando identidades trigonométricas para simplificar:

$$\begin{aligned} & V^2G - jV^2B - kV_{dc}VG\cos(\delta - \alpha) + jkV_{dc}VB\cos(\delta - \alpha) - jkV_{dc}VG\text{sen}(\delta - \alpha) - kV_{dc}VB\text{sen}(\delta - \alpha) = \\ & VI\cos(\delta - \theta) + jVI\text{sen}(\delta - \theta) = P + jQ \end{aligned}$$

Separando las componentes real y reactiva, la ecuación anterior puede expresarse también de la siguiente forma

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI\cos(\delta - \theta) \\ Q - VI\text{sen}(\delta - \theta) \\ P - V^2G + kV_{dc}VG\cos(\delta - \alpha) + kV_{dc}VB\text{sen}(\delta - \alpha) \\ Q + V^2B - kV_{dc}VB\cos(\delta - \alpha) + kV_{dc}VG\text{sen}(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Finalmente se presenta el modelo dinámico completo:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f_c(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref})$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R I^2}{C V_{dc}}$$

$$0 = \begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B - kV_{dc} VB \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VG \sin(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

En el que  $k = \sqrt{3}/8 m$  y es una constante directamente proporcional al índice de modulación  $m$ .

En este controlador PWM la magnitud del voltaje de bus de  $ac$  es controlado mediante el índice de modulación  $m$ , mientras que el ángulo de fase  $\alpha$  determina la potencia activa  $P$  fluyendo dentro del controlador y por lo tanto la carga y descarga sobre el capacitor, es usada para controlar directamente la magnitud del voltaje de  $dc$ .

Los límites de control del controlador están definidos por los límites de corriente en los conmutadores electrónicos y el voltaje de  $dc$ .

### Modelo en estado estacionario

Si en la ecuación (3.22) son reemplazadas las ecuaciones correspondientes con las ecuaciones de estado estacionario de las ecuaciones de  $dc$  y la característica de control de voltaje del STATCOM es posible obtener las ecuaciones en estado estacionario para el controlador PWM.

De la curva típica de voltaje terminal contra corriente de salida del STATCOM y en condiciones de estado estacionario:

$$V - V_{ref} \pm X_{SL} I = 0 \quad (3.23)$$

De igual forma en estado estacionario el voltaje de  $dc$  debe ser igual al voltaje de  $dc$  de referencia por lo que:

$$V_{dc} = V_{dcref} \Rightarrow V_{dc} - V_{dcref} = 0 \quad (3.24)$$

Al no existir variaciones del voltaje de  $dc$  y de la ecuación (3.11) se tiene

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R I^2}{C V_{dc}}$$

Pero si  $\dot{V}_{dc} = 0$ , entonces

$$P - G_c V_{dc}^2 - R I^2 = 0 \quad (3.25)$$

Finalmente el flujo de potencia entre el STATCOM y el sistema continúa siendo el mismo representado por la ecuación (3.21).

El modelo completo, en estado estacionario es el siguiente:

$$0 = \begin{bmatrix} V - V_{ref} \pm X_{SL} I \\ V_{dc} - V_{dcref} \\ P - G_C V_{dc}^2 - R I^2 \\ P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} VG \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VB \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B - kV_{dc} VB \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} VG \sin(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

En la primera ecuación, el signo positivo se usa cuando el dispositivo es operado sobre el modo capacitivo ( $Q < 0$ ) y el negativo para el modo inductivo ( $Q > 0$ ), con  $I \geq 0$  y  $X_{SL}$  corresponde a la pendiente de la curva  $V-I$  del STATCOM, Figura 3.5.

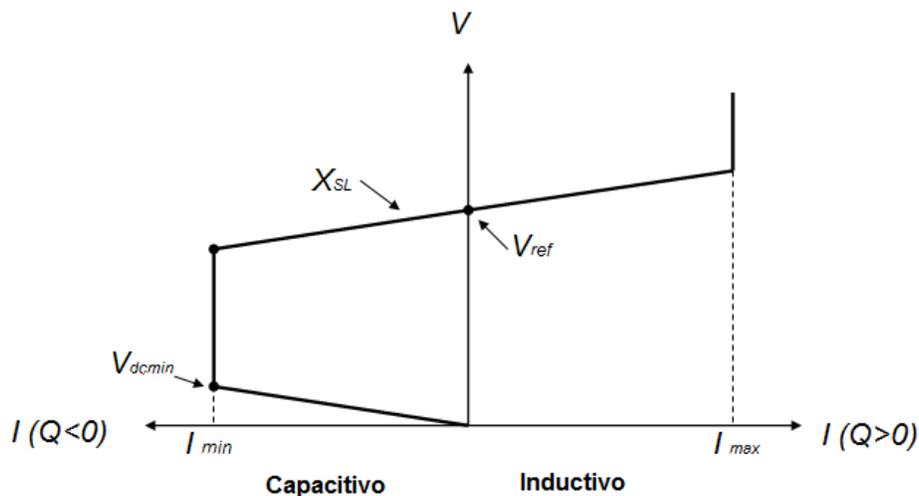


Figura. 3.5 Curva característica V-I del STATCOM.

### III.3 Modelo dinámico considerando conmutaciones

Como propuesta se presenta este modelo en el que se consideró la dinámica propia del convertidor ya que esto permite que el análisis de un sistema de potencia que cuente con un compensador electrónico se realice con mayor detalle, a diferencia de los modelos anteriormente presentados en este capítulo.

La dinámica del convertidor puede describirse mediante la Figura 3.5 en donde el convertidor se basa en una topología puente H y  $u$  es la señal que controla el cierre y apertura de los interruptores del convertidor.

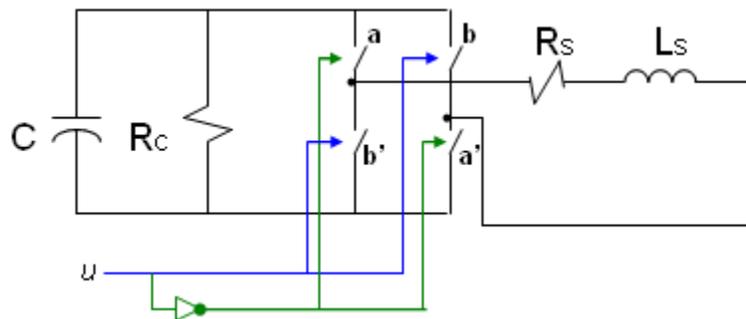


Figura. 3.6 Convertidor topología puente H.

Para este modelo también se asume que el sistema trabaja a frecuencia fundamental y se encuentra balanceado.

Cuando  $u=0$ , se indica el cierre de los interruptores a, a' y el circuito de la Figura 3.6 es equivalente al de la Figura 3.7 con el voltaje y la corriente con las polaridades indicadas.

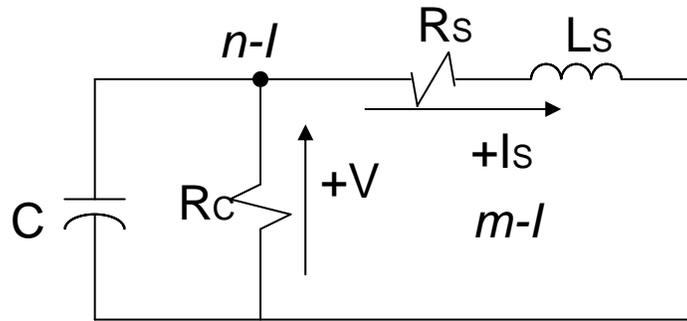


Figura. 3.7 Funcionamiento del convertidor con los interruptores  $a, a'$  cerrados y  $b, b'$  abiertos.

Cuyas ecuaciones se indican a continuación:

Analizando la malla  $m-I$ , por ley de voltajes de Kirchhoff

$$V_C = V_R + V_L$$

Al sustituir las ecuaciones características correspondientes

$$V_C = RI_s + LI_s \quad (3.27)$$

Analizando el nodo  $n-I$  por la ley de corrientes de Kirchhoff

$$I_s = i_C + i_{R_c}$$

Sustituyendo las relaciones constitutivas correspondientes

$$I_s = cV_C + \frac{1}{R_C}V_C \quad (3.28)$$

Cuando  $u=1$ , se indica el cierre de los interruptores  $b$ ,  $b'$  y el circuito de la Figura 3.6 es equivalente al de la Figura 3.8 con el voltaje y la corriente con las polaridades indicadas.

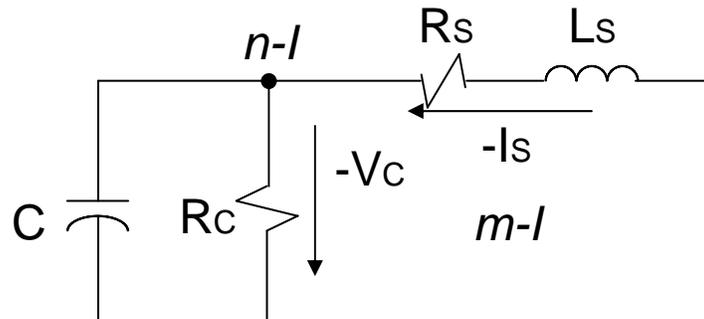


Figura. 3.8 Funcionamiento del convertidor con los interruptores  $b$ ,  $b'$  cerrados y  $a$ ,  $a'$  abiertos.

Las ecuaciones que representan el comportamiento del circuito anterior se indican a continuación

Analizando la malla  $m-I$ , por ley de voltajes de Kirchhoff

$$-V_C = V_R + V_L$$

Si las relaciones constitutivas de los elementos involucrados son sustituidas

$$-V_C = RI_S + L \frac{dI_S}{dt} \quad (3.29)$$

Analizando el nodo  $n-I$  por la ley de corrientes de Kirchhoff

$$-I_S = i_C + i_{Rc}$$

Sustituyendo las relaciones constitutivas correspondientes a cada elemento

$$-I_s = c \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{R_c} V_c \quad (3.30)$$

Para representar cualquiera de los casos representados por (3.27) y (3.29) es posible escribirlas como

$$L \frac{dI_s}{dt} + RI_s = (1-2u)V_c \quad (3.31)$$

Generalizando los casos de las expresiones (3.28) y (3.30) se tiene

$$c \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{R_c} V_c = (1-2u)I_s \quad (3.32)$$

Ya que las señales de control, representadas por  $(1-2u)$  no son continuas es necesario aplicar una técnica de promediación que nos permitirá obtener una aproximación continua del modelo anterior en el que  $(1-2u) \approx k$ , las ecuaciones (3.31) y (3.32) tomarán la forma

$$L \frac{dI_s}{dt} + RI_s = kV_c \quad (3.33)$$

$$c \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{R_c} V_c = kI_s \quad (3.34)$$

Las ecuaciones (3.33) y (3.34) están representando el modelo promediado en el que la entrada de control  $k$  ahora será continua con valores que pertenezcan al conjunto  $\{-1, 1\}$ .

El convertidor incorporado al sistema se representa mediante la siguiente figura.

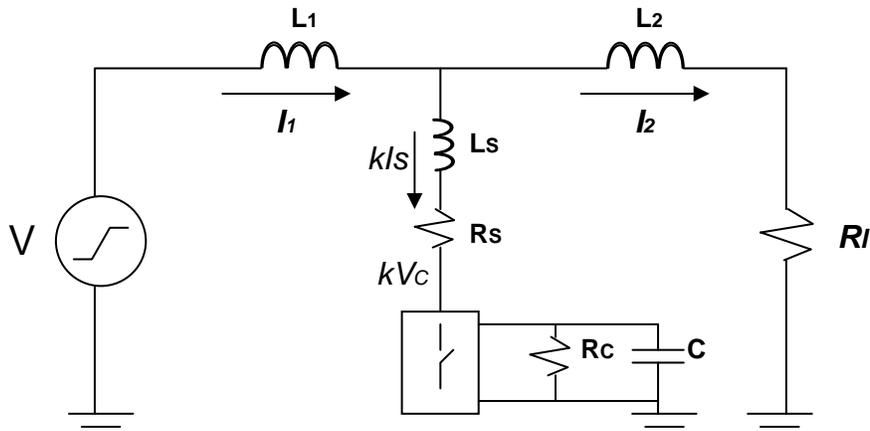


Figura 3.9. Diagrama del convertidor STATCOM conectado a una línea de transmisión

De la Figura 3.9 se pueden definir las siguientes expresiones:

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s - kV_c = L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_l I_2 \quad (3.35)$$

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s - kV_c = -L_1 \frac{dI_1}{dt} + V_R \quad (3.36)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{R_c} = kI_s \quad (3.37)$$

Con estas tres ecuaciones es posible caracterizar el modelo presentado con el cual se trabajará en el Capítulo IV para realizar el diseño del control.

Es importante destacar los aspectos que caracterizan a cada uno de los modelos presentados en este capítulo por lo que a continuación se harán algunos comentarios al respecto.

El modelo de retraso en el ángulo de disparo (Figura 3.1) es un modelo sencillo donde el regulador es una ganancia proporcional cuya función es que la diferencia entre el voltaje de referencia y el del voltaje terminal sea cero y de alguna forma permite cambiar la señal de voltaje de referencia a una señal de corriente que deberá ser generada por el compensador para enviarla como salida, en cuanto al funcionamiento del STATCOM sólo se maneja como un retraso con respecto a la señal de referencia, en este modelo no se aborda la forma en que éste trabaja para realizar la compensación ni cómo esta conformado además de que no se representan las pérdidas

Por otro lado, en el modelo de balance de energía (Figura 3.3) si se consideran las pérdidas, tanto las debidas al acoplamiento como las del convertidor, en este segundo modelo el convertidor es representado por una fuente de voltaje cuya magnitud y fase varían según una referencia dada con controladores externos al convertidor, aunque no se considera la estructura interna del convertidor.

En el caso del modelo dinámico considerando conmutaciones (Figura 3.9) se consideran todos los elementos que conforman al convertidor y la representación de sus pérdidas, se hace el análisis de la estructura y funcionamiento interno del convertidor lo cual es una aportación que permite definir su dinámica en todo momento y representar la forma en que realiza la compensación y cómo interactúa con el sistema bajo cualquier condición.

El control que será aplicado al STATCOM para obtener su comportamiento deseado será desarrollado en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO IV.

### **CONTROL**

Varios métodos de control han sido usados para realizar tareas de control en convertidores basados en electrónica de potencia, incluyendo técnicas lineales y no lineales; la linealización entrada-salida ha sido aplicada para control de rectificadores trifásicos, control difuso se ha usado en rectificadores controladores de fase y control basado en pasividad se ha aplicado a fin de lograr un factor de potencia unitario [8].

Entre todas las técnicas mencionadas anteriormente, una técnica de control no lineal basada en disipación de energía (Control Basado en Pasividad) se ha usado desde 1997 para controlar convertidores dc/dc, seguir corriente para compensación del factor de potencia en rectificadores así como para control de rectificadores e inversores usados para diferentes tareas como control de sistemas de energía ininterrumpibles, compensación de corrientes armónicas en paralelo con un inversor de medio puente, compensación de potencia reactiva por cancelación de armónicas con filtros activos, compensación del factor de potencia en un rectificador multinivel con regulación de voltaje en el lado de *dc* solo por mencionar algunas aplicaciones del control basado en pasividad para convertidores basados en electrónica de potencia [9]. En muchos de estos diseños usualmente se considera como carga una resistencia de valor constante, aunque esto es una situación poco realista se hace esta consideración por simplicidad matemática.

Una vez que se ha descrito de forma detallada el funcionamiento del convertidor en el último modelo abordado en el capítulo anterior en el que

se toma en cuenta la dinámica del convertidor, será diseñado el esquema de control y se hará el análisis con un sistema como el mostrado en la Figura 4.1 en donde el STATCOM estará conectado en derivación en un punto entre el generador ( $V_R$ ) y una carga,  $L_1$  y  $L_2$  representan la impedancia de la línea, en el punto de conexión la ley de corrientes es  $I_s = I_1 + I_2$ .

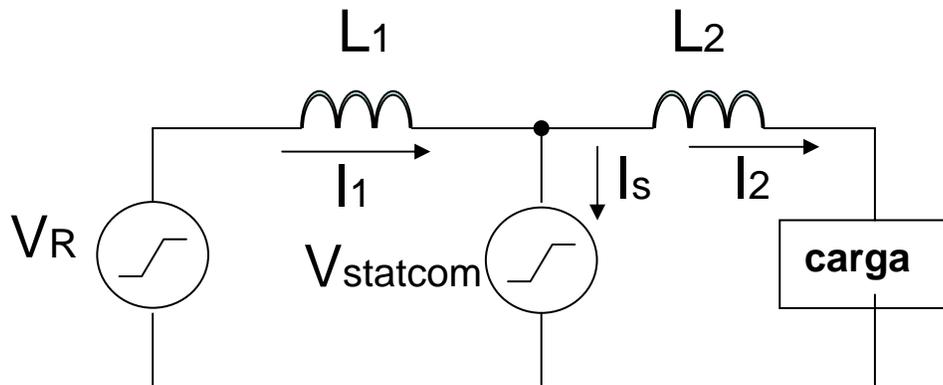


Figura. 4.1 Sistema de estudio.

Como se estableció en el capítulo anterior el sistema a estudiar puede representarse mediante la Figura 4.1 y al incorporar los elementos propios de la línea, de la carga y del convertidor, la Figura 3.3 es equivalente; es importante mencionar que al realizar el análisis únicamente se considerará la componente fundamental.

En la Figura 4.2 el capacitor  $C$  es usado como la fuente de voltaje del convertidor,  $R_C$  representa las pérdidas del capacitor,  $R_s$  son las pérdidas del convertidor que cuenta además con un acoplamiento  $L_s$ ,  $L_1$  y  $L_2$  son las impedancias de la línea entre el generador ( $V_R$ ), el punto de conexión del convertidor y la carga representada como una resistencia fija  $R_l$ .

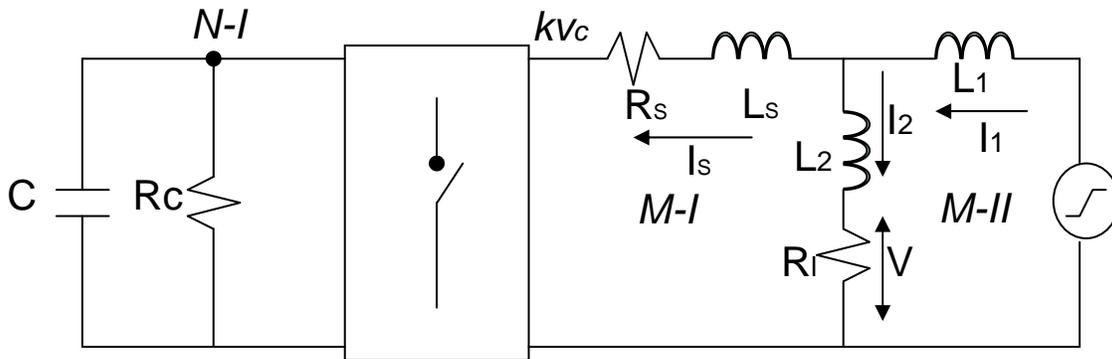


Figura. 4.2 Sistema detallado.

El reto para el control a diseñar es lograr dos objetivos de control al mismo tiempo:

- Mantener el voltaje en el capacitor ( $V_C$ ) fijo en un valor de referencia.
- Realizar seguimiento de la corriente proporcionada por el STATCOM ( $I_s$ ).

Para esto únicamente se cuenta con una entrada de control que es la función de conmutación  $k$  por lo que será necesario establecer un segundo grado de libertad.

Ya que mediante la Figura 4.2 se ha establecido la estructura y operación del convertidor, aplicando las leyes de corrientes y voltajes de Kirchoff se pueden obtener el par de ecuaciones diferenciales que se presentan enseguida para describir su comportamiento dinámico.

Para el lado de  $dc$  del convertidor, en el nodo  $N-I$  se tiene que:

$$C \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{R_C} V_C - k I_s = 0 \quad (4.1)$$

Para el lado de  $ac$  del convertidor, analizando la malla  $M-I$ :

$$L_s \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s + kV_C = v \quad (4.2)$$

Con la finalidad de aplicar la técnica de control basado en pasividad se asumirán los siguientes hechos:

- 1) Todos los parámetros del inversor son conocidos.
- 2) El voltaje del capacitor es medible y su valor deseado es conocido.
- 3) El voltaje del sistema también es conocido y es de la forma

$$V_R = V_R \cdot \text{sen}(wt).$$

Las hipótesis 2) y 3) son hipótesis razonables, mientras que, no es fácil garantizar que todos los parámetros del inversor son conocidos, como se plantea en el hecho 1), la evaluación del controlador, que será presentada en el siguiente capítulo, mostrara que mediante el esquema propuesto es posible enfrentar las incertidumbres existentes.

Primero se realizará un análisis que permita conocer en qué medida el convertidor puede lograr el comportamiento deseado y definir los valores deseados para la corriente  $I_{sd}$  y el voltaje  $V_{Cd}$  requeridos en la estructura del controlador, este análisis se hace asumiendo que el convertidor se encuentra trabajando en estado estacionario, por lo que los valores de  $I_s$  y  $V_C$  ya han alcanzado sus valores deseados.

Primero poner (4.1) y (4.2) con los valores deseados

$$c \frac{dV_{Cd}}{dt} + \frac{1}{R_C} V_{Cd} - kI_{sd} = 0 \quad (4.3)$$

$$L \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} + kV_{Cd} = v \quad (4.4)$$

donde

$$v = L_2 \frac{di_2}{dt} + V_T \quad (4.5)$$

Despejando  $k$  de la ecuación (4.4)

$$k = -\frac{1}{V_{Cd}} \left[ L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} - v \right] \quad (4.6)$$

La ecuación (4.6) será la primera ley de control para una corriente  $I_{sd}$  dada y  $V_{Cd}$  diferente de cero.

Ahora se establecerá la segunda ley de control como:

$$I_{sd} = I_1 \text{sen}(\omega t) \quad (4.7)$$

Al elegir un valor apropiado para el parámetro  $I_1$  es posible asignar a  $I_s$  su valor deseado.

Si se considera la ley de control representada por la ecuación (4.6) en la ecuación (4.3) se tiene

$$cV_{Cd} \frac{dV_{Cd}}{dt} + \frac{1}{R_C} V_{Cd}^2 = -L I_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - R_s I_{sd}^2 + v \quad (4.8)$$

Aplicando el siguiente cambio de variable en (4.8)

$$V_{Cd}^2 = z$$

$$\frac{c}{2} \frac{dz}{dt} + \frac{1}{R_C} z = -L I_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - R_s I_{sd}^2 + v \quad (4.9)$$

El objetivo de control quedará completamente resuelto si el valor de  $z$  es elegido de tal forma que tienda a un valor deseado del  $V_C$ , se detalla el procedimiento enseguida.

Si se define  $v = A \sin(\omega t + \varphi)$  y se sustituye en (4.9) esta estructura junto con la segunda ley de control establecida da como resultado

$$\frac{c}{2} \frac{dz}{dt} + \frac{1}{R_C} z = -L(I_1 \sin(\omega t))(I_1 \omega \cos(\omega t)) - R_s I_1^2 \sin^2(\omega t) + A I_1 \sin(\omega t + \varphi) \sin(\omega t) \quad (4.10)$$

A partir de (4.10) y considerando que se está trabajando únicamente con la frecuencia fundamental la expresión anterior se convierte en

$$\bar{z} = -\frac{R_s I_1^2}{2} + \frac{A I_1}{2} \cos(\varphi)$$

de donde

$$R_s I_1^2 - A I_1 \cos \varphi + 2z = 0 \quad (4.11)$$

Por otro lado, si

$$V_T = R_l I_2, \text{ entonces } I_2 = \frac{V_T}{R_l} \quad (4.12)$$

De  $I_2$  definida en (4.12), con la estructura establecida con anterioridad para  $v$  y si  $V_T = V \sin(\omega t)$  se obtiene la siguiente expresión

$$\begin{aligned}
A \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) &= \frac{L_2}{R_l} \frac{dV_T}{dt} + V_T = \frac{L_2}{R_l} V \omega \cos(\omega t) + V \operatorname{sen}(\omega t) \\
A \operatorname{sen}(\omega t) \cos(\varphi) + A \cos(\omega t) \operatorname{sen}(\varphi) &= \frac{L_2}{R_l} V \omega \cos(\omega t) + V \operatorname{sen}(\omega t)
\end{aligned} \tag{4.13}$$

De la ecuación (4.13) se define que

$$A = V \sqrt{\left(\frac{\omega L_2}{R_l}\right)^2 + 1} \quad \text{y} \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_2}{R_l}\right)$$

Determinando las constantes anteriores será posible encontrar los valores requeridos en la segunda ley de control presentada por (4.7).

Con lo anterior han quedado establecidas las leyes de control que permitirán ejercer control sobre las variables de interés.

Finalmente se plantea el mecanismo de estabilización el cual esta dado en términos de una retroalimentación proporcional de las variables del convertidor, para lo cual se incorporará la dinámica del error asociada a los valores deseados de las variables de control, el cual será definido como:

$$\tilde{x} = x - x_d$$

En el que  $x$  es el valor obtenido del sistema y  $x_d$  representa el valor deseado para cada una de las variables de control. Por lo que al introducirlo en las expresiones (4.1) y (4.2)

$$c \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{R_C} V_C - k I_s = -k_1 (V_C - V_{Cd}) \tag{4.14}$$

$$L \frac{dI_s}{dt} + R_s I_s + kV_c - v = -k_2(I_s - I_{sd}) \quad (4.15)$$

Con las expresiones (4.14) y (4.15) queda definido el sistema y evidentemente el comportamiento deseado se alcanzará cuando el error  $\tilde{x} \rightarrow 0$ .

Las simulaciones que serán presentadas en el siguiente capítulo permitirán poner a prueba el modelo propuesto así como el control diseñado comprobando así su funcionamiento y verificando que los objetivos de control establecidos se logren.

## CAPITULO V.

### **SIMULACIONES**

Para implementar las leyes de control al modelo dinámico considerando conmutaciones y cuyas ecuaciones fueron presentadas en el capítulo anterior, ahora se aplicarán las leyes de control propuestas para el mismo con el fin de mostrar la efectividad de dicho diseño.

Primero se presentarán los parámetros del sistema y los voltajes y corrientes propias de una situación ideal, con la finalidad de observar que la respuesta del sistema bajo esta condición es el deseado se presentarán las gráficas correspondientes, luego se propondrá una situación diferente en la cual el sistema será sometido a una condición de falla representada por un cambio en el voltaje de la línea y nuevamente se presentarán las graficas pertinentes con las que se mostrara que el control actúa de tal forma que el comportamiento del sistema es el deseado.

Las simulaciones reportadas a continuación fueron realizadas mediante Matlab y Simulink, el método numérico utilizado es el *ode45* de *Dormand-Prince*, el cual es una variación del Runge-Kutta de 4° y 5° orden con paso de integración variable o adaptativo, el máximo paso de integración con el cual se trabajó es de 0.0001 y el mínimo esta determinado de forma automática por el programa con una tolerancia relativa de  $1e-6$

Un esquema de integración de paso variable este método es de los más utilizados en la práctica ya que es una de las alternativas para resolver los problemas que conlleva la simulación de sistemas rígidos, la integración de paso variable implica que la propia subrutina calcula el paso de

integración para que, sea cual sea la función y el esquema utilizado, el resultado sea numéricamente correcto.

Las simulaciones se harán con un sistema como el que muestra la Figura 4.2. El valor deseado para el voltaje en el capacitor es de 200 V y para la corriente  $I_s=8.1$  A. Todos los parámetros de la línea y el convertidor, se presentan en la Tabla I.

$L_1$	0.15 mH	$R_s$	0.08 $\Omega$
$L_2$	0.15 mH	C	24 mF
$L_s$	0.2 mH	$\omega$	377 rad/s
$R_l$	25 $\Omega$	$V_t$	100 V
$R_c$	100 $\Omega$		

*Tabla I. Parámetros del convertidor y la línea*

Los valores de las ganancias de control  $k_1=0.2$  y  $k_2=0.0001$  fueron determinados de manera experimental siendo éstos los que permitieron un mejor funcionamiento del sistema y el control del convertidor.

Las gráficas de la Figura 5.1, 5.2 y 5.3 representan al sistema trabajando con los parámetros establecidos y sus valores deseados.

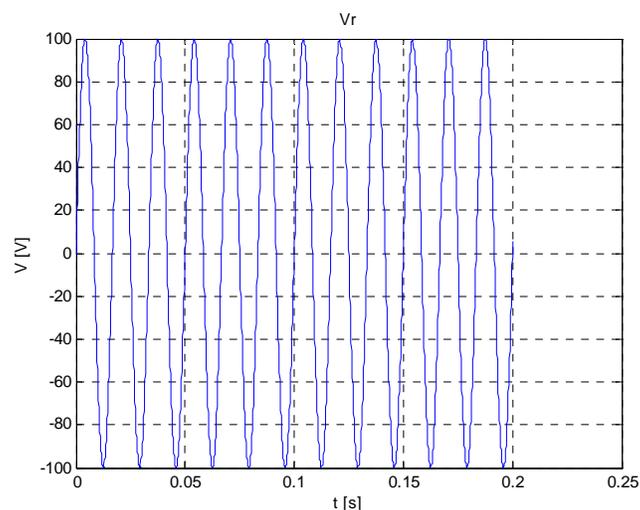


Figura 5.1 Voltaje de la línea ( $V_R$ )

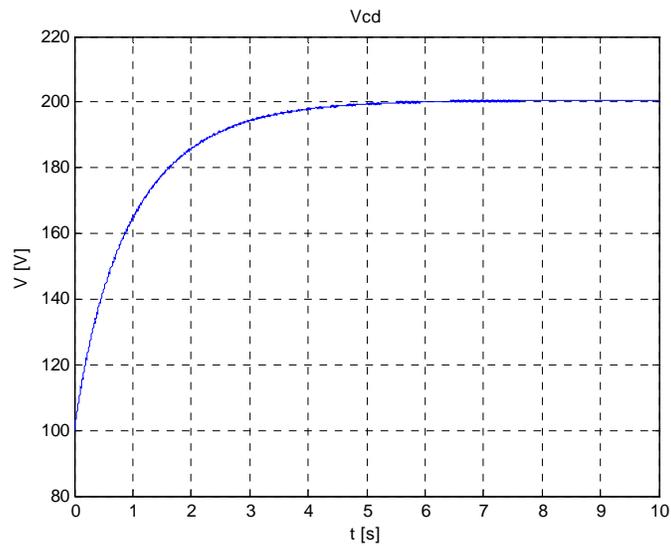


Figura 5.2 Voltaje deseado en el capacitor ( $V_{Cd}$ ).

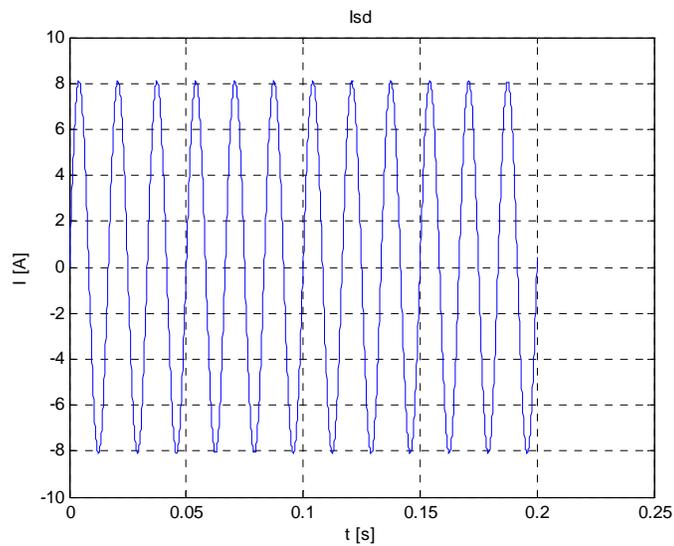


Figura 5.3 Corriente deseada del convertidor ( $I_{sd}$ )

### **V.1 SIMULACIÓN Y RESPUESTA DEL SISTEMA EN CONDICIONES IDEALES**

Las gráficas presentadas a continuación muestran la condición de cuando el sistema se encuentra trabajando en condiciones ideales.

En este caso el valor del voltaje en la línea presentado en la Figura 5.2a) es el que permite que lo demandado por la carga se suministre con el voltaje que circula por la línea.

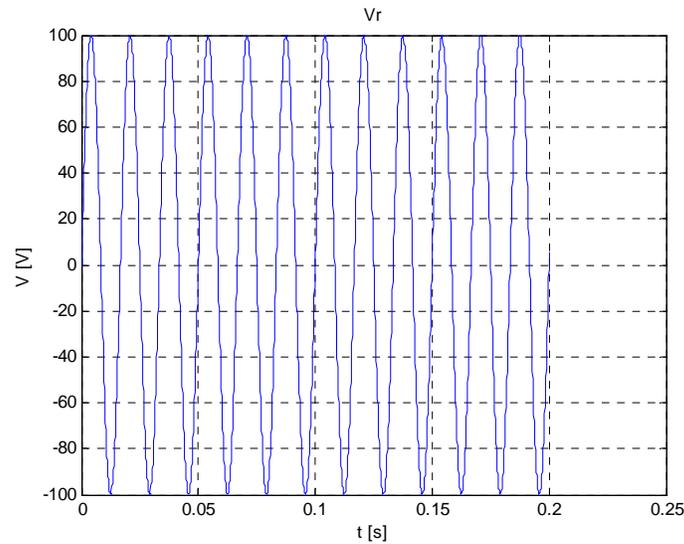


Figura 5.2 a)  $V_R$ .

En la Figura 5.2b) se puede observar que  $V_C$  llega a un valor constante que al ser contrastado con el valor deseado establecido anteriormente se presenta un error en estado estacionario prácticamente nulo, Figura (5.2b') esto implica que, de ser necesario, el capacitor como fuente de  $dc$  del convertidor, tendrá la energía necesaria para realizar compensación.

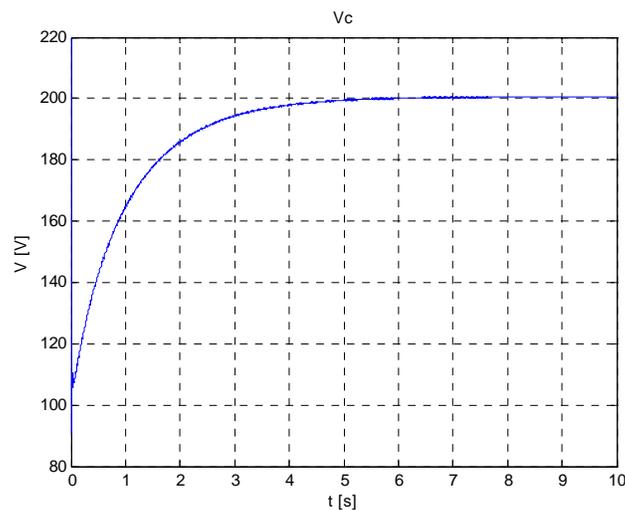
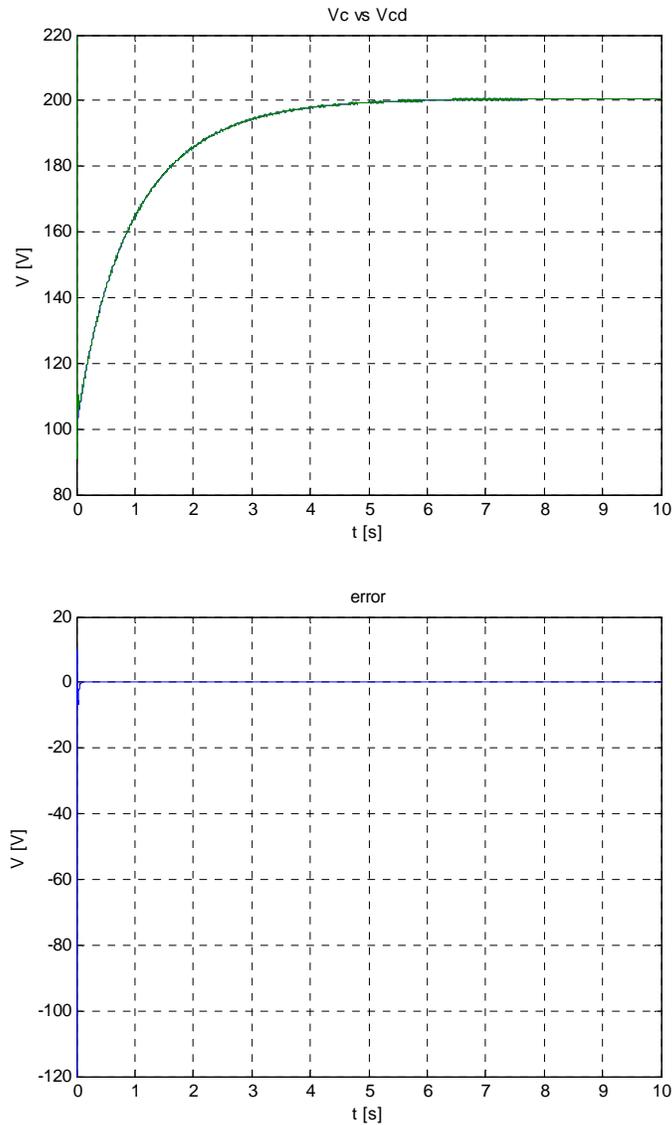
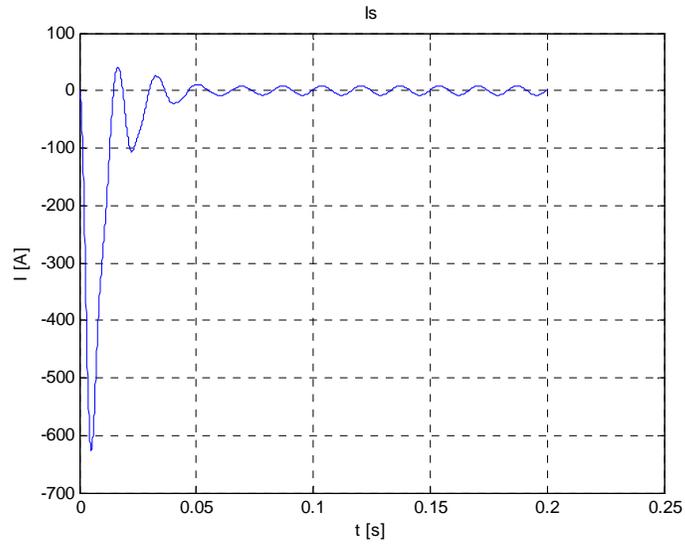


Figura 5.2 b)  $V_C$ .

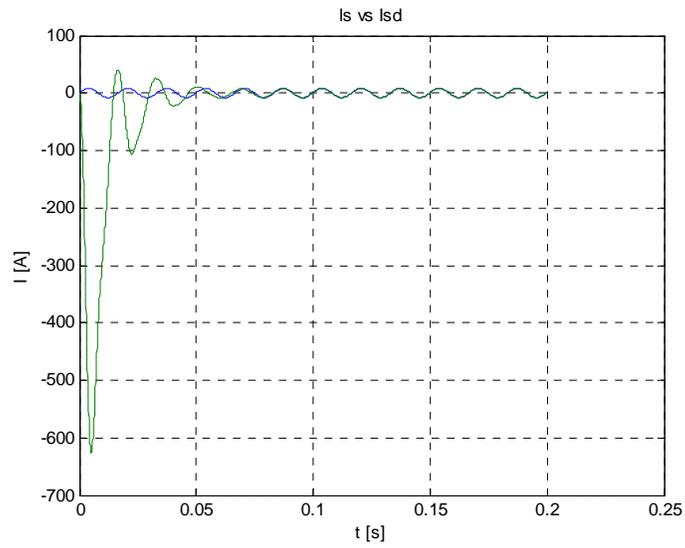


*Figura 5.2b')  $V_C$  vs  $V_{Cd}$*

La corriente del convertidor ( $I_s$ ) es mostrada en la Figura 5.2c), en 5.2c) se observa que en estado estacionario no existe diferencia entre el valor deseado y el que da el convertidor.



*Figura 5.2 c) Is*



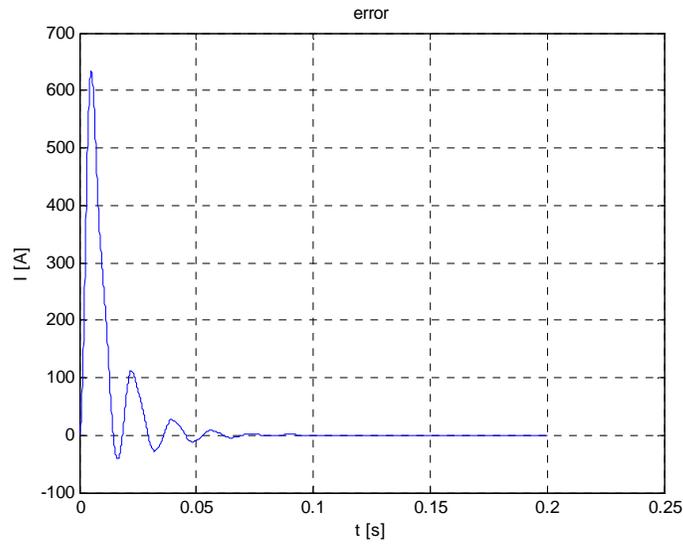


Figura 5.2 c')  $I_s$  vs  $I_{sd}$

La gráfica 5.2d) se muestran las variaciones y estabilización de la variable de control  $k$  hasta que se logra que  $V_C$  e  $I_s$  lleguen a los valores deseados.

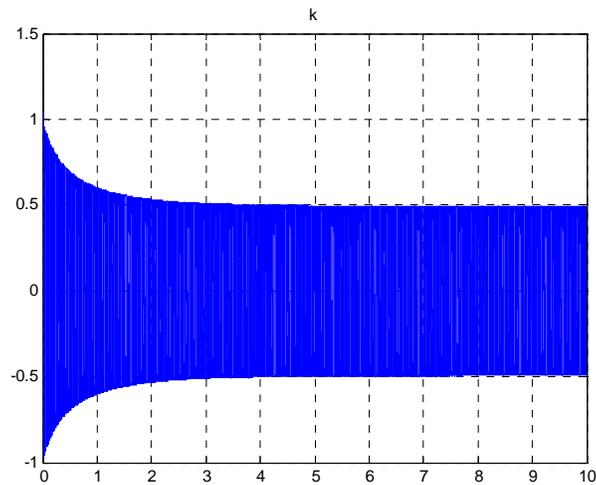


Figura 5.2 d)  $k$

## V.2 SIMULACIÓN Y RESPUESTA DEL SISTEMA FRENTE A UNA PERTURBACIÓN

La presentación del caso siguiente será de utilidad para comprobar el funcionamiento del control en condiciones diferentes a las ideales.

Se simulará el caso en que existe una perturbación en el sistema, dicha perturbación se representará con un cambio el voltaje en la línea de un 10% con respecto a las condiciones ideales como se muestra en la Figura 5.3 a).

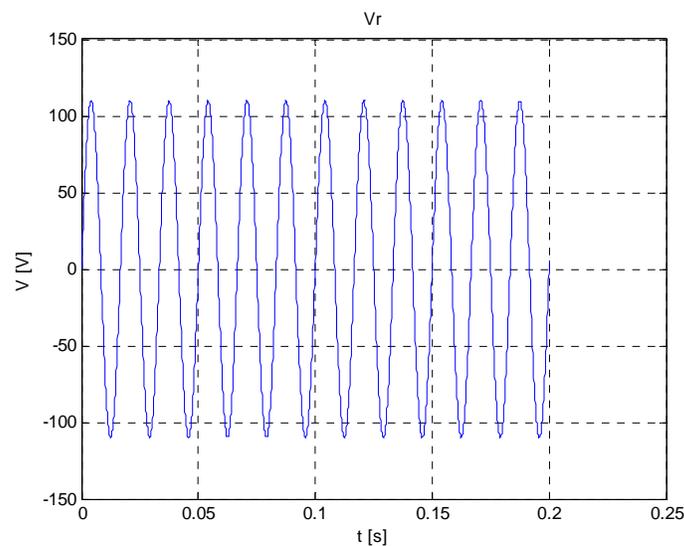


Figura 5.3 a)  $V_R$ .

De manera similar a lo presentado con anterioridad se puede observar que el voltaje en el capacitor logra llegar a un valor constante presentando un error menor al 1% con respecto al valor final deseado según se observa en la Figura 5.3 b, b')

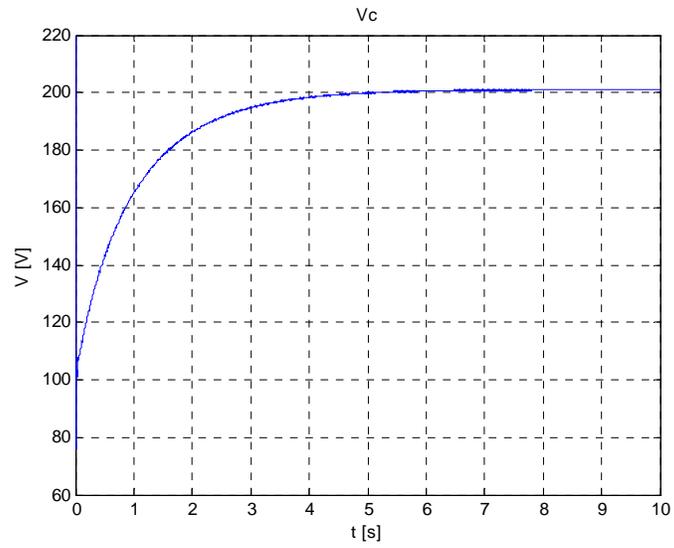
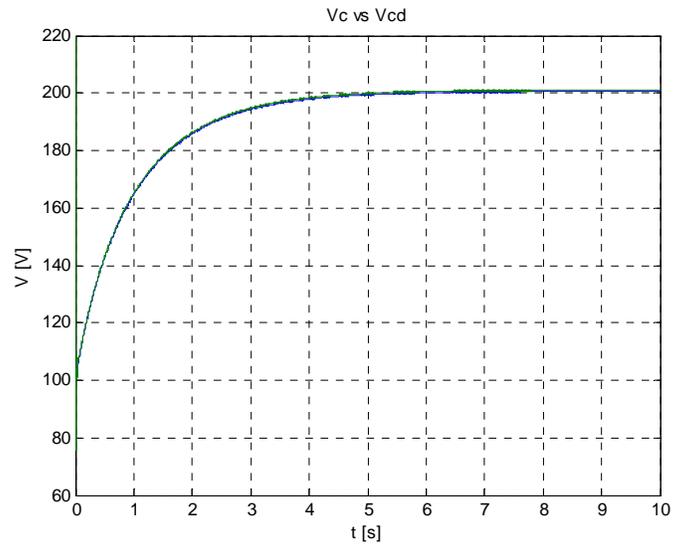
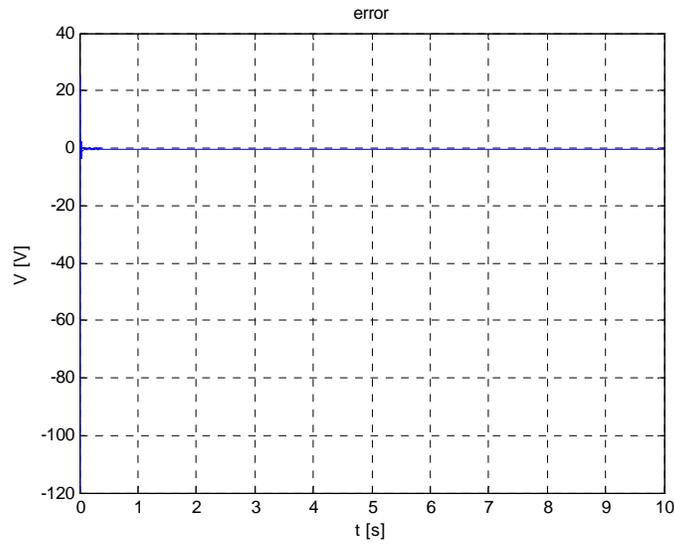


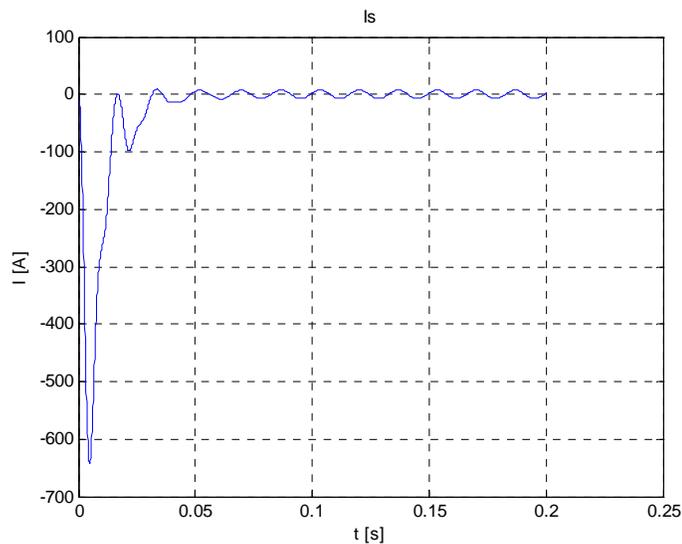
Figura 5.3 b)  $V_c$



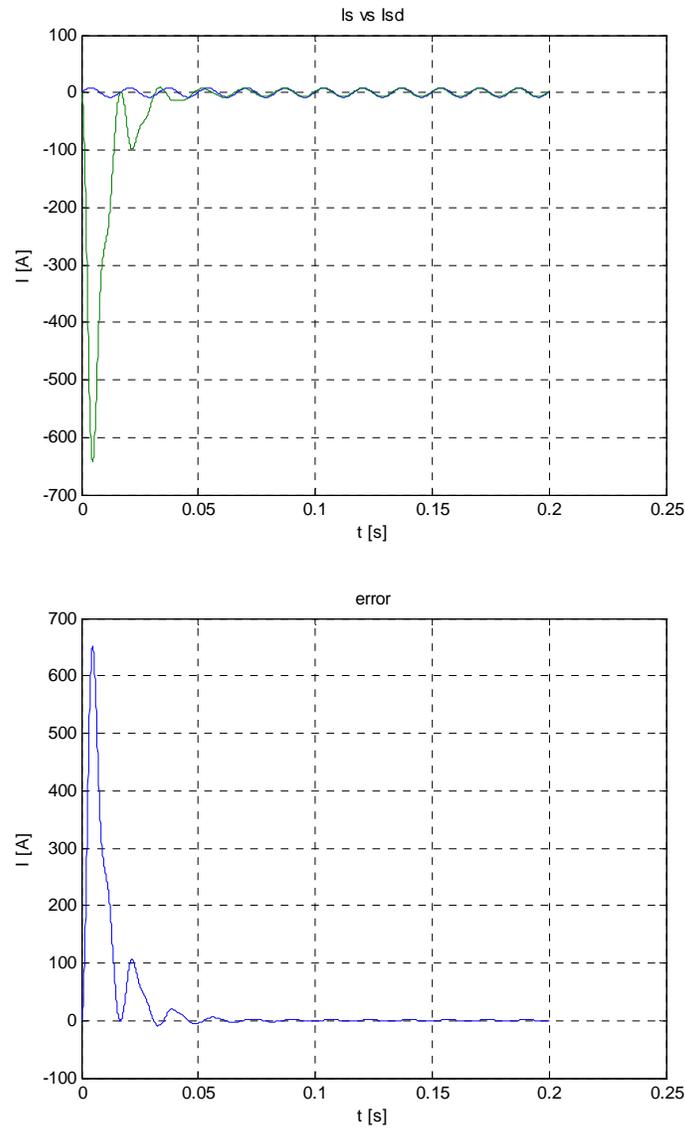


*Figura 5.3 b')Vc vs Vcd*

Para la corriente suministrada por el convertidor, mostrada en la Figura 5.3 c,c'), el sistema controlado logra llegar al valor deseado en un tiempo ligeramente mayor al del caso de la simulación en condiciones ideales, pero en general el error presentado resulta poco significativo.

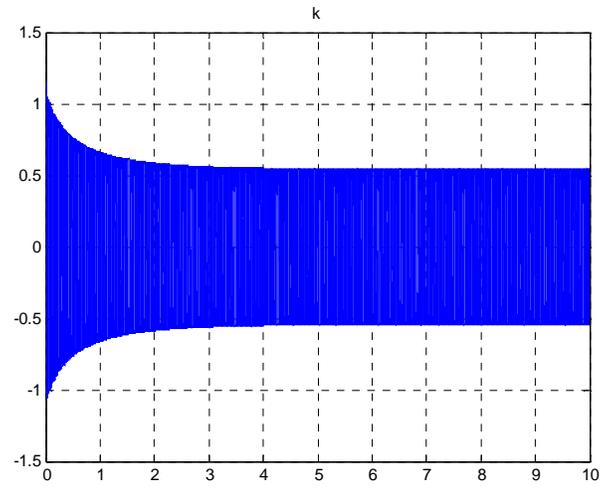


*Figura 5.3 c)Is.*



*Figura 5.3 c')Is vs Isd*

De igual forma que en la simulación en condiciones ideales, la variable de control presenta una variación hasta llegar al valor en que, tanto la corriente  $I_s$  como el voltaje  $V_C$ , llegan a ser los deseados, como se ve en la Figura 5.3 d.



*Figura 5.3 d) k*

## CAPÍTULO VI.

### **CONCLUSIONES**

- El modelo propuesto permite representar todos los parámetros tanto de la línea como del convertidor así como su comportamiento de manera dinámica, con esto se logra una representación mucho más cercana a la realidad lo que aumenta la confiabilidad de los resultados.
- Con base en los resultados de las simulaciones es posible decir que, el control diseñado funciona, el comportamiento del convertidor es el deseado y permite lograr los objetivos de control con error mínimo aumentando así la tolerancia del sistema a fallas.
- El hecho de que los valores de las variables de interés lleguen a los valores deseados garantiza que la energía en la carga será la requerida, por lo que se puede decir que el diseño del control y el funcionamiento del convertidor es adecuado y esta trabajando de manera correcta ya que los objetivos de control establecidos se logran.
- El buen funcionamiento del control demuestra que aplicando Control Basado en Pasividad para diseñar las leyes de control es una buena opción para dispositivos basados en electrónica de potencia de una manera relativamente sencilla pero con buenos resultados.
- El análisis de los resultados obtenidos nos permite decir que el STATCOM es un dispositivo eficiente para lograr compensación de potencia al ser conectado en líneas de transmisión de AC, esta

situación lo coloca como una opción más para mejorar la calidad de la energía en los sistemas de transmisión.

- Se logró demostrar que la implementación de un dispositivo STATCOM logra que la estabilidad dentro de un sistema eléctrico de potencia aumente de forma considerable, con esto es posible evitar cortes de energía y afectaciones al equipo conectado a ellos al presentarse alguna falla.
- La respuesta de un convertidor STATCOM esta íntimamente relacionada con el tipo de dispositivos electrónicos que lo conforman por lo que, al utilizar dispositivos más poderosos se aumentará la eficiencia, velocidad y capacidades del convertidor.
- El uso de dispositivos FACTS tales como el STATCOM representa una inversión importante en los sistemas de potencia la cual es justificable tomando en cuenta que presentan enormes ventajas ya que no solo pueden sustituir elementos electromecánicos, con velocidad de respuesta baja y vida útil corta debido al desgaste por uso, sino que además de que pueden ser complementos de los sistemas de protecciones mejorando los sistemas de transmisión.
- El estudio profundo y detallado del STATCOM así como de otros dispositivos FACTS es primordial para lograr incrementar su aplicación a escala mundial revolucionando los sistemas eléctricos de potencia y satisfaciendo las crecientes demandas puestas sobre dichos sistemas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Viqueira L. Jacinto. **Redes eléctricas**, Vol. 1, México: Ediciones Alfaomega, 1993
- [2] Narain G. Hingorani, Lazlo Gyugyi, **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**, Wiley-IEEE Press, 1999
- [3] Cao G., Dong Z.Y., Wang Y., Zhang P., Oh Y.T., **VSC based STATCOM controller for damping multi-mode oscillations**, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008
- [4] Sarmiento Gerardo, **Algunas consideraciones para identificar la aplicación de controladores FACTS en los sistemas de transmisión**, CIGRE-México, Bienal 2001
- [5] Chen Jianye, Song Shan, Wang Zhanji, **Analysis and implement of thyristor-based STATCOM**, International Conference on Power System Technology, 2006
- [6] Dávalos M. Ricardo, Ramírez A. Juan, **Características funcionales del STATCOM**, CIGRE-México, Bienal 2001
- [7] Cañizares Claudio A., Pozzi Massimo, Corsi Sandro, Uzunovic Edvina, **STATCOM Modeling for Voltage and Angle Stability Studies**, Electrical Power and energy systems, Vol. 25, 2003, pp. 1-20

- [8] V. Fernao Pires, J. Fernando Silva, G. D. Marques, ***Space vector  $\alpha$ - $\beta$  Modulator and Sliding Mode Control of the Three-Phase Buck Type Rectifier with Freewheeling Diode***, 28<sup>th</sup> Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE 2002, Vol. 1, pp. 341-346, 2002.
- [9] G. Escobar, D. Chevreau, R. Ortega, E. Mendes, ***A Passivity Based Controller for the regulation of a Unity Power Factor Rectifier Using a Full Bridge Boost Circuit: Stability Analysis and Experimental Results***. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 451-456, 1999.
- [10] Cavallo Alberto, Setola Roberto, Vasca Francesco, ***Using MATLAB, SIMULINK and Control System Toolbox: a practical approach***, Londres, Prentice Hall, 1996.
- [11] Zhang Yankui, Zhang Yan, Wu Bei, Jian Zhou, ***Power injection model of STATCOM with control and operating limit for power flow and voltage stability analysis***, Electric Power System Research, No. 76, 2006.
- [12] Lin Tan Yoke, Wang Youyi, ***Design of series and shunt FACTS controller using adaptive nonlinear coordinated design techniques***, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No.3, Singapur, 1997