



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE UN COMPENSADOR
ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)”**

TESINA DE SEMINARIO

GRADO A OBTENER

**Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica y Automatización
Industrial**

Presentada por:

JOSÉ LUIS LOOR LÓPEZ

Guayaquil-Ecuador

2012

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme llegar hasta donde me lo he propuesto, a mi familia que me ha brindado todo su apoyo y confianza, a esta prestigiosa Universidad llamada ESPOL, en especial a la FIEC donde tuve el agrado de haber tenido mis mejores guías mis profesores a lo largo de mi carrera de estudiante impartiendo todos sus conocimientos y experiencias, y en especial al PhD. Sixifo Falcones por su constante apoyo en este proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres en especial a mi madre Magdalena López Yépez, que ha sido un constante apoyo a lo largo de mi vida, a mi esposa Ivanna Carolina Aguilar, a mi hijo Renato Loor Aguilar , y a toda mi familia en general, que han sido pilar fundamental y una motivación para alcanzar este objetivo tan anhelado.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sixifo Falcones', written over a horizontal line.

PHD. SIXIFO FALCONES

**PROFESOR DEL SEMINARIO
DE GRADUACIÓN**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Efrén Herrera', written over a horizontal line.

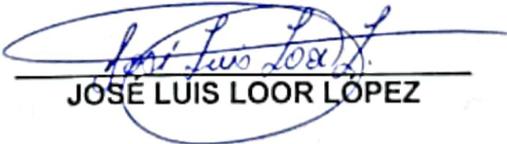
ING. EFREN HERRERA

**PROFESOR DELEGADO
POR LA UNIDAD ACADÉMICA**

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de esta Tesina, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

(REGLAMENTO DE GRADUACIÓN DE LA ESPOL)



JOSÉ LUIS LOOR LÓPEZ

RESUMEN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia se han convertido por mucho en los sistemas más complejos creados por el hombre. Desde su aparición los Sistemas Flexibles de Transmisión AC (Flexible AC Transmisión Systems, FACTS) han sido y continúan siendo estudiados e implementados en todas las redes eléctricas alrededor del mundo, convirtiéndose en un elemento esencial para la estabilidad, control y máxima explotación de las mismas. Uno de los dispositivos FACTS más utilizados es el Compensador Estático de Reactivos (Static Var Compensator, SVC).

En este trabajo se presenta un análisis conceptual, diseño, modelado y simulación de un SVC. Se dimensionó cada uno de los elementos del reactor controlado por tiristores (Thyristor Controlled Reactor, TCR), además se evalúa el problema de generación de armónicas en este tipo de compensador y se demuestra la inyección de armónicas de orden impar mediante análisis de Fourier, herramienta de Simulink. También se dimensionó los componentes del capacitor conmutado por tiristores (Thyristor Switched Capacitor). Así como los filtros de 5ta y 7ta armónica.

Los resultados obtenidos del diseño del SVC, como Rango de Operación continua del SVC, dimensionamiento de cada uno de sus componentes, fueron comparados mediante la herramienta de simulación del programa

SIMPOWERSYSTEM de MATLAB/SIMULINK obteniendo los resultados favorables que coinciden con los valores de diseño.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
ABREVIATURAS	XVII
SIMBOLOGÍA	XIX
CAPÍTULO 1	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 ESTADO DEL ARTE	2
1.3 CONTRIBUCIÓN	7
1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS	7
CAPÍTULO 2	9
FUNDAMENTO TEÓRICO	9

2.1 ELEMENTOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	10
2.2 REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES.....	17
2.3 CAPACITOR CONMUTADO POR TIRISTORES	25
2.3.1 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DEL TSC.....	29
2.3.2 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN.....	31
2.4 SISTEMA DE MEDICIÓN	33
2.5 REGULADOR DE VOLTAJE	34
2.6 LAZO DE ENGANCHE DE FASE.....	37
CAPÍTULO 3.....	39
DISEÑO DE COMPONENTES DEL SVC.....	39
3.1 RAMA TSC	41
3.1.1 BANCO DE CAPACITORES.....	42
3.1.2 REACTOR LIMITADOR DE CORRIENTE.....	46
3.2 RAMA TCR.....	49
3.2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR DEL TCR.....	50
3.2.2 VÁLVULAS DE TIRISTORES DEL TCR.....	56
3.3 FILTROS DE 5TA Y 7TA ARMÓNICA.....	56
CAPÍTULO 4.....	64
DISEÑO DEL CONTROLADOR	64

4.1	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	65
4.2	LINEALIZACIÓN DE LA PLANTA.....	67
4.3	GANANCIA DEL SISTEMA.....	69
4.4	DISEÑO DEL CONTROLADOR POR EL MÉTODO DEL FACTOR K. 74	
	CAPÍTULO 5.....	79
	SIMULACIÓN DEL SVC.....	79
5.1	MODELO EN SIMULINK.....	80
5.1.1	CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	80
5.1.2	TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	82
5.1.3	MODELO SIMULINK DE LA RAMA DEL TCR.....	83
5.1.4	MODELO SIMULINK DE LA RAMA DEL TSC.....	85
5.1.5	FILTROS DE 5TA Y 7MA ARMÓNICAS.....	87
5.2	MODELO EN SIMULINK DE COMPONENTES DEL CONTROL.....	88
5.2.1	SISTEMA DE MEDICIÓN.....	89
5.2.2	CONTROLADOR.....	90
5.2.3	FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN.....	93
5.2.4	CONVERTIDOR SUSCEPTANCIA-ÁNGULO.....	94
5.2.5	CONVERTIDOR DE SUSCEPTANCIA EN SEÑAL-DIGITAL.....	97

5.2.6 CONTROL DE LA OPERACIÓN CONJUNTA TSC-TCR.....	98
5.3 SIMULACIÓN	98
5.3.1 SIMULACIÓN EL LAZO ABIERTO.....	99
5.3.2 SIMULACIÓN EN LAZO CERRADO.....	101
5.3.3 SIMULACION DE RESPUESTA A UN SWELL (SUBIDA DE TENSIÓN)	102
5.3.4 SIMULACIÓN DE RESPUESTA A UN SAG (CAIDA DE TENSION)	105
CONCLUSIONES	108
BIBLIOGRAFÍA.....	110
ANEXOS.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación grafica del efecto del primer grupo de FACTS [10].	4
Figura 1.2. Representación grafica del efecto del segundo grupo de FACTS [10].	6
Figura 2.1. Sistema ideal de un SVC.	10
Figura 2.2. Característica de V/I de un compensador ideal.	11
Figura 2.3. Característica Compuesta de un SVC.	12
Figura 2.4. Circuito Equivalente de Thevenin del SEP.	13
Figura 2.5. Curva Característica de V/I Real.	13
Figura 2.6. Solución grafica de un SVC en el punto de operación.	14
Figura 2.7. Elementos que componen un SVC.	17
Figura 2.8 (a). Elementos Básicos de un TCR, (b). Control del ángulo de disparo, (c). Forma de onda de la corriente con distintos ángulos α . [1]	18
Figura 2.9. Característica de control de la susceptancia del TCR, <i>BTCR</i> [1].	20
Figura 2.10. Área de operación V/I del TCR [1].	22
Figura 2.11. Amplitud de los armónicos de corriente en el TCR vs el ángulo de disparo [1].	23
Figura 2.12. La corriente fundamental <i>I1</i> y el total de corriente armónica <i>Ih</i> [1].	24
Figura 2.13. Fotografía de la rama TCR [10].	25

Figura 2.14. Configuración básica de un capacitor conmutado por tiristores, sus respectivas formas de onda [10].	26
Figura 2.15. El factor de magnificación de la frecuencia fundamental de un TSC [4]......	28
Figura 2.16. Estrategias de disparo de un TSC [1].	30
Figura 2.17. Característica de Operación de un TSC.	31
Figura 2.18. Fotografía de la rama TSC [10]......	32
Figura 2.19. Válvula de Tiristores del SVC [10].	33
Figura 2.20. Métodos de implementación de la pendiente de corriente en el regulador de voltaje del SVC, (a) lazo de retroalimentación de la corriente, (b) retroalimentación de la susceptancia y (c) ganancia-tiempo constante[4]. ...	35
Figura 2.21. Modelo Básico 1. Las funciones de transferencia para el circuito de medición y el control del tiristor susceptancia.	36
Figura 2.22. Modelo Básico 2. Las funciones de transferencia para el circuito de medición y el control del tiristor susceptancia.	36
Figura 2.23. Figura Diagrama de Bloques de Funcionamiento PLL.....	38
Figura 3.1. Diagrama Unifilar del SVC.	40
Figura 3.2. Diagrama Esquema del TSC conectado en estrella.	41
Figura 3.3. Configuración de una fase del TSC [10].	44
Figura 3.4. Configuración de la Válvula del TSC [10].	48
Figura 3.5. Potencia Reactiva entregada por el TSC.....	49
Figura 3.6. Diagrama esquemático de una rama del TCR.....	50

Figura 3.7 Potencia Reactiva Entregada por el TCR.	53
Figura 3.8 Análisis de Fourier de Armónicos de la rama del TCR.	54
Figura 3.9 Análisis de Fourier de armónicos inyectados al Sistema.	55
Figura 3.10 Diagrama Esquemático de los filtros de 5ta y 7ma armónica. ...	57
Figura 3.11 Análisis de Fourier de armónicos en el sistema, con filtro de 5to y 7to orden.....	62
Figura 4.1 Diagrama esquemático general del sistema de control de un SVC.	65
Figura 4.2 Diagrama de bloque simplificado del SVC.....	66
Figura 4.3 Representación del sistema de potencia del SVC, incluyendo el acoplamiento con el transformador.....	69
Figura 4.4 Fase del sistema requerida para tipo de controlador [18].	76
Figura 4.5 Los tres tipos de controladores [18].....	76
Figura 4.6 Diagrama de Bode de la Ganancia del Controlador.	77
Figura 4.7 Diagrama de Bloque de la Ganancia de lazo.....	78
Figura 5.1 Diagrama del sistema del SVC construido en Simulink/SimPower System.....	80
Figura 5.2 Sistema Equivalente de Potencia.	81
Figura 5.3 Diagrama de la conexión Delta-Delta del transformador.	83
Figura 5.4 Bloque del Transformador en Simulink/SimPower System.....	83
Figura 5.5 Programación en Simulink del Bloque TCR.....	84
Figura 5.6 Programación en Simulink del Bloque TSC.....	86

Figura 5.7. Programa en Simulink de 5ta y 7ta armónica.	88
Figura 5.8. Programa Simulink del Bloque de Control.	89
Figura 5.9. Bloque de medición Implementado en Simulink.	89
Figura 5.10. Implementación de la transformación de (a, b, c) a (α , β) para la medición de voltaje promedio.	90
Figura 5.11. Programa Simulink del Controlador.	91
Figura 5.12. Bloque de Inicializa AVR.....	93
Figura 5.13. Programa Simulink del bloque Función de distribución.	94
Figura 5.14. Implementación en Simulink de Bloque Conversión de Susceptancia a alfa.....	95
Figura 5.15. Curva de la Gráfica de Transformación del ángulo de disparo a Bsvc.	96
Figura 5.16. Aplicación de una rampa como voltaje de referencia de bloque controlador.....	100
Figura 5.17. Gráfica de la simulación al aplicar una rampa como Vref. (a) Voltaje de resp, (b) Corriente ISVC del lado primario, (c) Susceptancia del SVC Bsvc, (d). Potencia Reactiva del Sistema.....	100
Figura 5.18. Gráficas de Simulación de la Prueba 1.....	103
Figura 5.19. Diagrama Fasorial Respuesta de Simulación a un Swell.....	104
Figura 5.20. Resultado de la Corriente del TCR (<i>ITCR</i>), alfa, TSC_on.	104
Figura 5.21. Gráficas de Simulación de la Prueba 1.....	105
Figura 5.22. Diagrama Fasorial Respuesta de Simulación a un Sag.....	106

Figura 5.23 Resultado de la Corriente del TCR (*ITCR*), alfa, TSC_on. 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores nominales del banco de capacitores.....	43
Tabla 3.2. Valores nominales del Reactor del SVC.....	52
Tabla 3.2. Valores nominales instalados en los filtros de 5ta y 7ma armónica.	62
Tabla 5.1. Valores del SEP.....	81
Tabla 5.2. Parámetros y características del transformador.....	82
Tabla 5.3. Parámetros del TCR.....	84
Tabla 5.4. Parámetros del Banco Capacitores.....	87
Tabla 5.5. Parámetros del Filtro de 5ta Armónica.....	87
Tabla 5.6. Parámetros del Filtro de 7ta Armónica.....	88
Tabla 5.7. Tabla de Limites de Susceptancia Bmax y Bmin.....	92
Tabla 5.8. Tabla parámetros introducidos al modelo Simulink histéresis.....	97
Tabla A.1. Valores nominales de los elementos Principales del SVC.....	115
Tabla A.2. Valores máximos y mínimos de Reactancia.....	118
Tabla A.3. Valores máximos y mínimos de Reactancia.....	119

ABREVIATURAS

AC	Corriente alterna.
CUT	Subestación Culiacán Tres.
DC	Corriente directa.
DSP	Procesamiento digital de señales.
FACTS	Sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles.
HVAC	Transmisión de alta tensión de corriente directa.
IPFC	Control de Flujo de Interlinea.
KV	Kilovoltios.
PLL	Lazo enganchado de fase.
SCR	Rectificador controlado de silicio.
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
SSSC	Compensador Serie Estático Síncrono.
STATCOM	Compensador Estático Síncrono.
TC	Transformador de corriente de instrumento.
TCPAR	Regulador de Angulo de Fase Controlado por Tiristores.
TCR	Reactancia controlada por tiristores.
TCSC	Compensador Serie Controlado por Tiristores.
TCVR	Regulador de Voltaje Controlado por Tiristores.
TP	Transformador de Potencial.
TSC	Capacitor conmutado por tiristores.

UPFC Controlador Unificado de Flujo de Potencia.

SIMBOLOGÍA

B_C	Susceptancia del capacitor.
B_L	Susceptancia del TCR.
B_{SVC}	Susceptancia del SVC.
B_{max}	Límite superior de susceptancia del SVC.
B_{min}	Límite inferior de susceptancia del SVC.
B_{ref}	Señal de susceptancia de salida del regulador de voltaje.
I_{AC}	Amplitud de la corriente en el capacitor.
I_{LF}	Amplitud de la corriente fundamental en el reactor.
I_{Ln}	Amplitud de los armónicos de corriente en el TCR.
I_{SVC}	Corriente del SVC en el lado primario del transformador.
$I_{\alpha'}$	Componente de corriente en el eje '.
I_{β}	Componente de corriente en el eje.
I_0	Componente de secuencia cero de corriente.
K_C	Ganancia del controlador.
K_N	Ganancia del Sistema.
K_N	Respuesta de susceptancia del SVC.
K_{OL}	Ganancia de lazo abierto.
K_R	Ganancia estática.
K_{SL}	Pendiente de la característica V / I .

Q_{SVC}	Potencia reactiva del SVC en el lado de alta.
R_R	Constante del integrador.
S_C	Corriente de Cortocircuito Trifásica.
T_m	Constante de tiempo del sistema de medición.
V_C	Amplitud del voltaje en el capacitor.
V_{CO}	Amplitud del voltaje inicial en el capacitor del TSC.
V_{SL}	Contribución de la pendiente.
V_{err}	Voltaje de entrada al regulador.
V_{ref}	Voltaje de referencia del regulador de voltaje.
V_{resp}	Respuesta de voltaje medido en el lado primario del transformador.
V_t	Voltaje Terminal del SVC.
$V_{\alpha'}$	Componente de voltaje en el eje α' .
V_{β}	Componente de voltaje en el eje.
V_0	Componente de secuencia cero de voltaje.
X_C	Reactancia capacitiva.
X_L	Reactancia inductiva.
X_{F5}	Reactancia de Filtro de 5ta armónica.
X_{F7}	Reactancia de Filtro de 7ta armónica.
X_{SL}	Pendiente de la característica V / I .
i_C	Corriente instantánea en el capacitor del TSC.
i_L	Corriente instantánea en el reactor del TCR.

ω_n	Frecuencia natural.
ω_0	Frecuencia fundamental.
m	Variable del factor de magnificación.
α	Ángulo de disparo del tiristor.
α'	Eje horizontal de la transformación de coordenadas.
β	Eje vertical de la transformación de coordenadas.
σ	Ángulo de conducción del tiristor.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años se ha hecho evidente que la máxima capacidad operativa de un sistema seguro de transmisión se basa frecuentemente en la estabilidad de la tensión y de los ángulos de fase, y no tanto en sus limitaciones físicas. Así pues, en vez de construir nuevas líneas, la industria ha buscado desarrollar tecnologías o dispositivos que incrementen la capacidad de las redes de transmisión, manteniendo al mismo tiempo, o incluso mejorando la estabilidad de la red.

La tecnología de Sistemas de Transmisión AC Flexibles (*Flexible AC Transmission Systems*, FACTS), basadas en la electrónica de potencia, no solo mejoran la capacidad y estabilidad de la red, sino que mejoran su flexibilidad. Los dispositivos FACTS se integran en un sistema por diversas razones, por ejemplo para controlar el flujo de energía, compensar la potencia reactiva (vars), controlar las circulaciones de potencia o realizar funciones auxiliares, como la amortiguación de oscilaciones. Los Compensadores Estáticos de Reactivos (SVC), representan la primera generación de controles FACTS y han sido utilizados desde 1970 hasta la actualidad.

El objetivo de esta tesina es la Simulación y Modelado utilizando Matlab/Simulink de uno de los dispositivos FACTS usados en un Sistema Eléctrico de Potencia, basados en la electrónica de potencia, como es el

compensador estático de potencia reactiva, en donde se cubrirá aspectos como, comportamiento, configuración y control. El programa que se ha de elaborar se ajustara lo más posible a las condiciones reales de operación de un SVC. Obteniendo resultados relacionados con el estudio de armónicos, corrección del factor de potencia, la utilización de filtros de armónicos y estabilidad de voltaje en las líneas de transmisión.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El control de voltaje está directamente relacionado con los cambios de potencia reactiva que se tiene en una red eléctrica. En demanda mínima se tiene poca carga conectada al sistema, teniendo excedentes de reactivos en la red, que se reflejan en elevaciones de voltaje. En demanda máxima se tienen valores altos de carga activa y reactiva, debiendo satisfacer, en muchos casos, la demanda de reactivos desde puntos de

generación relativamente alejados de la carga, lo que causa la degradación del perfil de voltaje de la red.

Los niveles de tensión en sistemas de CA pueden variar moderadamente, pero no se admite que superen límites bien definidos, generalmente del 5 al 10 por ciento. Los límites de estabilidad de la transmisión se refieren a la energía que un sistema afectado por importantes averías puede transmitir sin haber perdido nada de su capacidad de transmisión.

Los sistemas FACTS están diseñados para eliminar estas limitaciones de forma rápida y como en el caso de esta tesis el SVC, será diseñado para mantener un voltaje de referencia constante en la carga de nuestro sistema, para lo cual ya sea el caso, si el voltaje de la red está por encima de los valores requeridos, debe absorber potencia reactiva o cuando existe una caída de voltaje, debe entregar potencia reactiva y así mantener un voltaje constante en la carga.

1.1 ESTADO DEL ARTE.

En la segunda mitad de los 70's se introdujo la Electrónica de Potencia, en el control de la potencia reactiva, esto vino a mitigar las limitaciones básicas en la transmisión de potencia en corriente alterna, tales como distancia, estabilidad y control del flujo, lo cual ha generado una subutilización de las líneas de transmisión. En aquel

tiempo también se comenzaron a desarrollar los Reactores Controlados por Tiristores (Thyristor Controlled Reactor, TCR) y los Capacitores Conmutados por Tiristores (Thyristor Switched Capacitor, TSC), los cuales se comenzaron a utilizar solos, juntos, y en combinación con dispositivos de conmutación mecánicos para el control de voltaje. Fue entonces que después de muchas discusiones se denominaron estos dispositivos como Compensadores Estáticos de Reactivos, los primeros SVC fueron comercializados en 1974 por General Electric (GE) y en 1975 por Westinghouse [8].

En 1982 apareció el primer libro de texto sobre los SVC, llamado *Reactive Power in Electric Systems* por T.J.E Millar, publicado por Wilian-Interscience. En las década de los 80's se instaló el primer capacitor serie controlado por tiristores, para mitigar las oscilaciones de baja frecuencia [8].

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (Electric Power Research Institute, EPRI) en representación de la colaboración en la investigación y el brazo de desarrollo de la utilidad de las industrias en los EE.UU, apoyo el desarrollo de las tecnologías FACTS. Se ha discutido a través de publicaciones, en los discursos en las reuniones de la IEEE, foros, talleres, GIGRE. Su concepto fue mencionado por primera vez en el Diario EPRI en 1986, luego el lanzamiento durante

un discurso en la reunión de verano de la IEEE PES en San Francisco en Julio de 1987 y luego un discurso en la Conferencia de Energía de América en 1988 [8].

La base de las tecnologías FACTS es basada en tiristores. Sofisticados sistemas de control, vigilancia de dispositivos y códigos de computadora también son componentes importantes de FACTS. Las tecnologías FACTS permiten el control de flujo potencia en líneas de transmisión AC, y utilizar las líneas de transmisión existentes y llevarlas hasta sus límites térmicos sin sacrificar su fiabilidad.

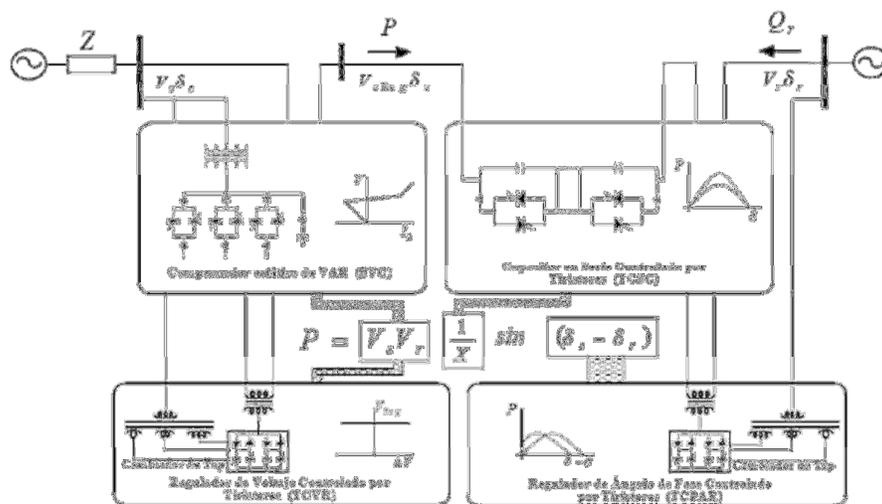


Figura 1.1. Representación grafica del efecto del primer grupo de FACTS [10].

Los controladores FACTS se pueden clasificar de varias maneras, unas de ellas es en función de la conexión de los dispositivos.

El primer grupo utiliza elementos reactivos y transformadores cambiadores de taps controlado por tiristores.

Dentro de este grupo son:

- Compensador Estático de Reactivos, (Static Var Compensator, SVC).
- Regulador de Voltaje controlado por tiristores (Thyristor Controlled Voltage Regulator, TCVR).
- Regulador de ángulo de fase controlador por tiristores (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR).
- Compensador Serie Controlado por tiristores (Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC).

El segundo grupo utiliza convertidores de voltaje auto conmutados, que actúan como fuentes estáticas de voltaje síncrono. De este grupo son:

- Compensador Estático Síncrono (Static Compensator, STATCOM)

- Compensador Serie Estático Síncrono (Static Synchronous Series Compensator, SSSC)
- Controlador de Flujos Interlinea (Interline Power Flow Controller, IPFC)
- Controlador Unificado de Flujo de Potencia (Unified Power Flow Controller, UPFC)

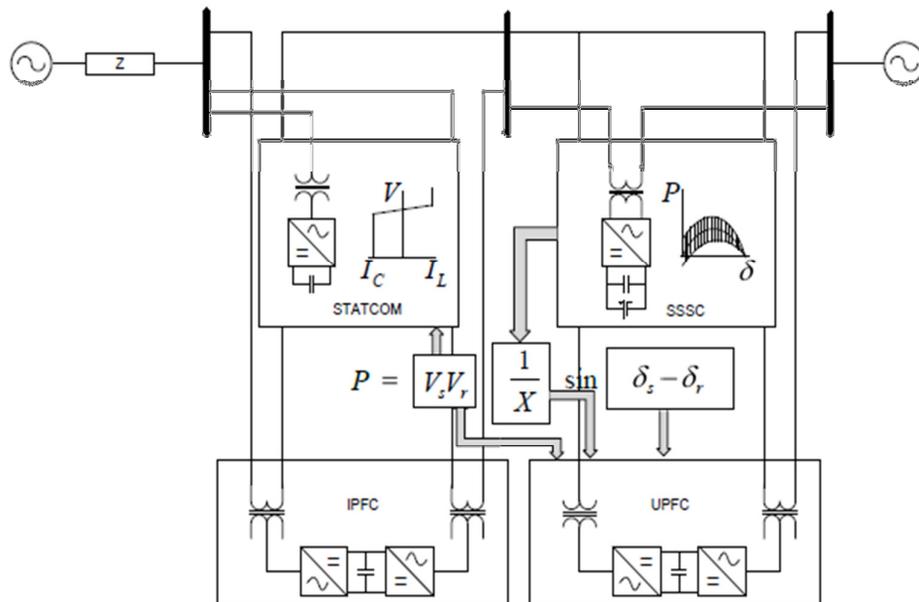


Figura 1.2. Representación grafica del efecto del segundo grupo de FACTS [10].

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Dimensionamiento de los equipos que conforman el SVC.

- Diseño y Modelado del Controlador, mediante el método del Factor K.
- Simulaciones del nuestro sistema, con características estáticas y con posibles perturbaciones reales en la red de alimentación.

1.3 CONTRIBUCIÓN.

Se presenta un análisis detallado de los principios de operación del Compensador Estático de Reactivos (SVC) en sus configuraciones como TCR y TSC. Se demuestra analíticamente y mediante simulaciones que el compensador estático tipo TCR, por su principio de operación, distorsiona la onda de corriente y genera armónicas.

Se presenta un análisis completo de la conmutación de un capacitor, tanto el caso ideal como el práctico. Basados en este último caso se analizan posibles alternativas para conmutar un capacitor con el objetivo de reducir el transitorio de corriente. El análisis se respalda mediante resultados de simulación.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se encuentra estructurada de la siguiente manera:

Introducción.- Se da una breve introducción del Inicio de los FACTS y su desarrollo, así también se plantean los objetivos de la tesis, y su aportación.

Capitulo1.- Se describe el planteamiento del problema, y se plantean los objetivos específicos de la tesis, los cuales deberán ser comprobables al finalizar nuestro trabajo.

Capitulo 2.- Se plantea la parte conceptual del compensador estático de Reactivos así como el estudio de cada una de sus configuraciones, estrategias de control y su comportamiento estático y dinámico.

Capitulo 3.- Se describe la red de transmisión a la cual va estar conectado nuestro SVC. Al mismo tiempo se diseñaran los componentes que conformaran nuestro SVC bajo estudio y los datos que se usaran durante la programación y la simulación que se describe en el Capítulo 4.

Capitulo 4.- Se realiza el diseño, implementación y pruebas del controlador del SVC.

Capitulo 5.- Se presenta la implementación en Matlab/Simulink y las simulaciones de nuestro sistema de potencia, con las pruebas reales a nuestro sistema.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los Compensadores Estáticos de Reactivos son utilizados en un sistema eléctrico de Potencia (SEP), para realizar un control de voltaje y mejorar la estabilidad del Sistema.

Dadas sus características de control rápido y continuo los SVC son muy útiles para controlar la inyección de potencia reactiva ante cambios normales en el sistema y también durante disturbios. Los compensadores estáticos de Reactivos generalmente están integrados por capacitores y/o reactores, incluyendo un regulador de voltaje y una lógica de control para el disparo de tiristores.

2.1 ELEMENTOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Desde el punto de vista de operación de un sistema de potencia, la característica de un SVC ideal, es equivalente a un inductor y un capacitor variable, los cuales pueden ser ajustados para controlar de la manera deseada, el voltaje y potencia reactiva en un sistema de transmisión, como podemos apreciar en la figura 2.1

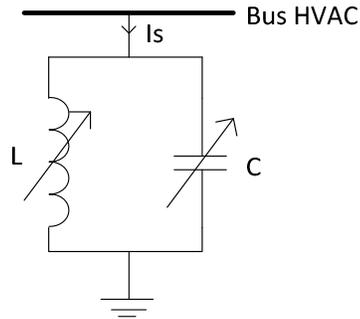


Figura 2.1. Sistema ideal de un SVC.

Idealmente, un SVC puede mantener un voltaje de manera constante, y a su vez tiene capacidad ilimitada de generar o absorber energía reactiva, sin pérdida de potencia activa o reactiva y proveer de respuesta instantánea [5] [4].

La característica de V/I de un SVC se muestra en la figura 2.2

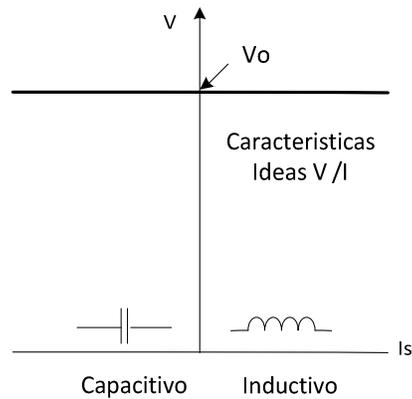


Figura 2.2. Característica de V/I de un compensador ideal.

Consideremos a un SVC conformado por un reactor controlable y un banco de capacitores. La característica resultante es suficientemente general y aplicable para una configuración práctica. En la Figura 2.3 se presentan las características ideales del reactor controlable y del banco de capacitor. La suma de las dos características individuales nos da como resultado la característica del SVC.

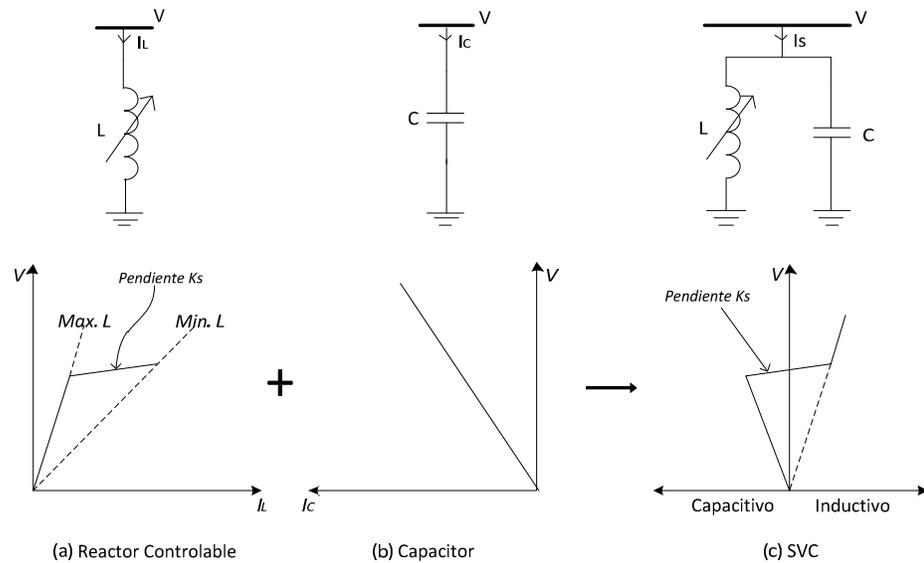


Figura 2.3. Característica Compuesta de un SVC.

Característica del Sistema de Potencia:

Para analizar el comportamiento de un SVC cuando es aplicado a un sistema de potencia, necesitamos analizar las características del sistema de potencia juntos. Para analizar la característica de V/I del sistema podemos considerar mediante el circuito equivalente Thevenin de nuestro sistema desde el Bus Alta Tensión cuyo voltaje va a ser regulado por el SVC [5]. Como se muestra en la figura 2.4.

La impedancia de Thevenin que se muestra en la figura 2.4 es predominantemente una reactancia inductiva. El correspondiente

voltaje en relación a la característica de corriente se muestra en la figura 2.5.

Donde podemos apreciar que el voltaje V crece linealmente con una corriente de carga capacitiva y decrece con una corriente de carga inductiva.

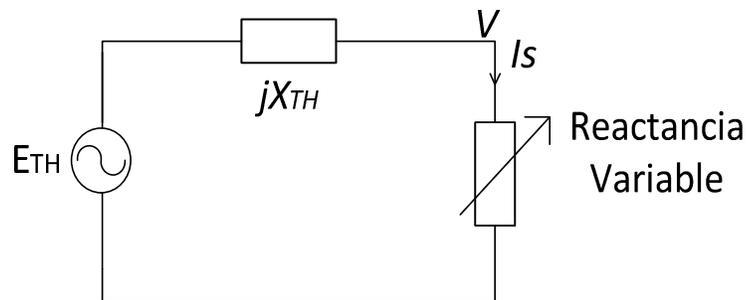


Figura 2.4. Circuito Equivalente de Thevenin del SEP.

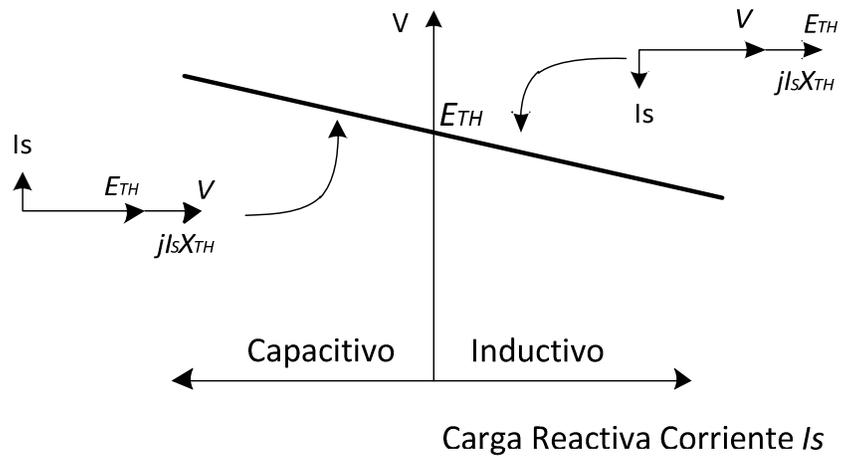


Figura 2.5. Curva Característica de V/I Real.

La característica del sistema pueden ser representadas por:

$$V = E_{th} - X_{th}I_S \quad (2.1)$$

La Característica del SVC, dentro del rango de control definido por la pendiente de reactancia X_{SL} , está dada por

$$V = V_0 - X_{SL}I_S \quad (2.2)$$

La solución del SVC y de la ecuación de la característica del sistema eléctrico de potencia (SEP), esta graficada en la figura 2.6. Tres características de sistemas, para tres fuentes distintas de voltaje son consideradas en la siguiente figura.

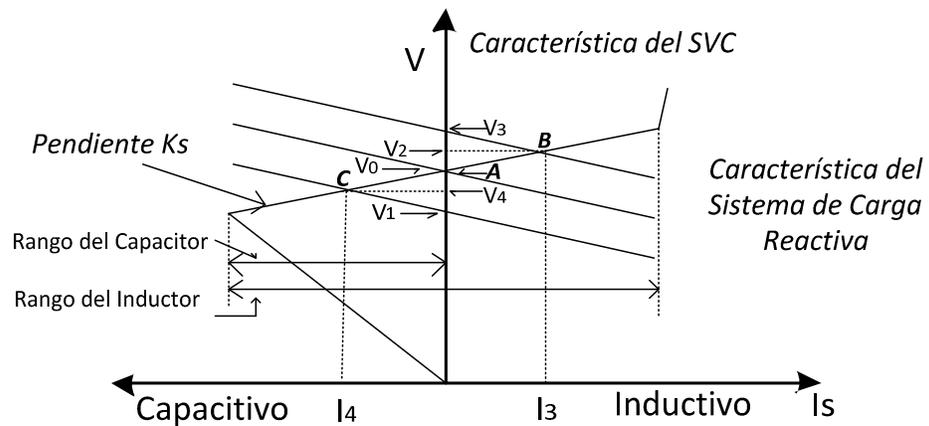


Figura 2.6. Solución gráfica de un SVC en el punto de operación dado por las características del sistema.

La característica del medio representa la condiciones nominales del sistema, es asumida para interceptar la característica del SVC en el punto A, donde $V = V_0$ y $I_S = 0$. Si el Voltaje del sistema se incrementa (debido a un decremento en el nivel de la carga del sistema) V va incrementarse hasta V_1 sin un SVC. Con un SVC se estabilizara el voltaje en el punto B, absorbiendo corriente inductiva I_3 , y va a mantener su voltaje V_3 . De igual manera Si el voltaje del sistema decrece (debido a un incremento en el nivel de carga del sistema) V va a disminuir hasta V_2 sin un SVC, Sin embargo con un SVC, va a estabilizar el voltaje en el punto C, manteniendo su voltaje en V_4 . Si la pendiente K_s fuese 0, el voltaje se habría mantenido en V_0 para ambos casos considerados en el análisis [5].

Los elementos más característicos de un SVC son los condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas (TCR) por tiristores, ya que estos dispositivos son los que incluyen la electrónica de potencia, pero también existen otros tipos de configuraciones de tipo manual o discreto como se muestran a continuación.

- Reactores Conmutados Mecánicamente (*Mechanical Switched Reactors, MSR*).

- Capacitores Conmutados Mecánicamente (*Mechanical Switched Capacitor, MSC*).
- Reactores Conmutados por Tiristores (*Thyristor Switched Reactors, TRS*).
- Capacitores Conmutados por Tiristores (*Thyristor Switched Capacitors, TSC*).
- Reactancias Saturables (*Saturated reactor, SR*).
- Reactor Controlado por Tiristores (*Thyristor Controlled Reactor, TCR*).

En la figura 2.7 se representan de forma esquemática los distintos elementos que pueden formar parte de un compensador estático de reactivos.

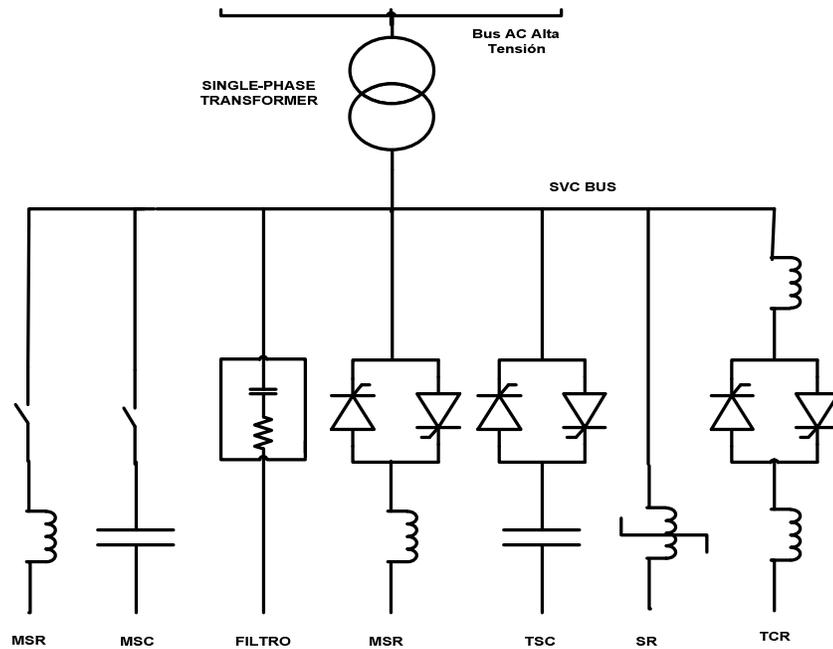


Figura 2.7. Elementos que componen un SVC.

2.2 REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES

Los elementos básicos de un TCR (Reactor Controlado por Tiristores) consiste en una reactancia L en serie con una con una válvula bidireccional de tiristores SW figura 2.8 (a). El tiristor conduce cuando se aplican pulsos de disparo a las compuertas de los tiristores con igual polaridad, y termina la conducción cuando el voltaje cruza por cero [1] [2] [4].

La corriente del tiristor puede ser controlada mediante la variación del ángulo α figura 2.8 (b), que es medido desde el cruce por cero. La

conducción plena se obtiene con un ángulo de $\alpha = 90^\circ$. La corriente es esencialmente reactiva y sinusoidal. Conducción parcial es obtenida con ángulos de disparos entre 90° y 180° , como se muestra en la Figura 2.8(c).

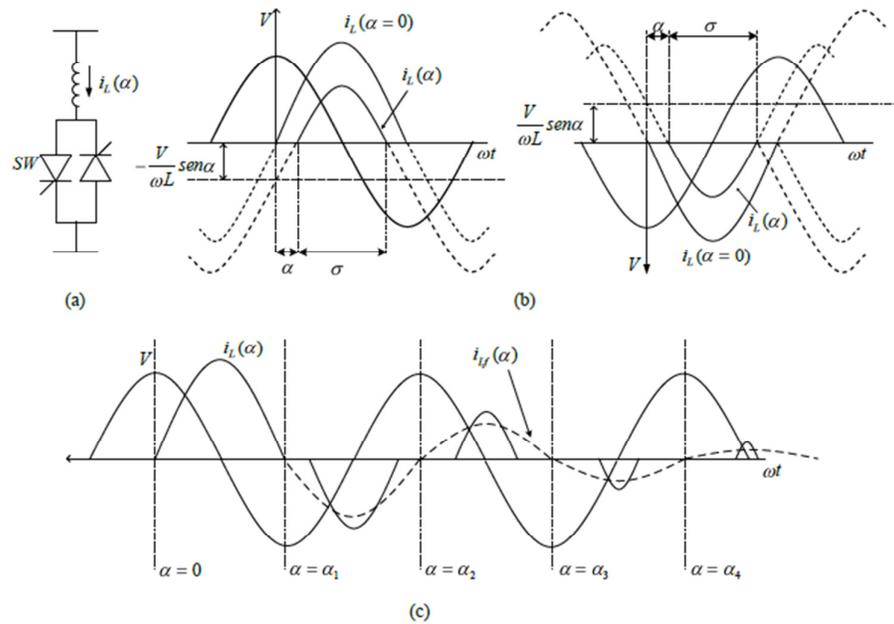


Figura 2.8. (a). Elementos Básicos de un TCR, (b). Control del ángulo de disparo, (c). Forma de onda de la corriente con distintos ángulos α . [1]

Ángulos de disparo entre 0° y 90° no son permitidos debido a que producen corrientes asimétricas con componentes DC.

El ángulo de conducción σ . Está relacionado con el ángulo de conducción α mediante la ecuación:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.3)$$

La corriente instantánea i viene dada por [1]:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}V}{X_L} (\cos\alpha - \cos\omega t) & \text{Para } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{Para } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (2.4)$$

Mediante análisis de Fourier de la forma de onda de la corriente nos da como resultado la componente fundamental de corriente, que es igual a:

$$I_{LF} = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \text{sen}\sigma}{\pi} \quad (2.5)$$

Donde la I_{LF} y V son los valores RMS de corriente y voltaje respectivamente, y X_L es la reactancia del reactor a frecuencia fundamental.

El efecto de incrementar α es el de reducir la componente fundamental I_{LF} , esto equivale a incrementar la inductancia efectiva en el reactor.

La amplitud de la corriente fundamental del reactor en función del ángulo α , $I_{LF}(\alpha)$ viene dada por [1] [4] [6]:

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{X_L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{sen} 2\alpha \right) \quad (2.6)$$

Que puede ser escrita como:

$$I_{LF}(\alpha) = V B_{TCR}(\alpha) \quad (2.7)$$

Dónde:

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{max} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{sen} 2\alpha \right) \quad (2.8)$$

$$B_{max} = \frac{1}{\omega L} \quad (2.9)$$

Sustituyendo el valor de α por el ángulo de conducción σ , tenemos una expresión alternativa de la componente fundamental de la corriente del TCR.

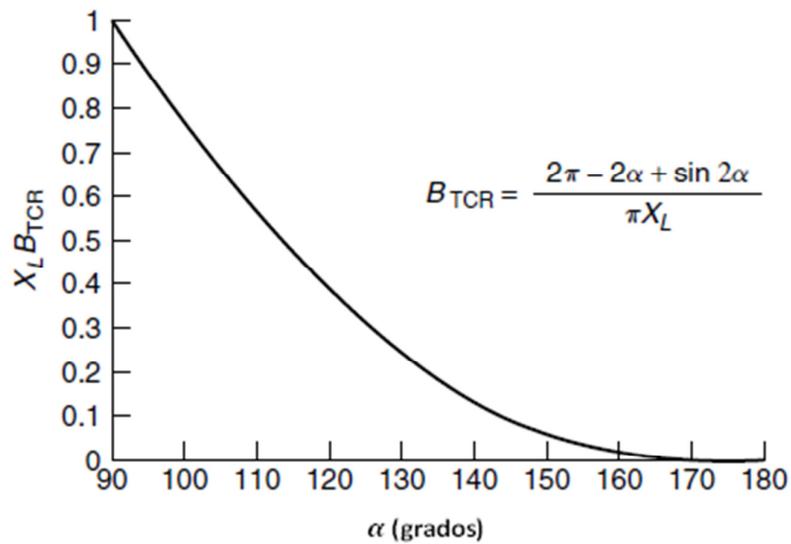


Figura 2.9. Característica de control de la susceptancia del TCR, B_{TCR} [1].

La Figura 2.9 muestra la variación de la susceptancia B_{TCR} en p.u, con relación al ángulo α , el valor en p.u B_{TCR} se obtiene con respecto a su valor máximo B_{max} como la cantidad base. La variación de la amplitud de la componente fundamental es lo que permite tener una admitancia reactiva variable $B_L(\alpha)$ en el TCR. La siguiente ecuación muestra esta susceptancia como una función del ángulo α .

El valor máximo de la susceptancia efectiva es en conducción completa ($\alpha = 90^\circ$), y es igual a $1/X_L$; el valor mínimo es cero, que se obtiene mediante $\alpha = 180^\circ$ o $\alpha = 0^\circ$.

En la práctica, los valores máximos de voltaje y corriente están limitados por los componentes de potencia (reactores y válvulas de tiristores usados). El TCR debe operar en un área V/I definida donde las fronteras son los límites máximos de susceptancia, voltaje y corriente como se muestra en la figura 2.10.

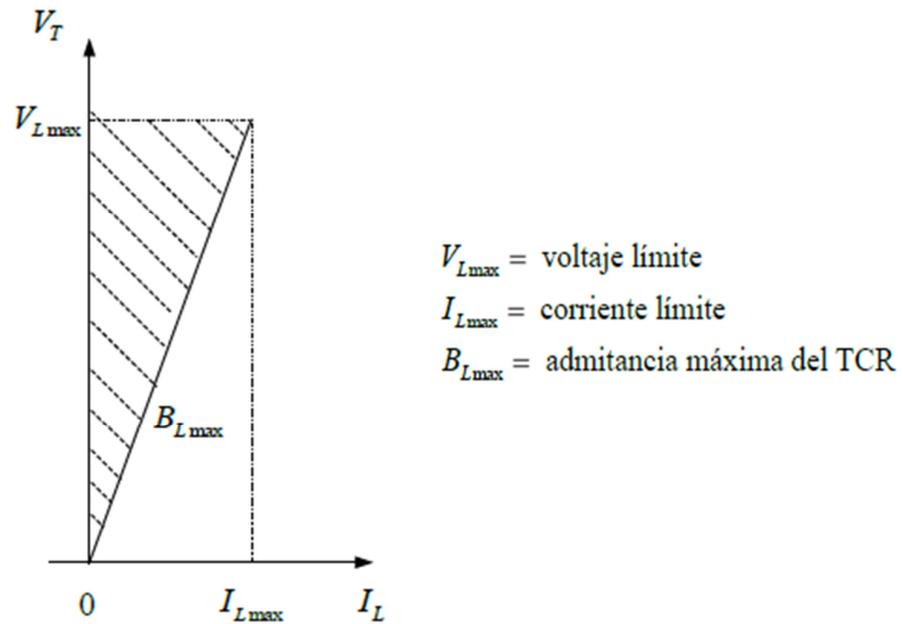


Figura 2.10. Área de operación V/I del TCR [1].

En la figura 2.11 se puede observar como al aumentar el ángulo de disparo más allá de $\alpha=90^\circ$, la corriente ya no es completamente sinusoidal, y se generan armónicos. Si los dos tiristores se disparan de forma simétrica en los semiciclos positivos y negativos, sólo se producirán armónicos de orden impar. Los armónicos se pueden deducir a través de un análisis de Fourier de componentes de alta frecuencia [4] [10].

El valor eficaz del armónico de orden n se expresa como una función de α en la siguiente ecuación:

$$I_{Ln}(\alpha) = \frac{4V}{\omega L \pi} \left(\frac{\text{sen}(\alpha)\cos(n\alpha) - n\cos(\alpha)\text{sen}(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right) \quad (2.10)$$

Donde $n = 2C + 1$, $k = 1, 2, 3 \dots$ es el orden del armónico.

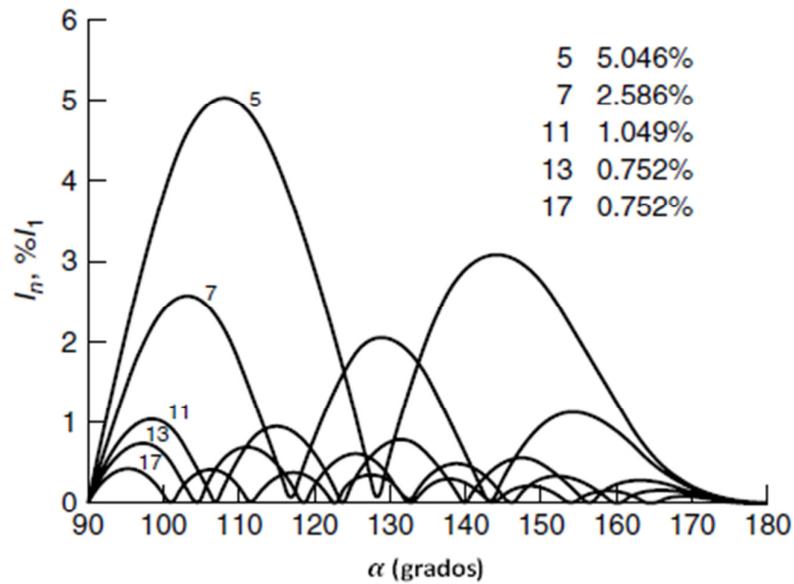


Figura 2.11. Amplitud de los armónicos de corriente en el TCR vs el ángulo de disparo [1].

En la Figura 2.11 se muestra la variación de la amplitud de los armónicos, expresada en porcentaje de la corriente fundamental máxima, mientras que en la Figura 2.12 se observa el contenido total de armónicos de corriente.

Se ve que todos los picos de armónicos se producen en ángulo de disparo distintos. Los valores máximos de varias corrientes armónicas, son expresados cada uno como un porcentaje de la componente fundamental, figura 2.11 [6].

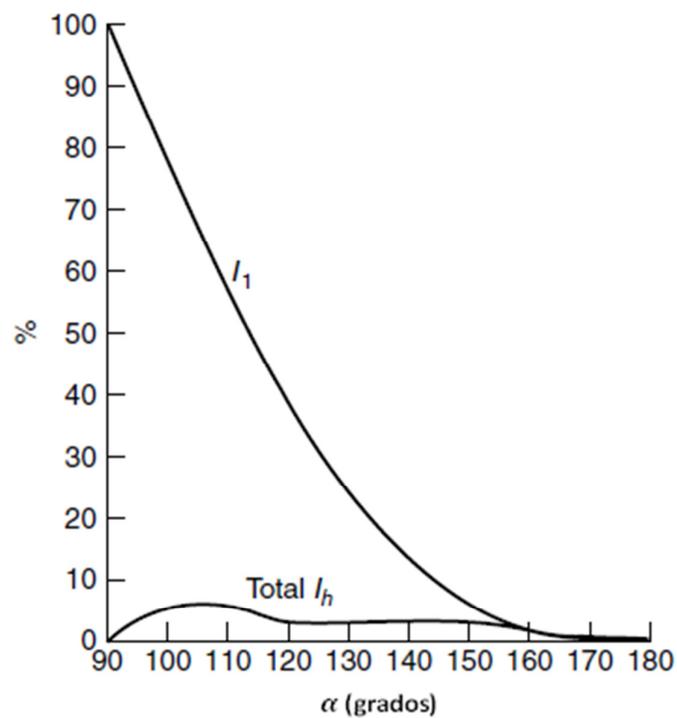


Figura 2.12. La corriente fundamental I_1 y el total de corriente armónica I_h [1].

Existen algunas técnicas para eliminar los armónicos en los TCR, como los TCR con 6 pulsos o 12 pulsos, sin embargo la más usado son los filtros LCR en paralelo con el TCR [1] [4].

Estos filtros están sintonizados para los armónicos de orden 5to y 7to, y en ocasiones el 11vo y el 13vo.

Finalmente mostramos una fotografía de como se observa en la realidad un TCR.



Figura 2.13. Fotografía de la rama TCR [10].

2.3 CAPACITOR CONMUTADO POR TIRISTORES

El esquema del condensador conmutado por tiristor (*Thyristor Switched capacitor*, TSC) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de potencia reactiva. Este elemento está formado por una válvula bidireccional de tiristores en serie con un condensador o batería de condensadores ver figura 2.14.

En la figura 2.14 se muestran dos tiristores en antiparalelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero.

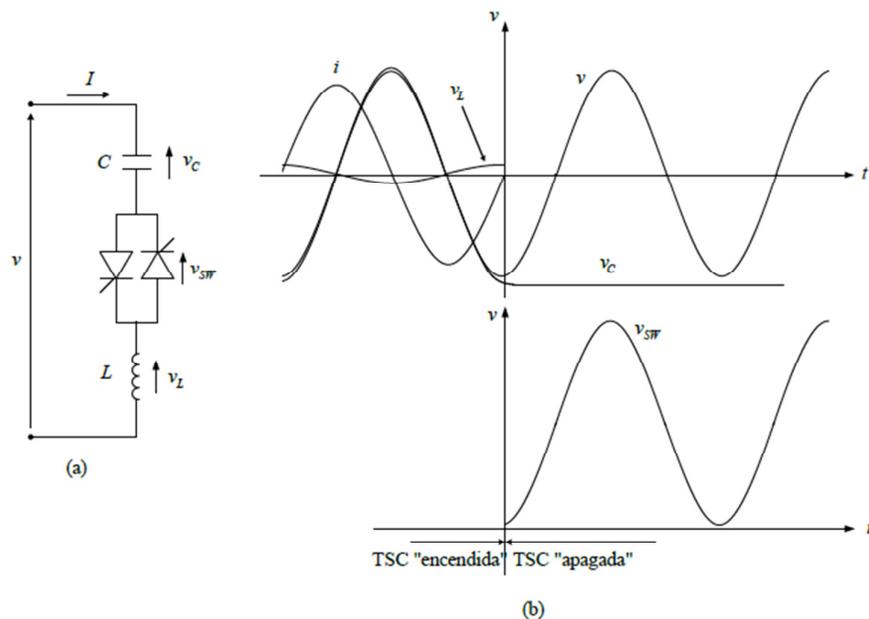


Figura 2.14. Configuración básica de un capacitor conmutado por tiristores, sus respectivas formas de onda [10].

Debido a los problemas de transitorios en el encendido de las válvulas, añade un reactor limitador de corriente en serie con el condensador, el cual tiene la función principal de limitar la corriente en la válvula de los tiristores bajo condiciones anormales de operación o cuando no se cumple la condición de conexión en el

instante de mínimo transitorio y para prevenir resonancias con la red.

En condiciones de estado estacionario, cuando la válvula de tiristores se encuentra en conducción, el capacitor es conectado a la fuente de voltaje AC, donde:

$$V = V \text{sen}(\omega t) \quad (2.11)$$

Y la corriente del ramal es:

$$i(\omega t) = V \frac{m^2}{m^2 - 1} \omega C \cos(\omega t) \quad (2.12)$$

Donde:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad (2.13)$$

La frecuencia natural es:

$$\omega_n = m\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

Donde $\omega_0 = 2\pi f$; siendo f la frecuencia natural del sistema

La amplitud del voltaje y la corriente en el capacitor viene dado por la formula.

$$V_c = I X_c = V \frac{m^2}{m^2 - 1} \quad (2.16)$$

$$I_{Ac} = VB_c \frac{m^2}{m^2 - 1} \quad (2.17)$$

Donde B_c es la susceptancia del capacitor C.

El factor $\frac{m^2}{m^2 - 1}$ se conoce como factor de magnetización [4], la figura

2.15 muestra la curva del factor de magnetización.

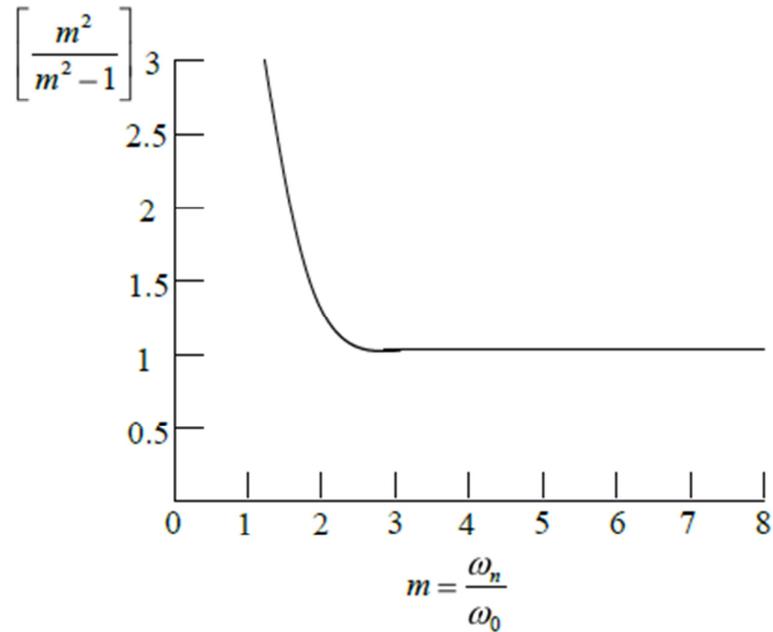


Figura 2.15. El factor de magnificación de la frecuencia fundamental de un TSC

[4].

Es interesante estudiar este aumento como una función del ajuste de la Rama de TSC. El resultado se da en la figura. 2.15. Para los circuitos LC sintonizados a la frecuencia de resonancia, la cual es

tres veces la frecuencia de alimentación, el factor magnificación es cercano a 1.0, para ajustes por debajo de $3\omega_0$, el factor de magnificación aumenta muy rápidamente. Para sistemas prácticos, por lo tanto, n debe ser elegido superior a 3 (por lo general, entre los armónicos 4 y 5) [4] [6].

2.3.1 ESTRATEGIAS DE CONEXIÓN DEL TSC.

Las estrategias de conexión que se mostraran a continuación limitan los transientes hasta límites aceptables, estas estrategias deciden básicamente cuando un tiristor debe ser disparado.

Estrategia A.

- El capacitor tiene una carga inicial menor al valor de la amplitud del voltaje AC aplicado. Es decir $V_{co} < V$. En el momento ideal para la conexión para el mínimo transitorio es cuando el valor instantáneo de voltaje AC aplicado es igual al valor del voltaje inicial del capacitor.
- El capacitor tiene una carga inicial igual o mayor al valor de la amplitud de voltaje AC aplicado, es decir $V_{co} > V$.

El momento ideal para la conexión para el mínimo transitorio es en el valor pico de voltaje AC aplicado, en el cual el voltaje en la válvula de tiristores es el mínimo.

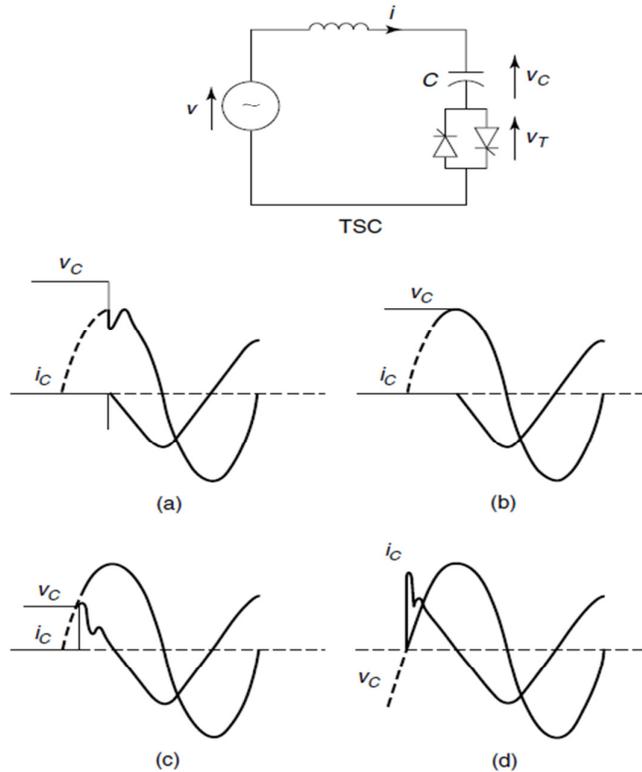


Figura 2.16. Estrategias de disparo de un TSC [1].

Estrategia B.

- Los condensadores se cargan a la cresta de la tensión de alimentación disparando sólo uno de los dos tiristores. Se puede notar que no se cargan a la óptima tensión $Vn^2 / (n^2 - 1)$.

- Disparar siempre tiene lugar en la cresta de la tensión de alimentación, donde el voltaje de la válvula es mínima.

Estas estrategias de disparo tratan de minimizar el transitorio de corriente. No requieren estrategias especiales de carga del capacitor y pueden operar con capacitores de potencia convencionales.

2.3.2 CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN.

El TSC tiene una característica discreta de funcionamiento de tensión y corriente [4], la cual varía conforme el número de bancos de Capacitores que posee el diseño del SVC, como se muestra en la figura 2.17.

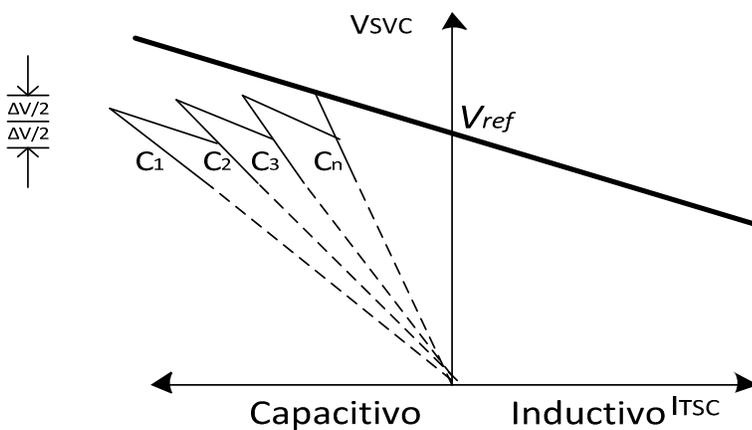


Figura 2.17. Característica de Operación de un TSC.

La forma de esta característica es una función del número de TSC, sus medidas individuales, y su voltaje de histéresis ΔV , que está diseñado en evitar frecuencias no deseables de conmutaciones de los condensadores [1]. En un voltaje de control de lazo cerrado, el TSC regula la tensión del bus en el rango de $V_{ref} \pm \Delta V / 2$. Finalmente mostramos una fotografía de como se ve un TSC en la realidad.

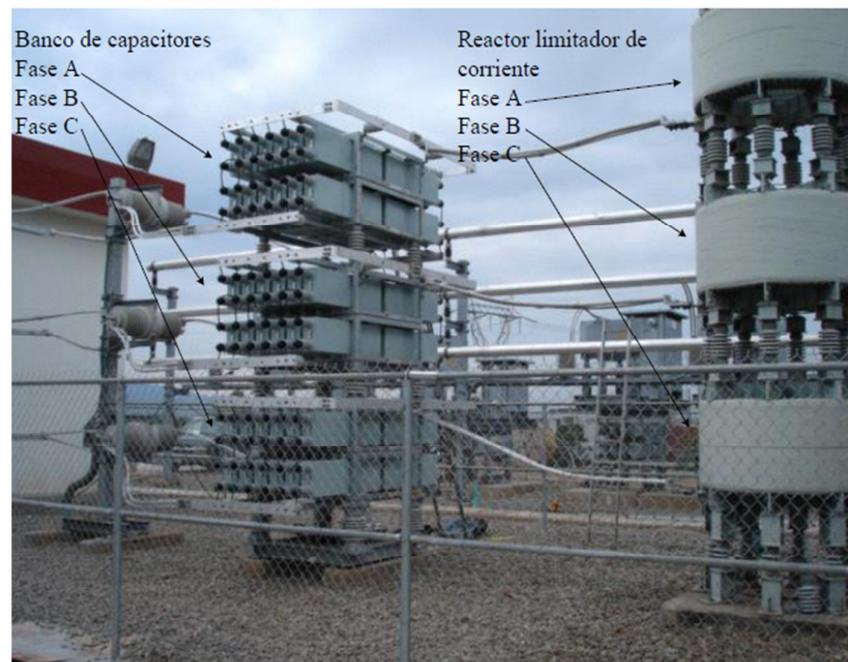


Figura 2.18. Fotografía de la rama TSC [10].

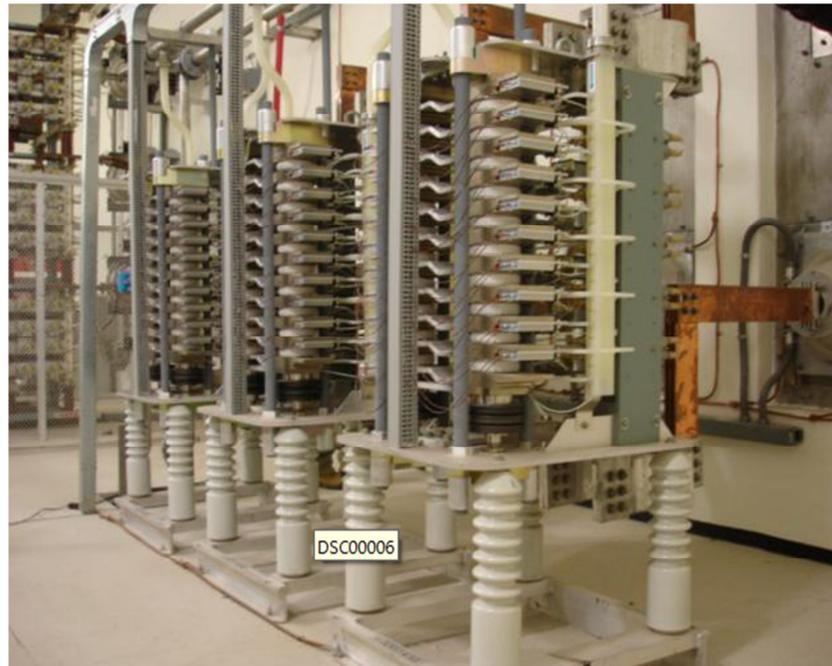


Figura 2.19. Válvula de Tiristores del SVC [10].

2.4 SISTEMA DE MEDICIÓN

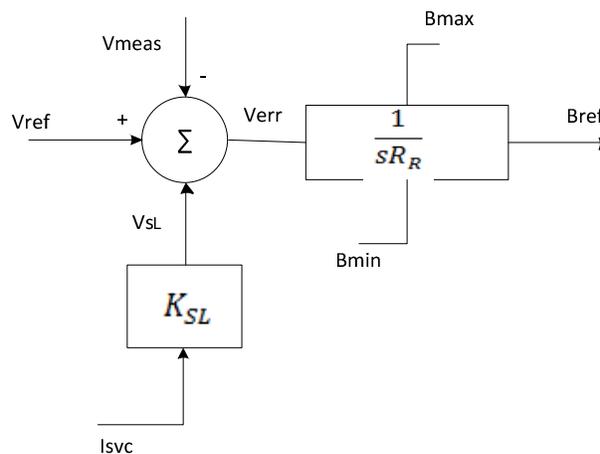
El sistema de medición proporciona las entradas necesarias para el controlador del SVC para la realización de sus operaciones de control, mediante transformadores de corriente (TC) o transformadores de voltaje o potencial (TP). Las diferentes entradas requeridas por un SVC dependen de la función que el controlador SVC va a realizar. La función principal de este bloque en lazo de control es generar una señal de DC proporcional al valor rms del sistema trifásico a la frecuencia fundamental [1] [16].

2.5 REGULADOR DE VOLTAJE

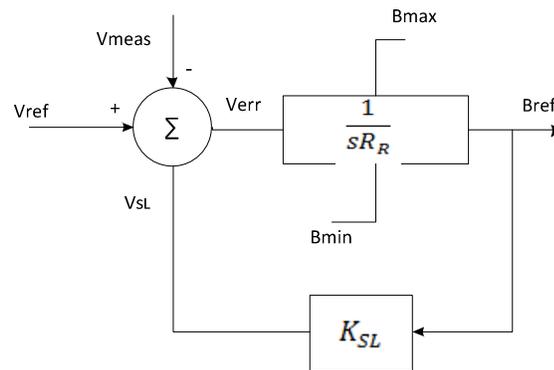
Esta unidad corresponde al control básico del SVC. Se encarga de regular la tensión en barra del SVC o aplicar funciones más complejas como por ejemplo regular la inyección de reactivos.

El control de tensión puede ser implementado en forma análoga o digital. Para ello, recibe las variables de interés medidas, las procesa y arroja las señales de control a los distintos actuadores del equipo de compensación.

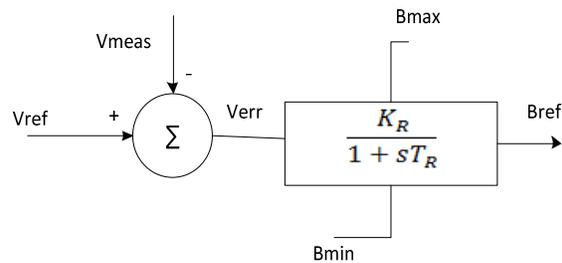
Los controladores más utilizados en los reguladores de tensión corresponden a etapas basadas en bloques y lazos de control del tipo proporcional e integral, como se muestra en la figura 2.20.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.20. Métodos de implementación de la pendiente de corriente en el regulador de voltaje del SVC, (a) lazo de retroalimentación de la corriente, (b) retroalimentación de la susceptancia y (c) ganancia-tiempo constante [4].

Hay dos modelos básicos para el control de estabilidad transitoria, se recomiendan los modelos estándar de la industria. Los modelos se basan en los modelos CIGRE. Las estructuras del modelo básico 1 y 2 son similares excepto por el método que representa la pendiente. El primer modelo es el más simple y es similar a los modelos en la mayoría de los controles existentes de estabilidad transitoria [1].

Ambos son adecuados para control continuo del SVC. Como se describe más adelante, los modelos puede ser modificado para representar TSC / TSR tipos de compensadores

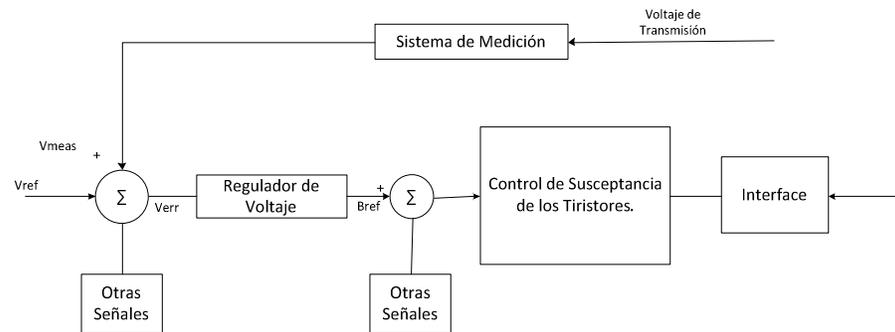


Figura 2.21. Modelo Básico 1. Las funciones de transferencia para el circuito de medición y el control del tiristor susceptancia.

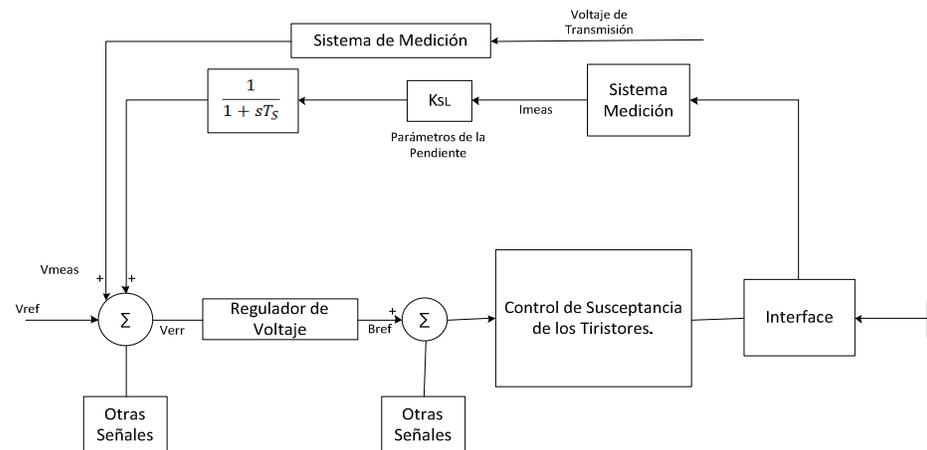


Figura 2.22. Modelo Básico 2. Las funciones de transferencia para el circuito de medición y el control del tiristor susceptancia.

La figura 2.21 muestra el modelo básico 1. El regulador de voltaje es del tipo proporcional y la ganancia K_R es la inversa de la pendiente. Este modelo se utiliza a menudo para estudios preliminares [7].

La Figura 2.22 muestra el modelo básico 2. El regulador de voltaje es de tipo integral, o proporcional más integral y la pendiente K_{SL} , se realiza a través realimentación de corriente. Los ajustes de ganancia y la pendiente son independientes. El modelo básico 2 representa la estructura física de la mayoría, de los SVC instalados [7].

La diferencia básica entre los dos modelos es en el método de realización de la pendiente. Modelo 1 da un voltaje de relación lineal de susceptancia. Modelo 2 da un tensión con relación lineal de corriente. Para una tensión de cerca de p.u, y para los valores usuales de pendiente pequeña, no hay mucha diferencia. Desde que ambos tipos de control se utilizan, ambos modelos están incluidos.

2.6 LAZO DE ENGANCHE DE FASE

El bloque sincronizador de disparos del Lazo de Enganche de Fase (Phase Locked Loop, PLL), se realiza por medio de disparadores lógicos, sincronizados con el cruce por cero de la tensión en el módulo TCR proveniente del Transformador de Potencial (TP). Gracias a la velocidad de procesamiento disponible hoy en día, es

posible realizar lo anterior mediante rutinas en microcontroladores que procesan la señal análoga en términos digitales.

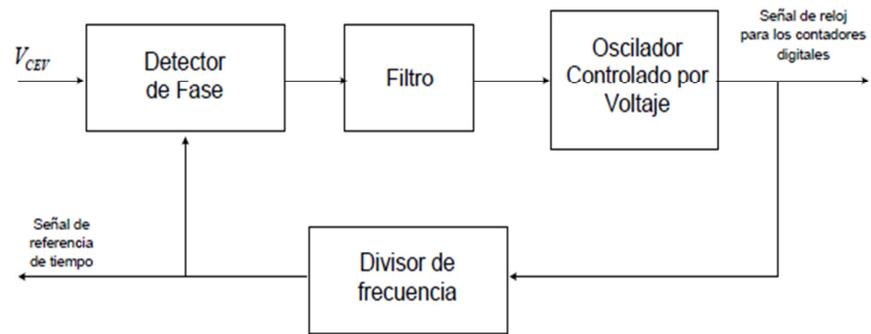


Figura 2.23. Figura Diagrama de Bloques de Funcionamiento PLL.

Estos pulsos sincronizados son usados para generar los pulsos de disparo hacia los tiristores. El módulo de sincronización supervisa el voltaje en el lado del secundario del transformador del SVC y genera pulsos de sincronización hacia los Generadores de Pulsos de Control.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE COMPONENTES DEL SVC

El compensador estático de Reactivos que analizaremos se encuentra instalado en la ciudad Sinaloa –México, Sub-Estación CUT [10].

El SVC tiene un rango de Operación de continua ± 100 MVAR y está conectado en derivación a la red de 230 KV, que está conectado a un transformador trifásico de una potencia de 200 MVA y un voltaje de transformación de 230kV/13.8KV [1].

Como se muestra un diagrama unifilar del SVC.

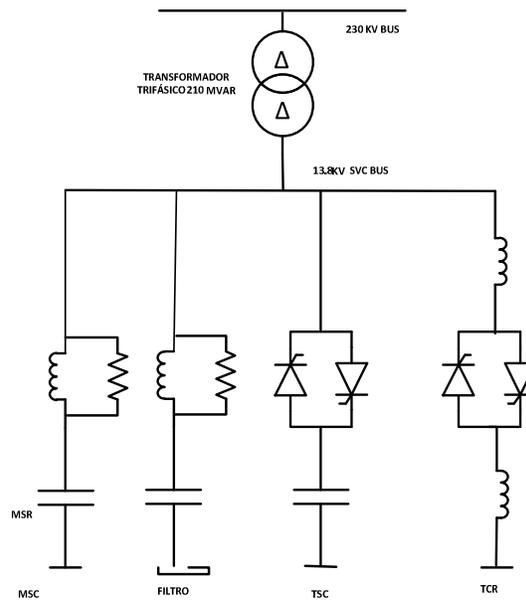


Figura 3.1. Diagrama Unifilar del SVC.

En estos capítulos se describirá en detalle cada uno de los componentes del SVC y del dimensionamiento de sus componentes principales.

EL SVC de la figura 3.1 consta de un banco de capacitores conmutado por tiristores (TSC) en configuración estrella, banco de reactores controlados por tiristores (TCR) en configuración delta. Para eliminar los armónicos más significativos hacia la carga fueron instalados dos filtros del 5to y 7to armónico. El sistema de control opera al SVC de la manera que la potencia reactiva resultante puede controlarse en el rango de máxima potencia.

3.1 RAMA TSC

La rama TSC del SVC que se encuentra instalada, se muestra en la figura 3.2, con una potencia reactiva de 50 MVAR capacitivos, y está formada por los siguientes elementos, los cuales describiremos en el desarrollo de la sección:

- Reactor Limitador de Corriente
- Banco de Capacitores
- Válvula tiristores.

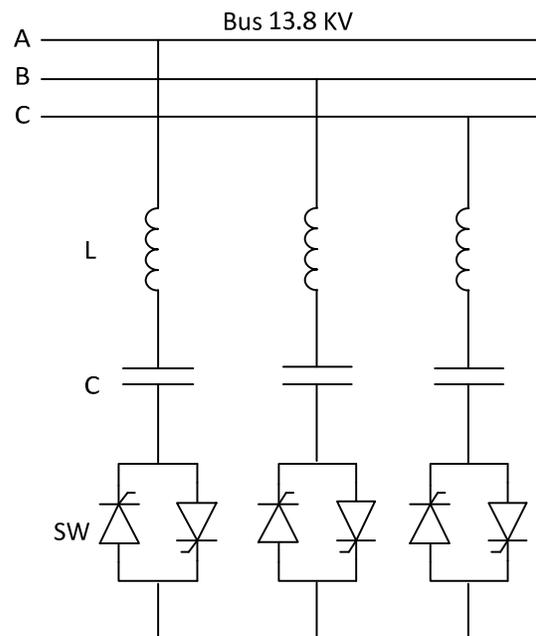


Figura 3.2. Diagrama Esquema del TSC conectado en estrella.

3.1.1 BANCO DE CAPACITORES.

Como podemos ver en la figura 3.2, El banco de capacitores está conectado en estrella al voltaje de 13.8KV. A continuación dimensionaremos el banco de capacitores:

La reactancia del Total de la TSC viene dada por:

$$X_{TSC} = \frac{\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{Q}{3}\right)} = \frac{\left(\frac{13Kv}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{50MVA}{3}\right)} = 3.8088[\Omega] \quad (3.1)$$

Donde:

$$X_{TSC} = X_L + X_C \quad (3.2)$$

La suma fasorial nos da como resultado

$$X_C = X_{TSC} + X_L = 3.8088 + 0.2254 = 4.034[\Omega] \quad (3.3)$$

Para hallar el valor del capacitor:

$$C = \frac{1}{60 \times 2\pi(4.034)} = 657.51\mu F \quad (3.4)$$

El valor de la capacitancia por fase nos dio como resultado que $C = 657.51\mu F$, valor dentro del rango de la capacitancia escogida en la instalación realizada por el fabricante ABB, el cual tiene un valor de capacitancia por fase de $C = 615.4\mu F$

con un rango de tolerancia del 0/+5%.

El banco de capacitores está conformado por 72 capacitores en total, teniendo 24 en cada una de las fases, como se muestra en la figura 3.3, donde las baterías de capacitores nominadas como B_1 y B_2 son iguales, y están conectadas en paralelo.

También se muestra un transformador de corriente y un transformador de potencial para medir la corriente de desbalance en las ramas, y para medir el voltaje respectivamente.

La tabla 3.1 nos muestra los valores nominales de las capacitancias del TSC.

Tabla 3.1. Valores nominales del banco de capacitores.

Descripción	Valor/Unidad de Medida
Voltaje nominal	5400 Vrms
Potencia nominal	1127.4 KVAR
Frecuencia nominal	60 Hz
Capacitancia nominal	102.56 μ F
Corriente nominal	250 A

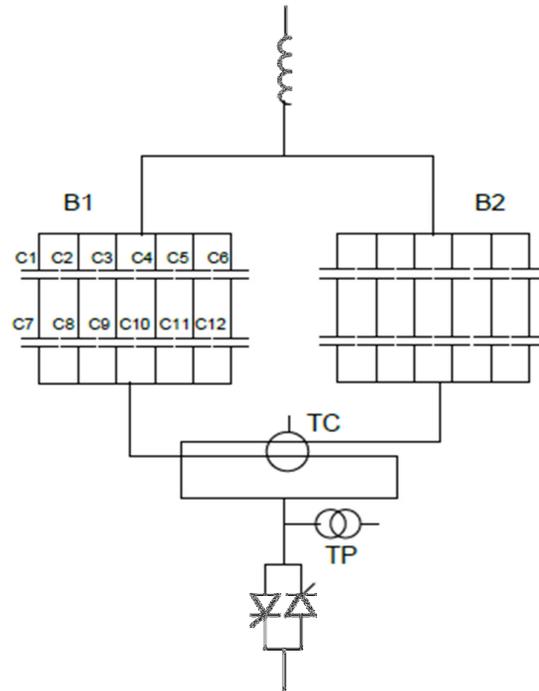


Figura 3.3. Configuración de una fase del TSC [10].

La Capacitancia de la Batería de la figura 3.4 se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 C_{B1} &= 6 \left(\frac{1}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C7}} \right) \\
 &= \left(\frac{1}{\frac{1}{102.56\mu F} + \frac{1}{102.56\mu F}} \right) \quad (3.5) \\
 &= 307.68\mu F
 \end{aligned}$$

La capacitancia total por fase es la suma de las susceptancias de las baterías B_1

y B_2 , las cuales son idénticas.

$$C = C_{B1} + C_{B2} = 615.36\mu F \quad (3.6)$$

El valor calculado C para la capacitancia por fase del TSC, coincide con los datos del fabricante en el Anexo A.

El voltaje en los bancos de capacitores de cada fase es un poco mayor que el voltaje de línea a neutro de la línea de 13.8 Kv. debido a la caída de voltaje en el reactor limitador de corriente. La ecuación que calcula el voltaje del capacitor es igual:

$$V_c = IX_c = \frac{m^2}{m^2 - 1} = \frac{4.37^2}{4.37^2 - 1} = 1.0552V \quad (3.7)$$

El voltaje máximo continuo en el bus del secundario, ocurre en el punto de operación 1.05 p.u del voltaje del primario, en el cual el voltaje del secundario tiene un valor de 15.7 KV como se muestra en el Anexo A.

Con esta información podemos hallar el valor del voltaje en el capacitor.

$$V_c = 1.0552V \frac{15.7 KV}{\sqrt{3}} = 9.56KV \quad (3.8)$$

El voltaje de la ecuación (3.7) es afectado por los armónicos de fondo del sistema 230KV, así como por los armónicos generados por el TCR. Estos armónicos son sumados a la corriente fundamental y pueden causar distorsión de las ondas de voltaje y corriente [17].

3.1.2 REACTOR LIMITADOR DE CORRIENTE.

En la figura 3.3 podemos observar en cada una de las fases del TSC a el reactor limitador de corriente, que se lo describió en la capítulo 2.4, la función principal de este elemento es de limitar la corriente en la válvula de los tiristores bajo condiciones anormales de operación o cuando no se cumple la condición de conexión en el instante de mínimo transitorio y para prevenir resonancias con la red.

En la tabla (A.1) del anexo se muestra los valores de los valores principales, el reactor de corriente, el cual fue diseñado con un valor de $L = 0.589mH$, y del banco de capacitores $C = 615.4\mu F$. Con la ecuación (2.14), obtenemos la frecuencia de sintonización o natural ω_n de la rama del TSC. Donde $\omega_0 = 60Hz$, es la frecuencia fundamental del sistema.

$$\omega_n = m\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.598mH * 615.4\mu F)}} \quad (3.9)$$

El valor de m es:

$$m = \frac{\omega_n}{\omega_0} = \frac{262.3}{60} = 4.37 \quad (3.10)$$

El valor de $m=4.37$ que es adecuado ya que en la práctica se escogen valores entre 4 y 5. Para los circuitos LC sintonizados a la resonancia frecuencia de tres veces y superior a la frecuencia de alimentación, el factor magnificación que es cercano a 1.0, para ajustes por debajo de 3, el factor de magnificación aumenta muy rápidamente. Para sistemas prácticos, por lo tanto, n debe ser elegido superior a 3 (por lo general, entre los armónicos 4 y 5) [3].

Válvula de Tiristores del TSC.

La válvula de tiristores del TSC está conformada por 32 tiristores por fase, conectados en antiparalelo. La figura 3.4 muestra el diagrama esquemático de una válvula del TSC del SVC [10]. Esta válvula que fue instala se enfría mediante agua desmineralizada y los tiristores son disparados por corriente mediante una unidad convertidora de pulsos de voltaje.

La corriente máxima que circula por esta válvula es cuando el voltaje del capacitor es igual a 15.7 KV, tomando el valor máximo de susceptancia de la Tabla (A.1), tenemos que:

$$I_{TSC,max} = U_2 B_{TSC,max} = \frac{15.7}{\sqrt{3}} \frac{13.8}{\sqrt{3}} \quad (3.11)$$

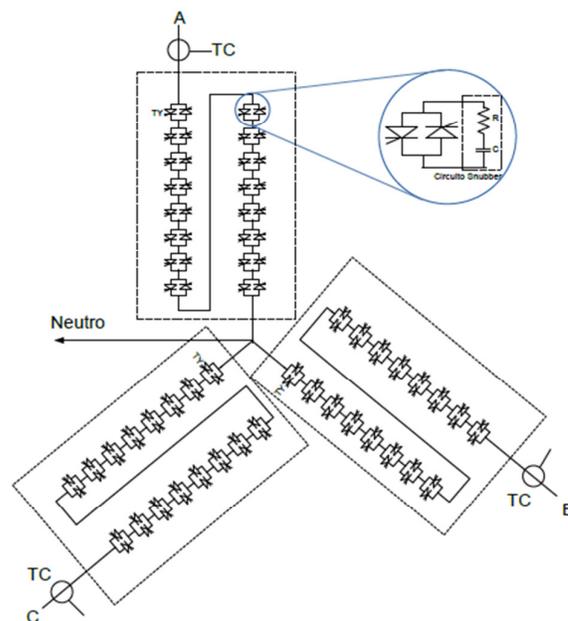


Figura 3.4. Configuración de la Válvula del TSC [10].

Mediante simulación en Matlab/Simulink/SimPowerSystem se pudo comprobar, que el dimensionamiento del TSC es el correcto, con los valores hallados de cada uno de los componentes de TSC, se tiene que la Potencia reactiva es

igual a 50 MVAR, como se muestra en la figura 3.5, valor aproximado al de diseño.

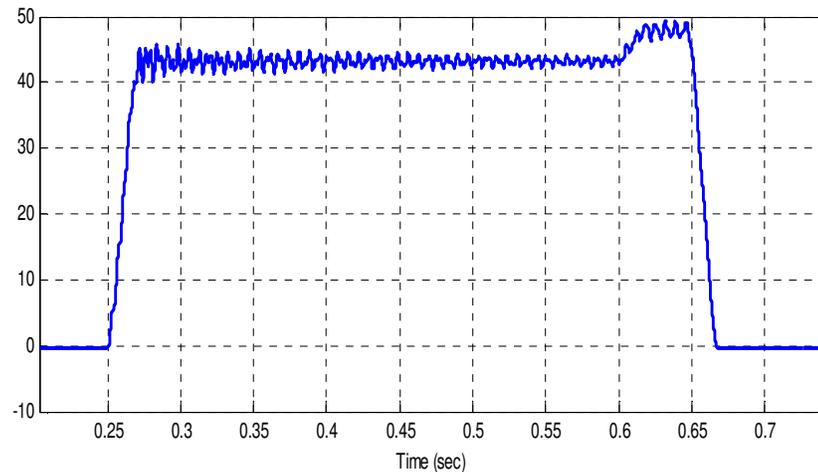


Figura 3.5. Potencia Reactiva entregada por el TSC.

3.2 RAMA TCR.

La rama TCR de la sub-estación CUT. Tiene una potencia de 150 MVAR inductivos y está formada por los siguientes elementos.

- Reactores
- Válvulas del TCR

El diagrama esquemático de la rama del TCR lo podemos apreciar en la figura 3.6. Como se muestra en la figura cada una de las fases tienen dos reactores, que es simplemente un reactor dividido en dos, esto se realiza para en caso de una falla de cortocircuito en una de

las bobinas del reactor del TCR, la corriente de falla sea limitada por la otra bobina del reactor de la misma rama del TCR.

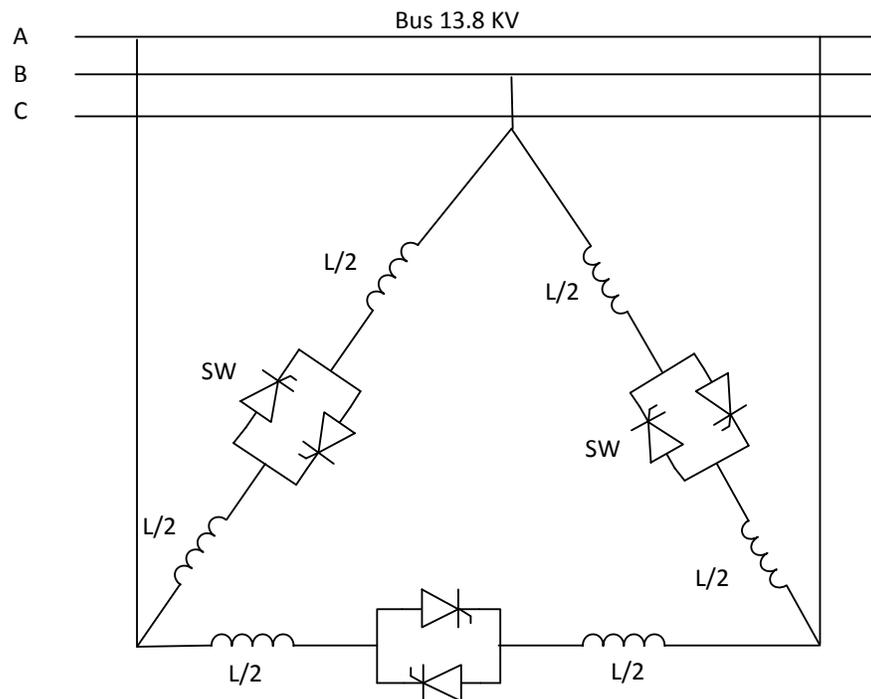


Figura 3.6. Diagrama esquemático de una rama del TCR.

3.2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR DEL TCR.

Como se puede apreciar en la figura 3.6. Los reactores están conectados en delta al voltaje de 13.8KV. A continuación dimensionaremos el reactor por fase:

La reactancia del total de la TCR viene dada por:

$$X_{TCRY} = \frac{\left(\frac{V_{sec_b}}{\sqrt{3}}\right)^2}{Q_{3/3}} = \frac{13800^2}{150000} = 1.2696 [\Omega] \quad (3.12)$$

Teniendo el valor de la reactancia podemos hallar la inductancia por fase:

$$L_Y = \frac{X_{LTCR}}{2 \times \pi \times f} = \frac{1.2696}{2\pi(60)} = 3.37mH \quad (3.13)$$

El valor del reactor en estrella es:

$$L_{\Delta} = 3L_Y = 3(3,37mH) = 10mH \quad (3.14)$$

El valor del reactor por fase nos dio como resultado que $L = 10mH$ valor dentro del rango de la reactor escogido en la instalación realizada por el fabricante ABB en la sub-estación del (CUT), el cual tiene un valor de inductancia por fase de $L = 9.59mH$ con un rango de tolerancia del -2/0%.

Los valores nominales del reactor instalado en la sub-estación por ABB se muestran en la tabla 3.2 a continuación.

Tabla 3.2. Valores nominales del Reactor del SVC.

Descripción	Valor/ Unidad de Medida
Voltaje máximo	15.7/ KVrms
Número de Bobinas por fase	2
Inductancia nominal por fase	9.59 mH
Tolerancia de la inductancia Nominal	-2/0 %
Corriente máxima sin armónicos	3.967 KArms
Corriente máxima de cortocircuito	6.9 KArms/1s

Mediante simulación en Matlab/Simulink/SimPowerSystem de nuestro sistema, podemos comprobar que el dimensionamiento de nuestros equipos es el correcto, teniendo como premisa que el TCR iba a poder absorber potencia reactiva hasta 150 MVAR, lo cual mediante simulación a un ángulo $\alpha = 90^\circ$ de plena conducción podemos observar en la figura 3.7 que la Potencia Reactiva absorbida por el QTCR=145MVAR valor aproximado al de diseño.

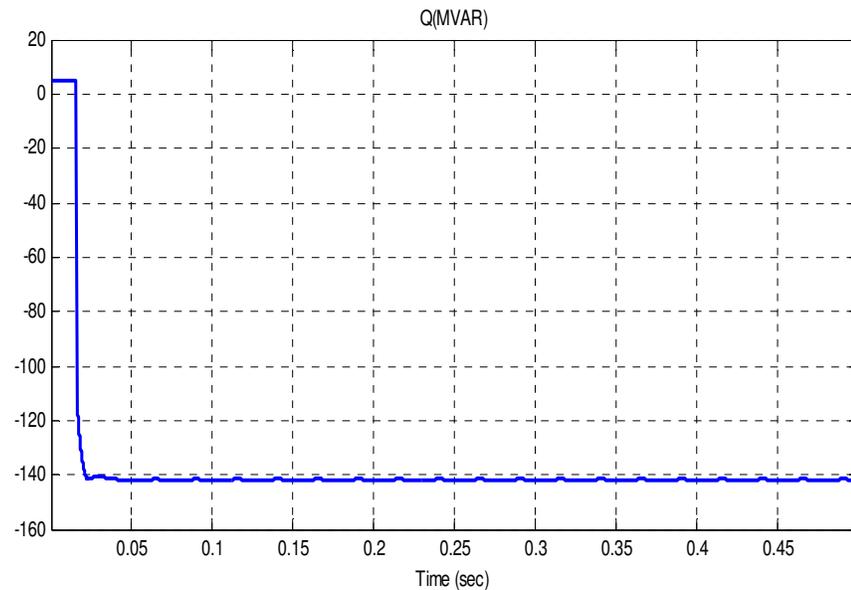


Figura 3.7 Potencia Reactiva Entregada por el TCR.

Una de las principales características del TCR es la generación de armónicos en la corriente. Como se analizó en la sección 2.2 de esta tesis las implicaciones de la corriente armónicas en el sistema, así como también en la figura 2.12 nos muestra la gráfica de los armónicos de corrientes I_n generados por TCR como porcentaje de la corriente fundamental I_1 . Para todo rango valido de α , es decir desde $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. Para valores $\alpha = 90^\circ$ se produce la máxima conducción de corriente en el TCR, y para un $\alpha \geq 90^\circ$ la corriente se ve reducida hasta llegar a un valor de $\alpha = 180^\circ$, donde la corriente es cero. Para ángulos de disparos entre

$90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, hay generación de armónicos en porcentaje de acuerdo a la figura 2.11. de números de armónicos vs ángulos de disparo. En sistemas completamente balanceados, la conexión delta del TCR, atrapa los múltiplos impares de los terceros armónicos (3ero, 9no, 12avo, 15vo), mientras que el resto de armónicos impares como (5to, 7mo, 11vo, 13vo) son inyectados al sistema. Lo que se puede observar en la siguiente figura.

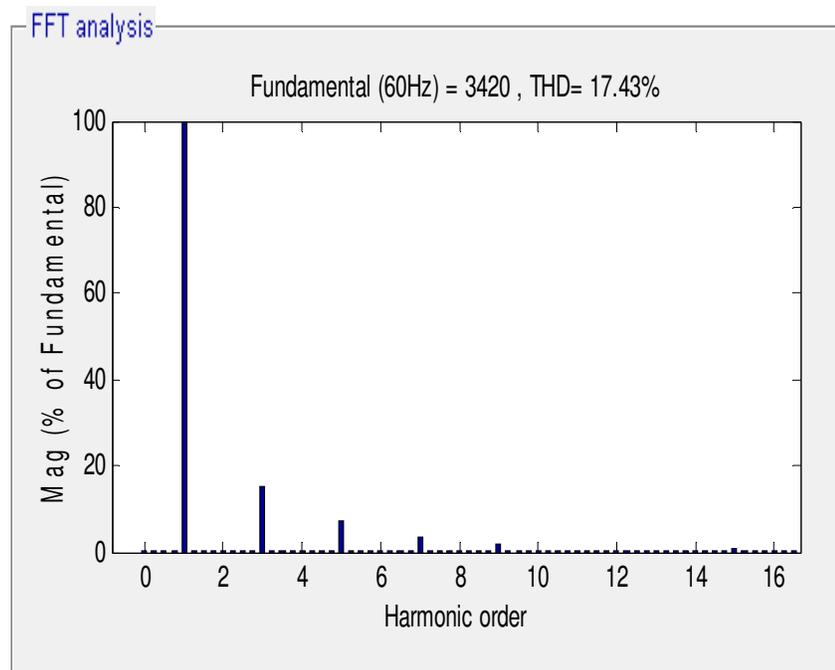


Figura 3.8. Análisis de Fourier de Armónicos de la rama del TCR.

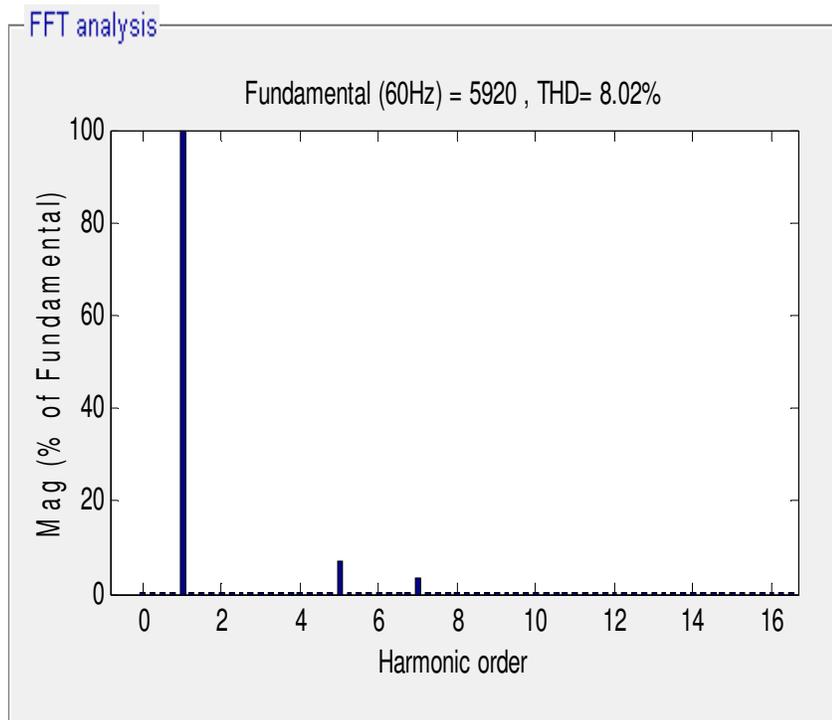


Figura 3.9. Análisis de Fourier de armónicos inyectados al Sistema.

Como hemos podido observar en las figuras 3.8 y 3.9 del análisis de Fourier de las corrientes en el sistema, en la figura 3.8 tenemos un THD=17% con una aportación mayor del armónico de 3er orden, pero a su vez estos armónicos se quedan dentro de la conexión Delta del TCR no se inyectan al sistema, como se puede observar en la figura 3.9 donde los armónicos de orden 5 y 7 son los que afectan al sistema con un THD= 8.02%, para lo cual se diseñaron filtros de 5ta y 7ma armónica en el siguiente sección.

3.2.2 VÁLVULAS DE TIRISTORES DEL TCR.

La válvula de tiristores del SVC de CUT está conformada por 20 tiristores por fase conectados en antiparalelo. La figura 2.19 se muestra una fotografía de la Válvula del TCR instalada [10].

El TCR está diseñado para soportar en estado estacionario, la corriente de operación mostrada en el Anexo A. En este punto de operación el voltaje del primario es 1.1 p.u y en el lado del secundario es $U_2 = 1.0175$ p.u. De la tabla A.1 la susceptancia máxima para el TCR es $B_{TCR,max} = 1.6139$, con estos datos de la corriente del TCR, para el punto de operación C se calcula como:

$$I_{TCR} = U_2 B_{TCR,max} = 1.642 \text{ pu} \equiv 3967A \quad (3.15)$$

3.3 FILTROS DE 5TA Y 7TA ARMÓNICA.

En esta sección se describen los conceptos básicos relacionados con el diseño de filtros asociados a equipos SVC [13].

Como se vio en las secciones pasadas, los equipos FACTS no están exentos de la producción de armónicos, debido a la conmutación de los interruptores de estado sólido o a fenómenos de resonancia con otros elementos de la red. Es por ello que en su diseño es natural encontrar filtros de 5° y 7° armónicas conectados en las mismas

barras de conexión de los equipos FACTS. En particular, en un SVC, se producen armónicos ya sea por la conmutación de los tiristores de los TCR como también por las resonancias entre bancos de condensadores y los TCR.

En la figura 3.10 se muestra el diagrama esquemático para los filtros de 5ta y 7ma armónicas y en las tablas A.1 y A.2 del anexo A se dan los valores de los elementos que los conforman.

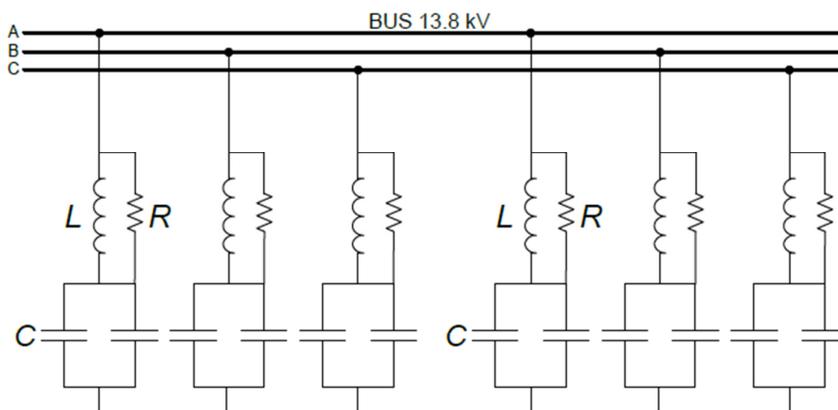


Figura 3.10. Diagrama Esquemático de los filtros de 5ta y 7ma armónica.

Dimensionamiento de los Filtros

A continuación, se desarrollan las ecuaciones básicas para el diseño de filtros de armónicos de corriente. La impedancia de un filtro sintonizado serie, como el de la Figura 3.10 está dado por la siguiente expresión:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.16)$$

$$Z = R + jX \quad (3.17)$$

Para este tipo de filtro la resonancia ocurre a la frecuencia:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.18)$$

Es decir

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.19)$$

Finalmente el circuito resuena para la armónica:

$$h_{res} = \frac{f_0}{f_{red}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}f_{red}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.20)$$

El valor h_{res} por lo general toma valores de 5, 7, 11 y 13. A continuación hallares los valores requeridos para el Filtro de la 5ta armónica.

$$X_{F5} = \frac{\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{Q}{3}\right)} = \frac{\left(\frac{13Kv}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{33MVA}{3}\right)} = 5.77[\Omega] \quad (3.21)$$

Teniendo que $h_{res} = 5$ de la ecuación 3.20, $f_{red} = 60Hz$ podemos despejar L en función de C

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi h_{res} f_{red}} \quad (3.22)$$

$$LC = \left(\frac{1}{2\pi h_{res} f_{red}} \right)^2 \quad (3.23)$$

De la ecuación 3.16 tenemos que:

$$X_{F5} = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (3.24)$$

$$X_{F5} = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} \quad (3.25)$$

$$C = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega X_{F5}} \quad (3.26)$$

$$C = 420 \mu F \quad (3.27)$$

De lo cual podemos hallar el valor de inductancia y resistencia

$$L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (3.28)$$

$$L = 0.684 \mu H \quad (3.29)$$

Con $C = 420 \mu F$, $L = 0.684 \mu H$ y $R = 26 [\Omega]$ Hallamos la impedancia del filtro

$$Z_{F5} = \frac{j\omega(RL + CR) + -\omega^2 LC}{j\omega L + R} \quad (3.30)$$

$$Z_{F5} = 0.42 \text{ m}\Omega \quad (3.31)$$

A continuación dimensionaremos el Filtro 7ta armónica.

El valor h_{res} por lo general toma valores de 5, 7, 11 y 13. A continuación hallares los valores requeridos para el Filtro de la 5ta armónica.

$$X_{F7} = \frac{\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{Q}{3}\right)} = \frac{\left(\frac{13Kv}{\sqrt{3}}\right)^2}{\left(\frac{17MVA}{3}\right)} = [\Omega] \quad (3.32)$$

Teniendo que $h_{res} = 5$ de la ecuación 3.20, $f_{red} = 60\text{Hz}$ podemos despejar L en función de C

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi h_{res} f_{red}} \quad (3.33)$$

$$LC = \left(\frac{1}{2\pi h_{res} f_{red}}\right)^2 \quad (3.34)$$

De la ecuación 3.22 tenemos que:

$$X_{F7} = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.35)$$

$$X_{F7} = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} \quad (3.36)$$

$$C = \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega X_{F7}} \quad (3.37)$$

$$C = 420 \mu F \quad (3.38)$$

De lo cual podemos hallar el valor de inductancia y resistencia

$$L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (3.39)$$

$$L = 0.684 \mu H \quad (3.40)$$

Con $C = 210 \mu F$, $L = 0.694 \mu H$ y $R = 36 [\Omega]$ Hallamos la impedancia del filtro

$$Z_{F5} = \frac{j\omega(RL + CR) + -\omega^2 LC}{j\omega L + R} \quad (3.41)$$

$$Z_{F7} = 0.291 m\Omega \quad (3.42)$$

Los valores nominales instalados para los filtros de 5ta y 7ma armónica respectivamente, se muestran a continuación en la tabla 3.4, que se encuentra dentro del rango de los valores hallados, con

un porcentaje de incertidumbre del $\pm 5\%$.

Tabla 3.3. Valores nominales instalados en los filtros de 5ta y 7ma armónica.

Elemento	Filtro de 5ta	Filtro de 7ma	Unidad	Tolerancia
C	420.0	210.0	$\mu F/Y$	5%
L	0.684	0.694	$\mu F/Y$	4%
R	26	36	$[\Omega]$	$\pm 5\%$

Los filtros de 5ta y 7ma armónica tienen la función de evitar que las componentes armónicas de mayor magnitud generadas por el TCR pasen al lado primario del SVC, como se muestra en la figura.

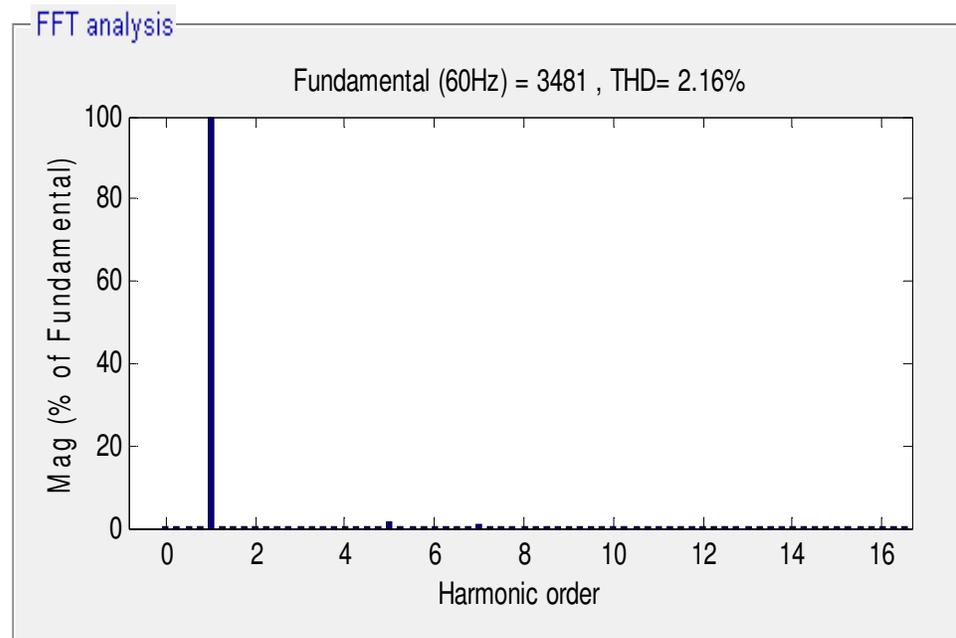


Figura 3.11. Análisis de Fourier de armónicos en el sistema, con filtro de 5to y 7to orden.

Como se analizó en la sección anterior el TCR, inyecta al sistema gran cantidad de armónicos de 5to y 7to orden, para lo cual fueron diseñados los filtros, los cuales nos redujeron el THD desde 8.02% a 2.16% como se muestra en la figura 3.12, eliminado así la gran parte de los armónicos inyectados a red, producidos por el TCR.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

En esta sección se describen los distintos componentes de un control de un sistema general de un SVC, tales como el sistema de medición, regulador de voltaje, generador de pulsos, un sistema de sincronización, y control complementario [10].

El diagrama de bloques general sistema de control SVC tipo TSC-TCR es representada en la figura. 4.1. Este sistema de control incorpora características tanto de tensión simple control y de control auxiliar.

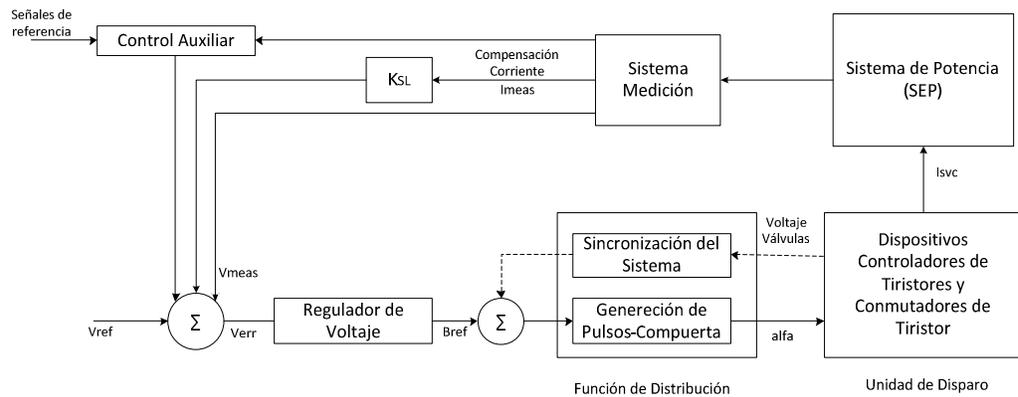


Figura 4.1. Diagrama esquemático general del sistema de control de un SVC.

4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

Para estudios del sistema de potencia relacionados con el control de voltaje en el punto de conexión del SVC con el sistema, un diagrama de bloque simplificado del SVC y del sistema de potencia puede ser suficiente. Este sistema simplificado puede ser utilizado para verificar los adecuados parámetros de control. Por esta situación el sistema de potencia es representada por una fuente de voltaje en serie con un sistema de reactancia equivalente X_e en p.u la figura 4.2 muestra un diagrama de bloque simplificado del SVC con un lazo cerrado de voltaje de control. Este modelo está basado en la asunción que el voltaje V_{svc} varia ligeramente con respecto al voltaje nominal.

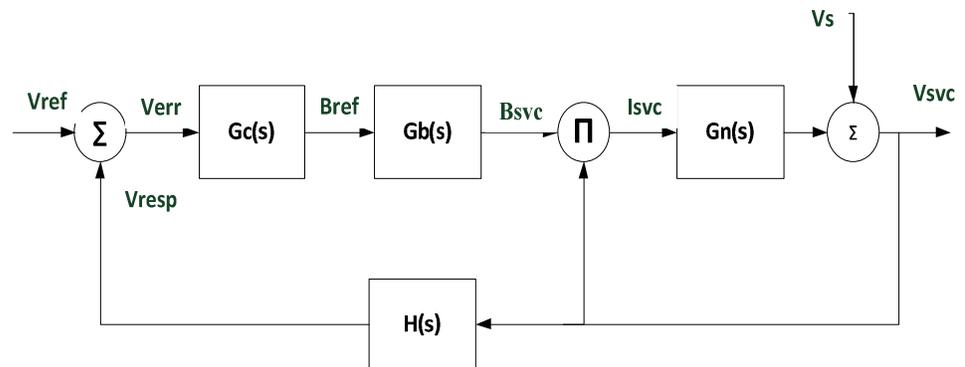


Figura 4.2. Diagrama de bloque simplificado del SVC.

Para simplificación del modelo, tenemos:

$$\Delta V_T(s) = \frac{G_C(s)G_B(s)G_N(s)}{1 + G_C(s)G_B(s)G_N(s)H_S(s)} \Delta V_{ref}(s) + \frac{1}{1 + G_C(s)G_B(s)G_N(s)H_S(s)} \Delta V_S$$

La variable V_{svc} es el voltaje instantáneo del lado de alta de *SVC*, el cual entra al bloque del transductor, donde T_m es la constante de tiempo del transductor de voltaje. El transductor entrega una medición de voltaje V_{resp} el cual se resta en el punto suma. V_{ref} sirve para aplicar un pequeño escalón de voltaje para evaluar la respuesta al escalón del *SVC*. La referencia de voltaje del regulador de voltaje es V_{ref} .

La Variable K_{SLOPE} es la pendiente de la característica V-I del *SVC*. La salida del punto suma es la señal de error V_{ERR} , la cual es aplicada al bloque del controlador, el cual es un control de tipo integral. La

ganancia integral es K_c y el control integral está acotado para trabajar dentro de los límites fijados por las constantes B_{max} y B_{min} .

El bucle cerrado de control de voltaje será lo bastante rápido para contrarrestar variaciones de voltaje y perturbaciones pero también conservará un margen de estabilidad adecuado. El Sistema de control de voltaje utilizado es un sistema de lazo cerrado con un control de voltaje de secuencia positiva. El control automático puede desconectarse y el SVC correr manualmente. La variable de control (por ejemplo, el voltaje de secuencia positiva en la red de alta tensión, donde está conectado el SVC) se compara con un valor de referencia prescrito para el control de voltaje. A continuación se explicara con mas detalle, cado uno de los bloque que compone nuestro controlador, tal como se muestra en la figura 4.2.

4.2 LINEALIZACIÓN DE LA PLANTA.

Supongamos que la susceptancia de salida deseada, B_{ref} , del regulador de tensión va a ser implantada en su totalidad a través del TCR, es decir, no hay condensadores fijos o conmutables. Entonces la aplicación de la salida del regulador de voltaje B_{ref} como una actual susceptancia instalada B_{svc} , se lleva a cabo a través de una etapa intermedia donde se calcula el ángulo de disparo, como se

muestra en la fig. 4,20. Debido a que la relación entre el ángulo de disparo y susceptancia BSVC- s expresó como $F_1(\alpha)$ no lineal, que requiere la inclusión de una función de linealización $F_2(\alpha)$ para asegurar que

$$G_b = F_2(\alpha)F_1(\alpha) = 1 \quad (4.2)$$

Donde

$$F_2(\alpha) = [F_1(\alpha)]^{-1} \quad (4.3)$$

Para el caso de un solo TCR, $F_1(\alpha)$ se expresa como:

$$F_1(\alpha) = B_{SVC} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (4.5)$$

Entonces

$$F_2(\alpha) = B_{SVC} = \frac{\pi}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (4.6)$$

La función $F_2(\alpha)$ representa el cálculo del ángulo disparo, correspondiente a B_{ref} , el cual va aplicarse al SVC. Posteriormente, cuando el TCR se dispara con un ángulo α , la susceptancia neta B_{svc} conectado al bus SVC, se convertirá igual a B_{ref} .

4.3 GANANCIA DEL SISTEMA.

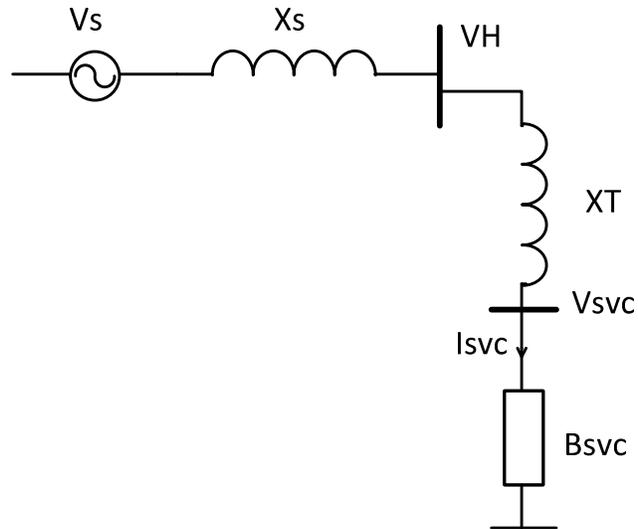


Figura 4.3. Representación del sistema de potencia del SVC, incluyendo el acoplamiento con el transformador.

Considerando el acoplamiento del transformador como se muestra en la figura 4.3, representación del acoplamiento del transformador al SVC, crea un bus de bajo voltaje conectado al SVC y la reactancia del transformador X_T está separada de X_S . El lado de alta voltaje V_H , se relaciona con el lado de baja tensión, V_{svc} , de la siguiente manera:

$$\frac{V_{svc}}{V_H} = \frac{1}{1 + X_T B_{svc}} \quad (4.7)$$

Linealizando la ecuación tenemos:

$$\Delta V_{SVC}(\mathbf{1} + X_T B_{SVC0}) + V_{SVC0} X_T \Delta B_{SVC} = \Delta V_H \quad (4.8)$$

Sustituyendo la ecuación anterior y la expresión V_{SVC0}/V_{H0} de la ecuación () n resulta lo siguiente:

$$\frac{\Delta V_H}{\Delta B_{SVC}} = \frac{-V_{H0}}{(ESCR + B_{SVC0})} \left(\frac{\mathbf{1} - X_T ESCR}{\mathbf{1} + X_T B_{SVC0}} \right) \quad (4.9)$$

El efecto del SVC en el sistema de Voltaje puede ser evaluado de una manera aproximada, como se muestra a continuación:

$$V_{SVC} = \frac{V_S(\mathbf{1}/B_{SVC})}{(X_S + \mathbf{1}/B_{SVC})} \quad (4.10)$$

$$= \frac{V_S}{(\mathbf{1} + B_{SVC}/ESCR)} \quad (4.11)$$

Donde X_S es el equivalente a la impedancia de cortocircuito del sistema en shunt con la capacitancia reactiva del SVC.

Para un sistema AC, generalmente $ESCR \gg B_{SVC}$ (o realmente $X_S \ll \mathbf{1}/B_{SVC}$), por lo tanto la ecuación puede ser desarrollar como:

$$V_{SVC} = V_s \left(\mathbf{1} - \frac{B_{SVC}}{ESCR} \right) \quad (4.12)$$

El cambio en el bus de voltaje del SVC ΔV , esta dada por:

$$\Delta V = V_S - V_{SVC} \quad (4.13)$$

O

$$\Delta V = \frac{V_S B_{SVC}}{ESCR} \quad (4.14)$$

O también

$$\Delta V = K_N B_{SVC} \quad (4.15)$$

Donde K_N está definida como la ganancia del sistema

$$K_N = \frac{V_S}{ESCR} = \frac{V_S}{B_S} \quad (4.16)$$

La ganancia del sistema K_N , se refiere por tanto a la desviación del voltaje del bus SVC para la susceptancia del SVC. Un aumento de la susceptancia inductiva, B_{SVC} , causa que un ΔV se convierta más positiva, lo que conduce a una caída en la tensión del bus SVC. De hecho, la ecuación. (5.15) puede obtenerse a partir de la ecuación. (5.11) asumiendo que:

$$V_{SVC0} \cong V_S \text{ y } ESCR \gg B_{SVC0} \quad (4.17)$$

La expresión anterior derivada de la ganancia del sistema se puede utilizar para llegar a un diseño preliminar de un regulador de voltaje del SVC. Sin embargo, se puede observar que la ganancia del

sistema K_n depende del voltaje del sistema V_s y la impedancia equivalente X_s - los cuales están sujetos a cambios con la dinámica variando la configuración del sistema de potencia. Entonces la ganancia K_N no es una constante y, de hecho, varía en un cierto rango. Un sistema AC débil correspondería a una alta ganancia del sistema; un sistema AC fuerte se traduciría en una ganancia del sistema relativamente baja.

La ecuación (4,16) se obtuvo sobre la base de los valores absolutos de los diversos parámetros involucrados. Para los estudios de control, es deseable para obtener una correspondiente ecuación basada en los valores unitarios de diferentes variables. Dejemos que la tensión de base, V_b , y susceptancia base, B_b , sean elegidos como:

$$V_b = V_{nominal} \quad (4.18)$$

Donde $V_{nominal}$ = Voltaje del Bus

$$B_b = B_{max} - B_{min} \quad (4.19)$$

Donde B_{max} = La máxima susceptancia del SVC (capacitivo)

B_{min} = La máxima susceptancia del SVC (inductivo)

La ganancia por unidad del sistema de la ecuación

$$K_N = \frac{V_s B_b}{V_b B_s} \quad (4.20)$$

Multiplicando y dividiendo ecuación (4.15) para V_b^2 ,

$$K_N = \frac{V_s B_b V_b^2}{V_b B_s V_b^2} \quad (4.21)$$

$$= \frac{V_s Q_{SVC}}{V_b B_s V_s V_b \frac{V_b}{V_s}} \quad (4.22)$$

Resolviendo tenemos:

$$K_N = \frac{V_s Q_{SVC}}{S_C V_b \frac{V_b}{V_s}} \quad (4.23)$$

Donde S_C = la potencia de cortocircuito

= el voltaje base * la corriente de cortocircuito

$$= V_b \times (B_s V_s)$$

Asumiendo que V_s/V_b es cercano a 1, que es usualmente el caso del sistema de potencia, la ganancia por unidad del sistema es expresada como:

$$K_N = \frac{\Delta V_{svc}}{B_{svc}} = \frac{Q_{SVC}}{S_C} pu \quad (4.24)$$

Como se puede observar la ganancia del sistema va a cambiar con variaciones en la configuración de la red, conmutación de línea, y cualquier evento que cambie el cortocircuito del sistema en el Voltaje del Bus.

4.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR POR EL MÉTODO DEL FACTOR K.

Como resultado de que la ganancia de la planta es igual a la linealización de las funciones que da como resultado la unidad, para hallar el valor del controlador necesitamos la ganancia de planta G_P ecuación 4.26, que es igual a la Ganancia G_b , por la Ganancia del Sistema G_N ecuación 4.25.

$$K_N = \frac{Q_{SVC}}{S_C} pu \quad (4.25)$$

$Q_{SVC} = 100 \text{ MVARs}$ Potencia reactiva del SVC

$S_C = 1069,6 \text{ MVA}$ Potencia de cortocircuito trifásica del Sistema

La ganancia de la planta es igual a:

$$\mathbf{G}_P(s) = \mathbf{G}_b(s)\mathbf{G}_N(s) \quad (4.26)$$

De lo cual tenemos:

$$\mathbf{G}_b(s) = \mathbf{1} \quad (4.27)$$

Entonces reemplazando los valores anteriores en la ecuación 4.26 tenemos:

$$\mathbf{G}_P(s) = \mathbf{K}_N \quad (4.28)$$

Ya teniendo el valor de la ganancia de la planta \mathbf{G}_P necesitamos saber nuestro margen de fase del sistema φ_{sys} , debido a que \mathbf{G}_P es una constante, nuestro $\varphi_{sys} = -90^\circ$, lo que podemos apreciar en la figura 4.6 grafica de bode de la ganancia de la planta, con lo cual podemos hallar nuestro φ_{boost} , el cual es igual a:

$$\varphi_{boost} = PM - \varphi_{sys} - 90^\circ \quad (4.29)$$

Debido a que $\varphi_{boost} = 0$, como nos muestra la figura 4.7 es un controlador de tipo I, el cual se trata de un control tipo integral donde, la frecuencia de corte $f_c = 6\text{Hz}$, escogimos este valor ya que nuestra frecuencia de conmutación es de la línea es decir de 60Hz, y la frecuencia de corte debe de estar una década antes.

A continuación también se muestran las gráficas de Bode de la Ganancia de planta y lazo, \mathbf{G}_C y \mathbf{G}_{OL} respectivamente

Required ϕ_{boost}	Controller type
0°	Type I
$< 90^\circ$	Type II
$> 90^\circ$	Type III

Figura 4.4. Fase del sistema requerida para tipo de controlador [18].

<u>Type I</u> $G_C(s) = \frac{K_C}{s}$	<u>Type II</u> $G_C(s) = \frac{K_C}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)}$ $\omega_z < \omega_p$	<u>Type III</u> $G_C(s) = \frac{K_C}{s} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_z}\right)^2}{\left(1 + \frac{s}{\omega_p}\right)^2}$ $\omega_z < \omega_p$
---	--	---

Figura 4.5. Los tres tipos de controladores [18].

$$G_c = \frac{K_C}{S} \quad (4.30)$$

$$K_C = \frac{\omega_C}{K_N} \quad (4.31)$$

$$= \frac{2\pi f_c}{K_N} \quad (4.32)$$

$$= \frac{37.7}{0.093} = 405.4 \quad (4.33)$$

$$G_C = \frac{405.4}{S} \quad (4.34)$$

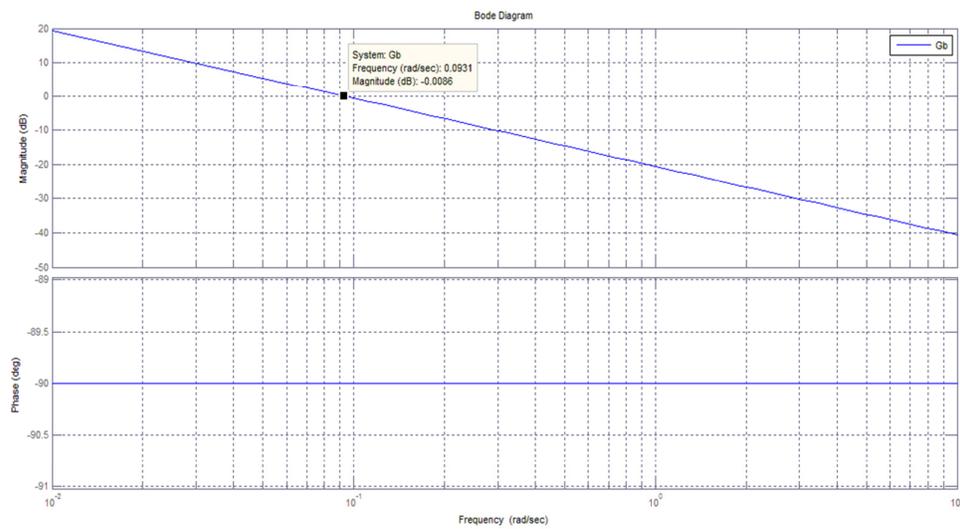


Figura 4.6. Diagrama de Bode de la Ganancia del Controlador.

Con lo cual podemos obtener la ganancia de lazo $G_{OL} = G_C(s)G_p(s)$

$$G_{OL} = \frac{37.7}{S} \quad (4.35)$$

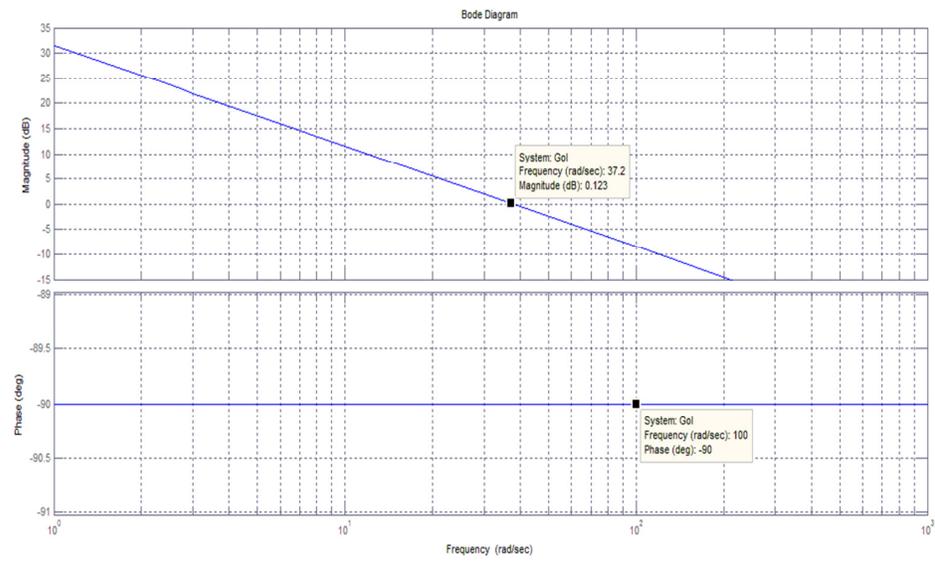


Figura 4.7. Diagrama de Bloque de la Ganancia de lazo.

CAPÍTULO 5

5. SIMULACIÓN DEL SVC

En el capítulo anterior se presentaron los componentes fundamentales de SVC y se dimensionaron cada uno de los elementos que lo componen como son el TCR, TSC filtros y la red de potencia a la cual está conectado. En este capítulo se presenta la programación en Matlab/Simulink de ese compensador. La figura 5.1 podemos apreciar el diagrama del sistema eléctrico construido en Simulink. En las siguientes secciones de este capítulo se describen cada una de sus etapas detallando de una manera más amplia el desarrollo del SVC.

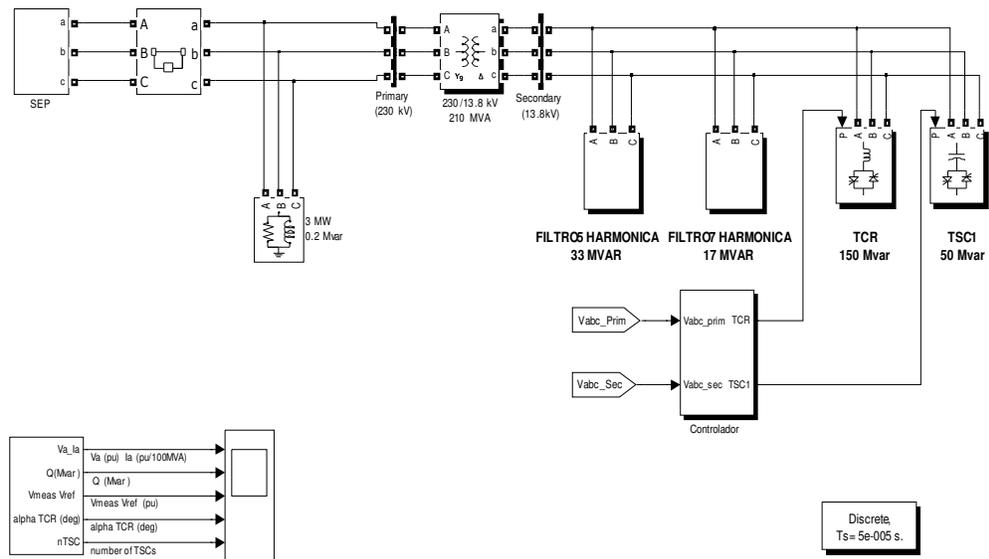


Figura 5.1. Diagrama del sistema del SVC construido en Simulink/SimPower System.

5.1 MODELO EN SIMULINK

A continuación modelaremos en Simulink/SimPowerSystem cada uno de los elementos principales que componen el SVC.

5.1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SISTEMA DE POTENCIA.

El primer bloque mostrado en la figura 5.1 es el equivalente de Thevenin del SEP, la subestación donde está conectado el CEV. La figura 5.2 muestra el arreglo de las fuentes de voltaje y las impedancias contenidas en este bloque. Dentro de la librería de Simulink/SimPower System se seleccionó una fuente trifásica y los parámetros introducidos al sistema fueron escogidos en base al dimensionamiento de los elementos

principales capítulo 3, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Valores del SEP.

Descripción	Valor/Unidad
Voltaje de fase a fase valor rms:	230 kV
Frecuencia de operación	60 Hz
Conexión interna de los devanados:	estrella aterrizada
Nivel de corto circuito trifásico a potencia base:	2285.1 MVA
El voltaje base del sistema:	230 kV
La relación X/R de la fuente:	3.76418

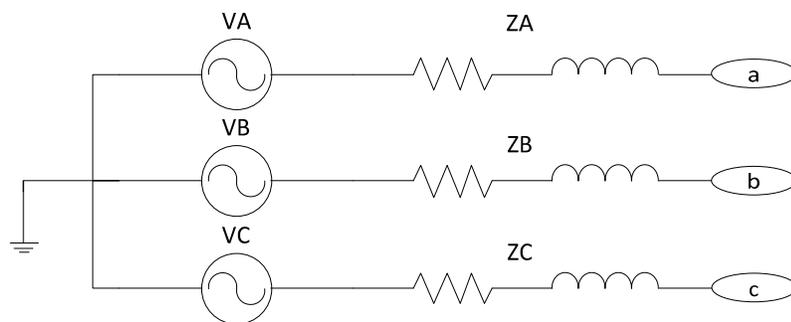


Figura 5.2. Sistema Equivalente de Potencia.

Este bloque de Simulink tiene dos maneras en las que puede trabajar, mediante la corriente de cortocircuito trifásico y la relación X/R, el cual es nuestro caso, la otra opción hubiese sido obtener los valores de resistencia (R) e inductancia (L) de la línea.

5.1.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

El segundo bloque mostrado en la figura 5.1 corresponde al transformador. Este bloque está compuesto por tres transformadores monofásicos conectados en configuración delta en el lado primario y delta en el lado secundario, como se muestra en la figura 5.3.

En el programa Simulink el transformador se modeló como un solo transformador trifásico, como se muestra en la figura 5.4.

Los parámetros introducidos al modelo son:

Tabla 5.2. Parámetros y características del transformador.

Descripción	Valor/unidad
Potencia nominal	210 MVA
Frecuencia de operación	60 Hz
Tipo de conexión del devanado primario	Delta
Tipo de conexión del devanado secundario	Delta
Voltaje en los devanados primario y secundario en Vrms	230/13.8 kV

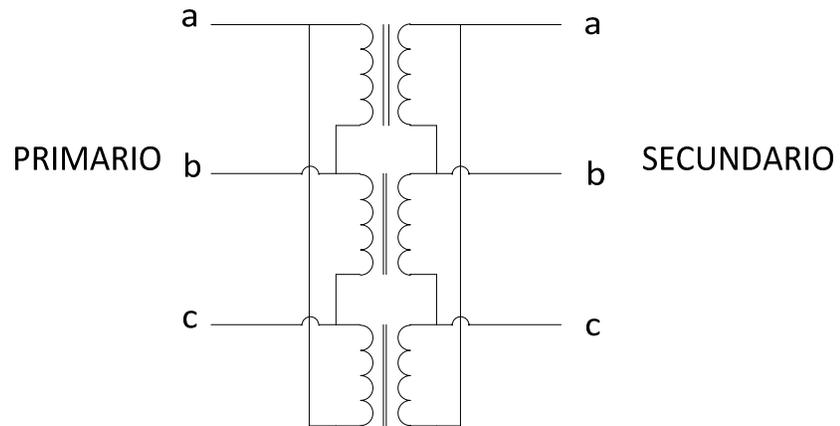


Figura 5.3. Diagrama de la conexión Delta-Delta del transformador.

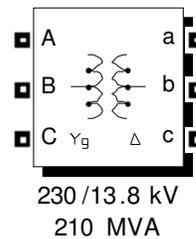


Figura 5.4 Bloque del Transformador en Simulink/SimPower System.

5.1.3 MODELO SIMULINK DE LA RAMA DEL TCR.

El banco de reactores conectados en delta y la válvula de tiristores están implementados en el bloque *TCR* de la figura 5.1. La programación en Simulink/SimPower System de este bloque se muestra en la figura 5.5. La conexión de los reactores y válvulas de tiristores de este modelo está de acuerdo a la Figura 3.7.

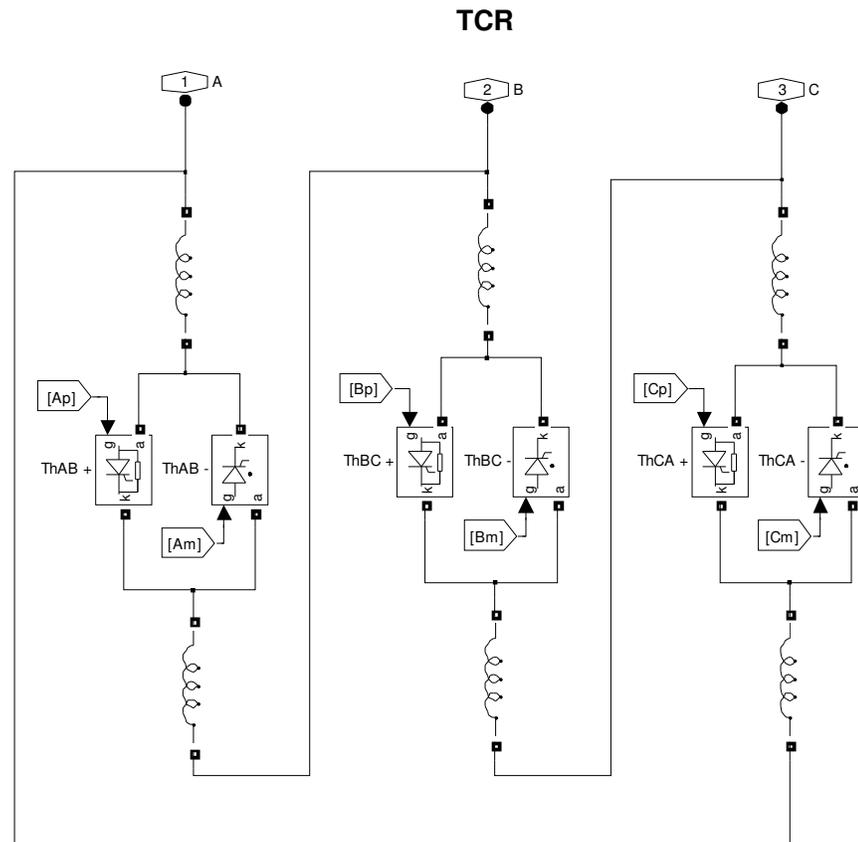


Figura 5.5. Programación en Simulink del Bloque TCR.

Los parámetros programados al modelo Simulink para cada tiristor son:

Tabla I. Parámetros del TCR.

Descripción	Valor/Unidad
Inductancia $L/2$ (H)	4.795e-3 mH
Resistencia R_{on} (Ohms)	0.001 Ohm
Inductancia L_{on} (H)	0
Caída de voltaje en conducción (V)	0.8 V
Corriente inicial I_c (A):	0
Resistencia snubber R_s (Ohms)	500 Ohm
Capacitancia snubber C_s (F)	250e-9 uF

Cada fase de la válvula de tiristores está formada por dos tiristores en antiparalelo, uno conduce en el semiciclo positivo de la corriente y el otro el semiciclo negativo. Los pulsos de disparo [Ap], [Bp], [Cp] (semiciclo positivo) y [Am], [Bm], [Cm] (semiciclo negativo) procedentes de *Unidad de Disparo* son aplicados a la compuerta de cada tiristor. Las señales son tomadas mediante el multímetro interno de los tiristores para después ser graficadas en el bloque de señales.

5.1.4 MODELO SIMULINK DE LA RAMA DEL TSC.

La figura 5.6 muestra la programación en Simulink/SimPower System del bloque TSC mostrado en la figura 5.1. Esta rama TSC está programada de acuerdo a los datos de las Figuras 3.2.

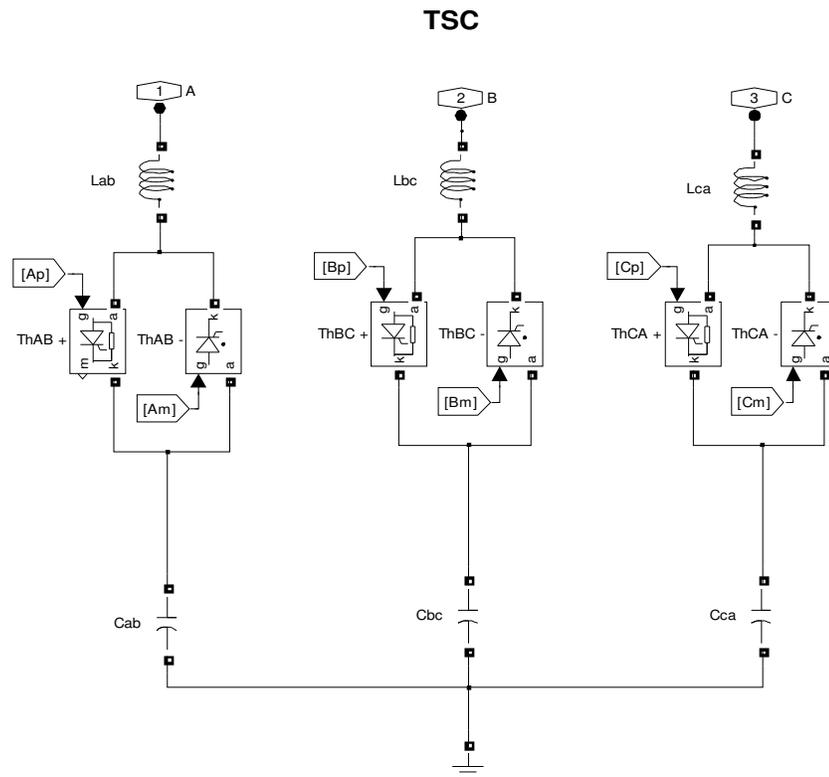


Figura 5.6. Programación en Simulink del Bloque TSC.

La señal de entrada a este bloque es la señal TSC on la cual es la orden de encendido de la válvula. Esta señal proviene del bloque *Control, específicamente del Bloque Unidad de Disparo*. También se conectan los voltajes secundarios y el neutro del bus de 13.8 kV. Los parámetros introducidos al modelo Simulink son los que se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Parámetros del Banco Capacitores.

Descripción	Valor/Unidad
Resistencia (Ohm):	0
Inductancia (H):	0.598e-3 mH
Capacitancia (F):	615.4e-6 uF
Resistencia Ron (Ohm):	0.001 Ohm
Inductancia Lon (H):	0
Caída de voltaje en conducción (V):	0.8V
Corriente inicial (A):	0
Resistencia snubber Rs (Ohm):	500 Ohm
Capacitancia snubber Cs (F):	250e-9 uF

5.1.5 FILTROS DE 5TA Y 7MA ARMÓNICAS.

La figura 5.7 muestra la programación en Simulink del bloque *Filtros de 5ta y 7ma* de la figura 5.1. Los parámetros introducidos a los modelos Simulink de la figura 5.7 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5. Parámetros del Filtro de 5ta Armónica.

Descripción	Valor/Unidad
Resistencia R (ohm):	26 Ohm
Inductancia L (H):	0.684e-3 mH
Capacitancia C (F):	0
Resistencia R (ohm):	infinita
Inductancia L (H):	infinita
Capacitancia C (F):	420e-6 uF

Tabla 5.6. Parámetros del Filtro de 7ta Armónica.

Descripción	Valor/Unidad
Resistencia R (ohm):	36 Ohm
Inductancia L (H):	0.694e-6 mH
Capacitancia C (F):	0
Resistencia R (ohm):	infinita
Inductancia L (H):	infinita
Capacitancia C (F):	210e-6 uF

Los cálculos de sintonización de los filtros se muestran en el capítulo 3 de esta tesis

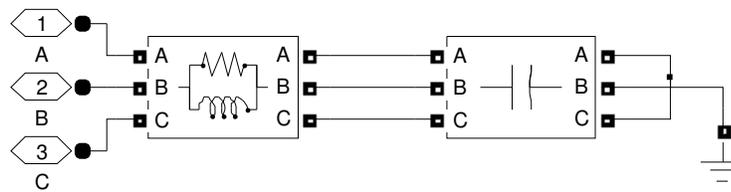


Figura 5.7. Programa en Simulink de 5ta y 7ta armónica.

5.2 MODELO EN SIMULINK DE COMPONENTES DEL CONTROL.

En el bloque llamado *Control* de la figura 5.1 está programado lo siguiente:

- 1.- Sistema de Medición
- 2.- Controlador.
- 3.- Función de distribución
- 4.- Unidad de Disparos.

La figura 5.8 muestra el programa Simulink del bloque *Control*.

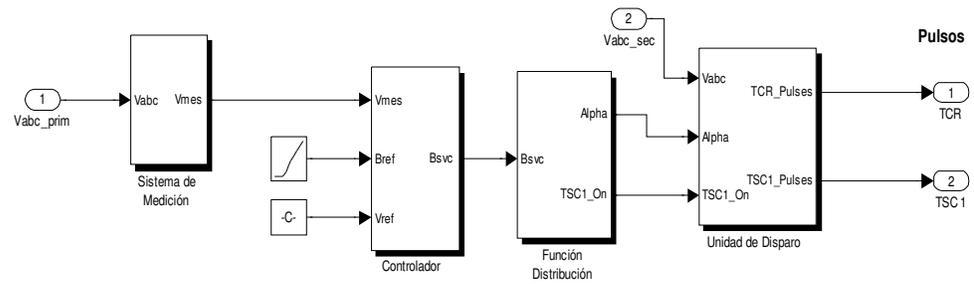


Figura 5.8. Programa Simulink del Bloque de Control.

5.2.1 SISTEMA DE MEDICIÓN

El bloque Medición de la figura 5.8 es donde se realiza la medición del voltaje de respuesta V_{resp} del lado de 230kV, para luego ser retroalimentado al regulador de voltaje.

Para realizar dicha medición se utiliza la transformación de coordenadas $\alpha - \beta$, la cual fue descrita en la sección 5.2.2. También en este bloque se implementa la medición de la potencia reactiva Q_{svc} del SVC. La figura 5.9 muestra el programa Simulink del bloque Medición. La transformación de coordenadas α, β se implementa en Simulink como se muestra en la figura 5.10,

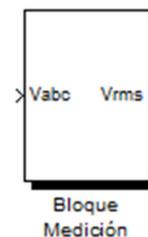


Figura 5.9. Bloque de medición Implementado en Simulink.

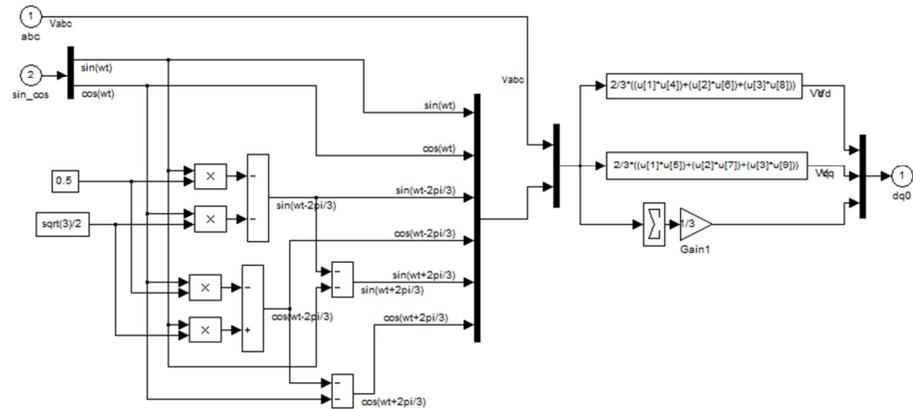


Figura 5.10. Implementación de la transformación de (a, b, c) a (α , β) para la medición de voltaje promedio.

Dando como resultado:

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{2}{3} (V_a \sin \omega t + V_b \sin (\omega t - 2\pi/3) + V_c \sin (\omega t + 2\pi/3)) \\
 V_q &= \frac{2}{3} (V_a \cos \omega t + V_b \cos (\omega t - 2\pi/3) + V_c \cos (\omega t + 2\pi/3)) \\
 V_0 &= \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)
 \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.2.2 CONTROLADOR.

La figura 5.11 muestra la programación en Simulink el controlador, el cual está basado en el modelo básico 2 para control continuo de un SVC de la IEEE figura 2.22 , al punto suma del regulador entran las señales V_{mes} , V_{ref} y V_{slope} . La señal V_{ref} sirve para evaluar la respuesta del SVC a señales tipo escalón que se introducen al punto suma. La señal V_{resp}

es la señal en p.u. del voltaje primario del SVC derivada de la transformación de coordenadas de la figura 5.10.

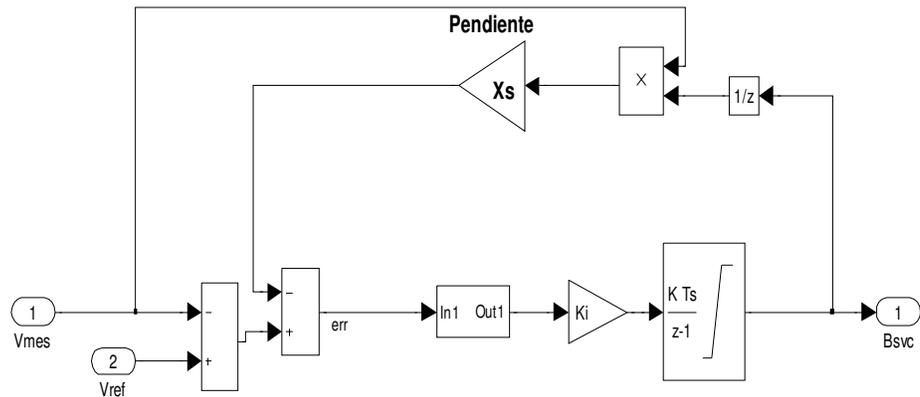


Figura 5.11. Programa Simulink del Controlador.

La señal $Vref$ es el voltaje de referencia en p.u. al cual se desea que el SVC regule y por último la señal $Vslope$ es la responsable de introducir una pendiente en la característica V-I del SVC.

Siguiendo con el análisis de la figura 4.17, el bloque Gc ganancia de controlador es donde se da entrada Ganancia de la Planta Gp , que consta de una ganancia Kn o que es la ganancia del sistema y el integrador debido a que es el controlador que arrojo el análisis por medio del factor K , que es método utilizado para hallar la ganancia de Controlador. El bloque llamado *Integral* es donde se realiza la integración de la señal $Verr$ y los

parámetros introducidos a este modelo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.7. Tabla de Limites de Susceptancia Bmax y Bmin.

Descripción	Valor/Unidad
Condición inicial:	0
Límite superior de saturación (B)	1.0698 p.u.
Límite inferior de saturación (B)	-1 p.u

Los límites superior e inferior de saturación están en p.u. y corresponden a la susceptancia máxima y mínima del SVC, los cuales se calculan en los anexos C y E respectivamente. La salida del regulador de voltaje es la señal de susceptancia *Bref* la cual es aplicada al bloque *Función de distribución* para su procesamiento. También en la figura 5.11 se muestra la implementación de la pendiente acorde al modelo 2 de la IEEE de la Figura 4.16.

La señal *Vref* es el voltaje de referencia en p.u. al cual se desea que el CEV regule y por último la señal *Vslope* es la responsable de introducir una pendiente en la característica V-I del SVC. El bloque Inicializa AVR que se muestra en la Figura 5.12 tiene la función de bloquear la acción del regulador de voltaje durante los primeros 150ms después de energizar el

SVC Esto es necesario ya que durante los primeros 150ms de energizado el SVC los filtros de 5ta y 7ma armónicas aportan 50 MVAR (los filtros se energizan al momento de cerrar el interruptor 95050), la función llamada Inicio TCR localizada dentro de la Función de distribución envía pulsos continuos de disparo a la válvula TCR para de esta manera generar reactivos inductivos para anular los reactivos capacitivos de los filtros de 5ta y 7ma armónicas y de esta manera energizar el CEV con cero MVAR.

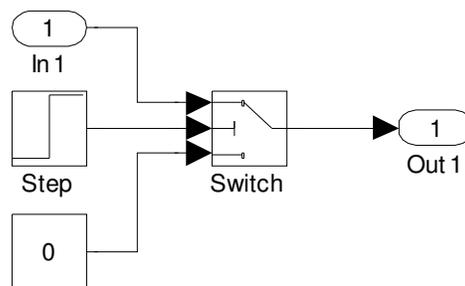


Figura 5.12. Bloque de Inicializa AVR.

5.2.3 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN

La función de distribución tiene como propósito convertir la señal *Bref* proveniente del regulador de voltaje a señales de encendido para la válvula de tiristores del TSC y para generar señales de control de ángulo de disparo para la válvula de tiristores del TCR. La figura 5.13 muestra el programa Simulink de la *Función de distribución*

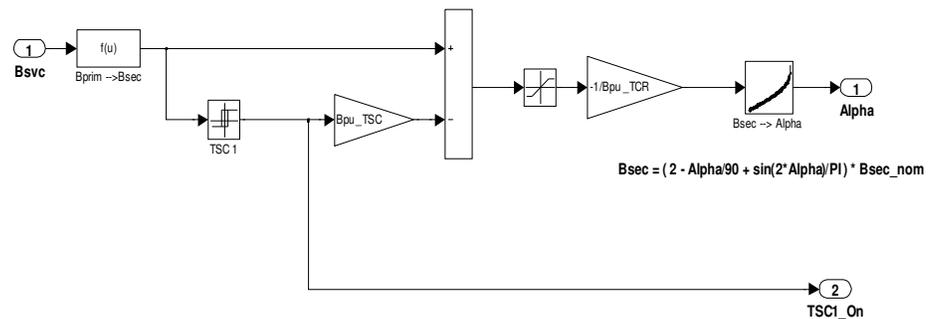


Figura 5.13. Programa Simulink del bloque Función de distribución.

En el bloque *Función de distribución* se llevan a cabo las siguientes tareas principales:

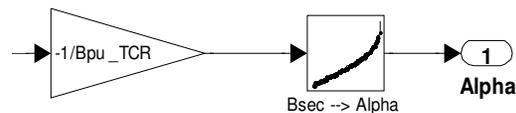
- 1.- Convertir la señal analógica *Bref* en el ángulo de disparo correspondiente para el control de la válvula TCR.
- 2.- Convertir la señal analógica *Bref* en señales digitales para el control de encendido y apagado de la válvula TSC.
- 3.- Control de la operación conjunta del TSC y el TCR.

5.2.4 CONVERTIDOR SUSCEPTANCIA-ÁNGULO

La figura 5.15 muestra la gráfica en Simulink del resultado de la simulación bloque *Convertidor Bsec-alfa* de la figura 5.14. Para realizar la conversión de la señal *Bref* al ángulo de disparo para el control de la válvula TCR se utiliza la ecuación 2.8

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \text{sen}2\alpha \right).$$

En la cual la susceptancia del TCR B_L está en función del ángulo de disparo aplicado a la válvula de tiristores. Es necesario poner la ecuación 2.8 de tal forma que B_L ya que el dato de entrada al bloque es la susceptancia. Debido a que la ecuación 2.8 es no lineal, se utilizó el método de aproximación polinomial a la curva generada por la ecuación 2.3 para así tener en función de B_L . Para ello se realizó el programa mostrado en el anexo B. La figura 5.15 muestra las curvas de la ecuación 2.8 (azul) y su aproximación polinomial (rojo) generadas por el programa del anexo B. En esta gráfica la variable independiente es B_L , por lo que en la aproximación polinomial se tiene que αB_L .



$$B_{sec} = (2 - \text{Alpha}/90 + \sin(2 * \text{Alpha})/\text{PI}) * B_{sec_nom}$$

Figura 5.14. Implementación en Simulink de Bloque Conversión de Susceptancia a alfa.

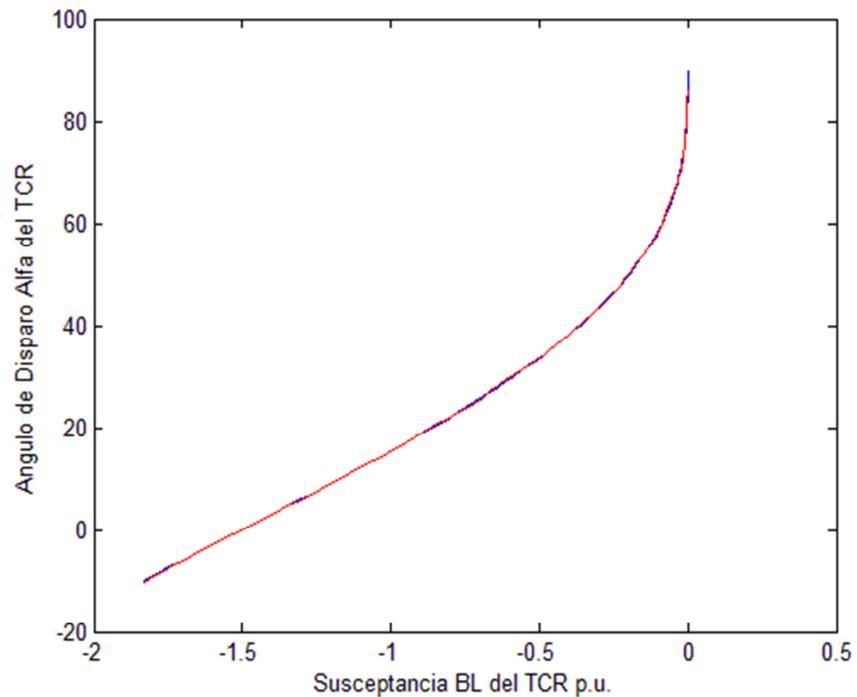


Figura 5.15. Curva de la Gráfica de Transformación del ángulo de disparo a Bsvc.

$F(u) = a_{21} \cdot u^{21}, a_{20} \cdot u^{20}, a_{19} \cdot u^{19}, a_{18} \cdot u^{18} \dots a_2 \cdot u^2, a_1 \cdot u, a_0$ (4.1). Donde u representa a la variable independiente B_L y $f(u)$ representa al ángulo de disparo. Los coeficientes a_{21} hasta a_0 del polinomio de la ecuación 4.1 son calculados por el programa del anexo B, por lo que es necesario correr primero este programa antes de ejecutar el programa Simulink del SVC. En la figura 5.15 el rango del ángulo de disparo va de 0° a 90° grados, donde para 0 es la máxima conducción y para 90° la conducción es cero. Se podría esperar que la variación de fuera

de 90° a 180° para máxima y mínima conducción respectivamente (en el caso de que la señal de voltaje fuera la referencia para), más el sistema de sincronía utiliza una señal con la cual está atrasada 90° con respecto al voltaje y es la que se utiliza para referenciar al ángulo de disparo.

5.2.5 CONVERTIDOR DE SUSCEPTANCIA EN SEÑAL-DIGITAL.

Para realizar la conversión de la señal de susceptancia a una señal digital para el encendido y apagado de la válvula TSC se utiliza en elemento *histéresis* de la figura 4.13. Cuando la señal 0.5 p.u. *Bref* se manda encender la válvula TSC, y para apagar la válvula TSC la señal 0.425 p.u. *Bref*, con lo cual se implementa la histéresis de encendido y apagado de la rama TSC.

Tabla 5.8. Tabla parámetros introducidos al modelo Simulink histéresis.

Descripción	Valor/Unidad
Switch on point	0.5
Switch off point	0.425
Output when on	1
Output when off	0
Enable zero crossing detection	si

5.2.6 CONTROL DE LA OPERACIÓN CONJUNTA TSC-TCR.

Como se explica en el capítulo 2 de esta tesis, para una regulación continua en todo el rango operativo del CEV, es de vital importancia que al momento de conexión y desconexión de la rama TSC se realice la compensación adecuada con la rama TCR. De la figura 4.13 los elementos que realizan esta compensación es la señal *TSC_on*. Cuando el TSC está apagado la señal *TSC_on* no está presente. En estas condiciones cuando la señal *Bref* va aumentando y al aproximarse a 0.5 p.u, con esto se está ordenando al TCR llevar su susceptancia a cero por lo que al ángulo de disparo va aumentando hasta llegar a 90 como se aprecia en la figura 4.21.

En el instante que se cumple que 0.5 p.u. *Bref* (encendido del TSC) la salida del bloque de histéresis *Switch_on* es 0.5 (susceptancia del TCR) por lo que el ángulo de disparo del TCR cambia bruscamente a 140 y compensa la conexión del TSC para una regulación continua. Para la desconexión del TSC como ya se explicó la susceptancia debe ser 0.425 p.u. *Bref*.

5.3 SIMULACIÓN

Una vez descrito el CEV bajo estudio, así como su implementación en el programa Simulink de Matlab, en este capítulo se presentan los

resultados obtenidos con el programa desarrollado. Para las simulaciones se consideraron aquellas condiciones o casos de operación de las cuales se cuenta con información gráfica de campo de la respuesta del SVC real, con lo cual se pueden validar los resultados obtenidos de las simulaciones. Los casos a considerar para las simulaciones son los siguientes:

Caso1 “Característica estática del SVC”, Caso 2 “Respuesta al escalón”, donde se consideran diferentes valores de escalón, ganancia y pendiente. Los resultados de estos casos se comparan con los obtenidos durante las pruebas de puesta en servicio.

5.3.1 SIMULACIÓN EL LAZO ABIERTO

Para evaluar la característica estática del modelo Simulink del SVC de la Figura 5.1 se introduce una rampa como voltaje de referencia V_{ref} como se muestra en la Figura 5.16.

Dicha rampa se ajusta para hacer variar gradualmente la susceptancia B_{ref} de salida del regulador de voltaje desde su mínimo valor -1 hasta su valor máximo de 1. La figura 5.17 muestra el resultado de dicha simulación.

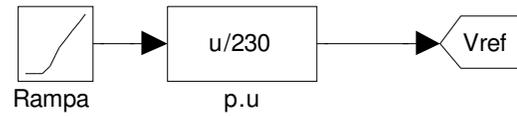


Figura 5.16. Aplicación de una rampa como voltaje de referencia de bloque controlador.

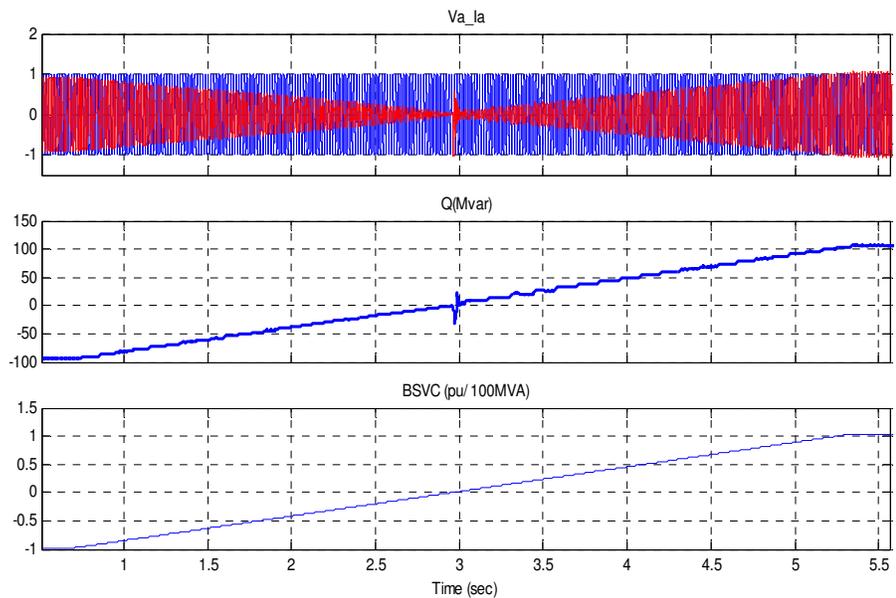


Figura 5.17. Gráfica de la simulación al aplicar una rampa como Vref. (a) Voltaje de resp, (b) Corriente ISVC del lado primario, (c) Susceptancia del SVC Bsvc, (d). Potencia Reactiva del Sistema.

Como podemos apreciar en la figura 5.17 (a) tenemos el voltaje de respuesta del lado del primario como resultado de la respuesta a la susceptancia B_{ref} del regulador de voltaje, la figura 5.17(c) tenemos la variación de B_{ref} desde -1 a 1, los

cuales con los valor límites del bloque integral B_{max} y B_{min} , mostrado en la figura 5.11.

La tabla 5.1 nos muestra los parámetros del Bloque SEP, utilizados en nuestra simulación como el Sistema Equivalente de Potencia, en la figura 5.17 (c) observamos la corriente del SVC en el lado del primario I_{svc} , la cual cuando va decreciendo se considera negativa, lo cual nos quiere decir que es inductiva con lo cual el SVC absorbe reactivos del SEP para bajar el voltaje, como se puede apreciar en la figura 5.17 (d) que es la Potencia Reactiva del SEP, de la misma manera en el rango de tiempo después de los 3 segundos tenemos la corriente se considera positiva es decir capacitiva con lo cual el SEP aporta reactivos para subir el voltaje lo cual lo podemos verificar en la figura 5. 17(d) donde podemos ver como entrega potencia reactiva el sistema.

5.3.2 SIMULACIÓN EN LAZO CERRADO

En este caso simularemos 2 pruebas para observar, la respuesta del sistema a diferentes valores del SEP, uno para una subida de tensión de alimentación (Swell) y por otra parte la respuesta del sistema en una caída de tensión de la alimentación (Sag). Graficaremos las curvas de voltaje y

corriente del SVC en p.u (V_{svc} , I_{svc}), Potencia Reactiva (Q), ángulo alfa y TSC_on.

5.3.3 SIMULACIÓN DE RESPUESTA A UN SWELL (SUBIDA DE TENSIÓN)

Para esta prueba ajustaremos el voltaje del SEP a 241.5KV, este ajuste se realiza el bloque SEP de la figura 5.1, el voltaje de referencia V_{ref} continua siendo a 1.0 p.u, este ajuste se realiza en el bloque Control en la entrada V_{ref} de la figura 5.1. El valor de Ganancia del controlador, y pendiente se ajustan en el bloque controlador figura 5.11 y son los son los siguientes.

Ganancia del Controlador $G_c=450$, Pendiente=1%.

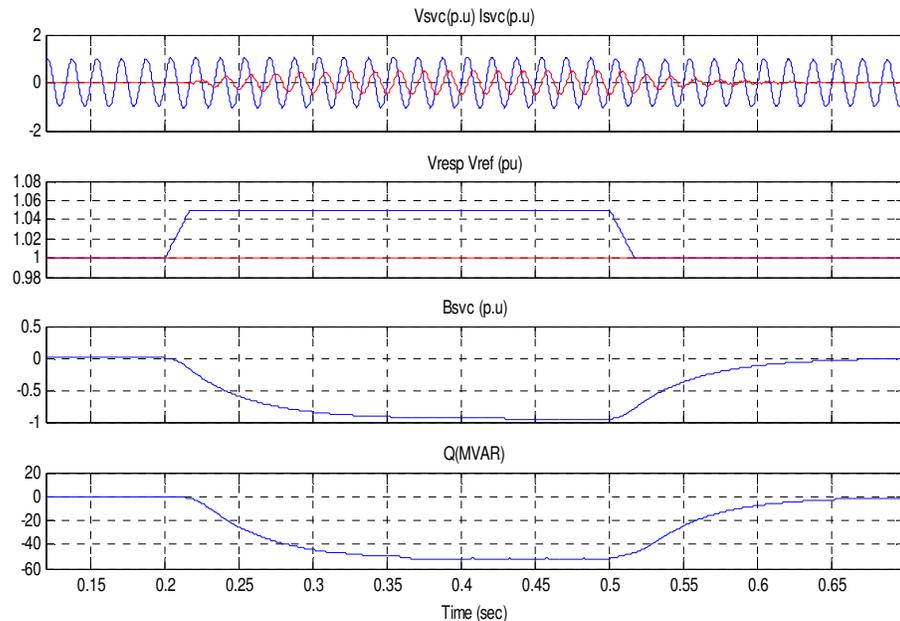


Figura 5.18. Gráficas de Simulación de la Prueba 1.

En la figura 5.18 Tenemos como resultado la simulación de la prueba 1 en Simulink, (a) Voltaje y Corriente en lado de alta del SVC en p.u, (b) Voltaje de Respuesta y de Referencia (V_{resp} , V_{ref}), (c) Susceptancia de salida B_{svc} del bloque Controlador en p.u la cual antes de la perturbación en la red tenía un valor aproximado de cero (d) Potencia Reactiva del sistema Q (MVAR) en la cual podemos notar que el SEP está absorbiendo Potencia Reactiva, en la gráfica (a) se observa como el voltaje adelante a la corriente del lado de alta, lo cual nos dice que nuestro sistema se está portando de una manera inductiva, como lo demostramos en los anexos C y D, y también podemos

comparar con el diagrama fasorial donde se puede apreciar que el voltaje adelanta a la corriente en 90° por lo que se encuentran en cuadratura el voltaje y la corriente.

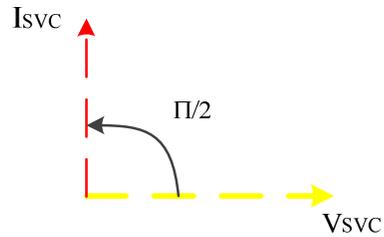


Figura 5.19. Diagrama Fasorial Respuesta de Simulación a un Swell.

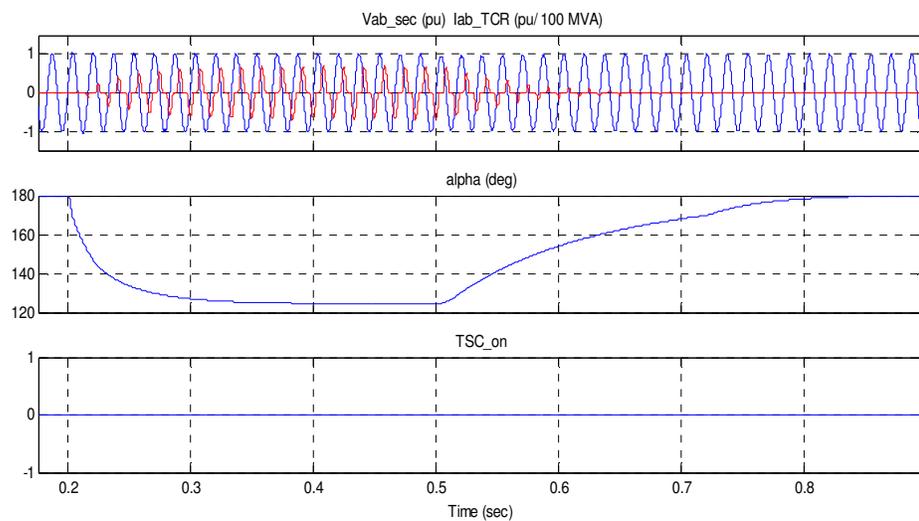


Figura 5.20. Resultado de la Corriente del TCR (I_{TCR}), alfa, TSC_on.

En la figura 5.20 (a) Podemos apreciar la corriente en el TCR y como esta varía en función del ángulo alfa de la figura 5.20 (b) que es resultado del bloque Función de Distribución hasta que se estabiliza el voltaje de respuesta del sistema de la figura

5.18, debido a que el SEP esta absorbiendo potencia reactiva la señal TSC_on no está presente en esta prueba.

5.3.4 SIMULACIÓN DE RESPUESTA A UN SAG (CAIDA DE TENSIÓN)

Para esta prueba simularemos una caída de tensión en el SEP (Sag) con lo cual analizaremos el comportamiento del sistema, ajustaremos el voltaje del SEP a 218.5KV, el voltaje de referencia Vref continua siendo a 1.0 p.u. El valor de Ganancia del controlador, y pendiente se ajustan en el bloque controlador figura 5.1 y son los son los siguientes.

Ganancia del Controlador $G_c=450$, Pendiente=1%.

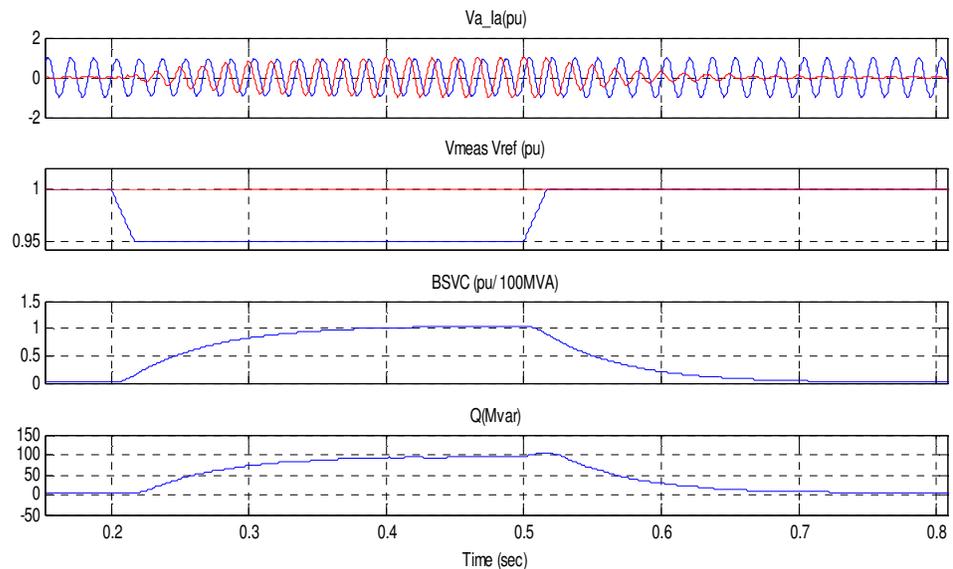


Figura 5.21. Gráficas de Simulación de la Prueba 1.

En la figura 5.21 Tenemos como resultado la simulación de la prueba 2 en Simulink, (a) Voltaje y Corriente en lado de alta del SVC en p.u, (b) Voltaje de Respuesta y de Referencia (V_{resp} , V_{ref}), (c) Susceptancia de salida B_{ref} del bloque Controlador en p.u la cual antes de la perturbación en la red tenía un valor aproximado de cero (d) Potencia Reactiva del sistema Q (MVAR) en la cual podemos notar que el SEP está entregando Potencia Reactiva, en la gráfica (a) se observa como la corriente adelanta al voltaje en el lado de alta, lo cual nos dice que nuestro sistema se está portando de una manera capacitiva, como se demuestra en el anexo B, y también podemos comparar con el diagrama fasorial donde se puede apreciar que el voltaje adelanta a la corriente en 90° por lo que se encuentran en cuadratura el voltaje y la corriente.

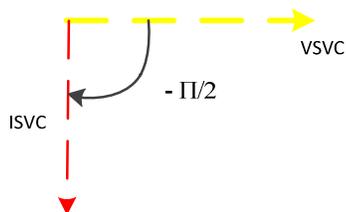


Figura 5.22. Diagrama Fasorial Respuesta de Simulación a un Sag.

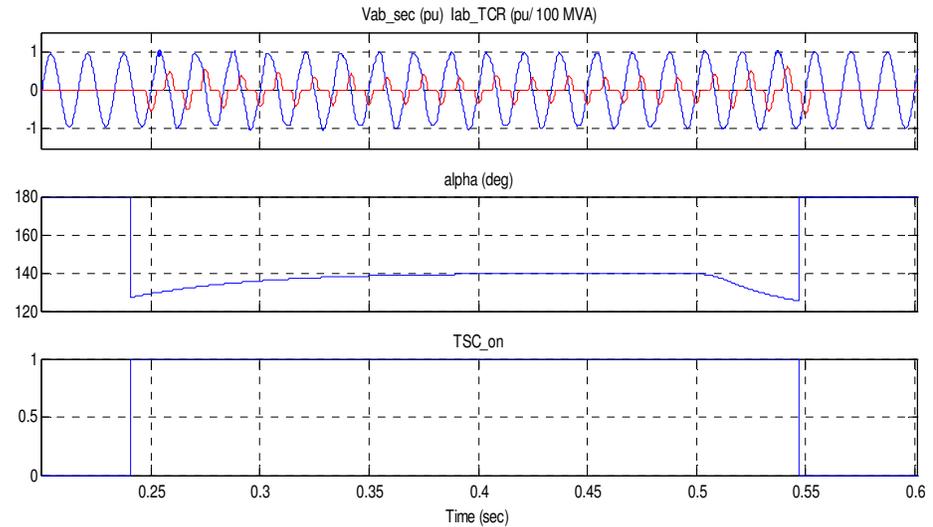


Figura 5.23. Resultado de la Corriente del TCR (I_{TCR}), alfa, TSC_on.

En la figura 5.23 (a) Podemos apreciar la corriente en el TCR y como está varía en función del ángulo alfa de la figura 5.23 (b) que es resultado del bloque Función de Distribución hasta que se estabiliza el voltaje de respuesta del sistema de la figura 5.23, de la misma manera ya que el SEP está entregando potencia reactiva la señal TSC_on esta presenta para tratar de mantener el voltaje dentro del rango de referencia.

CONCLUSIONES

1. De acorde al diseño de los elementos en el capítulo 3 de dimensionamiento de los equipos, en las figuras 3.10 y 3.11, se puede observar que el TCR tiene un Potencia Reactiva inductiva de 150 MVAR lo que contrastamos con nuestra simulación de 145MVAR, el TSC a su vez fue diseñado para entregar una potencia de 50 MVAR, entregando 45 MVAR en la simulación en Simulink/SimPowerSystem, en el caso de los armónicos, pudimos constatar mediante análisis de Fourier en Matlab/Simulink que una conexión del TCR en Delta elimina los armónicos de 3 orden, y mediante los filtros de 5 y 7to orden pudimos reducir la distorsión armónica total de $THD=8.02\%$ a $THD=2.8\%$, que era principalmente producidos por las armónicos de 5 y 7 orden, figuras 3.12, 3.14 respectivamente.

2. Podemos concluir que el sistema esta dentro de los rangos de Operación de los cuales fueron diseñados, como se menciona en el capítulo 3 el sistema fue diseñado para transmitir ± 100 MVAR, lo cual lo podemos observar en nuestra figura 5.17, En el capítulo de simulaciones, cumpliendo con las máximas capacidad de transmisión de potencia reactiva del sistema potencia, lo que también lo verificamos en los anexos B y C donde comprobamos analíticamente que el sistema transmite la capacidad diseñada.

3. En el capítulo 5 pudimos constatar la robustez de nuestro sistema mediante pruebas a nuestro sistema, como respuestas a caídas de tensión (Sag) y respuestas a subidas de tensión (Swell), figuras 5.18 y 5.20 el valor de referencia V_{ref} se mantenía de acorde a lo requerido, tal como podemos comprobarlo en el anexo A y D, donde se realizó el análisis teórico de las simulaciones a un Sag y un Swell, obteniendo los mismos valores de Potencia Reactiva que en la simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", IEEE Series on Power Engineering, Wiley InterScience, 2002.
- [2] Ned Mohan Tore M. Undeland, William P. Robbins, "POWER ELECTRONICS, Converters, Applications, and design", John Wiley & Sons, Inc., Segunda edición, 1995.
- [3] K.R. Padiyar: "Power System Dynamics: Stability and Control", 2nd edition, BS Publications, 2002.
- [4] R. Sastry Vedam Mulutukatla S. Sarma "POWER QUALITY VAR Compensation in Power Systems" Taylor & Francis Group, LLC 2009.
- [5] K.R. Padiyar: "FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution", New Age International (P) Ltd., Publishers 2007.
- [6] Mehmet Uzunoğlu Celal Kocatepe Recep Yumurtaci Kayhan Gülez "The Various Operating Condition, Harmonics Effects and Stability of Thyristor Controlled Reactor".

- [7] "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance" Simulation" IEEE Transaction on Power System, Vol.9 No.1 February 1994.
- [8] Juan Dixon, Luis Moran "Reactive Power Compensation Technologies, State of the Art Review".
- [9] "Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations" IEEE Transaction on Power System, Vol.6 No.1 May 1991.
- [10] Luis Coronel "Modelado del Compensador Estático de Vars de CUT para Análisis de Transitorios Electromagnéticos" Tesis de Maestría, México D.F 9 de Octubre del 2010.
- [11] Jaime Muñoz "Prototipo de Equipos FACTS de Baja Potencia" Tesis de Maestría, Santiago de Chile Septiembre del 2006.
- [12] H.Dean Venable, "The K-Factor; A new mathematical tool for stability analysis and synthesis". Fecha de consulta Abril del 2012.
- [13] M.Norozzian "Modeling of a SVC in a Power System Studies" ABB document number NR500-026E April 1996.
- [14] "P.Asare, T. Diez, A. Galli, E. O'Neill-Carillo, L. Robertson "An Overview of Flexible AV Transmission Systems" ECE Technical Reports, December 1994.

- [15] Nang Sabai, Hnin Nandar, "Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission System Using Static Var Compensator" World Academy of Science and Technology 2008.
- [16] D.Jovcic, N.Pahalawaththa, M.Zavahir, H.Hassan, "SVC Dynamic Analytical Model" 2001.
- [17] Mohammad Mohammadi, "Voltage Stability Analysis with Static Var Compensator (SVC) for Various Faults in Power System with and Without Power System Stabilizers (PSS)", July 25, 2011.
- [18] Ayyanar, Raja. , k-factor approach, EEE 572 Arizona State University, spring 2009.

ANEXOS

A. CALCULOS DE CORRIENTE, IMPEDANCIAS Y REACTANCIAS EN P.U.

El SVC tiene un rango de Operación de continua ± 100 MVAR y está conectado en derivación a la red de 230 KV, que está conectado a un transformador trifásico de una potencia de 200 MVA y un voltaje de transformación de 230kV/13.8KV. En la figura 3.1 se muestra un diagrama unifilar del SVC.

Cálculos:

$$\text{Voltaje primario} \quad U_{prim_b} = 230 \text{ KV}$$

$$\text{Voltaje del Secundario} \quad U_{sec_b} = 13.8 \text{ KV}$$

$$\text{Potencia Aparente} \quad S_b = 100 \text{ MVA}$$

Con estos valores fases se pueden calcular los valores base para la corriente, reactancia, susceptancia.

Corriente primaria e impedancia primaria:

$$I_{prim} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \times U_{prim_b}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 230 \text{ KV}} = 251 \text{ [A]} \quad (\text{A.1})$$

$$Z_{prim_b} = \frac{U_{prim_b}^2}{S_b} = \frac{230KV^2}{100 MVA} = 529 [\Omega] \quad (A.2)$$

Corrientes del secundario de las ramas conectadas en Estrella.

$$I_{sec_{bY}} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \times U_{sec_b}} = \frac{100 MVA}{\sqrt{3} \times 13.8KV} = 4184 [A] \quad (A.3)$$

Corriente del secundario de las ramas conectadas en Delta.

$$I_{sec_{b\Delta}} = \frac{S_b}{3 \times U_{sec_b}} = \frac{100 MVA}{3 \times 13.8KV} = 4184 [A] \quad (A.3)$$

La reactancia de los componentes conectados en Estrella.

$$Z_{sec_{bY}} = \frac{U_{sec_b}^2}{S_b} = \frac{13.8KV^2}{100 MVA} = 1.9044 [\Omega] \quad (A.4)$$

La susceptancia de los componentes de las ramas conectadas en estrella.

$$B_{sec_{bY}} = \frac{1}{1.9044} = 0.5251 [\Omega^{-1}] \quad (A.5)$$

La reactancia de los componentes conectados en Delta.

$$Z_{sec_{b\Delta}} = \frac{3 \times U_{sec_b}^2}{S_b} = \frac{3 \times 13.8KV^2}{100 MVA} = 5.7132 [\Omega] \quad (A.6)$$

La susceptancia de los componentes de las ramas conectadas en estrella.

$$B_{sec_{b\Delta}} = \frac{1}{5.7132} = 0.1750 [\Omega^{-1}] \quad (A.7)$$

Tabla A.1. Valores nominales de los elementos Principales del SVC.

TCR	$L = 9.59 \text{ mH}$	Tolerancia -2/+0%
TSC	$C = 615.4 \mu\text{F}$	Tolerancia 0/+5%
	$L = 0.598 \text{ mH}$	Tolerancia 0/+5%
Filtro de 5ta. Armónica	$C = 420.0 \mu\text{F}$	Tolerancia 0/+5%
	$L = 684 \text{ mH}$	Tolerancia 0/+4%
	$R = 26 \Omega$	Tolerancia $\pm 7.5\%$
Filtro de 7ma. Armónica	$C = 210.0 \mu\text{F}$	Tolerancia 0/+5%
	$L = 694 \text{ mH}$	Tolerancia 0/+4%
	$R = 36 \Omega$	Tolerancia $\pm 7.5\%$
Transformador	$e_{KN} = 15\%$,	Tolerancia $\pm 5\%$

Con los valores nominales de cada uno de los componentes del SVC, podemos calcular los valores de reactancias por unidad.

Reactancia de un inductor.

$$X_L = j\omega L; \text{ donde } \omega = 2\pi f$$

Así tenemos entonces la reactancia del TCR:

$$X_{TCR} = j2\pi(60)(959\text{mH}) = j3.615[\Omega] \quad (A.8)$$

En p.u dividimos el valor obtenido de la reactancia del TCR, con el valor de la reactancia del secundario en Delta:

$$X_{TCRnom} = \frac{X_{TCR}}{Z_{sec_{b\Delta}}} = \frac{3.615j}{5.1732j} = 0.6398[\Omega] \quad (A.9)$$

Para la reactancia del TSC se suman fasorialmente las reactancias del inductor en serie con el capacitor.

$$X_{TSC} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (A.10)$$

$$\begin{aligned} &= j2\pi(60)(0.598mH) - \frac{1}{j2\pi(60)(615.4\mu F)} \\ &= -j4.0849 [\Omega] \end{aligned} \quad (A.11)$$

En p.u dividimos el valor obtenido de la reactancia del TSC, con el valor de la reactancia del secundario en Estrella:

$$X_{TSCnom} = \frac{X_{TSC}}{Z_{sec_{bY}}} = \frac{-4.0949j}{1.9044j} = -2.1449[\Omega] \quad (A.13)$$

La reactancia de los filtros de 5ta y 7ma armónica se calcula como un inductor en paralelo con una resistencia y este conjunto en serie con un capacitor, Según se aprecia en la figura 3.9.

$$X_{F5} = \frac{j\omega L * R}{j\omega L * R} + \frac{1}{j\omega C} \quad (A.14)$$

$$X_{F5} = \frac{j2\pi * (0.684mH) * 26\Omega}{j2\pi * (0.684mH) * 26\Omega} + \frac{1}{j2\pi(60)(420\mu F)} \quad (A.15)$$

$$X_{F5} = 0.002557 - 6.05784j \cong -6.05784j \quad (A.16)$$

Para pasar el valor de la ecuación en p.u, dividimos con el resultado de la ecuación (A.5).

$$X_{F5nom} = \frac{-6.05784j}{1.9044j} = -3.1810 \quad (A.17)$$

El signo negativo de X_{F5nom} nos indica que a 60Hz el filtro se comporta como capacitivos.

De igual manera que se calculo la reactancia del 5to armónica, se calcula la reactancia del filtro de la 7ta armónica.

$$X_{F7} = \frac{j2\pi * (0.694mH) * 36\Omega}{j2\pi * (0.694mH) * 36\Omega} + \frac{1}{j2\pi(60)(210\mu F)} \quad (A.18)$$

$$X_{F7} = 0.001901 - 12.3697j \cong -12.3697j \quad (A.19)$$

$$X_{F7nom} = \frac{-12.369j}{1.9044j} = -6.4953 \quad (A.20)$$

$$X_{TSCnom} = \frac{-4.0849j}{1.9044j} = -2.1449 \quad (A.21)$$

La reactancia del transformador se calcula de la siguiente manera:

$$X_T = 0.15 \left(\frac{(230Kv)^2}{3 * 63MVA} \right) = 39.477\Omega \quad (A.22)$$

Para pasar la impedancia a p.u dividimos el resultado de la ecuación (A.22) para la ecuación (A.2).

$$X_{Tnom} = \frac{39.47}{529} = 39.477\Omega \quad (A.23)$$

Tabla A.2. Valores máximos y mínimos de Reactancia.

		Reactancia de Rama	
Elemento	$X_{nom}[p.u]$	$X_{max}[p.u]$	$X_{min}[p.u]$
		Transformador	$X_{Tnom} = 0.0750[p.u]$
TCR	$X_{TCRnom} = 0.6328[p.u]$	$X_{TCRmax} = 0.6333[p.u]$	$X_{TCRmin} = 0.6196[p.u]$
		TSC	$X_{TSCnom} = -2.1220[p.u]$
Filtro Armónica 5	$X_{FC5} = -3.1810[p.u]$	$X_{FC5max} = -3.1838[p.u]$	$X_{FC5min} = -3.0149[p.u]$
		Filtro Armónica 7ma	$X_{FC7nom} = -6.4953[p.u]$
Total Filtros	$X_{FC} = -2.1353[p.u]$	$X_{Tmax} = -2.1372[p.u]$	$X_{Tmin} = -2.2051[p.u]$

Tabla A.3. Valores máximos y mínimos de Reactancia.

		Susceptancia de Rama	
Elemento	$B_{nom}[p.u]$	$B_{max}[p.u]$	$B_{min}[p.u]$
		Transformador	$B_{Tnom} = -13.33[p.u]$
TCR	$B_{TCRnom} = -1.5803[p.u]$	$B_{TCRmax} = -1.6139[p.u]$	$B_{TCRmin} = -1.5789[p.u]$
		TSC	$B_{TSCnom} = 0.4662[p.u]$
Filtro Armónica 5	$B_{FC5} = 0.3144[p.u]$	$B_{FC5max} = 0.3317[p.u]$	$B_{FC5min} = 0.3141[p.u]$
		Filtro Armónica 7ma	$B_{FC7nom} = 0.1540[p.u]$
Total Filtros	$B_{FC} = 0.4683[p.u]$		

B. OPERACIÓN CAPACITIVA A 100 MVAR A 1.0 P.U. DE VOLTAJE PRIMARIO.

A continuación se calculan los valores para las susceptancias, reactancias, potencias y voltajes para este punto de operación.

Con los valores mínimos de susceptancia de la Tabla A.2, la susceptancia mínima del lado secundario B_2 es

$$B_2 = B_{Tscmin} + B_{FC5min} + B_{FC7min}$$

La reactancia del lado del secundario es

$$X_2 = \frac{-1}{B_2} = -1.0710 p.u$$

La impedancia total del lado del primario del SVC es

$$X_1 = X_2 + X_{Tmin} = -0.9998 \text{ p.u}$$

Y la susceptancia en el lado del primario del SVC es

$$B_1 = \frac{-1}{X_1} = 1.0002 \text{ p.u}$$

La potencia reactiva Q_1 generada por el SVC hacia el sistema del voltaje de 230 KV del voltaje nominal es

$$U_1 = 1.0 \text{ p.u}$$

$$Q_1 = U_1^2 B_1 = 1.0 \text{ p.u} = 100 \text{ MVAR Capacitivos}$$

C. OPERACIÓN INDUCTIVA A 100 MVAR A 1.0 P.U. DE VOLTAJE PRIMARIO.

A continuación se calculan los valores para las susceptancias, reactancias, potencias y voltajes para este punto de operación.

Con los valores mínimos de susceptancia de la Tabla A.2, la susceptancia mínima del lado secundario B_2 es

$$B_2 = B_{TCRmin} + B_{FC5max} = -1.0851 \text{ p.u}$$

La reactancia del lado del secundario es

$$X_2 = \frac{-1}{B_2} = -0.9216 \text{ p.u}$$

La impedancia total del lado del primario del SVC es

$$X_1 = X_2 + X_{Tmin} = -1.004 \text{ p.u}$$

Y la susceptancia en el lado del primario del SVC es

$$B_1 = \frac{-1}{X_1} = -0.9996 \text{ p.u}$$

La potencia reactiva Q_1 absorbida por el SVC hacia el sistema del voltaje de 230 KV del voltaje nominal es

$$U_1 = 1.0 \text{ p.u}$$

$$Q_1 = U_1^2 B_1 = 1.0 \text{ p.u} = 100 \text{ MVAR Capacitivos}$$

D. OPERACIÓN INDUCTIVA A 0.95 P.U. VOLTAJE DEL PRIMARIO.

A continuación se calculan los valores para las susceptancias, reactancias y potencias para este punto de operación de 0.95 p.u voltaje del primario, para un ángulo alfa igual a 120° , lo que remplazamos en la ecuación (2.8), la susceptancia en el lado del secundario B_2 es

$$B_2 = -45.24 [\Omega^{-1}]$$

Y la susceptancia en el lado del primario del SVC es igual a la suma de la susceptancia del secundario más la del transformador con lo cual tenemos

$$B_1 = B_2 + B_T = -45.24 - 13.33 = -58.57 [\Omega^{-1}]$$

Lo que dividimos para la potencia base, para obtener el valor en p.u con que tenemos

$$B_1 = -0.5857 p.u$$

La potencia reactiva Q_1 absorbida por el SVC hacia el sistema del voltaje de 230 KV del voltaje nominal es

$$U_1 = 0.95 p.u$$

$$Q_1 = U_1^2 B_1 = 0.5285 p.u = 52.85 \text{ MVAR Capacitivos}$$