

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

“Utilización de la compensación serie mediante los dispositivos FACTS”

Autor: Raunel Arturo Morales Rojas

Tutor: MSc Jorge Luis Portal Gallardo

Santa Clara

2013

"Año 55 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

La sabiduría suprema es tener sueños bastante grandes para no perderlos de vista mientras se persiguen

William Faulkner

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mis abuelos, mis padres, mi hermana y mi novia por ser mi inspiración en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la posibilidad de haber llegado a este momento.

Agradezco a toda mi familia por apoyarme a lo largo de mi vida y ayudarme a superar los retos que he tenido que enfrentar, en especial a:

Mi papa por ser el ejemplo de sacrificio y entrega ante cada situación

Mi mama porque no concibo mi vida sin su presencia, dedicación y amor.

A mi hermana por estar conmigo en todo momento y brindarme su apoyo.

A mi novia por haber sufrido junto a mí con cada obstáculo que tuve que afrontar para llegar a esta instancia y darme lo mejor de ella en todo momento.

También quisiera agradecer a mis amigos:

Javier, Tito por apoyarme y aconsejarme en todo momento

Luis Daniel, Harold, Yerson, Jenry, Yander, Mario que pasamos juntos estos cinco años de tanto sacrificio

A mi amiga Sandra que hizo lo imposible por ayudarme en la realización del trabajo

Amaris y Harold por brindarme su ayuda

A los profesores Gretter y Leyanis por ayudarme en todo cuanto pudieron.

A mi tutor por ayudarme en la confección del trabajo

En fin a todas las personas que de una manera u otra hicieron posible este sueño.

TAREA TECNICA

Con el propósito de darle cumplimiento a los objetivos trazados en esta tesis, se tuvo en cuenta una serie de tareas técnicas para la confección del informe, ellas fueron:

1. Identificación de referentes relacionados con los diferentes tipos de dispositivos FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna) utilizados.
2. Caracterización de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).
3. Caracterización del Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC).
4. Comprobación del funcionamiento del Compensador Serie Estático Sincrónico, mediante la herramienta Simulink del Matlab.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se describen los principales conceptos y clasificaciones de los Sistemas de Transmisión Flexible de Corriente Alterna (FACTS), utilizados para la compensación de la transmisión de corriente alterna en los sistemas eléctricos de potencia; y se dan a conocer sus principales ventajas. Se analiza la compensación serie, con su principio de funcionamiento y sus ventajas, también se realiza una descripción detallada del Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC) y sus principales componentes. Finalmente se simula un SSSC en un sistema eléctrico de potencia, en diferentes regímenes de operación, para analizar su eficacia en el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia eléctrica, con la ayuda de la herramienta Simulink, del Matlab.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TECNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Generalidades	4
1.1 Importancia de las Redes de Transmisión.....	4
1.2 Definiciones asociadas a los FACTS.....	6
1.3 Clasificación de los Dispositivos FACTS.....	8
1.4 Aplicación de los Dispositivos FACTS.....	20
1.5 Ubicación de los Dispositivos FACTS.....	21
1.6 Ventajas en la Utilización de Dispositivos FACTS.....	22
CAPÍTULO 2. Caracterización de un Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC)	24
2.1. Ventajas de Utilizar Compensadores Series en Sistemas de Transmisión.	25
2.2. Flujos de Potencia Activa y Reactiva entre dos Barras con un SSSC.	27
2.3. Topología General del SSSC.	29

2.4. Topología del Convertidor.....	30
2.5. Tipo de Modulación en Convertidores CD-AC.	31
2.6. Descripción del Dispositivo Semiconductor de Potencia IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).....	34
2.7. Convertidores Multinivel.....	36
CAPÍTULO 3. Simulación del Compensador Estático Sincrónico Serie.	40
3.1 Descripción del Circuito Utilizado para la Simulación.	40
3.2 Descripción General de los Bloques más Importantes Utilizados en la Simulación.....	43
3.2.1 Carga Dinámica Trifásica.	43
3.2.2 Voltaje de Referencia Paso (V_{qref}).....	44
3.2.3 Falla Trifásica.	45
3.2.4 Carga Trifásica RLC Paralela.	46
3.3 Compensador Sincrónico Serie.	47
3.4 Simulación y Resultados.....	50
CONCLUSIONES	56
Recomendaciones	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en el área de la electrónica de potencia ha permitido la optimización de diversos componentes dentro de los sistemas eléctricos, principalmente en el área del manejo de la energía. Esta tendencia ha dado lugar al surgimiento de nuevos problemas dentro de los sistemas de transmisión y distribución que implican un gran reto para los investigadores en el área. En los recientes años, la industria ha comenzado a demandar equipo de alta potencia; ahora se alcanzan los niveles de Megawatts (MW). Los dispositivos de control de corriente alterna en el rango de MW están usualmente conectados al sistema de transmisión. Actualmente son redes de gran tamaño y complejidad no solo en extensión territorial, sino en cantidad y diversidad de los elementos que los conforman. Debido a esto presentan un gran número de problemas operativos y de control, que se traducen en pérdidas económicas para las compañías suministradoras de servicio eléctrico.

Una alternativa que se ha consolidado para la solución a muchos problemas que actualmente enfrenta el sector eléctrico son los dispositivos FACTS (Sistemas de Transmisión Flexible de Corriente Alterna), capaces de controlar los parámetros que rigen la transferencia de potencia. Una de sus ventajas es la utilización de líneas de transmisión muy cerca a sus límites térmicos, incrementando los márgenes de estabilidad y control del flujo de potencia, lo que conlleva a una mejor utilización de los recursos disponibles permitiendo así mayor eficiencia. Por lo tanto, los dispositivos FACTS se instalan para mejorar la operación de estado estacionario y estado transitorio, ayudando al amortiguamiento de oscilaciones,

estabilidad de voltaje, estabilidad dinámica, compensación de reactivos, limitación de corrientes de falla y en problemas de resonancia subsincrónica.

Por las razones anteriormente expuestas se declara como **situación problemática** de este trabajo, la necesidad, de comprobar el funcionamiento, de un modelo de Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC), para su posible implementación.

Esto lleva a plantear como **problema científico**: ¿Cómo verificar la eficacia en el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia de un modelo de Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC)?

La investigación tiene como **objeto de estudio**: los Compensadores Serie Estático Sincrónico, por lo que se propone como **objetivo general**: Comprobar la eficacia en el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia de un modelo de Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC) mediante su simulación en la herramienta Simulink del Matlab. Para darle solución al objetivo general propuesto, se declaran los siguientes **objetivos específicos**:

- ❖ Identificar referentes relacionados con los diferentes tipos de dispositivos FACTS utilizados.
- ❖ Caracterizar los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS).
- ❖ Caracterizar el Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC).
- ❖ Comprobar el funcionamiento del Compensador Serie Estático Sincrónico, mediante la herramienta Simulink del Matlab.

El **campo de acción** de este trabajo lo constituyen los Sistemas de Transmisión Flexible de Corriente Alterna (FACTS). En el desarrollo de la investigación se da respuesta a las siguientes **interrogantes científicas**:

- ❖ ¿Qué referentes relacionados con los diferentes tipos de dispositivos FACTS utilizados existen?

-
- ❖ ¿Qué características tienen los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS)?
 - ❖ ¿Qué características tiene el Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC)?
 - ❖ ¿Cómo comprobar el funcionamiento del Compensador Serie Estático Sincrónico?

La memoria escrita está estructurada por una introducción y un desarrollo que abarca la realización de tres capítulos los cuales se relacionan con: conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

En el primer capítulo se presenta la definición del concepto de los FACTS, se exponen las características de los dispositivos desarrollados para las aplicaciones en sistemas de potencia, sus bondades que pueden contribuir a controlar las principales variables y su clasificación de acuerdo a la conexión que se utiliza para interconectarlos con los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). En el segundo capítulo se aborda la compensación serie con sus principales ventajas, se realiza un análisis de un SSSC en un SEP de dos barras con la finalidad de controlar la potencia transmitida, además de realizar un análisis de su topología para comprender su funcionamiento. En el tercer capítulo se realiza una simulación de un SSSC con el objetivo de demostrar su eficacia en el amortiguamiento de las oscilaciones de la potencia con la ayuda del Matlab y su herramienta Simulink.

CAPÍTULO 1. Generalidades

1.1 Importancia de las Redes de Transmisión.

La mayoría de los sistemas de suministro de energía eléctrica a nivel mundial se encuentran estrechamente interconectados, tanto internamente entre las diferentes empresas y regiones que lo integran, como externamente a través de conexiones internacionales. Esto se efectúa con finalidades fundamentalmente económicas para reducir los costos de electricidad y mejorar la confiabilidad de los sistemas de suministro de energía.

Las redes de interconexión permiten efectuar no solamente el suministro de energía sino también la comercialización de la misma entre las centrales generadoras y los centros de consumo, con la finalidad de minimizar la generación total de potencia y los costos asociados de combustible. Mediante este tipo de redes se pueden satisfacer demandas de diferentes características utilizando una gran variedad de recursos energéticos y precios de combustible, persiguiendo como objetivo la minimización de los costos con un nivel requerido de confiabilidad. Una menor capacidad de transmisión significa que se requerirá una mayor cantidad de recursos de generación sin considerar si el sistema está integrado por centrales generadoras grandes o pequeñas.

No se puede asegurar en forma real cuál es el balance óptimo entre la generación y la transmisión, a menos que los responsables de la planificación del sistema utilicen métodos avanzados de análisis que permiten integrar la planificación de la transmisión en escenarios que consideran en forma conjunta la planificación de transmisión y generación. Los costos de operación y mantenimiento de las líneas

de transmisión y las pérdidas asociadas, como también las dificultades encontradas en la construcción de nuevas líneas, limitan con frecuencia la capacidad de transmisión. Se ha podido observar en muchos casos que la optimización de la operación del sistema o bien de la distribución de reserva, desde un punto de vista económico, se encuentra restringida por la capacidad de la transmisión y esta situación por lo general no tiende a mejorar.

En un sistema eléctrico desregulado la disponibilidad de una red de transmisión de características malladas es vital para el ambiente competitivo de un servicio eléctrico confiable. Por otro lado, debido al incremento en la transferencia de potencia se origina una mayor complejidad en la operación de los sistemas eléctricos, disminuyendo su seguridad por la probabilidad en la ocurrencia de fallas. Esta situación puede conducir a la transmisión de grandes flujos de potencia con un control inadecuado, excesiva circulación de potencia reactiva en diferentes partes del sistema y en las interconexiones entre áreas y por lo tanto, no puede utilizarse el potencial disponible del sistema de transmisión.

En la actualidad los sistemas de potencia, por lo general, son controlados mecánicamente. Se observa además un extenso uso de microelectrónica, computadoras y comunicaciones de alta velocidad para efectuar el control y protección de los sistemas actuales de transmisión. Sin embargo, cuando las señales de operación son enviadas a los circuitos de potencia, donde se efectúa la acción final de control, los componentes de conexión son mecánicos y actúan por lo tanto con menor velocidad de control. Otro problema apreciado en los componentes mecánicos es que el control no puede efectuarse con elevada frecuencia, debido a que sufren un mayor desgaste comparado con los componentes estáticos.

En efecto, considerando la operación desde el punto de vista dinámico y en estado estacionario, se puede observar que los sistemas de potencia no presentan un control adecuado. Los profesionales encargados de la planificación y operación de los sistemas de potencia han aprendido a convivir con estas limitaciones utilizando

una variedad de técnicas ingeniosas para lograr una operación efectiva del sistema, a costa de proveer mayores márgenes de operación y redundancias. Esto representa una buena posibilidad para la utilización en forma prudente de la tecnología FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión de CA).

En los últimos años se ha observado la ubicación de grandes demandas en diferentes puntos de las redes de transmisión como consecuencia de las reglas del mercado en sistemas competitivos, las cuales presentan además un crecimiento continuo. Estos incrementos de demanda sobre la red de transmisión, la ausencia de una planificación de largo alcance y la necesidad de proveer un libre acceso a las empresas generadoras y consumidores, han originado tendencias hacia una menor seguridad de operación y reducida calidad de suministro.

La tecnología FACTS es esencial para aliviar en gran medida estas dificultades, posibilitando a las empresas de mayores servicios a través de sus posibilidades de transmisión y mejorando la confiabilidad del sistema. Es necesario destacar, sin embargo, que para muchos casos vinculados con la necesidad de la expansión de la capacidad se requiere la construcción de nuevas líneas o bien aumentar la capacidad de corriente y tensión de las líneas y corredores existentes.

1.2 Definiciones asociadas a los FACTS.

Los dispositivos FACTS son una tecnología basada en elementos de electrónica de potencia de alta velocidad y que pueden solucionar problemas que se presentan en los sistemas de potencia. Con ellos se puede obtener el mayor provecho de los sistemas de transmisión y ayudar a la estabilidad del sistema. También abren nuevas oportunidades de control de la potencia y el incremento de la capacidad disponible, ya que la posibilidad de controlar la corriente a través de una línea a un costo razonable, permite incrementar la capacidad de las líneas existentes. Esto se puede lograr debido a que estos dispositivos tienen la capacidad de modificar parámetros que actualmente restringen a los sistemas

eléctricos de potencia, permitiendo además operar las líneas de transmisión cerca de sus límites térmicos, lo que anteriormente no era posible sin violar las restricciones de seguridad del sistema.

Actualmente la tecnología de los FACTS se basa en la operación de fuentes convertidoras de voltaje o corriente, interconectadas en el lado de alta tensión de las redes eléctricas, con el propósito de realizar acciones de control sobre el sistema eléctrico [1]. En lo que respecta a los sistemas eléctricos de potencia, los dispositivos FACTS tienen un campo de acción amplio en las áreas de transmisión y distribución de energía.

En su expresión más general, el concepto de los FACTS está basado en la incorporación de dispositivos de electrónica de potencia en el lado de alta tensión de las redes eléctricas, con la idea de hacerlas electrónicamente controlables. Los FACTS surgieron en la década de los 80's, en el EPRI (Electrical Power Research Institute), y fueron desarrollados a nivel conceptual por Hingorani y Gyugyi [2]. La manera en la que los dispositivos son capaces de alterar las cantidades eléctricas, como magnitudes de voltaje, flujos de potencia etc., ha ido cambiando el diseño de los equipos del sistema de potencia, así como los procedimientos para la operación y planeación.

De acuerdo al IEEE, la definición de estos dispositivos es la siguiente [2]:

“Sistema de transmisión de corriente alterna que incorpora controladores estáticos basados en la electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia.”

La cualidad fundamental de los FACTS es que pueden contribuir a controlar las principales variables de los sistemas de potencia, como son:

- La impedancia de la línea de transmisión.
- La magnitud del voltaje en algún nodo del sistema.
- El ángulo de fase del nodo.

La modificación de los parámetros mencionados permite la utilización de los dispositivos FACTS ante eventualidades que requieren acciones de control específicas en el sistema de potencia. Entre las principales acciones de control que realizan se pueden mencionar las siguientes [3]:

- Control de los flujos de potencia.
- Regulación del voltaje en los nodos.
- Aumento en el margen de estabilidad transitoria.
- Amortiguamiento de oscilaciones torsionales.

Existen otras características de control que se pueden realizar mediante la variación de cualquiera de estos parámetros. La mayoría de tales acciones se implementan mediante un control adecuado de la magnitud y el ángulo de fase del voltaje generado por la fuente convertidora de voltaje utilizada.

Observe que los dispositivos FACTS actúan para cambiar la distribución de la potencia transferida en un sistema eléctrico determinado, pero no pueden suministrar o remover potencia activa al sistema. Además, los dispositivos FACTS pueden tener diferentes impactos en el sistema de potencia activa, por lo que es importante maximizar su uso, para lo cual se debe considerar cuidadosamente la localización geográfica junto con su impacto económico, con el fin de obtener los mejores resultados.

1.3 Clasificación de los Dispositivos FACTS.

Los dispositivos FACTS pueden maximizar las capacidades del sistema controlando una o múltiples variables del sistema, como pueden ser voltaje y flujos de potencia activa y reactiva [4]. Existen FACTS de operación en derivación para el control de la magnitud de voltaje nodal (local o remoto), como el TCR (Reactor Controlado por Tiristores), el SVC (Compensador Estático de Vars) y de última generación el STATCOM (Compensador Estático Sincrónico). Los FACTS de operación en serie como el TCSC (Capacitor Serie Controlado por Tiristores) y el

SSSC (Compensador Serie Estático Sincrónico) permiten el control del flujo de potencia activa.

Estos dispositivos permiten controlar la corriente en una línea a costo relativamente bajo comparado con lo que representa su construcción. Esto abre nuevas expectativas para incrementar la capacidad de las líneas ya existentes y/o controlar el flujo de potencia a través de ellas.

Los controladores FACTS tienen la posibilidad de controlar todas las características fundamentales de los sistemas de potencia: perfil de voltaje, flujos en líneas, impedancias serie y derivación y la topología de la red [5]. Las características de estos dispositivos permiten solucionar problemas de operación de estado estable del sistema, sin necesidad de realizar un redespacho de generación, de ahí que se diga que hacen más flexible a la red.

Los dispositivos FACTS pueden dividirse en tres grandes categorías, de acuerdo a la conexión que se utiliza para interconectarlos con el sistema de potencia. Considerando lo anterior se tienen las siguientes categorías:

1. **Controladores en serie.** Los controladores serie, como se ilustra en la Figura 1.1, pueden consistir en una impedancia variable como capacitor, reactor, etc., o una fuente variable de voltaje basada en electrónica de potencia a frecuencia fundamental, subsincrónica, armónica o una combinación de ellas.

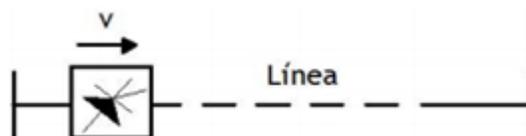


Figura 1.1. Esquema de un controlador serie.

El principio de operación de todos los controladores serie es inyectar un voltaje en serie con la línea. Una impedancia variable multiplicada por la corriente que fluye a través de ella representa un voltaje en serie inyectado a la línea. Mientras el voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador

serie solo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa. Dispositivos serie son:

- Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC).

Es un generador estático sincrónico operado sin una fuente de poder externa, al igual que un compensador serie. La salida de voltaje está en cuadratura y controlada independientemente de la corriente de línea, con el propósito de incrementar o decrementar la caída de voltaje reactivo a través de la línea. De esta forma, se controla la potencia eléctrica transmitida.

El SSSC puede incluir dispositivos de almacenamiento de energía para transitorios o dispositivos de absorción de energía para mejorar el comportamiento dinámico del sistema de potencia a través de compensación temporal adicional de potencia activa, para incrementar o decrementar momentáneamente la caída resistiva de voltaje a través de la línea, Figura 1.2.

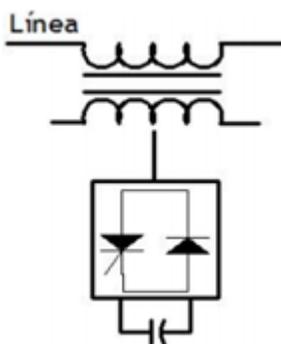


Figura 1.2. Diagrama esquemático del SSSC.

- Capacitor en Serie Controlado por Tiristores (TCSC).

Es un compensador de reactancia capacitiva que consiste de un banco de capacitores en serie, y en paralelo con un reactor controlado por tiristores a fin de proveer una reactancia capacitiva serie variable, Figura 1.3. El TCSC

está basado en tiristores sin capacidad de apagado. Este dispositivo es una alternativa para el SSSC y es un dispositivo FACTS muy importante.

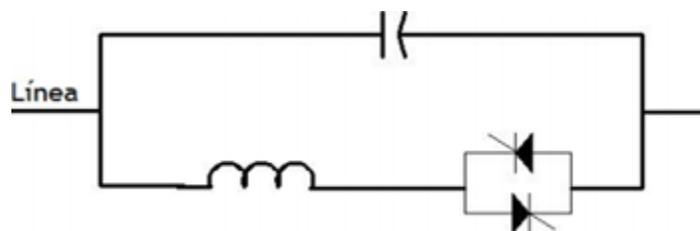


Figura 1.3. Diagrama esquemático del TCSC.

- Capacitor en Serie Conmutado por Tiristores (TSSC).

Es un compensador de reactancia capacitiva que consiste de un banco de capacitores en serie, y en paralelo con un reactor conmutado por tiristores para proveer control de reactancia capacitiva.

- Reactor Serie Controlado por Tiristores (TCSR).

Es un compensador de reactancia inductiva que consiste de un reactor serie en paralelo con un TCR, a fin de proveer una reactancia variable. En la Figura 1.4 se exhibe su diagrama esquemático. El último dispositivo es un complemento del TCSR, con la diferencia de que en el TSSR los tiristores no tienen control de ángulo de disparo.

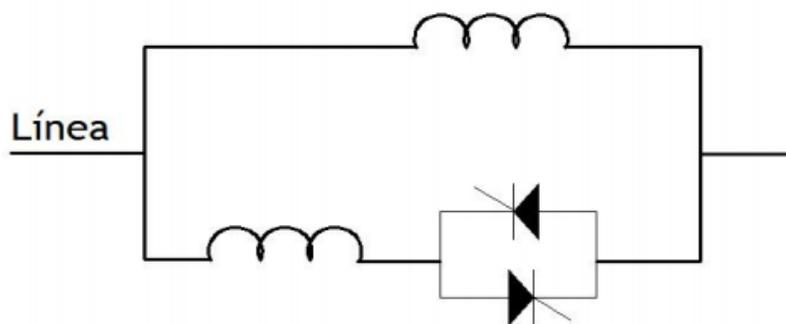


Figura 1.4. Diagrama esquemático del TCSR y del TSSR.

- Reactor en Serie Conmutado por Tiristores (TSSR).

Es un compensador de reactancia inductiva que consiste de un reactor conmutado por tiristores, a fin de proveer control de reactancia inductiva serie [6].

2. **Controladores en derivación.** Al igual que el controlador en serie, los controladores en derivación (Figura 1.5) pueden consistir de una impedancia variable, fuente variable de voltaje, o una combinación de ambas.

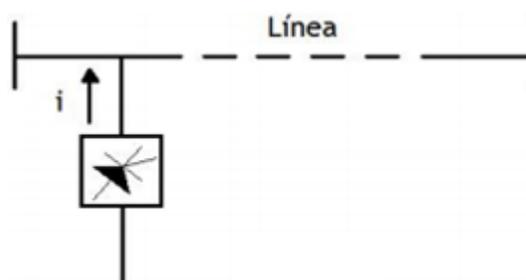


Figura 1.5. Esquema de un controlador paralelo.

El principio de operación de todos los controladores en derivación es inyectar corriente al sistema en el punto de conexión. Una impedancia variable conectada al voltaje de línea causa un flujo de corriente variable que representa una inyección de corriente a la línea. Mientras la corriente inyectada esté en cuadratura con el voltaje de línea, el controlador en derivación solo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa. Dispositivos que se conectan en derivación son:

- Generador Estático Sincrónico (SSG).

Es un convertidor estático de potencia autoconmutado, alimentado de una fuente de energía eléctrica apropiada y operado para producir un conjunto de voltajes de salida multifase ajustables. Puede ser acoplado a un sistema de potencia de CA con el propósito de intercambiar independientemente y de manera controlada potencia activa y reactiva (Figura 1.6).

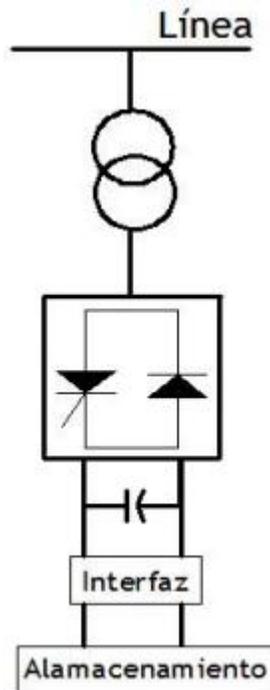


Figura 1.6. Diagrama esquemático de la unidad SSG.

El SSG es una combinación de STATCOM y cualquier fuente de energía para absorber o suministrar potencia. El término SSG, generaliza la conexión de cualquier fuente de energía incluyendo una batería, imán superconductor, capacitor de CD de gran almacenamiento, otro rectificador/inversor, etc.

- Compensador Estático de Reactivos (SVC).

Este dispositivo genera o absorbe potencia reactiva. La salida se ajusta para intercambiar corriente capacitiva o inductiva y así mantener o controlar parámetros específicos (típicamente el voltaje en una barra) del sistema eléctrico de potencia. En la Figura 1.7 se muestra el diagrama de este controlador.

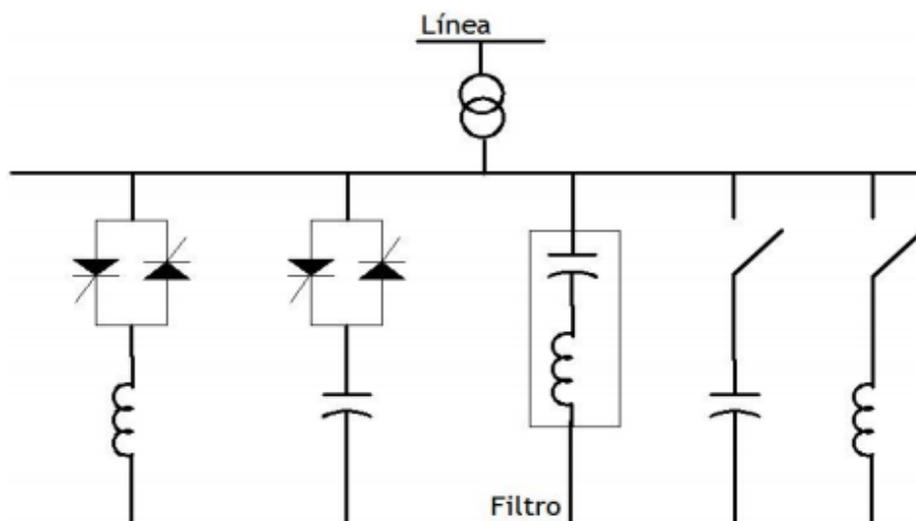


Figura 1.7. Diagrama esquemático del SVC.

El SVC se basa en tiristores convencionales, es decir, dispositivos sin capacidad de apagado. La diferencia que existe entre este dispositivo y un STATCOM radica en el principio básico de operación. Por otro lado, el SVC opera con base de TCR's y TSC's que hacen la función de una admitancia reactiva controlada conectada en derivación.

- Compensador Estático Sincrónico (STATCOM).

Es un compensador estático sincrónico operado como compensador estático de reactivos en derivación, en el que es posible controlar la corriente de salida capacitiva o inductiva de manera independiente del voltaje de CA del sistema.

El STATCOM es uno de los controladores FACTS más importantes. Puede estar basado en convertidores de corriente o de voltaje. La Figura 1.8 ilustra un diagrama simple de una línea con un STATCOM basado en un convertidor de voltaje y en un convertidor de corriente.

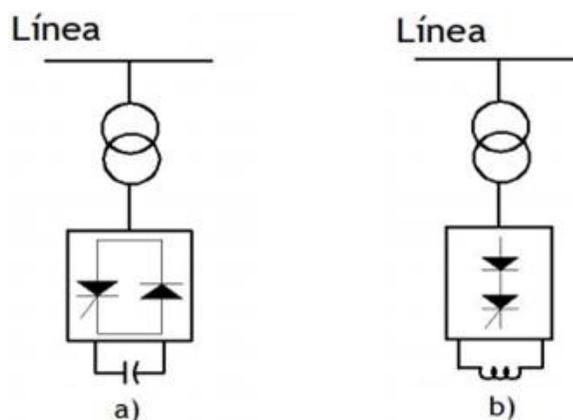


Figura 1.8. Diagrama esquemático del STATCOM, basado en convertidores de voltaje y corriente.

- Reactor Controlado por Tiristores (TCR).

Es un reactor controlado por tiristores que varía su reactancia efectiva de manera continua mediante control parcial de conducción de los tiristores.

El TCR es un subconjunto del SVC en el que el tiempo de conducción, y por lo tanto, la corriente en el reactor en derivación están controlados por un conmutador de tiristores con control de ángulo de disparo. En la Figura 1.9 se exhibe su diagrama esquemático.

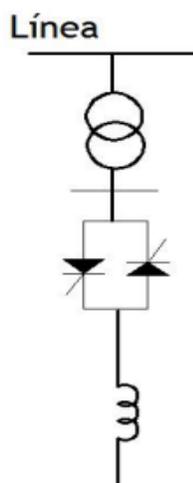


Figura 1.9. Diagrama esquemático del TCR.

- Capacitor Controlado por Tiristores (TSC).

Es un capacitor en derivación conmutado por tiristores, cuya reactancia efectiva varía de acuerdo a la operación de los tiristores de conducción, total o nula [6].

El TSC es también un subconjunto del SVC en el que los conmutadores de CA, basados en tiristores, se utilizan para conectar o desconectar unidades de capacitores en serie, para así alcanzar la potencia requerida por el sistema. A diferencia de los reactores en derivación, los capacitores en derivación no pueden conmutarse continuamente con un control del ángulo de disparo. En la Figura 1.10 se muestra su diagrama esquemático.

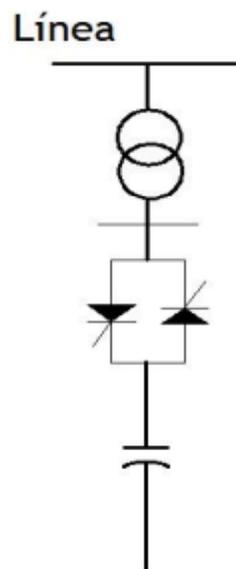


Figura 1.10. Diagrama esquemático del TSC.

3. **Controladores combinados serie-paralelo.** Estos dispositivos pueden ser una combinación de dispositivos en derivación y serie controlados de manera coordinada, o un controlador de flujo de potencia unificado con elementos serie y derivación, como se muestra en la Figura 1.11.

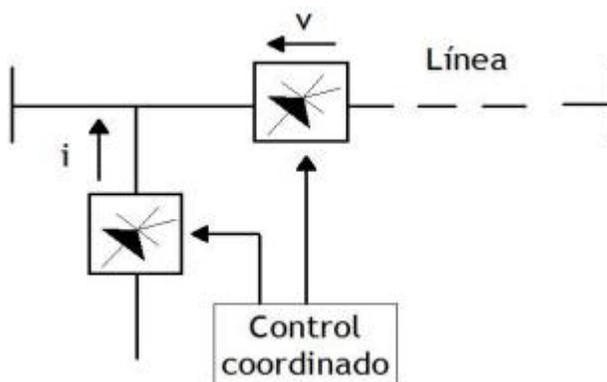


Figura 1.11. Diagrama esquemático de un controlador serie-derivación.

El principio de operación de los controladores serie-derivación es inyectar corriente al sistema con la parte en derivación del controlador y voltaje en serie con la línea utilizando la parte serie. Cuando los controladores serie y derivación son unificados puede haber un intercambio de potencia activa entre ellos a través del enlace de potencia. Ejemplo de estos controladores son:

- Controlador Unificado de Flujos de Potencia (UPFC).

Es una combinación del compensador estático sincrónico (STATCOM) y el compensador serie estático sincrónico (SSSC). Están acoplados a través de un enlace de CD, para permitir el flujo bidireccional de potencia activa entre las terminales serie de salida del SSSC y los terminales en derivación de salida del STATCOM. Son controlados para proveer compensación activa y reactiva serie sin una fuente de energía eléctrica externa.

El UPFC, a través de la inyección de voltaje en serie, es capaz de controlar el voltaje de línea, la impedancia y el ángulo, o alternativamente el flujo de potencia activa y reactiva de la línea. El UPFC puede también proporcionar compensación reactiva en derivación con control independiente.

El UPFC es un dispositivo capaz de controlar potencia activa y reactiva a través de la línea, así como voltaje de línea. Esto es debido a que este dispositivo tiene la capacidad de modificar los parámetros que determinan la

transferencia de potencia, como son: magnitudes de voltaje, impedancia de línea y ángulos de fase [7]. El diagrama esquemático del UPFC se ilustra en la Figura 1.12.

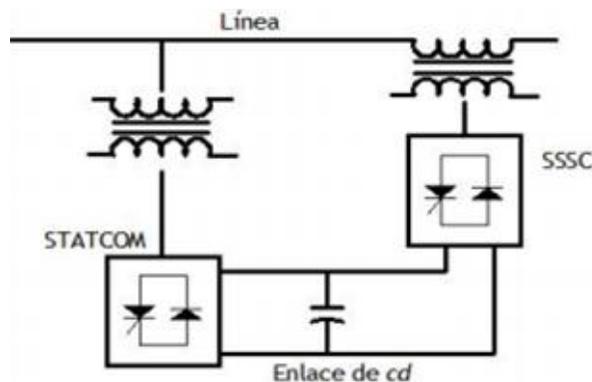


Figura 1.12. Diagrama esquemático del UPFC.

- Transformador cambiador de fase controlado por tiristores (TCPST).

Es un transformador cambiador de fase ajustado por tiristores para proporcionar un ángulo de fase que varía rápidamente.

Generalmente el cambio de fase se obtiene sumando un voltaje en cuadratura en serie con una de las fases de la línea. Este vector se obtiene de las otras dos fases a través de transformadores conectados en derivación. Para hacer variar este voltaje se utilizan diferentes configuraciones de dispositivos de electrónica de potencia. Una configuración capaz de invertir la polaridad del voltaje permite el cambio de fase en cualquier dirección. A este controlador se le conoce también como regulador de ángulo de fase controlado por tiristores. En la Figura 1.13 se muestra su diagrama esquemático.

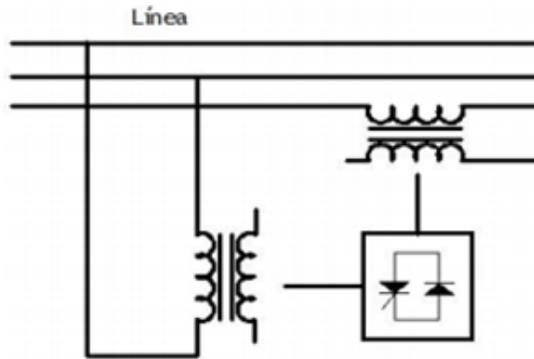


Figura 1.13. Diagrama esquemático del TCPST.

Un controlador serie tiene su impacto sobre el voltaje de línea y por consiguiente directamente sobre el flujo de corriente y potencia a través de la línea. Por otro lado, si el propósito de utilizar un dispositivo es controlar el flujo de corriente/potencia y el amortiguamiento de oscilaciones, el controlador serie es más poderoso que el controlador en derivación. Esto se debe a que permite la posibilidad de modificar la impedancia serie de la línea de transmisión, que es uno de los parámetros que determinan el flujo de corriente/potencia [5].

De igual forma el controlador en derivación puede verse como una fuente de corriente que inyecta corriente a la línea. De esta manera un dispositivo en derivación es una forma de controlar el voltaje en y alrededor del punto de conexión a través de la inyección de corriente reactiva en atraso o en adelanto. Puede también darse una combinación de corriente activa y reactiva para un control más efectivo de voltaje y el amortiguamiento de oscilaciones de voltaje.

En un controlador serie es necesario mantener el voltaje de línea dentro de un rango especificado; durante las fluctuaciones de voltaje son en gran medida una consecuencia de la caída del voltaje en la impedancia serie de las líneas, transformadores y generadores. Así, si se utiliza un controlador FACTS en serie se puede mejorar el perfil de voltaje, pero a un costo muy elevado. Un controlador en derivación es mucho más efectivo para mantener el perfil de voltaje requerido en una subestación. Una de las ventajas del controlador en derivación es que se abastece al nodo independientemente de las líneas conectadas a él.

Para resolver un problema que involucra controladores serie se podría requerir, aunque no necesariamente, un controlador para cada una de las líneas conectadas a la subestación. No obstante, esto no implica una razón decisiva para elegir un controlador en derivación, ya que el nivel de potencia requerido en un controlador serie es pequeño comparado con el de uno en derivación. De cualquier manera el dispositivo en derivación no puede controlar el flujo de potencia sobre las líneas.

Se sugiere diseñar los controladores serie para operar durante contingencias, sobrecargas dinámicas y corrientes de corto circuito. Estos dispositivos se pueden proteger mediante supresores de picos, o a través de dispositivos de estado sólido que inhiben su operación cuando la corriente de falla es demasiado grande. Se puede prever que la combinación de controladores serie y derivación puede ofrecer las ventajas de cada uno de ellos, como lo son control de flujo de corriente/potencia de línea y el control de voltaje nodal.

1.4 Aplicación de los Dispositivos FACTS.

Una de las primeras aplicaciones de un SVC para controlar el voltaje en un sistema de transmisión se evidencia en Estados Unidos. Se instala un reactor controlado por tiristores (TCR) en la subestación Victory Hill en Nebraska, con el propósito de controlar variaciones de voltaje, tanto en condiciones de estado estable como ante contingencias.

Con el avance de la electrónica de potencia, las ventajas técnicas de los equipos de control tomaron un gran impulso, dando lugar a la aparición de los SVC operados sobre la base de TCR's y TSC's que hacen la función de una admitancia reactiva controlada conectada en derivación. Una aplicación de este esquema se realizó en el sistema ESCOM en Sudáfrica, para la corrección de desbalances de voltaje en una red de 132 K.V, donde los desbalances eran causados por cargas asimétricas de trenes

Se tiene en los Estados Unidos la aplicación del Capacitor Serie Controlado por Tiristores (TCSC) el cual consiste de un capacitor fijo derivado por reactor controlado por tiristores, proporcionando una compensación serie capacitiva controlada. Este equipo se instaló en una línea de 300 Km., de 230 Kv en la subestación Kayenta en Arizona. La finalidad de esta aplicación fue la de incrementar la transferencia de potencia de la línea en cuestión

Los cables submarinos tienen una capacitancia grande, por lo tanto los cables de CA requieren una corriente de carga grande (potencia reactiva), en una magnitud de orden mayor a la de las líneas aéreas. La corriente de carga que fluye en los cables puede ser reducida solamente conectando inductores en derivación con el cable en intervalos de 15-20 kilómetros. Es por ello que se ha utilizado la tecnología FACTS en esta área por ejemplo, el Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC), que proporciona una mejora controlando la magnitud de los voltajes para mantenerlos idénticos. De esta manera, la longitud útil del cable desde el punto de vista de la corriente de carga puede ser reducida a la mitad. Este acercamiento puede proporcionar una solución económica para las distancias submarinas moderadas hasta cerca de 100 kilómetros. [8].

1.5 Ubicación de los Dispositivos FACTS.

Existen tres factores a considerar cuando se ha tomado la decisión de instalar un dispositivo FACTS:

- El tipo de dispositivo.
- La capacidad requerida.
- La ubicación que optimice el funcionamiento del dispositivo.

De estos factores, el último es de gran importancia, ya que la ubicación de los FACTS depende del efecto deseado y de las características propias del sistema. Por ejemplo, si se desea evitar el flujo en anillo, primero se tiene que identificar el anillo y después se debe ubicar el dispositivo en una de las líneas de transmisión de éste para forzar el flujo en la manera deseada. La diferencia entre una ruta

directa y la determinada por la red se denomina "flujo en anillo", que se caracteriza por una circulación de potencia que disminuye la capacidad disponible de la línea. Ahora bien, si se desea mejorar la operación económica del sistema al incrementar la capacidad de transmisión de potencia, el dispositivo FACTS se puede ubicar en una línea subutilizada, aumentando el flujo a través de ella, o bien, colocarlo en la línea más cargada para limitar el flujo por la misma, permitiendo mayor flujo por el resto de sistema.

Otro aspecto que hay que tomar en cuenta es la selección de las señales de retroalimentación para estos dispositivos, ya que ésta información es de vital importancia para el diseño de estabilizadores basados en dispositivos FACTS. El criterio para la selección ha sido la capacidad máxima de los estabilizadores para amortiguar las oscilaciones en el sistema de potencia. Sin embargo, para un buen diseño de los estabilizadores, además de la máxima eficiencia de los mismos, un factor relevante es la robustez de los estabilizadores a las condiciones de operación del sistema de potencia. Esto significa que en la etapa de selección de la localización y las señales de retroalimentación se debe examinar no sólo la efectividad de los estabilizadores en condiciones típicas de operación, sino también su robustez sobre otras condiciones de operación [9].

1.6 Ventajas en la Utilización de Dispositivos FACTS.

Los FACTS se basan en la idea de mejorar la utilización de las líneas de transmisión existentes, aumentando su capacidad mediante el control de los parámetros del sistema mediante dispositivos electrónicos [10].

Las siguientes características resumen las principales ventajas que representa el uso de dispositivos FACTS:

- Control del flujo de potencia. El control del flujo de potencia puede realizarse, de acuerdo a las necesidades de los proveedores, para obtener flujos óptimos, atravesar condiciones de emergencia o una combinación de ambos.
- Incrementar la cargabilidad de las líneas al aumentar su capacidad térmica. Esto se

puede lograr superando otras limitaciones y compartiendo la potencia de las líneas según su capacidad.

- Se puede operar con niveles de carga seguros (sin sobrecarga) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Es también importante observar que la capacidad térmica de línea varía por un margen muy grande dependiendo de las condiciones ambientales.
- Incrementa la seguridad del sistema a través del incremento de los límites de estabilidad transitoria, limitando las corrientes de corto circuito y sobrecargas.
- Proporciona seguridad en las conexiones a través de las líneas de enlace entre empresas y entre líneas vecinas, de tal modo que disminuyan los requisitos de reserva total de la generación en ambos lados.
- Provee una gran flexibilidad en los sitios de nueva generación.
- Mejora en las líneas.
- Reduce el flujo de potencia reactiva.
- Reduce los flujos en lazo.
- Amortigua las oscilaciones del sistema de potencia que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.

Una propiedad única de los FACTS es la gran flexibilidad que presentan en los tres estados operativos del sistema de potencia: pre falla, falla y post falla. La capacidad para controlar transitorios y para impactar rápida y significativamente el estado de post falla los hace sumamente atractivos [11].

CAPÍTULO 2. Caracterización de un Compensador Serie Estático Sincrónico (SSSC)

Los compensadores en serie pueden ser representados como una impedancia variable, como un condensador, un reactor o un convertidor estático con frecuencia fundamental, subsincrónica y armónico, como se muestra en la Figura 2.1.

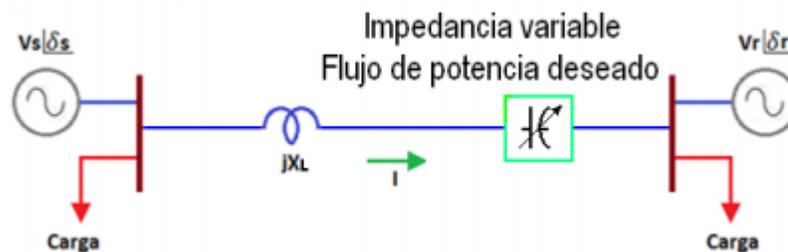


Figura 2.1. Representación general de un compensador serie.

En principio, estos dispositivos inyectan un voltaje en serie con la línea; ya que una impedancia variable en serie multiplicada por el flujo de corriente representa un voltaje serie inyectado a la línea [12]. Mientras que el voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el compensador serie solo absorbe o inyecta potencia reactiva, cualquier otra combinación de fase involucrará también el manejo de potencia activa. Así, el efecto fundamental de este tipo de equipos es controlar la corriente en la línea de transmisión.

2.1. Ventajas de Utilizar Compensadores Series en Sistemas de Transmisión.

Un transitorio es un evento no deseado en el cual el voltaje se eleva a magnitudes muy altas por un instante de tiempo. Por lo general el tiempo de duración de un transitorio de voltaje es menor a la mitad de un ciclo, por lo que se mide en nanosegundos [13].

La idea operativa fundamental de un compensador serie es afectar alguno de los parámetros de la ecuación de transferencia de potencia. Estos dispositivos pueden influenciar uno o más de esos parámetros y de este modo influenciar el flujo de potencia.

En términos generales, estos dispositivos pueden generar los siguientes impactos sobre el sistema de potencia en el que se insertan:

- Pueden proporcionar un control rápido y continuo del flujo de potencia en los sistemas de transmisión controlando los voltajes en los nodos críticos, cambiando la impedancia de las líneas de transmisión o controlando el ángulo de fase al final de las líneas.
- Permiten el incremento de la cargabilidad de las líneas de transmisión a niveles cercanos a los límites térmicos. Por ello pueden aumentar la transferencia de potencia a través de sistemas de transmisión que tienen restricciones en la actualidad, optimizando el uso de la infraestructura disponible y suministrando potencia a bajos costos a un gran número de consumidores.
- Permiten la disminución de las oscilaciones que pueden dañar equipos y/o limitar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica. Por esto pueden ser aplicados para el manejo de la congestión e incremento de la estabilidad.

- Permiten al sistema mayor habilidad para transferir potencia eléctrica entre áreas controladas, de forma que los márgenes de generación de reserva se reduzcan de 18% a 15 % [14].
- Permiten la prevención de apagones en cascada al evitar los efectos de fallas y de equipos dañados.
- Permiten disminución de pérdidas de potencia activa, menores costos de producción de energía y cumplimiento de requerimientos contractuales mediante el control de los flujos de potencia en la red.

Es importante notar que, el aprovechamiento de las ventajas de los sistemas de comunicación actuales en las redes de potencia y las altas velocidades de respuesta de los tiristores que conforman la dinámica de los compensadores, son esenciales para que estos dispositivos puedan operar sobre los flujos de potencia cuando se quieren resolver problemas de inestabilidad en el SEP.

Por otro lado, es un factor crucial seleccionar la mejor solución desde los puntos de vista técnico y económico, dado que hay una gran variedad de dispositivos que pueden ser utilizados para estos efectos.

A continuación, en la Figura 2.2, se muestra un perfil de tensión para un sistema sencillo de transmisión de electricidad.

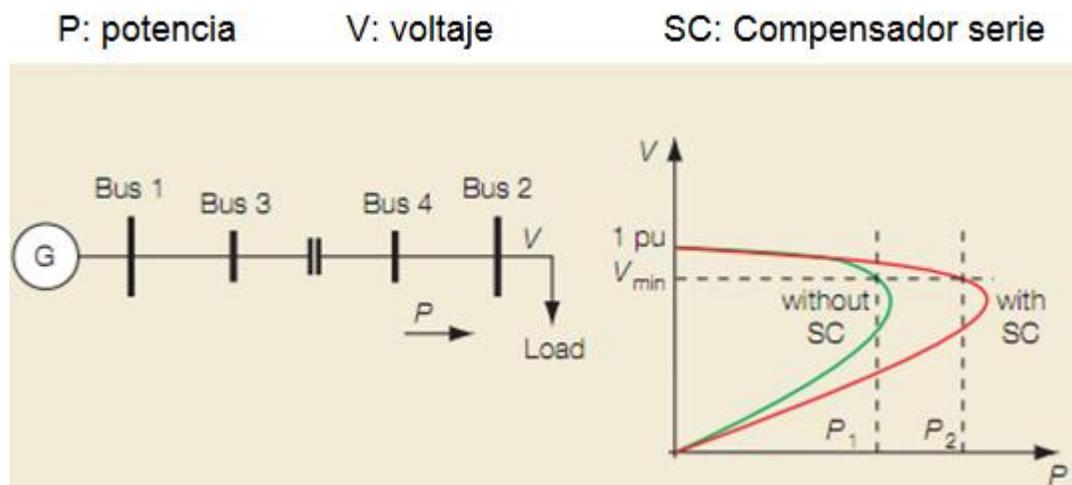


Figura 2.2. Perfil de tensión para un sistema sencillo de transmisión de electricidad.

2.2. Flujos de Potencia Activa y Reactiva entre dos Barras con un SSSC.

Cuando se compensa una línea de transmisión su topología cambia y por ende las leyes de Kirchoff de corriente y voltaje son diferentes y necesitan ser analizadas como tal.

En la figura 2.3 se muestra un SEP (Sistema Eléctrico de Potencia) con dos barras, se ha conectado a la línea un SSSC con la finalidad de regular la potencia transmitida y mitigar disturbios o perturbaciones ocasionadas por inestabilidad angular y de voltaje. Un compensador serie ideal puede representarse como una fuente de voltaje conectada en la línea de transmisión.

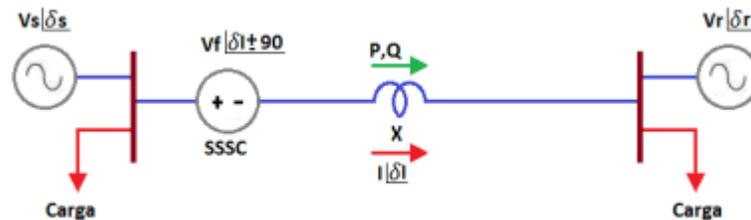


Figura 2.3. Compensador serie en una línea de transmisión corta.

Simbología

V_r : Voltaje en la barra r.

V_s : Voltaje en la barra s.

X_{comp} : Reactancia de compensación

X : Reactancia de la línea de transmisión

δ_s : Angulo del voltaje de la barra s.

δ_r : Angulo del voltaje de la barra r.

K : Factor de grado de compensación.

Aplicando la ley de las mallas de Kirchoff en el circuito de la Figura 2.3 se tiene la siguiente igualdad:

$$(V_s \angle \delta_s) - (V_f \angle \delta(i \pm 90)) - (V_r \angle \delta_r) = jX * I \quad (2.1)$$

El voltaje serie inyectado V_f , puede representarse por una impedancia reactiva, si éste está en cuadratura con la corriente [9].

$$V_f \angle \delta(i \pm 90) = jX * I * K \quad (2.2)$$

Remplazando (2.2) en (2.1) y agrupando las impedancias, X se tiene:

$$\begin{aligned} (V_s \angle \delta_s) - X * I * K - (V_r \angle \delta_r) &= jX * I \\ (V_s \angle \delta_s) - (V_r \angle \delta_r) &= jX * I + K + jX * I \\ (V_s \angle \delta_s) - (V_r \angle \delta_r) &= jX * I * (1 + K) \end{aligned} \quad (2.3)$$

La corriente de la línea bajo esta condición será [9]:

$$I = \frac{(V_s \angle \delta_s) - (V_r \angle \delta_r)}{jX(1 + K)}; K = \frac{X_{comp}}{X} \quad (2.4)$$

De esta expresión se observa que la impedancia total equivalente de la línea de transmisión se modifica sumando o restando la impedancia de compensación a la impedancia de la línea. El factor K es el grado de compensación serie. El valor absoluto de K varía entre 0 y 1, y su signo es negativo para compensación capacitiva y positivo para compensación inductiva [14].

Observando el análisis realizado, la ecuación de transferencia de potencia activa en la línea de transmisión cambiaría de la siguiente manera [14]:

$$P_s = \frac{V_s * V_r * \sin(\delta)}{X(1 + K)} \quad (2.5)$$

Y la potencia reactiva suministrada por el compensador quedará definida por [14]:

$$\begin{aligned} Q_s &= I^2 * X_{comp} \\ Q_s &= [V_s^2 + V_r^2 + 2 * V_s * V_r * \cos(\delta)] * \frac{K}{X(1 + k)^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

De las ecuaciones (2.5) y (2.6) se observa que para un determinado valor de desfasaje entre las barras δ , la variación del grado de compensación serie permite incrementar el valor de la potencia activa transferida a través de la línea, mediante el incremento de la potencia reactiva inyectada por el dispositivo serie [14].

2.3. Topología General del SSSC.

El SSSC (Figura 2.4) está conformado por los siguientes elementos [15]:

- Fuente DC.
- Convertidor DC-AC.
- Filtros.
- Transformador de acoplamiento.
- Sistema de control.

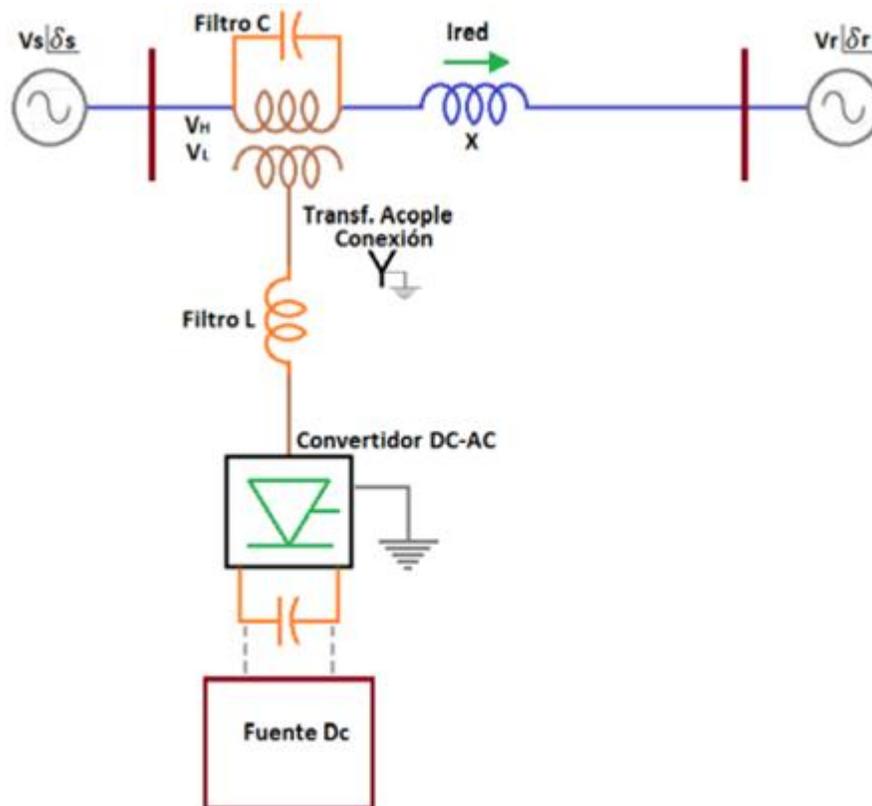


Figura 2.4. Estructura en bloques del SSSC.

A continuación se describen las diferentes partes que constituyen el compensador SSSC:

La **fuentes DC** es la encargada de suministrar el voltaje de corriente directa, V_{DC} , al convertidor. Este voltaje es convertido en una señal pulsante en diferentes niveles, por acción de la conmutación que exista debido a la comparación de la onda moduladora con las portadoras.

El **convertidor DC-AC** es el más relevante de todos los elementos del SSSC. Basado en electrónica de potencia cumple la función de abrir y cerrar los interruptores de modo secuencial. Se basa en niveles altos y bajos de voltaje con los que entrega una serie de pulsos que en promedio dan origen a una señal sinusoidal de 60Hz. Dado que el convertidor cumple una importante tarea, el siguiente apartado es exclusivamente para detallar su funcionamiento y topología.

Los **filtros** se encargan de eliminar los armónicos de baja frecuencia.

El **transformador de acoplamiento** es un elevador de potencial que se encarga de conectar el SSSC a la red y permite obtener el valor nominal de voltaje de compensación en el lado de alta. Sus terminales en el lado de baja están conectados en estrella con neutro aterrizado y los terminales del lado de alta se encuentran en serie con la línea de transmisión.

El **sistema de control** es diseñado para comparar valores de referencia de voltaje y corriente con valores obtenidos de la red en tiempo real. Así, cuando exista un disturbio los parámetros eléctricos mencionados cambian y el sistema de control comienza el proceso de corregir el error, llevando su valor hasta cero con un comportamiento dinámico rápido y eficaz.

2.4. Topología del Convertidor.

El convertidor comúnmente utilizado es el denominado Fuente Convertidor de Voltaje (Voltage Source Converter, VSC) el cual se emplea para generar un voltaje AC a partir de una fuente DC. Con este convertidor se puede controlar la amplitud,

el ángulo de fase y la frecuencia del voltaje de salida. Estos dispositivos están constituidos por interruptores, o también llamados semiconductores controlados, y son elegidos dependiendo de la capacidad de potencia a la que se vaya a trabajar.

La arquitectura que constituye la fuente del convertidor de voltaje depende del tipo de circuito, es decir, monofásico o trifásico además el diseño de su topología puede ser [16]:

- Medio puente.
- Puente completo.
- Con transformador de toma media (“push-pull”).

Estas son las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente de DC con los medios disponibles hoy en día en electrónica de potencia.

2.5. Tipo de Modulación en Convertidores CD-AC.

Se denomina modulación al proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia. Debido a este proceso la señal de alta frecuencia denominada portadora, sufrirá la modificación de alguna de sus parámetros, siendo dicha modificación proporcional a la amplitud de la señal de baja frecuencia denominada moduladora, la Figura 2.6 muestra el proceso de la modulación [17]:

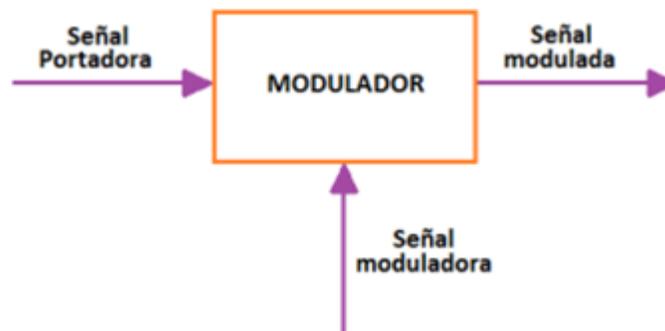


Figura 2.6. Proceso de modulación.

La modulación es un aspecto importante en el campo de las telecomunicaciones, sabemos que en el medio existen interferencias tales como el ruido, que afecta o distorsiona la señal transmitida. Así mismo, la modulación en la electrónica es fundamental ya que se puede controlar ciertos parámetros eléctricos, como es el caso de los inversores de potencia.

La modulación en convertidores de DC-AC o también llamados inversores, permite el control de la magnitud y la frecuencia de la señal de salida. Así, la entrada al inversor puede ser una batería, una celda de combustible, una celda solar u otra fuente de DC, que en conjunto con dispositivos de activación y desactivación controlada (semiconductores) como los BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, GTO, Válvulas de Tiristores para altos voltaje, entre otros, hacen posible obtener un voltaje simétrico de salida AC con la magnitud y frecuencia deseadas.

Para el control de estos semiconductores, se pueden utilizar diversos tipos de modulación, un ejemplo es la aplicación de la Modulación por Ancho de Pulsos (Pulse Width Modulation, PWM). En la actualidad existen varios tipos de modulación PWM, siendo la Modulación Sinusoidal por Ancho de Pulso (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) la más utilizada.

Este tipo de modulación permite obtener a la salida del VSC o inversor un voltaje troceado que se genera por medio de la comparación entre una señal sinusoidal (moduladora) y una triangular (portadora). La frecuencia de la señal portadora establece la frecuencia de conmutación de los interruptores y la frecuencia de la señal de control es reflejada a la salida del convertidor en la señal promedio ciclo por ciclo (Cycle-by-Cycle Average, CCA) obtenida a partir del voltaje troceado [13].

No es posible conseguir una onda de voltaje libre de armónicos, estas son señales inherentes producidas por la conmutación de los interruptores que componen el inversor, pero vale mencionar que la manifestación de armónicos causados naturalmente por el uso de dispositivos electrónicos de potencia han llevado a la creación de técnicas capaces de mitigarlos. Es así como, al utilizar este tipo de modulación como base para posteriormente realizar una modulación multinivel, se

ha logrado minimizar los contenidos de armónicos de manera eficiente del voltaje de salida [18].

El índice de modulación es una cantidad sin unidad que indica la relación existente entre las magnitudes de la señal sinusoidal de referencia o moduladora y la señal portadora de forma triangular. La relación se denota como sigue:

$$m_a = \frac{A_{mod}}{A_{port}} = \frac{A_{señal\ sin}}{A_{señal\ triangular}} \quad (2.7)$$

Dónde: m_a : Índice de modulación.

A_{mod} : Magnitud de la señal sinusoidal.

A_{port} : Magnitud de la señal triangular.

Para $m_a \leq 1$, la magnitud del voltaje a la salida del inversor V_a , varía en forma proporcional. Caso contrario, cuando m_a es mayor que 1 existirá sobre-modulación, es decir el incremento no será lineal.

A continuación en la Figura 2.7 se presenta la modulación SPWM. En la misma se puede visualizar la generación de pulsos que se da en una de las tres fases al comparar la moduladora o señal de control con la señal triangular simétrica.

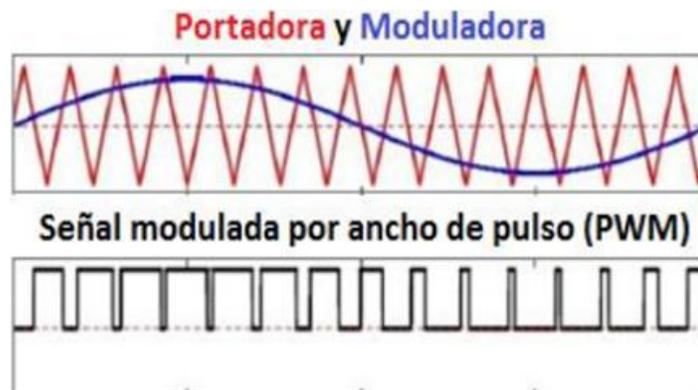


Figura 2.7. Modulación SPWM para un inversor monofásico.

Para realizar una modulación trifásica, simplemente se necesita de tres referencias sinusoidales desfasadas 120° entre sí.

2.6. Descripción del Dispositivo Semiconductor de Potencia IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).

Para aplicaciones en que se requiere controlar grandes cantidades de potencia entregada a una carga el IGBT es el dispositivo idóneo, ya que requiere tensiones de compuerta relativamente bajas y puede conmutar a frecuencias elevadas. Este dispositivo es un componente híbrido entre dos transistores de potencia: el transistor de unión bipolar (BJT) y el transistor de metal oxido semiconductor de efecto de campo (MOSFET). Del BJT toma las características de pérdidas por conducción muy bajas en estado de encendido y voltajes de bloqueo grandes, mientras que del MOSFET toma las características de conmutación rápida [2]. Con la combinación de la estructura de compuerta MOS y la corriente de conducción bipolar, la estructura del IGBT puede dar no solo una impedancia de entrada muy alta, sino también una alta densidad de corriente de operación con un bajo voltaje de saturación. En la Figura 2.8 se muestra el símbolo de un IGBT.

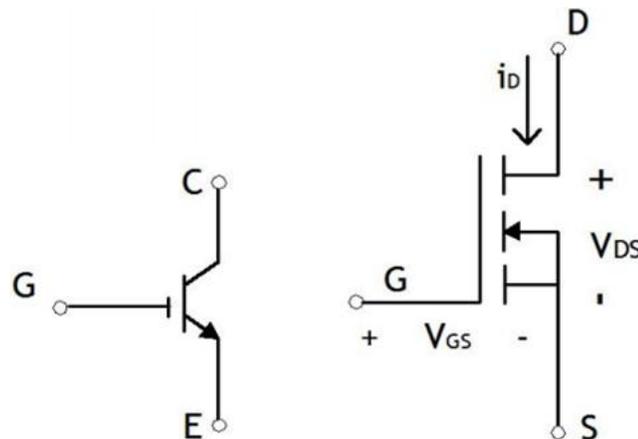


Figura 2.8. Símbolo de un IGBT.

El IGBT tiene dos estados de funcionamiento estables que son el de saturación y el de corte. Para mantener el IGBT en conducción se mantiene la tensión puerta-emisor (V_{ge}) por encima de la tensión umbral $V_{ge_{th}}$. En conducción, el IGBT se comporta como un transistor bipolar con una tensión de saturación, es decir: tensión de saturación colector a emisor $V_{ce_{sat}}$. El valor de esta tensión es función de V_{ge} , la corriente de colector (I_c) y la temperatura.

El IGBT se encuentra en corte cuando, una vez terminado el proceso de apagado, la tensión V_{ge} se mantiene por debajo de la tensión de umbral. La máxima tensión que soporta un IGBT se denomina tensión de ruptura colector-emisor V_{ces} . La transición entre estos dos estados se realiza durante las conmutaciones de encendido y apagado; dichas conmutaciones se verán fuertemente influenciadas por estas capacidades y por la resistencia de compuerta (R_g).

La selección apropiada de un IGBT envuelve dos puntos clave, ambos están relacionados con mantener al IGBT dentro de sus parámetros máximos durante la operación. El primer criterio es que la corriente de pico de colector durante la operación, incluyendo cualquier sobrecarga de corriente, debe ser menor que 2 veces el valor de la corriente nominal. El segundo criterio es que la temperatura de operación de la unión en el IGBT debe siempre mantenerse por debajo de $T_{j(max)}$ en operación normal, incluyendo sobrecargas esperadas. Si no se dispone de un sistema de enfriamiento o ventilación apropiado es necesario usar un IGBT que soporte mucho mayor corriente que la esperada para el circuito.

Un IGBT requiere voltaje en la puerta para establecer conducción de colector a emisor. Este voltaje de puerta puede ser aplicado por una gran variedad de circuitos. Los parámetros a considerar para seleccionar un circuito de puerta incluyen los requerimientos de polarización de apagado, carga de la puerta y disponibilidad de fuente de poder.

Para encender un IGBT se recomienda un voltaje de alrededor de 15 V. Este valor es suficientemente alto para saturar completamente al IGBT y minimizar las pérdidas en estado de encendido, pero es suficientemente bajo para limitar la corriente de cortocircuito y el estrés de potencia resultante. Debe procurarse utilizar un voltaje en el rango de 12 – 20V para el encendido.

Un IGBT se apaga cuando el voltaje de la puerta sea cero. Sin embargo, para asegurar que el IGBT permanezca en estado de apagado, cuando el ruido dv/dt se presente en el voltaje de colector a emisor se debe utilizar un voltaje de

polarización de apagado. El uso de polarización inversa también disminuye las pérdidas de apagado.

Seleccionar la resistencia adecuada para la puerta de un IGBT es muy importante. El valor de la resistencia de puerta tiene un impacto significativo en el comportamiento dinámico del IGBT. El IGBT es encendido y apagado cargando y descargando la capacitancia de puerta. Un resistor pequeño de puerta, carga y descarga la capacitancia de puerta rápidamente, reduciendo las pérdidas y tiempo de conmutación.

Si no se utiliza un sistema térmico apropiado los dispositivos de potencia se sobrecalentaran lo cual podría resultar en falla. En muchas aplicaciones la máxima salida de potencia utilizable en el módulo está limitada por el diseño térmico del sistema. El primer paso en el diseño térmico es la estimación de la pérdida total de potencia. En circuitos electrónicos de potencia que utilizan IGBT's, las dos más importantes fuentes de disipación de potencia que deben ser consideradas son las pérdidas por conducción y las pérdidas por conmutación.

2.7. Convertidores Multinivel.

La modulación multinivel es la base para la obtención de una onda de voltaje que muestre una buena calidad en su forma; es decir, que sea una senoide casi perfecta con un rizado mínimo producto de los armónicos inherentes de la conmutación.

Dependiendo del número de niveles que se utilice se aporta significativamente a la disminución del rizado. Los convertidores multinivel (Figura 2.9) brindan un voltaje generado en la salida en forma de onda escalonada considerando que los interruptores se cierran y se abren en tiempos diferentes.

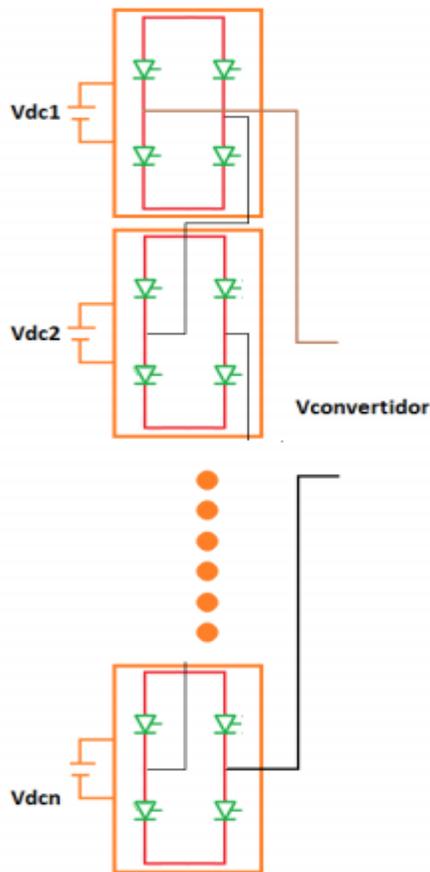


Figura 2.9. Inversor monofásico compuesto por n puentes H en cascada.

Son conocidos como seccionadores de tensión y su principal diferencia con un convertidor convencional radica en que el voltaje de salida, de valor elevado, se obtiene a partir de diferentes niveles de tensión continua de entrada, mientras que en el convencional el voltaje continuo de entrada presenta un único nivel [19].

El proceso de modulación es similar a la modulación de ancho de pulso ya que se realiza una comparación entre una señal sinusoidal (moduladora) y varias señales triangulares (portadoras). En la figura 2.10 se muestra el proceso de modulación mediante la señal moduladora y portadoras [19]:

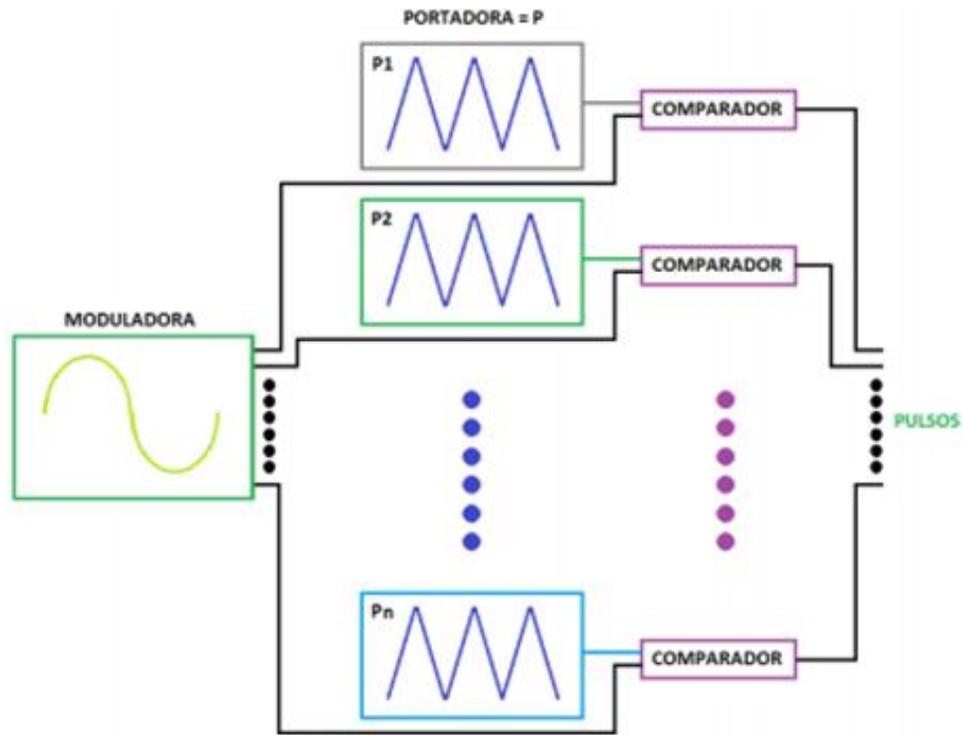


Figura 2.10. Proceso de modulación para general n pulsos.

Las frecuencias de la señales portadoras establecen la frecuencia de conmutación de los interruptores y la frecuencia de la señal de control es reflejada a la salida del convertidor. Esto se observa en la Figura 2.11 donde se muestran 8 señales triangulares.

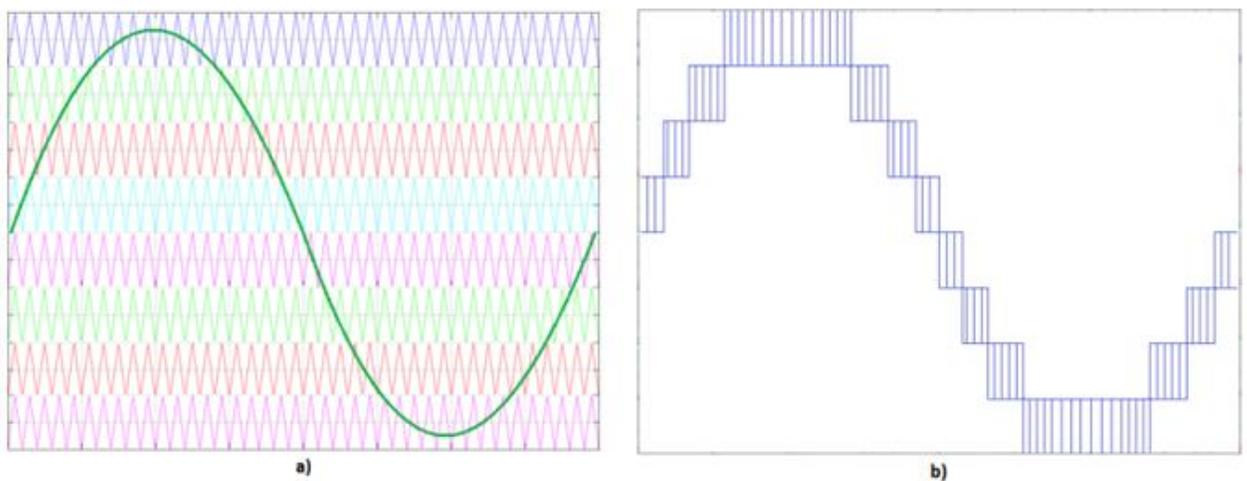


Figura 2.11. (a) Señal moduladora y 8 Señales portadoras, (b) Voltaje del convertidor multinivel de 8 niveles.

Las ventajas y desventajas de utilizar convertidores multinivel son las siguientes [19]:

- Los interruptores de potencia que conforman el inversor soportan niveles de voltaje reducidos, ya que la disposición del voltaje V_{DC} de entrada en múltiples niveles permite aumentar varias veces la tensión de trabajo del convertidor empleando los mismos interruptores que un convertidor convencional.
- La potencia de los convertidores se incrementa al emplear voltajes mayores, sin necesidad de incrementar la corriente, evitando así mayores pérdidas durante la conducción y por consecuencia mejorar el rendimiento del convertidor.
- El voltaje de salida obtenido en un convertidor multinivel presenta un contenido armónico menor que el obtenido en un convertidor convencional.
- La respuesta dinámica del convertidor es más rápida, por tener más niveles de tensión de salida y emplear filtros de menor tamaño.
- La corriente de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja.
- Pueden operar con una baja frecuencia de conmutación considerando frecuencia del orden debajo de 1000 Hz.
- Cuando se emplea un número grande de interruptores la complejidad del control se incrementa.
- Es necesario tener diferentes niveles de tensión de entrada, que pueden obtenerse con capacitores o mediante varias fuentes de continua. La desventaja se manifiesta en que se debe tener un control adicional para cuando se emplean capacitores, ya que las tensiones de estos deben de permanecer constantes o equilibrados en cualquier condición de trabajo.

CAPÍTULO 3. Simulación del Compensador Estático Sincrónico Serie.

3.1 Descripción del Circuito Utilizado para la Simulación.

El compensador estático sincrónico serie (SSSC), es uno de los principales dispositivos FACTS, consta de una fuente convertidora de voltaje y un transformador conectado en serie con la línea de transmisión. El SSSC inyecta una tensión de magnitud variable en cuadratura con la corriente de línea, emulando así una reactancia inductiva o capacitiva. Esta reactancia variable en serie con la línea influye en la potencia eléctrica transmitida. En este caso, el SSSC es usado para amortiguar las oscilaciones de potencia en una red eléctrica tras una falla trifásica.

La red eléctrica se compone de dos subestaciones de generación de energía y un centro de carga principal en la barra tres *B3*. La primera subestación de generación de energía (*M1*) tiene una potencia de 2.100 MVA, que representa 6 máquinas de 350 MVA y el otro (*M2*) tiene una potencia de 1.400 MVA, que representa 4 máquinas de 350 MVA. El centro de carga de aproximadamente 2.200 MW se modela utilizando un modelo de carga dinámica en la que la potencia activa y reactiva absorbida por la carga es una función del sistema de generación de voltaje.

La subestación *M1* está conectada a esta carga por dos líneas de transmisión, línea 1 (*L1*) y línea 2 (*L2*). *L1* es de 280 km de largo y *L2* se divide en dos segmentos de 150 kilómetros, con el fin de simular una falla trifásica (con un

interruptor de falla) en el punto medio de la línea. La subestación $M2$ también está conectada a la línea de carga $L3$ (50 km). Cuando el SSSC es de derivación (bypass), el flujo de potencia hacia esta importante carga es el siguiente: 664 MW de flujo en $L1$ (medido en $B2$), 563 MW de flujo en $L2$ (medido en $B4$) y 990 MW de flujo en $L3$ (medido en $B3$).

El SSSC que se encuentra en $B1$, está en serie con la línea $L1$. Tiene una potencia de 100 MVA y es capaz de inyectar hasta 10% de la tensión nominal del sistema. El SSSC es un modelo de fasores de una típica PWM de tres niveles. Si se abre el cuadro de diálogo del SSSC y se selecciona "datos de energía de la pantalla", se verá que el modelo representa un SSSC con una tensión nominal de circuito intermedio de 40 kV, con una capacidad equivalente de 375 μF . En el lado AC, su impedancia total equivalente es de 0,16 p.u. en 100 MVA. Esta impedancia representa la reactancia de fuga del transformador y el reactor de fase del puente IGBT de una PWM.

El SSSC inyecta una tensión de referencia que se ajusta normalmente por un controlador POD (Power Oscillation Damping) cuya salida está conectada a la entrada V_{qref} del SSSC. El controlador POD se compone de un sistema activo de medición de potencia, una ganancia en general, un filtro de paso bajo, un filtro de paso alto de lavado, un compensador y un limitador de salida. Las entradas al controlador POD son la tensión en $B2$ y la corriente que fluye en $L1$.

A continuación, en la Figura 3.1 se muestra la construcción del controlador POD y la Figura 3.2 se refiere al circuito descrito anteriormente.

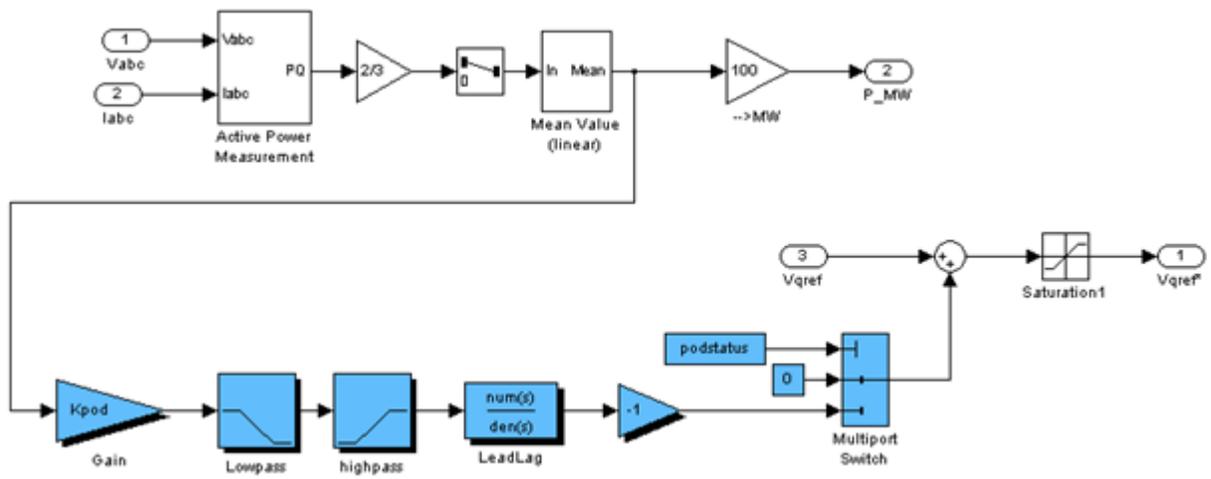


Figura 3.1. Controlador POD.

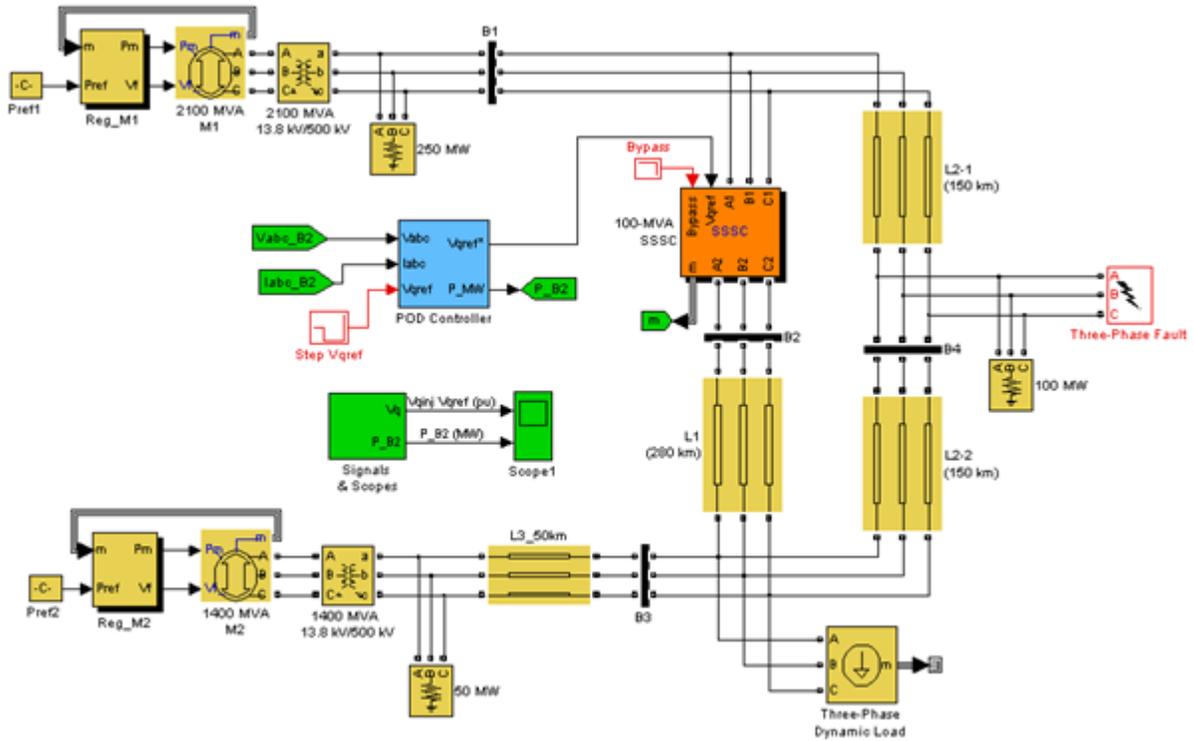


Figura 3.2. Circuito del SSSC utilizado para la simulación.

3.2 Descripción General de los Bloques más Importantes Utilizados en la Simulación.

3.2.1 Carga Dinámica Trifásica.

El bloque (ver Figura 3.3) implementa una carga trifásica, donde la potencia activa P y la potencia reactiva Q son una función del sistema de generación de voltaje de secuencia positiva. La negativa y las corrientes de secuencia de cero no están simuladas. Las tres corrientes de carga están balanceadas, se emparejan bajo condiciones desequilibradas de voltaje en la carga.

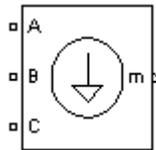


Figura 3.3. Bloque que representa la carga trifásica.

En la Figura 3.4 se muestra la ventana de diálogo y los parámetros del bloque descrito.

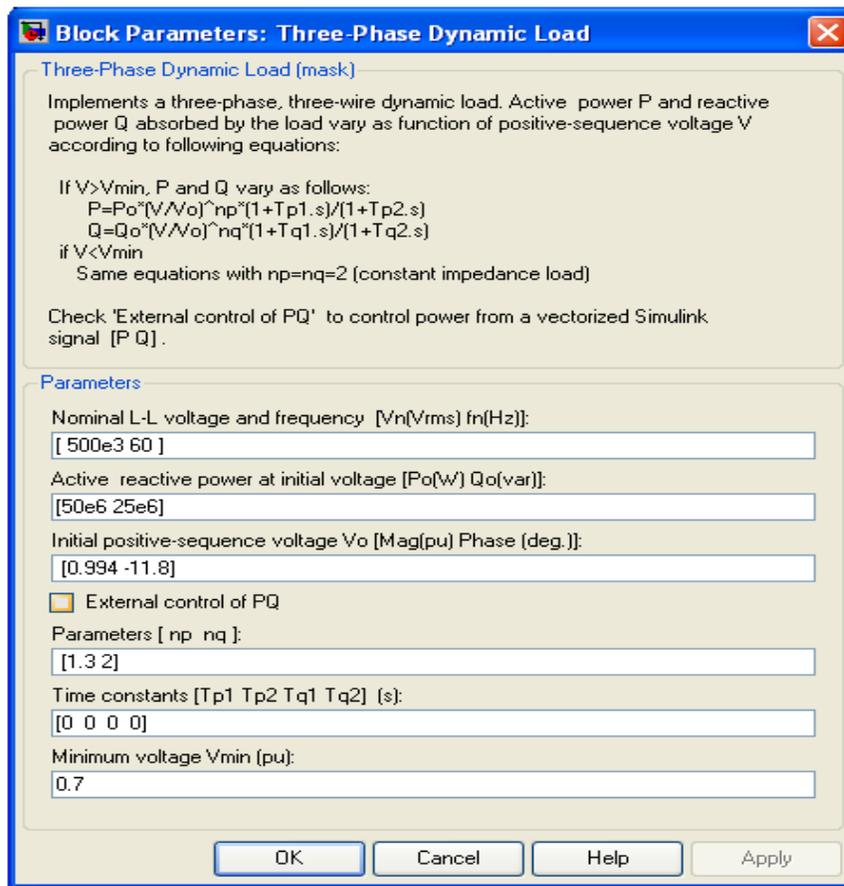


Figura 3.4. Parámetros del bloque que representa la carga trifásica.

3.2.2 Voltaje de Referencia Paso (V_{qref}).

El bloque Timer genera una señal alterándose en las veces especificadas de transición. Este bloque se usa para generar una señal lógica (0 ó 1) y controlar la abertura y las horas de cierre de los interruptores. También se puede usar este bloque para generar una señal cuyos cambios de amplitud dan un paso en las veces especificadas de transición. Su diagrama de diálogo y parámetros se muestra en la Figura 3.5.

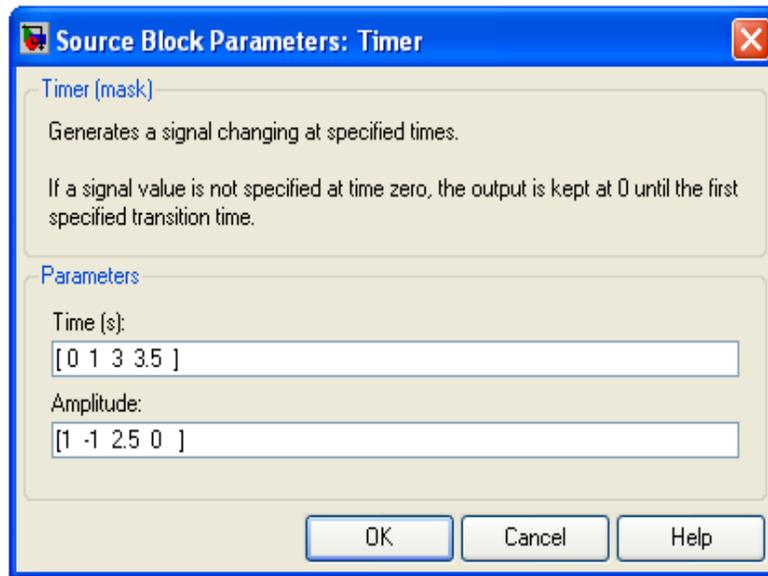


Figura 3.5. Parámetros del bloque que representa el voltaje de referencia.

3.2.3 Falla Trifásica.

El bloque de la falla trifásica (Figura 3.6), implementa un cortocircuito de tres fases donde las horas de cierre pueden estar controladas por una señal externa (modo externo de control) o por un bloque interno del cronometrador de control.



Figura 3.6. Bloque que representa la falla trifásica.

El bloque de la falla trifásica (en modo interno de control) usa tres bloques Breaker que pueden ser individualmente cambiados, puede simular corto circuitos de fase-fase, fase-tierra y otras combinaciones. Para comprender más su función en el circuito se muestra su diagrama de diálogo y parámetros en la Figura 3.7.

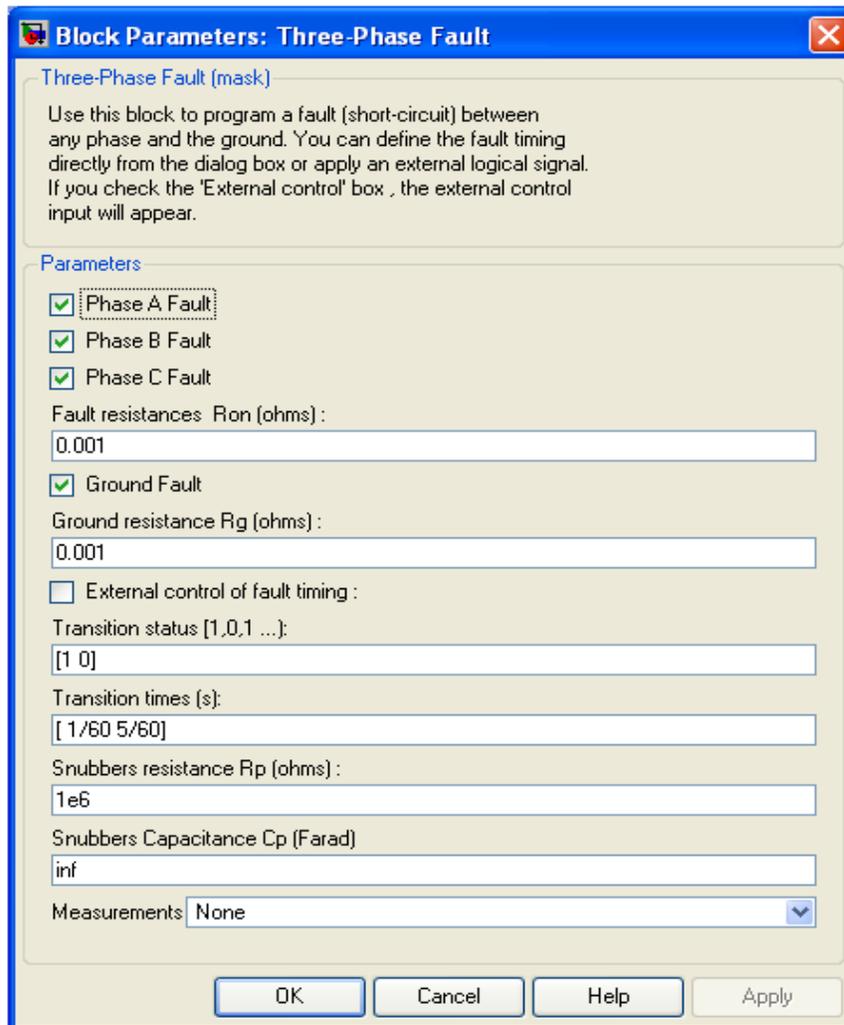


Figura 3.7. Parámetros del bloque que representa la falla trifásica.

3.2.4 Carga Trifásica RLC Paralela.

En la Figura 3.8 se representa este bloque, el cual implementa una carga trifásica balanceada como la combinación de elementos RLC en serie. A la frecuencia especificada la carga presenta una impedancia constante. La potencia activa y reactiva consumida es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado. Solo son mostrados los elementos RLC que tienen un valor distinto de cero, de acuerdo a esto, el icono se actualiza en forma automática. En la Figura 3.9 se representa la ventana de diálogo de este elemento.

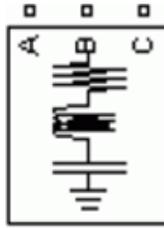


Figura 3.8. Bloque que representa la carga trifásica RLC paralela.

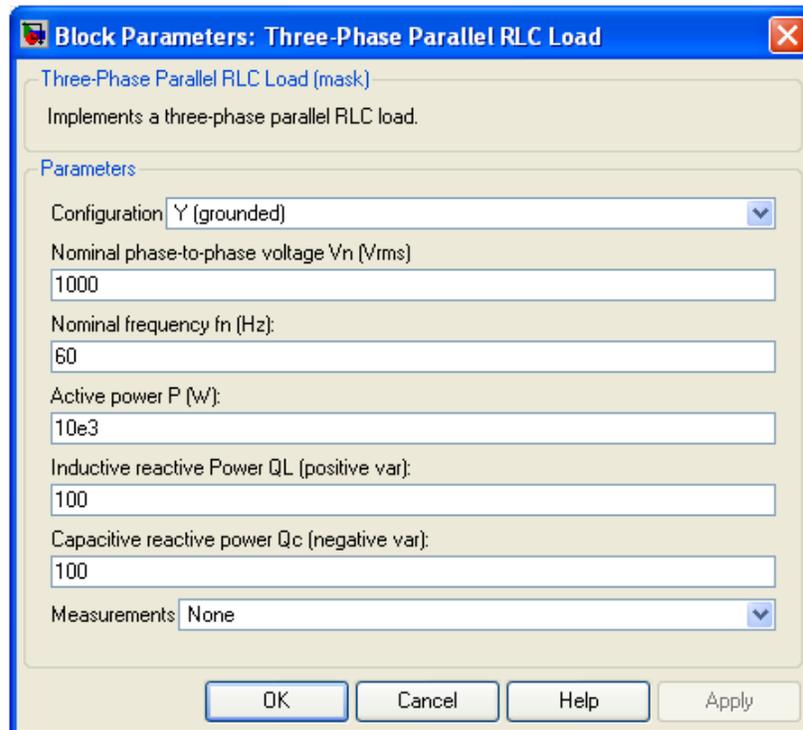


Figura 3.9. Parámetros del bloque que representa la carga trifásica RLC paralela.

3.3 Compensador Sincrónico Serie.

El Compensador Sincrónico Serie (SSSC) es un dispositivo FACTS usado para controlar flujo de potencia y mejorar el amortiguamiento de oscilaciones de potencia. En la Figura 3.10 se muestra el diagrama lineal de un SSSC y su diagrama de bloques del sistema de control.

El sistema de control consiste en un lazo de enganche de fase (PLL) que funciona sincrónicamente en el componente de secuencia positiva de la corriente. La salida del lazo de enganche de fase se usa para computar el eje directo y los

componentes del eje de cuadratura de corriente alterna trifásica, los voltajes y las corrientes (designada como V_d , V_q o I_d , I_q , en el diagrama).

Los sistemas de medida miden los componentes q de corriente alterna de secuencia positiva de los voltajes V_1 y V_2 (V_1q y V_2q), así como también el voltaje de corriente directa V_{dc} .

Los reguladores de voltaje, tanto de corriente directa como alterna, computan los dos componentes del voltaje del convertidor (V_{d_conv} y V_{q_conv}) requerido para obtener el voltaje de corriente directa deseado (V_{dref}) y el voltaje inyectado (V_{qref}). El regulador de voltaje V_q es asistido por un regulador de adelanto que predice el voltaje V_{conv} desde la corriente medida I_d .

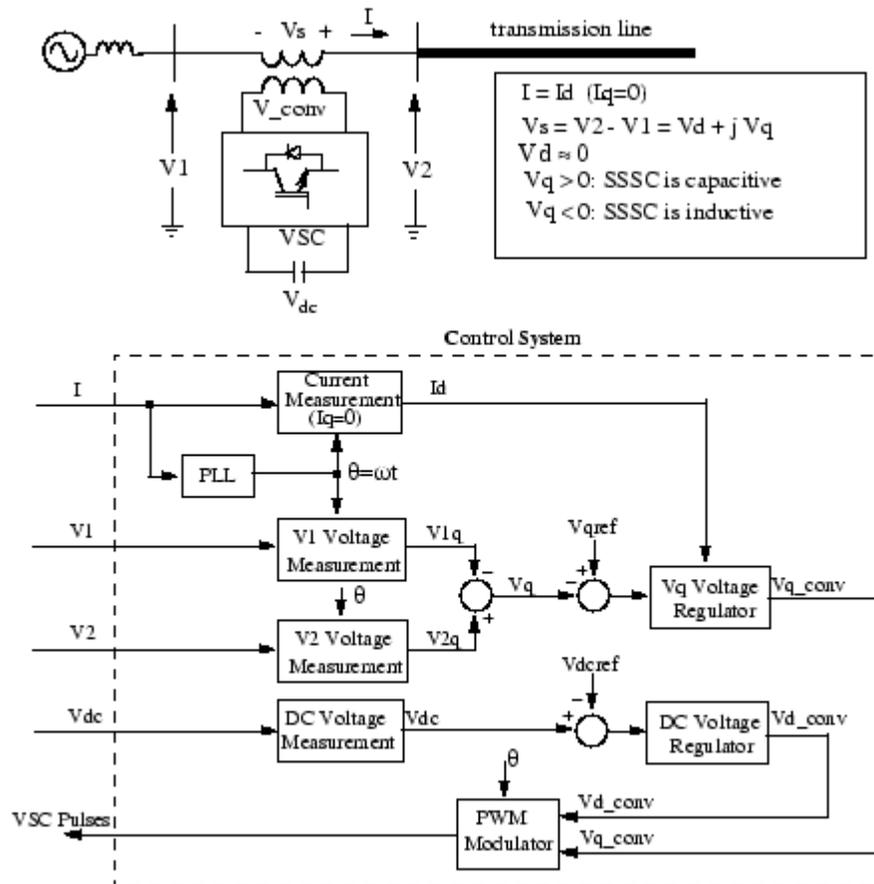


Figura 3.10. Diagrama esquemático del SSSC.

El bloque SSSC es un modelo fasorial que no incluye una representación detallada de la electrónica de potencia. Este puede ser usado en los sistemas trifásicos de potencia conjuntamente con generadores sincrónicos, motores y cargas dinámicas.

Los parámetros del SSSC son agrupados en dos categorías: Power data y Control parameters, para seleccionar el grupo de parámetros que se quiere visualizar se debe usar el listbox Display. En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran estas dos categorías.

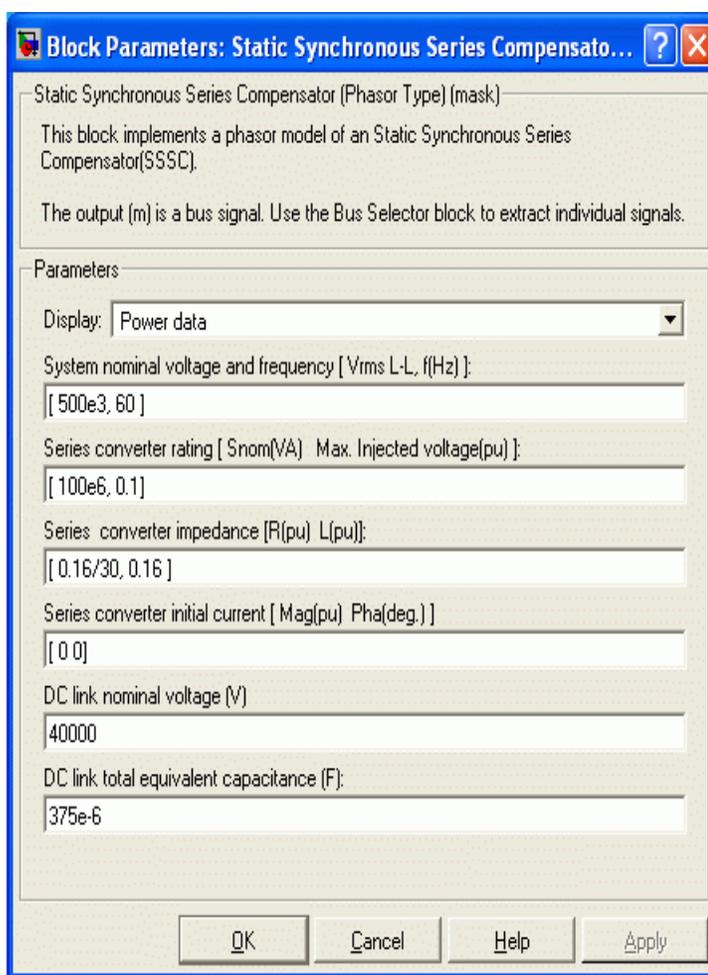


Figura 3.11. Parámetros del SSSC (Power data).

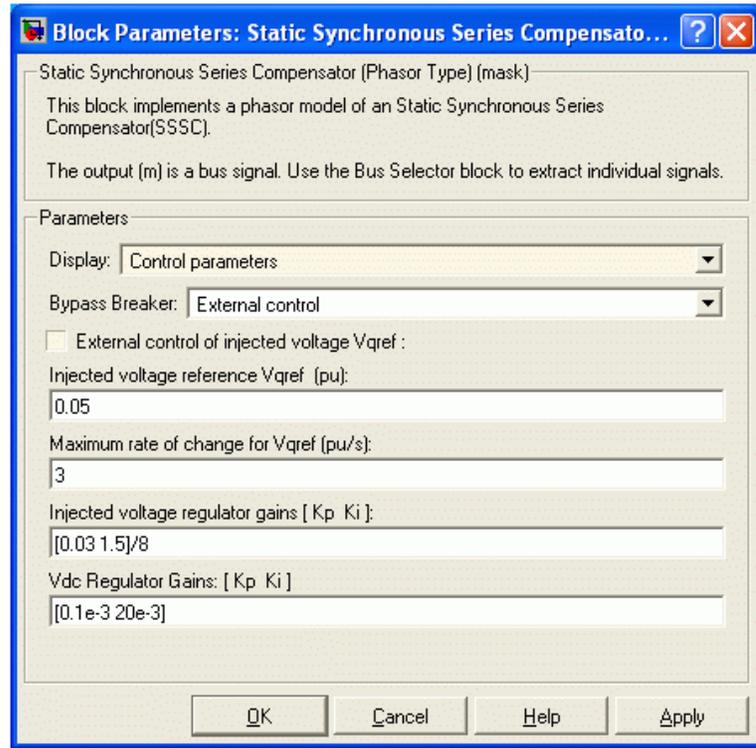


Figura 3.12. Parámetros del SSSC (Control parameters).

3.4 Simulación y Resultados.

A continuación se realiza una demostración de la respuesta dinámica del modelo. El primer paso a realizar, es modificar los valores del V_{qref} (Voltaje de referencia). Para esto se debe programar el bloque “Step V_{qref} ” (el bloque de temporizador rojo conectado a la entrada “ V_{qref} ” del controlador POD) de la siguiente forma: el valor inicial de V_{qref} es 0 p.u. para un tiempo cero, transcurrido 2 segundos el valor de V_{qref} es de -0.08 p.u. (inductivo), mientras que al pasar 6 segundos V_{qref} se establece en 0.08 p.u. (capacitivo).

Después de haber realizado este primer paso se procede a verificar que el bloque controlador POD esté en estado de apagado. Además, se debe tener en cuenta que el interruptor de falla no esté funcionando durante la simulación. Realizado todo lo expuesto anteriormente se procede a simular el modelo. El resultado de la simulación antes descrita se muestra en las gráficas de la Figura 3.13.

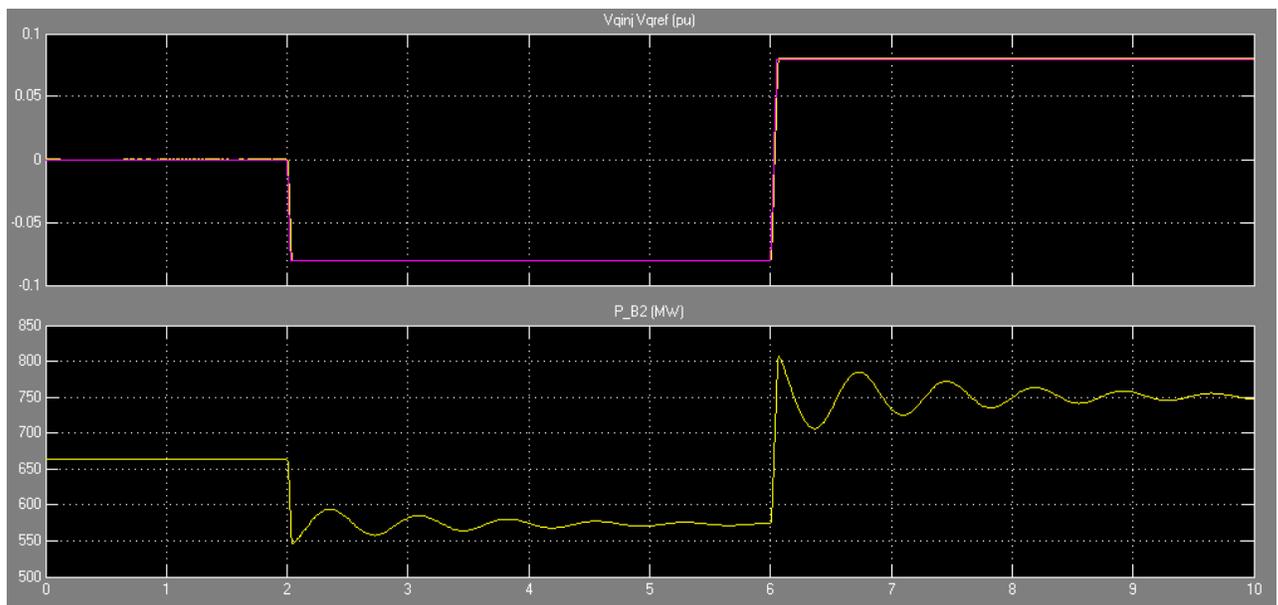


Figura 3.13. Flujo de potencia para dos valores diferentes de voltaje de referencia.

El primer grafico muestra la señal de referencia (V_{qref}) de color violeta, junto con el voltaje inyectado por el dispositivo SSSC (V_{qinj}) de color amarillo. En esta gráfica se puede ver como el voltaje inyectado por el SSSC sigue muy bien la señal de referencia. El segundo gráfico muestra el flujo de potencia activa (P_{B2}) en la línea 1(L1), medida en la barra dos (B2). Aquí se puede apreciar como dependiendo de la tensión inyectada el flujo de potencia varía de 575 hasta 750 kW. En un sistema real la señal de referencia sería cambiada aun más gradual con el fin de evitar la oscilación de potencia transmitida (P_{B2}).

Estas oscilaciones de la potencia también se pueden solucionar en el modelo de la siguiente manera. En el bloque SSSC se selecciona en el display "Control Parameters" y se modifica "Maximum rate of change for V_{qref} (pu/s)" de 3 a 0.05, con el objetivo de reducir la tasa máxima de cambio de V_{qref} en p.u./s y así mejorar la amortiguación de las oscilaciones. Los resultados de esta simulación se muestran en la Figura 3.14.

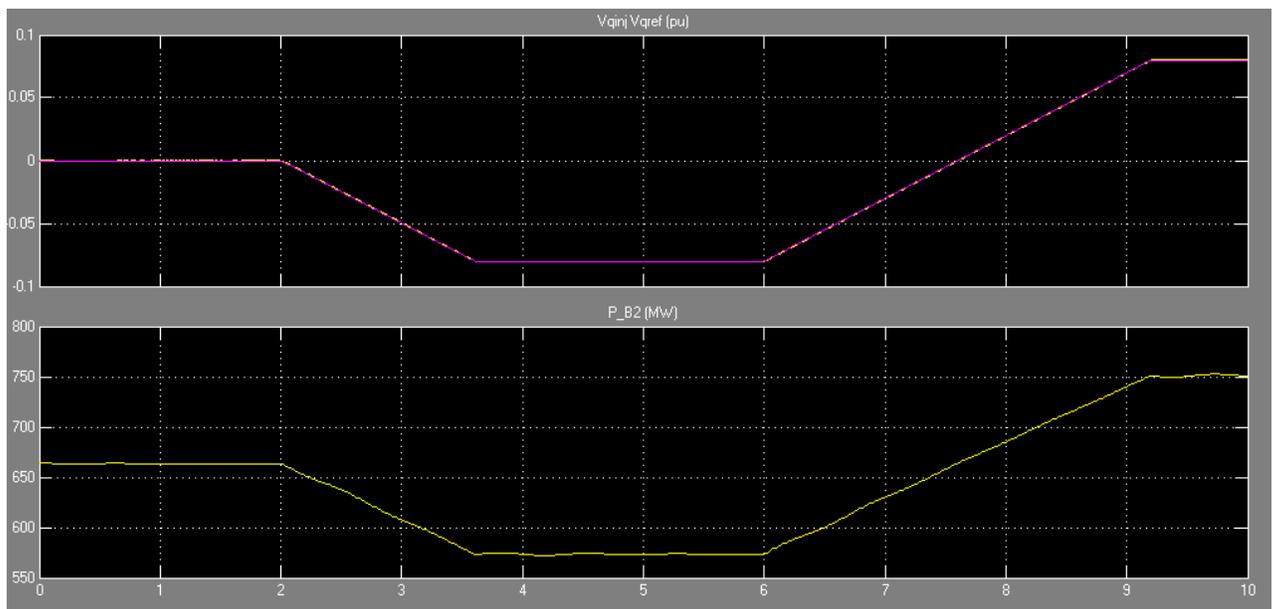


Figura 3.14. Flujo de potencia reduciendo la tasa máxima de cambio de voltaje de referencia.

Como se puede apreciar las oscilaciones de la frecuencia disminuyeron satisfactoriamente de ahí la importancia de variar gradualmente el voltaje de referencia.

A continuación se compara el funcionamiento del SSSC con y sin el control del bloque POD, al ocurrir una falla trifásica. El primer caso es sin el control del bloque POD y el segundo caso cuando se aplica el control POD.

Caso 1.

El primer paso a realizar es abrir el bloque “Vqref Step” y multiplicar por 1000 el vector tiempo, con el objetivo de desactivar las variaciones del *Vqref*. Después se procede a activar el interruptor de falla, se seleccionan los parámetros de falla de la fase A, B y C con el objetivo de simular una falla trifásica. Se tiene que verificar que los tiempos de transición estén establecidos de la siguiente manera: [20/60 30/60] +1, esto significa que la falla se aplicará en 1.33 segundos y tendrá una duración de 10 ciclos. En la Figura 3.15 se muestran los resultados de la simulación para este caso.

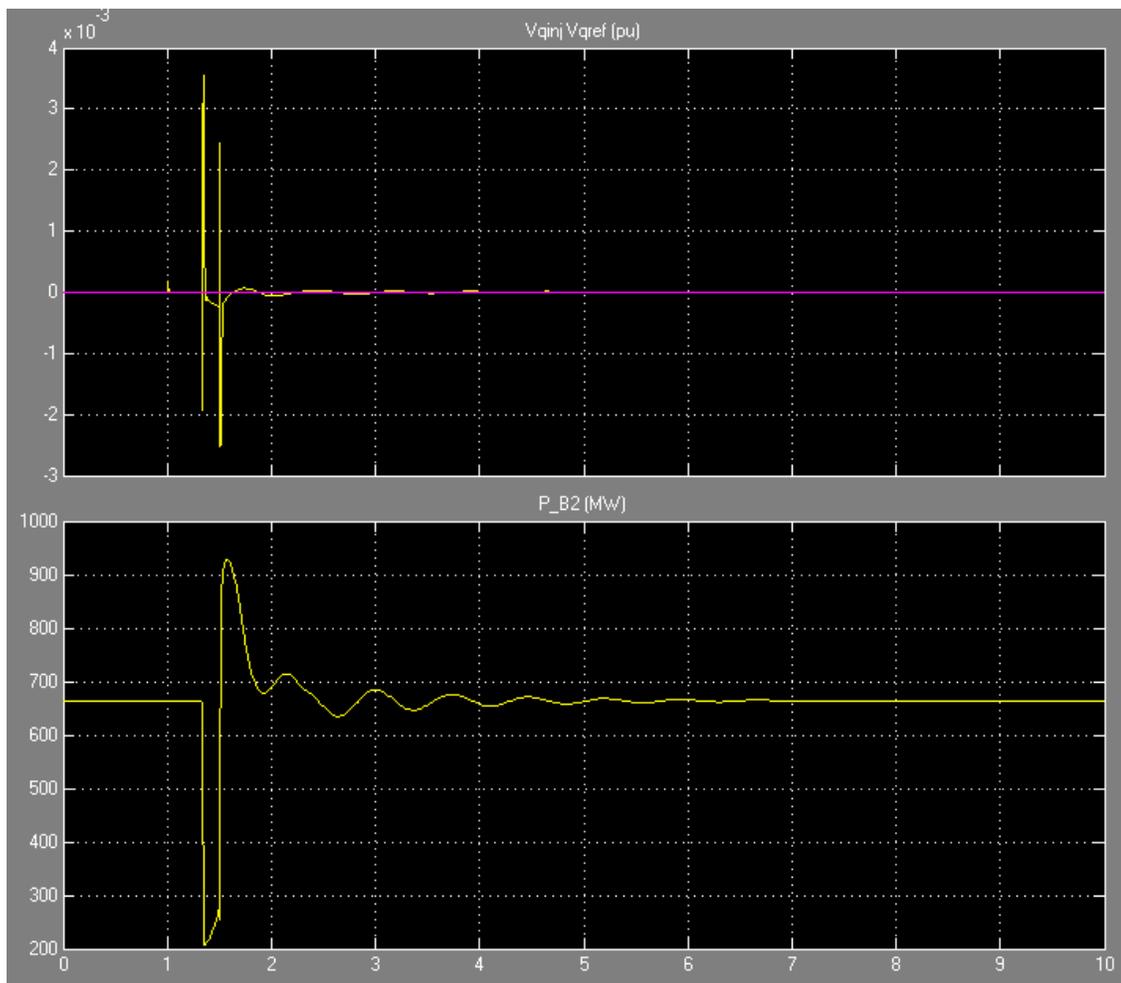


Figura 3.15. Flujo de potencia con el bloque POD desactivado cuando ocurre una falla trifásica.

Como se puede apreciar en la gráfica, existe una distorsión no deseada en la señal de la onda de potencia, puesto que el voltaje inyectado al ocurrir la falla no posee una referencia que cumpla con los requisitos de poder amortiguar estas oscilaciones.

Caso 2.

En este segundo caso se procede a realizar la misma simulación, pero esta vez con el control del bloque POD. Para ello se debe abrir el bloque POD y establecer el parámetro de estado de este bloque en encendido. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 3.16.

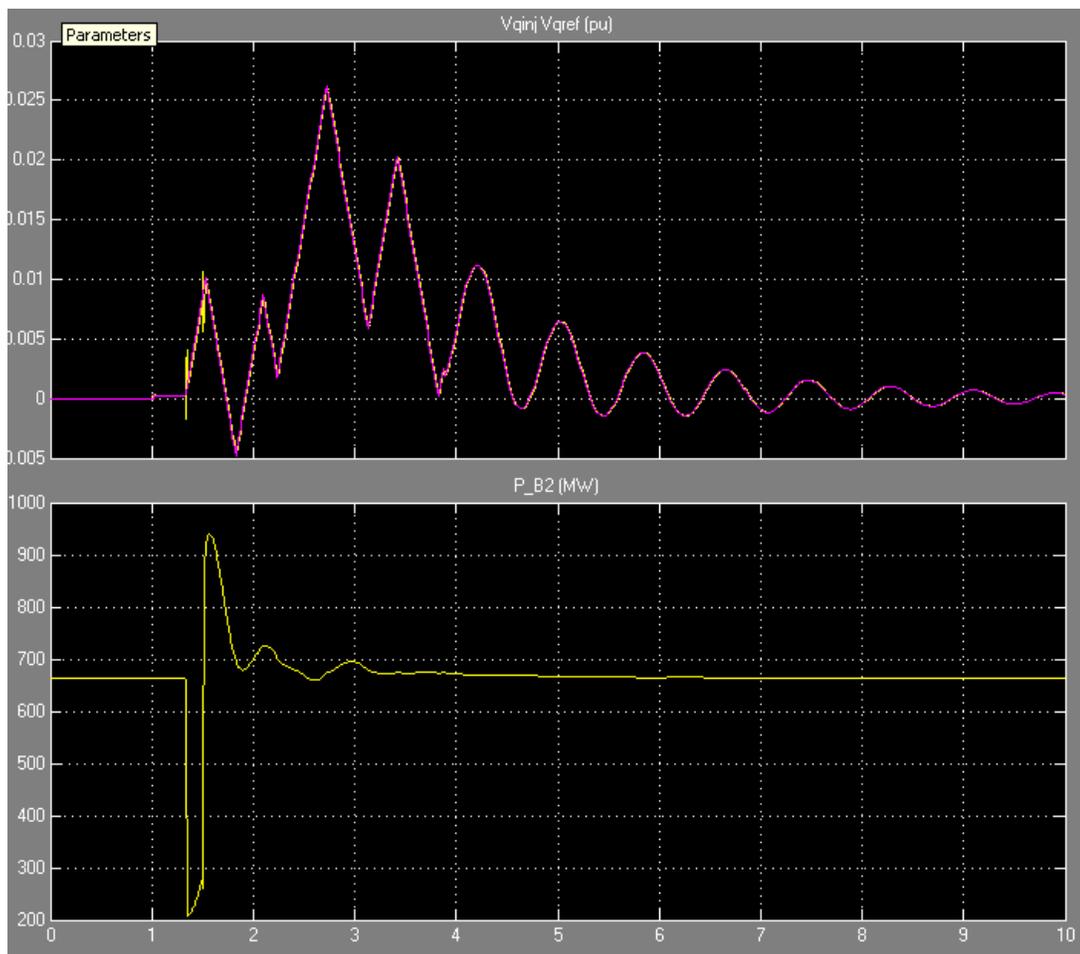


Figura 3.16. Flujo de potencia con el bloque POD activado cuando ocurre una falla trifásica.

Podemos apreciar en esta gráfica como la forma de onda de la señal de la potencia se modifica de manera satisfactoria, ya que la señal de referencia obtenida con el controlador POD hace muy eficaz la amortiguación de las oscilaciones de la potencia. Por ello, en la Figura 3.17, se ofrece una comparación de esta misma onda pero más detallada, con y sin el controlador POD. En esta gráfica se puede divisar mucho mejor la eficacia e importancia de utilizar el SSSC con el control del bloque POD como herramienta para amortiguar las oscilaciones de la potencia.

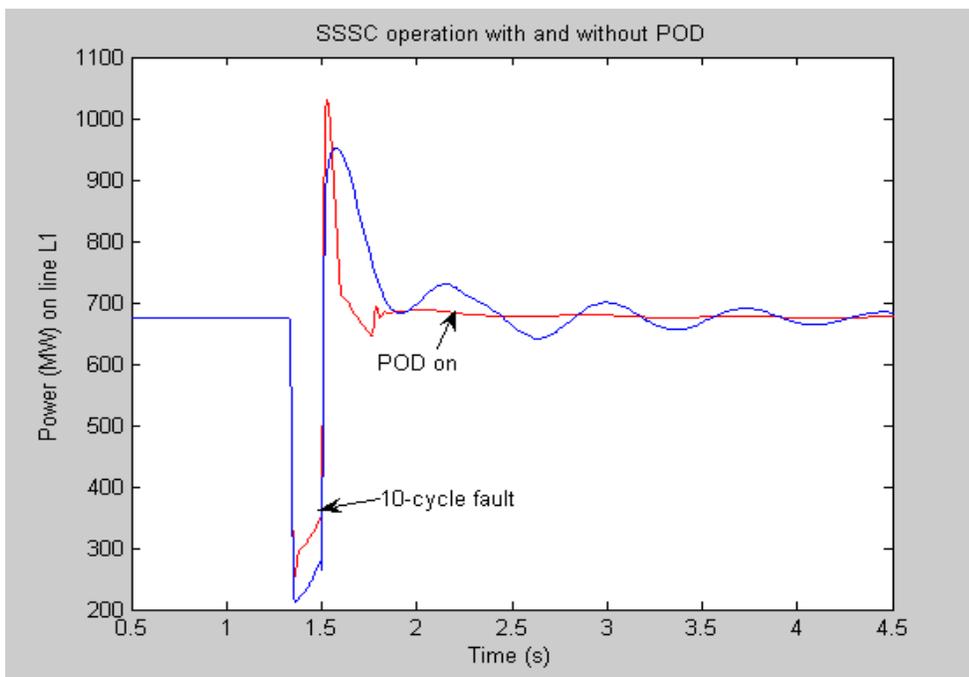


Figura 3.17. Gráfica comparativa del SSSC, con y sin el bloque POD.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente podemos apreciar como el SSSC es una excelente opción cuando se trata de disminuir las oscilaciones que pueden dañar equipos y/o limitar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica. Por esto puede ser aplicado para el manejo de la congestión e incremento de la estabilidad.

Conclusiones

Durante la realización de este trabajo investigativo se arribó a las siguientes conclusiones:

1. Los FACTS son una alternativa para la solución de muchos problemas que enfrenta el sistema eléctrico, capaces de controlar los parámetros que rigen la transferencia de la potencia.
2. El efecto fundamental de la compensación serie es controlar la corriente en la línea de transmisión.
3. El Compensador Estático Sincrónico (SSSC) con el control del POD (Power Oscillation Damping) es una herramienta eficaz en el amortiguamiento en las oscilaciones de la potencia en presencia de un evento no deseado o estado transitorio.

Recomendaciones

Se recomienda:

1. Puesto que esta tecnología es novedosa, continuar con su estudio para seguir perfeccionando su función en la transferencia de la potencia.
2. Realizar un análisis desde el punto de vista económico con el objetivo de evaluar la factibilidad de la utilización de estas tecnologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chirstl, N., et al., "Advanced Series Compensation with Variable Impedance," EPRI Conference on FACTS Cincinnati, OH, Nov.14-16, 1990
- [2] Christl, et al., "Advanced Series Compensation with Thyristor Controlled Impedance," CIGRE paper 14/37/38-05, 1992.
- [3] Pavel Zúñiga Haro, "Diseño e Implementación en Laboratorio de un dispositivo TCSC" Tesis de Maestría, Cinvestav, Unidad Guadalajara, México, Noviembre de 2001.
- [4] R. Adapa "Summary of EPRI's FACTS Systems Studies," CIGRE SC 14 International Colloquium on HVDC and FACTS, Montreal, Sep. 1995.
- [5] B. Avramovic, L. H. Fink, "Energy management systems and control of FACTS", Electrical Power and Energy Systems, Vol.17, No.3, pp. 195-198, 1995
- [6] R. Adapa, M. H. Baker, L. Bohmann, K. Clark, K. Habashi, L. Gyugyi, J.Lemay, A. S. Mehraban, A. K. Myers, J. Reeve, F. Sener, D. R. Torgerson and R. R. Wood, "Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No.4, pp. 1848-1853, Octubre 1997.
- [7] A. Edris, A. S. Menhraban, M. Rahman, L. Gyugyi, S. Arabi, T. Reitman, "Controlling the flow of real and reactive power," IEEE Computer Applications in Power, pp. 20-25, Enero 1998.
- [8] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE PC5713, 1999

- [9] S.G. Jalali, R.A. Hedin, M. Pereira and K. Sadek, "A stability model for the Advanced Series Compensator (ASC)". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp.1128-1137, 1996.
- [10] J.A Casazza, D.J. Lekang, "New FACTS Technology: It's Potencial Impact on Transmission System Utilization", EPRI Conference Flexible AC Transmission System, Cincinnati OH, Nov. 1990.
- [11] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission" IEEE Spectrum, pp. 40-45, Abril 1993.
- [12] Acha E., Fuerte Esquivel C., Ambriz Pérez H., Ángeles Camacho C.; "FACTS Modeling and Simulation in Power Networks"; John Wiley and Sons, ISBN, 2004.
- [13] Rashid M.; "Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones"; 3ª Edición, ISBN, Pearson Education, 2004.
- [14] Ortega, Oscar; Quezada, Abel; Herrera Efraín; "FLUJOS: Una Herramienta para el Análisis de Flujos de Potencia y Dispositivos Facts"; Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; depto. de Eléctrica y Computación. Junio de 2007
- [15] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications. Academic Press 2006.
- [16] Muhammad H. Rashid, "Electronica de Potencia, "Prentice Hall Press, 2004.
- [17] Vassilios G. Agelidis and Martina Calais, "Application Specific Harmonic Performance Evaluation of Multicarrier PWM Techniques," IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, pp.172-178.
- [18] José Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel Inverters: a Survey of Topologies, Controls, and Applications, "IEEE Trans. Ind. Elect, Vol. 49, No. 4, pp. 724-738, Aug 2002.
- [19] Marcos Aurelio Andino Montoya "Diseño del Control y Simulación de un Compensador Serie Estático Sincrónico", Tesis de Maestría, Guayaquil - Ecuador 2012.