

**MÉTODOS DE CONTROL DE LAS TECNOLOGÍAS FACTS  
(FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS)**

**ALVARO ACOSTA URREA**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2005**

**MÉTODOS DE CONTROL DE LAS TECNOLOGÍAS FACTS  
(FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS)**

**ALVARO ACOSTA URREA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito  
Parcial para optar por el título de Magíster en Ingeniería Eléctrica  
Directores: Alvaro Torres Macías  
Maria Teresa de Torres**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ, D.C.  
2005**

## PAGINA DE ACEPTACIÓN

### Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**A mis Padres, y Hermanos por todo su apoyo y dedicación en mi formación personal y profesional, Gracias.**

## **AGRADECIMIENTOS**

- A MARIA TERESA DE TORRES, Profesora del Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Los Andes, asesora y colaboradora de este proyecto.
  
- A Todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1    Justificación.....	12
1.2    Objetivo.....	14
1.3    Sistemas flexibles de transmisión .....	14
1.4    Limitantes inherentes de los sistemas de transmisión.....	15
1.5    Controladores FACTS .....	16
1.6    Análisis de los sistemas de potencia en estado estable .....	20
2. MODELAMIENTO DE LOS CONTROLADORES FACTS .....	21
2.1    Aspectos generales .....	21
2.2    Filosofía del modelaje .....	24
2.3    Controladores basados en tiristores convencionales.....	12
2.3.1.El reactor controlado por tiristores (TCR).....	25
2.3.2.Algoritmo de control del TCR.....	33
2.3.3.El compensador estático de reactivos (SVC).....	37
2.3.4.El compensador en serie controlado por tiristores (TCSC).....	40
2.3.4.1. Ecuaciones de corriente y voltaje en estado estable.....	42
2.4    Controladores de electrónica de potencia basados en dispositivos semiconductores totalmente controlados .....	45
2.4.1.El convertor de fuente de tensión (VSC).....	47
2.4.1.1. Control de modulación por ancho de pulso (PWM) .....	49
2.4.1.2. Principios de operación de los convertidores de fuentes de tensión.....	52
2.4.2.El compensador sincrónico de reactivos (STATCOM) .....	54
2.4.3.Transmisión de potencia continua basa en convertidores de fuentes de tensión HVDC-VSC.....	56

2.5	Características de los controladores basados en fuentes de tensión controladas (VSC) .....	59
3.	MODELAMIENTO DE LOS CONTROLADORES FACTS EN PSCAD .....	61
3.1	Modelamiento del compensador estático de reactivos (SVC) en PSCAD .....	61
3.1.1.	SVC ante variación súbita de carga.....	62
3.1.2.	SVC conectado a un sistema simple AC .....	65
3.1.2.	Algoritmo básico de control del SVC .....	68
3.2.1.	Statcom ante falla trifásica a tierra.....	70
3.2.2.	Algoritmo básico de control del Statcom.....	73
3.3.1.	Transmisión en corriente continua HVDC-VSC .....	75
	CONCLUSIONES .....	80
	BIBLIOGRAFÍA .....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama simplificado de un sistema de potencia.....	21
Figura 2. Controladores basados en tiristores convencionales.....	22
Figura 3. Circuito basado en tiristores.....	26
Figura 4. Formas de onda de tensión y de corriente en el TCR para alfa ( $90^0$ )...	27
Figura 5. Forma de onda de corriente en el TCR para alfa ( $100^0$ ).....	27
Figura 6. Forma de onda de corriente en el TCR para alfa ( $130^0$ ).....	28
Figura 7. Forma de onda de corriente en el TCR para alfa ( $150^0$ ).....	28
Figura 8. TCR trifásico.....	30
Figura 9. Esquemático del TCR en PSCAD.....	33
Figura 10. Algoritmo básico de control del TCR.....	33
Figura 11. Oscilador controlado por tensión.....	34
Figura 12. Control generador de pulsos de disparo.....	35
Figura 13. Control del TCR en PSCAD .....	36
Figura 14. Compensador estático de reactivos (SVC) trifásico compuesto de capacitores fijos y reactores controlados por tiristores .....	37
Figura 15. Estructura física de una fase de un TCSC .....	40
Figura 16. Circuito equivalente del TCSC.....	41
Figura 17. Circuito eléctrico del TCSC .....	42
Figura 18. Corriente asimétrica de los tiristores del TCSC.....	42
Figura 19. Símbolos circuitales para el GTO e IGBT .....	45
Figura 20. Topología del VSC trifásico.....	47
Figura 21. Modulación PWM.....	49
Figura 22. Pata de conversor de fuente de tensión VSC .....	51
Figura 23. Operación básica de un conversor de fuente de tensión VSC.....	52
Figura 24. Controladores basados en fuentes de tensión (VSC) .....	54
Figura 25. Sistema de compensación estática STATCOM.....	55
Figura 26. Sistema de transmisión de potencia continua basado en un conversor de fuente de tensión (HVDC-VSC).....	57



Figura 27. Diagrama fasorial ilustrando el concepto general del control realizado por los FACTS .....	60
Figura 28. Línea de transmisión a 500KV con un SVC conectado a la misma, carga variable.....	63
Figura 29. Simulación sin el SVC conectado a la línea, carga variable.....	64
Figura 30. Simulación con el SVC conectado a la línea, carga variable .....	65
Figura 31. Sistema AC a 130KV L-L con un SVC conectado a la misma .....	66
Figura 32. Simulación sin el SVC conectado a la línea, salida de carga .....	66
Figura 33. Simulación con el SVC conectado a la línea, salida de carga.....	67
Figura 34. Algoritmo básico de control para el SVC .....	68
Figura 35. Algoritmo básico de control para el SVC en PSCAD .....	69
Figura 36. Simulación de la variación del ángulo de disparo y de la cantidad de condensadores que entran al sistema a lo largo del evento.....	69
Figura 37. STATCOM conectado a un sistema de transmisión AC.....	71
Figura 38. Simulación sin el STATCOM conectado al sistema AC .....	71
Figura 39. Simulación con el STATCOM conectado al sistema AC .....	72
Figura 40. Inyección de reactivos durante la simulación.....	72
Figura 41. Algoritmo básico de control para el STATCOM.....	73
Figura 42. Obtención de la señal de desfase de la onda senoidal para la modulación PWM en PSCAD .....	74
Figura 43. Obtención de la señal triangular de referencia para la modulación PWM en PSCAD .....	75
Figura 44. Configuración típica de un esquema de transmisión VSC.....	76
Figura 45. Esquemático de un modelo de transmisión VSC en PSCAD .....	77
Figura 46. Onda de tensión en el lado de envío durante la simulación.....	78
Figura 47. Zoom de la situación anterior. Onda de tensión en el lado de envío durante la simulación.....	78
Figura 48. Onda de tensión en el lado DC durante la simulación.....	78

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los controladores FACTS enfocados a la solución de problemas de estado estable .....	19
--	----

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar, analizar y simular el comportamiento de los FACTS, (Flexible AC Transmission Systems) tales como: el Static Var Compensator (SVC) y el Static Synchronous Compensator (STATCOM), en su estado estable, dinámico y transitorio. El funcionamiento de estos equipos se gobierna mediante unos sofisticados algoritmos de control mediante el software PSCAD. Este trabajo analiza la respuesta del SVC ante una variación súbita del 50% de la carga de la línea controlado por el algoritmo de la *susceptancia característica* y la respuesta de un STATCOM controlado *por tensión* como compensador de una falla trifásica a tierra. Se analizan los resultados de las diferentes componentes del algoritmo de control así como las desviaciones de la tensión RMS de la línea en p.u. ante la tensión de referencia durante el evento y en condiciones normales. Asimismo, se investigaron los sistemas de transmisión en corriente continua MVDC-VSC, (Medium Voltage Direct Current-Voltage Sourced Converter) ya que es actualmente uno de los temas de mayor interés en la ingeniería eléctrica y utiliza las características propias de los STATCOMs.

Pscad, (Power System Cad) es la interfaz gráfica del programa mundialmente conocido como Emtdc. PSCAD le permite al usuario construir el esquemático de un circuito con el fin de ejecutar una simulación, para que este pueda analizar los resultados, de una manera más interactiva ya que permite un control directo de la simulación durante la ejecución de la misma, así como una visualización interactiva de este.

Este proyecto se fundamenta en la aplicación del PSCAD como una herramienta poderosa para el análisis de la calidad de la potencia en aplicaciones que involucren la operación de dispositivos típicos de la electrónica de potencia y sus aplicaciones tales como los controladores FACTS.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 JUSTIFICACIÓN**

La mayoría, sino todos los sistemas de suministro eléctrico del mundo están ampliamente interconectados entre si, involucrando conexiones ente regiones, países, hasta conexiones intercontinentales, buscando siempre el objetivo de reducir el costo de la electricidad y mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico.

El sector eléctrico a nivel mundial está atravesando por una gran transformación. Diferentes aspectos como el mercadeo, la escasez de los recursos naturales y el continuo incremento de la demanda de electricidad son algunos de los responsables de este cambio. A medida que se ha venido generando este cambio de rápida evolución, los programas de expansión de los sistemas eléctricos de diferentes países se han visto frustrados por una cantidad de aspectos ambientales, de utilización de los terrenos, y presiones de tipo regulatorio que previene la construcción de nuevas líneas de transmisión y de plantas generadoras.

Analizando las opciones disponibles para maximizar la utilización de los sistemas de transmisión actuales con altos niveles de confiabilidad y estabilidad se concluye que la mejor solución disponible hasta ahora es la de la electrónica de potencia.

Por otro lado, a medida que la transferencia de potencia aumenta, los sistemas se vuelven más complejos en su operación tornándose menos seguros y más propensos a sufrir una contingencia, puesto que involucran grandes flujos de potencia sin un control adecuado, con alta presencia de potencia reactiva en algunas partes del sistema así como permanentes cuellos de botellas lo que conlleva a que no se utilice completamente el potencial del sistema interconectado.

Los sistemas de potencia de hoy día en su mayoría, son controlados mecánicamente. Hay un amplio uso de la microelectrónica, computadores y comunicaciones a alta velocidad destinadas a controlar y proteger los sistemas de transmisión actuales, sin embargo, cuando estas señales de control finalmente llegan al punto en donde se debe realizar la acción, los dispositivos de conmutación son mecánicos los cuales carecen de un control a alta velocidad. Por lo tanto, bajo el punto de vista de la operación dinámica y en estado estable, el sistema es realmente incontrolable. Los planeadores de los sistemas de potencia, operadores e ingenieros han aprendido a vivir con estos problemas y limitaciones mediante una variedad de técnicas ingeniosas tratando de que el sistema opere efectivamente, pero pagando el precio de tener altos márgenes de desaprovechamiento de la capacidad existente.

En los sistemas de potencia AC, debido a la insignificante capacidad de almacenamiento de energía eléctrica, la generación y la carga deben estar balanceadas todo el tiempo haciendo que de una u otra forma el sistema sea autorregulado. Si la generación es menor que la carga, el voltaje y la frecuencia caen, y por lo tanto también la carga cae hasta el punto en que iguala la generación menos las pérdidas por transmisión. Sin embargo, existe un bajo porcentaje en el margen para dicha autorregulación.

Las tecnologías FACTS esencialmente alivian algunas de estas dificultades permitiendo que los diferentes nodos del sistema obtengan el mayor servicio posible de sus sistemas de transmisión mejorando la confiabilidad de la red.

El punto más interesante para los planeadores de los sistemas de potencia es que las tecnologías FACTS abren nuevas oportunidades para controlar el flujo de potencia incrementando la capacidad presente tanto de las líneas existentes como de las nuevas. La posibilidad de que la corriente que fluye a través de una línea de transmisión pueda ser controlada a un precio razonable abre un gran potencial

para incrementar la capacidad de las líneas existentes mediante conductores de mayor calibre, así como el uso de los controladores FACTS para habilitar el correspondiente flujo de potencia a través de una línea ante condiciones nomales y de contingencia.

Estas oportunidades se deben a la habilidad que tienen los FACTS de controlar los parámetros interrelacionados que gobiernan la operación de los sistemas de transmisión incluyendo la impedancia en serie, la impedancia en paralelo, la corriente, el voltaje, el ángulo de fase y las variaciones de frecuencia alrededor de la frecuencia nominal.

## **1.2 OBJETIVO**

Este proyecto propone observar y analizar el comportamiento algunos tipos de FACTS y sus metodologías de modelaje bajo un punto de vista teórico, así como desde el punto de vista de las simulaciones digitales.

## **1.3 SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN AC**

El concepto FACTS está basado en la incorporación de dispositivos de electrónica de potencia y métodos hacia el lado de alta tensión del sistema de transmisión con el fin de hacerlo electrónicamente controlable. (IEEE/CIGRE 1995).

Los FACTS han abierto su campo de acción en el área de la electrónica de potencia apuntando a incrementar la posibilidad de controlar el flujo de potencia en el lado de alta tensión durante estado estable y condiciones transitorias. La nueva realidad de hacer que el flujo de potencia se pueda controlar electrónicamente ha comenzado a alterar la manera como se ha venido diseñando y construyendo las plantas generadoras y los sistemas de transmisión y distribución actuales.

Varios tipos de controladores FACTS se han instalado en el mundo entero. Los más populares son los cambiadores de taps, reguladores de ángulo de fase, los compensadores estáticos de reactivos (SVC), los compensadores en serie controlados por tiristores (TCSC), compensadores estáticos (STATCOM) y los controladores de flujo de potencia unificados (UPFC).

#### **1.4 LIMITANTES INHERENTES DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN**

Las características de un sistema de transmisión dado evolucionan con el tiempo a medida que la carga crece y se agregan plantas de generación. Si los sistemas de transmisión no se mejoran suficientemente, el sistema se vuelve vulnerable ante problemas de estado estable y transitorio haciendo así que el margen para conservar la estabilidad del sistema sea mínimo.

La capacidad de transmisión de potencia de un sistema se afecta por una o más de las siguientes limitaciones dinámicas y de estado estable:

- Estabilidad angular.
- Magnitud de la tensión.
- Límites térmicos.
- Estabilidad transitoria.
- Estabilidad dinámica.

Estos límites definen la potencia eléctrica máxima a ser transmitida sin causarle daños a equipos o al sistema eléctrico. En principio, las limitantes de de la transferencia de potencia pueden ser relevados mediante la adición de nuevas líneas de transmisión y plantas de generación. De manera alterna, los controladores FACTS pueden cumplir con el mismo objetivo sin alterar de manera significativa la configuración de la red actual.

Los beneficios potenciales que se obtienen mediante los FACTS incluyen la reducción de la operación y del costo de inversión en los sistemas de transmisión,

incrementar la seguridad y confiabilidad del sistema, incrementar la capacidad de transferencia de potencia, y mejorar de manera significativa la calidad de la energía entregada a los clientes.

## 1.5 CONTROLADORES FACTS

El control del flujo de potencia ha sido tradicionalmente enmarcado por el control del generador, regulación de tensión mediante cambiadores de taps y transformadores cambiadores de ángulo de fase y plantas compensadoras de reactivos.

Los transformadores cambiadores de fase han sido utilizados con el propósito de regular la potencia activa en los sistemas de transmisión AC. En la práctica, algunos son operados permanentemente con ángulos fijos pero en la mayoría de los casos se utiliza la ventaja de estos de cambiar fácilmente los taps.

Los reactores en serie son utilizados para reducir el flujo de potencia y los niveles de corto circuito en puntos designados de la red. De manera recíproca los condensadores en serie son utilizados para "*disminuir eléctricamente*" la longitud de las líneas incrementando así el flujo de potencia. En general, la compensación en serie es conmutada "on" y "off" de acuerdo con las condiciones de carga y de voltaje existentes. Por ejemplo, en algunos sistemas de potencia, la compensación capacitiva en serie es desviada (bypassed) durante la presencia de mínima carga para evitar sobretensiones en la línea de transmisión debido al excesivo efecto capacitivo que se pueda presentar en el sistema. De manera análoga, la compensación capacitiva en serie es utilizada al máximo durante condiciones de carga máxima buscando incrementar la transferencia de potencia evitando sobrecargas en la línea.

Hasta hace algunos años, estas soluciones servían las necesidades de los sistemas eléctricos, sin embargo, la desregulación del sector y las dificultades de



obtener derechos para implementar nuevas líneas de transmisión han creado el momento de adoptar unos nuevos y radicales desarrollos tecnológicos basados en alta tensión.

Hace unos pocos años atrás, la industria manufacturera en compañía con organizaciones dedicadas a la investigación se embarcaron en un programa ambicioso con el fin de desarrollar nuevas plantas de generación equipadas con elementos de electrónica de potencia. El impacto de esos desarrollos ha hecho que este tipo de tecnología se haya extendido a las tres áreas del negocio llamadas generación, transmisión y distribución.

Los primeros desarrollos de las tecnologías FACTS constituían versiones de dispositivos electrónicos capaces de proveerle a los transformadores la capacidad de realizar cambios de fase y de tensión mediante un control directo de sus taps. Estos controladores junto con la compensación electrónica en serie pueden ser considerados como los primeros desarrollos de FACTS.

El controlador unificado de flujo de potencia (UPFC), el compensador estático (STATCOM) y el controlador de potencia inter-fase son los más recientes desarrollos. Sus algoritmos de control son más sofisticados que los que tenían los primeros desarrollos de controladores FACTS. Estos últimos pueden ser considerados como una segunda generación de FACTS. Los condensadores conmutados mediante tiristores o TSC, los reactores controlados mediante tiristores o TCR y los convertidores de corriente alterna a continua HVDC han existido por muchos años, aunque sus características operacionales residen en estos controladores FACTS.

Existe una gran cantidad de controladores FACTS. La mayoría se diseñan para cumplir un importante papel tanto en condiciones de estado estable como transitorias, pero algunos han sido específicamente diseñados para operar bajo condiciones transitorias.

Los controladores FACTS diseñados para operación en estado estable son (IEEE/CIGRE1995):

- Cambiadores de fase controlados por tiristores (PS): Este controlador es un transformador cambiador de fase electrónicamente controlado de tal forma que los tiristores generan una rápida respuesta para el cambio de fase.
- Cambiador de tap (LTC): Este puede ser considerado como un controlador FACTS, si el cambio de los taps está gobernado por tiristores.
- Reactor controlado por tiristores (TCR): Este es un reactor controlado por tiristores conectado en paralelo, la reactancia efectiva puede variar en un gran rango mediante una conducción parcial de los tiristores.
- Condensador en serie controlado por tiristores (TCSC): Este controlador consiste de un condensador en serie con el sistema, en paralelo con un reactor controlado por tiristores de forma que provea compensación en serie.
- Controlador de potencia interfase (IPC): Este es un controlador conectado en serie a dos barrajes en paralelo, uno inductivo y otro capacitivo, sujetos a corrimiento de fase y magnitudes de tensión. El control de potencia activa es impuesto de manera independiente o mediante un ajuste coordinado de las dos fuentes desfasadas y las dos reactancias variables. El control de la potencia reactiva es independiente del control de la potencia activa.
- Compensador estático de reactivos (STATCOM): Este corresponde a un condensador de estado sólido conectado en paralelo con el sistema AC. La corriente de salida se ajusta mediante un control de magnitud de tensión así como la potencia reactiva inyectada al sistema.
- Controlador en serie de estado sólido (SSSC): Este controlador es similar al STATCOM, pero es conectado en serie con el sistema AC. La corriente de salida, la magnitud de la tensión y la potencia reactiva inyectada son controlados e inyectados a través del transformador conectado en serie.

- Controlador de flujo de potencia unificado (UPFC): Este consiste de un compensador en serie estático de estado sólido (sssc) y un STATCOM, conectados de manera que comparten un condensador DC. El UPFC, es capaz de controlar concurrentemente o selectivamente la impedancia de la línea de transmisión, la magnitud de la tensión y el flujo de potencia activa y reactiva que fluye a través de este. Puede proveer también de manera independiente compensación de reactivos en paralelo.
- Compensador estático de reactivos: Este corresponde a una fuente de potencia reactiva conectado en paralelo.
- Enlace de transmisión en continua a alta tensión (HVDC): Este es un controlador que comprende una estación de rectificación y una estación de inversión unidos a través de una configuración back-to-back o a través de un enlace dc. Los convertidores pueden ser compuestos ya sea de tiristores convencionales o de la nueva generación de dispositivos semiconductores como tiristores con compuerta de apagado (GTO's) o transistores bipolares de compuesta a aislada (IGBT's).

La clasificación de los controladores FACTS enfocados a la solución de problemas de estado estable se observa en la tabla 1.

PROBLEMA DE OPERACION	ACCION CORRECTIVA	CONTROLADOR FACTS
<b>Límites de tensión</b>		
Baja tensión a carga pesada	Proveer potencia reactiva	STATCOM, SVC
Alta tensión a baja carga	Absorbe potencia reactiva	STATCOM, SVC, TCR
Alta tensión seguida de contingencia	Absorbe potencia reactiva, prevenir sobrecarga	STATCOM, SVC, TCR
Baja tensión seguida de contingencia	Proveer potencia reactiva, prevenir sobrecarga	STATCOM, SVC
<b>Límites térmicos</b>		
Circuito de transmisión sobrecargado	Reducir sobrecarga	TCSC, SSSC, UPFC, IPC, PS
Tropezo de circuitos en paralelo	Limitar la carga circuital	TCSC, SSSC, UPFC, IPC, PS
<b>Loops de corriente</b>		
Líneas en paralelo compartiendo carga	Ajuste de la reactancia en serie	IPC, SSSC, UPFC, TCSC, PS
Flujo de potencia postfalla	Reacomodar la red o uso de las acciones de límite térmico	IPC, SSSC, UPFC, TCSC, PS
Dirección de flujo de potencia	Ajustar el ángulo de fase	IPC, SSSC, UPFC, PS

**Tabla 1. Clasificación de los controladores FACTS enfocados a la solución de problemas de estado estable**

## **1.6 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA EN ESTADO ESTABLE**

Desde el punto de vista operacional, la tecnología FACTS está relacionada con la habilidad de controlar, de una manera adaptativa, el flujo de potencia a través de la red, donde antes del advenimiento de los FACTS, el control a altas velocidades era restringido. La habilidad para controlar la impedancia de la línea y las magnitudes de voltaje y ángulos de fase tanto en el lado de recibo como de envío en una línea de transmisión sin un retardo considerable, ha incrementado considerablemente la seguridad del sistema. Bajo este contexto, los programas computacionales de flujos de potencia con controladores FACTS se han constituido en herramientas poderosas para los ingenieros y planeadores de los sistemas de potencia, ya que permiten evaluar técnica y económicamente los beneficios de un amplio rango de alternativas y soluciones que ofrece la tecnología FACTS.

## 2. MODELAMIENTO DE LOS CONTROLADORES FACTS

### 2.1 ASPECTOS GENERALES

Existen dos clases grandes de aplicaciones de la electrónica de potencia que han emergido de manera significativa en los últimos años. Estas son el control de la potencia activa y reactiva, y la mejora de la calidad de la potencia. La primera aplicación se conoce como FACTS, donde la última tecnología de dispositivos de electrónica de potencia se encarga de controlar electrónicamente el lado de alta tensión de la red. La segunda área de aplicación es el “custom power”, el cual se enfoca a redes de baja tensión o distribución y ha sido una tecnología creada en respuesta a las múltiples quejas y reportes de una pobre calidad de la potencia y confiabilidad de las industrias, empresas, oficinas y hogares. Se espera que cuando el desarrollo de esta tecnología haya tomado lugar, los usuarios se verán expuestos a una mejor regulación de voltaje, mínimas interrupciones, bajos armónicos de tensión. La figura 1 muestra la conexión de plantas generadoras en un sistema de transmisión interconectado, donde se observa claramente la frontera entre el sistema de transmisión y el de distribución.

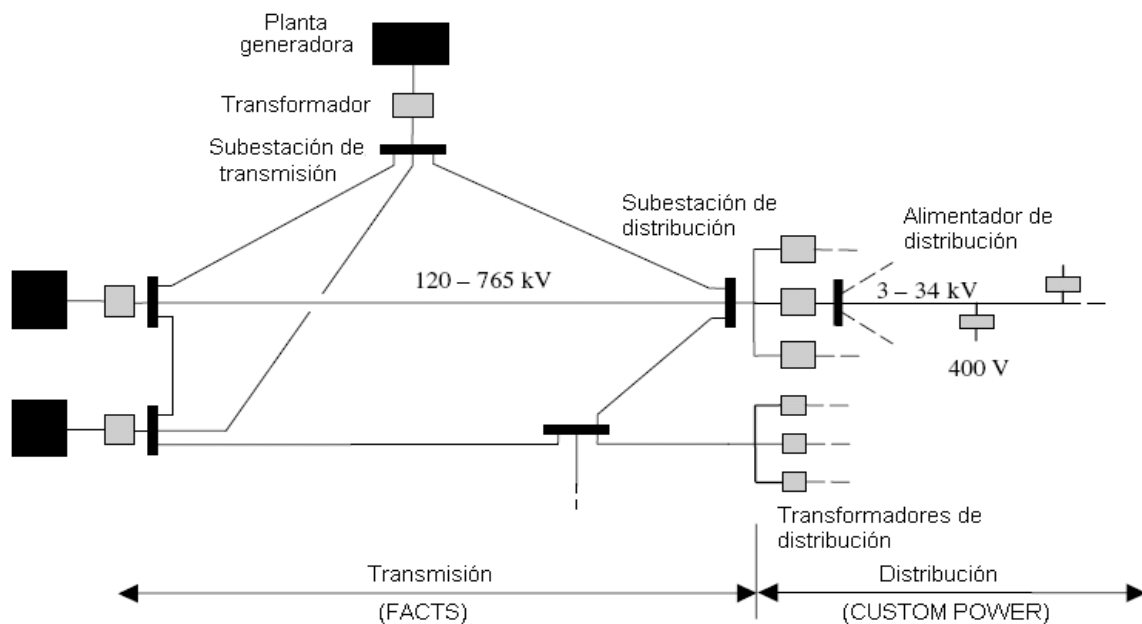


Figura 1. Diagrama simplificado de un sistema de potencia

Los beneficios obtenidos mediante la instalación de FACTS en los sistemas de transmisión, son similares a los que obtenidos en los sistemas de distribución mediante equipos de custom power.

Tradicionalmente se ha buscado interconectar en grandes mallas los sistemas de transmisión buscando incrementar la interconexión entre generadores y cargas mediante un gran sistema integrado. La motivación ha sido tomar ventaja de la diversidad existente entre las cargas habilitando una mejor utilización de los recursos de energía primaria.

La interconexión se ha visto modificada por una tecnología basada en semiconductores (Arrillaga, 1998). Los sistemas de transmisión en corriente continua basados en tiristores (HVDC) han permitido interconectar sistemas a diferentes frecuencias, por ejemplo 50/60Hz, así mismo han permitido interconectar sistemas separados por el mar así como interconexiones de un sistema de potencia débil con uno sistema de potencia fuerte.

La más reciente tecnología de HVDC es el basado en convertidores de tensión de estado sólido el cual habilita un control independiente y rápido de las potencias activa y reactiva. (McMurray, 1987).

La electrónica de potencia es una tecnología que ha afectado todos los aspectos de la red, no sólo para la transmisión HVDC sino también sistemas de transmisión AC y sistemas de distribución. Los mercados regulados han impuesto fuertes demandas de plantas generadoras aumentando su desgaste y la existencia de plantas generadoras de muchos tipos. Para aliviar estos problemas, los controladores de electrónica de potencia han sido desarrollados para que la operación de los generadores aumente su confiabilidad en el mercado.

El compensador en serie controlado por tiristores (TCSC) es usado para mitigar resonancias subsíncronas y para disminuir las oscilaciones del sistema. Sin embargo ha sido tema de discusión el aspecto de que la función primaria del TCSC y el de su dispositivo equivalente controlado mecánicamente, el banco de condensadores, es reducir la longitud eléctrica de la línea de transmisión compensada. Entonces el objetivo es aumentar la transferencia de potencia significativamente, pero a su vez, incrementando los márgenes de estabilidad. El TCSC hace parte del lado de los FACTS en la figura 1.

Para propósitos aún más prácticos el compensador de reactivos estático basado en tiristores (SVC) ha hecho redundante la existencia del compensador sincrónico, excepto donde se necesita incrementar el nivel de cortocircuito de modo que se obtenga un rápido soporte de reactivos (Miller, 1982). Sin embargo, a medida que avanza la tecnología de la electrónica de potencia, el SVC se va a ver reemplazado por dispositivos basados en fuentes de tensión convertoras (VSC). Estos son conocidos como STATCOM's (static compensators) y proveen todas las funciones de los SVC a una velocidad mucho mayor (IEEE/CIGRE 1995). Es más compacto y requiere sólo una fracción del terreno que necesita un SVC.

El STATCOM es esencialmente un VSC interconectado con el sistema AC mediante una interfase compuesta de un transformador conectado en paralelo. El VSC es el bloque básico de la nueva generación de controladores de electrónica de potencia que ha emergido desde los FACTS hasta los inicios del custom power (Ignoran and Gyugyi, 2000). En la transmisión de alto voltaje, los equipos FACTS más populares son el STATCOM, el controlador de potencia unificado (UPFC) y el HVDC-VSC. A niveles de media tensión en sistemas de distribución el SVC se ha convertido en el núcleo de los equipos empleados para el custom power. Como son el STATCOM de distribución, el restaurador dinámico de tensión y los filtros activos.

## **2.2 FILOSOFÍA DEL MODELADO**

El objetivo principal de este libro, es obtener de manera precisa los principales aspectos del modelado de diferentes tecnologías de FACTS, destacando su comportamiento ante disturbios típicos en un sistema de potencia como son la inestabilidad de voltaje y las fallas a tierra, siguiendo de manera precisa el comportamiento de las diferentes variables de los elementos del algoritmo de control en el tiempo. Los modelos presentados en este libro hacen mayor referencia a los algoritmos de control y a su respuesta ante los diferentes disturbios en vez de a la estructura física de los equipos.

## **2.3 CONTROLADORES BASADOS EN TIRISTORES CONVENCIONALES**

Los circuitos de electrónica de potencia que usan tiristores convencionales han sido ampliamente utilizados en aplicaciones en los sistemas de transmisión desde 1970. La primera aplicación se hizo en el área de la transmisión HVDC, pero desde que se hizo necesaria la compensación de potencia reactiva usando inductores y capacitores controlados rápidamente se comenzaron a incluir el resto de controladores. Más recientemente, los compensadores basados en tiristores de rápida respuesta han sido usados para variar la longitud eléctrica de las líneas de transmisión sin un retraso considerable, en vez de los condensadores en serie los cuales eran mecánicamente controlados en sistemas de distribución

En esta sección se describirá el funcionamiento de los controladores basados en tiristores como el reactor controlado por tiristores (TCR), el SVC y el TCSC.

En la figura 2, se observan los esquemáticos de los diferentes controladores basados en tiristores convencionales así como la parte de la ecuación de potencia que estos gobiernan.



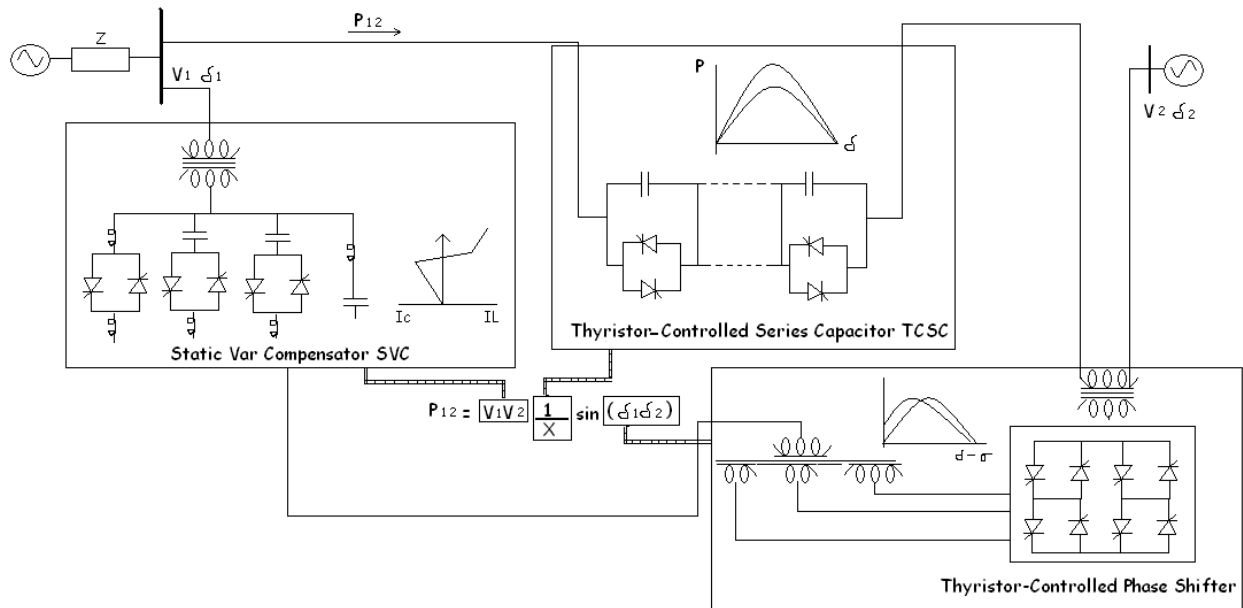
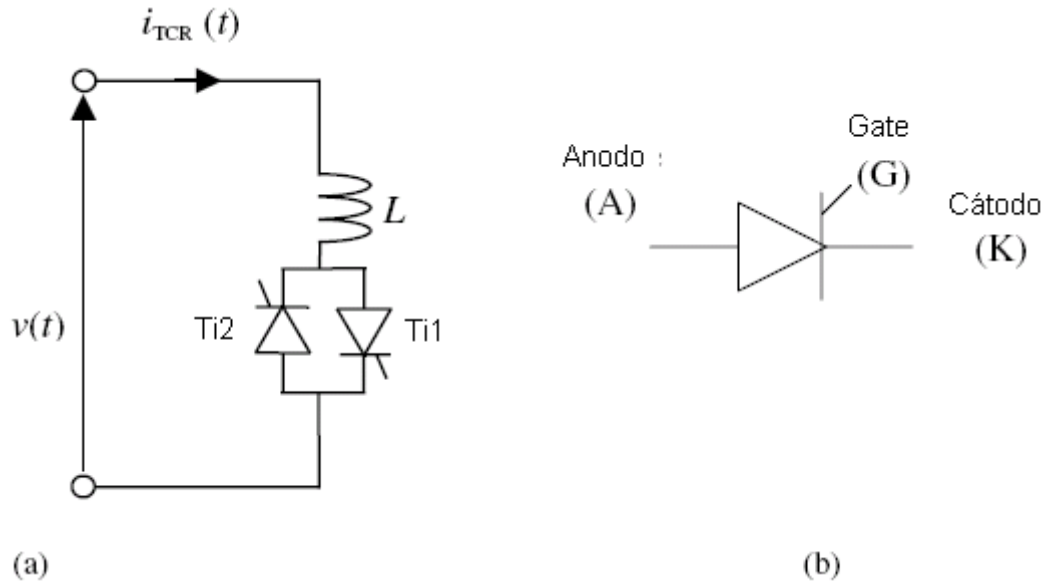


Figura 2. Controladores basados en tiristores convencionales

### 2.3.1 EL REACTOR CONTROLADO POR TIRISTORES

Los componentes principales que conforman un TCR básico se muestran en la figura 2(a). El elemento controlable es un par de tiristores dispuestos en antiparalelo, Tr1 y Tr2, los cuales conducen en medios ciclos alternados de la frecuencia de la fuente. El símbolo circuital del tiristor se muestra en la figura 2(b).



**Figura 3. Circuito basado en tiristores (a) Reactor básico controlado por tiristores (TCR); (b) Símbolo circuital del tiristor**

La acción principal del controlador del tiristor sobre el reactor lineal es habilitar al reactor para que actúe como una susceptancia controlable en el sentido inductivo, el cual es función del ángulo de disparo. Aunque esta acción no es del todo perfecta, ya que el TCR al mantiene su frecuencia de estado estable a expensas de la generación de armónicos a menos que se provea conducción total.

Primero, consideremos el caso en que no se genera distorsión armónica por el TCR, el cual toma lugar cuando los tiristores se encuentran en estado de conducción, precisamente en el pico de la onda de tensión suministrada. El reactor conduce plenamente y uno podría pensar que el tiristor está en corto circuito. El reactor contiene una pequeña resistencia y la corriente es esencialmente senoidal e inductiva, atrasando al voltaje por casi  $90^\circ$ . Esto se ilustra en la figura 3 en donde se observan el período del voltaje y la corriente. Cabe mencionar que esta condición corresponde a un ángulo de disparo de  $90^\circ$ , que corresponde al cruce por cero de la onda de corriente medido con referencia al cruce por cero de la onda de tensión. La relación entre el ángulo de disparo  $\alpha$  y el ángulo de conducción  $\sigma$  está dada por:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad \text{Ec. 1}$$

La conducción parcial se logra cuando el ángulo de disparo se encuentra en el rango  $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ . Esta situación se ilustra en las figuras 4, 5 y 6 donde se observa la corriente del TCR en función del ángulo de disparo.

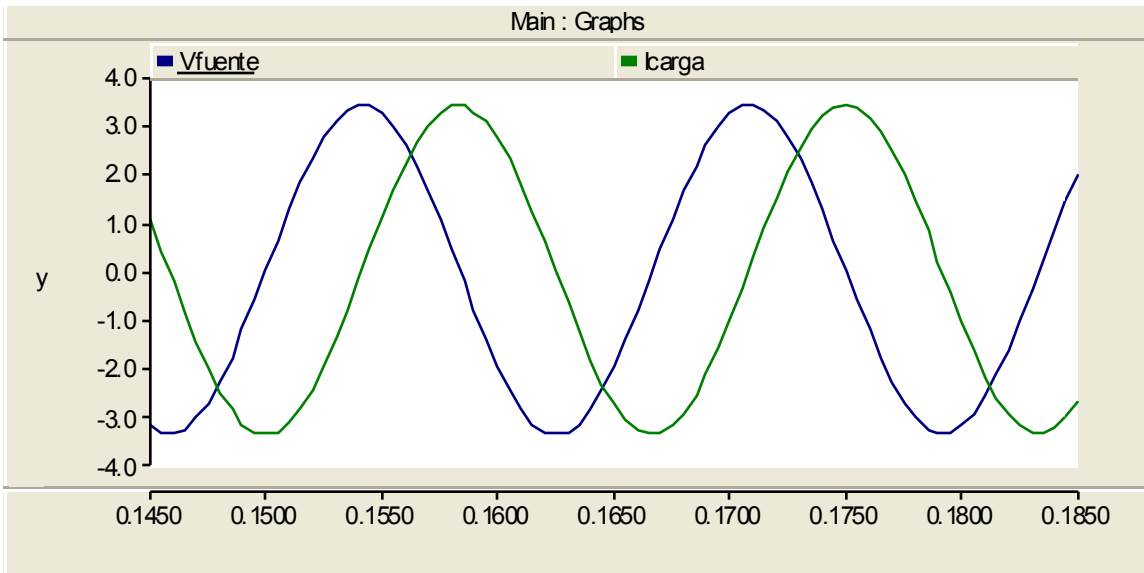


Figura 4. Formas de onda de tensión y de corriente en el TCR para  $\alpha = 90^\circ$

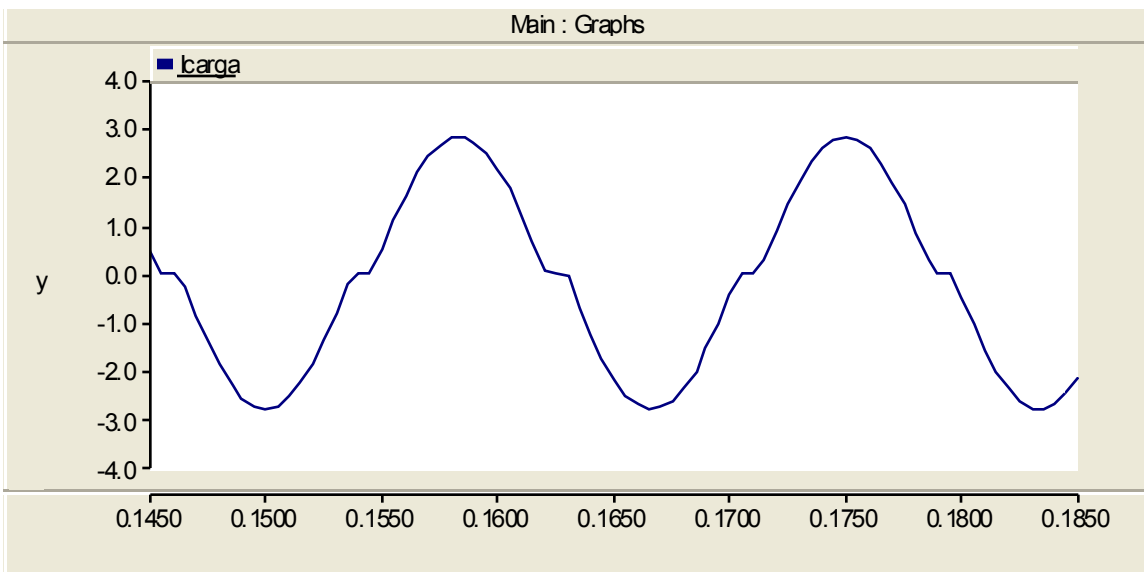


Figura 5. Forma de onda de corriente en el TCR para  $\alpha = 100^\circ$

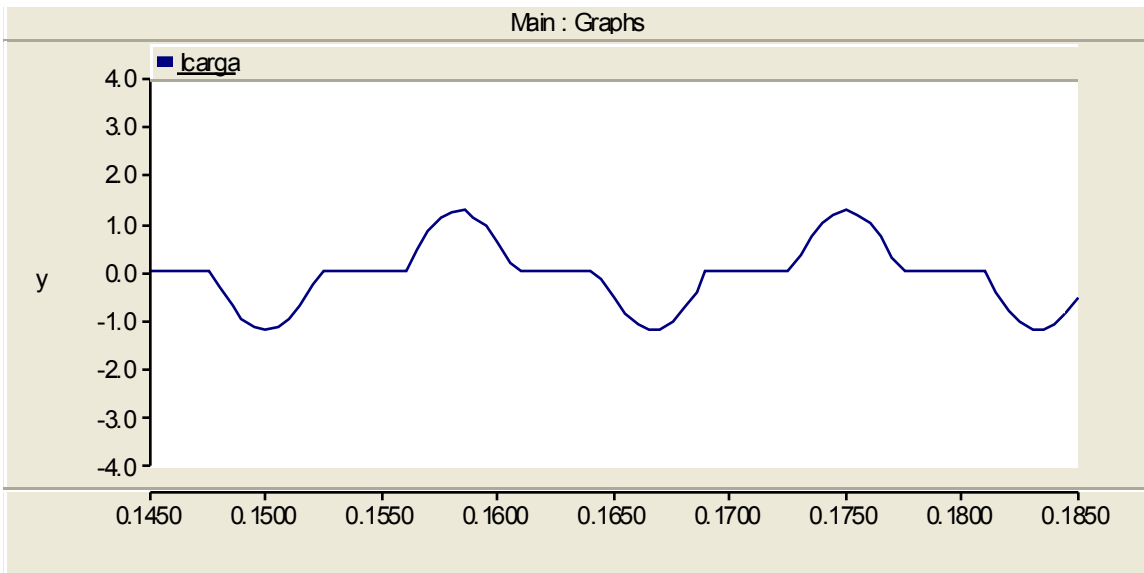


Figura 6. Forma de onda de corriente en el TCR para  $\alpha = 130^\circ$

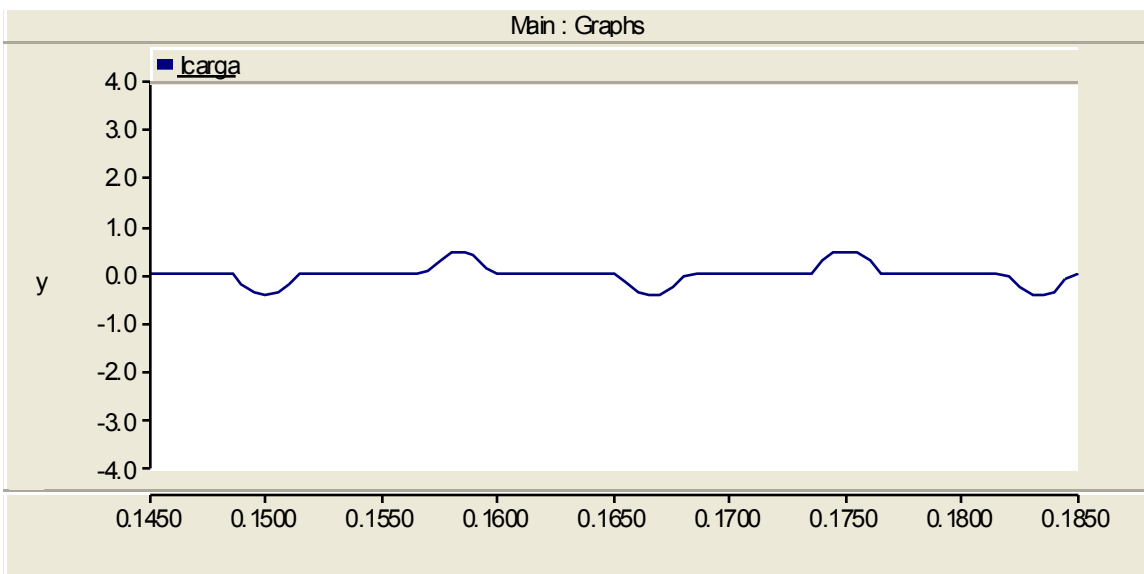


Figura 7. Forma de onda de corriente en el TCR para  $\alpha = 150^\circ$

Como se observa, al incrementar el valor del ángulo de disparo por encima de  $90^\circ$  la forma de onda de corriente comienza a ser no senoidal reduciéndose la magnitud de la componente fundamental de la frecuencia. Esto es equivalente a incrementar la inductancia del reactor reduciendo su habilidad de inyectar potencia reactiva a la red en el punto de conexión.

Para la condición de tensión mostrada en la figura 3 con  $v(t) = \sqrt{2} \sin \omega t$ , la corriente instantánea  $i_{TCR}(t)$  está dada por:

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2} V \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2} V}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \text{Ec. 2}$$

en el intervalo  $\alpha \leq \omega t \leq (\alpha + \sigma)$ , y es cero en otra parte.  $V$  es el valor de tensión RMS, y  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia del sistema.

Usando análisis de Fourier, se obtiene una expresión para frecuencia fundamental de la corriente  $I_{TCRf1}$

$$I_{TCRf1} = \frac{V}{j\omega L \pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \quad \text{Ec. 3}$$

Si los ángulos de disparo de Ti1 y Ti2 están balanceados, no se presentan armónicos pares y el valor RMS del  $h^o$  armónico impar de corriente está dado por:

$$I_{TCR,h} = \frac{4V}{j\omega L \pi} \left[ \frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos \alpha \frac{\sinh \alpha}{h} \right] \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $h = 3,5,7,9,11,13,\dots$

Las instalaciones de TCR en los sistemas de potencia son trifásicas y usan filtros y otras técnicas para cancelar o prevenir que las corrientes armónicas ingresen al lado de alta tensión. Los inductores TCR también tienen una pequeña componente resistiva. Por ejemplo, la figura 7 muestra un TCR trifásico conectado en delta. Esta topología usa seis grupos de tiristores y es comúnmente conocida como TCR de seis pulsos.

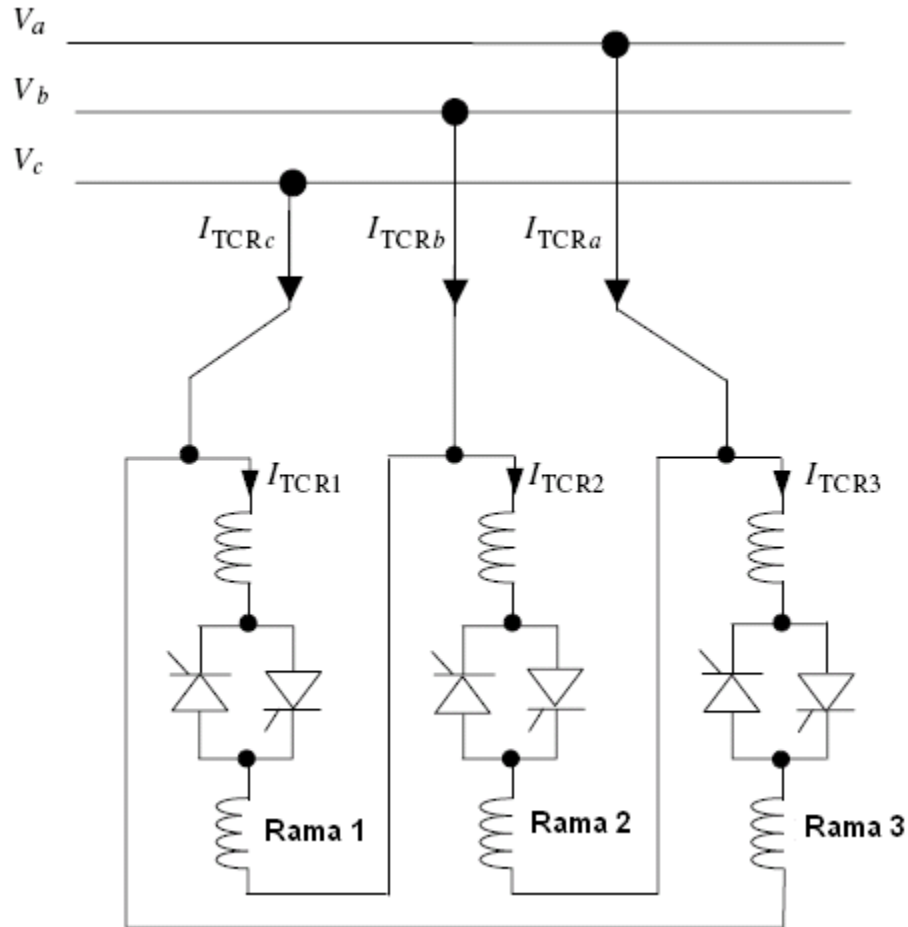


Figura 8. TCR trifásico

En esta configuración y bajo condiciones de operación balanceadas, las corrientes armónicas triples generadas por las tres ramas TCR no llegan a la red externa, sólo los armónicos de orden 5, 7, 11, 13,... aún más, si el TCR se divide en dos unidades de igual capacidad y conectados en el lado de baja tensión del transformador, uno conectado en estrella y el otro en delta, quedarían sólo los armónicos 11, 13.... Esa configuración es conocida como TCR de doce pulsos. Los armónicos 11 y 13 normalmente son eliminados mediante filtros. (Miller, 1982).

Asumiendo que la eliminación de los armónicos no es una prioridad, de la ecuación 3 se observa fácilmente que esta puede ser interpretada como la susceptancia equivalente del TCR mostrado en la figura 2, el cual corresponde a

una función del parámetro controlable  $\alpha$ . Teniendo esto en cuenta, la ecuación 3 puede ser expresada como:

$$I_{TCR} = -jB_{TCR}V \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

$$B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\omega L \pi} \quad \text{Ec. 6}$$

La representación trifásica nodal de la admitancia de un TCR se puede obtener por medio de transformaciones lineales. Por ejemplo, usando la ecuación 6, el caso del TCR de seis pulsos mostrado en la figura 7 se tendría los siguientes parámetros.

$$\begin{bmatrix} I_{TCR1} \\ I_{TCR2} \\ I_{TCR3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -jB_{TCR1} & 0 & 0 \\ 0 & -jB_{TCR2} & 0 \\ 0 & 0 & -jB_{TCR3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}, \quad \text{Ec. 7}$$

Y las matrices de conectividad para las fases a, b y c serían:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{(\pi/6)}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \text{Ec. 8}$$

$$\begin{bmatrix} I_{TCRa} \\ I_{TCRb} \\ I_{TCRc} \end{bmatrix} = \frac{(-\pi/6)}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{TCR1} \\ I_{TCR2} \\ I_{TCR3} \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 9}$$

Substituyendo la ecuación 8 en la ecuación 7 y el resultado intermedio en la ecuación 9, se obtendría el circuito equivalente para el TCR de seis pulsos.

$$\begin{bmatrix} I_{TCR a} \\ I_{TCR b} \\ I_{TCR c} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -j(B_{TCR1} + B_{TCR3}) & jB_{TCR1} & jB_{TCR3} \\ jB_{TCR1} & -j(B_{TCR1} + B_{TCR2}) & jB_{TCR2} \\ jB_{TCR3} & jB_{TCR2} & -j(B_{TCR2} + B_{TCR3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 10}$$

Como condición especial, si las ramas de las tres fases en el TCR tienen igual susceptancia ( $B_{TCR1} = B_{TCR2} = B_{TCR3} = B_{TCR}$ ), algo que es posible lograr mediante un cuidadoso diseño, la ecuación 10 se simplificaría a:

$$\begin{bmatrix} I_{TCR a} \\ I_{TCR b} \\ I_{TCR c} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -j2B_{TCR} & jB_{TCR} & jB_{TCR} \\ jB_{TCR} & -j2B_{TCR} & jB_{TCR} \\ jB_{TCR} & jB_{TCR} & -j2B_{TCR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 11}$$

Bajo esta situación, se vuelve factible utilizar una nueva representación, el plano de referencia mediante las componentes simétricas. Tres componentes de secuencia son asociadas a los circuitos trifásicos, llamadas cero (0), positiva (1) y negativa (2). La transformación de las coordenadas de fase a las coordenadas de secuencia teniendo en cuenta la matriz de componentes simétricas  $T_s$  y su inversa, la ecuación 11 se convierte en:

$$\begin{bmatrix} I_{TCR(0)} \\ I_{TCR(1)} \\ I_{TCR(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -jB_{TCR} & 0 \\ 0 & 0 & -jB_{TCR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(0)} \\ V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 12}$$

Como era de esperarse, no hay corriente de secuencia cero que pueda fluir en este circuito dada la naturaleza de la conexión en delta del TCR. Los circuitos de secuencia positiva (1) y la secuencia negativa (2) presentan igual impedancia (susceptancia) a los flujos de sus respectivas corrientes. También se observa en la ecuación 12 que no existen secuencias de acoplamiento.



### 2.3.2 ALGORITMO DE CONTROL DEL TCR

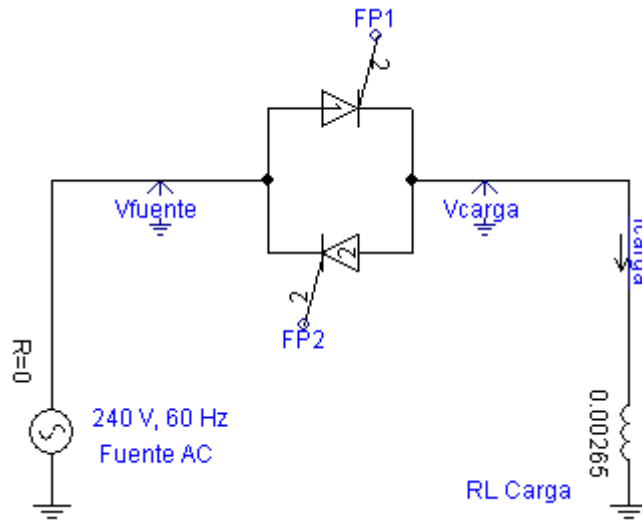


Figura 9. Esquemático del TCR en PSCAD.

En la figura 8 se muestra el esquemático de un TCR en PSCAD. Las señales FP1 y FP2 corresponden a los pulsos de disparo que gobiernan el TCR. Estos son los encargados de transmitir toda la información de control dada por el ángulo de disparo  $\alpha$ .

Estos trenes de pulsos de disparo deben ser gobernados por un algoritmo de control, que de alguna forma debe generar un pulso de un ancho determinado cada medio ciclo de la onda de tensión.

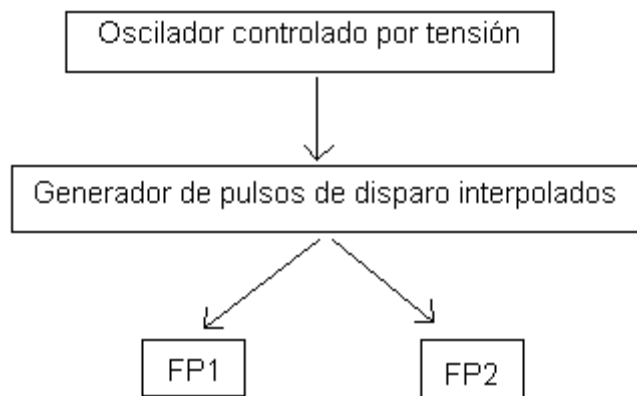
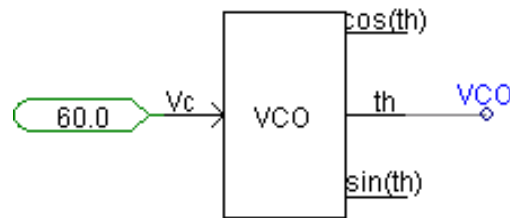


Figura 10. Algoritmo básico de control del TCR.

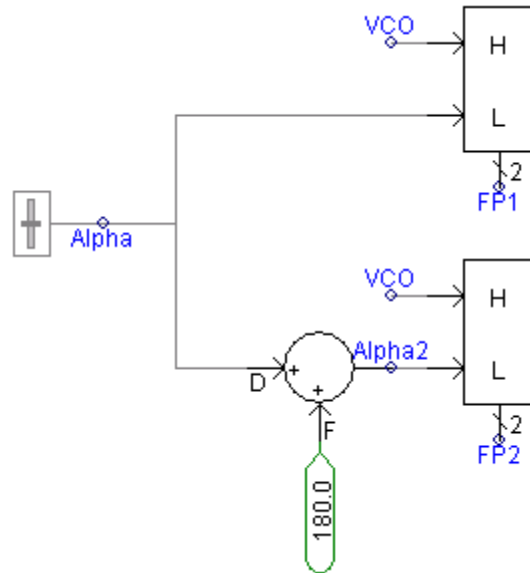
En la figura 9 se tiene el oscilador controlado por tensión (VCO). Para una entrada en Hz, genera una salida tipo rampa entre 0 y 360 grados. Se usa como señal de referencia para la generación de los pulsos de disparo.



**Figura 11. Oscilador controlado por tensión.**

En la figura 11, se observa el control generador de pulsos de disparo, este se compone de dos generadores de pulsos interpolados los cuales arrojan las señales FP1 y FP2 las cuales se componen de un arreglo de dos elementos, la primera posición del arreglo corresponde a una señal de 0 o 1 correspondiente a la salida actual del pulso de disparo, la segunda posición, es la información relativa al tiempo de duración de cada pulso. Este dispositivo recibe dos entradas alta (H) y baja (L). La entrada baja (L) corresponde al ángulo de disparo y la entrada alta (H) corresponde a la salida del oscilador controlado por tensión.

Al ángulo de disparo del segundo generador de pulsos de disparo, que corresponde al tiristor 2, debe tener un desfase de  $180^{\circ}$  con relación al ángulo de disparo del primer generador, con el fin de obtener los pulsos de disparo para el medio ciclo negativo de la onda.



**Figura 12. Control generador de pulsos de disparo.**

En la figura 12 se observa, el resultado de la simulación de un TCR, con un ángulo de disparo de  $120^{\circ}$ . En la primera gráfica del marco, se observan las formas de onda de tensión en el inductor y en la fuente.

En la segunda gráfica se observa también la corriente de carga, que como se explicó anteriormente corresponde a una señal de corriente no senoidal.

En la tercera gráfica se observa la salida del oscilador controlado por tensión, que corresponde a una señal tipo rampa que oscila entre  $0^{\circ}$  y  $360^{\circ}$ . A su vez se observan los valores de los ángulos de disparo para ambos tiristores, que corresponden a alfa1 ( $120^{\circ}$ ) y a alfa2 ( $120^{\circ}+180^{\circ}=360^{\circ}$ ).

Por último se observan los pulsos de disparo FP1 y FP2 correspondientes a cada tiristor.

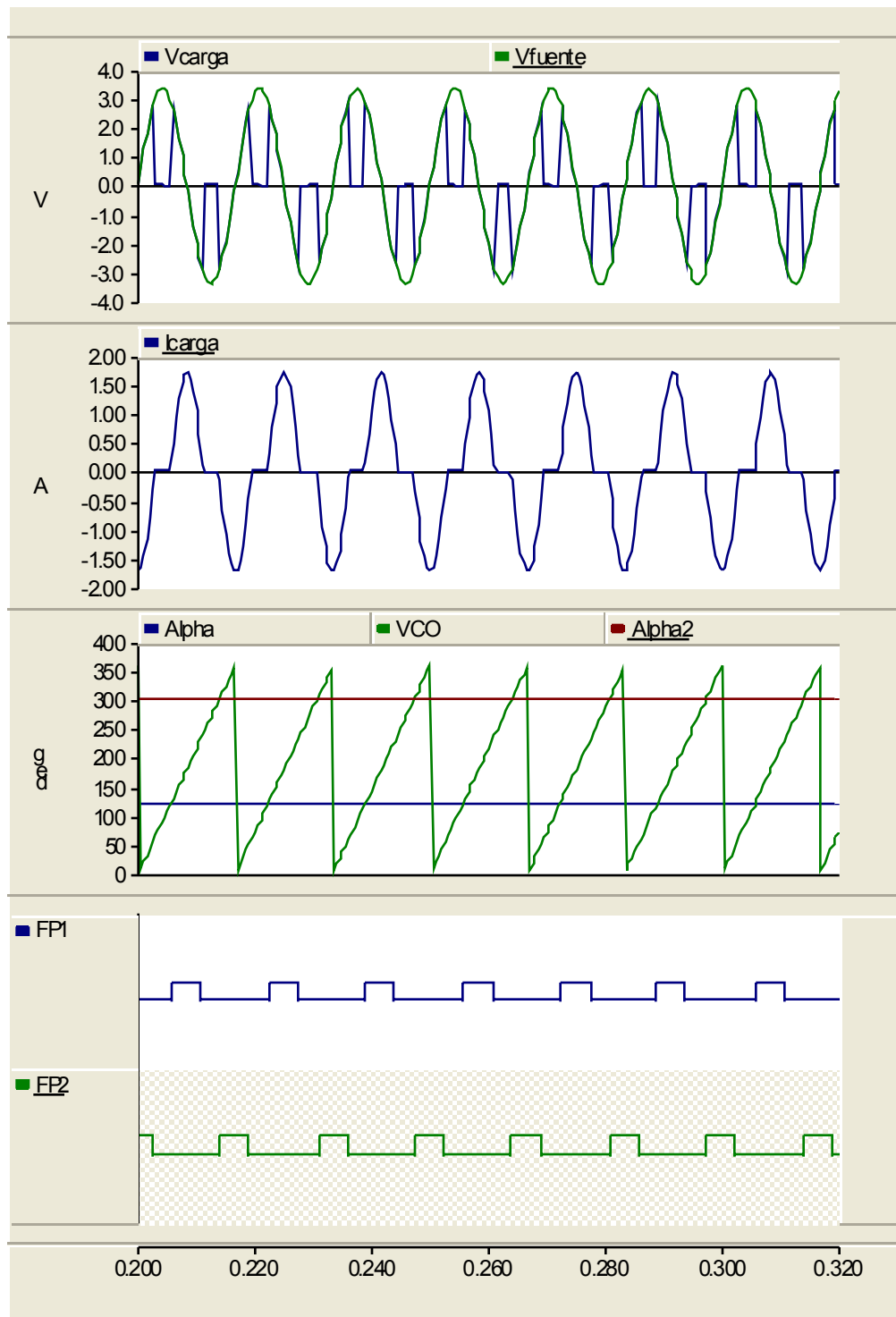


Figura 13. Control del TCR en PSCAD.

### 2.3.3 EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)

El SVC consiste de un TCR en paralelo con un banco de condensadores. Desde el punto de vista operacional, el SVC se comporta como una reactancia variable conectada en paralelo la cual genera o absorbe potencia reactiva de manera que regula la magnitud de la tensión en el punto de conexión con el sistema AC. Ha sido utilizado para proveer potencia reactiva y regulación de tensión de una manera rápida. El control del ángulo de disparo del tiristor habilita al SVC para tener una respuesta casi instantánea.

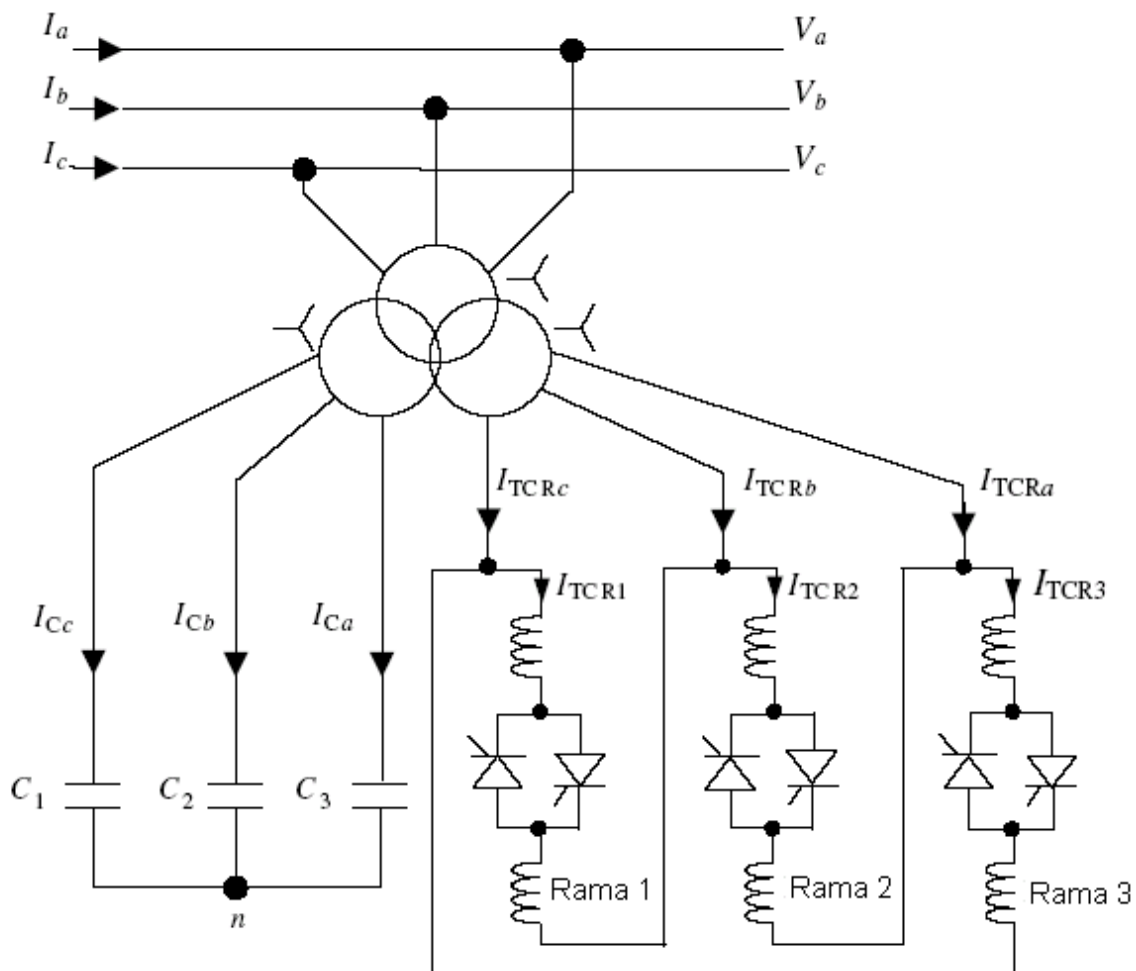


Figura 14. Compensador estático de reactivos (SVC) trifásico compuesto de capacitores fijos y reactores controlados por tiristores.

La representación circuital de un SVC se muestra en la figura 13, donde se utiliza un transformador trifásico tri-devanado se utiliza como interfase entre el SVC y el barraje de alta tensión. El transformador tiene dos devanados secundarios idénticos: uno es utilizado para conectar en delta el TCR de seis pulsos y el otro para conectar en estrella el banco de condensadores trifásico.

La admitancia nodal del banco de condensadores, puede ser expresado desde el punto de vista de la conexión en estrella, la cual no está aterrizada. Sin embargo, es más ventajoso realizar una reducción de Kron para obtener un equivalente reducido, en donde sólo se tendrán los parámetros a, b y c de las fases.

Para un caso general, cuando  $B_{C1} \neq B_{C2} \neq B_{C3}$  y después de haber realizado la reducción de Kron, el modelo equivalente reducido del banco de condensadores es

$$\begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\left(B_{C1} - \frac{B_{C1}^2}{\Delta B_C}\right) & -j\frac{B_{C2}B_{C1}}{\Delta B_C} & -j\frac{B_{C3}B_{C1}}{\Delta B_C} \\ -j\frac{B_{C1}B_{C2}}{\Delta B_C} & j\left(B_{C2} - \frac{B_{C2}^2}{\Delta B_C}\right) & -j\frac{B_{C3}B_{C2}}{\Delta B_C} \\ -j\frac{B_{C1}B_{C3}}{\Delta B_C} & -j\frac{B_{C2}B_{C3}}{\Delta B_C} & j\left(B_{C3} - \frac{B_{C3}^2}{\Delta B_C}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \text{ Ec. 13}$$

Donde

$$\left. \begin{aligned} \Delta B_C &= B_{C1} + B_{C2} + B_{C3}, \\ B_{C1} &= \omega C_1, \\ B_{C2} &= \omega C_2, \\ B_{C3} &= \omega C_3. \end{aligned} \right\} \text{ Ec. 14}$$

Si las tres ramas en los bancos de condensadores tienen susceptancias equivalentes  $B_{C1} = B_{C2} = B_{C3} = B_C$ , entonces la ecuación 13 se simplifica a:

$$\begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} j2B_C & -jB_C & -jB_C \\ -jB_C & j2B_C & -jB_C \\ -jB_C & -jB_C & j2B_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}. \text{ Ec. 15}$$

La expresión más general para el SVC se obtiene al sumar las ecuaciones 10 y 13, donde se obtiene un modelo que permitiría considerar los posibles desbalances en el SVC. Una expresión aún más condicionada, pero aún útil es la que se obtiene de las ecuaciones 11 y 15.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{SVCa} \\ I_{SVCb} \\ I_{SVCc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{Ca} \\ I_{Cb} \\ I_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{TCRa} \\ I_{TCRb} \\ I_{TCRc} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} j2(B_C - B_{TCR}) & -j(B_C - B_{TCR}) & -j(B_C - B_{TCR}) \\ -j(B_C - B_{TCR}) & j2(B_C - B_{TCR}) & -j(B_C - B_{TCR}) \\ -j(B_C - B_{TCR}) & -j(B_C - B_{TCR}) & j2(B_C - B_{TCR}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 16} \end{aligned}$$

Aplicando la matriz de componentes simétricas  $T_s$  y su inversa en la ecuación 16, se obtiene el siguiente resultado.

$$\begin{bmatrix} I_{SVC(0)} \\ I_{SVC(1)} \\ I_{SVC(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & j(B_C - B_{TCR}) & 0 \\ 0 & 0 & j(B_C - B_{TCR}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(0)} \\ V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 17}$$

Similar al TCR, no podría circular corriente de secuencia cero en el circuito del SVC en el punto de conexión en estrella si el banco de condensadores no está aterrizado. Las secuencias positivas y negativas contienen iguales impedancias.

$$I_{SVC(1)} = jB_{svc} V_{(1)} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde

$$\left. \begin{aligned} B_{SVC} = B_C - B_{TCR} &= \frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] \right\}, \\ X_L &= \omega L, \\ X_C &= \frac{1}{\omega C}. \end{aligned} \right\} \quad \text{Ec. 19}$$

### 2.3.4 EL COMPENSADOR EN SERIE CONTROLADO POR TIRISTORES (TCSC)

Los TCSC varían la longitud eléctrica de la línea de transmisión compensada con un poco de retardo. Esta característica hace que los TCSC se usen para controlar de una manera rápida el flujo de potencia activa.

También mejoran el margen de estabilidad del sistema y han tenido muy buenos resultados previniendo oscilaciones alrededor de la frecuencia fundamental en sistemas de potencia.

En principio, la respuesta en estado estable del TCSC se puede calcular resolviendo las ecuaciones diferenciales que describen su comportamiento eléctrico, usando métodos de integración numérica. De manera análoga, las ecuaciones diferenciales del TCSC se pueden expresar en forma algebraica y se pueden resolver por métodos fasoriales.

Un modulo básico de TCSC consiste de un TCR en paralelo con un condensador fijo. Un TCSC actual comprende uno o más módulos. La figura 14 muestra el unificador de una de las fases del TCSC instalado en Kinney, Mittelstadt, and Suhrbier, 1994.

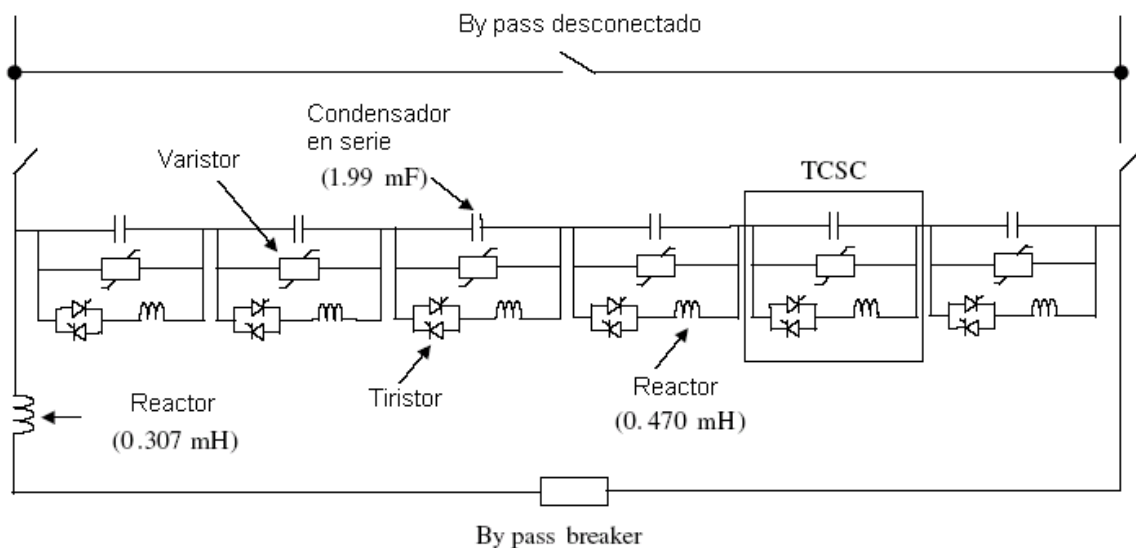
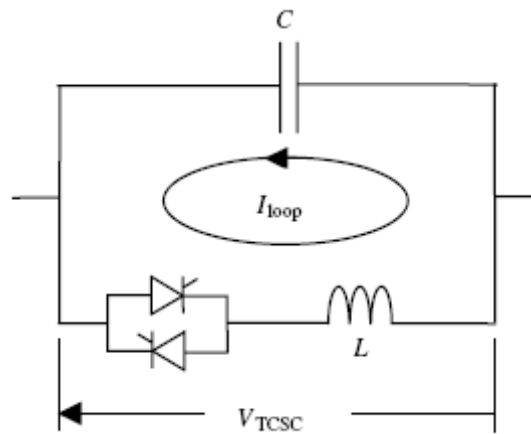


Figura 15. Estructura física de una fase de un TCSC.



El TCR mantiene su frecuencia fundamental operando a expensas de la generación de corrientes armónicas, las cuales son función del ángulo de disparo del tiristor. Si embargo, al contrario de las aplicaciones de SVC donde las corrientes armónicas generadas por el TCR tienden a escaparse a través de la red, en las aplicaciones con TCSC, las corrientes armónicas generadas por el TCR son atrapadas dentro del TCSC debido a la baja impedancia de los condensadores comparados con la impedancia equivalente de la red.

Para el propósito de estudiar sistemas de potencia a la frecuencia fundamental, un esquemático complejo de un TCSC como el de la figura 14 se puede reducir a su equivalente TCR en paralelo por un condensador equivalente como se muestra en la figura 15.



**Figura 16. Circuito equivalente del TCSC.**

Este circuito equivalente se ha asociado con una reactancia equivalente, la cual es función de las señales de los tiristores. Las expresiones para los parámetros eléctricos en los TCSC se mostrarán en las secciones siguientes.

### 2.3.4.1. ECUACIONES DE CORRIENTE Y VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE

Las ecuaciones de corriente del TCSC se pueden obtener con referencia al circuito mostrado en la figura 16.

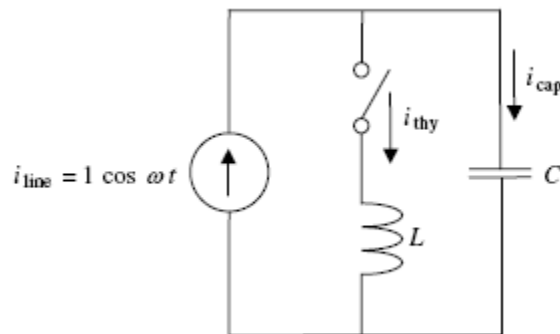


Figura 17. Circuito eléctrico del TCSC.

La figura 16 representa el esquemático de un TCR en paralelo con un banco de condensadores justo antes de que los tiristores conmuten “on”. El tiristor se representa como un switch ideal, y la contribución de la red externa se asume como una fuente de corriente senosoidal. El pulso de corriente a través del tiristor, el cual exhibe un grado de asimetría justo en el punto en que se alcanza el estado estable se muestra en la figura 17.

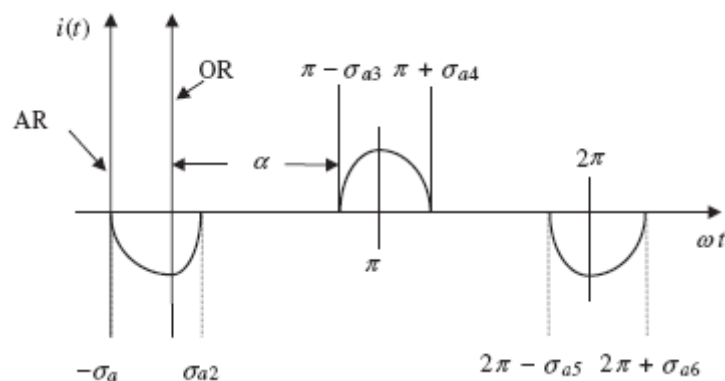


Figura 18. Corriente asimétrica de los tiristores del TCSC.

El tiempo de referencia denominado el “tiempo de referencia original (OR)”, es tomado en el punto en que la onda de tensión de la reactancia inductiva del TCSC positiva cruza por cero. El tiempo de referencia auxiliar (AR) es tomado cuando el tiristor comienza a conducir.

Expresando la corriente de línea dada en el circuito de la figura 16,  $i_{line} = \cos \omega t$ , en términos del plano de referencia auxiliar (AR).

$$i_{line} = \cos(\omega t - \sigma_a) = \cos \omega t \cos \sigma_a + \sin \omega t \sin \sigma_a \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $\sigma_a$ , es igual a  $\pi - \alpha$ , es el ángulo de disparo avanzado, y  $\alpha$  es el ángulo de disparo donde el voltaje del condensador cruza por cero.

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff al circuito de la figura 16 se obtiene>

$$i_{line} = i_{thy} + i_{cap} \quad \text{Ec. 21}$$

Durante el período de conducción, el voltaje a través de las reactancias inductivas y capacitivas del TCSC tiene igual valor

$$L \frac{di_{thy}}{dt} = \frac{1}{C} \int i_{cap} dt + V_{cap}^+ \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $V_{cap}^+$  es el voltaje a través del condensador cuando el tiristor conmuta “on”.

Expresando las ecuaciones 20 y 22 en el dominio de Laplace se obtiene.

$$I_{line} = \cos \left( \sigma_a \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) + \sin \left( \sigma_a \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right), \quad \text{Ec. 23}$$

$$I_{line} = I_{thy} + I_{cap}, \quad \text{Ec. 24}$$

$$I_{cap} = s^2 LC I_{thy} - CV_{cap}^+, \quad \text{Ec. 25}$$

Donde  $s$  es el operador de Laplace.

Substituyendo las ecuaciones 23 y 25 dentro de la ecuación 24 se obtiene la corriente a través del tiristor en el dominio de Laplace.

$$I_{thy} = \omega_0^2 \frac{s}{(s^2 + \omega_0^2)(s^2 + \omega^2)} \cos(\sigma_a) + \omega_0^2 \frac{1}{(s^2 + \omega_0^2)(s^2 + \omega^2)} \omega \sin(\sigma_a) + \frac{\omega_0^2 C V_{cap}^+}{s^2 + \omega_0^2}. \quad \text{Ec. 26}$$

A partir de esta ecuación, se obtiene la ecuación de la corriente a través del inductor en el dominio del tiempo.

$$i_{thy} = A \cos(\omega t - \sigma_a) - A \cos \sigma_a \cos \omega_0 t - B \sin \sigma_a \sin \omega_0 t + D V_{cap}^+ \sin \omega_0 t, \quad \text{Ec. 27}$$

donde

$$A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad \text{Ec. 28}$$

$$B = \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad \text{Ec. 29}$$

$$D = \omega_0 C, \quad \text{Ec. 30}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad \text{Ec. 31}$$

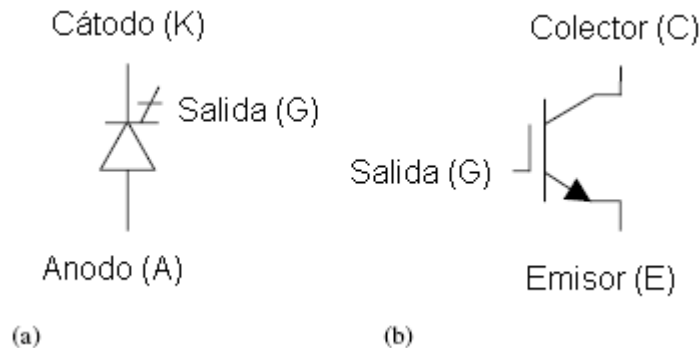
De manera similar, cuando el inductor no está conduciendo, el circuito de la figura 16 se reduce a un condensador en serie con una fuente de corriente DC que representa el voltaje en el condensador en el momento de la conmutación del tiristor.

$$V_{cap}^{off} = \frac{1}{C} \int_{\alpha}^{\omega t} \cos(\omega t) dt + V_{cap}^{on-off} \quad \text{Ec. 32}$$

## 2.4 CONTROLADORES DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA BASADOS EN DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES TOTALMENTE CONTROLADOS

Los controladores modernos basados en electrónica de potencia son capaces de generar potencia reactiva sin la necesidad de grandes elementos de almacenamiento de energía reactiva como en los sistemas SVC. Esto se logra haciendo circular las corrientes a través de las fases del sistema AC con la ayuda de dispositivos de conmutación muy rápidos. (Hingorani y Gyugi, 2000).

Los dispositivos semiconductores empleados en la nueva generación de convertidores de electrónica de potencia son del tipo totalmente controlados, como el transistor de compuerta aislada (IGBT) y el tiristor con apagado de compuerta (GTO). Sus respectivos símbolos circuitales se muestran en la figura 18.



**Figura 19. Símbolos circuitales para el GTO y el IGBT.**

El GTO es una versión más avanzada del tiristor convencional, con una característica de encendido “on” similar, pero con la habilidad de conmutar “off” a un tiempo diferente del que toma la corriente naturalmente al cruzar por cero. Como este dispositivo es más funcional, tiene nuevas aplicaciones en áreas industriales y aún en sistemas de transmisión donde hoy en día es posible redirigir la potencia activa a un nivel de megavatios.

Sin embargo, todavía hay posibilidades de mejorar aún más los GTO's existentes ya sea en la construcción o en el diseño ya que todavía es necesaria la generación de pulsos de disparo negativos para apagar el GTO. Actualmente, la frecuencia máxima de conmutación está por el orden de 1 KHz.

El IGT es uno de los miembros más desarrollados de la familia de los transistores de potencia. Es el dispositivo más popular utilizado en el área de motores AC y DC, alcanzando niveles de unos pocos cientos de kilovatios. Los convertidores de potencia apuntan hacia aplicaciones que están comenzando a hacer uso de los IGBT's de bajas pérdidas e la conducción.

En los convertidores DC-AC llamados inversores, los IGBT han tenido mucha acogida en los últimos años, la entrada DC puede ser una fuente de tensión (típicamente un condensador) o una fuente de corriente (típicamente una fuente de tensión en serie con un inductor). Con base a este principio, los convertidores pueden ser clasificados como convertidores de fuente de tensión (VSC's) o convertidores de fuente de corriente. Por razones económicas, la mayoría de los controladores de potencia reactiva constan de una topología VSC. La disponibilidad de modernos semiconductores con altas capacidades de tensión y corriente como el GTO's e IGBT's han creado el concepto de compensación de reactivos basados en convertidores conmutadores, aún para aplicaciones de alta tensión.

### 2.4.1. EL CONVERTOR DE FUENTE DE TENSIÓN (VSC)

Hay muchas topologías de VSC actualmente en uso en los sistemas de potencia y en otros campos en los cuales están desarrollando un gran potencial, incluyendo: el puente completo monofásico (puente-H); el convencional puente trifásico, de dos niveles, trifásico con neutro. Otras topologías de VSC están basadas en combinaciones que buscan minimizar la frecuencia de operación de los semiconductores dentro del VSC y producir una alta calidad en la onda senoidal con mínimos requerimientos de filtros o sin filtros. Por ejemplo, la topología del VSC convencional de dos niveles usando IGBT se muestra en la figura 19.

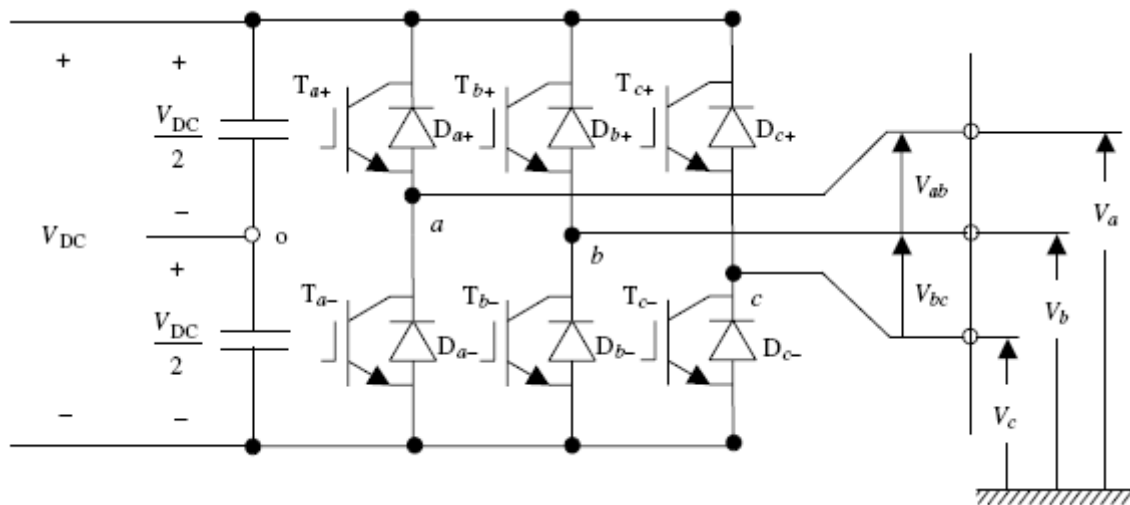


Figura 20. Topología del VSC trifásico.

El VSC mostrado en la figura 19 se compone de seis IGBT's con dos IGBT's puestos en cada pata. Cada IGBT tiene un diodo conectado en antiparalelo para asegurar que no hayan posibles voltajes en reversa debidos a las condiciones circuitales externas. Dos condensadores de igual magnitud se conectan en el lado DC para proveer una fuente de potencia reactiva.

Aunque no se observa en la figura 19, el módulo de control de las conmutaciones, es una componente integral del VSC. Su tarea es controlar la secuencia de conmutación de los diferentes dispositivos semiconductores en el VSC, apuntando a producir una forma de onda de voltaje que sea lo más cercanamente posible a una onda senoidal con alta calidad en el control y mínimas pérdidas en la conmutación.

Las estrategias de conmutación de la corriente en los VSC pueden dividirse en dos grandes categorías:

- Conmutación a la frecuencia fundamental: La conmutación de cada dispositivo semiconductor se limita a un ciclo por encendido y a otro por apagado. La topología básica mostrada en la figura 19 con conmutación a la frecuencia fundamental genera una onda cuasi-cuadrada, la cual tiene un alto contenido armónico y por lo tanto es inaceptable. En la práctica se utilizan arreglos de varios VSC's de seis pulsos acomodados en una estructura de pulsos múltiples para generar calidad en la onda y mayores potencias.
- Modulación por ancho de pulso (PWM): Esta técnica permite que los dispositivos conmuten "on" y "off" a una velocidad considerablemente mayor que la de la frecuencia fundamental. La forma de onda de la salida es cortada y el ancho de los pulsos es modulado. Los armónicos se presentan a altas frecuencia, por lo tanto se hace más fácil filtrarlos o reducirlos. A lo largo de los años, se han publicado muchas técnicas de PWM, pero aún permanece la más popular y efectiva que es la SPWM o modulación senoidal por ancho de pulso por su simplicidad y efectividad.

Ambas técnicas están lejos de ser perfectas. La técnica de conmutación a la frecuencia fundamental requiere complejos esquemas de transformadores para lograr una distorsión armónica aceptable. La técnica PWM conlleva altas pérdidas en las conmutaciones, pero se sabe que en el futuro estas deficiencias se van a ir reduciendo, haciendo que la técnica de modulación



PWM sea la universalmente preferida aún por aplicaciones en líneas de transmisión a alto voltaje.

#### 2.4.1.1. CONTROL DE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM)

El método de control básico PWM se puede explicar haciendo referencia a la figura 20, en la cual se compara una señal senoidal a la frecuencia fundamental con una señal triangular a alta frecuencia produciendo una señal de onda cuadrada, la cual tiene el propósito de controlar los disparos de los diferentes dispositivos de conmutación de un convertidor dado como el mostrado en la figura 19.

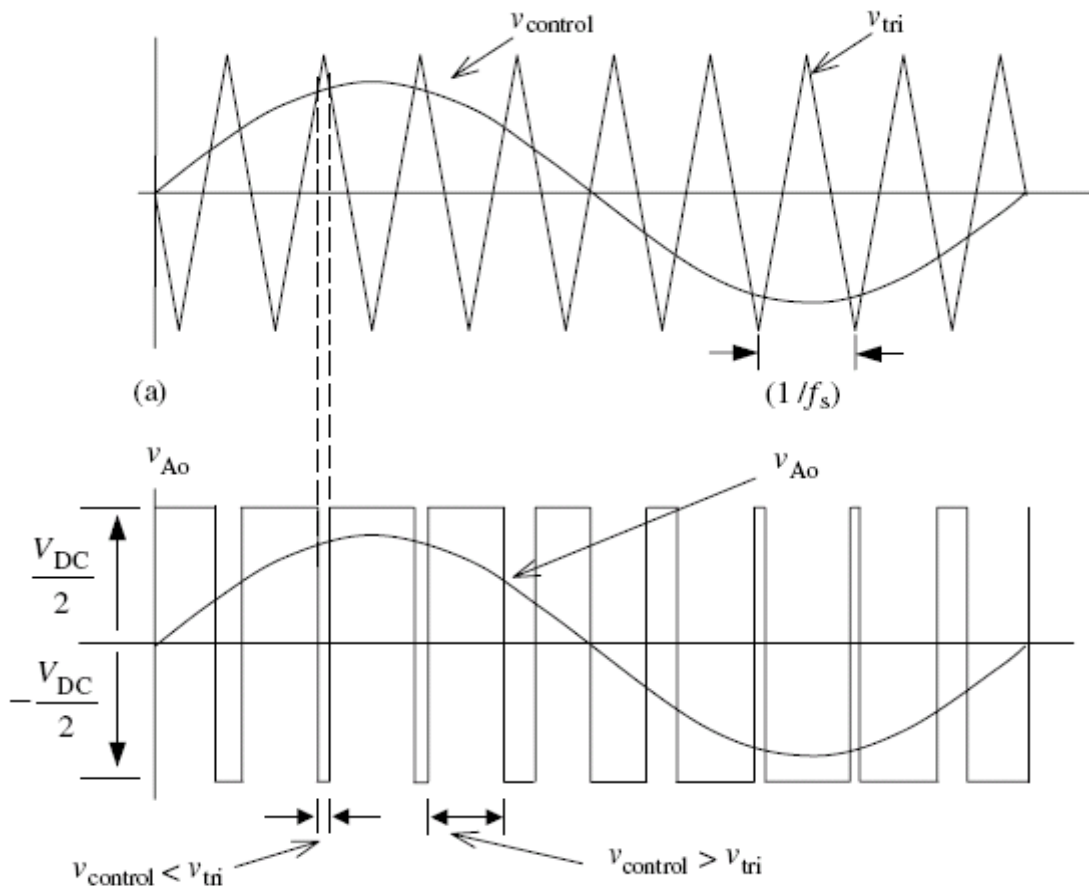


Figura 21. Modulación PWM.

Las señales senosoidales y triangulares, son señales de referencia y señales portadoras respectivamente. Variando la amplitud de la señal senoidal y manteniendo fija la amplitud de la señal portadora, la cual normalmente se mantiene en 1p.u., la amplitud de la componente fundamental del señal de control resultante varía linealmente. En la figura 20, la frecuencia portadora  $f_s$  es nueve veces la frecuencia deseada.

El ancho de la onda cuadrada es modulado de una manera senoidal, y las componentes fundamental armónicas se pueden determinar por medio de un análisis de Fourier. Para determinar la magnitud y la frecuencia de los términos armónicos y de la fundamental, es útil utilizar el concepto de tasa de modulación de amplitud  $m_a$ , y tasa de modulación de frecuencia  $m_f$

$$m_a = \frac{\hat{V}_{CONTROL}}{\hat{V}_{tri}} \quad \text{Ec. 33}$$

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad \text{Ec. 34}$$

Donde  $\hat{V}_{control}$  es la amplitud pico de la señal de control senoidal y  $\hat{V}_{tri}$  es la amplitud pico de la señal triangular (portadora), la cual para la mayoría de los casos prácticos se mantiene constante.

Para el caso de la representación de una sola pata de la figura 21 que corresponde a una fracción de la figura 19, los conmutadores  $Ta+$  y  $Ta-$  son controlados por la comparación directa entre  $\hat{V}_{control}$  y  $\hat{V}_{tri}$ , resultando las siguientes tensiones a la salida.

$$v_{ao} = \begin{cases} \frac{1}{2}V_{DC} & \text{cuando } T_{a+} \text{ está "on" en respuesta de } v_{\text{control}} > v_{\text{tri}} \\ -\frac{1}{2}V_{DC} & \text{cuando } T_{a-} \text{ está "on" en respuesta de } v_{\text{control}} < v_{\text{tri}} \end{cases}$$

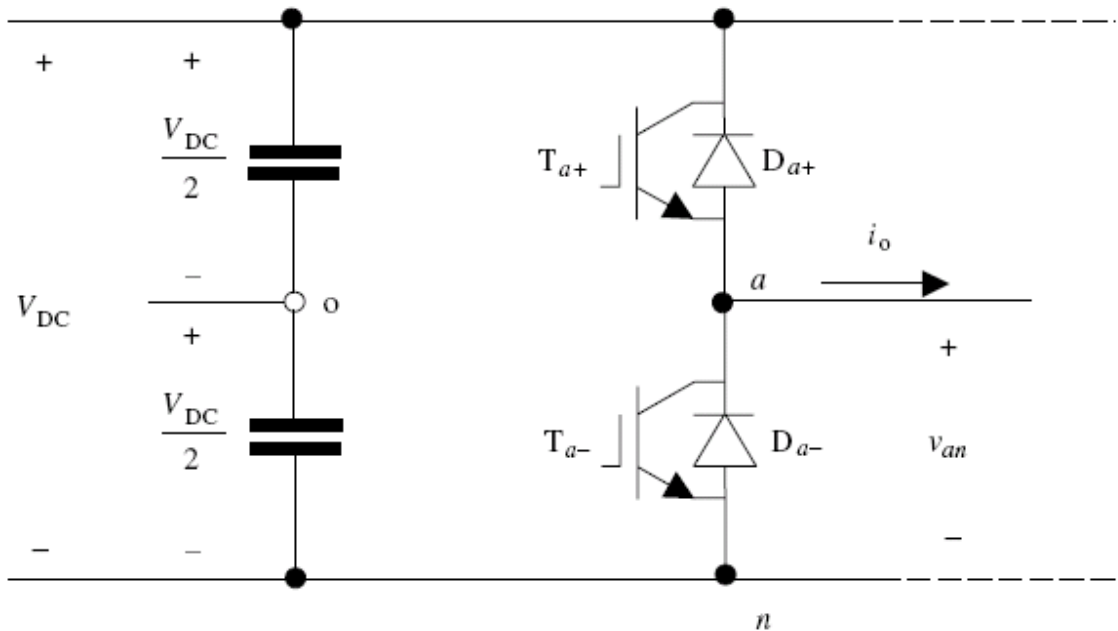


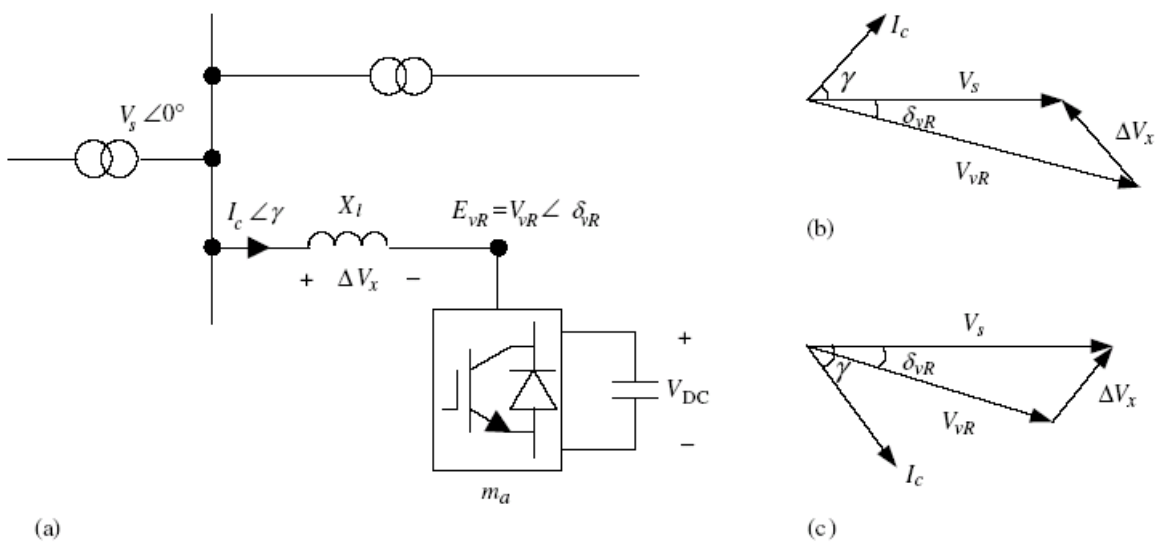
Figura 22. Pata de conversor de fuente de tensión VSC.

La tensión de salida  $V_{ao}$  fluctúa entre  $-V_{DC}/2$  y  $V_{DC}/2$  ya que  $T_{a-}$  y  $T_{a+}$  nunca son apagados simultáneamente y es independiente de la dirección de la corriente  $i_o$ .

La tensión de salida  $V_{ao}$  y su componente a la frecuencia fundamental se muestran en la figura 20 para el caso de  $m_f = 9$  y  $m_a = 0.8$ .

### 2.4.1.2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS CONVERTORES DE FUENTES DE TENSIÓN (VSC)

La interacción entre los VSC y los sistemas de potencia se puede explicar considerando que el VSC permanece conectado al sistema AC a través de un reactor como se observa en la figura 22.



**Figura 23. Operación básica de un convertor de fuente de tensión VSC a) VSC conectado al bus del sistema b) representación vectorial de operación en atraso y c) operación en adelanto**

La amplitud y el ángulo de fase de la caída de tensión  $\Delta V_x$  a través del reactor  $X_l$  se puede controlar definiendo la cantidad y la dirección del flujo de potencias activa y reactiva a través de  $X_l$ . El voltaje en la fuente de alimentación  $V_s \angle 0^\circ$ <sup>1</sup> y la componente a la frecuencia fundamental del voltaje AC del SVC es  $V_{vR} \angle \delta_{vR}$ . La representación vectorial de secuencia positiva se muestra en las figuras 22 b) y 22 c) para la compensación de reactivos en atraso y en adelanto respectivamente.

<sup>1</sup> Notación:  $V \angle \delta$  es un número complejo de magnitud  $V$  y ángulo de fase  $\delta$

De acuerdo con la figura 22, para potencias en atraso y en adelanto, las potencias activa y reactiva se pueden expresar como:

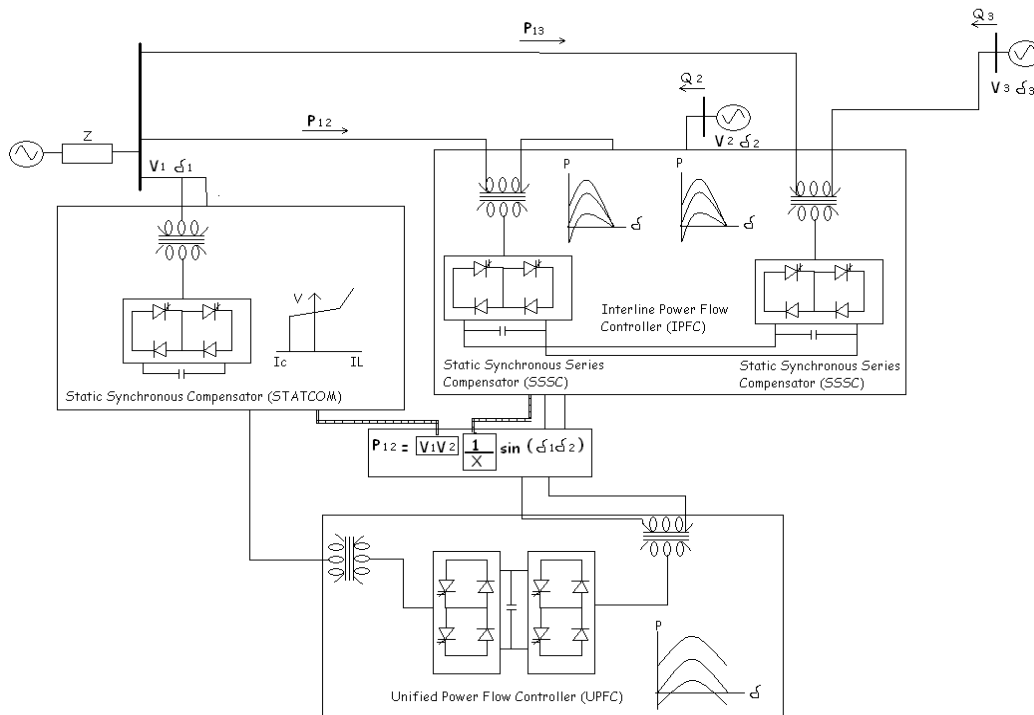
$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \sin \delta_{vR}, \\ Q &= \frac{V_s^2}{X_l} - \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \cos \delta_{vR}. \end{aligned} \right\} \text{ Ec. 35}$$

Teniendo en cuenta la figura 22, se derivan las siguientes observaciones:

- El voltaje de salida del VSC  $V_{vR}$  atrasa el voltaje AC de la fuente  $V_s$  por un ángulo  $\delta_{vR}$  y la corriente de entrada atrasa la caída de tensión a través del reactor  $\Delta V_x$  por  $\pi/2$ .
- El flujo de potencia activa entre la fuente AC y el VSC se controla por el ángulo de fase  $\delta_{vR}$ . La potencia activa fluye hacia el VSC desde la fuente AC para el atraso de  $\delta_{vR}$  ( $\delta_{vR} > 0$ ) y fluye hacia fuera del VSC para el adelanto de  $\delta_{vR}$  ( $\delta_{vR} < 0$ ).
- El flujo de potencia reactiva se determina principalmente por la magnitud de la fuente de tensión  $V_s$ , y la tensión de salida del VSC,  $V_{vR}$ . Para  $V_{vR} > V_s$ , el VSC genera potencia reactiva y consume potencia reactiva cuando  $V_{vR} < V_s$ .

El voltaje del condensador DC,  $V_{DC}$  se controla ajustando el flujo de potencia activa que va hacia el VSC. Durante operación normal, una pequeña fracción de potencia activa debe fluir hacia el VSC para compensar las pérdidas dentro del VSC.

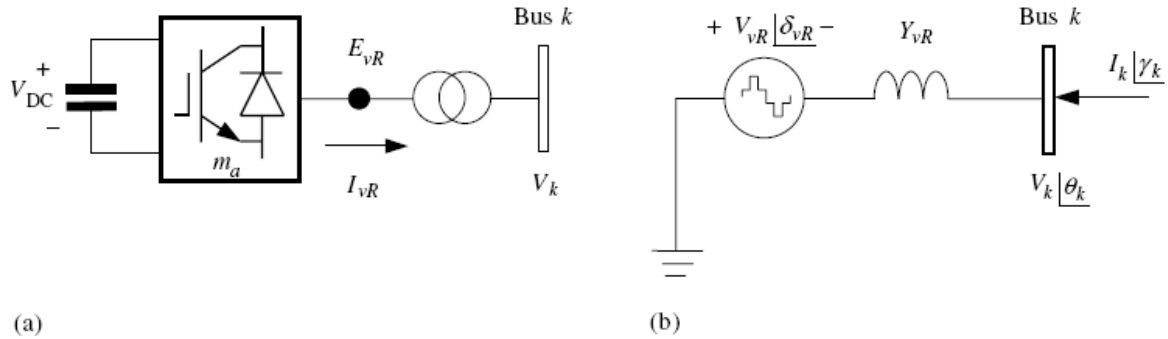
En la figura



**Figura 24. Controladores basados en convertidores de fuentes de tensión (VSC)**

### 2.4.2. EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (STATCOM)

El STATCOM consiste de un VSC y un transformador asociado conectado en paralelo. Es la contraparte estática de una máquina rotante pero genera o absorbe potencia reactiva de una manera mucho más rápida porque no intervienen partes móviles en el proceso. En principio, este realiza la misma regulación de tensión que un SVC pero de una manera más robusta, ya que su funcionamiento no se daña por la presencia de bajos voltajes. (IEEE/CIGRE, 1995).



**Figura 25. Sistema de compensación estática (STATCOM) a) VSC conectado al sistema AC mediante un transformador conectado en paralelo b) Fuente de tensión de estado sólido conectado en paralelo**

En las figuras 23(a) y (b) se muestra la representación de un STATCOM y su equivalente circuital respectivamente. El circuito equivalente corresponde al equivalente Thevenin visto desde el bus k, con la fuente de tensión  $E_{vR}$  actuando a la componente fundamental de frecuencia de la salida de tensión del VSC, resultando del producto de  $V_{DC}$  y  $m_a$ .

Bajo el punto de vista de estado estable a la frecuencia fundamental, el STATCOM se puede representar de la misma forma que un condensador sincrónico, el cual en la mayoría de los casos se modela como un generador de pura potencia reactiva. Otra forma un poco más flexible de modelar el STATCOM es como una fuente de tensión variable  $E_{vR}$ , para el cual la magnitud y el ángulo de fase se pueden ajustar usando un algoritmo apropiado para satisfacer una magnitud de tensión especificada en el punto de conexión con el sistema AC. La fuente de voltaje del STATCOM trifásico se puede representar por:

$$E_{vR}^{\rho} = V_{vR}^{\rho} \cos \delta_{vR}^{\rho} + j \text{sen} \delta_{vR}^{\rho} \quad \text{Ec. 36}$$

Donde  $\rho$  indica las cantidades de fase a, b y c.

La magnitud del voltaje  $V_{vR}^{\rho}$  es dada según los límites máximos y mínimos, los cuales son función de la capacidad nominal del STATCOM. Sin embargo  $\delta_{vR}^{\rho}$  puede tomar cualquier valor entre 0 y  $2\pi$  radianes.

Basándonos en el circuito de la figura 23 (b) y asumiendo parámetros trifásicos, se pueden escribir las siguientes ecuaciones de transferencia:

$$[\mathbf{I}_k] = [\mathbf{Y}_{vR} \quad -\mathbf{Y}_{vR}] \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k \\ \mathbf{E}_{vR} \end{bmatrix}, \quad \text{Ec. 37}$$

Donde

$$\mathbf{I}_k = [I_k^a \angle \gamma_k^a \quad I_k^b \angle \gamma_k^b \quad I_k^c \angle \gamma_k^c]^t, \quad \text{Ec. 38}$$

$$\mathbf{V}_k = [V_k^a \angle \theta_k^a \quad V_k^b \angle \theta_k^b \quad V_k^c \angle \theta_k^c]^t, \quad \text{Ec. 39}$$

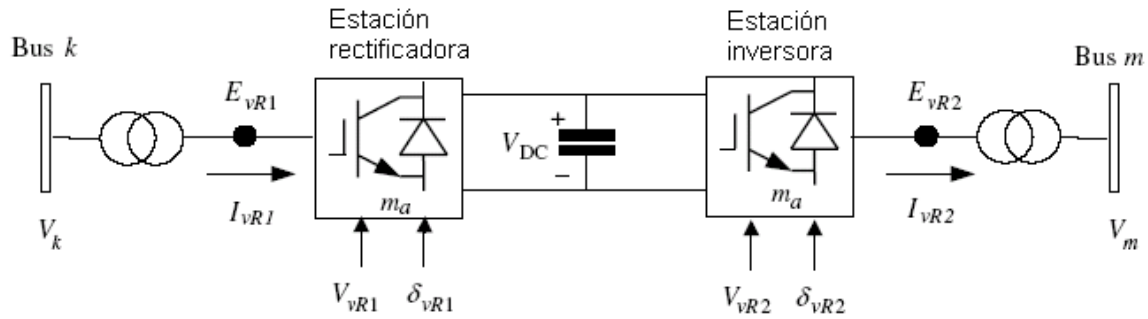
$$\mathbf{E}_{vR} = [V_{vRk}^a \angle \delta_{vRk}^a \quad V_{vRk}^b \angle \delta_{vRk}^b \quad V_{vRk}^c \angle \delta_{vRk}^c]^t, \quad \text{Ec. 40}$$

$$\mathbf{Y}_{vR} = \begin{bmatrix} Y_{vRk}^a & 0 & 0 \\ 0 & Y_{vRk}^b & 0 \\ 0 & 0 & Y_{vRk}^c \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 41}$$

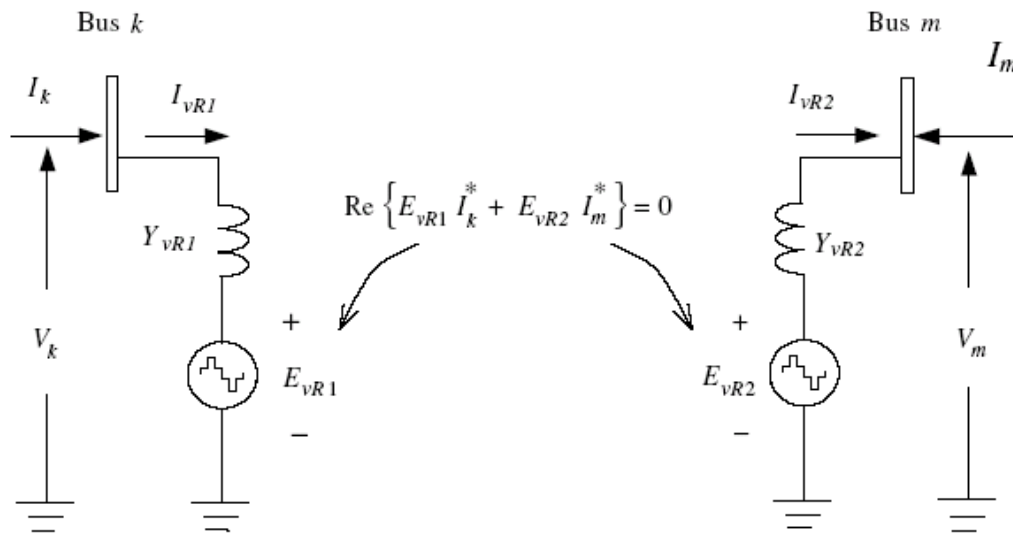
### 2.4.3. TRANSMISIÓN DE POTENCIA CONTINUA BASADA EN CONVERSORES DE FUENTES DE TENSIÓN HVDC-VSC

Los HVDC-VSC comprenden dos VSC's, uno operando como rectificador y el otro como inversor. Los dos convertidores están conectados ya sean espalda-espalda (back to back) o unidos por un cable en DC, dependiendo de la aplicación. Su función principal es transmitir potencia continua desde la estación de rectificación hasta la de inversión con alta controlabilidad. En la figura 24 (a) y (b) se observa el esquemático de un HVDC-VSC y su equivalente circuital respectivamente.





(a)



(b)

**Figura 26. Sistema de transmisión de potencia continua basado en un convertor de fuente de tensión (HVDC-VSC) a) El VSC de la estación de envío hace el papel de rectificación y el VSC de la estación de recibo hace el papel de inversión b) Circuito equivalente.**

Un VSC controla la tensión DC y el otro la transmisión de la potencia activa a través del enlace DC. Asumiendo que los convertidores no tienen pérdidas, el flujo de potencia activa entrando al sistema DC debe igualar la potencia activa que tiene el sistema AC en la estación de recibo (inversor) menos las pérdidas por transmisión en el cable DC. Durante operación normal, ambos convertidores tienen un control de reactivos independiente (Asplund, 2000).

El sistema HVDC-VSC se representa adecuadamente por dos VSC conectados en paralelo mediante un enlace DC y gobernados por una ecuación de potencia

activa. Cada fuente de tensión se conecta al sistema AC por medio de su transformador.

Las expresiones que gobiernan las fuentes de tensión y la potencia son:

$$E_{vR1}^{\rho} = V_{vR1}^{\rho} (\cos \delta_{vR1}^{\rho} + j \sin \delta_{vR1}^{\rho}), \quad \text{Ec. 42}$$

$$E_{vR2}^{\rho} = V_{vR2}^{\rho} (\cos \delta_{vR2}^{\rho} + j \sin \delta_{vR2}^{\rho}), \quad \text{Ec. 43}$$

$$\text{Re}\{-E_{vR1}^{\rho} I_{vR1}^{*\rho} + E_{vR2}^{\rho} I_m^{*\rho}\} = 0, \quad \text{Ec. 44}$$

Donde  $\rho$  indica las cantidades de fase a, b y c.

En esta aplicación, las dos fuentes de tensión en paralelo utilizadas para representar las estaciones rectificadoras y de inversión tienen los siguientes límites en las magnitudes de las tensiones y en los ángulos de fase.

$$\begin{aligned} V_{vR \min 1}^{\rho} &< V_{vR1}^{\rho} < V_{vR \max 1}^{\rho}, \\ 0 &< \delta_{vR1}^{\rho} < 2\pi, \\ V_{vR \min 2}^{\rho} &< V_{vR2}^{\rho} < V_{vR \max 2}^{\rho}, \\ 0 &< \delta_{vR2}^{\rho} < 2\pi. \end{aligned}$$

Basándonos en el circuito equivalente mostrado en la figura 24 (b) y asumiendo parámetros trifásicos, se pueden escribir las siguientes ecuaciones de transferencia:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_k \\ \mathbf{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{vR1} & -\mathbf{Y}_{vR1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{vR2} & -\mathbf{Y}_{vR2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k \\ \mathbf{E}_{vR1} \\ \mathbf{V}_m \\ \mathbf{E}_{vR2} \end{bmatrix}, \quad \text{Ec. 44}$$

donde todos los parámetros están definidos en las ecuaciones anteriores.

## 2.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTROLADORES BASADOS EN FUENTES DE TENSIÓN CONTROLADAS (VSC)

Los tres sistemas basados en controladores VSC llamados SSSC, UPFC y el HVDC-VSC, comparten sistemas de control con características similares. Estos son capaces de regular la magnitud de la tensión en el nodo y/o el flujo de potencia reactiva en uno de sus terminales y el flujo de potencia activa a través de su controlador. El UPFC y el HVDC-VSC emplean dos convertidores y son capaces de regular la magnitud de la tensión en el nodo con uno de ellos y con el otro la inyección de potencia reactiva. Desde la perspectiva del estudio de los sistemas de potencia a la frecuencia fundamental, existe una pequeña diferencia entre la flexibilidad del control de los tres controladores.

La magnitud del voltaje  $V_m \angle \theta_m$  puede ser controlada a un valor específico inyectando un incremento  $\Delta V_{cR} \angle \delta_{cR} = \theta_m$  en fase o en fase contraria como se ilustra en la figura 25 (a). El valor del ángulo de fase  $\theta_m$  tiene un valor de  $0^\circ$  en la figura 25. Se obtiene compensación de reactivos en serie inyectando una tensión compleja  $\Delta V_{cR} \angle \delta_{cR} = \gamma_m \pm 90^\circ$ , el cual está en cuadratura con la corriente de línea,

$I_m \angle \gamma_m$ , como se observa en la figura 25 (b). El puro control de ángulo de fase es también posible como se muestra en la figura 25 (c) inyectando una cantidad angular  $\angle \delta_{cR}$  al voltaje no afectado  $V_m \angle \theta_m$  como se muestra en la figura 25 (d).

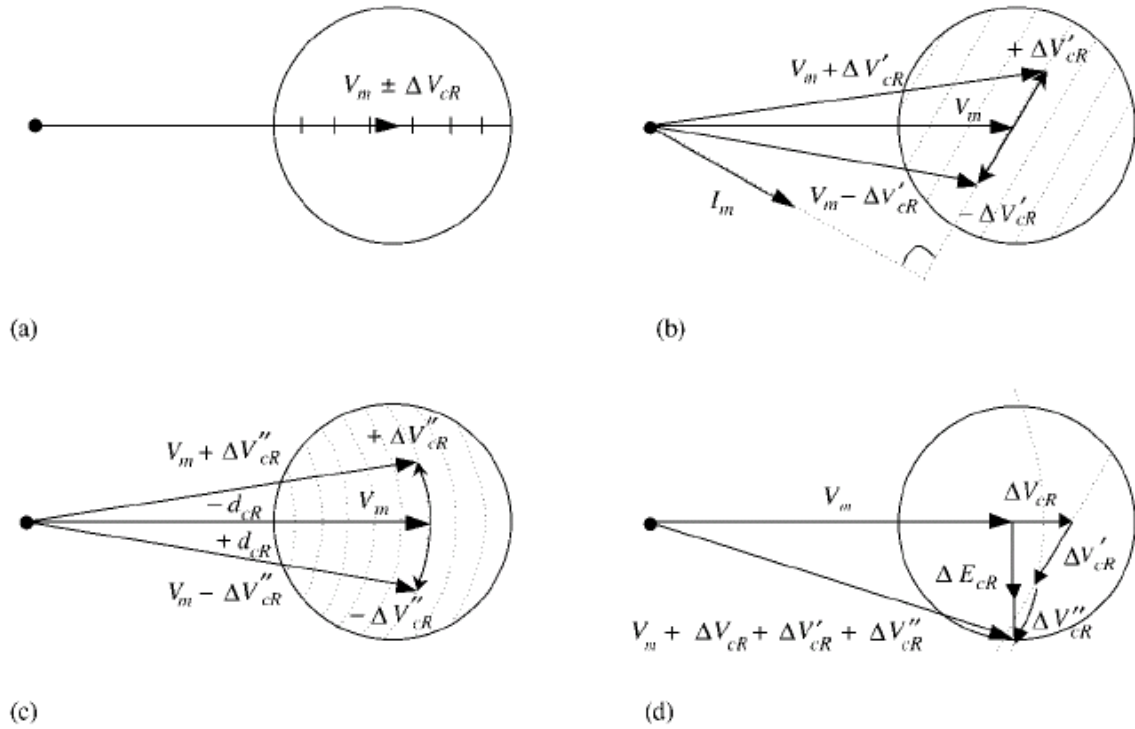


Figura 27. Diagrama fasorial ilustrando el concepto general de: a) Control de la magnitud de la tensión, b) Compensación de impedancia de la línea, c) Regulación del ángulo de fase y d) Control simultáneo.

### **3. MODELAMIENTO DE LOS CONTROLADORES FACTS EN PSCAD**

Este trabajo se enfocó en llevar a cabo simulaciones de las configuraciones de los dos grupos de controladores FACTS mencionados en capítulo anterior. Para el primer grupo se simuló el Static Var Compensator (SVC) y para el segundo se simuló el STATic synchronous COMPensator (STATCOM) mediante el programa PSCAD, Emtdc.

PSCAD, (Power System CAD) es la interfaz gráfica del programa mundialmente conocido Emtdc. PSCAD le permite al usuario construir el esquemático de un circuito con el fin de ejecutar una simulación, para que este pueda visualizar los resultados, de una manera más interactiva ya que permite un control directo de la simulación durante la ejecución de la misma, así como una visualización interactiva de esta.

#### **3.1 MODELAMIENTO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC) EN PSCAD**

Para tener en cuenta el comportamiento del SVC tanto en condiciones de estado estable, dinámico y transitorio, se simularon dos casos. El primero corresponde a una disminución súbita de carga, y el segundo corresponde a una salida total de carga de un sistema AC ambas dispuestas de un SVC conectado en paralelo al sistema AC con el fin de obtener el comportamiento del sistema con el controlador conectado a este.

Consideremos el siguiente caso.

- Línea de transmisión a 500KV L-L 60Hz de 760Km.
- Carga variable. A los 0.5 segundos de la simulación, sale del sistema gran parte de la carga causando inestabilidad de voltaje.
- SVC de 100 MVA inductivos y 220MVA capacitivos.

Como se observa en la Figura 4, se tiene una línea de transmisión con un SVC conectado en paralelo a la misma.

### **3.1.1 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS SVC ANTE VARIACIÓN SÚBITA DE CARGA**

Consideremos el siguiente caso.

- Línea de transmisión a 500KV L-L 60Hz de 760Km.
- Carga variable. A los 0.5 segundos de la simulación, sale del sistema gran parte de la carga causando inestabilidad de voltaje.
- SVC de 100 MVA inductivos y 220MVA capacitivos

Como se observa en la Figura 28, se tiene una línea de transmisión con un SVC conectado en paralelo a la misma.

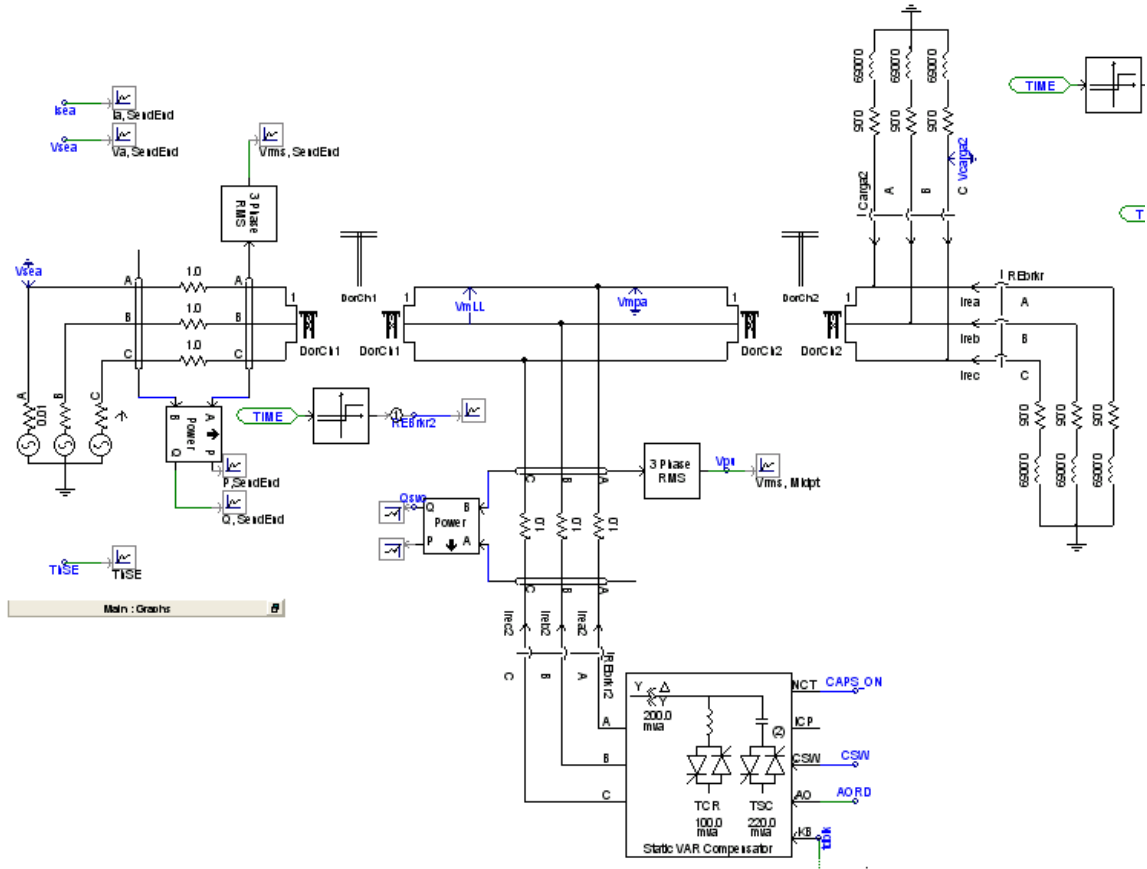
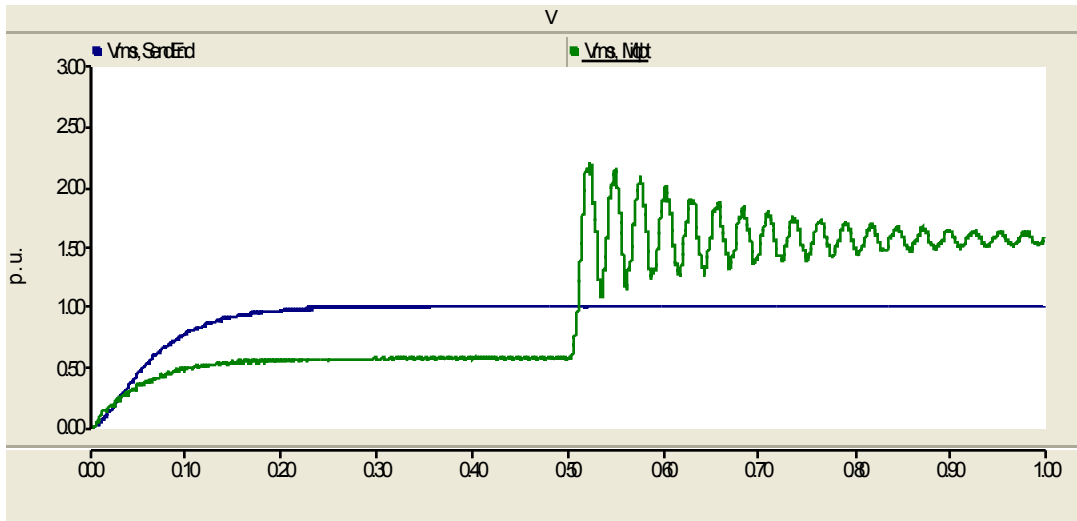


Figura 28. Línea de transmisión a 500KV con un SVC conectado a la misma, carga variable

Para apreciar el efecto que tiene el SVC en la línea se simuló el fenómeno con y sin el SVC conectado a la línea.



**Figura 29. Simulación de la situación sin el SVC conectado a la línea. En azul se tiene el voltaje RMS de referencia en p.u. En verde se tiene el voltaje RMS en la línea de transmisión antes y después de la disminución súbita de carga.**

Como se aprecia en la simulación se tiene una fuerte inestabilidad de la tensión RMS 3 $\phi$  de la línea de transmisión al salir gran parte del sistema gran parte de la carga desde el momento en que sucede el evento (0.5s), por otro lado también se observa que debido a la sobrecarga que tenía la línea antes del evento, la tensión RMS 3 $\phi$  de la línea es sustancialmente menor que el valor en p.u. (1p.u.) de referencia que se tenía antes del evento.



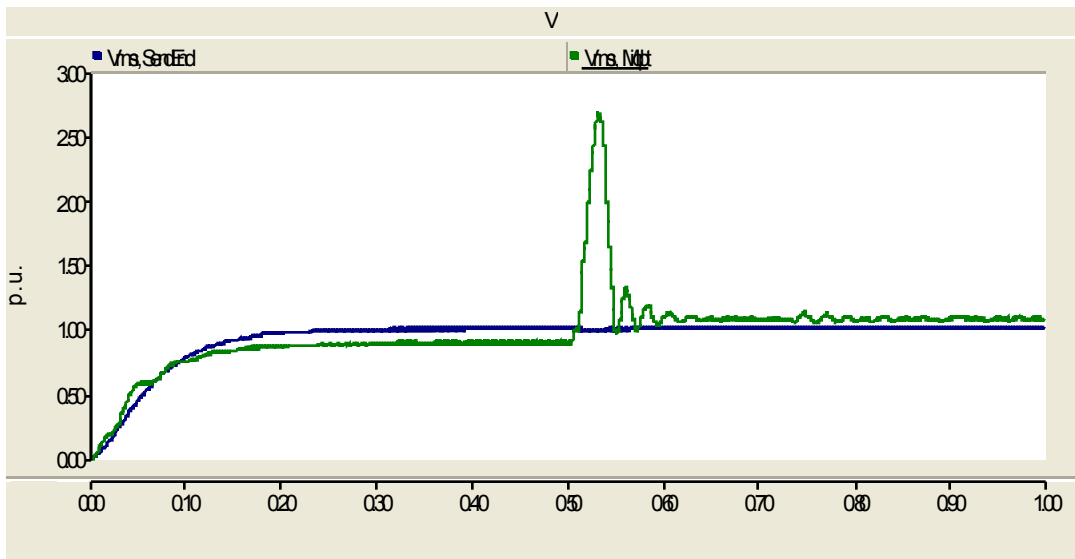


Figura 30. Simulación de la situación con el SVC conectado a la línea. En azul se tiene el voltaje RMS de referencia en p.u. En verde se tiene el voltaje RMS en la línea de transmisión antes y después de la disminución súbita de carga.

En la Figura 30 se observa el resultado de la simulación, pero esta vez con el SVC conectado a la línea. En esta se observan dos cosas. La primera es que se aprecia como el SVC trata de mantener la tensión RMS 3 $\phi$  de la línea a la tensión de referencia asignada (1p.u.) antes de los 0.5s de la simulación. La segunda corresponde a lo que ocurre desde el momento en que sucede el evento (0.5s) ya que aunque se observa un gran transitorio, el SVC mantiene el valor de la tensión RMS 3 $\phi$  de la línea muy cercano al valor de la tensión de referencia asignada (1p.u.) previniendo así las oscilaciones de la tensión RMS 3 $\phi$  propias de la inestabilidad de voltaje.

### 3.1.2 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS SVC CONECTADO A UN SISTEMA SIMPLE AC

Consideremos el siguiente caso:

SVC conectado a un sistema simple AC.

- Sistema a 130KV L-L alimentando una sola carga trifásica resistiva de 144Ω.

Simulación de 2s. A los 1s de la simulación sale la carga del sistema.

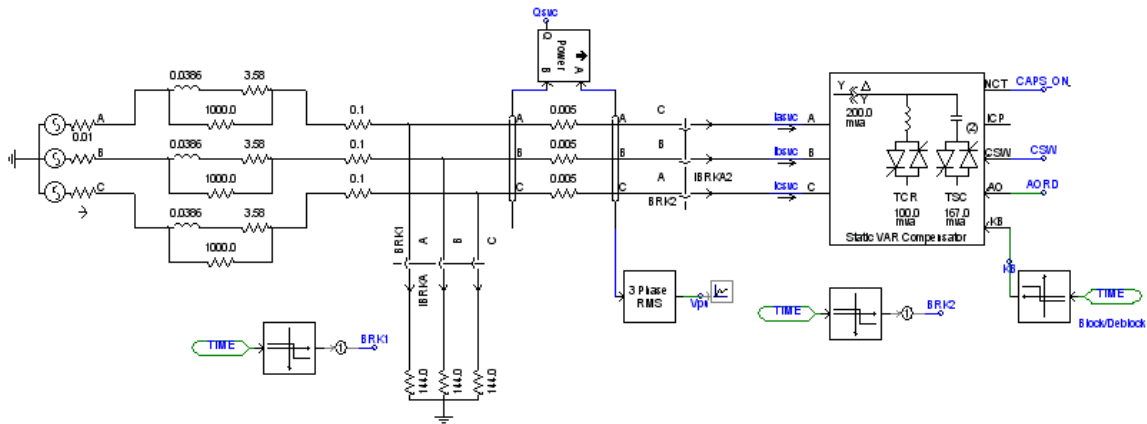


Figura 31. Sistema AC a 130KV L-L con un SVC conectado a la misma.

En la Figura 32 se observa el resultado de la simulación sin el SVC conectado al sistema AC.

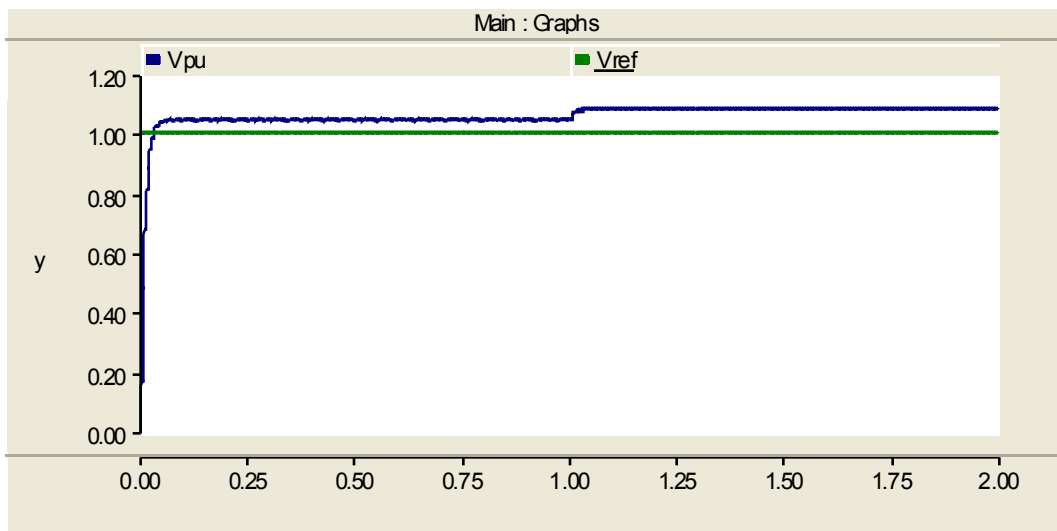
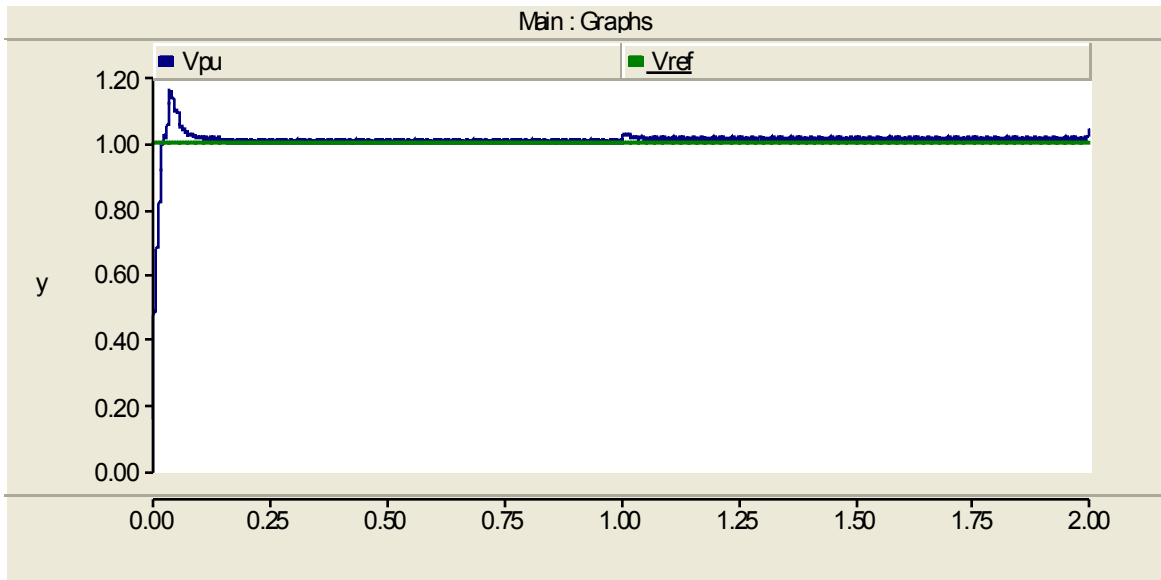


Figura 32. Simulación de la situación sin el SVC conectado al sistema. En verde se tiene el voltaje RMS de referencia en p.u. En azul se tiene el voltaje RMS del sistema AC antes y después de la salida de la carga.

Como se aprecia en la simulación se observa un incremento de la tensión RMS 3 $\phi$  del sistema cuando sucede el evento a los 1s de la simulación, así mismo se observa que antes de la ocurrencia del evento, la tensión RMS 3 $\phi$  del sistema estaba por encima del valor de referencia en p.u.



**Figura 33. Simulación de la situación con el SVC conectado a la línea. En verde se tiene el voltaje RMS de referencia en p.u. En azul se tiene el voltaje RMS en la línea de transmisión antes y después de la salida de la carga.**

En la Figura 33 se observa el resultado de la simulación con el SVC conectado al sistema AC. Se observa como la tensión RMS 3 $\phi$  del sistema es igual a la tensión trifásica de referencia RMS en p.u. y también se observa como en el momento del evento, se observa un pequeño disturbio o swell de poca incidencia en el sistema.

### 3.1.3 ALGORITMO DE CONTROL DEL SVC

El algoritmo de control que gobierna el funcionamiento de un SVC válido para las dos configuraciones anteriormente descritas se observa en la Figura 34. El montaje del mismo así como los diferentes resultados de las simulaciones para el primer caso (disminución súbita de carga) se observan en las Figuras 34 y 35.

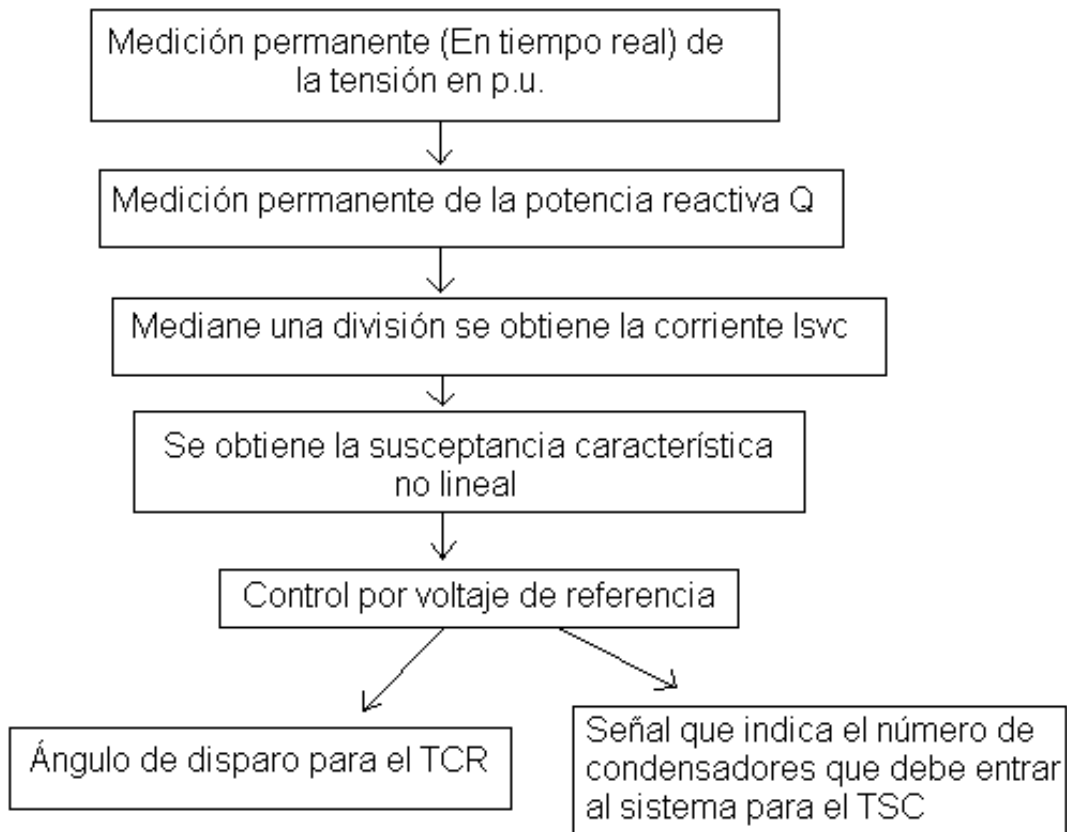


Figura 34. Algoritmo básico de control para el SVC.

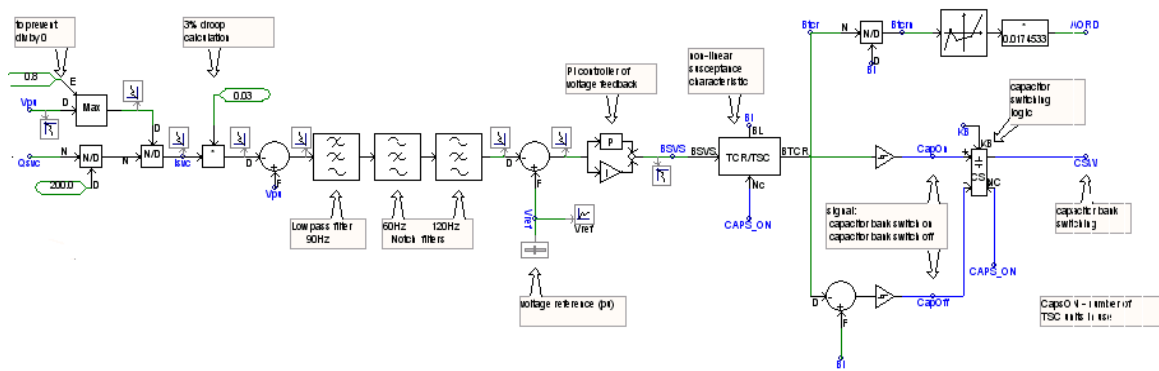


Figura 35. Algoritmo básico de control para el SVC en PSCAD.

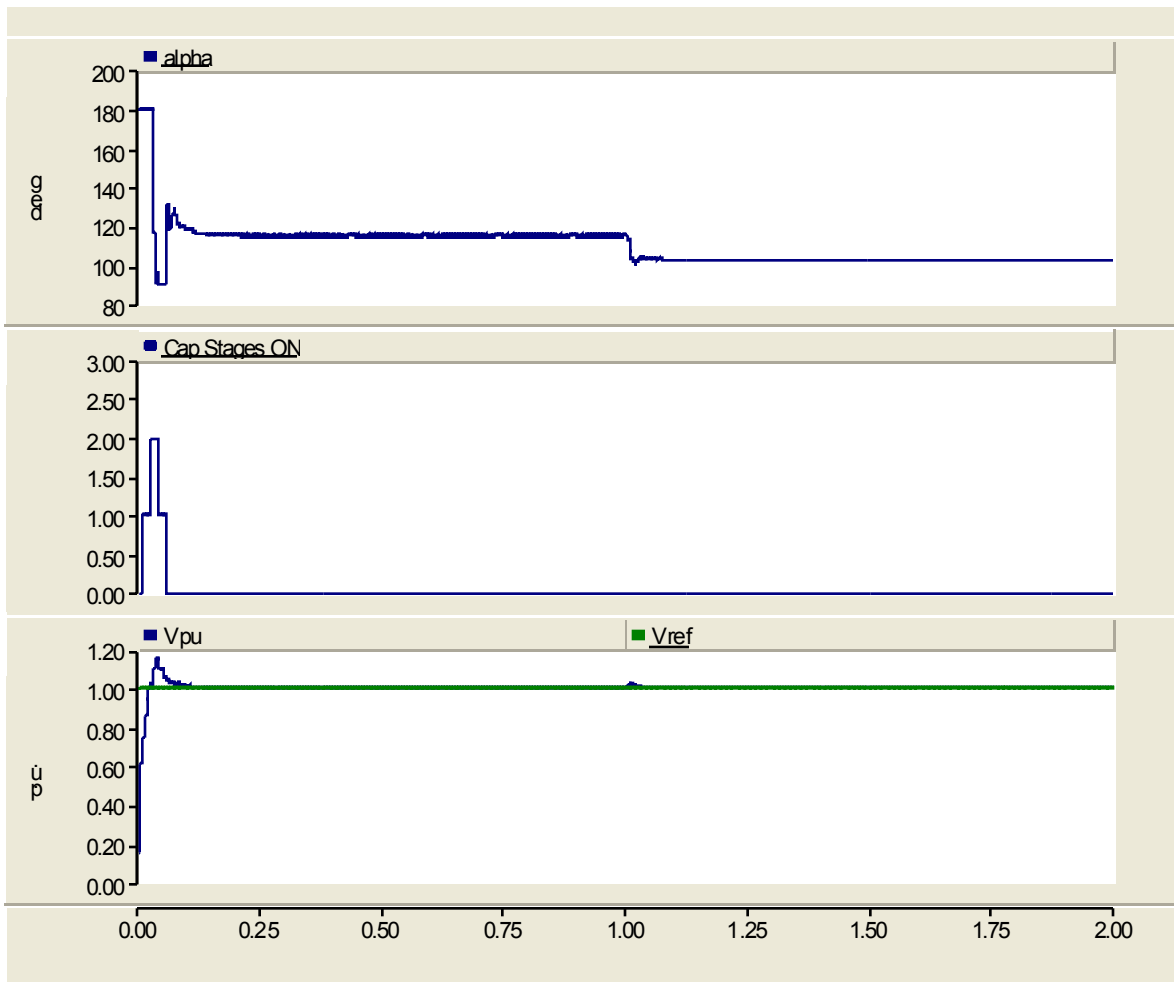


Figura 36. Simulación de la variación del ángulo de disparo, y de la cantidad de condensadores que entran al sistema a lo largo del evento.

### 3.2.1 STATCOM ANTE FALLA TRIFÁSICA A TIERRA

Para tener en cuenta el comportamiento del STATCOM tanto en condiciones de estado estable, dinámico y transitorio, se simuló un caso en que el STATCOM está conectado a un sistema AC.

Consideremos el siguiente caso:

- Sistema AC a 115KV L-L
- Carga trifásica de 88MVA con un factor de potencia de 0.906.
- STATCOM (GTO's) conectado al sistema AC en paralelo a la carga compuesto de un condensador de 300uF en el lado DC.
- Se aplica una falla trifásica a tierra a través de una impedancia de  $75\Omega$  con relación  $X/R = 1$  a los 1.5 segundos de la simulación y con una duración de 0.75 segundos.

En la Figura 37 se observa la situación anteriormente descrita.

Para poder apreciar el comportamiento del sistema bajo estas condiciones, se simuló el sistema sin y con el STATCOM, conectado al mismo.

En la Figura 38 se observa como el sistema bajo esas condiciones presenta una tensión RMS  $3\phi$  de 0.78p.u. Bajo condiciones normales de estado estable y de 0.61p.u bajo condiciones de falla.

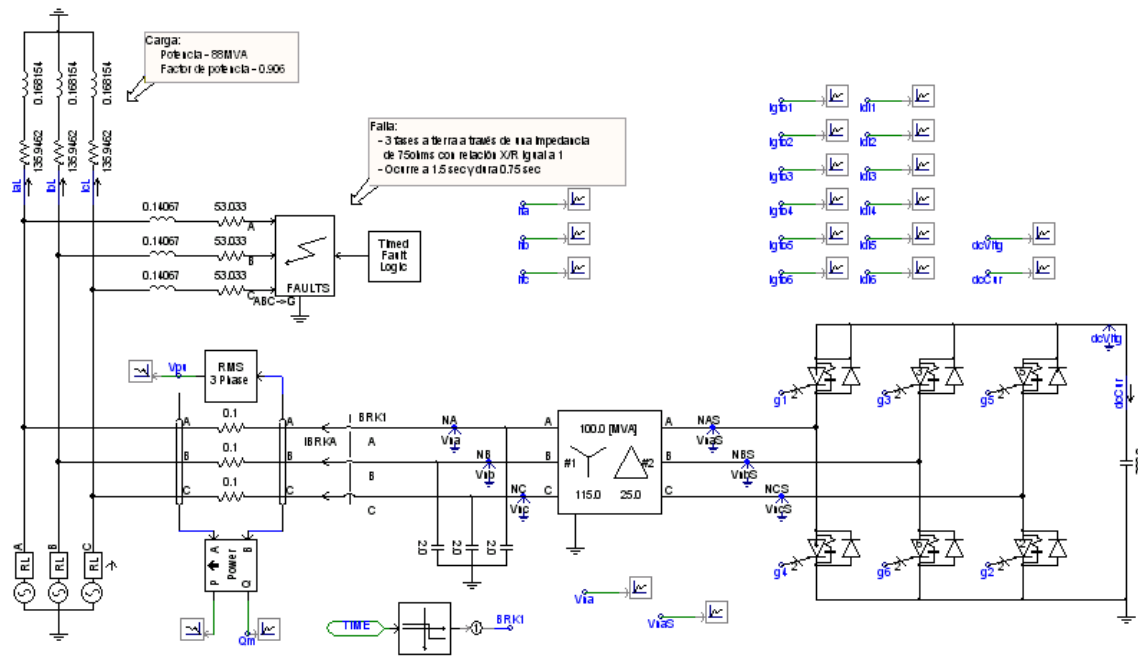


Figura 37. STATCOM conectado a un sistema de transmisión AC

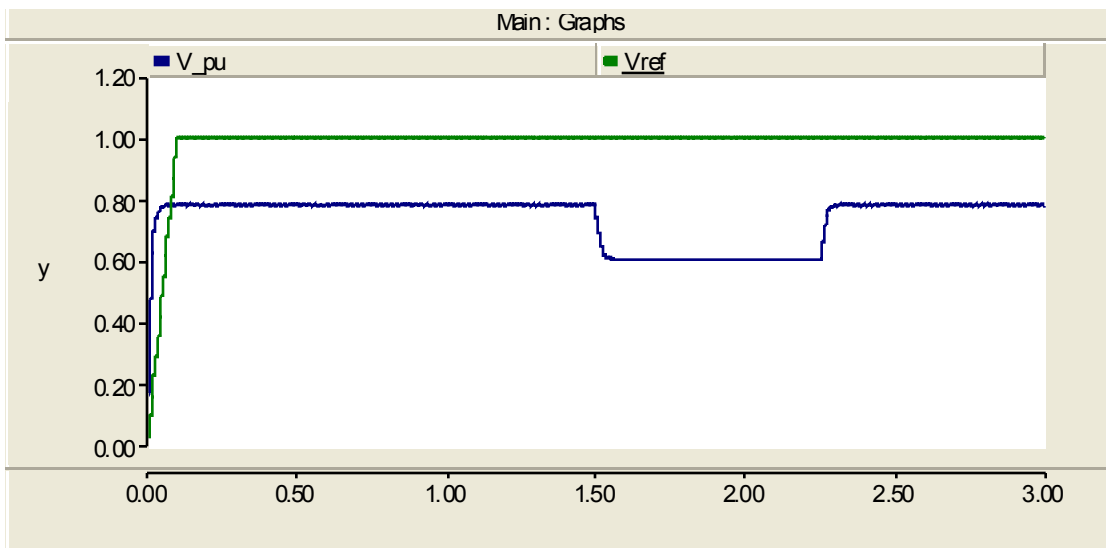
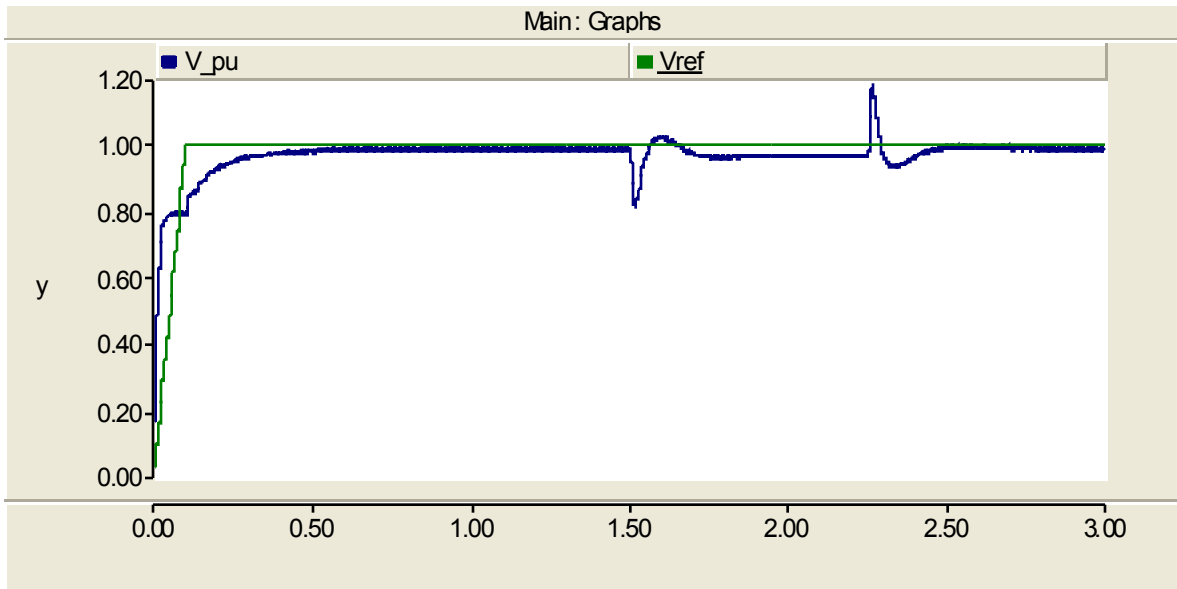


Figura 38. Simulación de la situación sin el STATCOM conectado al sistema AC. En azul se tiene la tensión del sistema en p.u. y en verde se tiene el valor de la tensión de referencia en p.u

En la figura 15 se observa el resultado de la simulación del STATCOM conectado a un sistema AC que se aplica una falla trifásica a tierra a través de una impedancia de  $75\Omega$  con relación  $X/R = 1$ .

La simulación muestra como el STATCOM mantiene la tensión RMS  $3\phi$  del sistema AC durante condiciones de estado estable y de falla.



**Figura 39. Simulación de la situación con el STATCOM conectado al sistema AC. En azul se tiene la tensión del sistema en p.u. y en verde se tiene el valor de la tensión de referencia en p.u.**

En la figura 40 se observa la potencia reactiva que le inyectó el convertidor al sistema AC durante la condición de falla.



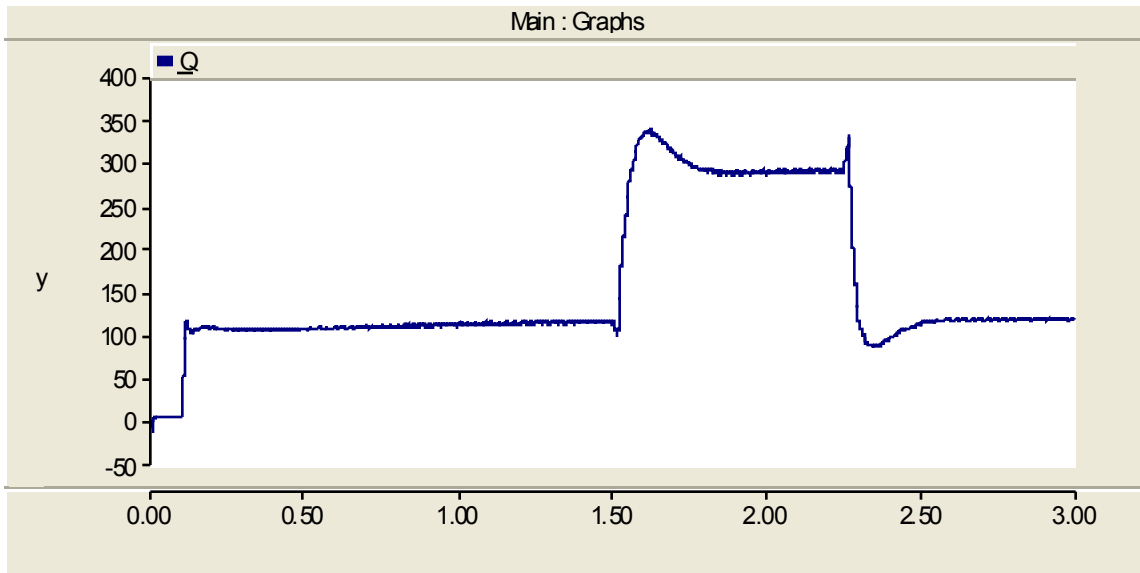


Figura 40. Inyección de reactivos durante la simulación.

### 3.2.2. ALGORITMO DE CONTROL DEL STATCOM

En la Figura 41 se tiene el algoritmo básico de control para el STATCOM,

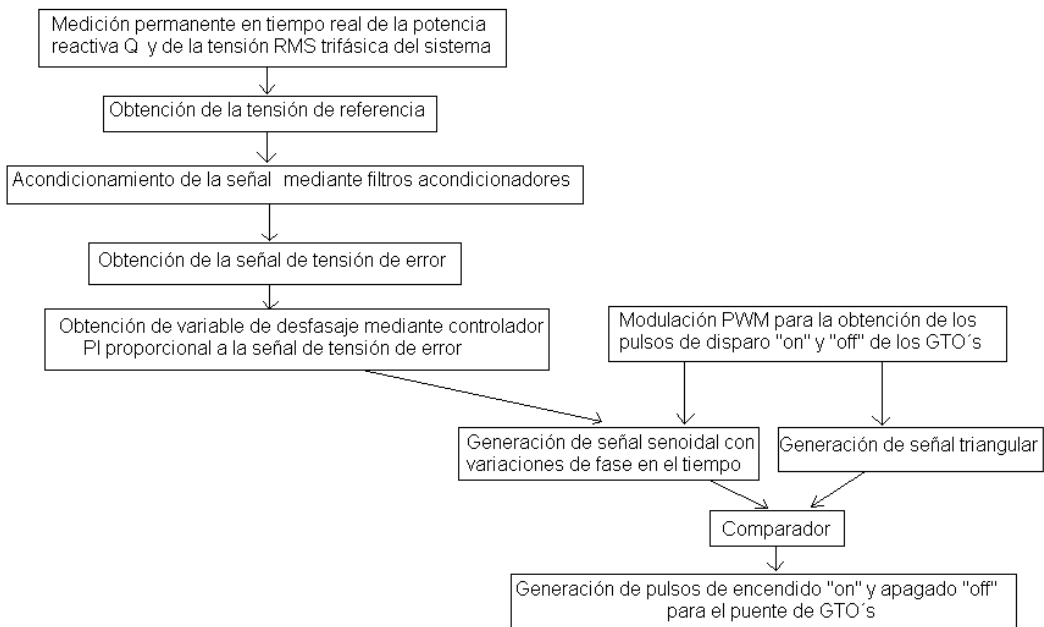
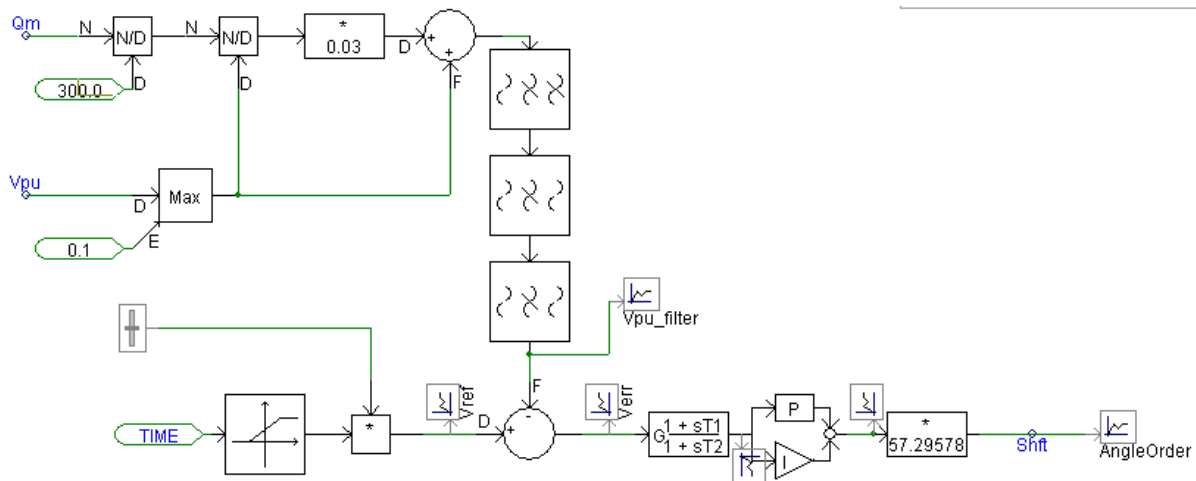


Figura 41. Algoritmo básico de control para el STATCOM.

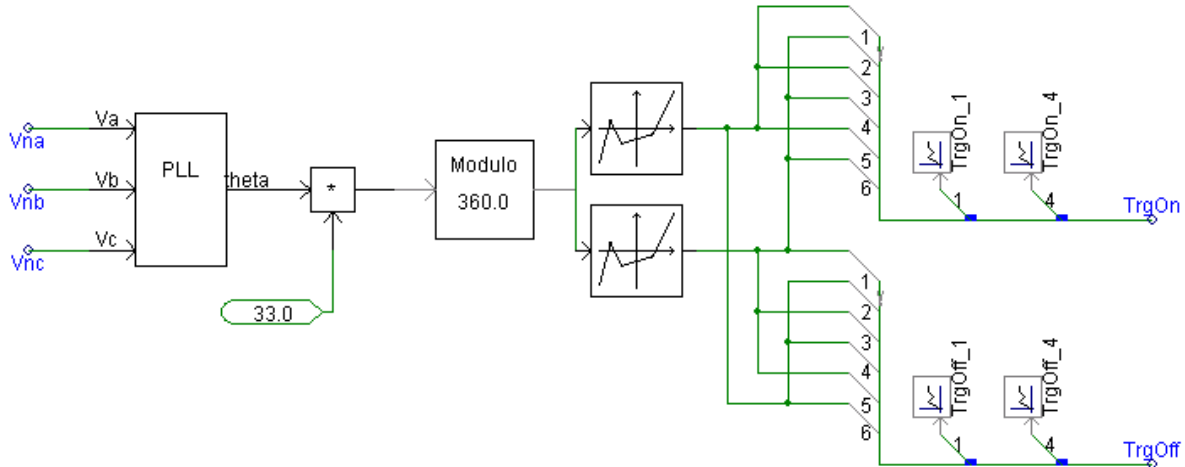
En la Figura 43 se obtiene la señal de desfase de la onda senoidal para la modulación PWM (ángulo). Esta señal de desfase es la responsable de coordinar el desfase que debe haber entre la señal de tensión producida por el STATCOM y la señal de tensión del sistema AC lo que determina la cantidad y dirección del flujo de potencia reactiva.



**Figura 42. Obtención de la señal de desfase de la onda senoidal para la modulación PWM en PSCAD.**

En la figura 19 se obtiene el algoritmo de control para obtener las señales triangulares de referencia para la modulación PWM. Los pulsos de disparo de encendido “on” y apagado “off” responsables de gobernar el convertor obteniéndose de la comparación de la señal senoidal variable desfasada en el tiempo con las señales triangulares de referencia.

La modulación PWM normalmente se realiza a una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Valores de frecuencia de 33 veces o más de la frecuencia fundamental son los más utilizados en la literatura técnica.



**Figura 43. Obtención de la señal triangular de referencia para la modulación PWM PSCAD.**

### 3.3.1 TRANSMISIÓN EN CORRIENTE CONTINUA HVDC-VSC

Si se instalan aparte dos convertidores controlados como fuentes de tensión o STATCOM's y se unen mediante un enlace DC se obtiene lo que se conoce en el mundo entero como transmisión VSC.

Debido a que cada STATCOM viene compuesto de diodos unidireccionales dispuestos en antiparalelo a los GTO's se genera un problema de carga residual almacenada en los conductores del lado DC lo que obliga a estos a ser livianos, de bajo calibre y a tener un muy bajo aislamiento.

Esta dificultad ha hecho que la transmisión VSC a alta tensión (HVDC) sea para casos restringidos, se presente como un caso de transmisión en continua en media tensión la mayoría de las veces. Debido a las características de sus conductores en DC, se han empleado como enlaces subterráneos.

Las ventajas de la transmisión VSC son las siguientes.

- Control de voltaje AC independiente en cada terminal del bus dc con las mismas características y ventajas de los STATCOM.
- Respuesta adecuada en potencia debido a la rapidez de la operación del algoritmo de control .
- El receptor puede ser una carga o algún tipo de generación diferente y frecuencia diferente al del envió sin ningún requerimiento especial.

La transmisión VSC es una tecnología emergente con poca información en la literatura que ayude en el diseño de la misma, los ingenieros y expertos en el tema de la planeación de sistemas de transmisión se han encontrado con dicha desventaja.

En la Figura 44 se observa la configuración típica de un esquema de transmisión VSC.

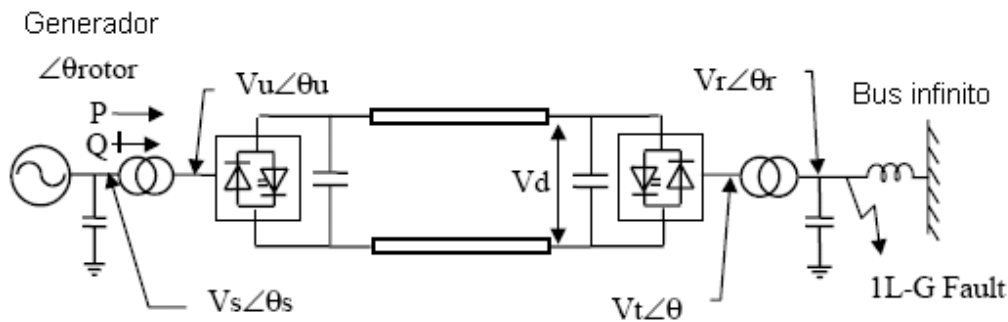


Figura 44. Configuración típica de un esquema de transmisión VSC

Con el fin de estudiar y analizar el comportamiento dinámico y transitorio de un esquema de transmisión VSC a media tensión se simuló en PSCAD aplicándole una falla monofásica a tierra en el lado del receptor.

Consideremos el siguiente caso:

- Lado de envío a 13.8Kv LL a 60Hz.
- Lado de recibo a 115Kv LL a 50Hz.
- Enlace DC subterráneo bipolar de 50km a 120Kv DC.
- Par de STATCOM's dispuestos en el lado de envío como de recibo compuestos por GTO's con diodos en antiparalelo provistos de un circuito snubber.
- A los 2.1s de la simulación se aplica una falla monofásica a tierra en el lado de recibo (50Hz) con una duración de 0.05s.

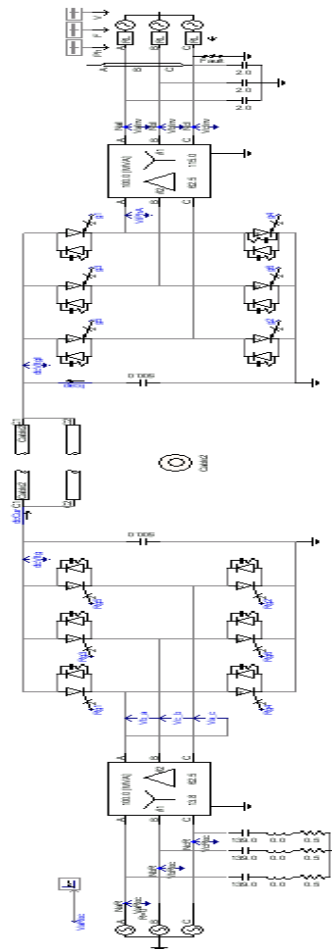
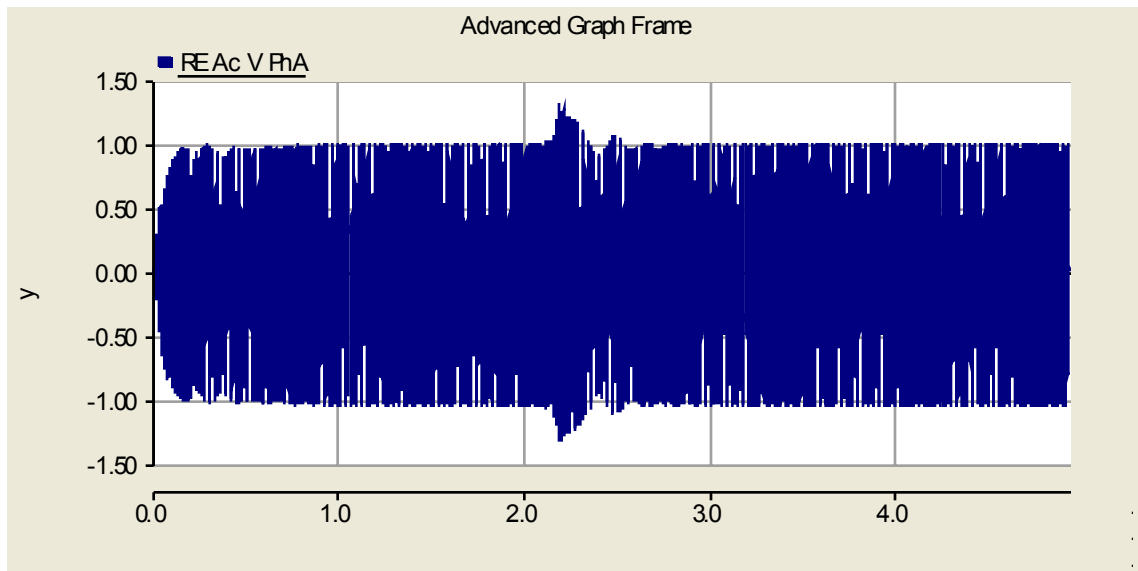
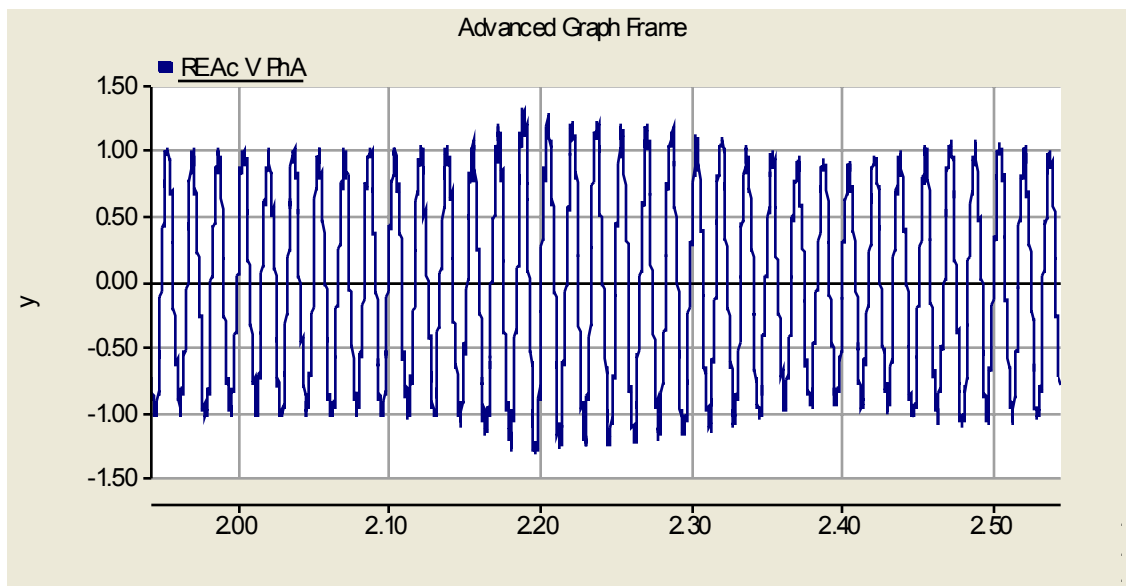


Figura 45. Esquemático de un modelo de transmisión VSC

En las Figura 46 y 47 se observa el resultado del impacto que tiene la falla monofásica a tierra en el lado de recibo sobre la onda de tensión del lado de recibo. En las figura 23



**Figura 46. Onda de tensión en el lado de envío durante la simulación.**



**Figura 47. Zoom de la situación anterior. Onda de tensión en el lado de envío durante la simulación.**

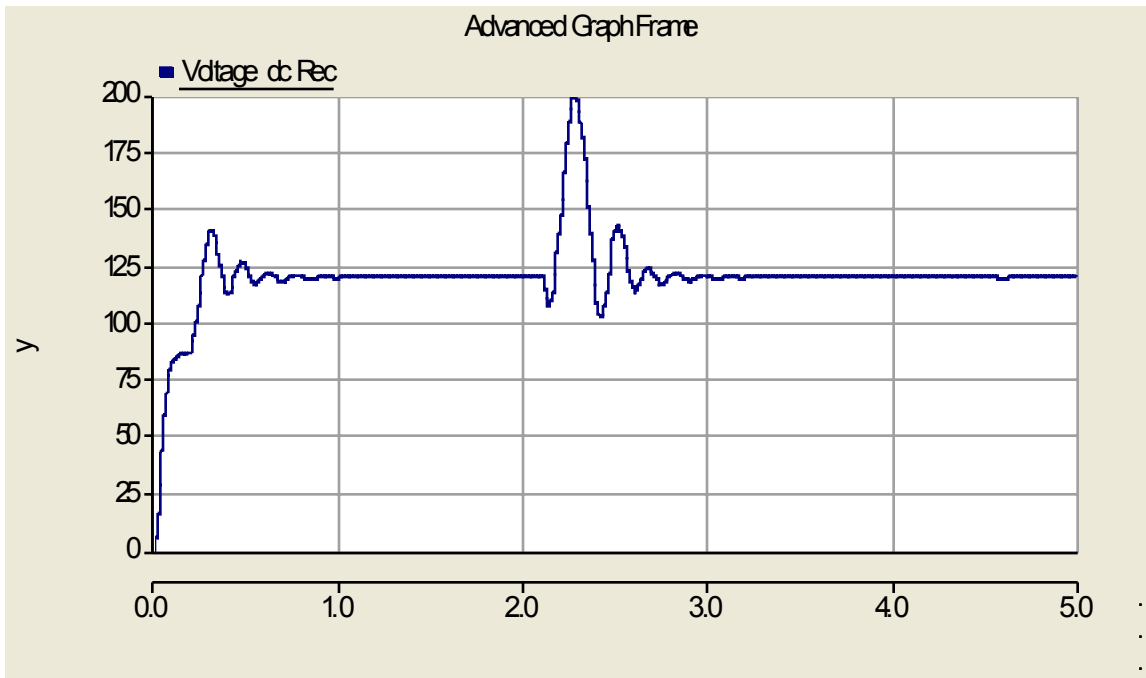


Figura 48. Onda de tensión en el lado DC durante la simulación.

## CONCLUSIONES

- Se investigaron diferentes tecnologías de control para los FACTS tales como el control por susceptancia característica para los SVC y el control por tensión para los Statcom.
- Se comparó la respuesta de los SVC y STATCOM comparando sus ventajas y limitaciones tanto físicas como de sus algoritmos de control ante contingencias y disturbios del sistema.
- Se empleó el software PSCAD V4.1 debido a las ventajas que tiene este en la simulación de algoritmos de control para componentes de electrónica de potencia tales como GTO's y SCR.
- El punto más interesante para los planeadores de los sistemas de potencia es que las tecnologías FACTS abren nuevas oportunidades para controlar el flujo de potencia incrementando la capacidad presente tanto de las líneas existentes como de las nuevas.
- El comportamiento del SVC gobernado por el control de susceptancia característica es satisfactorio ante la variación súbita de carga previniendo la inestabilidad de voltaje así como medio de compensación de reactivos para un sistema AC.
- Las simulaciones del sistema AC con el STATCOM conectado al mismo arrojaron comportamientos satisfactorios ya que lograron compensar una tensión RMS 3 $\phi$  de 0.78p.u. bajo condiciones nomales de estado estable y de 0.61p.u bajo condiciones de falla a valores aceptables cercanos a 1.0p.u.



## BIBLIOGRAFÍA

[1] Enrique Acha. Claudio R. Fuerte Esquivel, "FACTS, Modelling and simulation in Power Networks"

[2] Kundur Prabha. "Power System Stability and Control" 1994.

[3] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi "Understanding FACTS, concepts and technology of flexible AC transmission systems".

[4] Yong Hua Song, Allan T. Johns "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)".