

# IDENTIFICACION DE LAS VENTAJAS, LAS DESVENTAJAS Y LAS CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)

LEIDY VANESSA AGUDELO GALLEGO  
LEONEL RUIZ OCHOA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2008

IDENTIFICACION DE LAS VENTAJAS, LAS DESVENTAJAS Y  
LAS CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION  
FLEXIBLE (FACTS)

LEIDY VANESSA AGUDELO GALLEGO  
LEONEL RUIZ OCHOA

TRABAJO DE GRADO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTRICIDAD

DIRECTOR  
CARLOS ALBERTO RIOS PORRAS  
INGENIERO ELECTRICISTA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2008

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **DEDICATORIA**

Le dedico este título a mi mamá AMPARO GALLEGO la cual siempre me apoyo y creyó en mis capacidades.

### **LEIDY VANESSA AGUDELO GALLEGO**

Les dedico este título a mis padres Leticia Ochoa y José Edilberto Ruiz por su apoyo y comprensión en los momentos difíciles en el transcurso de mi carrera, a mi tía Lilalba Gaviria Ruiz por su inmensa ayuda y colaboración, a todos mis hermanos por su comprensión a lo largo de mi carrera.

### **LEONEL RUIZ OCHOA**

“La educación es algo que recibimos cuando nuestro padre nos manda a la universidad, pero no estará completa mientras no mandemos allí a nuestro propio hijo”.

**Anónimo**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer primero a Dios por darnos sabiduría y paciencia para culminar una etapa más en nuestras vidas.

Al ingeniero Carlos Ríos Porras por la entrega, tiempo y colaboración que nos dedico en la elaboración de nuestro trabajo de grado, a los ingenieros Antonio Escobar, Oscar Gómez y Santiago Gómez por su aporte y colaboración a este proyecto.

A mis compañeros y amigos, a Villa por su ayuda en el transcurso de mi carrera en donde siempre obtuve su apoyo.

**LEONEL RUIZ OCHOA**

A mis amigos Cata, Diana, Nine y Disney por colaborarme en las dificultades que se me presentaron a lo largo de mi carrera.

A mi Negrís por estar siempre a mi lado apoyándome, dándome ánimos para salir adelante y no dejarme vencer por las dificultades.

**LEIDY VANESSA AGUDELO GALLEGO**

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>12</b>
<b>1. SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 BREVE HISTORIA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 ANTECEDENTES SOBRE FACTS</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)</b> .....	<b>15</b>
1.3.1 Ventajas de los (FACTS) .....	16
1.3.2 Desventajas de los (FACTS).....	17
<b>2. CLASIFICACION DE LOS FACTS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 SEGÚN LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1.1 Controlador serie. ....	18
2.1.1.1 Descripción. ....	18
2.1.1.2 Principio básico de funcionamiento.....	19
2.1.1.2.1 Circuito controlador serie sin compensación .....	20
2.1.1.2.2 Circuito controlador serie con compensación .....	25
2.1.1.3 Tipos de controladores serie.....	29
2.1.1.3.1 Capacitor controlador por transistores serie (TCSC).....	29
2.1.1.3.2 Objetivos principales de un TCSC.....	30
2.1.1.3.3 Configuración de un TCSC .....	30
<b>2.1.2 Controlador paralelo</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1.2.1 Descripción:</b> .....	<b>31</b>
2.1.2.2 Principio básico de funcionamiento.....	32
2.1.2.2.1 Circuito controlador paralelo sin compensación.....	32
<b>2.1.2.2.2 Circuito controlador paralelo con compensación</b> .....	<b>33</b>
2.1.2.3 Tipos de controladores Paralelo .....	38
2.1.2.3.1 Compensador estático de reactivos (SVC) .....	38
2.1.2.3.2 Objetivos principales de un SVC:.....	39
2.1.2.3.3 Configuración básica de un SVC .....	39
2.1.2.3.4 Modo de operación del SVC.....	40
2.1.2.3.5 Aumento de la capacidad de transmisión.....	40
2.1.2.3.6 Control de tensión en puntos críticos .....	40
2.1.2.3.7 Mejoramiento de la estabilidad transitoria .....	40
2.1.2.4 Configuración y aplicación de un SVC en función del modo de control de los bancos de condensadores.....	41

2.1.2.4.1	Condensador encendido por tiristores (TSC).....	41
2.1.2.4.2	Reactor controlado por tiristores (TCR) .....	42
2.1.2.4.3	Reactor encendido por tiristores (TSR).....	43
2.1.2.5	Compensador estático síncrono (STATCOM).....	43
2.1.2.5.1	Objetivos principales de un STATCOM .....	44
2.1.2.5.2	Ventajas del STATCOM: .....	44
2.1.2.5.3	Ventajas del STATCOM sobre el SVC:.....	44
2.1.2.5.4	Desventajas del STATCOM.....	44
2.1.2.5.5	Componentes básicos de un STATCOM.....	44
2.1.2.5.6	Configuración de un STATCOM usando GTO.....	45
2.1.2.5.7	Aplicaciones del STATCOM .....	46
2.1.2.6	Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC).....	46
2.1.2.6.1	Objetivos principales del UPFC.....	47
2.1.2.6.2	Aplicaciones del UPFC .....	47
2.1.2.6.3	Configuración de un UPFC .....	47
2.1.3	Controladores serie- serie:.....	48
<b>2.1.4</b>	<b>Controladores serie-paralelo: .....</b>	<b>49</b>
<b>2.2</b>	<b>SEGÚN SU GENERACIÓN .....</b>	<b>51</b>
2.2.1	Primera generación:.....	51
<b>2.2.2</b>	<b>Segunda generación: .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Tercera generación:.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3</b>	<b>SEGÚN SUS FUNCIONES.....</b>	<b>52</b>
2.3.1	Control de voltaje: .....	52
2.3.2	Control de flujo de potencia: .....	52
2.3.3	Estabilidad dinámica: .....	52
2.3.4	Estabilidad transitoria:.....	53
<b>2.4</b>	<b>SEGÚN LA FUNCIÓN DE SUS PRINCIPALES ELEMENTOS.....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Dispositivos FACTS controlados por tiristores .....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Dispositivos FACTS basados en convertidores .....</b>	<b>54</b>
<b>2.5</b>	<b>USO DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS) EN COLOMBIA .....</b>	<b>55</b>
<b>2.6</b>	<b>ESTUDIOS REALIZADOS PARA LA IMPLEMENTACION DE SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLES (FACTS) EN COLOMBIA .....</b>	<b>58</b>
<b>2.7</b>	<b>LOCALIZACION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS) .....</b>	<b>59</b>
<b>3.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Controlador serie .....	19
Figura 2. Circuito controlador serie sin compensación .....	20
Figura 3. triangulo de potencia de la carga.....	21
Figura 4. Diagrama fasorial serie sin compensación.....	23
Figura 5. Circuito en simulink serie sin compensación .....	24
Figura 6. Voltaje de envío ( $V_f$ ) del circuito serie sin compensación.....	24
Figura 7. Circuito controlador serie con compensación .....	25
Figura 8. Diagrama fasorial serie con compensación .....	27
Figura 9. Circuito en simulink serie con compensación.....	28
Figura 10. Voltaje de envío ( $V_f$ ) del circuito serie con compensación .....	28
Figura 11. Comparación del voltaje de envío ( $V_f$ ) del circuito serie sin compensación y con compensación .....	29
Figura 12. Capacitor controlado por transistores serie (TCSC).....	30
Figura 13. Controlador paralelo .....	31
Figura 14. Corriente de línea ( $I_s$ ) del circuito paralelo sin compensación .....	32
Figura 15. Circuito controlador paralelo con compensación .....	33
Figura 16. Triangulo de factor de potencia .....	33
Figura 17. Diagrama fasorial paralelo con compensación .....	35
Figura 18. Circuito simulink, paralelo con compensación.....	36
Figura 19. Corriente de línea ( $I_s$ ), del circuito paralelo con compensación.....	36
Figura 20. Voltaje en el envío ( $V_i$ ), del circuito paralelo con compensación .....	37
Figura 21. Comparación del voltaje de envío ( $V_f$ ), del circuito paralelo sin compensación y con compensación .....	37
Figura 22. Comparación de las corrientes de línea ( $I_s$ ) del circuito paralelo sin compensación y con compensación .....	38
Figura 23. Compensador estático de reactivos (SVC).....	39
Figura 24. Compensador encendido por tiristores (TSC).....	42
Figura 25. Reactor controlado por tiristores (TCR).....	43
Figura 26. Compensador estático síncrono (STATCOM).....	46
Figura 27. Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) .....	48
Figura 28. Controlador serie-serie .....	49
Figura 29. Controlador serie-paralelo con controlador coordinado.....	50
Figura 30. Controlador serie-paralelo con enlace CD.....	50
Figura 31. Sistema caño limón sin SVC .....	57
Figura 32. Diagrama de potencia caño limón sin SVC .....	57
Figura 33. Sistema caño limón con SVC.....	57
Figura 34. Diagrama de potencia caño limón con SVC .....	58

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados del controlador serie sin compensación.....	23
Tabla 2. Resultados del controlador serie con compensación .....	26
Tabla 3. Resultados del controlador paralelo con compensación.....	35

## GLOSARIO

BESS: (*Battery Energy Storage System*): sistema de almacenaje de energía en baterías.

FACTS: (Flexible AC Transmisión System): sistema de transmisión flexible.

STATCOM: (Static Synchronous Compensator): compensadores estáticos síncronos.

SMES: (Superconducting Magnetic Energy Storage): almacenaje de energía en superconductores magnéticos.

SSG: (*Static Synchronous Compensator*): generador estático síncrono.

SSSC: (*Static Synchronous Series Compensator*): compensadores estáticos síncronos serie.

SVC: (Static Var Compensator): compensador estático de reactivos.

SVG: (*Static Var Generator or Absorber*): generador (o consumidor) estático de reactivos.

SVS: (*Static Var System*): sistema estático de VARS.

TCSC: (Thyristor Controlled Switched Capacitor): condensador controlado por transistores serie.

TCSR: (Thyristor Controlled Switched Reactor): reactor controlado por transistores serie.

TCR: (*Thyristor Controlled Reactor*): reactor controlado por tiristores

TSC: (*Thyristor Switched Capacitor*): condensador encendido por tiristores

TSSC: (*Thyristor-Switched Series Capacitor*): condensador encendido por transistores serie.

TSR: (*Thyristor Switched Reactor*): reactor encendido por tiristores

UPFC: (Unified Power Flow Controller): Controlador unificado del flujo de potencia.

VARS: compensador estático de potencia reactiva.

IPC: (Controller of Power Interface) controlador de potencia de interface.

IPFC: (Controller interline Flow Controller): controlador interlinea del flujo de potencia.

VSC: (Convertor of source voltage) convertidor de fuente de voltaje.

CSC: (Controlable Condenser of Serie) condensador de serie controlables.

PAR: (Regulatory Angle of Phase) ángulo regulador de fase.

TCPST: (Phase Changer Controlled for Thyristor) cambiador de fase controlado por tiristores.

TCPAR: (Regulator of Phase Angle Controlled for Thyristor) regulador de ángulo de fase controlado por tiristores.

TCVR: (Regulator of Voltage Controlled for Thyristor) regulador de voltaje controlado por tiristores.

SSR-NGH: (Damper of Subsynchronous Resonance) apagador de resonancia subsíncrona.

BTB-VSC: (Back To Back Convertor of Source Voltage) back to back convertidor de fuente de voltaje.

## **RESUMEN**

Se presenta la descripción de los (FACTS), clarificando las diferencias existentes entre varios dispositivos, así como sus ventajas y desventajas respecto a su función correspondiente.

Se analizan los diagramas fasoriales de los controladores series y los controladores paralelos, de esta forma se desarrollan las ecuaciones con sus valores correspondientes para el circuito de la Compensación Serie Controlada por Tiristores (TCSC) y el circuito de la Compensación Estática (Compensador Estático de Reactivos-SVC).

# INTRODUCCION

En los últimos años la demanda en los sistemas ha aumentado y seguirá incrementándose lo cual conlleva a una serie de problemas como sobrecarga y subutilización del potencial de transmisión, debido a lo anterior es necesario implementar sistemas que hagan más fácil y eficiente el transporte de la energía eléctrica disminuyendo las pérdidas en las líneas, uno de estos sistemas son los de transmisión flexible (FACTS) que buscan principalmente reducir el impacto ambiental ya que se pueden utilizar las infraestructuras y la servidumbre de las líneas ya existentes para transmitir más potencia. [3]

Según la IEEE la definición de los sistemas FACTS es la siguiente: “Sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores estáticos y otros basados en electrónica de potencia para mejorar el control e incrementar la capacidad de transferir potencia.”

Por lo anterior se va a realizar una investigación que lleve a comprender la importancia de los sistemas de transmisión flexible (FACTS), se analizarán las características, las ventajas y las desventajas, esta investigación se llevará a cabo recopilando información de los FACTS más utilizados y se describirá una simulación desarrollada en la cual se resaltarán las ventajas de utilizar FACTS en un sistema de potencia. [8]

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Identificar las ventajas, las desventajas y las características de los sistemas de transmisión flexible (**FACTS**).

### OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar las ventajas y las desventajas de los (FACTS).
- Analizar los diferentes tipos de (FACTS) y su funcionamiento.

# 1. SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)

Los sistemas de transmisión y distribución de las empresas eléctricas experimentan cambios debido al aumento en la demanda de energía eléctrica, las limitaciones de tipo ambiental en la construcción de nuevos proyectos y el desarrollo de nuevas tecnologías como la electrónica de potencia y los sistemas de telecomunicación que permiten mejorar las condiciones operativas del sistema eléctrico.

En la actualidad los sistemas de potencia presentan un gran nivel de interconexiones debido a las ventajas que éstas representan, como son la posibilidad de poder suministrar energía eléctrica a los centros de carga al mínimo costo con la confiabilidad requerida, tener asistencia mutua en emergencias y coordinar la operación de todas las unidades generadoras participantes; sin embargo, esto ha traído como consecuencia un crecimiento excesivo de los sistemas de potencia haciendo que estos sean cada vez más difíciles de controlar y por lo tanto, pueden ser menos seguros al conducir grandes flujos de potencia con control inadecuado, tener exceso de potencia reactiva en varias zonas del sistema, y presentar grandes oscilaciones dinámicas entre diferentes partes del sistema, sumando a esto el costo de las líneas de transmisión, así como las dificultades que representa su construcción, se limita la disponibilidad y el crecimiento de la capacidad de generación. Además, en un sistema de transmisión complejo, la potencia entre una estación generadora y los centros de carga fluye a través de numerosas líneas, éste fenómeno se conoce como flujo en anillo o flujo por rutas paralelas. En un mercado de servicio eléctrico desregulado, éste fenómeno causa problemas en las empresas eléctricas ya que la energía eléctrica no fluye basada en leyes económicas, por lo tanto, el manejo de la transmisión de energía es de principal interés para el establecimiento de una competencia real en el mercado eléctrico. [4]

## 1.1 BREVE HISTORIA

A partir de los años 60's se empezó el desarrollo de la tecnología de transmisión en corriente continua en alto voltaje (HVDC) que permitió realizar interconexiones que fueron verdaderos retos de la ingeniería:

- Interconexión submarina (Francia-Inglaterra).
- Interconexiones Brasil (60 Hz)-Paraguay (50 Hz). Enlaces transcontinentales en DC de los Estados Unidos, los más importantes alimentan el estado California desde Oregón (900 km, 3100 MW), y Utah (780 km, 1600 MW).

A pesar de que los sistemas D.C presentan inconvenientes y unos altísimos costos en las estaciones convertidoras, éstos permiten una flexibilidad increíble contraria a los sistemas A.C que son completamente inflexibles, por lo que

desde finales de los años 70's se ha desarrollado la tecnología para obtener mayor control en el flujo de potencia para los sistemas de A.C. [10]

En el área de ingeniería eléctrica se han llevado a cabo diversas investigaciones, las que han conducido al desarrollo de los sistemas de transmisión flexible (FACTS), dispositivos que abarcan al conjunto de equipos con capacidad de controlar el flujo de potencia o variar características de la red, empleando semiconductores de potencia para controlar el flujo de corriente alterna, cuyo propósito es dar flexibilidad a la transmisión de la energía eléctrica. [4]

## **1.2 ANTECEDENTES SOBRE FACTS**

El término de la industria eléctrica, FACTS, cubre un número de tecnologías que optimizan la seguridad, la capacidad y la flexibilidad de los sistemas de transmisión de energía. Las soluciones FACTS permiten incrementar la capacidad de las redes de transmisión existentes, mientras mantienen o mejoran los márgenes de operación necesarios para la estabilidad de la red.

Al utilizar los sistemas de transmisión flexible (FACTS), se puede hacer llegar más energía a los consumidores con un mínimo impacto en el ambiente y a menor costo de inversión comparado con la alternativa de construir nuevas líneas de transmisión o plantas generadoras, que llevan más tiempo.

La tecnología de los FACTS provee soluciones a los problemas de estabilidad y permite a los sistemas de transmisión operar más eficientemente. [9]

## **1.3 CARACTERISTICAS DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)**

Los FACTS controlan el flujo de potencia en una línea de transmisión, esto permite utilizar las líneas cerca de sus límites térmicos y/o forzar los flujos de potencia por rutas determinadas. Estos dispositivos también pueden ser utilizados para controlar problemas dinámicos del sistema, para compartir potencia entre las redes de regiones alejadas, teniendo como fin utilizar las cargas debido a la diferencia de clima y horario, disponibilidad de diversas reservas de generación en zonas geográficas distintas, cambios en precios del combustible y en la regulación, etc. [10]

Es por esto que hoy en día el número de estas instalaciones está en aumento en el sistema interconectado debido a que entregan nodos de tensión aproximadamente constante en estado estacionario y también aumentan la estabilidad transitoria del sistema. [11]

Los sistemas de control de los FACTS están basados en la posibilidad de manejar los parámetros interrelacionados que restringen los sistemas (impedancias serie y paralelo, ángulo de fase, oscilaciones a frecuencias

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

Los FACTS son sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores estáticos basados en electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia. [3]

### **1.3.1 Ventajas de los (FACTS)**

- Incrementan la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas de transmisión.
- Mantienen el flujo en las trayectorias de la red para que se establezcan de acuerdo a las distintas condiciones operativas.
- Operan con niveles de carga seguros (sin sobrecarga), y cercano a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Permiten mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas con lo que el margen de reserva en generación puede reducirse considerablemente.
- Previenen salidas de servicio en cascada, limitando el efecto de fallas en el sistema y equipos.
- Amortiguar oscilaciones del sistema de potencia, que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible. Pueden bloquear flujos en anillo indeseados. Esto permite aumentar la capacidad de las líneas entre un 20-40%, cuando de otra manera una restricción en éstas obligaría a reducir la capacidad de flujo a través de ellas.
- Otorgan la posibilidad de operar las líneas cercanas a sus límites térmicos manteniendo o mejorando la seguridad y confiabilidad en el sistema. Esto permite a las empresas ahorrar dinero mediante la mejor utilización de sus activos (cables y equipos en general) acomodándose al aumento de demanda de energía y potencia por parte de los clientes.
- Responden rápidamente a los cambios en las condiciones de la red para proveer un control del flujo de potencia en tiempo real, el cual es necesario cuando se produce un gran número de transacciones en un mercado eléctrico completamente desregulado.
- Controlan el flujo de potencia activa y reactiva según se requiera, lo que permite optimizar las capacidades de las líneas y moverse bajo condiciones de emergencia más adecuadamente.
- Aumentan la seguridad del sistema en general a través del aumento del límite de estabilidad, limitando corrientes de cortocircuitos y sobrecargas, entregando la posibilidad de controlar los apagones en cascada, absorbiendo oscilaciones electromecánicas de sistemas de potencia y máquinas eléctricas.
- Proveen conexiones seguras a instalaciones y regiones vecinas al mismo tiempo que reducen las exigencias generales de reservas de generación.
- Entregan mayor flexibilidad en la locación de nuevas unidades generadoras.

- Reducen los flujos de potencia reactiva en las líneas de transmisión y por lo tanto, aumentan la capacidad de transporte de potencia activa.
- Reducen los flujos de potencia en anillo o flujos de corriente.
- Incrementan la utilización de la generación de menor costo. [4]
- Incrementan los niveles de cargabilidad y transferencias de los corredores de transmisión ya existentes, sin sacrificar aspectos de seguridad o calidad del servicio.
- Una propiedad única de los FACTS es la gran flexibilidad que presentan en los tres estados operativos del sistema de potencia: prefalla, falla y postfalla. La capacidad para controlar transitorios y para impactar rápida y significativamente el estado de postfalla los hace sumamente atractivos. [12]

### **1.3.2 Desventajas de los (FACTS)**

- Costos aún elevados comparados con la compensación reactiva tradicional.
- Generación e introducción de armónicos a la red.
- No están estandarizados, es decir, son muy ajustados a los sistemas donde se colocan. [10]

## **2. CLASIFICACION DE LOS FACTS**

### **2.1 SEGÚN LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS**

#### **2.1.1 Controlador serie.**

##### **2.1.1.1 Descripción.**

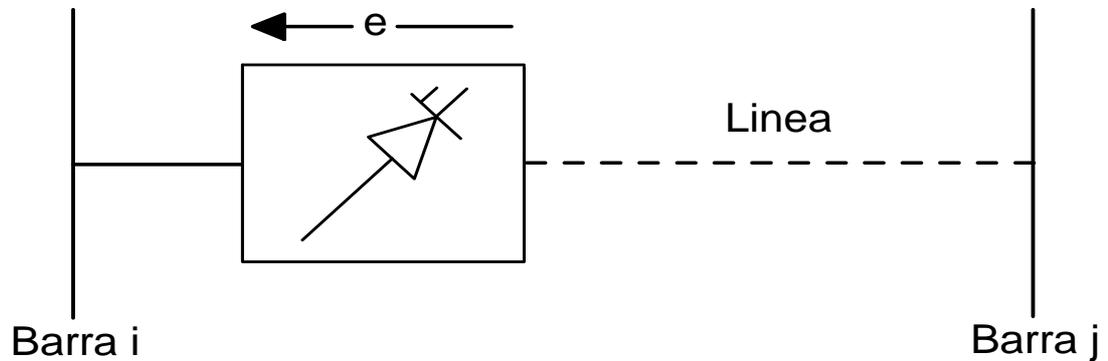
El controlador serie consiste en una impedancia variable como un capacitor o un reactor, o una fuente variable basada en electrónica de potencia a frecuencia fundamental, subsíncrona, armónica o una combinación de ellas. El principio de operación de todos los controladores serie es inyectar un voltaje ( $e$ ) en serie con la línea. Una impedancia variable multiplicada por la corriente que fluye a través de ella representa un voltaje en serie inyectado a la línea. Mientras el voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador serie sólo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa. [12]

Es importante notar que un controlador serie tiene su impacto sobre el voltaje de línea y por consiguiente directamente sobre el flujo de corriente y potencia a través de la línea. Por otro lado si el propósito de utilizar un dispositivo es controlar el flujo de corriente/potencia y el amortiguamiento de oscilaciones, el controlador serie es más poderoso que el controlador paralelo, ya que éste permite la posibilidad de modificar la impedancia serie de la línea de transmisión, que es uno de los parámetros que determinan el flujo de corriente/potencia.

Como resultado se obtiene un mejor funcionamiento del sistema de transporte gracias a:

- a) La reducción del voltaje serie disminuye en magnitud y ángulo sobre una línea de conducción eléctrica.
- b) Reducción de las fluctuaciones de tensión dentro de límites definidos durante cambio de transmisiones de potencia.
- c) Limitación de las corrientes de cortocircuitos en las redes o subestaciones.
- d) Mejoramiento del sistema de amortiguación. Respectivamente oscilaciones de amortiguamiento.

Figura 1. Controlador serie



### 2.1.1.2 Principio básico de funcionamiento

A través del siguiente ejemplo se explica el principio básico de funcionamiento del controlador serie. En la **Figura 2** se presenta el circuito equivalente monofásico de una línea de transmisión con reactancia inductiva ( $X_s$ ) que abastece a una carga de 180 MVA,  $V_L = 220$  kV y  $F_p = 0,8 \downarrow$ . En este ejemplo se podrán controlar los flujos de potencia activa y reactiva por medio de la magnitud y el ángulo de transferencia de potencia del voltaje del controlador serie.

Datos:

- Carga:

$$V_{LL} = 220 \text{ kV}$$

$$F_p = 0,8 \downarrow$$

$$\text{Potencia trifásica} = S_3 \phi = 180 \text{ MVA}$$

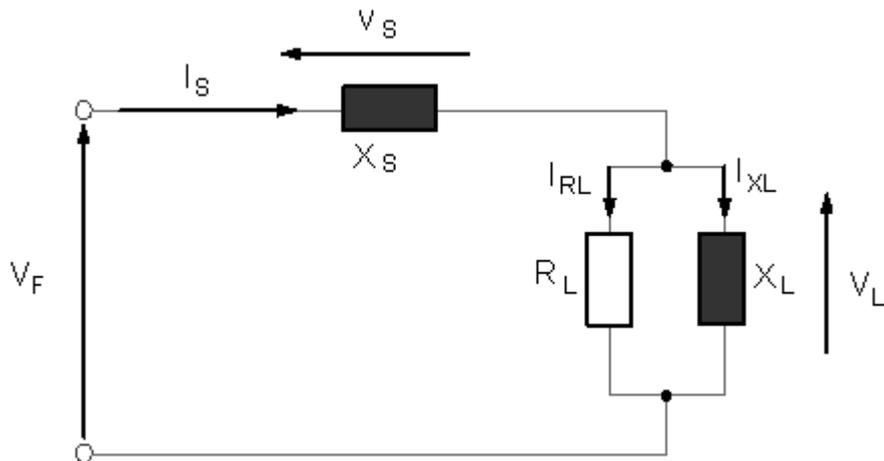
- Línea

$$X_s = 90 \Omega$$

$$F = 60 \text{ Hz}$$

## 2.1.1.2.1 Circuito controlador serie sin compensación

Figura 2. Circuito controlador serie sin compensación



$V_L$  = Voltaje en la carga  
 $X_L$  = Reactancia en la carga  
 $R_L$  = Resistencia en la carga  
 $I_{XL}$  = Corriente en la reactancia de la carga  
 $I_{RL}$  = Corriente en la resistencia de la carga  
 $V_S$  = Caída de tensión en la línea  
 $X_S$  = Reactancia de la línea  
 $I_S$  = Corriente de la línea  
 $V_F$  = Voltaje de envío

Cálculos:

La corriente en la reactancia de la carga ( $I_{XL}$ ) se toma como referencia:

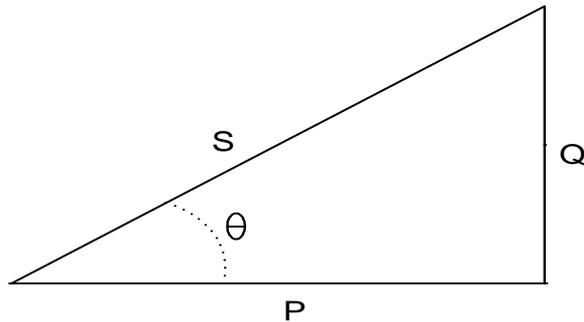
$$I_{XL} = I_{XL} \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$V_L = \frac{220 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \angle 90^\circ = 127 \text{ kV} \angle 90^\circ$$

$$Fp = 0,8 \downarrow \rightarrow \theta = 36,87^\circ$$

$$\text{Potencia monofásica} = S_1 \phi = 60 \text{ MVA} \angle 36,87^\circ$$

**Figura 3. Triangulo de potencia de la carga**



La potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q) de la carga es:

$$P = S \cos \theta = 48 \text{ MW}$$

$$Q = S \operatorname{sen} \theta = 36 \text{ MVAR}$$

La corriente en la carga ( $I_s$ ) es igual a:

$$I_s = \left( \frac{S_1 \phi}{V_L} \right)^* = \left( \frac{60 \text{ MVA} \angle 36,87^\circ}{127 \text{ kV} \angle 90^\circ} \right)^* = 472,377 \text{ A} \angle 53,13^\circ$$

Donde:

$$R_L = \frac{(V_L)^2}{P} = \frac{(127 \text{ kV})^2}{48 \text{ MW}} = 336,02 \Omega$$

$$X_L = \frac{(V_L)^2}{Q} = \frac{(127 \text{ kV})^2}{36 \text{ MVAR}} = 448,148 \Omega$$

El valor de la reactancia ( $X_s$ ) de la línea es:

$$X_s = 90 \Omega = \omega L_s \qquad \omega = 2\pi \times F$$

$$L_s = 238,7 \text{ mH}$$

Se halla la corriente en la reactancia de la carga ( $I_{XL}$ ) y la corriente en la resistencia de la carga ( $I_{RL}$ ):

$$I_{XL} = \frac{V_L}{jX_L} = \frac{127 \text{ kV} \angle 90^\circ}{448,148 \Omega \angle 90^\circ} = 283,38 \text{ A} \angle 0^\circ$$

$$I_{RL} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{127 \text{ kV} \angle 90^\circ}{336,02 \Omega} = 377,95 \text{ A} \angle 90^\circ$$

La impedancia de la carga ( $Z_L$ ) es igual:

$$Z_L = \frac{(R_L)(jX_L)}{R_L + jX_L}$$

$$Z_L = \frac{336,02\Omega \times j448,148}{336,02\Omega + j448,148} = 268,8 \angle 36,87^\circ$$

Se halla la caída de tensión en la línea ( $V_s$ ):

$$V_s = (jX_s) \times (I_s) =$$

$$V_s = (90\Omega \angle 90^\circ) \times (472,38 A \angle 53,13^\circ) = 42,514 kV \angle 143,13^\circ$$

El voltaje en el envío ( $V_F$ ), se halla usando la segunda ley de Kirchhoff:

$$V_F = (jX_s) \times (I_s) + V_L =$$

$$V_F = \left( (90\Omega \angle 90^\circ) (472,377 A \angle 53,13^\circ) \right) + (127 kV \angle 90^\circ) = 156,3 kV \angle 102,6^\circ$$

El ángulo de transferencia de potencia ( $\delta$ ) es:

$$\delta = \theta_{V_F} - \theta_{V_L}$$

$$\delta = 102,6^\circ - 90^\circ$$

$$\delta = 12,6^\circ$$

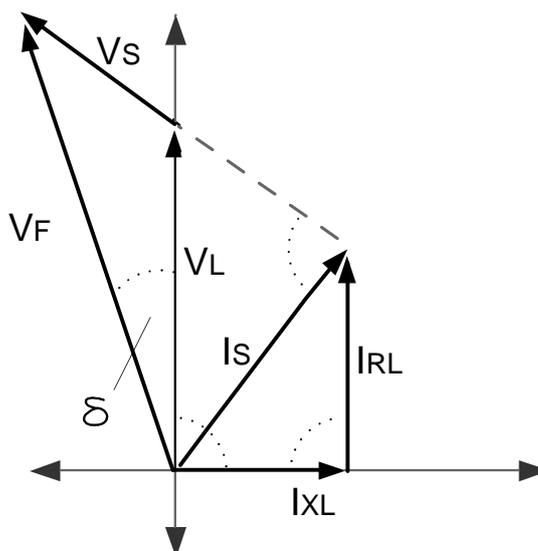
En la **Tabla 1** se muestran los resultados obtenidos de la solución del circuito serie sin compensación, se puede observar que el valor del ángulo de transferencia de potencia ( $\delta$ ) es igual a ( $12,6^\circ$ ), el control de este ángulo ( $\delta$ ) permite controlar la potencia reactiva, y la magnitud del voltaje ( $V_F$ ) controla la potencia activa.

**Tabla 1. Resultados del controlador serie sin compensación**

VARIABLE	RESULTADOS
$R_L$	$336,02 \Omega$
$X_L$	$448,148 \Omega$
$X_S$	$90 \Omega$
$Z_L$	$268,80 A \angle 36,87^\circ$
$I_{RL}$	$377,95 A \angle 90^\circ$
$I_{XL}$	$283,38 A \angle 0^\circ$
$I_S$	$472,377 A \angle 53,13^\circ$
$V_L$	$127 kV \angle 90^\circ$
$V_S$	$42,514 kV \angle 143,13$
$V_F$	$156,3 kV \angle 102,6^\circ$
$\delta$	$12,6^\circ$

Se toma como referencia  $I_{XL} = 283,380 A \angle 0^\circ$

**Figura 4. Diagrama fasorial serie sin compensación**



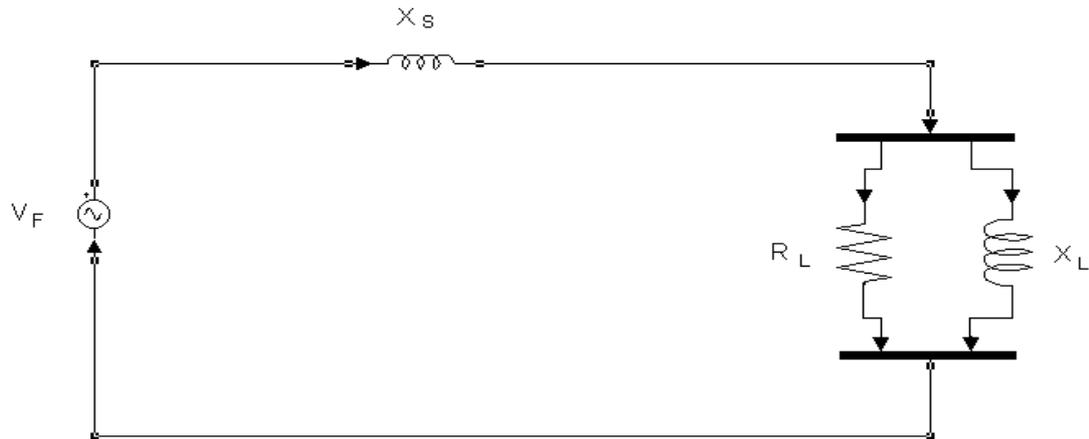
Donde el voltaje de envío ( $V_F$ ) pico a pico es igual a:

$$V_{F \cdot PICO} = \sqrt{2} \times (156,3 \text{ kV} \angle 102,6^\circ) = 221 \text{ kV} \angle 102,6^\circ$$

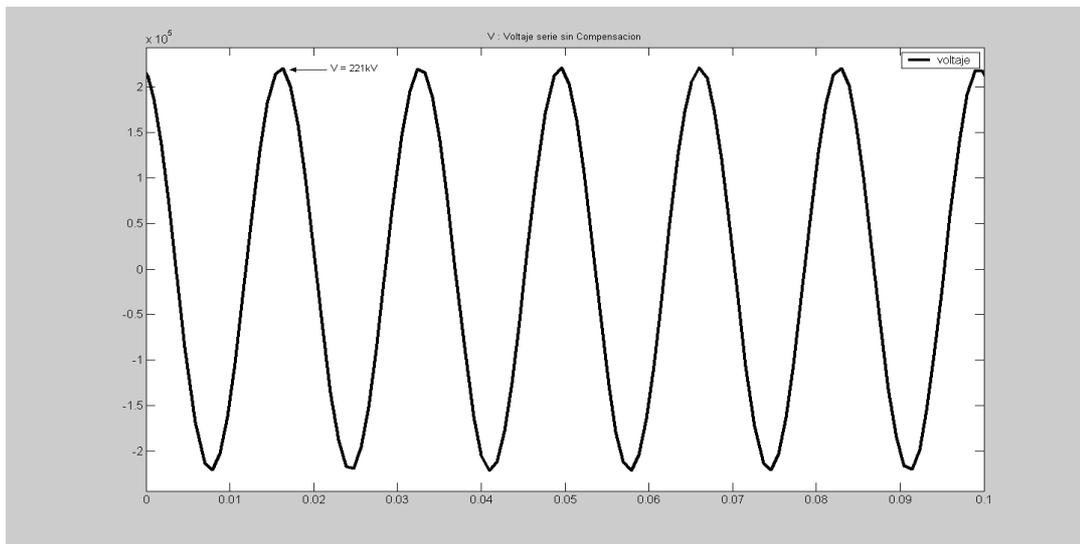
Y donde el voltaje en la carga ( $V_L$ ) pico a pico es igual a:

$$V_{L \cdot PICO} = \sqrt{2} \times (127 \text{ kV} \angle 90^\circ) = 179,6 \text{ kV} \angle 90^\circ$$

**Figura 5. Circuito en simulink serie sin compensación**



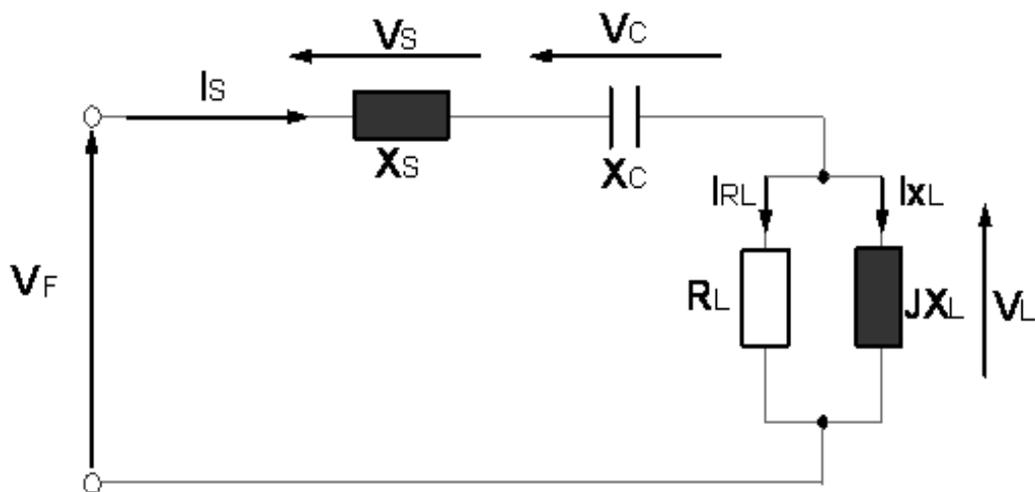
**Figura 6. Voltaje de envío ( $V_f$ ) del circuito serie sin compensación**



## 2.1.1.2.2 Circuito controlador serie con compensación

Para la Figura 7, se presenta el circuito equivalente monofásico de una línea de transmisión con una reactancia inductiva ( $X_S$ ) y una compensación serie capacitiva del 10% de la reactancia serie de la línea de transmisión que abastece a una carga trifásica de 180 MVA,  $V_L = 220$  kV y  $F_p = 0,8$  ↓, donde se mantiene constante la potencia de la carga.

Figura 7. Circuito controlador serie con compensación



Cálculos:

Se halla el voltaje en el condensador ( $V_C$ ):

$$V_C = (I_s) \times (-jX_C) \quad \text{donde} \quad X_C = 10\% X_S$$

$$V_C = (472,38 A \angle 53,13^\circ) \times (9 \Omega \angle -90^\circ) = 4,251 kV \angle -36,87^\circ$$

También se halla  $V_S$ :

$$V_S = (I_s) \times (jX_S) =$$

$$V_S = (472,38 A \angle 53,13^\circ) \times (90 \Omega \angle 90^\circ) = 42,514 kV \angle 143,13^\circ$$

Para luego hallar el voltaje en el envío ( $V_F$ ) se aplica la segunda ley de Kirchhoff:

$$V_F = V_S + V_C + V_L =$$

$$V_F = (42,514kV \angle 143,13^\circ) + (4,251kV \angle -36,87^\circ) + (127kV \angle 90^\circ) =$$

$$V_F = 153,05kV \angle 101,53^\circ$$

El voltaje  $V_{LN}$  pico a pico es igual a:

$$V_{F\text{-}PICO} = \sqrt{2} \times (153,05kV \angle 101,53^\circ) = 216,44kV \angle 101,53^\circ$$

El ángulo de transferencia de potencia con compensación serie ( $\delta_C$ ) es:

$$\delta_C = \theta_{V_F} - \theta_{V_L}$$

$$\delta_C = 101,53^\circ - 90^\circ$$

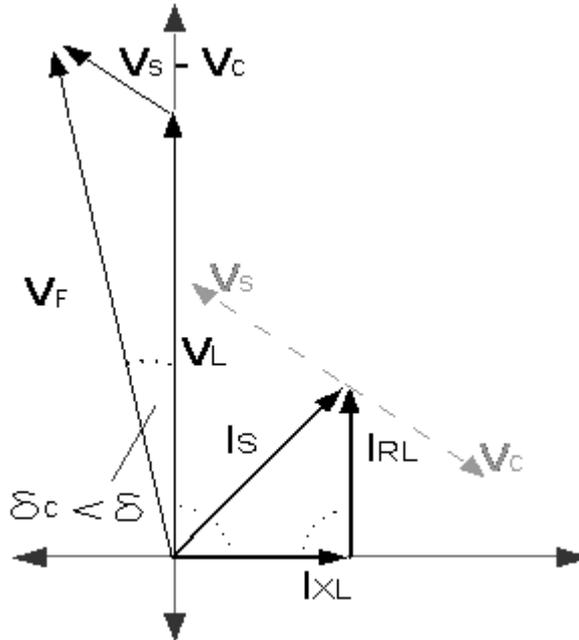
$$\delta_C = 11,53^\circ$$

**Tabla 2. Resultados del controlador serie con compensación**

VARIABLE	RESULTADOS
$R_L$	336,02 $\Omega$
$X_L$	448,148 $\Omega$
$Z_L$	268,8 A $\angle 36,87^\circ$
$I_{RL}$	377,95A $\angle 90^\circ$
$I_{XL}$	283,38 A $\angle 0^\circ$
$I_S$	472,377A $\angle 53,13^\circ$
$V_C$	4,251kV $\angle -36,87^\circ$
$V_L$	127kV $\angle 90^\circ$
$V_S$	42,514kV $\angle 143,13^\circ$
$V_F$	153,05kV $\angle 101,53^\circ$
$\delta_C$	11,53 $^\circ$

Se toma como referencia  $I_{XL} = 283,380 \text{ A} \angle 0^\circ$

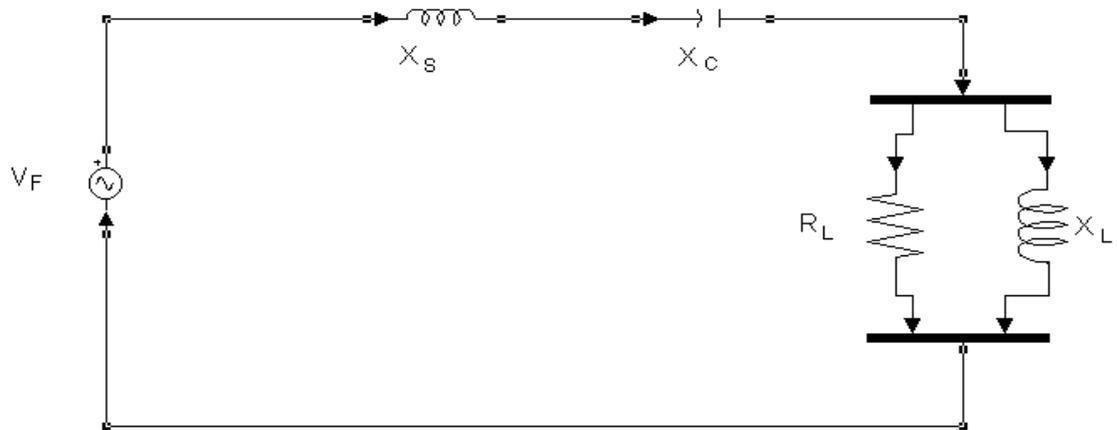
Figura 8. Diagrama fasorial serie con compensación



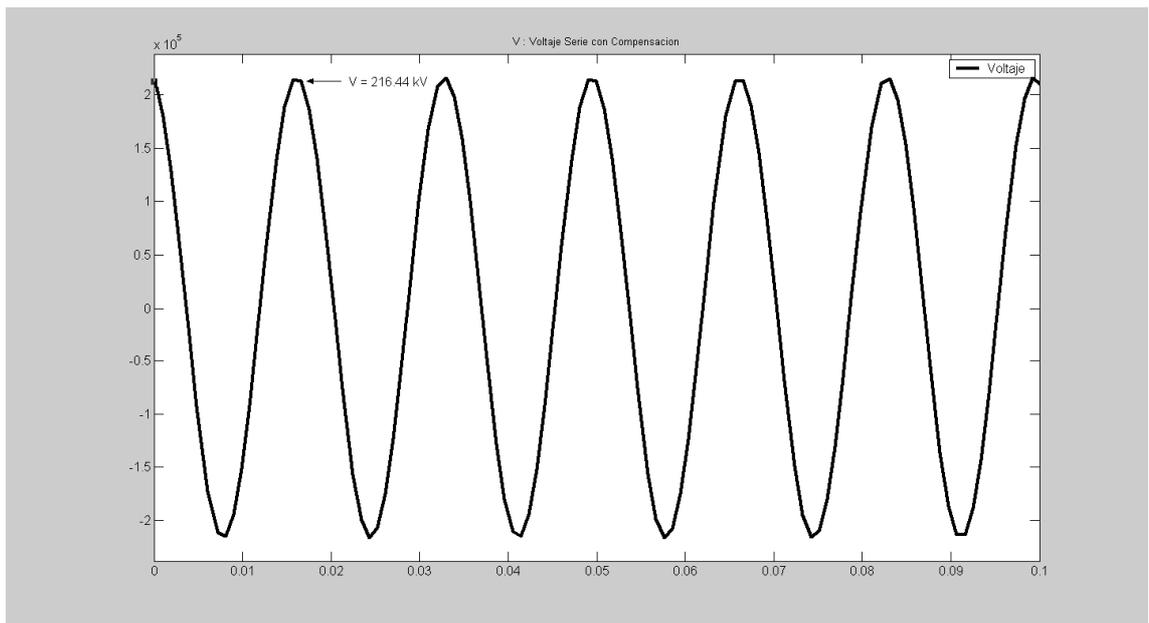
Al calcular la tensión  $V_S - V_C$  (38,263 kV) del circuito controlador serie con compensación, respecto a la tensión  $V_S$  (42,514 kV) del circuito serie sin compensación, se muestra que hay una reducción en la tensión en la línea, lo cual implica una reducción de las fluctuaciones de tensión y un mejoramiento de la respuesta del sistema ante oscilaciones.

En la Figura 9 se simula el circuito serie con compensación y en la Figura 10 aparece la tensión de envío del circuito serie sin compensación y la Figura 11 la comparación de la tensión del voltaje de envío del circuito serie sin compensación y con compensación, donde se nota la reducción en la tensión de envío.

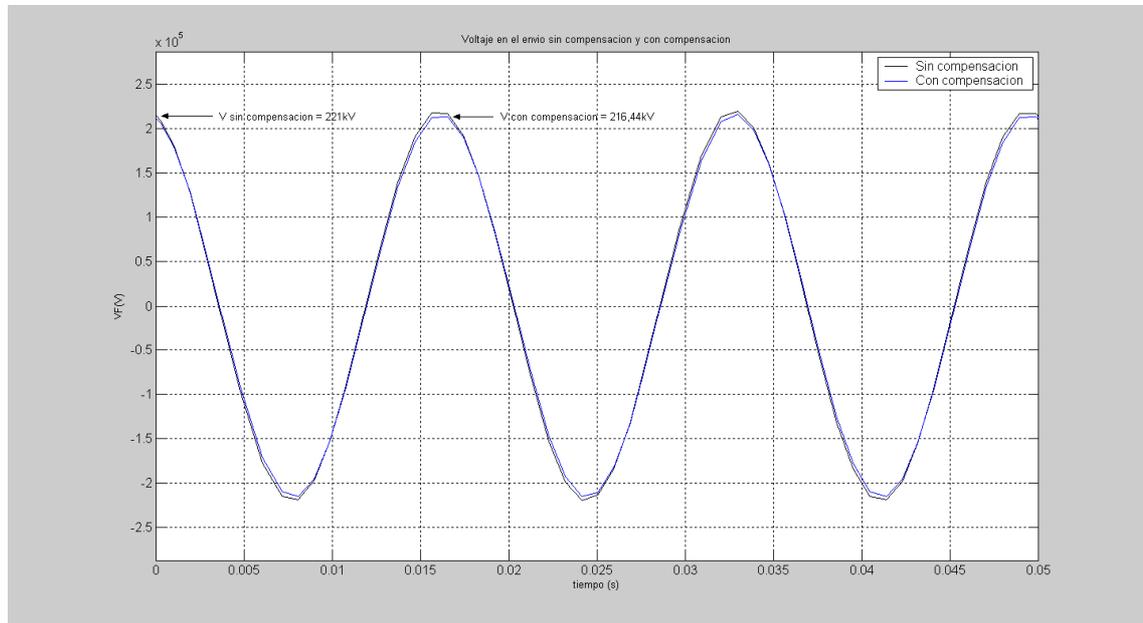
**Figura 9. Circuito en simulink serie con compensación**



**Figura 10. Voltaje de envío ( $V_f$ ) del circuito serie con compensación**



**Figura 11. Comparación del voltaje de envío (Vf) del circuito serie sin compensación y con compensación**



Al comparar las ondas de voltaje generado entre el circuito serie sin compensación y con compensación, se observa la magnitud del voltaje disminuye considerablemente, lo cual significa que no se necesita un sistema de aislamiento tan robusto, debido a que el sistema puede abastecer a la carga con un voltaje de generación más pequeño.

### 2.1.1.3 Tipos de controladores serie

Los tipos de controladores serie son: TCSC (Condensador Controlado por Tiristor Serie), SSSC (Compensadores Estáticos Síncronos Serie), TSSC (Condensador Encendido por Tiristor Serie), TCSR (Reactor Controlado por Tiristor Serie), IPFC (Controlador de Flujo de Potencia Interlineas), TSSR (Reactor Encendido por Tiristor Serie). El tipo de controlador serie más utilizado es el TCSC, a continuación se observa más detalladamente.

#### 2.1.1.3.1 Capacitor controlador por tiristor serie (TCSC)

Es una compensación serie cuya magnitud es controlada por tiristores, normalmente un TCSC está compuesto de una porción de compensación que se deja fija y una porción variable, esta última es la que posee tiristores para su control.

El TCSC al cambiar la impedancia de una línea rápidamente puede controlar el flujo de potencia por la misma, incrementando el flujo y permitiendo reajustes rápidos en respuesta a contingencias (incremento de la estabilidad transitoria), e incrementar el amortiguamiento de oscilaciones de potencia. [1]

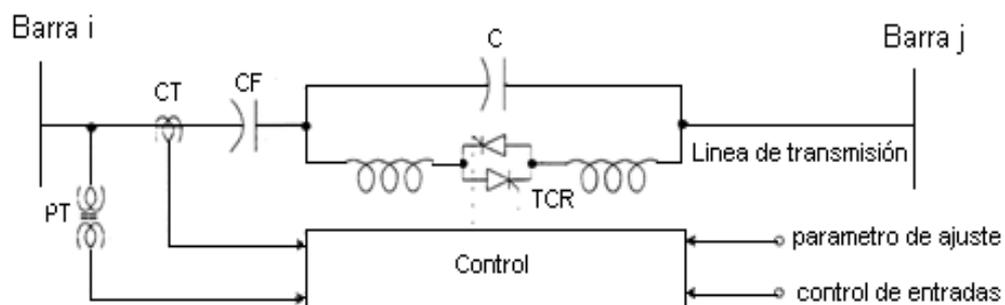
### 2.1.1.3.2 Objetivos principales de un TCSC

- Adaptar la potencia transferida a condiciones reales, medio eficaz para aumentar la potencia transferida.
- Reducir al mínimo las pérdidas del sistema.
- Evitar la resonancia subsíncrona en los sistemas que tienen alto grado de compensación.
- Dividir la potencia en los sistemas con dos niveles diferentes de voltaje de transmisión.
- Proporcionar el medio de interconectar sistemas débiles (el aumento tanto de sincronización como de compensación de torque)
- Limitar la corriente y mejorar la fuente de energía. [7]

### 2.1.1.3.3 Configuración de un TCSC

El TCSC se utiliza para el control del flujo de potencia, amortiguamiento de las oscilaciones de potencia (POD) o para la eliminación de la resonancia sub sincrona (SSR). El TCSC consiste en un arreglo en serie con la línea de un condensador de capacidad fija, que a su vez, está en paralelo con un TCR **Figura 12** De esta forma se obtiene un rango de variación continuo de la impedancia de compensación, permitiendo disminuir la impedancia  $X$  de la línea. Este dispositivo necesita una menor capacidad de generación de reactivos para efectuar las mismas tareas que sus contrapartes paralelas, dado que la modificación de la impedancia permite una acción mucho más directa que el control de las tensiones en las barras que une la línea.

**Figura 12. Capacitor controlado por transistores serie (TCSC)**



Donde los controladores serie se define como la inserción de elementos de potencia reactiva en líneas de transmisión. La tarea de la compensación serie es de reducir la transmisión inductiva en las líneas. De esta manera, se logra acortar virtualmente las líneas y Como consecuencia, el ángulo de transmisión se reduce y la transferencia de energía se puede aumentar sin la reducción de la estabilidad del sistema. [4]

## 2.1.2 Controlador paralelo

### 2.1.2.1 Descripción:

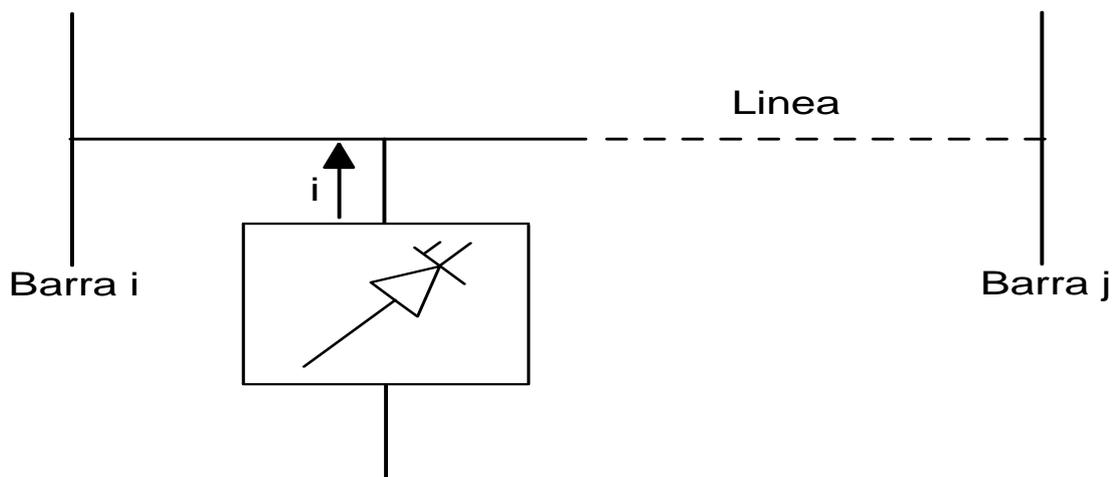
Al igual que como sucede con el controlador serie, el controlador en paralelo puede consistir de una impedancia variable, fuente variable de voltaje o una combinación de ambas **Figura 13**. El principio de operación de todos los controladores en paralelo es inyectar corriente al sistema en el punto de conexión. Una impedancia variable conectada al voltaje de línea causa un flujo de corriente variable que representa una inyección de corriente a la línea. Mientras la corriente inyectada esté en cuadratura con el voltaje de línea, el controlador en paralelo sólo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa. [12]

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

Como resultado se obtiene un mejor funcionamiento del sistema de transporte gracias a:

- a) El control del ángulo permite regular el flujo de potencia.
- b) Al regular el voltaje con un controlador en paralelo, puede ser una medida efectiva para controlar el flujo de potencia real y reactiva entre dos subsistemas.

**Figura 13. Controlador paralelo**



## 2.1.2.2 Principio básico de funcionamiento

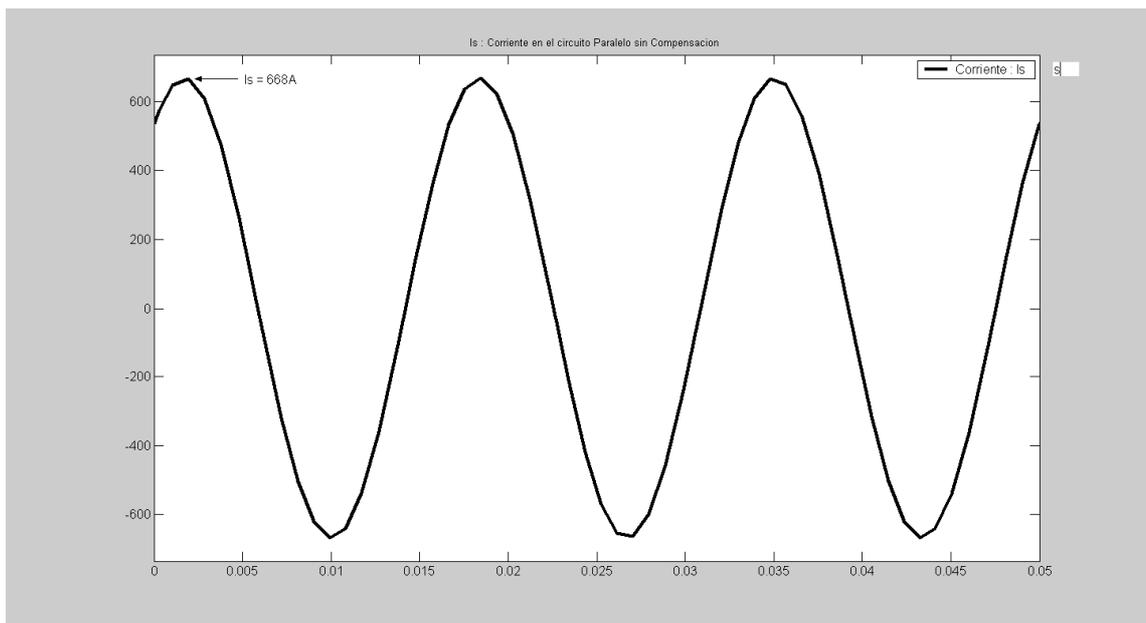
Para explicar el principio básico de funcionamiento del controlador paralelo, se toma el ejemplo de la sección 2.1.1.2.1, el factor de potencia de la carga se mejora a 0,9↓ en atraso.

### 2.1.2.2.1 Circuito controlador paralelo sin compensación

Los datos y los resultados de la línea de transmisión y de la carga aparecen en la **tabla 1**.

La corriente rms a través de la línea es  $I_S = 472,377A \angle 53,13^\circ$  y su valor pico es  $I_{S'PICO} = \sqrt{2} \times (472,377A \angle 53,13^\circ) = 668,041A \angle 53,13^\circ$  **figura 14**.

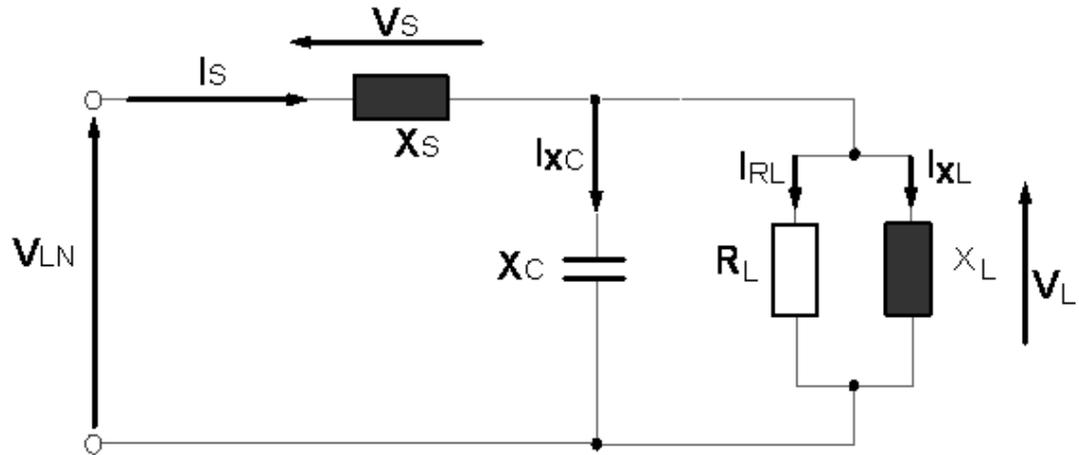
**Figura 14. Corriente de línea (Is) del circuito paralelo sin compensación**



### 2.1.2.2 Circuito controlador paralelo con compensación

En la Figura 15 se presenta el principio de compensación paralela.

Figura 15. Circuito controlador paralelo con compensación

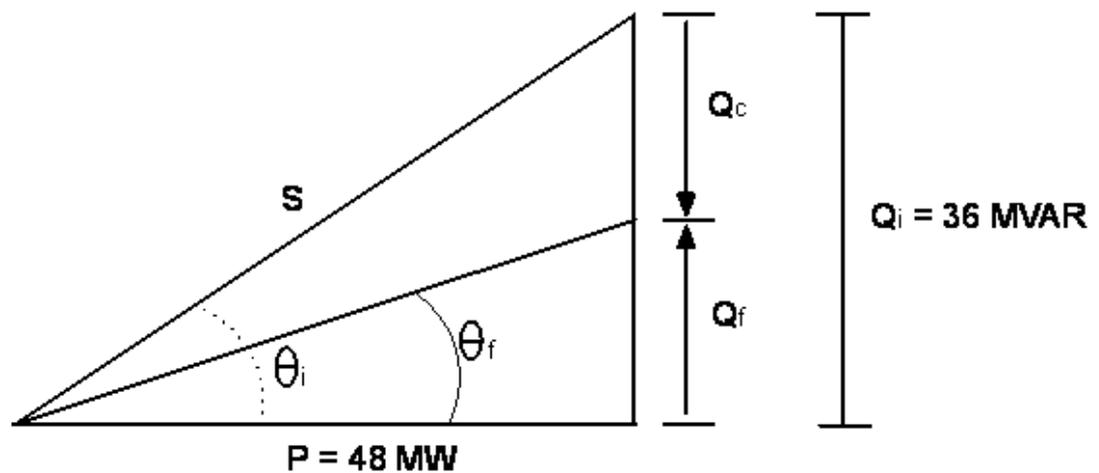


Solución de corrección de factor de potencia ( $F_p$ )

$$F_p = 0,8 \downarrow \text{ en atraso} \rightarrow \theta = 36,87^\circ$$

$$F_p = 0,9 \downarrow \text{ en atraso} \rightarrow \theta = 25,84^\circ$$

Figura 16. Triangulo de factor de potencia



$$\tan\theta_F = \frac{Q_F}{P}$$

$$Q_F = P \times \tan\theta_F = 48 \text{ MW} (\tan 25,84^\circ) = 23,25 \text{ MVAR}$$

$$Q_C = (Q_i - Q_F) = 23,25 \text{ MVAR} - 36 \text{ MVAR} = -12,75 \text{ MVAR}$$

Donde el condensador ( $X_C$ ) es igual a:

$$Q_C = -\omega_C (V_L)^2 \quad \rightarrow \quad C = \frac{-12,75 \text{ MVAR}}{-(377 \times (127 \text{ kV})^2)} = 2,097 \mu\text{F}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega_C} = \frac{1}{377 \times 2,097 \mu\text{F}} = 1265 \Omega$$

Se halla la corriente en el condensador ( $I_C$ ):

$$I_{XC} = \frac{V_L}{-jX_C} = \frac{127 \text{ kV} \angle 90^\circ}{1265 \angle -90^\circ} = 100,4 \text{ A} \angle 180^\circ$$

La corriente en la carga ( $I_L$ ) es igual a:

$$I_L = \frac{V_L}{Z_L} = \frac{127 \text{ kV} \angle 90^\circ}{268,9 \angle 36,87^\circ} = 472,3 \text{ A} \angle 53,13^\circ$$

En el circuito se aplica la primera ley de Kirchhoff para hallar la corriente de la línea ( $I_S$ ):

$$I_S = I_C + I_L$$

$$I_S = (100,4 \angle 180^\circ) + (472,3 \text{ A} \angle 53,13^\circ) = 419,9 \text{ A} \angle 64,15^\circ$$

La corriente de línea ( $I_S$ ) pico a pico es igual a:

$$I_S = \sqrt{2} \times (419,9 \text{ A} \angle 64,15^\circ) = 593,9 \text{ A} \angle 64,15^\circ$$

El voltaje de envío ( $V_F$ ):

$$V_F = V_S + V_C$$

$$V_F = (419,9 \angle 64,15^\circ) (90 \angle 90^\circ) + (127 \text{ kV} \angle 90^\circ)$$

$$V_F = 147,5 \text{ kV} \angle 103,3^\circ$$

Donde el voltaje de envío ( $V_F$ ) pico a pico es igual a:

$$V_{F\text{PICO}} = \sqrt{2} \times (147,5 \angle 103,3^\circ) = 208,6\text{kV} \angle 103,3^\circ$$

**Tabla 3. Resultados del controlador paralelo con compensación**

VARIABLE	RESULTADOS
$Q_F$	23,25 MVAR
$Q_C$	- 12,75 MVAR
$X_C$	1265 $\Omega$
$I_C$	100,4 A $\angle 180^\circ$
$I_L$	472,3 A $\angle 53,13^\circ$
$I_S$	419,9 A $\angle 64,15^\circ$
$V_L$	127kV $\angle 90^\circ$
$V_F$	147,5kV $\angle 103,3^\circ$

Se toma como referencia  $I_{XL} = 283,38 \text{ A} \angle 0^\circ$

**Figura 17. Diagrama fasorial paralelo con compensación**

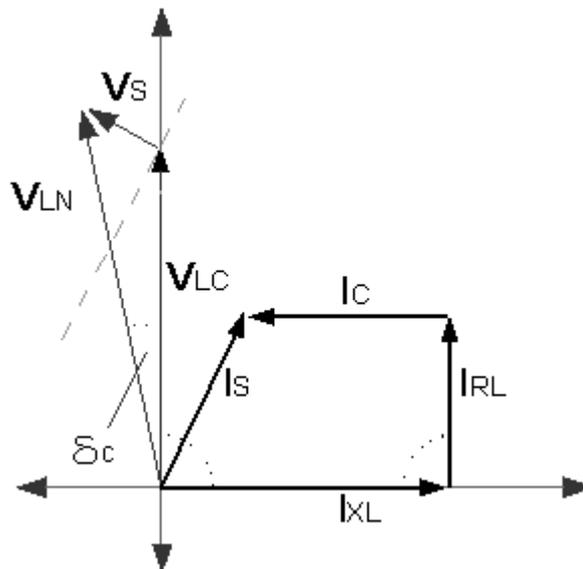


Figura 18. Circuito simulink, paralelo con compensación

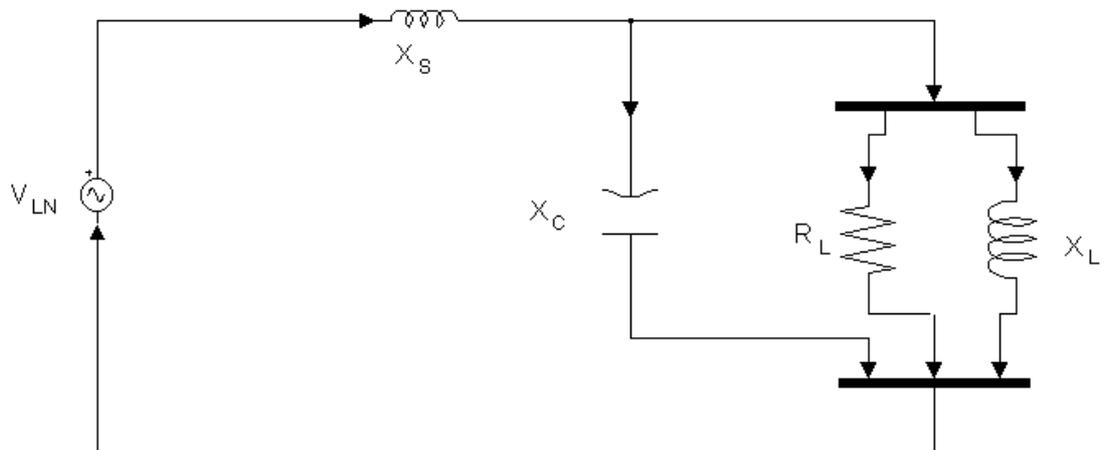
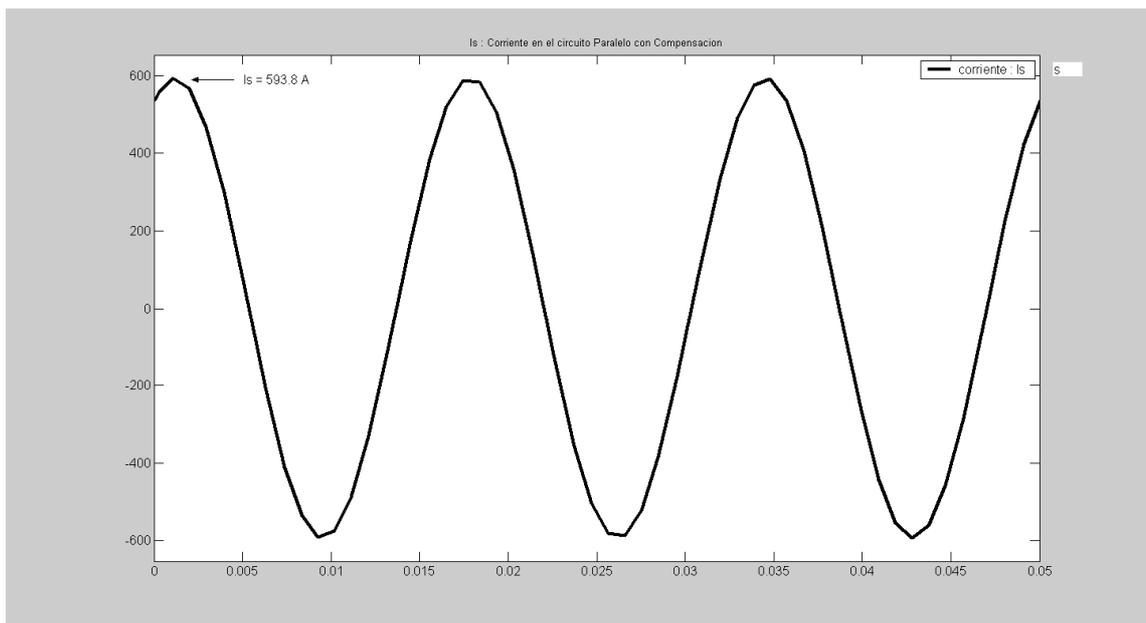


Figura 19. Corriente de línea ( $I_s$ ), del circuito paralelo con compensación



La corriente de línea ( $I_s$ ) expresado en sus valores pico a pico.

$$I_{S'PICO} = \sqrt{2} \times (419,9 \angle 64,15^\circ) = 593,83 \text{ A} \angle 64,15^\circ$$

Figura 20. Voltaje en el envío ( $V_f$ ), del circuito paralelo con compensación

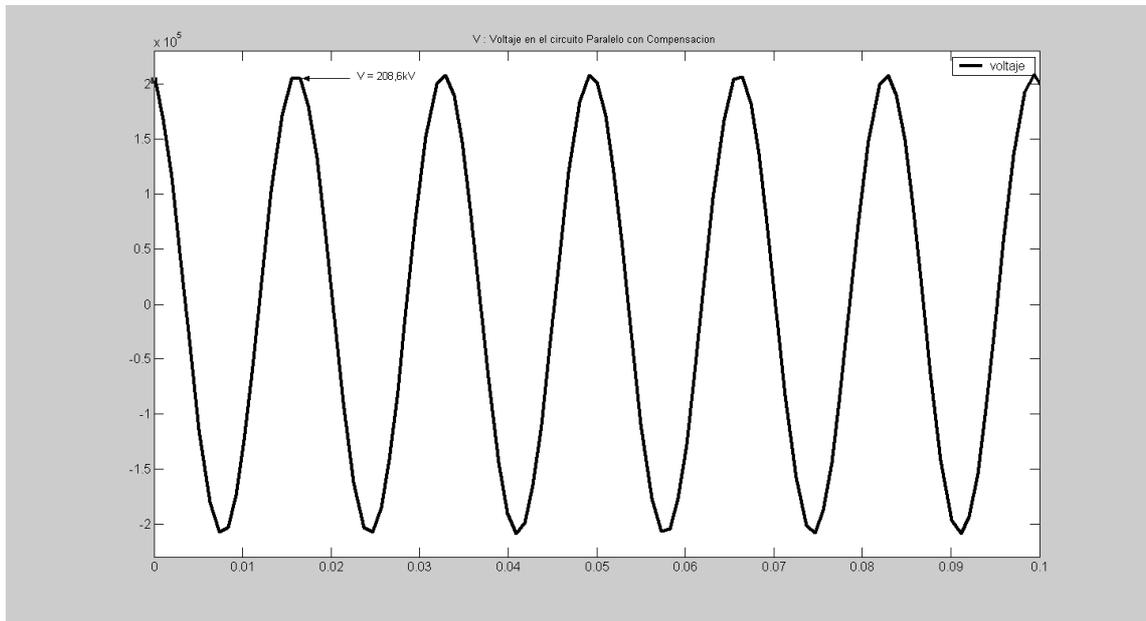
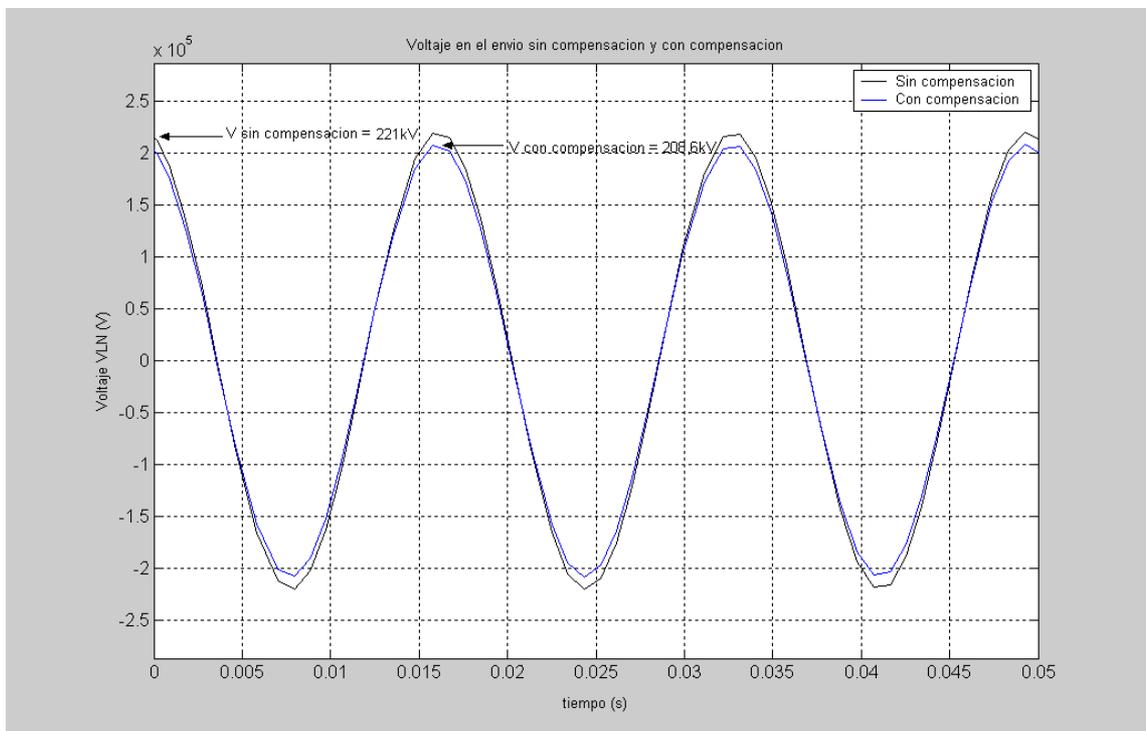


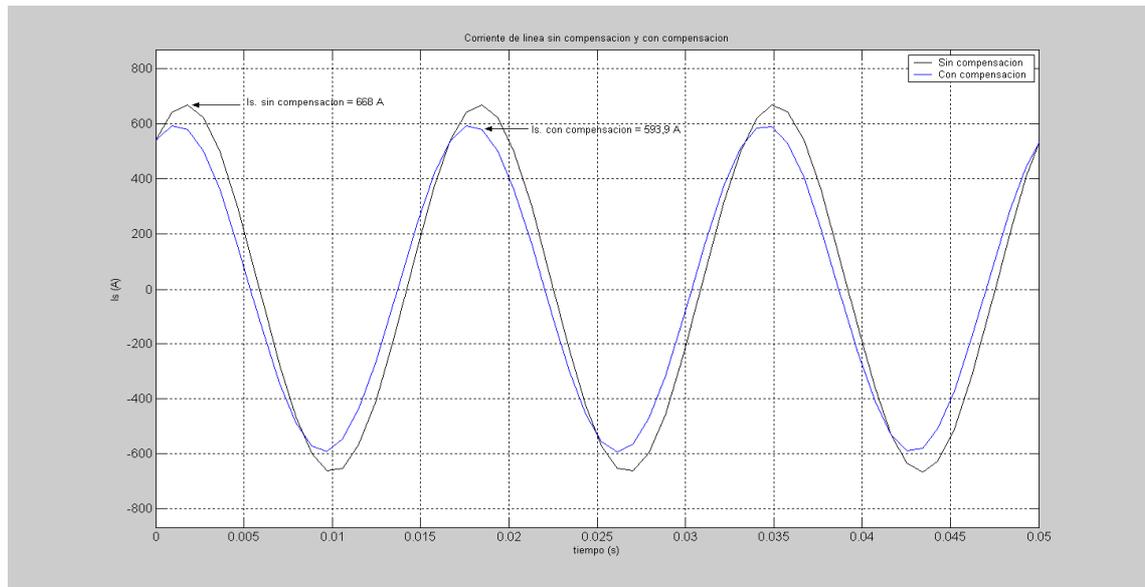
Figura 21. Comparación del voltaje de envío ( $V_f$ ), del circuito paralelo sin compensación y con compensación



Al comparar las ondas del voltaje de envío ( $V_F$ ) sin compensación, con las del voltaje de envío ( $V_F$ ) con compensación, se observa como la magnitud del

voltaje disminuye considerablemente, lo cual indica que al regular el voltaje puede ser una medida efectiva para controlar el flujo de potencia activa, sin necesidad de un sistema de aislamiento tan robusto y además se evitará que se produzca el efecto corona.

**Figura 22. Comparación de las corrientes de línea ( $I_s$ ) del circuito paralelo sin compensación y con compensación**



Al comparar las ondas de corriente de línea ( $I_s$ ) sin compensación, con la onda de corriente de línea ( $I_s$ ) con compensación, se observa que la magnitud de la corriente ( $I_s$ ) con compensación disminuye, implicando una disminución de flujo de corriente en las líneas y a su vez una reducción en las pérdidas, aportando así un mejor control de la compensación serie.

### 2.1.2.3 Tipos de controladores Paralelo

Los controladores paralelos más importantes son: SVC (Compensador Estático de Reactivos), TCR (Reactor Controlado por Tiristores), TSR (Reactor Encendido por Tiristores), TSC (Condensador Encendido por Tiristores), STATCOM (Compensadores Estáticos Síncronos), SSG (Generador Estático Síncrono), BESS (Sistema de Almacenaje de Energía en Baterías), SMES (Almacenaje de Energía en Superconductores Magnéticos), SVG (Generador Estático de Reactivos), SVS (Sistema Estático de VARS). Pero el tipo de controlador que veremos más detalladamente es el SVC.

#### 2.1.2.3.1 Compensador estático de reactivos (SVC)

Las cargas eléctricas generan y absorben energía reactiva, dado que la carga varía considerablemente de una hora a otra, la potencia reactiva resultante en la red también varía, como consecuencia de esto se pueden producir

variaciones inaceptables de los niveles de tensión o incluso bajadas de tensión que pueden llegar a convertirse en caídas totales.

El sistema de compensación estática (SVC) reacciona rápidamente, proporcionando la energía reactiva requerida para controlar las variaciones dinámicas de tensión, en diferentes condiciones del sistema y así, mejorando el rendimiento del sistema eléctrico de generación y transporte. [4]

### 2.1.2.3.2 Objetivos principales de un SVC:

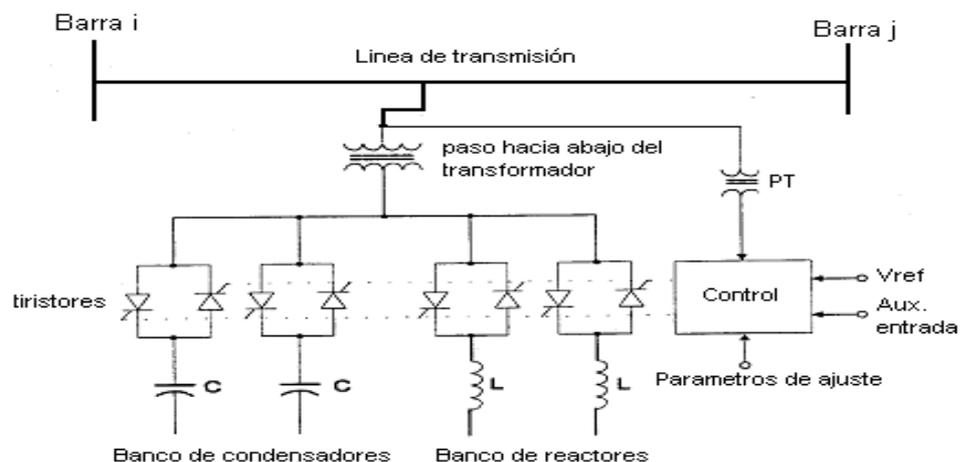
- Aumentar la capacidad de transporte y reducir las pérdidas.
- Mantener los niveles de tensión estables en las distintas situaciones de la red.
- Reducir las oscilaciones de potencia activa por medio de la modulación de la amplitud de la tensión.

### 2.1.2.3.3 Configuración básica de un SVC

El SVC posee un comportamiento característico el cual se basa en su composición de elementos reactivos como reactores y bancos de condensadores, los cuales están controlados por elementos activos como tiristores, así el SVC está compuesto por un TCR y un banco de condensadores en paralelo, en donde el TCR está constituido por un inductor de reactancia fija y un convertidor CA-CA (conformado por tiristores en antiparalelo). Dependiendo del valor adquirido por el ángulo de disparo de este par de tiristores, el SVC se puede ver como una reactancia equivalente variable ya sea inductiva o capacitiva, dependiendo de la compensación requerida por el sistema en ese instante. [5]

Un típico SVC está compuesto por: un reactor controlado por tiristores (TCR) y un condensador encendido por tiristores (TSC) como se muestra en la **Figura 23**.

**Figura 23. Compensador estático de reactivos (SVC)**



#### ***2.1.2.3.4 Modo de operación del SVC.***

Su funcionamiento se basa principalmente en el control entregado por los componentes activos, es posible controlar la amplitud de la componente fundamental de la corriente, la cual es de naturaleza inductiva. Al tener control sobre esta corriente, se tiene control sobre la corriente del SVC. Con lo cual se obliga al compensador a absorber una corriente del tipo inductiva o capacitiva dependiendo la compensación requerida.

El ángulo de disparo en los tiristores se determina por medio de la medición de la tensión en donde se encuentra conectado el SVC a la línea de transmisión, o sea el punto de compensación de reactivos. Este punto es el máximo de la tensión de cada hemicycle, la que es comparada con la tensión de referencia, la cual genera órdenes de disparo para los tiristores, y esto produce un control de tensión para cada semicycle.

#### ***2.1.2.3.5 Aumento de la capacidad de transmisión***

Se considera importante la incorporación de los SVC a los sistemas de transmisión dado a que con ellos se puede realizar un aumento de la capacidad de transmisión de potencia activa en las líneas, con esto se permite un ahorro económico, ya que no es necesario instalar nuevas líneas de transmisión para satisfacción de la demanda.

#### ***2.1.2.3.6 Control de tensión en puntos críticos***

Otra de las razones habituales para instalar un SVC en los sistemas, es para reducir el efecto de las perturbaciones de la red sobre las cargas sensibles, puede tratarse de cortocircuitos o la pérdida de una línea importante de transmisión. Así con cualquiera de estas circunstancias el SVC detecta la caída de tensión resultante en el sistema y modifica su impedancia para restaurar rápidamente la tensión de la red inyectando reactivos capacitivos hacia la red. El SVC asegura que este proceso sea suavemente, de manera que las perturbaciones no se noten en los centros de carga. Así después al restaurar el desperfecto se produce una fuerte sobre tensión lo cual el SVC lo contrarresta absorbiendo reactivos inductivos y es así como va regulando en el punto compensado.

Lo mismo sucede cuando aumenta la carga en el sistema, se reducirá la tensión en los niveles de subtransmisión y distribución pero una vez más el SVC inyecta reactivos capacitivos así contrarrestando la caída de tensión.

#### ***2.1.2.3.7 Mejoramiento de la estabilidad transitoria***

La amortiguación de las oscilaciones de potencia es otra misión de los SVC dependiendo de la ubicación podrá contribuir a una amortiguación importante en las variaciones de potencia. En el caso de un sistema subamortiguado

cualquier disturbio menor puede causar una oscilación en el ángulo de carga, lo cual llevará a una oscilación de potencia alrededor de potencia de régimen transmitida. Puesto que la oscilación de potencia es un evento dinámico, es necesario modificar la compensación aplicada de modo a lograr una consistente y rápida amortiguación. [5]

### **2.1.2.4 Configuración y aplicación de un SVC en función del modo de control de los bancos de condensadores**

En este tipo de configuración corresponde básicamente a un arreglo de reactores y capacitores dispuestos en configuración paralela, que actúan proporcionando potencia reactiva inductiva o capacitiva, de manera de mantener una consigna de tensión dada. A continuación se explica más detalladamente cada uno de estos elementos.

- FC/TCR: (Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor).
- TSC/TCR: (Thyristor Switched Capacitor-Thyristor Controlled Reactor).
- TCR-MSC (Thyristor Controlled Reactor, Mechanically Switched Capacitor). En ésta, los bancos de condensadores se conectan o desconectan por medios mecánicos.[1]

#### **2.1.2.4.1 Condensador encendido por tiristores (TSC)**

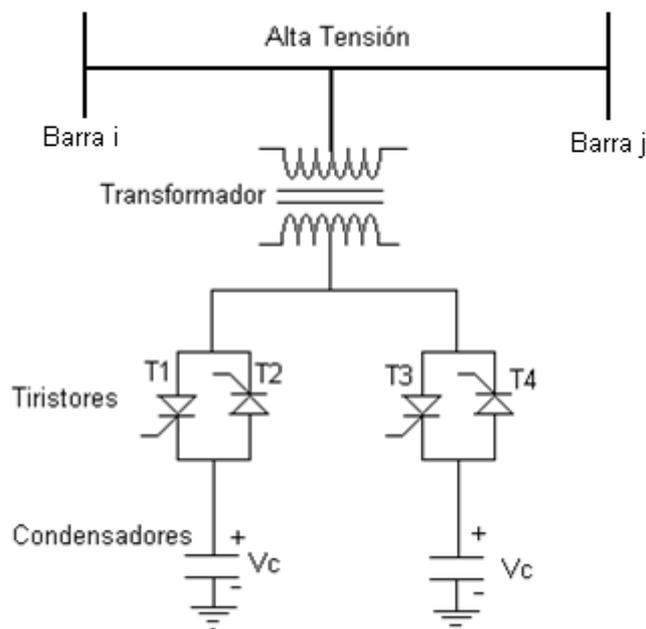
Los sistemas tanto de transmisión como de distribución presentan variaciones en la carga conectada que puede requerir de la presencia de condensadores para compensar las caídas de tensión y la deficiencia de reactivos. Esto permite que se pueda hacer una compensación de la potencia reactiva con el fin de garantizar un factor de potencia específico para las diferentes condiciones de carga.

Una alternativa es la conmutación de un banco, el cual consta de un número de condensadores que pueden aplicarse en varias etapas. El número de estas depende de lo suave que se quiera hacer la variación de corriente reactiva para que tenga un menor impacto en el sistema, la desventaja es que esto tiene un costo adicional. Dependiendo de la cantidad de corriente reactiva requerida, se conecta o se desconecta un cierto número de condensadores, esto debe hacerse de acuerdo al consumo de la potencia reactiva monitoreada.

Hasta hace un tiempo el proceso de conexión y desconexión de los condensadores se hacía con dispositivos electromecánicos, pero estos tienen las desventajas de ser lentos, introducir transitorios y necesitar mantenimiento frecuente. Es por eso que los dispositivos de estado sólido cada vez más han ido reemplazando a los electromecánicos.

La conmutación con tiristores hace posible el control continuo de la potencia reactiva a grandes niveles. En la **Figura 24** se muestra un esquema para el TSC. Los transitorios durante la conmutación de los condensadores se evitan seleccionando el instante de tiempo en que la tensión de la red coincide con la del condensador en magnitud y signo, para hacer la conexión respectiva. El apagado no presenta ningún problema porque se inhiben los pulsos de encendido a los tiristores, apagándose por conmutación natural. Una vez desconectado, el condensador queda con una tensión de carga, cuyo valor y signo no interesa así se garantiza que el circuito que controla el encendido esté libre de transitorios.

**Figura 24. Compensador encendido por tiristores (TSC)**



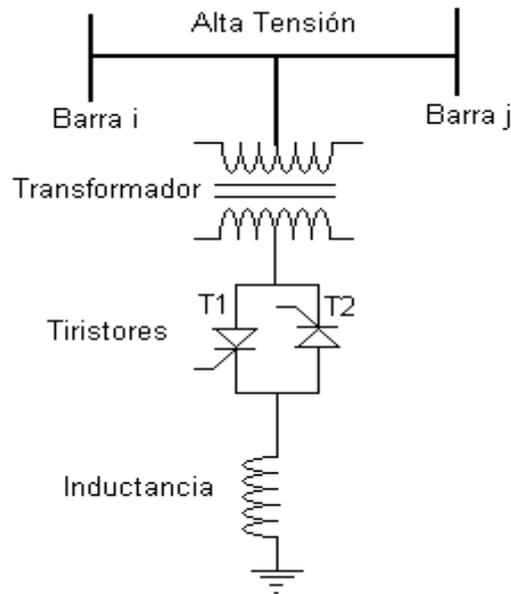
### **2.1.2.4.2 Reactor controlado por tiristores (TCR)**

Tiene aplicación en el control de sobretensiones transitorias en línea largas, siendo una alternativa a la compensación shunt tradicional, pero utilizando tiristores para variar la potencia reactiva absorbida en forma fina y continua. La funcionalidad del TCR es evitar que ocurra un sobre voltaje ante disparo de la línea o una salida brusca de la carga. [10]

Un TCR es un tiristor controlado por un inductor cuya reactancia es variada en forma continua debido al control de la conducción del tiristor **Figura 25** La corriente en el reactor puede ser controlada desde su máximo hasta poner en cero por el método de encender el control del ángulo de retraso. La duración de los intervalos de conducción de corrientes es controlada retrasando el cierre de

la válvula del tiristor en lo que concierne al pico del voltaje aplicado en cada semiciclo. [6]

**Figura 25. Reactor controlado por tiristores (TCR)**



### **2.1.2.4.3 Reactor encendido por tiristores (TSR)**

Un TSR tiene el equipo muy similar a un TCR, la diferencia radica en que es usado sólo en ángulos fijos para la conducción completa o nula. La corriente reactiva será proporcional al voltaje aplicado, la reactancia es variada en una forma gradual.

### **2.1.2.5 Compensador estático síncrono (STATCOM)**

La evolución del SVC es el STATCOM. Este dispositivo es capaz de proporcionar soporte de potencia reactiva al sistema sin la necesidad de emplear bancos de condensadores y reactores utiliza únicamente un inversor de tensión (o de corriente) que utiliza transistores para su funcionamiento. [4]

El compensador estático síncrono o STATCOM es un dispositivo FACTS conectado en paralelo. Este genera un conjunto de voltajes trifásicos sinusoidales balanceados a la frecuencia fundamental con una amplitud y fase rápidamente controlables y es utilizado para controlar el soporte de voltaje y la compensación de potencia reactiva. Existen opiniones que sugieren que considerar el uso del STATCOM tiene ventajas importantes sobre el uso de un SVC convencional con el control apropiado, el STATCOM puede aumentar los

límites de transferencia de potencia y mejorar el comportamiento dinámico de forma significativa. [8]

#### **2.1.2.5.1 Objetivos principales de un STATCOM**

- Controlar la capacidad del voltaje y la compensación de potencia reactiva (VAR).
- Amortiguar las oscilaciones de potencia.
- Mejorar la estabilidad fija y transitoria. [7]

#### **2.1.2.5.2 Ventajas del STATCOM:**

- Respuesta rápida.
- Aumento en flujo de potencia en las líneas de transmisión.
- Mejora las condiciones de estabilidad.
- Soporte de tensión en áreas críticas.

#### **2.1.2.5.3 Ventajas del STATCOM sobre el SVC:**

- Reducción en el tamaño de los equipos.
- Reducción en el costo de instalaciones.
- Mejor funcionamiento.
- Respuesta rápida.
- Reducción de costos para potencias futuras.
- Reducción de campos magnéticos y de ruido.
- Posibilidad de conectar corriente continua al lado de una fuente de energía que suministra o absorbe potencia con el sistema de corriente alterna. [7]

#### **2.1.2.5.4 Desventajas del STATCOM**

- Inyección de armónicos a la red.
- Limitación en potencia debido a limitaciones en los tiristores de Apagado por Puerta GTO (Gate Turn-off).
- Su costo es aún elevado.

#### **2.1.2.5.5 Componentes básicos de un STATCOM**

En el caso de un STATCOM la fuente de voltaje controlada en amplitud y fase es implementada a través de inversores los cuales son conectados en su lado DC a un condensador y en su lado AC a un transformador. Además se necesita de un bloque de control para su accionamiento. Así el STATCOM está compuesto por cuatro partes básicas: inversores, transformador, condensador en el lado DC y un sistema de control.

A continuación se identifica brevemente la función de cada una de las partes del STATCOM.

- **Inversor:**

Los inversores son un conjunto de elementos constituidos principalmente por dispositivos electrónicos de potencia como GTOs e IGBTs, con capacidad de corte y conducción su función en el STATCOM es la de generar la tensión AC de la tensión DC en los terminales del condensador del lado DC. El uso de varios inversores, reduce la distorsión armónica en el voltaje de salida.

- **Condensador del lado DC:**

La principal función del condensador del lado DC en el STATCOM es servir de fuente de tensión DC haciendo posible el funcionamiento del inversor; además el condensador en el lado DC sirve como acumulador temporal de energía permitiendo el intercambio entre el sistema eléctrico y el STATCOM.

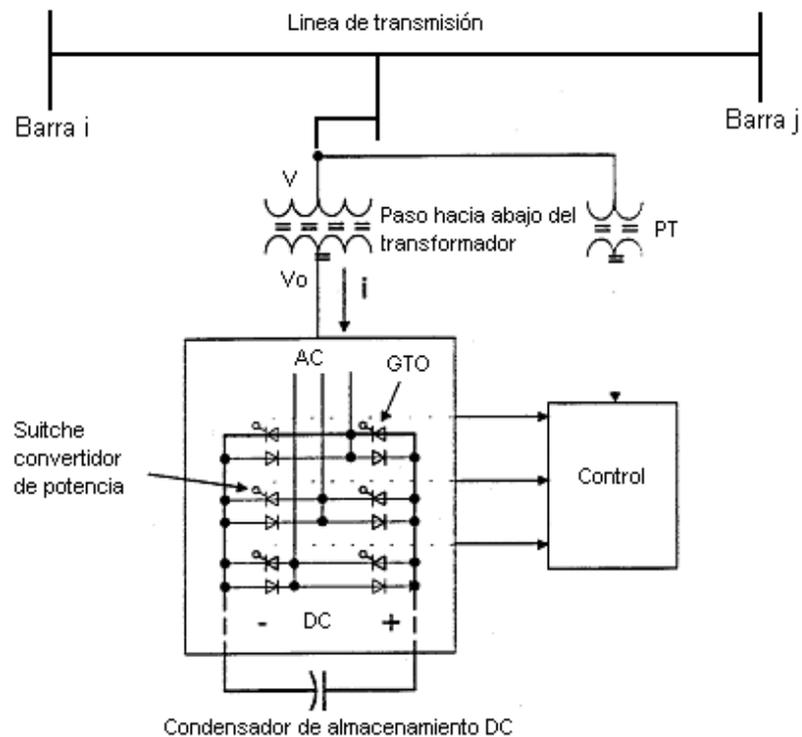
- **Transformador:**

En el STATCOM los transformadores son utilizados para dos funciones principales, la primera función es servir de acople con el sistema eléctrico en AC adecuando las tensiones de operación de los equipos y los límites de tensión de los inversores con la red. Además con ciertas configuraciones especiales el transformador elimina algunos de los armónicos generados por los inversores reduciendo el contenido armónico insertado en la red eléctrica. La segunda consiste en la utilización del transformador para realizar estructuras de bloqueo de secuencia cero, en el caso de que esta exista, y servir como elemento de amortiguación de transitorios.

### ***2.1.2.5.6 Configuración de un STATCOM usando GTO***

El STATCOM usando GTOs está compuesto por: seis GTOs colocados en cada rama como se muestra en la **Figura 26**. Cada GTO es proveído de un diodo conectado antiparalelo para realizar inversiones de voltaje requeridas por el circuito externo. [6]

Figura 26. Compensador estático síncrono (STATCOM)



### 2.1.2.5.7 Aplicaciones del STATCOM

- Estabilización de la tensión y mejora del perfil de ésta.
- Prevención de la resonancia subsíncrona.
- Mejora del factor de potencia.
- Equilibrio de cargas.

### 2.1.2.6 Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

El UPFC es un dispositivo que provee control simultáneo e independiente de todas las variables que interviene en el flujo de potencia AC (voltaje, impedancia y ángulo de fase), en cada fase. También hace posible controlar de manera independiente el flujo de potencia activa y reactiva en la línea, maximizando su utilización y minimizando el flujo de potencia reactiva, con su consecuente reducción de las pérdidas. [10]

### **2.1.2.6.1 Objetivos principales del UPFC**

- Control de flujo.
- Mejorar la estabilidad transitoria.
- Mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia.
- Controlar la potencia que se obtiene de un sistema de HVDC sin necesidad de operación asíncrona. [10]

### **2.1.2.6.2 Aplicaciones del UPFC**

Sin embargo los UPFC responden a cambios rápidos en el sistema haciendo las funciones de control especificadas durante perturbaciones de pequeña y gran señal. La dinámica de pequeña señal puede ser usada:

- Para contrarrestar las oscilaciones torsionales.
- Contrarrestar las oscilaciones de frecuencia interarea.
- Como un filtro activo para mitigar la inestabilidad armónica.

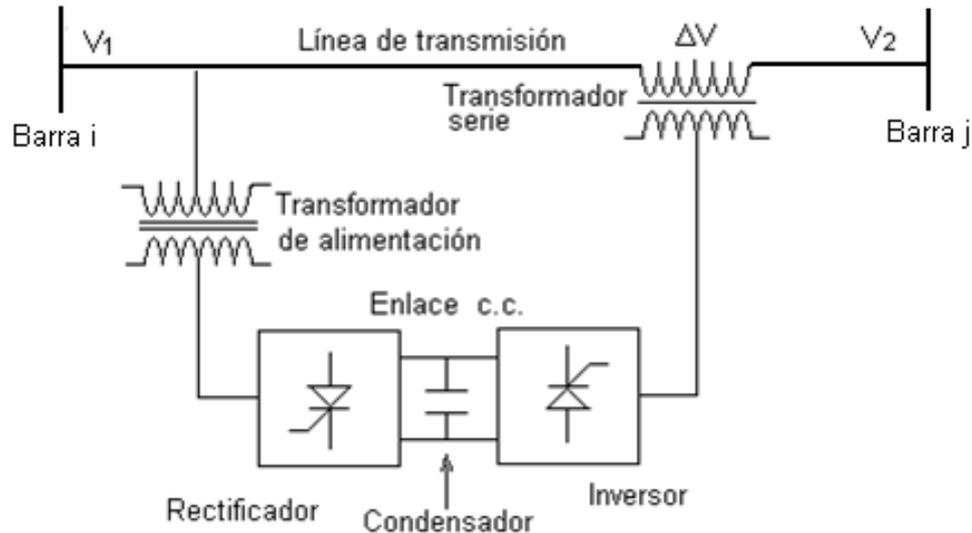
Durante perturbaciones de gran señal puede usarse para:

- Ampliar los límites de estabilidad transitoria.
- Aliviar los esfuerzos de transitorios torsionales en el eje.
- Control en tiempo real de la tensión, la impedancia de la línea y el ángulo de desfase y es posible gracias al control tanto de la magnitud como del desfase de la tensión inyectada. A diferencia de los transformadores de regulación, que disponen de un número determinado de tomas en sus devanados.
- Compensación dinámica de líneas. Control tanto del flujo de potencia como de la potencia reactiva de la línea. [1]

### **2.1.2.6.3 Configuración de un UPFC**

Este tipo de *FACTS* realiza compensación tanto serie como paralela y permite la variación continua de la tensión en serie con la línea de transmisión tanto en magnitud como en fase, permitiendo un rango de regulación mayor que el cambiador de fase y superando su limitación al usar de manera más eficiente los tiristores que conforman los convertidores utilizados. Está conformado por un transformador que sirve como alimentación para un convertidor C.A. - C.C, un convertidor trabajando como rectificador, otro trabajando como inversor y un transformador cuyo secundario está conectado en serie con la línea de transmisión.

Figura 27. Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

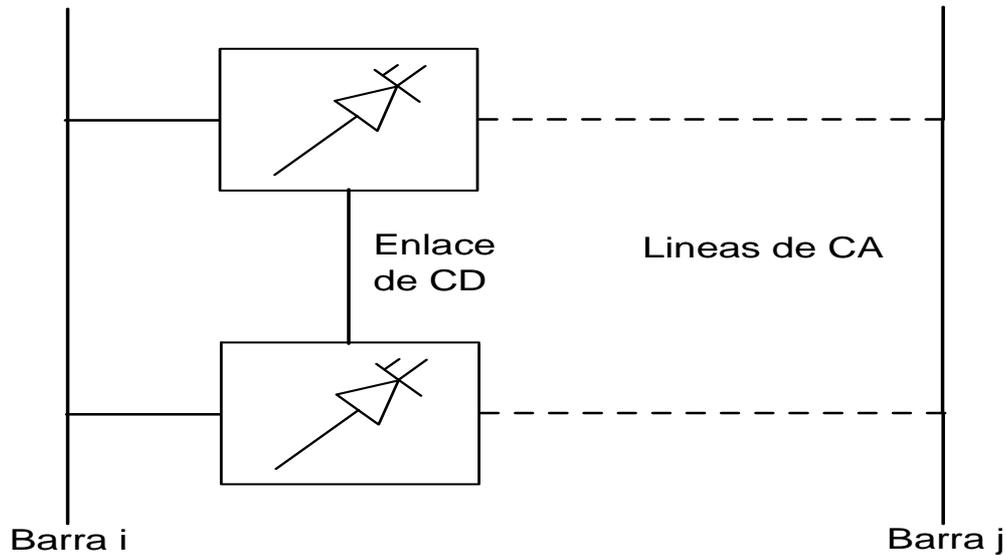


En la **Figura 27** el inversor regula el ángulo de fase y la magnitud del voltaje.  $V_1$  alimentando al transformador serie, tal que el voltaje de la línea de transmisión  $V_2$  puede tomar cualquier valor alrededor de  $V_1$  mostrado por la línea. Esto permite que el flujo real de potencia real y reactiva en la red sea controlado y también el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas. El rectificador puede trabajar como una fuente de corriente controlable cuando el enlace continuo deba contener una inductancia que asegure corriente continua constante.

### 2.1.3 Controladores serie- serie:

Este tipo de controlador actúa sobre el balance del flujo de potencia activa y reactiva en las líneas, puede ser una combinación de controladores serie coordinados en un sistema de transmisión multilínea o puede ser un controlador unificado en el que los controladores serie proveen compensación reactiva en serie para cada línea, además de transferencia de potencia activa entre líneas a través del enlace de potencia **Figura 28**. La capacidad de transferencia de potencia activa que presenta un controlador serie-serie unificado, llamado controlador de flujo de potencia interlínea, hace posible el balance de flujo de potencia activa y reactiva en las líneas y de esta manera maximiza la utilización y la capacidad de transporte de los sistemas de transmisión. En este caso el término “unificado” significa que las terminales de CD de los convertidores de todos los controladores se conectan para lograr una transferencia de potencia activa entre sí.

Figura 28. Controlador serie-serie



#### 2.1.4 Controladores serie-paralelo:

Actúan sobre ambas variables la impedancia serie y el voltaje. Este dispositivo puede ser una combinación de controladores en paralelo y serie separados, controlados de manera coordinada o un controlador de flujo de potencia unificado con elementos en serie y en paralelo **Figura 29**. El principio de operación de los controladores serie-paralelo es inyectar corriente al sistema a través de la componente en paralelo del controlador y un voltaje en serie con la línea utilizando la componente en serie. Cuando los controladores en serie y en paralelo son unificados puede haber un intercambio de potencia activa entre ellos a través de su enlace **Figura 30**. [4]

Los controladores serie-paralelo más importantes son: UPFC (Controlador Unificado de flujo de Potencia), TCPST (Cambiador de Fase Controlado por Tiristores), TCPAR (Regulador de Ángulo de Fase Controlado por Tiristores), IPC (Controlador de Potencia de Interface).

Figura 29. Controlador serie-paralelo con controlador coordinado

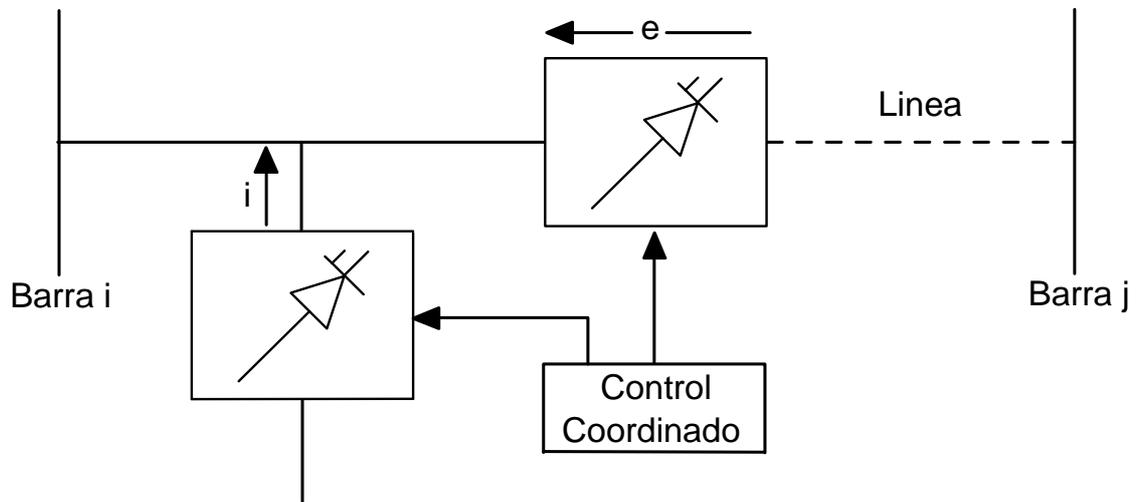
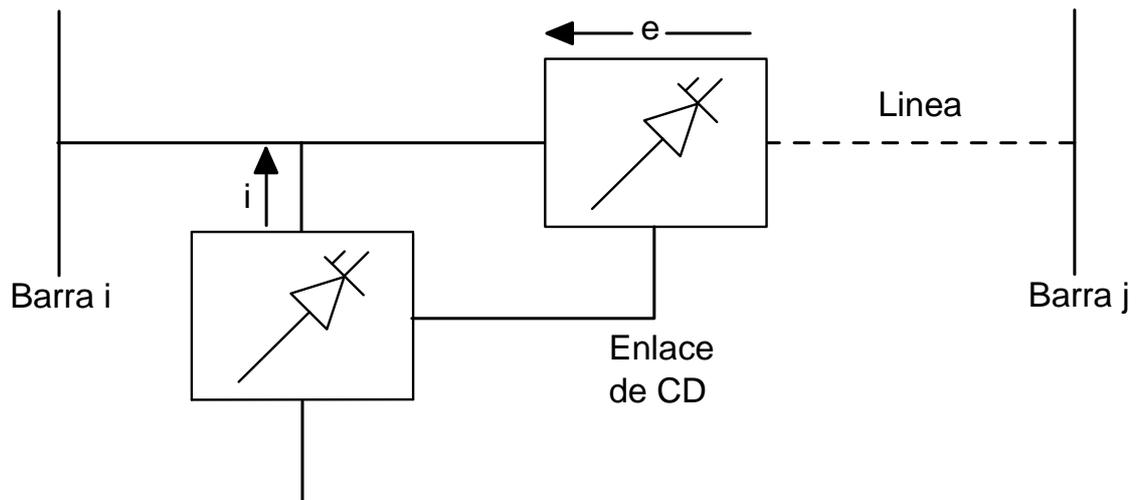


Figura 30. Controlador serie-paralelo con enlace CD



## **2.2 SEGÚN SU GENERACIÓN**

### **2.2.1 Primera generación:**

SVC (compensador estático de reactivos), se caracterizan por:

- Tecnología probada y establecida para aplicación industrial desde 1960.
- Uso de sistemas de potencia desde 1970.
- Es una tecnología basada en tiristores.
- Tiene los siguientes componentes: FC (Filtro), TCR (Reactor Controlado por Tiristores), TSR (Reactor Encendido por Tiristores), TSC (Condensador Encendido por Tiristores). [8]

Los FACTS más representativos de esta generación son: SVC (Compensador Estático de Reactivos), SSR-NGH (Apagado de Resonancia subsíncrona), CSC (Condensador de Serie Controlada), TSSC (Condensador Encendido por Transistores Serie), TCSC (Condensador Controlado por Transistores Serie), PAR (Angulo Regulador de Fase).

### **2.2.2 Segunda generación:**

VSC (Convertidor de Fuente de Voltaje), se caracteriza por:

- Surgió en la década de los 80, el cual utilizaban tiristores GTO (Gate Turn – Off Switch) este tipo de dispositivos permiten controlar el encendido y apagado de los tiristores.
- Generar potencia reactiva sin corriente alterna en las capacitancias y reactancias.
- Mejorar las características de operación de funcionamiento en la respuesta rápida.
- Más compacta y menor trabajo de instalación.
- Estandarizar el hardware de potencia electrónica en diferentes aplicaciones. [7]

Los FACTS más representativos de esta generación son: VSC (Convertidor de Fuente de Voltaje), STATCOM (Compensadores Estáticos Síncronos), SSSC (Compensador Serie Estático Síncrono).

### **2.4.3 Tercera generación:**

UPFC (Controlador Unificado del Flujo de Potencia), se caracteriza por:

- En la década de los 90, se empezó la aplicación de este tipo de compensación.

- Estructurar el regulador unificado para controlar P (Potencia) y Q (Reactiva) por separado.
- Ajustar simultáneamente la potencia que transfieren las tres variables: voltaje, impedancia y ángulo de fase.
- Diferentes modos de operación y de control: convertibilidad
- Expansibilidad para integrar múltiples controles en las líneas de transmisión. [7]

Los FACTS más representativos de esta generación son: UPFC (Controlador Unificado del Flujo de Potencia), BTB-VSC (Back to Back Convertidor de Fuente de Voltaje), IPFC (Controlador Interlinea de Flujo de Potencia).

## **2.3 SEGÚN SUS FUNCIONES**

### **2.3.1 Control de voltaje:**

Normalmente este control requiere de una capacidad continua, incremental de alta velocidad, de tal forma que se pueda prevenir una inestabilidad potencial en el voltaje.

Los FACTS utilizados son: SVC, STATCOM, UPFC, SMES (Almacenaje de Energía en Superconductores Magnéticos), BESS (Sistema de Almacenaje de Energía en Baterías).

### **2.3.2 Control de flujo de potencia:**

Este control tiene requisitos mínimos de velocidad de respuesta y se puede lograr con equipo convencional (capacitores o reactores en serie), así como transformadores reguladores de ángulo de fase, a menos que la condición inmediata post-contingencia contempla un colapso de voltaje. Una alternativa es redespacho de generación. Esto requiere un compromiso entre el costo del equipo de control y el no contar con despacho económico. [11]

Los FACTS utilizados son: TCSC, TCSR, TCPST, UPFC, SSSC.

### **2.3.3 Estabilidad dinámica:**

Cuando se tienen problemas potenciales de estabilidad dinámica, se requiere normalmente del uso de controles suplementarios, esto se puede lograr en ocasiones con equipo convencional como los capacitores serie, pero sí es necesario tener una mejor respuesta que amortigüe sensiblemente las oscilaciones de potencia.

Los FACTS utilizados son: TCSC, SVC, STATCOM, UPFC.

### **2.3.4 Estabilidad transitoria:**

Se requiere mejor cuidado de los condensadores en serie, alta respuesta de los sistemas de excitación de los generadores, frenado de la resistencia y rápida conmutación de los condensadores paralelo.

Los FACTS utilizados son: TCBR, SVC, STATCOM, TCSE.

## **2.4 SEGÚN LA FUNCIÓN DE SUS PRINCIPALES ELEMENTOS**

### **2.4.1 Dispositivos FACTS controlados por tiristores**

Emplean los elementos del sistema SVC (Compensador estático de VAR), TCVR (Regulador de voltaje controlado por tiristores), TCPAR (Regulador de ángulo de fase controlado por tiristores), TCSC (Capacitor en serie controlado por tiristores).

Dentro del primer grupo de controladores (SVC, TCSC y el cambiador de fase controlado por tiristores) se emplean tiristores convencionales (sin capacidad de apagado) en arreglos similares a los de los dispositivos controlados mecánicamente, con la diferencia de tener una respuesta mucho más rápida y ser operados por controles sofisticados.

A excepción del cambiador de fase controlado por tiristores, los demás controladores tienen una característica común: la potencia reactiva requerida para la compensación es generada o absorbida por bancos de capacitores y reactores y los tiristores se utilizan únicamente para controlar la impedancia reactiva combinada que estos bancos representan en el sistema de potencia. En consecuencia, los compensadores convencionales controlados por tiristores representan una admitancia reactiva variable en la red de transmisión y por lo tanto cambian la impedancia del sistema. Típicamente, la compensación capacitiva en paralelo acoplada a la impedancia inductiva del sistema resulta en una resonancia por encima de la frecuencia fundamental que puede ser a las frecuencias armónicas dominantes (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>) del SVC y del sistema de potencia, o cerca de ellas. La compensación capacitiva serie resulta en una resonancia eléctrica por debajo de la frecuencia fundamental que puede interactuar con las resonancias mecánicas de los sistemas turbina-generador que alimentan la línea y de esta manera puede provocar una resonancia subsíncrona total del sistema (SSR).

Desde el punto de vista de la operación funcional, el SVC y el TCSC actúan indirectamente en la red de transmisión. Por ejemplo, el TCSC se inserta en serie con la línea con el propósito de aportar un voltaje de compensación para incrementar el voltaje a través de la impedancia serie de la línea, la cual

determina la corriente de línea y la potencia transmitida. Así, la compensación serie actual es inherentemente una función de la corriente de línea. En forma similar, el SVC se aplica como una impedancia en derivación para producir la corriente de compensación requerida. Así, la compensación en derivación es una función del voltaje de línea. Esta dependencia de las variables de línea (voltaje y corriente) es perjudicial para la compensación cuando grandes disturbios llevan al TCSC y al SVC a operar fuera de su intervalo normal de control. [12]

## **2.4.2 Dispositivos FACTS basados en convertidores**

Emplea los convertidores STATCOM (Compensador Estático Síncrono), SSSC: (Compensador Serie Estático Síncrono), IPFC (Controlador de Flujos de Potencia Interlínea), UPFC (Controlador Unificado de Flujos de Potencia).

Emplean fuentes convertidoras de voltaje autoconmutadas para proporcionar rápidamente, de forma controlable y estática, fuentes síncronas de voltaje y corriente. Este enfoque, cuando se compara con los métodos de compensación convencionales que emplean capacitores y reactores conmutados por tiristores, generalmente provee características superiores de desempeño. Además tiene la opción de intercambiar potencia real directamente con el sistema de CA, así como de proveer control independiente en la compensación de potencia reactiva.

La fuente de voltaje síncrona (SVS) es análoga a una máquina síncrona ideal, la cual genera un conjunto balanceado de tres voltajes senoidales a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo de fase controlados. Esta máquina ideal no tiene inercia, su respuesta es prácticamente instantánea, no altera significativamente la impedancia existente del sistema y puede generar internamente potencia reactiva (capacitiva e inductiva). Además, puede intercambiar potencia real con el sistema de CA si está acoplada a una fuente de energía apropiada que pueda proveer o absorber la potencia requerida por el sistema de CA.

Si la función de intercambio de potencia real no se requiere, el SVS se convierte en una fuente de potencia reactiva autosuficiente y la fuente de energía externa puede eliminarse. El SVS puede aplicar un voltaje específico para forzar la corriente de línea deseada (o una corriente específica para forzar el voltaje terminal deseado). En contraste con el enfoque de impedancia controlada, la compensación aplicada por un SVS se mantiene independiente de las variables de la red (corriente de línea, voltaje o ángulo) y así puede mantenerse durante disturbios grandes del sistema (por ejemplo, caídas de tensión de voltaje, oscilaciones de potencia y ángulo).

El SVS es una fuente de voltaje alterna que con entradas de control adecuadas, operará solamente a la frecuencia fundamental. Su impedancia de salida a otras frecuencias en teoría será cero. Consecutivamente, el SVS, en

comparación con los compensadores de tipo impedancia, es incapaz de formar un circuito resonante serie o paralelo con la red de transmisión de CA. [12]

## **2.5 USO DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS) EN COLOMBIA**

En Colombia se han desarrollado 2 proyectos sobre sistemas de transmisión flexible uno en Chinú (500 kV) y el otro en Caño Limón (230 kV).

### **CHINU (500 kV):**

En 1998, ISA realizó una revisión del plan de expansión generación-transmisión para el periodo 1994 – 2000 en el cual se encontró la necesidad de reforzar la transmisión hacia la Costa Atlántica con el fin de incrementar la capacidad de transporte de potencia en los circuitos de 500 kV, proveer un soporte de tensión ante contingencias y poder manejar el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia por la líneas que interconectan al centro del país con la Costa Atlántica.

Con el estudio de las aplicaciones del SVC, se encuentra que con este se obtiene mayor control de tensión, se aumenta la capacidad de transferencia de potencia activa por los circuitos, ya que está limitada por la tensión y la reactancia del sistema de transmisión, se incrementa el margen de estabilidad transitoria, mejora el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia, amortigua las oscilaciones subsíncronas, reduce las sobretensiones temporales y se hace balance de la carga conectada. Con la implementación de un SVC para controlar la tensión en un punto específico y alterando la característica de potencia transmitida con controles adecuados se mejora el amortiguamiento de las oscilaciones de potencia que se presentan en el sistema. Usualmente se maneja la señal de la frecuencia o la potencia transmitida para controlar la potencia reactiva y la tensión. A raíz de los estudios realizados sobre la compensación estática, ISA instaló en la subestación Chinú el proyecto denominado "Proyecto Compensación estática Chinú 500 kV +250, -150 MVar" el cual comenzó a funcionar a finales de 1999. Este proyecto consta de dos bancos de condensadores conmutados por tiristores (TSCs), dos bancos de reactores controlados por tiristores (TCRs). Los bancos de condensadores conmutados por tiristores (TSCs), proveen el soporte de tensión después de grandes perturbaciones, amortiguan las oscilaciones de potencia, controlan la tensión y balancean la carga. Los bancos de reactores controlados por tiristores (TCRs), estabilizan la tensión y reducen las sobretensiones temporales, mejoran la estabilidad en el sistema, amortiguan las oscilaciones de potencia y balancean la carga.

## **CAÑO LIMON (230 kV):**

La instalación del SVC de Caño limón nació por la necesidad que se tenía en la zona por problemas de baja tensión y por el crecimiento en la demanda petrolera OXY, ya que la línea de transmisión para la fecha de entrada de las nuevas cargas, la línea no tendría la capacidad de transportar toda la potencia requerida.

### **Antes del SVC (como estaba el sistema):**

- Perfil de tensión (menos de 0,9 pu).
- Limite de transmisión casi al límite.

### **Características de la zona:**

- Topografía compleja.
- Orden público (posibles atentados) debido a la zona donde se encuentra.

Se tienen 2 propuestas de solución:

1. Instalar un nuevo circuito (líneas de transmisión) que tiene como consecuencia el tiempo debido a:

- Estudio (lo que se debe realizar).
- Licitaciones.
- Medio ambiente.
- Compra de terrenos.
- Orden público.
- Topografías.

2. Instalar un SVC , donde se evitara todo lo anterior y sus beneficios son:

- Reactivos, Capacitivos, mejora si depende de V en el nodo.
- Tensión en el nodo, mejora ostensiblemente.
- Permite aumentar el flujo de potencia activa por la línea siempre y cuando el sistema lo requiera o (lo permita), ya que parte de la potencia reactiva se estará inyectando localmente y no tendrá que ser suministrada desde la subestación.[2]

Figura 31. Sistema caño limón sin SVC

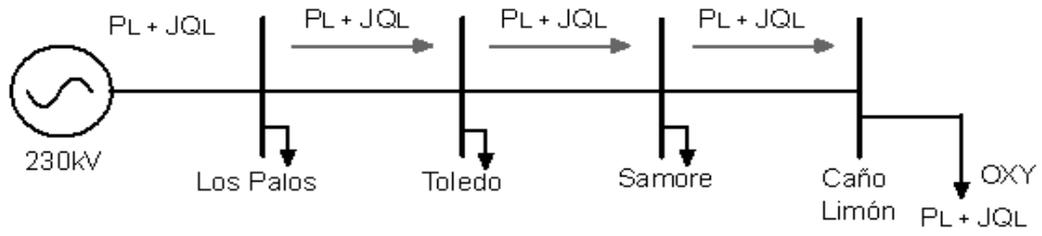


Figura 32. Diagrama de potencia caño limón sin SVC

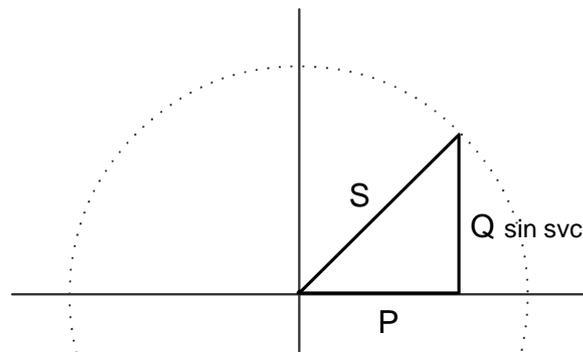
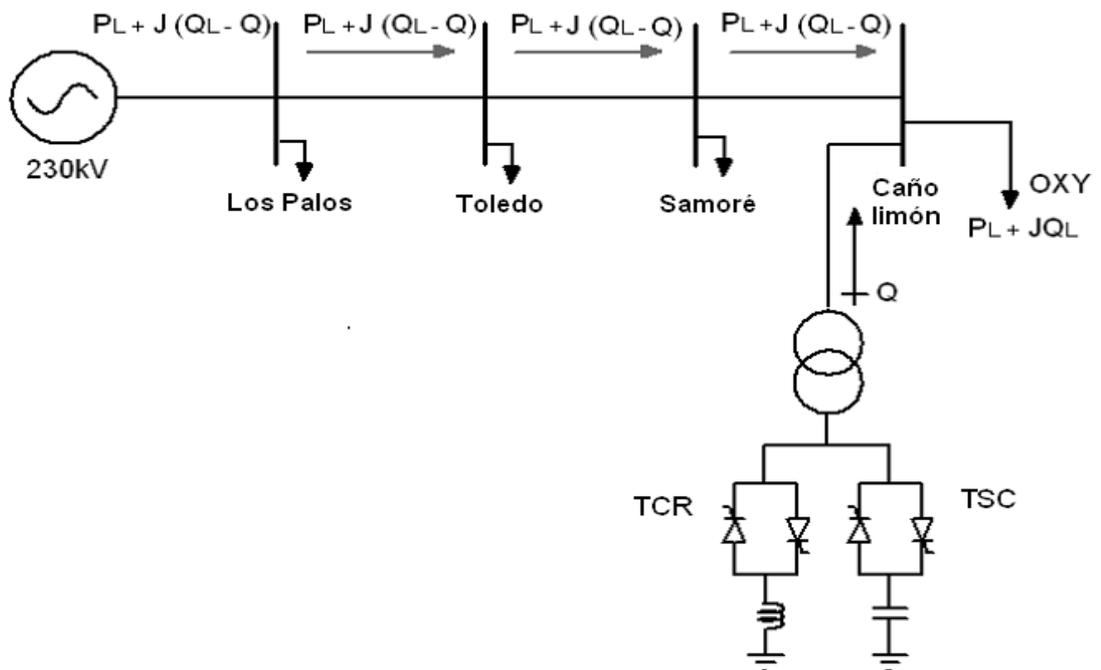


Figura 33. Sistema caño limón con SVC





aprovechamiento de la red de 230 kV. Presentó mejores beneficios instalar dicha compensación en la línea San Carlos - Esmeralda 230 kV, junto con compensación shunt en Yumbo 230 kV.

- **Área Antioquia:** se analizó la superación del nivel de corto circuito en la subestación San Carlos. La alternativa de solución de mejor desempeño, entre las nuevas tecnologías, es seccionar la barra de 220 kV por medio de un reactor limitador.
- **Interconexión con SIEPAC:** se analizó el enlace por medio de HVDC, considerando la conexión en el lado colombiano desde el nodo de 500 kV en la subestación Cerromatoso y el cambio del nivel en el enlace HVDC de 250 kV DC por 500 kV DC. Lo anterior permite que sea una conexión más sólida y que se reduzcan las pérdidas por el enlace DC.
- **Interconexión con Ecuador:** con el fin de aumentar la capacidad de transferencias y mejorar los perfiles de voltaje en las subestaciones de interconexión, se consideró la instalación de compensación serie en las líneas entre Jamondino y Pomasqui 220 kV y compensación shunt convencional o tipo SVC en Jamondino.
- **Interconexión con Venezuela:** para eliminar el problema de oscilaciones de baja amortiguación, se consideró instalar un TCSC en las líneas de interconexión, dicho efecto se puede lograr también con la instalación de un Back-to-Back. [12]

## 2.7 LOCALIZACION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLE (FACTS)

Existen tres factores importantes a considerar cuando se ha tomado la decisión de instalar un dispositivo FACTS: El tipo de dispositivos, la capacidad requerida y la ubicación que optimice el funcionamiento del dispositivo. De estos factores, el último es de suma importancia, ya que la ubicación de los FACTS depende del efecto deseado y de las características propias del sistema. Por ejemplo, si se desea evitar el flujo en anillo y después ubicar el dispositivo en una de las líneas de transmisión de éste para forzar el flujo en la manera deseada. Ahora bien, si se desea mejorar la operación económica del sistema al incrementar la capacidad de transmisión de potencia, el dispositivo FACTS se puede ubicar en una línea subutilizada, aumentando el flujo a través de ella, o bien, colocarlo en la línea más cargada para limitar el flujo por la misma, permitiendo mayor flujo por el resto del sistema.

Otro aspecto que hay que tomar en cuenta es la selección de las señales de retroalimentación para estos dispositivos, ya que esta información es de vital importancia para el diseño de estabilizadores basados en dispositivos

FACTS. El criterio para la selección ha sido la capacidad máxima de los estabilizadores para amortiguar las oscilaciones en el sistema de potencia. Sin embargo, para un buen diseño de los estabilizadores, además de la máxima eficiencia de los mismos, un factor relevante es la robustez de los estabilizadores a las condiciones de operación del sistema de potencia. Esto significa que en la etapa de selección de la localización y las señales de retroalimentación, se debe examinar no solo la efectividad de los estabilizadores en condiciones típicas de operación, sino también su robustez sobre otras condiciones de operación.

### 3. CONCLUSIONES

- En este trabajo se realizó un análisis sobre los dispositivos FACTS los cuales fueron desarrollados para aplicaciones en sistemas de potencia, se expusieron las características y se clasificaron según la conexión de los dispositivos, según su generación, según sus funciones y según la función de sus principales elementos y de acuerdo en la forma en que estos dispositivos se conectan al sistema.
- Se aprendió que la tecnología de los FACTS es una gran alternativa para resolver problemas de estabilidad, seguridad y capacidad de transmisión del sistema, permitiendo mejorar el funcionamiento de las redes eléctricas, y utilizar la infraestructura de transmisión existente mejorando su funcionamiento y reduciendo impactos ambientales negativos.
- La selección del dispositivo FACTS es muy relevante y depende de cada dispositivo que está diseñado para una función específica dentro del esquema de control y compensación. La tendencia de los FACTS se dirige hacia su construcción con base en fuentes conmutadas de voltaje, y muchos de estos dispositivos aún se encuentran en etapa de desarrollo y prueba. La mayoría de ellos tiene su aplicación en el mejoramiento de la operación en estado estacionario, aunque secundariamente ayudan a mejorar el estado transitorio.
- Los FACTS permiten mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas, reduciendo los márgenes de generación de seguridad y dando soluciones a los problemas clásicos de los sistemas A.C como el bajo amortiguamiento en las oscilaciones de potencia y la estabilidad de voltaje.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ANGEL F. Germán. Automática e instrumentación “Una aplicación de la electrónica de potencia”. Universidad de Zaragoza Dpto. de Ingeniería Eléctrica. pp. 53-57, Colombia 2002.
- [2] GIRALDO GOMEZ, Walter Alexis y TORRES MATEUS, Nelson David “Estudio y análisis de sistemas FACTS con enfoque en el STATCOM” Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Minas. 2005
- [3] PEREZ GELVES, Jhon Jairo y ROZO MENDIETA, Claudia Patricia “En la interconexión Colombia - Ecuador 230kV, análisis de comportamiento eléctrico mediante la Simulación en ATP para un compensador serie (FACTS)” Mundo eléctrico colombiano Vol.18 No.54 [2004]
- [4] RASHID, M.H Electrónica de Potencia, segunda edición. Editorial Prentice Hall 1995.
- [5] SANTIS FUENZALIDA, Cristian Patricio, “Estudio y desarrollo de un compensador de reactivos con mínima generación de armónicos, utilizando técnica de conmutación en alta frecuencia” Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. España 2005-2006.
- [6] VINASCO Guillermo E. “Uso de los sistemas de transmisión flexible (FACTS) en la industria del transporte de energía eléctrica” Scientia et técnica No.13. pp. 141-150, Colombia 2000.
- [7] ESCOBAR ZULUAGA, Antonio H. “Introducción a los sistemas flexibles-controladores FACTS” Maestría Universidad tecnológica de Pereira, 2007. Capítulo 2.
- [8] ZUÑIGA, Pável y RAMIREZ, M. Juan. “FACTS: soluciones modernas para la industria eléctrica” Avance y Perspectiva vol. 20 p.p.235-244.
- [9] [www.abb.com](http://www.abb.com). “Antecedentes sobre FACTS” última edición 2004-02-18.
- [10] [www.abb.com](http://www.abb.com). “ABB Power Systems AC Systems División” 27-28 de septiembre, Medellín, Colombia 2000.
- [11] [www.cigre.org.mx](http://www.cigre.org.mx). “Algunas consideraciones para identificar la aplicaciones de controladores FACTS en los sistemas de transmisión”. México 2001.
- [12] [www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co). “Escenarios y Estrategia minería y energía” Bogotá, D.C, Colombia, Febrero de 2007 – No 11.
- [13] [www.2.ing.puc.cl](http://www.2.ing.puc.cl) Hugh Rudnick V. Chile, 2007. 36p.