

**ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN EN
AC “FACTS”**

**TANIA YINETH GUERRERO CASTILLA
JOHANDER MORA GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
MINOR EN SISTEMAS DE POTENCIA
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C
2008**

**ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN EN
AC “FACTS”**

**TANIA YINETH GUERRERO CASTILLA
JOHANDER MORA GONZALEZ**

**Monografía presentada como requisito para obtener el grado del Minor en
Sistemas de Potencia**

**Director
ENRIQUE VANEGAS
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
MINOR EN SISTEMAS DE POTENCIA
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C
2008**

Cartagena, 30 de Mayo de 2008

Señores

Comité curricular de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Respetados Señores:

La presente es para informarles que la monografía titulada **“ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN EN AC FACTS”** ha sido desarrollada de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como autores de la monografía consideramos que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

TANIA GUERRERO CASTILLA

JOHANDER MORA GONZALEZ

Cartagena, 30 de Mayo de 2008

Señores

**Comité curricular de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Universidad Tecnológica de Bolívar**

Respetados Señores:

Cordialmente me permito informarles, que he llevado a cabo la dirección del trabajo de grado de los estudiantes Tania Yineth Guerrero Castilla y Johander Mora González, titulado **ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN EN AC “FACTS”**.

Atentamente,

ENRIQUE VANEGAS

Ingeniero Electricista

Cartagena, 30 de Mayo de 2008

Señores

COMITÉ FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Universidad Tecnológica de Bolívar

Cartagena

Asunto: Autorización para colgar trabajo de grado en la página Web de la biblioteca.

Cordial saludo.

Autorizamos que el trabajo realizado por nosotros titulado **“ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN EN AC “FACTS”**, se encuentra en condiciones de ser leído y definido como tesis de grado, a su vez este mismo puede ser consultado en versión digital a través de la pagina Web de la biblioteca de la Universidad Tecnología de Bolívar.

Agradecemos la atención prestada.

Cordialmente,

TANIA GUERRERO CASTILLA

JOHANDER MORA GONZALEZ

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, 30 de Mayo de 2008

DEDICATORIA

A Dios por que Gracias a El soy lo que soy, por llenarme de valor para soportar las dificultades, por regalarme los dones para alcanzar mis metas y por su infinito amor.

¡Señor, tu eres maravilloso, te alabo y te bendigo!

Gracias a mis padres por sus esfuerzos y sacrificios, por brindarme amor y por ofrecerme la oportunidad para formarme personal y profesionalmente.

Gracias Mamá por tu apoyo incondicional, Papá, a ti Gracias por tus valiosos consejos, Sin Ustedes no hubiese alcanzado mis objetivos.

A mis hermanos por su confianza y compañía, Gracias por escucharme, apoyarme y aconsejarme, ¡Fueron mi ejemplo a seguir!

A mis sobrinitos, Yneth, Sarita y José Miguel, por alegrar y endulzar mi vida. Los amo hasta el infinito!

A mis compañeros y profesores por contribuir a mi formación personal y profesional.

Tania Yneth Guerrero Castilla.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios quien me lleno de sabiduría y entendimiento para adquirir todos los nuevos conocimientos a lo largo de mi carrera profesional.

A mis padres Leonor y Aquiles que gracias a su paciencia y apoyo incondicional, me permitió culminar con éxito este trabajo. A mis Hermanos Yury, Yulissa y Johiner quienes estuvieron a mi lado a lo largo de todo este proceso.

A mis tutores de quienes adquirí el conocimiento tanto en el ámbito profesional como el personal,

Y por último a todos mis amigos y amigas quienes estuvieron a mi lado a lo largo de mi carrera profesional.

Johander Mora González

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA	4
1.1 EVOLUCIÓN	4
1.2 COMPONENTES	4
1.3 CARACTERISTICAS	5
1.4 LIMITANTES	6
2. SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISION EN AC (FACTS)	9
2.1 SURGIMIENTO	10
2.2 PRIMERAS ALTERNATIVAS	10
2.3 AVANCE E IMPACTO TECNOLOGICO	12
2.4 CONCEPTO	14
2.5 OBJETIVOS	16
2.6 CARACTERÍSTICAS	17
3. CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN FLEXIBLE EN CORRIENTE ALTERNA.	20
3.1 SEGÚN LA FUNCION DE LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS.	20
3.1.1 Controlador Serie	20
3.1.2 Controlador en Derivación	21
3.1.3 Controlador Serie – Serie	22
3.1.4 Controlador Serie – Derivación	23
3.1.5 Importancia de los tipos de controladores según la función de conexión de los Dispositivos	24
3.2 SEGÚN LA FUNCION DE SUS PRINCIPALES ELEMENTOS	26
3.2.1 FACTS Controlador por Tiristores	27
3.2.2 FACTS Basados en Convertidores	29
3.3 SEGÚN EL PARAMETRO QUE SE CONTROLA	30

3.3.1	FACTS Tipo A	30
3.3.2	FACTS Tipo B	30
3.3.3	FACTS Tipo C	30
4.	PRINCIPALES DISPOSITIVOS FACTS	32
4.1	COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)	32
4.1.1	Estructura y Principio de Operación	32
4.1.2	Ventajas	34
4.1.3	Desventajas	34
4.2	COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO (STATCOM)	35
4.2.1	Estructura y Principio de Operación	35
4.2.2	Ventajas	37
4.3	CONTROLADOR DE FLUJO DE POTENCIA UNIFICADO (UPFC)	38
4.3.1	Estructura y Principio de Operación	38
4.3.2	Ventajas	40
4.4	CAPACITOR SERIE CONTROLADOS CON TIRISTORES (TCSC)	41
4.4.1	Estructura y Principio de Operación	41
4.4.2	Ventajas	43
4.5	COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO SERIE (SSSC)	44
4.6	CONTROLADOR DE FLUJO DE POTENCIA INTERLINEA (IPFC)	46
4.7	TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE (TCPST)	47
5.	CRITERIOS DE IMPLEMENTACIÓN	50
5.1	APLICACIONES	50
5.1.1	Control de Flujo	51
5.1.2	Control de Voltaje	51
5.1.3	Control Dinámico	51

5.2 ASPECTOS OPERATIVOS	53
5.3 LOCALIZACION	55
5.4 ASPECTOS ECONÓMICOS	56
6. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS FACTS	59
6.1 FLEXIBILIDAD DE LA RED	59
6.2 MEJORA DE LA CANTIDAD DE LA ENERGÍA	60
6.3 OTRAS VENTAJAS PARA RESALTAR	62
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFIA	67

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Representación gráfica del efecto de los dispositivos FACTS.	19
Figura 2.	Diagrama esquemático de un controlador serie.	21
Figura 3.	Diagrama esquemático de un controlador en derivación.	22
Figura 4.	Diagrama esquemático de un controlador serie-serie.	23
Figura 5.	Topología de controladores unificados.	24
Figura 6.	Configuración del Compensador Estático de Reactivos.	33
Figura 7	Forma de onda de un inversor de voltaje	36
Figura 8.	Configuración del Compensador Estático Sincrónico (STATCOM).	36
Figura 9.	Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC).	39
Figura 10.	Configuración del Controlador Serie usando capacitores conmutados por tiristores.	42
Figura 11.	Configuración del Controlador Serie usando un capacitor fijo en paralelo con reactores controlado con tiristores.	42
Figura 12.	Análisis de potencia.	45
Figura 13.	Configuración del Compensador Estático Sincrónico Serie (SSSC).	46
Figura 14.	Configuración del Transformador cambiador de Fase.	48

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Principales dispositivos FACTS según su conexión y tecnología.	31
Tabla 2.	Atributos de control en dispositivos FACTS	49
Tabla 3.	Aplicaciones de FACTS y equipo convencional	52

INTRODUCCION

En el pasado los sistemas eléctricos de potencia eran relativamente simples y diseñados para ser autónomos. Actualmente los sistemas de potencia constan de una gran cantidad de interconexiones, no sólo entre compañías prestadoras de servicio eléctrico pertenecientes a un país, sino también entre sistemas de diferentes países; esto obedece principalmente a cuestiones de carácter económico y de seguridad en la operación del sistema¹.

Además de esto la industria eléctrica está experimentando cambios acelerados, entre los cuales se ubica la reforma estructural del mercado eléctrico internacional. Las nuevas estructuras requieren que la potencia eléctrica sea transportada a través de líneas de transmisión bien definidas; sin embargo, las redes convencionales de los sistemas de potencia no pueden prever las expectativas futuras de flexibilidad en el control de la potencia.

En los últimos años la demanda en los sistemas de potencia ha aumentado y seguirá incrementándose, lo que conlleva a una serie de problemas como sobrecarga y sub-utilización del potencial de transmisión, cuellos de botella y oscilaciones de potencia.

El costo de líneas de transmisión, así como las dificultades que se presentan para su construcción, su localización, derecho de vía, etc., a menudo limitan la

¹ J.M. Ramírez, I. Coronado, P. Zúñiga, R. Dávalos, A. Valenzuela, I Castillo, *Avance y Perspectiva* 19, 347 (2000).

capacidad de transmisión, lo cual ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten mitigar estos inconvenientes².

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

Los últimos avances en las tecnologías en transmisión, son una alternativa para flexibilizar la rigidez del sistema de potencia, optimizando su expansión, su operación y aumentando su confiabilidad, factores claves en la desregulación. Esos avances hacen a varias de esas tecnologías mucho más viables, mucho más útiles y mucho más efectivas.

Además hacen más viable el negocio de la transmisión. Los Sistemas de Transmisión Flexibles en AC es uno de estos avances que muestran los grandes desarrollos que se están dando en esta área de los SEP. Estas tecnologías no sólo mejoran la capacidad y la seguridad de los sistemas de transmisión de energía, sino que aumentan mucho su flexibilidad.

En ésta monografía se revisa la problemática de los sistemas eléctricos de potencia, haciendo énfasis en el uso de los dispositivos conocidos como FACTS para la solución de problemas de estado estacionario y dinámico, debido al gran número de ventajas que éstos presentan sobre los dispositivos de conmutación mecánica. Se revisa también la clasificación de FACTS en función de la forma de conexión que estos dispositivos tienen en la red. Así como una descripción de los

² N.G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems (IEEE Press, 1999).

principales dispositivos, clarificando las diferencias entre ellos y mencionando sus principales características.

Teniendo en cuenta esto, en el contenido de esta monografía se describirán los aspectos más importantes de la Tecnología FACTS, tales como su surgimiento, los tipos de FACTS existentes, aplicaciones, ventajas y otras características más que permitirán tener una visión mas clara de los conceptos que a estos se relacionan y la importancia que ha tenido su implementación en los Sistemas de Potencia.

1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se construyeron inicialmente para satisfacer la demanda de las regiones que demográfica y económicamente se fueron estableciendo en ellas. Se abastecía entonces la demanda de una región y luego, por necesidades climáticas, energéticas o eléctricas se vio la necesidad de interconectarlas eléctricamente. En ese entonces, se operaba con intercambios mínimos entre regiones.

1.1 EVOLUCIÓN

Los primeros sistemas eléctricos de potencia estaban basados en corriente continua (CC), cerca de 1882, éstos alimentaban pequeñas carga de iluminación en casas y avenidas. Luego, en 1890 aparecen los primeros sistemas eléctricos de potencia de corriente alterna (CA) monofásicos. Con la aparición del transformador, se fortaleció el uso de los Sistemas AC, además a esto se suma la implementación de transmisión en CA trifásicos.

1.2 COMPONENTES

Los constituyentes principales de un sistema de potencia son: Generadores, líneas de transmisión, sub-transmisión, distribución y cargas junto con sus equipos auxiliares de protección y soporte.

Los generadores son máquinas rotativas que pueden ser sincrónicas o asincrónicas. Las líneas de transmisión, Sub-transmisión y distribución, son

esencialmente redes de parámetros distribuidos predominantemente reactivos diseñadas para operar a altos, medios y bajos voltajes AC. Las cargas pueden ser sincrónicas, no sincrónicas y pasivas, consumiendo en general potencia activa y reactiva.

1.3 CARACTERISTICAS

Los sistemas de potencia convencionales, especialmente las líneas de transmisión, se dice que son inflexibles debido a que ofrecen poca o nula posibilidad de control en el flujo de potencia como consecuencia de que los parámetros y la configuración de la red son fijos. Además, la red tiene una respuesta lenta ante contingencias, lo cual dificulta el control del flujo de potencia del sistema en términos de velocidad y versatilidad³.

Esto se debe a que los sistemas eléctricos de potencia en la actualidad están primordialmente controlados por elementos mecánicos, que son lentos y requieren mantenimiento continuo debido a que sufren desgaste.

El flujo de potencia entre dos puntos a través de una línea de transmisión sin pérdidas está dado por la siguiente relación (**Ec. 1**):

$$P_{ij} = V_i V_j \frac{\text{Sen}(\theta_{ij})}{X_{ij}} \quad \text{Ec.1}$$

³ W. Fang, Coordinated Power Control of Unified Power Flow Controller and its Application for Enhancing Dynamic Power System Performance, tesis doctoral, Hong Kong Polytechnic University (1999).

Donde:

- P_{ij} , es la potencia real o activa transferida a través de la línea de transmisión que conecta los nodos $i - j$.
- V_i y V_j corresponden a la magnitud del voltaje en los nodos $i - j$, respectivamente.
- θ_{ij} , es la diferencia angular entre los nodos terminales.
- X_{ij} , es la reactancia de la línea de transmisión.

De esta expresión se puede observar que la potencia que fluye por una línea depende de los parámetros físicos de la red: voltaje en los extremos de la línea, reactancia de la línea y la diferencia angular entre los voltajes extremos.

En sistemas de potencia convencionales el parámetro X_{ij} no es controlable; sin embargo, es posible ajustar dentro de un margen estrecho los parámetros V_i , V_j y θ_{ij} para controlar el flujo de potencia.

1.4 LIMITACIONES

Con la llegada de la desregulación del sector eléctrico se presenta la necesidad de realizar grandes transferencias de bloques de energía entre zonas remotas con el fin de minimizar el costo de la operación. Estas nuevas condiciones operativas hicieron evidente un fenómeno que era inherente al sistema aún antes de la desregulación: la congestión de los SEP⁴.

⁴ R.D. Christie, B.F. Wollenberg, and I. Wangensteen. "Transmission management in the deregulated environment," Proceedings of the IEEE, vol. 88, pp. 170 -195, Feb. 2000

Clásicamente se ha visto la congestión, como un estado de operación del SEP cerca de uno o más de sus límites de transferencia. Dichos límites pueden ser de muy diversa índole, entre otros limitantes de estado estacionario, dinámico, físico y aún de tipo regulatorio⁵. Estas limitantes llevan a los sistemas de potencia a operar muchos activos por debajo de su límite térmico, con otros corredores altamente cargados y exigencia de estrategias operativas tales como re-despachos de generación que encarecen la operación.

En teoría, un sistema de transmisión puede transportar energía hasta alcanzar sus límites de carga térmica. En la práctica, sin embargo, el sistema casi siempre está restringido por los límites de estabilidad y de variación de la tensión, y por las circulaciones de potencia, antes de alcanzar el límite térmico. Los niveles de tensión en sistemas de CA pueden variar moderadamente, pero no se admite que superen límites bien definidos, generalmente del 5 al 10 por ciento. Los límites de estabilidad de la transmisión se refieren a la energía que un sistema afectado por importantes averías puede transmitir sin haber perdido nada de su capacidad de transmisión.

Teniendo en cuenta lo anterior se tiene que el flujo de potencia a través de un sistema de transmisión está limitado por una o más de las siguientes características⁶:

- **Límites de estabilidad:** En la actualidad y en sistemas de potencia desarrollados, los límites de transmisión de potencia están principalmente relacionados con los límites de estabilidad.

⁵ G. Marin, J. Ramirez. "Congestion management in electrical power systems within deregulated schemes". 35th North American Power Symposium, Oct 2003

⁶ RUEDA de T, María Teresa. Torres, A; Ríos, M. Mejoramiento de la Red de Transmisión Nacional con la Utilización de Nuevas Tecnologías. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

- **Límites térmicos:** Es una condición que se presenta más comúnmente en líneas de transmisión de corta longitud y a niveles de tensiones nominal, menores a 230KV. Este límite está relacionado con las pérdidas I^2R que calienta al conductor, esto indica, que cuando se alcanza cierta temperatura, las características físicas del conductor cambian en forma irreversible.
- **Límites de tensión:** Las limitaciones en el control de voltaje y control de potencia reactiva afecta la estabilidad de voltaje y por lo tanto, la seguridad del sistema.
- **Flujos circulantes:** En sistemas enmallados existe la posibilidad de bucles indeseables entre elementos en paralelo que llevan a pérdidas y limitación en la potencia que se puede manejar. Si se utilizan medios para controlar la impedancia de las redes en paralelo, ésta dificultad desaparece.
- **Límites en los niveles de corto circuito:** El crecimiento de un sistema de potencia conlleva a un incremento en la corriente de corto por encima de la capacidad original de los equipos. Esto implica elevadas inversiones en medios para limitarla, tales como reactores en serie; sin embargo, a su vez disminuyen la capacidad de transmisión. Si se limita la corriente de corto circuito se puede elevar la capacidad de transmisión con equipos construidos para una corriente de falla inferior.

2. SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CA (FACTS)

Con el advenimiento de la electrónica de potencia se han desarrollado dispositivos, hoy conocidos como FACTS, que aprovechan las bondades de los elementos semiconductores de potencia con el fin de mejorar el desempeño de la red eléctrica. Actualmente los sistemas eléctricos de potencia son redes de gran tamaño y complejidad no solo en extensión territorial sino también en la cantidad y diversidad de los elementos que los conforman, debido a esto presentan un gran número de problemas operativos y de control, que se traducen en pérdidas económicas para las compañías suministradoras de servicio eléctrico, así como para los usuarios.

Los dispositivos FACTS se han consolidado como una alternativa de solución a muchos de los problemas que actualmente enfrenta el sector eléctrico, puesto que éstos permiten controlar los parámetros que rigen la transferencia de potencia. Además presentan una serie de beneficios como la utilización de líneas de transmisión muy cerca de sus límites térmicos, incremento de los márgenes de estabilidad, control del flujo de potencia a través de rutas preestablecidas, entre otros. Esto tiene como consecuencia un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles permitiendo así ahorros en el aspecto económico. Si bien los dispositivos FACTS se instalan para operar en estado estacionario, son bien conocidas las virtudes que éstos tienen en estado transitorio, además de ayudar al amortiguamiento de oscilaciones, estabilidad de voltaje, estabilidad dinámica, compensación de reactivos, limitación de corrientes de falla y en problemas de resonancia subsíncrona.

2.1 SURGIMIENTO

Las limitaciones básicas de la transmisión de potencia a corriente alterna (distancia, estabilidad y controlabilidad del flujo), que ha ocasionado una sub-utilización de líneas de transmisión y otros activos, así como el potencial de mitigar estas limitaciones mediante compensación controlada, fueron los incentivos necesarios en la última parte de la década de los 70's para introducir la electrónica de potencia en el control de la potencia reactiva.

Las condiciones socioeconómicas empezaron a cambiar durante los setentas, dando como resultado que las empresas eléctricas se enfrentaran a problemas económicos, sociales y del medio ambiente: el embargo petrolero, oposición a la energía nuclear, el enfoque social a problemas de contaminación, etc. Lo anterior, junto con la reestructuración de la industria al cambiar de grandes centros de manufactura a producción distribuida en instalaciones menores, resultó en un cambio en los patrones de la demanda de energía eléctrica.

Esto incentivó el crecimiento de interconexiones entre empresas eléctricas vecinas para compartir la energía y aprovechar la diversidad de la carga, la demanda pico en diferentes husos horarios y la disponibilidad de diferentes reservas de generación. Sin embargo, lo anterior requiere de una red de transmisión lo suficientemente flexible para acomodar los requisitos de cambios económicos y de medio ambiente. De aquí el nacimiento del concepto **FACTS**.

2.2 PRIMERAS ALTERNATIVAS

Desde antes de la aparición de la tecnología FACTS, ya se hacían esfuerzos por flexibilizar los sistemas de potencia. Por ejemplo, ya se utilizaba para aumentar el flujo en una línea de transmisión insertar un condensador serie. Dicho

condensador era conectado y desconectado por medio de un interruptor con posibles problemas de transitorios por conexión y algunas veces de resonancia subsíncrona, fenómeno que afecta con mayor impacto a generadores térmicos, los cuales poseen ejes más largos que los hidráulicos.

También se colocaban reactores o capacitores en paralelo conectados con interruptores para resolver problemas relacionados con el voltaje, pero al igual que con la inserción de elementos serie, este era un control discreto y relativamente lento.

Esta claro que se puede incrementar la potencia a transmitir en estado estable y que se puede controlar el perfil de voltaje a lo largo de la línea de transmisión, con una compensación adecuada de la potencia reactiva. El propósito de esta compensación es cambiar las características eléctricas naturales de la línea de transmisión. Por lo que, reactores conectados en derivación (fijos o conectados mecánicamente), se aplican para minimizar la sobretensión en la línea bajo condiciones de baja carga. De la misma forma, se aplican capacitores en derivación; fijos o conectados mecánicamente, para elevar el voltaje bajo condiciones de incremento de la demanda.

En el caso de líneas de transmisión largas, la compensación capacitiva en serie se emplea para “acortar” la línea al reducir su reactancia inductiva (X) y por lo tanto su longitud eléctrica. En algunas configuraciones con múltiples líneas, puede suceder que el ángulo “impuesto” en forma natural en alguna línea en particular sea inadecuado para la transferencia de potencia programada para dicha línea. En este caso, se puede emplear un regulador de ángulo de fase para controlar el ángulo de esta línea, en forma independiente del ángulo establecido por la transmisión.

Tanto la compensación serie como la compensación en derivación, incrementan en forma significativa la potencia máxima transmitida. Por lo que es razonable esperar que, con controles rápidos y adecuados, estas técnicas de compensación serán capaces de cambiar el flujo de potencia en el sistema para aumentar el límite de la estabilidad transitoria y proporcionar un afectivo amortiguamiento de las oscilaciones de potencia, así como prevenir el colapso de voltaje.

2.3 AVANCE E IMPACTO TECNOLÓGICO

La electrónica de potencia hizo su aparición comercial aplicada a enlaces HVDC con válvulas de mercurio en 1954. Luego aparecieron los dispositivos semiconductores como el tiristor. En los enlaces HVDC se controlaba el flujo de potencia activa entre dos nodos y se hacía opcionalmente un control de voltaje, aunque con no mucha eficacia. Hasta ese momento y hasta hace muy poco los enlaces en transmisión en alto voltaje de corriente directa HVDC eran concebidos para altos voltajes, altas capacidades de transferencia y aplicado a sistemas no mallados.

Típicamente entre otras aplicaciones se ha usado para traer la generación desde plantas muy lejanas, llevar energía eléctrica a sitios muy lejanos, interconectar sistemas de diferentes frecuencias, o interconectar dos sistemas, aislando las perturbaciones de un sistema hacia el otro por medio de lo que se llama enlace HVDC back-to-back, que no es más que un enlace HVDC sin línea de transmisión, ósea que donde se encuentran los dos sistemas de HVAC, se colocan a cada lado, las estaciones conversoras sin necesidad de construir una línea en DC.

Se vio entonces la posibilidad de llevar los tiristores a más campos de aplicación y es así como surge la tecnología FACTS siendo ya posible con tiristores realizar un control continuo sobre los reactores y capacitores, tanto en serie como en

paralelo, según la necesidad, eliminando los problemas típicos antes mencionados del switcheo por interruptores.

Con ello se gana además velocidad de respuesta pudiendo ayudar la tecnología FACTS a solucionar más efectivamente problemas de estabilidad que requieren altas velocidades de respuesta en los elementos de control y con ello descongestionando la red, pues permite usarla más cerca de su límite térmico.

Surgen ya en los últimos años importantes desarrollos en la electrónica de potencia que impactan positivamente la tecnología FACTS. Esos desarrollos son los siguientes:

- Uso de IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) con control tanto de encendido como de apagado a nivel de kHz.
- Configuración de estaciones como Convertidoras Fuente de voltaje (VSC).
- Algoritmo de Modulación del Ancho de Pulso (PWM) con accionamiento a nivel de kHz.
- Uso de filtros activos

Los IGBT en configuración VSC usando PWM permiten un control mucho más preciso y a la vez independiente de activa y reactiva, pudiendo usar el HVDC no solo como controlador de flujo, sino como un buen elemento de control de voltaje.

Es de resaltar que estos avances permiten tener “generadores de reactiva” sin necesidad de tener capacitores (para entregar reactiva) o reactores (para absorber reactiva) pues por medio de solo electrónica de potencia, se puede variar el voltaje en un nodo inyectando un voltaje de magnitud y ángulo adecuados, según las necesidades. Esto rompe un paradigma y una visión de los que muchas veces se entiende por reactiva.

En cuanto al impacto de los últimos avances en las tecnologías soporte de los FACTS, se pueden mencionar los siguientes:

- Control independiente mejorado de activa y reactiva
- Menores pérdidas activas y reactivas en el suicheo de semiconductores
- Disminución de requerimientos de compensación reactiva en los proyectos de FACTS.
- Disminución de equipos pasivos de filtrado
- Se aumenta la viabilidad de FACTS por disminución de costos del proyecto y costos de operación, con lo que la distancia de equilibrio en la construcción de una línea de AC y una de DC disminuye.
- Potencialidad de nuevos negocios de servicios complementarios en transmisión como control de voltaje, control de flujo o soporte de estabilidad angular y de voltaje.

2.4 CONCEPTO

El término FACTS engloba la totalidad de los sistemas basados en la electrónica de alta potencia que se utilizan para la compensación y transmisión de energía de corriente alterna.

Los equipos FACTS representan una tecnología relativamente nueva para los sistemas de transmisión. Se desarrollan a partir de una combinación de equipos convencionales (transformadores y condensadores), elementos de electrónica de potencia, microelectrónica y equipos de telecomunicaciones, la que posibilita una operación coordinada y de mayor flexibilidad de los distintos dispositivos presentes en el sistema.

El grupo de trabajo de FACTS de IEEE sugiere términos y definiciones para dispositivos FACTS y para controladores FACTS⁷. Se presentan ahora las definiciones de los términos más comunes en la literatura.

- **Flexibilidad de la Transmisión de la Potencia Eléctrica:** habilidad de acomodarse a cambios en el sistema de transmisión eléctrico o en las condiciones de operación, tal que se mantengan unos márgenes suficientes de estabilidad estacionaria y trasciende.
- **Sistemas de Transmisión Flexible en Corriente Alterna:** sistemas de transmisión de corriente alterna basados en electrónica de potencia y en otros controladores estáticos para así aumentar la confiabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia. A estos dispositivos se les denomina Controladores FACTS.

En la definición anterior debe hacerse notar que las palabras “otros controladores estáticos” implican que puede haber otros controladores estáticos que no estén basados en electrónica de potencia.

- **Controlador FACTS:** Sistema basado en electrónica de potencia y otros equipos estáticos que proporcionan control sobre uno o más de los parámetros de los sistemas de transmisión de CA.

Los equipos FACTS permiten lograr la máxima utilización del sistema de transmisión, minimizando pérdidas y maximizando la capacidad de transmisión de energía, además de generar externalidades que pueden ser vistas como señales económicas de inversión, tales como manejo de congestiones, realización de

⁷ IEEE Transmission and Distribution Committee, 2000, "FACTS Applications", IEEE FACTS Working Group.

contratos sin afectar a terceros, manejo de interconexiones y criterios de calidad y seguridad de servicio.

2.5 OBJETIVOS

El reto básico del sistema de transmisión, cualquiera que sea su evolución y forma final, es proporcionar una red capaz de suministrar la energía eléctrica requerida desde la generación hasta los centros de consumo sobre una amplia área geográfica bajo un mercado eléctrico variante.

La solución a cualquier restricción es que, debido al costo, derechos de paso, y problemas ambientales; la red cada vez más estará basada en la estructura física existente.

Tomando en cuenta lo anterior, al final de los ochentas, se formalizó el concepto general de FACTS, con los siguientes dos objetivos principales:

- a. Incrementar la capacidad de transferencia de potencia de los sistemas de transmisión.
- b. Mantener el flujo en las rutas designadas.

El primer objetivo implica que el flujo de potencia en una línea dada debe poderse incrementar hasta su límite térmico, forzando la corriente necesaria por la impedancia en serie si y solo si, al mismo tiempo, se mantiene la estabilidad del sistema con el control adecuado en tiempo real de los flujos durante y después de una falla.

El segundo objetivo implica que, controlando la corriente en una línea (por ejemplo, cambiando su impedancia aparente), el flujo de potencia se restringe a

corredores designados. También implícito en este objetivo es que la trayectoria primaria de flujo pueda cambiar rápidamente a una trayectoria secundaria bajo alguna condición de contingencia, y así mantener la operación adecuada del sistema.

2.6 CARACTERÍSTICAS

La característica principal de los controladores FACTS es la capacidad que tienen para modificar los parámetros del sistema, lo que a su vez permite controlar el flujo de potencia (Fig. 1). Esto es:

- a.** Al controlar la impedancia de la línea X_{ij} se puede regular la corriente, así como la potencia activa.
- b.** El control del ángulo permite regular el flujo de corriente.
- c.** Inyectar un voltaje en serie con la línea, ortogonal al flujo de corriente puede aumentar o disminuir la magnitud de ésta.
- d.** Inyectar un voltaje en serie con la línea y con cualquier ángulo de fase puede regular la magnitud y la fase de la corriente de línea y, por lo tanto, se puede controlar la potencia real y reactiva en forma más precisa.
- e.** La combinación del control de la impedancia de línea con un controlador en serie, y la regulación de voltaje con un controlador en derivación, puede ser una medida efectiva para controlar el flujo de potencia real y reactiva entre dos subsistemas.

Los controladores FACTS ofrecen oportunidades sin precedentes para regular la transmisión de corriente alterna (CA), incrementando o disminuyendo el flujo de potencia en líneas específicas y respondiendo de manera casi instantánea a los problemas de estabilidad. Por esta razón se han denominado Sistemas Flexibles de Transmisión de CA.

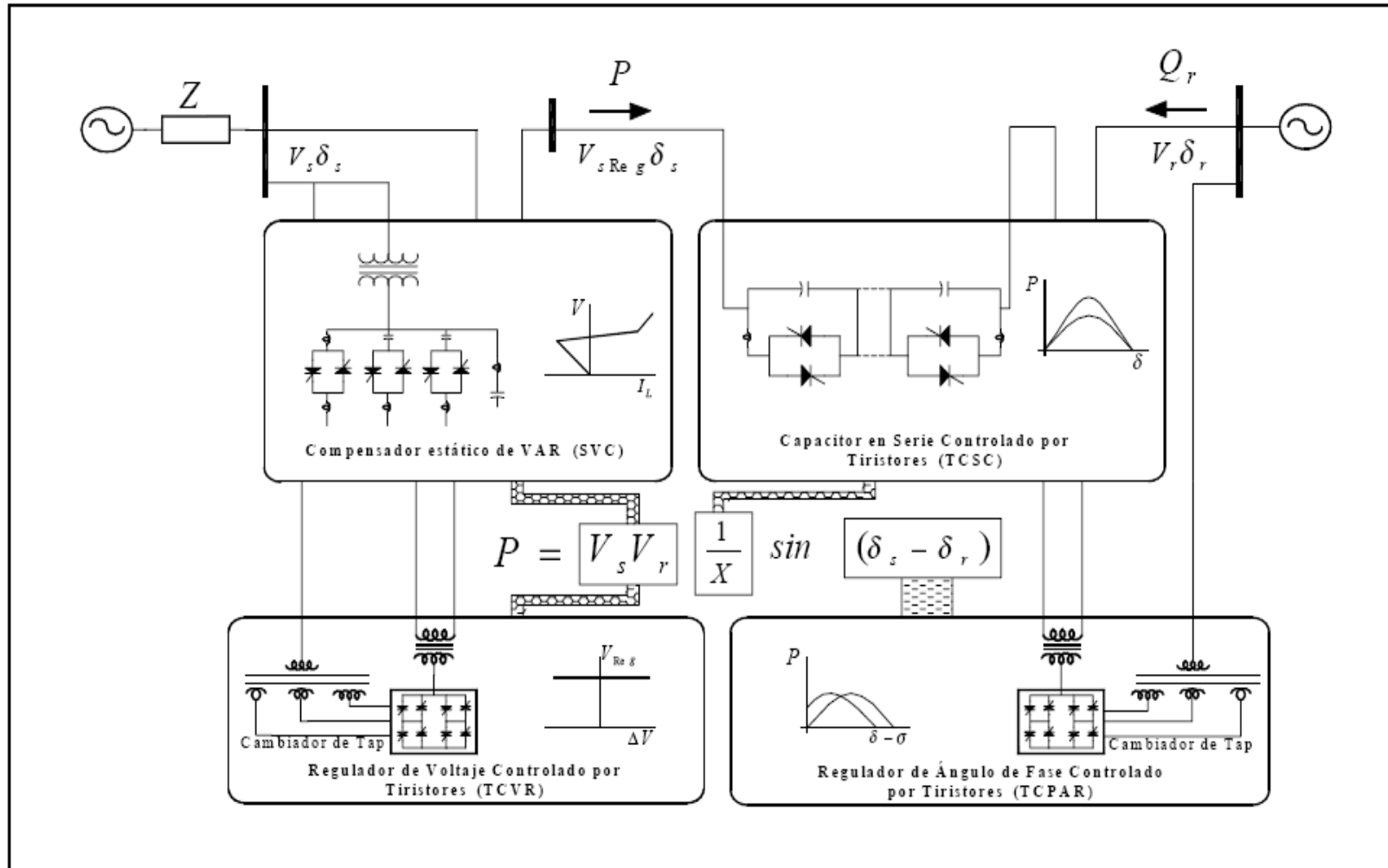


Figura 1. Representación gráfica del efecto de los dispositivos FACTS.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRANSMISION FLEXIBLES EN CORRIENTE ALTERNA

Hay diferentes tipos de Sistemas de Transmisión Flexibles en A.C, éstos dependen de su principio de funcionamiento y tecnología, por lo que se describirá cada uno de ellas según su clasificación así:

3.1 SEGÚN LA FUNCION DE LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS:

Existen diferentes formas de clasificar los dispositivos FACTS; una de ellas es en función de la conexión de los dispositivos⁸: controladores serie, controladores en derivación, controladores serie-serie y controladores serie-derivación.

3.1.1 Controlador serie (Fig. 2)

Puede consistir en una impedancia variable como un capacitor, reactor, etc., o una fuente variable basada en electrónica de potencia a frecuencia fundamental.

El principio de operación de todos los controladores serie es inyectar un voltaje en serie con la línea. Una impedancia variable multiplicada por la corriente que fluye a través de ella representa un voltaje en serie inyectado a la línea. Mientras el voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea el controlador serie sólo aporta consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa.

⁸ N.G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* (IEEE Press, 1999).

En esta categoría se encuentran:

- Compensador Serie Estático Síncrono (SSSC).
- Capacitor en Serie Controlado por Tiristores (TCSC).
- Reactor en Serie Controlado por tiristores (TCSR).

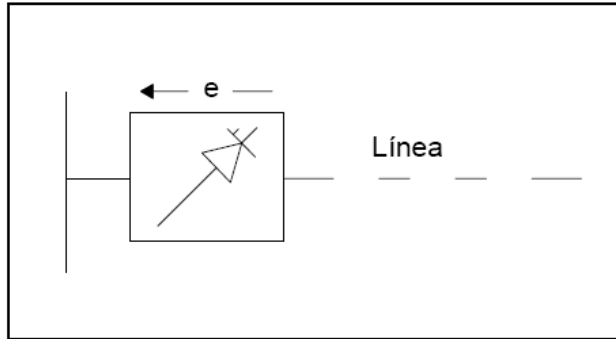


Figura 2. Diagrama esquemático de un controlador serie.

3.1.2 Controlador en derivación

Al igual que como sucede con el controlador serie, el controlador en derivación puede consistir de una impedancia variable, fuente variable o una combinación de ambas (Fig. 3). El principio de operación de todos los controladores en derivación es inyectar corriente al sistema en el punto de conexión. Una impedancia variable conectada al voltaje de línea causa un flujo de corriente variable y de esta manera representa una inyección de corriente a la línea. Mientras que la corriente inyectada esté en cuadratura con el voltaje de línea, el controlador en derivación sólo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa.

En esta categoría se encuentra:

- Compensador estático de Vars (SVC).
- Compensador Estático Síncrono (STATCOM).
- Reactor Controlado por Tiristores (TCR).
- Capacitor Controlado por Tiristores (TSC)

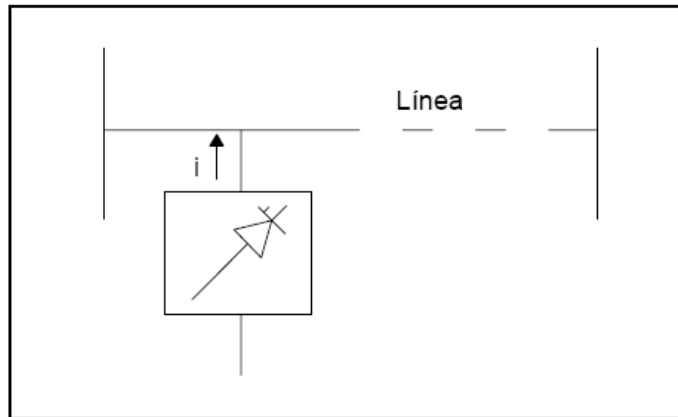


Figura 3. Diagrama esquemático de un controlador en derivación.

3.1.3 Controlador serie-serie

Este tipo de controlador puede ser una combinación de controladores serie coordinados en un sistema de transmisión multilínea, o puede también 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 (Fig. 4).

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 el uso de los sistemas de transmisión. En este caso el término “unificado” significa que las terminales de CD de los convertidores SSSC de todos

los controladores se conectan para lograr una transferencia de potencia activa entre sí.

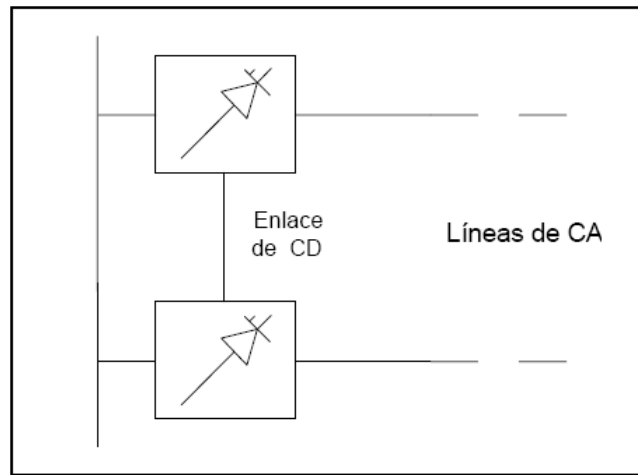


Figura 4. Diagrama esquemático de un controlador serie-serie.

3.1.4 Controlador serie-derivación

Este dispositivo puede ser una combinación de controladores en derivación y serie separados, controlados de manera coordinada, o un controlador de flujo de potencia unificado con elementos en serie y en derivación. El principio de operación de los controladores serie-derivación es inyectar corriente al sistema a través de la componente en derivación del controlador, y un voltaje en serie con la línea utilizando la componente en serie. Cuando los controladores en serie y en derivación son unificados puede haber un intercambio de potencia activa entre ellos a través de su enlace (Fig. 5).

En esta categoría se encuentra:

- Controlador Unificado de flujos de potencia (UPFC).
- Transformador cambiador de fase.

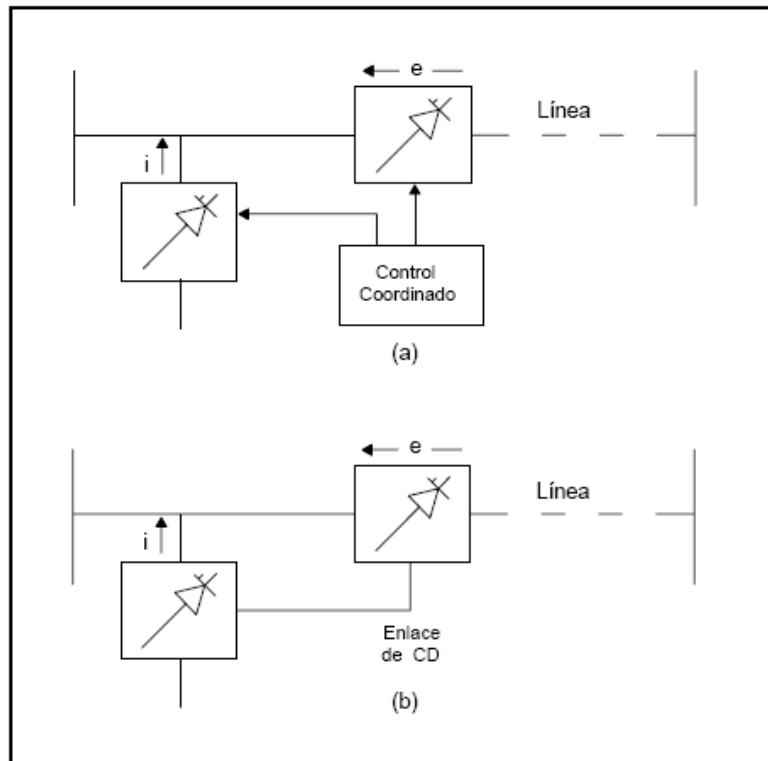


Figura 5. Topología de controladores unificados:
 (a) Controlador coordinado serie-paralelo
 (b) controlador unificado serie-paralelo.

3.1.5 Importancia de los tipos de controladores según la función de conexión de los Dispositivos

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 en derivación, 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/potencia⁹.

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

Lo anterior no significa que no se pueda utilizar un controlador serie para mantener el voltaje de línea dentro de un rango especificado. Después de todo, las fluctuaciones de voltaje son en gran medida una consecuencia de la caída del voltaje en la impedancia serie de las líneas, transformadores y generadores. Así, si se utiliza un controlador FACTS en serie se puede mejorar el perfil de voltaje, pero a un costo muy elevado. Un controlador en derivación es mucho más efectivo para mantener el perfil de voltaje requerido en una subestación. Una de las ventajas del controlador en derivación es que abastece al nodo independientemente de las líneas conectadas a él.

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

⁹ Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Primera Edición, IEEE Press, 1999.

Por otro lado, se sugiere diseñar los controladores serie para operar durante contingencias, sobrecargas dinámicas y corrientes de corto circuito. Estos dispositivos se pueden proteger mediante supresores de picos, o a través de dispositivos de estado sólido que inhiben su operación cuando la corriente de falla es demasiado grande.

De lo expuesto anteriormente se puede prever que la combinación de controladores serie y derivación puede ofrecer las ventajas de cada uno de ellos, como lo son control de flujo de corriente/potencia de línea y el control de voltaje nodal.

3.2 SEGÚN LA FUNCION DE SUS PRINCIPALES ELEMENTOS

La filosofía de los sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS, por sus siglas en inglés), desarrollada a finales de los años 80, es utilizar dispositivos electrónicos basados en diodos, tiristores y GTO para modificar los parámetros descritos y con ello controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión.

Los Dispositivos Electrónicos presentan ventajas sobre los dispositivos de conmutación mecánicos, como la capacidad de conmutar mucho más rápido, además de poder utilizarse para re-direccionar la potencia en una fracción de ciclo. Esta ventaja permite, por ejemplo, amortiguar oscilaciones de potencia, lo cual no puede lograrse con el empleo de controladores mecánicos.

Además, los dispositivos de conmutación mecánicos tienden a desgastarse, mientras que los controladores basados en dispositivos electrónicos pueden conmutar dos veces cada ciclo sin deteriorarse. Debido a la rapidez en su

operación, estos dispositivos también pueden ser utilizados para impactar positivamente en los problemas dinámicos del sistema¹⁰.

Los controladores FACTS también pueden clasificarse en dos grupos tomando como referencia la función de sus principales elementos.

3.2.1 FACTS controlados por tiristores

El primer grupo utiliza elementos reactivos y transformadores cambiadores de taps controlados por tiristores. Dentro de este grupo se encuentran:

- 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

¹⁰ J.M. Ramírez, I. Coronado, P. Zúñiga, R. Dávalos, A. Valenzuela, I Castillo, *Avance y Perspectiva* 19, 347 (2000).

representan una admitancia reactiva variable en la red de transmisión y por lo tanto cambian la impedancia del sistema.

Típicamente, la compensación capacitiva en derivación 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^a, 5^a, 7^a) del SVC y del sistema de potencia, o cerca de ellas¹¹.

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)¹².

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 requerida¹³. 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

¹¹ Y.H. Song, A.T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS) (IEE Power and Energy Series 30, 1999).

¹² N.G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems (IEEE Press, 1999).

¹³ Y.H. Song, A.T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS) (IEE Power and Energy Series 30, 1999).

disturbios llevan al TCSC y al SVC a operar fuera de su intervalo normal de control¹⁴.

3.2.2 FACTS basados en convertidores

El segundo grupo utiliza convertidores de voltaje autoconmutados que actúan como fuentes estáticas de voltaje síncrono. A este grupo corresponden:

- STATCOM Compensador estático síncrono
- SSSC Compensador serie estático síncrono
- IPFC Controlador de flujos de potencia interlínea
- UPFC Controlador unificado de flujos de potencia
- SVS Fuente De Voltaje Sincrónica

El segundo grupo de controladores FACTS emplea 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 reactiva¹⁵.

¹⁴ N.G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems (IEEE Press, 1999).

¹⁵ Y.H. Song, A.T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS) (IEE Power and Energy Series 30, 1999).

3.3 SEGÚN EL PARAMETRO QUE SE DESEA CONTROLAR:

Otros autores¹⁶ clasifican los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna, en tres categorías, es decir, se dividen dependiendo del parámetro que se desee controlar así:

3.3.1 FACTS tipo A

Estos dispositivos controlan el flujo de potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q) en la línea de transmisión, entre éstos se encuentra el UPFC, Control Unificado de Flujo de Potencia, entre otros.

3.3.2 FACTS tipo B

Controlan sólo la potencia activa (P) de la línea. Un ejemplo claro de éste tipo de dispositivo es el TCSC, Capacitor Serie Controlado por Tiristores.

3.3.3 FACTS tipo C

Son controladores de reactivos en el nodo de conexión. Este dispositivo ajusta la inyección de potencia reactiva para controlar la magnitud de voltaje en el nodo mencionado. Entre éstos se encuentra el STATCOM, Compensador Estático.

Para finalizar este capítulo, en la Tabla 1, se muestra un resumen de los diagramas característicos de seis de los principales dispositivos FACTS, clasificados según su forma de conexión y sus elementos de composición.

¹⁶ CASTILLO, I. Un criterio Óptimo para Coordinar Estabilizadores en Sistema Eléctricos de Potencia. Tesis de Grado. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Unidad Guadalajara, Jal. Diciembre - 2002.

	Dispositivos basados en tiristores	Dispositivos basados en VSC's
Dispositivos en Derivación	<p>TCR</p>	<p>STATCOM</p>
Dispositivos en Serie	<p>TSSC</p>	<p>SSSC</p>
Dispositivos Serie-Derivación	<p>TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE</p>	<p>UPFC</p>

Tabla 1. Principales dispositivos FACTS según su conexión y tecnología.

4. PRINCIPALES DISPOSITIVOS FACTS: Generalidades

4.1 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)

El SVC es uno de los dispositivos utilizados para mantener el voltaje dentro de niveles aceptables de operación. Los SVCs desarrollados a principios de los 70s son los precursores de los actuales controladores FACTS. La función del SVC es regular el voltaje del sistema de transmisión en el punto de conexión.

Desde el punto de vista de operación, el SVC puede verse como una reactancia variable en derivación que depende del ángulo de disparo aplicado a los dispositivos electrónicos de potencia que lo componen. Dependiendo del valor de éste ángulo, el dispositivo se comporta como una reactancia ya sea capacitiva o inductiva.

SVC es un término general para un reactor controlado o conmutado por tiristores, y/o un capacitor conmutado por tiristores, o una combinación de ambos. El SVC se basa en tiristores convencionales, es decir, dispositivos sin capacidad de apagado.

4.1.1 Estructura y Principio de Operación

Los compensadores estáticos de reactivos generalmente están integrados por bancos de capacitores y/o reactores, es decir elementos pasivos. Con el uso de la electrónica de potencia y estrategias de control adecuadas se logra una respuesta sumamente rápida (1 ciclo) para conectar elementos en derivación. La conexión/desconexión de capacitores se realiza en forma discreta mediante el control de tiristores en los períodos de conducción.

La conexión de reactores se efectúa en forma controlada variando el ángulo de disparo de los tiristores, logrando de esta forma el control continuo de la corriente del reactor. En los sistemas de transmisión las características adecuadas de control de voltaje y potencia reactiva con SVCs son por lo general obtenidas en base a estrategias de control de lazo cerrado.

Un compensador estático de reactivos conectado en derivación está compuesto de bancos de capacitores y de reactores conmutados mediante tiristores como se muestra en la Fig. 6. Con una apropiada coordinación de la conmutación de los capacitores y el control de los reactores, la salida en VARS puede ser variada continuamente entre los rangos capacitivo e inductivo del equipo¹⁷.

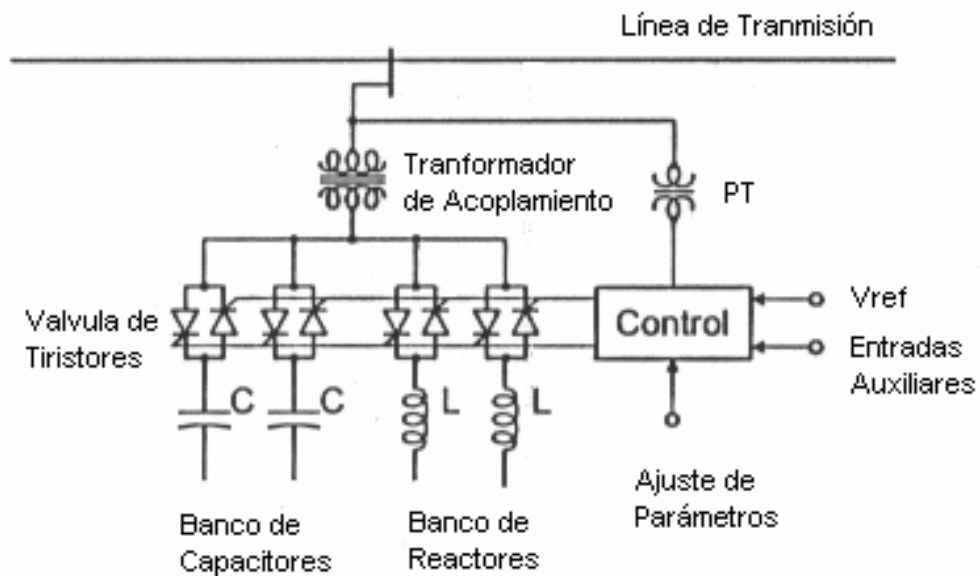


Figura 6. Configuración del Compensador Estático de Reactivos

¹⁷ GYUGYI, L, "Power electronics in electric utilities: Static VAr compensators", Proceedings of the IEEE, 76, (4) April 1998.

4.1.2 Ventajas:

Este dispositivo genera o absorbe potencia reactiva, la salida se ajusta para intercambiar corriente capacitiva o inductiva y así mantener o controlar parámetros específicos (típicamente el voltaje en una barra) del sistema eléctrico de potencia. Los compensadores estáticos de reactivos controlados mediante tiristores son los pioneros de los actuales controladores FACTS. Desarrollados a principios de la década de los setenta para compensación de hornos de arco industriales fueron adaptados después para aplicaciones de transmisión.

El compensador es operado normalmente para regular el voltaje del sistema de transmisión en una terminal determinada. La regulación cercana al voltaje nominal puede ser alcanzada en el rango normal de operación definido por las máximas corrientes capacitivas e inductivas del SVC.

4.1.3 Desventajas:

El SVC al estar compuesto de capacitores y reactores, puede únicamente suministrar una corriente que disminuye paralelamente con el decrecimiento del voltaje del sistema que es determinado por la máxima admitancia capacitiva equivalente. Es decir, la capacidad de soporte de voltaje del SVC convencional se deteriora rápidamente si el voltaje del sistema decrece.

El SVC no tiene forma de incrementar transitoriamente la generación de potencia reactiva (VARS) ya que la corriente capacitiva máxima que él puede absorber está estrictamente determinada por el tamaño del capacitor y la magnitud del voltaje del sistema, en síntesis, la corriente capacitiva máxima obtenible decrece linealmente, (y la potencia reactiva generada en cuadratura), con el voltaje del sistema, ya que el SVC se convierte en un capacitor fijo cuando la máxima salida capacitiva es alcanzada.

4.2 COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO (STATCOM)

Este dispositivo se instala en derivación con un nodo de transmisión y se usa principalmente para regular el voltaje en los sistemas de transmisión. Otra de sus funciones es incrementar la estabilidad dinámica de una red de potencia.

4.2.1 Estructura y Principio de Operación

El STATCOM proporciona una compensación en paralelo de manera muy similar a los SVC pero utiliza un convertidor de fuente de voltaje en lugar de reactores y capacitores en paralelo. Por consiguiente, incorpora en su estructura una parte de electrónica de potencia aunque la parte principal la compone solamente un capacitor y un transformador. Esto lleva a una construcción modular compacta, que puede ser fácilmente transportado al lugar de su instalación y si fuese necesario, también de fácil re- localización.

En el STATCOM, el banco de capacitores se usa para mantener un voltaje constante de CD para la operación del inversor de voltaje. El inversor de voltaje contiene en su estructura una serie de tiristores con capacidad de apagado cuya función es la de conmutar el voltaje CD almacenado en el banco de capacitores y así generar el voltaje alterno deseado.

En la figura 7 se muestra un ejemplo de la forma de onda que se genera en un inversor cualquiera. Dependiendo de la frecuencia e instantes en que se realicen las conmutaciones en cada fase la forma de onda resultante se acercará a la sinusoidal. Un diagrama simplificado del STATCOM conectado a un nodo del SEP se muestra en la Fig. 8.

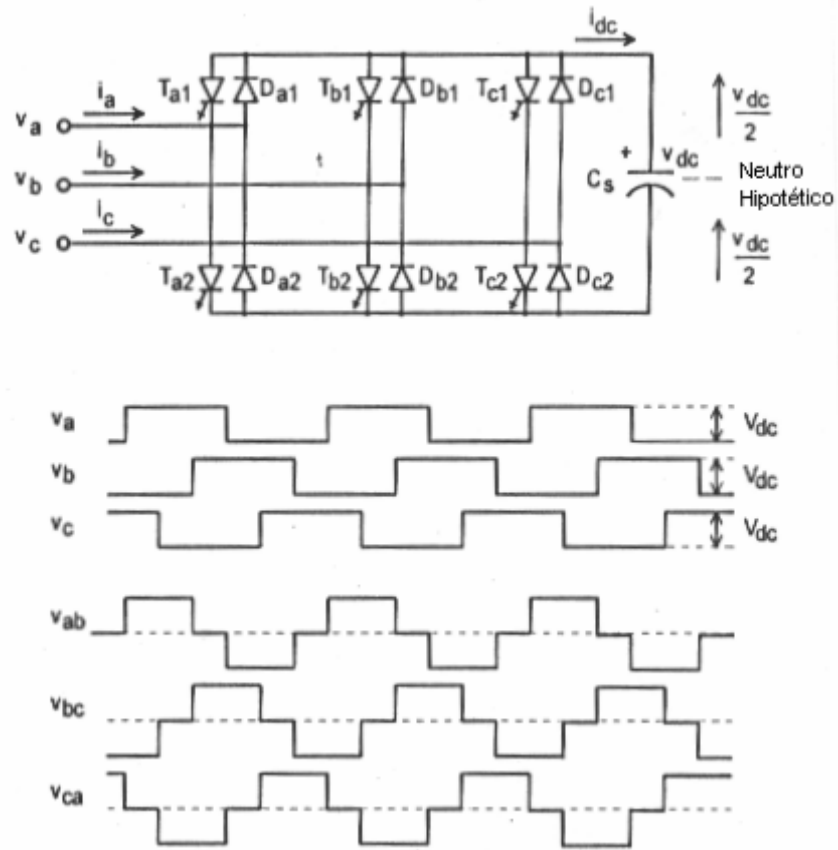


Figura 7. Forma de onda de un inversor de voltaje.

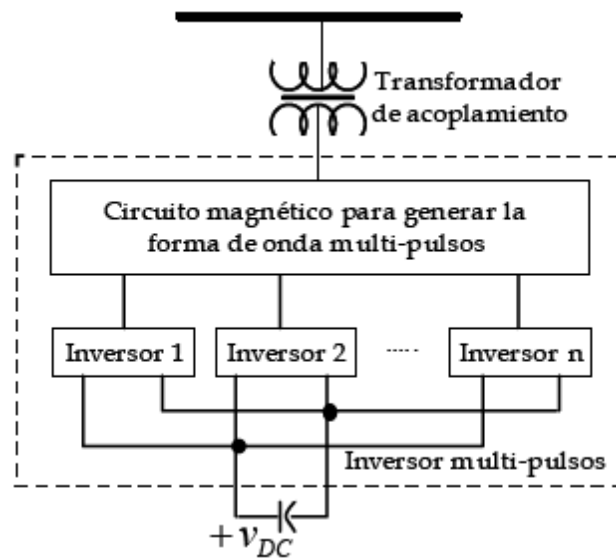


Figura 8. Configuración del Compensador Estático Síncrono (STATCOM)

Los elementos esenciales del STATCOM son: un transformador de acoplamiento que se encarga de servir de enlace entre el SEP y el inversor de voltaje (VSC), un inversor multipulsos que genera la forma de onda de voltaje que se compara con el voltaje del sistema para realizar el intercambio de potencia reactiva y un capacitor que sirve como una pequeña fuente de CD para poder generar la forma de onda de CA, donde V_{DC} es el voltaje en el capacitor.

4.2.2 Ventajas

El STATCOM es un dispositivo muy adecuado para el control del voltaje puesto que rápidamente puede inyectar o absorber potencia reactiva para estabilizar las variaciones de voltaje. Éste es uno de los controladores FACTS más importantes, pues puede estar basado en convertidores de corriente o de voltaje. Además, puede suministrar compensación capacitiva e inductiva y es capaz de controlar su salida de corriente sobre un máximo rango (capacitivo o inductivo) independientemente del voltaje del sistema AC.

La capacidad transitoria disponible en el STATCOM depende de las características de los semiconductores de potencia usados y en la temperatura de junta a la cual los dispositivos son operados, el potencial del STATCOM para producir una salida de corriente capacitiva alta con un voltaje del sistema bajo lo hace muy efectivo en el mejoramiento de la estabilidad transitoria¹⁸.

El STATCOM es de gran utilidad para amortiguar oscilaciones electromecánicas cuando se usa para el control de voltaje y como compensador de potencia reactiva, es decir, La habilidad de éste dispositivo para mantener un nivel de voltaje predeterminado por medio de compensación de potencia reactiva ha

¹⁸ GYUGYI, L, "Dynamic compensation of AC transmission lines by solid state synchronous voltage sources", IEEE Trans. On Power Delivery, 1994, 9, (2), April 94.

mostrado mejorar la estabilidad transitoria y el amortiguamiento de oscilaciones subsíncronas.

El STATCOM se basa en una fuente de voltaje síncrona de estado sólido que es análoga a una máquina síncrona ideal. Por lo tanto, los principios básicos de operación del STATCOM son fundamentalmente diferentes a los del SVC. Lo que conlleva a que el STATCOM tenga generalmente características funcionales superiores, mejor desempeño operacional y mayor flexibilidad de aplicación que los alcanzados con el SVC convencional.

4.3 CONTROLADOR DE FLUJO DE POTENCIA UNIFICADO (UPFC)

El Controlador de flujo de potencia unificado (UPFC) fue propuesto en una reunión de la IEEE en 1994, para control en tiempo real y compensación dinámica de sistemas de transmisión AC, proporcionando la flexibilidad funcional necesaria requerida para resolver los problemas que actualmente se presentan en los sistemas de potencia. Se asume que el controlador UPFC se inserta al final de una línea de transmisión.

4.3.1 Estructura y Principio de Operación

El circuito de potencia de un UPFC se compone de un transformador de excitación (TE), un transformador elevador, dos convertidores de voltaje trifásico basados en dispositivos electrónicos llamados GTO y un capacitor de enlace.

Los dos convertidores, implementados como inversores usando GTO's son operados desde una conexión común en DC proporcionada por un capacitor de almacenamiento, este arreglo funciona como un convertidor de potencia ideal de AC a AC en el cual la potencia activa puede fluir libremente en cualquier dirección

entre las terminales de AC de los dos inversores y cada uno puede generar (absorber) independientemente potencia reactiva en su propia terminal de AC (Fig.9).

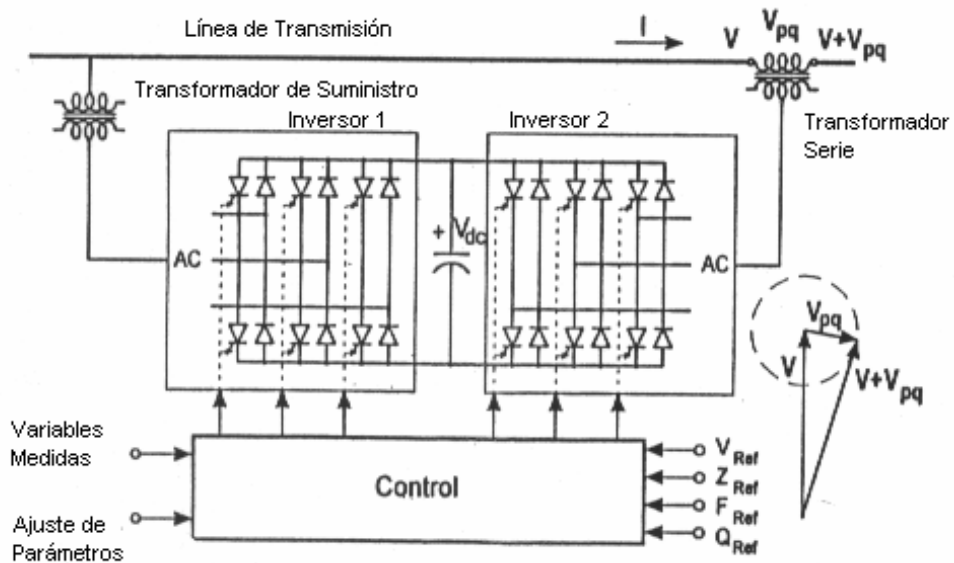


Figura 9. Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC)

El UPFC utiliza un convertidor conectado en serie con una línea de transmisión y otro inversor conectado al nodo local en paralelo con la línea. Primeramente, el inversor conectado en serie se usa para inyectar un voltaje controlado en serie con la línea llevando al flujo de potencia a un valor deseado.

En general, el inversor serie puede intercambiar la potencia activa y reactiva con la línea mientras realiza su trabajo. Un inversor de fuente de voltaje es capaz de generar electrónicamente la potencia reactiva necesaria en sus terminales de corriente alterna. El inversor serie tiene sus terminales de CD conectadas a las del inversor en paralelo, realizando su función primaria entregando exactamente la cantidad de potencia activa necesaria. Si el inversor en paralelo es diseñado con un valor de corriente adicional, puede además desempeñar una función secundaria generando electrónicamente potencia reactiva para la regulación del voltaje en el nodo local de CA.

En síntesis, el inversor proporciona la principal función del UPFC inyectando un voltaje AC con magnitud y ángulo de fase controlables en la línea a la frecuencia fundamental mediante un transformador de inserción. La corriente de la línea de transmisión fluye a través de esta fuente de voltaje resultando esto último en un intercambio de potencia activa y reactiva entre el dispositivo y el sistema de AC, la potencia activa intercambiada en los terminales del inversor serie es convertida por este en potencia DC la cual aparece en la conexión DC común como demanda de potencia activa positiva o negativa.

La función básica de la sección en derivación es la de suministrar o absorber la potencia real demandada por el inversor serie en la conexión DC común. Esta potencia es convertida a AC y acoplada a la línea de transmisión mediante un transformador conectado en paralelo, el inversor en derivación puede también generar o absorber potencia reactiva controlable si se desea y por lo tanto puede proporcionar compensación reactiva en paralelo independiente a la línea.

4.3.2 Ventajas

El UPFC en su forma general puede proporcionar de manera simultánea control en tiempo real de todos los parámetros básicos del sistema de potencia, transmisión de potencia, impedancia y ángulo de fase y la compensación dinámica del sistema de corriente alterna, el UPFC ofrece una capacidad única de regular independientemente el flujo de potencia activa y reactiva (P y Q) de la línea de transmisión y puede además regular el voltaje en el nodo local.

En otras palabras, éste dispositivo suministra el mayor nivel de control de todos los dispositivos de compensación, ya que cuatro funciones básicas de control son posibles, éstas son: Regulación de Voltaje Terminal, Compensación Capacitiva

Serie, Regulación de Angulo de Transmisión (Desplazamiento de Fase) y Control de flujo de potencia Multifuncional.

4.4 CAPACITOR SERIE CONTROLADO CON TIRISTORES (TCSC)

Una de las herramientas más populares para controlar el flujo de potencia en las líneas es la compensación serie. El fundamento básico de este método es modificar la impedancia de la línea al insertar capacitores o inductancias en serie con el circuito para modificar el flujo de potencia. La compensación capacitiva se emplea de manera común para contrarrestar los efectos inductivos naturales de las líneas de transmisión. La compensación serie convencional involucra bancos de capacitores que son controlados en forma individual por elementos mecánicos que por su uso tienden a desgastarse y a ocasionar fallas en su operación.

El TCSC es un dispositivo FACTS que permite variar la reactancia de la línea de transmisión para controlar el flujo a través de ella. Ayuda además, en la estabilidad transitoria del sistema y al amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas.

4.4.1 Estructura y Principio de Operación

Un TCSC consiste en un banco de capacitores en serie, en paralelo con un reactor controlado por tiristores a fin de proveer una reactancia capacitiva serie variable. Es decir, consta de tres elementos esenciales: un capacitor, un reactor y un conmutador bidireccional que está compuesto por un par de SCRs conectados en antiparalelo, sin capacidad de apagado.

El reactor variable se conecta en paralelo con un capacitor serie; cuando el ángulo de disparo del TCR es de 180° , no existe conducción a través del reactor y el capacitor serie tiene su impedancia normal. Mientras el ángulo de disparo decrece

desde 180° , la impedancia capacitiva aumenta; cuando el ángulo de disparo es de 90° , existe conducción total a través del reactor y la impedancia total se vuelve inductiva, ya que la impedancia del reactor se diseña para ser mucho más baja que la del capacitor serie. Con un ángulo de disparo de 90° el TCSC ayuda a limitar la corriente de falla. Este dispositivo puede consistir de uno o de varios módulos a fin de lograr un mejor desempeño.

Los dos esquemas básicos de los capacitores serie controlados con tiristores son: usando capacitores conmutados por tiristores (Fig. 10) y usando un capacitor fijo en paralelo con reactores controlados con tiristores (Fig. 11).

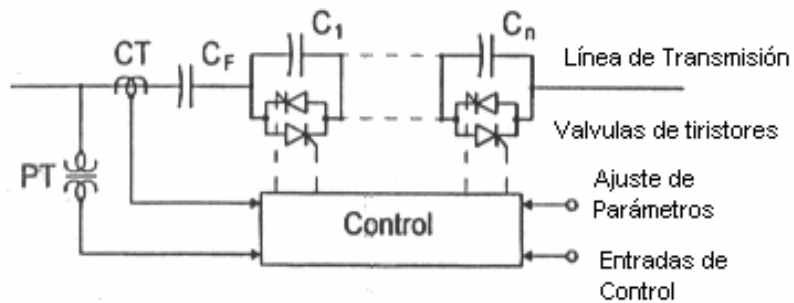


Figura 10. Configuración del Controlador Serie usando capacitores conmutados por tiristores

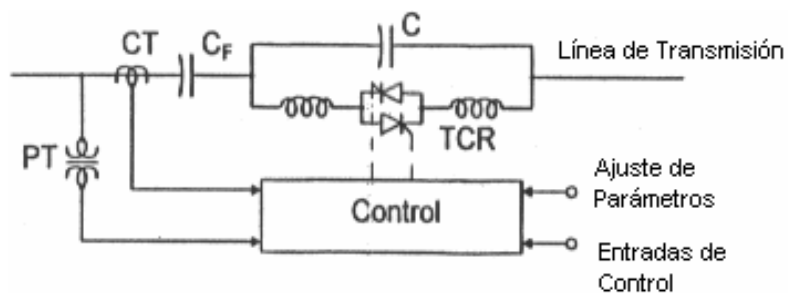


Figura 11. Configuración del Controlador Serie usando un capacitor fijo en paralelo con reactores controlado con tiristores

En el esquema de capacitores conmutados por tiristores, el grado de compensación es controlado por el incremento o la disminución del número de bancos de capacitores en serie.

En el otro esquema, que es el de los capacitores fijos en paralelo con los reactores controlados por tiristores, el grado de compensación serie es aumentado (o disminuido) aumentando el período de conducción del tiristor. Puede operar básicamente en tres modos:

- Modo de bloqueo o de no-conducción.
- Modo de conducción.
- Modo vernier.

Para el modo de bloqueo o no-conducción por los tiristores no circula corriente, y los tiristores se comportan como un interruptor abierto. Si los tiristores se encuentran conduciendo en todo momento se dice que el dispositivo está operando en modo de conducción; para este caso los tiristores se comportan como un interruptor cerrado. El modo de operación donde normalmente funciona el dispositivo se denomina modo vernier. En este caso los tiristores conducen de forma parcial formando un ciclo sucesivo de encendido/apagado.

Los dos esquemas pueden ser combinados mediante la conexión de un número determinado de reactores controlados por tiristores sumados a arreglos de capacitores fijos en serie con el fin de conseguir un mayor rango de control y flexibilidad¹⁹.

4.4.2 Ventajas

La principal tarea de la compensación serie es la de modificar la impedancia característica de la línea mediante la inserción de capacitores o reactores, con esto se puede aumentar o disminuir la capacidad de transmisión de potencia

¹⁹ GYUGYI, L, SCHAUDER, C.D. and SEN, K.K.: "Static Synchronous series compensator: a solid state approach to series compensation of transmission lines", IEEE Trans. On Power Delivery, 1997, 12, (1), pp. 1085- 1097.

activa a través de la línea ya que en un sistema interconectado la potencia fluirá por la línea que presente una menor impedancia.

El TCSC es un dispositivo caracterizado por una rápida respuesta, un amplio rango de operación y una alta confiabilidad. En resumen se puede decir que el TCSC es un dispositivo de compensación serie versátil ya que puede variar la impedancia de la línea de una forma continua según lo requiera el SEP para mejorar el perfil de voltaje, esto se puede lograr con el control adecuado del ángulo de disparo de los tiristores.

4.5 COMPENSADOR ESTÁTICO SINCRÓNICO SERIE (SSSC)

Un SSSC es un Generador estático síncrono operado sin una fuente de poder externa al igual que un compensador serie, cuya salida de voltaje está en cuadratura y controlada independientemente de la corriente de línea con el propósito de incrementar o decrementar la caída de voltaje reactivo a través de la línea y así controlar la potencia eléctrica transmitida.

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

El SSSC es uno de los controladores FACTS más importantes. Es parecido a un STATCOM excepto porque el voltaje de CA de salida está en serie con la línea. Puede construirse en base a convertidores de voltaje o de corriente, su diagrama esquemático se muestra en la Fig. 12.

El concepto del uso de fuentes de voltaje sincrónicas de estado sólido para compensación reactiva serie está basado en el hecho de que la característica "Impedancia vs frecuencia" del capacitor serie convencionalmente utilizado. La función del capacitor serie es simplemente producir un voltaje apropiado a la frecuencia fundamental del sistema AC para incrementar el voltaje a lo largo de la impedancia inductiva de la línea, la corriente fundamental de la línea y la potencia transmitida (Fig. 12). Esto tiene el mismo efecto eléctrico de que la inductancia serie de la línea fuera reducida a la de una línea más pequeña.

De este modo, si una fuente de voltaje AC en la frecuencia fundamental con una relación de cuadratura al de la corriente de la línea es inyectada en serie con la línea, el equivalente a la compensación proporcionada por un capacitor serie es obtenida, esto representa un capacitor serie virtual generando el mismo voltaje de compensación que su contraparte real. Sin embargo en contraste con el capacitor serie real, la fuente de voltaje serie es capaz de mantener un voltaje compensador constante frente a una corriente de línea variable o controlar la amplitud del voltaje de compensación inyectado independientemente de la amplitud de la corriente de línea.

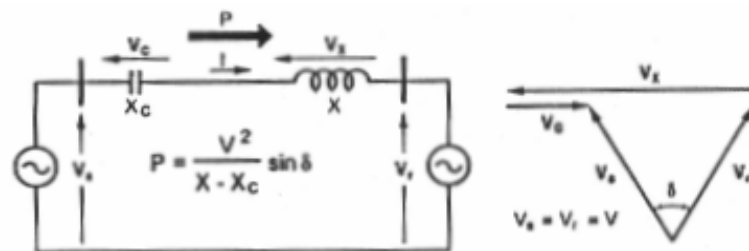


Figura 12 Análisis de Potencia

Para compensación normal capacitiva la salida de voltaje está atrasada con respecto a la corriente de línea 90 grados, sin embargo la salida de voltaje de esta fuente serie puede ser reversada por una simple acción de control para situarla en adelante de 90 grados con respecto a la línea, en este caso la compensación serie tiene el mismo efecto de que la impedancia reactiva de la línea fuera

incrementada, este esquema de compensación serie es llamado compensador estático sincrónico serie (SSSC) (Fig. 13.).

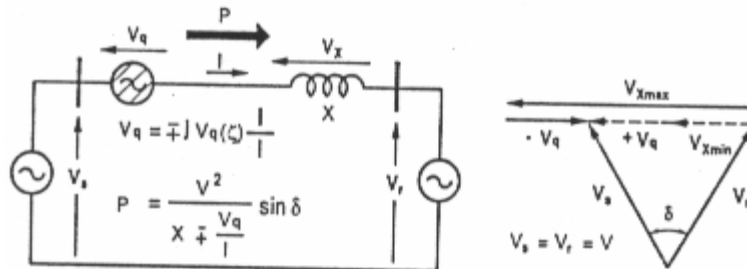


Figura 13. Configuración del Compensador Estático Sincrónico Serie (SSSC)

4.6 CONTROLADOR DE FLUJO DE POTENCIA INTERLÍNEA (IPFC)

El Controlador de flujo de potencia interlínea (IPFC) representa un concepto nuevo con el objetivo de suministrar un esquema de control de flujo de potencia flexible para un sistema de potencia multilínea, en el cual dos (o más) líneas emplean un SSSC para compensación serie.

El esquema del IPFC junto con la compensación reactiva controlable independiente de cada línea, proporciona la capacidad para transferir potencia real entre las líneas compensadas, esto hace posible el igualar el flujo de potencia activo y reactiva entre las líneas para transferir potencia de líneas sobrecargadas a líneas subutilizadas. Compensación contra caídas de voltaje resistivas en la línea y la correspondiente potencia reactiva es también posible. Esto incrementa la efectividad del sistema de compensación contra perturbaciones dinámicas mejorando la estabilidad transitoria y amortiguando las oscilaciones de potencia.

La idea intrínseca de esta aproximación generalizada del IPFC es que las líneas subutilizadas o robustas son forzadas a ayudar a las débiles o sobrecargadas con el fin de optimizar la utilización de todo el sistema de transmisión.

La operación de un IPFC requiere que la suma de la potencia activa intercambiada por el número total de convertidores debe ser cero. Sin embargo, la distribución de la potencia positiva y negativa intercambiada con las líneas individuales por los convertidores dentro de esta restricción general es arbitraria; esto puede ser logrado mediante la adición de un convertidor conectado en paralelo (STATCOM); este arreglo es particularmente atractivo en aquellos casos en los cuales los requerimientos de compensación de potencia activa de las líneas débiles excede la potencia activa que puede ser absorbida por las líneas robustas sin impactar apreciablemente su propia transmisión de potencia. Otra aplicación útil es cuando se requiere compensación reactiva en derivación en la subestación para soporte de voltaje²⁰.

4.7 TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE (TCPST)

Aunque no existe un cambiador de fase no mecánico de alta potencia en servicio actualmente, los principios para el uso de un transformador cambiador de fase con un cambiador de tap controlado mediante tiristores, están bien establecidos.

La mayoría de los cambiadores de fase convencionales son cambiadores de tap mecánicos. Como su contraparte a tiristores, suministran una inyección de voltaje en cuadratura.

Un arreglo transformador, cambiador de fase controlado mediante tiristores, se muestra en la Fig. 14. Este consiste en un transformador de excitación conectado

²⁰ GYUGYI, L, "The Interline Power Flow Controller Concept: a new approach to power flow management in transmission systems", IEEE Trans. On Power Delivery, 1999, 14, (3).

en derivación con los taps apropiados, un transformador de inserción serie y un arreglo de tiristores conectando una combinación seleccionada de taps del secundario del transformador de inserción; el transformador de excitación tiene tres arrollamientos secundarios no idénticos en proporciones 1:3:9 el cual está en capacidad de producir un total de 27 pasos por fase con un arreglo de switches que puede hacer derivaciones a un arrollamiento o incluso cambiar su polaridad.

Los requerimientos de cambio de fase para control de flujo de potencia pueden ser determinados a partir de medidas de ángulo, si están disponibles, o medidas de potencia. El transformador cambiador de fase controlado mediante tiristores puede ser utilizado para regular el ángulo de transmisión para mantener un flujo de potencia balanceado en múltiples caminos de transmisión o para controlarlo para incrementar la estabilidad transitoria y dinámica del sistema de potencia²¹.

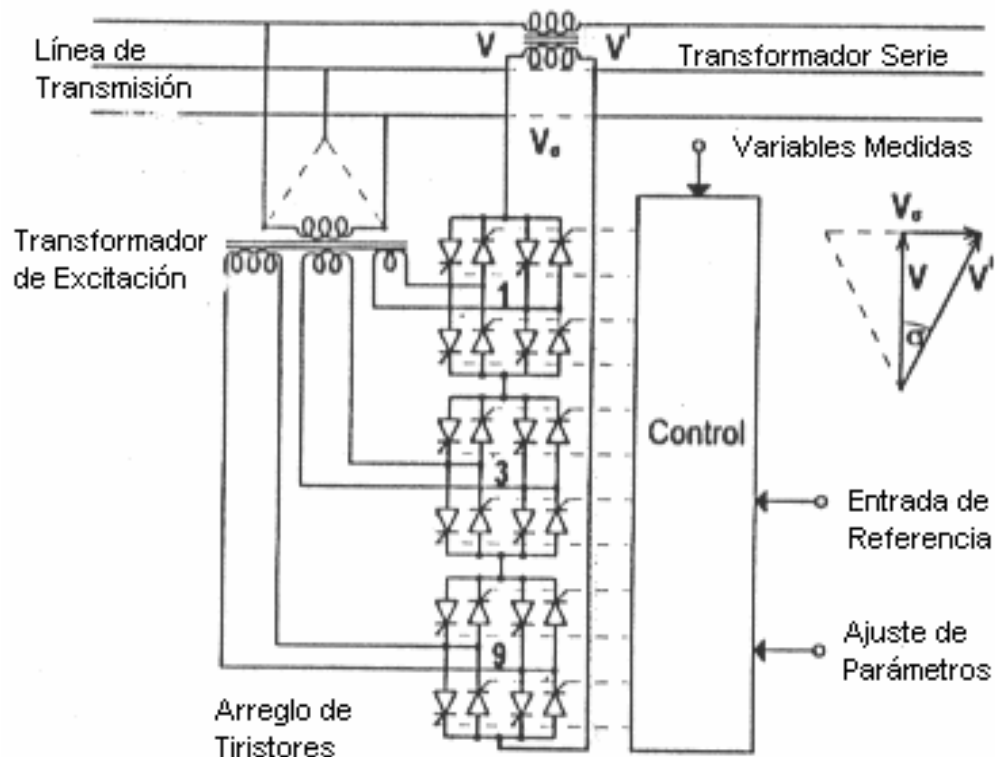


Figura 14. Configuración del Transformador cambiador de Fase

²¹ GYUGYI, L, "Power transmission control: basic theory; problems and needs; FACTS solutions ", Capítulo No.1, FACTS, 1999

La Tabla 2 resume los atributos de control de los principales dispositivos FACTS.

DISPOSITIVOS FACTS	ATRIBUTOS DE CONTROL
STATCOM: Compensador Estático Síncrono.	Control de Voltaje. Compensación de Reactivos. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad de Voltaje.
SVC: Compensador Estático de Reactivos TCR: Reactor Controlado Por Tiristores TSR: Reactor Conmutado Por Tiristores	Control de Voltaje. Compensación de Reactivos. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad de Voltaje.
TCSC: Capacitor Serie Controlado Con Tiristores	Control de Corriente. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Estabilidad de Voltaje. Limitaciones de la Corriente de Falla.
TCPST: Transformador Cambiador de Fase	Control de Potencia Activa. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Estabilidad de Voltaje.
SSSC: Compensador Estático Síncrono Serie	Control de Corriente. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Estabilidad de Voltaje. Limitación de Corriente de Falla.
UPFC: Controlador De Flujo De Potencia Unificado	Control de Potencia Activa y Reactiva. Control de Voltaje. Compensación de Reactivos. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Estabilidad de Voltaje. Limitación de la Corriente de Falla.
IPFC: Controlador De Flujo De Potencia Interlínea	Control de Potencia Reactiva. Control de Voltaje. Amortiguamiento de Oscilaciones. Estabilidad Transitoria y Dinámica. Estabilidad de Voltaje.

Tabla 2: Atributos de control en dispositivos FACTS²²

²² Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability". McGraw-Hill, Inc. 1994.

5. CRITERIOS DE IMPLEMENTACIÓN

Al considerar los controladores FACTS, se debe poner atención especial a la planeación de los reactivos. Las fuentes de potencia reactiva deben tomarse en cuenta de manera especial, ya que líneas largas de transmisión con controladores FACTS se cargan muy por arriba de su potencia natural (SIL) y las pérdidas de reactivos son muy grandes.

La implementación de controladores FACTS en las áreas de calidad de la energía y corto circuito normalmente están asociadas con los sistemas de subtransmisión y distribución. Sin embargo, un entorno de un mercado competitivo puede resultar en implementaciones FACTS a niveles superiores de tensión como resultado de grandes variaciones en los niveles de corto circuito: Una disponibilidad baja de corto circuito puede resultar en la necesidad de regulación de voltaje.

Por otro lado, niveles altos de corto circuito pueden requerir una reducción a niveles aceptables (lo que se puede hacer con el IPC ó Interphase Power Controller).

5.1 APLICACIONES

La forma más sencilla para identificar el beneficio potencial de los controladores FACTS es examinar sus funciones y relación con equipo convencional. Las aplicaciones básicas de los controladores FACTS son:

5.1.1 Control de Flujo

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.

El uso de flujos óptimos ofrece una metodología para estudiar una gran variedad de escenarios. Las funciones objetivo pueden incluir la maximización de límites térmicos o de voltaje, o la minimización de costos con la aplicación de dispositivos en serie, en paralelo, o dispositivos reguladores de ángulo de fase.

5.1.2 Control de Voltaje

Este control puede requerir una capacidad continua, incremental y/o de alta velocidad. Una inestabilidad potencial de voltaje puede requerir de la aplicación de un SVC, STATCOM o algún otro dispositivo de alta velocidad.

5.1.3 Control dinámico

Una de las principales aplicaciones de los controladores FACTS es el mejorar el comportamiento dinámico y transitorio de la estabilidad en el sistema. Se requieren programas de estabilidad convencionales y de pequeñas señales para sintonizar los controles y darles robustez. Es necesario identificar las señales de entrada, su ubicación y salida para proporcionar el amortiguamiento necesario. Se deben considerar una amplia variedad de condiciones del sistema, incluyendo el mantenimiento de L.T. y los despachos de generación.

Los controles suplementarios adicionales pueden mejorar la estabilidad dinámica. Aunque el equipo convencional puede incrementar los límites de estabilidad (por ejemplo capacitares serie), se obtiene un mejor amortiguamiento por el uso de SVC, STATCOM, TCSC, o algún otro controlador a base de electrónica de potencia. Un aspecto importante de esta aplicación es preguntarse si el dispositivo está simplemente proporcionando un control dinámico o si está suministrando potencia reactiva y/o control del flujo de potencia.

La selección del equipo dependerá de la función, disponibilidad, costo, aplicabilidad e incertidumbres futuras.

La experiencia ha mostrado que una solución híbrida de controladores FACTS actuando en conjunto con equipo convencional pudiera ser lo que nos llevara al sistema “óptimo”, ya mencionado con anterioridad. Se deben considerar controles FACTS multipropósito para maximizar la flexibilidad en la operación.

En la Tabla No. 3 se encuentran las alternativas posibles de dispositivos a emplear, de acuerdo a la variable que se desee controlar.

FUNCIÓN	CONTROLADORES FACTS Y EQUIPO CONVENCIONAL
Control de voltaje	<ul style="list-style-type: none"> → Plantas generadoras. → Cambiadores de Taps en transformadores de tipo convencional. → Bancos de capacitores convencionales. → Compensador estático de Vars (SVC). → Compensador estático síncrono (STATCOM). → Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC). → Superconductor de energía (SMES). → Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS). → Compensador estático convertible.

FUNCIÓN	CONTROLADORES FACTS Y EQUIPO CONVENCIONAL
Control de flujo de potencia	<ul style="list-style-type: none"> → Plantas generadoras. → Compensación serie convencional. → Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC). → Reactor en serie controlado por tiristores (TCSR). → Cambiador de fase controlado por tiristores (TCPST). → Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC). → Compensador serie estático síncrono (SSSC).
Estabilidad transitoria	<ul style="list-style-type: none"> → Capacitor serie convencional. → Resistencia controlada por tiristores (TCBR). → Compensador estático de VARS (SVC), compensador estático síncrono (STATCOM) TCSE. → Métodos convencionales: Sistemas de excitación. Seccionamiento de Líneas de Transmisión.
Estabilidad dinámica	<ul style="list-style-type: none"> → Capacitor serie convencional. → Estabilizador de sistemas de potencia. → TCSC, SVC, STATOM, UPFC.

Tabla 3: Aplicaciones de FACTS y equipo convencional.²³

5.2 ASPECTOS OPERATIVOS

En un sistema eléctrico de potencia se presentan contingencias entre las que pueden estar la pérdida de generación de carga, de una o varias líneas; una vez que éstas se liberan mediante la operación de interruptores, relevadores u otros dispositivos de protección, el sistema queda en un estado llamado de pos-falla, si éste es aceptable el sistema se dice “seguro”.

²³ Ixtláhuatl Coronado G. “Ubicación de dispositivos FACTS desde una perspectiva dinámica”. Tesis de Maestría en Ciencias, Cinvestav unidad Guadalajara, Octubre, 2001.

La seguridad de un sistema implica tener un margen adecuado de recursos, ya sea de generación, transmisión, etc., para que éste pueda continuar abasteciendo energía después de que ocurre una contingencia, además de que el personal de operaciones pueda controlar elementos ajustables del sistema para garantizar una operación segura ante posibles fallas; para lograr esto se deben establecer límites de operación en el estado de pre-falla y a menudo en el estado de post-falla. Un sistema que satisface estos límites es seguro para hacer una transición a un estado aceptable una vez que se ha liberado la falla; la presencia de límites en el estado de post-falla restringe la operación del sistema en estado normal, a menudo a expensas de los aspectos económicos.

La habilidad que presentan los dispositivos FACTS para controlar transitorios, y para afectar rápida y significativamente el estado siguiente inmediato a una falla, con frecuencia significa que el impacto que tienen las restricciones impuestas a éste en las operaciones del sistema en estado normal se pueden minimizar, dejando así una región de operación de pre-falla mayor para optimizar aspectos económicos. Un sistema que se diseña adecuadamente con un margen de operación suficiente hace posible satisfacer seguridad y economía durante su operación²⁴.

Por otro lado, un dispositivo FACTS puede lograr que una línea opere muy cercana a sus límites térmicos; esto afecta favorablemente el aspecto económico, ya que se evita la construcción de nuevas líneas de transmisión, además de que la energía se puede hacer fluir a través de rutas establecidas, permitiendo así el intercambio de potencia entre diferentes compañías prestadoras de servicio eléctrico, así como entre diferentes países. Una de las consecuencias que trae el incremento en la transferencia de potencia a través de una o más líneas del sistema es que puede conducir a sobrecalentamientos; de esta manera, con el uso extensivo de estos dispositivos se hará necesario el monitoreo térmico de la red.

²⁴ B. Avramovic, L.H. Fink, *Electrical Power & Energy Systems* 17, 195 (1995).

5.3 LOCALIZACIÓN

Existen tres factores importantes a considerar cuando se ha tomado la decisión de instalar un dispositivo FACTS: el tipo de dispositivo, 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 primero debe identificarse el 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 sólo la

efectividad de los estabilizadores en condiciones típicas de operación, sino también su robustez sobre otras condiciones de operación²⁵.

Las soluciones FACTS permiten a los propietarios de redes aumentar la capacidad de la red existente manteniendo al mismo tiempo o mejorando los márgenes de operación necesarios para la estabilidad de la red. El resultado es que se puede hacer llegar más energía a los consumidores afectando muy poco al medio ambiente, se acelera la ejecución de los proyectos y se reducen los costes de inversión respecto de la opción alternativa, construir nuevas líneas de transmisión o instalaciones de generación de energía eléctrica. FACTS proporciona flexibilidad, ya que puede influir rápidamente y de forma simultánea en varios parámetros de la red, entre ellos los flujos de potencia activa y reactiva.

5.4 ASPECTOS ECONÓMICOS

La factibilidad económica de la aplicación de los FACTS, está afectada en muchos países por la carencia en la regulación en los aspectos de compensación de potencia reactiva y servicios auxiliares en los sistemas de potencia. En el momento los avances en la regulación colombiana en estos aspectos es muy limitada y hasta ahora se están desarrollando. La regulación vigente y las leyes existentes permiten la competencia entre agentes a nivel del sistema de transmisión en condiciones de igualdad. Sin embargo, se requiere de un desarrollo más profundo en los esquemas de remuneración para la potencia reactiva, control de voltaje y de frecuencia para perseguir el mejoramiento de la seguridad y confiabilidad del sistema.

En el proceso de planeación se toman en cuenta los parámetros futuros: tanto técnicos como económicos; de manera que se logre una solución “óptima”, o de

²⁵ H.F. Wang, IEEE Transactions on Power Systems 14, 145 (1995).

“mínimo costo”. Sin embargo, la situación actual del sistema de transmisión, en cuanto a la dificultad de construir nuevas líneas, en cuanto a la reestructuración de la industria y el acceso a la transmisión; hacen este proceso de planeación más complicado e incierto. La disponibilidad actual de diferentes controladores FACTS, aunque ofrece soluciones alternas, complican el logro o la existencia de un sistema óptimo.

Las principales tareas que comprenden los estudios de planeación están interrelacionadas. La evaluación de los requisitos de la línea y del equipo demandan estudios tanto en estado estable (flujos de carga) como dinámicos (estabilidad transitoria y oscilatoria), que tienden a ser iterativos por naturaleza. Es importante reconocer que la disponibilidad actual de controladores FACTS no cambia sustancialmente el procedimiento de planeación. Es decir, en el corazón del proceso está la búsqueda de la aplicación de cualquier dispositivo o dispositivos que maximice el uso de la transmisión disponible.

A continuación se presenta una breve síntesis de los principales hallazgos y recomendaciones de los análisis del estudio que fue adelantado por la Unión Temporal GERS-ISA-KEMA para tres de las más grandes zonas del país, los cuales, dado que el éste finalizó muy recientemente, están aún siendo evaluados por la UPME.

▪ **Zona Costa Atlántica**

La zona de la Costa Atlántica tiende a disminuir las importaciones en el tiempo debido al aumento de la generación térmica requerida para el suministro de la demanda en todo el País. Desde el punto de vista económico no es viable instalar equipos FACTS en esta área ya que no se utilizará toda la capacidad de importación del área en un futuro.

▣ **Zona Bogotá**

La zona de Bogotá presenta un aumento de sus importaciones en el tiempo, con lo cual se obtienen altos beneficios al aumentar su capacidad de importación. La instalación de un SVC no mejora sensiblemente la capacidad de importación del área.

▣ **Zona Sur Occidente**

La zona del Sur-Occidente utiliza con alta frecuencia la capacidad de importación, particularmente con la entrada en operación del refuerzo a la interconexión Colombia – Ecuador que aumentará a 500 MW la capacidad de exportación de Colombia. La instalación de equipos FACTS en el Sur-occidente es altamente atractiva ya que adicional al aumento de la capacidad de exportación a Ecuador, no se tienen previstos proyectos de generación adicionales en el área.

6. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS FACTS

La tecnología de FACTS abre nuevas oportunidades en el control de la potencia y el incremento de la capacidad disponible, ya que la posibilidad de controlar la corriente a través de una línea a un costo razonable permite incrementar la capacidad de las líneas existentes; permite 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.

Asimismo, el desarrollo de estos dispositivos también ha tenido repercusiones importantes en el aspecto económico de las compañías suministradoras debido al ambiente competitivo actual (desregulación). El potencial de esta tecnología se basa en la posibilidad de controlar la ruta del flujo de potencia y la habilidad de conectar redes que no estén adecuadamente interconectadas, dando la posibilidad de comerciar energía entre agentes distantes, lo que antes era muy difícil.

6.1 FLEXIBILIDAD DE LA RED

Una propiedad única de los FACTS es la gran flexibilidad que presentan en los tres estados operativos del sistema de potencia: pre-falla, falla y post-falla. La capacidad para controlar transitorios y para impactar rápida y significativamente el estado de post-falla los hace sumamente atractivos²⁶.

²⁶ B. Avramovic, L.H. Fink, *Electrical Power & Energy Systems* 17, 195 (1995).

Los sistemas FACTS están diseñados para eliminar estas limitaciones de forma rápida e inteligente para poder alcanzar los objetivos de los planificadores, inversores y operadores sin necesidad de hacer grandes añadidos al sistema. Los dispositivos FACTS se integran en un sistema por diversas razones, por ejemplo para controlar el flujo de energía, compensar la potencia reactiva (var), controlar las circulaciones de potencia o realizar funciones auxiliares, como la amortiguación de oscilaciones.

Estos dispositivos permiten incrementar de forma muy rentable la capacidad de transmisión de energía eléctrica en óptimas condiciones, es decir, consiguiendo máxima disponibilidad, pérdidas mínimas de transmisión y mínimo impacto medioambiental.

Otro de los aspectos que también deben tomarse en cuenta es que los FACTS, así como cualquier otro componente en el sistema, introduce modos de oscilación en su comportamiento, y se vuelve más complejo de operar; esto puede conducir a interacciones no deseadas entre equipos. Debido a ello, debe preverse la coordinación de todos los controladores en el sistema incluyendo los dispositivos FACTS, haciendo cada vez más complejo el control del sistema de potencia. Así pues, la inclusión de este tipo de elementos al sistema de potencia ofrece una serie de ventajas en diferentes aspectos como el económico, entre otros, pero también trae consigo complejidades que deben tomarse en cuenta para la operación segura del sistema.

6.2 MEJORA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

La calidad de la energía comprende muchos aspectos distintos, entre ellos las bajadas o cortes de tensión, los armónicos, las oscilaciones y las fluctuaciones. Las bajadas de tensión, por ejemplo, son consecuencia de averías en la red, que

pueden estar causadas por rayos, rupturas de aislamiento o descargas disruptivas (contorneo) a tierra. Cualquiera que sea la causa, mantener o mejorar la calidad de la energía en redes de transmisión y distribución es muy importante. FACTS ha demostrado sobradamente su valía cuando se trata de problemas de calidad de la energía, como pone de relieve el ejemplo siguiente.

Supongamos que una región o un país deciden construir una acería muy necesaria. Se elige una ubicación adecuada desde el punto de vista del posible crecimiento del PIB y del empleo. Sin embargo, en muchos casos se pasa por alto la capacidad de la red de suministro eléctrico. La fábrica se construye y a menudo se comprueba que la red es débil o incluso insuficiente. El resultado es un rendimiento no satisfactorio de la fábrica y una contaminación añadida a la red, que se extiende y afecta a otras industrias conectadas a ella.

En estos casos, FACTS puede confinar o neutralizar perturbaciones eléctricas como las bajadas y fluctuaciones de tensión, las oscilaciones, la distorsión armónica y el desequilibrio de fases en sistemas trifásicos. Además, el proceso o procesos en cuestión se desarrollarán de forma más económica.

Transmisión de CA a larga distancia Cuando se trata de transmisión de CA a larga distancia es muy importante mantener el sincronismo en el sistema y conseguir que las tensiones sean estables, especialmente si se producen averías en el sistema. Con compensación en serie, la transmisión segura y masiva de CA a distancias de más de 1.000 km ya es realizable hoy en día. Con la llegada de la compensación en serie controlada por tiristores, ya se puede hablar de mayor capacidad y flexibilidad en las líneas de CA.

La compensación serie controlada por tiristores (TCSC) es especialmente útil cuando varios estados, o regiones muy separadas dentro del mismo estado, están interconectados por líneas largas y débiles. En estas situaciones, la capacidad de

transferencia se ve restringida debido a que la estabilidad dinámica de las líneas es limitada. En un sistema de transmisión de eléctrica TCSC: se equilibran los flujos de cargas, aumenta la estabilidad de las primeras oscilaciones, la amortiguación de las oscilaciones de potencia y la estabilidad de la tensión y se evitan los riesgos propios de la resonancia subsíncrona (SSR).

Otro aspecto a tener en cuenta es el tratamiento de la calidad de energía en un sistema eléctrico es la cantidad de armónicos presentes que puedan degenerar la forma de onda de voltaje.

6.3 OTRAS VENTAJAS PARA RESALTAR

Otras ventajas que representan el uso de dispositivos FACTS, de manera general, son:

- Permiten un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiéndolo a través de rutas predeterminadas.
- Se puede operar con niveles de carga seguros (sin sobrecarga) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas, con lo que el margen de reserva en generación puede reducirse considerablemente.
- Incrementan la seguridad del sistema al aumentar el límite de estabilidad transitoria, limitando las corrientes de corto circuito y sobrecargas, previniendo salidas en cascada, y limitando el efecto de otras fallas en el sistema y equipos.

- Amortiguan oscilaciones del sistema de potencia que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.
- Responden rápidamente a los cambios en las condiciones de la red para proveer un control del flujo de potencia en tiempo real.
- Instalación rápida: se pueden completar entre 12 y 18 meses.
- Se aumenta la confiabilidad y controlabilidad del sistema, por su rápida respuesta e “inteligencia” intrínseca, ayudando a conservar la integridad de la red.
- Al ser ambientalmente amigables, se pueden obtener beneficios fiscales, que pueden viabilizar más los proyectos.
- Proveen una mayor flexibilidad en la localización de nuevas plantas generadoras.
- Proporcionan seguridad en las conexiones a través de las líneas de enlace entre empresas y regiones vecinas.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un resumen general del concepto de dispositivos FACTS, sus características, sus bondades y su clasificación. Se puede concluir que ésta tecnología hará, en un futuro próximo, que los sistemas eléctricos de potencia operen de una forma más segura y confiable.

Aspectos como el crecimiento de la demanda, el nuevo ambiente regulatorio que permite al sector privado invertir en plantas de generación, la necesidad de contar con sistemas más confiables, seguros y el aumento en los costos debido a los requerimientos ambientales y las dificultades naturales, hacen necesario que las empresas del sector eléctrico consideren otras alternativas tecnológicas que les permitan mejorar la explotación de los sistemas existentes y futuros. Los FACTS son una respuesta a estas necesidades.

Una de las ventajas que presentan los dispositivos FACTS en un sistema eléctrico es que hace posible del control de las variables fundamentales que gobiernan la operación de los sistemas de transmisión tales como: corrientes por las líneas, voltaje y ángulo de fase, impedancias serie y paralela, flujo de potencia activa y de reactiva, etc.

La tendencia de los FACTS se dirige hacia su construcción en base a fuentes conmutadas de voltaje, y muchos de éstos 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 ayuda a mejorar el estado transitorio.

Se podría decir que hoy con los FACTS se tienen Sistemas Eléctricos de Potencia realmente controlables y flexibles; pero no basta con tener disponibilidad de dichos elementos, sino que es un factor crítico, la ubicación óptima y la operación de dichos dispositivos en sistemas de potencia, lo cual es un área de oportunidad en la investigación.

La tecnología ha disminuido muchos costos y lo que se pensaba lejano o inviable es una realidad mundial. Es hora de explorar en Colombia nuevas ramas de los sistemas de potencia y dejar de lado la creencia que son tecnologías muy caras o conocimientos lejanos. El descongestionar el SEP tendrá un impacto positivo en la tarifa al usuario final y en la viabilidad de las empresas.

El potencial de los FACTS es muy amplio, y de gran utilidad cuando los sistemas se enfrentan a una actividad comercial en crecimiento, posibilitando negocios nuevos a cualquier empresa sin ser un gigante, contribuyendo a crear un mercado más competitivo.

Sin embargo, el uso de esta tecnología también presenta algunas desventajas, como lo particular del uso del dispositivo según las condiciones de operación de la barra donde se ubicará, asociado a un alto costo y todavía escasa disponibilidad de algunos equipos. Además, inyectan un flujo considerable de armónicas en todos los modos de operación de la red. Por lo tanto, se debe estudiar en detalle la aplicación, junto a sus beneficios que se obtendrían a partir de ésta.

Es de hacer notar que estos dispositivos despiertan un gran interés en las "Compañías Eléctricas" por lo novedoso y por todos los beneficios que traen consigo. Aunque este interés no está exento de precauciones para su incorporación de forma masiva en los sistemas de la "Compañía".

Como se expuso anteriormente, hay una necesidad apremiante de optimizar y flexibilizar nuestros sistemas de potencia para que se adapten al funcionamiento en un sector desregulado, altamente interconectado y de libre competencia, todo esto tomando como base la aplicación de los desarrollos sin precedentes en la electrónica de alta potencia.

Los sistemas de transmisión AC flexible (FACTS) han comenzado a sustentar todas las crecientes necesidades de los sistemas de potencia modernos y aunque muchos de ellos todavía se encuentran en fase experimental, su altamente previsible aplicación masiva a escala mundial terminará por revolucionar los sistemas de potencia eléctrica de forma dramática.

BIBLIOGRAFIA

J.M. Ramírez, I. Coronado, P. Zúñiga, R. Dávalos, A. Valenzuela, I Castillo, Avance y Perspectiva 19, 347 (2000).

N.G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems (IEEE Press, 1999).

W. Fang, Coordinated Power Control of Unified Power Flow Controller and its Application for Enhancing Dynamic Power System Performance, tesis doctoral, Hong Kong Polytechnic University (1999).

S.L. Nilsson, Electrical Power and Energy Systems 17, 173 (1995).

Y.H. Song, A.T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS) (IEE Power and Energy Series 30, 1999).

B. Avramovic, L.H. Fink, Electrical Power & Energy Systems 17, 195 (1995).

H.F. Wang, IEEE Transactions on Power Systems 14, 145 (1995).

Song, Y.H., A.T. Johns, editors, Flexible ac transmission systems (FACTS), The Institute of Electrical Engineers, Power and Energy Series 30, Inglaterra, 1999.

Rolf Grünbaum Johan Ulleryd. Revista ABB 4/2005. ABB Power Technologies AB. Västerås, Suecia.

R.D. Christie, B.F. Wollenberg, and I. Wangensteen. "Transmission management in the deregulated environment," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 170 -195, Feb. 2000.

G. Marin, J. Ramirez. "Congestion management in electrical power systems within deregulated schemes". *35th North American Power Symposium*, Oct 2003.

G. Reed, J. Paserba and P. Salavantis. "The FACTS on resolving transmission gridlock," *IEEE Power Engineering Magazine*, p.p. 41-46, Oct. 2003.

RUEDA de T, María Teresa. Torres, A; Ríos, M. Mejoramiento de la Red de Transmisión Nacional con la Utilización de Nuevas Tecnologías. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

IEEE Transmission and Distribution Committee, 2000, "FACTS Applications", IEEE FACTS Working Group

CASTILLO, I. Un criterio Óptimo para Coordinar Estabilizadores en Sistema Eléctricos de Potencia. Tesis de Grado. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. Unidad Guadalajara, Jal. Diciembre - 2002.

GYUGYI, L, "Dynamic compensation of AC transmission lines by solid state synchronous voltage sources", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1994, 9, (2), April 94.

GYUGYI, L, SCHAUDER, C.D. and SEN, K.K.: "Static Synchronous series compensator: a solid state approach to series compensation of transmission lines", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1997, 12, (1), pp. 1085- 1097.

GYUGYI, L, "The Interline Power Flow Controller Concept: a new approach to power flow management in transmission systems", IEEE Trans. On Power Delivery, 1999, 14, (3).

GYUGYI, L, "Power transmission control: basic theory; problems and needs; FACTS solutions ", Capítulo No.1, FACTS, 1999

Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability". McGraw-Hill, Inc. 1994

Ixtláhuatl Coronado G. "Ubicación de dispositivos FACTS desde una perspectiva dinámica". Tesis de Maestría en Ciencias, Cinvestav unidad Guadalajara, Octubre, 2001.

B. Avramovic, L.H. Fink, Electrical Power & Energy Systems 17, 195 (1995).