

***CONCEPTOS Y CONSIDERACIONES
GENERALES DE LOS “FACTS”***

INDICE DE CONTENIDO

1. RED DE TRANSMISIÓN INTERCONECTADA

- 1.1 Importancia de la red de transmisión
- 1.2 posibilidades de utilización de los FACTS

2. FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA

- 2.1 Flujo de potencia en vínculos paralelos
- 2.2 Flujo de potencia en sistemas mallados

3. CAUSAS QUE LIMITAN LA CAPACIDAD DE CARGA DE LOS VINCULOS

4. FLUJO DE POTENCIA Y CONSIDERACIONES DE ESTABILIDAD DINAMICA DE UN VINCULO DE TRANSMISION

5. IMPORTANCIA RELATIVA DEL CONTROL DE PARAMETROS

6. TIPO BASICO DE CONTROLADORES FACTS

- 6.1 Importancia relativa de los diferentes tipos de controles

7. BREVE DESCRIPCIÓN DE CONTROLADORES FACTS Y DEFINICIONES ASOCIADAS

- 7.1 Controladores conectados shunt
- 7.2 Controladores conectados en serie
- 7.3 Controladores combinados conectados en shunt y serie
- 7.4 Otros controladores

8. BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA FACTS

9. CONCLUSIONES

CONCEPTOS Y CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS “FACTS”

1. RED DE TRANSMISIÓN INTERCONECTADA

1.1 IMPORTANCIA DE LA RED DE TRANSMISION

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

Las redes de interconexión permiten efectuar no solamente el suministro de energía sino también la comercialización de la misma entre los centrales generadores y los centros de consumo con la finalidad de minimizar la generación total de potencia y los costos asociados de combustible. Mediante este tipo de redes se pueden satisfacer demandas de diferentes características utilizando una gran variedad de recursos energéticos y precios de combustible persiguiendo como objetivo la minimización de los costos con un nivel requerido de confiabilidad. Una menor capacidad de transmisión significa que se requerirá una mayor cantidad de recursos de generación sin considerar si el sistema está integrado por centrales generadoras grandes o pequeñas. No se puede asegurar en forma real cuál es el balance óptimo entre la generación y la transmisión a menos que los responsables de la planificación del sistema utilicen métodos avanzados de análisis que permiten integrar la planificación de la transmisión en escenarios que consideran en forma conjunta la planificación de transmisión y generación. Los costos de operación y mantenimiento de las líneas de transmisión y las pérdidas asociadas como también las dificultades encontradas en la construcción de nuevas líneas, limitan con frecuencia la capacidad de transmisión. Se ha podido observar en muchos casos que la optimización de la operación del sistema o bien de la distribución de reserva, desde un punto de vista económico, se encuentra restringida por la capacidad de la transmisión y esta situación por lo general no tiende a mejorar. En un sistema eléctrico desregulado la disponibilidad de una red de transmisión de características malladas es vital para el ambiente competitivo de un servicio eléctrico confiable.

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

En la actualidad los sistemas de potencia, por lo general, son controlados mecánicamente. Se observa además un extenso uso de microelectrónica, computadoras y comunicaciones de alta velocidad para efectuar el control y protección de los sistemas actuales de transmisión, sin embargo cuando las señales

de operación son enviadas a los circuitos de potencia, donde se efectúa la acción final de control, los componentes de conexión son mecánicos y actúan por lo tanto con menor velocidad de control. Otro problema apreciado en los componentes mecánicos es que el control no puede efectuarse con elevada frecuencia, debido a que sufren un mayor desgaste comparado con los componentes estáticos. En efecto, considerando la operación desde el punto de vista dinámico y en estado estacionario, se puede observar que los sistemas de potencia no presentan un control adecuado. Los profesionales encargados de la planificación y operación de los sistemas de potencia han aprendido a convivir con estas limitaciones utilizando una variedad de técnicas ingeniosas para lograr una operación efectiva del sistema, a costa de proveer mayores márgenes de operación y redundancias. Esto representa una buena posibilidad para la utilización en forma prudente de la tecnología FACTS.

En los últimos años se ha observado la ubicación de grandes demandas en diferentes puntos de las redes de transmisión como consecuencia de las reglas del mercado en sistemas competitivos, las cuales presentan además un crecimiento continuo. Estos incrementos de demanda sobre la red de transmisión, la ausencia de una planificación de largo alcance y la necesidad de proveer un libre acceso a las empresas generadoras y consumidores, han originado tendencias hacia una menor seguridad de operación y reducida calidad de suministro. La tecnología FACTS es esencial para aliviar en gran medida estas dificultades, posibilitando a las empresas de mayores servicios a través de sus posibilidades de transmisión y mejorando la confiabilidad del sistema. Es necesario destacar, sin embargo, que para muchos casos vinculados con la necesidad de la expansión de la capacidad se requiere la construcción de nuevas líneas o bien aumentar la capacidad de corriente y tensión de las líneas y corredores existentes.

1.2 POSIBILIDADES DE UTILIZACIÓN DE LOS FACTS

Para los encargados de planificar la transmisión en los sistemas de potencia es de gran relevancia el conocimiento de la tecnología de los FACTS, debido a que brinda nuevas posibilidades de controlar la potencia y mejorar la utilización de la capacidad disponible actual del sistema de transmisión y la prevista para el futuro. La posibilidad de que la corriente a través de una línea pueda controlarse a un costo razonable permite disponer de un gran potencial para incrementar la capacidad de líneas existentes en la transmisión de potencia mediante la utilización de uno de los tipos de controladores FACTS, tanto en condiciones de operación normal como en emergencia.

Las posibilidades mencionadas se alcanzan mediante la capacidad de los dispositivos FACTS de controlar los parámetros vinculados a la operación de los sistemas de transmisión tales como impedancias series y shunt, corriente, tensión, ángulo de fase y el amortiguamiento de las oscilaciones de diferentes frecuencias por debajo de la nominal. Para no violar las restricciones asociadas a la operación de las redes de transmisión, mientras se mantiene la confiabilidad requerida para los componentes mecánicos utilizados, es necesario reducir la capacidad de transmisión disponible. Con la utilización adicional de los controladores flexibles FACTS es posible transmitir potencia por una línea en valores cercanos al límite nominal

térmico. Los interruptores mecánicos deben ser suplementados con componentes electrónicos de respuesta rápida. Es necesario hacer énfasis en que los FACTS pertenecen a una tecnología para posibilitar la potencialización de las instalaciones y no para reemplazar los interruptores mecánicos.

La tecnología de FACTS no es un simple elemento controlador de alta potencia, sino una colección de controladores que pueden actuar individualmente o en coordinación con los restantes para controlar uno o más de los parámetros interrelacionados del sistema mencionados previamente. La utilización de un controlador FACTS bien seleccionado permite sobrepasar los límites especificados tradicionalmente para la operación de una línea de transmisión o corredor. Debido a que todos los controladores FACTS representan aplicaciones de la misma tecnología básica, su producción puede eventualmente presentar la ventaja de la tecnología de escala. Los componentes básicos para este tipo de controladores son el tiristor y el transistor de potencia.

La tecnología FACTS también conduce a la posibilidad de la extensión en forma escalonada de los límites utilizados en la transmisión mediante inversiones incrementales cómo y cuándo esto lo requieran. Las personas encargadas de la planificación debieran prever en forma progresiva el funcionamiento conjunto de medidas de conexión mecánicas y controladores FACTS para alcanzar el objetivo con las inversiones apropiadas.

Entre los Controladores Electrónicos de Potencia, ahora incluidos en el concepto de FACTS, se pueden mencionar el compensador estático de potencia reactiva (SVC – Shunt-connected Static VAR Compensator) para control de tensión, el cual fue comercializado por GE en 1974 y por Westinghouse en 1975. El primer controlador serie con estructura de amortiguamiento, NGH_SSR fue presentado en California por Siemens en 1984. Con esto se observa que un controlador activo no se limita solamente a la compensación capacitiva serie. Justamente en forma previa a la existencia de los SVCs, hubieron dos versiones de reactores estáticos saturables para limitación de sobretensiones en estado estacionario y dinámico. También se han efectuado investigaciones con componentes de estado sólido para el control de los transformadores regulables de tensión y en los desfasadores. Por lo tanto, el aspecto más relevante de la tecnología FACTS es que el concepto de umbral asociado a la tecnología electrónica de potencia se lo puede mejorar considerablemente para ser utilizado en sistemas de potencia.

Es necesario destacar que la implementación de la tecnología FACTS se ha desarrollado con una tecnología base provista a través de los componentes para la conducción en alta tensión de corriente continua (HVDC) y mecanismos de control de alta tensión. No obstante, como los componentes semiconductores de potencia continúan mejorando y como el concepto de controladores FACTS avanza, el costo de este tipo de control presenta una tendencia decreciente y su utilización en gran escala está prácticamente asegurada.

2. FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA

En la actualidad muchas de las posibilidades de transmisión se encuentran confrontadas ante la situación de uno o más límites en los parámetros de la red y además ante la infactibilidad de transmitir flujo de corriente continua.

En los sistemas de corriente alterna tanto la generación eléctrica como la carga se deben balancear en todo momento. En algún grado los sistemas eléctricos presentan una autorregulación. Como ilustración puede decirse que si la generación resultase menor que la carga en un determinado instante, la tensión y la frecuencia disminuyen y por lo tanto la carga comienza a disminuir para igualar la generación descontadas las pérdidas de transmisión. Sin embargo existe solamente un pequeño margen porcentual para esta autorregulación. Si la tensión se consigue mantener con reserva de potencia reactiva, luego la carga aumentará y en consecuencia la frecuencia continuará disminuyendo hasta alcanzar el colapso. Alternativamente, si la reserva de potencia reactiva resulta inadecuada, el sistema puede finalizar con un colapso de tensión.

Cuando se tiene una adecuada disponibilidad de generación, el flujo de potencia activa fluye desde las áreas exportadoras hacia las que poseen déficit a través de todas las trayectorias paralelas disponibles, las cuales incluyen líneas de alta y media tensión. Con frecuencia en esta transmisión están presentes grandes distancias con cargas y generaciones a lo largo del trayecto. Como ejemplo ilustrativo se puede citar el suministro de energía desde el área correspondiente a la Ontario Hidro Canadá hacia el sistema noreste de los Estados Unidos (North East United States) efectuado a través del sistema "PJM" mediante un gran lazo, el cual posee un gran número de vínculos de elevada capacidad y baja impedancia. Con mayores o menores diferencias en cuanto a los componentes y distancias disponibles es lo que aproximadamente ocurre en la mayoría de los sistemas de transmisión.

2.1 FLUJO DE POTENCIA EN VINCULOS PARALELOS

Para el análisis de esta situación se considerará un caso muy sencillo de flujo de potencia (Figura 1(a)), cuya energía se suministra a través de dos trayectorias paralelas (corredores posibles de diferentes líneas) desde un área exportadora, representada en la figura como un generador equivalente en el costado izquierdo, hacia un área deficitaria ubicada en el extremo derecho. Sin la existencia de algún control, la distribución del flujo de potencia se efectúa en forma inversamente proporcional a las impedancias de las diferentes líneas de transmisión. Adicionalmente, al considerar las causas contractuales que rigen el suministro de energía, las cuales definen el nivel de carga de las líneas, es probable que la línea con baja impedancia resulte sobrecargada y por lo tanto limite también la capacidad en los restantes vínculos de mayor impedancia que no alcanzaron su capacidad máxima de carga. Esto no debiera ser un incentivo para originar inversiones con la finalidad de aumentar la capacidad de corriente del vínculo sobrecargado, porque esto produciría una disminución en la impedancia y dichas inversiones carecerían de

sentido, particularmente si los vínculos de mayor impedancia presentan suficiente capacidad.

**Surplus
Generation Area**

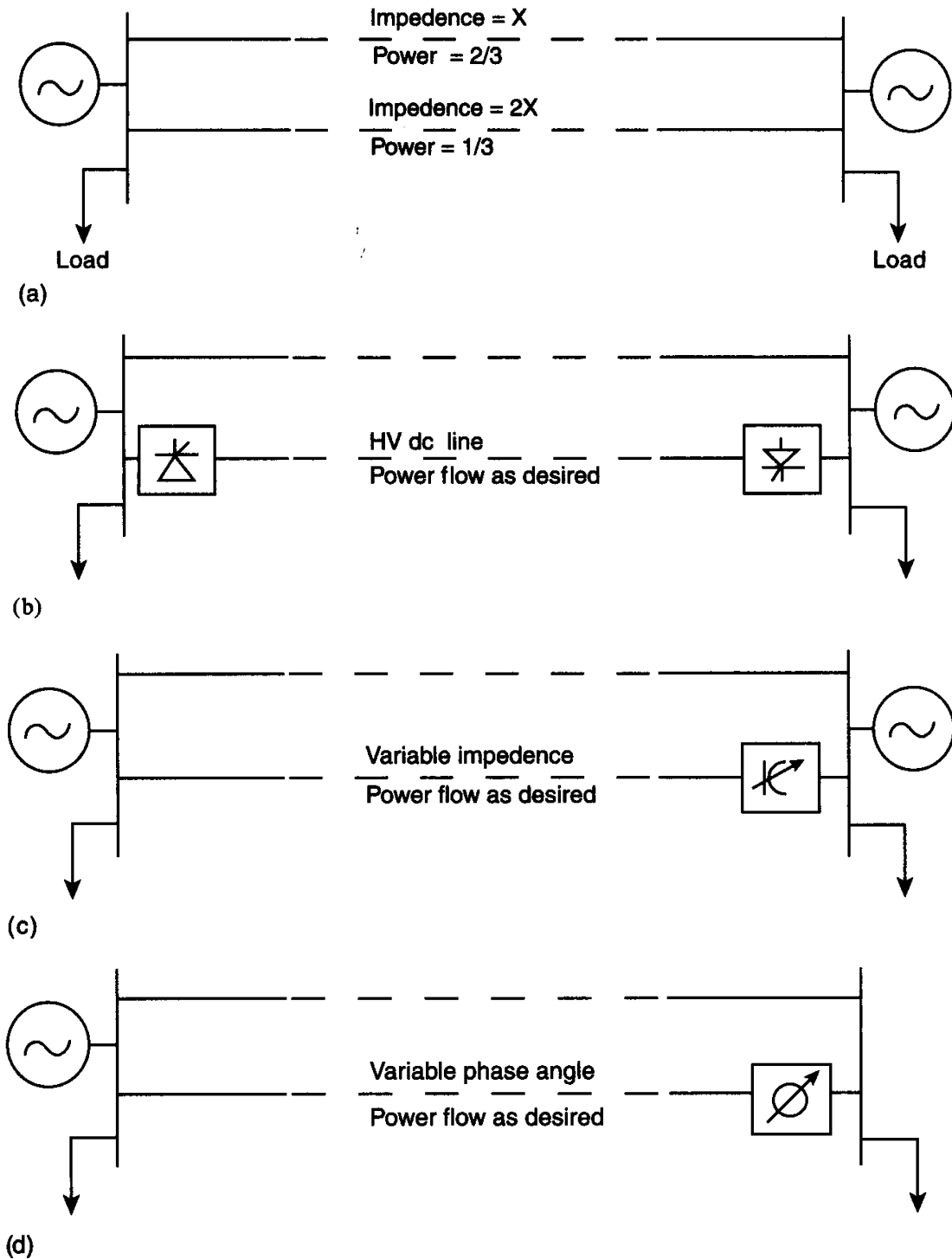


Figura 1: Flujo de potencia en vínculos paralelos; (a) flujo de potencia de corriente alterna; (b) control de flujo de potencia con HVDC; (c) control de flujo de potencia con impedancia variable; (d) control de flujo de potencia con ángulo de fase variable.

La figura 1(b) muestra los mismos dos vínculos, pero uno de ellos presenta la transmisión en corriente continua (HVDC). Con HVDC, los flujos de potencia pueden ser controlados por el operador mediante el control de los convertidores electrónicos de potencia. Con esta posibilidad de control sobre la potencia transmitida por este tipo de vínculo se puede alcanzar hasta su límite de capacidad térmica si se dispone de los convertidores de capacidad adecuada.

Adicionalmente, debido a que las líneas de HVDC poseen controles de alta velocidad, pueden utilizarse estos para ayudar a mantener la estabilidad de los vínculos paralelos de corriente alterna. Sin embargo los vínculos de HVDC son caros para un uso generalizado y usualmente se consideran cuando se involucran grandes distancias en la transmisión. Como una nueva alternativa se muestran los controladores FACTS de tipo serie en líneas de transmisión, ilustrados en las figuras 1(c) y 1(d). Mediante el control de la impedancia (Figura 1(c)) o bien mediante el ángulo de fase de las tensiones (Figura 1(d)), el FACTS puede controlar el flujo de potencia requerido. El máximo flujo de potencia se puede restringir a su límite nominal incluso bajo condiciones de contingencia, cuando por ejemplo se espera que esta línea transporte mayor potencia debido a la pérdida de una línea paralela.

2.2 FLUJO DE POTENCIA EN SISTEMAS MALLADOS

Para una mejor comprensión de esta situación del flujo de potencia, se considerará un caso muy simplificado, en el cual generadores de dos diferentes lugares se encuentran vendiendo potencia a un centro de carga a través de una red formada por tres líneas interconectadas en forma mallada (Figura 2). Se supondrá que las líneas AB, BC y AC presentan una potencia nominal límite en operación normal de 1000 MW, 1250 MW y 2000 MW respectivamente y en situaciones de emergencia de dos veces aquellos valores durante un período de tiempo de suficiente magnitud para permitir la redistribución de potencia en caso de pérdida de una de estas líneas. Si uno de los generadores está suministrando 2000 MW y el otro 1000 MW, un total de 3000 MW serían aportados al centro de carga. Debido a las impedancias mostradas en las líneas cada una transporta 600, 1600 y 1400 MW, respectivamente como se aprecia en la figura 2(a). Tal situación produce una sobrecarga en la línea BC (cargada a 1600 MW sobre su valor nominal de 1250 MW) y por lo tanto la generación en B debiera ser disminuida y aumentada en A con la finalidad de satisfacer la carga sin producir violaciones en la línea BC.

La distribución de los flujos de potencia sobre el sistema dependen fundamentalmente de las impedancias serie de cada línea, las cuales son de características esencialmente inductivas, originando grandes dificultades para satisfacer los contratos, límites térmicos y pérdidas de transmisión en valores aceptables.

Sin embargo si se inserta una reactancia capacitiva de $-5 \text{ }[\Omega]$ a la frecuencia sincrónica en la línea AC (Figura 2(b)), la impedancia total de esta línea se reduce de $10 \text{ }[\Omega]$ a $5 \text{ }[\Omega]$ originando una redistribución de los flujos a través de las líneas AB, BC y AC en magnitud de 250, 1250 y 1750 MW respectivamente. Es evidente que si el capacitor serie es variable, se pueden modificar los flujos de potencia para poder satisfacer los contratos, límites de transmisión y pérdidas estimadas en un amplio

rango de variación de las cargas y posibilidades de generación. Además, en el caso en que este tipo de capacitores sean estructurados en forma modular con elementos mecánicos de interconexión, la cantidad de operaciones a las que podrían estar afectados se las debe limitar estrictamente por el desgaste en los componentes mecánicos, ya que las condiciones de carga de cada línea varían continuamente con el estado de demanda del sistema o de generación o bien ante la salida de servicio de alguna línea.

Otras complicaciones que pueden alcanzarse en el caso de que el capacitor serie se controle en forma mecánica es la situación en que dicho componente pueda conducir a una resonancia subsincrónica (En una frecuencia típica de 10 a 50 Hz para el caso de sistemas de 60 Hz). Esta resonancia puede ocurrir cuando una de las frecuencias de resonancia mecánica del eje de una unidad generadora con múltiples turbinas coincide con los 60 Hz menos la frecuencia de resonancia eléctrica del capacitor con la impedancia inductiva de la línea. Si esta resonancia persiste, se terminará dañando el eje mencionado. También en el caso en que la falla de una línea fuerza a las restantes a operar en sus valores de emergencia transportando por lo tanto una mayor carga, es probable que se produzcan oscilaciones de potencia de baja frecuencia (En los valores típicos de 0,3 a 3 Hz) lo cual puede originar la pérdida de sincronismo de los generadores impulsando al sistema hacia un colapso. Sin embargo, si una parte o la totalidad de los capacitores serie son controlados por tiristores se los pueden variar tan frecuente como sean requeridos. Este tipo de control puede modularse para amortiguar rápidamente cualquier condición de resonancia subsincrónica o bien amortiguar las oscilaciones de baja frecuencia en el flujo de potencia. Esto permitiría al sistema de transmisión pasar desde una condición de estado estacionario a otra sin el riesgo de producir algún daño en el eje del generador y también colaborar con la reducción del riesgo en el colapso del sistema. En otras palabras, un capacitor serie controlado por tiristores puede ampliamente mejorar la estabilidad de la red. En la práctica lo que se utiliza con mayor frecuencia es que una parte de la compensación serie se la controle en forma mecánica y la otra parte mediante los tiristores a fin de controlar las restricciones del sistema con menores costos.

Se pueden obtener resultados similares incrementando la impedancia de una de las líneas en la misma configuración mallada mediante la inserción en serie de un reactor de 7 $[\Omega]$ en la línea AB (Figura 2(c)). De igual manera un inductor serie puede ser controlado parcialmente en forma mecánica y parcialmente mediante tiristores, lo cual posibilita ajustar el flujo de potencia en estado estacionario y amortiguar las oscilaciones no deseadas.

Como una opción diferente a las mencionadas se puede efectuar la instalación en serie de un regulador del ángulo de fase controlado por tiristores en cualquiera de las tres líneas para alcanzar el mismo propósito que en los casos anteriores. En la figura 2(d), el regulador se instala en la tercera línea para reducir la diferencia total del ángulo de fase a lo largo de la línea desde 8,5 grados hasta 4,24 grados. Como se mencionó anteriormente se puede efectuar también aquí con la finalidad de reducir costos una combinación del control mecánico y electrónico mediante tiristores vinculados al regulador del ángulo de fase. Sin embargo no se pueden alcanzar los mismos resultados mediante la inyección de una tensión variable en

una de las líneas. Puede observarse además que para balancear el flujo de potencia en los casos anteriores no se requiere más que un controlador FACTS y realmente existen diferentes opciones de controladores y en diferentes líneas.

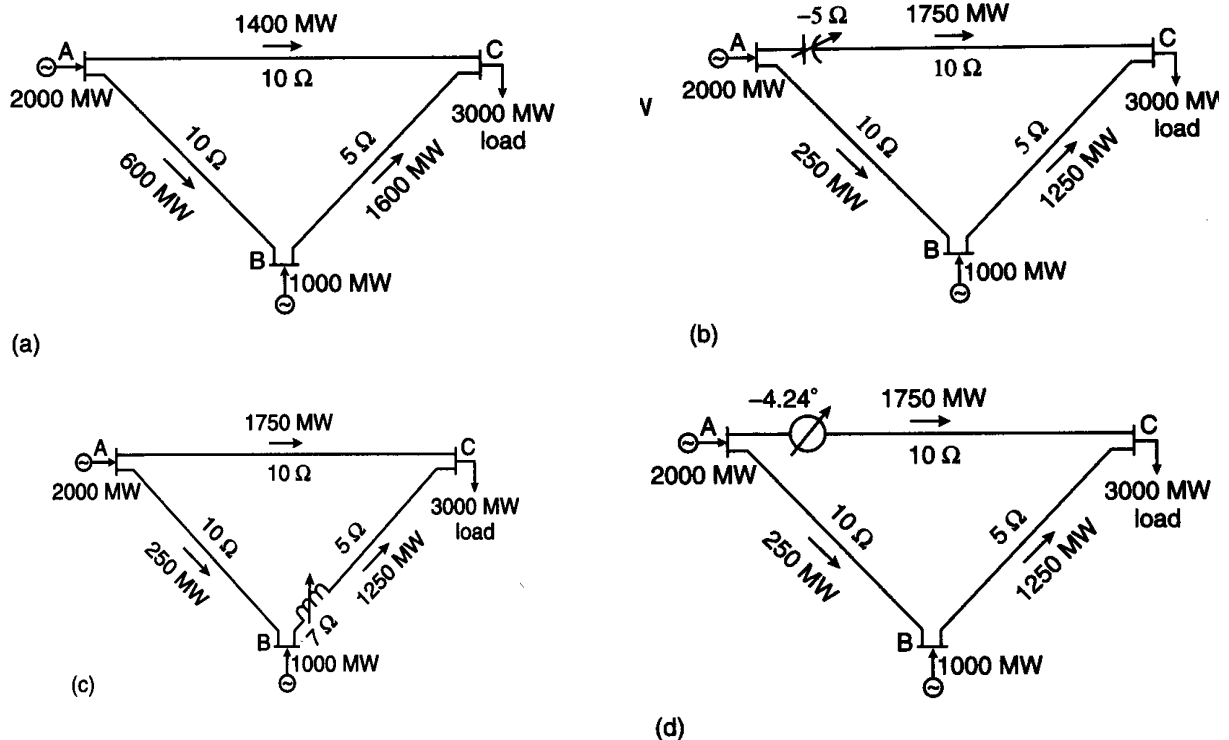


Figura 2: Flujo de potencia en una red mallada: (a) diagrama del sistema; (b) diagrama del sistema con capacitor serie controlado por tiristores en la línea AC; (c) diagrama del sistema con reactor serie controlado por tiristores en la línea BC; (d) diagrama del sistema con regulador del ángulo de fase controlado por tiristores en la línea AC.

Si la red de transmisión posee a un único propietario la decisión para la instalación de un controlador FACTS obedece a un criterio económico del sistema en forma global. Por otro lado si diferentes agentes están involucrados en la operación de la red, es necesario definir un mecanismo de decisión para establecer la inversión y la empresa encargada de la misma.

3. CAUSAS QUE LIMITAN LA CAPACIDAD DE CARGA DE LOS VINCULOS

Asumiendo que no existen dificultades vinculadas con el propietario de la red y que el objetivo perseguido es lograr la mejor utilización de la red en la transmisión de potencia y maximizar la capacidad de carga (teniendo en cuenta condiciones de contingencia), es necesario definir en función de los componentes disponibles la capacidad de carga existente y la estrategia para mejorarla.

Las limitaciones en la capacidad se pueden resumir básicamente en las siguientes:

- Térmicas
- Dieléctricas
- De estabilidad

Seguidamente se explicará con un mayor grado de detalle cada uno de estos límites.

Límite térmico

La capacidad térmica de una línea aérea depende de la temperatura ambiental, condiciones de viento, características del conductor y distancia a tierra. Esta capacidad puede variar por un factor de 2 a 1 debido a las variables ambientales y a la historia de la carga del componente. El valor nominal definido para una línea se lo hace en forma conservativa considerando diferentes escenarios que tienen en cuenta las situaciones más críticas en el medio ambiente con sus estadísticas disponibles. Debido a que estos escenarios se presentan raramente, en la realidad la mayoría de las veces existe una capacidad real mayor que la asumida. En algunas empresas se asignan valores diferentes para invierno y verano, no obstante ello se dispone en ambos casos de un margen considerable para la operación. Se observa también la existencia de programas computacionales fuera de línea que pueden calcular la capacidad de carga de la línea utilizando los datos ambientales y la historia de la carga reciente. Con la existencia de los componentes de monitoreo en tiempo real se dispone de los datos para poder definir la capacidad de carga en forma actualizada. Algunas veces las condiciones ambientales actuales pueden ser peores que las asumidas, por lo tanto es muy útil la posibilidad de determinar el valor actuar de la capacidad de transmisión de la línea.

Para el incremento de la capacidad de un vínculo de transmisión se debe considerar la capacidad existente en tiempo real de los transformadores y de los restantes componentes que participan en el transporte, tales como transformadores de intensidad y bobinas de onda portadora, algunos de los cuales es necesario reemplazarlos con la finalidad de mejorar la capacidad de carga de la línea. La capacidad de carga en tiempo real de los transformadores depende también de la temperatura ambiente, del envejecimiento del transformador y de la carga histórica reciente. El monitoreo de la capacidad de carga en línea y fuera de línea puede utilizarse para obtener la capacidad de carga en tiempo real del transformador. La mejora en la refrigeración del transformador sirve también como una ayuda importante.

Existe la posibilidad de incrementar el límite de transporte de una línea mediante el cambio del conductor por uno de mayor capacidad de corriente o mediante la transformación de un circuito simple a uno doble, lo cual puede requerir en ambos casos modificaciones estructurales. Una vez que se dispone de una mayor capacidad es necesario definir cómo debe ser utilizada. La tecnología FACTS puede ayudar en hacer más efectiva la utilización de esta ampliación en la capacidad.

Límite Dieléctrico

Desde el punto de vista del aislamiento, la mayoría de las líneas son diseñadas en forma muy conservativa. Para un valor definido de tensión nominal es posible incrementar con cierta frecuencia en condiciones de operación normal y sin mayores riesgos hasta un 10% de la magnitud de la tensión (por ejemplo de 500 kV a 550 kV) y en algunos casos efectuar aumentos aún mayores. Se deben tomar las

precauciones necesarias para asegurar que las sobretensiones dinámicas y transitorias se mantengan dentro de los límites adoptados. La utilización de materiales modernos y nuevas tecnologías en los aisladores y subestaciones posibilitan el aumento de la capacidad de tensión en las líneas y subestaciones. La tecnología FACTS se la utiliza en este caso para asegurar condiciones aceptables de sobretensión y flujo de potencia.

Límite por Estabilidad

Hay una serie de efectos relacionados con la estabilidad del sistema que limitan la capacidad de transmisión. Entre estos efectos se pueden enumerar los siguientes:

- Estabilidad transitoria
- Estabilidad dinámica
- Estabilidad en estado estacionario
- Colapso de frecuencia
- Colapso de tensión
- Resonancia subsincrónica

Debido a la extensión de esta temática y teniendo en cuenta que existe abundante bibliografía, en este caso en particular el análisis se limitará solamente a los aspectos esencialmente necesarios para la explicación de los controladores FACTS. La tecnología FACTS se la puede utilizar para evitar las violaciones en cualquiera de los límites de estabilidad, en cuyo caso el último límite debiera ser térmico o dieléctrico.

4. FLUJO DE POTENCIA Y CONSIDERACIONES DE ESTABILIDAD DINAMICA DE UN VINCULO DE TRANSMISION

En la figura 3(a) se muestra un caso simplificado de flujo de potencia sobre una línea de transmisión. Los nodos 1 y 2 representan subestaciones conectadas mediante una línea de transmisión. Estas subestaciones pueden poseer carga, generación o bien ser simplemente puntos de interconexión en el sistema y por simplicidad se ha asumido que son barras de tensión fija. E_1 y E_2 representan las tensiones de las correspondientes barras extremas con el ángulo δ entre ellas. Se ha asumido que la línea posee una impedancia inductiva X , despreciando por lo tanto su resistencia y capacitancia.

Como puede apreciarse en el diagrama fasorial (Figura 3(b)) la caída de tensión en la línea está representada por el fasor E_L , calculado como la diferencia entre los fasores de tensión de las barras extremas E_1 y E_2 . La magnitud de la corriente de línea se puede expresar mediante (1)

$$I = E_L / X \quad (1)$$

Debido a las características puramente inductivas del circuito considerado, la corriente I se encuentra retrasada 90° respecto de la tensión E_L . Es importante

destacar que la caída de tensión producida a lo largo de la línea es muy pequeña en comparación con las tensiones de las barras extremas. Para este caso en particular se puede considerar que la caída de tensión a plena carga es de aproximadamente 1%/10 km, con lo cual si se asume que la distancia entre las dos subestaciones es de 200 km la caída total de tensión en esta línea para una situación de plena carga podría alcanzar el 20%, manteniéndose el ángulo δ en valores pequeños. Si se asume por ejemplo que las magnitudes de E_1 y E_2 son iguales y que X es igual a 0,2[pu], el ángulo δ resultaría de 0,2 radianes o 11,5°.

La corriente que fluye por la línea puede controlarse actuando sobre E_L ó X o bien sobre el ángulo δ . Con la finalidad de alcanzar un grado de control relevante sobre la corriente que circula por la línea, el equipamiento requerido que se conectará en serie no debiera tener un consumo elevado de potencia. Por ejemplo, en el caso de 500 [kV] de tensión de línea (aproximadamente 300 kV de tensión de fase) y para una corriente de línea de 2000 [A], la potencia trifásica resulta de aproximadamente 1800 [MVA]. Teniendo en cuenta además que la longitud de la línea es de 200 [km], la caída de tensión a plena carga se podría estimar en 60 [kV]. Para el elemento de control variable conectado en serie, con una capacidad de compensación del 25 %, requerirá una potencia nominal de $0,25 \times 60 \text{ [kV]} \times 2000 \text{ [A]} = 30 \text{ [MVA]}$ por fase o lo que es equivalente 90 [MVA] para las tres fases, lo cual representa sólo 5% de la potencia transportada por la línea de 1800 [MVA].

Como puede observarse a través de este sencillo ejemplo la potencia nominal de los controladores FACTS conectados en serie representa una fracción de la que transporta la línea.

En la figura 3(b) se puede apreciar que el fasor del flujo de corriente es perpendicular a la caída de tensión E_L (90° en atraso). En el caso en que el ángulo entre las barras extremas sea pequeño, la corriente que circula representa en gran medida el flujo de potencia activa. Aumentando o disminuyendo la impedancia inductiva de la línea se puede afectar en forma considerable el flujo de potencia activa. Efectuando por lo tanto un control de la impedancia puede obtenerse uno de los medios más efectivos para controlar el flujo de potencia. Utilizando unos lazos apropiados de control, se puede recurrir a este medio para controlar el flujo de potencia activa o bien el ángulo para satisfacer requisitos de estabilidad.

El diagrama fasorial correspondiente a la figura 3(b) se ha representado con un mayor grado de detalle en 3(c), donde se pueden apreciar las relaciones existentes entre las componentes de la corriente activa y reactiva con respecto a las tensiones en ambos extremos.

La componente activa del flujo de corriente en la barra E_1 es:

$$I_{p1} = (E_2 \sin \delta) / X$$

De igual manera la componente reactiva del flujo de corriente resulta:

$$I_{q1} = (E_1 - E_2 \cos \delta) / X$$

Teniendo en cuenta lo anterior se puede calcular la potencia activa y reactiva inyectada en este extremo:

$$\begin{aligned} P_1 &= E_1(E_2 \sin \delta) / X \\ Q_1 &= E_1(E_1 - E_2 \cos \delta) / X \end{aligned} \quad (2)$$

En forma similar se pueden obtener las ecuaciones de potencia asociadas al extremo E_2 como se observa seguidamente:

$$\begin{aligned} P_2 &= E_2(E_1 \sin \delta) / X \\ Q_2 &= E_2(E_2 - E_1 \cos \delta) / X \end{aligned} \quad (3)$$

Al no considerarse las pérdidas activas en la línea, las potencias P_1 y P_2 son iguales y se puede expresar como

$$P = E_1(E_2 \sin \delta) / X \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones (2), (3) y (4) puede observarse que variando el valor de X se puede modificar P , Q_1 y Q_2 .

Suponiendo que E_1 y E_2 son las magnitudes de las tensiones internas de dos máquinas equivalentes representativas de dos sistemas diferentes y que en la impedancia X se ha incluido la reactancia interna de dichas máquinas, se ha graficado en la figura 3(d) la mitad superior de la curva senoidal correspondiente a la potencia activa en función del ángulo δ . Puede apreciarse que sin la disponibilidad de controles de alta velocidad de cualquiera de los parámetros E_1 , E_2 , $E_1 - E_2$, X y δ la línea de transmisión se puede utilizar a un nivel bastante alejado por debajo de los 90° por razones de seguridad, para mantener un adecuado margen de acuerdo a lo requerido por las condiciones de estabilidad transitoria y dinámica.

Aumentando y disminuyendo el valor de X se podrá incrementar o disminuir la altura de las curvas respectivamente, como puede apreciarse en la figura 3(d). Para el caso en que se esté transmitiendo un determinado flujo de potencia activa, variando la reactancia X adecuadamente, podrá modificarse el ángulo entre los dos extremos.

El flujo de potencia o corriente puede también controlarse mediante regulación de la magnitud de los fasores de tensión E_1 o E_2 . Sin embargo se puede apreciar en la figura 3(e) que los cambios en la magnitud de E_1 no afecta en forma significativa el módulo de la caída de tensión $E_1 - E_2$, pero sí su ángulo de fase. Esto también significa que la regulación de las magnitudes del fasor de tensión E_1 y/o E_2 tiene mucha más influencia sobre el flujo de potencia reactiva que sobre el de activa, como se aprecia en los dos fasores de corriente correspondientes a las diferentes caídas de tensión mostradas en la figura 3(e).

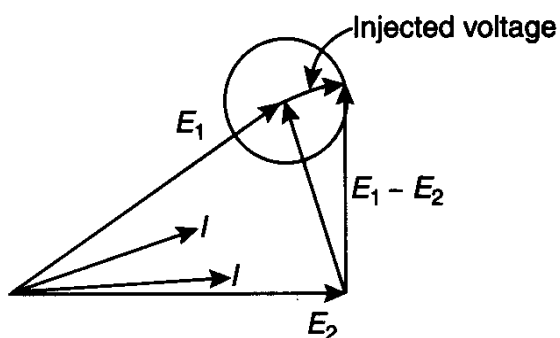
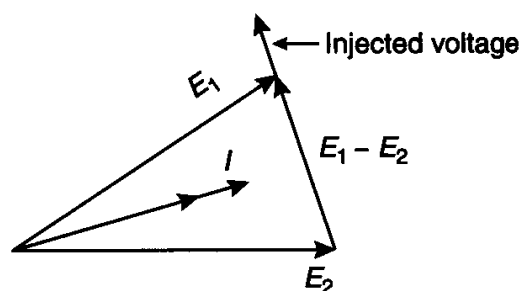
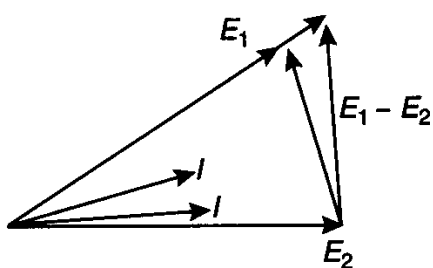
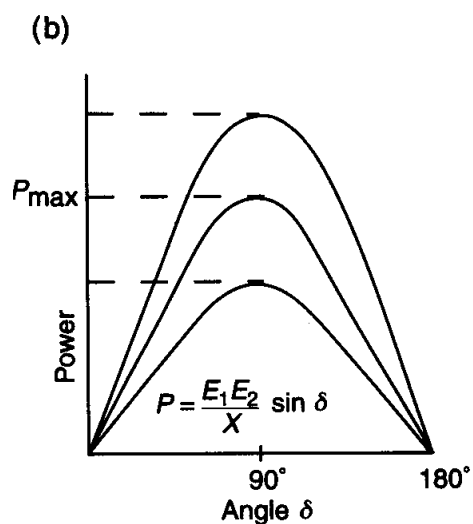
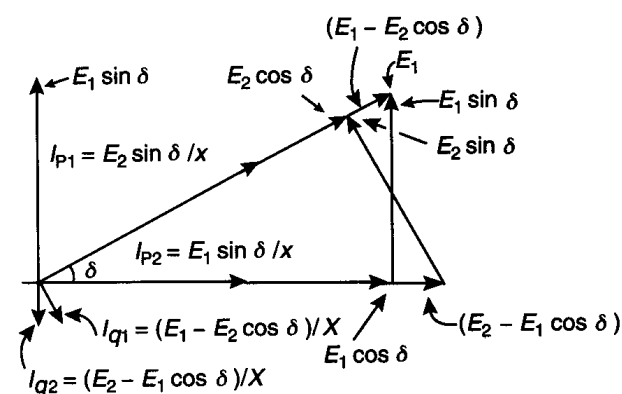
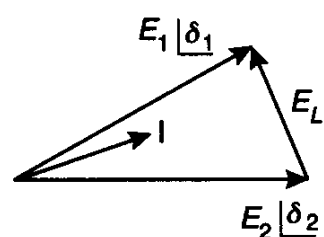
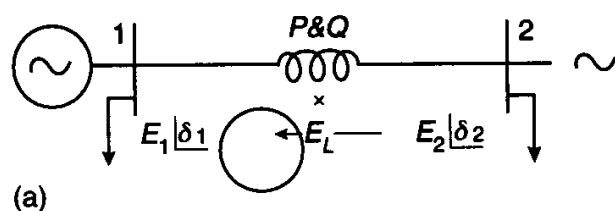


Figura 3: Control de flujo de potencia de corriente alterna de una línea de transmisión: (a) Sistema simple de dos máquinas; (b) flujo de corriente perpendicular a la caída de tensión entre barras extremas; (c) diagrama fasorial del flujo de corriente activa u reactiva; (d) Curvas de ángulo de potencia para diferentes valores de X ; (e) regulación de la tensión produciendo cambios principalmente en la potencia reactiva; (f) inyección de tensión perpendicular a la corriente de línea produciendo cambios principalmente en la potencia activa; (g) inyección de un fasor de tensión en serie con la línea.

El flujo de corriente y por lo tanto el flujo de potencia activa puede cambiarse mediante la inyección de tensión en serie con la línea. En la figura 3(f) puede apreciarse que cuando la tensión inyectada se encuentra en cuadratura de fase con la corriente, lo cual significa aproximadamente en fase con el fasor representativo de la caída de tensión entre las barra, se produce una influencia prácticamente directa sobre la magnitud del flujo de corriente y el ángulo de fase δ que afecta sustancialmente el flujo de potencia activa. Alternativamente, la tensión que se inyecta en serie puede efectuarse con módulo y ángulo variable en relación con la tensión de línea como se observa en la figura 3(g). Mediante este tipo de inyección de tensión se logra controlar el flujo de potencia activa y reactiva. El método de inyección de tensión representa una de las herramientas más importantes de los controladores FACTS.

5. IMPORTANCIA RELATIVA DEL CONTROL DE PARAMETROS

Teniendo en cuenta lo explicado en el apartado anterior se puede destacar aquí algunos puntos importantes relacionados con el control del flujo de potencia.

- El control de la impedancia de línea X (por ejemplo, mediante un capacitor en serie controlado por tiristores) puede proveer un método eficaz para controlar la corriente.
- Cuando el ángulo δ es relativamente pequeño, lo cual ocurre en la mayoría de los casos, controlando la reactancia X o el ángulo se puede obtener un control significativo para la potencia activa.
- El control del ángulo (con un regulador del ángulo de fase), el cual puede modificar la caída de tensión entre los nodos extremos, permite disponer de una herramienta poderosa para controlar el flujo de corriente y por lo tanto el flujo de potencia activa en los casos en que el ángulo no sea lo suficientemente grande.
- La inyección de tensión en serie con la línea y perpendicular al flujo de corriente puede aumentar o disminuir la magnitud de dicho flujo. Debido a que el flujo de corriente se encuentra atrasado respecto de la caída de tensión entre las barras extremas en 90° , esto significa inyección de potencia reactiva en serie (por ejemplo utilizando compensación sincrónica estática en serie). Mediante esta herramienta se puede disponer de un medio importante para controlar la corriente de línea y por lo tanto la potencia activa cuando el ángulo es pequeño.
- La inyección de tensión en serie con la línea pero con un ángulo de fase variable con respecto a la caída de tensión puede controlar la magnitud y fase de la corriente de línea. Mediante esta acción se puede disponer de una poderosa herramienta para controlar en forma precisa la potencia activa y reactiva. Esto se puede obtener mediante la inyección en serie de ambas potencias activa y reactiva.
- La potencia nominal en [MVA] de los controladores poseen en la mayoría de los casos una pequeña fracción de la potencia transmitida por la línea.
- En el caso en que el ángulo no es grande, controlando la magnitud de la tensión en los nodos extremos (por ejemplo mediante un regulador de tensión controlado por tiristores), puede resultar una herramienta muy efectiva en costos para el control de la potencia reactiva a través de la interconexión.

- Una combinación de un control de la impedancia de línea con un controlador serie y un regulador de tensión con un controlador shunt, pueden resultar también como un medio muy efectivo en costos para controlar ambos flujos de potencia activa y reactiva entre los dos sistemas.

6. TIPO BASICO DE CONTROLADORES FACTS

En general, los controladores FACTS pueden dividirse en cuatro categorías como se detalla seguidamente:

- Controladores serie
- Controladores shunt
- Controladores combinados serie-serie
- Controladores combinados serie-shunt

En la figura 4(a) se presenta el símbolo general adoptado para un controlador FACTS, el cual se encuentra representado por el símbolo de un tiristor dentro de un recuadro.

Controladores Serie (figura 4(b)): El controlador serie debiera ser una impedancia variable, tal como un capacitor, reactor, etc., o una fuente variable basada en electrónica de potencia de frecuencia nominal, subsincrónica y frecuencias armónicas (o una combinación) para satisfacer los requerimientos originados durante la operación del sistema. En principio, todos los controladores serie inyectan tensión en serie con la línea. De esta manera, una impedancia variable multiplicada por el flujo de corriente a través de ella, representa una tensión en serie inyectada en la línea. En la medida en que la tensión se encuentre en cuadratura de fase con la corriente de línea, el controlador serie actuará suministrando o consumiendo solamente potencia reactiva variable. Si la cuadratura de fase no se verifica, el controlador incluirá en su actuación a la potencia activa.

Controladores Shunt (figura 4(c)): Como en el caso del controlador serie, el controlador shunt puede poseer también una impedancia variable, una fuente variable, o una combinación de estos. En principio todos los controladores shunt inyectan corriente en el sistema en el punto de conexión. De este modo una impedancia shunt variable conectada a la tensión de línea causa un flujo de corriente variable y por lo tanto representa una inyección de corriente en la línea. En la medida en que la corriente inyectada se encuentre en cuadratura de fase con la tensión de línea, el controlador shunt actuará suministrando o consumiendo solamente potencia reactiva variable. Si la cuadratura de fase no se verifica, el controlador incluirá en su actuación a la potencia activa.

Controladores Combinados serie-serie (figura 4(d)): Este controlador puede estar integrado por una combinación de controladores serie separados, los cuales se controlan en una manera coordinada en un sistema de transmisión multilínea. Otra alternativa puede ser un controlador unificado (figura 4(d)), en el cual los controladores series proveen una compensación reactiva serie en forma independiente para cada línea pero también transfieren potencia activa entre las

líneas mediante el vínculo existente de potencia. La capacidad de transferencia de potencia activa del controlador unificado serie-serie, considerando su comportamiento como controlador del flujo de potencia entre líneas (Interline Power Flow Controller), permite balancear ambos flujos de potencia activa y reactiva en las líneas y por lo tanto maximizar la utilización de los sistemas de transmisión. Es necesario destacar que el término “unificado” utilizado en este caso significa que los terminales de corriente continua (dc) de todos los convertidores de los controladores se conectan en forma conjunta a la señal de la transferencia de potencia activa.

Controladores Combinados serie-shunt (figura 4(e) y figura 4(f)): Este controlador al igual que en el caso anterior puede estar integrado por una combinación de controladores shunt y serie separados, los cuales se controlan en una manera coordinada (figura 4(e)). Otra alternativa puede ser un controlador unificado (Unified Power Flow Controller) con elementos serie y shunt (figura 4(f)). En principio, controladores combinados serie y shunt inyectan corriente en el sistema mediante su componente shunt y tensión en serie en la línea con el correspondiente componente serie del controlador. Sin embargo cuando los controladores serie y shunt están unificados, se puede efectuar un intercambio de potencia activa entre los controladores serie y shunt a través del vínculo de potencia.

6.1 IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CONTROLES

Es importante apreciar que los controladores conectados en serie afectan la caída de tensión entre las barras extremas y por lo tanto el flujo de potencia/corriente en forma directa. Por lo tanto si el propósito de la aplicación es controlar el flujo de potencia/corriente y amortiguar las oscilaciones, el controlador serie es mucho más efectivo que el shunt.

Como se mencionó, el controlador shunt por otro lado, se puede considerar como una fuente de corriente, la cual absorbe o inyecta corriente en la línea. El controlador shunt es por lo tanto una buena forma para controlar la tensión en el punto de conexión y en su área de influencia a través de la inyección de corriente reactiva (en adelante o atraso) o bien mediante una combinación de corriente activa y reactiva para un control más efectivo de la tensión y amortiguación de las oscilaciones de tensión.

No se puede decir que el controlador serie no puede ser utilizado para mantener la tensión de línea dentro del rango especificado. Después de todo, las fluctuaciones de tensión son una consecuencia de la caída de tensión en la impedancia en serie de la línea, transformador y generador. Por lo tanto adicionando o restando tensión en serie mediante un controlador FACTS, puede ser una de las maneras más efectivas desde el punto de vista de los costos para mejorar el perfil de tensiones. No obstante, un controlador shunt es mucho más efectivo para mantener un requerido perfil de tensiones en la barra de una subestación.

Considerando lo anterior puede decirse que en algunos casos resulta conveniente una combinación de los controladores serie y shunt (Figuras 4(e) y 4(f)) con la

finalidad de alcanzar una solución más efectiva para el control del flujo de potencia /corriente y de tensión de línea.

En el caso de la actuación combinada de controladores serie y shunt, el controlador shunt puede consistir en una simple unidad que actúa en coordinación con el controlador individual de línea (Figura 4(g)). Esta configuración permite beneficios adicionales (control del flujo de potencia reactiva) utilizando Controladores unificados.

La tecnología de los controladores FACTS puede basarse en tiristores con compuertas solamente “turn-off” o “turn-on” o bien en componentes de potencia con capacidad de funcionamiento de estas compuertas. Los principales controladores de este último tipo utilizan convertidores dc-ac, los cuales permiten intercambiar potencia activa y reactiva con el sistema. Cualquiera de los controladores serie, shunt o combinación serie-shunt que utilice convertidores pueden incorporar fuentes de almacenamiento de energía tales como capacitores, baterías u otros componentes electrónicos más sofisticados, los cuales permiten potenciar aún más la tecnología de FACTS (Figuras 4(h), 4(i) y 4(j)).

El beneficio de la adición de un sistema de almacenamiento de energía al controlador presenta efectos de importancia. Un controlador con posibilidades de almacenamiento es mucho más efectivo para controlar la dinámica del sistema que el correspondiente controlador sin este almacenamiento. Estos controladores permiten bombear en forma dinámica potencia activa hacia el sistema o desde él, en comparación con solamente la influencia lograda sobre la potencia activa transmitida por el sistema en el caso de controladores con posibilidad de almacenaje de energía.

Un controlador que utiliza convertidores puede ser diseñado para atenuar la generación de armónicas de un bajo orden a niveles poco significativos. Los componentes convertidores pueden además diseñarse para generar la forma de onda correcta actuando como un filtro activo. Estos componentes se los puede controlar y operar con la finalidad de mejorar los desbalances de tensión, incluyendo transferencia de energía entre fases. Todas estas acciones beneficiosas pueden lograrse simultáneamente si el componente convertidor se lo diseña con esta finalidad.

Dada la gran cantidad de beneficios y atributos de los diferentes controladores mencionados, se puede decir que para un determinado problema es necesario disponer de una evaluación preliminar criteriosa para seleccionar el más adecuado.

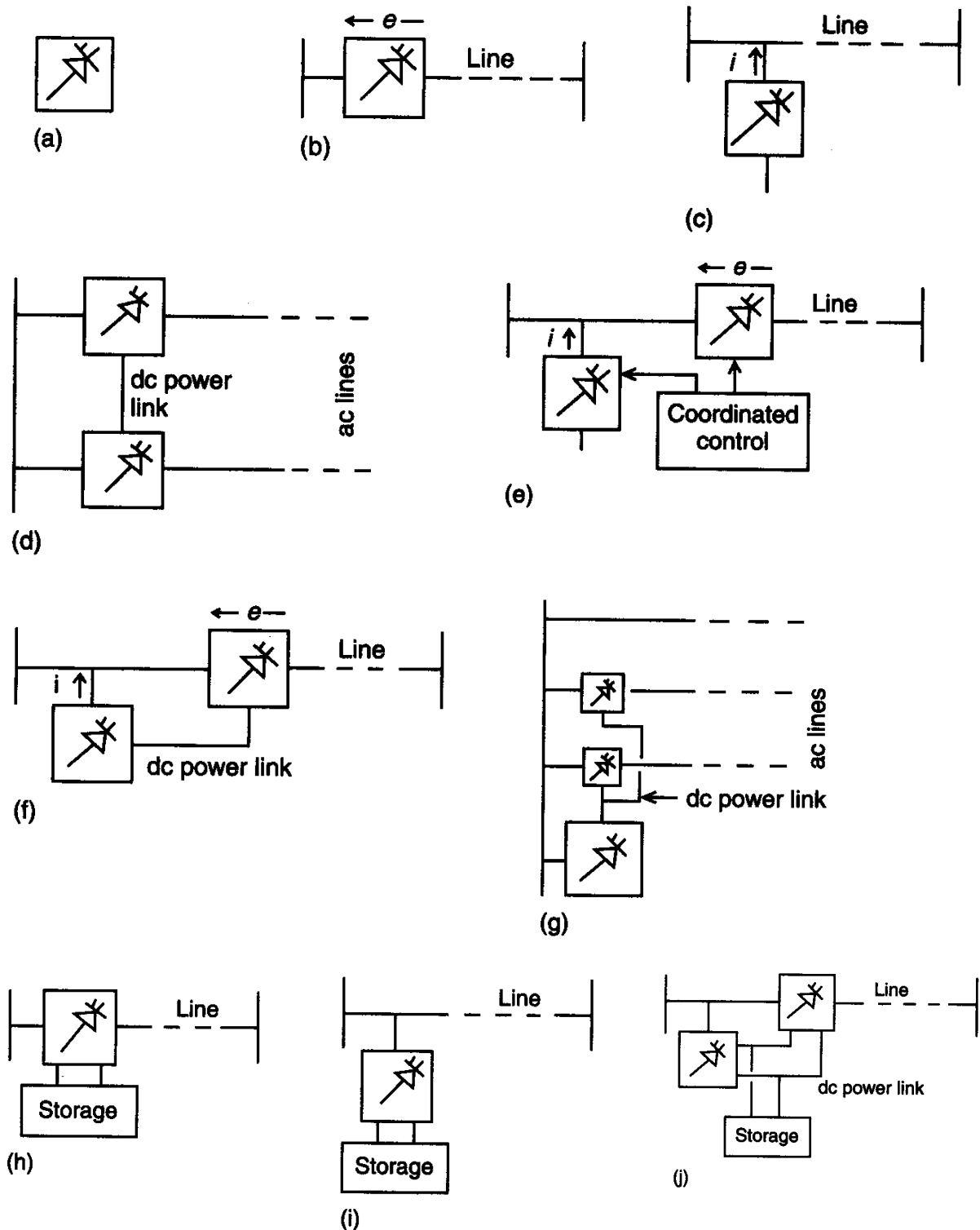


Figura 4: Tipos básicos de controladores FACTS: (a) símbolo general para un controlador FACTS; (b) controlador serie; (c) controlador shunt; (d) controlador unificado serie-serie; (e) controlador coordinado serie y shunt; (f) controlador unificado serie-shunt; (g) controlador unificado para múltiples líneas; (h) controlador serie con posibilidad de almacenamiento de energía; (i) controlador shunt con posibilidad de almacenamiento de energía; (j) controlador unificado serie-shunt con posibilidad de almacenamiento de energía.

7. BREVE DESCRIPCIÓN DE CONTROLADORES FACTS Y DEFINICIONES ASOCIADAS

Antes de efectuar una breve descripción de los diferentes tipos de controladores FACTS considerados de mayor relevancia, es importante mencionar que los controladores basados en convertidores responden a dos diferentes tipos de convertidores que utilizan componentes con compuertas “turn-off”. Estos son los llamados convertidores con fuente de tensión y los convertidores con fuente de corriente, los cuales han sido ilustrados en el costado izquierdo y derecho respectivamente de la figura 5(a). En relación al primer caso se puede decir que presenta un capacitor como fuente de tensión que provee una tensión unidireccional de continua que es transformada en una tensión alterna a través de una conmutación secuencial. La inversión de potencia incluye una inversión de corriente, pero no de tensión. Cuando la capacidad de almacenaje del capacitor es pequeña y no hay otra fuente de potencia conectada a él, el convertidor no puede suministrar o absorber potencia activa por mucho más tiempo que un ciclo. La tensión de salida alterna se mantiene a 90° en adelante o atraso con respecto a la corriente alterna, y el convertidor se utiliza para absorber o suministrar solamente potencia reactiva.

El convertidor con fuente de corriente, por otro lado, transforma la corriente continua en alterna a través de componentes de conmutación secuencial. La corriente alterna suministrada es variable en amplitud y fase en relación con la tensión alterna del sistema. La inversión de potencia incluye inversión de tensión pero no de corriente. El convertidor de fuente de corriente se lo representa simbólicamente como un rectángulo con sus componentes electrónicos de potencia y un inductor como la fuente de corriente.

Desde un punto de vista de costos generales, el convertidor de fuente de tensión aparenta ser el preferido y será la base para la presentación de la mayoría de los convertidores basados en controladores FACTS.

Seguidamente se incluirán algunas definiciones consideradas de importancia sobre la temática adoptadas por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.):

Flexibilidad de la transmisión de potencia eléctrica: Es la capacidad para acomodarse a cambios en los sistemas de transmisión eléctrica o condiciones de operación, mientras se mantiene suficientes márgenes para estabilidad en estado transitorio y estacionario.

Sistemas de Transmisión Flexibles de Corriente Alterna (FACTS): Sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores, los cuales se basan en electrónica de potencia o bien en características estáticas, para mejorar la controlabilidad del sistema e incrementar la capacidad de transferencia de potencia.

Controladores FACTS: Es un equipamiento basado en electrónica de potencia y otros componentes estáticos que permiten efectuar el control de uno o más parámetros del sistema de transmisión de corriente alterna.

7.1 CONTROLADORES CONECTADOS SHUNT

Compensador sincrónico estático (STATCOM): Es un generador sincrónico estático operado como un compensador shunt de potencia reactiva variable cuya corriente aportada de características capacitiva o inductiva puede ser controlado en forma independiente a la tensión alterna del sistema.

STATCOM es uno de los controladores FACTS claves. Estos pueden basarse en fuentes de corriente o tensión con convertidores. En la figura 5(a) se muestra un simple diagrama unifilar de un STATCOM basado en fuentes de corriente o tensión con convertidores. Como se mencionó anteriormente, desde un punto de vista general de costos, los convertidores con fuente de tensión aparentan ser preferidos y serán la base para la presentación de la mayoría de los controladores FACTS basados en convertidores.

Para el caso de una fuente de tensión con convertidor, el aporte de tensión alterna es controlado de modo tal que sea ajustado de acuerdo al flujo de corriente reactiva requerida por alguna tensión alterna de barra. Este componente se lo puede diseñar para actuar también como un filtro activo para absorber armónicas del sistema.

Generador sincrónico estático (SSG): Es un convertidor estático de potencia autoconmutado alimentado desde una fuente de energía eléctrica apropiada para producir un conjunto de tensiones multifase variables, las cuales pueden acoplarse a un sistema de corriente alterna con el propósito de intercambiar en forma independiente y controlable tanto potencia activa como reactiva. Puede observarse claramente que el SSG es una combinación de un STATCOM y una fuente de energía, tal como una batería o algún otro componente más sofisticado, para suministrar o absorber potencia. Una interfase electrónica conocida como “chopper” es generalmente necesaria entre la fuente de energía y el convertidor. Para un convertidor con fuente de tensión, la fuente de energía que posee se utiliza para compensar apropiadamente la carga del capacitor a través de la interfase electrónica y mantener la tensión requerida del capacitor.

Compensador de potencia reactiva variable (SVC): Es un componente estático conectado en shunt que genera o absorbe potencia reactiva, cuya salida es variable para intercambiar corriente capacitiva o inductiva así como el mantenimiento o control sobre parámetros específicos del sistema de potencia eléctrico (especialmente tensión de barras).

Este es un término general utilizado para un controlador conformado en base a tiristores tal como reactores conectados mediante tiristores y/o capacitores conectados por tiristores o una combinación de ellos (figura 5(c)). Los SVC están basados en tiristores sin la compuerta de capacidad turn-off. Estos incluyen componentes que permiten conducir y retardar la potencia reactiva, como es el caso de los tiristores controlados o con posibilidad de conectar un reactor para la absorción de potencia reactiva o un capacitor para suministrar esta potencia. Los SVC pueden ser considerados como una alternativa de bajo costo para un STATCOM, comparándolos en relación con su funcionamiento y no con respecto al tamaño en [MVA].

Reactor controlado por tiristores (TCR): Es un inductor controlado por tiristores conectado en shunt cuya reactancia efectiva es variada en forma continua mediante el control de conducción del tiristor.

Puede decirse que los TCR pertenecen a un subconjunto de SVC, cuyo tiempo de conducción y fuera de servicio de la corriente que circula por el reactor shunt se controla por un componente de interrupción de corriente alterna basado en tiristores, en los cuales el control concretamente se efectúa sobre el ángulo de encendido (figura 5(c)).

Reactor conmutado por tiristores (TSR): Es un inductor conmutado por tiristores conectado en shunt cuya reactancia efectiva es variada en forma escalonada por el tiristor desde la operación de conducción completa hasta cero.

Los TSR (figura 5(c)) pertenecen también a un subconjunto de los SVC. Los TSR están contruidos por diferentes inductores conectados en shunt, los cuales se conmutan al estado de operación o fuera de él a través de la conmutación de tiristores sin ningún control del ángulo de encendido con el objeto de alcanzar los cambios requeridos en el consumo de potencia reactiva desde el sistema. El uso de tiristores sin el control del ángulo de encendido, tiene la ventaja de requerir menores costos y pérdidas, pero no permiten efectuar un control continuo.

Capacitor conmutado por tiristores (TSC): Es un capacitor conmutado por tiristores conectado en shunt cuya reactancia efectiva es variada en forma escalonada por el tiristor desde la operación de conducción completa hasta cero.

Los TSC (figura 5(c)) pertenecen también a un subconjunto de los SVC, cuyos tiristores de conmutación cambian del estado de operación al de fuera de servicio (sin ningún control del ángulo de encendido) sobre las unidades capacitivas conectadas en shunt con el objeto de alcanzar los cambios requeridos en el suministro de potencia reactiva al sistema. A diferencia de los reactores shunt, los capacitores shunt no pueden conmutarse continuamente con el control en forma variable del ángulo de encendido.

Componente, equipamiento o sistema estático de generación y absorción de potencia reactiva (SVG): Este elemento es capaz de controlar corriente capacitiva y/o inductiva desde un sistema de potencia eléctrico y por lo tanto la correspondiente generación o absorción de potencia reactiva. Generalmente consisten de la conexión en shunt de reactores controlados por tiristores y/o capacitores conmutados por tiristores.

Los SVG son simplemente fuentes de potencia reactiva que, con controles apropiados, pueden convertirse en compensadores shunt de potencia reactiva con fines específicos o multipropósitos. De este modo los SVC y los STATCOM se pueden considerar como SVG en la medida que se los equipe con lazos apropiados de control para variar la salida de potencia reactiva así como para satisfacer objetivos de compensación específica.

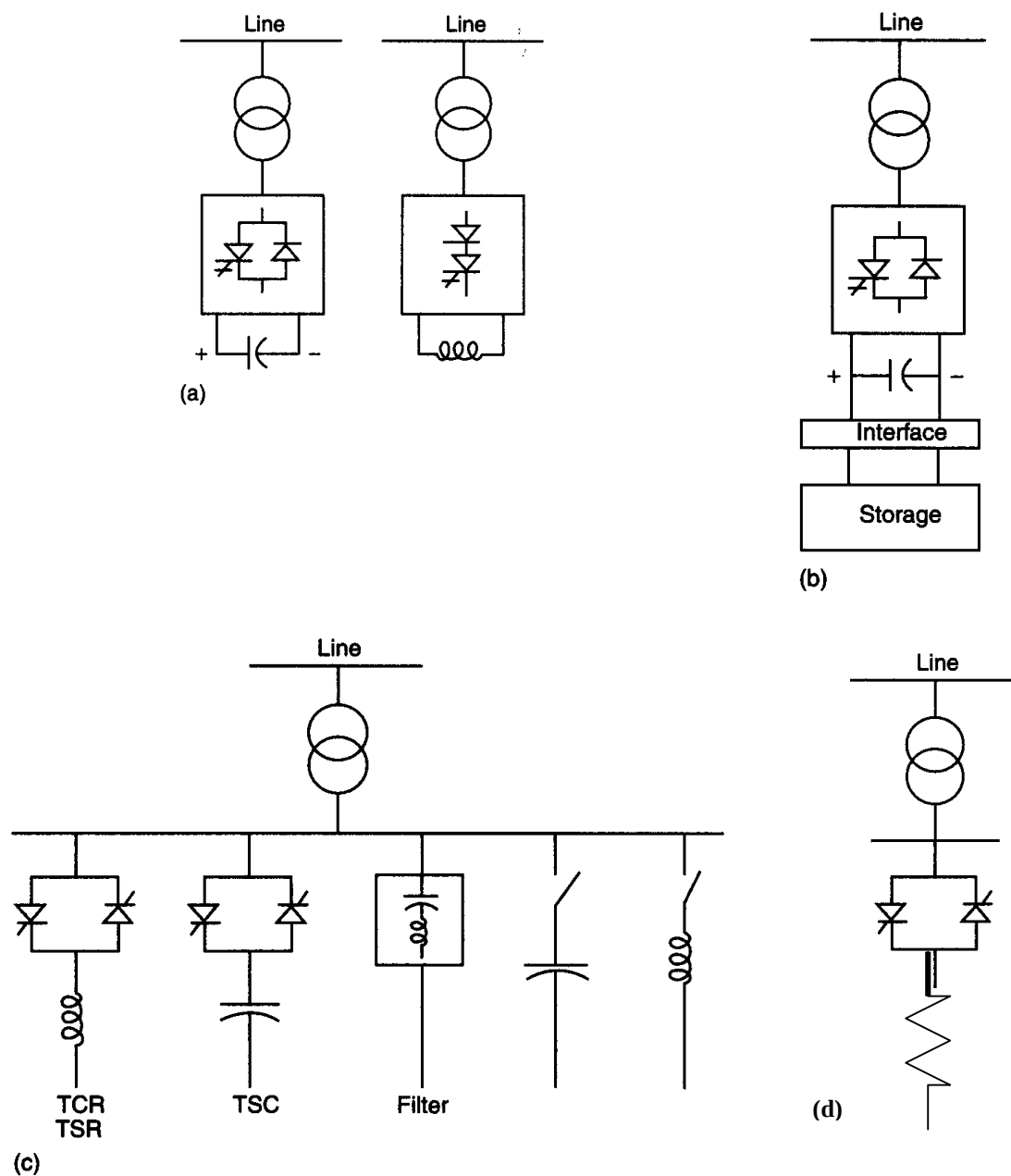


Figura 5: Controladores conectados shunt: (a) Compensador sincrónico estático (STATCOM) basado en convertidores con fuente de tensión y corriente; (b) STATCOM con almacenamiento; (c) Compensador estático de potencia reactiva (SVC), Generador estático de potencia reactiva (SVG), Sistema estático para potencia reactiva (SVS), Reactor controlado por tiristores (TCR), Capacitor conmutado por tiristores (TSC) y reactor conmutado por tiristores (TSR), (d) Resistor controlado por tiristores.

Sistema estático de control de potencia reactiva (SVS): Es una combinación de diferentes compensadores estáticos de potencia reactiva conmutados en forma mecánica y cuya salida se la realiza coordinadamente.

Resistor de frenado controlado por tiristores (TCBR): Es un resistor conmutado por tiristores conectado en shunt, el cual es controlado para colaborar con la estabilización de un sistema de potencia o para minimizar la aceleración de potencia de una unidad generadora durante una perturbación.

Los TCBR incluyen la conmutación ciclo por ciclo de un resistor (usualmente resistores lineales) con un conmutador basado en tiristores que poseen un control sobre su ángulo de encendido (figura 5(d)). Para minimizar costos, los TCBR pueden ser tiristores de conmutación sin el control sobre el ángulo de encendido. Sin embargo con el control de encendido se los puede utilizar para amortiguar en forma selectiva oscilaciones de baja frecuencia.

7.2 CONTROLADORES CONECTADOS EN SERIE

Compensador estático sincrónico conectado en serie (SSSC): Es un generador sincrónico estático operado sin una fuente de energía eléctrica externa. Actúa como un compensador serie cuya salida de tensión se encuentra en cuadratura con respecto a la corriente de línea y es además controlada independientemente de esta última, con el propósito de aumentar o disminuir la caída de tensión reactiva a lo largo de la línea y por lo tanto controlar la potencia eléctrica transmitida. El SSSC puede incluir transitoriamente componentes para almacenar o absorber energía con el objeto de mejorar el comportamiento dinámico del sistema de potencia mediante la compensación adicional temporaria de potencia activa para aumentar o disminuir momentáneamente la caída de tensión resistiva a lo largo de la línea. El SSSC es uno de los controladores FACTS más importantes. Es similar a un STATCOM, excepto que la salida de corriente alterna está en serie con la línea. Este puede basarse en una fuente de tensión con convertidor (figura 6(a)) o bien en una fuente de corriente con convertidor. Usualmente la tensión inyectada en serie debiera ser bastante más pequeña comparada con la tensión de línea y su aislamiento respecto de tierra considerablemente elevado. Con una apropiada aislación entre el primario y el secundario del transformador, el equipo convertidor se lo ubica al potencial de tierra. La relación del transformador se adopta de forma tal que permita un diseño lo más económico posible del convertidor. Sin una fuente extra de energía el SSSC puede inyectar solamente tensión variable, la cual se ubica a 90° en atraso o adelanto respecto de la corriente. El primario del transformador y en consecuencia su secundario como también el convertidor, deben tener la capacidad de transportar la corriente de línea en forma completa incluyendo la correspondiente a falla, a menos que el convertidor quede anulado temporalmente mediante un “bypass” durante las fallas severas de línea.

Baterías u otros elementos más sofisticados de almacenamiento de energía pueden conectarse a un controlador serie (figura 6(b)) para inyectar un vector de tensión con su ángulo variable en serie con la línea.

Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC): Es un compensador de reactancia capacitiva el cual consiste de un banco de capacitores en serie que incluye en forma paralela un reactor controlado por tiristores con la finalidad de proveer una variación suave de la reactancia capacitiva serie.

El TCSC (figura 6(c)) se basa en la utilización de tiristores sin la capacidad “turn off” de la compuerta. Igual que en el caso de los SSSC es un controlador FACTS muy importante. Un reactor variable tal como un reactor controlado por tiristores (TCR) se conecta a lo largo de un capacitor serie. Cuando el ángulo de disparo es de 180° , el

reactor no conduce y el capacitor serie posee su impedancia normal. Cuando el ángulo de disparo comienza a disminuir desde los 180° la impedancia capacitiva aumenta. En el otro extremo, cuando el ángulo de disparo del TCR es de 90° , el reactor obtiene la conductancia total y por lo tanto la impedancia inductiva total, la cual es diseñada de tal manera que sea mucho menor que la impedancia serie del capacitor. Con el ángulo de disparo en 90° el TCSC colabora en la limitación de la corriente de falla. El TCSC puede estar formado por una unidad simple de gran tamaño o bien puede consistir de distintas unidades iguales o de diferentes magnitudes con capacidades pequeñas con la finalidad de alcanzar un mejor funcionamiento.

Capacitor serie conmutado por tiristores (TSSC): Es un compensador de reactancia capacitiva, el cual consiste de un banco de capacitores serie que incluye en forma paralela un reactor conmutado por tiristores con la finalidad de proveer un control escalonado de la reactancia capacitiva serie.

En lugar de un control continuo de la impedancia capacitiva, este componente efectúa una conmutación del ángulo de disparo de 90° a 180° sin realizar un control continuo de dicho ángulo, lo cual reduce costos y pérdidas del controlador (figura 6(c)). Es razonable disponer en algunos casos de uno de los módulos con control de tiristores, mientras que los restantes podrían tener la posibilidad de conmutación con tiristores.

Reactor serie controlado por tiristores (TCSR): Es un compensador de reactancia inductiva, el cual consiste de un reactor serie que incluye en forma paralela un reactor controlado por tiristores con la finalidad de proveer una variación suave de la reactancia inductiva serie.

Cuando el ángulo de disparo de un reactor controlado por tiristores es de 180° , este no conduce y el reactor serie no controlado actúa como un limitador de la corriente de falla (figura 6(d)). En la medida que el ángulo disminuya por debajo de los 180° la inductancia neta disminuye hasta que el ángulo de disparo alcanza los 90° , cuando la inductancia neta es la que corresponde al paralelo de los dos reactores. Al igual que en el caso del TCSC, el TCSR puede estar formado por una unidad simple de gran tamaño o por distintas unidades pequeñas ubicadas en serie.

Reactor serie conmutado por tiristores (TSSR): Es un compensador de reactancia inductiva, el cual consiste de un reactor serie que incluye en forma paralela un reactor conmutado por tiristores con la finalidad de proveer un control escalonado de la reactancia inductiva serie.

Este es un complemento del TCSR, pero con los tiristores con la posibilidad de conmutación para permitir la conducción completa o la interrupción del servicio (sin el control del ángulo de disparo) para alcanzar una combinación en forma escalonada de la inductancia serie (figura 6(d)).

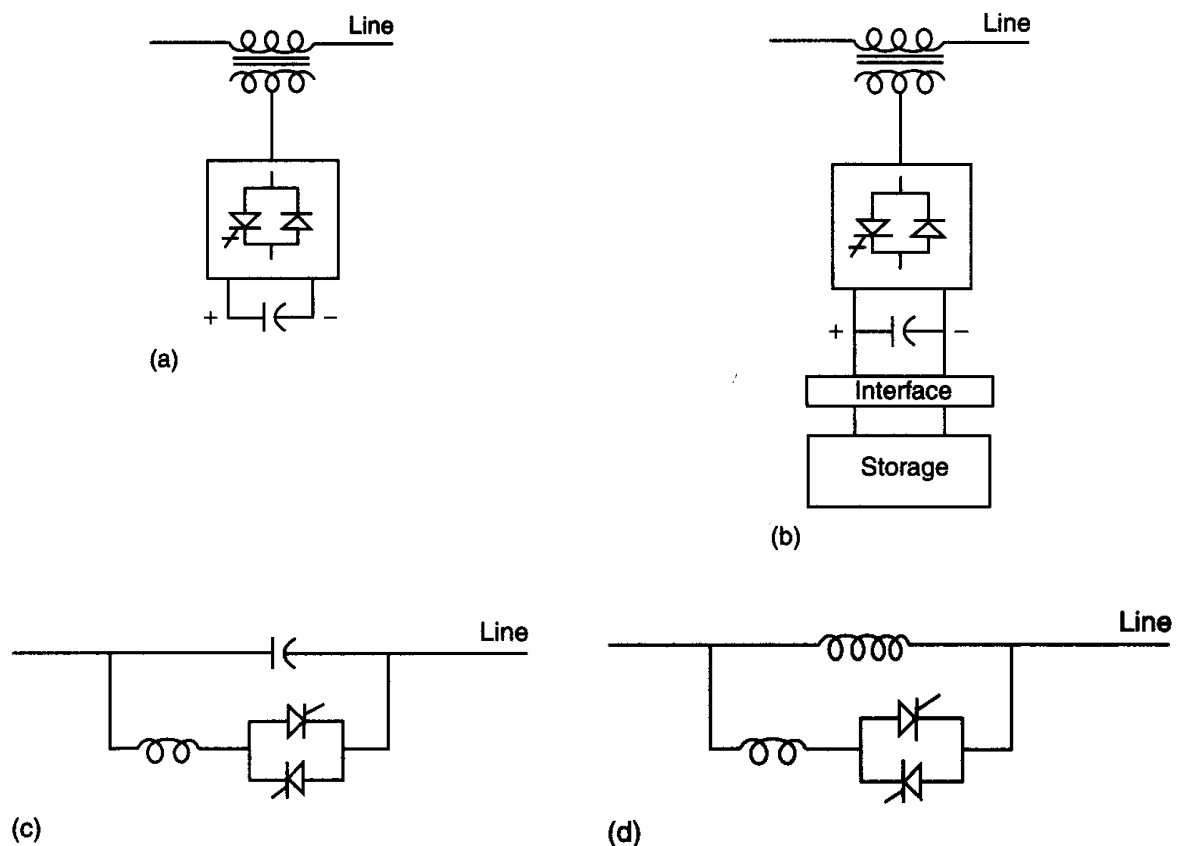


Figura 6: (a) Compensador estático sincrónico conectado en serie (SSSC); (b) SSSC con fuente; (c) Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC) y capacitor serie conmutado por tiristores (TSSC); (d) Reactor serie controlado por tiristores (TCSR) y reactor serie conmutado por tiristores (TSSR).

7.3 CONTROLADORES COMBINADOS CONECTADOS EN SHUNT Y SERIE

Controlador unificado del flujo de potencia (UPFC): Es una combinación de un compensador sincrónico estático (STATCOM) y un compensador serie estático (SSSC), los cuales se acoplan mediante un vínculo común de corriente continua para permitir un flujo bidireccional de potencia activa entre los terminales de la salida en serie del SSSC y los terminales de la salida shunt del STATCOM. Estos componentes se controlan con la finalidad de proveer en forma simultánea compensación serie de la línea tanto en la potencia activa como reactiva sin una fuente de energía externa. El UPFC debido a la inyección de tensión serie no restringida angularmente, es capaz de controlar simultáneamente o selectivamente la tensión de línea de la transmisión, la impedancia y el ángulo o bien en forma alternativa el flujo de potencia activa y reactiva en la línea. El UPFC puede proveer también independientemente compensación controlable reactiva shunt.

En el UPFC (figura 7(b)), el cual combina un STATCOM (figura 5(a)) y un SSSC (figura 6 (a)), la potencia activa para la unidad serie SSSC se obtiene desde la línea misma a través de una unidad shunt STATCOM. Esta última se utiliza también para el control de tensión con el control de su potencia reactiva. Este componente es un

controlador completo que permite controlar la potencia activa y reactiva que circula en la línea como también la tensión de línea.

La disponibilidad de elementos para almacenar energía, tal como un superconductor magnético conectado al vínculo de corriente continua mediante una interfase electrónica, podrían proveer los medios para lograr futuras mejoras en la efectividad del UPFC. Como se mencionó anteriormente, el intercambio controlado de potencia activa con una fuente externa, tal como un almacenador de energía, es mucho más efectivo para el control de la dinámica del sistema como es el caso de la modulación de la potencia transferida dentro del sistema.

Transformador desfasador controlado por tiristores (TCPST): Es un transformador desfasador ajustado por la conmutación de tiristores para proveer una variación rápida del ángulo de fase.

En general el desplazamiento de fase se obtiene mediante la adición de un vector de tensión perpendicular acoplado en serie con cada una de las fases. Este vector se obtiene desde las otras dos fases mediante un transformador conectado en shunt (figura 7(a)). La tensión serie perpendicular se puede variar mediante la utilización de componentes electrónicos de potencia. La utilización de circuitos que tienen la posibilidad de invertir la tensión, puede originar desplazamiento de fase en otras direcciones. Este controlador se lo denomina también como Regulador del ángulo de fase controlado por tiristores (TCPAR).

Controlador de potencia entre fases (IPC): Es un controlador de potencia activa y reactiva conectado en serie, el cual posee en cada fase ramas inductivas y capacitivas para controlar separadamente el desplazamiento del ángulo de las tensiones. La potencia activa y reactiva se puede fijar independientemente para ajustar el desplazamiento de fase y/o la impedancia de rama, utilizando una conmutación mecánica o electrónica. En el caso particular donde la impedancia inductiva y capacitiva forman un par conjugado, cada terminal del IPC es una fuente de corriente pasiva dependiente de la tensión en el otro terminal.

Este componente se basa en el amplio concepto del controlador serie, el cual puede diseñarse para efectuar el control de la potencia activa y reactiva.

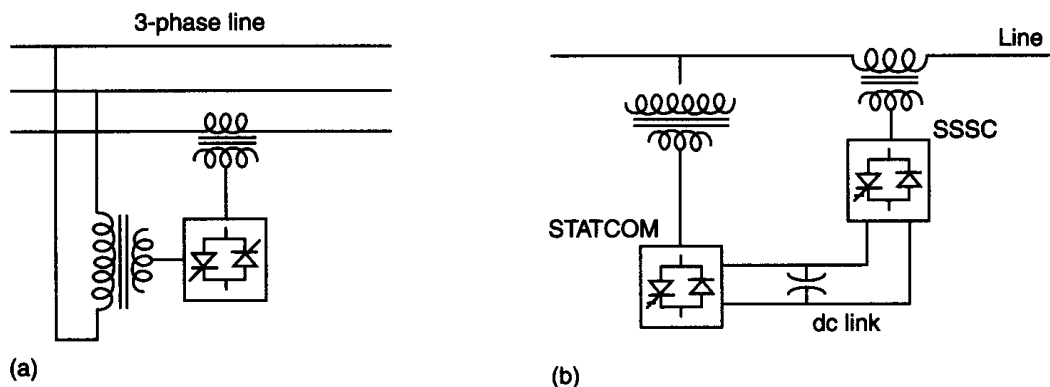


Figura 7: (a) Transformador desfasador controlado por tiristores (TCPST) o Regulador del ángulo de fase controlado por tiristores (TCPAR); (b) Controlador de flujo de potencia unificado (UPFC).

7.4 OTROS CONTROLADORES

Limitador de tensión controlado por tiristores (TCVL): Es un conmutador de tiristores con un varistor de óxido metálico (MOV) utilizado para limitar la tensión entre sus terminales durante las condiciones transitorias.

Regulador de tensión controlado por tiristores (TCVR): Es un transformador controlado por tiristores, el cual puede disponer de un control continuo para lograr una variación de la tensión de fase.

Para propósitos prácticos este componente puede ser un transformador regulable con la variación de las tomas controladas por tiristores (figura 8(b)) o bien con un convertidor de tensión (ac/ac) controlado por tiristores para inyectar tensión alterna variable de la misma fase en serie con la línea (figura 8(c)). Estos controladores son de relativamente bajo costo y pueden resultar muy efectivos en el control del flujo de potencia reactiva entre dos sistemas de corriente alterna.

Otro tipo de controles más sofisticados, no definidos aquí por su complejidad pero mencionados en el apartado 6., son aquellos que vinculan líneas de transmisión con la finalidad de balancear el flujo de potencia activa y reactiva.

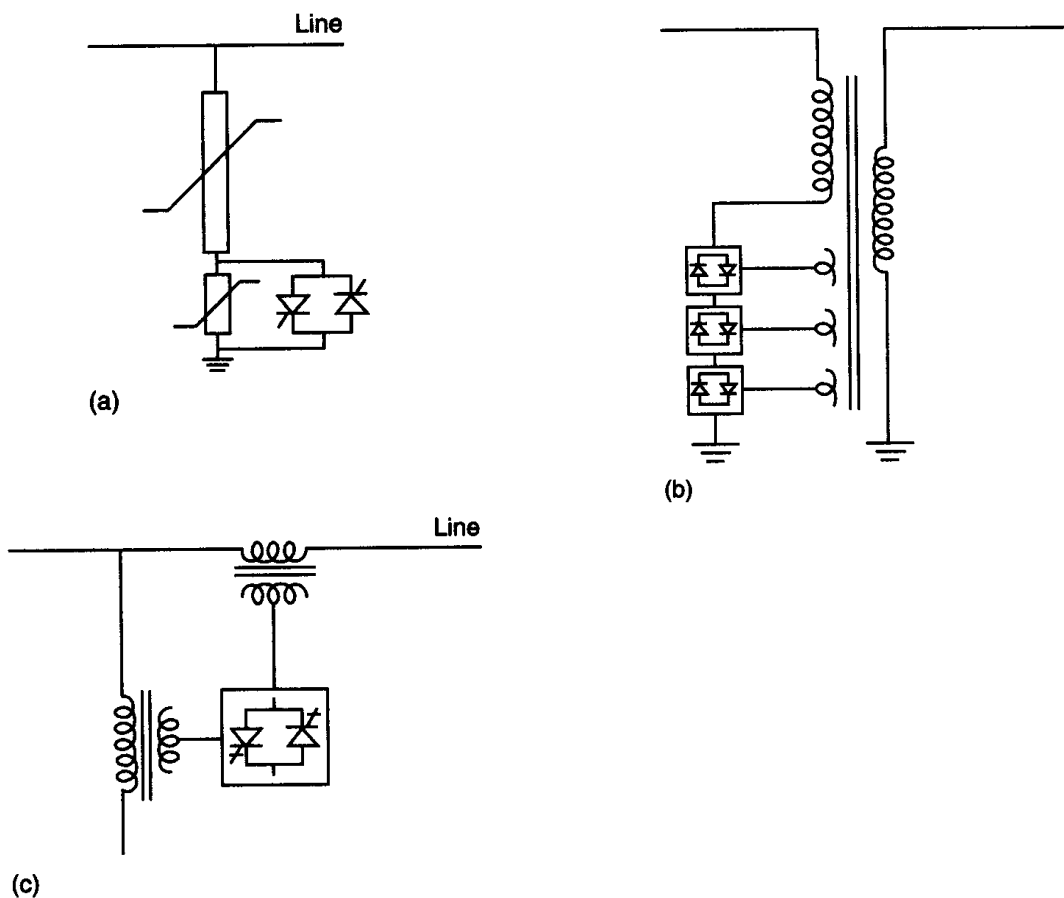


Figura 8: Otros controladores: (a) Limitador de tensión controlado por tiristores (TCVL); (b) Regulador de tensión controlado por tiristores (TCVR) basado en tomas regulables de los transformadores; (c) Regulador de tensión controlado por tiristores (TCVR) basado en la inyección de tensión.

8. AGRUPAMIENTO DE CONTROLADORES FACTS

El desarrollo de los controladores FACTS ha seguido dos propuestas técnicas diferentes, ambas resultantes en grupos de controladores capaces de resolver determinados problemas en los sistemas de transmisión. El primer grupo emplea impedancias reactivas o un transformador con tomas regulables con conmutación controlada por tiristores. El segundo grupo usa convertidores estáticos autoconmutados como fuentes de tensión controladas.

8.1 CONTROLADORES “FACTS” CONTROLADOS POR TIRISTORES:

El primer grupo de controladores incluye principalmente los siguientes y sus derivados:

- *Compensador de reactivo estático (SVC – Static VAR Compensator)*
- *Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC – Thyristor controlled series capacitor)*
- *Transformadores defasadores (PST – Phase Shifter Transformer)*

Estos controladores emplean tiristores convencionales (aquellos que no tienen habilidad turn-off) en disposiciones circuitales similares a capacitores y reactores conmutados y transformadores de tomas regulables convencionales (mecánicos). Estos controladores tienen respuesta mucho más rápida y son operados por sofisticados controles. Cada uno de estos controladores puede actuar sobre uno de los siguientes parámetros que influyen en la transmisión de potencia:

- En la tensión (SVC y sus derivados)
- En la impedancia de transmisión (TCSC y sus derivados)
- En el ángulo de transmisión (PST y sus derivados)

La Figura 9 sintetiza el modo de instalación y su efecto sobre el sistema de transmisión de estos tres controladores. Se muestra un diagrama esquemático de una interconexión CA entre dos sistemas. La potencia activa transmitida entre los sistemas es definida por la expresión conocida de la figura en función de las tensiones extremas V_s (V_1) y V_r (V_2) de ambos nodos, la reactancia X equivalente de transferencia y los ángulos de fase de las tensiones nodales extremas. Esta expresión resulta para la situación donde la relación R/X de la línea es muy pequeña, o sea se desprecia el efecto de las pérdidas activas de transmisión.

Desde la ecuación mencionada es evidente que la potencia transmitida es influenciada por tres parámetros: tensión, impedancia y diferencias de ángulos de tensión. Los aparatos FACTS pueden influenciar uno o más de estos parámetros y con ello influenciar el flujo de potencia.

Excepto el defasador (PST) o regulador de ángulo de fase controlado por tiristores (TCPAR), todos tienen la característica común en que la potencia reactiva necesaria requerida para la compensación es generada o absorbida por los tradicionales bancos de reactores o capacitores y las conmutaciones por tiristores se usan solamente para el control de la impedancia reactiva combinada. (Aunque el

defasador no posee un capacitor o reactor, no es capaz de suministrar o absorber la potencia reactiva que el intercambia con el sistema de CA). En consecuencia, los compensadores convencionales controlados por tiristores presentan a la red de transmisión una admitancia reactiva variable y por esto generalmente cambian el carácter de la impedancia del sistema. Normalmente la compensación shunt capacitiva acoplada con la impedancia inductiva del sistema provoca resonancia en la red, por encima de la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), estas se pueden presentar para la 3ra, 5ta o 7ma armónicas dominantes del SVC y del sistema de CA. La compensación capacitiva serie provoca una resonancia eléctrica por debajo de la frecuencia fundamental que puede interactuar con las resonancias mecánicas del conjunto turbina-generador causando un problema de resonancia subsincrónica en el sistema.

Las resonancias del sistema por encima y por debajo de la frecuencia fundamental pueden causar problemas significantes si ellos ocurren para frecuencias en que sea posible una excitación sostenida. Por esta razón, se emplean usualmente filtros LC en el SVC a los efectos de prevenir resonancias paralelo en las frecuencias armónicas dominantes. Por otro lado, la atenuación de la resonancia producida por la compensación serie puede requerir amortiguamiento "activo" a través del control de las válvulas de tiristores.

Desde el punto de vista de la operación funcional, el SVC y el TCSC actúan indirectamente sobre la red de transmisión. Por ejemplo, el TCSC se inserta en serie con la línea de transmisión con la finalidad de desarrollar una tensión de compensación para incrementar la tensión a través de la impedancia serie de la línea que finalmente determina la corriente de línea y la potencia transmitida. Luego la compensación serie real es inherentemente una función de la corriente de línea. Similarmente, el SVC se aplica como una impedancia shunt para producir la corriente de compensación requerida. Así, la compensación shunt provista es una función de la tensión de la línea. Esta dependencia sobre las variables de la línea (tensión y corriente) es perjudicial a la compensación cuando grandes perturbaciones fuerzan al TCSC y SVC a operar fuera de su rango de control normal.

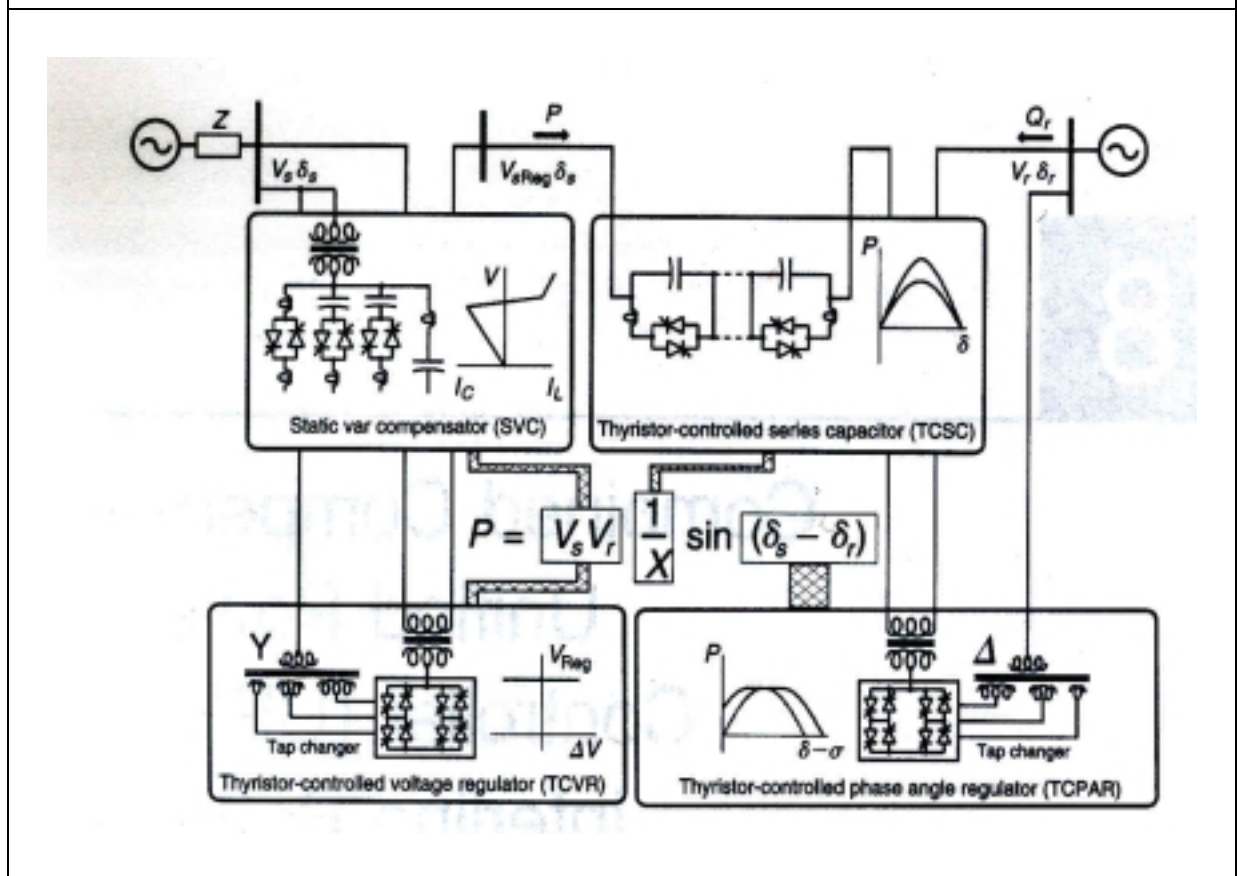
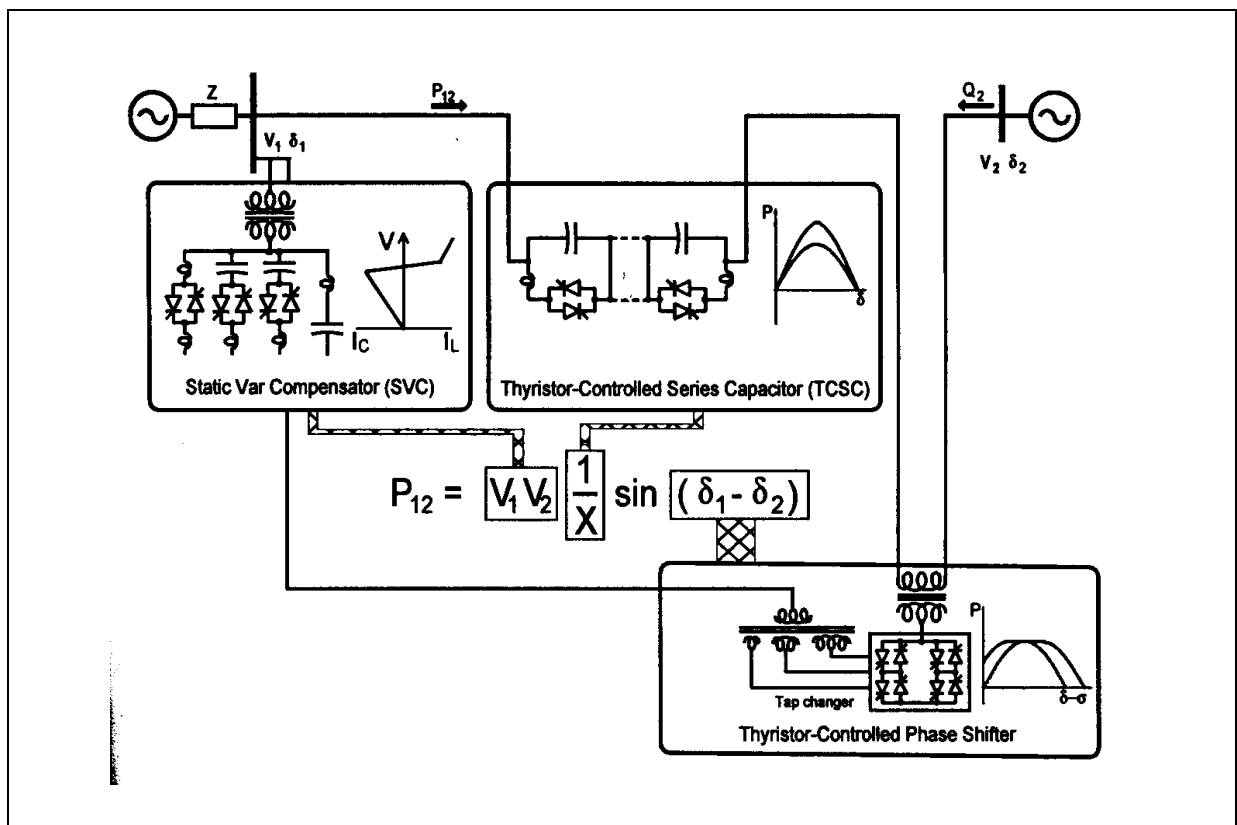


Figura 9:

Controladores FACTS convencionales basados en tiristores

8.2 CONTROLADORES “FACTS” BASADOS EN CONVERTIDORES:

El grupo de controladores FACTS discutidos en esta sección emplea convertidores conmutables de fuente de tensión para conformar en forma rápida fuentes de corriente o de tensión de CA controlables, estáticas y sincrónicas. Esta alternativa, comparada a los métodos de compensación convencional que emplean capacitores conmutados por tiristores y reactores controlados por tiristores, proveen generalmente características de performance superior y una aplicabilidad uniforme para el control de la tensión de transmisión, de la impedancia efectiva de línea y del ángulo de transmisión. Esta alternativa también ofrece un potencial único para intercambiar potencia activa directamente con el sistema de CA adicionalmente a la provisión de compensación de potencia reactiva controlable. Esto brinda una potente nueva opción para el control de flujo de potencia y para contramedidas ante perturbaciones dinámicas.

La fuente de tensión sincrónica (SVS – Synchronous Voltage Source) que se ha considerado, es análoga a una máquina sincrónica rotativa ideal que genera un conjunto de tres tensiones senoidales balanceadas a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo de fase controlable. Esta máquina ideal no tiene inercia, su respuesta es casi instantánea, no altera significativamente la impedancia del sistema y puede generar internamente potencia reactiva tanto capacitiva como inductiva. Además ella puede intercambiar potencia activa con el sistema de CA si está acoplada a una apropiada fuente de energía que pueda suministrar o absorber la potencia que ella suministra al sistema de CA o absorba del sistema de CA.

Un modelo funcional de una fuente de tensión sincrónica basada en convertidores conmutables se muestra esquemáticamente en la Figura 10. Las señales de referencia Q_{ref} y P_{ref} definen la amplitud V y la fase ψ de la tensión senoidal de salida que se genera y de ese modo el intercambio de potencia activa y reactiva entre la fuente de tensión y el sistema de CA. Si no se requiere la función de intercambio de potencia activa ($P_{ref}=0$), la fuente SVS se convierte en una fuente de potencia reactiva autosuficiente como si fuera un compensador sincrónico ideal. En este caso la fuente de energía externa o equipamiento de almacenamiento de energía se puede eliminar.

La fuente de tensión sincrónica facilita una función forzada para compensación de la línea de transmisión y el control de flujo de potencia. Esto es, la fuente SVS puede aplicar una tensión definida para forzar una corriente de línea deseada (o una corriente definida para forzar una tensión deseada en terminales). En contraste con las alternativas de impedancia controlada la compensación aplicada que provee la fuente SVS es marcadamente independiente de las variables de la red (corriente, tensión, ángulo) y así ella se puede mantener mejor cuando se producen grandes perturbaciones en el sistema (por ejemplo, grandes caídas de tensión, oscilaciones de corriente y ángulos, etc.).

La fuente SVS es una fuente de tensión de alterna (con una salida senoidal) la cual, con entradas de control fijas, operaría solamente a la frecuencia fundamental. Su salida en otras frecuencias serían teóricamente cero. La fuente SVS posee también la capacidad inherente de ejecutar un flujo de potencia activa bidireccional entre sus

terminales de CA y CC. De esta manera, es posible vincular los terminales de CC de dos o más fuentes SVS y con ello establecer caminos para la transferencia de potencia activa entre barras y/o líneas seleccionadas de la red de transmisión. Con las combinaciones apropiadas de fuentes SVS una única instalación de controlador FACTS sería capaz de controlar independientemente el flujo de potencia activa y reactiva en líneas individuales.

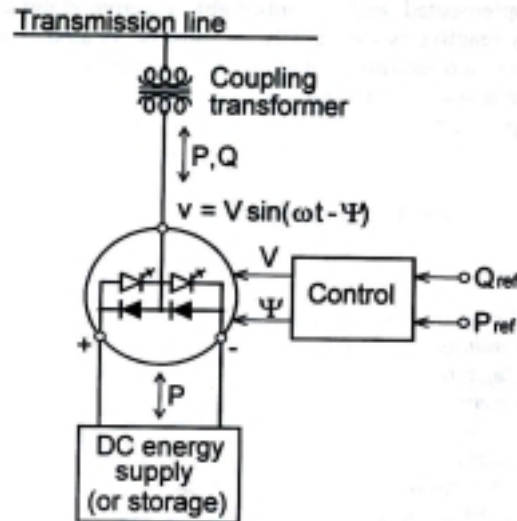


Figura 10:

Fuente de tensión sincrónica basada en convertidores conmutables en una conexión shunt

El grupo de controladores FACTS que emplean fuentes de tensión sincrónicas basada en convertidores conmutables se muestra con su objetivo de control funcional en la Figura 11.

En ella se distinguen:

- *Compensador Sincrónico Estático*
(STATCOM – Static Synchronous Compensator)
Este controlador es la contraparte del convencional SVC. Controla la tensión de transmisión por compensación reactiva shunt.
- *Compensador Serie Sincrónico Estático*
(SSSC – Static Synchronous Series Compensator)
Provee compensación serie controlando directamente la tensión a través de la impedancia serie de la línea de transmisión y de ese modo controlando la impedancia efectiva de transmisión.
- *Controlador de Flujo de Potencia Unificado*
(UPFC – Unified Power Flow Controller)
Puede controlar individualmente o en combinación los tres parámetros efectivos de transmisión (tensión impedancia y ángulo) o directamente el flujo de potencia activa y reactiva en la línea.

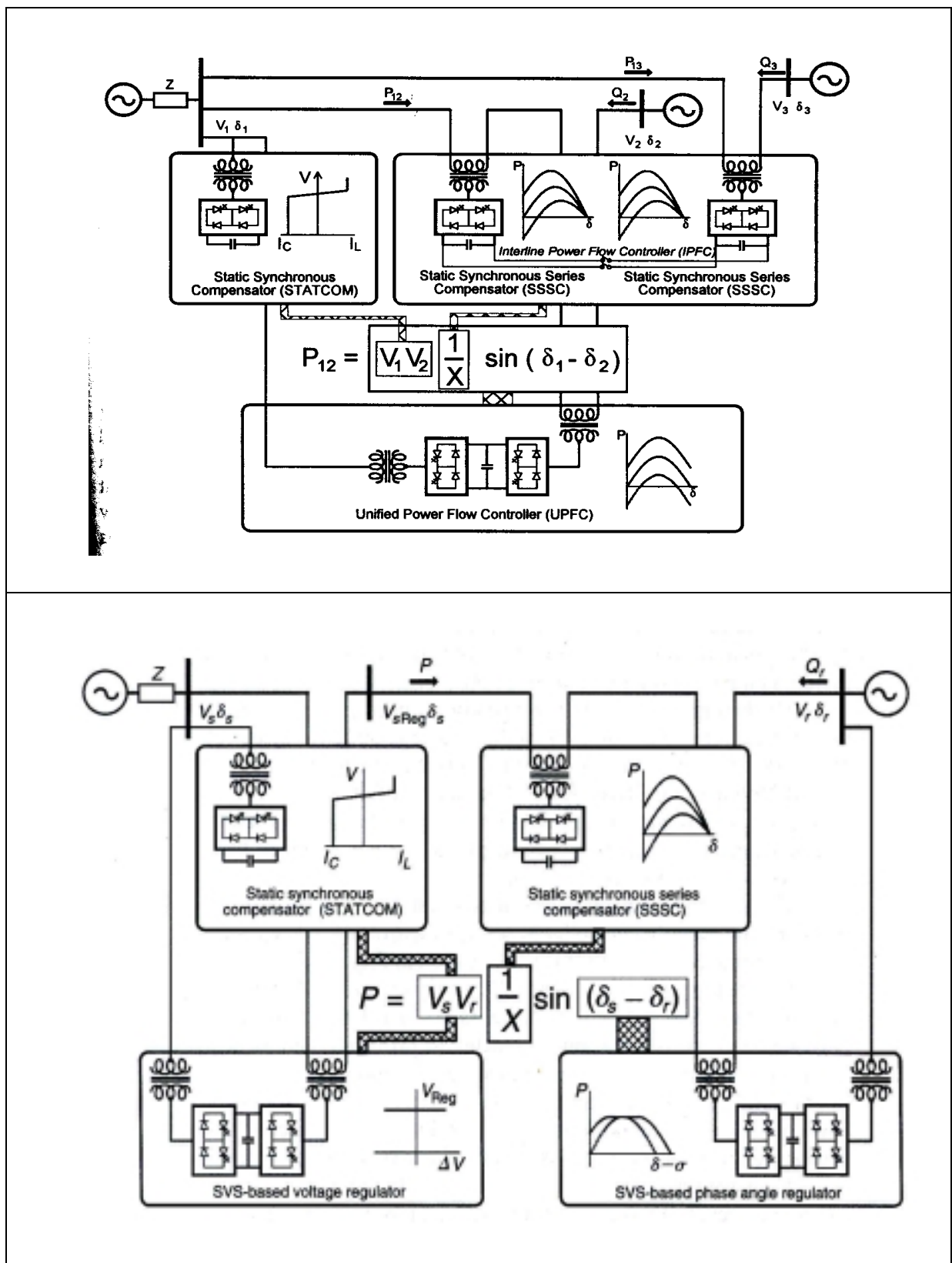


Figura 11:

Familia de controladores FACTS basados en convertidores conmutables

- *Controlador de Flujo de Potencia entre líneas*

(IPFC – Interline Power Flow Controller)

Es capaz de transferir potencia activa entre líneas además de proveer compensación serie reactiva. Por esto puede facilitar un manejo completo de la potencia activa y reactiva para un sistema de transmisión de varios circuitos.

Fuente de tensión sincrónica (SVS) basada en convertidores conmutables.

La fuente de tensión sincrónica estática se puede implementar a través de varios convertidores de potencia conmutables. En esta parte se realiza un breve resumen del convertidor de fuente de tensión multipulso usado actualmente en las aplicaciones FACTS.

En la Figura 12a. se muestra un convertidor de fuente de tensión elemental de 6 pulsos. Este consiste de seis conmutaciones semiconductoras autoconmutadas (usualmente tiristores con puerta de encendido y apagado GTO Gate-Turn-Off), cada una de las cuales está en paralelo con un diodo conectado en reversa. En convertidores de alta potencia cada aparato de conmutación puede consistir de una cadena de semiconductores conectados en serie para lograr la tensión nominal requerida. El convertidor puede producir, con una fuente de tensión de CC (que puede ser un capacitor cargado), un conjunto balanceado de tres ondas de tensión de forma casi cuadradas para una frecuencia dada. En la Figura 12b se observan las ondas obtenidas al conectar la fuente de CC secuencialmente a los tres terminales de salida con las conmutaciones de convertidor que correspondan.

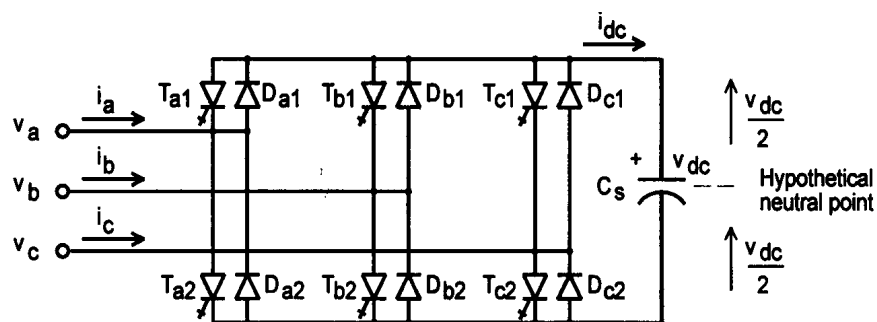
Varios de los convertidores elementales se pueden operar desde la misma fuente de CC, cada uno produciendo un conjunto de tres ondas de tensión de forma casi cuadrada. Generando estas ondas de tensión con apropiados desplazamientos de fase sucesivas y sumando estas ondas obtenidas se puede obtener una onda de tensión multipulso. Con un número suficiente de convertidores elementales se puede aproximar la forma de la onda de salida a una onda senoidal como es lo deseado.

En la Figura 13a. se muestra esquemáticamente la estructura de un posible convertidor multipulso. Se ilustran las formas de onda de corriente y tensión de salida para una disposición de convertidor de 48 pulsos que emplea 8 convertidores de 6 pulsos elementales en la Figura 13b. Como puede observarse para 48 pulsos, lo cual representaría una elección práctica para aplicaciones de sistemas de potencia, la corriente de salida es esencialmente una onda senoidal. El convertidor se puede considerar para todos los propósitos prácticos como una fuente de tensión senoidal.

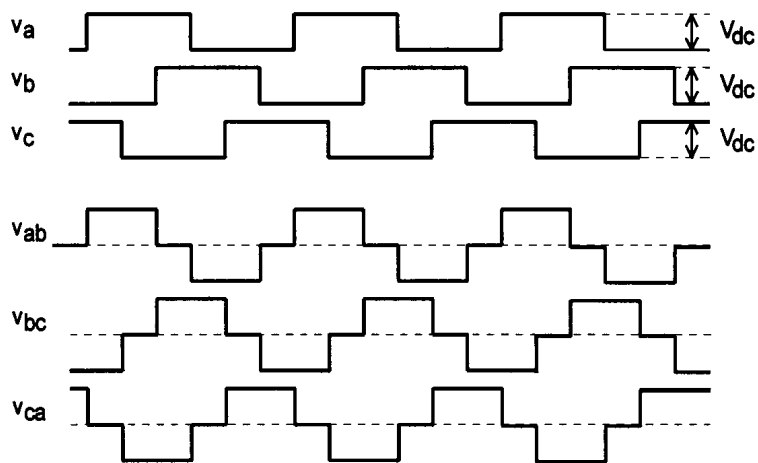
El intercambio de potencia reactiva entre el convertidor y el sistema de CA (Figura 10) se puede controlar por variar la amplitud de la tensión de salida trifásica que se produce. Si la amplitud de la tensión de salida se incrementa por encima de la del sistema de CA, luego la corriente fluye a través de la reactancia desde el convertidor al sistema de CA y el convertidor genera potencia reactiva para el sistema de CA. Por el contrario, si la amplitud de la tensión de salida decrece por debajo de la tensión del sistema de CA, la corriente fluye desde el sistema de CA al convertidor y

con ello éste consume potencia reactiva. Si la tensión de salida es igual a la tensión del sistema de CA, la potencia reactiva intercambiada es cero.

Similarmente, el intercambio de potencia activa entre el convertidor y el sistema de CA se puede controlar a través del defasaje entre la tensión de salida del convertidor y la tensión del sistema de CA. El convertidor suministra potencia activa al sistema de CA desde su energía almacenada en la fuente de CC, si la tensión de salida del convertidor adelanta a la tensión correspondiente del sistema de CA. De la misma manera, el convertidor absorbe potencia activa del sistema de CA para almacenamiento de energía en la fuente de CC, si la tensión de salida del convertidor atrasa respecto a la tensión del sistema de CA.



(a)

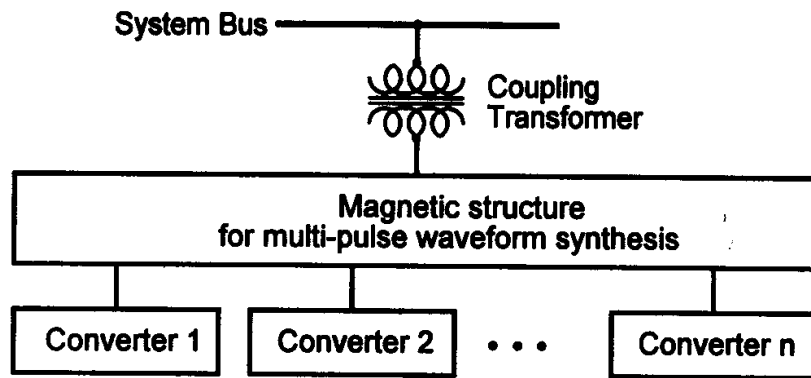


(b)

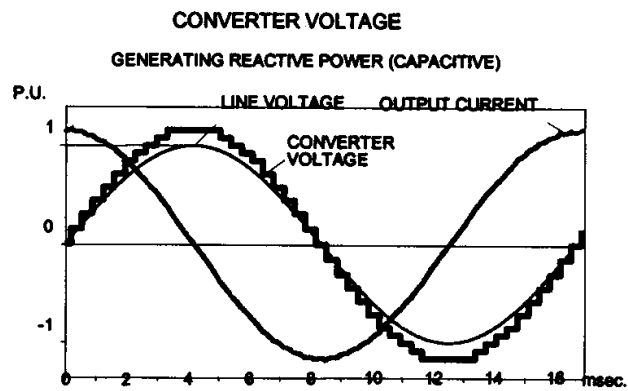
Figura 12:

a) Convertidor elemental de 6 pulsos

b) Ondas de tensión de salida



(a)



(b)

Figura 13:

- a) Estructura de un convertidor multipulso generalizado
- b) Formas de onda de salida de 48 pulsos ($n=8$)

9. BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA FACTS

Dentro de los lineamientos básicos de seguridad del sistema los controladores FACTS podrían permitir a los propietarios de los sistemas de transmisión obtener uno o más de los siguientes beneficios:

- Control del flujo de potencia. El uso del control de flujo de potencia puede suceder debido al cumplimiento de un determinado contrato, necesidades propias de operación de las empresas, asegurar flujos de potencia óptimos, estrategias para control de emergencias, o combinación de ellas.
- Incremento de la capacidad de carga de las líneas acercándolas a sus capacidades térmicas. Esta capacidad varía dentro de un amplio rango de acuerdo a las condiciones de medio ambiente y la historia de carga.
- Incremento de la seguridad del sistema a través del mejoramiento del límite de estabilidad transitoria, limitación de corrientes de cortocircuito y sobrecargas, manejo de cortes en cascada y amortiguación de oscilaciones electromecánicas de sistemas de potencia y máquinas.
- Provisión de interconexiones más seguras entre áreas o empresas vecinas guiando esto a un decrecimiento de los requerimientos de reserva de generación en ambos lados.
- Provisión de una mayor flexibilidad para la instalación de nueva generación.
- Actualización de viejas líneas.
- Reducción de flujos de potencia reactiva permitiendo el mayor transporte de potencia activa.
- Reducción de circulación de flujos en mallas.
- Incremento en la utilización de generación de menor costo. Una de las principales razones de las interconexiones de transmisión es el uso de generación de costos inferiores. Esto puede verse afectado por la no disponibilidad de suficiente capacidad de transmisión. El mejoramiento de esta capacidad de transmisión permitiría incrementar el uso de generación de bajo costo.

Varios de estos beneficios resultan solapados. En la realidad el planteo de cualquiera de los objetivos planteados puede ser la justificación para la elección de un determinado controlador FACTS.

Ya que la tensión, corriente, impedancia, potencia activa y potencia reactiva se encuentran interrelacionadas cada controlador tiene múltiples atributos en cuanto a lo que ellos pueden hacer para controlar la tensión, el flujo de potencia, la estabilidad, etc. Estos controladores pueden tener múltiples controles de lazo abierto y cerrado. En la Tabla 1 se muestra una lista de controladoras FACTS y sus atributos de control. La lista no es exhaustiva, existen controladores adicionales o mixtos que no se exponen. El grado de controlabilidad, en particular el control de estabilidad y de flujo de potencia, varía de controlador a controlador.

Tabla 1: Atributos de control para varios controladores FACTS

Controlador FACTS	Atributos de control	Diagrama
Compensador Sincrónico Estático sin almacenamiento de energía. (STATCOM without storage)	- Control de tensión. - Compensación de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad de tensión	5 (a)
Compensador Sincrónico Estático con almacenamiento de energía. (STATCOM with storage)	- Control de tensión. - Compensación de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión - Control automático de generación (AGC)	5 (b)
Compensador de Reactivo Estático (SVC, TCR, TCS, TRS)	- Control de tensión. - Compensación de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión	5 (c)
Resistor de Frenado controlado por Tiristores (TCBR)	- Amortiguación de oscilaciones. - Estabilidad transitoria y dinámica.	5 (d)
Compensador Serie Sincrónico Estático sin almacenamiento de energía. (SSSC without storage)	- Control de corriente. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión - Limitador de corriente de falla.	6 (a)
Compensador Serie Sincrónico Estático con almacenamiento de energía. (SSSC with storage)	- Control de corriente. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión.	6 (b)
Capacitor Serie Controlado por Tiristores (TCSC, TSSC)	- Control de corriente. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión - Limitador de corriente de falla.	6 (c)
Reactor Serie Controlado por Tiristores (TCSR, TSSR)	- Control de corriente. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión - Limitador de corriente de falla.	6 (d)

Transformador Defasador Controlado por Tiristores (TCPST)	- Control de potencia activa. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión.	7 (a)
Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC)	- Control de potencia activa. - Control de potencia reactiva. - Control de tensión. - Compensación de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión. - Limitador de corriente de falla.	7 (b)
Limitador de Tensión Controlado por Tiristores (TCVL)	- Limite de tensión transitoria. - Limite de tensión dinámica.	8 (a)
Regulador de Tensión Controlado por Tiristores (TCVR)	- Control de tensión. - Control de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión	8 (b) 8 (c)
Controlador de flujo de Potencia entre Líneas (IPFC)	- Control de tensión. - Control de potencia reactiva. - Amortiguación de oscilaciones - Estabilidad transitoria y dinámica. - Estabilidad de tensión	4 (d)

10. CONCLUSIONES

Los equipamientos FACTS pueden dividirse en elementos serie, paralelo y serie-paralelo. El impacto de los elementos serie sobre el control de flujo de potencia activa es mucho mayor comparado con los elementos shunt. Los elementos serie son también más efectivos en la amortiguación de oscilaciones de potencia y en el mejoramiento de la estabilidad transitoria. Los elementos shunt se usan principalmente para el control de tensión y pueden tener funciones de control de amortiguación de oscilaciones.

La Tabla 2 resume el grado de impacto de los principales controladores FACTS sobre determinados atributos de control. La tabla solo considera las habilidades técnicas del equipamiento. El UPFC ofrece la mejor performance para todos los problemas discutidos en sistemas de potencia. Sin embargo, el planteo de todos estos requerimientos para un mismo equipo puede guiar a un valor nominal muy elevado del equipamiento.

El impacto de los controladores FACTS es diferente en sistemas de transmisión extensos y en sistemas mallados interconectados. En sistemas extensos el TCSC ofrece ventajas si se compara su efectividad relacionada al valor nominal y complejidad del equipo. En sistemas mallados el flujo de potencia activa se puede controlar efectivamente por controladores de otro tipo tal como el IPC. El UPFC puede sin embargo controlar también el flujo de potencia reactiva. En tales redes es menos conveniente el uso de los TCSC.

El impacto de los equipos FACTS serie es menos sensible a la ubicación que los equipos shunt. Esto es válido tanto para sistemas extensos como para sistemas mallados. Para equipos shunt, la elección óptima de la ubicación es importante a los efectos de lograr mejor efectividad.

La efectividad de los equipamientos FACTS depende estrechamente de la configuración del sistema. La decisión final puede ser tomada solo luego de efectuar estudios y análisis detallados que tengan en cuenta la instalación de varios controladores FACTS.

Tabla 2: Grado de impacto de los principales controladores FACTS sobre distintos atributos de control

Control/Controlador	SVC	SVG	TCSC	TCPS T	UPFC	IPC
Control de tensión	***	***	*	*	***	-
Control de flujo de carga	-	-	*	***	***	***
Estabilidad transitoria	*	*	***	**	***	-
Amortiguamiento de oscilaciones (sistemas extensos)	*	*	***	**	***	-
Amortiguamiento de oscilaciones (sistemas mallados)	*	*	*	**	***	-

Referencias:

- : Sin influencia o influencia despreciable.
- * : Influencia pequeña.
- ** : Influencia media.
- *** : Influencia fuerte.