

Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna

Francisco D. Pérez A.

Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria
Universidad Tecnológica de Panamá
francisco.perez@utp.ac.pa

Resumen: *en el presente trabajo se describe, a grandes rasgos, qué son los Sistemas de Transmisión Flexibles en Corriente Alterna, mejor conocidos como dispositivos FACTS. Se hace una descripción de sus usos y aplicaciones en el sistema eléctrico de potencia, especialmente en el área de transmisión de energía eléctrica. Adicionalmente, se presenta una clasificación de estos dispositivos según su tipo de conexión y según su aplicación en la red eléctrica de potencia.*

Palabras claves: *compensador estático, FACTS, Flujo de Potencia, SVC, TCSC, UPFC.*

Title: *Flexible Alternating Current Transmission Systems.*

Abstract: *The present work describes Flexible Alternating Current Transmission Systems, better known as FACTS devices. Their use and application in electric power systems are discussed, especially in the area of electric energy transmission. Additionally, a classification of these devices is presented according to the type of connection and application in electric power networks.*

Keywords: *FACTS, power flow, static compensator, SVC, TCSC, UPFC.*

1. Introducción

El uso de la tecnología de dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) ha tenido un gran auge en los últimos años dado el actual escenario del sector eléctrico, que se presenta en un constante proceso de desregulación buscando crear un mercado realmente competitivo.

Lo anterior ha llevado a los sistemas eléctricos a realizar funciones para los que no estaban originalmente diseñados, es decir, ya no sólo se requiere que los generadores muy distantes giren en sincronismo y transmitan la energía en forma coordinada respetando los límites físicos impuestos por la red, sino que la operación debe ser llevada a cabo de forma que se mantenga y se mejore la seguridad de los sistemas de potencia durante y después del proceso de desregulación de las empresas.

En los últimos años, se ha dificultado la transmisión de la energía eléctrica debido a que existen cada vez restricciones más severas para el uso de derecho de vía.

Adicionalmente a esto, se deben construir líneas de gran longitud en ciertos casos, lo que introduce problemas de transporte de potencia a gran distancia, de estabilidad dinámica y de voltaje y de controlabilidad del flujo.

Otra motivación para el acelerado uso de los FACTS es el ambiente competitivo entre las empresas eléctricas, ya que el potencial de esta tecnología se basa en la posibilidad de controlar la ruta de flujo de potencia y la habilidad de conectar redes que no estén adecuadamente interconectadas, dando la posibilidad de comercializar energía entre agentes distantes donde antes no era posible.

No obstante, el uso masivo de los FACTS no ha rendido sus frutos debido a las restricciones de seguridad, disponibilidad y costo de los componentes.

2. ¿Qué son los FACTS?

Los sistemas de transmisión y distribución de las empresas eléctricas han comenzado un período de cambio, debido principalmente a la aplicación de la electrónica de potencia, microprocesadores y comunicaciones en general. Esto los ha llevado a una operación más segura, controlable y eficiente.

En esta área se han llevado a cabo diversas investigaciones, las que han conducido al desarrollo de los FACTS, dispositivos que abarcan al conjunto de equipos con capacidad de controlar el flujo de potencia o variar características de la red, empleando semiconductores de potencia para controlar el flujo de los sistemas de corriente alterna, cuyo propósito es dar flexibilidad a la transmisión de la energía sobre la base de dos objetivos principales:

- Incrementar la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas de transmisión.
- Mantener el flujo en las trayectorias de la red para que se establezcan de acuerdo a las distintas condiciones operativas. Esto permite mejorar la eficiencia del sistema debido a:
- Un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiéndolo a través de las rutas predeterminadas.
- La operación con niveles de carga seguros (sin sobrecarga), y cercano a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas con lo que el margen de reserva en generación puede reducirse considerablemente.
- Prevención de salidas de servicio en cascada, limitando el efecto de fallas en el sistema y equipos.
- El amortiguamiento de las oscilaciones del sistema de potencia, que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.

Los sistemas de control de los FACTS están basados en la posibilidad de manejar los parámetros interrelacionados que restringen los sistemas (impedancias serie y paralelo, ángulo de fase, oscilaciones a frecuencias subsíncronas), permitiendo además operar las líneas de transmisión cerca de sus límites térmicos, lo que anteriormente no era posible sin violar las restricciones de seguridad del sistema.

Cada sistema de las empresas posee redes de potencia eléctrica que integran sus centros de generación y cargas, las que a su vez se interconectan con los sistemas vecinos. Esto permite compartir potencia entre las redes de regiones alejadas, con el propósito de aprovechar la diversidad de las cargas, debido a diferencias de clima y horario, disponibilidad de diversas reservas de generación en zonas

geográficas distintas, cambios en precios del combustible y en la regulación, etc.

Para facilitar gran parte de las transferencias de potencia, estas redes interconectadas ayudan a minimizar la necesidad de aumentar las plantas de generación y permiten a empresas y regiones vecinas comprar y vender energía entre ellas. Esto lleva a una operación segura y a más bajo costo.

En los últimos años, la demanda eléctrica ha crecido y seguirá creciendo considerablemente, unido a un aumento en la competencia en el sector generación. La gran dificultad que ha surgido es la adquisición de nuevos "derechos de vía". Los FACTS pueden aportar en este caso, permitiendo una mejor utilización de las líneas ya existentes, aumentando su capacidad útil por medio de modificaciones de la impedancia y del ángulo de fase.

El flujo de potencia entre dos puntos a través de una línea de transmisión está dado por:

$$P_{ij} = V_i * V_j * \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \right] \quad (1)$$

De esta expresión se desprende que la potencia que fluye por una línea no depende de los propietarios, de los contratos ni de los límites térmicos, sino más bien de los parámetros físicos de la red: voltaje en los extremos de la línea (V_i, V_j), impedancia de la línea (x_{ij}) y ángulos de fase de voltaje y corriente (θ_i, θ_j) que se presenta al comienzo y al final de cada línea por el camino posible. Esto conlleva la dificultad de transmitir flujos de potencia a través de caminos determinados.

La diferencia entre una ruta directa y la determinada por la red se denomina: "flujo de anillo", y se caracteriza por una circulación de potencia que disminuye la capacidad disponible de la línea.

Las principales ventajas de los dispositivos FACTS son:

- Permiten bloquear flujos en anillo indeseados. Esto posibilita aumentar la capacidad de las líneas en un 20-40% cuando de otra manera un "cuello de botella" en éstas obligaría a reducir la capacidad de flujo a través de ellas.
- Posibilitan la operación de las líneas a valores cercanos a sus límites térmicos, manteniendo o mejorando la seguridad y confiabilidad en el sistema. Esto permite a las empresas ahorrar dinero mediante la mejor utilización de sus activos (cables y quipos en general) acomodándose al aumento de demanda de energía y potencia por parte de los clientes.
- Facilitan responder rápidamente a los cambios en las condiciones de la red para proveer un control del flujo de potencia en tiempo real, el cual es necesario cuando se produce un gran número de transacciones en un mercado eléctrico completamente desregulado.

3. Tipos de FACTS

Existe un gran número de dispositivos FACTS con distintas constituciones, no obstante, su principio de funcionamiento no suele ser complicado y en muchos de ellos se deriva de la simple aplicación de la electrónica a equipos conocidos tradicionalmente. Por ello, se puede dividir a los FACTS en base a su concepción en dos

grandes grupos: FACTS derivados de la aplicación de "conmutadores electrónicos" a equipos tradicionales y FACTS basados en la aplicación de "convertidores".

En cuanto a sus acciones sobre el sistema se clasifican en: dispositivos de compensación en serie, dispositivos de compensación en paralelo, derivación o "shunt", y dispositivos desfasadores.

3.1. Compensadores en serie

Podemos encontrar dos tipos de controladores. En primer lugar el control se hace por separado pero de modo coordinado en un sistema de múltiples líneas. O, como se muestra en la figura, el centro de control es unificado y permite entregar la compensación reactiva serie requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas mediante el DC Power Link. Esta capacidad de controlar el tránsito de potencia activa se conoce como Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas que hace posible balancear el flujo de las potencias reactivas y activas en las líneas de transmisión y mediante esto, maximizar la utilización y capacidad de transporte de las mismas.

Como su nombre lo indica, en este grupo se encuentran los controladores que se conectan en serie al elemento específico (una línea de transmisión, por ejemplo) y que pueden ser impedancias variables tales como capacitores o reactores, o una fuente variable construida en base a elementos electrónicos de potencia que entreguen una señal de voltaje a frecuencia primaria, subsíncrona o a las frecuencias armónicas deseadas. Mientras la señal de voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador consumirá o entregará sólo potencia reactiva. En cualquier otro caso se verá involucrado un manejo de potencia activa.

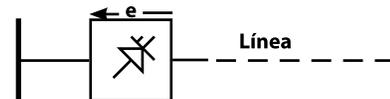


Figura 1. Diagrama equivalente de la compensación serie.

La compensación en serie inserta energía reactiva en la línea de transmisión. Mediante esto se logra acortar virtualmente las líneas. Como consecuencia, el ángulo de transmisión se reduce, y la transferencia de energía se puede aumentar sin la reducción de la estabilidad del sistema.

Dentro de los elementos a que encontramos en este grupo están:

- Compensadores Estáticos Síncronos Serie (SSSC).
- Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas (IPFC).
- Capacitor Serie Controlado por Tiristores (TCSC).
- Capacitor Serie Encendido por Tiristores (TSSC).
- Reactor Serie Controlado por Tiristores (TCSR).
- Reactor Serie Encendido por Tiristores (TSSR).

3.2. Compensadores en paralelo

La compensación en paralelo (*shunt*) consiste en suministrar potencia reactiva a la línea, para aumentar la transferencia de potencia activa, manteniendo los niveles de tensión dentro de los

rangos aceptables de seguridad. Tal como los controladores series, los elementos que se pueden conectar son los mismos, y la diferencia es que inyectan señales de corriente al sistema en el punto de conexión. El manejo de potencia activa mediante estos elementos está condicionado por los ángulos de desfase, del mismo modo que los controladores serie.

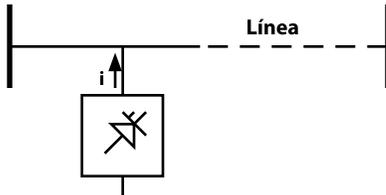


Figura 1.4. Diagrama equivalente de la compensación en paralelo.

En este grupo están:

- Compensadores Estáticos Síncronos (STATCOM).
- Generador Estático Síncrono (SSG).
- Sistema de Almacenaje de Energía en Baterías (BESS).
- Almacenaje de Energía en Superconductores Magnéticos (SMES).
- Compensador Estático de Reactivos (SVC).
- Reactor Controlado por Tiristores (TCR).
- Reactor Encendido por Tiristores (TSR).
- Capacitor Encendido por Tiristores (TSC).
- Generador (o Consumidor) Estático de Reactivos (SVG).
- Sistema Estático de VARs (SVS).
- Resistor de Freno Controlado por Tiristores (TCBR).

3.3. Compensadores combinados serie-serie

Podemos encontrar dos tipos de controladores. En primer lugar el control se hace por separado pero de modo coordinado en un sistema de múltiples líneas. O, como se muestra en la figura, el centro de control es unificado y permite entregar la compensación reactiva serie requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas mediante el DC Power Link. Esta capacidad de controlar el tránsito de potencia activa se conoce como Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas hace posible balancear el flujo de las potencias reactivas y activas en las líneas de transmisión y mediante esto, maximizar la utilización y capacidad de transporte de las mismas.

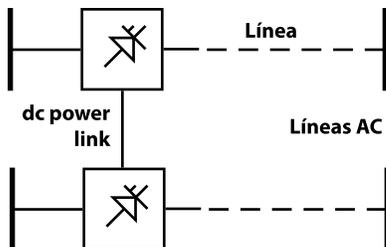


Figura 1.7. Diagrama del controlador unificado de potencia.

3.4. Compensadores combinados serie-paralelo

Del mismo modo que la combinación serie-serie, también se pueden operar de dos maneras. La primera mediante una combinación de controladores serie y paralelo controlados coordinadamente como se muestra a continuación:

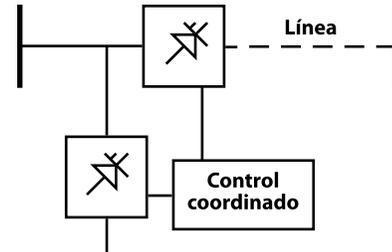


Figura 1.8. Diagrama de la compensación serie-paralelo.

O mediante un Controlador de Flujo de Potencia Unificado, que tal como en el caso anterior, posee la capacidad de agregar transferencia de potencia activa entre líneas si es necesario, mediante el DC Power Link.

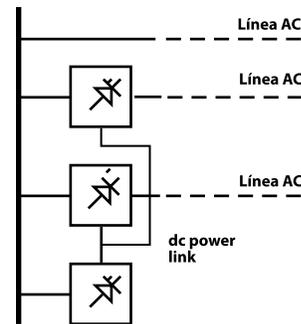


Figura 1.9. Diagrama del controlador unificado de potencia.

Dentro de los controladores serie-paralelo encontramos:

- Controladores de Flujo de Potencia Unificados (UPFC).
- Transformador Cambiador de Fase Controlado por Tiristores (TCPST).
- Regulador de Ángulo de Fase Controlado por Tiristores (TCPAR)
- Controlador de Potencia de Interfase (IPC).

Existen otros controladores que no están en el marco de los grupos descritos y que son los siguientes:

- Limitador de Voltaje Controlado por Tiristores (TCVL), que es un varistor controlado por Tiristores usado para limitar la tensión entre sus terminales durante condiciones transientes.
- Regulador de Voltaje Controlado por Tiristores (TCVR), que corresponde a un transformador controlado por tiristores que puede proveer voltaje variable con control continuo.

4. Ventajas

Las ventajas que ofrecen las familias de controladores descritos anteriormente son muchas y de varios tipos, y cada uno de estos elementos presenta una o más de las siguientes características:

- Control del flujo de potencia según se requiera, lo que permite

optimizar las capacidades de las líneas y moverse bajo condiciones de emergencia más adecuadamente.

- Aumentan la capacidad de carga de las líneas hasta su límite térmico, tanto en horizontes de corto plazo como estacionario.
- Aumentan la seguridad del sistema en general a través del aumento del límite de estabilidad transitoria, limitando corrientes de cortocircuitos y sobrecargas, ofreciendo la posibilidad de controlar apagones (blackouts) en cascada y absorbiendo oscilaciones electromecánicas de sistemas de potencia y máquinas eléctricas.
- Proveen conexiones seguras a instalaciones y regiones vecinas al mismo tiempo que reducen las exigencias generales de reservas de generación.
- Entregan mayor flexibilidad en la locación de nuevas unidades generadoras.
- Permiten mejorar los niveles de uso de las líneas.
- Reducen los flujos de potencia reactiva en las líneas de transmisión, y por lo tanto, una mayor capacidad de transporte de potencia activa.
- Reducen los flujos de potencia en anillo (loop flows).
- Incrementan la utilización de la generación de menor costo.

De cualquier modo, éstos controladores permiten la amplia variedad de capacidades descritas anteriormente debido a que el voltaje, corriente, impedancia, potencia activa y reactiva son variables interrelacionadas, por lo que cada controlador tiene múltiples opciones para el control de flujo de potencia, estabilidad, etc. tanto en lazo abierto como cerrado, por lo que las posibilidades son muchas.

5. Limitaciones

La gran versatilidad y la amplia gama de prestaciones que un elemento de transmisión flexible introduce a un sistema interconectado o sector cualquiera no son competitivas en precio con las soluciones más tradicionales. Claramente las mayores limitaciones estarán dadas por sus costos, que son comparativamente mayores a lo que podría resultar la instalación de una nueva línea en el caso de requerirse más capacidad de transmisión, por ejemplo. En este caso, los FACTS

trabajan con potencia reactiva lo que les da un rango de manejo menor al que si, por ejemplo, se duplicara una línea de transmisión, ya que aparte de mejorar la capacidad de potencia al doble, reduce la impedancia a la mitad del par transmisor, lo que otorga una mayor flexibilidad, a un precio menor. A medida que la tecnología de la electrónica de potencia se haga más accesible en cuanto a precios se podrán obtener más aplicaciones factibles en un sistema como el nuestro, pero por lo pronto hay que esperar.

6. Conclusiones

El término FACTS, aplicado a los sistemas eléctricos, engloba distintas tecnologías que mejoran la seguridad, capacidad y seguridad de las redes existentes de transporte, a la vez que mantienen o mejoran los márgenes operativos necesarios para la estabilidad de la red. Como consecuencia, puede llegar más energía a los consumidores con un impacto mínimo en el medio ambiente, con plazos de ejecución de los proyectos sustancialmente inferiores y con inversiones más reducidas. Todo ello en comparación con la alternativa de construir nuevas líneas de transporte o nuevas plantas generadoras.

Las dos razones principales para incorporar equipos FACTS a los sistemas eléctricos son: elevar los límites de estabilidad dinámica y mejorar el control de flujo de energía.

La mejora del funcionamiento de las redes eléctricas es cada día más importante por razones económicas y medioambientales. Los dispositivos FACTS son la solución mejor establecida en el mercado para mejorar la utilización de las líneas de transmisión.

Referencias

- [1] N. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System", IEEE, New York, 2000.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [3] P. M. Anderson & A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Computer Society Publisher, 1994.
- [4] E. Acha, C.R. Fuente-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Ángeles-Camacho, "FACTS, Modelling and Simulation in Power Networks", Jhon Wiley & Sons Ltd 2004.