

## **FACTS: SOLUCIONES MODERNAS PARA LA INDUSTRIA ELÉCTRICA**

### **INTRODUCCIÓN**

En el pasado los sistemas eléctricos de potencia eran relativamente simples y diseñados para ser autónomos. Actualmente los sistemas de potencia constan de una gran cantidad de interconexiones, no sólo entre compañías prestadoras de servicio eléctrico pertenecientes a un país, sino, también, entre sistemas de diferentes países; esto obedece principalmente a cuestiones de carácter económico y de seguridad en la operación del sistema [1, 2, 4, 7, 8].

Aunado a esto, la industria eléctrica viene experimentando cambios acelerados a nivel mundial, entre los cuales se encuentra las reformas estructurales del mercado eléctrico. Las nuevas estructuras requieren que la potencia eléctrica sea transportada a través de líneas de transmisión definidas; sin embargo, las redes convencionales de los sistemas de potencia no pueden proveer las expectativas futuras de flexibilidad en el control de la potencia. En los últimos años la demanda en los sistemas de potencia ha aumentado y seguirá incrementándose, lo que conlleva a una serie de problemas como sobrecarga y sub-utilización del potencial de transmisión, cuellos de botella, y oscilaciones de potencia. El costo de líneas de transmisión, así como las dificultades que se presentan para su construcción, su localización, derecho de vía, etc., a menudo limitan la capacidad de transmisión, lo cual ha motivado el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten mitigar estos inconvenientes [2, 4, 7, 8].

### CONCEPTO DE SISTEMAS FLEXIBLES DE TRANSMISIÓN DE CA (FACTS)

Los sistemas de potencia convencionales, especialmente las líneas de transmisión, se dice que son inflexibles, debido a que ofrecen poca o nula posibilidad de control en el flujo de potencia, ya que los parámetros y la configuración de la red son fijos. Además, la red tiene una respuesta lenta ante contingencias, lo cual dificulta el control del flujo de potencia del sistema en términos de velocidad y versatilidad [2, 4, 7-8]. Esto se debe a que los sistemas eléctricos de potencia en la actualidad están primordialmente controlados por elementos mecánicos, que son lentos y requieren mantenimiento continuo debido a que presentan desgaste.

El flujo de potencia entre dos puntos a través de una línea de transmisión sin pérdidas está dado por la siguiente relación:

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

donde:

$P_{ij}$  es la potencia real o activa transferida a través de la línea de transmisión que conecta los nodos  $i - j$ .

$V_i$  y  $V_j$ , son la magnitud del voltaje en los nodos  $i - j$ , respectivamente.

$\theta_{ij}$  es la diferencia angular entre los nodos terminales.

$X_{ij}$  es la reactancia de la línea de transmisión.

Esto es, la potencia que fluye por una línea depende de los parámetros de la red: voltaje en los extremos de la línea, reactancia de la línea y la diferencia angular entre los voltajes extremos. En sistemas de potencia convencionales, el parámetro  $X_{ij}$  no es controlable, sin embargo, es posible ajustar dentro de un margen estrecho los parámetros  $V_i$ ,  $V_j$  y  $\theta_{ij}$  para controlar el flujo de potencia.

La filosofía de los *sistemas de transmisión flexibles de CA (FACTS)*, desarrollada en los ochenta, es el uso de dispositivos electrónicos basados en elementos de estado sólido como diodos, tiristores y GTO, para modificar los parámetros señalados y con ello controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión, lo cual permite utilizar las líneas cerca de sus límites térmicos y/o forzar los flujos de potencia por rutas determinadas. Los tiristores presentan ventajas sobre los dispositivos de conmutación mecánicos, como la capacidad de rápida conmutación, además de poder utilizarse para re-direccionar la potencia en una fracción de ciclo. Esta ventaja permite, por ejemplo, amortiguar oscilaciones de potencia, lo cual

no puede lograrse con el empleo de controladores mecánicos. Además, los dispositivos de conmutación mecánicos tienden a desgastarse, mientras que los controladores basados en tiristores pueden conmutar dos veces cada ciclo sin deteriorarse.

Debido a la rapidez en su operación, estos dispositivos también pueden ser utilizados para impactar positivamente en los problemas dinámicos del sistema [1]. La característica principal de los controladores FACTS, es la capacidad que tienen para modificar los parámetros del sistema, lo cual permite controlar el flujo de potencia. Esto se logra porque:

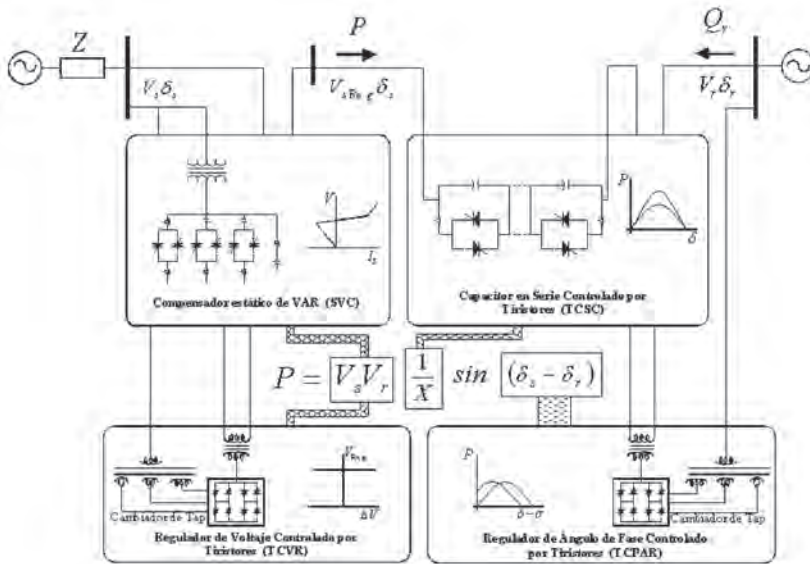
- Al controlar la impedancia de la línea  $X_{ij}$ , a través de compensación serie o utilizando FACTS, se puede controlar la corriente, así como la potencia activa.
- El control del ángulo, permite verificar el flujo de corriente.
- Inyectar un voltaje en serie con la línea y con cualquier ángulo de fase, puede controlar la magnitud y la fase de la corriente de línea y, por lo tanto, se puede controlar la potencia activa y reactiva de forma más precisa.
- La combinación del control de la impedancia de línea con un controlador serie, y la regulación de voltaje con un controlador en derivación, puede ser una medida efectiva para controlar el flujo de potencia real y reactiva entre dos subsistemas.

Los controladores FACTS ofrecen oportunidades sin precedentes para regular la transmisión de CA, incrementando o disminuyendo el flujo de potencia en líneas específicas, y respondiendo de manera casi instantánea a los problemas de estabilidad angular. Por esta razón se han denominado *sistemas flexibles de transmisión de CA*.

De acuerdo con la IEEE la definición de estos dispositivos es [2], “Sistema de transmisión de corriente alterna que incorpora controladores estáticos y otros basados en electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia.”

En la figura 1.1 se representa el efecto de estos dispositivos FACTS.

El concepto de FACTS es relativamente nuevo, no obstante, incluye a los compensadores estáticos de VAR, los cuales han sido utilizados desde los años setenta. De hecho, fueron utilizados por primera vez en el control de un sistema de transmisión de CA en 1978 [3], en un proyecto conjunto de EPRI (Electric Power Research Institute) y la Minnesota Power and Light. Sin embargo, para algunos controladores FACTS que se están utilizando actualmente no se tiene la experiencia con la que se cuenta con otros dispositivos, teniendo como consecuencia los riesgos asociados a la nueva tecnología. A pesar de esto, la mayoría de los controladores FACTS tienen muchas características en común con aquellos que ya han sido probados, lo cual es un gran apoyo para su utilización.



**Figura 1.1** Representación gráfica del efecto de los dispositivos FACTS [2]

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

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

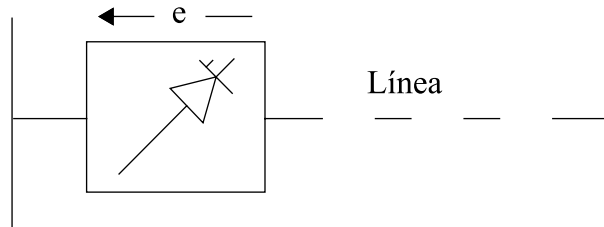
interconectadas; dando la posibilidad de comerciar energía entre agentes distantes, que anteriormente era muy complicado.

#### Clasificación en función de la conexión

Existen diferentes formas de clasificar los dispositivos FACTS, una de ellas es en función de la conexión de los dispositivos. Así, estos se pueden dividir de manera general en cuatro grandes categorías [2,4]:

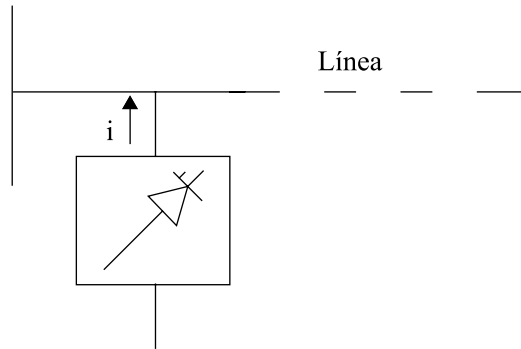
- Controladores serie.
- Controladores en derivación.
- Controladores serie-serie.
- Controladores serie-derivación.

*Controlador serie:* el controlador serie, mostrado esquemáticamente en la figura 1.2, puede consistir en una impedancia variable como un capacitor, reactor, etc., o una fuente variable basada en electrónica de potencia a frecuencia fundamental. El principio de operación de todos los controladores serie, es el de inyectar un voltaje en serie con la línea. Una impedancia variable, multiplicada por la corriente que fluye a través de ella, representa un voltaje en serie inyectado a la línea. Mientras el voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador serie sólo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa.



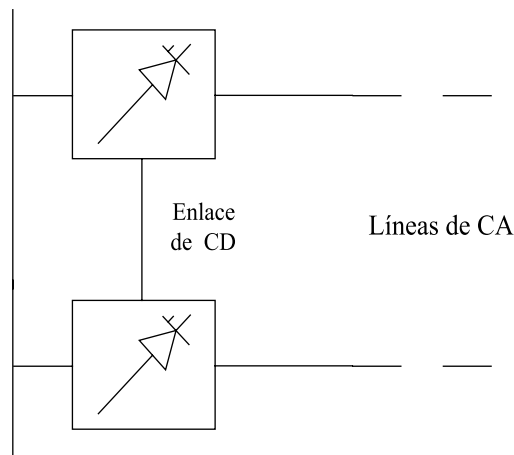
**Figura 1.2** Diagrama esquemático de un controlador serie

*Controlador en derivación:* al igual que con el controlador serie, el controlador en derivación puede consistir de una impedancia variable, fuente variable, o una combinación de ambas; en la figura 1.3 se muestra en forma esquemática. El principio de operación de todos los controladores en derivación, es inyectar corriente al sistema en el punto de conexión. Una impedancia variable conectada al voltaje de línea causa un flujo de corriente variable, por lo tanto, representa una inyección de corriente a la línea. Mientras que la corriente inyectada esté en cuadratura con el voltaje de línea, el controlador en derivación sólo aporta o consume potencia reactiva; cualquier otro ángulo de fase representa manejo de potencia activa.



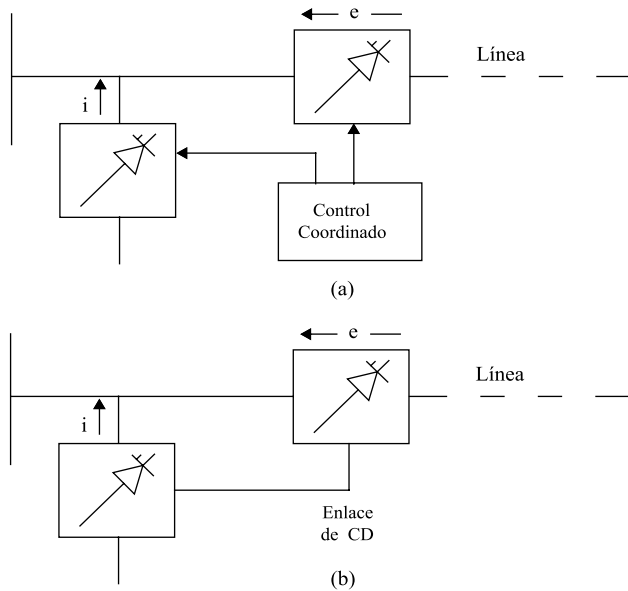
**Figura 1.3 Diagrama esquemático de un controlador en derivación**

*Controlador serie-serie:* este tipo de controlador puede ser una combinación de controladores serie separados, controlados de manera coordinada en un sistema de transmisión multilínea, o puede también ser un controlador unificado en el que los controladores serie proveen compensación reactiva serie para cada línea, además de transferencia de potencia activa entre líneas a través del enlace de potencia; el diagrama esquemático se muestra en la figura 1.4. La capacidad de transferencia de potencia activa que presenta un controlador serie-serie unificado, llamado controlador de flujo de potencia interlínea, hace posible el balance de flujo de potencia activa y reactiva en las líneas, y de esta manera maximiza el uso de los sistemas de transmisión. En este caso el término *unificado* significa que las terminales de CD de los convertidores de todos los controladores se conectan para lograr una transferencia de potencia activa entre sí.



**Figura 1.4 Diagrama esquemático de un controlador serie-serie**

*Controlador serie-derivación:* este dispositivo puede ser una combinación de controladores en derivación y serie separados, controlados de manera coordinada, o un controlador de flujo de potencia unificado con elementos serie y en derivación. El principio de operación de los controladores serie-derivación es inyectar corriente al sistema a través del componente en derivación del controlador, y un voltaje en serie con la línea utilizando el componente serie. Cuando los controladores serie y en derivación son unificados puede haber un intercambio de potencia activa entre ellos a través de su enlace; en la figura 1.5 se muestra el diagrama esquemático de este tipo de controladores.



**Figura 1.5 a) Controlador coordinado serie-paralelo  
b) Controlador unificado serie-paralelo**

Los controladores FACTS también pueden clasificarse en dos grupos tomando como referencia la función de sus principales elementos. El primer grupo utiliza elementos reactivos y transformadores cambiadores de taps controlados por tiristores. Dentro de este grupo se encuentran:

SVC	Compensador estático de VAR.
TCVR	Regulador de voltaje controlado por tiristores.
TCPAR	Regulador de ángulo de fase controlado por tiristores.
TCSC	Capacitor en serie controlado por tiristores.

El segundo grupo utiliza convertidores de voltaje auto-conmutados que actúan como fuentes estáticas de voltaje síncrono (VSC). A este grupo corresponden:

StatCom	Compensador estático síncrono.
SSSC	Compensador serie estático síncrono.
IPFC	Controlador de flujos de potencia interlínea.
UPFC	Controlador unificado de flujos de potencia.

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

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

A excepción del cambiador de fase controlado por tiristores, los demás controladores tienen una característica común, la potencia reactiva requerida para la compensación es generada o absorbida por bancos de capacitores y reactores, y los tiristores se utilizan únicamente para controlar la impedancia reactiva combinada, que estos bancos representan en el sistema de potencia. En consecuencia, los compensadores convencionales controlados por tiristores representan una admitancia reactiva variable en la red de transmisión y, por lo general, cambian la impedancia del sistema. Típicamente, la compensación capacitiva en derivación acoplada a la impedancia inductiva del sistema, resulta en una resonancia por encima de la frecuencia fundamental, que puede ser a las frecuencias armónicas dominantes del SVC (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>) y del sistema de potencia, o cerca de ellas [2, 4, 7-8]. La compensación capacitiva serie resulta en una resonancia eléctrica por debajo de la frecuencia fundamental y puede interactuar con las resonancias mecánicas de los sistemas turbina-generador que alimentan la línea, lo cual puede provocar una resonancia subsíncrona total del sistema (SSR) [2].

Desde el punto de vista de la operación funcional, el SVC y el TCSC actúan indirectamente en la red de transmisión. El TCSC se inserta en serie con la línea, con el propósito de aportar un voltaje de compensación para incrementar el voltaje a través de la impedancia serie de la línea, la cual determina la corriente de línea y la potencia transmitida. Así, la compensación serie es inherentemente una función de la corriente de línea. Similarmente, el SVC se aplica como una impedancia en derivación para producir la corriente de compensación requerida [4]. La compensación en derivación es una función del voltaje de línea. Esta dependencia de las variables de línea (voltaje y corriente), es perjudicial para la compensación cuando grandes disturbios llevan al TCSC y al SVC a operar fuera de su rango normal de control [2].



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

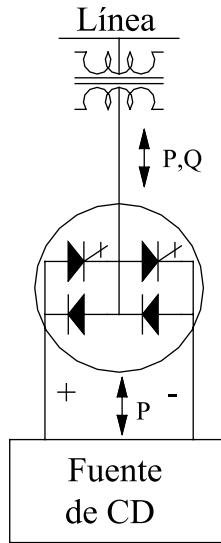
El segundo grupo de controladores FACTS emplea fuentes convertidoras de voltaje auto-conmutadas para proporcionar rápidamente, de forma controlable y estática, fuentes síncronas de voltaje y corriente. Este enfoque cuando se compara con los métodos de compensación convencionales que emplean capacitores y reactores conmutados por tiristores, generalmente provee características superiores de desempeño. Además tiene la opción de intercambiar potencia activa directamente con el sistema de CA, así como de proveer control independiente en la compensación de potencia reactiva [4].

La fuente de voltaje síncrona (VSC) es análoga a una máquina síncrona ideal, la cual genera un conjunto balanceado de tres voltajes senoidales a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo de fase controlados; su diagrama esquemático se muestra en la figura 1.6. Esta máquina ideal no tiene inercia, su respuesta es prácticamente instantánea, no altera significativamente la impedancia existente del sistema, y puede generar internamente potencia reactiva (capacitiva e inductiva). Además, puede intercambiar potencia activa con el sistema de CA si está acoplada a una fuente de energía apropiada que pueda proveer o absorber la potencia requerida por el sistema de CA [4].

Si la función de intercambio de potencia real no se requiere, la VSC se convierte en una fuente de potencia reactiva autosuficiente, y la fuente de energía externa puede eliminarse.

La VSC puede aplicar un voltaje específico para forzar la corriente de línea deseada (o una corriente específica para forzar el voltaje terminal deseado). En contraste con el enfoque de impedancia controlada, la compensación aplicada por una VSC se mantiene independiente de las variables de la red (corriente de línea, voltaje o ángulo), y así puede mantenerse durante disturbios grandes del sistema (por ejemplo, abatimientos de voltaje, oscilaciones de potencia y ángulo) [2].

La VSC es una fuente de voltaje alterna que, con entradas de control adecuadas, opera solamente a la frecuencia fundamental. Su impedancia de salida a otras frecuencias, en teoría, será cero. Consecuentemente, la VSC, en contraste con los compensadores de tipo impedancia, es incapaz de formar un circuito resonante serie o paralelo con la red de transmisión de CA [4]. En la figura 1.6, se presenta el diagrama esquemático de una fuente de voltaje síncrona.



*Figura 1.6 Diagrama esquemático de una fuente de voltaje síncrona (VSC)*

#### **Ventajas en la utilización de dispositivos FACTS**

Las siguientes son las principales ventajas que representan el uso de dispositivos FACTS.

- Permiten un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiéndolo a través de rutas predeterminadas.
- Se puede operar con niveles de carga seguros (sin sobrecarga) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas, con lo que el margen de reserva en generación puede reducirse considerablemente.
- Incrementan la seguridad del sistema al aumentar el límite de estabilidad transitoria, limitando las corrientes de cortocircuito y sobrecargas, previniendo salidas en cascada, y limitando el efecto de otras fallas en el sistema y equipos.
- Amortiguar oscilaciones del sistema de potencia que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.
- Responder rápidamente a los cambios en las condiciones de la red para proveer un control del flujo de potencia en tiempo real.
- Proveen una mayor flexibilidad en la localización de nuevas plantas generadoras.
- Proporcionan seguridad en las conexiones a través de las líneas de enlace entre empresas y regiones vecinas.

Una propiedad particular de los FACTS es la gran flexibilidad que presentan en los tres estados operativos del sistema de potencia: prefalla, falla y postfalla. La capacidad para controlar transitorios y para impactar rápida y significativamente el estado de postfalla los hace sumamente atractivos [5].

### ASPECTOS OPERATIVOS

En un sistema eléctrico de potencia se presentan contingencias como: pérdida de generación, de carga, de una o varias líneas, etc.; una vez que éstas se liberan mediante la operación de interruptores, relevadores u otros dispositivos de protección, el sistema queda en un estado llamado de postfalla; si éste es aceptable el sistema se dice *seguro*.

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

La habilidad que presentan los dispositivos FACTS de controlar transitorios y de afectar rápida y significativamente el estado siguiente inmediato a una falla, con frecuencia significa que el impacto que tienen las restricciones impuestas a éste en las operaciones del sistema, en estado normal, se pueden minimizar, dejando una región de operación de prefalla mayor para optimizar aspectos económicos. Así, un sistema que se diseña adecuadamente con un margen de operación suficiente, hace posible satisfacer seguridad y economía durante su operación [5].

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

Otro de los aspectos que también deben tomarse en cuenta es que los FACTS, así como cualquier otro componente en el sistema, introduce

modos de oscilación en su comportamiento, tornándose más complejo de operar; esto puede conducir a interacciones no deseadas entre equipos. Debido a esto, debe preverse la coordinación de todos los controladores en el sistema incluyendo aquellos de los dispositivos FACTS, haciendo cada vez más complejo el control del sistema de potencia.

Así, pues, la inclusión de este tipo de elementos al sistema de potencia ofrece una serie de ventajas en diferentes aspectos como el económico, entre otros, pero también trae consigo mayor complejidad, que deben tenerse en cuenta para la operación segura del sistema.

### LOCALIZACIÓN

Existen tres factores importantes a considerar cuando se ha tomado la decisión de instalar un dispositivo FACTS:

- El tipo de dispositivo.
- La capacidad requerida.
- La ubicación que optimice el funcionamiento del dispositivo dependiendo de su aplicación.

De estos factores, el último es de suma importancia, ya que la ubicación de los FACTS depende del efecto deseado y de las características propias del sistema. Por ejemplo, si se desea evitar el flujo en anillo<sup>1</sup>; primero debe identificarse el anillo y después ubicar el dispositivo en una de sus líneas de transmisión para forzar el flujo en la manera deseada. Ahora bien, si se desea mejorar la operación económica del sistema al incrementar la capacidad de transmisión de potencia, el dispositivo FACTS se puede ubicar en una línea subutilizada, aumentando el flujo a través de ella, o bien, colocarlo en la línea más cargada para limitar el flujo por la misma, permitiendo mayor flujo por el resto del sistema.

Otro aspecto a tener en cuenta es la selección de las señales de retroalimentación para estos dispositivos, ya que esta información es de vital importancia para el diseño de estabilizadores basados en dispositivos FACTS. El criterio para la selección ha sido la capacidad máxima de los estabilizadores para amortiguar las oscilaciones en el sistema de potencia. Sin embargo, para un buen diseño de los estabilizadores, además de su máxima eficiencia, un factor relevante es la robustez de los estabilizadores ante diferentes condiciones de operación del sistema de potencia. Esto significa que en la etapa de selección de la localización y las señales de retroa-

---

<sup>1</sup> La diferencia entre una ruta directa y la determinada por la red se denomina “flujo en anillo”, que se caracteriza por una circulación de potencia que disminuye la capacidad disponible de la línea.

limentación, se debe examinar no sólo la efectividad de los estabilizadores en condiciones típicas de operación, sino también su robustez sobre otras condiciones de operación [6].

#### REFERENCIAS

- [1] J.M. Ramírez, I. Coronado, P. Zúñiga, R. Dávalos, A. Valenzuela, I Castillo, *Control de un red eléctrica de potencia. Avance y perspectiva*, Vol. 19, Nov-Dic, 2000, pp. 347-357.
- [2] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, primera edición, IEEE Press, 1999.
- [3] S. L. Nilsson, *Security Aspects of Flexible AC Transmission System Controller Applications*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 173-179, 1995.
- [4] Yong Hua Song, Allan T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, primera edición, IEE Power and Energy Series 30, 1999.
- [5] B. Avramovic, L. H. Fink, *Energy Management Systems and control of FACTS*, Electrical Power & Energy Systems, vol. 17, no. 3, pp. 195-198, 1995.
- [6] H. F. Wang, *Selection of Robust Installing Locations and Feedback Signals of FACTS-based Stabilizers in Multi-machine Power Systems*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1995.
- [7] Vijay K. Sood, *HVDC and FACTS Controllers. Applications of Static Converters in Power Systems*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmissions Systems*, IEEE Press, 2002.