

## Algunas consideraciones para identificar la aplicación de controladores FACTS en los sistemas de transmisión

Héctor Gerardo Sarmiento  
Instituto de Investigaciones Eléctricas  
[hsu@iie.org.mx](mailto:hsu@iie.org.mx)

**Resumen.-** Ante las restricciones económicas y ambientales, así como la nueva estructura del sector eléctrico mundial, surge el concepto FACTS, con objeto de aprovechar la infraestructura existente de transmisión de energía eléctrica. Se describen los beneficios de esta tecnología y su impacto en el proceso de planeación.

**Palabras clave.-** Controladores FACTS, compensación de potencia reactiva, suficiencia y seguridad en sistemas eléctricos.

### DEFINICIONES

#### Flexibilidad en la transmisión de energía

La habilidad de acomodar cambios en el sistema de transmisión; o la habilidad de acomodar diferentes condiciones operativas, manteniendo márgenes suficientes en estado estable y transitorio.

#### Controlador FACTS

Un sistema basado en electrónica de potencia y equipo estático adicional que proporciona control a uno o más parámetros del sistema de transmisión a c.a.

### I. INTRODUCCIÓN

En la conocida ecuación para la transferencia de energía en sistemas de transmisión;

$$P = \frac{V_r V_s}{X} \text{ send}$$

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

la potencia eléctrica real (P) transmitible es función de los voltajes fuente y receptor ( $V_s$  y  $V_r$ ) del sistema de transmisión, de la longitud eléctrica de la línea; es decir, de la reactancia efectiva  $X$  de la línea de transmisión y del llamado "ángulo de potencia" ( $\delta$ ) entre los fasores de voltaje  $V_r$  y  $V_s$ . Una vez alcanzado el límite teórico de la transmisión cuando  $\delta = 90^\circ$ , la potencia transmitida disminuye con una mayor longitud de la línea a menos que se incremente el voltaje de la línea o se disminuya la impedancia efectiva de la misma.

Un límite práctico para una línea real con resistencia  $R$ , puede estar impuesto por las pérdidas  $I^2 R$  que calientan al conductor. A cierta temperatura las características físicas del conductor cambian en forma irreversible (por ej. se puede deformar en forma permanente). **Esto establece un límite térmico** para la potencia máxima transmitible.

El límite térmico es una condición que se presenta más comúnmente en líneas de transmisión de corta longitud y a niveles de tensión nominal menores a 230 kV. **También se presentan límites por estabilidad de ángulo y de voltaje** para el transporte de energía para líneas largas a niveles mayores a 230 kV.

*Se debe considerar cada límite de acuerdo a las condiciones de operación y el que resulte menor será el que determine el límite a partir del cual se establece un margen para la operación confiable.*

### II. COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Se ha reconocido desde hace mucho tiempo que se puede incrementar la potencia a transmitir en estado estable y que se puede controlar el perfil de voltaje a lo largo de la línea de transmisión, con una compensación adecuada de la potencia reactiva. El propósito de esta compensación es cambiar las características eléctricas naturales

de la línea de transmisión. Por lo que, *reactores conectados en derivación* (fijos o conectados mecánicamente), se aplican para minimizar la sobretensión en la línea bajo condiciones de baja carga. De la misma forma, se aplican *capacitores en derivación*; fijos o conectados mecánicamente, para elevar el voltaje bajo condiciones de incremento de la demanda.

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

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

### III. SURGIMIENTO DEL CONCEPTO FACTS

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

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

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

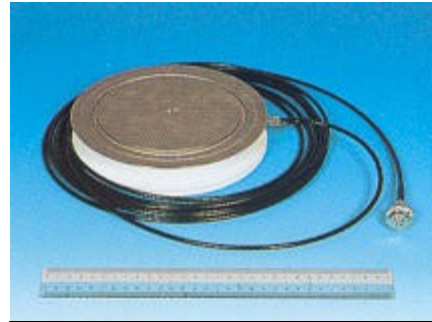


Figura 1 Tiristor disparado en forma óptica

### IV. LOS OBJETIVOS DE FACTS

El reto básico del sistema de transmisión, cualquiera que sea su evolución y forma final, es proporcionar una red capaz de suministrar la energía eléctrica requerida desde la generación hasta los centros de consumo sobre una amplia área geográfica bajo un mercado eléctrico variante. **La solución a cualquier restricción es que, debido al costo, derechos de paso, y problemas ambientales; la red cada vez más estará basada en la estructura física existente.**

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

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

El primer objetivo implica que el flujo de potencia en una línea dada debe poderse incrementar hasta su límite térmico, forzando la corriente necesaria por la impedancia en serie si y solo si, al mismo tiempo, se mantiene la estabilidad del

sistema con el control adecuado en tiempo real de los flujos durante y después de una falla.

El segundo objetivo implica que, controlando la corriente en una línea (por ejemplo, cambiando su impedancia aparente), el flujo de potencia se restringe a corredores designados. También implícito en este objetivo es que la trayectoria primaria de flujo pueda cambiar rápidamente a una trayectoria secundaria bajo alguna condición de contingencia, y así mantener la operación adecuada del sistema.

## V. FILOSOFÍA Y CRITERIOS DE PLANEACIÓN CON FACTS

Los dos aspectos importantes de la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia son **la suficiencia y la seguridad**.

*Lo adecuado o la suficiencia* de un sistema eléctrico es su capacidad de satisfacer la demanda de energía, dentro de las capacidades del equipo y los límites de voltaje preestablecidos. *La seguridad* de un sistema de potencia es su habilidad de manejar incidentes o disturbios sin la pérdida incontrolable de carga.

Las aplicaciones de los controladores FACTS buscan el incremento en el uso de la capacidad disponible de transmisión. Se tienen presiones de todo tipo (técnicas, económicas, ecológicas, políticas) que hacen cada día más difícil la construcción de nuevas instalaciones de transmisión. Esto tiene como consecuencia una utilización más intensa de las redes de transmisión existentes. *Este uso más intensivo debe lograrse sin que peligre la seguridad de los sistemas de transmisión*. Esta es la razón de que los controladores FACTS se deben definir a partir de las necesidades de las redes eléctricas.

Desde el punto de vista de la planeación, *la capacidad más importante que se espera de los dispositivos FACTS diseñados para mejorar la estabilidad de las redes, es su capacidad de reducir el impacto del disturbio primario*. Esto no solo mejora la utilización de la capacidad de transmisión disponible, sino logra que la red sea capaz de soportar un segundo incidente, evitando posible fallas subsecuentes en cascada.

En general, la pérdida de una línea de transmisión no pone en peligro la estabilidad del sistema, si éste es lo suficientemente mallado. Sin embargo, pueden ocasionar caídas de voltaje de magnitud inaceptable, o sobrecargas en las trayectorias paralelas. Estas caídas de voltaje y sobrecargas son la causas más comunes de las limitaciones en transmisión. En este caso, el

propósito de los controladores *FACTS debe ser contener los efectos de las contingencias y por lo tanto permitir una mayor carga inicial en las líneas de transmisión*.

Existen otras consideraciones relacionadas con la operación en estado estable, que también contribuyen a los límites en transmisión. Se pueden mencionar los flujos en anillo, y la integración de nueva generación, como los Productores Independientes. *En este caso, los retos resultantes que los controladores FACTS deben resolver son el control de flujos de potencia y la limitación de niveles de corto circuito*.

Desde el punto de vista de planeación, existe un gran potencial de capacidad de transmisión no utilizada. Las soluciones convencionales que están disponibles son: para mitigar los flujos en anillo (reguladores de ángulos de fase), para caídas de voltaje (capacitores en derivación desconectables, compensadores estáticos de VARs) y para sobrecargas (procedimientos de operación). En la mayoría de los casos estas soluciones no son completamente satisfactorias. *El reto de los controladores FACTS es hacer lo anterior en forma más sencilla y a un costo razonable*.

## IV. METODOLOGÍA DE PLANEACIÓN

En el proceso de planeación se toman en cuenta los parámetros futuros: tanto técnicos como económicos; de manera que se logre una solución “óptima”, o de “mínimo costo”. Sin embargo, la situación actual del sistema de transmisión, en cuanto a la dificultad de construir nuevas líneas, en cuanto a la restructuración de la industria y el acceso a la transmisión; hacen este proceso de planeación más complicado e incierto. La disponibilidad actual de diferentes controladores FACTS, aunque ofrece soluciones alternas, complican el logro o la existencia de un sistema óptimo.

Las principales tareas que comprenden los estudios de planeación están interrelacionadas. La evaluación de los requisitos de la línea y del equipo demandan estudios tanto en estado estable (flujos de carga) como dinámicos (estabilidad transitoria y oscilatoria), que tienden a ser iterativos por naturaleza.

### A. Criterios de estudio

En la evaluación de los planes de expansión de la transmisión, y en particular de los límites de transferencia, se establecen criterios determinísticos para probar el comportamiento

tanto en estado estable como transitorio de las alternativas. Algunos de estos criterios se enumeran a continuación:

1. *Definir la banda de voltajes permisibles en operación en estado estable.*
2. *Definir la banda de voltajes permisibles durante condiciones de contingencia.*
3. *Definir cómo se aliviarán condiciones de voltaje inaceptables, durante condiciones de contingencia sencilla (por ej. utilizando solamente compensación y/o cambiadores de ángulo de fase, pero no permitiendo recortes de carga o reducción en la generación).*
4. *Establecer límites térmicos. No exceder la capacidad de conducción en estado estable y en emergencia de los conductores eléctricos.*
5. *Bajo el criterio de contingencia sencilla, selección de las contingencias más severas.*
6. *Definir el valor límite para el colapso de voltaje. Por ejemplo, no exceder el 95% del valor de voltaje que lleva a la inestabilidad (margen del 5%).*
7. *Definir la falla o fallas para evaluar la estabilidad (por ejemplo una falla trifásica que se libera en cinco ciclos).*
8. *Definir el modelo de carga para condiciones de operación normal y contingencia, así como para las simulaciones dinámicas (por ej. potencia constante para operación normal y para simulaciones dinámicas caracterizar la potencia real como corriente constante y la potencia reactiva como impedancia constante).*

## **B. Qué papel juegan los controladores FACTS?**

Es importante reconocer que la disponibilidad actual de controladores FACTS no cambia sustancialmente el procedimiento de planeación. Es decir, en el corazón del proceso está la búsqueda de la aplicación de cualquier dispositivo o dispositivos que maximice el uso de la transmisión disponible. Lo que implica el “concepto FACTS” es una nueva generación de equipo basado en electrónica de potencia, básicamente con la misma función de otros equipos convencionales; **pero con un alto grado de controlabilidad y capacidad de respuesta. El nuevo paradigma es como utilizar estos nuevos controladores y la justificación de su aplicación.**

## **C. Aplicación de los controladores FACTS**

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

La aplicación de controladores FACTS en las áreas de calidad de la energía y corto circuito normalmente están asociadas con los sistemas de subtransmisión y distribución. Sin embargo, un entorno de un mercado competitivo puede resultar en aplicaciones FACTS a niveles superiores de tensión como resultado de grandes variaciones en los niveles de corto circuito: Una disponibilidad baja de corto circuito puede resultar en la necesidad de regulación de voltaje. Por otro lado, niveles altos de corto circuito pueden requerir una reducción a niveles aceptables (lo que se puede hacer con el IPC ó Interphase Power Controller).

La forma más sencilla para identificar el beneficio potencial de los controladores FACTS es examinar sus funciones y relación con equipo convencional. En la tabla I se ilustra esta relación.

Tabla I FUNCIÓN DE LOS CONTROLADORES FACTS	
Función	Controladores FACTS y equipo convencional
Control de voltaje	Plantas generadoras Cambiadores de taps convencionales Capacitor/reactor convencional en derivación <b>Compensador estático de VARs (SVC)</b> <b>Compensador estático síncrono (STATCOM)</b> <b>Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)</b> <b>Almacenamiento superconductor de energía (SMES)</b> <b>Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS)</b> <b>Compensador estático convertible (CSC)</b>
Control de flujo de potencia	Plantas generadoras Regulador convencional de ángulo de fase Compensación serie convencional <b>Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC)</b> <b>Reactor en serie controlado por tiristores (TCSR)</b> <b>Cambiador de fase controlado por tiristores (TCPST)</b> <b>Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)</b> <b>Sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS)</b> <b>Compensador serie estático síncrono (SSSC)</b>
Estabilidad transitoria	Capacitor serie convencional <b>Resistencia controlada por tiristores (TCBR)</b> <b>SVC, STATCOM, TCSC, TCPST, UPFC, BESS, SMES, SSSC, CSC</b> Métodos convencionales <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resistencia</li> <li>▪ Excitación</li> <li>▪ Seccionar L.T. , etc.</li> </ul>
Estabilidad dinámica	Capacitor serie convencional Estabilizador de sistema potencia <b>TCSC, SVC, STATCOM, UPFC, SSSC</b>

Las aplicaciones básicas de los controladores FACTS son:

**Control de flujo.-**

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

**Control de voltaje.-**

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

**Control dinámico.-**

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

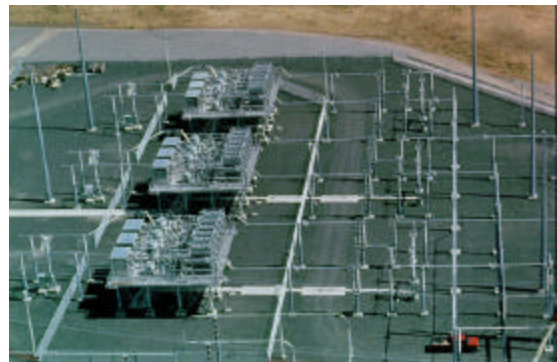


Figura 2.- Compensación serie controlada por tiristores en la SE Slatt

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

En particular para los controladores FACTS:

**Tabla II**  
**Medida de la influencia de los controladores**  
**FACTS**

	Control de flujos	Control de voltaje	Estabilidad transitoria	Amortiguamiento de oscilaciones
TCSC				
SVC/ STATCOM				

TCPAR				
SSSC				

UPFC				

TCPAR = Regulador de ángulo de fase controlado por tiristores  
 UPFC = Controlador unificado de flujo de potencia

#### D. Requisitos de los estudios

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

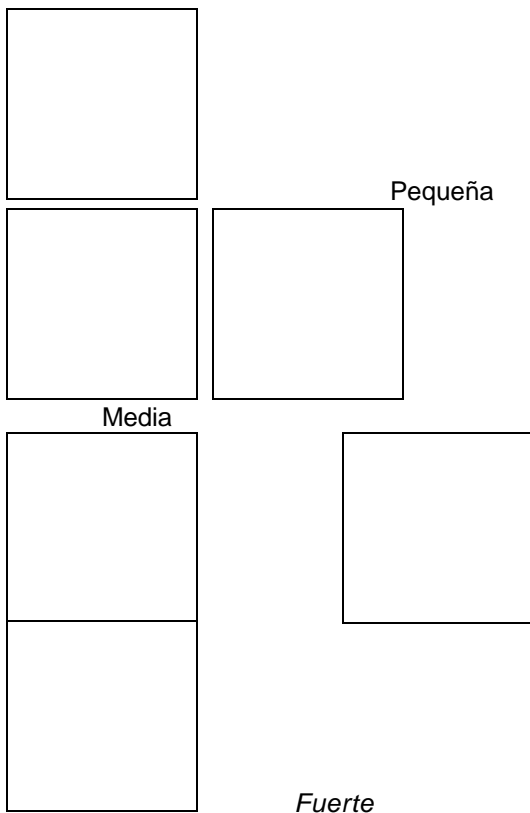
El uso de flujos óptimos ofrece una metodología para estudiar una gran variedad de escenarios. Las funciones objetivo pueden incluir la maximización de límites térmicos o de voltaje, o la minimización de costos con la aplicación de dispositivos en serie, en paralelo, o dispositivos reguladores de ángulo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

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

#### V. REFERENCIAS

- [1] Song, Y.H., A.T. Johns, editors, *Flexible ac transmission systems (FACTS)*, The Institute of Electrical Engineers, Power and Energy Series 30, Inglaterra, 1999.
- [2] *Coordination of Controls of Multiple FACTS/HVDC Links in the Same System*, Working Group 14.29, CIGRE, diciembre de 1999.
- [3] Edris, A., "FACTS Technology Development: An Update", *IEEE Power Engineering Review*, marzo 2000 Vol.20, No.3, p.4.
- [4] Lemay, J., "Meeting the Real Needs of Power Transmission Networks with FACTS Devices – A Planner's Point of View", EPRI FACTS 3 Conference, Octubre 5-7, 1994, Baltimore, MD.

#### Influencia:



SVC/STATCOM = Compensador estático de VARs/ Compensador estático avanzado

TCSC = Compensación serie controlada por tiristores

SSSC = Compensador serie estático síncrono

## **Biografía**

*Héctor Sarmiento Uruchurtu.*- Realizó un Doctorado en la Universidad Concordia, Canada. Actualmente es Investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas en la Gerencia de Análisis de Redes Eléctricas.