

Uso de FACTS para el aumento de la cargabilidad en la línea de transmisión Circo-Guavio perteneciente al sistema de transmisión colombiano

Use of FACTS for Increasing the Loadability in the Circo-Guavio Transmission Line of the Colombian Transmission System

FREDY MURCIA

Ingeniero Electricista Universidad de La Salle.
Correo electrónico: fredmur07@gmail.com

GUILLERMO DÍAZ

Ingeniero Electricista Universidad de La Salle.
Correo electrónico: guillermoandresdiaz@gmail.com

CAMILO CORTÉS

Profesor Asociado. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle. Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Grupo de Investigación CALPOSALLE, Universidad de La Salle.
Correo electrónico: camilocortes@lasalle.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 12 de abril de 2007

Fecha de aceptación: 10 de julio de 2007

Palabras clave: congestión, compensación reactiva, FACTS, SVC, TCSC.

Key words: congestion, reactive compensation, FACTS, SVC, TCSC.

RESUMEN

Este artículo analiza el problema de la congestión en las redes de transmisión colombianas, haciendo énfasis en el anillo de 230kV correspondiente a la zona de Bogotá, y la manera en que diversos dispositivos FACTS pueden llegar a favorecer el comportamiento eléctrico del sistema desde el punto de vista de operación en estado estable. Adicionalmente, mediante un método gráfico se optimiza la potencia de los FACTS estudiados y se compara desde el punto de vista técnico-económico la solución planteada con una tradicional.

ABSTRACT

This paper analyzes the problem of congestion in Colombian transmission networks, focusing in the 230 kV loop of the Bogotá area, and in the way that different FACTS devices may help to improve the electric behavior of the system, in order to keep or bring the system in a stable state operation. Additionally, the capacity of the studied FACTS is optimized using a graphic method, and the established solution is compared with a traditional one using a techno-economic criterion.

1. Introducción

La necesidad de realizar una administración más eficiente de los sistemas eléctricos ha impulsado la innovación de tecnologías en las áreas de generación y transmisión de energía. El ciclo combinado es un buen ejemplo de nuevos desarrollos en generación. Por su parte, los sistemas de transmisión no podían quedar en desventaja, dando vida a una nueva gama de dispositivos de última generación llamados Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna, FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Las grandes redes de transmisión, subtransmisión y distribución han sufrido continuos cambios y desarrollos desde el mismo momento de su concepción. Se puede decir que los sistemas de transmisión de energía nacieron de la competencia entre los señores Edison y Westinghouse, en la cual cada uno defendía su percepción de método ideal de transmisión, uno en corriente directa y el otro en corriente alterna respectivamente. La historia cita que Westinghouse apabulló a Edison desde el momento de la instalación de la famosa central hidroeléctrica en las Cataratas de Niágara, pero la actualidad nos demuestra que el señor Edison no perdió la carrera, sino que seguramente su concepto estaba demasiado adelantado para su época.

El gran aporte de Bardeen, Brattain y Shockley al ingeniar el transistor logró encender la chispa en el desarrollo de todo un universo de dispositivos semiconductores que han permitido grandes avances en los campos de la electrónica y de los sistemas de control, logrando ampliar sin precedentes las alternativas, en cuanto a la manera en que se conciben los sistemas de transporte de energía eléctrica de la actualidad.

En este artículo se estudian los efectos eléctricos debidos a la operación de diversos dispositivos FACTS para determinar cuáles son los que mejor se adecuan a la problemática de la línea de transmisión de doble circuito de 230 kV que conecta a las subestaciones de Guavio y Circo del Sistema de Transmisión Nacional (STN) colombiano, desde el punto de vista de operación en estado estable del sistema.

2. Problema de la congestión en los sistemas de potencia

Con la implementación de las nuevas tecnologías de desarrollo, la ampliación de mercados nacionales e internacionales y la expansión de las ciudades se crea la necesidad de desarrollar y modernizar los sistemas de transmisión, a fin de descongestionar los sistemas de potencia ante el aumento de la demanda de energía eléctrica [1]. Una consecuencia clara del aumento de la demanda de energía es el *incremento en la cargabilidad de las líneas de transmisión* del sistema, lo que implica transportar la energía sobre o en un punto muy cercano del límite térmico de los conductores. Esta situación puede representar peligrosos riesgos en el proceso de transporte, tales como la reducción de la estabilidad del sistema [2] (por disparo de protecciones en varios puntos del sistema), además de una reducción de la vida útil de las líneas por deformación permanente de los conductores [3].

La capacidad de transporte es limitada por la dilatación del cable a causa de su calentamiento, que a su vez es consecuencia de las pérdidas por efecto Joule. La dilatación del cable viene limitada por el máximo vano permitido para cumplir con las distancias de seguridad con el terreno. Uno de los parámetros importantes de la línea, su inductancia, depende de forma importante de la posición geométrica relativa de las tres fases sobre la torre. Asimismo, las líneas provocan un efecto capacitivo con tierra que fija el valor de su capacitancia a tierra. De esta forma, cuando las líneas están cargadas el efecto inductivo predomina, siendo la línea consumidora de energía reactiva, y cuando están descargadas es el efecto capacitivo el preponderante, convirtiendo la línea en generadora de energía reactiva [4].

Adicionalmente, por razones medioambientales es cada vez más difícil ampliar y reforzar las redes de transmisión, por lo que es necesario aprovechar la capacidad de las instalaciones existentes [4]. Con el desarrollo de la electrónica de potencia están surgiendo diversos equipos que tratan de incrementar la capacidad real de las líneas y dirigir los flujos

hacia las líneas más descargadas, como es el caso de los FACTS que se están imponiendo de manera relevante a nivel mundial. Singh [5] muestra como los controladores FACTS mejoran el desempeño estático y dinámico de los sistemas de potencia, en los cuales una de las principales ventajas es el incremento de la cargabilidad y el manejo de la congestión de los sistemas. En la literatura se encuentran varias propuestas en las que se muestra la importancia de los FACTS en el control del flujo de potencia en sistemas en los que se cuenta con dichos dispositivos [6, 7].

Ahora bien, específicamente para el problema planteado, varios autores han mostrado la conveniencia de utilizar FACTS en sistemas de potencia para ayudar a solucionar problemas de congestión en sistemas tradicionales [8], en ambientes de mercados [1, 9, 10], o cuando se tienen corredores de interconexión entre sistemas [11]. Estos documentos muestran cómo el manejo de la congestión en los sistemas de potencia puede ser una gran área de aplicación de los FACTS, a la vez que se puede mejorar la seguridad del sistema. En este artículo se analiza la conveniencia de utilizar FACTS específicamente para el problema de la congestión del sistema colombiano en la línea de transmisión objeto de estudio.

3. Selección de la línea objeto de estudio

Se realizó una solicitud a la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) con la finalidad de determinar cuales serán las líneas de transmisión que a corto plazo se encontrarán, según sus proyecciones, cercanas o sobre su cargabilidad nominal. Los resultados de dicha petición se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Líneas con cargabilidades más altas del STN

| Línea | Cargabilidad |
|--------------------|--------------|
| San Marcos - Yumbo | 92% |
| Circo-Guavio | 89% |
| Guavio - Reforma | 84% |

En la tabla 1 se aprecia que la línea con mayor cargabilidad es la línea San Marcos-Yumbo con un valor del 92%. Sin embargo, dicha línea cuenta con tres circuitos, en los cuales dos ellos ya cuentan con compensación capacitiva en serie, y compensación en paralelo en la subestación de San Marcos; por estos hechos esta línea es descartada como objeto del estudio. La siguiente línea con mayor cargabilidad es la que conecta las subestaciones de *Circo* y *Guavio*, con un valor de 89 %; dicha línea cuenta con dos circuitos y, hasta el momento del estudio, no se le ha implementado ningún sistema de compensación reactiva, lo que la hace ideal como objeto de estudio para este trabajo.

4. Selección de la herramienta de análisis

Debido a las grandes exigencias que implican la administración, operación y planeación de las redes eléctricas de potencia, han nacido una gran cantidad de programas que ofrecen, además de las rutinas típicas de cálculo, rasgos que hacen más natural e intuitivo el estudio del comportamiento de los sistemas eléctricos. Luego de una búsqueda de posibles herramientas de análisis, se decidió usar la caja de herramientas PSAT (Power System Analysis Toolbox) junto al software MATLAB. PSAT es una caja de herramientas de licencia gratuita, que permite hacer análisis de flujo de potencia con FACTS [12], simulaciones de sistemas eléctricos de potencia en estado estable y transitorio, y de código totalmente abierto. Las razones más importantes para utilizar PSAT en este proyecto de investigación se listan a continuación:

- Permite calcular el flujo de potencia incluyendo FACTS.
- Es de licencia libre.
- Se ha utilizado exitosamente en reconocidas universidades a nivel mundial.
- Está diseñado para trabajar en conjunto con programas de alto nivel como UWPFLOW y GAMS.

Dentro de los alcances de este programa se tiene: solución de flujos de potencia, flujo de potencia óptimo, estabilidad de pequeña señal, y análisis y simulaciones en el dominio del tiempo. Adicionalmente, cuenta con una interfaz gráfica y una completa librería para el diseño de diagramas unifilares en Simulink que permiten al usuario una mayor maniobrabilidad sobre el diseño de un sistema eléctrico. PSAT incluye una variedad de modelos estáticos y dinámicos que permiten el análisis de sistemas de potencia como nodos, líneas de transmisión, transformadores, nodos de regulación, PV y PQ, admitancias en paralelo, fallas en líneas de transmisión, interruptores, FACTS, mediciones, máquinas, controles, reguladores de transformadores y generadores, turbinas eólicas, entre otros dispositivos.

5. Criterios de selección de los FACTS para el estudio

Los criterios de selección de los FACTS en este trabajo se basaron en el artículo [13], del que se extractó la información de la tabla 2. Como se puede observar en dicha tabla, los dispositivos FACTS que inicialmente se adaptan mejor a la problemática son los siguientes: TCSC, SVC, UPFC (Unified Power Flow Controller), TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator). En este estudio se descartan el TCPAR y el UPFC debido a que su tecnología se encuentra todavía en etapa experimental, ya que todavía no existen aplicaciones comerciales de estos dispositivos [13]. Por lo tanto, este trabajo se centrará en el estudio de los dispositivos SVC y TCSC.

Tabla 2. Criterios de selección de los FACTS de acuerdo al escenario [13]

| Tema | Problema | Acción correctiva | Solución convencional | Dispositivo FACTS |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------|
| Límites de tensión | Baja tensión con alta carga | Incrementar suministro de reactivos | Condensadores en paralelo y en serie | SVC, TCSC, STATCOM |
| | Alta tensión con baja carga | Suspender suministro de reactivos | Conmutar línea o condensador en paralelo | SVC, TCSC, STATCOM |
| | | Absorber reactivos | Conmutar condensador en paralelo, reactor en paralelo | SVC, STATCOM |
| | Alta tensión debida a cortes | Absorber reactivos | Instalar reactor en paralelo | SVC, STATCOM |
| | | Proteger los equipos de sobretensiones | Instalar descargador de sobretensión | SVC |
| | Baja tensión debida a cortes | Incrementar suministro de reactivos | Conmutar condensador en paralelo, reactor, Condensador en serie | SVC, STATCOM |
| | | Prevenir las sobrecargas | Implementar reactor en serie, regulador de ángulo de fase | TCPAR, TCSC |
| | Baja tensión y sobrecarga | Incrementar suministro de reactivos y limitar la sobrecarga | Combinar dos o más dispositivos | TCSC, UPFC, STATCOM, SVC |
| Límites térmicos | Sobrecarga de línea o transformador | Reducir sobrecarga | Implementar línea o transformador regulante | TCSC, UPFC, TCPAR |
| | | | Implementar reactor en serie | SVC, TCSC |
| | Salida de circuito paralelo | Limitar cargabilidad del circuito | Implementar reactor en serie, condensador | UPFC, TCSC |

| Tema | Problema | Acción correctiva | Solución convencional | Dispositivo FACTS |
|------------------------------|---|---|---|------------------------|
| Flujos de potencia en anillo | Sobrecarga asimétrica de líneas en paralelo | Ajustar reactancia en serie | Implementar condensador/reactor en serie | UPFC, TCSC |
| | | Ajustar el ángulo de fase | Implementar regulador de ángulo de fase | TCPAR, UPFC |
| | Desequilibrio del flujo de potencia post-falla | Reconfiguración de la red de acuerdo con límites térmicos | Regulador de ángulo de fase, condensador/reactor en serie | TCSC, UPFC, SVC, TCPAR |
| | Inversión del flujo de potencia | Ajuste del ángulo de fase | Regulador de ángulo de fase | TCPAR, UPFC |
| Nivel de corto circuito | Excesiva corriente de falla en interruptores | Limitar corriente de corto circuito | Implementar reactor en serie, nuevo interruptor | SCCL, UPFC, TCSC |
| | | Redimensionar breakers | Implementar nuevo interruptor | N/A |
| | | Reconfigurar la red | Seccionar barra | N/A |
| Resonancia subsincrónica | Posible deformación del eje Turbina - Generador | Mitigar oscilaciones | Compensación en serie | NGH, TCSC |

6. Resultados

Para tener un punto de referencia con el cual se puedan evaluar las ventajas eléctricas debidas a la operación de los dispositivos FACTS sobre la línea Circo-Guavio, se efectuó el modelado de la red de la zona de Bogotá para el cómputo del flujo de potencia en estado estable con datos reales suministrados

por la UPME. La línea Circo-Guavio cuenta con dos circuitos sin ningún sistema de compensación reactiva. Los parámetros de la línea de transmisión se muestran en la tabla 3 y fueron suministrados por la UPME. La línea de transmisión hace parte del anillo de 230 kV de Bogotá, por lo que se procederá a modelar esta zona como se muestra en la figura 1.

Tabla 3. Parámetros de la línea Circo-Guavio

| | Circuito 1 | Circuito 2 |
|---|-------------|-------------|
| Admitancia de Secuencia Cero (Y0) [Us/km] | 3.348 | 3.345 |
| Admitancia de Secuencia Positiva (Y1) [Us/km] | 4.298 | 4.296 |
| Corriente Nominal [A] | 710 | 790 |
| Longitud [km] | 109,5 | 109,8 |
| Reactancia de Secuencia Cero (X0) [Ohm/km] | 0,923 | 0,924 |
| Reactancia de Secuencia Positiva (X1) [Ohm/km] | 0,3983 | 0,3986 |
| Resistencia de Secuencia Cero (R0) [Ohm/km] | 0,2884 | 0,2885 |
| Resistencia de Secuencia Positiva (R1) [Ohm/km] | 0,0367 | 0,0366 |
| Voltaje Nominal [kV] | 230 | 230 |
| Subestación Origen | CIRC | CIRC |
| Subestación Destino | GUV2 | GUV2 |
| Número de Conductores/Fase | 2 | 2 |
| Conductor | ACSR RAIL | ACSR RAIL |
| Operación Normal | Cerrado | Cerrado |
| Tipo | Transmisión | Transmisión |

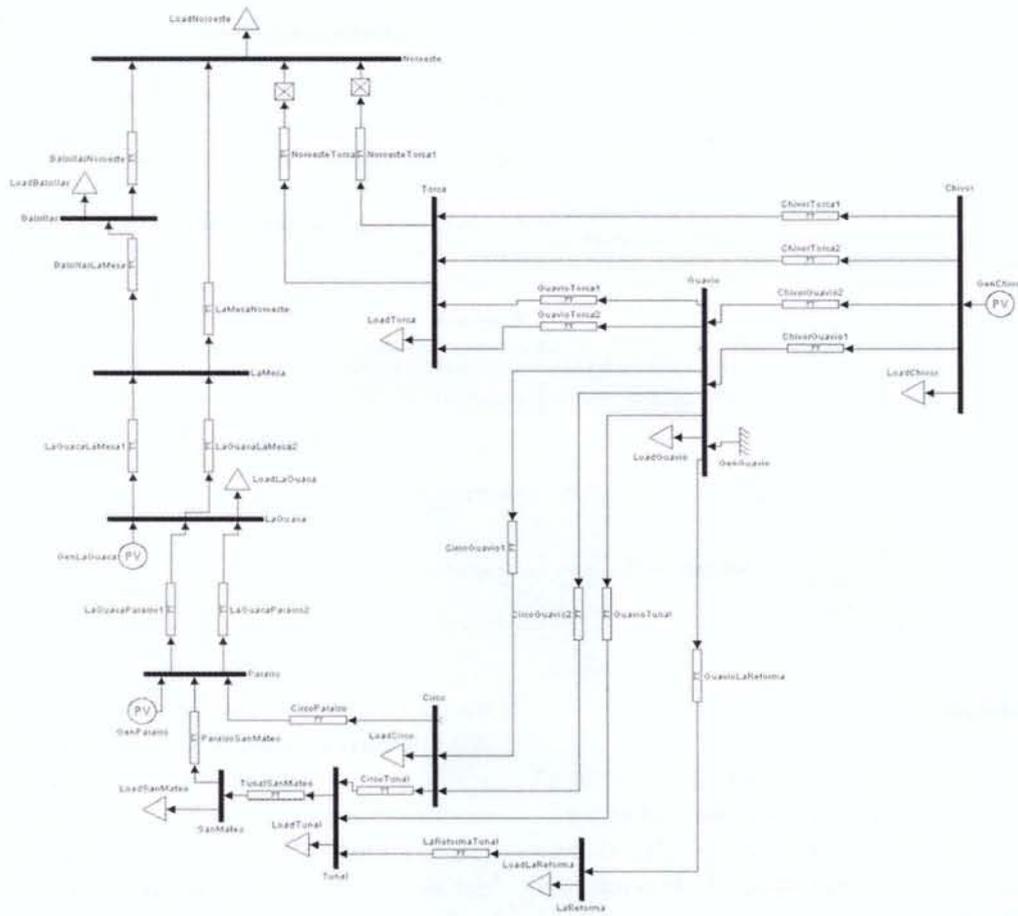


Figura 1. Anillo de Bogotá de 230 kV modelado en PSAT

6.1. Sistema original

En primera instancia, se modeló el sistema original, es decir, sin FACTS, y se intentó igualar la situación que la UPME proyectó, en la cual la cargabilidad de la línea Circo-Guavio será del 89% y la de Guavio - La Reforma del 84%. Los resultados de esta primera simulación se aprecian en la figura 2, a manera de diagrama unifilar para los nodos cercanos a la línea Circo-Guavio. Es importante hacer un seguimiento de las líneas vecinas a la línea Circo-Guavio, ya que los aportes de los FACTS no sólo afectan la línea seleccionada, sino también el conjunto de líneas que se conectan con las subestaciones de Circo y de Guavio [14].

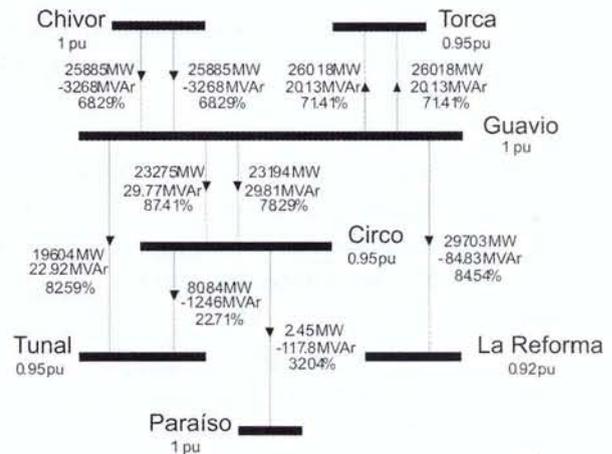


Figura 2. Algunos nodos del sistema original sin FACTS

6.2. Resultados del sistema con 3er circuito

Para evaluar los beneficios de implementar dispositivos FACTS en el STN, se propone comparar los estudios con una solución convencional. Una de las posibles soluciones para reducir la cargabilidad en la línea Circo-Guavio es la implementación de una línea en paralelo o un tercer circuito en la línea Circo-Guavio. Esta línea en paralelo tendría las mismas características eléctricas que poseen los dos circuitos actuales. En ese caso, las tensiones en las barras de Circo y de Tunal aumentan en comparación con el sistema original, mientras que la tensión en la barra de La Reforma permanece constante. Este comportamiento demuestra una mejor regulación de tensión en algunas barras del sistema como lo muestra la figura 3.

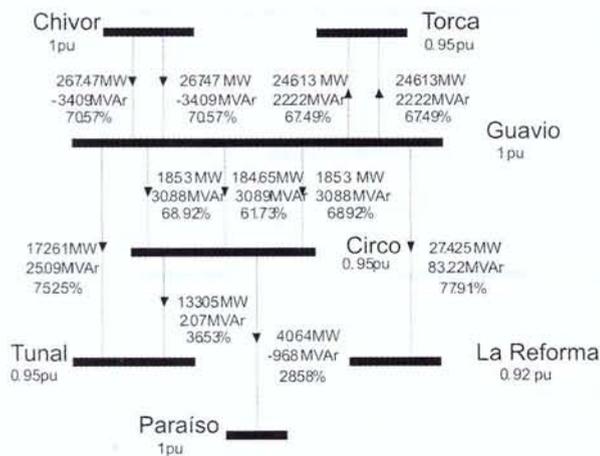


Figura 3. Algunos nodos del sistema con 3er circuito en la línea Circo-Guavio

La implementación de un tercer circuito en la línea Circo-Guavio descongestiona esta línea debido a que el flujo de corriente por cada circuito disminuye, lo que permite una diferencia más amplia entre la corriente nominal y la corriente de la línea. Al haber una reducción en la cargabilidad de la línea en cuestión, las líneas vecinas también reducen su cargabilidad. Debido a que la tensión de la barra de Circo aumenta, las corrientes que conectan este nodo disminuyen su valor, ya que la generación y las cargas permanecen constantes.

Como se observa en la figura 3, la cargabilidad en las líneas vecinas disminuyó, como es el caso de las líneas Guavio-Torca en 3,68%; Guavio-Torca 8,71%; Guavio-Reforma en 6,49%, y Circo-Paraíso en 9,73%. En las líneas de Guavio-Chivor y Circo-Tunal, la cargabilidad aumento en 2,25% y 14,62%, respectivamente.

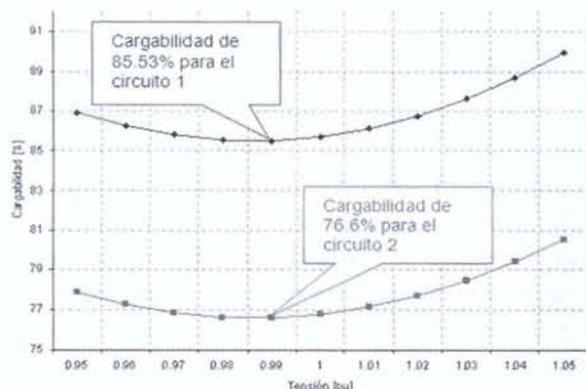
Al incluir un 3er circuito, la potencia activa transmitida por cada circuito disminuye, pero la potencia activa transmitida total aumenta 90,56 MW en comparación con el sistema original. De las líneas conectadas a los nodos de Circo y Guavio, la línea de Guavio-Chivor, Paraíso-Circo y Tunal-Circo aumentaron la transmisión de potencia activa, mientras que las líneas La Reforma-Guavio, Torca-Guavio y Tunal-Guavio disminuyeron su transmisión de potencia reactiva. El aumento más significativo se presenta en la línea Tunal-Circo con un aumento de 52,21 MW y la que más disminuyó fue Tunal-Guavio con una disminución de 23,43 MW. Las pérdidas de potencia activa en cada circuito disminuyen en un 62,16% y en el total de las líneas de transmisión las pérdidas disminuyen 0,61 MW, con respecto al sistema original. Las pérdidas de potencia activa en el sistema completo son de 44,62 MW.

Para estimar el costo de una línea de transmisión, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), mediante la resolución 026 de 1999, define los costos unitarios aplicables durante el periodo 2000-2004 y se establecen las áreas típicas de las unidades constructivas de subestaciones. Se debe tener en cuenta en el costo de la nueva línea de transmisión que tanto Circo como Guavio son subestaciones encapsuladas en SF6. Según la resolución 026 de 1999 y las características del tercer circuito de la línea Circo-Guavio, el costo de la línea de transmisión sería de US\$ 15.032.830.

6.3. Simulación sistema con SVC en Circo

Para determinar la capacidad del SVC que se va a instalar en el sistema, se realizó un análisis de la variación de la cargabilidad de los circuitos de la línea

Circo-Guavio con respecto a la tensión de referencia en la barra de Circo. En la gráfica 1 se muestran los diferentes valores de tensiones de referencia en la barra de Circo en función de la cargabilidad de cada uno de los circuitos de la línea. En esta misma gráfica se puede apreciar que hay un valor de tensión de referencia en el cual el SVC minimiza la cargabilidad de la línea.



Gráfica 1. Cargabilidad de Circo-Guavio a diferentes tensiones en la barra de Circo en ambos circuitos

Ahora bien, si se usa la potencia óptima hallada para el SVC, las tensiones en las barras del sistema presentan mejor regulación. En la barra en la que se instaló el SVC (Circo), la tensión llega a la tensión programada de 0,99 (p.u.) como se observa en la figura 4. Otro ejemplo del incremento de la regulación de tensión es en la barra de La Reforma, en la cual la tensión pasa de 0,919 (p.u.) a 0,932 (p.u.), lo que demuestra una mejor operación y un mejor comportamiento en el sistema. Debido al aumento de tensión en la barra de Circo y a la disminución en la transmisión de potencia reactiva por la línea (Circo-Guavio), se encontró que la cargabilidad disminuyó el 1,88% y 1,69% para el circuito 1 y 2 respectivamente, con respecto al sistema sin SVC. Al implementar el SVC se presenta una reducción de la cargabilidad en la mayoría de las líneas vecinas, con respecto al sistema original. El efecto más notorio se presenta en la línea de Circo-Paraiso, en la cual la cargabilidad se redujo del 32,04% al 6,14%.

La transmisión de potencia activa se incrementa con la implementación del SVC. La potencia que llega al nodo de Circo es de 237,05 MW y 236,24 MW, para el circuito 1 y 2 respectivamente. El incremento de potencia es de 4,29 MW para el circuito 1 y 4,29 MW para el circuito 2, lo que corresponde a un aumento del 1,018% en potencia transmitida para cada circuito. La figura 4 muestra un incremento en la potencia activa transmitida de algunas líneas vecinas, como es el caso de la línea Guavio-Chivor, Paraíso-Circo y Tunal-Circo. Para las demás líneas se presenta una reducción en la potencia transmitida.

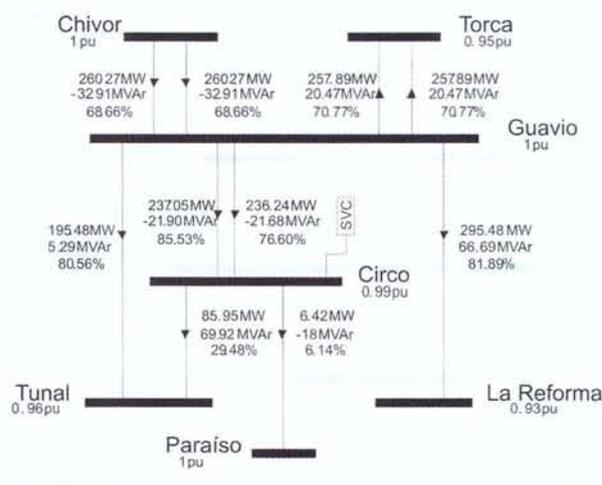
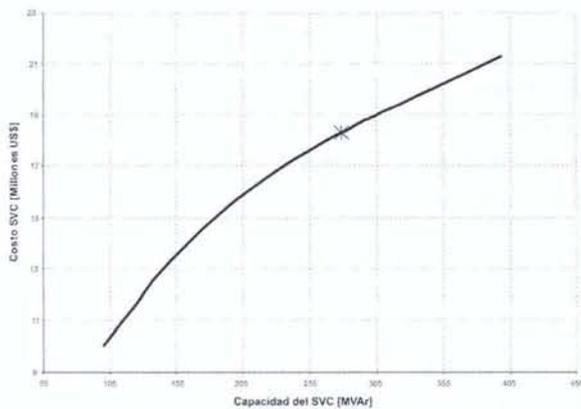


Figura 4. Algunos nodos del sistema con un SVC en la subestación Circo

En la gráfica 2 se muestran los costos aproximados del SVC seleccionado para el año 2004, en los cuales se incluyen los costos de infraestructura e inversión [13, 15]. Para el caso de la potencia óptima, el costo del SVC sería del orden de US\$ 18.200.000. Con la instalación de un SVC en la barra de Circo se presenta una ligera reducción de pérdidas con respecto al sistema original con un valor de 0,2 MW para cada uno de los circuitos. Las pérdidas en el sistema completo se reducen de 48,94 MW a 46,91 MW, con respecto del sistema original, lo que corresponde a una disminución total del 4,15% en pérdidas.

6.4. Resultados del sistema con TCSC en Circo-Guavio

Se instaló un solo TCSC en el circuito que presenta la cargabilidad más baja (circuito 2), a fin de incrementarla e igualarla con la del circuito 1 como se muestra en la figura 5. El proceso de igualar la cargabilidad de los dos circuitos es llamado balance de carga, y se realiza fundamentalmente en líneas multicircuito en las cuales la diferencia de impedancia hace que el flujo de potencia sobrecargue más un circuito que el otro [8]. Esto se hace con el objetivo de maximizar el flujo de potencia activa de la línea.



Gráfica 2. Costo del SVC en función de su capacidad en MVAR

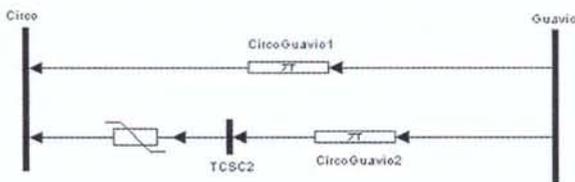
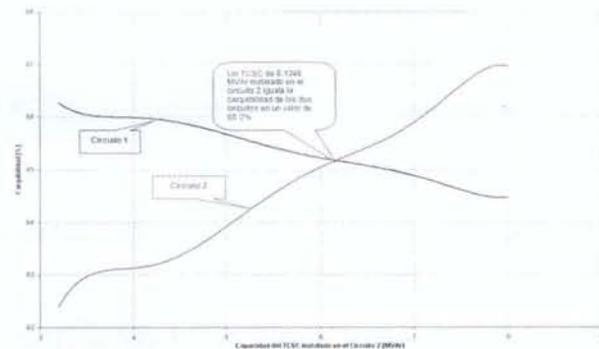


Figura 5. Modelación del TCSC en el circuito 2 de la línea Circo Guavio

De diversas simulaciones se obtuvo que el TCSC que logra igualar las cargabilidades de los dos circuitos debe tener una capacidad de 6,13 MVAR, para lograr un valor de cargabilidad del 85,2% en los dos circuitos (ver gráfica 3).

Como se aprecia en la figura 6, el perfil de tensiones del sistema muestra cambios muy leves comparados con el sistema sin FACTS. Si se compara con las tensiones obtenidas con el SVC se observa que las tensiones en las barras cercanas a la subestación de Circo son mayores en el caso del SVC.



Gráfica 3. Cargabilidad de los dos circuitos de la línea Circo-Guavio en función de la capacidad del TCSC instalado en el circuito 2

La figura 6 muestra que la cargabilidad del circuito 1 disminuye levemente (del 87,41% al 85,25%), mientras que la del circuito 2 se incrementa considerablemente (del 78,29% al 85,24%) comparados con el sistema sin TCSC. De modo similar, como sucede con el SVC instalado en Circo, el TCSC también tiene influencia en la cargabilidad de todas las líneas vecinas a la subestación de Circo y de Guavio. El incremento total de potencia activa transmitida por la línea Circo-Guavio es de 12,93, MW al implementar el TCSC, lo que corresponde a un aumento del 2,7% sobre la potencia transmitida sin aplicar FACTS.

En la gráfica 4 se muestran los costos aproximados del TCSC para el año 2004, en éstos se incluyen los costos de infraestructura e inversión [13, 15]. En este caso, un TCSC con la potencia óptima hallada tendría un valor de aproximadamente US\$ 1.000.000.

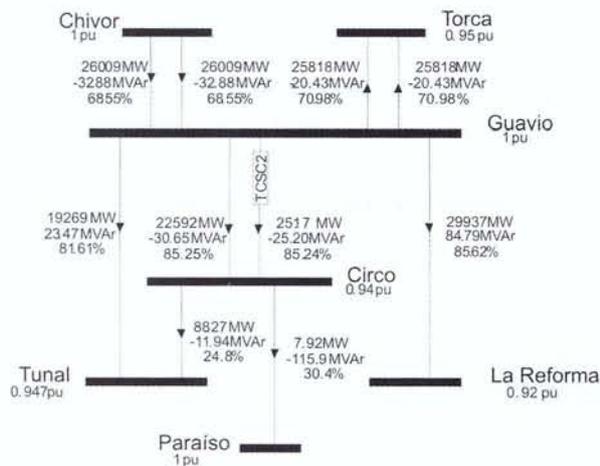
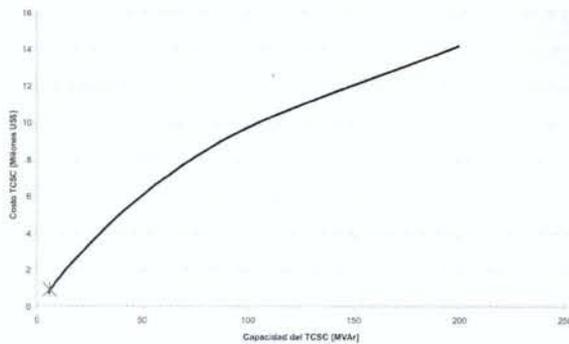


Figura 6. Sistema con un TCSC en el circuito 2 de la línea Circo – Guavio

Las pérdidas de potencia activa se reducen en el circuito 1, mientras que en el circuito 2 se incrementan con respecto al sistema sin FACTS. Esta situación se debe a que el TCSC incrementa considerablemente la corriente que circula por el circuito 2 y reduce al mismo tiempo la que circula por el circuito 1. Las pérdidas en el sistema completo se reducen de 48,94 MW a 48,92 MW, con respecto del sistema original, lo que corresponde a una disminución total del 0,04% en pérdidas.



Gráfica 4. Costo del TCSC en función de su capacidad en MVar

7. Conclusiones

Al analizar todas las variables de los tres escenarios el mejor resultado se obtiene con el TCSC, el cual redujo la cargabilidad del circuito más cargado de la línea Circo-Guavio (Circuito 1) incrementando la potencia transmitida en esta misma línea, lo que representa la menor inversión entre las tres alternativas analizadas. Esto se debe a que cuando se instala el TCSC en el circuito de menor cargabilidad se logra una repotencialización de la línea.

El TCSC incrementa la potencia transmitida por las líneas vecinas aproximadamente el doble del incremento que logra el SVC en su valor óptimo de operación. El TCSC muestra la mayor reducción de potencia transmitida comparada con el costo del dispositivo. En la mayoría de las líneas vecinas también muestra el mayor incremento en la potencia transmitida por costo del dispositivo, superando de manera amplia a las demás alternativas.

El análisis presentado en este artículo corresponde a un estudio en estado estable y no se están considerando otras posibles mejoras. La siguiente etapa de este estudio es determinar el comportamiento del sistema planteado desde el punto de vista de la estabilidad transitoria, de tensión, de frecuencia y de amortiguamiento de las oscilaciones de potencia, para así poder establecer las ventajas y las desventajas de cada una de las opciones desde un punto de vista integral. Además, las conclusiones alcanzadas se desprenden del trabajo de simulación y modelado realizados. Se requiere trabajo adicional para verificar que los resultados mostrados corresponden a lo que se obtendría en la realidad al instalar los dispositivos FACTS en el sistema colombiano.

Referencias bibliograficas

- [1] C. Schaffner, G and Andersson. (2002) Use of FACTS Devices for Congestion Management in a Liberalized Electricity Market. En *VIII SEPOPE*, Brasilia, Brasil.
- [2] Yong. S, Allan, J. (1999) *Flexible ac Transmission Systems (FACTS)*. United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, pp.383.
- [3] Díaz. G, Murcia. F. (2006) *Análisis técnico para la implementación de un sistema de compensación reactiva (FACTS) a la línea de transmisión Circo-Guavio perteneciente al STN*. Proyecto de Grado Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle.
- [4] Gómez. A. Expósito. (2002) *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. McGraw Hill: Madrid.
- [5] S.N. Singh. (2006). Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Controllers: an Overview *International Journal of Energy Technology and Policy (IJETP)*, Vol. 4 (3/4), pp. 236-254.
- [6] A. Herbig. (2000) *On Load Flow Control in Electric Power Systems*. PhD Thesis, Department of Electric Power Engineering, Royal Institute of Technology. Stockholm.
- [7] Yang Yea, M. Kazerani. (June 2006) Power Flow Control Schemes for Series-Connected FACTS Controllers. *Electric Power Systems Research*, Vol 76 (9-10), pp. 824-831.
- [8] G. Glanzmann, G. Anderson. (October 2005) Using FACTS Devices to Resolve Congestions in Transmission Grids. *CIGRE/IEEE PES International Symposium*, San Antonio, USA. pp. 347- 354.
- [9] Chong. B, Zhang. X. P, Yao L, Godfrey K.R, Bazargan M. (June 2007) Congestion Management of Electricity Markets Using FACTS Controllers. *IEEE 2007 PES general meeting*. 24-28. Tampa USA.
- [10] Xing Wang; Song Y.H, Lu Q, Sun Y.Z. (2001) Series FACTS Devices in Financial Transmission Rights Auction for Congestion Management. *IEEE Power Engineering Review*, Vol 21 (11), pp. 41-44.
- [11] Athanasiadis N, Chatzarakis G.E, Athanasiadis E, Fourlaris D. (June 2007) Analysis and Future Prospects for Cross-border Congestion Management Methods for the European Electricity Market. *Journal Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*. Vol 89 (6), pp. 509-517.
- [12] Federico M. (July 2005) *PSAT Power System Analysis Toolbox*. Documentation for PSAT version 1.3.4 [online] Disponible en www.ee.adfa.edu.au/staff/hrp/research/PSAT/psat-1.3.4.pdf, pp. 463.
- [13] Habur K. O'Leary D, (2004) *FACTS-Flexible Alternating Current Transmission Systems for Cost and reliable Transmission of Electrical Energy*. Distribution Group (EV) of Siemens AG in Erlangen, Germany & the World Bank. [Online] Disponible en www.worldbank.org/html/fpd/em.transmission/facts_siemens.pdf
- [14] Díaz G, Murcia F, Cortes C. (Julio-noviembre de 2005) Modelado del SVC (Static Var Compensator) para cálculo de flujo de potencia en estado estable basado en el algoritmo de Newton – Raphson. *Revista Epsilon*, Universidad de La Salle (5), pp. 29-40.
- [15] Cai L. (April 2004) *Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems*. Ph.D. Thesis. Universität Duisburg-Essen.