

MODIFICACIONES EN UN FLUJO DE CARGA POR LA INCLUSIÓN DE UN CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUJOS DE POTENCIA

JUAN PABLO RIVERA*
JAIME ALEJANDRO VALENCIA**

RESUMEN

El crecimiento de los sistemas de potencia y las condiciones de mercado dadas por los esquemas desregulados han evidenciado las limitantes técnicas y de operación que los sistemas eléctricos de potencia SEP tienen para abastecer la demanda bajo estrictas condiciones de seguridad, calidad de potencia y confiabilidad. Un controlador unificado de flujos de potencia UPFC (unified power flow controller) es uno de los dispositivos de la tecnología FACTS (Flexible AC Transmission Systems) que ofrece mayor versatilidad en términos de interacción con las variables de operación y control de un SEP y puede ser una solución óptima a las necesidades adicionales de control en un SEP moderno. Este trabajo presenta una formulación matemática y conceptual para la inclusión de un dispositivo UPFC en el análisis de flujos de carga en un SEP y una metodología para su inclusión en un software de flujos de carga en estado estable. Para validar la eficiencia de los modelos y métodos propuestos, se selecciona un sistema de potencia de prueba adecuado para ver los efectos esperados de la inclusión del UPFC en el sistema.

PALABRAS CLAVE: FACTS; flujo de carga; modelamiento de FACTS; software para sistemas de potencia; UPFC.

MODIFICATIONS ON A POWER FLOW DUE TO INCLUSION OF A UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER

ABSTRACT

The growth of power systems and the market conditions result of deregulated structures have made evident the operative and technical limitations that electric power systems have for supplying energy demand with strict conditions on security, power quality, and reliability. A unified power flow controller UPFC is one of the flexible AC transmission systems FACTS, devices which offer greater capabilities for interacting with operation and control

* Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander. Magíster en Ingeniería e investigador Grupo de Manejo Eficiente de la Energía, GIMEL, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jprivera@ieee.org

** Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Titular y coordinador Grupo GIMEL, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jvalenci@udea.edu.co

variables of an electric power system, and can be an optimal solution for the additional control requirements on a modern system. This paper presents a mathematical and conceptual formulation for including a UPFC on a load flow analysis, and a methodology for its including on a steady state power flow software. For validating the proficiency of proposed model and methodology, this paper selects a suitable platform system for viewing the expected effects on a load flow by including a UPFC.

KEY WORDS: FACTS; load flow; FACTS modeling; power systems software; UPFC.

MODIFICAÇÕES EM UM FLUXO DE CARGA PELA INCLUSÃO DE UM CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUXOS DE POTÊNCIA

RESUMO

O crescimento dos sistemas de potência e as condições de mercado dadas pelos esquemas desregulados evidenciaram as limitantes técnicas e de operação que os sistemas elétricos de potência SET têm para abastecer a demanda sob estritas condições de segurança, qualidade de potência e confiabilidade. Um controlador unificado de fluxos de potência UPFC (unified power flow controller) é um dos dispositivos da tecnologia FACTS (flexible AC transmission systems) que oferece maior versatilidade em termos de interação com as variáveis de operação e controle de um SET e pode ser uma solução ótima às necessidades adicionais de controle em um SET moderno. Este trabalho apresenta uma formulação matemática e conceptual para a inclusão de um dispositivo UPFC na análise de fluxos de carga em um SET e uma metodologia para sua inclusão em um software de fluxos de carga em estado estável. Para validar a eficiência dos modelos e métodos propostos, se seleciona um sistema de potência de prova adequado para ver os efeitos esperados da inclusão do UPFC no sistema.

PALAVRAS-CÓDIGO: FACTS; fluxo de carga; modelação de FACTS; software para sistemas de potência; UPFC.

1. INTRODUCCIÓN

Para alcanzar la confiabilidad operativa y técnica en un SEP ante los mercados desregulados y las necesidades en términos de capacidad, confiabilidad, calidad y seguridad de un SEP moderno, se requiere un amplio control y una utilización más eficiente de la infraestructura del sistema existente y esto se hace posible con la inclusión de controladores basados en electrónica de potencia, FACTS, gracias a sus óptimas características de capacidad, velocidad y controlabilidad (Paserba, 2007).

Desde el encuentro general de la Sociedad de Ingeniería de Potencia de IEEE, (IEEE Power Engineering Society), llevado a cabo en 2003 (Momoh, 2003), se ha planteado la necesidad de definir nuevos paradigmas de educación en ingeniería eléctrica y de incluir el estudio de los FACTS y su impacto en un SEP como un tema de dominio obligatorio de

las nuevas generaciones de ingenieros electricistas. En una encuesta evaluativa de los programas internacionales de educación en ingeniería de potencia, cuyos resultados fueron presentados en el encuentro general de la Sociedad de Ingeniería de Potencia en 2006 (Kyriakides y Suryanarayanan, 2006), se sugiere el estudio de dispositivos FACTS en sistemas de potencia como un tema especial que debe ser incluido en los cursos de pregrado.

Modelos completos de software de algunos dispositivos FACTS forman parte de software de tipo comercial o son modelos restringidos y de uso exclusivo de las empresas que financian las investigaciones en el área. Es necesario contar con modelos que den soporte tanto a los programas de formación en ingeniería eléctrica como a los grupos de investigación en ingeniería de potencia que quieran incursionar en el estudio y análisis de sistemas de potencia con dispositivos FACTS, haciendo uso de herramientas de



software simples y de bajo costo. Este artículo es uno de los resultados del trabajo de investigación de la tesis de maestría del autor principal y está orientado a ser una herramienta para la enseñanza de sistemas de potencia que incluyen la operación con dispositivos FACTS. Describe en detalle las modificaciones que la inclusión de un UPFC provoca en el flujo de carga y presenta una herramienta de software que incluye los modelos implementados.

2. DISPOSITIVOS FACTS

La idea operativa fundamental de un dispositivo FACTS es afectar alguno de los parámetros (tensiones de barra, ángulos de las tensiones o impedancia de una línea que une dos barras) de la ecuación de transferencia de potencia entre dos barras de un SEP. Los controladores FACTS de mayor aceptación y uso en diversos sistemas en el mundo son esencialmente el compensador estático de Var, SVC; el compensador estático síncrono de Var, STATCOM; el capacitor serie controlado por tiristores, TCSC; el compensador estático síncrono serie, SSSC; el regulador de ángulo de fase controlado por tiristores, TCPAR, y el UPFC (Hingorani y Gyugyi, 2000). La selección del dispositivo más adecuado para un SEP depende de un exhaustivo análisis con simulaciones de su impacto en el SEP. El dispositivo UPFC tiene grandes ventajas sobre los otros en términos de control de variables de un SEP (Povh, 2000b).

2.1 Controlador unificado de flujos de potencia, UPFC

El UPFC es una fuente de voltaje síncrona (synchronous voltage source, SVS), representada a la frecuencia fundamental para un SEP por el fasor de voltaje V_B con magnitud controlable V_B ($0 \leq V_B \leq V_{Bmax}$) y ángulo δ_B ($0 \leq \delta_B \leq 2\pi$), en serie con la línea de transmisión, como se muestra en la figura 1, donde se observa un sistema elemental de dos máquinas, con una línea de transmisión entre ellas.

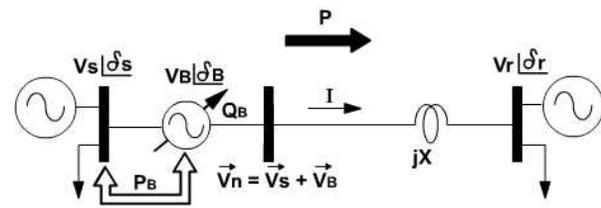


Figura 1. Fuente de voltaje síncrona: Representación conceptual de un UPFC en un sistema de potencia de dos máquinas

En un UPFC la potencia activa intercambiada con la línea es suministrada desde uno de los buses terminales del dispositivo como se sugiere en la figura 1. Por ello, desde el punto de vista de implementación práctica, el UPFC consta de dos convertidores de fuente de voltaje VSC (voltage source converter), como se ilustra en la figura 2.

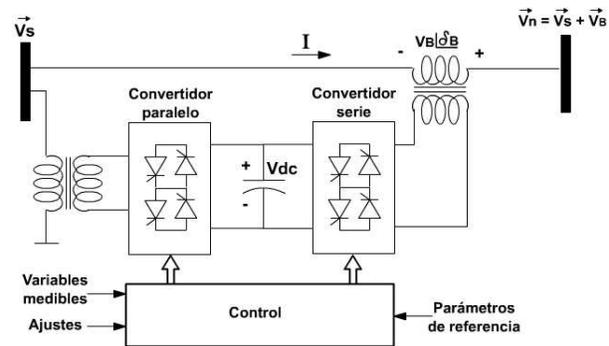


Figura 2. Arreglo de convertidores que conforman un dispositivo UPFC

Al convertidor conectado en paralelo, junto con su respectivo transformador, se le conoce como rama de excitación, y al convertidor conectado en serie se le conoce como rama de acople. Cada convertidor genera o absorbe reactivos independientemente (Hingorani y Gyugyi, 2000).

La principal función del UPFC es realizada por el convertidor serie, que inyecta un voltaje de magnitud y ángulo controlables, a través del transformador de acoplamiento en serie con la línea de transmisión. La potencia activa P intercambiada con la línea es suministrada por el mismo sistema a través

del convertidor paralelo y el enlace DC, por el cual la potencia activa puede fluir libremente en ambas direcciones entre los terminales AC de los dos convertidores. La potencia reactiva Q , intercambiada en el terminal AC del convertidor serie, es generada internamente por el convertidor y la potencia real intercambiada se convierte en potencia DC y aparece como potencia real negativa o positiva en el enlace DC. El lado AC del convertidor paralelo está conectado en paralelo con la línea de transmisión a través de un transformador e inyecta al sistema, o absorbe desde él, una corriente de magnitud y ángulo controlables. La función básica de este convertidor es suministrar o absorber la potencia activa demandada por el lado DC del convertidor serie. Sin embargo, puede también generar o absorber reactivos, proporcionando así compensación en paralelo independientemente del conversor serie, permitiendo un control local de voltaje.

Existen diferentes modos de operación y control del UPFC que incluyen, entre otros, el desacople total de los dos convertidores indicados en la figura 2 para proveer de manera independiente compensación de potencia reactiva paralelo y serie, sin ningún intercambio de potencia real (Hingorani y Gyugyi, 2000). La aplicación o modo de operación principal de un UPFC es el control de flujo de potencia multifuncional. En este modo de operación el UPFC permite un manejo simultáneo sobre la regulación del voltaje terminal, la compensación serie capacitiva en la línea y el cambio del ángulo de fase. En este caso el UPFC se usa para fijar valores de P y Q específicos en la línea en la que se inserta, además de controlar la tensión de la barra en la que se encuentra acoplado.

3. MODELAMIENTO DE DISPOSITIVOS FACTS

Este trabajo propone una herramienta para simular el impacto del dispositivo UPFC en el SEP para análisis de estado estable sin incluir modelamiento de los sistemas de control ni del detalle de la electrónica

de potencia de los convertidores que lo conforman. Este tipo de modelamiento implica simplificaciones que suponen que los sistemas de control de los convertidores operan en condiciones adecuadas y exige una representación adecuada del SEP. Es el tipo de modelación abordado en este artículo.

Hay una gran variedad de programas y modelos, la mayoría de ellos comerciales y de altos costos como DigSilent o PSCad, que ofrecen herramientas para el análisis de sistemas de potencia y controladores FACTS. Desde el año 2000 se han estado realizando investigaciones que utilizan técnicas de fasores dinámicos en modelamiento y análisis de dispositivos FACTS como las revisadas en Stankovic *et al.*, (2000), que ilustran la capacidad de las metodologías de modelado propuestas para los dispositivos tipo TCSC y tipo UPFC, que, sin embargo, no indican metodologías ni técnicas para incluir los modelos propuestos en software para flujos de carga o análisis de estabilidad. Investigaciones más recientes plantean complejos modelos de dispositivos FACTS para análisis de estabilidad, oscilaciones de potencia y estudio de restricciones de seguridad en flujos óptimos de potencia, OPF, basados en diferentes técnicas y haciendo uso de diferentes plataformas de software (Mhaskar y Kulkarni, 2006; Verma y Gupta, 2006; Berizzi *et al.*, 2005; Masuda *et al.*, 2004).

3.1 Modelamiento de dispositivos UPFC

Con base en la arquitectura básica de un UPFC, su capacidad de control en la transmisión de potencia y los diferentes modos de operación, según la interacción que se quiera con el SEP, la literatura mundial ha planteado diferentes modelos para estos dispositivos. Uno de ellos es el llamado “modelo de dos fuentes de corriente”, presentado por Dussan Povh (Povh, 2000a). Este modelo propone un esquema circuital con dos fuentes de corriente conectadas en paralelo y una fuente de voltaje en serie con la línea. Este modelo no es muy real ya que desprecia las pérdidas en los transformadores de acople y en



los convertidores, pero por su simplicidad puede ser útil en análisis de ubicación óptima de dispositivos. Otro modelo conocido como “modelo de dos puertos” se presenta en Orfanogianni y Bacher (2003), en una metodología basada en la identificación de la ubicación óptima de dispositivos FACTS para incrementar la máxima transferencia de potencia, y es un modelo que no considera las impedancias de los transformadores de excitación y de acople y que no incluye la capacidad de control de tensión del UPFC.

El llamado “modelo UPFC con impedancias” corresponde a la versión más completa de un modelo para UPFC. Considera ambos transformadores de acoplamiento como fuentes de tensión con sus respectivas impedancias en serie e incluye más variables que los modelos anteriores, dificultando su incorporación en herramientas de flujos de potencia. Sin embargo, este mayor nivel de modelación permite una representación más flexible y realista, alcanzando una mayor controlabilidad y resultados más cercanos a la operación real de un UPFC dentro de un sistema de potencia (Cerdeira y Palma, 2004). Esquemáticamente, su representación corresponde a la figura 3. El modelo matemático de estado estacionario fue desarrollado en Nabavi-Niaki e Iravani (1996), y el procedimiento de incorporación del UPFC en un flujo de potencia utilizando el método de Newton se expone en este artículo.

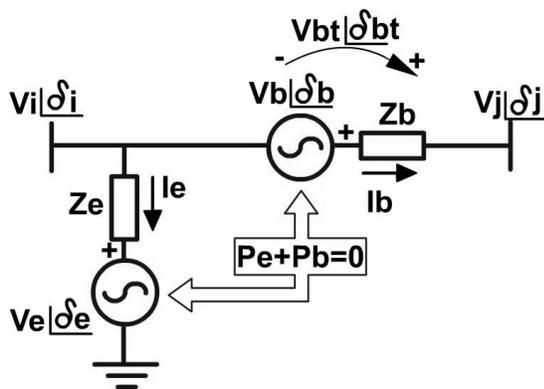


Figura 3. Modelo UPFC con impedancias

En este modelo se desprecian las pérdidas de potencia en los convertidores del UPFC, pero se consideran las pérdidas en los devanados de los transformadores serie y paralelo. En este trabajo se tomó el modelo UPFC con impedancias para ser empleado bajo el segundo frente de modelación mencionado.

3.2 Modelo para flujos de carga de dispositivo UPFC

Es común que la literatura internacional presente los modelos de dispositivos UPFC sólo en términos de su circuito equivalente, pero su inclusión en un SEP hace variar de manera significativa las expresiones para los modelos. Ahora se presenta una adaptación del modelo circuital para ser incluido en las ecuaciones de un SEP y para su posterior inclusión en un software de flujo de carga. Para generalizar, se utiliza la siguiente nomenclatura que define la ubicación de un UPFC en cualquier sistema, y se ilustra en la figura 4. Esta nomenclatura (a excepción del subíndice n impuesto al nodo de acople) es de uso común en textos como Acha *et al.*, (2004) y en publicaciones como Orfanogianni y Bacher (2003) y Nabavi-Niaki e Iravani (1996), entre otras.

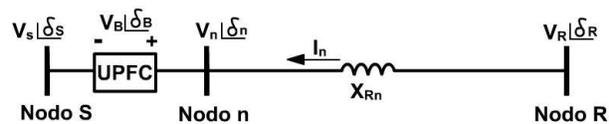


Figura 4. Inclusión de UPFC en línea de transmisión

Barra de origen: barra de la subestación en la que se conecta el dispositivo. Su fasor de voltaje será expresado como $\vec{V}_s = V_s \angle \delta_s$.

Barra de destino: barra terminal de la línea en la que se incluye el dispositivo UPFC. Su fasor de voltaje será expresado como $\vec{V}_R = V_R \angle \delta_R$.

Barra de acople: barra que aparece en el sistema al interrumpir la línea en la que se incluye el dispositivo, necesaria para acoplar el UPFC a la barra de destino. Su fasor de voltaje será expresado como $V_n = V_n \angle \delta_n$.

Ahora se presentan los intercambios de potencia entre el modelo y un SEP, además de las expresiones para la potencia activa y reactiva en las ramas de acople y de excitación del dispositivo. Estos intercambios de potencia se obtienen analizando el esquema circuital de la inserción del modelo en un SEP.

Este modelo parte de aplicar las leyes de Kirchhoff en el esquema circuital mostrado en la figura 5 y de considerar que la potencia que se entrega a la línea en la rama serie es absorbida desde el sistema en la rama paralelo y que no hay pérdidas en el traspaso.

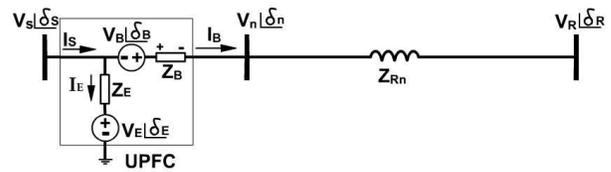


Figura 5. Modelo UPFC con impedancias inserto en línea de transmisión

Para simplificar el modelo y cumplir con esta restricción, se acoge en adelante que las impedancias de los transformadores no tienen parte real, y solo se representan por su componente reactiva. Si se observan de manera separada los términos que involucran sólo las variables de estado del UPFC y los que involucran solo las variables de estado del sistema y sus parámetros, se tiene la siguiente expresión para la potencia entregada al dispositivo desde la barra de origen:

$$\vec{S}_S = \frac{V_S V_E}{X_E} \sin(\delta_S - \delta_E) - \frac{V_S V_B}{X_B} \sin(\delta_S - \delta_B) + j \left(\frac{V_S V_B}{X_B} \cos(\delta_S - \delta_B) - \frac{V_S V_E}{X_E} \cos(\delta_S - \delta_E) \right) + \frac{V_S V_n}{X_B} \sin(\delta_S - \delta_n) + j \left(V_S^2 \left(\frac{X_E + X_B}{X_E \cdot X_B} \right) - \frac{V_S V_n}{X_B} \cos(\delta_S - \delta_n) \right) \quad (1)$$

La potencia entregada por el sistema desde el nodo de acople hacia el dispositivo queda dada por la expresión:

$$\vec{S}_n = \frac{V_n V_S}{X_B} \sin(\delta_n - \delta_S) + \frac{V_n V_B}{X_B} \sin(\delta_n - \delta_B) + j \left[\frac{V_n^2}{X_B} - \frac{V_n V_S}{X_B} \cos(\delta_n - \delta_S) - \frac{V_n V_B}{X_B} \cos(\delta_n - \delta_B) \right] \quad (2)$$

Dada la consideración del modelo del dispositivo que acepta que la potencia activa que el dispositivo entrega al sistema a través de la rama serie se toma del mismo sistema a través de la rama paralelo, se obtiene la siguiente ecuación, que es una restricción importante del modelo:

$$\frac{V_S V_E}{X_E} \sin(\delta_S - \delta_E) - \frac{V_S V_B}{X_B} \sin(\delta_S - \delta_B) + \frac{V_n V_B}{X_B} \sin(\delta_n - \delta_B) = 0 \quad (3)$$



4. SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGA INCLUYENDO FACTS

El flujo de potencia en un nodo k en el que se ha incluido un dispositivo FACTS debe considerar el flujo a través del dispositivo, lo que modifica las ecuaciones clásicas de un flujo de potencia para las potencias real y reactiva totales, P_k y Q_k , que entran a la red mediante la barra k .

Observamos en la ecuación (5) que a las expresiones matemáticas para la potencia activa y reactiva, en nodos en los que se incluye un dispositivo FACTS, les surge un nuevo componente que es función de las variables de estado del FACTS. Esta expresión dependerá del tipo de dispositivo FACTS insertado al sistema y en este artículo se analiza en términos de las variables de estado del dispositivo UPFC y de las ecuaciones presentadas para él. Si

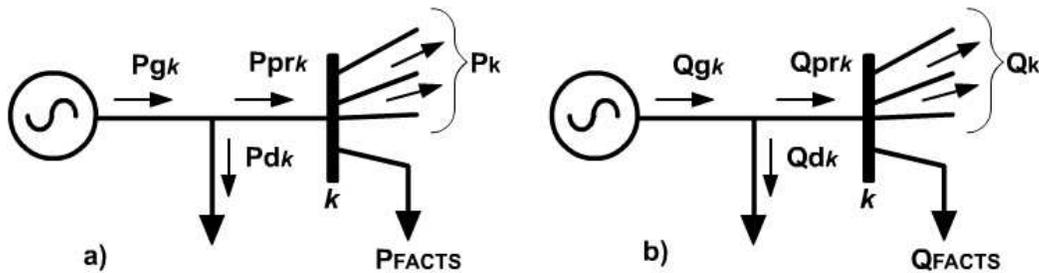


Figura 6. Flujos de potencia en una barra con dispositivos FACTS.
a) Flujo de potencia activa b) Flujo de potencia reactiva

Como se indica en las figuras 6a) y 6b), la corriente total que se inyecta a la red en este tipo de nodo (con dispositivo FACTS) se ve definida no solo por las líneas conectadas al nodo, y, por tanto, por los términos de los elementos Y_{kn} de la matriz Y_{barra} del sistema, sino además por los parámetros del dispositivo FACTS. Con esta consideración se obtiene la expresión para la corriente inyectada a la red en el nodo k :

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kN}V_N + I_{facts} = \sum_{n=1}^N Y_{kn}V_n + I_{facts} \quad (4)$$

Entonces, el complejo conjugado de la potencia que se inyecta a la barra k es:

$$P_k - jQ_k = \sum_{m=1}^N V_k V_m (G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)) - j \sum_{m=1}^N V_k V_m (G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)) + MVA_{facts}^* \quad (5)$$

las expresiones para P y Q de los nodos en los que se insertan dispositivos FACTS cambian, se modifica también el flujo de potencia en la medida en que surgen las variables de estado del dispositivo FACTS. El aumento de variables de estado exige también el aumento del número de ecuaciones que definen el sistema para que tenga solución y, dependiendo del método de solución para resolver el sistema, hará necesaria la modificación de su jacobiano. Las modificaciones en el flujo de carga podrán exigir o no la modificación de la matriz Y barra del sistema.

Para la incorporación del dispositivo UPFC en estudios de flujo de carga, es necesario tener en cuenta tanto las variables de estado del dispositivo y sus variables de control, como el método para resolver el sistema de ecuaciones. Hay dos opciones para resolver el sistema usando el algoritmo Newton-Raphson: el método simultáneo o unificado y el método secuencial o alternante. En el método

unificado todas las ecuaciones se combinan dentro de un grupo de ecuaciones algebraicas no lineales. En el método secuencial las ecuaciones se separan en dos grupos: el correspondiente a las variables del dispositivo FACTS y el correspondiente al resto de ecuaciones de balance de potencia del SEP. Aquí las ecuaciones se resuelven separada y secuencialmente. La formulación de flujo de carga convencional en este método se conserva como una subparte del algoritmo principal. En este artículo se presenta el método secuencial o alternante utilizando variables de estado duales (magnitud y ángulo de voltajes) y variables de control dual (potencia activa y reactiva serie inyectada).

4.1 Metodología para la inclusión del modelo UPFC en el SEP

La metodología que propone este trabajo se compone de tres pasos fundamentales en los que se define una nueva arquitectura de red para efectos de simulación, se ejecuta un flujo de carga convencional y se resuelve un sistema no lineal de ecuaciones dado por el UPFC dentro de un SEP. Cada uno de estos tres grandes pasos debe seguir una serie de consideraciones que se describen en detalle en los numerales 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3.

4.1.1 Definición del nuevo esquema de red con el UPFC

Al incluir el UPFC se modifica la arquitectura del SEP considerando el dispositivo UPFC como una rama separada de la red y abriendo el sistema en el punto de inserción. El UPFC pasa a ser una nueva rama de la red que debe ser aislada de la arquitectura del SEP que se quiere analizar mediante un flujo de carga. Esta rama, aunque no debe tenerse en cuenta en la construcción de la matriz de admitancia de la red, sí la modifica de manera breve, dado que provoca la aparición de un nuevo nodo que corresponde a la barra de acople, y, como se mencionó, provoca la apertura del sistema en el punto de inserción del UPFC. La rama dada por el dispositivo UPFC, según esta propuesta, no exige modificaciones complejas al software para flujo de potencia, aunque sí exige un código adicional para la inclusión de su impacto en el comportamiento del sistema. El nuevo sistema será como se muestra en la figura 7. El jacobiano de este nuevo sistema se transforma de manera indirecta, puesto que se deshace la conexión entre la barra de origen y la barra destino. En este primer paso de la metodología se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

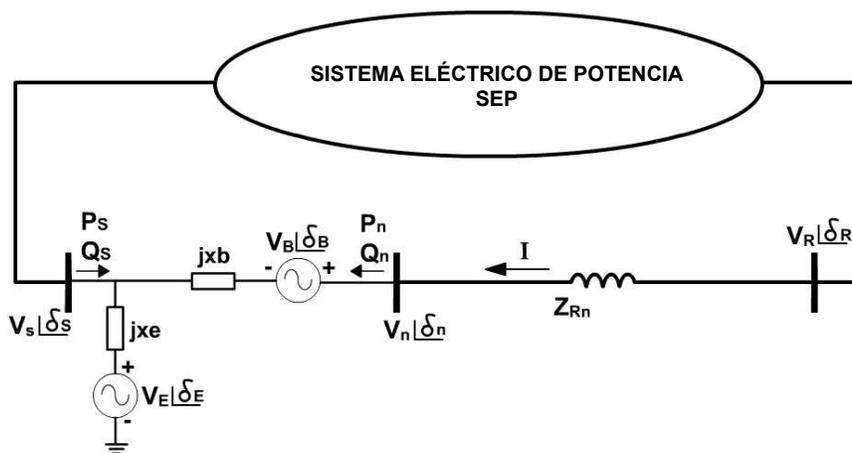


Figura 7. Inclusión de un modelo UPFC con impedancias en un SEP



1. Para efectos de simulación, surge una nueva barra en el sistema, la barra **n**. Esta barra de acople será considerada en el flujo como barra PQ, ya que en ella se desconocen los valores de magnitud y ángulo de la tensión y se conoce el flujo neto de activa y reactiva.
2. La unión entre las barras de origen y de destino, a través de una línea de transmisión, desaparece, y aparece la unión entre la barra de acople y la de destino a través de la línea de transmisión que había entre barras de origen y de destino.
3. La barra de origen se considera como una barra PV. Su inyección de potencia activa está definida por la potencia que se quiere fijar al incluir el UPFC. La tensión de esta barra la define el valor de la tensión que se quiere fijar por el efecto de la inclusión del UPFC.
4. Se define una nueva arquitectura de red para el SEP al considerar el UPFC como una rama aislada, al abrir el sistema en el punto de inserción del UPFC y al considerar las barras de origen y destino, como se indicó en las tres consideraciones anteriores. La nueva arquitectura de red es como se indica en la figura 8.

La inclusión del modelo UPFC en el flujo de potencia se realiza imponiendo a la red el efecto deseado en el flujo. De aquí surgen los parámetros de entrada necesarios para, más adelante, resolver el sistema no lineal dado por las ecuaciones del UPFC.

4.1.2 Flujo de potencia incluyendo el efecto esperado del UPFC

Una vez definida la nueva arquitectura del SEP para efectos de simulación, se realiza el segundo paso de la metodología, que corresponde a la ejecución de un flujo de carga convencional sobre la nueva arquitectura definida en el paso anterior que, aunque no implica ninguna modificación al flujo de carga (en este segundo paso de la metodología) debida a la inclusión del UPFC, sí lo considera mediante la nueva arquitectura de red (figura 8) en la que se incluye el impacto de este dispositivo en el SEP.

En la figura 8, P_f y Q_f son los valores de potencia activa y reactiva que se quieren fijar en la línea, y V_s es la tensión que se quiere imponer en la barra de origen. En la barra de origen se simula el efecto del UPFC como un generador cuya potencia activa es el valor que se quiere absorber (lo que da el signo a la potencia), desde la red hacia el UPFC, y cuya

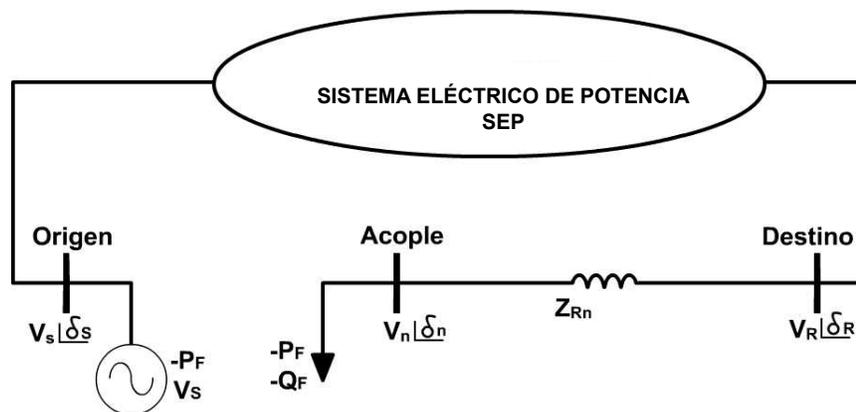


Figura 8. Nueva arquitectura de red para simulación de impacto sobre un SEP de dispositivo UPFC en modo de operación completo

tensión es el valor de tensión que se quiere fijar en la barra. En la barra de acople se fijan como carga los valores de potencia que se quieren imponer (lo que da el signo a las potencias), en la línea entre las barras de acople y destino. Una vez realizado el flujo de carga normal a esta arquitectura especial de red, se obtienen valores para las tensiones y sus respectivos ángulos y los flujos de potencia activa y reactiva en todas las barras del sistema, incluidas las de origen y de acople. Estos son los parámetros de entrada necesarios para la solución del sistema de ecuaciones dado por el dispositivo UPFC en el siguiente paso.

4.1.3 Solución del sistema de ecuaciones del UPFC

Entendiendo el UPFC como una rama fuera de la red de potencia y después de conocer las tensiones y flujos de potencia en la red por el efecto de la inclusión del dispositivo, se considera el esquema circuital mostrado en la figura 9.

El modelo por resolver del UPFC se obtiene planteando los balances de potencia en las barras

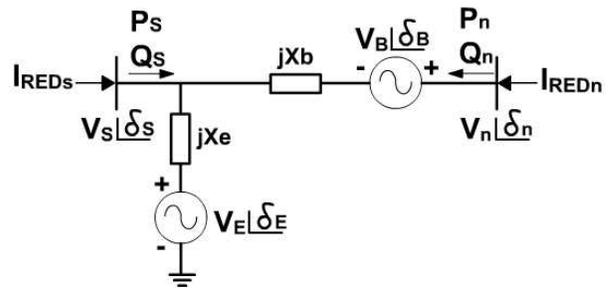


Figura 9. Modelo UPFC como rama aislada de la red de potencia

s y n del circuito de la figura 9: $\Delta P_s = 0$; $\Delta Q_s = 0$; $\Delta P_n = 0$; $\Delta Q_n = 0$. Este grupo de ecuaciones se plantea para ser resuelto mediante la técnica de Newton-Raphson y las variables indicadas en ellos son Pf, potencia activa que se quiere fijar entre las barras acople y destino; Qf, potencia reactiva que se quiere fijar entre las barras acople y destino; Q_{sis}, potencia reactiva inyectada desde el sistema hacia el UPFC a través de la barra s, y P_s, Q_s, P_n y Q_n son las expresiones para la potencia activa y reactiva entregadas por el sistema al UPFC en las barras s y n respectivamente. El sistema de ecuaciones para resolver con Newton-Raphson es:

$$\Delta P_s = -P_f + \frac{V_s V_E}{X_E} \sin(\delta_s - \delta_E) - \frac{V_s V_B}{X_B} \sin(\delta_s - \delta_B) + \frac{V_s V_n}{X_B} \sin(\delta_s - \delta_n) \quad (6)$$

$$\Delta Q_s = -Q_{sis} + V_s^2 \left(\frac{X_E + X_B}{X_E \cdot X_B} \right) - \frac{V_s V_n}{X_B} \cos(\delta_s - \delta_n) + \frac{V_s V_B}{X_B} \cos(\delta_s - \delta_B) - \frac{V_s V_E}{X_E} \cos(\delta_s - \delta_E) \quad (7)$$

$$\Delta P_n = P_f + \frac{V_n V_s}{X_B} \sin(\delta_n - \delta_s) + \frac{V_n V_B}{X_B} \sin(\delta_n - \delta_B) \quad (8)$$

$$\Delta Q_n = Q_f + \frac{V_n^2}{X_B} - \frac{V_n V_s}{X_B} \cos(\delta_n - \delta_s) - \frac{V_n V_B}{X_B} \cos(\delta_n - \delta_B) \quad (9)$$

En Acha *et al.* (2004) se hacen recomendaciones para inicializar las variables de estado de modelos de dispositivos FACTS, que permiten

llegar a soluciones robustas del sistema con una convergencia adecuada del método de Newton-Raphson.



5. SOFTWARE DE FLUJO DE POTENCIA CON DISPOSITIVOS UPFC EN MODO DE OPERACIÓN COMPLETO

Se adopta el método secuencial o alternante, ya que permite una modificación relativamente menor de cualquier software existente para flujos de carga, y hace muy versátil su inclusión en paquetes de software que no incluyan esta aplicación. En el diagrama de flujo de la figura 10, es evidente que la metodología propuesta no involucra modificaciones al software de flujo de carga, sino a las matrices que lo alimentan.

6. VALIDACIÓN DE MODELOS

Una pequeña red denominada red Hale presentada en Acha *et al.* (2004) se utiliza para ilustrar la funcionalidad del modelo y la metodología propuesta. Al correr un flujo de carga en la red Hale se observa que presenta el fenómeno de congestión y de operación no óptima por manejo de energía reactiva en la red. Por ello éste es un sistema ideal para utilizar un dispositivo UPFC y redireccionar los flujos de potencia para tener una operación aun mejor de la red. La red Hale se modifica para incluir el modelo UPFC, como se ilustra en la figura 11. El

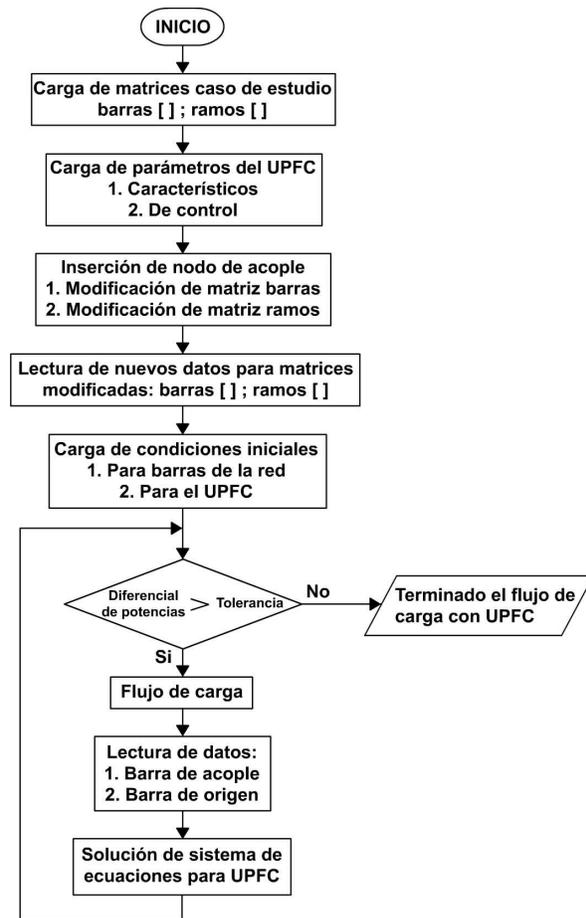


Figura 10. Diagrama de flujo para software de flujo de carga con inclusión de UPFC

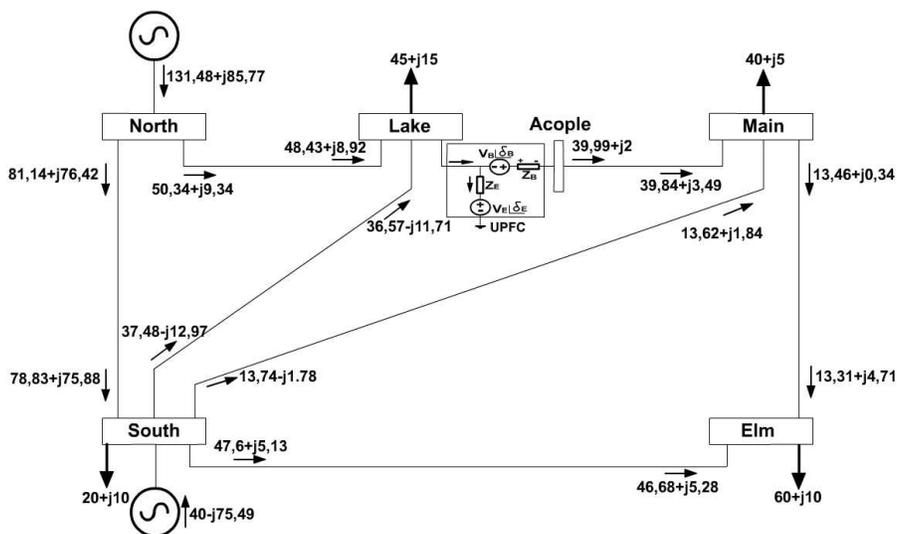


Figura 11. Red de prueba de 5 buses con UPFC incluido y resultados del flujo de potencia

UPFC se utiliza en el modo de control completo para mantener flujos de potencia activa y reactiva hacia barra Main y para regular la magnitud del voltaje en barra Lake. En el capítulo 5 de Acha *et al.* (2004) se encuentra el resultado completo de flujos, tensiones, generación y pérdidas para un flujo de potencia en la red Hale modificada con el UPFC, realizando un control completo y haciendo uso de una herramienta de software que emplea un algoritmo de solución unificado. De esta misma referencia se toman los parámetros del dispositivo para tener un patrón de comparación con los resultados de las simulaciones realizadas por esos autores, y se presentan en las tablas 1 y 2. En la tabla 1 se fijan los límites técnicos del dispositivo UPFC en las tensiones de sus transformadores serie y paralelo y sus admitancias. En la tabla 2 se indican los valores de potencia activa, potencia reactiva y de tensión que se quieren imponer en la red por la inclusión del UPFC.

Se realiza una simulación con el modelo propuesto en este trabajo y se muestran los resultados obtenidos, junto con los resultados para el mismo caso presentados en Acha *et al.* (2004), y el error relativo asociado en cada caso. Estos resultados se presentan en las tablas 3, 4, 5 y 6, y muestran la ver-

satilidad del modelo y de la metodología propuesta contra la dificultad que implica modificar un algoritmo de flujo de potencia con un método unificado para la solución de un flujo de carga como el usado en la referencia con la que se compara: Acha *et al.* (2004).

Tabla 1. Parámetros del UPFC para incluir en la red Hale

Parámetro	Símbolo	Valor (p.u)
Tensión de excitación máxima	V_E^{\max}	1,1
Tensión de acoplamiento máxima	V_B^{\max}	0,6
Admitancia de excitación	Ye	j10
Admitancia de acoplamiento	Yb	j10

Tabla 2. Parámetros de control del UPFC

Parámetro de control especificado	Símbolo	Valor
Tensión en barra de origen	V_s	1 (p.u)
Flujo de potencia activa en barra de acople	P_{n_espec}	40 (MW)
Flujo de potencia reactiva en barra de acople	Q_{n_espec}	2 (MVar)

Tabla 3. Flujos de potencia activa en líneas de transmisión

Barra 1	Barra 2	Barra 1 a Barra 2			Barra 2 a Barra 1		
		Modelo	Referencia	Error (%)	Modelo	Referencia	Error (%)
North	South	81,1395	81,14	0,0006162	-78,8343	-78,84	0,007229
North	Lake	50,3399	50,34	0,0001986	-48,4305	-48,43	-0,001032
South	Lake	37,4843	37,48	-0,0114720	-36,5690	-36,57	0,002734
South	Main	13,7384	13,74	0,0116448	-13,6251	-13,63	0,035950
South	Elm	47,6097	47,61	0,0006300	-46,6854	-46,69	0,009852
Acople	Main	39,9986	40	0,0035000	-39,8366	-39,84	0,008534
Main	Elm	13,4621	13,46	-0,0156010	-13,3084	-13,31	0,012021

**Tabla 4.** Flujos de potencia reactiva en líneas de transmisión

Barra 1	Barra 2	Barra 1 a Barra 2			Barra 2 a Barra 1		
		Modelo	Referencia	Error	Modelo	Referencia	Error (%)
North	South	76,4248	76,42	-0,006280	-75,8798	-75,87	-0,0129168
North	Lake	9,3434	9,34	-0,036400	-8,9241	-8,92	-0,0459641
South	Lake	-12,9694	-12,97	0,004626	11,7151	11,71	-0,0435525
South	Main	-1,7827	-1,78	-0,151680	-1,8443	-1,85	0,3081081
South	Elm	5,1359	5,14	0,079766	-5,2875	-5,29	0,0472589
Acople	Main	2,0008	2,00	-0,040000	-3,4913	-3,49	-0,0372492
Main	Elm	0,3371	0,34	0,852941	-4,7084	-4,71	0,0339702

Tabla 5. Magnitud y ángulo de tensiones de barra

Barra	Magnitud (p.u)			Ángulo (grados)		
	Modelo	Referencia	Error (%)	Modelo	Referencia	Error (%)
North	1,0600	1,060	0	-0,0000	0	0
South	1,0000	1,000	0	-1,7691	-1,77	0,0508474
Lake	1,0000	1,000	0	-6,0160	-6,02	0,0664451
Main	0,9917	0,992	0,0302419	-3,1905	-3,19	-0,0156739
Elm	0,9745	0,975	0,0512820	-4,9737	-4,97	-0,0744466
Acople	0,9965	0,997	0,0501504	-2,5121	-2,51	-0,0836653

Tabla 6. Parámetros del dispositivos FACTS

	Modelo	Referencia	Error (%)
Voltaje en transformador serie, Vb (p.u)	0,1013	0,1013	0,0000
Ángulo de Vb, (grados)	87,2700	87,2656	0,0050
Voltaje en transformador shunt, Ve (p.u)	1,0173	1,0173	0,0000
Ángulo de Ve, (grados)	-6,0055	-6,0054	0,0017

En las tablas 3 a 6 se puede observar que en todos los casos el error, si lo hay, es lo suficientemente pequeño para considerar que el modelo planteado en este trabajo funciona de manera correcta para un flujo de potencia, por lo que se considera un modelo validado.

Con el modelo planteado en el numeral 4.1.3 para la simulación del UPFC en el modo de control completo, es importante tener en cuenta que en Acha *et al.* (2004) se presentan los resultados cuando se usa un modelo UPFC incluido en la red utilizando el método de solución simultáneo y que invierte la polaridad para la tensión de la fuente del modelo en la rama serie (figura 9). Por este motivo, al ángulo del voltaje de la fuente de tensión del modelo en la rama serie del UPFC, presentado en Acha *et al.* (2004), se le suman 180° para poder realizar la comparación con el modelo propuesto en este trabajo que, además de tener una polaridad diferente para la tensión en el voltaje de la rama serie del UPFC, utiliza un método de solución secuencial para resolver el sistema de ecuaciones del UPFC, después de haber desarrollado un proceso iterativo para encontrar las condiciones del sistema de potencia considerando el efecto de la inclusión del dispositivo UPFC.

Como es de esperarse, los flujos de potencia incluyendo el dispositivo FACTS tipo UPFC en la red Hale, mostrados en la figura 11, difieren de los flujos de potencia de la misma red sin la inclusión del UPFC. El cambio más significativo es el aumento en un 32,5% en la cantidad de potencia activa que entra a la barra Lake desde las barras North y South, debido a la exigencia de potencia activa que hace el convertidor serie para imponer la potencia activa deseada en la línea Lake-Main. Por otro lado, dado que el UPFC genera su propia potencia reactiva, el generador de la barra North disminuye su generación de potencia reactiva en un 5,56 %, comparada con el caso de la red sin UPFC, y el generador de la barra South incrementa su absorción de potencia reactiva en un 22,5 %. También se observó que la simulación con este modelo mantiene el voltaje en la barra Lake en el valor especificado en los parámetros

de control de la tabla 2, así como los valores especificados de potencia por fijar (también presentados en la tabla 2), en la línea de transmisión entre las barras Lake y Main, donde se instala el UPFC.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo ha propuesto y validado un modelo para inclusión en un SEP de un dispositivo FACTS tipo UPFC para estudios eléctricos de estado estable. Se incluye la formulación conceptual y matemática para facilitar su implementación en otras herramientas similares. La metodología de inclusión en el SEP propuesta puede servir como modelo para análisis del impacto de otros FACTS en un SEP.

Aunque la literatura mundial presenta múltiples trabajos de modelamiento de dispositivos FACTS tipo UPFC, son pocos los que presentan detalles de su inclusión en software para análisis de sistemas de potencia. Acha *et al.* (2004) presentan detalles del modelo que se propone resolver con un método de solución unificado, pero es un código que requiere cambios de fondo en el algoritmo de flujo de carga ya que exige modificaciones en el jacobiano y entrar a modificar la raíz del software de flujo de carga que se piense utilizar. Esto hace valioso este trabajo, en la medida en que, además de detallar los algoritmos de inclusión de los dispositivos UPFC en un SEP, permite incorporarlos fácilmente en cualquier tipo de software para flujo de carga y explica con claridad las modificaciones que debe tener el sistema presentando todo el desarrollo matemático asociado al modelo de UPFC.

Las aproximaciones de modelamiento utilizadas para representar equipo controlable tipo FACTS pueden clasificarse en términos generales en dos categorías llamadas, métodos de solución secuencial y métodos de solución unificada. En cualquiera de los dos, el dispositivo debe considerarse como una rama separada de la red para obtener las ecuaciones que rigen su dinámica, por lo que su inclusión en el SEP para un flujo de potencia no altera de manera directa la matriz Y barra del sistema, aunque sí lo hace de manera indirecta, por cuanto modifica las



matrices de barras y de ramas, que son las entradas para el software de flujo de potencia. El segundo método exige la alteración del jacobiano del sistema, lo que lo hace un método más complejo en el que pueden aparecer problemas de convergencia no cuadrática. Este trabajo utilizó la primera aproximación, métodos de solución secuencial, lo que permitió realizar implementaciones en algoritmos de Newton-Raphson, de manera separada para la red y para el dispositivo UPFC, y llegar a resultados con errores por debajo del 0,8 % comparados con sistemas que usan el método de solución unificado. Este error puede ser despreciable frente a las ventajas que ofrece la simplicidad del modelo propuesto en este trabajo y la complejidad de los métodos basados en solución unificada.

La mayoría de autores sugiere como ecuación importante en el modelamiento del UPFC para su inserción en un SEP el balance de potencia activa entre los convertidores serie y paralelo del UPFC, donde se plantea que la potencia activa entregada al sistema por el dispositivo en la rama serie es absorbida del sistema por el dispositivo a través de la rama paralelo sin pérdidas durante el proceso en los convertidores. En el método secuencial, la escogencia de esta ecuación como parte del sistema no es adecuada cuando se desprecian las pérdidas de potencia activa en los transformadores de acople del UPFC a la red de potencia, ya que, en ese caso, esta ecuación resulta ser una combinación lineal de las ecuaciones de potencia activa en las barras de origen y de acople.

REFERENCIAS

- Acha, E.; Fuente-Esquivel, C.; Ambriz-Pérez H. and Ángeles-Camacho C. *FACTS: modeling and simulation in power networks*. John Wiley and Sons, 2004. 403 p., ISBN 0-470-85271-2.
- Berizzi, A.; Delfanti, M.; Marannino, P.; Pasquadibisceglie, M. S. and Silvestri, A. (2005). *Enhanced security-constrained OPF with FACTS devices*. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, No. 3, (Aug. 2005), pp. 1597-1605.
- Cerda, S. y Palma, R. (2004). Modelación e incorporación del controlador unificado de flujo de potencia en el flujo de potencia óptimo. Tesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2004.
- Hingorani, N. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Power Engineering Society, IEEE Press; ISBN 0780334558.
- Kyriakides, E. and Suryanarayanan, S. (2006). *Surveys-based assessment of international power engineering education programs*. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE 18-22 June 2006.
- Masuda, M.; Bormio, E.; Jardini, J. A.; Silva, F. A. T.; Copeliovitch, S. and Camargo, J. (2004). *Development and implementation of FACTS devices in distribution networks*. IEEE/PES Transmisión and Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2004, pp. 839-844.
- Mhaskar, U. P. and Kulkarni, A. M. (2006). Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, No. 1 (Feb. 2006), pp. 285-294.
- Momoh, J. (2003). Developing interdisciplinary research and education: a case for power system. Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, vol. 1 (July 2003), pp. 13-17.
- Nabavi-Niaki A. and Iravani M. R. (1996). Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, No. 4, 1996.
- Orfanogianni, T. and Bacher, R. (2003). Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, Issue 1 (Feb. 2003), pp. 19-26.
- Paserba, J. (2007). Recent power electronics/FACTS installations to improve power system dynamic performance. Power Engineering Society General Meeting, 2007 IEEE. 24-28 June 2007, pp. 1-4.
- Povh, D. (2000a). Modeling of FACTS in power system studies. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE 23-27 Jan. 2000, vol. 2, pp. 1435-1439.
- Povh, D. (2000b). "Use of HVDC and FACTS". *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, No. 2 (Feb. 2000), pp. 235-245.
- Stankovic, A. M.; Mattavelli, P.; Caliskan, V. and Verghese, G. C. (2000). Modeling and analysis of FACTS devices with dynamic phasors. Power Engineering Society Winter Meeting IEEE; vol. 2 (Jan 2000), pp. 1440-1446.
- Verma, K. S. and Gupta, H. O. (2006). Impact on real and reactive power pricing in open power market using unified power flow controller. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, No. 1 (feb. 2006), pp. 365-371.