

Comparación de metodologías para la inclusión del UPFC en estudios de estado estacionario

Ixtláhuatl Coronado G.

Juan M. Ramírez A.

Pável Zúñiga H.

CINVESTAV-Unidad Guadalajara

email: icoronad[jramirez][pzuniga]@gdl.cinvestav.mx

Resumen—Se presentan las principales características de dos modelos del Controlador Unificado de Flujos de Potencia (UPFC) para estudios de estado estacionario. Asimismo, se hace una comparación entre ellos utilizando un sistema de potencia de tres máquinas con un UPFC insertado en el mismo para analizar el desempeño de cada metodología.

Palabras Clave—FACTS, UPFC, Newton-Raphson.

I. INTRODUCCIÓN

El control del flujo de potencia en sistemas de potencia puede ser más flexible debido al desarrollo de los dispositivos FACTS, el cual se ha dado gracias al gran auge que ha tenido la electrónica de potencia. La tecnología de FACTS abre nuevas oportunidades en el control de la potencia y el incremento de la capacidad disponible, ya que la posibilidad de controlar la corriente a través de una línea a un costo razonable, permite incrementar la capacidad de las líneas existentes. Esto se puede lograr debido a que estos dispositivos tienen la capacidad de manejar parámetros que actualmente restringen a los sistemas eléctricos de potencia, permitiendo además operar las líneas de transmisión cerca de sus límites térmicos, lo que

anteriormente no era posible sin violar las restricciones de seguridad del sistema. Dentro de los dispositivos FACTS, el Controlador Unificado de Flujos de Potencia (UPFC) es uno de los más prometedores debido a sus características operativas, que le permiten controlar en tiempo real los principales parámetros de un sistema de potencia (magnitud y fase de voltaje e impedancia) [1].

La estructura básica del UPFC se ilustra en la Fig. 1 [2]. El UPFC consiste de dos convertidores (fuentes inversoras de voltaje) compuestos de GTO's trifásicos. Los dos convertidores son operados desde un capacitor que sirve como enlace de C.D.

El convertidor 1 (conectado en derivación) se utiliza para suministrar la potencia real demandada por el convertidor 2 a través del enlace de C.D. La potencia real intercambiada está determinada por la diferencia angular del voltaje del convertidor y el voltaje del sistema de C.A. El convertidor 1 también puede generar o absorber potencia reactiva en sus terminales de C.A., por lo tanto, también puede ejecutar las funciones de un compensador estático de VAR's.

El convertidor 2 realiza la función principal del UPFC, inyectando un voltaje de magnitud y ángulo controlable en serie con la línea a través de un transformador de acoplamiento. Este voltaje de C.A. se produce por la conmutación de tiristores alimentados con C.D. desde el capacitor de enlace.

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.

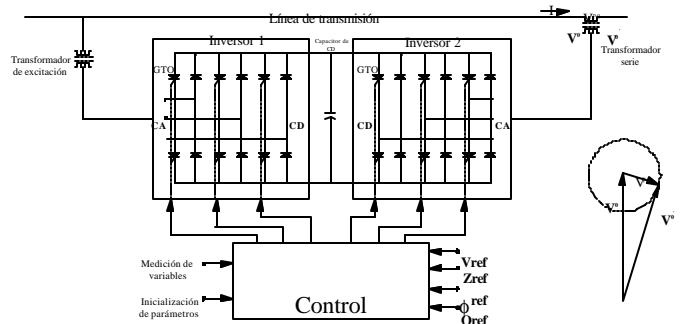


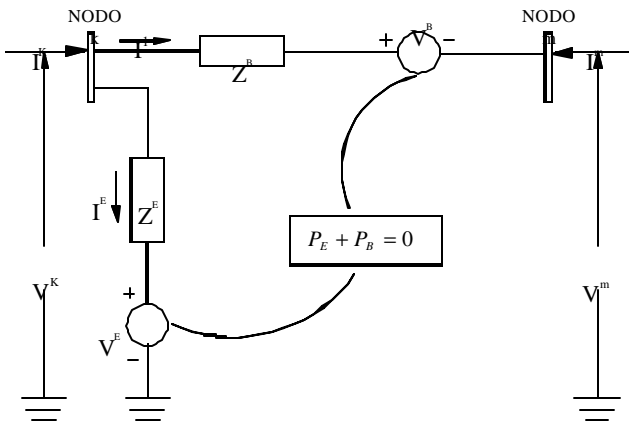
Fig. 1. Diagrama esquemático del UPFC

II. MODELOS DEL UPFC PARA ESTUDIO DE ESTADO ESTACIONARIO.

Los métodos de cálculo de flujos de carga con dispositivos FACTS pueden clasificarse en dos categorías. La primera categoría consiste en desacoplar los dispositivos FACTS de la red de potencia transfiriendo la fuente de voltaje/corriente equivalente como una inyección de potencia nodal. Este es llamado *método de inyección de potencia nodal*. La otra categoría consiste en encontrar en forma simultánea la solución del sistema de ecuaciones de potencia nodal con la incorporación de las ecuaciones de los dispositivos FACTS. Este es llamado *método unificado de solución iterativa*. A continuación se van a describir los modelos para el UPFC propuestos por C.R. Fuerte [3] (modelo unificado), y por W.L. Fang [4] (modelo de inyecciones de potencia).

A. Modelo Unificado [3]

En este modelo se introducen un sistema de ecuaciones no lineales para describir cada UPFC, para lo cual es necesario agregar un nodo ficticio por cada UPFC. Las ecuaciones de la red tradicionales junto con este sistema de ecuaciones se resuelven simultáneamente con un algoritmo de Newton-Raphson. Las variables a resolver incluyen magnitudes y ángulos de todos los voltajes nodales y los parámetros de control del UPFC. Los valores iniciales de los parámetros de control del UPFC se valoran primeramente mediante la simplificación de las ecuaciones del UPFC. El circuito equivalente del UPFC mostrado en la Fig. 2, se utiliza como el modelo en estado estacionario.



El circuito equivalente consiste de dos fuentes ideales de voltaje. La limitante $P_E + P_B = 0$, mostrada implica que:

- La potencia real no se intercambia entre el UPFC y el sistema; así, el voltaje de c.d. permanece constante.
- Las dos fuentes de voltaje V_B y V_E son mutuamente dependientes.

Las fuentes de voltaje ideal están representadas por:

$$V_E = V_E (\cos \mathbf{d}_E + j \sin \mathbf{d}_E) \quad (1)$$

$$V_B = V_B (\cos \mathbf{d}_B + j \sin \mathbf{d}_B) \quad (2)$$

donde V_E y \mathbf{d}_E son la magnitud y el ángulo de la fuente de voltaje del convertidor en derivación ($V_{Emin} \leq V_E \leq V_{Emax}$) ($0 \leq \mathbf{d}_E \leq 2\mathbf{p}$). La magnitud V_B y el ángulo \mathbf{d}_B de la fuente de voltaje del convertidor serie tienen como límites ($V_{Bmin} \leq V_B \leq V_{Bmax}$) y ($0 \leq \mathbf{d}_B \leq 2\mathbf{p}$), respectivamente.

La potencia activa asociada con el convertidor en serie se convierte en potencia de c.d. El convertidor en derivación debe suministrar la cantidad de potencia de c.d. para mantener V_{ω} constante. Así, la potencia activa suministrada al convertidor en derivación P_E debe satisfacer la demanda de potencia activa por el convertidor en serie, P_B :

$$P_E + P_B = 0 \quad (3)$$

Como los controles interactúan con otras redes, la convergencia de la solución llega a ser el principal interés en el modelado de los dispositivos controlables. Las variables de estado del UPFC se ajustan automáticamente para satisfacer los flujos de potencia y magnitudes de voltaje especificados. Las ecuaciones de potencia del UPFC linealizadas se combinan con el sistema de ecuaciones linealizadas del resto de la red,

$$[f(x)] = [J][\Delta X] \quad (4)$$

donde

$$[f(x)] = [\Delta P_k \quad \Delta P_m \quad \Delta Q_k \quad \Delta Q_m \quad \Delta P_{mk} \quad \Delta Q_{mk} \quad \Delta P_{bb}]^T$$

siendo ΔP_{bb} el error de potencia, el superíndice T indica la transposición; $[\Delta X]$ es el vector solución y $[J]$ es la matriz Jacobiana.

Para el caso en que el UPFC controle la magnitud de voltaje en la terminal del convertidor en derivación de c.a. (nodo k), la potencia activa que fluye del nodo m al nodo k , y la potencia reactiva inyectada en el nodo m , asumiendo que el nodo m es tipo PQ, el vector solución y la matriz Jacobiana tienen la forma:

$$[\Delta X] = \left[\Delta \mathbf{d}_k \quad \Delta \mathbf{d}_m \quad \frac{\Delta V_E}{V_E} \quad \frac{\Delta V_m}{V_m} \quad \Delta \mathbf{d}_B \quad \frac{\Delta V_B}{V_B} \quad \Delta \mathbf{d}_E \right]^T \quad (5)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \mathbf{d}_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_E} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial P_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_k}{\partial \mathbf{d}_E} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \mathbf{d}_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial P_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \mathbf{d}_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_E} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial Q_k}{\partial \mathbf{d}_E} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \mathbf{d}_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \mathbf{d}_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \mathbf{d}_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \mathbf{d}_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \mathbf{d}_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_E} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \mathbf{d}_B} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \mathbf{d}_E} \end{bmatrix}$$

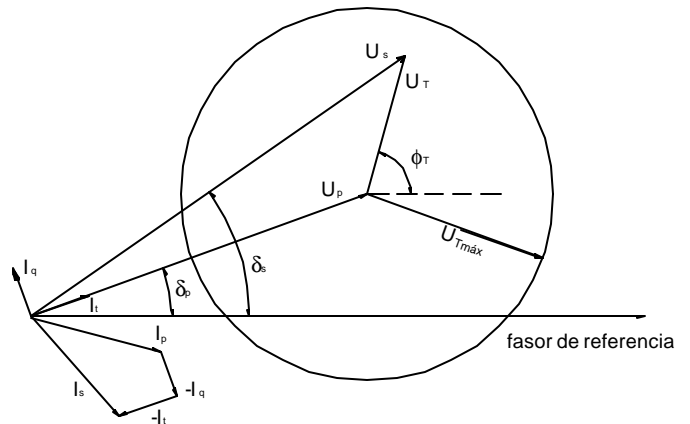


Fig. 4. Diagrama fasorial de un UPFC

B. Modelo de Inyecciones de Potencia

El modelo básico de estado estacionario del UPFC incluye la representación del mismo a través de dos ramas, una serie y una en derivación compuestas por fuentes ideales de voltaje. El modelo de la Fig. 3, incluye una rama serie compuesta por una fuente ideal de voltaje y una rama en derivación formada por una fuente ideal de corriente. El dispositivo se representa mediante tres parámetros independientes denominados U_T , τ , e I_q . Donde U_p , U_s , I_p , e I_s , son los voltajes y las corrientes terminales del UPFC, respectivamente. U_T , es la magnitud del voltaje de la fuente serie y τ es la fase correspondiente. La fuente ideal de corriente esta representada por I_q e I_t , las cuales representan las componentes reactiva y activa, y son componentes en cuadratura y en fase con U_p , respectivamente.

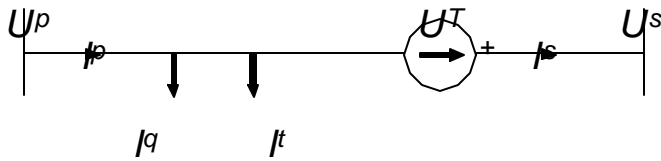


Fig. 3. Modelo de estado estacionario del UPFC

El diagrama fasorial del UPFC de la Fig. 4, muestra las señales descritas.

Estos tres parámetros pueden variar dentro de la región Γ y están determinados por la capacidad nominal del UPFC:

$$\Gamma = \{U_T, \tau, I_q \mid U_T \in [0, U_{T \text{ máx}}], \tau \in [0, 2\pi], I_q \in [-I_{q \text{ máx}}, I_{q \text{ máx}}]\} \quad (6)$$

Las relaciones matemáticas de los parámetros del UPFC son las siguientes:

$$U_s = U_p + U_T \quad (7)$$

$$I_s = I_p - I_q - I_t \quad (8)$$

$$\arg(I_q) = \arg(U_p) \pm \pi/2 \quad (9)$$

$$\arg(I_t) = \arg(U_p) \quad (10)$$

$$I_t = \frac{\text{Re}(U_T I_s^*)}{U_p} \quad (11)$$

1) Ecuaciones de flujos de potencia de un sistema de potencia con UPFC's

Se considera que el UPFC se inserta en una línea de transmisión cuyos nodos terminales son l y m , Fig. 5. En la figura se puede notar que el transformador en derivación del UPFC se conecta directamente al nodo l ($I_p = I_l$; $U_l = U_p$).

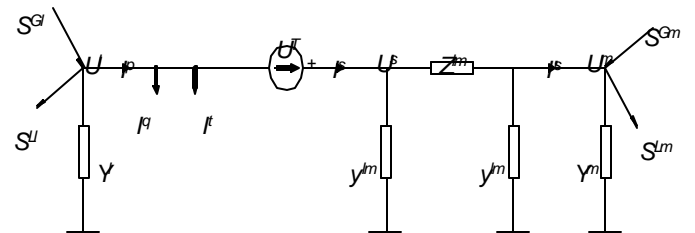


Fig. 5. UPFC conectado en la línea $l-m$

Donde:

Z_{lm} y y_{lm} representan los parámetros de la línea de

transmisión $l-m$.

Y_l y Y_m representan la admitancia shunt para los nodos l y m .

S_{Gl} y S_{Ll} representan las inyecciones nodales de potencia (generación y carga) en el nodo l .

S_{Gm} y S_{Lm} representan las inyecciones nodales de potencia (generación y carga) en el nodo m .

De la Fig. 6, se puede observar que el nodo l y el nodo m pertenecen al sistema de potencia, pero el nodo s corresponde a las terminales del UPFC. Este nodo se puede eliminar trasladando el efecto del UPFC como inyecciones nodales de potencia a los nodos l y m . En otras palabras la Fig. 5, se puede transformar en la Fig. 6, donde el efecto del UPFC está representado por las inyecciones nodales de potencia $\tilde{P}_l, \tilde{Q}_l, \tilde{P}_m, \tilde{Q}_m$.

Las ecuaciones de las inyecciones nodales de flujos de potencia debido a la inclusión de un UPFC en un sistema de potencia están dadas por las siguientes expresiones:

Nodo l :

$$\tilde{P}_l = 2U_l U_T (G + g_{lm}) \cos \mathbf{d}_{lT} - U_m U_T (G \cos \mathbf{d}_{mT} - B \sin \mathbf{d}_{mT}) + U_T^2 (G + g_{lm}) \quad (12)$$

$$\tilde{Q}_l = U_l U_T [(G + g_{lm}) \sin \mathbf{d}_{lT} - (B + b_{lm}) \cos \mathbf{d}_{lT}] - U_l I_q \quad (13)$$

Nodo m :

$$\tilde{P}_m = -U_m U_T (G \cos \mathbf{d}_{mT} + B \sin \mathbf{d}_{mT}) \quad (14)$$

$$\tilde{Q}_m = -U_m U_T (G \sin \mathbf{d}_{mT} - B \cos \mathbf{d}_{mT}) \quad (15)$$

donde

$$\mathbf{d}_{lT} = \mathbf{d}_l - \mathbf{f}_T \quad \mathbf{d}_{mT} = \mathbf{d}_m - \mathbf{f}_T$$

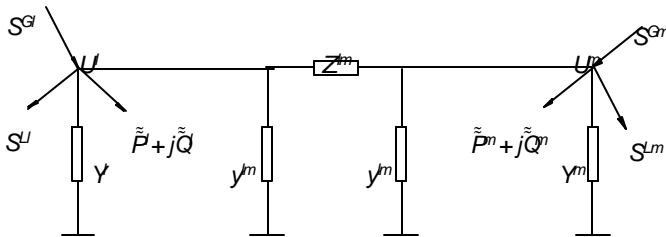


Fig. 6. UPFC representado por inyecciones de potencia

De aquí que, para un UPFC integrado en la línea de transmisión $l-m$ las ecuaciones de flujo de potencia se pueden expresar como:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \mathbf{d}_{ij} + B_{ij} \sin \mathbf{d}_{ij}) \quad (16)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \mathbf{d}_{ij} - B_{ij} \cos \mathbf{d}_{ij}) \quad (17)$$

para $i = 1, 2, 3, \dots, n, i \neq l, m$; n es el número de nodos del sistema

$$\Delta P_l = P_{Gl} - P_{Ll} - \sum_{j=1}^n U_l U_j (G_{lj} \cos \mathbf{d}_{lj} + B_{lj} \sin \mathbf{d}_{lj}) - \tilde{P}_l \quad (18)$$

$$\Delta Q_l = Q_{Gl} - Q_{Ll} - \sum_{j=1}^n U_l U_j (G_{lj} \sin \mathbf{d}_{lj} - B_{lj} \cos \mathbf{d}_{lj}) - \tilde{Q}_l \quad (19)$$

$$\Delta P_m = P_{Gm} - P_{Lm} - \sum_{j=1}^n U_m U_j (G_{mj} \cos \mathbf{d}_{mj} + B_{mj} \sin \mathbf{d}_{mj}) - \tilde{P}_m \quad (20)$$

$$\Delta Q_m = Q_{Gm} - Q_{Lm} - \sum_{j=1}^n U_m U_j (G_{mj} \sin \mathbf{d}_{mj} - B_{mj} \cos \mathbf{d}_{mj}) - \tilde{Q}_m \quad (21)$$

La diferencia entre las ecuaciones de flujos de potencia para los nodos en los que se conecta el UPFC y los demás es notoria, debido a los cuatro términos adicionales

$\tilde{P}_l, \tilde{Q}_l, \tilde{P}_m, \tilde{Q}_m$.

III. CASO DE ESTUDIO

A continuación se presentan los resultados obtenidos al implementar los modelos antes mencionados en un programa de flujos de potencia. El sistema de prueba es el que se muestra en la Fig. 7, en el cual se inserta un UPFC entre los nodos 4 y 9. Se desea que la potencia que fluye del nodo 4 al 9 sea de 25 MW y de 10 MVar, además se desea mantener la magnitud del voltaje del nodo 4 en 1 pu.

A. Modelo Unificado

En la Tabla I, se muestran los voltajes nodales del sistema en estudio, cuando se inserta el UPFC utilizando el modelo unificado. En este caso el nodo 10 es un nodo ficticio, el cual se utiliza para la conexión del UPFC. Las condiciones iniciales de las fuentes de voltaje del UPFC son: $V_B = 0.0067$ pu, $\theta_B = -68.199^\circ$, $V_E = 1.0$ pu, $\theta_E = 0^\circ$. En la Tabla II, se muestran los flujos en las líneas del sistema y puede observar que se obtuvo el flujo deseado. En la Tabla III, se muestran los valores de las fuentes serie y shunt del UPFC.

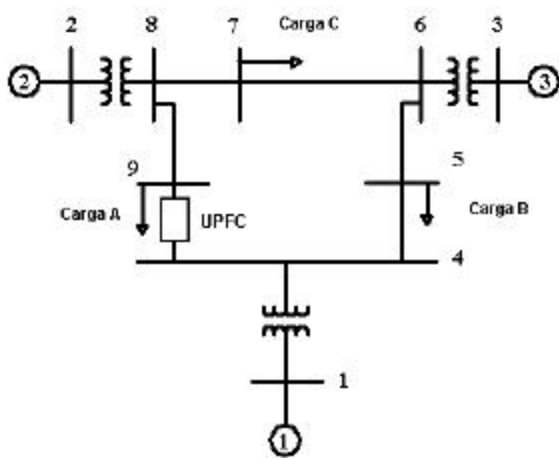


Fig. 7. Sistema de potencia de 9 nodos, tres máquinas.

TABLA I. VOLTAJES NODALES DEL SISTEMA INCLUYENDO UN UPFC (MODELO UNIFICADO)

Nodo	Voltaje	
	Magnitud (pu)	Ángulo (grados)
1	1.0400	0
2	1.0253	-5.6113
3	1.0254	-4.3102
4	1.0000	-3.3558
5	0.9936	-7.6883
6	1.0241	-7.0290
7	1.0044	-11.1203
8	1.0129	-10.0984
9	0.9464	-19.5627
10	0.9648	-18.3432

TABLA II. FLUJO EN LAS LÍNEAS DEL SISTEMA INCLUYENDO UN UPFC (MODELO UNIFICADO).

Nodo de envío	Nodo de recepción	Flujo de envío	Flujo de retorno
1	4	1.0569 + 0.7532i	-1.0569 - 0.6635i
4	5	0.8069 - 0.1276i	-0.7958 + 0.0308i
6	5	0.1056 - 0.0277i	-0.1042 - 0.3308i
3	6	0.8500 + 0.0420i	-0.8500 - 0.0016i
6	7	0.7444 + 0.0293i	-0.7379 - 0.1892i
7	8	-0.2621 - 0.1608i	0.2627 + 0.0146i
2	8	1.3000 + 0.2554i	-1.3000 - 0.1510i
8	9	1.0373 + 0.1364i	-1.0010 - 0.2480i
9	10	-0.2490 - 0.2520i	0.2500 + 0.1000i
4	10	9.9797 + 2.7226i	-9.9797 - 0.0474i

TABLA III. VALORES DE LAS FUENTES IDEALES DE VOLTAJE

Fuente serie		Fuente shunt	
V_B	B	V_E	E
0.2521 pu	71.9692°	0.9844 pu	-3.3919°

B. Modelo de Inyecciones de Potencia (MIP)

Los datos de entrada para el modelo de inyecciones de

potencia son: la componente reactiva de la fuente de corriente, $I_q = -0.6240$ pu, y el flujo de potencia de 9 a 4, $S_{9-4} = -0.2490 - j 0.2520$. En este caso no necesitamos un nodo ficticio. En la Tabla IV se muestran los voltajes nodales del sistema en estudio cuando se inserta el UPFC. Asimismo en la Tabla V, se muestran los flujos de potencia en las líneas, observándose que se mantiene el flujo del nodo 4 al nodo 9. Finalmente en la Tabla VI, se muestra el valor de la fuente serie (magnitud y ángulo).

TABLA IV. VOLTAJES NODALES DEL SISTEMA INCLUYENDO UN UPFC (MIP)

Nodo	Voltaje	
	Magnitud (pu)	Ángulo (grados)
1	1.0400	0
2	1.0253	-5.6105
3	1.0254	-4.3098
4	1.0000	-3.3558
5	0.9936	-7.6881
6	1.0241	-7.0286
7	1.0044	-11.1197
8	1.0129	-10.0977
9	0.9464	-19.5617

TABLA V. FLUJO EN LAS LÍNEAS DEL SISTEMA INCLUYENDO UN UPFC (MIP)

Nodo de envío	Nodo de recepción	Flujo de envío	Flujo de retorno
1	4	1.0569 + 0.7532i	-1.0569 - 0.6635i
4	5	0.8069 - 0.1276i	-0.7958 + 0.0308i
6	5	0.1056 - 0.0277i	-0.1042 - 0.3308i
3	6	0.8500 + 0.0420i	-0.8500 - 0.0016i
6	7	0.7444 + 0.0293i	-0.7379 - 0.1892i
7	8	-0.2621 - 0.1608i	0.2628 + 0.0146i
2	8	1.3000 + 0.2553i	-1.3000 - 0.1510i
8	9	1.0372 + 0.1364i	-1.0010 - 0.2480i
4	9	0.2500 + 0.1000i	-0.2490 - 0.2520i

TABLA VI. VALOR DE LA FUENTE IDEAL DE VOLTAJE

Fuente serie	
U_T	τ
0.2586 pu	-108.6148°

IV. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS

Puede observarse que los resultados obtenidos por ambos modelos presentan resultados muy semejantes, sin embargo difieren en el tiempo de cómputo y el número de iteraciones que se necesitan para que el programa converja. El Modelo Unificado necesita 10 iteraciones, mientras que el Modelo de Inyecciones de Potencia requiere 8 iteraciones y un menor tiempo de cómputo. Esto se debe a que el Modelo Unificado requiere que las condiciones iniciales de las fuentes del UPFC sean apropiadas, ya que una selección inapropiada de las mismas puede hacer que el sistema no

converja. Además, el orden de la matriz Jacobiana aumenta considerablemente (un UPFC requiere 7 ecuaciones y un nodo ficticio). Sin embargo, a partir de los datos proporcionados por cualquiera de los modelos podemos obtener los parámetros del otro, es decir, si utilizamos el modelo de inyecciones de potencia, al conocer U_T , T e I_q , podemos determinar V_B , B_B , V_E , E , lo cual hace que ambos modelos se complementen.

V. CONCLUSIONES

Los modelos del UPFC para estado estacionario analizados presentan la posibilidad de hacer estudios de flujos de potencia en sistemas que cuenten con uno o más de estos dispositivos. El modelo unificado introduce las ecuaciones del dispositivo en la formulación del problema de flujos. Sin embargo hay que tener en cuenta la manera en la que varían los valores de las fuentes del UPFC en cada iteración ya que el sistema puede converger, pero sobrepasando el límite de operación del dispositivo. El modelo de inyecciones de potencia desacopla el impacto del UPFC en el sistema y lo traslada como inyecciones de potencia en los nodos en los cuales se conecta el dispositivo, esto hace que el jacobiano sufra tan solo una pequeña modificación (a diferencia del modelo unificado en el cual por cada UPFC el orden del jacobiano aumenta y además se utiliza un nodo ficticio). Hay que hacer notar que ambos modelos proporcionan resultados muy semejantes y a partir de la información proporcionada por uno de ellos se pueden obtener los parámetros del otro.

VI. APÉNDICE

Las ecuaciones para la potencia activa y reactiva para el circuito equivalente mostrado en la Fig. 2, son [3]:

$$\begin{aligned}
 P_k &= V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_m) + B_{km} \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_m)] \\
 &\quad + V_k V_B [G_{km} \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_B) + B_{km} \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_B)] \\
 &\quad + V_k V_E [G_E \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_E) + B_E \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_E)] \\
 Q_k &= -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_m) - B_{km} \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_m)] \\
 &\quad + V_k V_B [G_{km} \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_B) - B_{km} \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_B)] \\
 &\quad + V_k V_E [G_E \sin(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_E) - B_E \cos(\mathbf{d}_k - \mathbf{d}_E)] \\
 P_m &= V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_k) + B_{mk} \sin(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_k)] \\
 &\quad + V_m V_B [G_{mm} \cos(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_B) + B_{mm} \sin(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_B)] \\
 Q_m &= -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_k) - B_{mk} \cos(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_k)] \\
 &\quad + V_m V_B [G_{mm} \sin(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_B) - B_{mm} \cos(\mathbf{d}_m - \mathbf{d}_B)] \\
 P_B &= V_B^2 G_{mm} + V_B V_k [G_{km} \cos(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_k) + B_{km} \sin(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_k)] \\
 &\quad + V_B V_m [G_{mm} \cos(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_m) + B_{mm} \sin(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_m)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_B &= -V_B^2 B_{mm} + V_B V_k [G_{km} \sin(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_k) - B_{km} \cos(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_k)] \\
 &\quad + V_B V_m [G_{mm} \sin(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_m) - B_{mm} \cos(\mathbf{d}_B - \mathbf{d}_m)] \\
 P_E &= -V_E^2 G_E + V_E V_k [G_E \cos(\mathbf{d}_E - \mathbf{d}_k) + B_E \sin(\mathbf{d}_E - \mathbf{d}_k)] \\
 Q_E &= V_E^2 B_E + V_E V_k [G_E \sin(\mathbf{d}_E - \mathbf{d}_k) - B_E \cos(\mathbf{d}_E - \mathbf{d}_k)]
 \end{aligned}$$

donde,

$$\begin{aligned}
 Y_{kk} &= G_{kk} + jB_{kk} = Z^{-1} + Z_E^{-1} \\
 Y_{mm} &= G_{mm} + jB_{mm} = Z_B^{-1} \\
 Y_{km} &= Y_{mk} = G_{km} + jB_{km} = -Z_B^{-1} \\
 Y_E &= G_E + jB_E = -Z_E^{-1}
 \end{aligned}$$

VII. REFERENCIAS

- [1] L. Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", *IEE Proc. C*, Vol. 139, pp. 323-331, July 1992.
- [2] L. Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williams, T.R. Rietman, D.R. Torgerson, A. Edris, "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, April 1995.
- [3] C.R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "Unified power flow controller: a critical comparison of Newton-Raphson UPFC algorithms in power flow studies", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 144, No. 5, Sept. 1997.
- [4] W.L. Fang, H.W. Ngan, "Control setting of unified power flow controllers through a robust load flow calculation", *IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 146, No. 4, July 1999.

VIII. BIOGRAFÍAS.

Ixtláhuatl Coronado recibió el grado en Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Veracruzana, México en 1998. Actualmente está trabajando para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Su área de interés son los dispositivos FACTS.

Juan M. Ramírez recibió el grado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, México en 1984 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica-Sistemas de Potencia de la UNAM en 1987. Recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la UANL en 1992. Se unió al departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV en 1999, donde actualmente es profesor de tiempo completo. Su interés actual es en dispositivos FACTS y el control de sistemas de potencia.

Pável Zúñiga H. recibió el grado en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro, México en 1999. Actualmente está trabajando para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Su interés de investigación actual es en dispositivos FACTS.