

CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUJOS DE POTENCIA (UPFC)

RESUMEN

En este capítulo se estudian algunos de los problemas operativos de los sistemas de potencia en estado estable que el UPFC puede ayudar a resolver, como el caso de la regulación del flujo de potencia en líneas de transmisión importantes.

Actualmente, estos problemas técnicos son parcialmente resueltos mediante el uso de cambiadores de derivaciones bajo carga (ULTC) o los transformadores reguladores del ángulo de fase (PAR). Un UPFC tiene ventajas sobre estos dispositivos FACTS, tales como: proveer un control independiente y simultáneo del flujo de potencia real y reactiva, las cuales permite controlar el flujo de potencia en un rango más amplio. Lo que significa operar una línea más eficientemente. Además, un UPFC responde rápidamente a transitorios y ayuda a mantener la estabilidad transitoria.

CONCEPTO DEL CONTROLADOR UNIFICADO DE FLUJOS DE POTENCIA

A diferencia del SVC (*Static Var Compensator*) y el TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), donde existe únicamente un parámetro que puede ser controlado (la impedancia efectiva del dispositivo, controlado mediante la variación del ángulo de disparo de los tiristores), el UPFC tiene tres parámetros controlables: la fase, la magnitud del voltaje inyectado en serie, y la magnitud de la corriente reactiva en derivación. Estos tres parámetros pueden ser controlados en varias formas dependiendo de los diferentes objetivos.

La versatilidad del UPFC puede proporcionar muchas funciones requeridas para resolver una variedad de problemas dinámicos y de estado

estable encontrados en las redes de potencia eléctrica. En este capítulo se analizan las principales características del UPFC en estado estacionario, enfatizando la diversidad de acciones de control que requiere. El análisis se lleva a cabo utilizando un sistema de potencia compuesto por una línea de transmisión y un UPFC, mostrando la versatilidad operativa que puede lograrse mediante este dispositivo.

El concepto básico de control de transmisión de potencia en tiempo real asume que existen medios disponibles para poder cambiar rápidamente aquellos parámetros del sistema de potencia que determinan el flujo de potencia. Para considerar las posibilidades del control del flujo de potencia, se revisan las relaciones básicas de potencia para un modelo simplificado de dos máquinas, como se ilustra en la figura 9.1, [1].

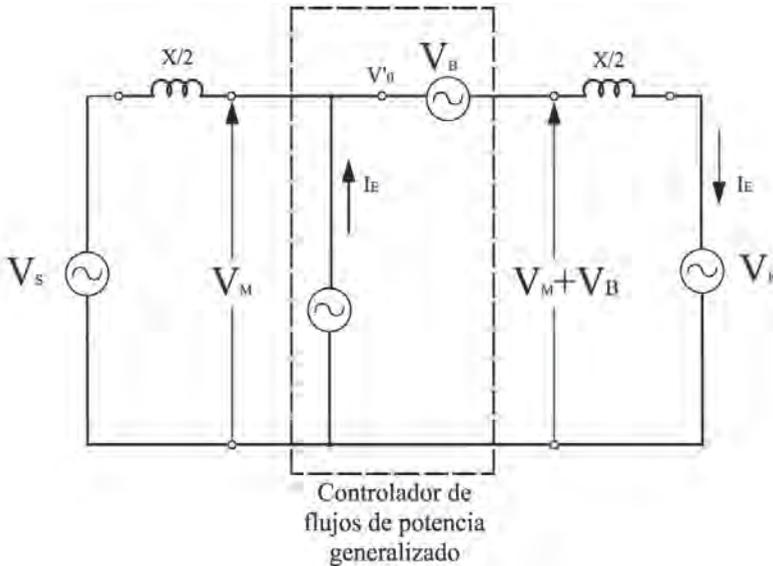


Figura 9.1 Sistema de potencia simplificado de dos máquinas con un controlador de flujos de potencia generalizado

Se asume que la fuente de voltaje en serie con la línea, V_B , puede ser controlada sin restricciones. Es decir, el ángulo de fase del fasor V_B , puede cambiar independientemente de la corriente de línea entre 0 a 2π , y su magnitud es variable entre cero y un valor máximo definido, $V_{B\max}$. Esto implica que la fuente de voltaje V_B debe generar o absorber potencia activa y reactiva. La fuente de corriente reactiva I_E se asume que es capacitiva o inductiva con una magnitud variable ($0 \leq I_E \leq I_{E\max}$) que es independiente del voltaje terminal.

Para introducir las características básicas del controlador de flujos de potencia generalizado, se asume que sus terminales están conectadas al generador V_s a través de un segmento de la línea de transmisión X_L y la magnitud del voltaje fasorial, denotado como V_0' , se mantiene constante en sus terminales a través de la fuente de corriente reactiva I_q . El voltaje V_0' e impedancia X_L pueden ser diferentes a V_M y $X/2$; es decir, en el presente modelo, el controlador de flujos de potencia no se localiza necesariamente en el punto medio de la línea. El voltaje fasorial V_0 en la terminal de salida del controlador de flujos de potencia, se asume como el fasor de referencia ($V_o = V_0$), de modo que $V_0 = V_0' - V_B$. Una corriente constante I , determinada por el extremo receptor del sistema de potencia, se asume que se envía a través de la terminal de salida del controlador de flujos de potencia.

El control del flujo de potencia se realiza mediante la adición de un voltaje fasorial V_B en la terminal del voltaje fasorial V_0' . Así, el fasor V_B se estipula para no tener restricciones angulares, y su magnitud es variable entre 0 y V_{Bmax} , su punto final puede estar en cualquier lado dentro del círculo con un radio de V_{Bmax} , cuyo centro está en el extremo del fasor de referencia V_0 , como se muestra en la figura 9.2. Esto significa que mediante un control fasorial apropiado V_B , el controlador de flujos de potencia puede ser utilizado para cumplir diferentes objetivos:

- a) Control o regulación del voltaje terminal, el cual puede obtenerse fijando el ángulo de V_B a cero (por lo tanto, $V_B = \pm AV_0 = \pm \Delta V_0$), y así cambiar únicamente la magnitud de V_0 (o viceversa), como se ilustra en la figura 9.2 b).
- b) Combinación de compensación de líneas en serie y control del voltaje terminal, que puede obtenerse fijando V_B como una suma de voltajes fasoriales V_C y ΔV_0 ; esto es, $V_B = V_C + \Delta V_0$, donde el fasor V_C es perpendicular a la corriente de línea I (por lo tanto, $V_C = kI \exp(\pm j\pi / 2)$) y ΔV_0 está en fase con la terminal del voltaje fasorial V_0 . El voltaje V_C disminuye o incrementa la caída de voltaje efectivo a través de la impedancia del segmento de línea X_L , dependiendo si V_C atrasa o adelanta la corriente I , como se ilustra en la figura 9.2 c).

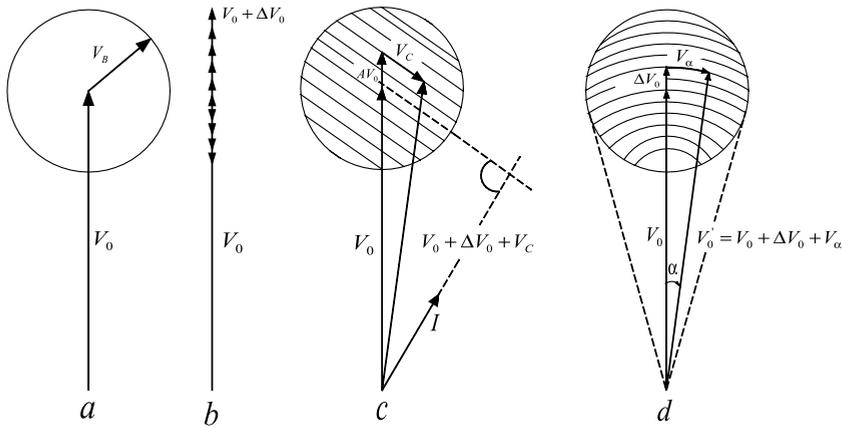


Figura 9.2 Diagrama fasorial que ilustra la operación del UPFC cuando: a) se controla la magnitud del voltaje terminal y el ángulo de fase, b) se regula el voltaje terminal, c) se regula el voltaje terminal y la impedancia en la línea, d) se regula el voltaje terminal y el ángulo de fase

- c) Combinación de regulación del ángulo de fase y el control del voltaje terminal, el cual se obtiene definiendo V_B como una suma de V_α y ΔV_0 ; esto es, $V_B = V_\alpha + \Delta V_0$, donde $V_\alpha = 2V_0 \sin(\alpha/2) \exp[\pm j(\pi/2 - \alpha/2)]$, y ΔV_0 está otra vez en fase con el voltaje terminal V_0 . La definición del fasor V_α permite que el voltaje terminal fasorial resultante en el extremo del segmento de línea, $V_0' = V_0 + \Delta V_0 + V_\alpha$, tenga la misma magnitud como $V_0 + \Delta V_0$ (por lo tanto, $|V_0 + \Delta V_0 + V_\alpha| = |V_0 + \Delta V_0| = V_0 \pm \Delta V_0$), pero su ángulo de fase es diferente a través de V_0 mediante α , como se ilustra en la figura 9.2 d). En términos prácticos esto significa que el cambio de fase se lleva a cabo sin ninguna intención de cambio de magnitud en el voltaje terminal controlado.
- d) Combinación de regulación del voltaje terminal, de compensación de líneas en serie y regulación del ángulo de fase, que puede llevarse a cabo sintetizando el voltaje fasorial inyectado V_B mediante los tres fasores controlados individualmente, ΔV_0 , V_C y V_α ; esto es, $V_B = \Delta V_0 + V_C + V_\alpha$.

De esta breve descripción se nota que el dispositivo UPFC presenta gran versatilidad.

Descripción del UPFC

El UPFC está constituido por un transformador excitador (ET), un transformador elevador (BT), dos fuentes inversoras de voltaje (VSC) unidas por un capacitor de enlace en corriente directa, tal como se ilustra en las figuras 9.3 y 9.4. La parte en derivación del UPFC es un compensador estático (StatCom), y la parte en serie es un compensador síncrono de estado sólido (SSSC). El StatCom se usa principalmente para regular el voltaje en sistemas de transmisión, aunque también puede ser utilizado para aumentar la estabilidad dinámica de un sistema [4-5]. Está basado en una fuente de voltaje síncrona de estado sólido que genera voltajes sinusoidales balanceados, a frecuencia fundamental, con amplitud y ángulo de fase rápidamente controlable.

El SSSC se puede operar como un compensador con capacitor en serie que permite cambios en la impedancia de la línea de transmisión con la ayuda de una fuente de voltaje en serie con la línea. Está basado en un compensador síncrono de estado sólido el cual emplea un inversor CD-CA, [6].

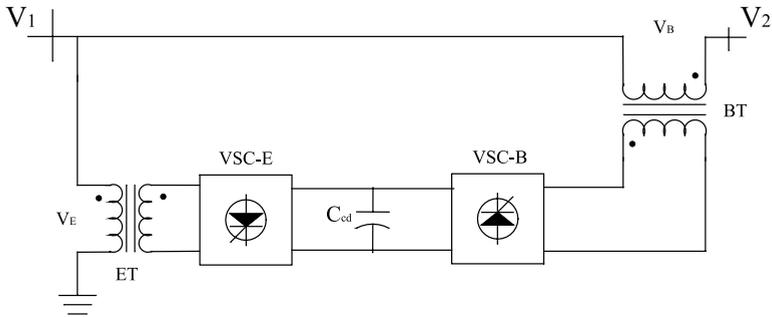


Figura 9.3. Diagrama esquemático del UPFC

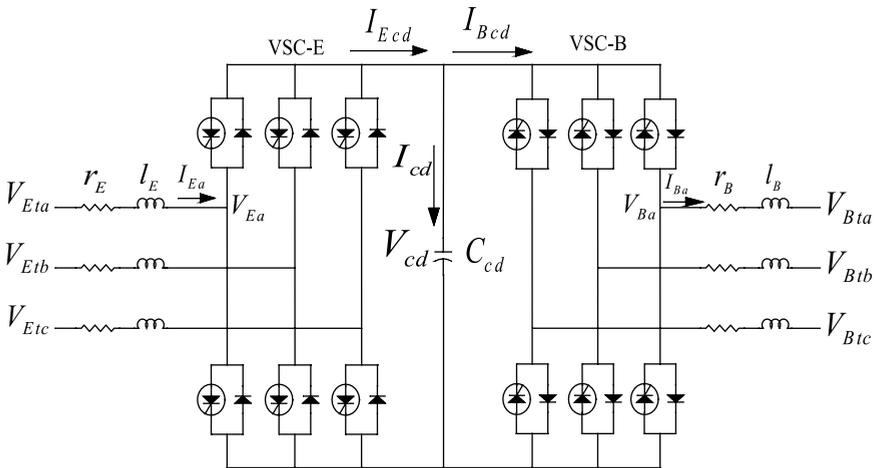


Figura 9.4. Diagrama del circuito trifásico del UPFC

Dependiendo de la estrategia de control, el UPFC puede realizar las funciones de un compensador en derivación, un compensador en serie y un cambiador de fase. Un UPFC puede ser utilizado para realizar las funciones indicadas ante condiciones de estado estable, dinámicas de pequeñas señales y dinámicas de grandes señales del sistema de potencia.

Entre los dispositivos semiconductores de potencia actuales, el transistor de desactivación de compuerta (GTO), (4500V-6000V, 4000A-6000A), tiene la capacidad de corriente y voltaje para ser usado como conmutador controlado en un UPFC. El GTO es un dispositivo de enganche que se activa aplicando a su compuerta un pulso positivo corto y se desactiva mediante un pulso negativo corto [7]. La frecuencia de conmutación de un GTO de alta potencia está limitada a 500 Hz. Por lo tanto, se requiere desarrollar técnicas de conmutación mediante modulación de ancho de pulso (PWM), que puedan utilizarse en los sistemas de potencia y, además, deben usarse las técnicas de conmutación sincronizadas para evitar la generación de armónicos.

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL UPFC

Básicamente, la estructura del UPFC es similar a la del transformador cambiador de fase [8]. Como se muestra en la figura 9.5, éste posee una rama en serie y otra en derivación. Cada una consiste en un transformador, un convertidor basado en electrónica de potencia con dispositivos semiconductores GTO y un circuito de CD. El transformador de la rama en derivación está conectado a un nodo terminal, mientras que el transformador de la rama en serie es funcionalmente un transformador elevador. Para explicar el principio de operación se asume que las ramas en derivación y serie no están conectadas. La rama en derivación del circuito de CD contiene el capacitor C_p , y la rama en serie del circuito CD del capacitor C_s , tal como se ilustra en la figura 9.5.

Lo más importante es que la rama en derivación puede actuar (en gran parte de la operación) como una fuente de corriente reactiva (corriente I_q), [1]. La corriente fasorial I_q en la figura 9.5 es ortogonal al voltaje fasorial de entrada U_A (en este caso se desprecian las pérdidas activa y reactiva).

El voltaje de inyección por el transformador elevador U_T es ortogonal a la corriente de línea I_B [3]. Así, la rama en serie del UPFC actúa como un condensador en serie. Sin embargo, desde el punto de vista del sistema, difiere considerablemente del capacitor en serie, mientras el capacitor en serie es una impedancia reactiva, U_T actúa como una fuente de voltaje controlable, cuya magnitud de voltaje puede ser controlada independientemente de la corriente de línea (la fase de voltaje está desfasada 90° con respecto a la corriente de línea). Cambiando la polaridad del voltaje U_T , se

alcanza el efecto del reactor controlado en serie. Por lo tanto, U_T ayudará en la compensación capacitiva en serie y con ello en el posible mejoramiento del amortiguamiento de las oscilaciones. Adicionalmente, el UPFC no produce resonancias en serie con la reactancia de línea, por esto no origina el fenómeno de la resonancia subsíncrona [1].

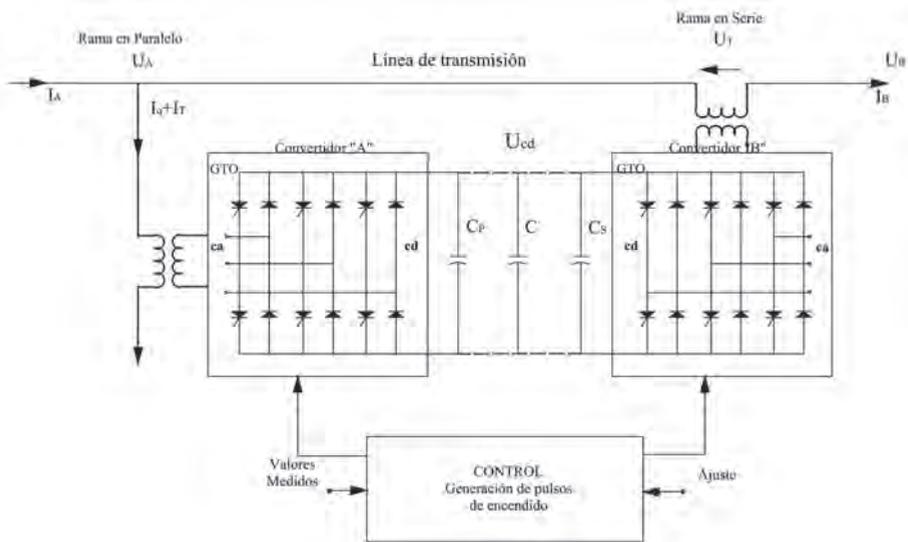


Figura 9.5 Esquema general del UPFC

Cada una de las dos ramas del UPFC puede generar o absorber potencia reactiva independientemente. Las propiedades descritas no cambian si los circuitos CD de ambos dispositivos están conectados, y si el circuito común de CD es el capacitor C , como se ilustra en la figura 9.5. Adicionalmente, existe la posibilidad de un cambio de fase controlable entre los fasores U_A y U_B , debido a que la potencia activa de las ramas en serie y derivación puede ser intercambiada. El voltaje inyectado por la rama en serie U_T puede, teóricamente, estar en cualquier ángulo de fase con respecto a U_A , y puede ser de cualquier magnitud desde 0 hasta la magnitud máxima U_{Tmax} . El área de operación es la región limitada por un círculo con un radio U_{Tmax} , tal como se ilustra en la figura 9.6. El extremo del fasor U_T (y también el fasor U_B) puede tomar cualquier posición dentro de esa área. El punto de operación puede cambiar continuamente (cambios continuos de la fase de U_T y magnitud). El componente del voltaje U_T , en fase con la corriente I_B , representa la parte real de la potencia inyectada. Este es suministrado por la rama en paralelo del UPFC (corriente I_T). El componente del voltaje U_T , que es ortogonal a la corriente I_B , representa el componente de potencia reactiva. Este se genera internamente y es independiente del

componente real. La inyección de la potencia real y reactiva por la rama en serie es el resultado de la inyección del voltaje U_T .

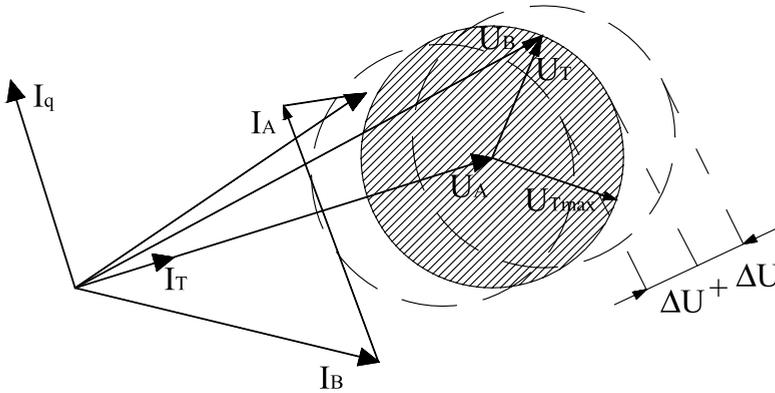


Figura 9.6 Diagrama fasorial y áreas de operación.

El voltaje del transformador en derivación del UPFC puede, además, ser controlado regulando la corriente reactiva I_q de esa rama. La operación del UPFC está constituida por el área del círculo que corresponde al área de operación de la rama en serie, la cual puede ser cambiada en fase por el voltaje fasorial terminal de entrada U_A (por $\pm \Delta U$, figura 9.6).

De lo anterior es claro que, a diferencia de otros dispositivos FACTS, el UPFC tiene tres parámetros controlables independientes: a) la magnitud $|U_T|$; b) la fase del voltaje inyectado de la rama en serie, ϕ_T ; c) la corriente reactiva de la rama en derivación, I_q ; permitiendo la posibilidad de controlar independientemente tres parámetros eléctricos del sistema. Con esta descripción del principio de operación señalada, se puede concluir que el UPFC:

- Controla el voltaje terminal mediante la generación o absorción local de potencia reactiva.
- Controla los flujos de potencia en la línea de transmisión, en estado estacionario y dinámico, mediante la regulación del flujo de potencia activa.
- Permite que la línea de transmisión opere hasta límites térmicos deseados.

CONEXIÓN DE UN UPFC EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En esta sección se presentan algunas posibilidades que tiene el dispositivo UPFC para modificar los parámetros de transmisión de potencia. Para hacerlo, se emplea un esquema simplificado de transmisión. El dispositivo

es capaz de controlar las potencias activa, reactiva y la magnitud de voltaje. Además, como parte de la solución, resultan los parámetros internos del dispositivo: las magnitudes y fases de sus voltajes serie y derivación. La metodología utilizada para el cálculo de estado estacionario se basa en la representación del dispositivo UPFC mediante un circuito equivalente, ilustrado en la figura 9.7. Las fuentes inversoras de voltaje del UPFC (VSC-E y VSC-B de la figura 9.3), se representan por dos fuentes de voltaje modeladas idealmente representando el componente fundamental del voltaje en las terminales de los convertidores de CA, tal como se ilustra en la figura 9.7. Se desprecian las pérdidas durante la operación en estado estacionario, se consideran voltajes y corrientes balanceados, no se consideran los armónicos de orden superior, y se asume un comportamiento promedio senoidal de frecuencia fundamental. El convertidor en derivación debe suministrar una cantidad de potencia CD tal que V_d permanezca constante [1].

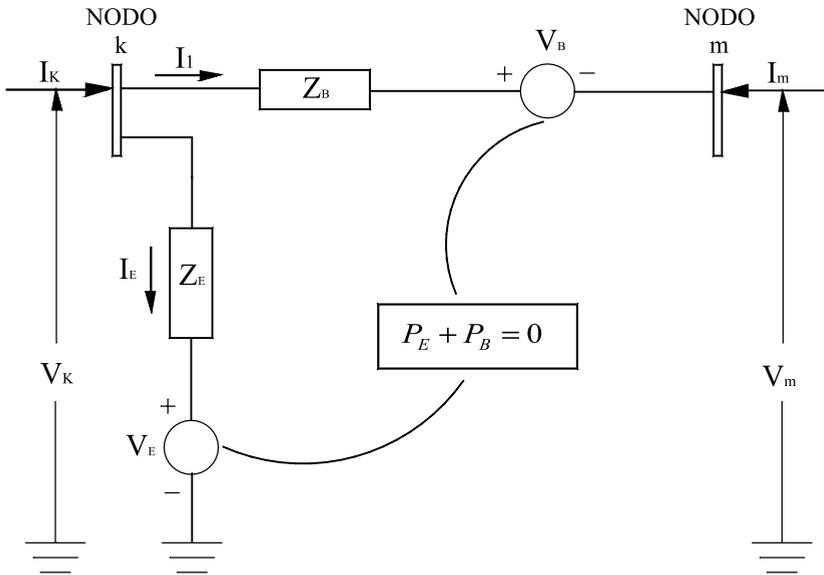


Figura 9.7 Modelo equivalente monofásico en estado estable del UPFC

La limitante $P_E + P_B = 0$ implica que:

- La potencia activa no se intercambia entre el UPFC y el sistema; así, el voltaje de CD permanece constante.
- Las dos fuentes de voltaje V_B y V_E son mutuamente dependientes ($P_E + P_B = 0$).

Las fuentes de voltaje ideal están representadas por:

$$V_E = V_E (\cos \delta_E + j \sin \delta_E) \quad (340)$$

$$V_B = V_B \cos \delta_B + j \sin \delta_B \quad (341)$$

Donde V_E y δ_E son la magnitud controlable ($V_{Emin} \leq V_E \leq V_{Emax}$) y el ángulo $0 \leq \delta_E \leq 2\pi$ de la fuente de voltaje, que representan al convertidor en derivación. La magnitud V_B y el ángulo δ_B de la fuente de voltaje del convertidor serie tienen como límites ($V_{Bmin} \leq V_B \leq V_{Bmax}$) y $0 \leq \delta_B \leq 2\pi$, respectivamente.

El ángulo de fase del voltaje serie, δ_B , determina el modo del control de flujo de potencia. Si δ_B está en fase con el ángulo del voltaje nodal δ_k , éste regula el voltaje terminal. Si δ_B está en cuadratura con respecto a δ_k , éste controla el flujo de potencia, actuando como un cambiador de fase. Si δ_B está en cuadratura con el ángulo de la corriente de línea entonces controla el flujo de potencia, actuando como un compensador serie variable. Para cualquier otro valor de δ_B , el UPFC opera como una combinación del regulador de voltaje, un compensador serie variable, y un cambiador de fase. La magnitud del voltaje serie inyectado determina la magnitud del flujo de potencia a ser controlado [2].

CARACTERÍSTICAS DE ESTADO ESTACIONARIO

Para mostrar la versatilidad operativa del UPFC en condiciones de estado estacionario al variar conjuntamente todos sus parámetros de control, éste se conecta a una línea de transmisión. La figura 9.8 [9] presenta un circuito equivalente de una línea conectada entre dos nodos de voltaje $V_s \angle \delta_s$ y $V_R \angle \delta_R$. La reactancia en serie con la fuente de voltaje $V_B \angle \delta_B$ está incluida en X_2 . El UPFC controla el flujo de potencia de la línea a través del control continuo de V_B y δ_B . Dependiendo de la condición operativa, la fuente de voltaje, $V_B \angle \delta_B$, intercambia potencia activa y reactiva con el sistema. Un UPFC no puede absorber o liberar potencia activa (las pérdidas son despreciadas), por lo que el ángulo de fase δ_E se ajusta para compensar el intercambio de potencia activa entre $V_B \angle \delta_B$ y el sistema. La modulación de la amplitud M_E , puede usarse para controlar el voltaje V_E , y, consecuentemente, el intercambio de potencia reactiva entre $V_B \angle \delta_B$ y el sistema. En general, por medio del control del voltaje V_E puede regularse el intercambio de potencia reactiva entre el UPFC y el sistema [2].

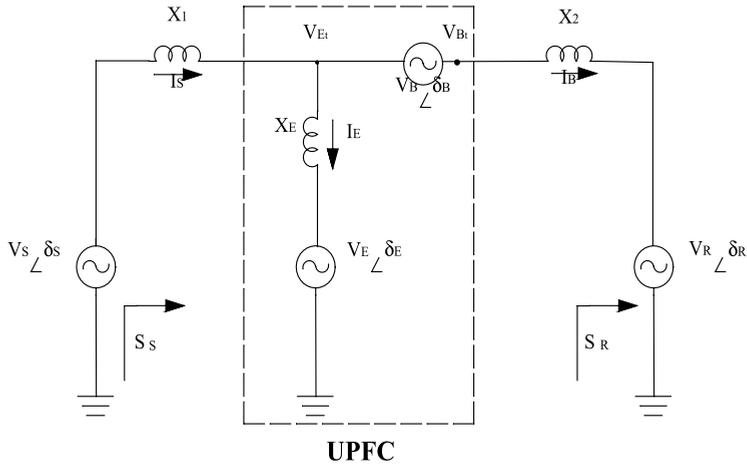


Figura 9.8 Diagrama monofásico de una línea equipada con un UPFC

Los parámetros base del sistema, utilizados para la deducción de las expresiones y simulaciones que se presentan a continuación, son:

$$V_S \angle \delta_S = 1 \angle 35^0 \text{ pu}$$

$$V_R \angle \delta_R = 1 \angle 0^0 \text{ pu}$$

$$V_E = 1 \text{ pu}$$

$$0 \leq V_B \leq 0.5 \text{ pu}$$

$$0 \leq \delta_B \leq 2\pi$$

$$X_1 = X_2 = 0.4 \text{ pu}$$

$$X_E = 0.2 \text{ pu}$$

Aplicando las leyes de Kirchhoff al sistema de la figura 9.8, se obtienen las corrientes de envío, recepción y excitación:

$$I_S = \frac{(X_E + X_2)V_S e^{j\delta_S} - X_2 V_E e^{j\delta_E} + X_E V_B e^{j\delta_B} - X_E V_R e^{j\delta_R}}{X_t^2 e^{j\frac{\pi}{2}}} \quad (342)$$

$$I_B = \frac{X_E V_S e^{j\delta_S} + X_1 V_E e^{j\delta_E} + (X_E + X_1) V_B e^{j\delta_B} - (X_E + X_1) V_R e^{j\delta_R}}{X_t^2 e^{j\frac{\pi}{2}}} \quad (343)$$

$$I_E = \frac{X_2 V_S e^{j\delta_S} - (X_1 + X_2) V_E e^{j\delta_E} - X_1 V_B e^{j\delta_B} + X_1 V_R e^{j\delta_R}}{X_t^2 e^{j\frac{\pi}{2}}} \quad (344)$$

$$\text{donde: } X_t^2 = X_1 X_2 + X_2 X_E + X_2 X_E \quad (345)$$

La potencia del extremo emisor y la potencia del extremo receptor se expresan mediante:

$$\begin{aligned} S_S &= V_S I_S^* = P_S + jQ_S \\ &= \frac{(X_E + X_S) V_S^2}{X_t^2} e^{j\frac{\pi}{2}} - \frac{X_E V_S V_R}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_S - \delta_R\right)} - \frac{X_2 V_S V_E}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_S - \delta_E\right)} + \frac{X_E V_S V_B}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_S - \delta_B\right)} \end{aligned} \quad (346)$$

$$\begin{aligned} S_R &= V_R I_R^* = P_R + jQ_R \\ &= -\frac{(X_E + X_1) V_R^2}{X_t^2} e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{X_E V_S V_R}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_S - \delta_R\right)} + \frac{X_1 V_R V_E}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_R - \delta_E\right)} + \frac{(X_E + X_1) V_R V_B}{X_t^2} e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \delta_R - \delta_B\right)} \end{aligned} \quad (347)$$

La potencia activa intercambiada por las fuentes de voltaje $V_B \angle \delta_B$ y $V_E \angle \delta_E$ con el sistema es:

$$\begin{aligned} P_B &= \text{Re}(V_B I_B^*) = -\frac{X_E V_B V_S}{X_t^2} \sin(\delta_B - \delta_S) \\ &\quad + \frac{(X_1 + X_E) V_B V_R}{X_t^2} \sin(\delta_B - \delta_R) - \frac{X_1 V_B V_E}{X_t^2} \sin(\delta_B - \delta_E) \end{aligned} \quad (348)$$

$$\begin{aligned} P_E &= \text{Re}(V_E I_E^*) = -\frac{X_2 V_E V_S}{X_t^2} \sin(\delta_E - \delta_S) + \\ &\quad \frac{X_1 V_E V_B}{X_t^2} \sin(\delta_E - \delta_B) - \frac{X_1 V_E V_R}{X_t^2} \sin(\delta_E - \delta_R) \end{aligned} \quad (349)$$

La potencia del extremo emisor puede ser escrita como:

$$P_s = a + c \sin \delta_B \quad (350)$$

$$Q_s = b + c \cos \delta_B \quad (351)$$

donde:

$$a = \frac{X_E V_S V_R}{X_t^2} \sin \delta - \frac{X_2 V_S V_E}{X_t^2} \sin \delta_E \quad (352)$$

$$b = \frac{(X_E + X_2)V_S^2}{X_t^2} - \frac{X_E V_S V_R}{X_t^2} \cos \delta - \frac{X_2 V_S V_E}{X_t^2} \cos \delta_E \quad (353)$$

$$c = \frac{X_E V_S V_B}{X_t^2} \quad (354)$$

Gráficas P-Q

Se presentan gráficas de las potencias activa (P_s) y reactiva (Q_s) de envío en función de los parámetros del UPFC, así como los efectos en la región de control de la potencia compleja mediante la variación de sus parámetros.

La figura 9.9 presenta las variaciones de la potencia del extremo emisor como una función del ángulo de la fuente serie δ_B para el sistema de la figura 9.8, cuando las amplitudes son $V_E=1.0$ pu y $V_B=0.3$ pu. De esta figura se puede observar que:

- La potencia activa de envío $P_s(\delta_B)$ es una función no-lineal,
- Existen dos valores distintos de δ_B que satisfacen $P_s(\delta_B)$.

Asimismo, se observa que existe un rango de operación apropiado del ángulo δ_B ($\delta_{B-l} \leq \delta_B \leq \delta_{B-u}$), que es deseable para lograr el flujo de potencia activa requerido con un valor razonable de potencia reactiva Q_s . El rango de operación de δ_B se encuentra entre el valor máximo y mínimo de potencia activa P_s , que corresponde a un valor de Q_s apropiado.

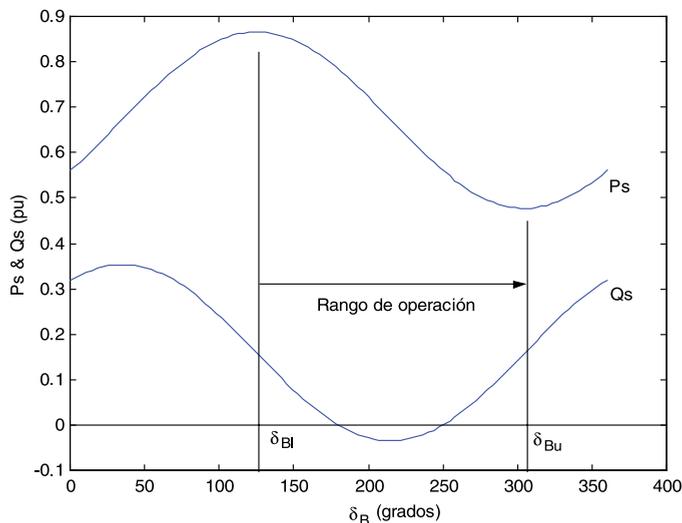
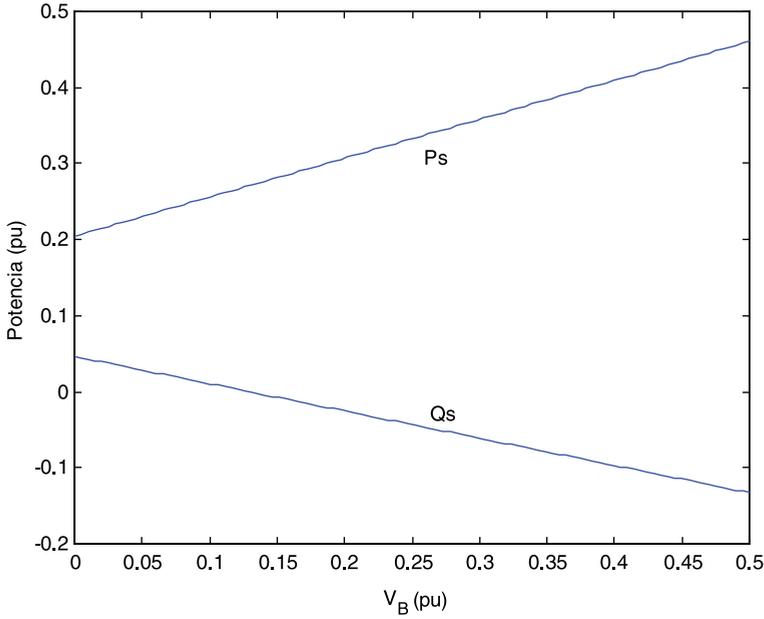


Figura 9.9 Potencia activa y reactiva del extremo emisor

La figura 9.10 ilustra las potencias activa y reactiva en función del voltaje serie V_B para el sistema de la figura 9.8 cuando $V_E=1.0$ pu y $\delta_B=160^\circ$. Se observa que los valores de P_s varían desde 0.2 hasta 0.45 pu en valores de V_B desde 0 hasta 0.5 pu. Para la potencia reactiva Q_s , existe una variación desde 0.5 hasta -0.15 pu en los mismos valores de V_B . La potencia activa exhibe variaciones más amplias que las variaciones de la potencia reactiva.



**Figura 9.10 Variaciones de P_s y Q_s como funciones de V_B
($V_E=1.0$ pu, $\delta_B=160^\circ$)**

La figura 9.11 ilustra las relaciones de potencias de envío $P_s(V_E)$ y $Q_s(V_E)$ para el sistema de la figura 9.8 cuando $V_B=0.3$ y $\delta_B=160^\circ$. Se observa que el voltaje V_E tiene un efecto significativo en la potencia reactiva del extremo emisor, mientras que la potencia real P_s tiene una variación menor. Comparando la figura 9.9, y las figuras 9.10 y 9.11 se concluyó que mediante el control de δ_B se obtiene un rango más amplio para la regulación de la potencia activa de envío P_s .

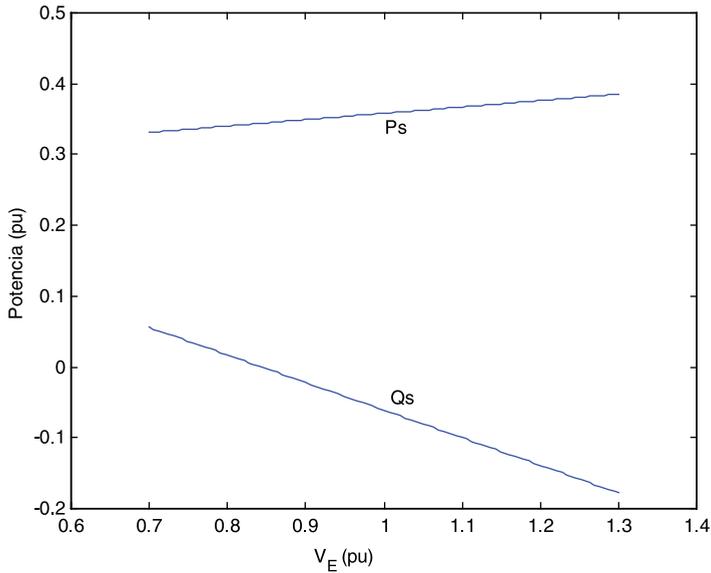


Figura 9.11 Variaciones de P_s y Q_s como funciones de V_E
 ($V_B=0.3$ pu, $\delta_B=160^\circ$)

Es interesante notar que las variaciones de potencia reactiva absorbida/liberada por la rama en derivación del UPFC, puede ser significativa, siempre y cuando el cambio del voltaje terminal correspondiente (V_E) se encuentre en un rango limitado.

En la figura 9.12 se presentan las variaciones de las potencias Q_E , Q_B , P_E y P_B como funciones del voltaje V_E para el sistema de figura 9.8, cuando $V_B=0.3$ pu y $\delta_B=160^\circ$. Se observa que la potencia reactiva del convertidor de excitación (Q_E) puede controlarse desde una forma capacitiva (negativa), hasta una forma inductiva (positiva), sin tener un efecto significativo en otras potencias. Esto quiere decir que el voltaje de excitación puede controlar la potencia reactiva (o perfil de voltaje) en el terminal de excitación.

El control del UPFC se activa debido a cambios en el sistema, por ejemplo, cambios de carga. En este caso, el UPFC debe ajustar el flujo de potencia de acuerdo con los valores de referencia, los cuales son actualizados a partir de una solución de flujos de potencia. Para regular el flujo de potencia activa de estado estacionario, se considera suficiente un control sobreamortiguado de δ_B con una constante de tiempo del orden de 0.6 seg. [9-10]. La regulación de potencia reactiva en estado estable también puede lograrse con un control sobreamortiguado de M_B con una constante de tiempo aproximada a 0.6 seg. Similarmente, el control de la variable M_E puede ajustarse con una respuesta sobreamortiguada con una constante de tiempo de aproximadamente 60 seg. El lazo de control del voltaje

de enlace de CD debe reaccionar rápidamente al disturbio en el sistema y mantener el voltaje de CD en sus valores de referencia dentro de un par de ciclos.

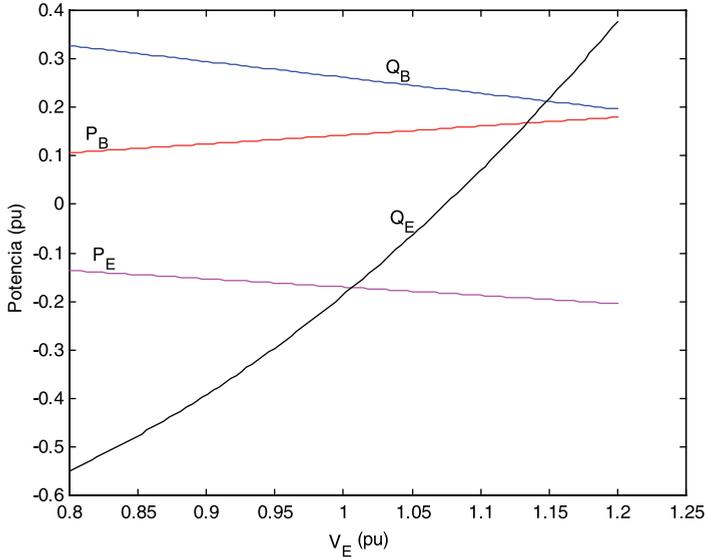


Figura 9.12 Potencia real y reactiva de los convertidores de excitación y elevador como función de V_E ($V_B = 0.3$ pu, $\delta_B = 160^\circ$)

La determinación de P_{ref} , Q_{ref} del sistema de la figura 9.13, se realiza utilizando la solución de flujos de potencia del sistema. V_{CD_ref} se usa para controlar V_{CD} . Con estos valores, el UPFC reacciona a los cambios en el sistema tratando de ajustar los valores de referencia.

De acuerdo con el análisis gráfico realizado y los lineamientos generales para el control del dispositivo UPFC, la figura 9.13 muestra una configuración típica adoptada con el objeto de regular los flujos de potencia en condiciones de estado estacionario. El esquema presenta la estructura de control convencional. Los flujos de potencia activa y reactiva en la línea se modifican a través de la modulación de la fase y amplitud de la fuente en serie δ_B y M_B , respectivamente. La amplitud de la fuente en derivación M_E se utiliza para regular el voltaje V_{Et} ; el ángulo de fase de la fuente en derivación δ_E se emplea para regular el voltaje del enlace capacitivo de corriente directa, V_{CD} . Los controladores representados son del tipo proporcional-integral (PI), aunque pueden utilizarse otros esquemas de control.

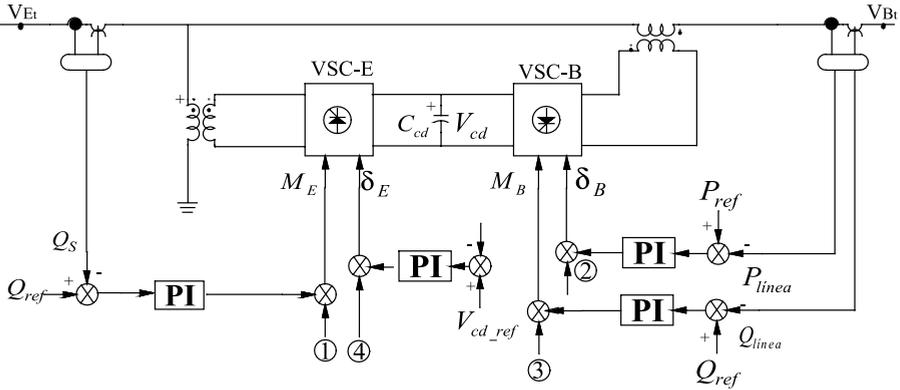


Figura 9.13 Sistema de control del UPFC

DIAGRAMAS DE POTENCIA

Para observar el impacto simultáneo de las variables δ_B , V_B y V_E sobre el flujo de potencia en la línea, se utiliza un diagrama de potencia. Con base en el esquema de la figura 9.8, los componentes de potencia activa y reactiva en ambos extremos de la línea, cuando el UPFC no se encuentra en servicio, están dadas por:

$$P = P_S = P_R = \frac{V_S V_R}{X_2} \sin \delta \quad (355)$$

$$Q = Q_S = -Q_R = -\frac{V_S V_R}{X_2} \cos \delta + \frac{V_R^2}{X_2} \quad (356)$$

donde:

$$X_2 = X_1 + X_2$$

δ : es la diferencia angular entre los nodos emisor y receptor

Con respecto al flujo de potencia en la línea, considerando el estado estacionario, se puede asumir que la magnitud de los voltajes de envío y recepción V_S y V_R están fijas, y los cambios en la diferencia angular δ definen las variaciones de P y Q. Si δ varía, el lugar geométrico de la potencia compleja $S = P + jQ$ describe un círculo en el plano complejo descrito mediante la ecuación (357).

$$P^2 + \left(Q - \frac{V_S^2}{X_2} \right)^2 = \left(\frac{V_S V_R}{X_2} \right)^2 \quad (357)$$

Este círculo se encuentra centrado en $\left(0, \frac{V_s^2}{X_{12}}\right)$ y tiene un radio de $\frac{V_s V_R}{X_{12}}$.

De acuerdo con el criterio de estabilidad, δ debe estar situado entre los límites de 0° y 90° . En la figura 9.14 se puede observar el diagrama de potencia del sistema, calculado mediante la ecuación (357), restringiéndose al cuadrante donde la potencia activa y la reactiva son positivas.

Utilizando las ecuaciones (350) y (354) se puede graficar el diagrama de potencia del extremo emisor, el cual se ilustra en la figura 9.15. Se considera que la diferencia angular entre el extremo emisor y receptor es $\delta = 0^\circ$, y se considera el UPFC insertado en el extremo emisor del sistema. El área dentro del círculo identifica el rango de control del flujo de potencia, mediante cambios de la magnitud de la fuente serie V_B (menor que V_{Bmax}). La transferencia de potencia se debe únicamente a la posibilidad de modificar las amplitudes y fases de las fuentes serie y derivación del dispositivo UPFC.

Es decir, mientras el UPFC no se encuentra en servicio se tiene muy poco rango de control sobre la transferencia de potencia, y, por cuestiones de estabilidad, se restringe la operación al primer cuadrante del plano complejo. Sin embargo, cuando el UPFC se encuentra en servicio, el lugar geométrico representa una curva cerrada, indicando que se tiene un rango más amplio de control y el sistema puede operar en valores positivos y negativos de potencia compleja, lo que le da mayor flexibilidad al sistema.

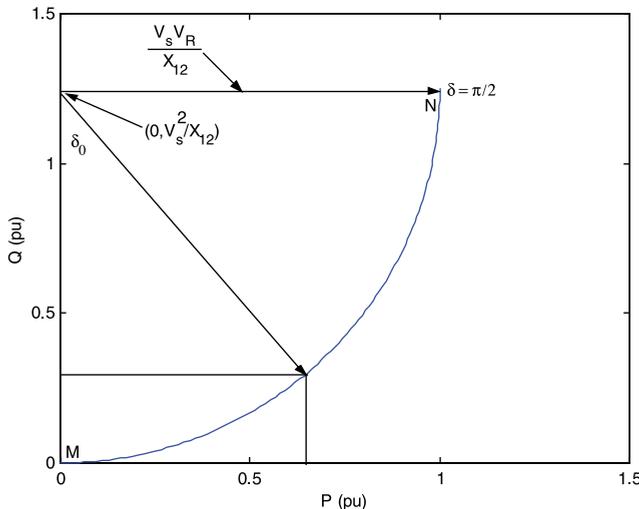


Figura 9.14 Diagrama de potencia del sistema de la figura 9.13 cuando el UPFC no está en servicio

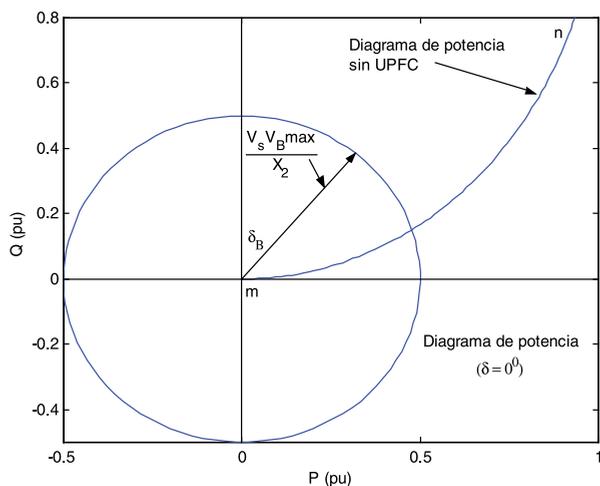
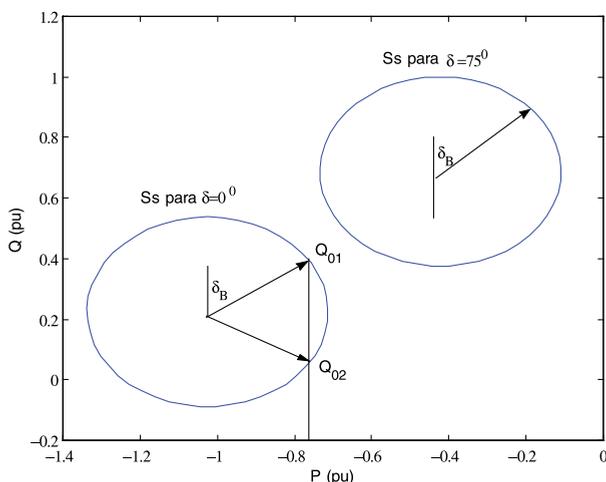


Figura 9.15 Potencia compleja del extremo emisor cuando el UPFC está localizado en el extremo emisor

La figura 9.16 presenta la región de potencia compleja del extremo emisor para $\delta = 0^0$ y $\delta = 75^0$ cuando el UPFC está localizado en medio de la línea. Esta curva se obtiene mediante la variación de la fase y la amplitud de la fuente de derivación δ_E y V_E , que, a su vez, hace que los valores de δ_B y/o V_B varíen. Se observa que para cualquier valor de transferencia de potencia activa existen dos valores distintos de transferencia de potencia reactiva (Q_{01} y Q_{02}). La región de control del flujo de potencia activa debería ser llevada a cabo con la potencia reactiva de menor valor.



Figuras 9.16 Región de la potencia compleja del extremo emisor para $\delta = 0^0$ y $\delta = 75^0$ cuando el UPFC está localizado en medio de la línea

La figura 9.17 ilustra la región de potencia compleja del extremo receptor para $\delta = 0^\circ$ y $\delta = 75^\circ$, cuando el UPFC está localizado en medio de la línea. Al igual que la figura 9.16, ésta se obtiene mediante la variación de la fase y amplitud de la fuente serie δ_E y V_E . Basándose en el control de V_B y δ_B , cualquier potencia compleja, asociada con un punto dentro de las áreas encerradas, puede ser controlada por el UPFC. También en este caso, la región de control del flujo de potencia real, puede realizarse mediante la potencia reactiva de menor valor.

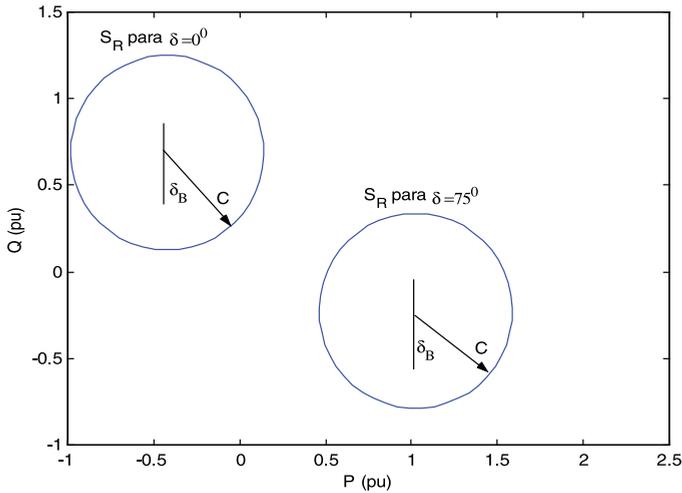


Figura 9.17 Región de potencia compleja del extremo receptor para un valor de δ desde 0° hasta 90°

La figura 9.18 muestra el área total del plano complejo que el UPFC puede controlar. En esta gráfica se identifican las áreas definidas por la ecuación $(P_s - a)^2 + (Q_s - b)^2 = c^2$, la cual define un círculo en el plano de la potencia compleja; éstas áreas se definen cuando la diferencia angular δ varía desde 0° hasta 90° .

La figura 9.19 despliega los efectos del voltaje V_E sobre la región de control de la potencia compleja para el sistema, para $V_E=1.15$ pu y $V_E=0.85$ pu. De la figura 9.8 se puede observar que cuando V_E es más grande que V_{Et} , el UPFC inyecta potencia reactiva al sistema, por esto, la cantidad de potencia reactiva suministrada por el extremo emisor debe ser menor. Esta es la razón por la que en la figura 9.19, S_2 se encuentra localizada más abajo que S_1 y estos son valores más pequeños que Q_s . También se observa que el área que definen S_1 y S_2 es la región del sistema de la figura 9.8 puede controlar cuando el UPFC se encuentra en servicio. Para enfatizar las diferencias, se incluye la región de control del sistema cuando el UPFC

no se encuentra en servicio (*curva mn*). Las posibilidades de control en este caso son mucho menor que cuando el dispositivo UPFC se encuentra en servicio.

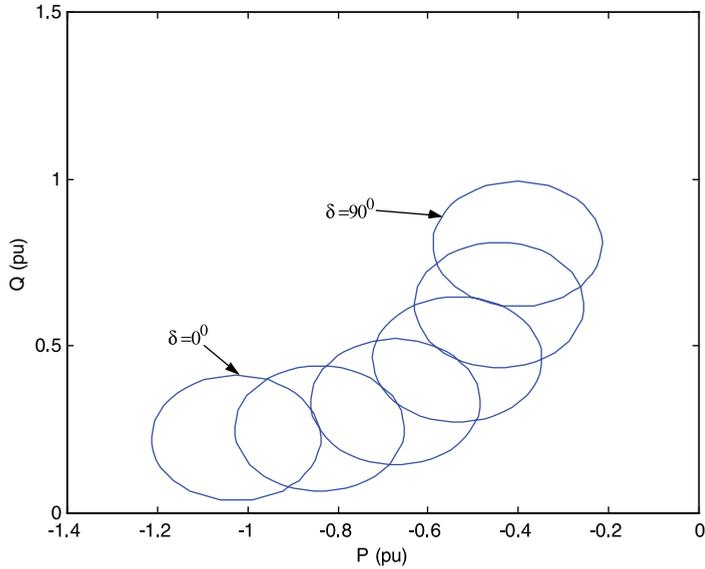


Figura 9.18 Área total del plano complejo que el UPFC puede controlar

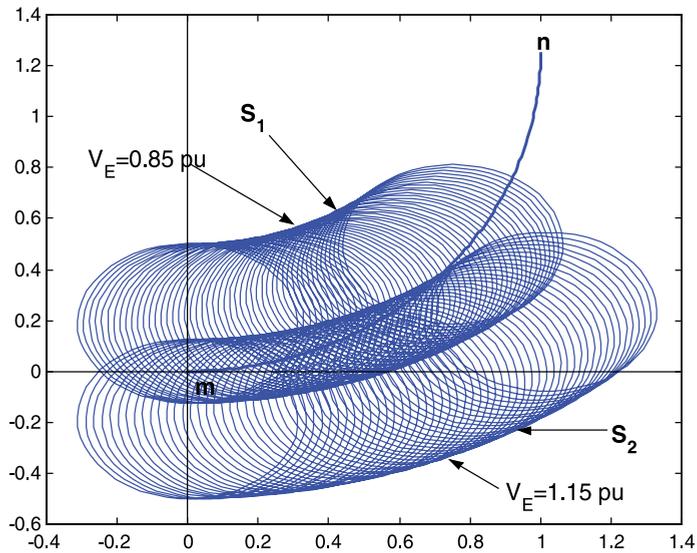


Figura 9.19 Efecto de V_E sobre la región de control de la potencia compleja

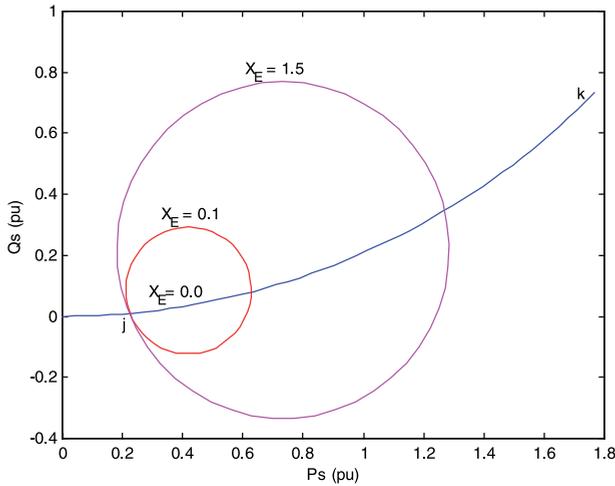


Figura 9.20 a) Efecto de X_E sobre la región de la potencia compleja en el extremo emisor

La figura 9.20 a) presenta el efecto de la reactancia externa X_E sobre la región de control de la potencia compleja en el extremo emisor. Se observa que cuando X_E disminuye, la magnitud del voltaje en el nodo de excitación es más influenciado por el convertidor de voltaje de excitación, y llega a ser menos afectado que la magnitud del voltaje inyectado en serie. Si $X_E=0$, la transferencia de potencia reactiva del extremo emisor es independiente de la magnitud del voltaje inyectado en serie (curva jk de la figura 9.20 a). Sin embargo, la fase de la fuente derivación δ_E es dependiente de V_B y/o δ_B , y el flujo de potencia real del extremo para $V_E \angle \delta_E$ es afectado únicamente por δ_B . Se observa que la región de potencia reactiva del extremo emisor se expande conforme X_E se incrementa.

En la figura 9.20 b) se muestra el efecto de la reactancia externa X_E sobre la región de potencia compleja en el extremo receptor. En ésta se puede ver que la región de potencia reactiva del extremo receptor se contrae conforme la reactancia X_E se incrementa.

La figura 9.21 muestra el efecto de la localización del UPFC respecto del extremo emisor del sistema de la figura 9.8. La localización del UPFC cambia variando X_1 y X_2 mientras X_1+X_2 permanece constante. Se observa que, para un nivel dado de transferencia de potencia real, la potencia reactiva demandada por el extremo emisor depende de la localización del UPFC. El convertidor de excitación del UPFC puede ser controlado para compensar (parcial o completamente) la demanda de potencia reactiva de la terminal de la línea. La figura 9.22 ilustra el efecto de la localización del UPFC respecto al extremo receptor.

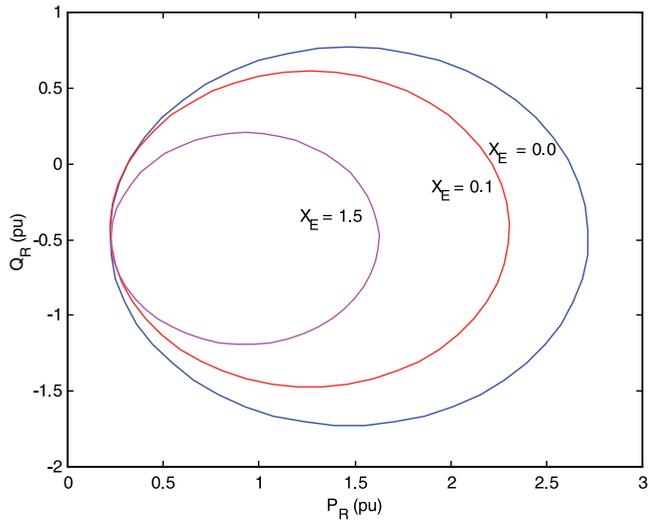


Figura 9.20 b). Efecto de X_E sobre la región de potencia compleja en el extremo receptor

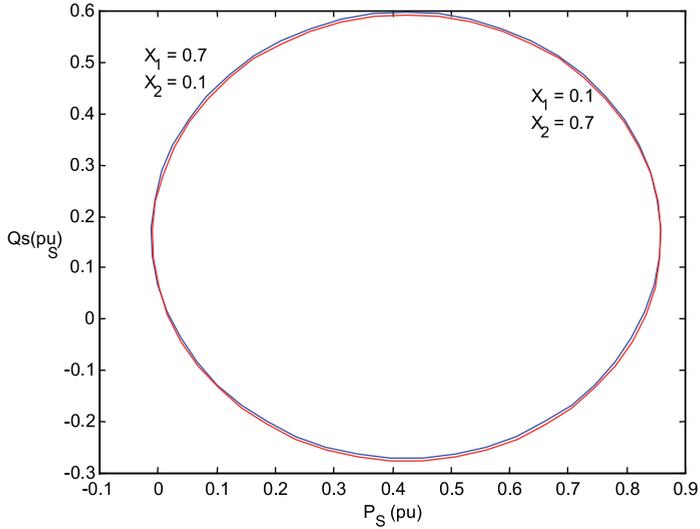


Figura 9.21 Efecto de la región de localización del UPFC del extremo emisor

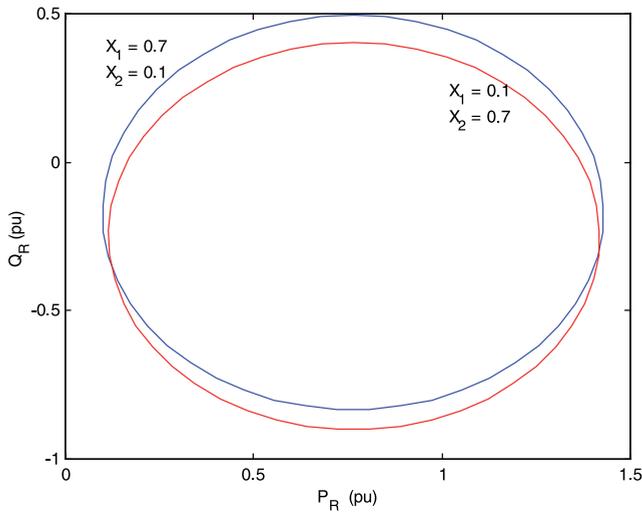


Figura 9.22 Efecto de la localización del UPFC en el extremo receptor

ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO

El concepto del controlador unificado de flujos de potencia (UPFC) fue propuesto por Laszlo Gyugyi en 1991 [1, 11]. El UPFC fue cancelado para el control en tiempo real y compensación dinámica de los sistemas de transmisión de CA, suministrando la flexibilidad multifuncional requerida para resolver muchos problemas encontrados en la industria eléctrica. El UPFC puede controlar, simultáneamente o selectivamente, todos los parámetros que afectan el flujo de potencia en la línea de transmisión (por ejemplo, voltaje, impedancia y ángulo de fase), esta capacidad única le da el significado de *unificado* [12]. Alternativamente, puede controlar independientemente el flujo de potencia activa y reactiva en la línea. El control de la potencia activa está asociado con un cambio similar en la potencia reactiva, y por lo tanto, incrementar el flujo de potencia activa implica incrementar la potencia reactiva en la línea.

Actualmente, *Electricité de France* está desarrollando un UPFC de 7 MVA para aplicaciones en líneas de 220 kV, y *American Electric Power* (AEP) está instalando un UPFC de 160 MVA en una línea de 138 kV [9]. La investigación y desarrollo asociado con las aplicaciones del UPFC tienen dos grandes vertientes, la primera es la realización y manufactura de convertidores basados en compensadores estáticos de VARS (VSC) para aplicaciones de alto voltaje. La segunda es la investigación del UPFC en el comportamiento dinámico y en estado estable en sistemas de potencia interconectados.

Análisis de flujos de carga en sistemas de potencia con UPFC [13]

El análisis de flujos de carga en sistemas de potencia con dispositivos FACTS, tales como TCSC, SVC y TCPS, han sido relativamente muy estudiados. 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*. Existen diferentes ventajas y desventajas en los dos métodos. Recientemente, se utilizan algoritmos genéticos para resolver los problemas de control del flujo de potencia óptimos con UPFC en [14]. El UPFC se considera como un dispositivo cambiador de fase continuo que regula la magnitud y ángulo del voltaje de rama y se deriva basándose en la inyección al nodo de potencia causado por el UPFC.

Estos dos métodos pueden aplicarse al UPFC; el método iterativo unificado fue utilizado en [15] y el modelo del controlador de flujo de potencia generalizado fue propuesto en [16]; se ha intentado manejar los dispositivos FACTS con un modelo generalizado. C. R. Fuerte Esquivel y E. Acha hicieron un gran trabajo al desarrollar un algoritmo que se ajusta al cálculo del flujo de carga del sistema de potencia con varios dispositivos FACTS [2, 17-18].

En [2], se introdujo un sistema de ecuaciones no lineales para describir cada UPFC. Las ecuaciones de la red tradicionales (un nodo ficticio agregado para cada UPFC), junto con este sistema de ecuaciones, fueron resueltas simultáneamente con un algoritmo de Newton. 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.

Durante la iteración, algunos parámetros violan sus límites, por lo tanto, estos parámetros pueden fijarse en sus valores límites. Casos de estudio muestran que este método tiene fuertes características de convergencia; sin embargo, existen defectos en este algoritmo. Si se consideran múltiples UPFC, el orden de la matriz jacobiana aumenta considerablemente (de manera convencional, un UPFC requiere siete ecuaciones y un nodo ficticio). Esto probablemente reduce la tendencia a la convergencia. Además, el método de evaluación de los valores iniciales de los parámetros del UPFC no puede asegurar que estén en la vecindad de soluciones. Especialmente, cuando el objetivo es controlar el flujo de potencia activa y potencia reactiva en una línea en valores que están lejos del flujo libre (flujo sin

dispositivo UPFC), en tal caso, el fenómeno puede volverse común. Sin embargo, existen inconvenientes en otros métodos, esto es, después de la convergencia del flujo de carga, el cálculo de parámetros del UPFC puede resultar en una solución que viola los límites.

Suponiendo que las referencias programadas de las potencias activa y reactiva en la línea, así como la magnitud de voltaje nodal, no son apropiadas, durante la iteración uno o dos parámetros del UPFC estarán más allá del límite. En este caso, incluso si se fijan los parámetros en sus valores límites, la solución disponible podría aun no estar determinada. De hecho, la capacidad de controlar el flujo en una línea y el voltaje nodal no es infinito con respecto a la capacidad fija del UPFC. La convergencia es posible sólo para un objetivo apropiado. Los dispositivos FACTS son descritos por su matriz de admitancias. Las características de convergencia son dudosas porque no hay valores iniciales disponibles para objetivos de control arbitrarios. Además, entre mayor sea el número de dispositivos FACTS utilizados, la probabilidad de divergencia es mayor. Como una aplicación en la referencia [2], el modelo se incorpora directamente en un programa de flujos óptimos [19]. En [10] se propone un modelo de estado estacionario. El método para calcular el flujo de carga mediante el modelo de estado estable del UPFC, se puede mejorar tomando el nodo-E donde el transformador excitador del UPFC se conecta como un nodo PQ y el nodo-B, donde el transformador elevador está conectado como un nodo PV.

Inserción del dispositivo UPFC en el sistema simplificado

Para comenzar la descripción del problema de flujos de potencia incluyendo un dispositivo UPFC, se utiliza el esquema simplificado de la figura 9.23. El esquema consiste en un transformador de excitación (ET), un transformador elevador (BT), dos convertidores de voltaje (VSC) basados en dos GTO trifásicos, y un enlace capacitivo de CD. Las variables M_E , M_B y δ_E , δ_B son las amplitudes y los ángulos de fase de las fuentes que representan a los VSC, y que son las señales de control del UPFC, de acuerdo con lo que se denomina enfoque de modulación de amplitudes y fases.

El análisis de estado estacionario, se realiza sobre la red de cuatro nodos, como se ilustra en la figura 9.24. Por conveniencia de cálculo, las fuentes de voltaje se han transformado en fuentes de corriente, para insertarlas en las ecuaciones de la red.

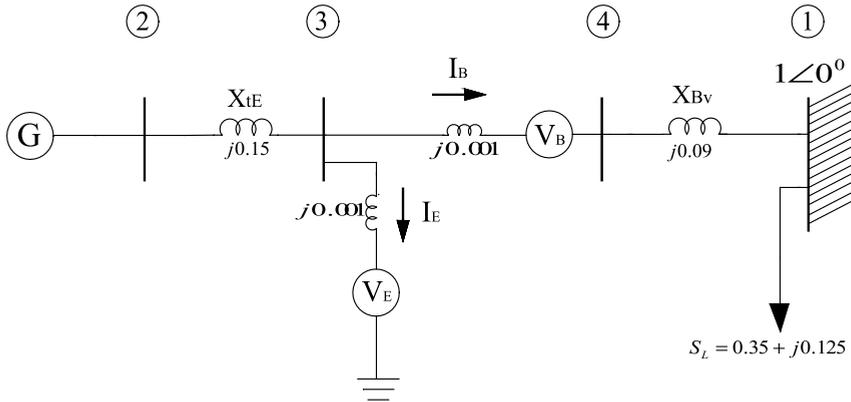


Figura 9.23 UPFC instalado en un sistema de potencia máquina barra-infinita

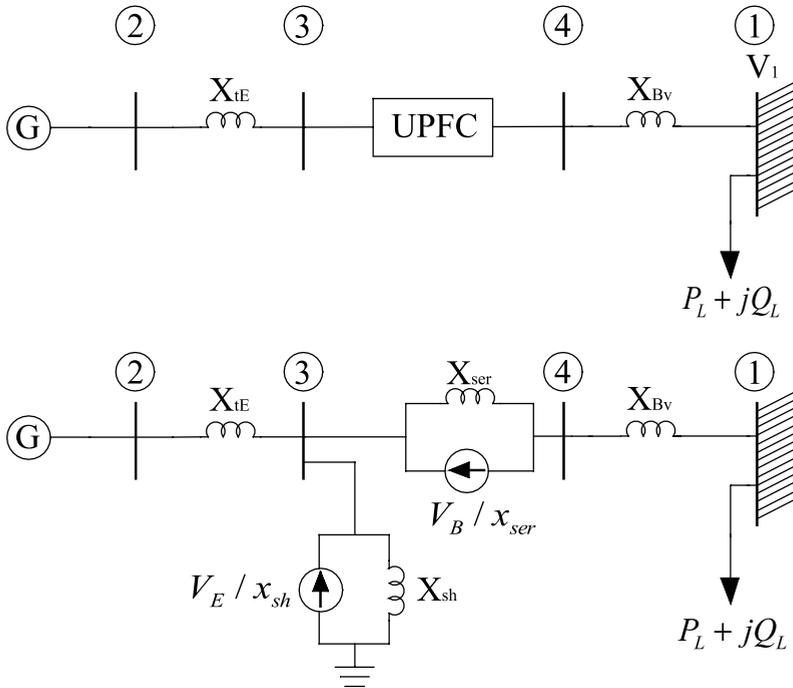


Figura 9.24 Sistema máquina barra-infinita incluyendo un UPFC

La rama en derivación del dispositivo UPFC controla la magnitud del voltaje del nodo 3, por lo tanto, se deben determinar seis incógnitas δ_2 , δ_3 , $|V_B|$, δ_B , $|V_E|$, δ_E en estado estacionario. Se asume que $V_1 = 1\angle 0^\circ$. A continuación se describen las ecuaciones de equilibrio utilizadas para este propósito.

$$V_4 = V_1 + jX_{Bv}(P_L - jQ_L) \quad (358)$$

$$\frac{P_g - jQ_g}{V_g^*} = \frac{V_g - V_3}{jX_{tE}} \Rightarrow P_g = \frac{|V_g||V_3|}{X_{tE}} \sin(\delta_g - \delta_3) \quad (359)$$

$$\frac{V_E}{jX_{sh}} + \frac{V_B}{jX_{ser}} = -\frac{V_g}{jX_{tE}} + \frac{V_3}{jX_T} - \frac{V_4}{jX_{ser}} \quad (360)$$

$$\frac{1}{X_T} := \frac{1}{X_{tE}} + \frac{1}{X_{sh}} + \frac{1}{X_{ser}}$$

La ecuación (360) se descompone en dos ecuaciones, parte real y parte imaginaria:

$$\frac{|V_4|}{X_{ser}} \cos \delta_4 = \frac{|V_3|}{X_T} \cos \delta_3 - \frac{|V_g|}{X_{tE}} \cos \delta_g - \frac{|V_B|}{X_{ser}} \cos \delta_B - \frac{|V_E|}{X_{sh}} \cos \delta_E \quad (361)$$

$$\frac{|V_4|}{X_{ser}} \sin \delta_4 = \frac{|V_3|}{X_T} \sin \delta_3 - \frac{|V_g|}{X_{tE}} \sin \delta_g - \frac{|V_B|}{X_{ser}} \sin \delta_B - \frac{|V_E|}{X_{sh}} \sin \delta_E \quad (362)$$

$$-\frac{V_B}{jX_{ser}} = -\frac{V_1}{jX_{Bv}} - \frac{V_3}{jX_{ser}} + \frac{V_4}{jX_{T2}} \quad (363)$$

$$\frac{1}{X_{T2}} := \frac{1}{X_{Bv}} + \frac{1}{X_{ser}}$$

Similarmente, la ecuación (363) también se descompone en dos ecuaciones quedando de la siguiente forma:

$$\frac{|V_1|}{X_{Bv}} - \frac{|V_4|}{X_{T2}} \cos \delta_4 = \frac{|V_B|}{X_{ser}} \cos \delta_B - \frac{|V_3|}{X_{ser}} \cos \delta_3 \quad (364)$$

$$-\frac{|V_4|}{X_{T2}} \sin \delta_4 = \frac{|V_B|}{X_{ser}} \sin \delta_B - \frac{|V_3|}{X_{ser}} \sin \delta_3 \quad (365)$$

Finalmente, se tiene la restricción de potencia activa cero en las fuentes del dispositivo UPFC:

$$P_{bb} = P_E + P_B = 0 \quad (366)$$

donde:

$$P_B = |V_B|^2 G_{mm} + |V_B| |V_3| [G_{km} \cos(\delta_B - \delta_3) + B_{km} \sin(\delta_B - \delta_3)] + |V_B| |V_4| [G_{mm} \cos(\delta_B - \delta_4) + B_{mm} \sin(\delta_B - \delta_4)] \quad (367)$$

$$P_E = -|V_E|^2 G_E + |V_E| |V_3| [G_E \cos(\delta_E - \delta_3) + B_E \sin(\delta_E - \delta_3)] \quad (368)$$

De las definiciones de conductancias y susceptancias:

$$G_{mm} + jB_{mm} = Z_{ser}^{-1} \quad ; \quad G_E + jB_E = Z_{sh}^{-1} \quad ; \quad G_{km} + jB_{km} = Z_{ser}^{-1} \quad (369)$$

En la solución del problema de estado estacionario se utilizó el método de Newton, por lo tanto, se requiere la linealización de las ecuaciones.

Como ejemplo de aplicación se ilustra la red mostrada en la figura 9.25, con un nivel de carga $S_L = 0.35 + j0.125$. La magnitud del voltaje de generación se mantiene en 1.05 pu y en 1.0375 pu para el nodo controlado del UPFC. Las potencias manejadas por las fuentes derivación y serie del dispositivo resultan $S_E = -0.0062 - j0.00697$ y $S_B = 0.0062 + j0.0075$, respectivamente.

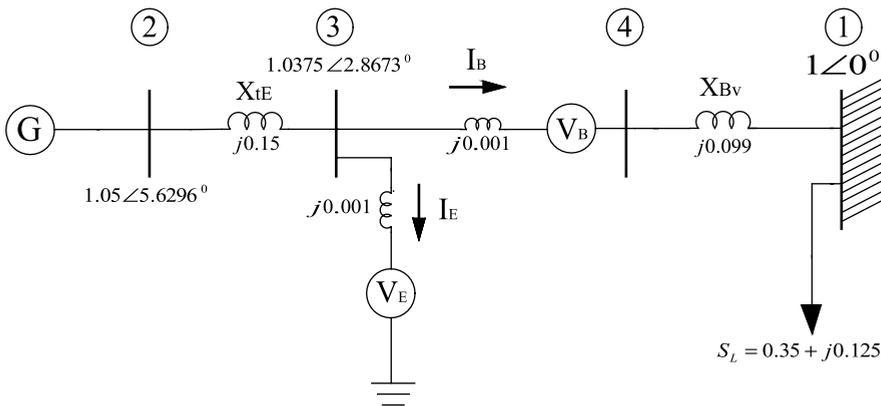


Figura 9.25 Flujo de carga para el caso máquina-barra infinita

Los voltajes y corrientes de las fuentes son $V_E = 1.0369 + j0.0519$, $I_E = -0.0093 + j0.0668$, $V_B = 0.0225 - j0.0134$, $I_B = 0.35 - j0.125$. Nótese que para mantener el nivel de voltaje propuesto de 1.0375 pu en el nodo 3, se requiere una cantidad importante de potencia reactiva. Se debe verificar que la capacidad del dispositivo sea suficiente para satisfacer la demanda exigida por las condiciones deseadas; de lo contrario, debe ajustarse a la capacidad nominal del dispositivo.

ECUACIONES DE EQUILIBRIO EN UN SISTEMA MULTI-MÁQUINAS CON UN UPFC

Las ecuaciones de potencias activa y reactiva del UPFC, según la figura 9.7, pueden escribirse como [2]:

$$\begin{aligned}
 P_k &= V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \\
 &\quad + V_k V_B [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_B) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_B)] \\
 &\quad + V_k V_E [G_E \cos(\delta_k - \delta_E) + B_E \sin(\delta_k - \delta_E)]
 \end{aligned} \tag{370}$$

$$\begin{aligned}
 Q_k &= -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \\
 &\quad + V_k V_B [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_B) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_B)] \\
 &\quad + V_k V_E [G_E \sin(\delta_k - \delta_E) - B_E \cos(\delta_k - \delta_E)]
 \end{aligned} \tag{371}$$

$$\begin{aligned}
 P_m &= V_m^2 G_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \cos(\delta_m - \delta_k) + B_{mk} \sin(\delta_m - \delta_k)] \\
 &\quad + V_m V_B [G_{mm} \cos(\delta_m - \delta_B) + B_{mm} \sin(\delta_m - \delta_B)]
 \end{aligned} \tag{372}$$

$$\begin{aligned}
 Q_m &= -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k [G_{mk} \sin(\delta_m - \delta_k) - B_{mk} \cos(\delta_m - \delta_k)] \\
 &\quad + V_m V_B [G_{mm} \sin(\delta_m - \delta_B) - B_{mm} \cos(\delta_m - \delta_B)]
 \end{aligned} \tag{373}$$

$$\begin{aligned}
 P_B &= V_B^2 G_{mm} + V_B V_k [G_{km} \cos(\delta_B - \delta_k) + B_{km} \sin(\delta_B - \delta_k)] \\
 &\quad + V_B V_m [G_{mm} \cos(\delta_B - \delta_m) + B_{mm} \sin(\delta_B - \delta_m)]
 \end{aligned} \tag{374}$$

$$\begin{aligned}
 Q_B &= -V_B^2 B_{mm} + V_B V_k [G_{km} \sin(\delta_B - \delta_k) - B_{km} \cos(\delta_B - \delta_k)] \\
 &\quad + V_B V_m [G_{mm} \sin(\delta_B - \delta_m) - B_{mm} \cos(\delta_B - \delta_m)]
 \end{aligned} \tag{375}$$

$$P_E = -V_E^2 G_E + V_E V_k [G_E \cos(\delta_E - \delta_k) + B_E \sin(\delta_E - \delta_k)] \tag{376}$$

$$Q_E = V_E^2 B_E + V_E V_k [G_E \sin(\delta_E - \delta_k) - B_E \cos(\delta_E - \delta_k)] \tag{377}$$

donde:

$$Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} = Z_B^{-1} + Z_E^{-1}$$

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

La potencia activa, asociada con el convertidor en serie, se convierte en potencia de CD. El convertidor en derivación debe suministrar la cantidad de potencia de CD para mantener V_{CD} 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 :

$$P_E + P_B = 0 \quad (378)$$

Como los controles interactúan con otras redes, la convergencia de la solución es 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:

$$[f(x)] = [J][\Delta X] \quad (379)$$

con:

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

donde: ΔP_b el error de potencia dado por (378), 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 CA (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:

$$[\Delta X] = \left[\Delta \delta_k \quad \Delta \delta_m \quad \frac{\Delta V_E}{V_E} \quad \frac{\Delta V_m}{V_m} \quad \Delta \delta_B \quad \frac{\Delta V_B}{V_B} \quad \Delta \delta_E \right]^T \quad (380)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_E} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_m} & 0 & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_E} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_m} & 0 & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_m} & 0 & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_m} & 0 & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_E} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_E} \end{bmatrix} \quad (381)$$

Si el control de voltaje del UPFC es desactivado, la tercera columna de la ecuación (381) se reemplaza por derivadas parciales respecto a δ_E , reemplazando a la magnitud de voltaje nodal incremental en el nodo k , $\frac{\Delta V_k}{V_k}$. En este caso, V_E se mantiene en un valor fijo dentro de los límites $V_{Emin} \leq V_E \leq V_{Emax}$. Si ambos nodos k y m , son tipo P-Q, el vector solución y la matriz jacobiana se define de la siguiente manera:

$$[\Delta X] = \left[\Delta \delta_k \quad \Delta \delta_m \quad \frac{\Delta V_k}{V_k} \quad \frac{\Delta V_m}{V_m} \quad \Delta \delta_B \quad \frac{\Delta V_B}{V_B} \quad \Delta \delta_E \right]^T \quad (382)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_E} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_B} V_B & 0 \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_B} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_B} V_B & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_E} \end{bmatrix} \quad (383)$$

La figura 9.26 muestra un diagrama de flujo del problema de flujos de potencia incluyendo un UPFC.

Ejemplo

El sistema de prueba utilizado es un sistema de tres máquinas y nueve nodos con un UPFC instalado entre los nodos 4-9. Los datos del sistema se presentan en la tabla 9.1.

Tabla 9.1 Datos del sistema de tres máquinas y nueve nodos

Nodo de salida	Nodo de llegada	R (p.u.)	X (p.u.)
1	4	0	0.0576
4	5	0.017	0.092
5	6	0.039	0.17
3	6	0	0.0586
6	7	0.0119	0.1008
7	8	0.0085	0.072
8	2	0	0.0625
8	9	0.032	0.161
9	4	0.01	0.085

De acuerdo con las condiciones del sistema, y asumiendo que se desea controlar el flujo de potencia $P = 0.5$ pu y $Q = 0.2$ pu, que fluye entre los nodos 4 y 9, se incluye un UPFC entre estos nodos. Entre los nodos propuestos al incluir el UPFC se genera un nodo ficticio, por lo que se aumenta el número nodos del sistema de 9 a 10, como se muestra la figura 9.27. La magnitud del voltaje de generación se mantiene en 1.04 pu y el nodo controlado del UPFC, en 1.0253 pu.

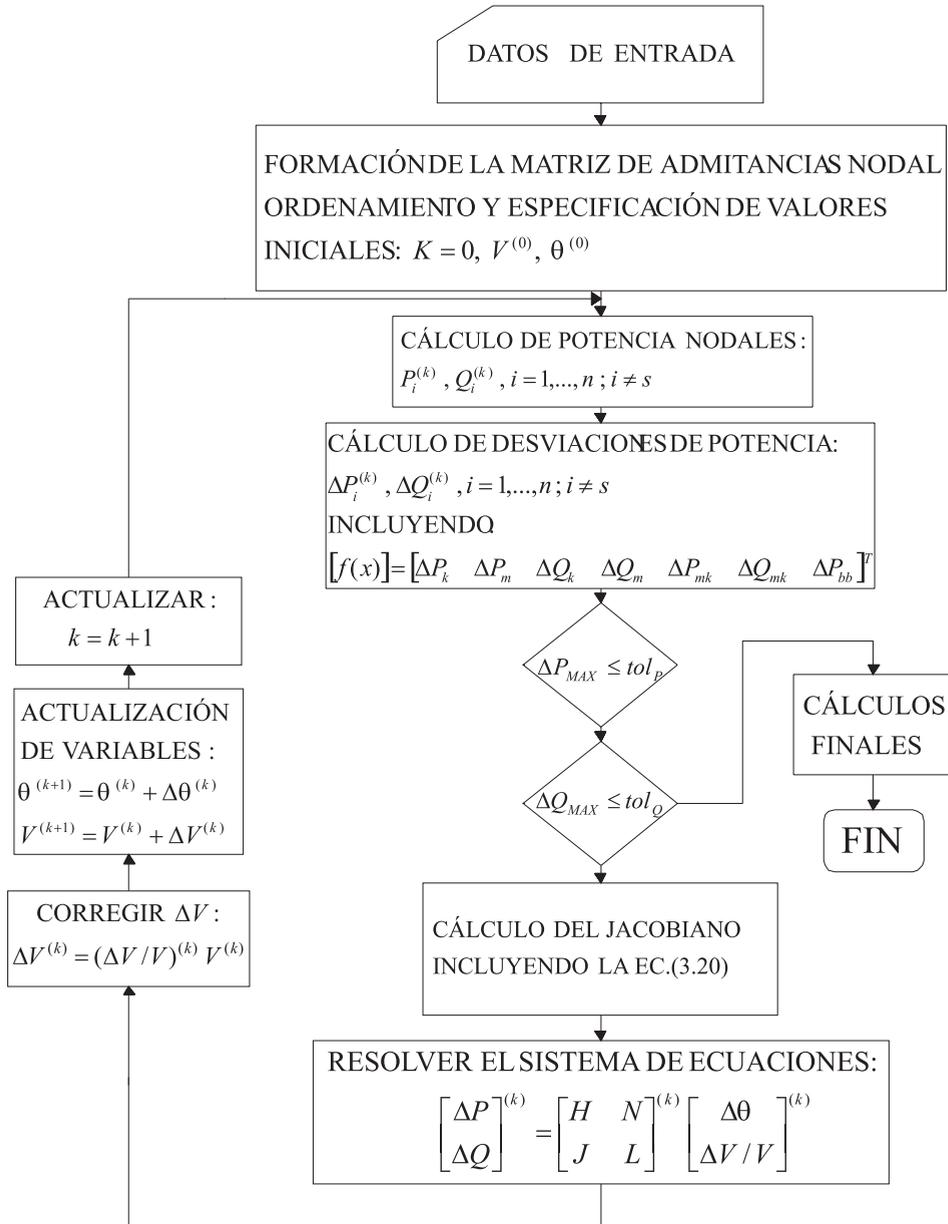


Figura 9.26 Diagrama de flujo del problema de flujos de potencia incluyendo un UPFC

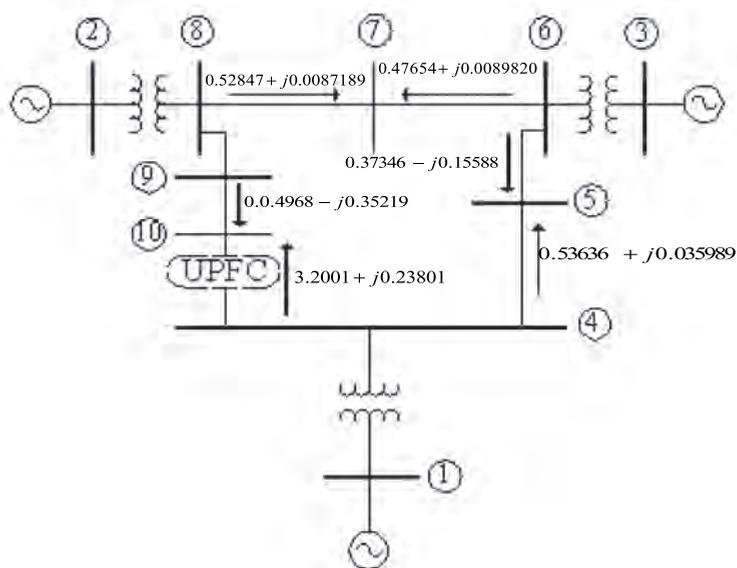


Figura 9.27 Sistema de prueba de nueve nodos incluyendo UPFC

Una vez incluido el dispositivo en el sistema, los resultados del flujo de carga se ilustran en la tabla 9.2.

Los voltajes de las fuentes manejadas por el UPFC son: $V_E = 1.0263 - j0.0010$, $V_B = 0.0661 - j0.0017$.

De la tabla 9.2 se observa que en el nodo donde se incluye el dispositivo se genera la potencia real y reactiva deseada de $0.5 + j0.2$, la magnitud de voltaje deseada en los nodos de generación y controlado se mantienen en los valores que se asignaron.

Tabla 9.2 Flujos de potencias del sistema incluyendo un UPFC

Del nodo	Al nodo	Flujo de envío	Flujo de retorno
1	4	$1.0364 + j0.27275$	$-1.0364 - j0.21159$
4	5	$0.53636 - j0.035989$	$-0.53169 - j0.10325$
6	5	$0.37346 - j0.15588$	$-0.36831 - j0.19675$
3	6	$0.85 - j0.106$	$-0.85 + j0.14690$
6	7	$0.47654 + j0.0089820$	$-0.47384 - j0.20550$
7	8	$-0.52616 - j0.14450$	$0.52847 + j0.0087189$
2	8	$1.3 + j0.036625$	$-1.3 + j0.063926$
8	9	$0.77153 - j0.072645$	$-0.75320 - j0.14782$
9	10	$-0.4968 - j0.35219$	$0.5 + j0.2$
4	10	$3.2001 + j0.23801$	$-3.2 + j0.0062967$

COMPENSACIÓN DE LÍNEAS

En la figura 9.28 se ilustra el caso de un generador y una línea que permite el transporte de la potencia eléctrica generada; ignorando las pérdidas, la potencia transmitida resulta:

$$P_e(t) = (E'_q(t)V_s / x_{ds})\sin\delta \tag{384}$$

Donde: E'_q es el voltaje interno del generador; V_s el voltaje del nodo receptor; x_{ds} la reactancia entre el nodo de envío y de recepción, incluyendo la reactancia síncrona del generador; el ángulo δ es la diferencia angular entre esos nodos. La relación $E'_q(t)V_s / x_{ds}$ representa la potencia máxima que puede ser transferida por la línea, y se denota como P_{max} .

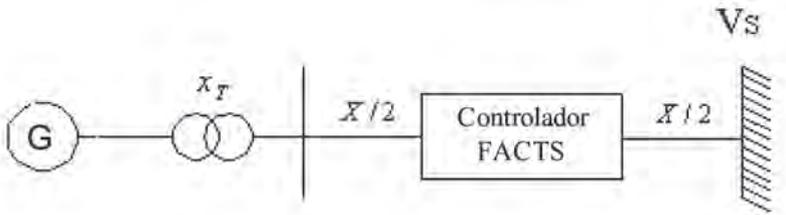


Figura 9.28 Modelo del sistema de potencia máquina-barra infinita con un controlador FACTS conectado en serie

Compensación serie

Para apreciar el papel de los dispositivos FACTS en la compensación de la línea se considera el sistema de la figura 9.28, el cual consta de los siguientes elementos:

- Un generador equivalente con reactancia de eje directo x_d ; la potencia mecánica P_m se asume constante.
- Líneas con reactancia equivalente total, X .
- Reactancia del transformador x_T .
- Dispositivo FACTS en el punto medio de la línea de transmisión.
- Barra infinita representada por un voltaje constante V_s y frecuencia ω_0 .

La potencia eléctrica de salida es:

$$P_e(t) = \frac{E'_q(t)V_s}{x_d + x_T + x_E} \sin\delta(t) \tag{385}$$

donde:

$$x_E = X + x_L(t) - x_C$$

x_E es la reactancia externa, x_d es la reactancia de eje directo, x_T es la reactancia del transformador, x_L y x_C son la reactancia inductiva y capacitiva que inserta el dispositivo, respectivamente. Con la adición de los dispositivos FACTS, la ecuación (385) se modifica en:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_s}{x_d + x_T + X + x_L(t) - x_C} \sin \delta(t) \quad (386)$$

Definiendo:

$$x_{ds} = x_d + x_T + X$$

Entonces:

$$\begin{aligned} P_e(t) &= \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds} + x_L(t) - x_C} \sin \delta(t) \\ &= \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds} \left(1 + \frac{x_L(t) - x_C}{x_{ds}} \right)} \sin \delta(t) \end{aligned} \quad (387)$$

Definiendo:

$$-k_1 = \frac{x_L(t) - x_C}{x_{ds}} \quad (388)$$

Por lo tanto:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds} (1 - k_1)} \sin \delta(t) \quad (389)$$

k_1 se define como el grado de compensación del dispositivo FACTS conectado en serie.

Compensación en derivación

La figura 9.29 ilustra un sistema de potencia máquina-barra infinita con un controlador FACTS conectado en derivación.

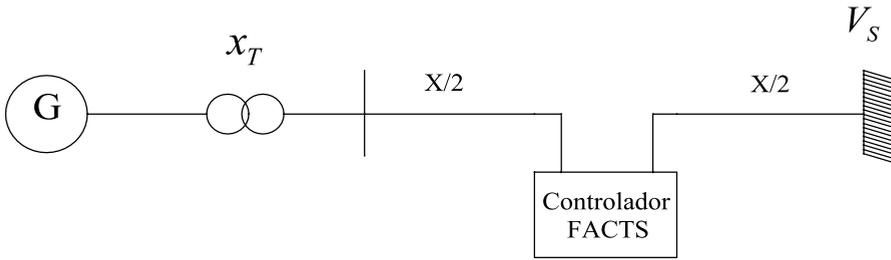


Figura 9.29 Modelo del sistema de potencia máquina-barra infinita con un controlador FACTS conectado en derivación

De manera similar que para el caso de la compensación serie, la potencia eléctrica es:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_E}{x_d + x_T + x_E} \sin\delta(t) \quad (390)$$

donde:

$$V_E = \frac{V_S}{\frac{X}{2}(B_L(t) - B_C) + 1}; \quad x_E = \frac{X}{2} + \frac{\frac{X}{2}}{\frac{X}{2}(B_L(t) - B_C) + 1} \quad (391)$$

V_E es el voltaje del transformador excitador, $B_L(t)$ y B_C son la susceptancia inductiva y capacitiva de la línea. Sustituyendo la ecuación (391) en la ecuación (390):

$$P_e(t) = \frac{E_q(t) \left[\frac{V_S}{\frac{X}{2}(B_L(t) - B_C) + 1} \right]}{x_d + x_T + \left[\frac{X}{2}(B_L(t) - B_C) + 1 \right]} \sin\delta(t) \quad (392)$$

Definiendo:

$$B_{svc} = B_C - B_L(t) \quad (393)$$

Entonces, la potencia eléctrica es:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_S}{\left[-\frac{X}{2}B_{svc} + 1\right] \left(x_d + x_T + \frac{X}{2}\right) + \frac{X}{2}} \sin\delta(t) \quad (394)$$

Definiendo:

$$x_{ds} = x_d + x_T + X \quad (395)$$

Entonces:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_S}{x_{ds} - B_{svc} \left\{ \frac{X}{2} \left(x_d + x_T + \frac{X}{2} \right) \right\}} \sin\delta(t) \quad (396)$$

$$k_2 = \frac{B_{svc}}{x_{ds}} \left\{ \frac{X}{2} \left(x_d + x_T + \frac{X}{2} \right) \right\} \quad (397)$$

Finalmente:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_S}{x_{ds}(1-k_2)} \sin\delta(t) \quad (398)$$

donde k_2 se define como el grado de compensación del dispositivo FACTS conectado en derivación.

Compensación serie-derivación

Una vez descritas la compensación serie y derivación, se procede a realizar la configuración adoptada por el UPFC que es la configuración serie-derivación, con el fin de visualizar al dispositivo como un compensador.

La transferencia de potencia máxima P_{\max} en un sistema máquina-barra infinita (SMIB), compensado con un UPFC_{emax} adicionado en el punto medio de la línea como se ilustra en la figura 9.30 puede ser escrita según [20], como:

$$P_{\max} = \frac{P_{\max}}{(1-k)} \quad (399)$$

donde P_{\max} es la máxima transferencia de potencia para la línea sin compensar y k es el grado de compensación.

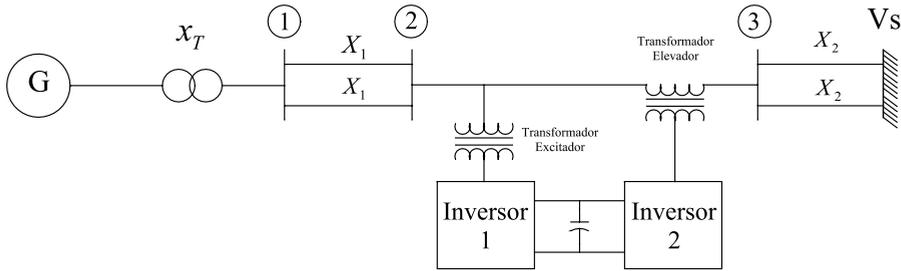


Figura 9.30 Modelo del sistema máquina-barra infinita con un UPFC localizado en medio de la línea

De la figura 9.30, ignorando los efectos de la capacitancia y resistencia del sistema de transmisión, es posible realizar un análisis de la transferencia de potencia máxima, P_{emax} , cuando existe compensación de la línea a través del UPFC, que puede escribirse en forma general como $P_{emax} = P_{max} / (1 - k_1 - k_2)$, donde P_{max} es la transferencia de potencia máxima para la línea sin compensar.

La aproximación usual para la transferencia de potencia, en el sistema máquina barra-infinita, sin considerar el UPFC, es:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds}} \sin \delta(t) \quad (400)$$

donde:

$$x_{ds} = x_d + X_1 + X_2$$

Puede mostrarse que con la adición del UPFC, la ecuación (400) resulta:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_E}{x_d + x_1 + x_E} \sin \delta(t) \quad (401)$$

donde x_E es la reactancia del transformador excitador.

De la figura 9.30:

$$V_E = \frac{V_R}{1 - (X_2 + x_s)B_Q(t)} \quad (402)$$

$$x_E = X_1 + \frac{(X_2 + x_s)}{1 - (X_2 + x_s)B_Q(t)} \quad (403)$$

donde, x_s es la reactancia equivalente del SSSC, $B_Q(t) = i_Q(t)/V_Q(t)$, es la susceptancia del StatCom, $i_Q(t)$ y $V_Q(t)$ son la corriente reactiva y el voltaje terminal al que está conectado el StatCom, respectivamente.

De la ecuación (400) puede escribirse:

$$\begin{aligned}
 P_e(t) &= \frac{E_q(t)V_s \sin \delta(t)}{\{1 - B_Q(t)(X_2 + x_s)\}\{x_d + X_1\} + \{X_2 + x_s\}} \\
 &= \frac{E_q(t)V_s \sin \delta(t)}{\{x_{ds} + x_s - B_Q(t)(X_2 + x_s)\}\{x_d + X_1\}} \\
 &= \frac{E_q(t)V_s \sin \delta(t)}{x_{ds} \left[\left\{ 1 - \left(-\frac{x_s}{x_{ds}} \right) - \frac{B_Q(t)}{x_{ds}} (X_2 + x_s) \right\} \{x_d + X_1\} \right]} \\
 &= \frac{E_q(t)V_s \sin \delta(t)}{x_{ds} (1 - k_1 - k_2)}
 \end{aligned} \tag{404}$$

Definiendo:

$$x_{ds} = x_d + x_T + \frac{X_1}{2} + \frac{X_2}{2} \tag{405}$$

Se tiene:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds}(1 - k_2)} \sin \delta(t) \tag{406}$$

Si:

$$k_1 = -\frac{x_s}{x_{ds}} \quad ; \quad k_2 = \frac{B_Q(t)}{x_{ds}} \left(\frac{X_2}{2} + x_s \right) \left(x_d + x_T + \frac{X_1}{2} \right) \tag{407}$$

Finalmente:

$$P_e(t) = \frac{E_q(t)V_s}{x_{ds}(1 - k_1 - k_2)} \sin \delta(t) \tag{408}$$

Entonces:

$$P_{emax} = P_{max} / (1 - k_1 - k_2) \tag{409}$$

donde:

$$P_{max} = E_q(t)V_s / x_{ds} \tag{410}$$

Para la rama en serie del UPFC, se puede decir que $k_1 > 0$ si $x_s(t) < 0$, y $k_1 < 0$ si $B_Q(t) < 0$. Para la rama en derivación del UPFC, se puede decir que $k_2 > 0$ si $B_Q(t) > 0$ y $k_2 < 0$ si $B_Q(t) < 0$.

El análisis muestra que la transferencia de potencia máxima depende de los grados de compensación ofrecidos por las ramas en serie y derivación del UPFC.

Cuando el UPFC varía, de tal manera que k_1 y k_2 son mayores que cero, la reactancia equivalente de la línea se reduce y el pico de la curva $P - \delta$ aumenta. El aumento de la curva $P - \delta$ tiene el efecto de aumentar el margen de estabilidad.

Por otro lado, cuando el UPFC varía de modo que k_1 y k_2 sean menores que cero, la reactancia de línea equivalente se incrementa y el pico de la curva $P - \delta$ decrece. La disminución de la curva $P - \delta$ del sistema tiene el efecto de reducir el margen de estabilidad transitoria.

CONCLUSIONES

Los controladores FACTS son una solución viable y económica para los problemas de las grandes redes de CA interconectadas, ya que se caracterizan por tener respuesta rápida, ausencia de inercia y requerimientos mínimos de mantenimiento. Mediante el uso de estos dispositivos se puede obtener el flujo deseado en cualquier línea, tomando en consideración sus capacidades, permitiendo la operación óptima del sistema de transmisión, y un rango amplio de transferencia de potencia activa y reactiva.

El UPFC es un controlador versátil que puede usarse para controlar independientemente el flujo de potencia activa y reactiva en cualquier línea de transmisión. Cuando se inserta el dispositivo en una línea, se obtiene una gama amplia de posibilidades operativas que, de otro modo, difícilmente pueden obtenerse. El control apropiado de los parámetros de las fuentes serie y derivación determinará el valor y dirección de los flujos de potencia.

La presencia de un UPFC puede incrementar notablemente la *región del control de la potencia*. Un UPFC puede incrementar la *máxima potencia real transferida* de una línea sin imponer una demanda de potencia reactiva sustancial sobre los extremos emisor y receptor.

La reactancia de dispersión del transformador de excitación de un UPFC tiene un impacto notable sobre el diagrama de potencia de los extremos emisor y receptor de la línea. La localización del UPFC puede impactar notablemente la demanda de potencia reactiva para varios niveles de potencia real transferida.

REFERENCIAS

- [1] Gyugyi L., "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", *IEE Proceedings-C*, 1992, Vol. 139, No. 4, July 1992, pp. 323-333.
- [2] C.R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "The Unified Power Flow Controller: A Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Studies", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 144, No.5, September 1997.
- [3] Gyugyi L., Schauder C.D., Williams S.L. Rietman T.R., Torgerson D.R. and Edris A.: "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, April 1995, pp. 1085-1097.
- [4] Wang H.F., "Applications of Damping Torque Analysis to StatCom Control", *Electrical Power and Energy Systems*, 22 (2000), pp. 197-204.
- [5] E. Larsen, N. Miller, S. Nilsson, and Lindgren, "Benefits of GTO-based Compensation Systems for Electric Utility Applications", *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, pp. 2056-2062, October 1992.
- [6] Gyugyi L., Schauder C.D., and Sen K. K., "Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines", *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, pp. 406-417, January 1997.
- [7] Rashid Muhammad H., *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 2ª edición, Editorial Prentice-Hall, 1993.
- [8] Mihalic R, Zunko P. and Pouh D., "Improvement of Transient Stability using Unified Power Flow Controller", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January 1996.
- [9] Nabavi-Niaki S.A.: Modelling and Applications of Unified Power Flow Controller for Power Systems, Ph.D. Thesis, University of Toronto, 1996.
- [10] Nabavi-Niaki A. and Iravani M.R.: "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", Presented at IEEE/PES Winter Meeting 96 WM 257-6 PWRS, January 21-25, 1996, Baltimore, MD.
- [11] N. G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", *IEEE Press*, 1999.
- [12] Limyingcharoen S., Annakkage U. D., Pahalawaththa N.C., "Effects of Unified Power Flow Controllers on transients stability", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 145, No. 2, March 1998.
- [13] Fang Wanliang "Coordinated Power Control of UPFC and its Application for Enhancing Dynamic Power System Performance", Ph. D. Thesis, The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [14] L.L. Lai and J.T. Ma, "Genetic Algorithm-Based Power Flow Control with Unified Power Flow Controller", the proceedings of the 3th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management, IEE, Hong Kong, November 1995, pp. 295-299.
- [15] Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin, Zhao He, Zhang Wentao, "Steady State Analysis and Load Flow Calculation of Unified Power Flow Controller in Power System", ICPST '94, October 18-21, Beijing, China, pp. 944-948.
- [16] Yu Jilai and Liu Zhuo, "GPFC Model Based Line Power Flow Control of Power System", *Power System Technology*, P.R. China, Vol. 20, No. 4, April, 1995, pp. 19-26.

- [17] C.R. Fuerte-Esquivel and E. Acha, "A Newton-Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, November 1997, pp. 1474-1480.
- [18] C.R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "Newton-Raphson Algorithm for the reliable Solution of large Power Networks with Embedded FACTS Devices", *IEE, Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol 143, No. 5, September, 1996.
- [19] H. Ambriz-Perez, E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel and A. De La Torre, "Incorporation of a UPFC Model in an Optimal Power Flow Using Newton's Method", *IEE proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol.145, No.3, May 1998, pp. 336-344.
- [20] Y.L.Tan, "Analysis of series and shunt line compensation by a Unified Power Flow Controller", *IEEE Power Engineering Review*, September, 1999, pp. 63-64.