



## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

##### 4.4.1 – Introducción

Es un controlador universal, el cual es capaz de controlar simultáneamente el flujo de potencia, activa y reactiva, de una línea de transmisión y la tensión C.A de una barra.

El UPFC es un dispositivo que realiza funciones de compensación, dentro de la nueva concepción de sistemas FACTS, ofreciendo alternativas para el control de sistemas de potencia hasta ahora imposibles de ser realizadas con el uso de equipos tradicionales.

Esto hace que el UPFC sea el más versátil de los dispositivos FACTS.

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

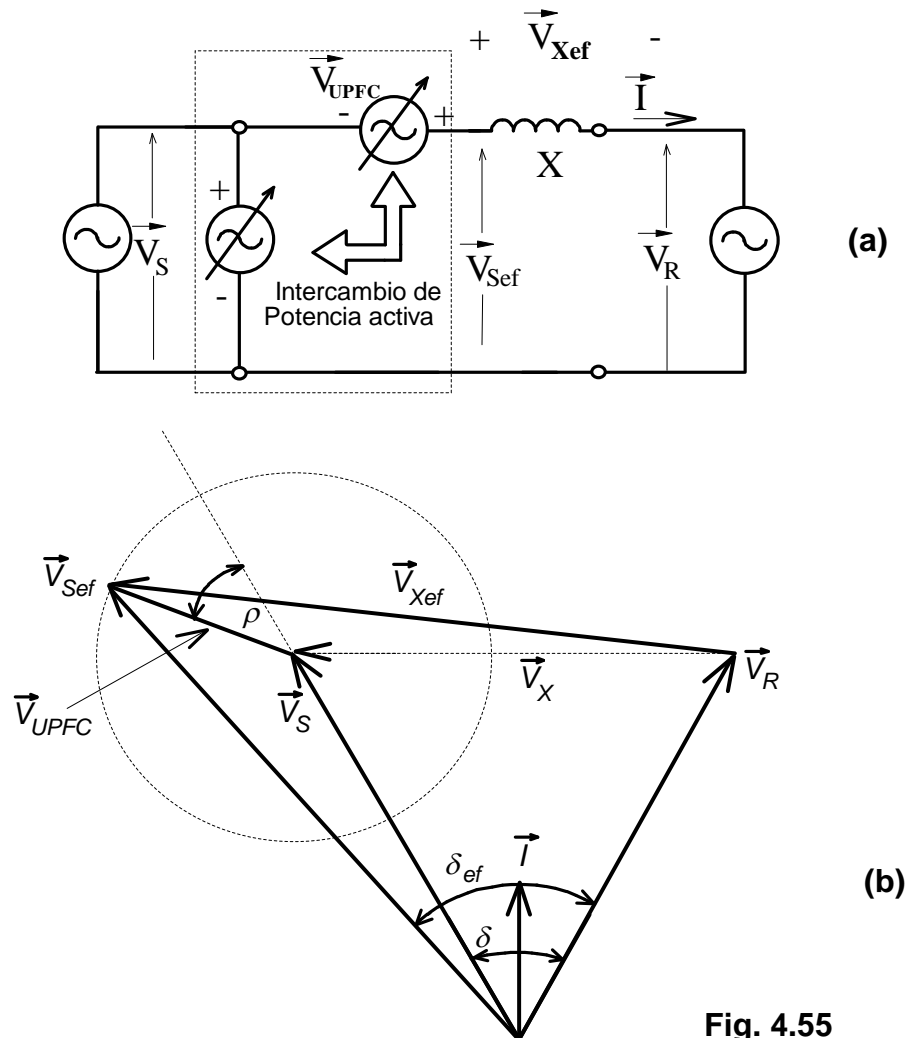


Fig. 4.55

#### 4.4.2 – Principio de Funcionamiento

Para entender las capacidades del UPFC, se considera el esquema de compensación generalizado mostrado por la Fig. 4.55(a).

Asumiendo que la tensión inyectada en serie ( $\vec{V}_{UPFC}$ ) con la línea puede ser controlada sin restricciones, es decir el ángulo de fase de la tensión,  $\rho$ , puede ser escogido independientemente del de la corriente de línea entre 0 y  $2\pi$ , y su magnitud es variable entre cero y un valor máximo definido ( $\vec{V}_{UPFCmax}$ ).

Esto implica que la tensión  $\vec{V}_{UPFC}$  generalmente intercambie tanto potencia activa como reactiva con la línea de transmisión.

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

Como fue explicado en secciones anteriores tanto el STATCOM como el SSSC pueden internamente generar o absorber potencia reactiva, pero la potencia activa a ser intercambiada con la línea debe ser suministrada o absorbida desde sus lados CC, cosa que con estos compensadores no es posible debido a que en su lado CC no tiene quien suministre esta potencia activa. Para el UPFC no es problema debido al enlace o acoplamiento que hay entre las fuentes variables.

No obstante esto, se visualiza de la Fig. 4.29(a) que al final la fuente que entrega la energía por definición es el generador del extremo emisor, de esta forma es razonable pensar que toda la potencia activa que se intercambia con la línea de transmisión en el UPFC, para tener un flujo de potencia deseado, proviene del generador. Esta estipulación es indicada simbólicamente en la figura mostrando un “acoplamiento” bidireccional de flujo de potencia activa entre el extremo emisor y el UPFC.

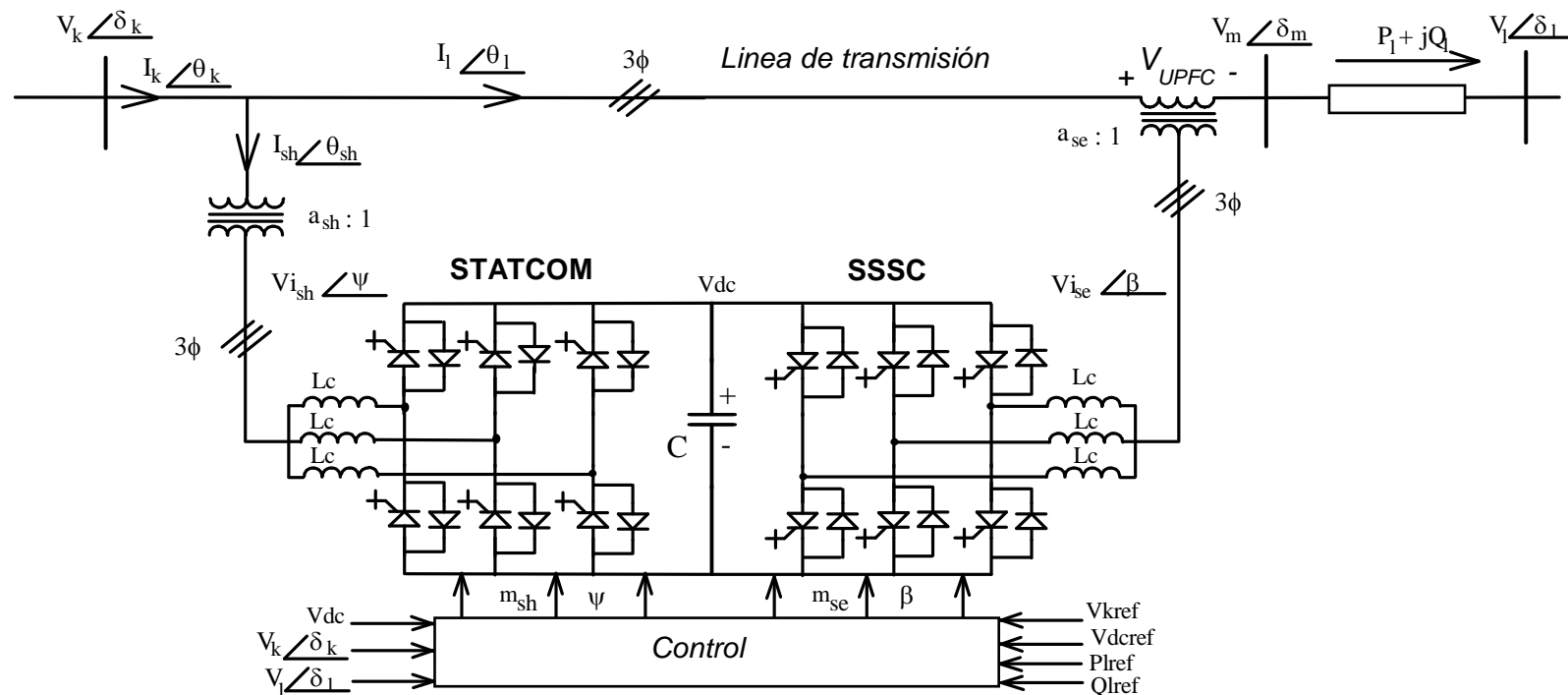
## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

Una posible implementación práctica de este acoplamiento es un arreglo “Back to Back” entre los controladores STATCOM y el SSSC, como muestra la Fig. 4.56, en el cual el STATCOM suministra la potencia activa (desde la barra de generación) y el SSSC la intercambia con la línea.

Este arreglo de controladores de flujo de potencia es autosuficiente para generar la tensión serie ( $V_{UPFC}$ ) no restringidas y conceptualizadas en la Fig. 4.55.



**Fig. 4.56**

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

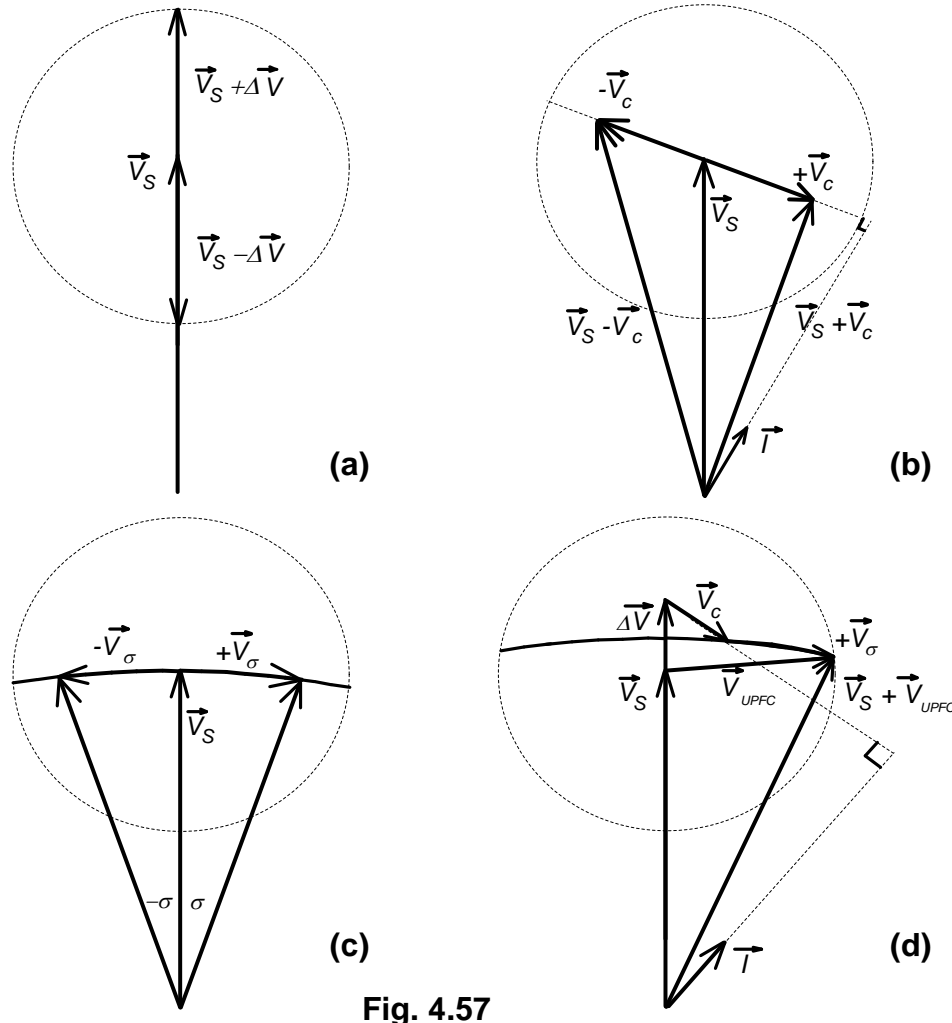


Fig. 4.57

#### 4.4.3 - Funciones del UPFC

Desde el punto de vista de transmisión de potencia, el UPFC puede proveer múltiples funciones de control.

Adicionando un fasor de tensión  $V_{UPFC}$  con una magnitud apropiada  $V$ , y un ángulo de fase,  $\rho$ , respecto del fasor  $V_S$ .

Como muestra la Fig. 4.57, con la elección apropiada del fasor  $V_{UPFC}$ , las tres funciones básicas de control de flujo y sus combinaciones pueden ser efectuadas:

a) **Regulación de la tensión terminal**, similar a lo obtenible con un transformador en derivación que tiene infinitas derivaciones (taps), esto es mostrado por la Fig. 4.57a donde  $V_{UPFC} = \pm \Delta V$  es adicionado en fase (ó antifase) con  $V_S$ .

b) **Compensación serie reactiva**, mostrada en la Fig. 4.57b, donde  $V_{UPFC} = \pm V_c$  es adicionado en cuadratura con la corriente de línea  $I$ .

c) **Desplazamiento de fase (regulación del ángulo de transmisión)**, mostrado en la Fig. 4.57c, donde  $V_{UPFC} = \pm V_\sigma$ , es adicionado con una relación angular respecto  $V_S$  que logra el deseado desplazamiento de fase ( $\sigma$ , en adelante o atraso) sin ningún tipo de cambio en magnitud.

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

d) **Control de flujo de potencia multifunción**, obtenida a través de una ejecución simultánea de regulación de tensión de terminal, compensación reactiva serie y regulación del ángulo de desplazamiento, tal como se muestra en la Fig. 4.57d donde:  $V_{UPFC} = \Delta V + V_{\sigma} + V_c$ .

La capacidad funcional es ilustrada por la Fig. 4.58, donde se muestra el rango de control para la potencia transmitida  $P$  v/s  $\delta$ , además muestra como el UPFC (de 0,5 p.u Mva de rango) es operado para emular a un inductor o condensador serie ( $V_{UPFC} = V_c$ ), a un desfasador ( $V_{UPFC} = V_{\sigma}$ ) y a un controlador multifunción ( $V_{UPFC}$ ) maximizando el rango de control para  $P$ .

Esta figura también da una comparación de la efectividad relativa para el flujo de potencia entre el UPFC y sus contrapartes controladores de flujo de potencia convencionales, el desfasador y el compensador reactivo serie (TCSC).

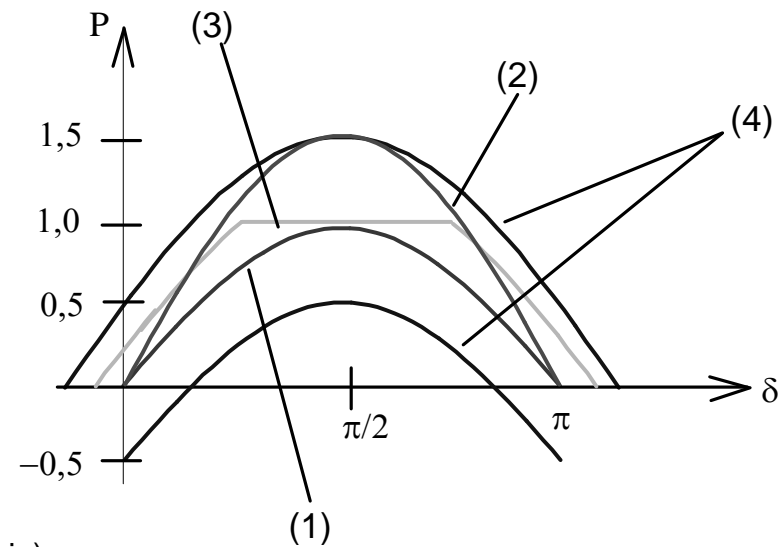
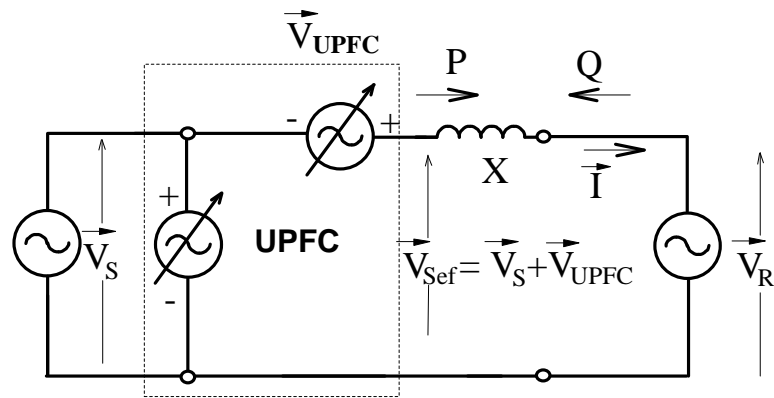
Debido a la inherente capacidad de control bidimensional (manifestado por la independencia para controlar tanto magnitud como ángulo de fase de la tensión adicionada), implica que el UPFC es capaz de controlar directamente tanto el flujo de potencia activa o así como flujo de potencia reactiva en la línea.

Resumiendo, **el UPFC simplemente controla la magnitud y fase de la tensión inyectada, del lado SSSC, forzando la magnitud y el ángulo de la corriente de línea en relación a la tensión seleccionada (ej. Extremo receptor), a valores con lo cual establece el flujo de potencia activa y reactiva en la línea de transmisión.**

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado



- (1) No compensado (rojo)
- (2) TCSC (magenta) (0-50%)
- (3) Desfasador (verde) (+/- 30°)
- (4) UPFC (azul) (0,5 pu) mostrando los limites superior e inferior.

**Fig. 4.58**

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

##### 4.4.4 - Análisis cualitativo del UPFC

De modo que sea entendida la capacidad de controlar tanto potencia activa como reactiva del UPFC se realiza el siguiente análisis; se obtiene la gráfica de la potencia reactiva  $Q$ , del extremo receptor sin compensar, en función de la potencia activa  $P$  para un sistema simple de dos máquinas con  $P$  y  $Q$  normalizados por  $V^2/X$ , potencia base, que es la potencia máxima transmitida.

Para un sistema no compensado,  $P$  y  $Q$  normalizados son:

$$Y, \quad P = \sin(\delta) \quad (4.65)$$

$$o, \quad -Q = (1 - \cos(\delta)) \quad (4.66)$$

$$1 + Q = \cos(\delta) \quad (4.67)$$

Con esto puede ser obtenido,  $Q = f(P)$ , siendo:

$$(Q+1)^2 + P^2 = 1 \quad (4.68)$$

La ecuación anterior muestra que  $Q = f(P)$  para el sistema no compensado describe un círculo con radio unitario, alrededor del centro definido por las coordenadas  $P_o=0$ ,  $Q_o=-1$ , mostrado por la línea llena azul en la Fig. 4.59.

Cada punto dado por las coordenadas  $P$  y  $Q$  sobre esta circunferencia corresponde a un ángulo de transmisión en particular, (ej. Las coordenadas  $P=0$ ,  $Q=0$  corresponden a  $\delta=0$ , las coordenadas  $P=1$ ,  $Q=-1$  corresponden a  $\delta=90$  etc.) el cual identifica el punto de compensación de partida del UPFC.



## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

Realizando de manera análoga el análisis para la potencia inyectada por el UPFC, definiendo primeramente la magnitud de la potencia aparente del UPFC, como:

$$|\overline{S}_{upfc}| = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \quad (4.69)$$

Normalizándola en función de la potencia aparente máxima del sistema, tiene que:

$$|\overline{S}_{upfc}| = \frac{V \cdot V_{upfc} / X}{V^2 / X} = \frac{V_{upfc}}{V} p.u \quad (4.70)$$

Entonces, se tiene que:

$$\begin{aligned} \overline{P}_{upfc} &= |\overline{S}_{upfc}| \cdot \sin(\rho) \\ y \\ \overline{Q}_{upfc} &= |\overline{S}_{upfc}| \cdot \cos(\rho) \end{aligned} \quad (4.71)$$

Elevando al cuadrado ambas expresiones y sumándolas se tiene:

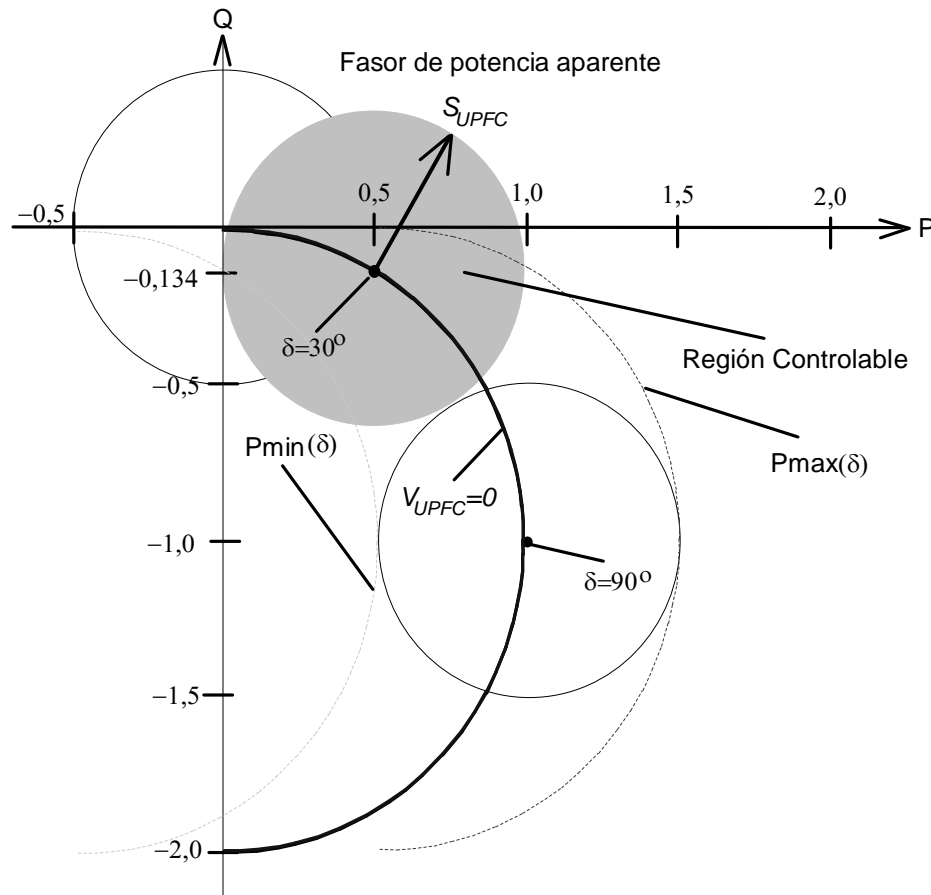
$$|\overline{P}_{upfc}|^2 + |\overline{Q}_{upfc}|^2 = |\overline{S}_{upfc}|^2 \quad (4.72)$$

La cual nos indica que es un círculo centrado en el punto de operación del sistema con radio,  $|\overline{S}_{upfc}|$  tal como muestra la fig. 4.59 donde se superponen las potencias del sistema y la del UPFC.

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado



**Fig. 4.59**

Asumiendo que el ángulo de transmisión  $\delta$  que prevalece en la Fig. 4.59 es de  $30^\circ$ . Entonces, la rotación completa ( $360^\circ$ ) del fasor de compensación  $V_{UPFC}$ , con magnitud máxima  $V_{UPFC}$  ( $S_{UPFC}=0.5\text{pu}$ ), describirá un círculo en el plano  $\{Q,P\}$ , en la figura mostrado sombreado, con radio de 0.5 alrededor de su centro definido por las coordenadas  $P_{30}=0.5$  y  $Q_{30}= -0.134$ , al cual caracteriza un sistema no compensado en  $\delta= 30^\circ$

El área dentro de este círculo define todos los valores  $P$  y  $Q$  obtenibles controlando magnitud y fase de  $V_{UPFC}$ . En otras palabras este círculo define el lugar geométrico de todos los valores de  $P$  y  $Q$  de transmisión alcanzables con el rango dado del UPFC para el sistema de potencia considerado.

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

##### 4.4.5 - Control del UPFC

Tal como muestra la Fig. 4.60 el UPFC puede ser visualizado como un STATCOM y un SSSC compartiendo el mismo lado CC. Por lo tanto el correspondiente modelo debe reflejar esto como muestra la Fig. 4.35.

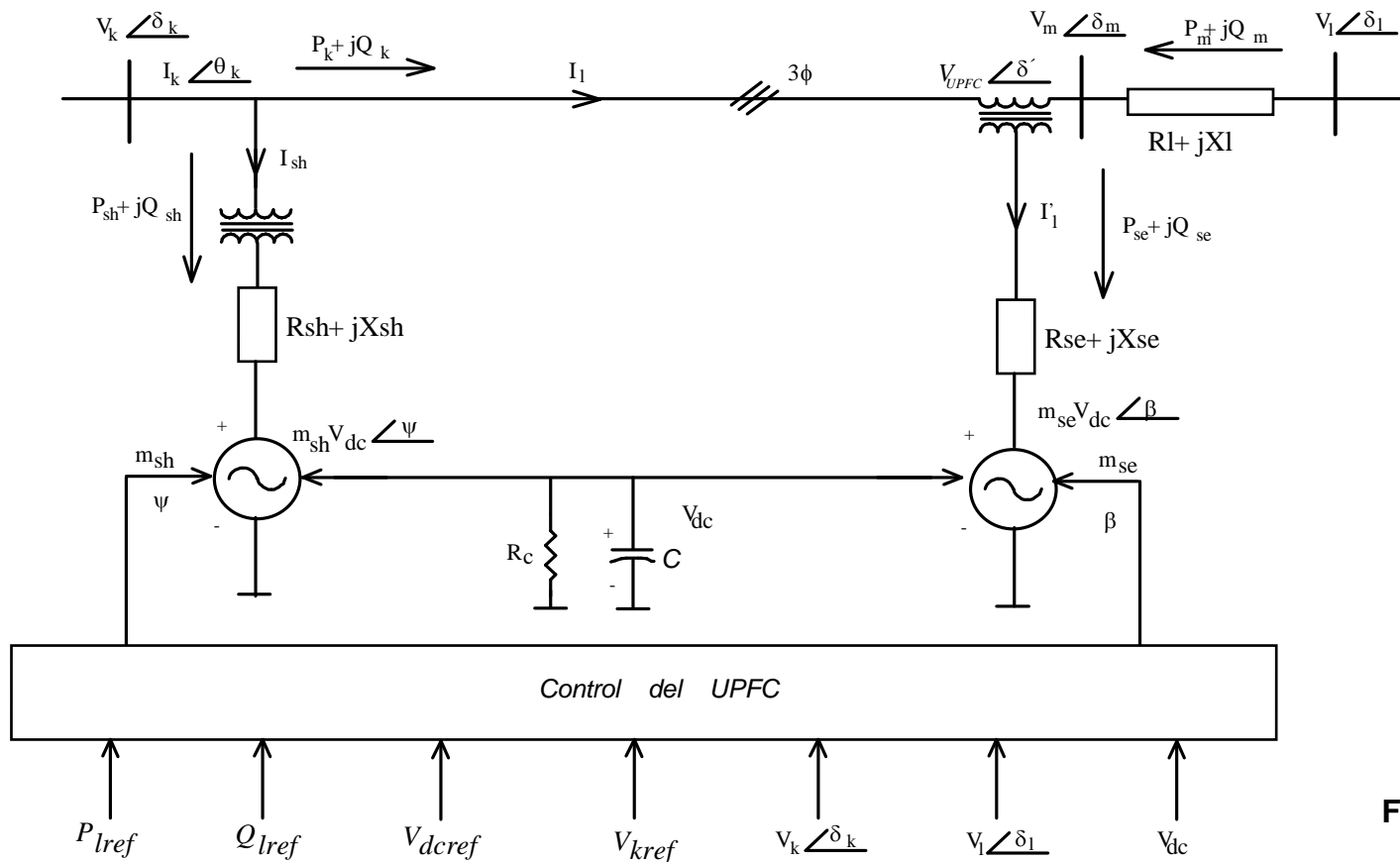
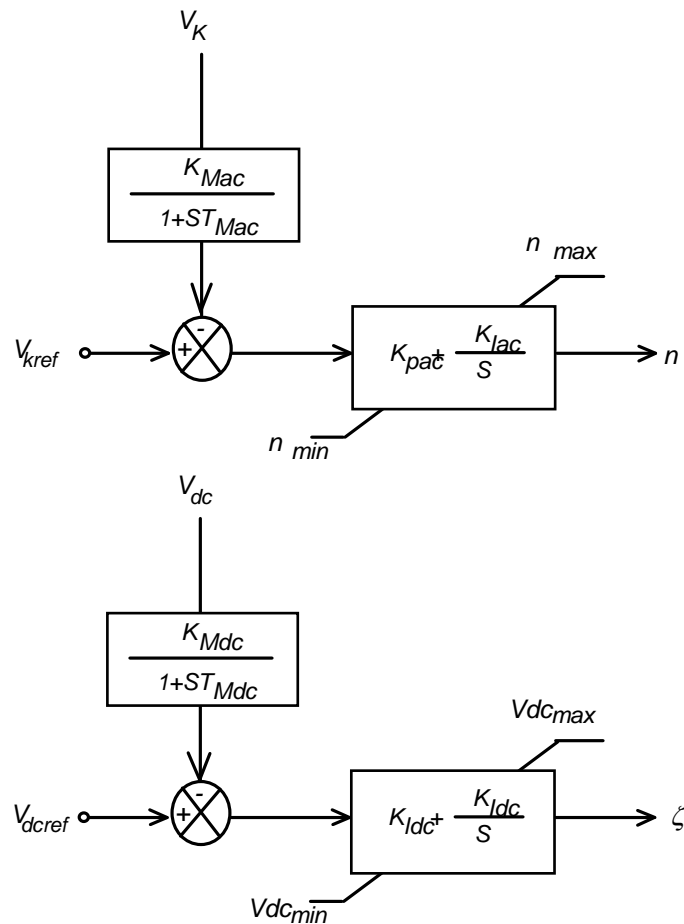


Fig. 4.60

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado



Los diagramas de los bloques compensadores para el UPFC son mostrados por la Fig. 4.61 y la Fig. 4.62 donde el controlador establecido para la parte shunt (STATCOM) es realizado de manera convencional, es decir con un control de dos lazos uno externo lento y uno interno rápido (Fig. 4.61).

En el caso del controlador serie, es realizado un control vectorial ( $P$ - $Q$ ) basado en una descomposición de ejes d-q para desacoplar las potencias activa y reactiva de los inversores. Sin embargo una estrategia de control de corriente convencional podría también ser usado.

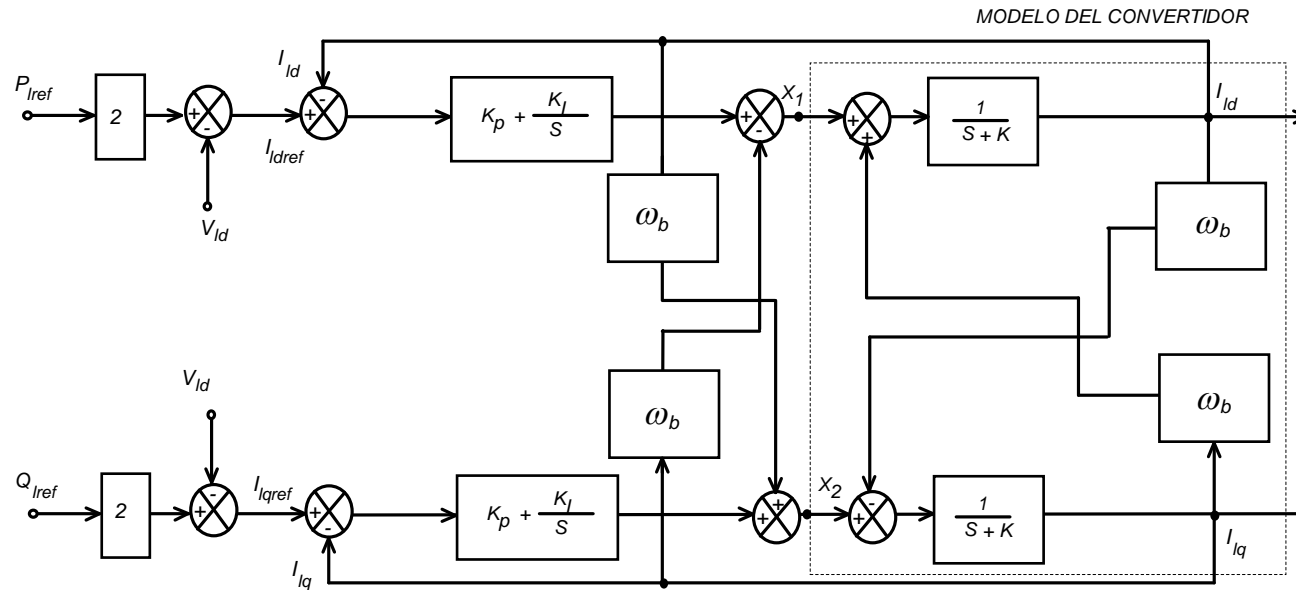
**Fig. 4.61**

## Capítulo 4

### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.4 – Controlador de Flujo de Potencia Unificado

El control básico de la rama serie del UPFC es en relación a la tensión de la barra 'l', donde todas las variables están dadas en pu, y  $\omega_b$  es la frecuencia fundamental del sistema dado en rad./seg. Las variables  $x_1$  y  $x_2$  de los PI son usadas para calcular las componentes en los ejes d y q de las tensiones de salida del STATCOM.



Donde:

$$K = \frac{R_T \cdot \omega_B}{X_T}$$

$$R_T = R_l + R_{se}$$

$$X_T = X_l + X_{se}$$

$$V_{ld} = \sqrt{2} \cdot V_l$$

$$V_{kd} = \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(\delta_l - \delta_k)$$

$$V_{kq} = \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \sin(\delta_l - \delta_k)$$

$$V_{sed} = V_{kd} - V_{ld} - \frac{X_T}{\omega_B} \cdot x_1$$

$$V_{seq} = V_{kq} - V_{lq} - \frac{X_T}{\omega_B} \cdot x_2$$

$$V_{se} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_{sed}^2 - V_{seq}^2}$$

$$m_{se} = \frac{V_{se}}{V_{dc}}$$

$$\beta = \delta_l - \tan^{-1} \left( \frac{V_{seq}}{V_{sed}} \right)$$

Fig. 4.62