



Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.1 - Funciones de la electrónica de potencia en los sistemas **FACTS**

Las funciones básicas que cumplen los convertidores estáticos en el área de dispositivos **FACTS** son las siguientes:

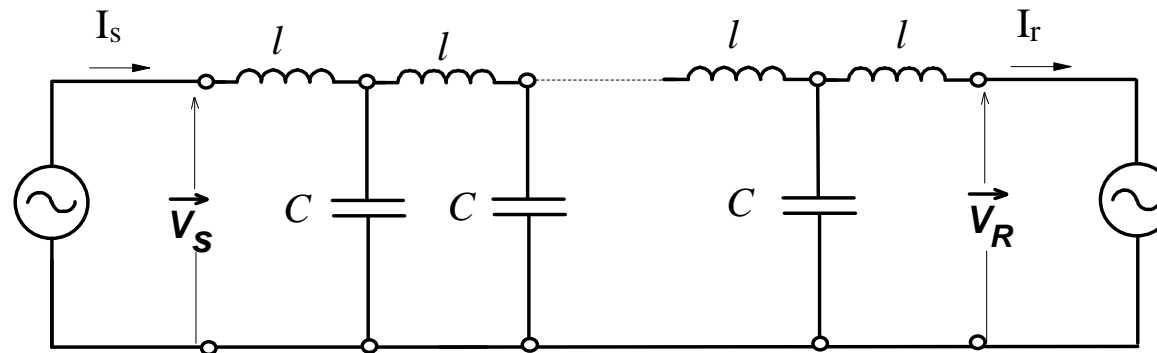
- ☐ Controlar la impedancia aplicada a un circuito: En este caso es evidente que todos los dispositivos **FACTS** basados en esta función son constituidos por reguladores (o graduadores) de tensión CA. Los reactores controlados por tiristor (TCR) y los condensadores conmutados por tiristor (TSC), son la base de estos controladores.
- ☐ Producir fuentes de tensión o de corrientes artificiales: Los convertidores para esta aplicación son, los convertidores CC-CA fuente de tensión, principalmente, o fuente de corriente y son usados en compensadores síncronos estáticos (STATCOM), así como en compensadores series síncronos (SSSC), etc.
- ☐ Convertir potencia de una forma a otra, ya sea CA en CC ó CC en CA : Este proceso es usado en transmisión de corriente continua alta tensión (HVDC) y en dispositivos que inyectan potencia real dentro de un sistema CA, como son los controladores de flujo de potencia unificados (UPFC) o los controladores de flujo de potencia interlinea (IPFC).

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Los sistemas de transmisión en corriente alterna actuales por lo general son de naturaleza compleja por la cantidad de generadores y cargas interconectadas, sin embargo se pueden obtener las expresiones que lo rigen a través de modelos simples, el modelo más simple es el modelo denominado de dos máquinas en el cual un generador en el extremo emisor es interconectado por una línea de transmisión con otro generador en el extremo receptor. Los dos generadores en los extremos pueden ser representados en el modelo por dos sistemas CA independientes que intercambian energía por intermedio del enlace de transmisión. La figura muestra el modelo básico.



Donde l es la inductancia de línea y C la capacitancia de línea, por unidad de longitud

Fig. 2.1

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

Donde la potencia eléctrica transmisible por el sistema es definida:

$$P = \frac{V_S \cdot V_R}{Z_o \cdot \sin \theta} \cdot \sin \delta \quad (2.1)$$

Donde:

V_S es la tensión eficaz del extremo emisor V_S

V_R es la tensión eficaz del extremo receptor V_R

δ es el ángulo de fase entre V_S y V_R conocido como ángulo de transmisión ó ángulo de carga

Z_o es la impedancia característica de la línea definida por:

$$Z_o = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (2.2)$$

θ es el ángulo eléctrico de la línea expresado, en radianes, por:

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot a = \beta \cdot a \quad (2.3)$$

Además, λ es la longitud de onda, 'a' es la longitud de la línea y β es el numero completo de ondas por longitud de línea, es decir:

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \frac{\omega}{\omega_0} = \omega \cdot \sqrt{l \cdot c} = 2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{l \cdot c} \quad (2.4)$$

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

La ecuación (2.1) provee una expresión generalizada caracterizando la potencia transmitida sin pérdidas. Para una mejor explicación de una línea de transmisión, y para una introducción relevante del concepto **FACTS** es conveniente usar una forma aproximada, luego suponiendo una línea de transmisión eléctricamente corta se tiene:

$$\text{sen}\theta \approx \theta = \beta \cdot a = \omega \cdot a \cdot \sqrt{l \cdot c} \quad (2.5)$$

Ó la expresión toma la forma:

$$Z_o \cdot \theta = \omega \cdot a \cdot \sqrt{l \cdot c} \cdot \sqrt{\frac{l}{c}} = \omega \cdot l \cdot a = \omega \cdot L = X \quad (2.6)$$

Por tanto la expresión de potencia transmitida es dada por:

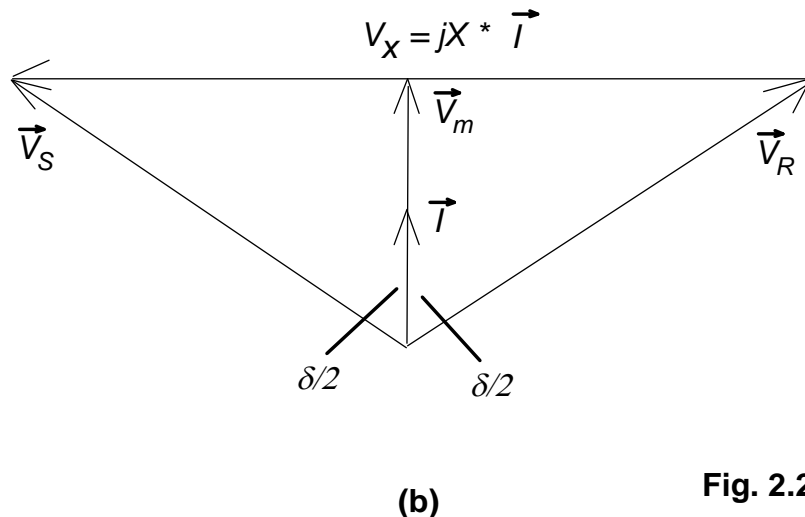
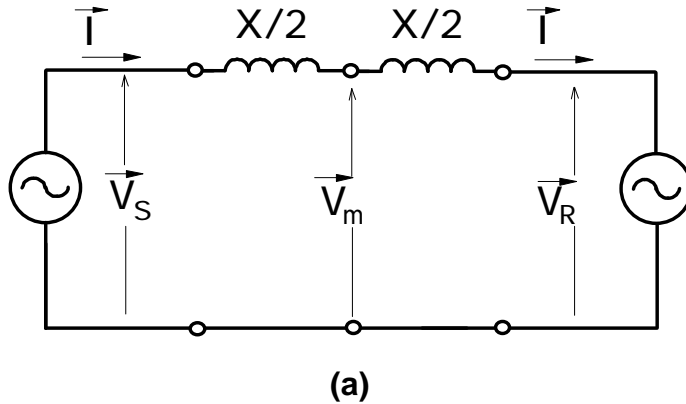
$$P \approx \frac{V_S \cdot V_R}{X} \cdot \text{sen}\delta \approx \frac{V^2}{X} \cdot \text{sen}\delta \quad (2.7)$$

Esta expresión desprecia la capacitancia paralela de la línea.

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS



Se considera nuevamente el modelo de dos máquinas solo que ahora simplificando la línea de transmisión.

La Fig. 2.2 muestra el modelo con su correspondiente diagrama Fasorial, teniendo como referencia el punto medio.

Se definen las tensiones de los extremos emisor (V_S) y receptor (V_R)

$$\vec{V}_S = V \cdot e^{j\delta/2} \quad (2.8)$$

y,

$$\vec{V}_R = V \cdot e^{-j\delta/2} \quad (2.9)$$

Definiéndose una tensión de media línea (V_m)

$$V_m = \frac{\vec{V}_S + \vec{V}_R}{2} = V \cdot \cos \delta/2 \quad (2.10)$$

La corriente de línea (I) es dada por:

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}_S - \vec{V}_R}{jX} = \frac{2 \cdot V}{X} \cdot \left(\frac{e^{j\delta/2} - e^{-j\delta/2}}{2j} \right) \quad (2.11)$$

O por Euler:

$$\vec{I} = \frac{2 \cdot V}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot e^{j0} \quad (2.12)$$

Fig. 2.2

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Como se ha asumido una línea sin pérdidas, la potencia activa ó real es la misma en ambos extremos, así como en su punto de línea media, es decir:

$$P = V_m \cdot I = V \cdot I \cdot \cos(\delta/2) = V \cdot \cos(\delta/2) \cdot \frac{2 \cdot V}{X} \cdot \sin(\delta/2) = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \cos(\delta/2) \cdot \sin(\delta/2) \quad (2.13)$$

También se sabe que : $\sin(\delta) = 2 \cdot \sin(\delta/2) \cdot \cos(\delta/2)$ Sustituyendo:

$$P = \frac{V^2}{X} \cdot \sin(\delta) \quad (2.14)$$

La cual es igual a la dada por (2.7).

La potencia reactiva generada en cada extremo de la línea respecto el punto medio es:

$$Q_S = -Q_R = I^2 \cdot \frac{X}{2} \quad (2.15)$$

Entonces:

$$Q_S = \left[\frac{2 \cdot V}{X} \cdot \sin(\delta/2) \right]^2 \cdot \frac{X}{2} = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \sin^2(\delta/2) \quad (2.16)$$

También se sabe que : $\sin(\delta/2) = \sqrt{\frac{1 - \cos \delta}{2}}$ Sustituyendo:

$$Q_S = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \frac{1 - \cos(\delta)}{2} = \frac{V^2}{X} \cdot (1 - \cos(\delta)) \quad (2.17)$$

O también desde (2.16), se tiene:

$$Q_S = V \cdot \frac{2 \cdot V}{X} \cdot \sin(\delta/2) \cdot \sin(\delta/2) = V \cdot I \cdot \sin(\delta/2) \quad (2.18)$$

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Las relaciones entre la potencia real P , potencia reactiva Q y el ángulo δ en la fuente emisora, son mostradas por la Fig. 2.3.

Como se observa, en tensión constante ($V_S = V_R = V$) y un sistema de transmisión fijo ($X = \text{Constante}$) la potencia transmitida es exclusivamente controlada por el ángulo δ .

Obsérvese que la potencia real P , no puede ser controlada sin cambiar la demanda de la potencia reactiva generada en ambos extremos.

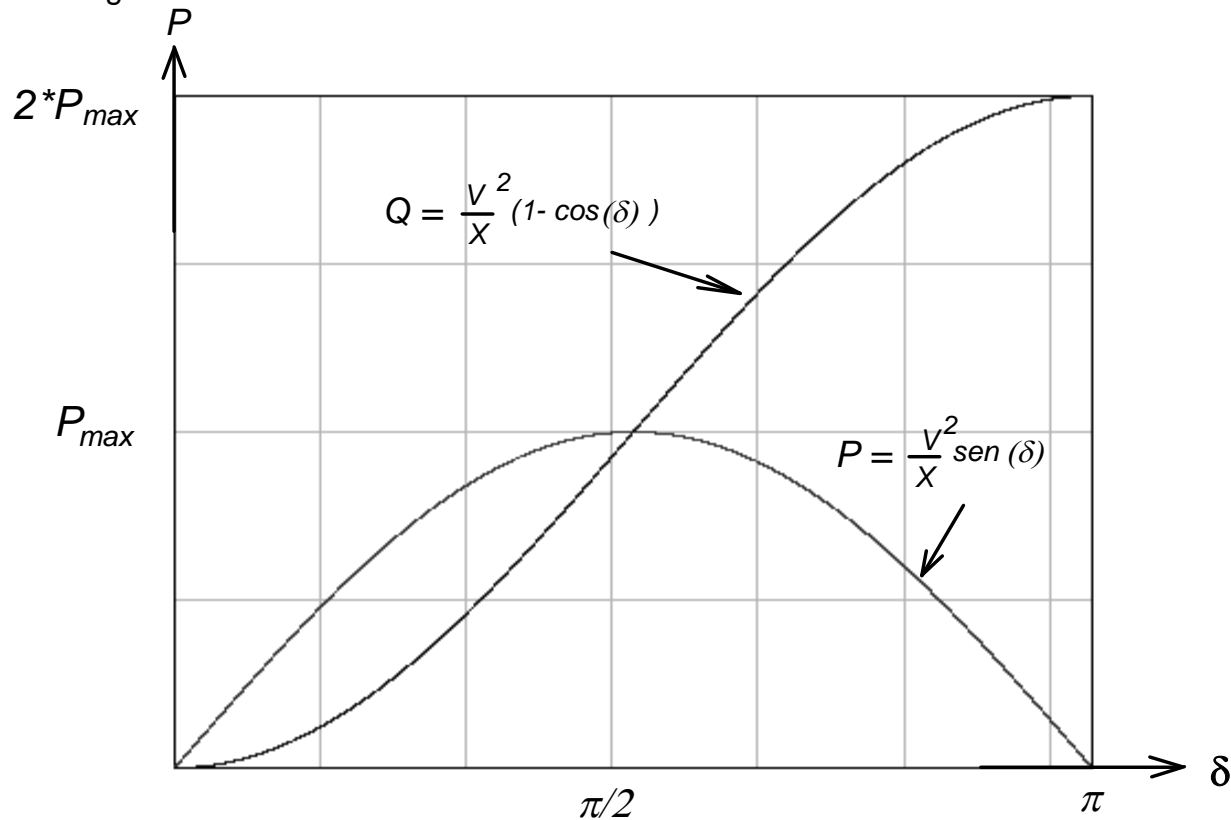
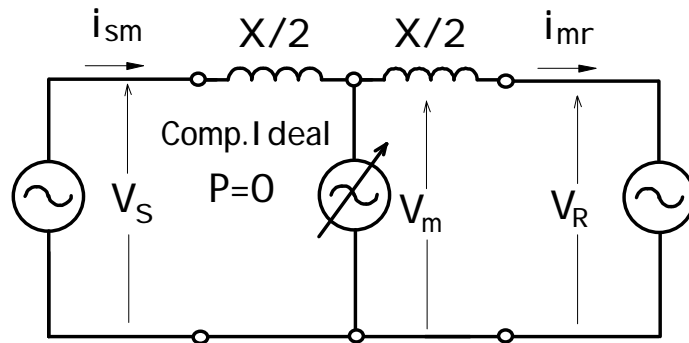


Fig. 2.3

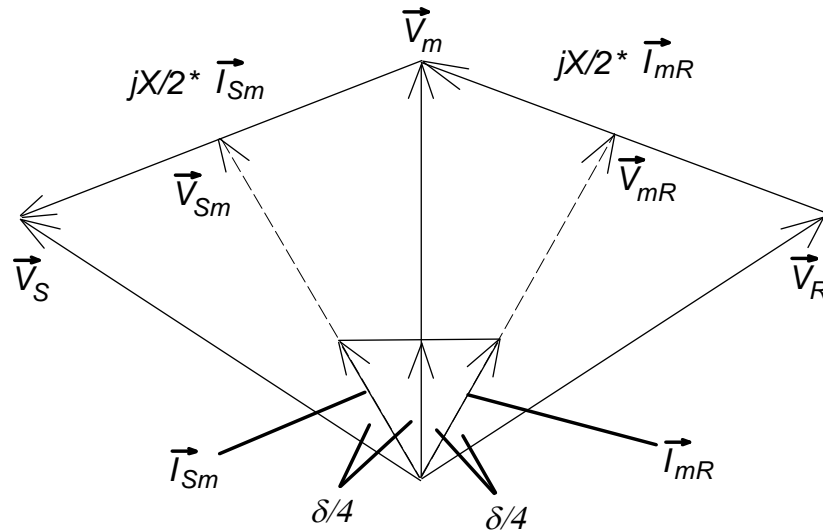
Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS



(a)



(b)

Fig. 2.4

Para un mejor entendimiento de los controladores **FACTS**, se definirán los principios de funcionamiento de estos dispositivos a través de modelos.

El modelo básico de representación son fuentes variables de tensión. Las relaciones básicas a ser presentadas sufren modificaciones cuando son considerados modelos completos de las líneas de transmisión, no en tanto el comportamiento cualitativo del sistema con los controladores **FACTS** se mantiene.

2.2.1 - Compensador ideal en derivación (shunt)

La Fig. 2.4a muestra un modelo ideal de un compensador en derivación conectado al punto medio de la línea CA.

Este compensador es representado por **una fuente de tensión sinusoidal CA (en la frecuencia fundamental), en fase con la tensión punto medio V_m** , que tiene la misma amplitud que V_S y V_R ($V_m = V_S = V_R = V$).

El compensador en el punto medio divide la línea en dos partes independientes con valor $X/2$ de reactancia inductiva, el primer segmento transfiere potencia de V_S al punto medio y el segundo segmento desde el punto medio a la carga, V_R .

Note que el compensador en derivación solo intercambia potencia reactiva con la línea de transmisión. Las relaciones entre tensiones y corrientes de cada segmento es mostrado fasorialmente en la Fig. 2.4b.

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

Para el sistema asumido sin pérdidas la potencia activa es la misma en cada extremo (fuente, punto medio, carga) de la línea, y ella puede fácilmente ser obtenida del diagrama fasorial de la Fig. 2.1b, si se tiene que:

$$V_{Sm} = V_{mR} = V \cdot \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.19)$$

$$I_{Sm} = I_{mR} = I = \frac{4 \cdot V}{X} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.20)$$

Luego la potencia transferida es:

$$P = V_{Sm} \cdot I_{Sm} = V_{mR} \cdot I_{mR} = V_m \cdot I_{Sm} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.21)$$

sustituyendo (2.19) y (2.20) en (2.21):

$$P = \frac{4 \cdot V^2}{X} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \cdot \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.22)$$

Pero se sabe por identidad trigonométrica que $\sin(\theta)\cos(\theta) = \sin(2\theta)/2$, luego:

$$P = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad V \cdot I \cdot \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) \quad (2.23)$$

similarmente:

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\left(\frac{\delta}{4}\right) = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right) \quad (2.24)$$

La relación entre potencia activa P, potencia reactiva Q, y ángulo δ para el caso de compensación shunt ideal es mostrado por la Fig. 2.5, observándose un significativo aumento de la potencia transmisible (doblando su valor máximo).

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

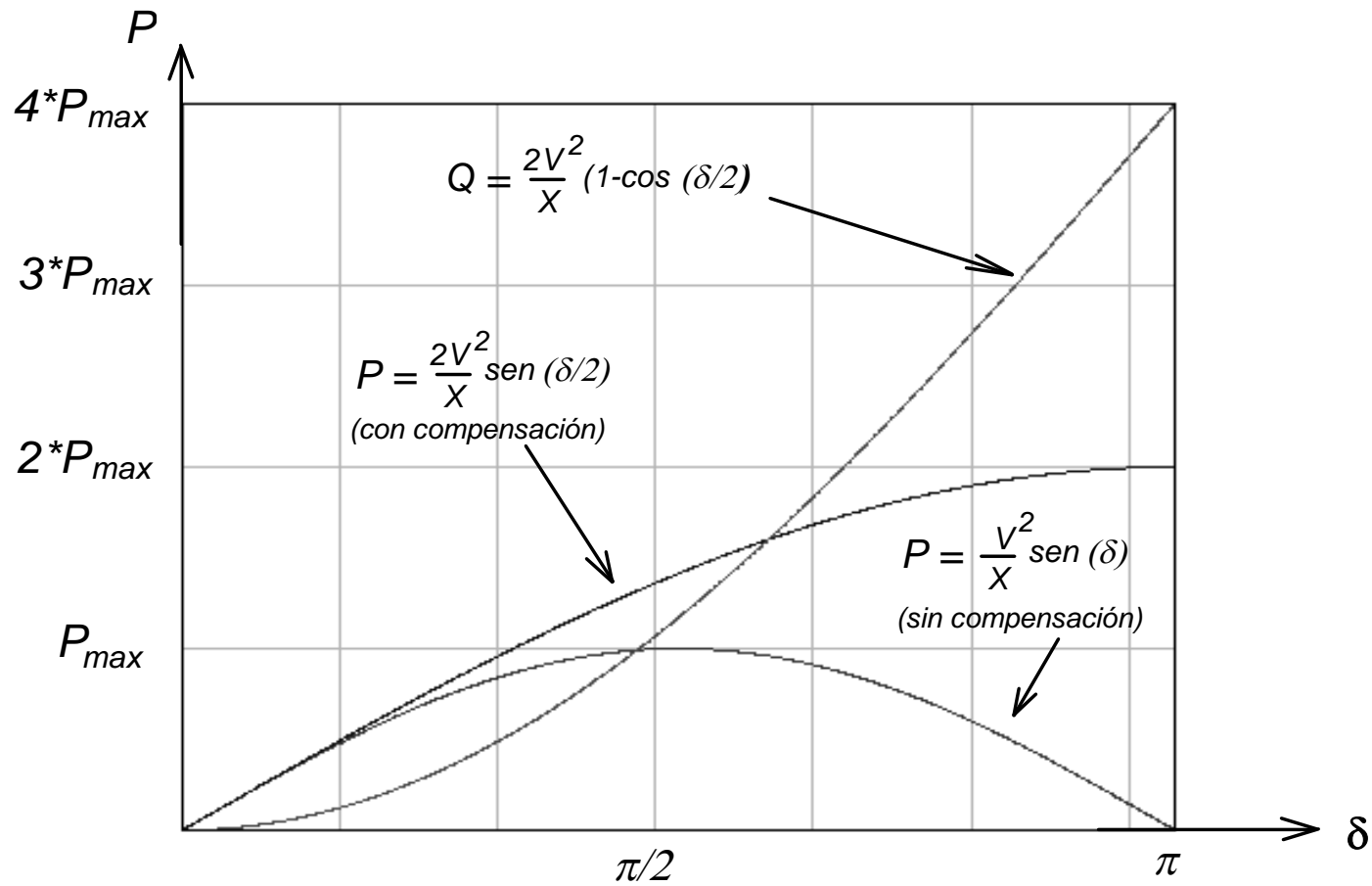


Fig. 2.5

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

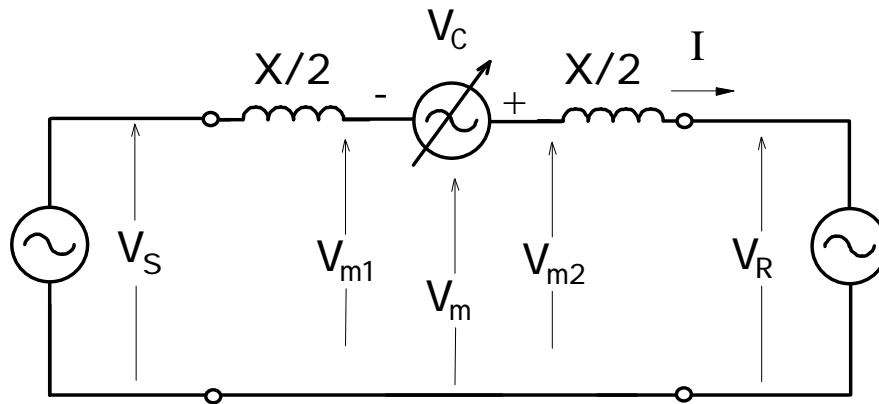


Fig. 2.6

2.2.2 - Compensador ideal en Serie

La idea básica detrás de la compensación serie es disminuir la impedancia de transmisión, es decir la impedancia vista desde el extremo fuente al extremo carga (dada por X).

La idea principal es de conectar un condensador compensador en serie de modo de cancelar una parte de la reactancia inductiva de línea actual y por lo tanto la impedancia de transmisión “efectiva” sea reducida como si la línea fuese físicamente cortada. También en orden de aumentar la corriente a través de la impedancia serie, la tensión sobre esta impedancia debe ser aumentada, de modo que la tensión final es decir la que cae sobre la reactancia equivalente sea menor (con esto aumenta la potencia transferida).

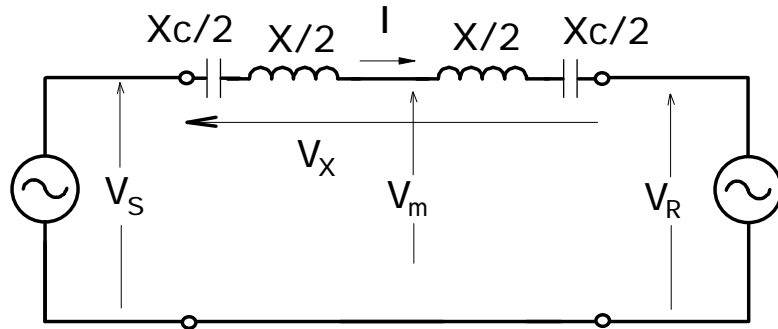
Esto puede ser realizado por un elemento de circuito conectado en serie (activo ó pasivo) que produzca una tensión opuesta a la tensión que prevalece en la reactancia de línea (V_S).

Idealmente una fuente controlada puede realizar esta función facilitando el control del flujo de potencia activa y reactiva (Fig. 2.6)

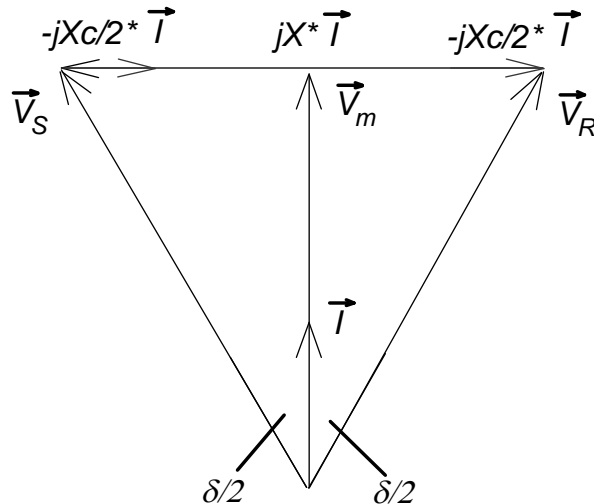
Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS



(a)



(b) Fig. 2.7

Si la tensión V_C está en cuadratura, y en atraso, en relación a la corriente de línea (I), el compensador serie no suministrará o absorberá potencia activa, es decir, la fuente V_C puede ser vista como una reactancia equivalente capacitiva (X_C). Para efecto de análisis esta es representada por un condensador y segmentada como $X_C/2$ en la Fig. 2.7a.

El correspondiente diagrama fasorial para este caso es observado en la Fig. 2.7b. Note que la magnitud de la caída de tensión total a través de la reactancia de línea, V_X , es disminuida por la magnitud del voltaje opuesto V_C (tensión sobre el condensador serie equivalente).

La impedancia de transmisión efectiva X_{ef} con la compensación serie es dada por:

$$X_{ef} = X - X_C \quad (2.25)$$

ó:

$$X_{ef} = (1 - k) \cdot X \quad (2.26)$$

donde k es la razón (o grado) de compensación serie, es decir:

$$k = \frac{X_C}{X} \quad 0 \leq k < 1 \quad (2.27)$$

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

La corriente a través de la línea es:

$$I = \frac{V_S - V_R}{jX_{ef}} = \frac{2 \cdot V}{(1-k) \cdot X} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.28)$$

y la potencia activa es:

$$P = V_m \cdot I = \frac{V^2}{(1-k) \cdot X} \cdot \sin \delta \quad (2.29)$$

La **potencia reactiva suministrada por el compensador serie** puede ser expresada por:

$$Q_C = I^2 \cdot X_C = \frac{4 \cdot V^2}{(1-k)^2 \cdot X^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot X_C = \frac{4 \cdot V^2}{(1-k)^2 \cdot X} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot k = \frac{2 \cdot V^2 \cdot k}{(1-k)^2 \cdot X} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (2.30)$$

La relación entre la potencia activa P , la potencia reactiva del compensador serie, Q_C con el ángulo δ es mostrada en la Fig. 2.8 tomando como parametro k .

Se observa que la potencia transmisible rápidamente aumenta con la variación de la razón de compensación, k .

Similarmente la potencia reactiva suministrada por el compensador serie también aumenta con k y varía con el ángulo δ de manera similar a la potencia reactiva de línea.

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

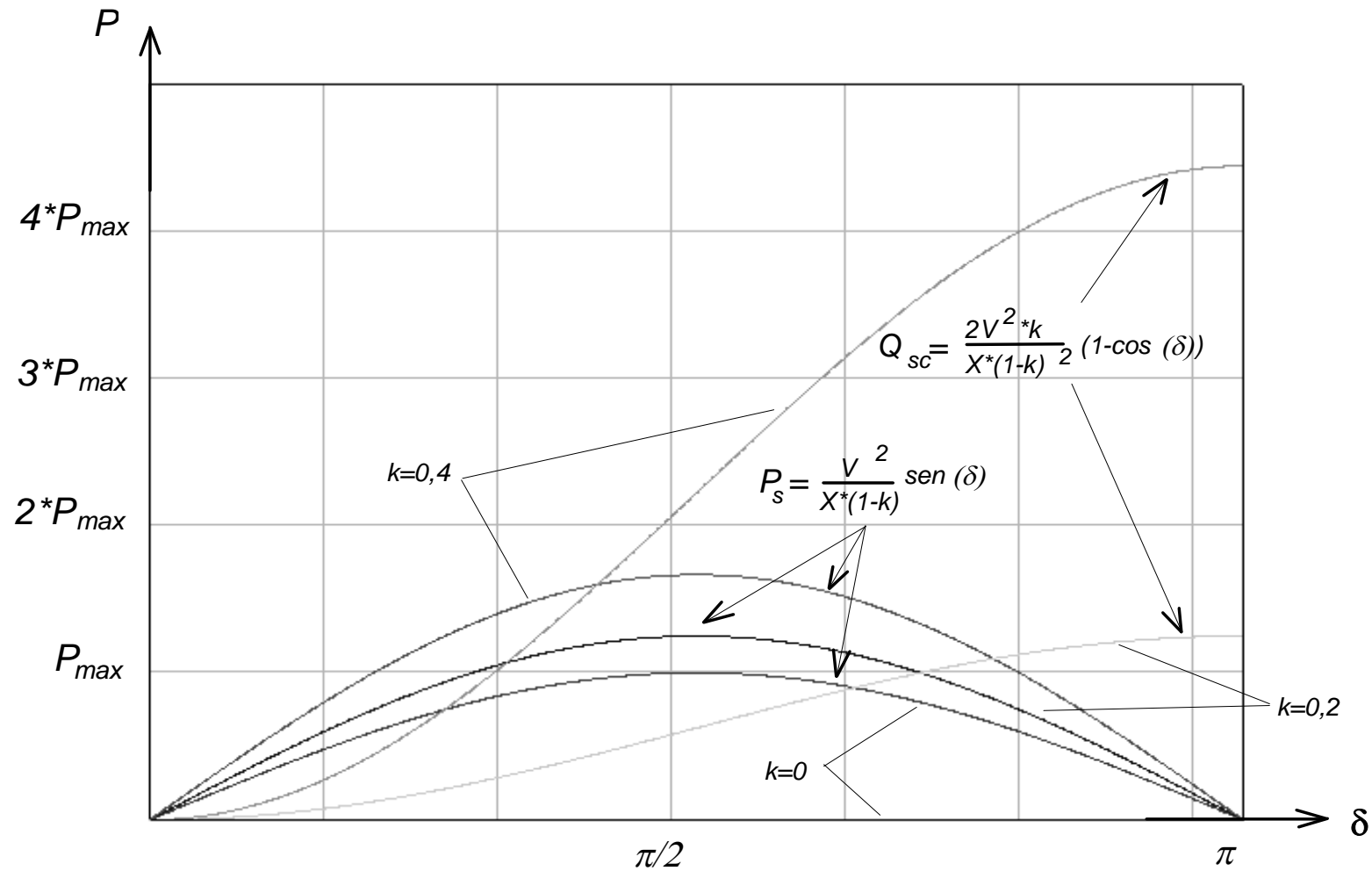


Fig. 2.8



Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

2.2.3 - Compensador de ángulo de fase

En los sistemas de potencia ocasionalmente sucede que el ángulo de transmisión (δ) requerido para el uso óptimo de una línea se vuelve incompatible con la propia operación del sistema.

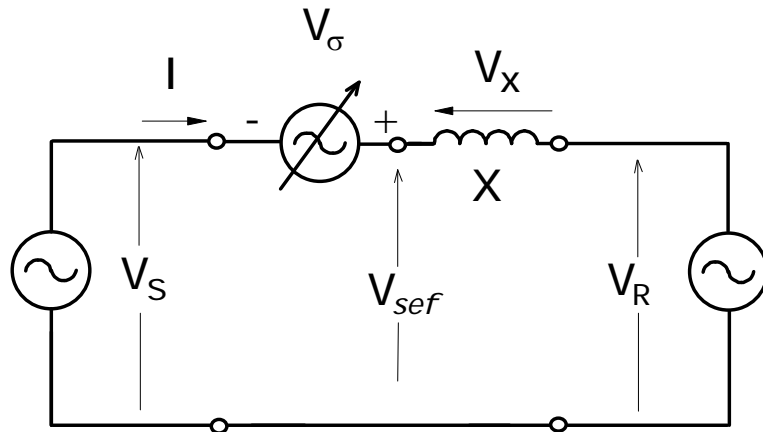
Tal caso ocurre, por ejemplo, cuando la potencia transmitida entre dos barras es transmitida sobre líneas paralelas de diferente longitud eléctrica o cuando dos barras son “interconectadas” cuya diferencia de ángulo resultante es insuficiente para establecer el flujo de potencia deseado.

En estos caso un ‘regulador de ángulo de fase’ ó desplazador de fase frecuentemente es utilizado.

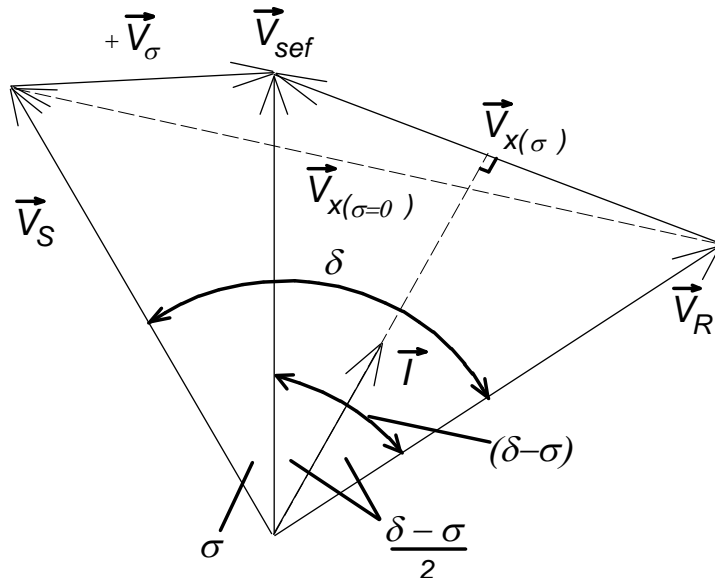
Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS



(a)



(b) Fig. 2.9

El concepto básico se explica nuevamente con la utilización de un sistema de dos máquinas en el cual un desplazador de fase es conectado entre la barra de generación y la línea de transmisión, ver Fig. 2.9a.

El desfasador puede ser considerado como una fuente de tensión CA (de frecuencia fundamental) con amplitud y ángulo de fase controlables.

En otras palabras, la tensión aplicada a la línea de transmisión y a la carga es:

$$\overrightarrow{V_{Sef}} = \overrightarrow{V_S} + \overrightarrow{V_\sigma} \quad (2.31)$$

Donde V_σ es la tensión suministrada por el desplazador de fase. El diagrama fasorial es mostrado por la Fig. 2.9b.

La idea básica de funcionamiento del desfasador es mantener en un nivel adecuado la potencia transferida, independiente del ángulo de transmisión δ , y en un rango de operación determinado.

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

Como ejemplo, la potencia puede ser mantenida en su valor máximo, aún para valores de $\delta > \pi/2$ controlando la amplitud de la tensión de cuadratura V_σ de modo que el ángulo efectivo $(\delta - \sigma)$ entre las tensiones de fuente y carga sea siempre $\pi/2$, ver Fig. 2.10.

De esta manera la potencia actual transmitida puede ser aumentada significativamente, aún cuando el desfasador por si solo no aumenta el límite de potencia transmitida en régimen permanente.

De la Fig. 2.6b se observa que el ángulo efectivo entre las tensiones V_{Sef} y V_R es $(\delta - \sigma)$, la potencia transmitida es expresada como:

$$P = \frac{V^2}{X} \cdot \text{sen}(\delta - \sigma) \quad (2.32)$$

La Fig. 2.10 muestra un ejemplo en que la potencia máxima es mantenida constante desde $\pi/2$ a $3\pi/2$ por un ángulo σ que varía de 0 a $\pi/4$. Nótese que la compensación comienza a ser hecha solamente en $\delta = \pi/2$ hasta $\delta = \pi/2 + \sigma$, es decir en $\pi/2$, σ comienza a variar desde 0 hasta $\pi/4$.

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

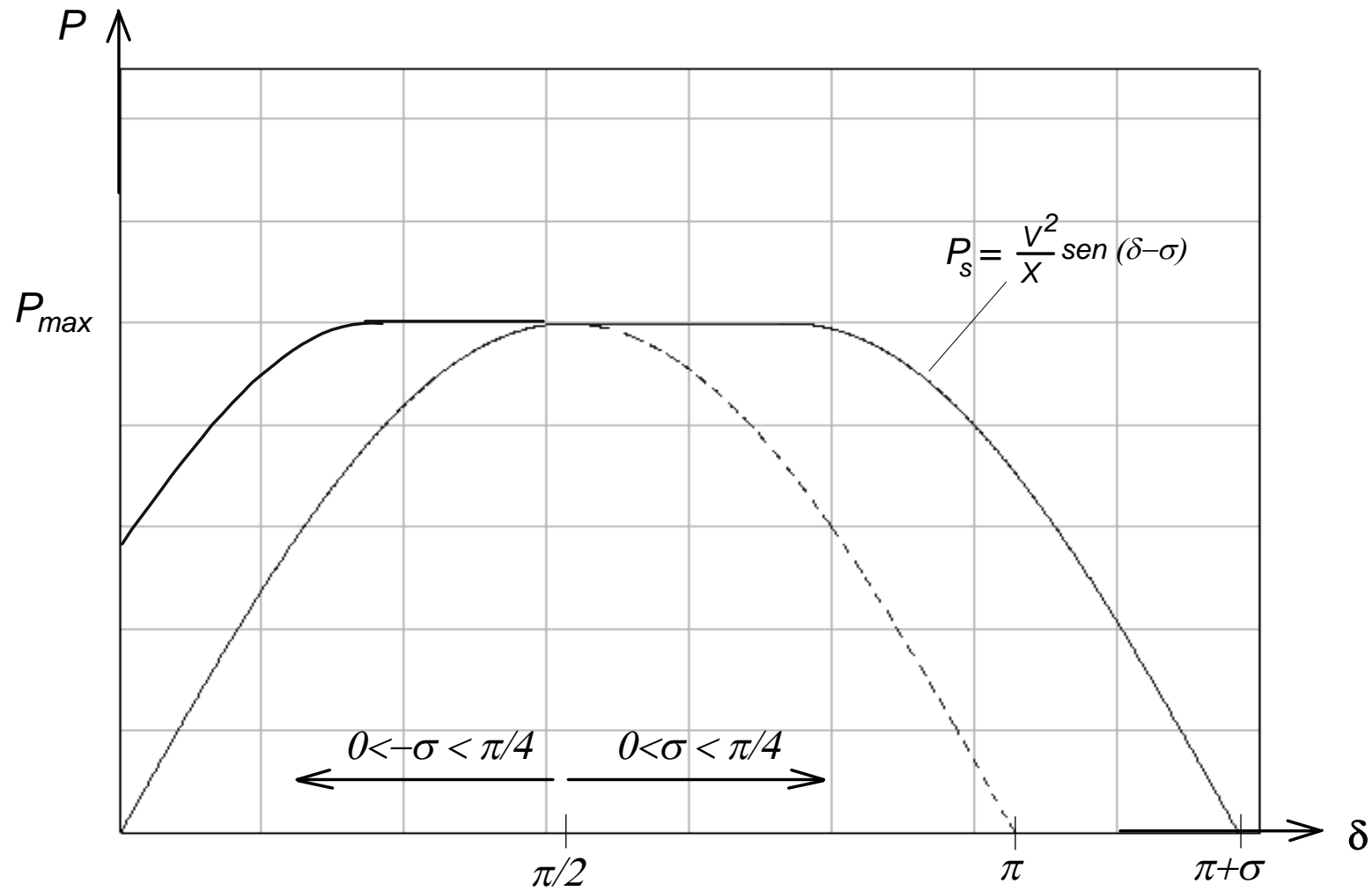


Fig. 2.10

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

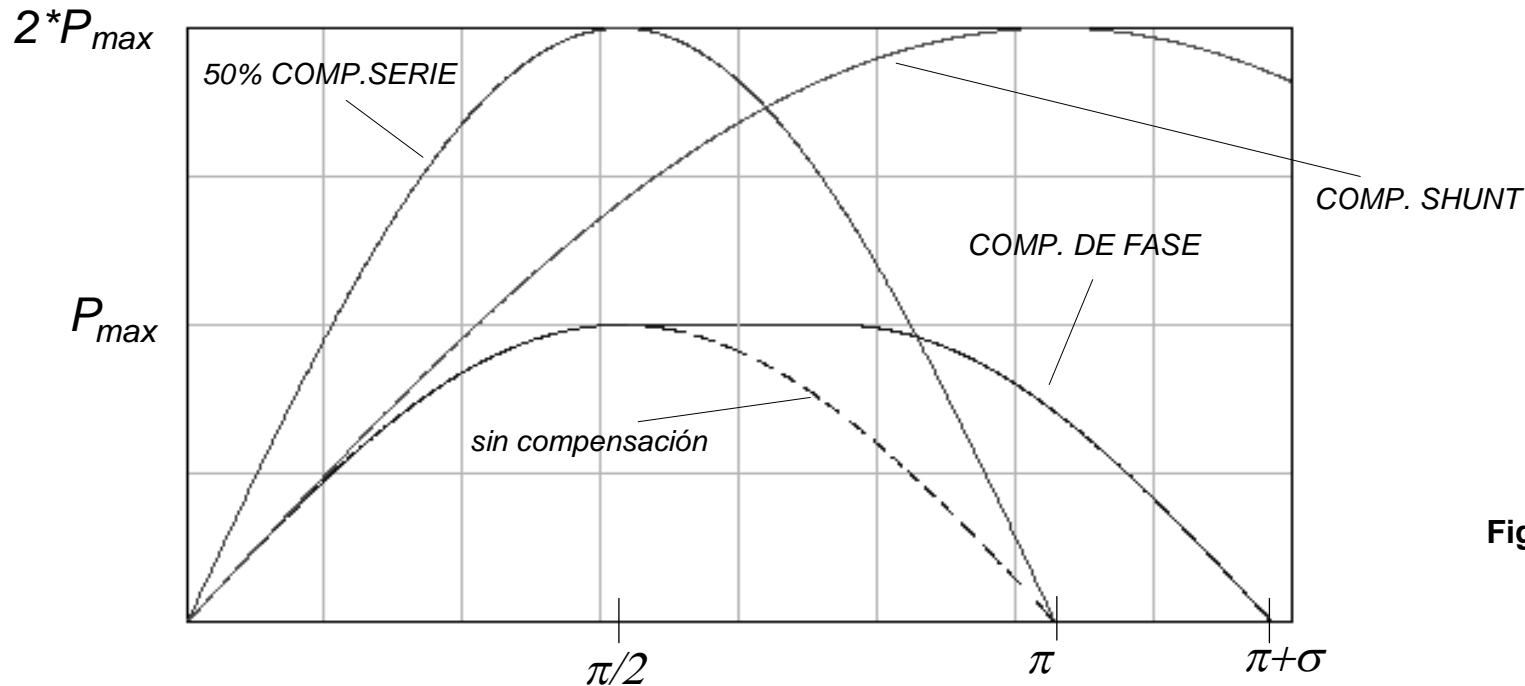


Fig. 2.11

La Fig. 2.11 muestra las características de transferencia de potencia activa para un sistema CA sin compensación y con compensaciones en derivación, serie y de ángulo de fase.

Para el caso del compensador de fase se considero que V_S , V_{sef} y V_R tienen la misma amplitud.

La Fig. 2.11 muestra que dependiendo del nivel de compensación, la compensación serie es la mejor elección cuando se desea aumentar la capacidad de transferencia de potencia para un determinado ángulo de carga.

El compensador de ángulo de fase es importante cuando se desea conectar dos sistemas distintos que posean un ángulo de transmisión grande o de difícil control.

El compensador en derivación (shunt) es la mejor opción para aumentar el margen de estabilidad dinámica.

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

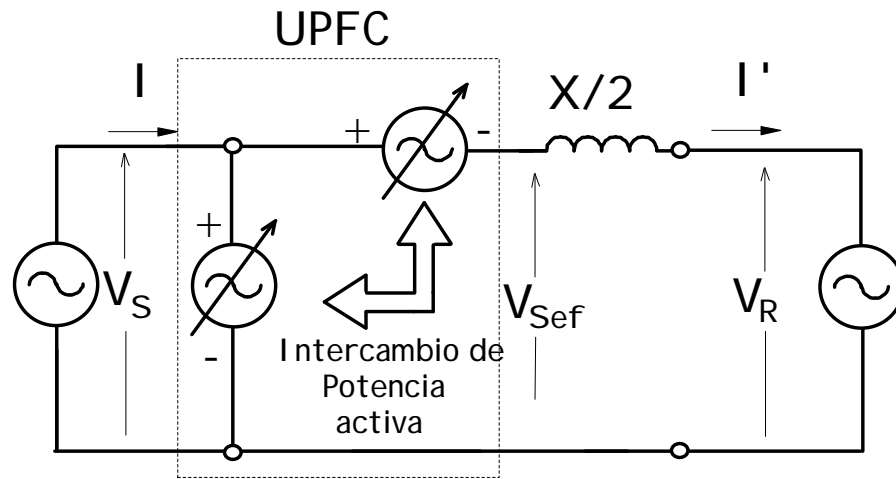


Fig. 2.12

2.2.4 - Controlador Universal de Flujo de Potencia (UPFC)

Una buena representación de este dispositivo es a través de la conexión simultánea de dos fuentes de tensión controladas (Fig. 2.12) una en serie y la otra en derivación (shunt).

Una de las principales ventajas de esta topología es que las dos fuentes pueden operar separadamente como dos compensadores distintos de potencia reactiva (serie-derivación) y compensando aún potencia activa.

Un caso interesante de observar pasa cuando una cantidad de potencia activa consumida (suministrada) por una de las fuentes (interna al UPFC) es igual a la potencia suministrada (consumida) por la otra (también interna).

El UPFC es un compensador genérico, donde los otros compensadores se pueden considerar que cumplen funciones particulares del UPFC.

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Para el calculo de la potencia aparente total entregada por la fuente nos basamos en el circuito equivalente mostrado por la Fig. 2.12, desde se tiene que la expresión de la corriente de la línea es dada por:

$$I = \frac{\vec{V}_S - \vec{V}_R + \vec{V}_{upfc}}{jX} \quad (2.33)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\vec{V}_S &= V \angle 0^\circ \\ \vec{V}_R &= V \angle -\delta^\circ \\ \vec{V}_{upfc} &= V \angle \rho^\circ\end{aligned}$$

Calculando la potencia aparente desde:

$$\vec{S}_S = \vec{V}_S \cdot \vec{I}^* = V \cdot \left(\frac{\vec{V}_S - \vec{V}_R}{jX} + \frac{\vec{V}_{upfc}}{jX} \right)^* \quad (2.34)$$

$$\vec{S}_S = V \cdot \underbrace{\left(\frac{\vec{V}_S - \vec{V}_R}{jX} \right)^*}_{\vec{S}_{NC}} + V \cdot \underbrace{\frac{\vec{V}_{upfc}}{jX}}_{\vec{S}_{upfc}}^* \quad (2.35)$$

Analizando la Potencia aparente del UPFC (S_{UPFC}), ya que la potencia aparente no compensada S_{NC} es conocida:

$$\vec{S}_{upfc} = V \cdot \frac{\vec{V}_{upfc}}{jX}^* \quad (2.36)$$

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

Donde:

$$\frac{\overrightarrow{V_{upfc}}}{jX} = \left| \frac{V_{upfc}}{X} \right| \angle \rho - 90^\circ \quad (2.37)$$

Luego, conjugando lo anterior:

$$\overrightarrow{S_{upfc}} = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \angle 90^\circ - \rho \quad (2.38)$$

Expandiendo en su forma cartesiana:

$$\overrightarrow{S_{upfc}} = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \cdot (\cos(90^\circ - \rho) + j \sen(90^\circ - \rho)) \quad (2.39)$$

Con: $\cos(90^\circ - \rho) = \sen(\rho)$ y

$$\sen(90^\circ - \rho) = \cos(\rho)$$

Entonces:

$$\overrightarrow{S_s} = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \cdot (\sen(\rho) + j \cos(\rho)) \quad (2.40)$$

O,

$$P_{upfc} = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \cdot \sen(\rho) \quad y$$

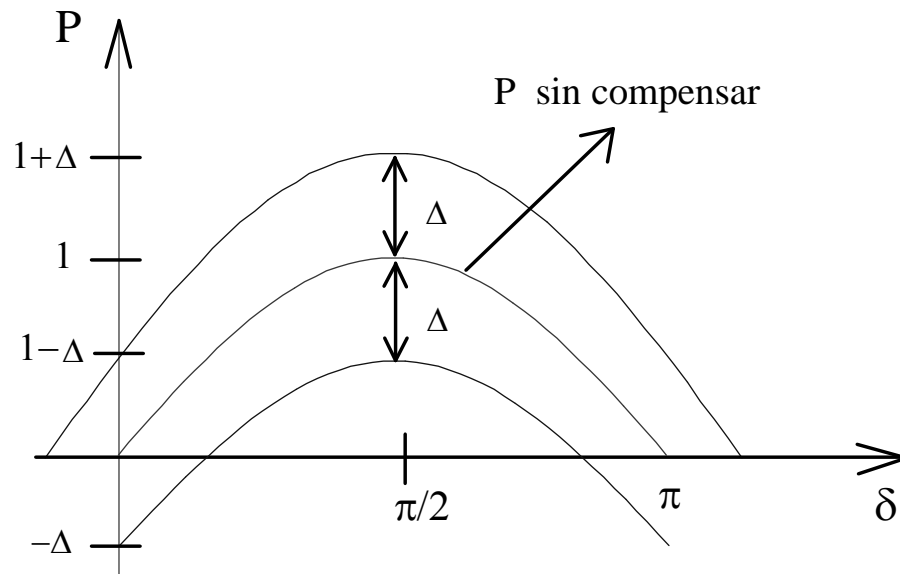
$$Q_{upfc} = \frac{V \cdot V_{upfc}}{X} \cdot \cos(\rho) \quad (2.41)$$

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Graficando el efecto de la potencia activa inyectada por el UPFC en el sistema se tiene lo siguiente:



Con Δ dado por:
$$\Delta = \frac{V \cdot V_{upqc}}{X}$$

Fig. 2.13

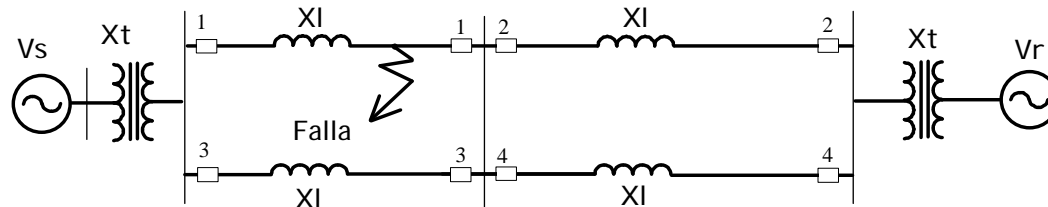
Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

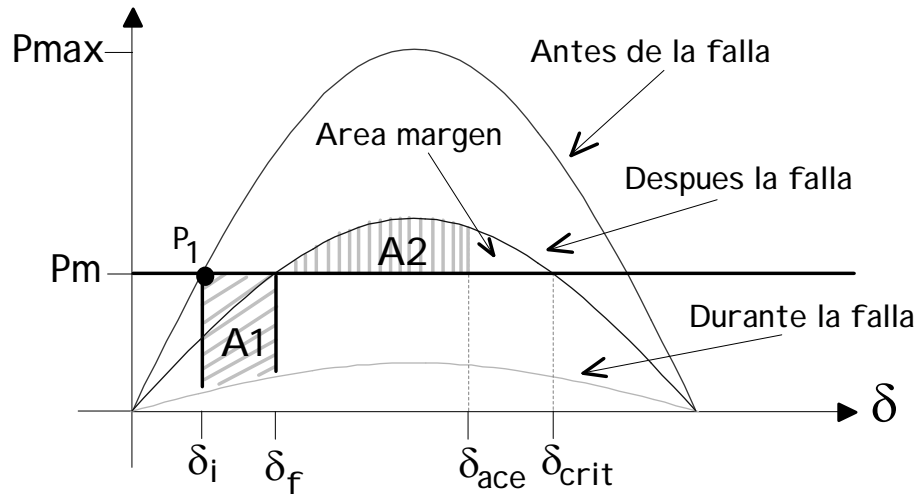
2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

2.2.5 - Mejoramiento de la Estabilidad Transitoria con los controladores F.A.C.T.S

La potencial efectividad de la compensación de los controladores FACTS sobre el mejoramiento de la estabilidad transitoria puede ser convenientemente evaluada por el criterio de la igualdad de las áreas.



(a)



(b)

Fig. 2.14

El significado de la igualdad de área es explicado con la ayuda de un sistema simple de dos máquinas mostrado por la Fig.2.14(a).

Asumiendo que el sistema completo es caracterizado por la gráfica mostrada por la Fig.2.14(b), donde son mostrados la curva de potencia normal antes de la falla, caracterizado por una potencia transmitida (P_1 igual a P_m) y un ángulo de carga δ_i .

La curva de potencia durante la falla de la línea 1 en este periodo, la potencia eléctrica transmitida disminuye significativamente mientras que la potencia mecánica de entrada (P_m) en el eje del generador permanece constante.

Como resultado de esto, el generador se acelera y el ángulo de carga aumenta de δ_i a δ_f , en cuyo momento es aclarada la falla. El generador V_s absorbe esta energía de aceleración representada por el área A1.

Capítulo 2

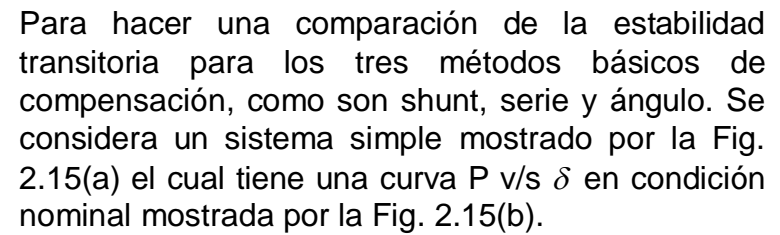
Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

En el ángulo de carga δ_f (en la curva de potencia con la falla aclarada) la potencia transmitida excede a la potencia mecánica de entrada y el generador Vs comienza a desacelerarse, sin embargo δ continua aumentando debido a la energía cinética (inercia) almacenada en la máquina. El ángulo máximo es alcanzado en δ_{ac} donde la energía de desaceleración es representada por el área A2.

El **limite de estabilidad transitoria** es alcanzado en $\delta = \delta_{crit}$ más allá de este valor la energía de desaceleración no logra hacerse comparable con la de aceleración y el sincronismo podría no ser restaurado. El área margen, entre δ_{ac} y δ_{crit} representa el margen de estabilidad transitoria del sistema: es evidente que la estabilidad transitoria, en un nivel de potencia transmitida y un tiempo de aclaramiento dados, es determinado por la característica P v/s δ del sistema después de la falla. Y puesto que la compensación shunt, serie y del ángulo δ , mejoran la característica natural de transmisión del sistema, se puede esperar que el empleo de estas técnicas podrían dar un efectivo y sustantivo aumento de la capacidad de transmisión del sistema post-falla y por lo tanto manejar la estabilidad transitoria del sistema.

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**



De la Fig. 2.15 se tiene que:

 δ_i Angulo de operación pre-falla

δ_f Angulo de desaparición de falla

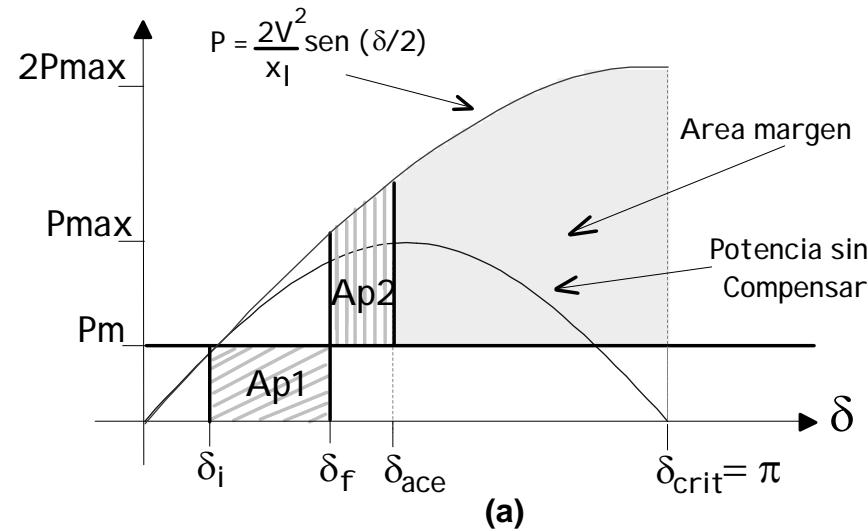
δ_{ace} Angulo final debido a la aceleración de la máquina.

Fig. 2.15

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS



Se supone que en el sistema no compensado y los tres sistemas compensados están sujetos a la misma falla por el mismo periodo de tiempo.

El desarrollo dinámico de los tres sistemas compensados son mostrados por la Fig. 2.16.

Donde P_m representa la potencia mecánica de entrada a la máquina y los ángulos δ con sufijo 'i' representa el ángulo de operación pre-falla, sufijo 'f' representa el ángulo de operación pos-falla y 'ace' el ángulo de aceleración.

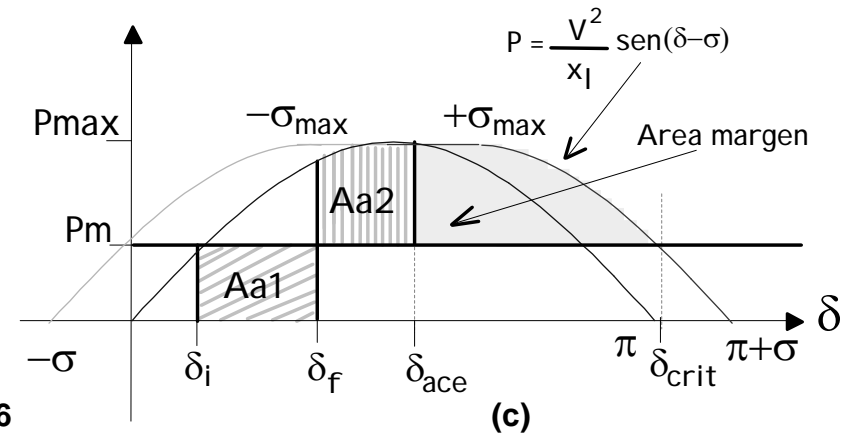
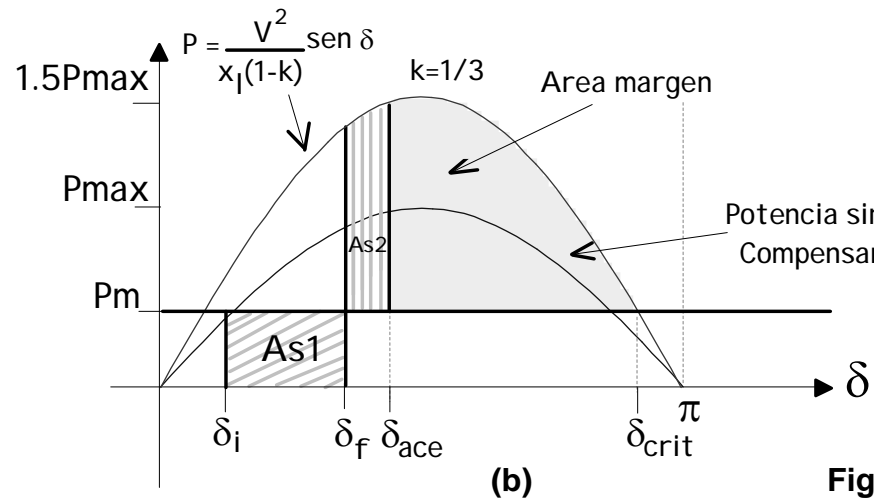


Fig. 2.16

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

Comparando las figuras 2.16 (a), (b) y (c), los sistemas compensados claramente muestran un aumento sustancial en el margen de estabilidad transitoria en comparación con el no compensado.

Si el sistema no compensado tiene un suficiente margen de estabilidad, estas técnicas de compensación se usan para aumentar considerablemente la potencia transmitida sin decrecer el margen.

De los tres sistemas compensados el de compensación shunt es el que ofrece un mayor margen de estabilidad.

2.2.6 - Amortiguación de la Potencia de Oscilación

En el caso de un sistema de potencia subamortiguado, cualquier disturbio menor puede causar que el ángulo de la maquina oscile alrededor de su valor de régimen permanente en la frecuencia natural del sistema electromecánico total. Evidentemente la oscilación del ángulo de carga tiene su correspondiente oscilación de potencia alrededor de la potencia de régimen transmitida. Puesto que la oscilación de potencia es un evento dinámico sostenido, es necesario variar la compensación aplicada de modo a lograr una consistente y rápida amortiguación, es decir, en este caso los compensadores hacen el trabajo de filtros.

La acción de control requerida es esencialmente la misma dada por los tres métodos básicos de compensación esto es **cuando la oscilación rotacional del generador se acelera y el ángulo δ aumenta ($d\delta/dt > 0$), la potencia eléctrica transmitida debe ser aumentada para compensar el exceso de potencia mecánica de entrada.**

Recíprocamente, **cuando el generador desacelera y el ángulo δ disminuye ($d\delta/dt < 0$), la potencia eléctrica debe decrecer para balancear la menor potencia mecánica de entrada.** (la potencia mecánica de entrada es asumida esencialmente constante durante todo el proceso de oscilación)

Capítulo 2

Principio de los Controladores FACTS

2.2 – Principio de operación de los controladores FACTS

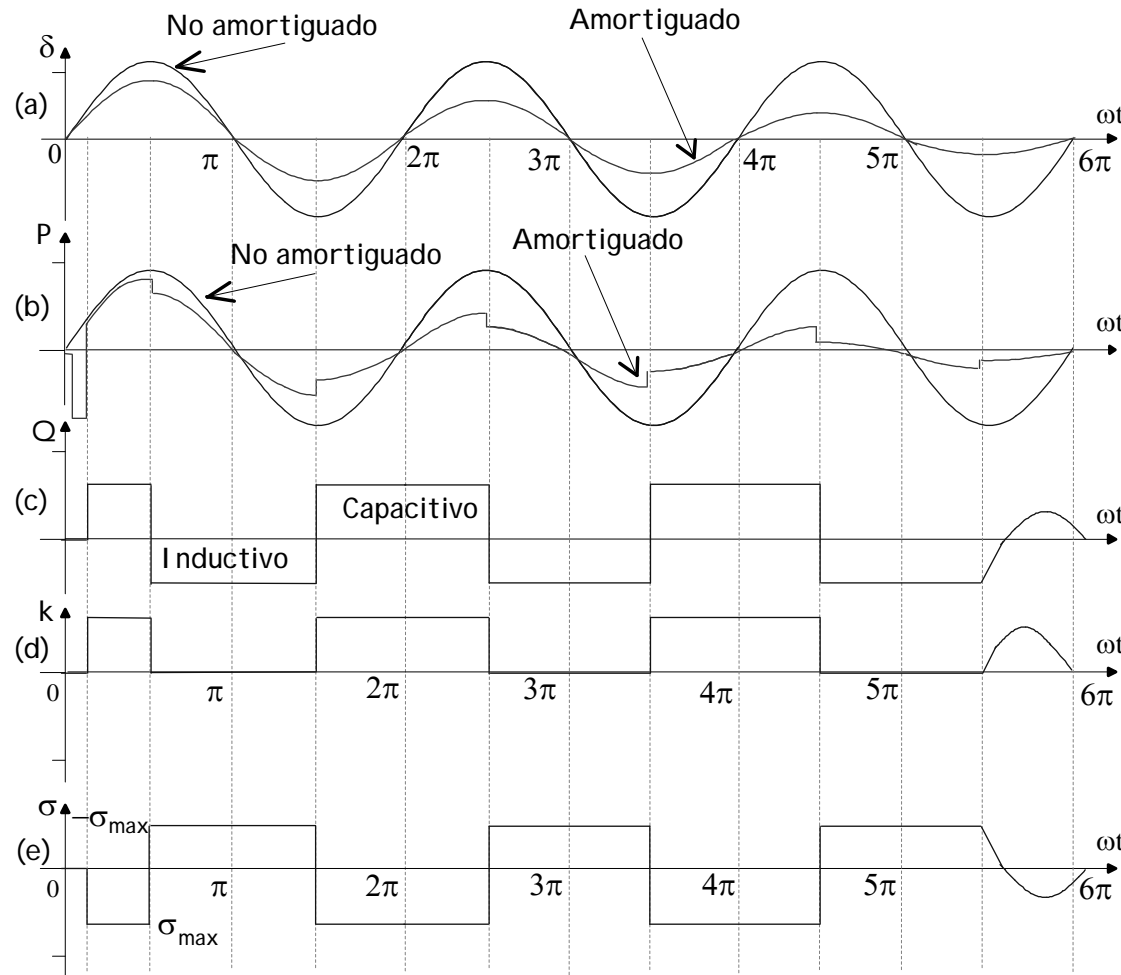


Fig. 2.17

La Fig. 2.17 muestra el desarrollo de una oscilación de potencia, así como el proceso de amortiguación para los tres casos básicos de compensación.

En 2.17(a) se observa la oscilación del ángulo de carga, no amortiguado como amortiguado.

En 2.17(b) se muestra la oscilación de la potencia transmitida debida a la oscilación del ángulo de carga no amortiguado como amortiguado.

Las figuras c, d y e muestran las variaciones de potencia reactiva (Q) para el compensador paralelo, del grado de compensación serie (k) para la compensación serie y del ángulo de desfase (σ), respectivamente para lograr la amortiguación del ángulo de carga (δ) y de la potencia transmitida.

Capítulo 2

Principio de los Controladores **FACTS**

2.2 – Principio de operación de los controladores **FACTS**

De la forma de onda mostrada por 'c' se desprende que la potencia reactiva de salida (Q_p) de un compensador shunt es capacitiva (positiva); aumentando la tensión de media línea y la potencia transmitida para cuando $d\delta/dt > 0$, y disminuye la potencia transmitida para cuando $d\delta/dt < 0$.

De 'd' se tiene que la variación del grado de compensación serie ' $k = X_c/X_L$ ' es mayor que cero para cuando $d\delta/dt > 0$, disminuyendo de esta forma la impedancia efectiva de la línea y aumentando la potencia transmitida. Cuando $d\delta/dt < 0$, ' k ' es disminuido, en la figura es hecho cero con esto la potencia transmitida es disminuida al valor que se tenía cuando el sistema no era compensado.

Y finalmente la figura 2.17(e) muestra la variación del ángulo de desfase ' σ ' producido por el desplazador de fase. (Para la ilustración es asumido que ' σ ' tiene un rango de operación de $-\sigma_{max} < \sigma < \sigma_{max}$ y δ está en el rango de $0 < \delta < \pi/2$).

Observandose que cuando $d\delta/dt > 0$, el ángulo σ es negativo haciendo que la curva de P v/s δ se desplace hacia la izquierda lo cual aumenta el ángulo efectivo entre los dos extremos, consecuentemente también aumenta la potencia transmitida.

Cuando $d\delta/dt < 0$, el ángulo σ es hecho positivo, lo cual desplaza la curva de potencia hacia la derecha y de esta forma disminuyendo el ángulo efectivo y con esto también la potencia transmitida.