



Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.1 - Introducción

El desarrollo de los controladores FACTS ha seguido distintamente dos técnicas o abordajes diferentes, la primera de estas técnicas emplea reactancias (ó susceptancias) variables usando a los tiristores como elementos controladores. La segunda técnica emplea convertidores estáticos auto conmutados como fuentes de tensión controladas.

El primer abordaje se basa en los variadores (ó graduadores) de tensión alternada y la segunda a los convertidores CC-CA (ó inversores VSI). En este capítulo estudiaremos la primera forma.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.1 – Introducción

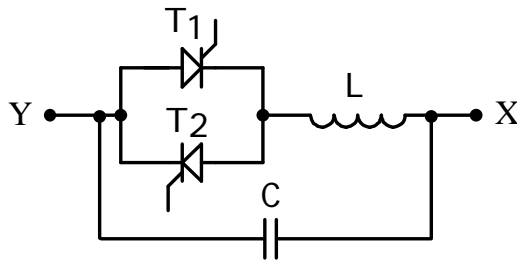


Fig. 3.1

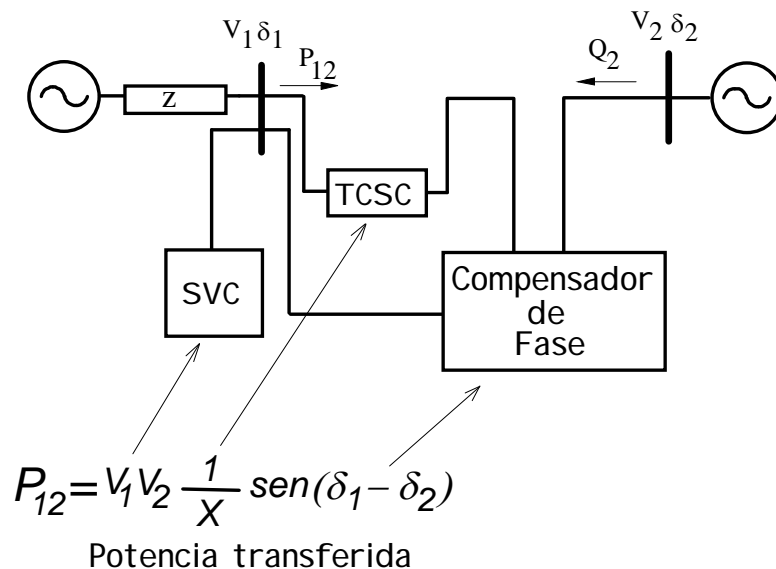


Fig. 3.2

La conexión en paralelo entre el TCR y un condensador de valor fijo, da origen a una célula de compensación estática mostrada por la Fig. 3.1.

Donde dependiendo de la conexión y del control de esta célula pueden ser generados el compensador estático de reactivo (SVC) o el condensador serie controlado a tiristor (TCSC). Si los extremos X-Y son conectados en paralelo se obtendrá el SVC, si X-Y se conectan en serie con la línea de transmisión se tendrá el TCSC, claramente los circuitos anteriores funcionan con un debido control aplicado. Donde el compensador de fase tiene una filosofía un poco diferente.

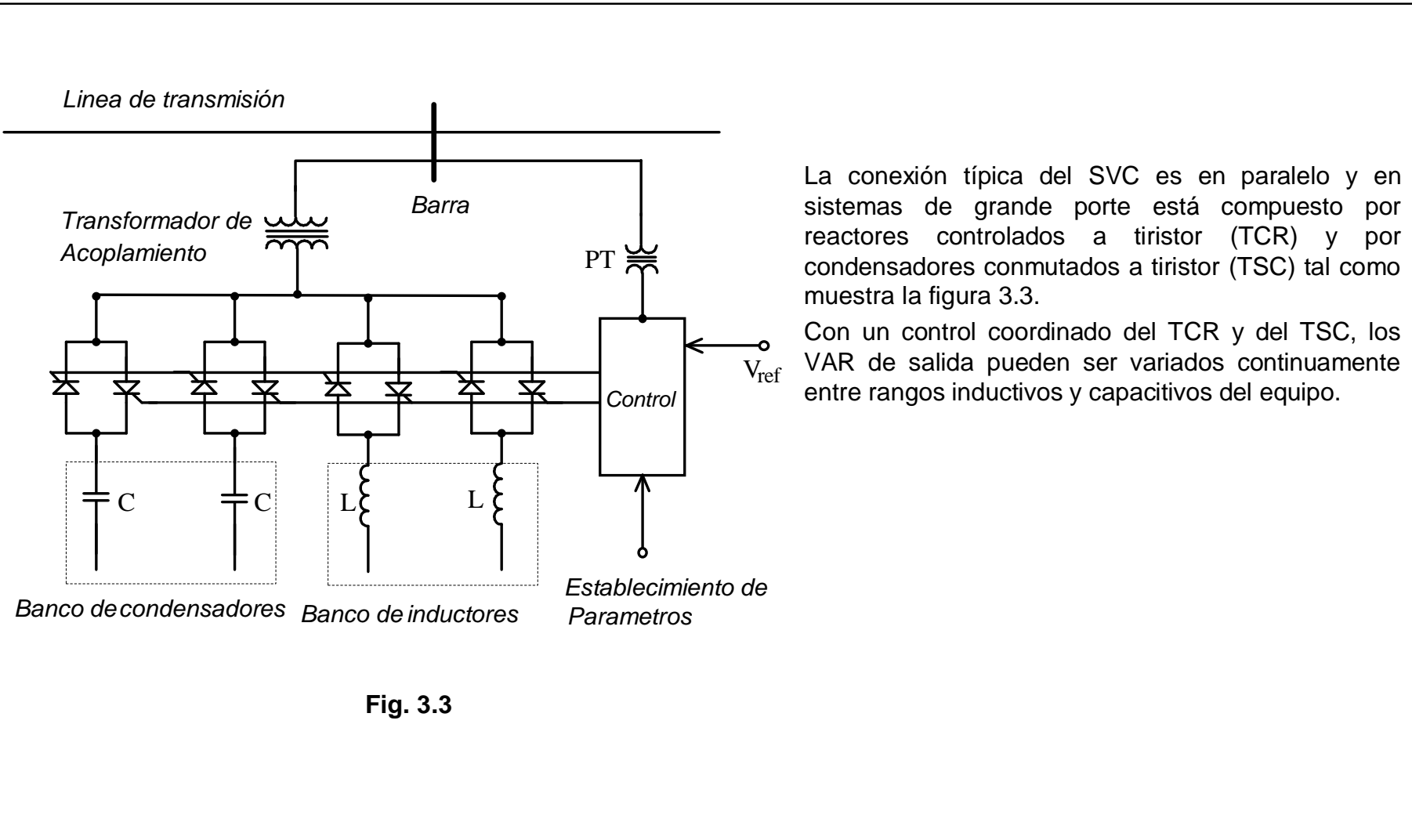
Cada uno de estos controladores puede actuar sobre uno de los tres parámetros que determinan la transmisión de potencia: La tensión (SVC), la impedancia de transmisión (TCSC) y el ángulo de transmisión (compensador de fase) tal como muestra la Fig. 3.2.

Con excepción del compensador de fase, todos ellos tienen la característica común de que la potencia reactiva necesaria para la compensación es generada ó absorbida por la célula de compensación reactiva. Donde, en la célula, los tiristores son controlados de manera tal que la impedancia presentada por la célula sea variable.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)



La conexión típica del SVC es en paralelo y en sistemas de grande porte está compuesto por reactores controlados a tiristor (TCR) y por condensadores conmutados a tiristor (TSC) tal como muestra la figura 3.3.

Con un control coordinado del TCR y del TSC, los VAR de salida pueden ser variados continuamente entre rangos inductivos y capacitivos del equipo.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

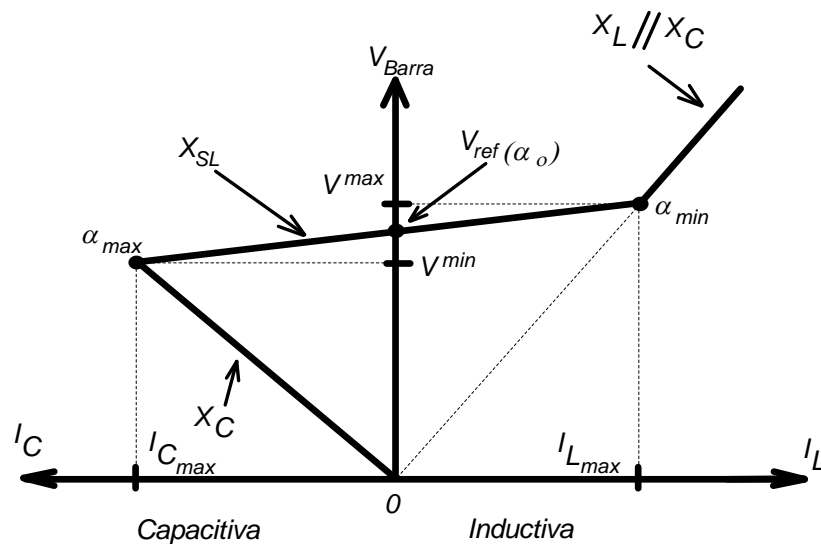


Fig. 3.4

3.2.1 - Característica régimen permanente (estática) de un SVC

El SVC normalmente está operando como “regulador de tensión” del sistema de transmisión. La característica **V-I** del SVC, mostrada en la Fig. 3.4, indica que el SVC se comporta (en su zona de control normal) como fuente de tensión con pendiente positiva de modo de regular la tensión de barra. Este modo de operación está definido por dos límites máximos de corriente: capacitiva (α_{max}) e inductiva (α_{min}). En estos puntos máximos el SVC pierde la capacidad de control y funciona simplemente como una impedancia con valores fijos, ya sea capacitiva (X_C) ó inductiva (X_L/X_C).

Observando la Fig. 3.4, se tiene que el compensador en su zona lineal, es representado por:

$$V_{Barra} = V_{ref}(\alpha_o) + X_{SL} \cdot I \quad (3.1)$$

Donde:

$$X_{SL} = \frac{V_{max} - V_{min}}{I_L^{max} - I_C^{max}} \quad (3.2)$$

que es la reactancia de línea a compensar, y:

$$V_{ref}(\alpha_o) = \frac{V_{min} \cdot I_L^{max} - V_{max} \cdot I_C^{max}}{I_L^{max} - I_C^{max}} \quad (3.3)$$

Representa una tensión de referencia, donde α_o es el punto donde $I=0$, es decir, el punto donde $B_{SVC}=0$, punto de resonancia.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

3.2.2 - Análisis del SVC en régimen permanente

En este ítem se estudia un SVC aplicado en la compensación de una línea de transmisión de un sistema de potencia. La línea de transmisión será considerada del tipo corta y es modelada como se muestra en la figura, mostrándose además la ubicación del SVC el cual debe compensar el punto medio de la línea de transmisión denominado (p).

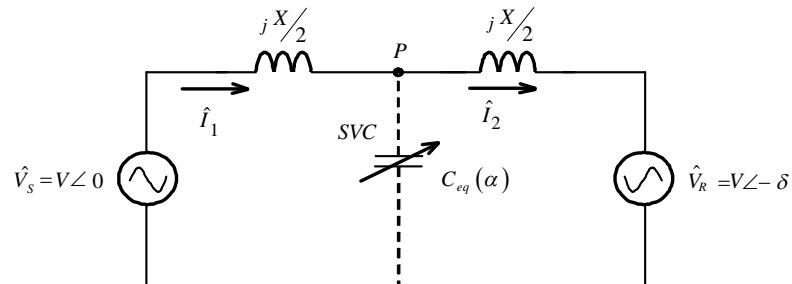


Fig. 3.5

Los parámetros de la figura 1 se definen a continuación:

\hat{V}_S : Fasor de tensión de fuente.

\hat{V}_R : Fasor de tensión de carga.

X : Reactancia inductiva de línea.

V : Tensión eficaz.

δ : Ángulo de carga.

$C_{eq}(\alpha)$: Capacitancia equivalente del SVC.

\hat{I} : Fasor de corriente de fuente.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

a) Análisis del Sistema sin compensar

El análisis se realiza, para este caso tomando como referencia la tensión del extremo emisor.

A continuación se determina la tensión en el punto 'p' para el sistema sin compensar. La corriente del sistema viene dada por:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}_S - \hat{V}_R}{j \cdot X} = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{X} \sqrt{1 - \cos(\delta)} \angle -\left(\frac{\delta}{2}\right) - \frac{2 \cdot V}{X} \operatorname{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \angle -\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.4)$$

Luego la tensión en el punto p es:

$$\hat{V}_p = \hat{V}_S - \hat{I} \cdot j \frac{X}{2} \quad (3.5)$$

Desarrollando la ecuación anterior:

$$\hat{V}_p = \frac{\hat{V}_S + \hat{V}_R}{2} \quad (3.6)$$

De donde:

$$\hat{V}_p = \frac{V}{2} \cdot (1 + \cos(\delta)) - j \cdot \frac{V}{2} \cdot \sin(\delta) \quad (3.7)$$

O si se tiene en forma polar:

$$\hat{V}_p = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{2} \sqrt{1 + \cos(\delta)} \angle -\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.8)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

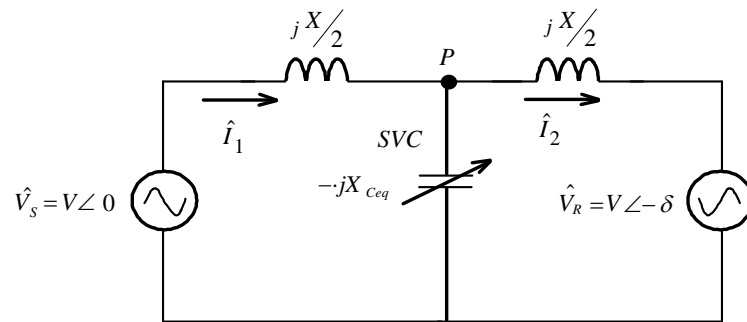


Fig. 3.6

La ecuación (3.8) nos da el valor de la tensión en el punto **p** para determinado ángulo de carga δ . En particular, para un ángulo de carga de cero grados la tensión en **p** es igual al valor de la fuente. En cambio para un ángulo de carga extremo como noventa grados, la tensión en el punto **p** cae alrededor de un 30% respecto de la tensión en la fuente.

Además, esta ecuación, indica que la fase de la tensión en el punto **p** es la mitad del ángulo de fase de la carga. Lo anterior debe ser mantenido (para generar solo reactivo) y tomado en cuenta al momento de disparar los tiristores del SVC, ya que el disparo de estos tiristores debe estar sincronizado con la tensión en el punto donde se ubica el compensador.

b) Análisis del Sistema compensado

La capacidad necesaria para compensar la caída de tensión en el punto **p** es determinada en el análisis siguiente.

El objetivo del compensador es mantener la magnitud de la tensión en el punto **p** en un valor igual a la magnitud de la tensión en la fuente. La Fig. 3.6 muestra el sistema con el compensador, el cual a sido modelado como una reactancia capacitiva equivalente.

Del análisis del circuito de la Fig.3.6 es posible obtener:

$$\hat{V}_P = \frac{2 \cdot X_{Ceq}}{(4 \cdot X_{Ceq} - X)} \cdot (\hat{V}_S + \hat{V}_R) \quad (3.9)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

O en forma polar:

$$\hat{V}_P = \frac{2\sqrt{2} \cdot X_{Ceq} \cdot V}{(4 \cdot X_{Ceq} - X)} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)} \angle -\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)} \cdot \frac{4 \cdot X_{Ceq}}{(4 \cdot X_{Ceq} - X)} \angle -\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.10)$$

De la ecuación (3.10) vemos que si la capacitancia equivalente tiende a cero, entonces la reactancia equivalente tiende a infinito y la tensión tiende al valor dado por la ecuación (3.8). Además se observa que el ángulo de fase de la tensión en el punto **P** no varía al insertar la capacitancia equivalente.

Al comparar las ecuaciones (3.8) y (3.10) el único factor que las diferencia es:

$$K = \frac{4 \cdot X_{Ceq}}{4 \cdot X_{Ceq} - X} = \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{4 \cdot \lambda}\right)} \quad (3.11)$$

Donde $\lambda = X_{Ceq}/X$, siendo “K” la ganancia de tensión en el punto **P** debido a la inserción de la capacitancia equivalente. Se debe notar que para un λ igual a 0,25 el sistema entra en resonancia.

Pensando que el SVC debe ser capaz de compensar la caída de tensión en el punto **P** en el peor de los casos (para un δ_{max}), se puede determinar a través de la ecuación (3.10) el valor de la capacitancia del condensador equivalente necesario para la compensación. En otras palabras, se busca que:

$$|\hat{V}_P| = |\hat{V}_S| = V \quad (3.12)$$

Entonces se puede escribir:

$$|\hat{V}_P| = \frac{2\sqrt{2} \cdot X_{Ceq} \cdot V}{(4 \cdot X_{Ceq} - X)} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{max})} = V \quad (3.13)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

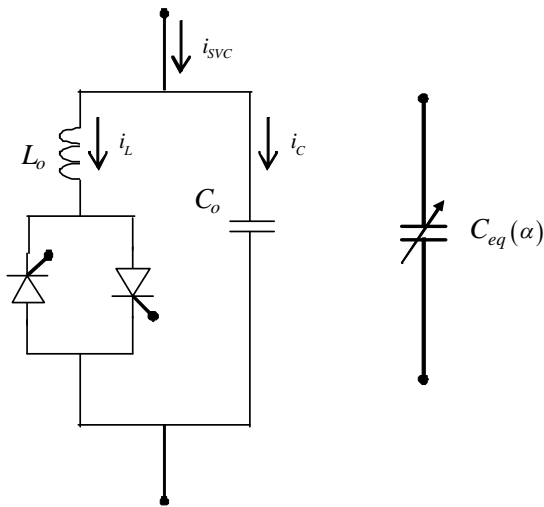


Fig. 3.7

De donde:

$$X_{Ceq} = \frac{\left(\frac{X}{2}\right)}{2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{\max})}} \quad (3.14)$$

Por tanto, la capacitancia del condensador equivalente en función del ángulo de carga δ viene dada por:

$$C_{eq} = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{\max})}\right]}{\omega^2 \cdot L/2} \quad (3.15)$$

Donde L es la inductancia total de la línea y ω es la frecuencia del sistema en rad/seg.

c) Circuito SVC

La Fig. 3.7 muestra el circuito del SVC y su representación equivalente. Con un adecuado disparo de los tiristores del TCR es posible controlar la amplitud de la componente fundamental de la corriente i_L , de naturaleza inductiva. Al tener un control sobre esta corriente, obviamente se tiene un control sobre la corriente del SVC (i_{svc}), con lo cual se obliga al SVC a absorber una corriente del tipo inductiva o capacitiva, dependiendo del tipo de compensación requerido. Es decir, se tiene un control sobre la reactancia equivalente del compensador vista por el sistema. La principal desventaja de este compensador es la circulación de corrientes armónicas de baja frecuencia presentes en el sistema, debido a la forma no sinusoidal de la corriente a través del TCR.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

c.1) Parámetros del Compensador

c.1.1) Obtención de la capacitancia fija 'Co'

Para máxima demanda del sistema (δ_{\max}) la capacitancia equivalente necesaria para compensar la caída de tensión en el punto P viene dada por la ecuación (3.15). El SVC debe ser capaz de manejar este nivel de capacitancia, luego:

$$C_o = C_{eq} = \frac{2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{\max})}}{\omega^2 \cdot L/2} \quad (3.16)$$

c.1.2) Obtención de la inductancia fija 'Lo'

Cuando el sistema no requiera compensación reactiva (sistema casi sin carga es decir, $\delta \approx 0$), la corriente fundamental a través del SVC debe ser cero. Corriente cero implica que la reactancia equivalente del compensador debe ser infinita, en otras palabras el SVC debe estar en resonancia. El ángulo de disparo que obliga al SVC a entrar en resonancia se denomina α_0 .

El intervalo ideal permitido para el ángulo de disparo es:

$$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \quad (3.17)$$

luego se puede seleccionar el ángulo de disparo para tener operación resonante en cualquier punto dentro de este intervalo. Mientras ubiquemos este ángulo lo más cercano a $\pi/2$ (90°), la magnitud de las armónicas inyectadas al sistema será menor. En particular podríamos tener operación resonante para 90° y la distorsión armónica para este punto sería despreciable. Sin embargo no se podría compensar elevaciones de tensión en la línea. Con lo anterior seleccionamos un ángulo de disparo para operación resonante igual a 100° , esto es:

$$\alpha_0 = 5 \frac{\pi}{9} \quad (3.18)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

La inductancia equivalente del TCR viene dada por:

$$L_{eq}(\alpha) = \frac{\pi \cdot L_o}{2(\pi - \alpha) - \sin(2(\pi - \alpha))} \quad (3.19)$$

Sustituyendo la ecuación (3.18) en (3.19) y ordenando se tiene:

$$L_{eq}(\alpha_0) = 1.282 \cdot L_o \quad (3.20)$$

Para operación resonante del SVC se debe cumplir que:

$$\omega = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}(\alpha_0) \cdot C_o}} \quad (3.21)$$

Reemplazando la ecuación (3.20) en (3.21) y simplificando se obtiene:

$$L_o = \frac{0.78}{\omega_o^2 \cdot C_o} \quad (3.22)$$

Quedando de esta forma definidos los parámetros del compensador.

c.2) Compensación para un punto de operación dado.

Sea δ_{op} el grado de carga del sistema para algún punto de operación. Entonces de la ecuación (3.15) se puede determinar la capacitancia equivalente requerida para la compensación:

$$C_{eq,op} = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{op})} \right]}{\omega^2 \cdot L/2} \quad (3.23)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Ahora se debe determinar el ángulo de disparo α_{op} que permita obtener una capacidad equivalente del SVC dada por:

$$C_{SVC}(\alpha_{op}) = C_{eq,op} \quad (3.24)$$

La ecuación para la capacitancia equivalente del SVC viene dada por:

$$C_{SVC}(\alpha) = \frac{X_{Leq}(\alpha) - X_{Co}}{X_{Leq}(\alpha) \cdot X_{Co} \cdot \omega} \quad (3.25)$$

Donde :

$$X_{Leq}(\alpha) = \omega \cdot L_{eq}(\alpha) \quad : \text{Reactancia inductiva equivalente del TCR.}$$

$$X_{Co} = \frac{1}{\omega \cdot C_o} \quad : \text{Reactancia capacitiva del condensador del SVC.}$$

La ecuación (3.24) es trascendental en la variable α , luego, para encontrar el valor del ángulo de disparo es necesario utilizar métodos numéricos u obtenerlo gráficamente.

Luego para esto sabemos del capítulo 1 que:

$$C_{SVC}(\alpha) = C_o - \left\{ \frac{2(\pi - \alpha) - \sin(2(\pi - \alpha))}{\omega^2 \cdot \pi \cdot L_o} \right\} \quad (3.26)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Ahora normalizando la ecuación anterior como sigue:

$$\bar{C}(\alpha) = [C_o - C_{sVC}(\alpha)] \cdot \omega^2 \cdot L_o \quad (3.27)$$

Luego:

$$\bar{C}(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} \quad (3.28)$$

Ahora la ecuación (3.28) depende solo de α y $\bar{C}(\alpha)$ normalizado podría ser la capacitancia equivalente del SVC en por unidad. Con lo anterior se puede utilizar esta ecuación para obtener el valor del ángulo de disparo buscado. La Fig. 3.8 muestra la ecuación (3.28) gráficamente.

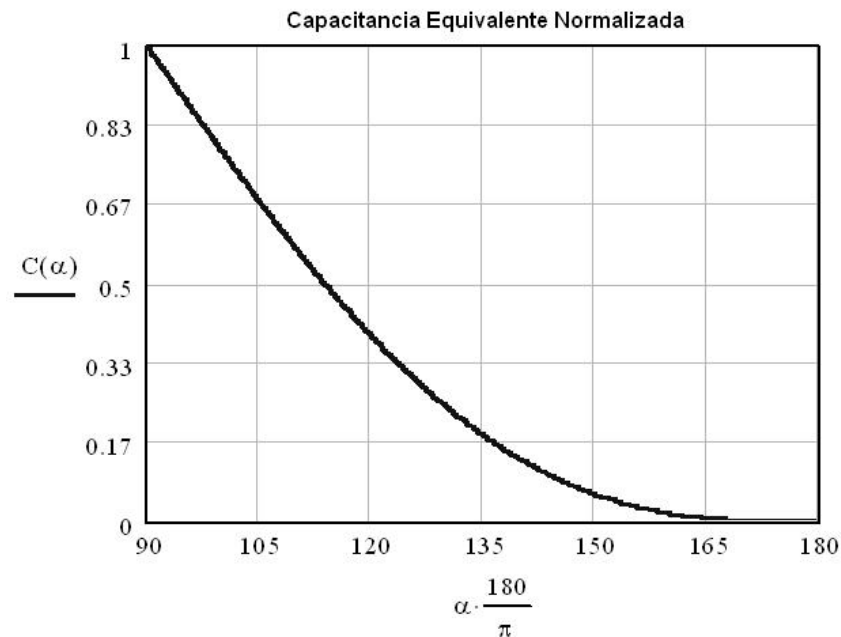


Fig. 3.8

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

3.2.3 – Ejemplo de Proyecto

A continuación se realiza un ejemplo de proyecto donde se compensa la línea de transmisión mostrada en la Fig. 3.9. Los parámetros de la línea son los siguientes:

$$V_S = 2300_{ef} \angle 0^\circ [\text{V}] \quad R1 = 1m\Omega \quad L1 = 1.2mH$$

$$V_R = 2300_{ef} \angle -\delta^\circ [\text{V}] \quad R2 = 1m\Omega \quad L2 = 1.2mH$$

$$R = 1m\Omega$$

Los datos de proyecto son los siguientes, todos en el extremo emisor:

$$\text{Grado de carga máximo} \quad \delta_{\max} = 22^\circ$$

$$\text{Grado de carga mínimo} \quad \delta_{\min} = 2^\circ$$

$$\text{Grado de carga nominal} \quad \delta_{op} = 16^\circ$$

$$\text{Frecuencia del sistema} \quad f = 50Hz$$

Determinación de los parámetros del compensador

La capacitancia C_o del compensador viene dada por la ecuación (3.16), esto es:

$$C_o = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{\max})} \right]}{\omega^2 \cdot \frac{L}{2}} = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(22^\circ)} \right]}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot \frac{0.0024}{2}} = 310.26\mu F$$

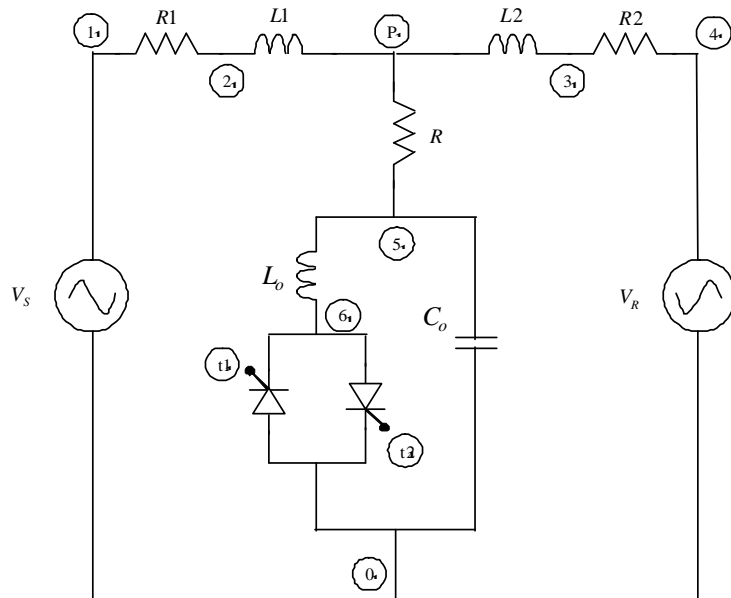


Fig. 3.9

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Y de la ecuación (3.22):

$$L_o = \frac{0.78}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot 310.26 \cdot 10^{-6}} = 25.472 \text{ mH}$$

Por lo tanto:

$$\therefore C_o = 310.26 \mu F$$

$$\therefore L_o = 25.472 \text{ mH}$$

$$\therefore \alpha_0 = 5 \frac{\pi}{9} \text{ rad}$$

Simulación para operación resonante (para δ_{\min})

A continuación se muestran los resultados obtenidos por simulación digital del circuito de la figura 3.9. Se considera al sistema con un ángulo de carga mínimo, por lo que el compensador debe estar en operación resonante.

La Fig. 3.10 muestra la forma de onda de la corriente de entrada al SVC, esta corriente está constituida prácticamente por componentes armónicas; la componente fundamental es mínima, lo cual era de esperarse ya que el compensador está en resonancia paralela.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

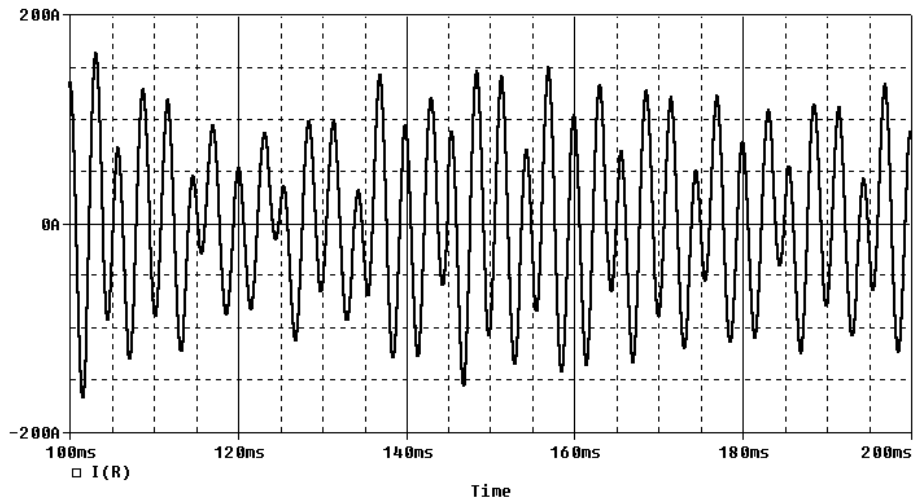
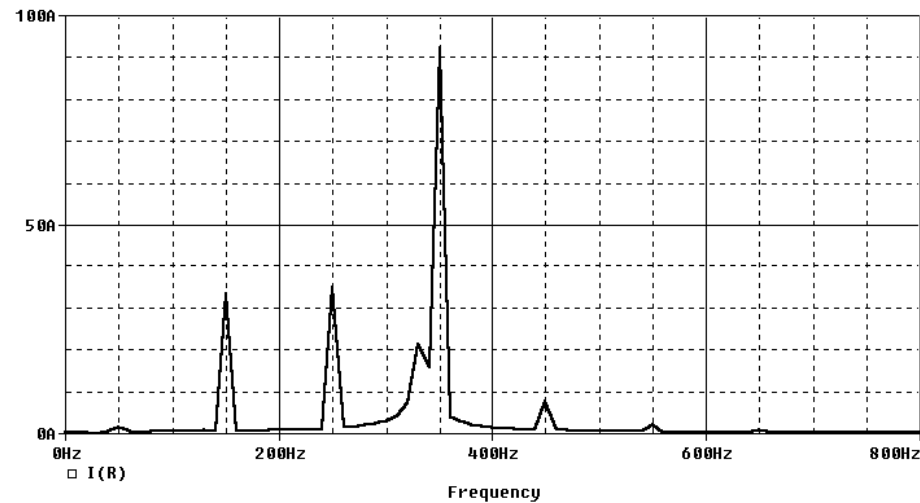


Fig. 3.10



La Fig.3.11 muestra el espectro armónico de la corriente a través del compensador. Se puede apreciar que la séptima armónica es la predominante:

Fig. 3.11

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

La tabla 3.1 muestra los resultados obtenidos del análisis de Fourier para la corriente a través del SVC. Como se indica en la tabla la componente fundamental de esta corriente es muy pequeña y se encuentra en atraso:

Tabla 3.1

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(R)

DC COMPONENT = 2.931229E-01

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	9.554E-01	1.000E+00	-6.732E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	8.340E-01	8.729E-01	7.665E+01	2.113E+02
3	1.500E+02	3.318E+01	3.473E+01	-9.336E+01	1.086E+02
4	2.000E+02	1.196E+00	1.252E+00	7.117E+01	3.404E+02
5	2.500E+02	3.570E+01	3.736E+01	8.213E+01	4.187E+02
6	3.000E+02	4.291E+00	4.491E+00	5.878E+01	4.627E+02
7	3.500E+02	8.819E+01	9.231E+01	9.654E+01	5.678E+02
8	4.000E+02	2.062E+00	2.158E+00	-1.190E+02	4.196E+02
9	4.500E+02	8.478E+00	8.874E+00	-1.012E+02	5.046E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.059653E+04 PERCENT

La Fig.3.12 muestra las formas de onda para la corriente a través del condensador y del inductor del TCR. Mientras que la Fig. 3.13 ilustra las formas de onda para la tensión en la fuente y para la tensión en el punto p.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

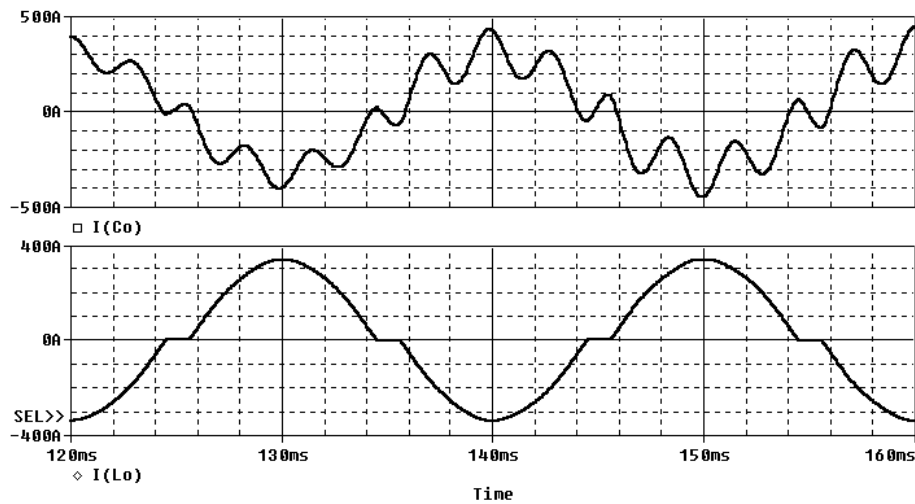
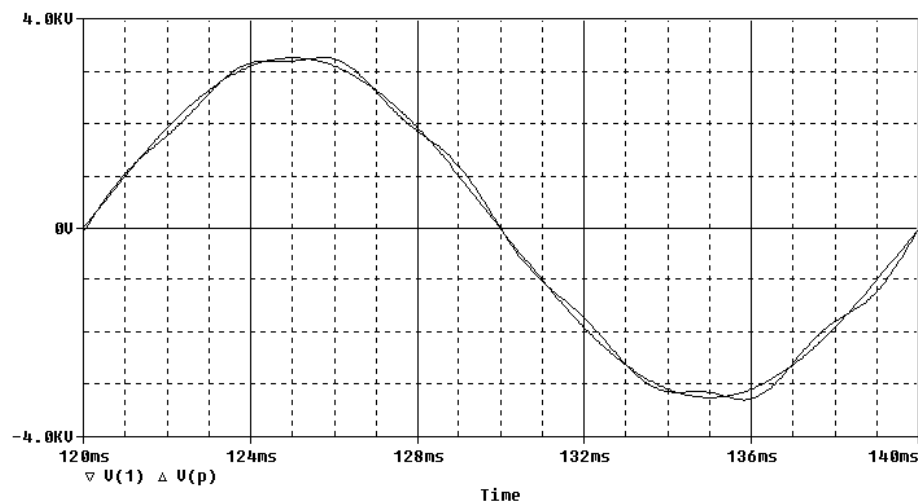


Fig. 3.12



La Fig.3.13 muestra V_p y la tensión del extremo emisor (Sinusoidal).

Fig. 3.13

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

La tabla 3.2 muestra los resultados obtenidos del análisis de Fourier para la tensión en el punto P. Como se destaca en la tabla; la magnitud de la componente fundamental de esta tensión es prácticamente igual a la magnitud de la tensión de fuente ($2300\sqrt{2}$). Puede apreciarse, además que la fase de esta tensión es aproximadamente igual a la mitad del ángulo de carga ($\delta_{\min}/2 = 1^\circ$), lo que concuerda con los cálculos teóricos.

Tabla 3.2

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(p)

DC COMPONENT = -3.385131E-01

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.252E+03	1.000E+00	-1.015E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	8.675E-01	2.667E-04	-6.353E+01	-6.150E+01
3	1.500E+02	2.340E+01	7.195E-03	1.780E+02	1.810E+02
4	2.000E+02	1.514E+00	4.657E-04	-4.395E+01	-3.989E+01
5	2.500E+02	4.212E+01	1.295E-02	-8.859E+00	-3.784E+00
6	3.000E+02	6.476E+00	1.991E-03	-3.624E+01	-3.016E+01
7	3.500E+02	1.456E+02	4.476E-02	6.241E+00	1.335E+01
8	4.000E+02	3.575E+00	1.099E-03	1.603E+02	1.684E+02
9	4.500E+02	1.782E+01	5.480E-03	1.710E+02	1.801E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.752635E+00 PERCENT

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Simulación para operación nominal (para δ_{op})

Para carga nominal el compensador debe presentar una capacitancia equivalente dada por la ecuación (3.15).

$$C_{eq} = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{op})} \right]}{\omega^2 \cdot L/2} = \frac{\left[2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(16^\circ)} \right]}{(2\pi \cdot 50)^2 \cdot \frac{0.0024}{2}} = 164.34 \mu F$$

Luego de la ecuación (3.26):

$$C_{SVC}(\alpha_{op}) = 164.34 \mu F$$

y de la ecuación (3.27) se tiene:

$$\bar{C}(\alpha_{op}) = \left[C_o - C_{SVC}(\alpha_{op}) \right] \cdot \omega^2 \cdot L_o \quad \left[3 \pm 0.26 \cdot 10^{-6} - 164.34 \cdot 10^{-6} \right] \cdot (100\pi)^2 \cdot 25.472 \cdot 10^{-3}$$
$$\therefore \bar{C}_{SVC}(\alpha_{op}) = 0.3668$$

Ahora de la grafica de la Fig.3.8 se obtiene:

$$\alpha_{op} = 121.47^\circ$$

Por lo que los tiristores deben ser disparados con un ángulo de $129,47^\circ$ para que estén sincronizados con la tensión en el punto **P**, es decir se le suma $\delta_{op}/2$ que para este caso es 8° .

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

A continuación se muestran los resultados obtenidos por simulación del circuito de la Fig. 3.9 para el sistema con carga nominal.

La Fig.3.14 muestra las formas de onda para la tensión en la fuente y para la tensión en el punto P ($\delta_{op}/2 = 8^\circ$). La distorsión de la forma de onda de tensión en el punto P es debida a los armónicos que el compensador inyecta en el sistema.

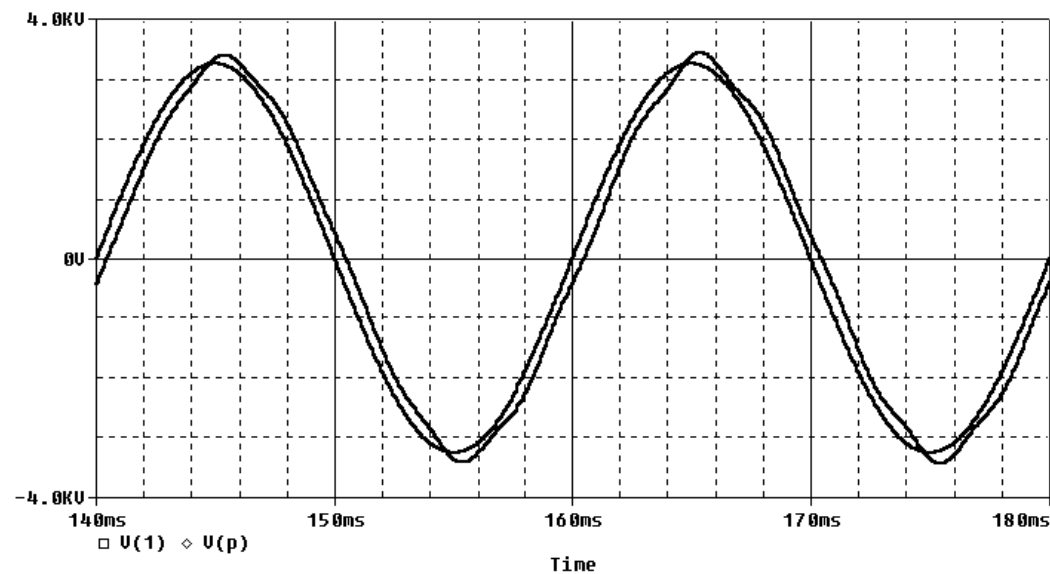


Fig. 3.14

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Para comprobar el grado de compensación del SVC se realizó un análisis de Fourier de la tensión en el punto **P**, el cual entrego los resultados que se muestran en la tabla 3.3.

De los datos entregados en la tabla 3.3 se puede ver que la magnitud de la tensión fundamental en el punto **P** es de 3261V con un ángulo de fase de $-8,003^\circ$. Esta magnitud es de 8,3V mayor que la magnitud de la tensión en la fuente, con lo cual se tiene un error de compensación del 0,25%. Nuevamente la fase de la tensión en el punto **P** coincide con los cálculos teóricos.

Tabla 3.3

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(p)

DC COMPONENT = 1.302573E-02

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.261E+03	1.000E+00	-8.003E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	3.420E-01	1.049E-04	1.729E+02	1.889E+02
3	1.500E+02	4.966E+01	1.523E-02	1.554E+02	1.794E+02
4	2.000E+02	8.504E-01	2.608E-04	1.763E+02	2.083E+02
5	2.500E+02	2.545E+01	7.804E-03	-4.472E+01	-4.704E+00
6	3.000E+02	4.779E+00	1.466E-03	1.758E+02	2.238E+02
7	3.500E+02	6.939E+01	2.128E-02	1.277E+02	1.837E+02
8	4.000E+02	2.589E+00	7.941E-04	5.286E+00	6.931E+01
9	4.500E+02	1.333E+01	4.088E-03	-6.426E+01	7.765E+00

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.766343E+00 PERCENT

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

La Fig.3.15 muestra las formas de onda para las corrientes a través del SVC, del condensador del compensador y del inductor del TCR respectivamente.

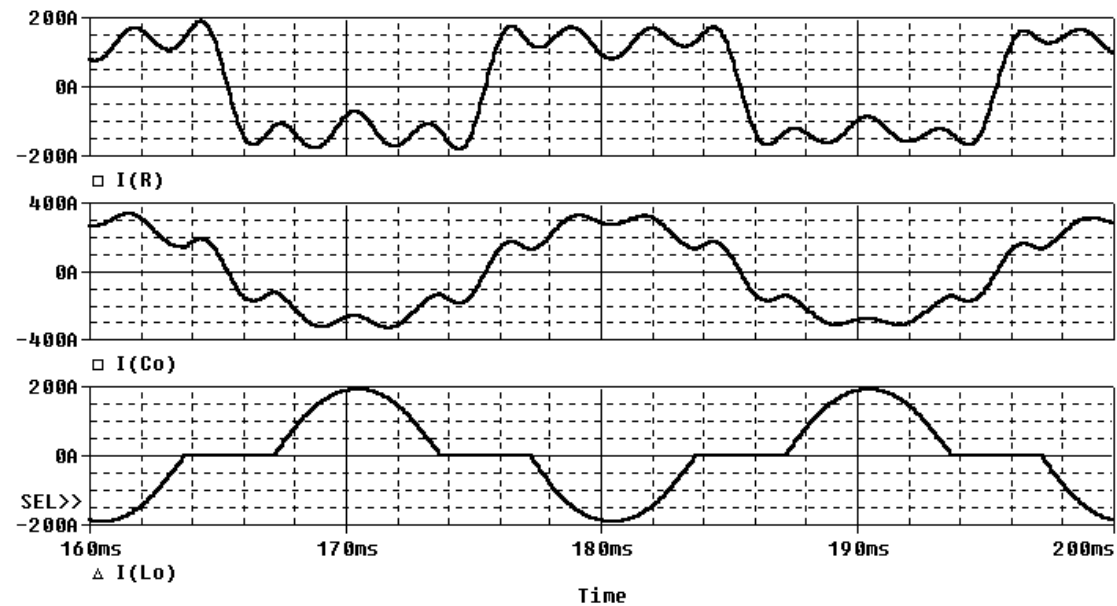


Fig. 3.15

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Los resultados del análisis de Fourier para la corriente a través del compensador se muestran en la tabla 3.4. como se puede apreciar en esta tabla la magnitud de la componente fundamental de la corriente es de 169.2 A con un ángulo de fase de 81.84° es decir esta corriente es de naturaleza reactiva capacitiva (167,5A), con una componente activa de 24 A, que es la que alimenta las pérdidas en el compensador.

Tabla 3.4

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I (R)

DC COMPONENT = -3.571498E-01

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	1.692E+02	1.000E+00	8.184E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	7.215E-01	4.263E-03	-9.268E+01	-2.564E+02
3	1.500E+02	7.022E+01	4.149E-01	-1.145E+02	-3.601E+02
4	2.000E+02	9.020E-01	5.330E-03	-9.196E+01	-4.193E+02
5	2.500E+02	2.159E+01	1.276E-01	4.529E+01	-3.639E+02
6	3.000E+02	3.378E+00	1.996E-02	-9.391E+01	-5.850E+02
7	3.500E+02	4.202E+01	2.483E-01	-1.423E+02	-7.152E+02
8	4.000E+02	1.370E+00	8.093E-03	9.472E+01	-5.600E+02
9	4.500E+02	6.288E+00	3.715E-02	2.566E+01	-7.109E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 5.019262E+01 PERCENT

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Simulación para carga máxima (δ_{\max})

Para este caso el grado de carga es de 22° , luego la capacitancia requerida ($C_{SVC}(\alpha)$) es igual a la capacitancia del condensador fijo del SVC (C_o), por lo que al aplicar la ecuación (3.27) se obtiene:

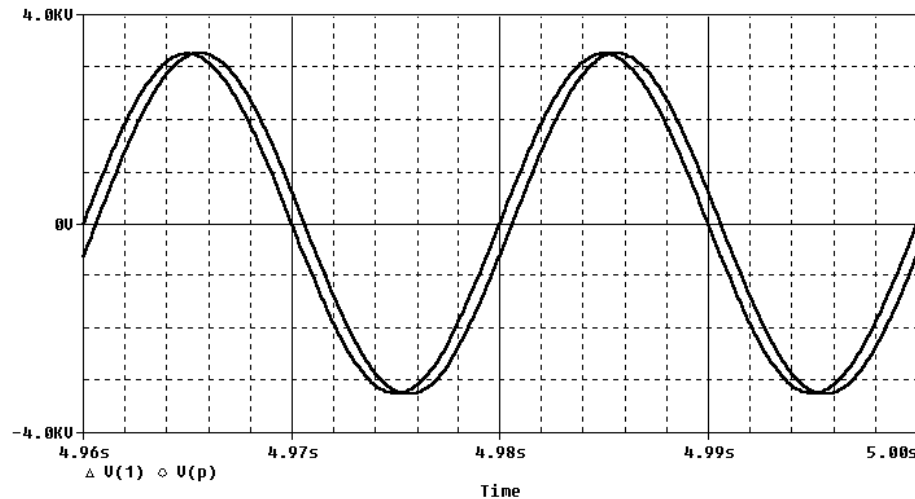
$$\therefore \bar{C}_{SVC}(\alpha_{op}) = 0$$

Ahora, de la gráfica de la Fig. 3.8 se obtiene:

$$\alpha_{op} = 180^\circ$$

Por lo que los tiristores deben ser disparados con un ángulo de 191° para que estén sincronizados con la tensión del punto **p** (se le suma $\delta/2$).

Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos por simulación.



La Fig.3.16 muestra las formas de onda para la tensión en la fuente y para la tensión en el punto **p**. Se aprecia en esta figura que la tensión en el punto **p** prácticamente no presenta distorsión.

Fig. 3.16

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

El análisis de Fourier para la tensión en el punto **p** muestra en la tabla 3.5. De la tabla 3.5 se ve que la magnitud de la componente fundamental de esta tensión es de 3268V con un ángulo de fase de -11.22° . El error de compensación en este caso es del 0.47%

Tabla 3.5

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(p)

DC COMPONENT = 2.561233E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.268E+03	1.000E+00	-1.122E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	8.982E-03	2.748E-03	1.323E+02	1.547E+02
3	1.500E+02	1.045E+00	3.198E-04	-2.010E+01	1.355E+01
4	2.000E+02	1.461E+00	4.469E-04	8.035E+01	1.252E+02
5	2.500E+02	1.061E+00	3.245E-04	-8.603E+01	-2.995E+01
6	3.000E+02	8.490E-01	2.598E-04	1.610E+02	2.283E+02
7	3.500E+02	9.489E-01	2.903E-04	-1.447E+02	-6.624E+01
8	4.000E+02	1.577E+00	4.826E-04	1.148E+02	2.045E+02
9	4.500E+02	7.351E-01	2.249E-04	1.661E+02	2.670E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.897240E-01 PERCENT

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

La Fig. 3.17 muestra las formas de onda para las corrientes a través del SVC, del banco de condensadores del compensador y del inductor del mismo. Obviamente la corriente en el inductor es cero, por lo que la corriente que circula por el SVC viene a ser la corriente a través del condensador C_o .

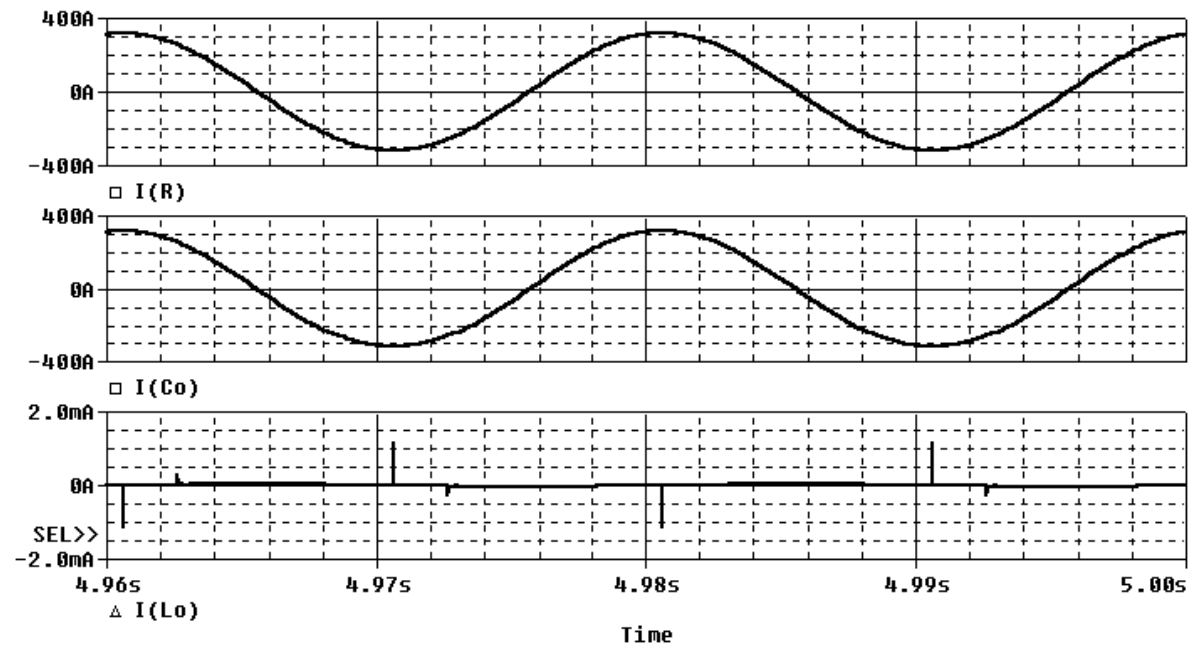


Fig. 3.17

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

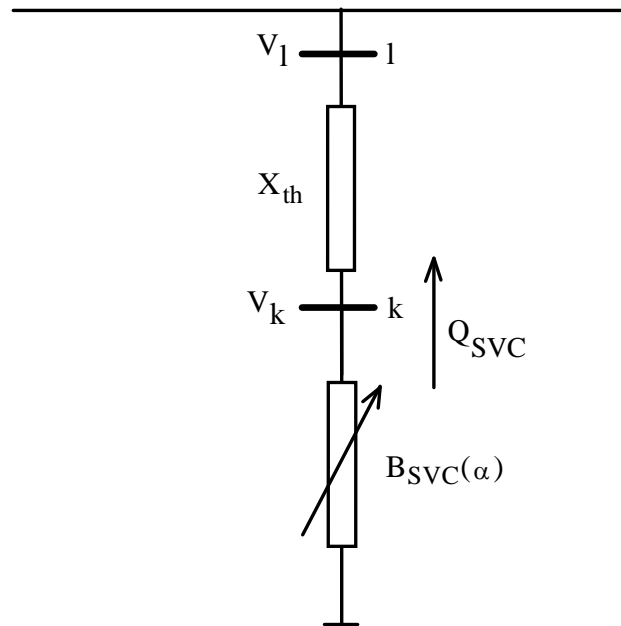


Fig. 3.18

3.2.4 - Ecuaciones del SVC en régimen permanente, desde el punto de vista del SEP

El SVC es usualmente conectado al sistema de transmisión a través de un transformador reductor, el cual es tratado, para efecto de análisis, de manera similar a otros transformadores del sistema. El SVC con sus correspondientes parámetros es esquemáticamente presentado en la Fig. 3.18, el voltaje controlado es típicamente V_l .

Las ecuaciones dadas por (3.29) describen el comportamiento en régimen permanente del SVC cuando está conectado a una barra 'l' del sistema, a través de un transformador X_{th} .

$$\left. \begin{aligned} V_l - V_{ref} + X_{sL} \cdot V_k \cdot B_{SVC} &= 0 \\ Q_{SVC} - V_k^2 \cdot B_{SVC} &= 0 \\ \pi \cdot X_C \cdot X_L \cdot B_{SVC} + \sin(2\alpha) - 2 \cdot \alpha + \pi \cdot \left(2 - \frac{X_L}{X_C} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

La inicialización de las variables, es hecha desde un valor definido por el usuario. Este está basado en los valores iniciales de variables del sistema CA y la característica de la reactancia equivalente. De esta forma, la reactancia es inicializada en el punto resonante $X_L = X_C$, es decir, $Q_{SVC} = 0$. El ángulo de disparo α es inicializado en un valor levemente superior a los 90 grados, α_0 . Los límites de control del SVC son básicamente los límites sobre el ángulo de disparo α , es decir, $\alpha \in [\alpha_m, \alpha_M]$ donde α_m es el ángulo de disparo mínimo y α_M ángulo de disparo máximo.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.2 – Compensador Estático de Reactivos (SVC)

3.2.5 - Control de un SVC

La estructura básica de un SVC operando en un típico control de tensión es mostrado por el diagrama en bloques dado por la Fig. 3.19.

En este modelo se asume que el sistema está balanceado y operando en su frecuencia fundamental (sin armónicas), es decir, asumiendo tensiones sinusoidales.

Del modelo se puede observar que el SVC está modelado como una reactancia (ó susceptancia en este caso) variable.

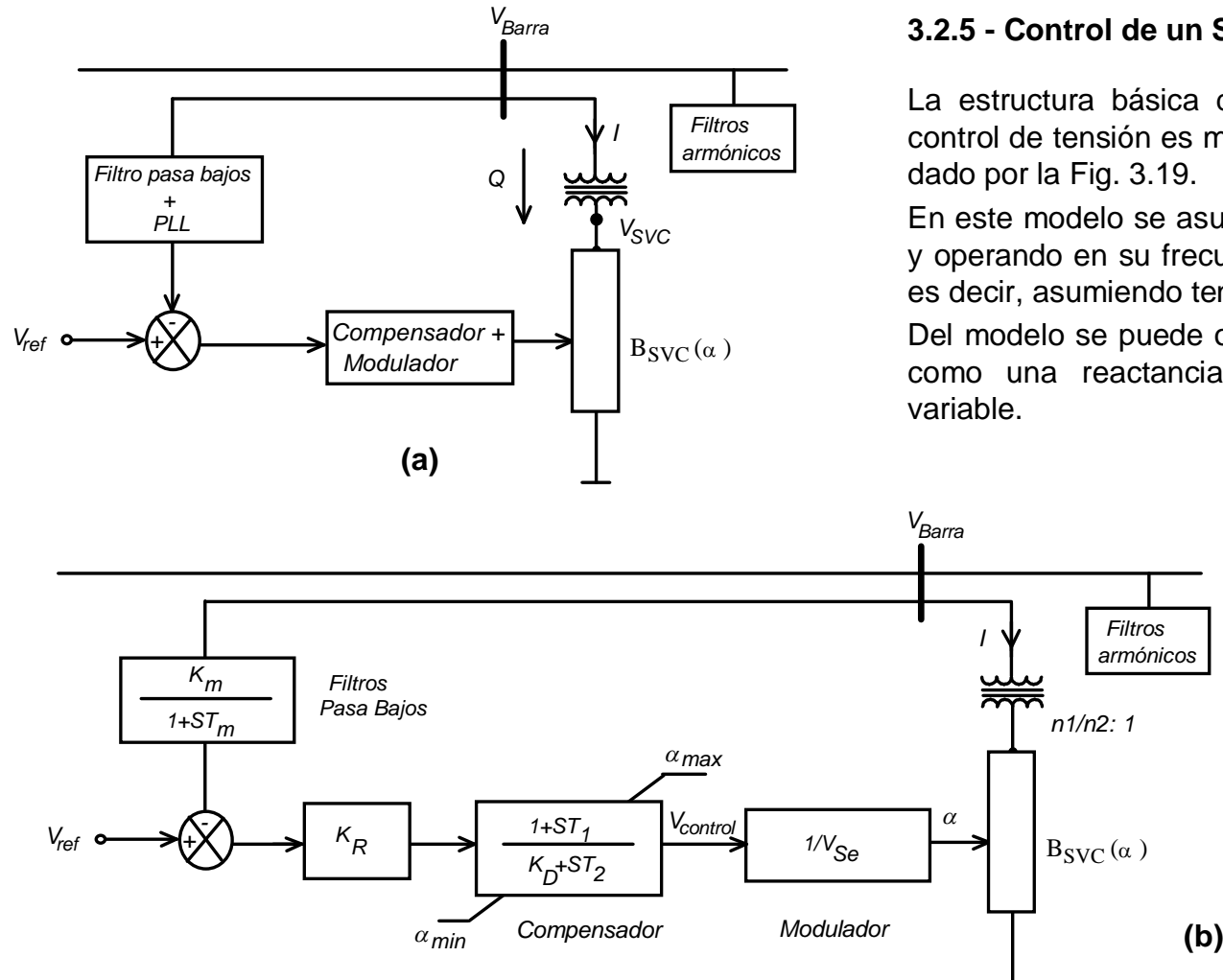


Fig. 3.19