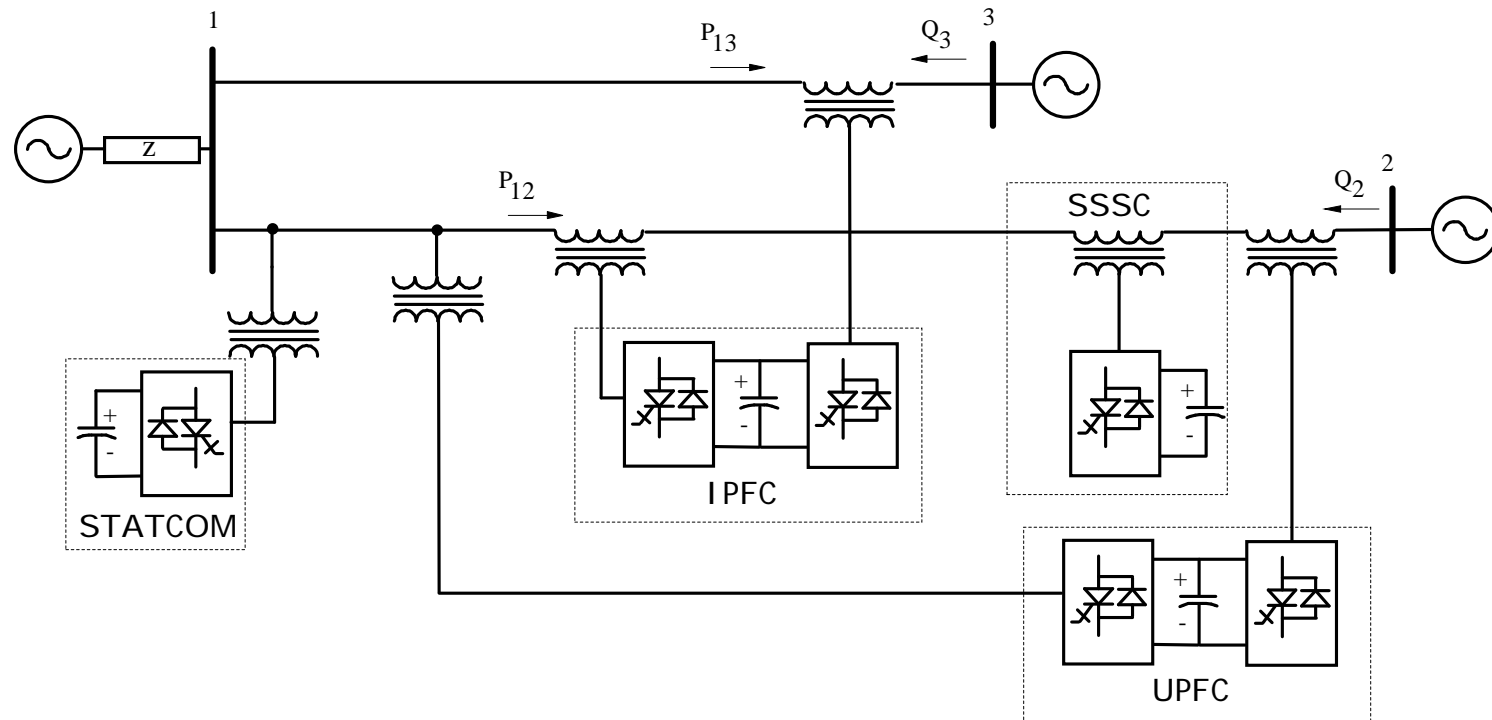


El grupo de controladores FACTS empleando fuentes de tensión sincrónicas basadas en los convertidores CC-CA son: el compensador síncrono estático (STATCOM), el compensador síncrono estático serie (SSSC), el controlador de flujo de potencia unificado (UPFC) y finalmente el controlador de flujo de potencia interlinea (IPFC). Todos estos controladores son mostrados con sus bloques funcionales en la Fig. 4.1.



**Fig. 4.1**

## Capítulo 4

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

#### 4.1 - Introducción

El STATCOM, al igual que su contraparte, el SVC, controla la tensión en la barra de conexión.

El SSSC provee compensación serie controlando directamente la tensión a través de la impedancia serie de la línea de transmisión, por lo tanto controla la impedancia efectiva de transmisión.

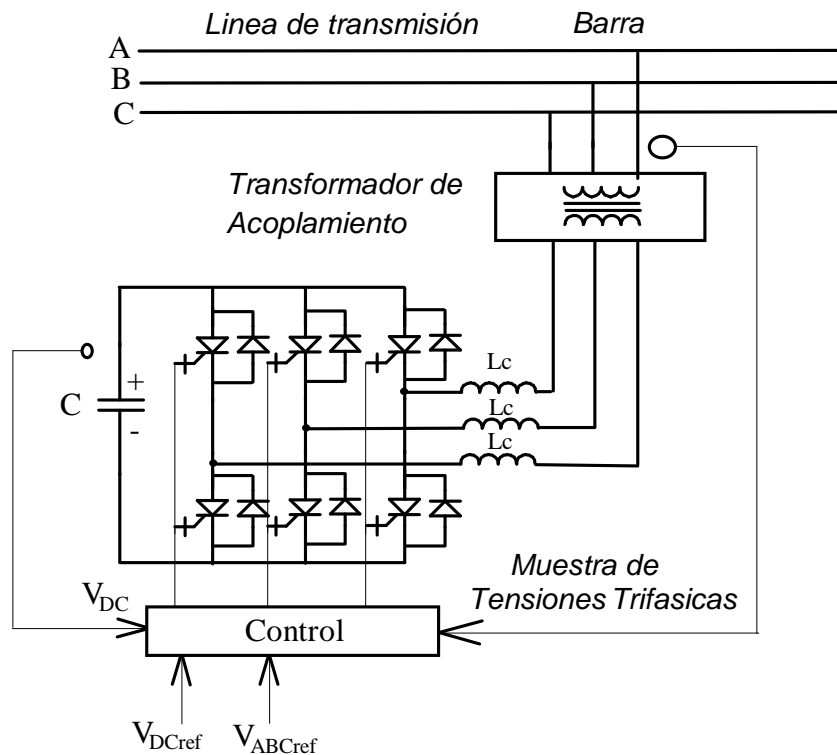
EL UPFC puede controlar, individualmente ó en combinación, todos los parámetros efectivos de transmisión ( tensión, impedancia y ángulo) ó directamente el flujo de potencia activa o reactiva en la línea.

El IPFC es capaz de transferir potencia activa entre líneas, por lo tanto puede facilitar una administración total de potencia activa y reactiva en un sistema de transmisión multilíneas.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)



**Fig. 4.2**

El compensador estático (STATCOM) es el análogo de la máquina síncrona ideal, es capaz de generar tensiones trifásicas sinusoidales y equilibradas, en la frecuencia fundamental, y de magnitud y ángulo de fase controlable.

Como es estático no tiene inercia, por lo tanto su respuesta es prácticamente instantánea y no altera significativamente la impedancia equivalente del sistema de potencia.

■ El STATCOM puede generar o absorber internamente potencia reactiva (capacitiva o inductiva respectivamente) y con esto controlar la tensión de barra, esto se resume del siguiente modo:

■  $Q > 0$  implica reducción de la tensión de barra (STATCOM inductivo), debe absorber reactivo.

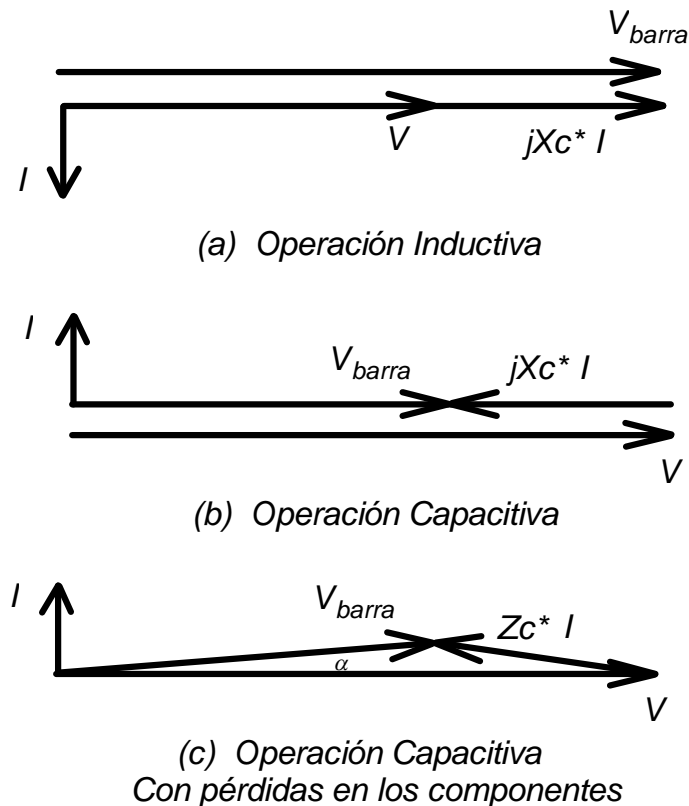
■  $Q < 0$  implica aumento de la tensión de barra (STATCOM capacitivo) debe generar reactivo.

■ Donde  $Q$  representa la potencia reactiva del sistema en la barra

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)



Donde las pérdidas son dadas por:  $Perd = \frac{V_{barra} \cdot V \cdot \sin(\alpha)}{X_C}$

**Fig. 4.3**

- El comportamiento del STATCOM es muy similar a la del condensador síncrono rotativo.
- Si la tensión generada por el STATCOM es menor que la tensión de barra del sistema, el STATCOM se comporta como una carga inductiva, absorbiendo reactivo.
- Contrariamente, un STATCOM actuará como un condensador en paralelo, generando reactivo cuando su tensión generada ( $V$ ) es más alta que la de la barra del sistema.
- La Fig. 4.3 muestra el diagrama fasorial de la explicación anterior.
- Se puede observar en 4.3c, la operación típica no ideal del STATCOM debido a que el convertidor deberá suplir sus propias pérdidas, además de la potencia activa absorbida desde la barra para mantener la tensión del condensador “C” constante.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### 4.2.1. - Característica régimen permanente del STATCOM

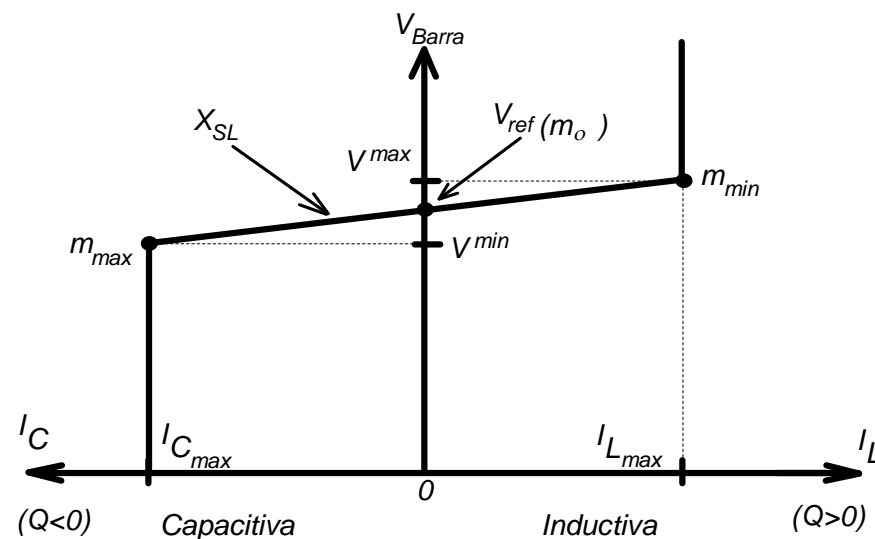


Fig. 4.4

Como muestra la Fig. 4.4, el STATCOM puede proveer compensación capacitiva o inductiva y es capaz de controlar su corriente de salida entre dos rangos máximos, capacitivo o inductivo independientemente de la tensión del sistema C.A es decir, el STATCOM se comporta en estos máximos como fuente de corriente.

En la practica el STATCOM puede ser considerado como un compensador de potencia reactiva (SVC) avanzado, por esto siguen siendo válidas las ecuaciones del SVC dadas en (3.1) a (3.3).

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### 4.2.1.1 - Operación régimen permanente

El sistema de transmisión a compensar es mostrado en la figura 4.5b, en esta figura se representa la línea de transmisión como dos fuentes ideales de tensión conectadas por medio de una reactancia, es decir, se modela inicialmente despreciando las pérdidas. El compensador (Fig.4.5a), por otro lado, se modela como una fuente de tensión ideal, despreciando las caídas de tensión presentes en el inductor de acoplamiento ( $L_o$ ) y en la reactancia del transformador.

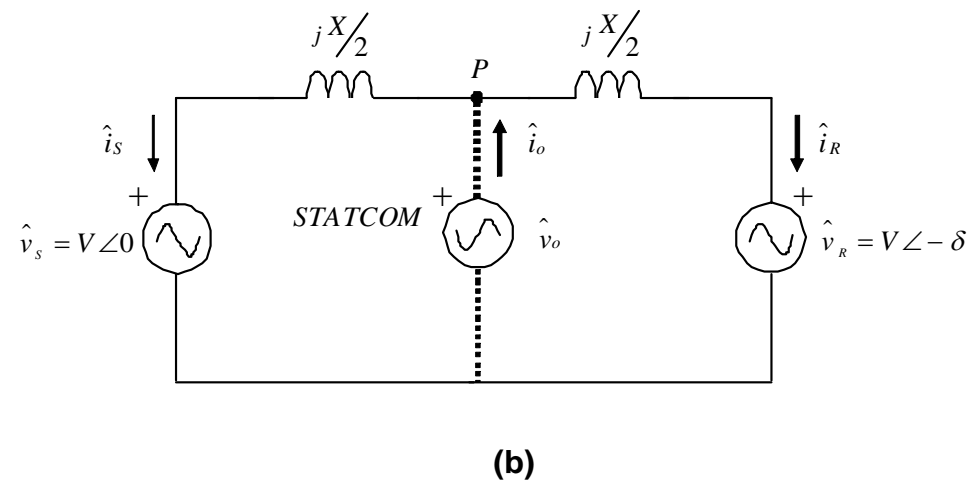
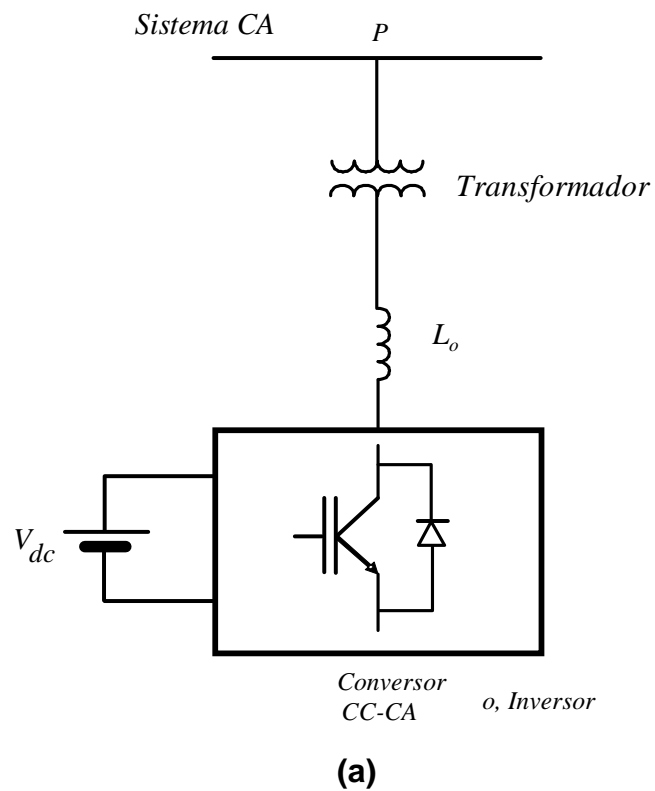


Fig. 4.5

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Los parámetros de la figura 4.5b se definen a continuación:

- $\hat{v}_s$  : Fasor de tensión de la fuente.
- $\hat{v}_R$  : Fasor de tensión de la carga.
- $\hat{v}_o$  : Fasor de tensión del compensador.
- $\hat{i}_s$  : Fasor de corriente de la fuente.
- $\hat{i}_R$  : Fasor de corriente de la carga.
- $\hat{i}_o$  : Fasor de corriente del compensador.
- $X$  : Reactancia inductiva de la línea.
- $V$  : Tensión eficaz.
- $\delta$  : Ángulo de carga.
- $P$  : Punto de la línea a compensar.

Del análisis del circuito de la figura 4.5b es posible obtener las siguientes ecuaciones:

$$\hat{i}_s = \frac{\hat{v}_o - \hat{v}_s}{\left( j \cdot \frac{X}{2} \right)} \quad (4.1)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

$$\hat{i}_R = \frac{\hat{v}_o - \hat{v}_R}{\left(j \cdot \frac{X}{2}\right)} \quad (4.2)$$

$$\hat{i}_o = (\hat{i}_S + \hat{i}_R) \quad (4.3)$$

Desarrollando la ecuación (4.3), y sustituyendo la ec. (3.6),  $\hat{v}_S + \hat{v}_R = 2 \cdot \hat{v}_{PSC}$ , se tiene:

$$\hat{i}_o = \frac{4}{X} [\hat{v}_{PSC} - \hat{v}_o] \cdot j \quad (4.4)$$

Donde  $V_{PSC}$  es la tensión en el punto P del sistema sin compensador.

De la ecuación anterior se puede inferir lo siguiente:

- ❑ La corriente a través del compensador es de naturaleza reactiva.
- ❑ Cuando la corriente a través del compensador es cero, decimos que el compensador está en operación flotante.
- ❑ Si  $v_o$  está en fase con  $V_{PSC}$ , pero posee una magnitud mayor, la corriente del compensador es capacitiva y el compensador entrega potencia reactiva al sistema. Lo que implica una elevación de tensión en el punto P, respecto de la tensión sin compensador.
- ❑ Si  $v_o$  está en fase con  $V_{PSC}$ , pero posee una magnitud menor, la corriente del compensador es inductiva y el compensador absorbe potencia reactiva del sistema. Lo que implica una caída de tensión en el punto P, respecto de la tensión sin compensador.
- ❑ Si  $v_o$  está en fase con  $V_{PSC}$ , no existe transferencia de potencia activa entre el sistema y el compensador



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Con relación al último punto, en la práctica debe existir un pequeño desfase entre estas tensiones con el fin de compensar las pérdidas del inversor y de mantener cargado el condensador del lado CC, el cual fue modelado en la figura 4.5 como una fuente de tensión ideal.

Con lo expuesto anteriormente, vemos que el compensador es capaz de controlar el nivel de tensión en el punto P del sistema simplemente controlando la amplitud de su propia tensión, mientras se mantiene en fase con el punto P.

En la sección siguiente se realizará el análisis del sistema considerando las pérdidas en la línea y el efecto de las caídas de tensión en el inductor de acoplamiento y sus pérdidas.

##### 4.2.1.2 - Análisis Considerando Pérdidas

La figura 4.6 muestra el circuito equivalente del sistema con compensador considerando las impedancias de la línea y del inductor de acoplamiento.

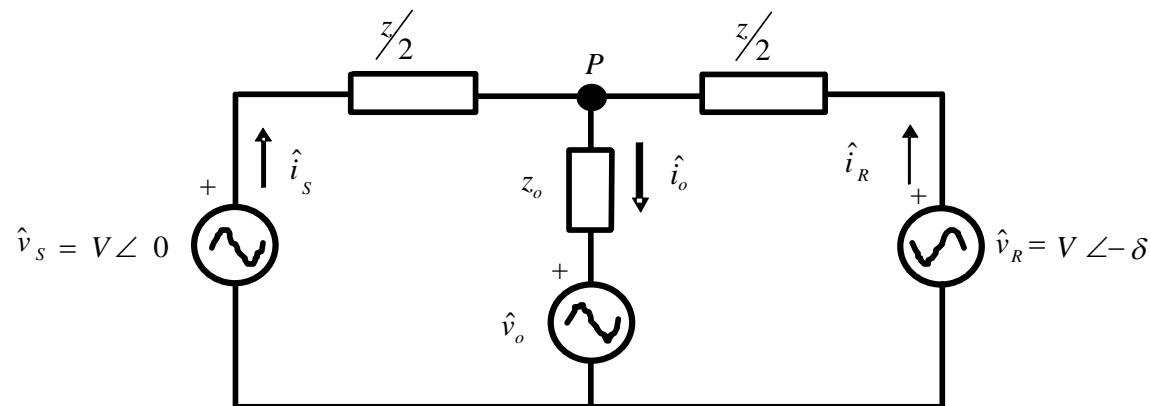


Fig. 4.6

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Los nuevos parámetros en la figura 4.6 se definen a continuación:

$z = Z \angle \theta$  : Impedancia de la línea.

$z_o = Z_o \angle \theta_o$  : Impedancia del inductor de acoplamiento.

La tensión en el punto P del sistema cuando no hay compensador viene dada por:

$$\hat{v}_{Psc} = \frac{\sqrt{2} \cdot V \sqrt{1 + \cos(\delta)}}{2} \angle -\frac{\delta}{2} \quad (4.5)$$

Por otro lado la tensión en el punto P cuando existe compensador viene dada por:

$$\hat{v}_P = \frac{4z_o}{(z + 4z_o)} \hat{v}_{Psc} + \frac{z}{(z + 4z_o)} \hat{v}_o \quad (4.6)$$

Para que exista compensación se debe cumplir lo siguiente:

$$|\hat{v}_P| = |\hat{v}_S| = V \quad \text{y,} \quad \angle \hat{v}_P = \angle \hat{v}_{Psc} - \frac{\delta}{2} \quad (4.7)$$

Luego:

$$\hat{v}_P = V \angle -\frac{\delta}{2} \quad (4.8)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Entonces, ordenando la ecuación (4.6), podemos determinar la tensión necesaria generada por el inversor para la compensación, por medio de la siguiente ecuación:

$$\hat{v}_o = \left[ \frac{(z + 4z_o) \hat{v}_P - 4z_o \hat{v}_{Psc}}{z} \right] \quad (4.9)$$

De la ecuación (4.9), conociendo los parámetros de la línea y del inversor, es posible determinar, tanto en magnitud como en fase, la tensión fundamental que debe ser capaz de entregar el inversor de tal forma de compensar las variaciones de tensión en el punto P. Se debe notar que la ecuación (4.9) implícitamente es función del ángulo de carga.

Observando la ecuación (4.9) vemos que, nuevamente, para que se cumpla la condición de operación flotante debe ocurrir que:

$$\hat{v}_o = \hat{v}_{Psc} \quad (4.10)$$

De la figura 4.6 se tiene que la corriente a través del compensador viene dada por:

$$\hat{i}_o = \frac{\hat{v}_P - \hat{v}_o}{z_o} \quad (4.11)$$

Y de las ecuaciones (4.5), (4.8) y (4.9) en la ecuación (4.11) tenemos:

$$\hat{i}_o = \frac{2 \cdot V}{Z} \cdot \left[ 2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)} \right] \angle \left( \pi - \theta - \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.12)$$

$\theta$ , Angulo de la impedancia de línea.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Es interesante observar en la ecuación (4.12) la independencia de la corriente a través del compensador respecto de la impedancia del inductor de acoplamiento. La magnitud de esta corriente viene dada por:

$$|\hat{i}_o| = \frac{2 \cdot V}{Z} \left[ 2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)} \right] \quad (4.13)$$

##### 4.2.1.3 - Parámetros del Inversor

Hasta este punto se ha determinado la magnitud y fase de la tensión fundamental a ser entregada por el inversor, de tal forma de cumplir con la compensación. Viene a continuación la determinación de los parámetros del inversor para su correcta operación.

El convertidor a utilizar en estos apuntes es el inversor fuente de tensión puente completo monofásico. El método de accionamiento a implementar para los interruptores es el PWM sinusoidal de tres niveles de tensión.

Sea:

$$\hat{v}_o = V_{oef} \angle \psi \quad (4.14)$$

la tensión resultante de evaluar la ecuación (4.9). Entonces el índice de modulación requerido para obtener esta tensión viene dado por:

$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{oef}}{V_{dc}} \quad (4.15)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Si llamamos  $V_{port}$  a la amplitud de la señal portadora, entonces la amplitud de la moduladora por definición es:

$$V_m = m_i \cdot V_{port} \quad (4.16) \quad \text{Y la fase de la moduladora es: } \angle V_m = \psi \quad (4.17)$$

Debido al tipo de modulación, las componentes armónicas de la tensión de salida están desplazadas al doble de la frecuencia de las portadoras. Se sabe que el índice de frecuencias es dado por:

$$m_f = \frac{f_{port}}{f_m} \quad (4.18)$$

Las armónicas de la tensión de salida más relevantes se encontrarán en:

$$2 \cdot m_f \pm 1 \quad (4.19)$$

La ecuación de proyecto para el inductor de acoplamiento viene dada por [6]:

$$L_o = \frac{V_{dc}}{8 \cdot f_{port} \cdot \Delta i_{o,max}} \quad (4.20)$$

Donde  $\Delta i_{o,max}$  es la máxima ondulación de la corriente a través del compensador, cuando el sistema opera en su máximo grado de carga. Generalmente la máxima ondulación de corriente permitida es de un 5-10% de la corriente máxima a través del inversor. La elección de esta máxima ondulación debe realizarse en base a un compromiso entre la magnitud de las armónicas presentes en la corriente del inversor y el tamaño del inductor de acoplamiento. Esto es, una ondulación muy pequeña implica un inductor de mayor tamaño, mientras que una ondulación demasiado grande influye en la amplitud de las armónicas inyectadas al sistema.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### 4.2.1.4 - Ejemplo de Proyecto en lazo abierto

A continuación se realizará el proyecto del compensador operando en un sistema con las siguientes características:

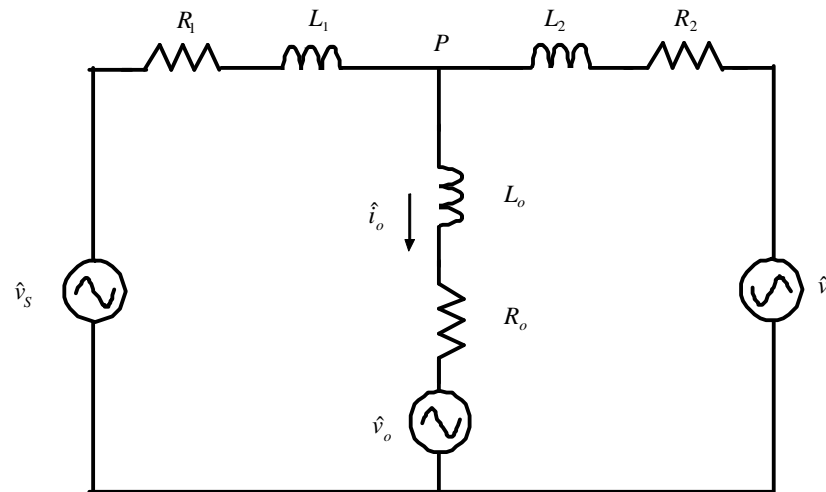


Fig. 4.7

$$V_{ef} = 2.3 \text{ KV} \quad f = 50 \text{ Hz} \quad \delta_{\min} = 0^\circ \quad \delta = 20^\circ \quad \delta_{\max} = 30^\circ$$

$$R_1 = R_2 = 1 \Omega = L_1 = L_2 = 6 \text{ mH}$$

$$z = 2.177 \angle 59.96^\circ \Omega$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### **a.- Cálculo para Compensación para grado de carga nominal**

Los datos del inversor son los siguientes:

$$f_m = 50 \text{ Hz} \quad f_{port} = 500 \text{ Hz}$$

$$m_f = 10 \quad V_{port} = 10 \text{ V}$$

$$V_{dc} = 4600 \text{ V}$$

De la ecuación (4.13) se tiene:

$$\left| \hat{i}_o \right|_{max} = \frac{2 \cdot V}{Z} \left[ 2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta_{max})} \right] = 144 \text{ A}$$

Asumiendo una ondulación del 20%, esto para verificar la influencia armónica, se tiene:

$$\Delta i_{o max} = 0.2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left| \hat{i}_o \right|_{max} = 40.7 \text{ A}$$

Y de la ecuación (4.20) se tiene:

$$L_o = \frac{V_{dc}}{8 \cdot f_{port} \cdot \Delta i_{o max}} = 28.25 \text{ mH}$$

Considerando una resistencia de 2 mili-ohms, se obtiene:

$$z_o = 6.27 \angle 89.98^\circ \Omega$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La tensión en el punto P sin compensación viene dada por la ecuación (4.5):

$$\hat{v}_{Psc} = \frac{\sqrt{2} \cdot V \sqrt{1 + \cos(\delta)}}{2} \angle -\frac{\delta}{2} \quad 2265 \angle -10^\circ \text{ V}$$

De la ecuación (4.8) la tensión requerida en el punto P para la compensación es:

$$\hat{v}_P = V \angle -\frac{\delta}{2} \quad 2300 \angle -10^\circ \text{ V}$$

Luego evaluando los datos obtenidos en la ecuación (4.9) obtenemos la tensión fundamental a ser entregada por el inversor:

$$\hat{v}_o = \left[ \frac{(z + 4z_o) \hat{v}_P - 4z_o \hat{v}_{Psc}}{z} \right] \quad V_{oef} \angle \psi \quad 2657 \angle -5.64^\circ \text{ V}$$

De la ecuación (4.15) el índice de modulación es:

$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{oef}}{V_{dc}} = 0.817$$

Y de la ecuación (4.16) la amplitud de la moduladora es:

$$V_m = m_i \cdot V_{Port} = 8.17 \text{ V}$$



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La fase de la moduladora viene dada por la ecuación (4.17):

$$\angle V_m = \psi - 5.64^\circ$$

Por lo tanto la moduladora es:

$$\hat{v}_m = \frac{8.17}{\sqrt{2}} \angle -5.64^\circ \text{ V}$$

##### **b.- Cálculo para Compensación para grado de carga mínimo**

Con grado de carga mínimo, la tensión en el punto P para este caso viene a ser la tensión en la fuente y el compensador debe estar en operación flotante, luego, de la ecuación (4.10) tenemos:

$$\hat{v}_o = \hat{v}_{Psc|\delta_{min}} = V_{oef} \angle \psi = 2300 \angle 0^\circ \text{ V}$$

Entonces el índice de modulación es en este caso:

$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{oef}}{V_{dc}} = 0.707$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Y la moduladora es entonces:

$$\hat{v}_m = \frac{7.071}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ \text{ V}$$

Con este último cálculo quedan determinados los parámetros necesario para proceder a la simulación del sistema con compensador, punto que será tratado en la sección siguiente.

##### **- Simulación del Sistema con Compensador Síncrono Estático**

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos por simulación digital del sistema línea de transmisión / STATCOM, para dos escenarios de operación distintos.

La primera simulación se realizó considerando el grado de carga mínimo, esto es, operación flotante del compensador. La segunda simulación consistió en el sistema con grado de carga nominal.

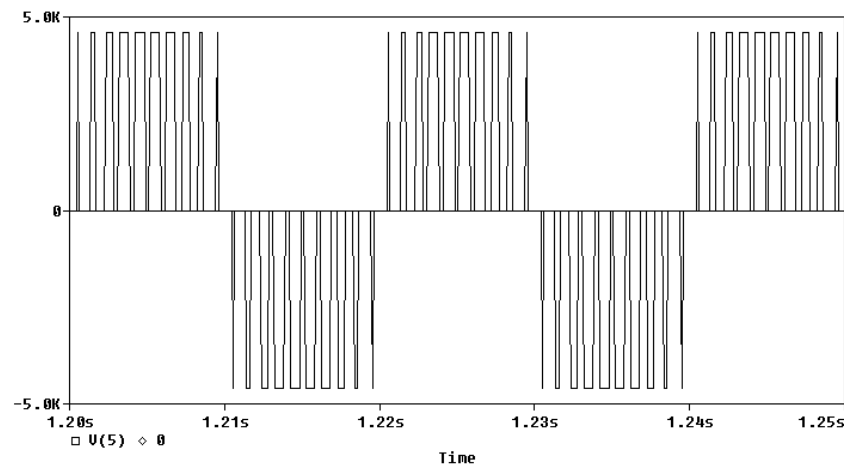
## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### **a) Simulación para compensación para grado de carga mínimo**

La figura 4.8 muestra la forma de onda para la tensión de salida del inversor. La tabla 4.1 muestra los resultados del análisis de Fourier para esta tensión. De la tabla vemos que la tensión fundamental para esta señal es de 3274V con un ángulo de fase de  $0.45^\circ$ . La magnitud de esta tensión es mayor que el valor teórico de fuente ( $\sqrt{2} \cdot 2300$ , o, 3252.7V) llevando a un error en los resultados del  $-0.66\%$ .



**Fig. 4.8**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla No 4.1**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(5)

DC COMPONENT = 1.355095E-03

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.274E+03	1.000E+00	4.593E-01	0.000E+00
2	1.000E+02	2.452E-02	7.487E-06	-1.364E+02	-1.373E+02
3	1.500E+02	8.949E+01	2.733E-02	-1.342E+02	-1.356E+02
4	2.000E+02	4.777E-02	1.459E-05	1.121E+02	1.103E+02
5	2.500E+02	8.448E+01	2.580E-02	1.377E+02	1.354E+02
6	3.000E+02	5.244E-02	1.602E-05	-1.996E+01	-2.271E+01
7	3.500E+02	6.636E+01	2.027E-02	1.179E+02	1.147E+02
8	4.000E+02	5.510E-02	1.683E-05	-1.490E+02	-1.527E+02
9	4.500E+02	1.899E+02	5.801E-02	-6.390E+01	-6.803E+01
10	5.000E+02	4.026E-02	1.230E-05	9.131E+01	8.671E+01
11	5.500E+02	1.048E+02	3.200E-02	-1.499E+02	-1.549E+02
12	6.000E+02	2.395E-02	7.314E-06	-2.338E+01	-2.889E+01
13	6.500E+02	1.017E+02	3.105E-02	4.508E+01	3.911E+01
14	7.000E+02	1.093E-02	3.339E-06	-1.462E+02	-1.526E+02
15	7.500E+02	2.689E+01	8.212E-03	1.024E+02	9.556E+01
16	8.000E+02	2.071E-02	6.324E-06	-7.775E+01	-8.509E+01
17	8.500E+02	4.114E+02	1.256E-01	4.980E+00	-2.828E+00
18	9.000E+02	3.382E-02	1.033E-05	1.295E+02	1.212E+02
19	9.500E+02	1.514E+03	4.625E-01	-4.230E+00	-1.296E+01
20	1.000E+03	1.245E-02	3.803E-06	1.284E+02	1.193E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.867274E+01 PERCENT

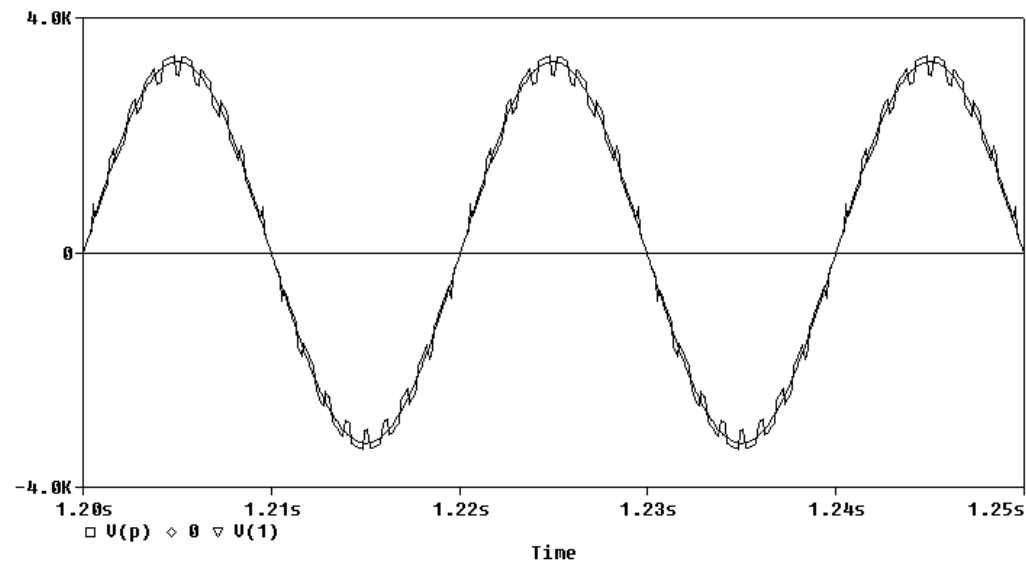
## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La figura 4.9 muestra las formas de onda para la tensión en la fuente y para la tensión en el punto P. Las dos señales se presentan superpuestas para su comparación. Podemos apreciar que la tensión en el punto P presenta cierta ondulación debido a los armónicos circulantes.

Los resultados del análisis de Fourier para la tensión en el punto P se muestran en la tabla 4.2. En la tabla se destacan la magnitud y la fase de la componente fundamental de esta tensión, las cuales son 3255V máximo o 2301.6V eficaces y  $-0.0024^\circ$ . Vemos que la tensión en el punto P es prácticamente la misma que en la fuente, con un error del  $-0.07\%$ , respecto del valor teórico.



**Fig. 4.9**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla N° 4.2**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(p)

DC COMPONENT = 1.450785E-04

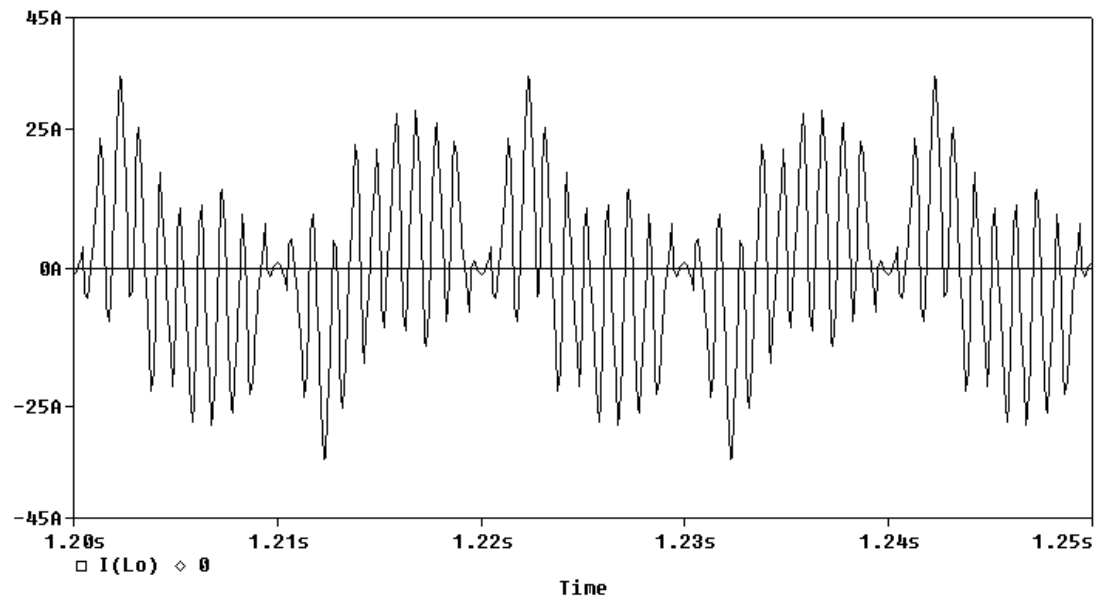
HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.255E+03	1.000E+00	-2.409E-03	0.000E+00
2	1.000E+02	2.333E-03	7.170E-07	-1.509E+02	-1.509E+02
3	1.500E+02	6.118E+00	1.880E-03	-1.483E+02	-1.483E+02
4	2.000E+02	2.567E-03	7.887E-07	1.472E+02	1.472E+02
5	2.500E+02	6.183E+00	1.900E-03	1.289E+02	1.289E+02
6	3.000E+02	5.131E-03	1.577E-06	-3.213E+01	-3.211E+01
7	3.500E+02	4.682E+00	1.439E-03	1.120E+02	1.120E+02
8	4.000E+02	3.705E-03	1.138E-06	-1.494E+02	-1.494E+02
9	4.500E+02	1.309E+01	4.023E-03	-6.679E+01	-6.677E+01
10	5.000E+02	2.515E-03	7.729E-07	9.942E+01	9.945E+01
11	5.500E+02	7.160E+00	2.200E-03	-1.541E+02	-1.541E+02
12	6.000E+02	9.659E-04	2.968E-07	3.556E+01	3.559E+01
13	6.500E+02	7.233E+00	2.222E-03	4.292E+01	4.295E+01
14	7.000E+02	2.778E-03	8.536E-07	1.028E+02	1.028E+02
15	7.500E+02	1.894E+00	5.820E-04	9.920E+01	9.924E+01
16	8.000E+02	1.681E-03	5.164E-07	-1.828E+01	-1.825E+01
17	8.500E+02	2.860E+01	8.787E-03	3.490E+00	3.531E+00
18	9.000E+02	2.765E-03	8.496E-07	1.363E+02	1.364E+02
19	9.500E+02	1.055E+02	3.242E-02	-5.737E+00	-5.691E+00
20	1.000E+03	2.127E-03	6.536E-07	1.405E+02	1.405E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 3.411564E+00 PERCENT

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)



**Fig. 4.10**

La figura 4.10 muestra la forma de onda para la corriente a través del compensador. Esta corriente está compuesta por los armónicos generados por el inversor, teniendo además una pequeña componente fundamental. La magnitud y fase de la fundamental de esta corriente se muestran en la tabla 4.3. la magnitud de la corriente fundamental es de 8A. Las componentes armónicas predominantes deberían ser las  $2mf \pm 1$ , es decir, las armónicas 19 y 21, sin embargo la 3<sup>era</sup>, 5<sup>ta</sup> y la 7<sup>ma</sup> aparecen y con valores altos. En la tabla 4.3 la armónica 19 tiene una amplitud máxima de 1.099A.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla N° 4.3**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(Lc)

DC COMPONENT = 1.370821E-05

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	8.097E+00	1.000E+00	1.065E+02	0.000E+00
2	1.000E+02	1.820E-04	2.248E-05	-8.650E+01	-2.995E+02
3	1.500E+02	6.013E+00	7.427E-01	-5.590E+01	-3.754E+02
4	2.000E+02	2.937E-04	3.627E-05	1.506E+02	-2.754E+02
5	2.500E+02	3.846E+00	4.750E-01	-1.195E+02	-6.520E+02
6	3.000E+02	1.013E-04	1.251E-05	-1.708E+02	-8.098E+02
7	3.500E+02	1.914E+00	2.364E-01	-1.491E+02	-8.946E+02
8	4.000E+02	3.854E-04	4.760E-05	5.982E+01	-7.922E+02
9	4.500E+02	2.622E+00	3.238E-01	3.378E+00	-9.551E+02
10	5.000E+02	2.079E-04	2.568E-05	-9.080E+01	-1.156E+03
11	5.500E+02	1.849E+00	2.284E-01	-7.405E+01	-1.246E+03
12	6.000E+02	8.162E-05	1.008E-05	-1.461E+00	-1.279E+03
13	6.500E+02	1.187E+00	1.466E-01	1.613E+02	-1.223E+03
14	7.000E+02	2.172E-04	2.682E-05	-1.120E+02	-1.603E+03
15	7.500E+02	4.326E-01	5.343E-02	-1.597E+02	-1.757E+03
16	8.000E+02	1.567E-04	1.935E-05	1.122E+02	-1.592E+03
17	8.500E+02	2.979E+00	3.679E-01	8.681E+01	-1.724E+03
18	9.000E+02	2.265E-04	2.797E-05	-1.308E+02	-2.048E+03
19	9.500E+02	1.099E+01	1.357E+00	8.316E+01	-1.940E+03
20	1.000E+03	7.566E-05	9.345E-06	7.798E+01	-2.052E+03

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.729571E+02 PERCENT

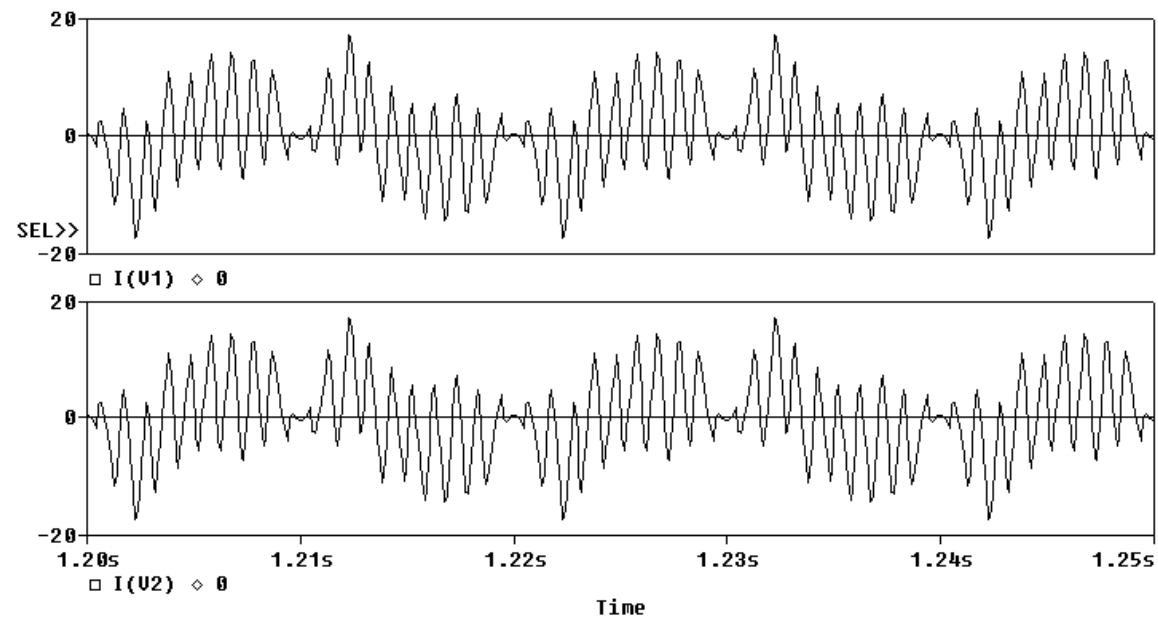


## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las formas de onda de las corrientes en la fuente y en la carga se muestran en la figura 4.11. obviamente la suma de ambas corrientes debe ser la corriente a través del compensador.



**Fig. 4.11**

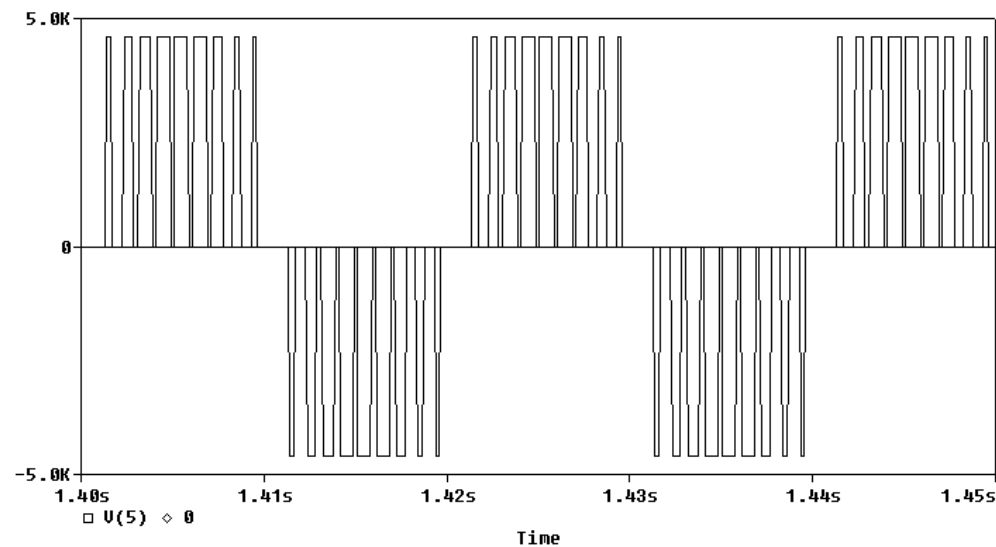
## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### **b) Simulación para compensación para grado de carga nominal**

La figura 4.12 muestra la forma de onda para la tensión de salida del inversor. La tabla 4.4 muestra los resultados del análisis de Fourier para esta tensión. De la tabla vemos que la tensión fundamental para esta señal es de 3718V máximo o 2629V eficaces con un ángulo de fase de  $-5.5^\circ$ . El valor eficaz de esta tensión es menor que el valor teórico (2657V) llevando a un error en los resultados del 1.05%. La fase por otro lado está más cerca de los resultados esperados con un error del 2.48%.



**Fig. 4.12**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla N° 4.4**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(5)

DC COMPONENT = 5.546533E-02

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.718E+03	1.000E+00	-5.505E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	6.404E-02	1.722E-05	-1.498E+02	-1.388E+02
3	1.500E+02	1.067E+02	2.870E-02	-1.489E+02	-1.324E+02
4	2.000E+02	1.541E-01	4.144E-05	9.687E+01	1.189E+02
5	2.500E+02	7.176E+01	1.930E-02	-1.670E+02	-1.395E+02
6	3.000E+02	9.092E-02	2.445E-05	-1.155E+02	-8.250E+01
7	3.500E+02	8.927E+01	2.401E-02	-6.805E+01	-2.951E+01
8	4.000E+02	9.248E-02	2.487E-05	1.236E+02	1.676E+02
9	4.500E+02	1.152E+02	3.099E-02	1.643E+01	6.597E+01
10	5.000E+02	1.247E-01	3.355E-05	-1.381E+02	-8.308E+01
11	5.500E+02	2.615E+02	7.034E-02	1.630E+02	2.236E+02
12	6.000E+02	7.191E-02	1.934E-05	7.378E+01	1.398E+02
13	6.500E+02	6.040E+01	1.624E-02	1.514E+02	2.229E+02
14	7.000E+02	1.634E-01	4.396E-05	-1.099E+02	-3.279E+01
15	7.500E+02	1.273E+02	3.424E-02	7.732E+01	1.599E+02
16	8.000E+02	3.539E-02	9.519E-06	5.056E+01	1.386E+02
17	8.500E+02	5.977E+02	1.607E-01	1.453E+01	1.081E+02
18	9.000E+02	1.005E-01	2.703E-05	-1.080E+02	-8.880E+00
19	9.500E+02	1.351E+03	3.634E-01	8.862E+00	1.135E+02
20	1.000E+03	5.755E-02	1.548E-05	2.695E+01	1.370E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.087160E+01 PERCENT

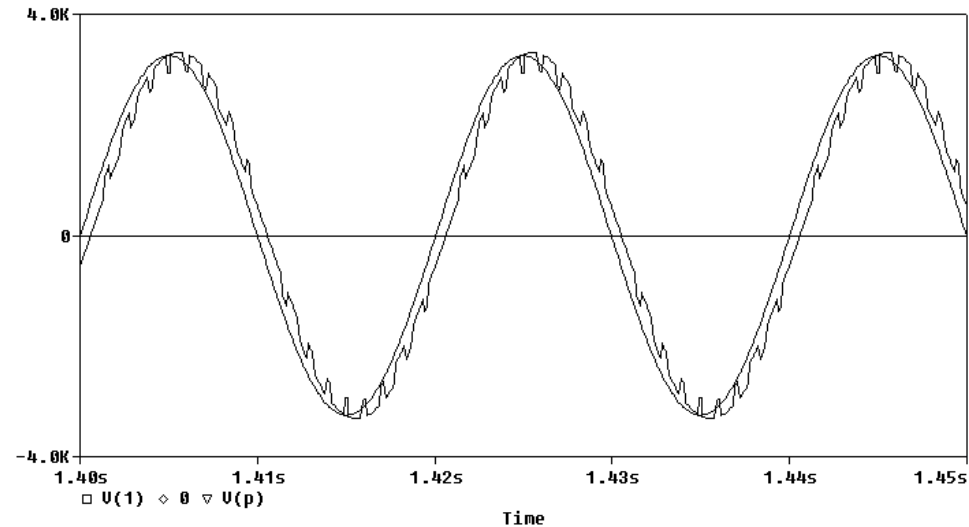
## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La figura 4.13 muestra las formas de onda para la tensión en la fuente y para la tensión en el punto P. Las dos señales se presentan superpuestas para su comparación. Podemos apreciar que la tensión en el punto P presenta cierta ondulación debido a los armónicos circulantes.

Los resultados del análisis de Fourier para la tensión en el punto P se muestran en la tabla 4.5. En la tabla se destacan la magnitud y la fase de la componente fundamental de esta tensión, las cuales son 3250V y  $-9.98^\circ$ . El error de compensación, tanto para la magnitud como para la fase, es del 0.08% y 0.2%, respectivamente, con respecto del valor teórico.



**Fig. 4.13**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla N° 4.5**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(p)

DC COMPONENT = 4.037747E-03

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.250E+03	1.000E+00	-9.980E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	5.261E-03	1.619E-06	-1.513E+02	-1.313E+02
3	1.500E+02	7.508E+00	2.310E-03	-1.590E+02	-1.291E+02
4	2.000E+02	9.556E-03	2.940E-06	1.016E+02	1.415E+02
5	2.500E+02	4.834E+00	1.487E-03	-1.763E+02	-1.264E+02
6	3.000E+02	7.472E-03	2.299E-06	-1.069E+02	-4.704E+01
7	3.500E+02	6.402E+00	1.970E-03	-7.218E+01	-2.317E+00
8	4.000E+02	6.357E-03	1.956E-06	1.230E+02	2.029E+02
9	4.500E+02	8.056E+00	2.479E-03	1.393E+01	1.038E+02
10	5.000E+02	9.093E-03	2.798E-06	-1.382E+02	-3.839E+01
11	5.500E+02	1.821E+01	5.603E-03	1.603E+02	2.701E+02
12	6.000E+02	5.871E-03	1.806E-06	8.711E+01	2.069E+02
13	6.500E+02	4.192E+00	1.290E-03	1.467E+02	2.765E+02
14	7.000E+02	8.387E-03	2.580E-06	-1.173E+02	2.244E+01
15	7.500E+02	8.845E+00	2.721E-03	7.572E+01	2.254E+02
16	8.000E+02	4.177E-03	1.285E-06	4.032E+01	2.000E+02
17	8.500E+02	4.155E+01	1.278E-02	1.296E+01	1.826E+02
18	9.000E+02	7.461E-03	2.296E-06	-1.124E+02	6.727E+01
19	9.500E+02	9.419E+01	2.898E-02	7.355E+00	1.970E+02
20	1.000E+03	3.728E-03	1.147E-06	4.539E+01	2.450E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 3.257838E+00 PERCENT

## Capítulo 4

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

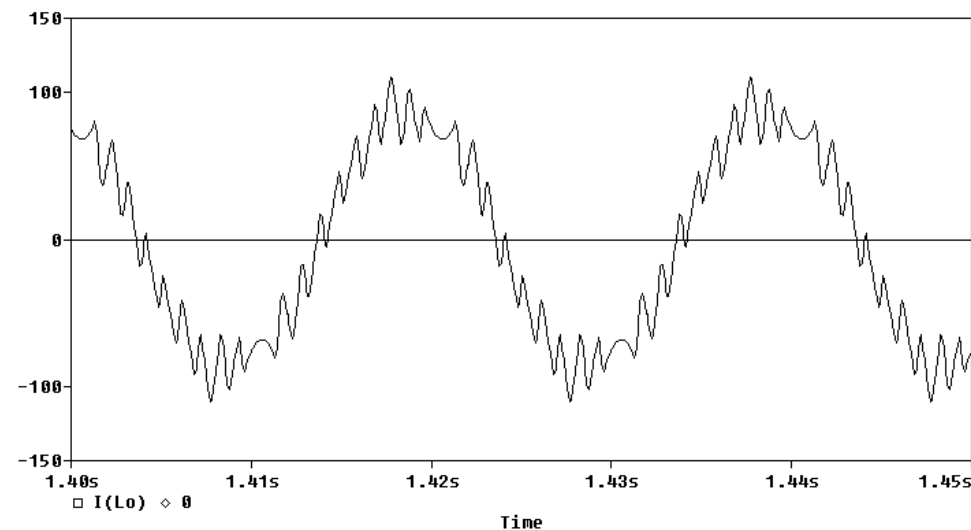
#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La figura 4.14 muestra la forma de onda para la corriente a través del compensador. La magnitud y fase de la fundamental de esta corriente se muestran en la tabla 4.6. El valor eficaz de la corriente fundamental es de 63A (ó 89.11A máximos) y la fase es de 111.7°.

De la ecuación (4.12) para el ángulo de carga de 20° se tiene una corriente fundamental a través del inversor dada por:

$$\hat{i}_o = \frac{2 \cdot V}{Z} \left[ 2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)} \right] \angle \left( \pi - \theta - \frac{\delta}{2} \right) = \frac{90.8}{\sqrt{2}} \angle 110.04^\circ \text{ A}$$

Luego, el error viene a ser del 1.86% para la magnitud y del -1.51% para la fase.



**Fig. 4.14**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

**Tabla N° 4.6**

\*\*\*\*\*  
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I (Lo)

DC COMPONENT = -8.580860E-05

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	8.911E+01	1.000E+00	1.117E+02	0.000E+00
2	1.000E+02	1.546E-04	1.735E-06	-9.526E+01	-3.186E+02
3	1.500E+02	5.232E+00	5.871E-02	-6.116E+01	-3.961E+02
4	2.000E+02	1.435E-04	1.610E-06	-1.551E+02	-6.018E+02
5	2.500E+02	3.236E+00	3.631E-02	-9.381E+01	-6.521E+02
6	3.000E+02	1.182E-04	1.326E-06	1.213E+02	-5.486E+02
7	3.500E+02	1.911E+00	2.144E-02	4.102E+01	-7.406E+02
8	4.000E+02	3.524E-04	3.955E-06	3.909E+01	-8.542E+02
9	4.500E+02	1.041E+00	1.169E-02	1.129E+02	-8.921E+02
10	5.000E+02	1.613E-04	1.810E-06	-4.843E+01	-1.165E+03
11	5.500E+02	3.097E+00	3.475E-02	-1.113E+02	-1.340E+03
12	6.000E+02	1.772E-04	1.988E-06	-3.685E+00	-1.344E+03
13	6.500E+02	1.341E+00	1.505E-02	-1.241E+02	-1.576E+03
14	7.000E+02	1.105E-04	1.240E-06	-7.409E+01	-1.637E+03
15	7.500E+02	9.908E-01	1.112E-02	1.581E+02	-1.517E+03
16	8.000E+02	2.991E-04	3.356E-06	1.362E+02	-1.650E+03
17	8.500E+02	4.577E+00	5.137E-02	9.656E+01	-1.802E+03
18	9.000E+02	8.102E-05	9.093E-07	-1.780E+02	-2.188E+03
19	9.500E+02	9.816E+00	1.102E-01	9.689E+01	-2.025E+03
20	1.000E+03	1.307E-04	1.467E-06	1.524E+02	-2.081E+03

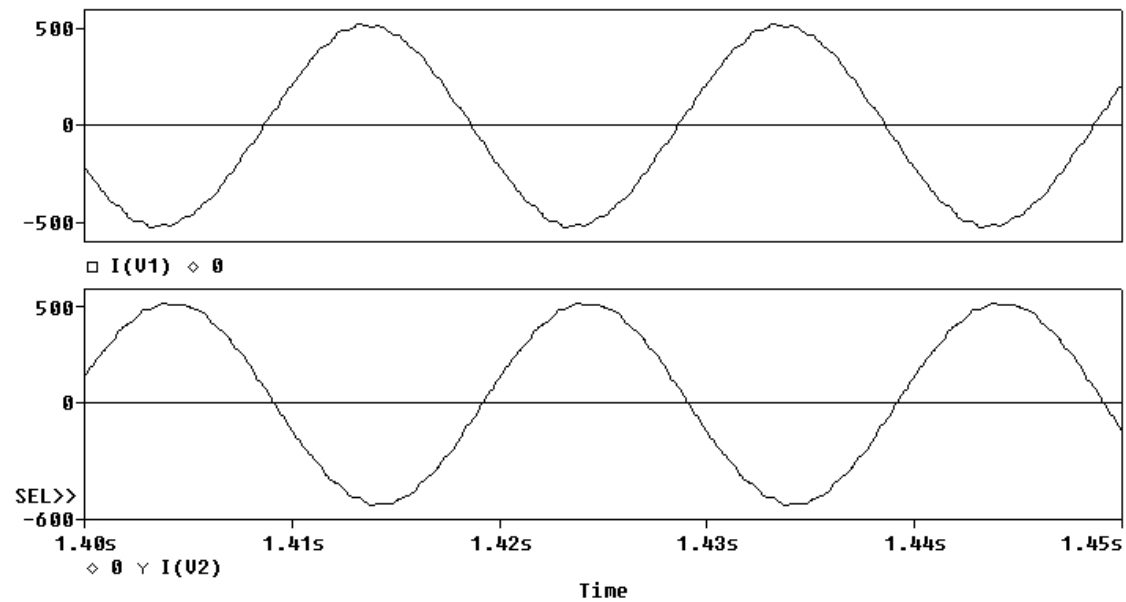
TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.472827E+01 PERCENT

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Finalmente, las formas de onda de las corrientes en la fuente y en la carga se muestran en la figura 4.15.



**Fig. 4.15**



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### 4.2.2 - Control de un STATCOM

Tal como fue explicado anteriormente, el intercambio de potencia reactiva del STATCOM con el sistema C.A es controlado regulando la amplitud de la tensión de salida del compensador de potencia. Si la amplitud de la tensión de salida del inversor es aumentada sobre la amplitud de la tensión de barra, la corriente fluye a través de la reactancia del transformador desde el STATCOM al sistema C.A y el dispositivo genera potencia reactiva (capacitiva).

Si la amplitud de la tensión de salida del STATCOM es disminuida a un nivel menor que la del sistema C.A, entonces la corriente fluye desde el sistema C.A al STATCOM, resultando que el dispositivo absorbe potencia reactiva (inductiva).

Si la amplitud de la tensión del STATCOM y del sistema C.A son iguales, la corriente reactiva es cero y el STATCOM no genera o absorbe potencia reactiva quedando en operación flotante.

En relación al control de tensión del condensador del lado continua, que debe comportarse como una fuente de tensión, esto es hecho por el propio inversor, simplemente controlando la fase de la tensión de salida del STATCOM en adelanto o en atraso respecto a la tensión del sistema C.A.

Cuando la tensión del inversor 'adelanta' la tensión de barra, el condensador 'suministra' potencia activa al sistema. Por otro lado, cuando la tensión del inversor 'atrassa' la tensión de barra, el condensador es cargado consumiendo potencia activa desde el sistema.

En régimen permanente, la tensión de salida del inversor ligeramente atrassa la tensión del sistema C.A, de este modo el inversor absorbe una pequeña cantidad de potencia activa desde el sistema C.A para compensar sus pérdidas internas y de esta forma, mantener constante la tensión del condensador.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### 4.2.2.1- Estrategia de Control

La base del control utilizado en este estudio, se basa en la transformación de Park, la cual permite descomponer los fasores trifásicos tanto de tensión como corriente de la red eléctrica, en dos componentes desacopladas entre sí, llamadas componente en eje directo “d” y componente de eje en cuadratura “q”. La componente en eje directo de la corriente, está íntimamente ligada con la potencia activa y la componente de eje en cuadratura, a su vez, está relacionada con la potencia reactiva. Este hecho es el que realmente hace idóneo el control vectorial para el STATCOM ya que al estar desacopladas las componentes d y q, son independientes entre sí y permiten hacer un control separado para las distintas partes del compensador. En las secciones siguientes se explican en detalle estas ideas.

##### - Transformada de Park

La transformada de Park es una transformación matemática que permite trasladar un sistema trifásico desde un marco de referencia estático, a un nuevo marco de referencia llamado marco de referencia rotatorio, el cual gira, junto con los nuevos fasores d y q, a la velocidad de sincrónica.

El hecho de que en este nuevo marco de referencia los fasores d y q giren, es una gran ventaja ya que estos nuevos fasores se pueden controlar como elementos “estáticos”. Matemáticamente la transformación de Park se aplica por medio de la matriz de Park dada, para este caso sentido anti-reloj de rotación en que el eje ‘d’ adelanta en 90 grados del eje ‘q’, por la ec. 4-21.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

$$[T_{dq0}] = [T] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}(\omega t) & \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

- Transformada inversa de Park

Al igual que las transformaciones algebraicas, la transformada de Park cuenta con su inversa, la cual permite trasladar los fasores en componentes d y q, nuevamente a las componentes trifásicas giratorias a, b y c.

Matemáticamente esta transformación inversa está dada por la siguiente expresión:

$$[T_{dq0}]^{-1} = [T]^{-1} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Modelo del sistema

Para una mejor visualización, se muestra una línea genérica de transmisión en su equivalente unilineal (figura 4-16). En base a este diagrama se muestran en detalle las partes del esquema de control aplicado al Inversor Multinivel Híbrido Simétrico como STATCOM. En donde  $\tilde{P}$  y  $\tilde{Q}$ , representan cargas cuyo consumo de potencia aparente es variable. En este diagrama se incluye el inversor conectado a la red. Éste cuenta además con un inductor ( $L_f$ ) que representa el total de reactancia en esa rama y el transformador de acoplamiento que es considerado ideal. Como se mencionó anteriormente el compensador se conecta a la barra central, entre los dos segmentos de línea, cuya tensión a controlar se denomina  $V_p$ . La tensión en los terminales del STATCOM se denomina  $V_o$ .

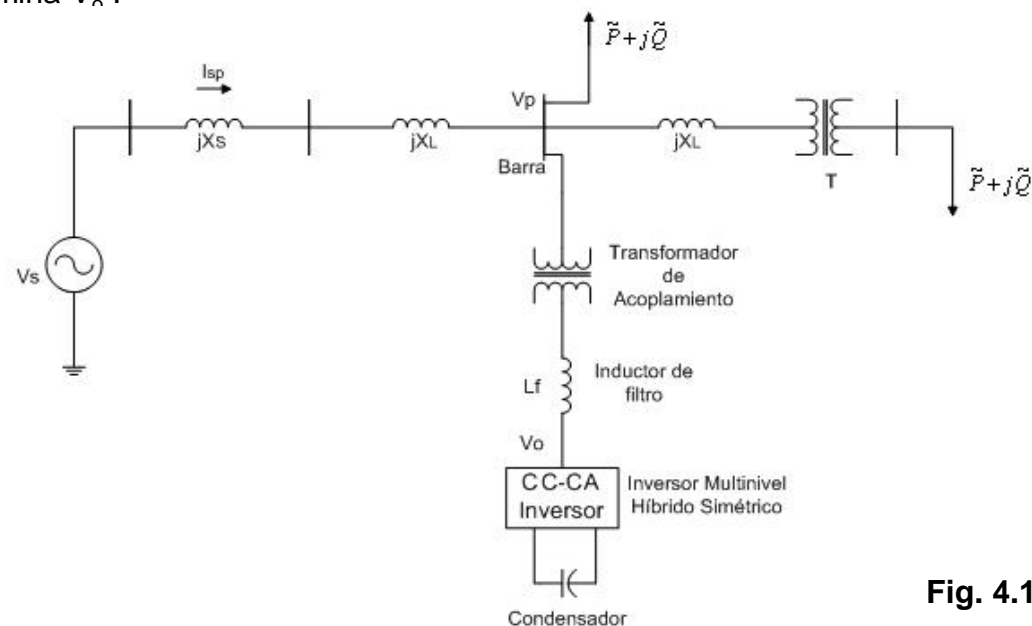


Fig. 4.16

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Obtención de las ecuaciones dinámicas del sistema

Las tensiones en la barra de conexión P (punto de conexión común), son las siguientes:

$$\begin{aligned}v_{a\_P} &= V_{ap} \text{sen}(\omega_s t) \\v_{b\_P} &= V_{bp} \text{sen}(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\v_{c\_P} &= V_{cp} \text{sen}(\omega_s t + \frac{2\pi}{3})\end{aligned}\tag{4.23}$$

Utilizando las leyes de Kirchhoff se definen las ecuaciones que rigen la dinámica de las corrientes en la rama de acoplamiento que se encuentra entre la barra P y los terminales de salida del Inversor, siendo:

$$\begin{aligned}v_{a\_P} &= i_a R_f + \frac{di_a}{dt} L_f + v_{a\_O} \\v_{b\_P} &= i_b R_f + \frac{di_b}{dt} L_f + v_{b\_O} \\v_{c\_P} &= i_c R_f + \frac{di_c}{dt} L_f + v_{c\_O}\end{aligned}\tag{4.24}$$

Matricialmente:

$$\begin{bmatrix} v_{a\_P} \\ v_{b\_P} \\ v_{c\_P} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{a\_O} \\ v_{b\_O} \\ v_{c\_O} \end{bmatrix}\tag{4.25}$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Donde  $I_{a,b,c}$  es la corriente en la rama de acoplamiento en la fase a, b, c,  $V_{a,b,c_o}$  es la componente de tensión fundamental que entrega el inversor en sus terminales en la fase,  $V_{a,b,c_p}$  es la tensión en la barra  $P$  de la fase a, b, ó c respectiva, y  $L_F$  con  $R_F$  son la inductancia y la resistencia del transformador de acoplamiento y el inductor de filtro unificados.

##### - Modelo dinámico en coordenadas d y q.

Para conseguir la simplificación de las ecuaciones descritas anteriormente en los ejes d y q, se debe aplicar la transformación de Park a la expresión (4-25), la cual se muestra nuevamente a continuación:

$$\begin{bmatrix} v_{a-p} \\ v_{b-p} \\ v_{c-p} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{a-o} \\ v_{b-o} \\ v_{c-o} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Aplicando la transformada se debería tener las ecuaciones siguientes:

$$\begin{bmatrix} v_{d-p} \\ v_{q-p} \\ v_{0-p} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d-o} \\ v_{q-o} \\ v_{0-o} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Con  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_o$  de la rama de acoplamiento, además sabiendo que:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad y \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Sin embargo, también se sabe que:

$$\begin{bmatrix} v_{d\_P} \\ v_{q\_P} \\ v_{0\_P} \end{bmatrix} = [T][T]^{-1} \begin{bmatrix} v_{d\_P} \\ v_{q\_P} \\ v_{0\_P} \end{bmatrix} = R_f [T][T]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + L_f [T] \frac{d}{dt} \left( [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right) + [T][T]^{-1} \begin{bmatrix} v_{d\_O} \\ v_{q\_O} \\ v_{0\_O} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Donde  $[T]$  y  $[T]^{-1}$  son las matrices de transformación de Park y transformación de Park inversa respectivamente, desarrollando (4.29), se tiene,

$$\begin{bmatrix} v_{d\_P} \\ v_{q\_P} \\ v_{0\_P} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + L_f [T] \left\{ \frac{d}{dt} ([T]^{-1}) \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + [T]^{-1} \cdot \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \right) \right\} + \begin{bmatrix} v_{d\_O} \\ v_{q\_O} \\ v_{0\_O} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Calculando y simplificando, la expresión (4-30) se puede reescribir como:

$$\begin{bmatrix} v_{d\_P} \\ v_{q\_P} \\ v_{0\_P} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + L_f \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{d\_O} \\ v_{q\_O} \\ v_{0\_O} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Se observa finalmente desde el modelo que existe un acoplamiento entre las corrientes de ambos ejes representada por  $\omega_s$ .

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Esquema de Control

El control del STATCOM consta de tres partes principalmente: El control de corriente, el control de tensión CA y el control de tensión CC. El control (o regulador) de corriente, es el encargado de mantener las corrientes dentro del rango de operación normal del inversor.

El control de tensión CA, es el encargado de mantener la magnitud de la tensión de la barra fija en el valor de referencia y que debe ser, idealmente, igual a la tensión nominal de la red. Este control está íntimamente relacionado con la componente de corriente de eje en cuadratura, la que a su vez, es la encargada de limitar la potencia reactiva absorbida o entregada por el inversor.

El control de tensión CC, es el encargado de mantener la tensión en el banco de condensadores, en el enlace continuo del inversor, igual al valor de referencia. Esta parte del control está íntimamente ligada a la componente de corriente de eje directo, la que a su vez, es la encargada de limitar la potencia activa absorbida o entregada por el inversor. Cabe destacar que esta potencia activa solo es la necesaria para cubrir las pérdidas en la rama de acoplamiento e inversor y con esto mantener cargado los condensadores del enlace continuo.

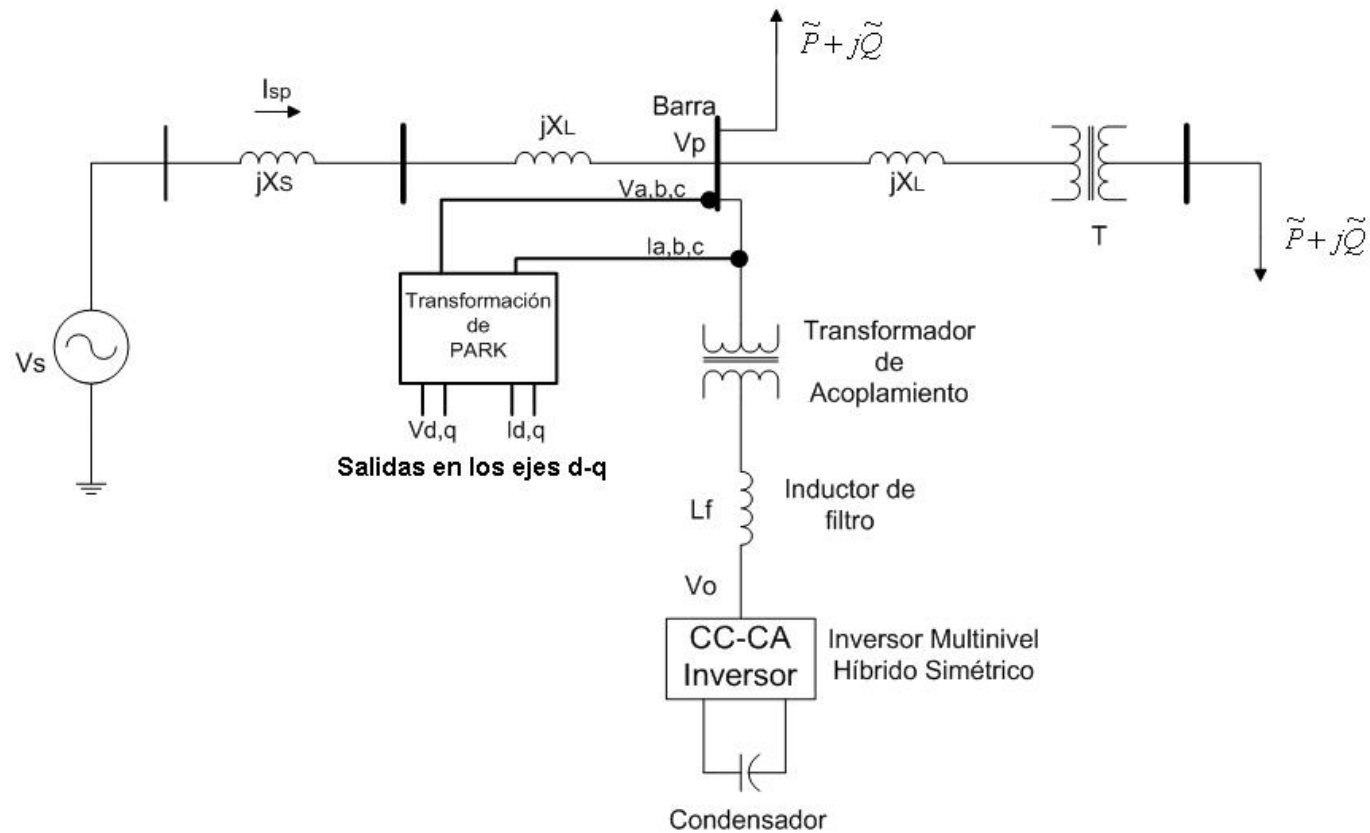
El primer paso es obtener las componentes, tanto de tensión como de corriente, en el eje de referencia de marco rotatorio  $d$  y  $q$  a través de la transformada de Park como muestra la figura 4-17. La corriente es obtenida desde la rama de acoplamiento y la tensión es obtenida de la barra 'P'. Al obtener estas componentes, se procede a alimentar el control que acciona finalmente al inversor. Cada una de estas partes se explica en las secciones posteriores.



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)



**Fig. 4.17**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Control de Corriente

La expresión (4-31) rige la dinámica de las corrientes en la rama de acoplamiento. Ésta a su vez depende tanto de la tensión en la barra 'P' como de la tensión en los terminales del inversor, con sus respectivas componentes en los ejes d y q. Rescribiendo por separado cada ecuación de esta expresión, se obtiene:

$$\begin{aligned}v_{d\_P} &= i_d R_f + \frac{di_d}{dt} L_f - \omega_s L_f i_q + v_{d\_O} \\v_{q\_P} &= i_q R_f + \frac{di_q}{dt} L_f + \omega_s L_f i_d + v_{q\_O} \\v_{0\_P} &= i_0 R_f + \frac{di_0}{dt} L_f + v_{0\_O}\end{aligned}\tag{4.32}$$

Reordenando y definiendo lo que tiene que ser compensado:

$$\begin{aligned}\mu_d &= \frac{di_d}{dt} L_f + i_d R_f = \omega_s L_f i_q + v_{d\_P} - v_{d\_O} \\\mu_q &= \frac{di_q}{dt} L_f + i_q R_f = -\omega_s L_f i_d + v_{q\_P} - v_{q\_O} \\\mu_0 &= \frac{di_0}{dt} L_f + i_0 R_f = v_{0\_P} - v_{0\_O}\end{aligned}\tag{4.33}$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Finalmente las señales moduladoras del inversor deben ser dadas por:

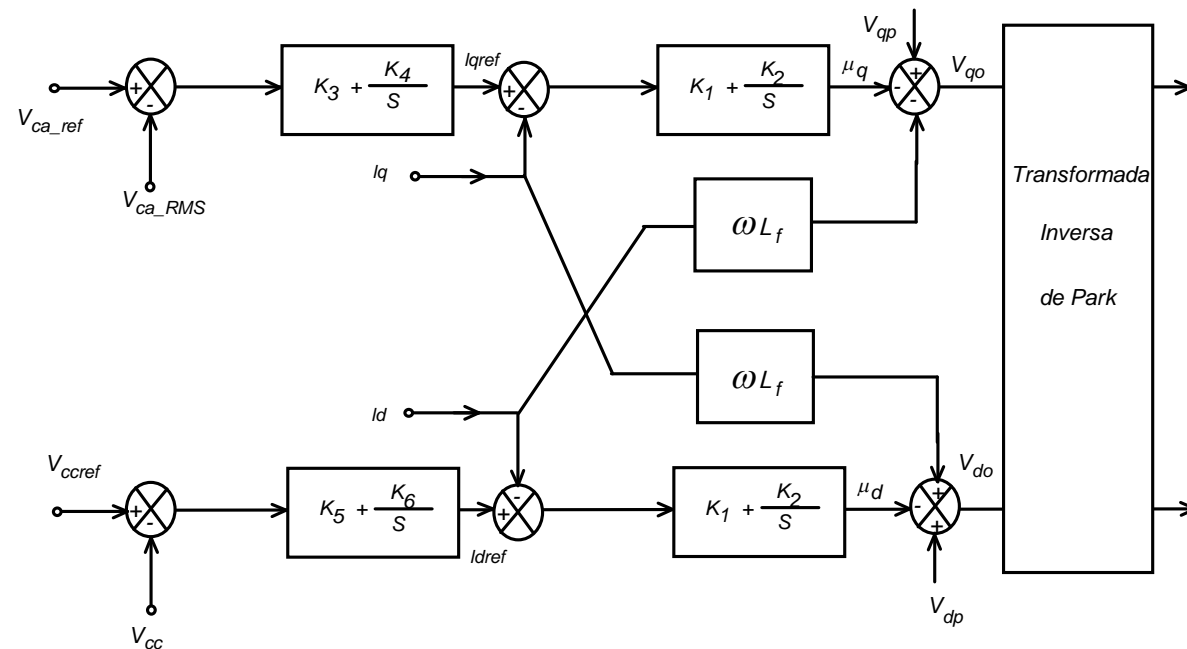
$$\begin{aligned}v_{d_o} &= -\mu_d + v_{d_p} + \omega_s L_f i_q \\v_{q_o} &= -\mu_q + v_{q_p} - \omega_s L_f i_d \\v_{0_o} &= -\mu_0 + v_{0_p}\end{aligned}\tag{4.34}$$

La expresión (4-34), es el inicio en la definición del regulador de corriente del circuito de control, en los ejes d y q. Donde las corrientes  $i_d$ ,  $i_q$  e  $i_o$  se obtienen al medir y aplicar la transformada de Park a la corriente en la rama de acoplamiento para después compararse con sus respectivos valores de referencia. Los términos  $v_{d_o}$ ,  $v_{q_o}$  e  $v_{0_o}$  representan la tensión de salida del inversor, y corresponden en el circuito de control, a las señales moduladoras en los ejes d y q que deberán, posteriormente, ser obtenidas en los ejes ABC después de la transformación de Park inversa. Los términos  $\mu_d$ ,  $\mu_q$ , e  $\mu_0$ , corresponden a la caída de tensión en la rama de acoplamiento, y son las que deben ser compensadas por el compensador, luego estas representan las tensiones de control que se obtienen a la salida de los controladores PI. Los términos  $v_{d_p}$ ,  $v_{q_p}$ , e  $v_{0_p}$ , corresponden a la tensión en la barra controlada, se obtienen sensándolas y aplicándoles la transformada de Park para luego ser comparados con el valor de referencia para la tensión  $v_o$ . Los términos  $\omega_s \cdot L_f \cdot I_{d,q}$ , se aplican por medio de lazos “feedforward”, restándose o sumándose dependiendo del signo con los que aparecen en la expresión. En la figura 4-18, se aprecia lo anteriormente explicado a través de un diagrama de bloques.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)



**Fig. 4.18**

De este circuito regulador de corriente son obtenidas las señales  $v_{q_o}$  y  $v_{d_o}$  que pasan a la transformada inversa de Park para obtener las señales moduladoras sinusoidales  $v_{a_o}$ ,  $v_{b_o}$  y  $v_{c_o}$ , las cuales accionarán, luego de ser comparadas con señales triangulares, cuya salida accionara a los dispositivos de conmutación del inversor multinivel híbrido simétrico.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Proyecto de los controladores PI del lazo de corriente.

Lo primero es obtener la función de transferencia de los lazos de corriente, se desea que las corrientes actuales tanto de eje directo como de eje en cuadratura sean iguales a un valor de referencia, por lo que se debe cumplir que:

$$\begin{aligned}i_q^* &= i_q \\i_d^* &= i_d\end{aligned}\tag{4.35}$$

Para error cero en la salida, entre el regulador y la rama de acoplamiento, que incluye el transformador y el inductor de filtro, para ambos lazos de corriente se debe cumplir con la siguiente igualdad:

$$i_q^* \left( K1 + \frac{K2}{s} \right) = i_q (R_f + sL_f) = \mu_q(s)\tag{4.36}$$

$$i_d^* \left( K1 + \frac{K2}{s} \right) = i_d (R_f + sL_f) = \mu_d(s)$$

Despejando se obtiene la Función de Transferencia en lazo abierto:

$$G_{LA} = \frac{i_q}{i_q^*} = \frac{i_d}{i_d^*} = \frac{\left( K1 + \frac{K2}{s} \right)}{(R_f + sL_f)}\tag{4.37}$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

En lazo cerrado se tiene:

$$G_{LC} = \frac{i_q}{i_q^*} = \frac{i_d}{i_d^*} = \frac{\left( K1 + \frac{K2}{s} \right)}{\left( R_f + sL_f \right)} = \frac{\left( K1 + \frac{K2}{s} \right)}{\left( R_f + sL_f \right) + \left( K1 + \frac{K2}{s} \right)} \quad (4.38)$$

Utilizando la cancelación polo cero, la cual consiste en igualar el tiempo integral del **PI** ( $K_1/K_2$ ) con la constante de tiempo del sistema de primer orden ( $L_f/R_f$ ), se tiene que:

$$K2 = \frac{R_f}{L_f} \cdot K1 \quad (4.39)$$

Realizando esta cancelación la función de transferencia en lazo cerrado se simplifica a:

$$G_{LC} = \frac{i_q}{i_q^*} = \frac{i_d}{i_d^*} = \frac{\frac{K1}{L_f}}{s + \frac{K1}{L_f}} \quad (4.40)$$

Se observa de esta ecuación que la frecuencia de cruce  $\omega_{cr}$ , para la función de transferencia en lazo cerrado del regulador de corriente, está dada por:

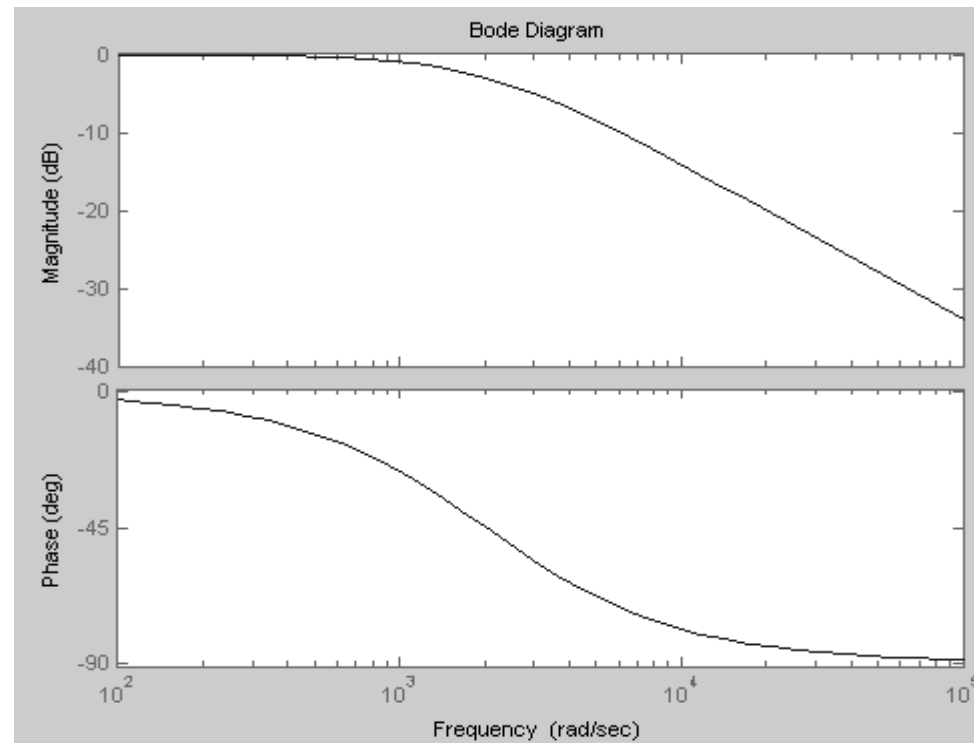
$$\omega_{cr} = \frac{K1}{L_f} \quad (4.41)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Realizándose el diagrama de Bode de esta función de transferencia, se tiene que es un sistema estable, con un margen de fase de  $90^\circ$ , esto se muestra en la figura 4-19. En la práctica, la frecuencia de cruce esta restringida por la frecuencia de la portadora de la modulación PWM (1600 [Hz] para este estudio), es decir tiene que ser menor a esta frecuencia.



**Fig. 4.19**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Como criterio inicial se trabaja en el presente estudio con una frecuencia de cruce  $\omega_{cr}$ , de un quinto de la frecuencia de la portadora.

Por lo tanto los valores para  $K_1$  y  $K_2$ , vienen dados por:

$$\omega_{cr} = \frac{K1}{L_f} = \frac{1}{5} \cdot 2\pi \cdot f_p \Rightarrow K1 = \omega_{cr} \cdot L_f \quad (4.42)$$

Desde donde:

$$K1 = \omega_{cr} \cdot L_f \quad (4.43)$$

Y sabiendo que:

$$K2 = \frac{R_f}{L_f} \cdot K1 \quad (4.44)$$

La ganancia del lazo “Feedforward”, viene dada de 4-34, como:

$$G_{f-f} = \omega_s \cdot L_f \quad (4.45)$$



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Control de Tensión CA.

Una variación de la componente en cuadratura de la corriente de referencia ( $I_q$ , corriente reactiva), produce solamente variación en la magnitud de la tensión de salida del inversor, y por ende, de la potencia reactiva entregada o absorbida por éste. Al encontrarse desacoplada de la componente del eje directo, dicha variación no produce un cambio en el lado continuo del inversor. El hecho de cambiar el valor de referencia  $i_{q\_ref}$ , y con esto obtener una variación en la magnitud de la tensión de la barra  $v_p$ , permite cerrar el lazo y controlar comparando con un valor de tensión de referencia deseado. La tensión obtenida de la barra P se filtra y se calcula su valor eficaz ( $V_{ca}$ ), se compara con la tensión de referencia, para luego ser regulada por el controlador PI. De aquí se obtiene la componente en cuadratura de la corriente de referencia. En la figura 4-20, se muestra el diagrama en bloque del control de tensión CA.

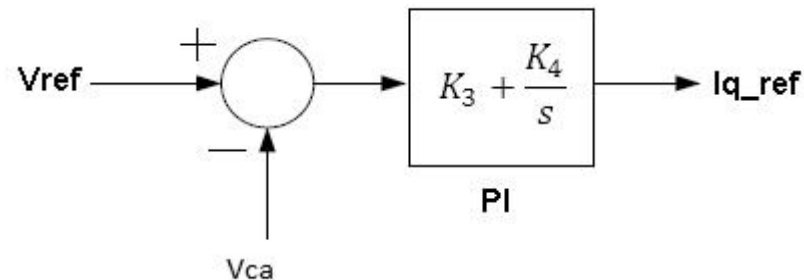


Fig. 4.20

Para este caso los factores  $K_3$  y  $K_4$ , se obtienen gracias a una herramienta computacional llamada rltool, cuyo funcionamiento se muestra en detalle en el ítem de simulaciones.

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Control de Tensión CC

Una variación en la componente en eje directo de la corriente de referencia ( $I_d$ , corriente real), produce una variación en la magnitud de la tensión de los condensadores del enlace continuo CC, esto debido a que el inversor absorbe o entrega potencia activa. En el caso de que la variación sea positiva y constante, los condensadores se cargan elevando su tensión hasta un valor en el cual los semiconductores de potencia se quemarían. En caso de ser una variación negativa y constante, los condensadores se descargan totalmente imposibilitando al inversor de poder entregar tensión a la red. Es importante destacar que el control de tensión CC, está desacoplado del control de tensión CA, ya que las componentes d y q de la corriente de referencia lo están. El hecho de variar la componente en eje directo de la corriente de referencia y obtener una carga o descarga de los condensadores, permite cerrar el lazo y controlar la tensión de referencia del lado continuo a un valor deseado, dentro de los márgenes de operación de los semiconductores. En la figura 4-21, se muestra el diagrama en bloque del control de tensión CC.

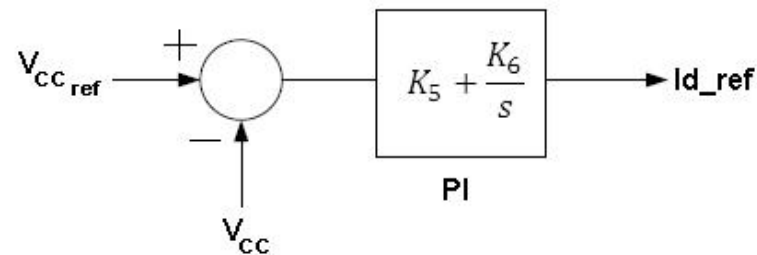


Fig. 4.21

Al igual que  $K_3$  y  $K_4$ , los factores  $K_5$  y  $K_6$ , se obtienen con la herramienta computacional llamada rltool.

--

--

--

**- Circuito de sincronismo PLL.**

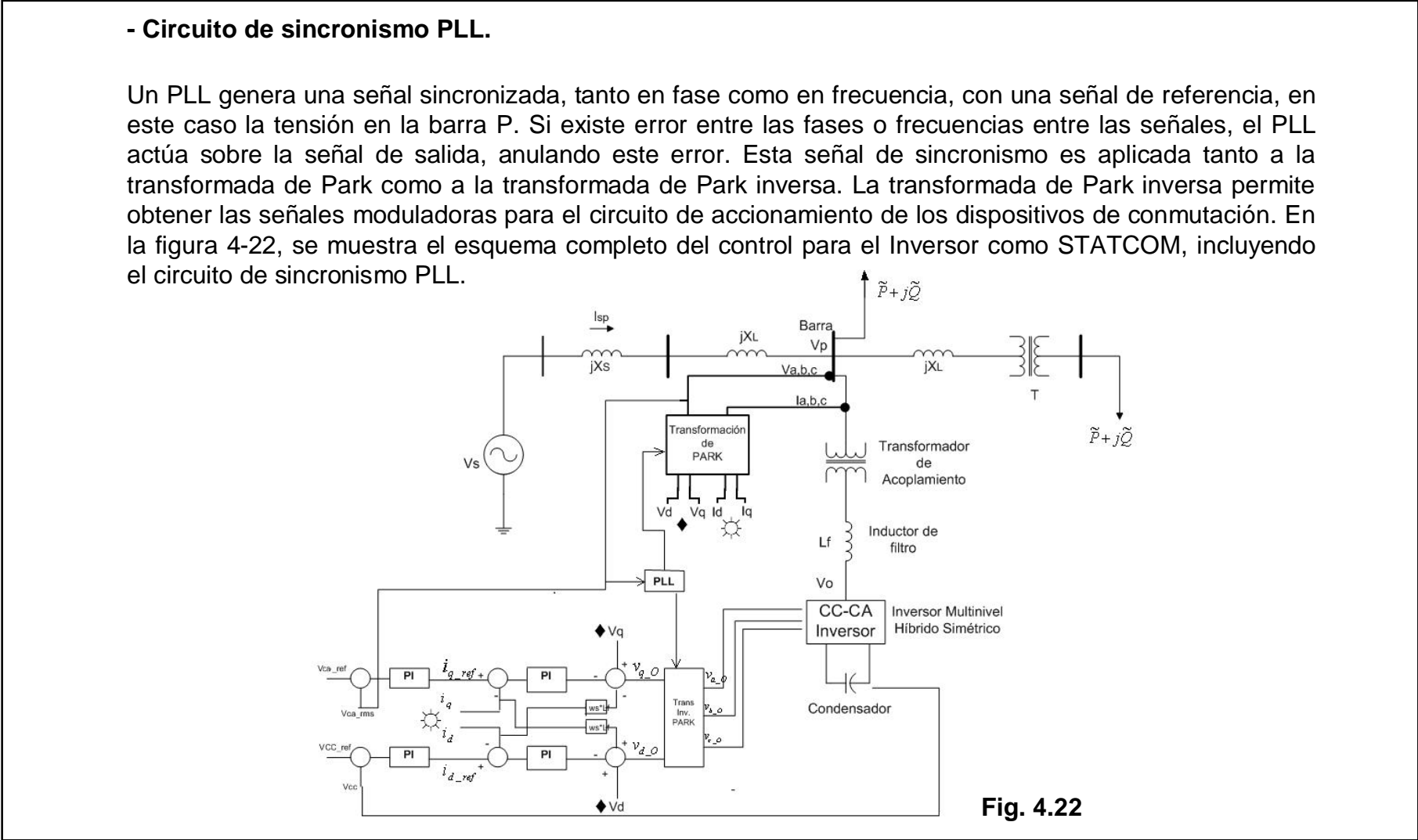
Un PLL genera una señal sincronizada, tanto en fase como en frecuencia, con una señal de referencia, en este caso la tensión en la barra P. Si existe error entre las fases o frecuencias entre las señales, el PLL actúa sobre la señal de salida, anulando este error. Esta señal de sincronismo es aplicada tanto a la transformada de Park como a la transformada de Park inversa. La transformada de Park inversa permite obtener las señales moduladoras para el circuito de accionamiento de los dispositivos de conmutación. En la figura 4-22, se muestra el esquema completo del control para el Inversor como STATCOM, incluyendo el circuito de sincronismo PLL.

**Fig. 4.22**

**- Circuito de sincronismo PLL.**

Un PLL genera una señal sincronizada, tanto en fase como en frecuencia, con una señal de referencia, en este caso la tensión en la barra P. Si existe error entre las fases o frecuencias entre las señales, el PLL actúa sobre la señal de salida, anulando este error. Esta señal de sincronismo es aplicada tanto a la transformada de Park como a la transformada de Park inversa. La transformada de Park inversa permite obtener las señales moduladoras para el circuito de accionamiento de los dispositivos de conmutación. En la figura 4-22, se muestra el esquema completo del control para el Inversor como STATCOM, incluyendo el circuito de sincronismo PLL.

**Fig. 4.22**



**- Circuito de sincronismo PLL.**

Un PLL genera una señal sincronizada, tanto en fase como en frecuencia, con una señal de referencia, en este caso la tensión en la barra P. Si existe error entre las fases o frecuencias entre las señales, el PLL actúa sobre la señal de salida, anulando este error. Esta señal de sincronismo es aplicada tanto a la transformada de Park como a la transformada de Park inversa. La transformada de Park inversa permite obtener las señales moduladoras para el circuito de accionamiento de los dispositivos de conmutación. En la figura 4-22, se muestra el esquema completo del control para el Inversor como STATCOM, incluyendo el circuito de sincronismo PLL.

Fig. 4.22

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Simulaciones en lazo cerrado.

Los aspectos vistos anteriormente son aplicados a una red simple de dos máquinas (figura 4-23) vía simulación. A través del programa “Matlab-Simulink” y específicamente de la caja de herramientas “SimPowerSystem”, se simulan los distintos escenarios.

Un ángulo de carga máximo ' $\delta_{\max}$ ' de  $30^\circ$  y una línea de cuatro kilómetros, son asumidos para determinar el valor de la rama de acoplamiento y del condensador del lado CC, además de otros elementos del control, siendo este ángulo considerado como caso extremo para el funcionamiento del STATCOM.

Cabe señalar que la tensión del lado continuo, es de valor 3600 [V], y le da a la componente fundamental de la tensión de salida su valor máximo. Dicha componente fundamental es elevada por el transformador de la rama de acoplamiento hasta el valor nominal línea a línea de la red, que bordea los 15000 [V].

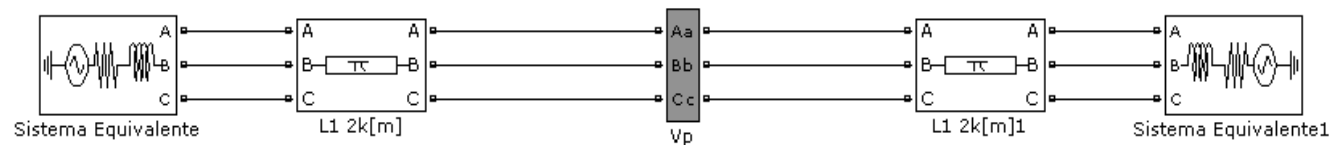


Fig. 4.23

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

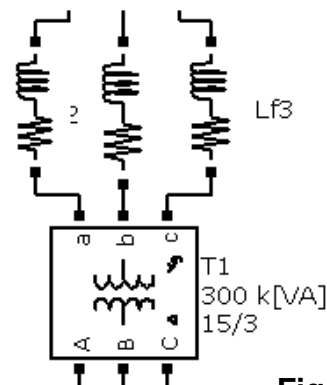
La rama de acoplamiento que une el inversor con la red a compensar, está conformada de dos elementos principalmente: El inductor de filtro y el transformador de acoplamiento.

El transformador de acoplamiento utilizado es un transformador Delta-estrella de conexión Dy11, cuya razón de transformación es  $a=5$ . Es importante señalar que este transformador produce un desfase de  $30^\circ$  entre las tensiones primaria y secundaria, lo cual debe ser compensado con un desfase de  $-30^\circ$  en la transformación de Park inversa, para evitar problemas con el control. La inductancia equivalente debe ser incluida como parte del inductor de filtro de corriente.

Los valores para realizar los cálculos del inductor de la rama de acoplamiento vienen dados de la red como:

$$V_{LLrms} = 15000[V] \quad f = 50[Hz] \quad \delta_{max} = -30^\circ \quad f_{Port} = 1600[Hz] \quad V_{DC} = 3600[V]$$

$$\delta_{nom} = -15^\circ \quad \delta_{min} = -5^\circ$$



**Fig. 4.24**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

El bloque del transformador es mostrado en la figura 4-24. Se sabe que la tensión máxima que se reflejara para el lado de alta tensión será de  $V_{dc}=18000[V]$ , dado que la razón de transformación del transformador de acoplamiento es  $a=5$ . También se sabe que  $f_{port}=1600[Hz]$ .

De cada mitad de la línea se tiene:  $\frac{R}{2} = 0,31012 \left[ \frac{\Omega}{km} \right] \cdot 2[km] = 0,62024[\Omega]$

$$\therefore R = 0,62024[\Omega] \cdot 2 = 1,24[\Omega]$$

$$\frac{L}{2} = 0,0011421 \left[ \frac{H}{km} \right] \cdot 2[km] = 2,2842[mH]$$

$$\therefore L = 2,2842[mH] \cdot 2 = 4,57[mH]$$

Al incluir las impedancias de fuente de los extremos, se calculan los valores totales de línea como:

$$L_t = 2 \cdot 0,00716 + 4,57 \cdot 10^{-3} = 18,89 [mH]$$

Luego:

$$X_t = 2\pi \cdot 50[Hz] \cdot 18,89[mH] = 5,935 [\Omega]$$

Para la resistencia:

$$R_t = 2 \cdot 0,15 + 1,24 = 1,54 [\Omega]$$

Finalmente:

$$Z_{linea-total} = 6,132 \angle 75,4543^\circ [\Omega]$$

De la ecuación (4-13), se calcula la corriente máxima en la rama del inversor:

$$|\hat{i}_o|_{\max} = \frac{2 \cdot V}{Z} \cdot [2 - \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos(\delta)}]$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

$$\left| \hat{i}_o \right|_{\max} = \frac{2 \cdot 15000 / \sqrt{3}}{6,132} \cdot \left[ 2 - \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos(30)} \right]$$

$$\left| \hat{i}_o \right|_{\max} = 192,501 \text{ [A]}$$

Imponiendo una ondulación del 10%, se calcula:

$$\Delta \hat{i}_{o \max} = 0,1 \cdot \sqrt{2} \cdot \left| \hat{i}_o \right|_{\max}$$

$$\Delta \hat{i}_{o \max} = 27,22388 \text{ [A]}$$

Luego reemplazando en (4-20), se obtiene el inductor de filtro de corriente como:

$$L_0 = 51,655 \text{ [mH]}$$

La resistencia de la rama de acoplamiento dada es de 8 [mΩ].

- Cálculo del regulador de corriente del lazo de corriente:

De la ecuación (4-42), se calcula:

$$\omega_{cr} = \frac{1}{5} \cdot \omega_p = \frac{1}{5} \cdot 2\pi \cdot f_p$$

$$\omega_{cr} = 2010.19 \text{ [rad/seg]}$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Luego, de la ecuación (4-43), se calcula  $K_1$ , siendo:  $K_1 = 103,8585$

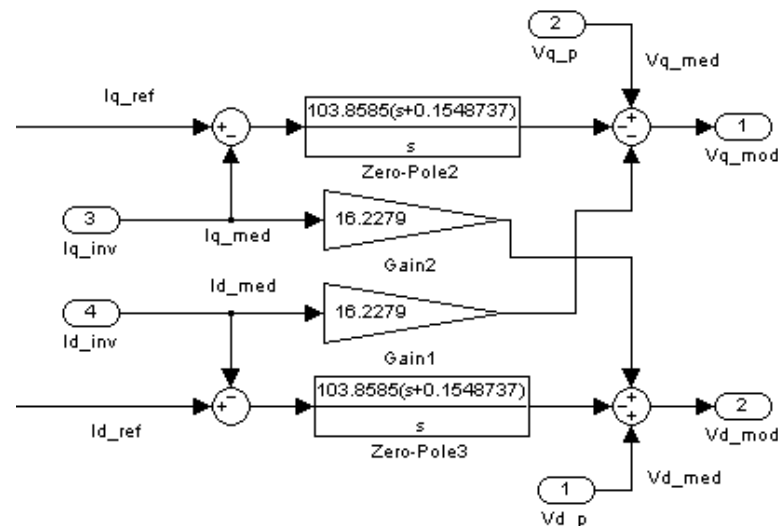
De la ecuación (4-44), se tiene  $K_2$ , siendo:  $K_2 = 16,0849482$

Finalmente el controlador PI para el regulador de corriente es:  $G_{C\_DC} = 103,8585 \cdot \frac{(0,1548737 + s)}{s}$

La ganancia del lazo feedforward viene dado por (3-25), y se calcula como:

$$G_{f-f} = \omega_s \cdot L_f = 2\pi \cdot 50 \cdot 51,655 \cdot 10^{-3} = 16,2279$$

En la figura 4-25, se aprecia el circuito implementado en “Simulink” con los valores calculados anteriormente:



**Fig. 4.25**



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

- Determinación del controlador PI para el lazo de tensión CA.

Como se mencionó anteriormente, una variación de la componente en eje de cuadratura de la corriente, produce un cambio en la magnitud de la tensión de salida del inversor sin influir en la tensión del lado continuo de éste, por estar desacoplada de la componente en eje directo. Este hecho es el que se utiliza para la obtención de la función de transferencia que gobierna la dinámica de la tensión en la barra.

Gracias a la herramienta computacional “System Identification Toolbox”, se logra estimar la función de transferencia de la planta requerida para poder controlar la tensión de la barra P.

Por otra parte y luego de obtener la función de transferencia, se procede a diseñar el controlador PI, a través de otra herramienta computacional llamada “Control System Toolbox”. Con la ayuda de estas herramientas, se obtiene una función de transferencia del sistema para la tensión CA en la barra, dada por:

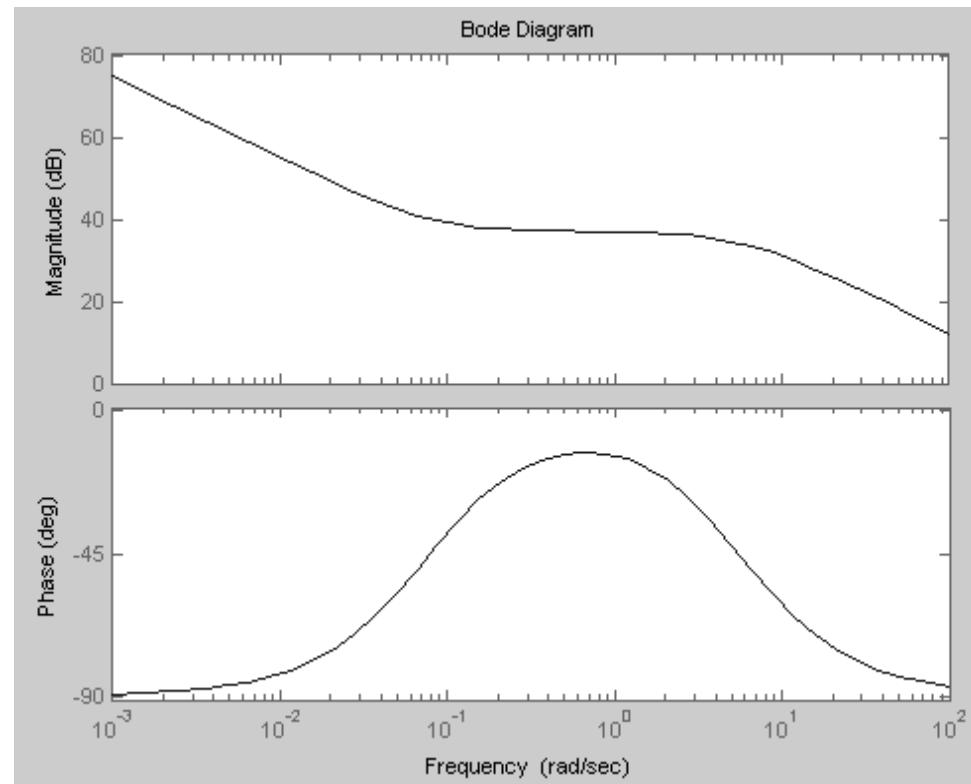
$$G_{CA} = \frac{405,6s + 31,16}{s^2 + 5,693s + 4,106 \cdot 10^{-6}} \quad (4.46)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

El diagrama de Bode de dicha función de transferencia se muestra en la figura 4-26.



**Fig. 4.26**

## Capítulo 4

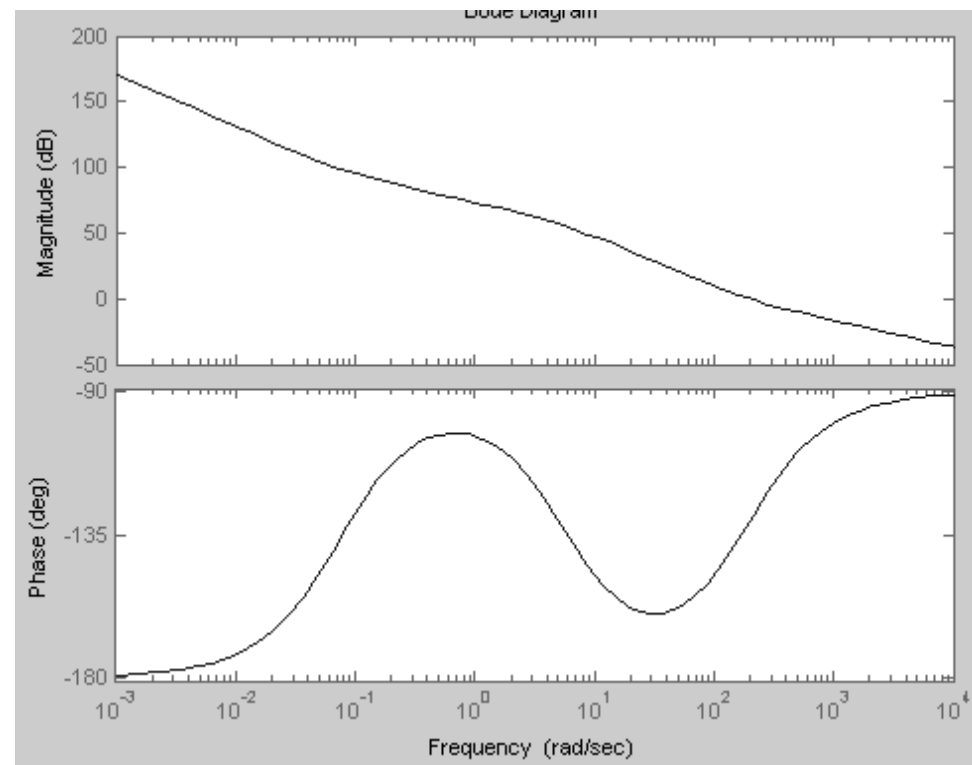
### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Y el controlador PI diseñado es:

$$G_{C_{CA}} = \frac{0,356103(s + 181,8182)}{s} \quad (4.47)$$

El diagrama de Bode del lazo, incluyendo el controlador, se muestra en la figura 4-27.



**Fig. 4.27**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Al obtener el controlador PI se procede a cerrar el lazo de control de la tensión en la barra. Como se logra apreciar en la figura 4-27, la tensión de referencia para la barra es  $15000/\sqrt{3}$  [V], lo cual es aproximadamente 8660 [V] eficaces por fase.

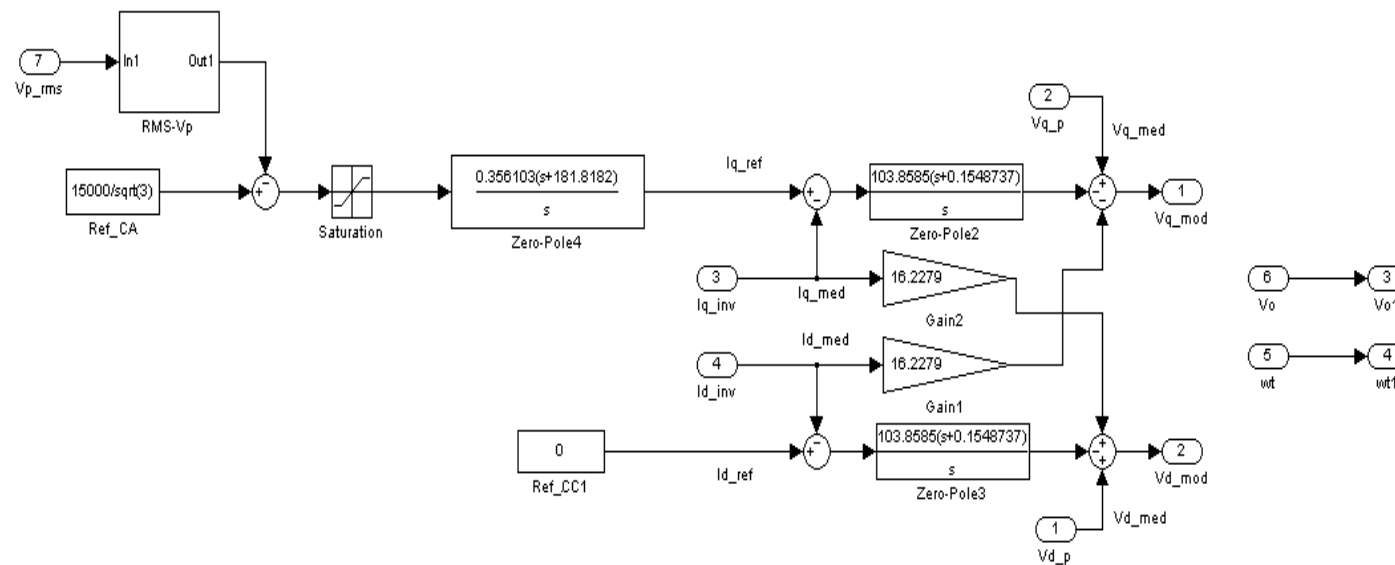


Fig. 4.27

## Capítulo 4

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

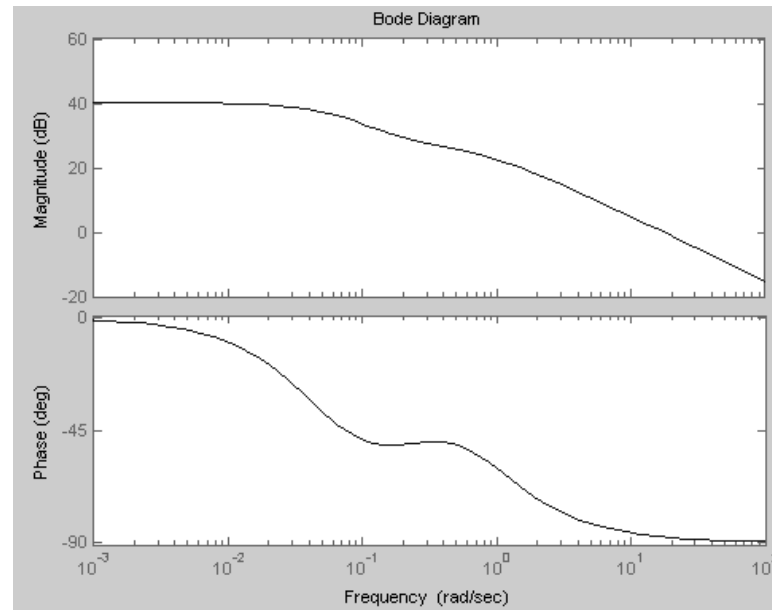
#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

- Determinación del controlador PI para la tensión CC.

Siguiendo un procedimiento similar al realizado para la obtención de la función de transferencia CA, se obtiene la función de transferencia del sistema para el lazo CC, la cual viene dada por:

$$G_{CC} = \frac{17,3s + 4,388}{s^2 + 0,925s + 0,04303} \quad (4.48)$$

Cuyo diagrama de Bode se muestra en la figura 4-28



**Fig. 4.28**

## Capítulo 4

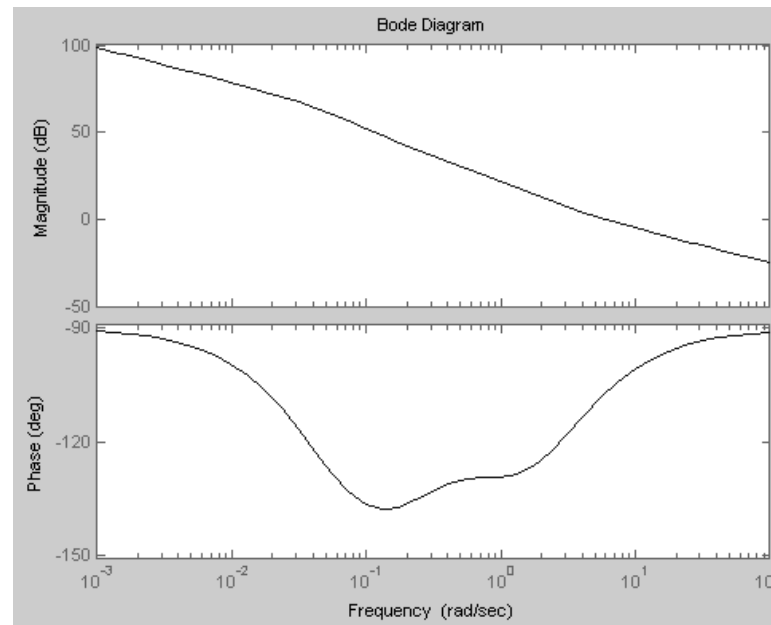
### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Con la obtención de la función de transferencia CC, y utilizando “Control System Toolbox”, se sintoniza el controlador PI, dado por:

$$G_{CC} = \frac{0,3183792(s + 2,631579)}{s} \quad (4.49)$$

La figura 4-29, se muestra el diagrama de Bode del lazo de control de la tensión CC, incluyendo el controlador PI



**Fig. 4.29**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Obteniendo el controlador para la tensión del lado CC en el banco de condensadores, se procede a cerrar el lazo de control CC, como muestra la figura 4-30.

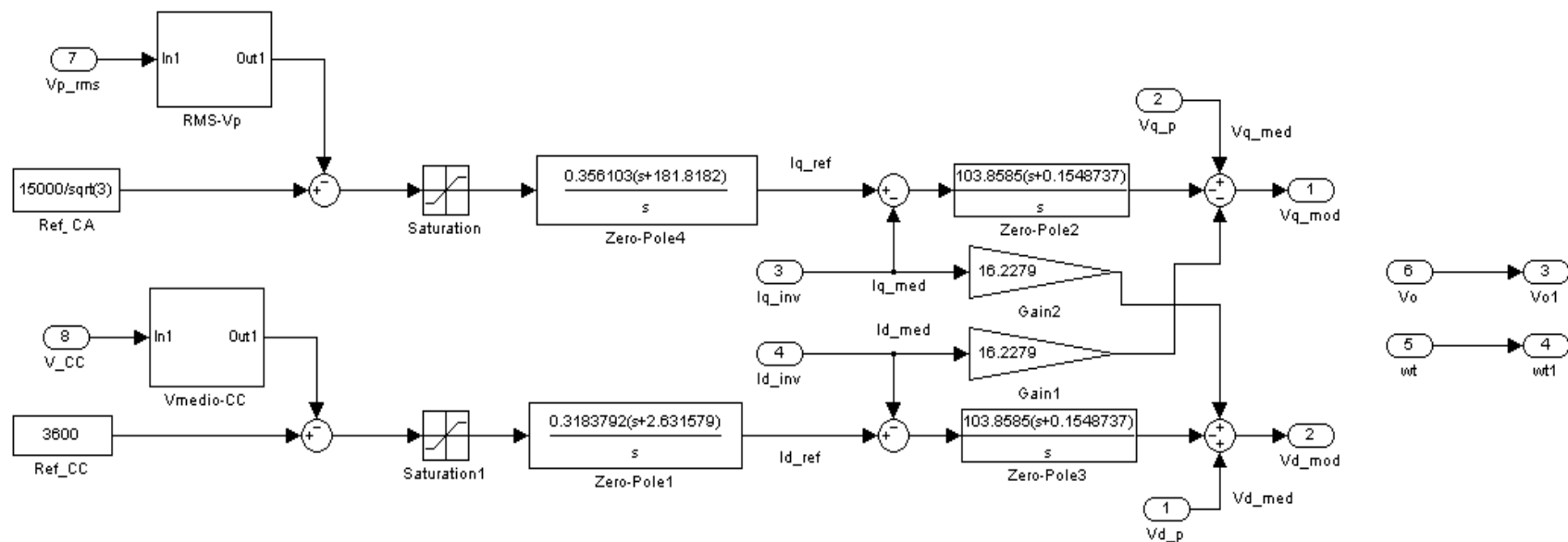


Fig. 4.30

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### - Resultados de simulación

En la presente sección se presentan los resultados obtenidos vía simulación para la red de dos máquinas mostrada en la figura 4-31. En esta red se aprecia el circuito PLL (1, en verde), la transformación de Park directa (2, en marrón), el circuito de control propiamente tal (3, en rojo), la transformación de Park inversa (4, también en marrón), los filtros (5, en gris), el inversor multinivel híbrido simétrico, IMHS (6, en azul), la rama de acoplamiento (7, en blanco) y la red eléctrica de dos máquinas (8, también en blanco).

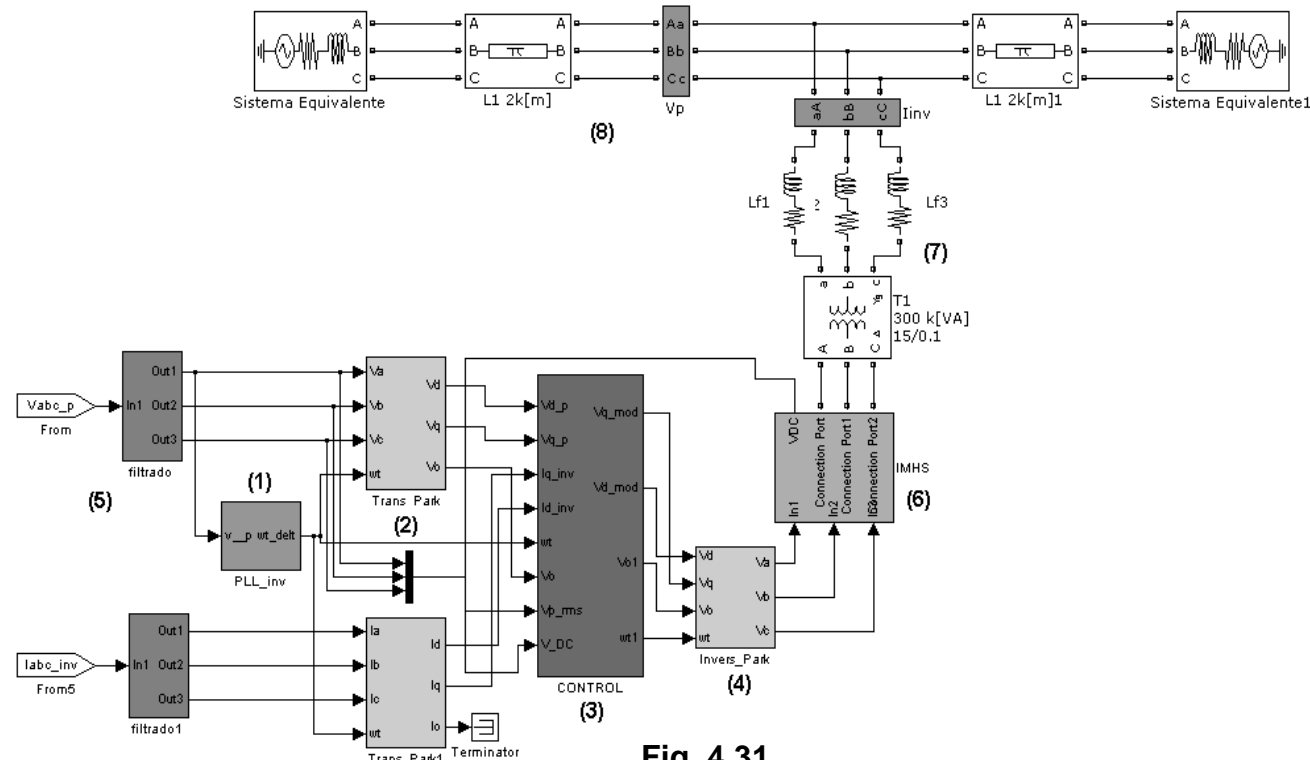


Fig. 4.31



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Son simulados los tres grados de carga, para los cuales se obtienen tensiones, corrientes y potencias, además se verifica si están dentro de los valores estimados. El STATCOM funciona en estos casos de manera capacitiva ya que eleva la tensión en la barra hasta el valor de referencia. Teniendo presente que para un sistema trifásico balanceado, la componente cero de la transformación de Park es nula, la potencia activa total en los ejes  $d$  y  $q$  se puede reescribir de la siguiente forma:

$$P = \begin{bmatrix} v_d & v_q & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ó finalmente,

$$P = \frac{3}{2} \cdot i_d \cdot v_d + \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot v_q \quad (4.50)$$

Igualmente se calcula la potencia reactiva teniendo en cuenta que la corriente adelanta a la tensión en  $90^\circ$ , está en referencia carga lo que significa que si es negativa es capacitiva y si es positiva es inductiva:

$$Q = \begin{bmatrix} v_d & v_q & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) & 1 \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) & 1 \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ó finalmente,

$$Q = \frac{3}{2} \cdot i_d \cdot v_q - \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot v_d \quad (4.51)$$

## Capítulo 4

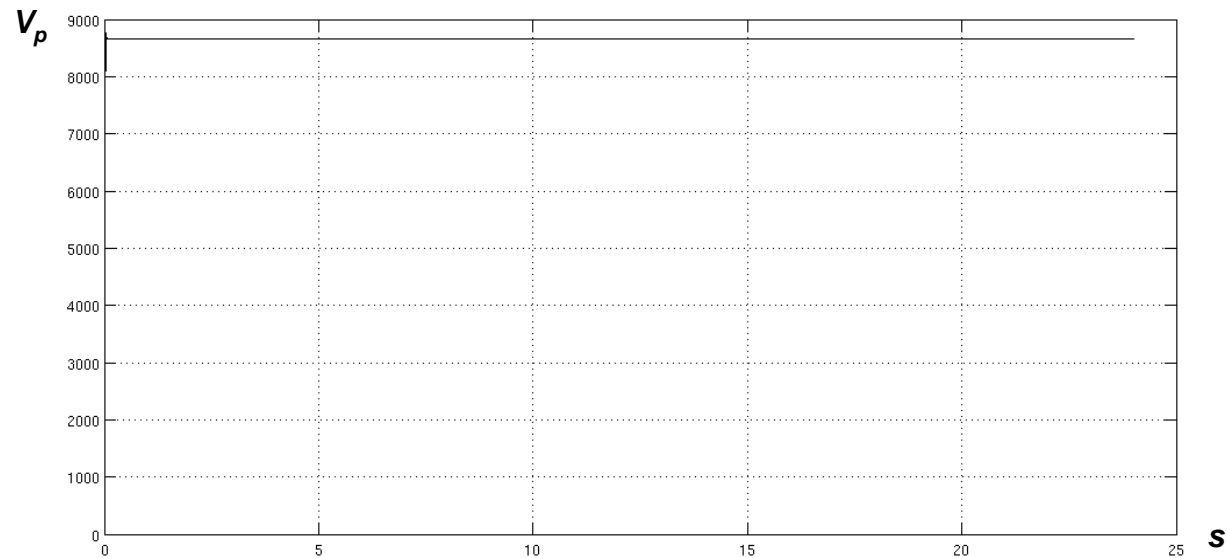
### Controladores FACTS: Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

A continuación se muestran los resultados para los tres grados de carga en la red de dos máquinas.

##### a.- Grado de carga mínimo $\delta_{\min}=5^\circ$

La Fig. 4.32 muestra el valor de la tensión eficaz de fase en la barra P, la cual tiene el mismo valor de la tensión de referencia del control (8660 [V]), demostrando que éste está bien sintonizado.



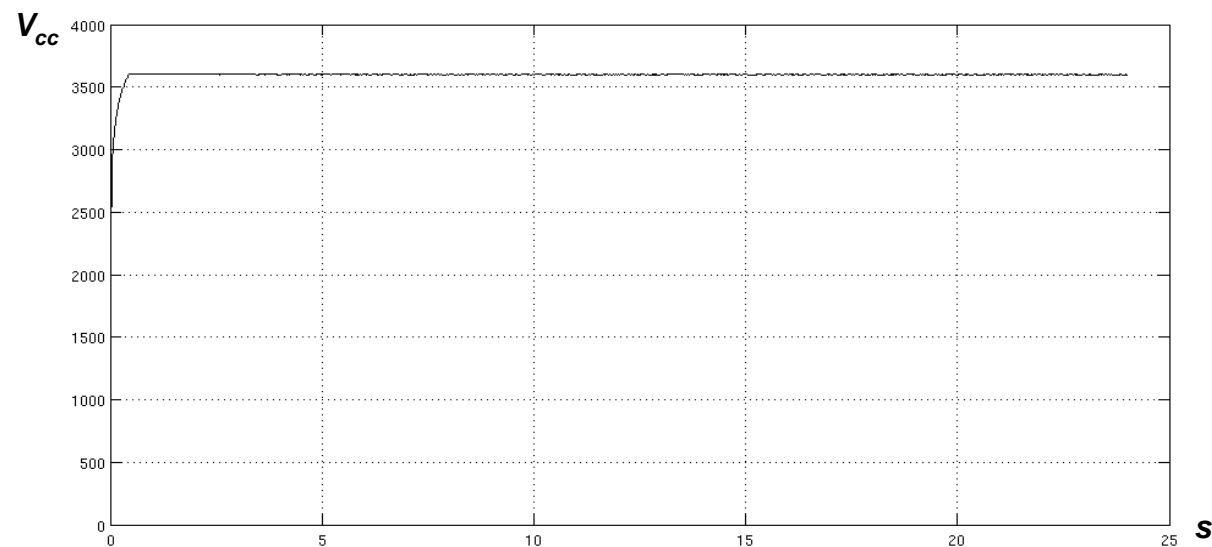
**Fig. 4.32**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La tensión media en el lado continuo del inversor se muestra en la figura 4-33. Esta tiene el valor de la referencia del control (3600 [V]) en todo el tiempo de simulación lo cual demuestra que el controlador de este lazo también está bien sintonizado.



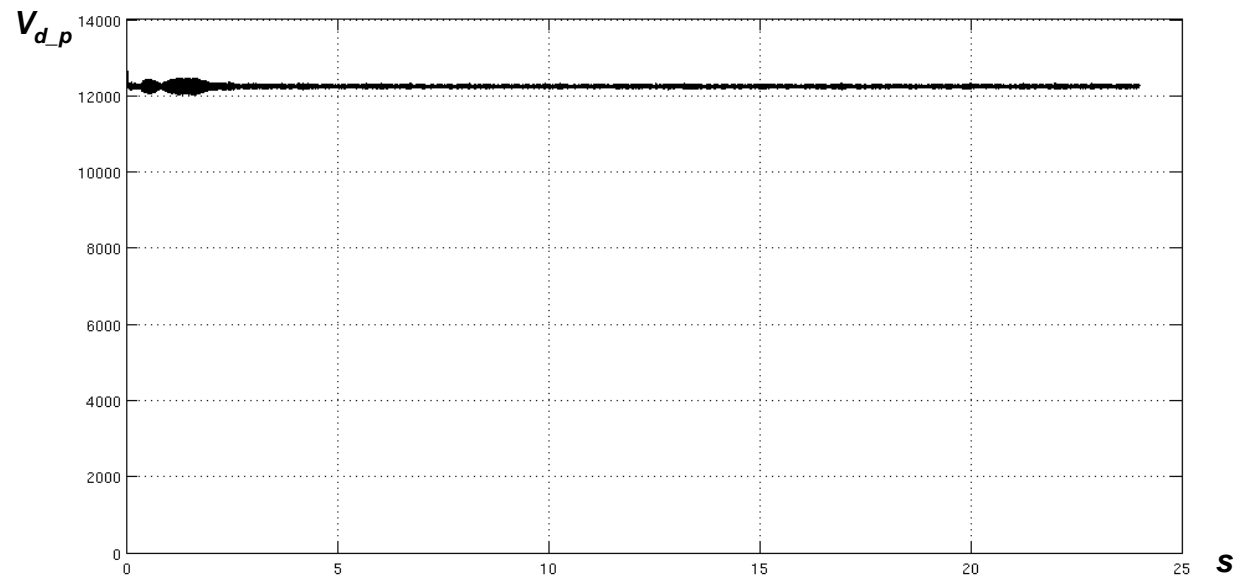
**Fig. 4.33**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La componente de tensión de la barra en el eje directo  $V_{d_p}$  se muestra en la figura 4-34. Esta tiene un valor de 12247 [V] que es igual al máximo de la tensión de fase en la barra y que también se mantiene estable durante todo el tiempo de simulación. La componente de tensión en el eje en cuadratura ( $V_{q_p}$ ) es cero.



**Fig. 4.34**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las corrientes en eje directo ( $I_d$ ) como en eje de cuadratura ( $I_q$ ) que circulan entre el inversor y la barra se muestran en la figura 4-35. Se puede observar que la componente en eje directo de la corriente tiene valor aproximado de cero, ya que hay mínimo intercambio de potencia activa entre el STATCOM y la red eléctrica. Por otro lado, la componente en eje en cuadratura tiene un único valor de 7,7 [A] durante todo el tiempo de simulación.

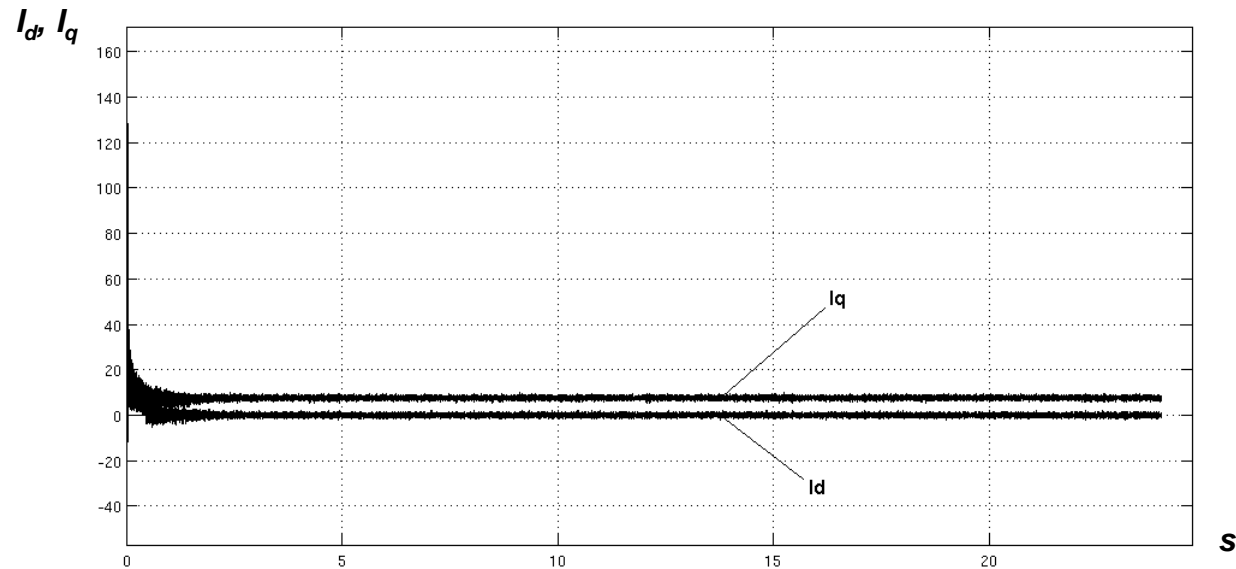


Fig. 4.35

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las potencias tanto activa como reactiva que son intercambiadas entre el inversor y la red se muestran en la figura 4-36. En dicha figura se aprecia que la potencia activa intercambiada entre el inversor y la red, es cuasi cero durante todo el tiempo de simulación. Por otro lado, la potencia reactiva presenta un único valor de 143,5 [kVar] durante todo el tiempo de simulación, además como  $i_d$  es aproximada a cero indica que es reactiva capacitiva.

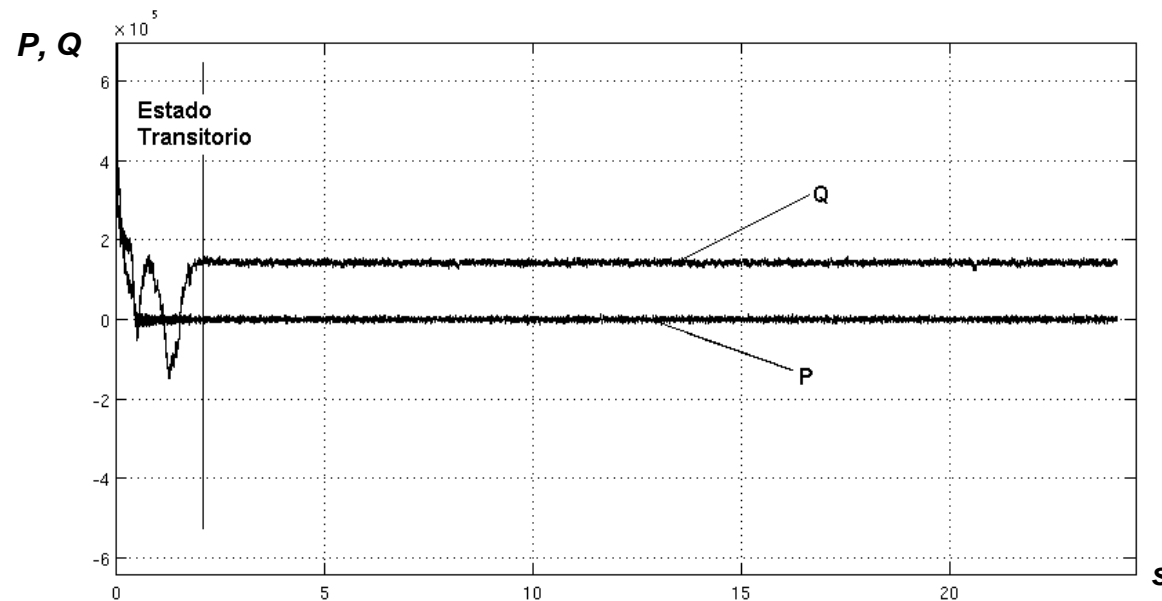


Fig. 4.36

El valor de esta potencia reactiva puede ser comprobado aplicando la ecuación 4-51, es importante destacar que esta es la potencia reactiva total suministrada por el STATCOM a la red.

$$|Q| = \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot v_d = \frac{3}{2} \cdot 7,7 [A] \cdot 1,225 \cdot 10^4 [V] \quad \text{ó,} \quad |Q| = 1,435 \cdot 10^5 [VA]$$

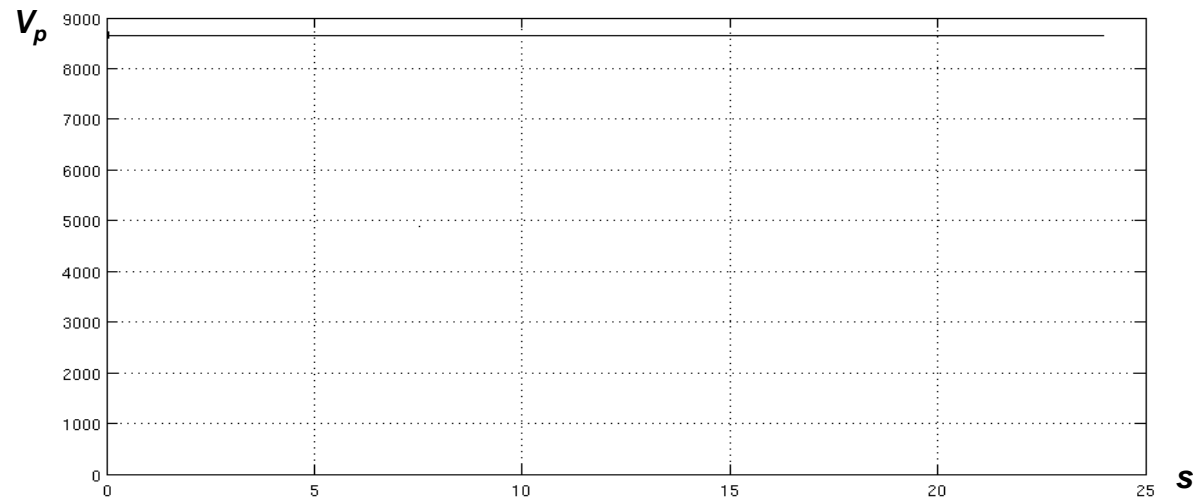
## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### **b.- Grado de carga nominal $\delta_{\text{nom}}=15^\circ$ .**

La figura 4-37, muestra el valor de la tensión eficaz de fase en la barra P, la cual tiene el mismo valor de la tensión de referencia del control (8660 [V]), esto indica que para todo el tiempo de simulación, la magnitud de la tensión en la barra tiene el valor de tensión de los extremos de la red, consiguiendo así el objetivo de estabilizar la tensión  $V_p$ .



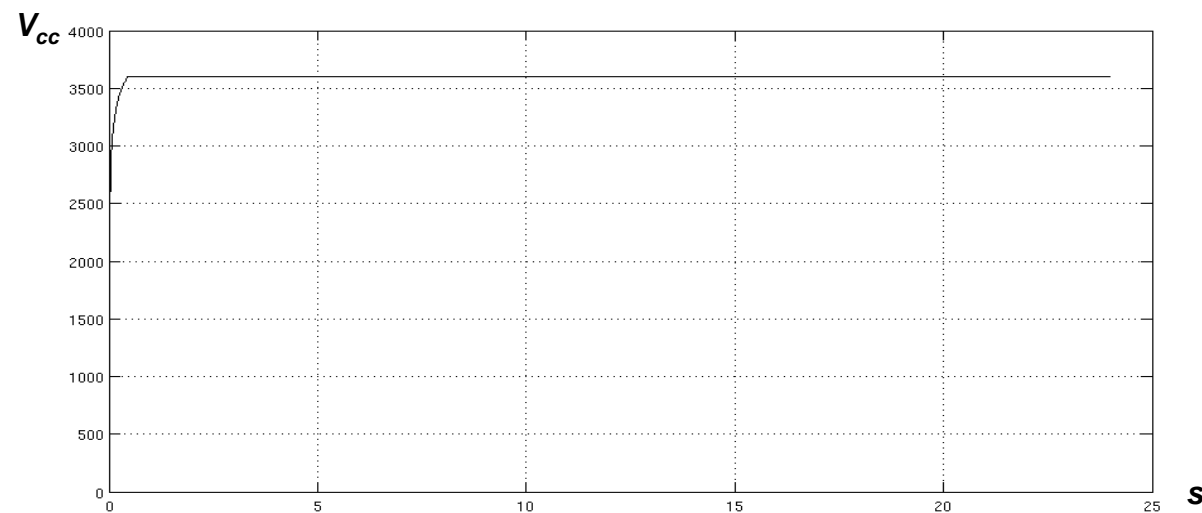
**Fig. 4.37**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La tensión media en el lado continuo del inversor se muestra en la figura 4-38. Esta tiene el valor de la referencia del control (3600 [V]) en todo el tiempo de simulación, demostrando que para este grado de carga el control se comporta sin problemas.



**Fig. 4.38**

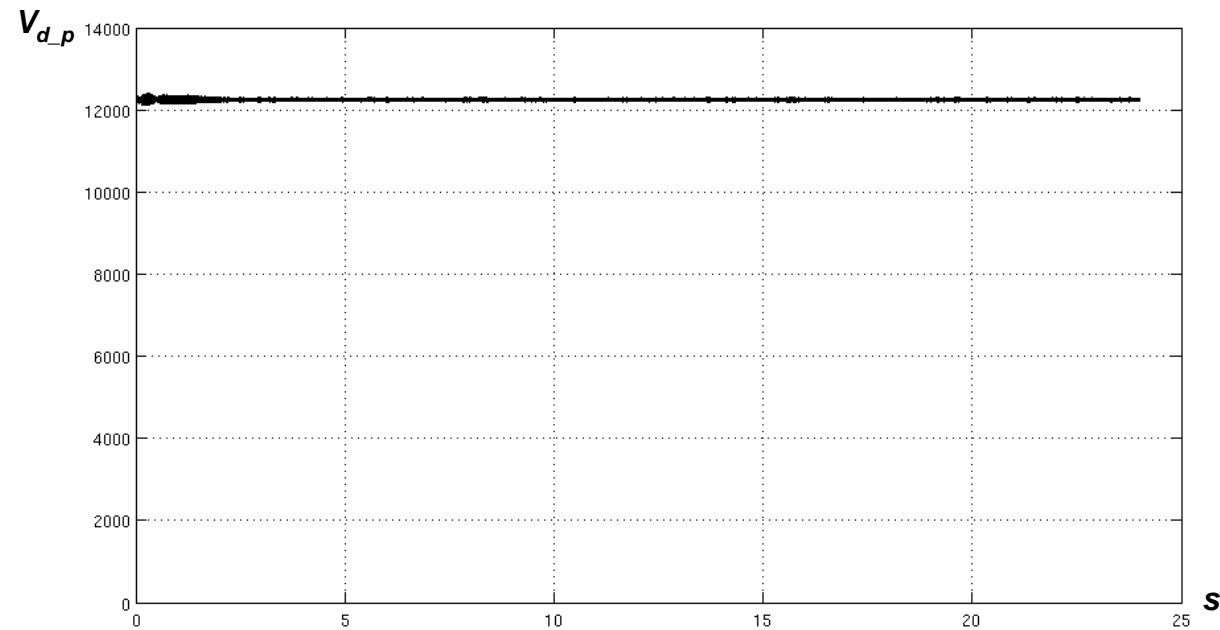


## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La componente de tensión de la barra, en el eje directo  $V_{d_p}$ , se muestra en la figura 4-39. Esta tiene un valor de 12247 [V] que es igual al máximo de la tensión de fase en la barra y que también se mantiene con baja ondulación.



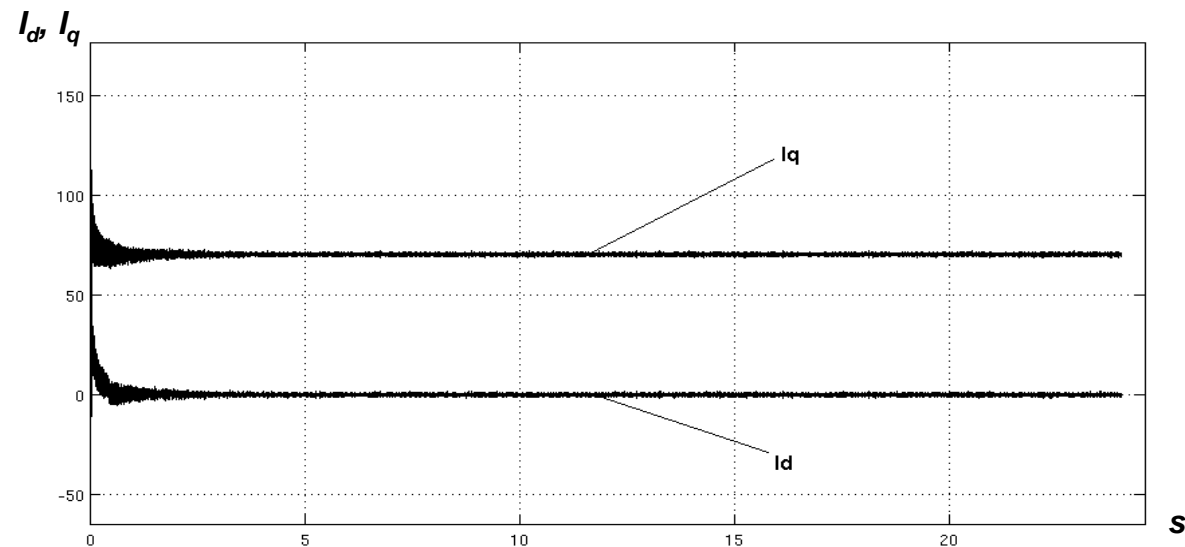
**Fig. 4.39**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las corrientes en eje directo así como en eje de cuadratura que circulan entre el inversor y la barra se muestran en la figura 4-40. Nuevamente se observa que la componente en eje directo de la corriente tiene valor aproximadamente cero ya que hay cuasi nulo intercambio de potencia activa entre el STATCOM y la red eléctrica. Por otro lado, la componente en eje en cuadratura tiene un único valor de 70,5 [A] durante todo el tiempo de simulación.



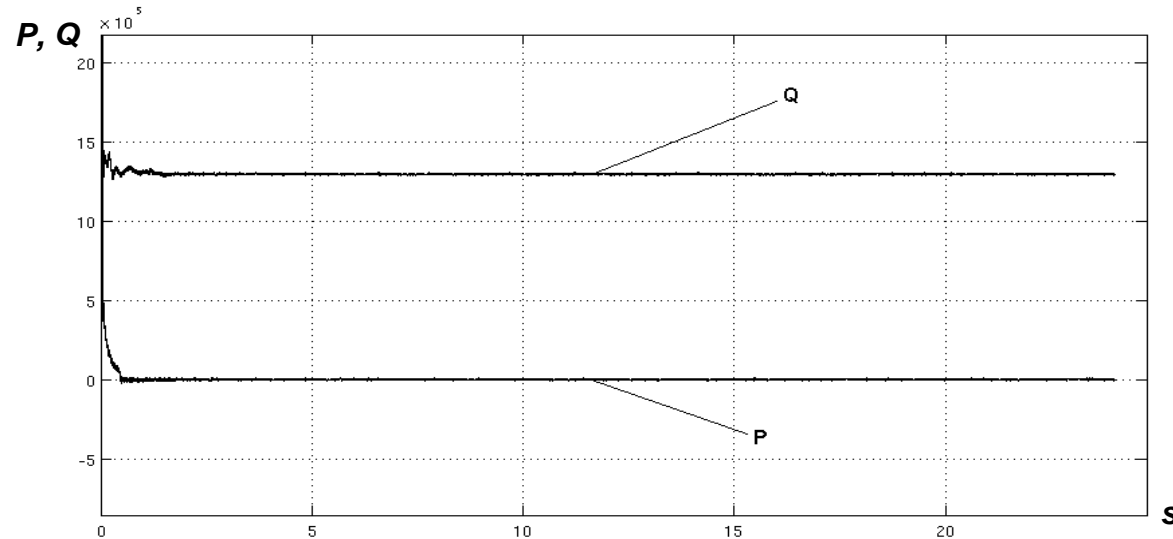
**Fig. 4.40**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las potencias activa y reactiva que son intercambiadas entre el compensador y la red se muestran en la figura 4-41. En dicha figura nuevamente se verifica que la potencia activa intercambiada entre el STATCOM y la red, es aproximadamente cero. Por otro lado, la potencia reactiva presenta un único valor de 1,2955 [MVar] durante todo el tiempo de simulación



**Fig. 4.41**

El valor de esta potencia reactiva puede ser comprobado aplicando la ecuación 4-51, es importante destacar que esta es la potencia reactiva suministrada por el STATCOM a la red.

$$|Q| = \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot v_d = \frac{3}{2} \cdot 70,5[A] \cdot 1,225 \cdot 10^4[V] \quad \text{ó,} \quad |Q| = 1,29543 \cdot 10^6 [\text{VAr}]$$

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

##### c.- Grado de carga máximo $\delta_{\max}=30^\circ$ .

La figura 4-42, muestra el valor de la tensión eficaz de fase en la barra P, nuevamente se observa que el control la mantiene en el valor de la tensión de referencia del control (8660 [V]), demostrando nuevamente, que éste está bien sintonizado.

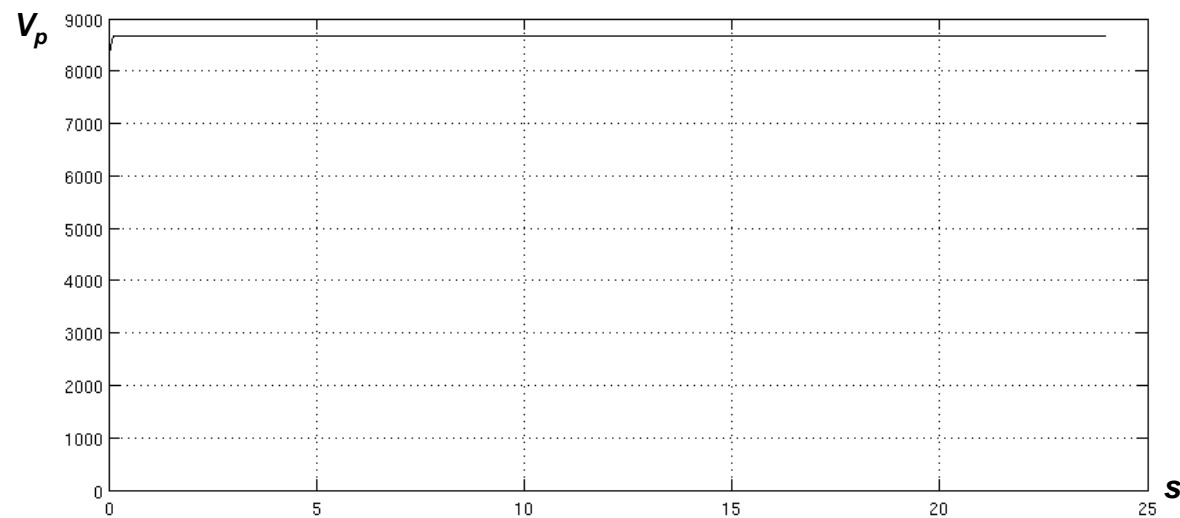


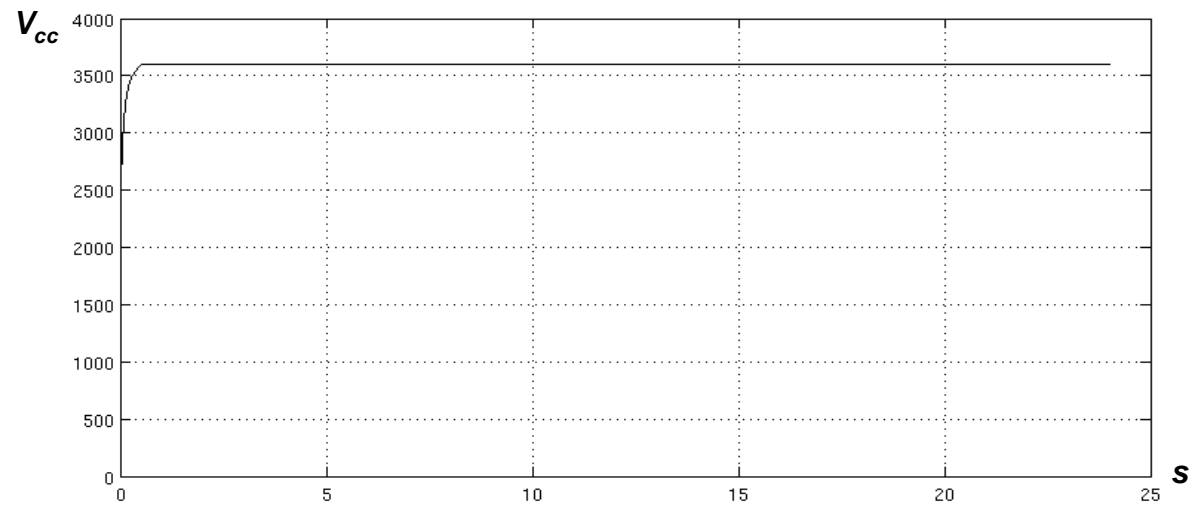
Fig. 4.42

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La tensión media en el lado continuo del inversor se muestra en la figura 4-43. Esta tiene el valor de la referencia del control (3600 [V]) en todo el tiempo de simulación. Esta es la tensión media CC en los condensadores del lado continuo y demuestra, nuevamente, que el control está bien sintonizado aunque el compensador está en su límite.



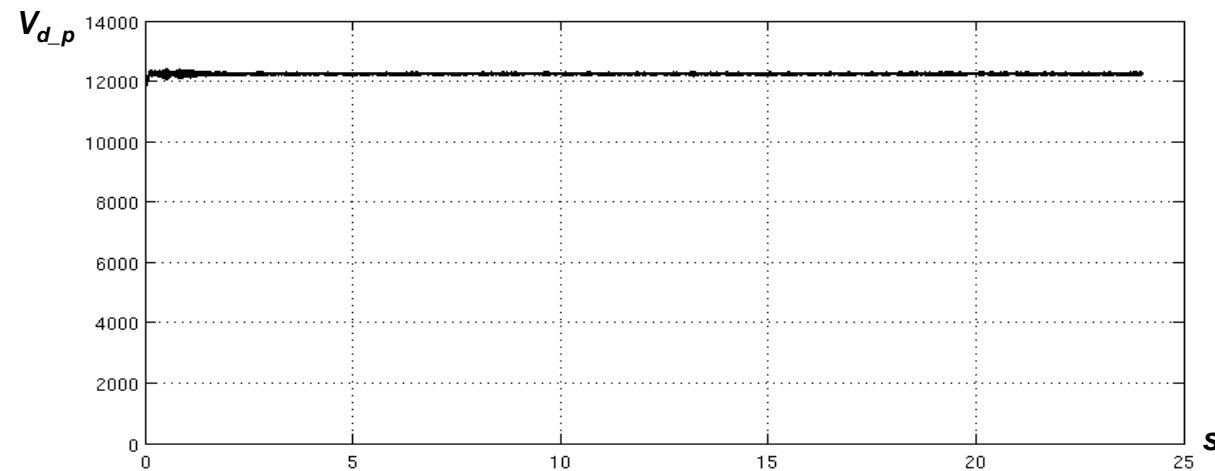
**Fig. 4.43**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

La componente de tensión de la barra en el eje directo  $V_{d_p}$  se muestra en la figura 4-44. Esta tiene un valor de 12247 [V] que es igual a la magnitud de la tensión de fase en la barra y que también se mantiene estable durante todo el tiempo de simulación.



**Fig. 4.44**

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las corrientes tanto en eje directo como en eje de cuadratura que circulan entre el inversor y la barra se muestran en la figura 4-45. Tal como en los casos anteriores la componente en eje directo de la corriente tiene valor cuasi cero ya que no hay un mínimo intercambio de potencia activa entre el STATCOM y la red eléctrica. Por otro lado, la componente en eje en cuadratura tiene un único valor de 281,5 [A] durante todo el tiempo de simulación.

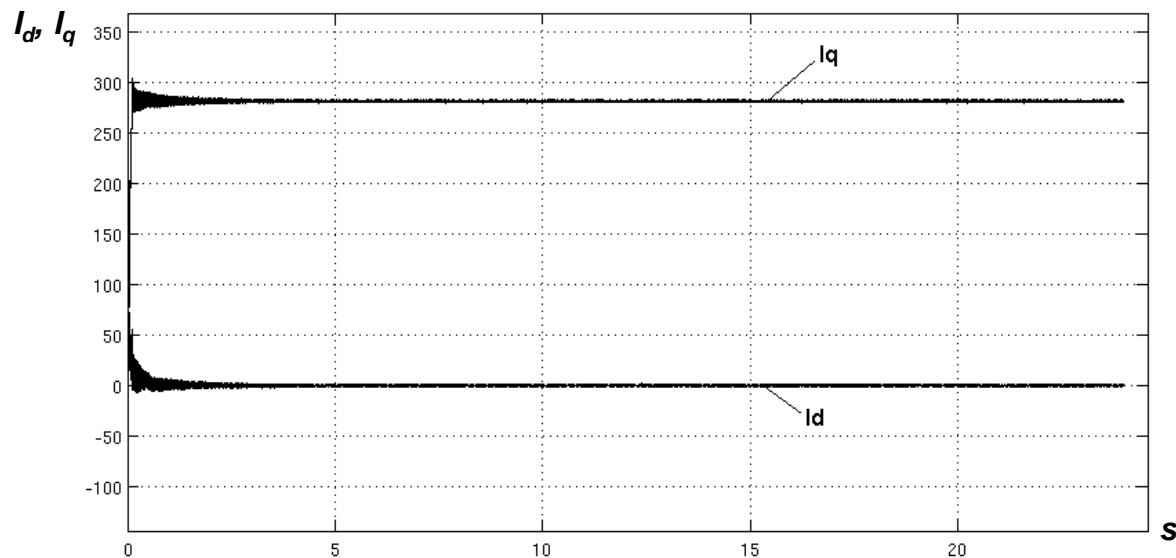


Fig. 4.45

## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Las potencias tanto activa como reactiva que son intercambiadas entre el inversor y la red se muestran en la figura 4-46. En dicha figura se aprecia que la potencia activa intercambiada entre el inversor y la red, es aproximadamente cero durante la simulación. Por otro lado la potencia reactiva presenta un único valor de 5,169 [MVar] durante todo el tiempo de simulación.

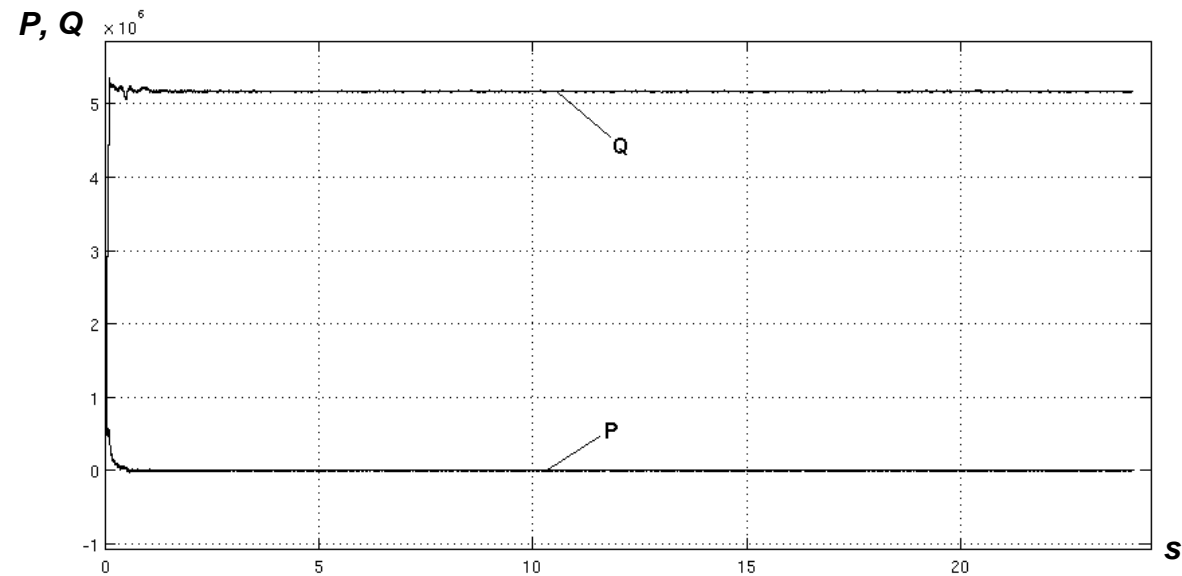


Fig. 4.46



## Capítulo 4

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

#### 4.2 – Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

El valor de esta potencia reactiva puede ser comprobado aplicando la ecuación 4-51:

$$|Q| = \frac{3}{2} \cdot i_q \cdot v_d = \frac{3}{2} \cdot 281,5[A] \cdot 1,225 \cdot 10^4[V]$$

$$|Q| = 5,17 \cdot 10^6 [VAr]$$

Esta potencia también puede ser calculada usando la ecuación 2-17, como sigue:

$$|Q^*| = \left| \frac{V_P^2 - V_P V_0 \cos \delta}{X} \right| = \left| \frac{8660^2 - 11890 \cdot 8660}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,051655} \right| \quad \text{Por fase}$$

$$|Q| = 3 \cdot |Q^*| = 3 \cdot \left| \frac{8660^2 - 11890 \cdot 8660 \cdot \cos(0^\circ)}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,051655} \right| = 5,171 [MVar]$$

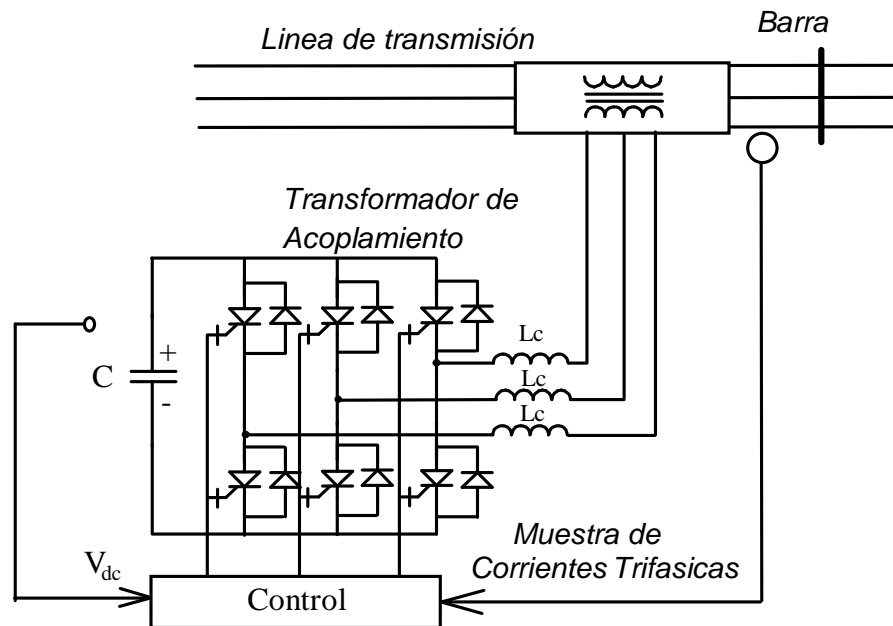
La tensión de fase eficaz de salida del inversor es 11890 [V] (reflejada al lado de alta del transformador), y el ángulo entre la tensión de salida del inversor y la tensión de la barra es aproximadamente cero grados, lo que produce un paso nulo de potencia activa.



## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)



**Fig. 4.47**

El SSSC, también es basado en un convertidor VSI, es conectado en serie con la línea y controla la impedancia efectiva de la línea, y con esto la potencia a ser transferida.

La función del SSSC es simplemente producir una tensión apropiada en el sistema C.A en la frecuencia fundamental para disminuir la caída de tensión que cae sobre la inductancia equivalente de línea y con esto aumentar la potencia transmitida.

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

Por lo tanto, si se tiene una fuente de tensión C.A, a la cual **su tensión es fijada en cuadratura (y en atraso) en relación a la corriente de línea y cuya magnitud es proporcional a la misma corriente**, inyectada en serie con la línea se obtiene una compensación equivalente a la hecha con un condensador serie.

Matemáticamente, esta tensión puede ser definida como:

$$\vec{V}_{SSSC} = -jk_s \cdot X \cdot \vec{I} = k_s \cdot |X_{sL}| \cdot |I| \angle -(\theta + 90^\circ) \quad (4.52)$$

Donde,  $V_{SSSC}$  es el fasor de tensión inyectada en la red,  $I$  es el fasor de corriente de línea,  $X$  es la reactancia de línea serie,  $k_s$  es el grado de compensación serie,  $\theta$  es el ángulo de la corriente de línea considerando pérdidas.

De esta forma,  $k_s \cdot X = X_C$  representa un condensador virtual generando la misma compensación de tensión que un condensador real. Sin embargo, en contraste a este condensador real, el SSSC es capaz, cuando es necesario, de mantener una tensión de compensación constante independiente de la amplitud de la corriente de línea, es decir en sus límites de funcionamiento se comporta como una fuente de tensión controlada.

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

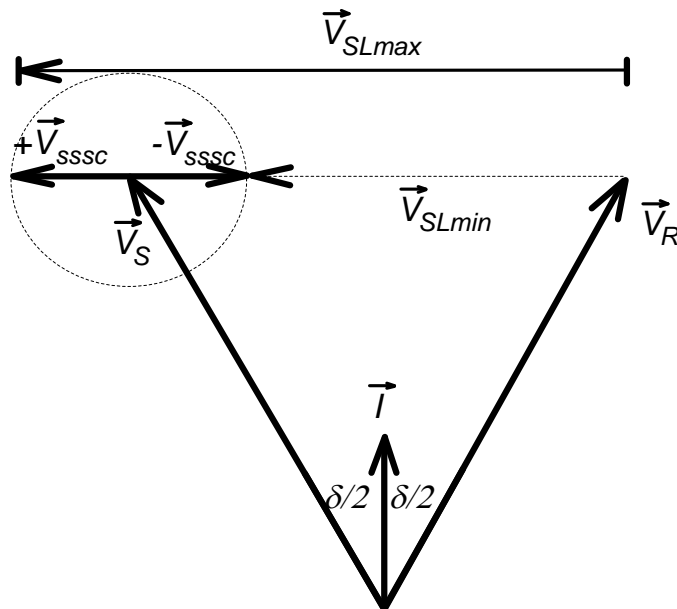


Fig. 4.48

Para **compensación normal capacitiva**, la **tensión de salida atrasa a la corriente de línea en 90°**. Sin embargo la tensión del SSSC ( $V_{SSSC}$ ) puede ser invertida hasta tener una tensión de salida en adelanto de 90°.

Con estas observaciones, se tiene una expresión generalizada de la tensión inyectada  $V_s$ , dada por:

$$\vec{V}_{SSSC} = \pm j \frac{V_{SSSC}(m)}{|I|} \cdot \vec{I} \quad (4.53)$$

Donde  $V_{SSSC}(m)$  es la magnitud de la tensión eficaz de compensación inyectada ( $0 \leq V_{SSSC}(m) \leq V_{SSSCmax}$ ) y ' $m$ ' es el parámetro de control asociado.

+ adoptado para operación inductiva

- adoptado para operación capacitiva

La Fig. 4.48 muestra el diagrama fasorial dado por (4.53), no considerando las pérdidas de la línea.

Además:

$$k_s \cdot X = \frac{|V_{SSSC}(m)|}{|I|} \quad (4.54)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

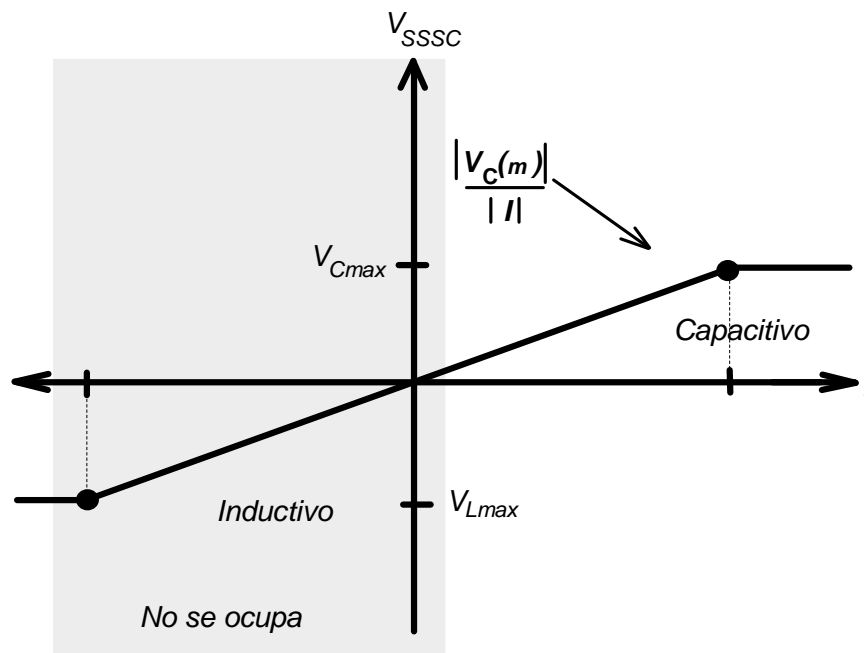


Fig. 4.49

#### 4.3.1 - Característica régimen permanente del SSSC

La Fig. 4.49 muestra la característica del SSSC.

Comparando con la característica del TCSC se observa que no tiene máximos de corriente que limiten la operación del controlador (evidentemente hasta un máximo en el cual no comprometa al inversor), pero si tiene máximos de tensión comportándose como una fuente de tensión controlada pasado estos máximos. Claramente se observa, a través del área achurada, la región de operación anormal del SSSC esta región debe ser evitada sino el compensador disminuirá la potencia transferida en vez de aumentarla.

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

##### 4.3.2 – Análisis en régimen permanente y cálculo de parámetros del inversor

La Fig. 4.50 muestra el modelo del SSSC considerándolo con comportamiento capacitivo, luego la tensión  $V_{SSSC}$  se debe controlar de forma que se comporte como condensador, es decir, su fase debe estar 90 grados atrasada de la fase de la corriente de línea  $i_{cs}$ .

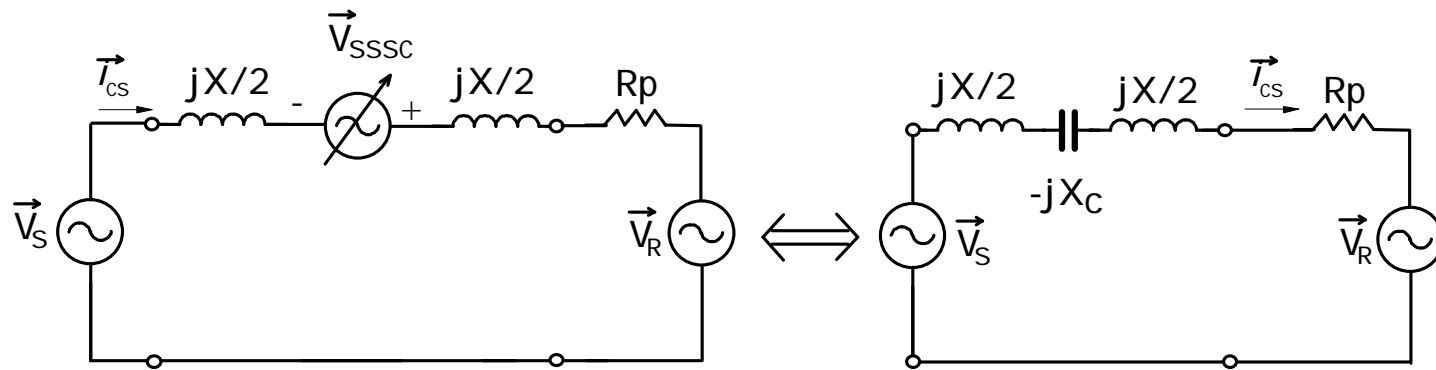


Fig. 4.50

Del circuito anterior se tiene que:

$$\hat{i}_{Cs} = \frac{\hat{V}_S - \hat{V}_R}{R_p + j(X - X_C)}$$

(4.55)

Se sabe que:  $k_s = \frac{X_C}{X}$

Con:  $\hat{V}_S = V \angle 0^\circ$

$\hat{V}_R = V \angle -\delta^\circ$

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

$$\hat{i}_{Cs} = \frac{V \angle 0 - V \angle -\delta}{R_p + jX(1-k_s)} = \frac{V - V(\cos \delta - j \sin \delta)}{j \left( \frac{R_p}{j} + X(1-k_s) \right)} \quad (4.56)$$

Manejando algebraicamente:

$$\hat{i}_{Cs} = \frac{V - V(\cos \delta - j \sin \delta)}{(X(1-k_s) - jR_p)} \cdot -j = \frac{V \sin \delta - jV(1 - \cos \delta)}{X(1-k_s) - jR_p} \quad (4.57)$$

Usando identidades trigonométricas se tiene la **corriente del sistema compensado**:

$$\hat{i}_{Cs} = \frac{2V \sin \frac{\delta}{2} \cdot \cos \frac{\delta}{2} - j2V \sin^2 \frac{\delta}{2}}{X(1-k_s) - jR_p} = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta}{2} \angle -\frac{\delta}{2}}{Z_C \angle -\theta_C} = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{Z_C} \angle -\left(\frac{\delta}{2} - \theta_C\right) \quad (4.58)$$

Donde:

$$Z_C = \sqrt{X^2(1-k_s)^2 + R_p^2} \quad \text{y,} \quad \theta_C = \tan^{-1} \left( \frac{R_p}{X(1-k_s)} \right)$$

La **corriente del sistema no compensado** (haciendo  $k=0$ ) pero con pérdidas es dado por:

$$\hat{i}_{Cs_{sc}} = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{Z_{sc}} \angle -\left(\frac{\delta}{2} - \theta_{sc}\right) \quad (4.59)$$

Donde:

$$Z_{sc} = \sqrt{X^2 + R_p^2} \quad \text{y,} \quad \theta_{sc} = \tan^{-1} \left( \frac{R_p}{X} \right)$$

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

Para el caso de compensación con SSSC, se tiene que la tensión a ser inyectada tiene que ser dada por:

$$\hat{V}_{SSSC} = -jX_C \cdot \hat{i}_{Cs} = -jk_s X \cdot \hat{i}_{Cs} \quad (4.60)$$

En donde se ha sustituido  $X_C$ , quedando en función del factor de compensación serie ' $k_s$ '.

Reemplazando la ecuación (4.58) en (4.60), se obtiene la tensión inyectada en función del factor ' $k_s$ ', luego:

$$\hat{V}_{SSSC} = k_s X \angle -90^\circ \cdot \frac{2V \cdot \sin \delta/2}{Z_C} \angle -(\delta/2 - \theta_C) \quad (4.61)$$

Sustituyendo  $Z_C$ :

$$\hat{V}_{SSSC} = k \angle -90^\circ \cdot \frac{2V \cdot \sin \delta/2}{\sqrt{(1-k)^2 + \left(\frac{R_p}{X}\right)^2}} \angle -(\delta/2 - \theta_C) \quad (4.62)$$

Ó:

$$\hat{V}_{SSSC} = \frac{2V \cdot k_s \cdot \sin \delta/2}{\sqrt{(1-k_s)^2 + \left(\frac{R_p}{X}\right)^2}} \angle -90^\circ - (\delta/2 - \theta_C) \quad (4.63)$$

Donde  $V_{SSSC}$  es la tensión a ser generada por el inversor, es decir:

$$\hat{V}_{SSSC} = V_{oef} \angle \beta \quad \text{con,} \quad \begin{aligned} \sqrt{2} \cdot V_{oef} &= m_i \cdot V_{DC} \\ \beta &= -90^\circ - (\delta/2 - \theta_C) \end{aligned} \quad (4.64)$$



## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

Además, 
$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{oef}}{V_{DC}} \quad m_f = \frac{f_p}{f_m}$$

Normalmente el inductor de acoplamiento no es necesario debido que al adicionar inductancia en la línea se cambia la condición original de operación, no obstante, si así lo fuese el inductor sigue siendo dado por:

$$L_{ac} = \frac{V_{DC}}{8 \cdot f_p \cdot |\Delta i_{SC_{Max}}|}$$

#### – Algoritmo de Proyecto

Datos:

$f_m$	$f_{Port}$	$k_s$	$\delta_{op}$
$V$	$V_{Port}$	$V_{DC}$	$X$
$R_p$			

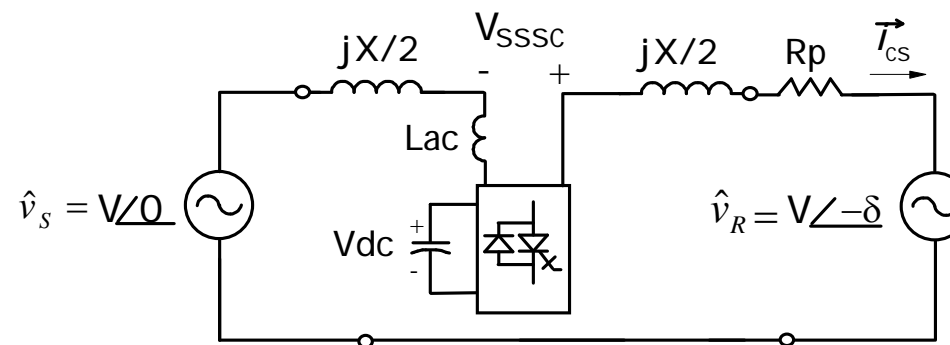


Fig. 4.51

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

1) Si es necesario se realiza el cálculo de ' $L_{ac}$ ', para compensación nominal;

$$|\hat{i}_{Cs}| = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta_{op}}{2}}{\sqrt{X^2(1-k_s)^2 + R_p^2}}$$

Asumiendo una ondulación del 1% se tiene,

$$|\Delta \hat{i}_{Cs}| = 0,01 \cdot \sqrt{2} \cdot |\hat{i}_{Cs}|, \text{ obteniéndose } L_{ac},$$

Normalmente esto puede ser realizado con la propia inductancia de línea. La consideración a ser tomada en cuenta es que si se adiciona  $L_{ac}$ , el grado de compensación debe ser aumentado en la misma proporción, si esto no es realizado no se cumplirá la compensación pedida.

2) Se obtiene la tensión del inversor para condición nominal.

$$\hat{V}_{SSSC} = \frac{2V \cdot k_s \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{\sqrt{(1-k_s)^2 + \left(\frac{R_p}{X}\right)^2}} \angle -90^\circ - \left(\frac{\delta}{2} - \theta_c\right) = V_{oef} \angle \beta$$

Con esto se obtiene el índice de modulación, con lo que a su vez se calcula la amplitud de la moduladora:

$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{oef}}{V_{DC}}, \quad V_m = m_i \cdot V_p$$

Finalmente la fase de la moduladora es dada por:

$$\angle V_{SSSC} = \beta$$

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

##### - Ejemplo de proyecto

Para mostrar su funcionamiento se realizaron simulaciones en lazo abierto, con las especificaciones dadas a continuación:

$$\begin{array}{lllll} k_s = 0,3 & \delta_{op} = 20^\circ & V_S = 2300 \angle 0^\circ [V] & R_p = 2 [\Omega] & V_{Port} = 5,5 [V] \\ V_{DC} = 500 [V] & f_{Port} = 1600 [Hz] & V_R = 2300 \angle -\delta_{op}^\circ [V] & L_{linea} = 12mH & \end{array}$$

Calculándose  $X$  y  $\theta_c$ ,

$$X = 100\pi \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 3,77 [\Omega] \quad \theta_c = \tan^{-1} \left( \frac{2}{3,77 \cdot 0,7} \right) = 37,15^\circ$$

1) Suponiendo que es necesario, se calcula  $L_{ac}$ :

$$|\hat{i}_{Cs}| = \frac{2 \cdot 2300 \cdot \sin(10^\circ)}{\sqrt{(3,77)^2 0,7^2 + 2^2}} = 241,23 [A]$$

Asumiendo una ondulación del 1% se tiene,

$$|\Delta \hat{i}_{Cs}| = 0,01 \cdot \sqrt{2} \cdot 241,23 = 3,4115 [A] \quad , \text{ obteniéndose } L_{ac},$$

Entonces,

$$L_{ac} = \frac{500}{8 \cdot 1600 \cdot 3,4115} = 11,45mH$$

Como  $L_{linea} = 12mH$ , no es necesario adicionar inductancia para cumplir con la ondulación pedida.

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

2) Obteniendo  $V_{SSSC}$  desde (4.63):

$$\hat{V}_{SSSC} = \frac{2 \cdot 2300 \cdot 0,3 \cdot \sin(10^\circ)}{\sqrt{0,7^2 + \left(\frac{2}{3,77}\right)^2}} \angle -90^\circ - (10^\circ - 37,15^\circ) = V_{oef} \angle \beta$$

$$\hat{V}_{SSSC} = V_{oef} \angle \beta = 272,835 \angle -62,85^\circ [\text{V}]$$

Entonces:

$$m_i = \frac{\sqrt{2} \cdot 272,835}{500} = 0,7717$$

Luego la amplitud de la moduladora es dada por:

$$V_m = 0,7717 \cdot 5,5 = 4,24435 [\text{V}] \quad \angle \beta = -62,85^\circ$$

La corriente **sin** y **con** compensación serán, respectivamente:

$$\hat{i}_{C_{SC}} = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{X \sqrt{1 + \left(\frac{R_p}{X}\right)^2}} \angle -\left(\frac{\delta}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{R_p}{X}\right)\right) = 187,17 \angle 17,946^\circ [\text{A}]$$

$$\hat{i}_{Cs} = \frac{2V \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{X \sqrt{(1 - k_s)^2 + \left(\frac{R_p}{X}\right)^2}} \angle \left(-\frac{\delta}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{R_p}{X \cdot (1 - k_s)}\right)\right) = 241,233 \angle 27^\circ [\text{A}]$$

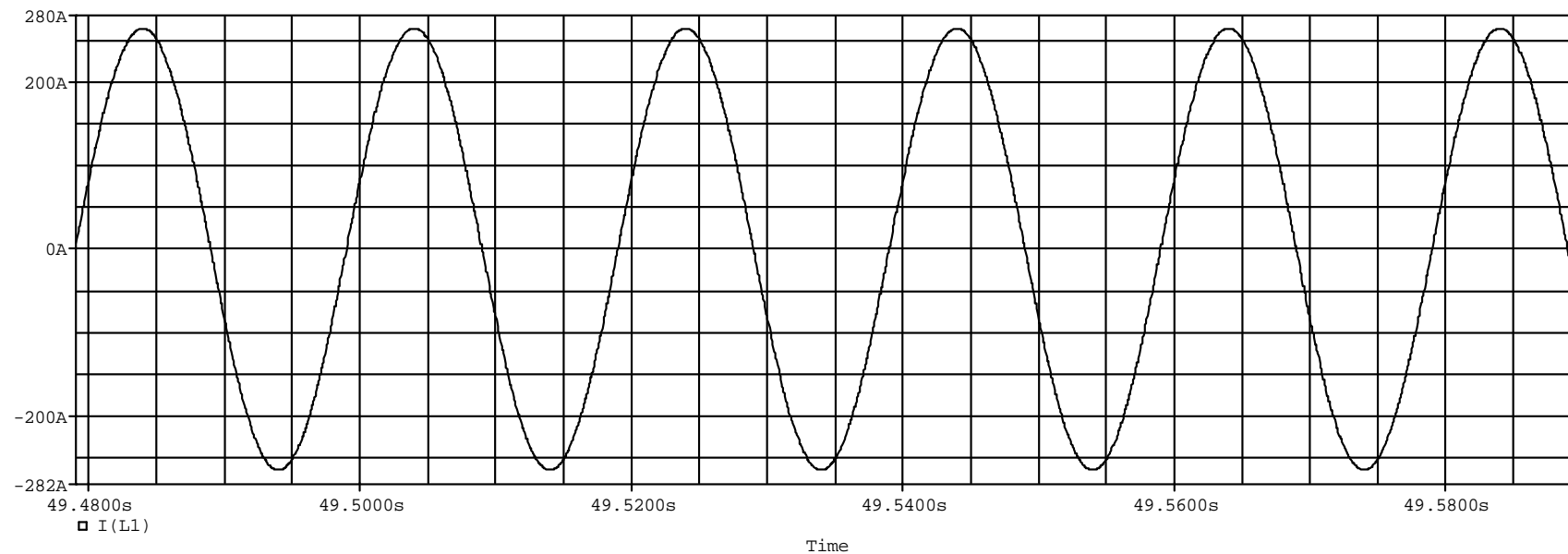
## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

##### Simulación sin compensación

La figura muestra la forma de onda de la corriente de línea del sistema sin compensar, teniendo un máximo de 264,5 [A] se observa que la corriente tiene una baja distorsión.



**Fig. 4.52**

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

La tabla muestra las componentes de Fourier de la corriente, observándose que el valor eficaz de la componente fundamental es dado por 187,029 [A] con fase de 17,45°, coincidiendo, cuasi totalmente, con el calculo realizado.

**Tabla N° 4.7**

<b>HARMONIC No</b>	<b>FREQUENCY (HZ)</b>	<b>FOURIER COMPONENT</b>	<b>NORMALIZED COMPONENT</b>	<b>PHASE (DEG)</b>	<b>NORMALIZED PHASE (DEG)</b>
1	5.000E+01	2.645E+02	1.000E+00	1.745E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	3.311E-02	1.252E-04	1.530E+02	1.181E+02
3	1.500E+02	2.277E-01	8.609E-04	-1.298E+02	-1.822E+02
4	2.000E+02	9.886E-02	3.738E-04	9.402E+01	2.420E+01
5	2.500E+02	4.848E-02	1.833E-04	-5.145E+00	-9.242E+01
6	3.000E+02	1.051E-01	3.975E-04	1.189E+02	1.421E+01
7	3.500E+02	1.755E-01	6.637E-04	1.359E+02	1.371E+01
8	4.000E+02	2.180E-01	8.242E-04	5.131E+01	-8.832E+01
9	4.500E+02	2.274E-01	8.598E-04	-1.016E+02	-2.587E+02
10	5.000E+02	3.191E-01	1.206E-03	6.524E+01	-1.093E+02
11	5.500E+02	1.731E-01	6.545E-04	4.188E+01	-1.501E+02
12	6.000E+02	1.307E-01	4.942E-04	7.314E+01	-1.363E+02
13	6.500E+02	1.527E-01	5.775E-04	1.725E+02	-5.439E+01
14	7.000E+02	1.289E-01	4.875E-04	-7.092E+01	-3.153E+02
15	7.500E+02	9.266E-02	3.503E-04	-7.511E+00	-2.693E+02
16	8.000E+02	3.446E-02	1.303E-04	-6.207E+01	-3.413E+02
17	8.500E+02	9.548E-02	3.610E-04	1.745E+02	-1.223E+02
18	9.000E+02	1.276E-02	4.825E-05	1.273E+02	-1.868E+02
19	9.500E+02	6.395E-02	2.418E-04	-1.361E+02	-4.677E+02
20	1.000E+03	1.453E-01	5.493E-04	2.752E+01	-3.216E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.505813E-01 PERCENT

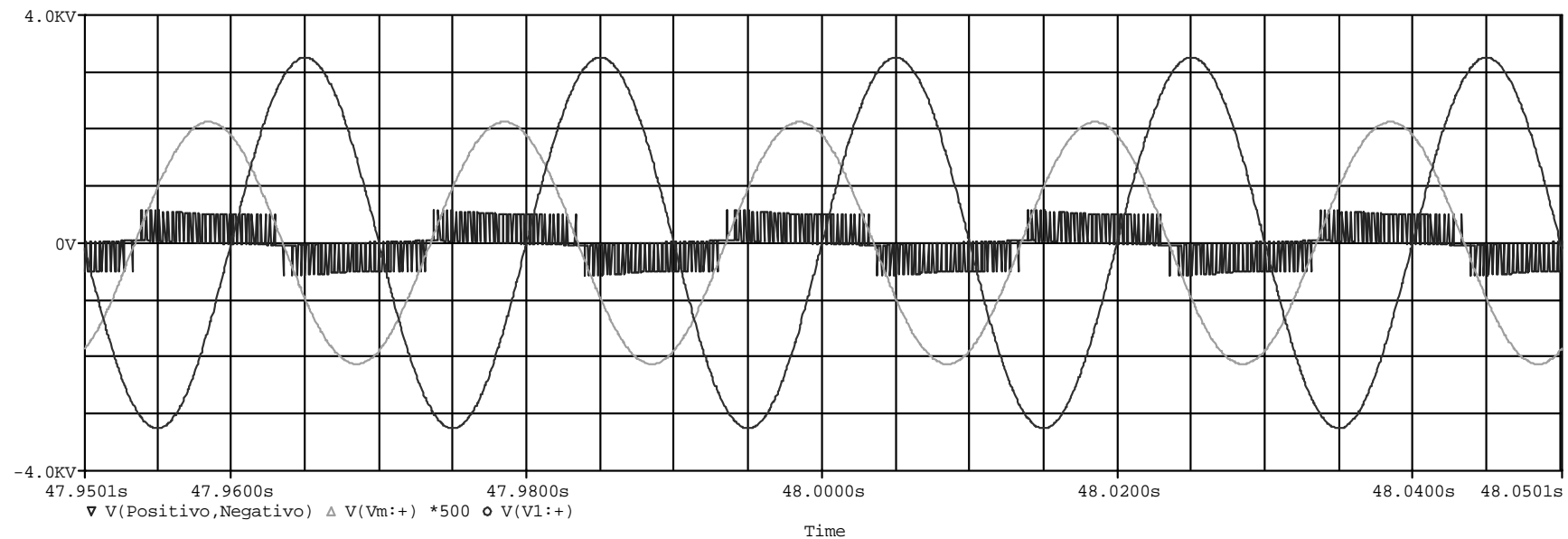
## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

##### Simulación con compensación para grado de carga nominal

La figura muestra la forma de onda para la tensión de salida del inversor (en azul), mostrándose totalmente en fase con la tensión moduladora, en marrón, que esta amplificada 500 veces y ambas a su vez adelantadas respecto la tensión de la fuente del extremo emisor  $V_1$  en rojo. El valor eficaz de la componente fundamental de  $V_{SSSC}$  fue de 282,49[V] con fase de -69,37 grados y el valor calculado fue de 272,835 con fase de -62,85 grados, dando un error del 3.41%.



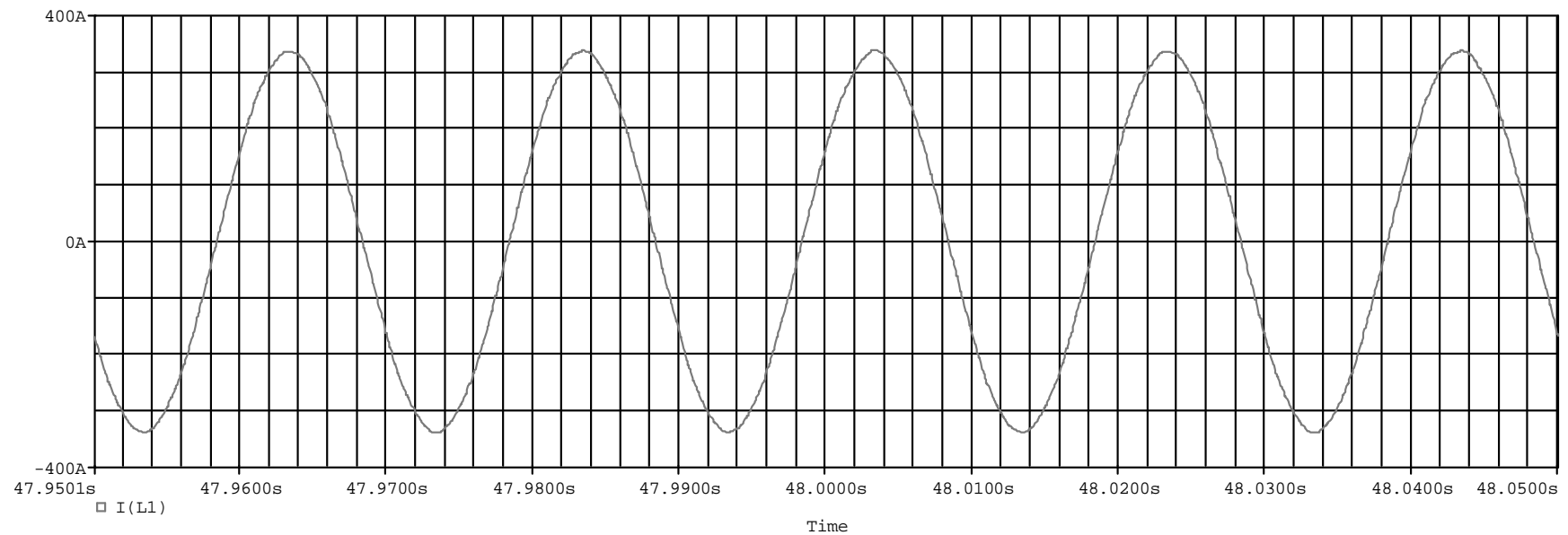
**Fig. 4.53**

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

La figura 4.54 muestra la forma de onda para la corriente de línea del sistema compensado teniendo un valor máximo de 336,2[A].



**Fig. 4.54**



## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

Desde la tabla 4.8 se tiene que el valor eficaz de la corriente es de 237.73[A] con fase de +27,69 grados, siendo que los valores teóricos fueron 241,233 con fase de +27 grados, un error del 0,1452 por ciento.

**Tabla N° 4.8**

HARMONIC No	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	5.000E+01	3.362E+02	1.000E+00	2.769E+01	0.000E+00
2	1.000E+02	4.693E-02	1.396E-04	-1.331E+02	-1.885E+02
3	1.500E+02	5.039E-01	1.499E-03	-8.327E+01	-1.663E+02
4	2.000E+02	2.203E-01	6.551E-04	5.647E+01	-5.429E+01
5	2.500E+02	5.496E-01	1.635E-03	-1.707E+01	-1.555E+02
6	3.000E+02	4.910E-01	1.460E-03	7.653E+01	-8.961E+01
7	3.500E+02	1.747E+00	5.196E-03	4.268E+00	-1.896E+02
8	4.000E+02	1.214E-01	3.610E-04	-1.097E+01	-2.325E+02
9	4.500E+02	4.542E-01	1.351E-03	-1.117E+02	-3.609E+02
10	5.000E+02	2.793E-01	8.308E-04	-5.164E+01	-3.285E+02
11	5.500E+02	5.535E-01	1.646E-03	-4.820E+01	-3.528E+02
12	6.000E+02	4.295E-01	1.277E-03	3.359E+01	-2.987E+02
13	6.500E+02	1.599E-01	4.756E-04	-7.009E+01	-4.301E+02
14	7.000E+02	4.260E-01	1.267E-03	-1.275E+01	-4.004E+02
15	7.500E+02	8.717E-02	2.593E-04	-5.021E+01	-4.656E+02
16	8.000E+02	2.448E-01	7.279E-04	9.185E+01	-3.512E+02
17	8.500E+02	3.448E-01	1.025E-03	7.459E+01	-3.961E+02
18	9.000E+02	2.176E-01	6.471E-04	1.164E+02	-3.820E+02
19	9.500E+02	2.883E-01	8.573E-04	1.744E+02	-3.517E+02
20	1.000E+03	2.022E-01	6.013E-04	-1.505E+02	-7.043E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 6.817554E-01 PERCENT

## Capítulo 4

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

#### 4.3 – Compensador Síncrono Estático Serie (SSSC)

##### 4.3.2 - Control de un SSSC

Para el SSSC, en contraste con el STATCOM, se debe realizar un lazo de control de corriente de línea, debido a la necesidad de que esta corriente siempre este en cuadratura con la tensión de salida del SSSC, el valor de  $I_{ref}$  debe ser obtenida del grado de compensación  $k_s$  requerido.

El correspondiente modelo dinámico es idéntico al realizado con el STATCOM, solo con la salvedad de que la corriente ahora este en cuadratura con la tensión, luego se realiza un control vectorial de forma análoga a lo realizado con el STATCOM.