



xx (129982.1)





# CINVESTAV

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.  
Unidad Guadalajara

---

## **Flujos de Potencia Armónicos Incluyendo los Dispositivos Electrónicos SVC y TCSC**

**CINVESTAV  
IPN  
ADQUISICION  
DE LIBROS**

Tesis que presenta:

**José de Jesús Chávez Muro**

para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

en la especialidad de:

**Ingeniería Eléctrica**

Director de Tesis

**Dr. Amner Israel Ramírez Vázquez**



CENTRO DE INVESTIGACION DE  
ESTUDIOS AVANZADOS DE I.P.N.

SERVICIOS BIBLIOGRAFICOS

Guadalajara, Jalisco, Agosto de 2006.

# **Flujos de Potencia Armónicos Incluyendo los Dispositivos Electrónicos SVC y TCSC**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

Por:

**José de Jesús Chávez Muro**  
Ingeniero Mecánico Electricista  
Universidad de Guadalajara 1999-2003

Becario de CONACYT, expediente no. 191094

Director de Tesis  
**Dr. Amner Israel Ramírez Vázquez**

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Agosto de 2006.

CLASIF.: \_\_\_\_\_  
ADQUIS.: SS1-401  
FECHA: 7-III-2007  
PROCED.: Don. 2007  
\$ \_\_\_\_\_

10.129285-1001

# DEDICATORIA

---

Esta tesis está dedicada a todas las personas que me dieron ánimos y estuvieron conmigo durante el transcurso de mi maestría.

Dedicada de una manera muy especial a:

*Mis padres.  
Ma. del Rosario Muro y Rubén Chávez*

*Mis hermanos  
Rubén, Javier y Mary*

*¿Qué rosa es la expresión del amor más puro y más noble?  
Acaso la flor maravillosa que el hombre a cultivado durante años, en sus largas noches  
de insomnio, por la cual, solitario, da su vida ardiente: ¡ la rosa mágica de la ciencia !  
“Hans Christian Andersen” La rosa más bella del mundo*

## AGRADECIMIENTOS

---

*A Dios por haberme permitido cursar estos últimos años sin mayor contratiempo. “Yo he venido para que tengan vida y vida en abundancia”. Juan 10, 10.*

*A mi madre por su amor incondicional, por estar siempre pendiente de mi, por inculcarme el deseo de aprender, por enseñarme que el conocimiento es una de las mejores armas que tiene el hombre en las batallas cotidianas de la vida.*

*A mi mejor amigo; mi padre por que con sus virtudes y defectos nos ha enseñado a mi y mis hermanos que no existen limites para ser lo que se quiere ser. Que las metas y caminos son trazados por uno mismo.*

*A mis hermanos que fueron, son y serán mis ejemplos a seguir y a sus hijos que son más que una alegría en mi vida.*

*Al director de mi tesis que más que un asesor ha sido un amigo siendo ejemplo de profesor teniendo el tiempo y paciencia para todas y cada una de mis dudas.*

*A los compañeros y amigos que han tenido que soportarme durante un lapso de tiempo de uno a tres años.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económico (espero que sigan apoyando a todos los deseosos del conocimiento)*



# ÍNDICE GENERAL

---

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice General .....	iii
Índice de Figuras .....	v
Índice de Tablas .....	vii
Resumen.....	viii

## Capítulo I INTRODUCCIÓN

1.1 Historia.....	1
1.2 Análisis Armónico.....	2
1.3 Incorporación de Generadores como Nodos PV .....	2
1.4 Elementos de Conmutación .....	2

## Capítulo II ELEMENTOS DE RED EN EL DOMINIO ARMÓNICO

2.1 Introducción .....	3
2.2 Elementos Básicos .....	3
2.3 Elementos No Lineales .....	4
2.4 Línea de Transmisión .....	6
2.5 Carga $PQ$ .....	8
2.6 Nodos PV .....	9
2.7 El Reactor Controlado por Tiristores (TCR) .....	10
2.7.1 <i>La Función de Conmutación S</i> .....	12
2.8 El Compensador Estático de Volts Amperes Reactivos (SVC) .....	15
2.9 El Compensador Estático Serie Controlado por Tiristores (TCSC) .....	16
2.10 Conclusiones .....	18

### **Capítulo III FLUJOS DE POTENCIA ARMÓNICOS – CASO MONOFÁSICO**

3.1 Introducción .....	19
3.2 Solución Utilizando Análisis Nodal y Método de Newton-Raphson .....	19
3.3 Metodología de Solución .....	20
3.4 Ejemplo de Aplicación .....	21
3.4.1 Datos de la Red .....	21
3.4.2 Sistema con Cargas Lineales .....	22
3.4.3 Sistema con Cargas Lineales, No Lineales y Cargas PQ .....	23
3.4.4 Sistema con Elementos de Conmutación SVC y TCSC .....	26
3.4.5 Sistema con Nodos PV (Completo) .....	29
3.4.6 Estructura del Jacobiano Caso Monofásico .....	31
3.5 Conclusiones .....	33

### **Capítulo IV FLUJOS DE POTENCIA ARMÓNICOS - CASO TRIFÁSICO**

4.1 Introducción .....	34
4.2 Líneas de Transmisión .....	34
4.3 El SVC Trifásico .....	35
4.4 Nodo PV Trifásico .....	37
4.5 Ejemplo de Aplicación .....	38
4.5.1 Datos de la Red .....	38
4.5.2 Sistema con Cargas Lineales .....	40
4.5.3 Sistema con Cargas Lineales No Lineales y Cargas PQ .....	41
4.5.4 Sistema con Elementos de Conmutación SVC y TCSC .....	44
4.5.5 Sistema con Nodos PV (Completo) .....	47
4.5.6 Estructura del Jacobiano Caso Trifásico.....	49
4.6 Conclusiones .....	52

### **Capítulo V CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

5. 1 Conclusiones .....	53
5. 2 Trabajos Futuros .....	54
Referencias .....	55

# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
2-1 Representación $\pi$ del modelo de línea con parámetros distribuidos.....	7
2-2 Esquema de TCR monofásico.....	10
2-3 Voltaje y corriente en terminales de un TCR. (a) $v_{TCR}$ , (b) $i_{TCR} (\alpha = 90^\circ)$ , (c) $i_{TCR} (\alpha = 120^\circ)$ , (d) $i_{TCR} (\alpha = 150^\circ)$ , (e) $i_{TCR} (\alpha = 170^\circ)$ .....	11
2-4 Ángulos de disparo y conducción del TCR.....	14
2-5 Esquema del SVC monofásico.....	15
2-6 Esquema básico del TCSC.....	16
2-7 Diferentes formas de operación para el TCSC. (a) Modo bypassed, (b), Modo bloqueado, (c) Conducción parcial (capacitivo), (d) Conducción parcial (inductivo).....	17
3-1 Red monofásica.....	20
3-2 Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico.....	23
3-3 Curva de saturación del reactor .....	24
3-4 Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico .....	24
3-5 Contenido armónico de la corriente de carga en nodos 5 y 7.....	25
3-6 Patrón de convergencia , sistema con cargas $RL, \alpha\beta$ y $PQ$ , caso monofásico.....	25
3-7 Reactancia a frecuencia fundamental para el SVC y TCSC.....	26
3-8 Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico.....	27
3-9 Contenido armónico de la corriente de carga en los nodos 5 y 7.....	27
3-10 Patrón de convergencia, sistema con SVC y TCSC, caso monofásico.....	28
3-11 Corriente a través del SVC.....	28
3-12 Voltajes y corrientes en nodos 5, 7 y 8 sistema monofásico.....	30
3-13 Contenido armónico de la corriente de cargas en nodos 5 y 7.....	30
3-14 Patrón de convergencia sistema incluyendo nodo PV, caso monofásico.....	31
3-15 Jacobiano caso monofásico, (a) de cargas no lineales y (b) cargas. $PQ$ .....	32
3-16 Jacobiano caso monofásico, (a) SVC y (b) TCSC.....	32
3-17 Jacobiano caso monofásico, (a) con PV y (b) sin PV .....	33
4-1 Línea de transmisión modelo $\pi$ .....	35

4-2	Esquema de SVC trifásico en conexión delta .....	35
4-3	Red trifásica.....	39
4-4	Configuración de la línea de transmisión.....	39
4-5	Voltajes en los nodos 3, 10 y 20 con cargas <i>RL</i> .....	40
4-6	Corrientes de carga en los nodos 10 y 20, con cargas <i>RL</i> .....	41
4-7	Voltajes en los nodos 3, 10 y 20 con cargas <i>RL</i> , $\alpha\beta$ y <i>PQ</i> .....	42
4-8	Corrientes de carga en los nodos 10 y 20, con cargas <i>RL</i> , $\alpha\beta$ y <i>PQ</i> .....	42
4-9	Contenido armónico de la corriente de carga en los nodos 10 y 20.....	43
4-10	Patrón de convergencia, sistema con cargas <i>RL</i> , $\alpha\beta$ y <i>PQ</i> , caso trifásico.....	44
4-11	Voltajes en los nodos 3, 10 y 20, con dispositivos SVC y TCSC.....	44
4-12	Corrientes en los nodos 10 y 20, con SVC y TCSC.....	45
4-13	Contenido armónico de la corriente de carga en nodos 10 y 20.....	45
4-14	Patrón de convergencia sistema incluyendo SVC y TCSC, caso trifásico .....	46
4-15	Voltajes en los nodos 3, 10 y 20 incluyendo generadores PV.....	47
4-16	Corrientes de carga en los nodos 10 y 20, incluyendo generadores PV.....	47
4-17	Contenido armónico de la corriente de carga en los nodos 10 y 20.....	48
4-18	Corriente a través del TCSC.....	48
4-19	Corriente a través del acomodo delta de TCRs .....	49
4-20	Patrón de convergencia sistema incluyendo generadores PV, caso trifásico.....	49
4-21	Jacobiano caso trifásico, (a) interconexión del sistema y (b) cargas lineales .....	50
4-22	Jacobiano caso trifásico, (a) de cargas no lineales y (b) cargas <i>PQ</i> .....	51
4-23	Jacobiano caso trifásico (a) de SVC y (b) TCSC.....	51
4-24	Jacobiano caso trifásico (a) total sin PV y (b) total con PV.....	52

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Número</i>	<i>Página</i>
2-1 Elementos básicos en el DT y en el DA.....	4
3-1 Datos de carga en pu.....	21
3-2 Datos de línea caso monofásico en pu.....	22
4-1 Datos de carga en pu.....	39

# RESUMEN

---

**E**n este trabajo se utiliza el Dominio Armónico para la solución en estado estable de sistemas eléctricos de potencia. Los elementos de red que se consideran son los siguientes:

- Líneas de transmisión con parámetros distribuidos (representación en configuración  $\pi$ ).
- Cargas lineales ( $R, L, C$ ).
- Cargas no lineales ( $\alpha\beta$ ).
- Cargas que consumen potencia activa y reactiva (nodos  $PQ$ ).
- Compensador estático de Volt-Ampere Reactivos (SVC).
- Compensador Estático Serie Controlado por Tiristores (TCSC).
- Generadores con potencia activa y voltaje en terminales definidos (nodos PV).

Se describe la metodología de flujos de potencia armónicos utilizando el método de Newton-Raphson para los casos monofásico y trifásico. A través de un ejemplo, se muestra el comportamiento y la interacción de los armónicos cuando se incluyen distintos elementos en la red en forma secuencial. En el Capítulo I se presentan algunos datos históricos acerca del uso del dominio armónico así como consideraciones generales de la red eléctrica. En el Capítulo II, se describen los elementos de una red monofásica en el dominio armónico. Por su parte, el Capítulo III incluye la descripción de la metodología para encontrar el estado estable en una red eléctrica monofásica. En el Capítulo IV, se trata el caso trifásico. Finalmente, en el Capítulo V se presentan las conclusiones y trabajos futuros sobre este tema.

# *Capítulo I*

---

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Historia

**L**os primeros estudios de armónicos en sistemas de potencia se remontan al año de 1890, cuando se identificaron a los transformadores y motores como los principales elementos que distorsionaban las formas de onda de voltaje y corriente en las redes eléctricas [1].

En 1893 C. P. Steimetz realizó diversos estudios para resolver los problemas de sobrecalentamiento que presentaba un motor (utilizando un tipo de análisis de armónicos), auxiliándose de un instrumento al cual llamó “medidor de ondas” (wave-meter). Este instrumento era capaz de reproducir la forma de onda del voltaje en determinados puntos de un sistema eléctrico. Una vez obtenida la forma de onda que generaba la máquina, Steimetz analizaba la señal por medio del análisis de Fourier [2], [13].

En aquella época, la distorsión armónica en los sistemas eléctricos fue reducida por medio de mejores diseños de generadores y/o transformadores.

En la década de 1960 se instalaron capacitores en derivación en muchas empresas con el fin de corregir el factor de potencia. Al mismo tiempo se empezaron a utilizar elementos electrónicos como diodos y tiristores con los cuales se obtenían troceadores e inversores de señal. En la década de 1980 se empezaron a introducir los tiristores GTO y tiristores IGBT a los sistemas eléctricos de potencia [3].

En la actualidad se pueden mencionar como principales elementos generadores de armónicos a los dispositivos electrónicos de potencia, transformadores saturados, máquinas síncronas, convertidores de corriente y hornos de arco eléctrico, entre otros.

## 1.2 Análisis Armónico

En el análisis de Fourier, la forma de onda de una señal es descompuesta en un grupo de ondas senoidales de amplitud y fase diferente con frecuencias múltiples a la frecuencia fundamental. A los múltiplos de la frecuencia fundamental se les conoce como “armónicos”.

El Dominio Armónico (DA) permite, en base a operaciones matriciales y series ortogonales, calcular el estado estable de una red que incluya dispositivos lineales y no lineales de una manera rápida y precisa. Por el contrario, el Dominio del Tiempo (DT) se basa en resolver un conjunto de ecuaciones diferenciales resultantes de la red en forma secuencial hasta llegar al estado estable. Como ventaja adicional el DA, a diferencia del DT, permite el cálculo de los armónicos de una manera natural.

En este trabajo se utiliza el DA basado en el análisis nodal para calcular el estado estable de una red eléctrica utilizando el método de Newton-Raphson. Se presentan ejemplos de redes que incluyen elementos lineales, no lineales, cargas de tipo  $PQ$ , generadores y elementos de conmutación.

## 1.3 Incorporación de Generadores como Nodos PV

Tradicionalmente en el cálculo de flujos de potencia se incluye al generador en forma iterativa, tratando de satisfacer las restricciones de potencia reactiva y voltaje en sus terminales. En este trabajo se describe la metodología para incluir generadores como nodos PV en el programa flujos de potencia armónicos propuesta en [4]. La construcción del Jacobiano para el generador y su inserción en el sistema es descrita con detalle. En comparación con los métodos tradicionales, en el algoritmo propuesto el nodo PV no requiere de procesos iterativos, conservando la convergencia cuadrática del método de Newton-Raphson.

## 1.4 Elementos de Conmutación

Se presenta además la incorporación del Jacobiano correspondiente al SVC y TCSC al análisis de flujos de potencia armónicos en su formulación monofásica y trifásica. También se presenta el proceso de linealización para la obtención de los ángulos de disparo del TCR.



## Capítulo II

---

# ELEMENTOS DE RED EN EL DOMINIO ARMÓNICO

## 2.1 Introducción

**E**n este capítulo se presentan algunas definiciones y conceptos fundamentales del método del DA y su aplicación a los sistemas de potencia. Se describe la representación en el DA de: elementos lineales, elementos no lineales, representación de líneas, cargas PQ y dispositivos de conmutación.

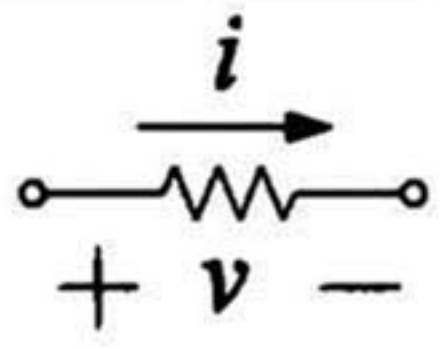
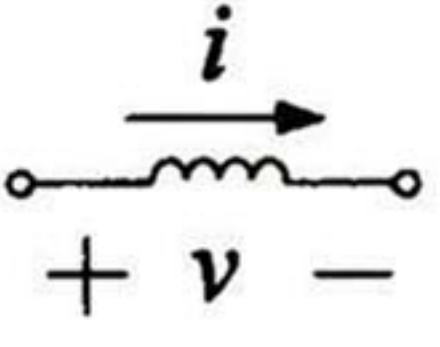
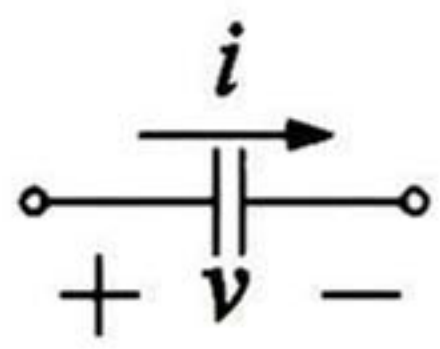
## 2.2 Elementos Básicos

En la Tabla 2.1 se presentan las expresiones correspondientes a los elementos básicos ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) en el DT y en el DA. Cabe mencionar que a lo largo de esta tesis, se utilizará notación minúsculas para variables en el DT y en mayúsculas para sus imágenes en el DA. En la Tabla 2.1 la cuarta columna indica la expresión para la admitancia de dichos elementos, donde  $U$  es la matriz identidad y  $D$  es la matriz de diferenciación [5], [12], dada por:

$$D = \text{diag}\{\dots, -j2\omega_0, -j\omega_0, 0, j\omega_0, j2\omega_0, \dots\} \quad 2.1$$

Cabe hacer notar que la admitancia de los elementos básicos (lineales) corresponde a un Jacobiano parcial en la formulación de flujos de potencia armónicos descrita en la Sección 3.2 (ver Tabla 2.1)

**TABLA 2-1**  
**ELEMENTOS BÁSICOS EN EL DT Y EN EL DA**

Símbolo	DT	DA	Admitancia
	$v(t) = Ri(t)$ $i(t) = \frac{1}{R}v(t)$	$V = RUI$ $I = \frac{1}{R}UV$	$Y_R = J_R = \frac{1}{R}U$
	$v(t) = L \frac{di}{dt}$ $i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v dt$	$V = LDI$ $I = \frac{1}{L} D^{-1}V$	$Y_L = J_L = \frac{1}{L} D^{-1}$
	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$ $i(t) = C \frac{dv}{dt}$	$V = \frac{1}{C} D^{-1}I$ $I = CDV$	$Y_C = J_C = CD$

### 2.3 Elementos No Lineales

Considere las relaciones corriente/ flujo y voltaje/ flujo en un inductor no lineal

$$i = f(\psi) , \tag{2.2a}$$

$$v = \dot{\psi} \tag{2.2b}$$

Considere además que las variables  $\psi$  e  $i$  son periódicas con frecuencia fundamental  $\omega_0$ , expresadas por sus respectivas series de Fourier como:

$$\psi(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_m e^{jmt\omega_0} , \tag{2.3a}$$

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k e^{jk\omega_0 t} \tag{2.3b}$$

Asumiendo que  $f(\psi)$  es diferenciable, entonces para pequeños incrementos de  $\psi$  e  $i$  alrededor de un punto base  $\psi_b$  e  $i_b$  la siguiente relación existe [5]:

$$\Delta i = \frac{df(\psi_b)}{d\psi} \Delta \psi \tag{2.4}$$

donde:

$$\Delta\psi(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Delta\Psi_m e^{jm\omega_b t}, \quad 2.5$$

$$\Delta i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Delta I_k e^{jk\omega_b t}, \quad 2.6$$

$$\frac{df(\psi_b)}{d\psi} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \xi_i e^{ji\omega_b t} \quad 2.7$$

Utilizando (2.5) a (2.7), (2.4) puede ser escrita en términos de coeficientes armónicos como:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta I_{-2} \\ \Delta I_{-1} \\ \Delta I_0 \\ \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_0 & \xi_{-1} & \xi_{-2} & \xi_{-3} & & \\ \xi_1 & \xi_0 & \xi_{-1} & \xi_{-2} & \xi_{-3} & \\ \xi_2 & \xi_1 & \xi_0 & \xi_{-1} & \xi_{-2} & \\ \xi_3 & \xi_2 & \xi_1 & \xi_0 & \xi_{-1} & \\ & \xi_3 & \xi_2 & \xi_1 & \xi_0 & \\ & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta\Psi_{-2} \\ \Delta\Psi_{-1} \\ \Delta\Psi_0 \\ \Delta\Psi_1 \\ \Delta\Psi_2 \end{bmatrix}, \quad 2.8$$

o en forma compacta:

$$\Delta I = F \Delta\Psi \quad 2.9$$

De la misma forma se tiene de (2.2):

$$\Delta V = D \Delta\Psi. \quad 2.10$$

Combinando (2.9) y (2.10) se obtiene:

$$\Delta I = Y_{nl} \Delta V, \quad 2.11$$

donde la admitancia de la carga no lineal está dada por [12]:

$$Y_{nl} = J_{nl} = F D^{-1} \quad 2.12$$

## 2.4 Línea de Transmisión

En este trabajo se utiliza el modelo de línea con parámetros distribuidos [6]. Considere la frecuencia compleja dada por:

$$s_h = jh\omega_o , \quad 2.13$$

donde :

$$h = -n, \dots, 1, 0, 1, \dots, n . \quad 2.14$$

En (2.14)  $n$  es el armónico más grande,  $\omega_o = 2\pi f_o$  y  $f_o = 60\text{Hz}$  .

Para cada una de las frecuencias dadas por (2.13) se calcula la impedancia del conductor  $Z_{cond}^h$  por unidad de longitud (el superíndice  $h$  denota el armónico):

$$Z_{cond}^h = \sqrt{R_{CD}^2 + Z_{AF}^h{}^2} , \quad 2.15$$

donde :

$$R_{CD} = \frac{\rho_c}{\pi r^2} . \quad 2.16a$$

$$Z_{AF}^h = \frac{\sqrt{s_h \mu_o \rho_c}}{2\pi r} . \quad 2.16b$$

$\rho_c$  es la resistividad relativa del conductor

$r$  es el radio del conductor

$\mu_o$  es la permeabilidad del espacio libre

A su vez, se calcula la impedancia de tierra  $Z_i^h$  y la impedancia geométrica  $Z_g^h$  dadas por:

$$Z_g^h + Z_i^h = \frac{s_h \mu_o}{2\pi} \ln \left[ \frac{2(h+p)}{r} \right] , \quad 2.17$$

donde  $p$  es la profundidad de penetración en tierra por efecto piel (profundidad compleja) dada por:

$$p = \sqrt{\frac{\rho_t}{s_h \mu_o}} , \quad 2.18$$

donde  $\rho_t$  es la resistividad de la tierra.

La impedancia total  $Z_T^h$  para cada armónico es:

$$Z_T^h = Z_{cond}^h + Z_g^h + Z_l^h. \quad 2.19$$

De una manera similar se obtiene la admitancia total  $Y_T^h$  para cada armónico:

$$Y_T^h = s_h \pi \epsilon_o \left( \log \frac{D_{ij}}{r} \right)^{-1}, \quad 2.20$$

donde

$\epsilon_o$  es la permitividad del espacio libre

$D_{ij}$  es la distancia entre el conductor  $i$  y su imagen  $j$

$r$  es el radio equivalente

Con base a los parámetros  $Y_T^h$  y  $Z_T^h$  es posible obtener una representación  $\pi$  de parámetros distribuidos como se muestra en la Fig. 2-1, donde  $Y_{deriv}$  denota la admitancia en derivación.

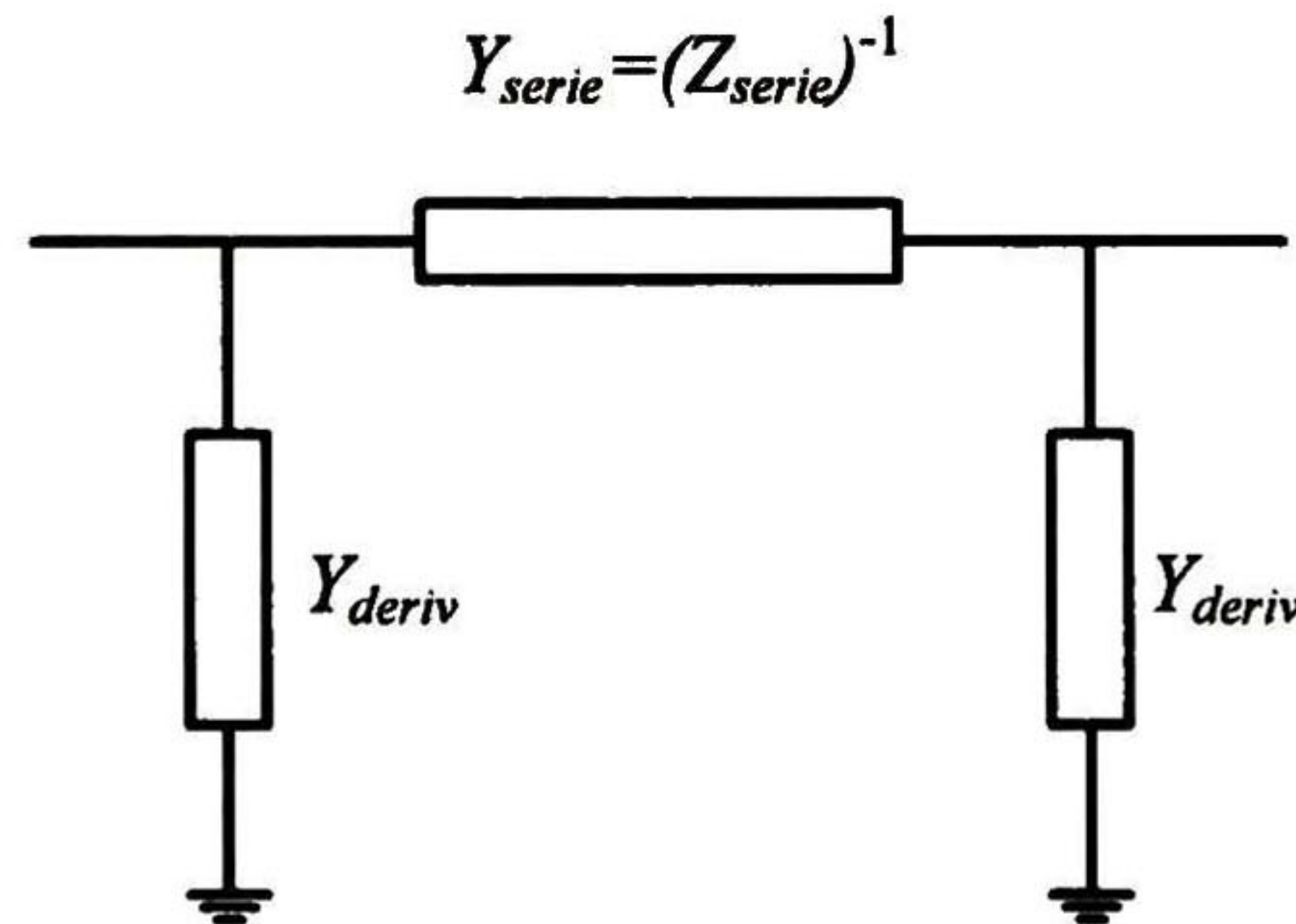


Fig. 2-1. Representación  $\pi$  del modelo de línea con parámetros distribuidos

Finalmente, se crea una matriz diagonal con los resultados obtenidos para la admitancia serie y otra para la admitancia en derivación (utilizando notación de Matlab).

$$Z_{serie} = diag \{ Z_{serie}^{-n}, \dots, Z_{serie}^{-1}, Z_{serie}^0, Z_{serie}^1, \dots, Z_{serie}^n \}, \quad 2.21$$

$$Y_{deriv} = diag \{ Y_{deriv}^{-n}, \dots, Y_{deriv}^{-1}, Y_{deriv}^0, Y_{deriv}^1, \dots, Y_{deriv}^n \}, \quad 2.22$$

donde:

$$Z_{serie}^h = Z_c^h \sinh(\gamma^h l), \quad 2.23$$

$$Y_{deriv}^h = Y_c^h \tanh(\gamma^h l / 2), \quad 2.24$$

$$\gamma^h = \sqrt{Z_T^h Y_T^h}, \quad 2.25$$

$$Z_c^h = \sqrt{Z_T^h / Y_T^h}, \quad Y_c^h = 1 / Z_c^h. \quad 2.26$$

## 2.5 Carga PQ

Existen cargas las cuales sólo están especificadas para la potencia activa y la potencia reactiva en la frecuencia de operación del sistema. A estas cargas se les conoce como cargas PQ. Para incluir una carga PQ en el programa de flujos de potencia armónicos definimos la potencia aparente como:

$$S = VI^* \quad 2.27$$

Entonces, si los valores están dados sólo para la frecuencia fundamental, en el DA (2.27) se puede expresar como [4]:

$$\begin{bmatrix} i_{-1} \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S/2v_1 \\ (S/2v_1)^* \end{bmatrix}. \quad 2.28$$

Linealizando (2.28) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{-1} \\ \Delta i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-S(1/v_1)^2}{2} \\ \frac{-S^*(1/v_1)^2}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}, \quad 2.29$$

o en forma compacta:

$$\Delta i = J_{PQ} \Delta v. \quad 2.30$$

Nótese que el Jacobiano de la carga PQ presenta un acoplamiento entre la frecuencia fundamental negativa y la frecuencia fundamental positiva.

Existen otras representaciones de la carga PQ en el DA para valores instantáneos como las presentadas en [18].

## 2.6 Nodo PV

Este tipo de nodo está constituido por un generador en donde las variables especificadas son la potencia real ( $P$ ) y el voltaje *rms* en terminales ( $V$ ). Tradicionalmente, en los programas de flujos de potencia, la potencia reactiva que inyecta un generador para mantener su tensión constante debe calcularse y compararse con límites de ajuste. Esto implica utilizar un método iterativo local para cada nodo PV [8], [16]. El siguiente procedimiento se utiliza para incluir nodos PV en el programa de flujos de potencia armónicos de una manera directa.

Considere las siguientes relaciones:

$$v_1 i_{-1} + v_{-1} i_1 = P, \quad 2.31$$

$$v_1 v_{-1} = \frac{V^2}{2} \quad 2.32$$

Linealizando (2.31) y (2.32) resulta en:

$$\begin{bmatrix} i_1 & i_{-1} \\ v_1 & v_{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_n + \begin{bmatrix} v_1 & v_{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{-1} \\ \Delta i_1 \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \left( \frac{V^2}{2} \right) \end{bmatrix}, \quad 2.33$$

donde  $n$  es el nodo al cual se conecta el generador .

Se puede observar que la segunda matriz de (2.33) es singular. Esto hace que las corrientes no se puedan especificar como funciones de los voltajes. Sin embargo se puede obtener la siguiente ecuación adicional a partir de la red bajo estudio:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{-1} \\ \Delta i_1 \end{bmatrix}_n = Y_{nn} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_n + Y_{nj} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_j + Y_{nk} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_k, \quad 2.34$$

donde los subíndices  $j$  y  $k$  corresponden a los nodos aledaños al nodo PV (aunque pueden estar conectados a más de dos nodos). Sustituyendo (2.34) en (2.33) se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \left( \frac{V^2}{2} \right) \end{bmatrix} = (A + BY_{nn}) \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_n + B \left( Y_{nj} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_j + Y_{nk} \begin{bmatrix} \Delta v_{-1} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix}_k \right), \quad 2.35$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} i_1 & i_{-1} \\ v_1 & v_{-1} \end{bmatrix} \quad y \quad B = \begin{bmatrix} v_1 & v_{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad 2.36$$

La parte correspondiente del Jacobiano al nodo PV será sustituida por la ecuación (2.35).

## 2.7 El Reactor Controlado por Tiristores (TCR)

Un TCR monofásico consiste en un par de tiristores ( $T_1$  y  $T_2$ ) conectados en antiparalelo, en serie con una inductancia lineal como se ilustra en la Fig. 2-2. El par de tiristores actúa como un interruptor bidireccional, con el tiristor  $T_1$  conduciendo en los medios ciclos positivos y  $T_2$  en los medios ciclos negativos del voltaje aplicado [3].

El rango de control del TCR, dado por el ángulo de disparo ( $\lambda$ ), se extiende desde  $90^\circ$  hasta  $180^\circ$ . Un ángulo de disparo de  $90^\circ$  resulta en una conducción completa a través de los tiristores con una corriente senoidal a través del TCR. A medida que  $\lambda$  varía de  $90^\circ$  a  $180^\circ$  la corriente fluye en una forma discontinua de pulsos simétricamente localizados en los medios ciclos positivos y negativos, como se ilustra en la Fig. 2-3. Para un ángulo de  $180^\circ$  la corriente se reduce hasta cero. Si el ángulo es menor a  $90^\circ$  se introduce corriente directa propiciando un disturbio en la operación simétrica de los tiristores.

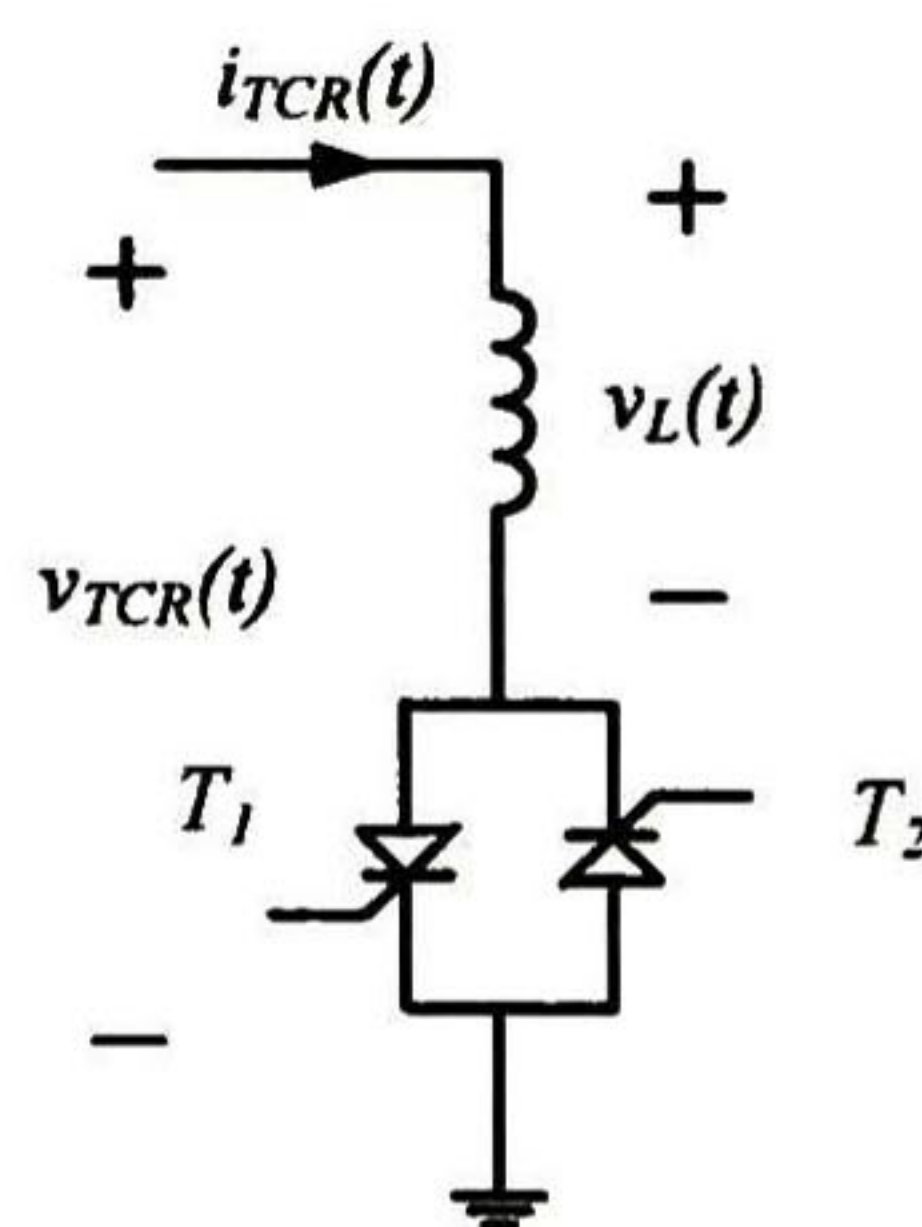
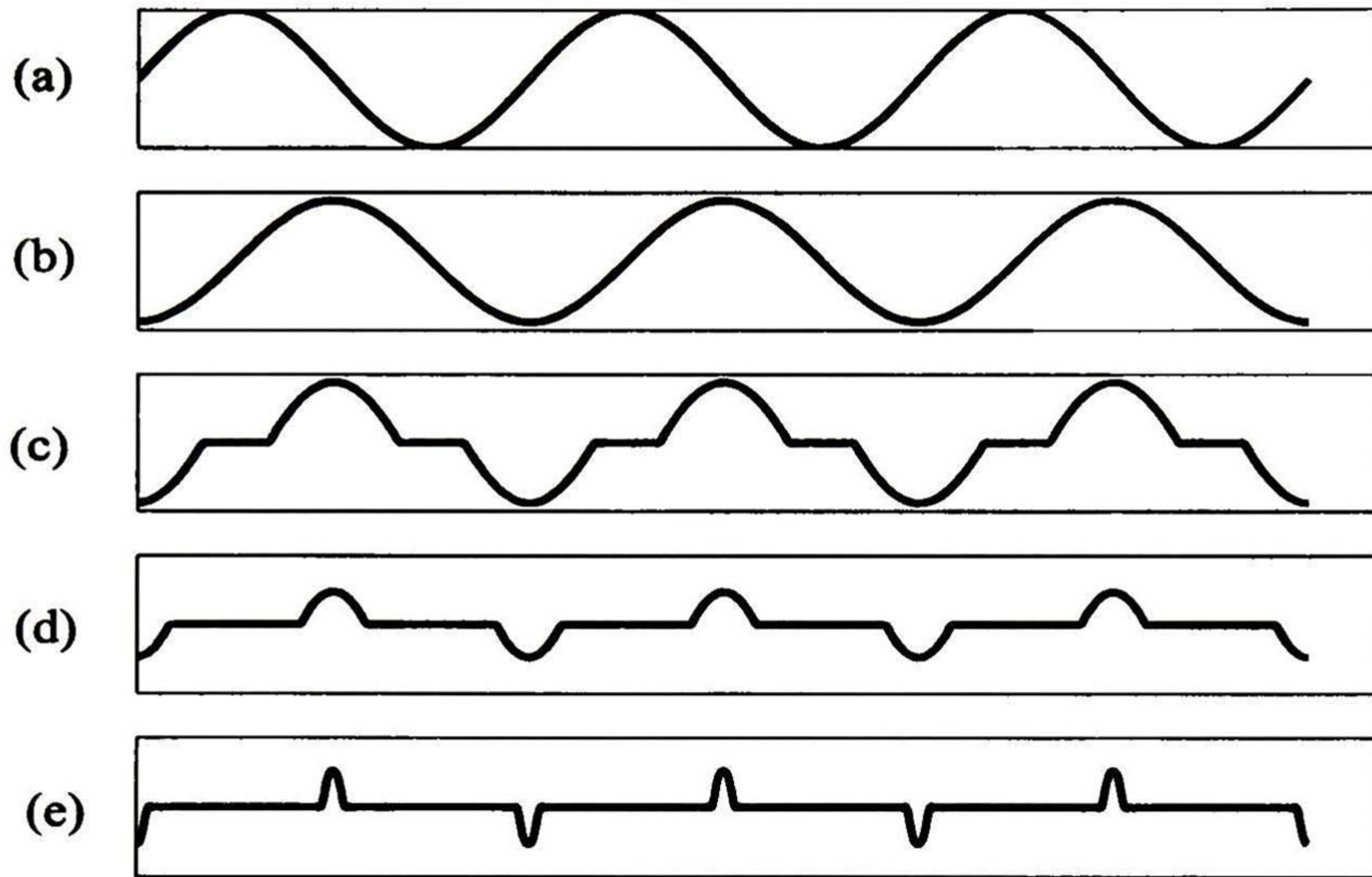


Fig. 2-2. Esquema de TCR monofásico





**Fig. 2-3.** Voltaje y corriente en terminales de un TCR. (a)  $V_{TCR}$ , (b)  $i_{TCR} (\alpha = 90^\circ)$  (c)  $i_{TCR} (\alpha = 120^\circ)$ , (d)  $i_{TCR} (\alpha = 150^\circ)$ , (e)  $i_{TCR} (\alpha = 170^\circ)$

El voltaje en el inductor de un TCR (ver Fig. 2- 2) puede expresarse en el DT por medio de las siguientes ecuaciones:

$$v_L(t) = s(t)v_{TCR}(t), \quad 2.37$$

$$v_L(t) = L \frac{di_{TCR}(t)}{dt}, \quad 2.38$$

donde  $s(t)$  es la función de conmutación (ver Fig. 2- 4). Entonces (2.37) y (2.38) en el DA se convierten en:

$$V_L = SV_{TCR}, \quad 2.39$$

$$V_L = LDI_{TCR}, \quad 2.40$$

donde  $S$  es la función de conmutación en el DA cuya estructura matricial es la de una matriz Hermitiana del tipo Toeplitz como la mostrada en (2.8) que se forma con el contenido armónico de  $s(t)$ . El proceso iterativo para la obtención de  $S$  se explica a detalle en la Sección 2.7.1.

Combinando (2.39) y (2. 40) y despejando la corriente del TCR se tiene:

$$I_{TCR} = J_{TCR} V_{TCR}, \quad 2. 41$$

donde la matriz de admitancia del TCR está dada por:

$$J_{TCR} = (1/L) D^{-1} S. \quad 2. 42$$

### 2.7.1 La Función de Conmutación $S$

En la Fig. 2-4 se muestra el efecto de la función de conmutación  $s(t)$  sobre  $v_{TCR}$  e  $i_{TCR}$ . El ángulo de disparo ( $\alpha$ ) y el ángulo de conducción ( $\sigma$ ), se relacionan de la siguiente manera:

$$\sigma = 2(\pi - \alpha). \quad 2. 43$$

El cruce por cero del voltaje a través del TCR es tomado como referencia para el ángulo de disparo del primer tiristor como se muestra en la Fig. 2-4. El primer tiristor se acciona en  $\theta_{a1}$  y conduce por un periodo de  $\sigma_1$  desconectándose en  $\theta_{b1}$ . En este trabajo se asume un esquema de disparo equidistante, es decir  $\theta_{a2} - \theta_{a1} = \pi$ .

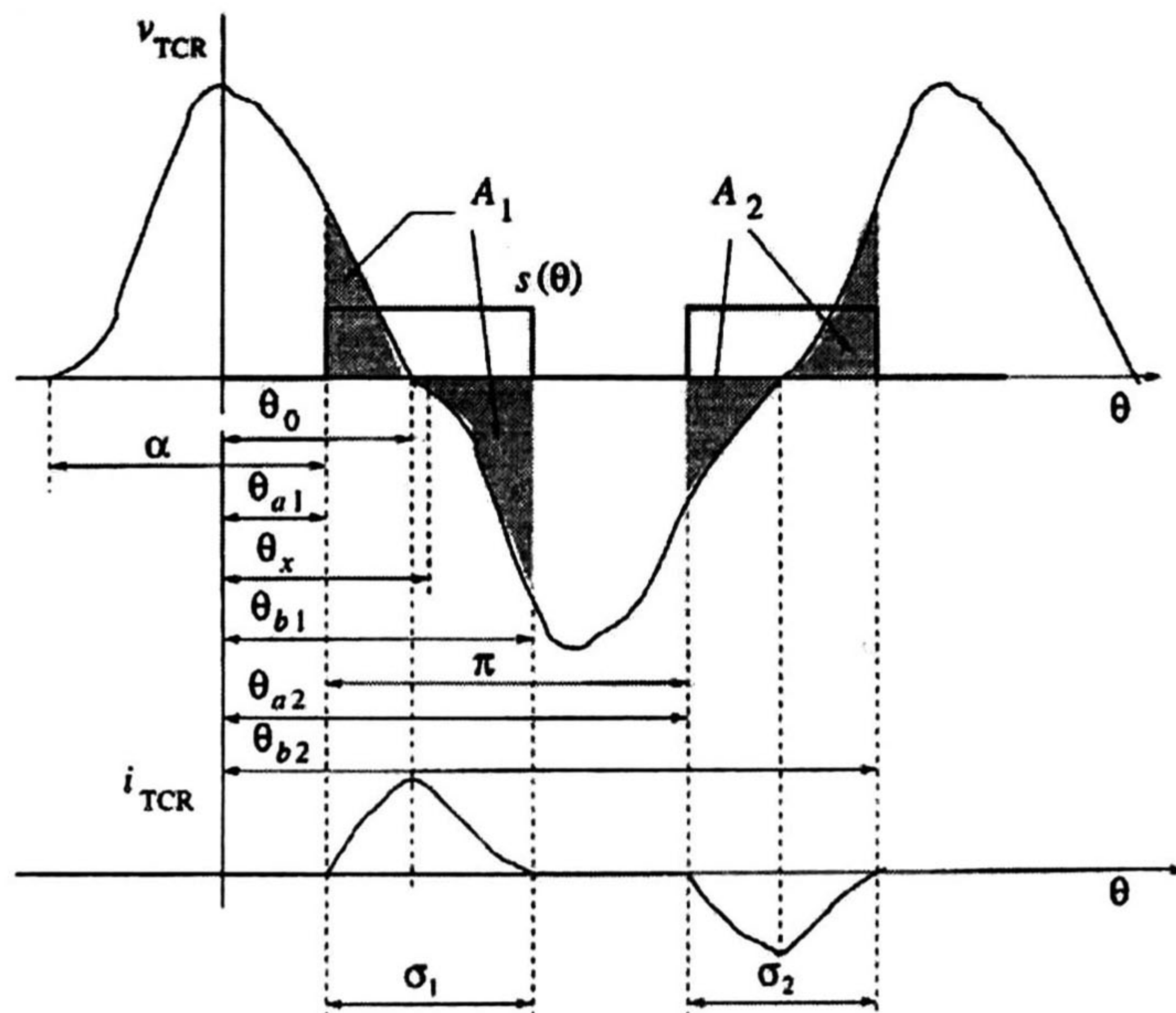


Fig. 2- 4. Ángulos de disparo y conducción del TCR [2]

Al momento que el voltaje cruza por cero en un ángulo  $\theta_0$ , puede ser representado en series de Fourier [7], [14] como:

$$v_{TCR} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jn\theta_0} = 0. \quad 2.44$$

El final del periodo de conducción, dado por el cruce por cero de la corriente en los tiristores, ocurre cuando el área del voltaje en el periodo de conducción es igual a cero, es decir:

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{\theta_{a1}}^{\theta_{b1}} v_{TCR} d\theta = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{V_n}{jn} (e^{jn\theta_{b1}} - e^{jn\theta_{a1}}) = 0 \\ A_2 &= \int_{\theta_{a2}}^{\theta_{b2}} v_{TCR} d\theta = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{V_n}{jn} (e^{jn\theta_{b2}} - e^{jn\theta_{a2}}) = 0 \end{aligned} \quad , \quad 2.45$$

donde:

$$\begin{aligned} \theta_{a1} &= \theta_0 - (\pi - \alpha) \\ \theta_{a2} &= \theta_0 + \alpha \end{aligned} \quad 2.46$$

En base a (2.44), (2.45) y (2.46), se utiliza el método de Newton con el cual se obtienen los ángulos de conducción. La expresión recursiva correspondiente es [5]:

$$\begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_{b1} \\ \theta_{b2} \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_{b1} \\ \theta_{b2} \end{bmatrix}^o - \begin{bmatrix} \frac{\partial v_{TCR}}{\partial \theta_0} & \frac{\partial v_{TCR}}{\partial \theta_{b1}} & \frac{\partial v_{TCR}}{\partial \theta_{b2}} \\ \frac{\partial A_1}{\partial \theta_0} & \frac{\partial A_1}{\partial \theta_{b1}} & \frac{\partial A_1}{\partial \theta_{b2}} \\ \frac{\partial A_2}{\partial \theta_0} & \frac{\partial A_2}{\partial \theta_{b1}} & \frac{\partial A_2}{\partial \theta_{b2}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{TCR} \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}^o, \quad 2.47$$

$$\theta_n = \theta_o - J \begin{bmatrix} v_{TCR} \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}^o, \quad 2.48$$

donde los elementos del Jacobiano diferentes de cero son:

$$\begin{aligned}
J_{11} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} jnV_n e^{jn\theta_0} \\
J_{21} &= -\sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jn(\theta_0 - \pi + \alpha)} \\
J_{22} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jn\theta_{b1}} \\
J_{31} &= -\sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jn(\theta_0 + \alpha)} \\
J_{33} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jn\theta_{b2}}
\end{aligned} \tag{2.49}$$

La condición inicial requerida para la solución de (2.48) es tomada del cruce por cero de la componente fundamental del voltaje del TCR como:

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{\Im\{V_1\}}{\Re\{V_1\}} \right) \tag{2.50}$$

A su vez, las condiciones iniciales de  $\theta_{b1}$  y  $\theta_{b2}$  pueden asumirse con simetría de cuarto de onda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
\theta_{b1} &= \theta_0 + (\theta_0 - \theta_{a1}) \\
\theta_{b2} &= \theta_{b1} + \pi
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Después de la convergencia de (2.48), el centro de la función de conmutación  $s(\theta)$  está dado por:

$$\theta_x = \theta_{a1} + \frac{\sigma_1}{2}, \tag{2.52}$$

y los ángulos de conducción son

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \theta_{b1} - \theta_{a1} \\
\sigma_2 &= \theta_{b2} - \theta_{a2}
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Los ángulos  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son usados para la obtención del contenido armónico de la función de conmutación, dado por:

$$\begin{aligned}
S_0 &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2\pi}, \\
S_n &= \frac{1}{n\pi} \left( \sin \frac{n\sigma_2}{2} \cos n\pi + \sin \frac{n\sigma_1}{2} \right) e^{-jn\theta_x}
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Finalmente  $S$  está dada por

$$S = \begin{bmatrix} S_0 & S_{-1} & S_{-n} \\ S_1 & S_0 & \cdots & S_{-n} \\ \vdots & S_1 & S_0 & \vdots \\ S_n & \vdots & \cdots & S_{-1} \\ S_n & \cdots & S_0 \end{bmatrix}. \quad 2.55$$

## 2.8 El Compensador Estático de Volt-Amper Reactivos (SVC)

El SVC consiste de un TCR en paralelo con un banco de capacitores como se observa en la Fig. 2-5. Desde el punto de vista operacional, el SVC se comporta como una reactancia variable en derivación, que puede generar o absorber reactivos con el propósito de regular la magnitud de voltaje en el punto de conexión del sistema deseado [5], [16].

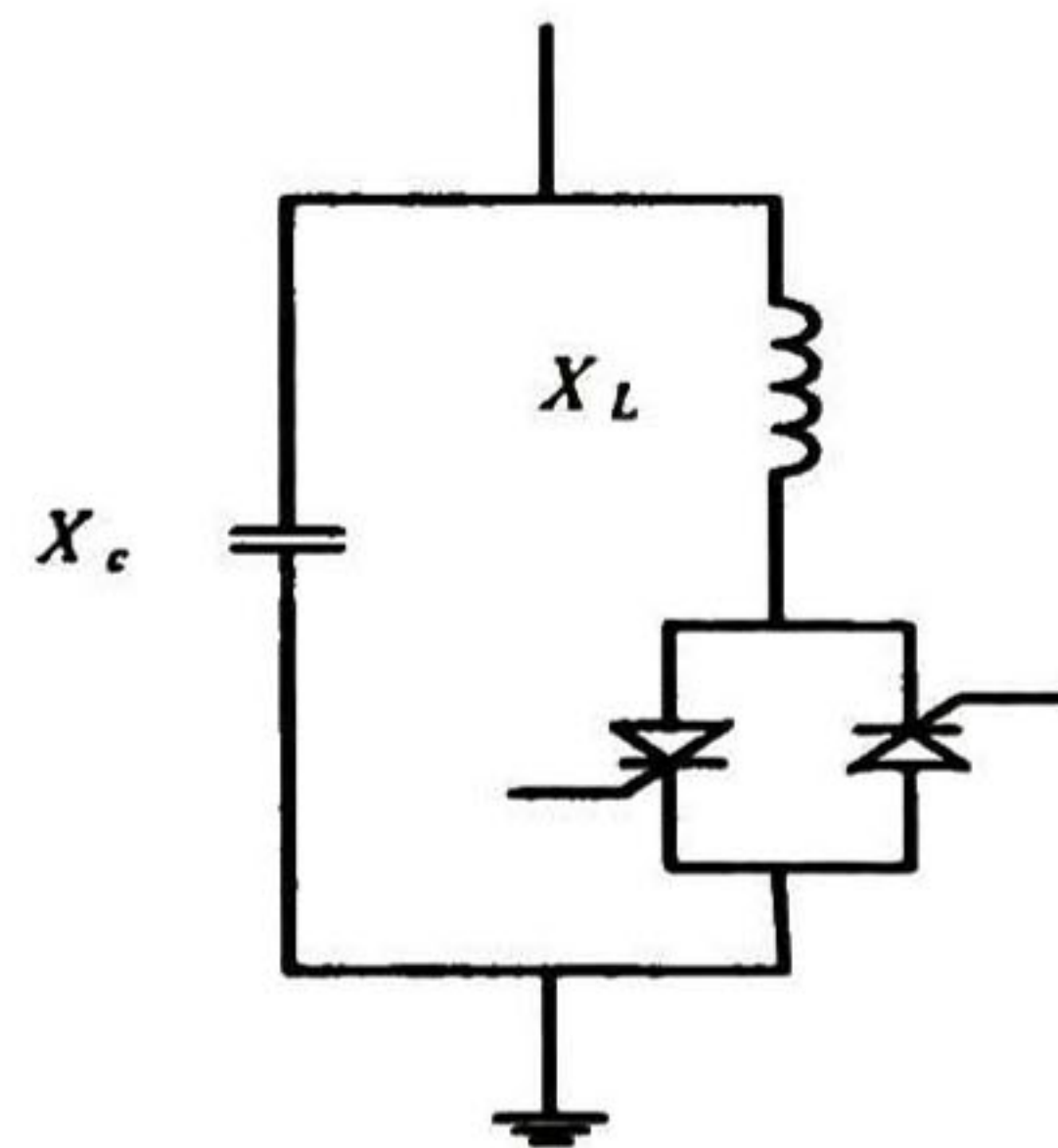


Fig. 2-5. Esquema del SVC monofásico

Tomando en cuenta que la admitancia del TCR dada por (2.42), el Jacobiano resultante del SVC está dado por:

$$J_{SVC} = J_{TCR} + Y_C, \quad 2.56$$

donde el equivalente para el capacitor es (ver Tabla 2-1)

$$Y_C = CD$$

2.57

## 2.9 El Compensador Estático Serie Controlado por Tiristores (TCSC)

El uso de capacitores en serie en líneas de transmisión de grandes longitudes físicas incrementa la capacidad de transmitir potencia. El TCSC provee un control activo en el flujo de potencia con un retardo muy pequeño, mejorando la estabilidad del circuito de transmisión.

El TCSC básico está formado por un SVC conectado en serie con la línea de transmisión como se observa en la Fig. 2-6 [9],[19].

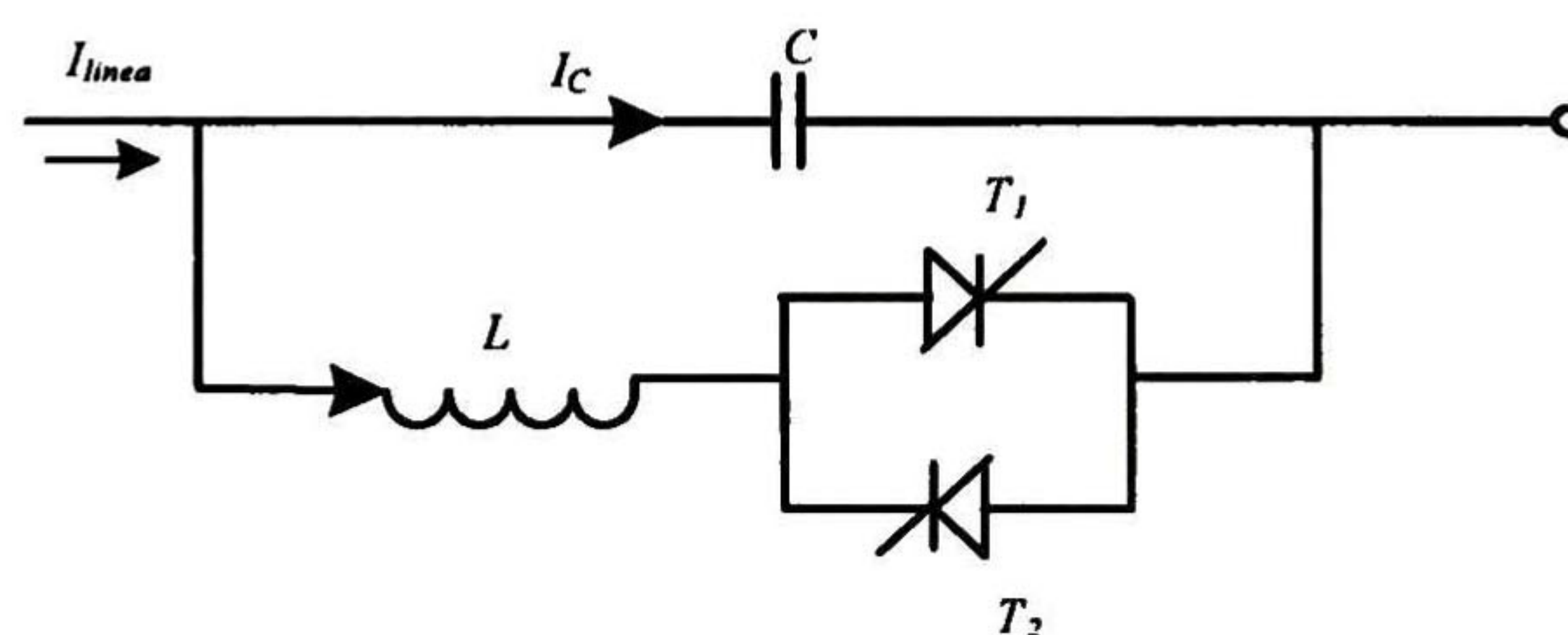


Fig. 2-6. Esquema básico del TCSC

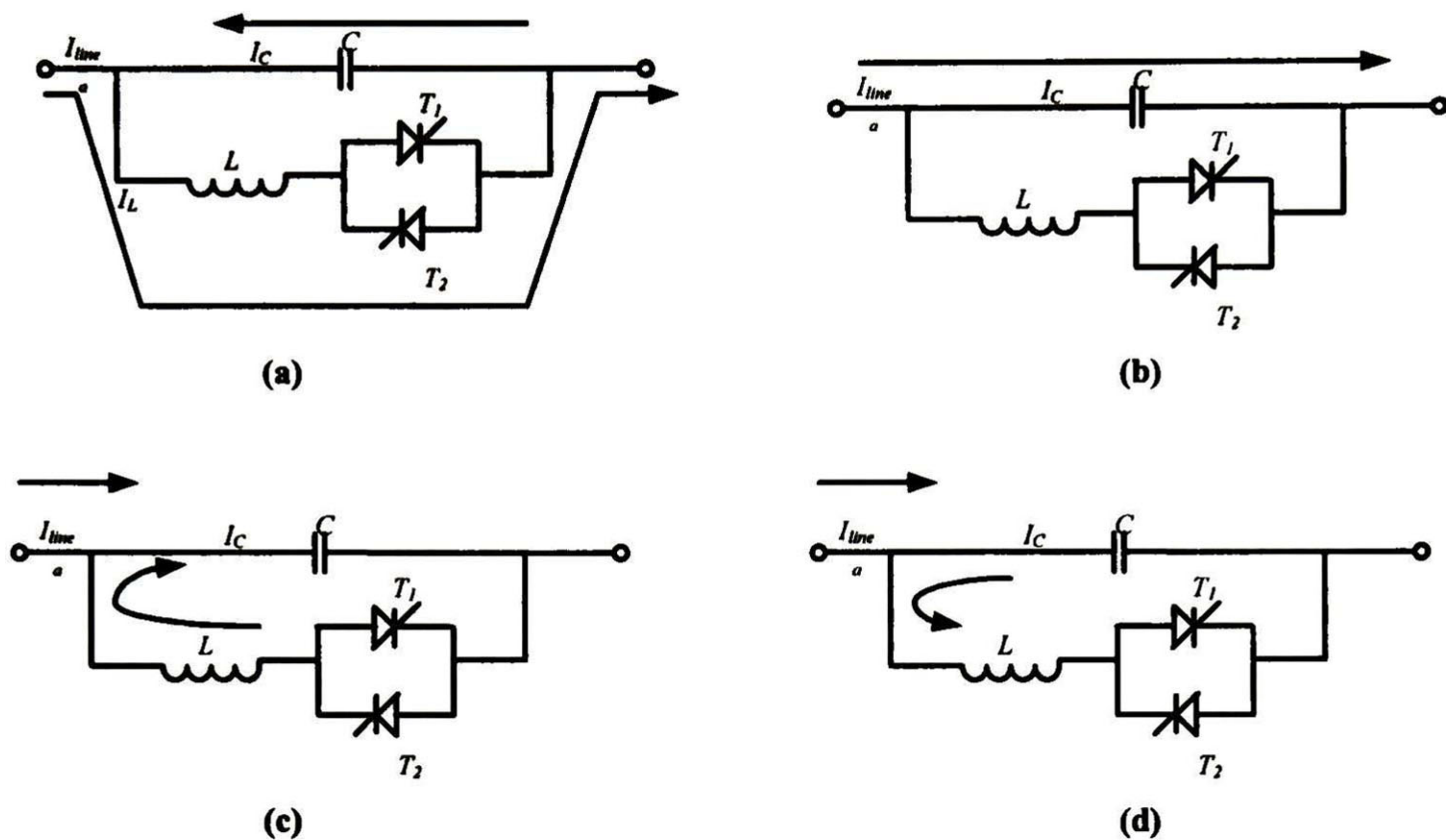
El Jacobiano de un TCSC es similar al del SVC, y está dado por:

$$J_{TCSC} = J_{TCR} + Y_C \cdot \quad 2-23$$

Sin embargo, para el cálculo de la función de conmutación se utiliza la diferencia de los voltajes en las terminales del TCSC.

En la práctica, parte de la corriente armónica generada por el TCR es atrapada dentro del TCSC por la baja impedancia del capacitor comparada con la impedancia equivalente del sistema, produciendo una distorsión considerable del voltaje en las terminales del TCSC [11].

De acuerdo al ángulo de conducción, el TCSC tiene los siguientes modos de operación (ver Fig. 2-7) [9]:



**Fig. 2-7.** Diferentes formas de operación para el TCSC. (a) Modo bypassed (b) Modo bloqueado (c) Conducción parcial (capacitivo) (d) Conducción parcial (inductivo)

### a) Modo tiristor pasa todo (*Bypassed*)

En este modo los tiristores se encuentran en una conducción total, con un ángulo de conducción de  $180^\circ$ , los pulsos de compuertas son aplicados lo mas rápido posible después de que el voltaje a través del tiristor es cero y se vuelve positivo, resultando en una corriente continua senoidal a través de los tiristores. El comportamiento del TCSC es el de un capacitor-inductor en paralelo (ver Fig. 2-7a). La corriente a través del módulo es inductiva, por el motivo que la susceptancia del inductor es mayor a la del capacitor. En el programa de flujos de potencia armónicos el proceso para encontrar la función de conmutación no se altera, la forma de la matriz de la función de conmutación ( $S$ ) es similar a la matriz identidad.

### b) Modo tiristor bloqueado (*Blocked*)

Los pulsos de disparo en el tiristor están bloqueados. El dispositivo TCSC es entonces reducido a un capacitor serie y la reactancia total por supuesto que es capacitiva (ver Fig. 2-7b). Los elementos de la matriz de la función de conmutación ( $S$ ) son prácticamente cero.

### *c) Conducción parcial del tiristor modo capacitivo*

El comportamiento del TCSC tiene una reactancia capacitiva y una inductiva controladas por el ángulo de conducción (ver Fig. 2-7c). En el modo capacitivo, los tiristores son disparados cuando el voltaje y la corriente del capacitor tienen polaridad opuesta. Esta condición causa un incremento en el voltaje del capacitor. Para prevenir resonancia, el ángulo de disparo ( $\alpha$ ) es medido del cruce por cero del voltaje del capacitor, en un ángulo de  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 180^\circ$ . La reactancia máxima permisible con  $\alpha = \alpha_{\min}$  es dos y medio a tres veces la reactancia a frecuencia fundamental.

### *c) Conducción parcial del tiristor modo inductivo*

La última variante es el modo inductivo, en el cual el TCSC puede operar con conducción alta en los tiristores. En este modo la dirección de la corriente circulante es revertida y el control presenta una impedancia inductiva (ver Fig. 2-7d).

## 2.10 Conclusiones

En este Capítulo se han obtenido las representaciones en el DA de elementos no lineales, de conmutación y generadores PV que son utilizados en el estudio de flujos de potencia armónicos para redes eléctricas monofásicas. La estructura de la matriz de admitancia para cada elemento refleja el comportamiento lineal o no lineal de los elementos del sistema siendo diagonal para los primeros y con acoplamientos para los segundos, mientras que para la incorporación de los nodos PV se necesita de un acomodo especial en el Jacobiano total.

Se ha observado que si se tiene el modelo matemático de algún elemento eléctrico en el DT puede pasarse al DA y viceversa de una manera muy sencilla, utilizando para este caso las series de Fourier. Además se ha hecho notar que las ecuaciones integro-diferenciales en el DT pasan a ser ecuaciones matriciales en el DA.



## Capítulo III

---

# FLUJOS DE POTENCIA ARMÓNICOS – CASO MONOFÁSICO

### 3.1 Introducción

**E**n este Capítulo se presenta la incorporación de los elementos descritos en el Capítulo II a una red eléctrica monofásica. Además, se describe un algoritmo para obtener el estado estable de dicha red por medio del método de Newton–Raphson [15], [20].

### 3.2 Solución Utilizando Análisis Nodal y Método de Newton-Raphson

Con propósitos de ilustración, considere la red mostrada en la Fig. 3-1. La relación que existe entre las corrientes nodales inyectadas  $I$ , los voltajes nodales  $V$  y las fuentes de voltaje (bus infinito)  $V_1$ , se expresa en el DA de la manera siguiente [4]:

$$I = YV + Y'V_1 + I_{bus}(V), \quad 3.1$$

en donde  $Y'$  representa la matriz de admitancia conectada al bus infinito,  $Y$  representa al resto del sistema e  $I_{bus}(V)$  es la corriente de los nodos exceptuando al bus infinito. Linealizando (3.1) se tiene:

$$\Delta I = J\Delta V, \quad 3.2$$

donde  $J$  es el Jacobiano total que incluye elementos lineales, no lineales y de conmutación. De (3.2) se puede obtener la ecuación recursiva:

$$J(V_n - V_{hist}) = I_{esp} - I_{hist} = -I_{hist}, \quad 3.3$$

donde  $I_{esp}$  es el vector de corrientes inyectadas a cada nodo, especificado por un vector de ceros debido a que corresponde a una inyección ficticia; los subíndices  $n$  e  $hist$  corresponden a nuevo e historia, respectivamente.

### 3.3 Metodología de Solución

Considere la red que se muestra en la Fig. 3-1. La fuente de corriente entrando al nodo 1 está dada por  $I_1 = Y_1 V_1$ , donde  $Y_1$  es una matriz diagonal.

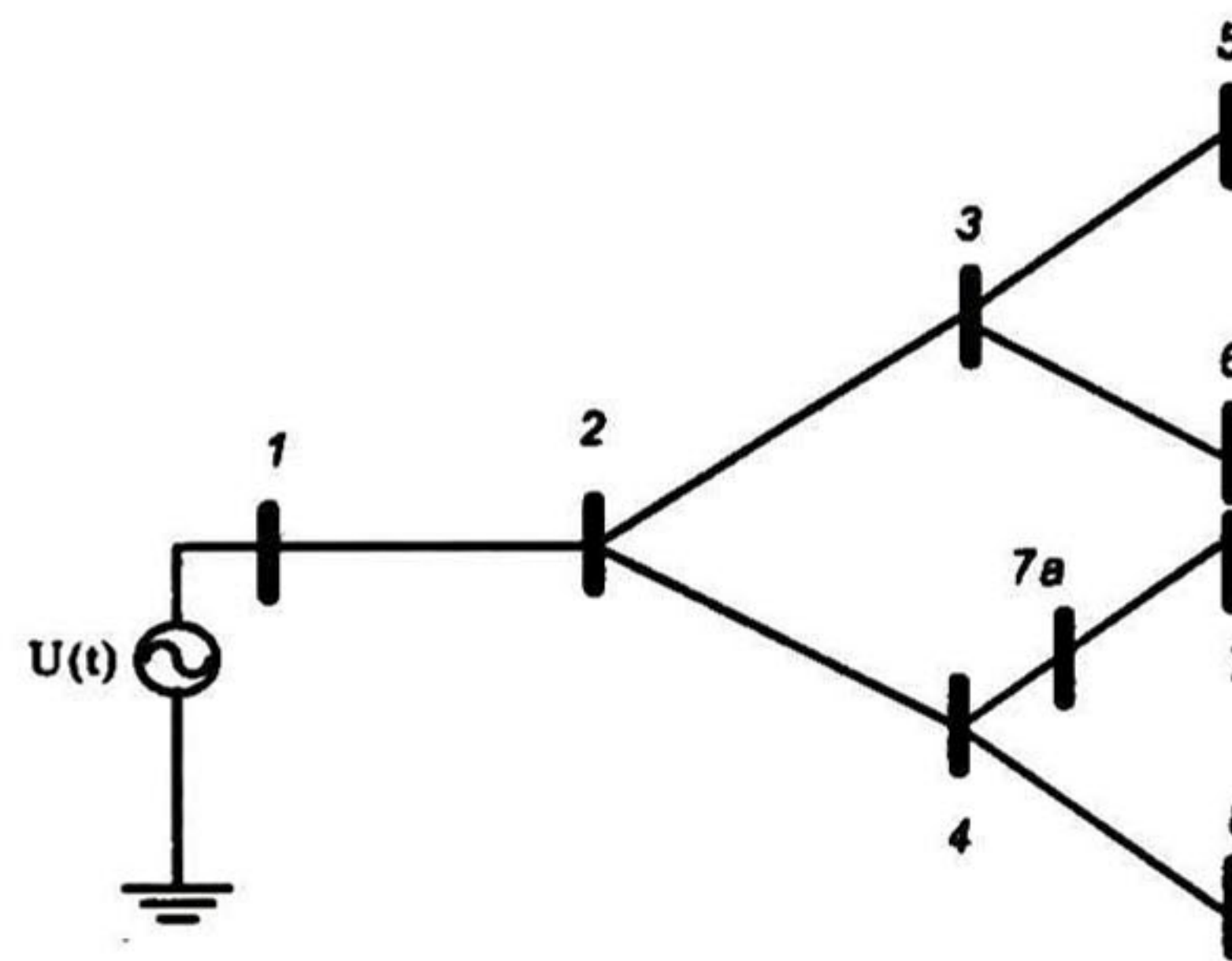


Fig. 3-1. Red monofásica

La matriz nodal del sistema de la Fig. 3.1 está dada por:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_m \end{bmatrix}, \quad 3.4$$

donde  $I_m$  representa el vector de corrientes inyectadas en los nodos 2 al 8. De la primera ecuación en(3.4) se obtiene:

$$V_1 = Y_{11}^{-1} (I_1 - Y_{12} V_m). \quad 3.5$$

Sustituyendo (3.5) en la segunda ecuación de (3.4) se obtiene

$$I_m = (Y_{22} - Y_{21} Y_{11}^{-1} Y_{12}) V_m + Y_{21} Y_{11}^{-1} I_1 \quad 3.6$$

La linealización de (3.6) resulta en (3.2) donde el Jacobiano está dado por:

$$J = Y_{22} - Y_{21} Y_{11}^{-1} Y_{12}, \quad 3.7$$

donde  $Y_{22}$  contiene todas las cargas lineales, no lineales o elementos de conmutación de los nodos, esto es:

$$Y_{22} = J_{lineas} + J_{RL} + J_{nl} + J_{PQ} + J_{SVC} + J_{TCSC}, \quad 3.8$$

Después de calcular el Jacobiano total dado por (3.7), se resuelve (3.3) como:

$$V_n = -J^{-1}I_{hist} + V_{hist}, \quad 3.9$$

donde  $V_{hist}$  es el estimado inicial del voltaje en los nodos dado, por ejemplo, por un voltaje puramente senoidal igual al del bus infinito. La corriente  $I_{hist}$  se obtiene sumando las corrientes entrando y saliendo en cada nodo, esto es:

$$I_{hist} = (J_{lineas} + J_{RL} + J_{SVC} + J_{TCSC})V_n + i_{nl} + i_{PQ}. \quad 3.10$$

En este trabajo se considera a la carga no lineal como la relación flujo/corriente (en cantidades instantáneas) [5]:

$$i_{nl} = \alpha\psi + \beta\psi^3 \quad 3.11$$

### 3.4 Ejemplo de Aplicación

#### 3.4.1 Datos de la Red

Considere la red radial de la Fig. 3-1. En el nodo 1  $u(t) = \cos(\omega_0 t)$  (pu) con  $\omega_0 = 1$  pu. En los nodos 2 a 8 se conectan secuencialmente cargas  $RL$ ,  $\alpha\beta$ ,  $PQ$  y un generador PV con los parámetros que se presentan en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1**  
DATOS DE CARGAS EN PU

CARGA $RL$		CARGA $\alpha\beta$		CARGA $PQ$		BUS PV		
$R$	$L$	$\alpha$	$\beta$	$P$	$Q$	$P$	$Q$	$V_{rms}$
2	6	0.2	0.4	0.03	0.01	0.350	0.3789	0.2601

Cabe mencionar que aunque las cargas lineales y no lineales se han especificado con el mismo valor para todos los nodos, el algoritmo es capaz de manejar cargas con valores distintos para cada uno de ellos. El número de armónicos que se ha utilizado en este ejemplo es igual a 50, con un criterio de convergencia  $\| -i_n + i_{esp} \| = 10^{-10}$ . Para este ejemplo, los datos de las líneas transmisión se presentan en la Tabla 3-2.

**Tabla 3- 2**

DATOS DE LINEA CASO MONOFÁSICO EN PU

Líneas de transmisión		
<i>R</i>	<i>L</i>	<i>C</i>
0.01	0.2	0.01

Nótese que para el caso monofásico  $Z_T$  de (2.19) está dada por  $Z_T = R + LD$  y  $Y_T$  de (2.20) está dada por  $Y_T = CD$ .

### 3.4.2 Sistema con Cargas Lineales

En la primera etapa, del nodo 2 al 7 se colocan cargas lineales  $RL$  solamente, en el nodo 8 no se conecta ningún tipo de carga puesto que en éste será conectado el generador PV en una etapa posterior. Las formas de onda de voltajes y corrientes en los nodos 5 y 7 y el voltaje del nodo 8 se presentan en la Fig. 3-2, donde se observa claramente que el tipo de onda es puramente senoidal. En este caso el método de Newton-Raphson arroja la solución al sistema en la primera iteración. El tiempo de simulación requerido es de aproximadamente 0.5150s en una computadora Pentium-IV, 2.5GHz de velocidad y 512 en memoria RAM.

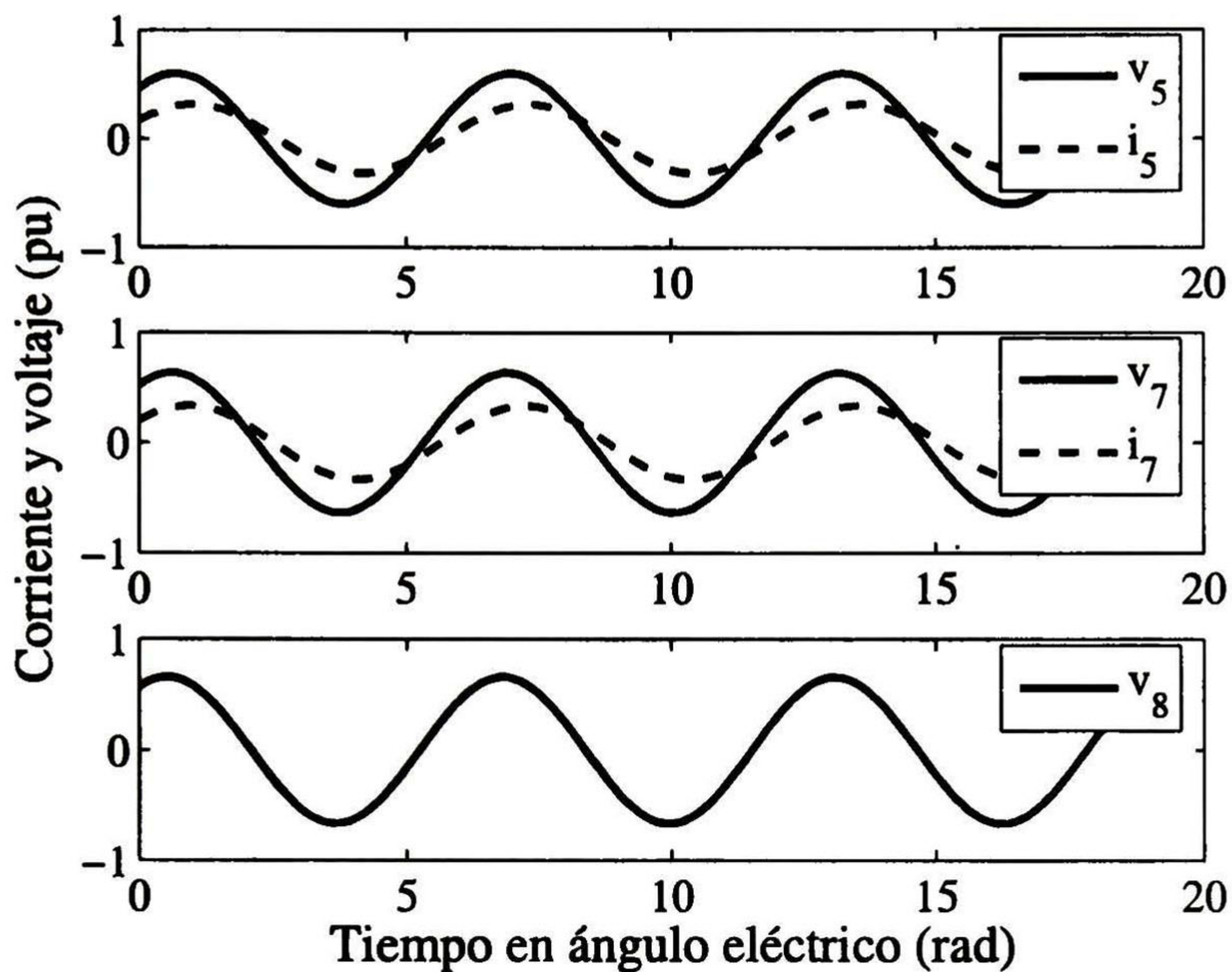


Fig. 3-2. Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico

### 3.4.3 Sistema con Cargas Lineales, No Lineales y Cargas PQ

En esta etapa, del nodo 2 al nodo 6 se colocan además cargas no lineales  $\alpha\beta$  y del nodo 2 al 4 cargas PQ adicionales a las cargas ya existentes. Con propósitos ilustrativos, en este trabajo se utiliza un reactor con la curva de saturación mostrada en la Fig. 3-3. En la Fig. 3-4 se muestran los voltajes y corrientes de carga para los nodos 5, 7 y el voltaje del nodo 8, donde se observa claramente la distorsión armónica en la señal resultante.

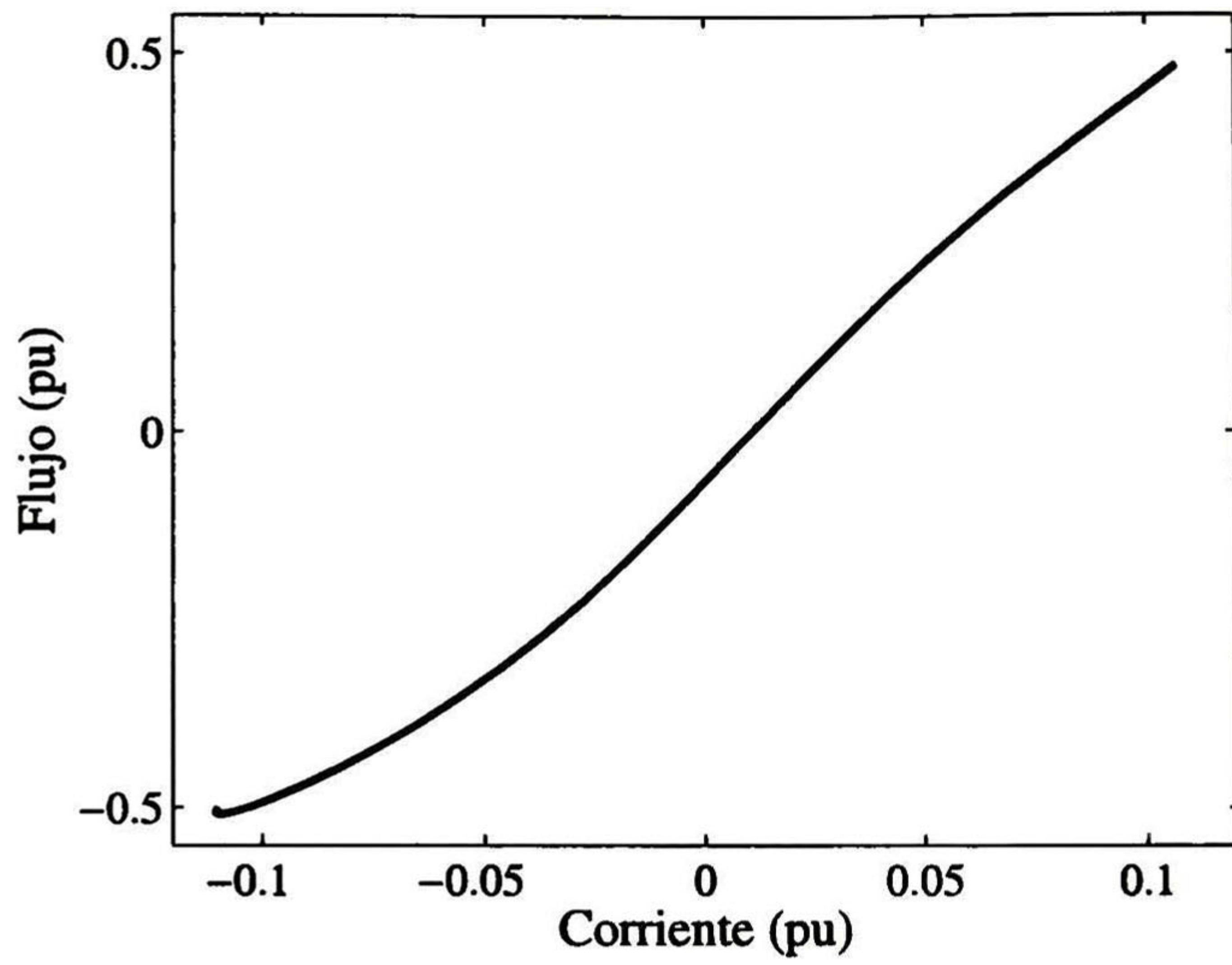


Fig. 3-3. Curva de saturación del reactor

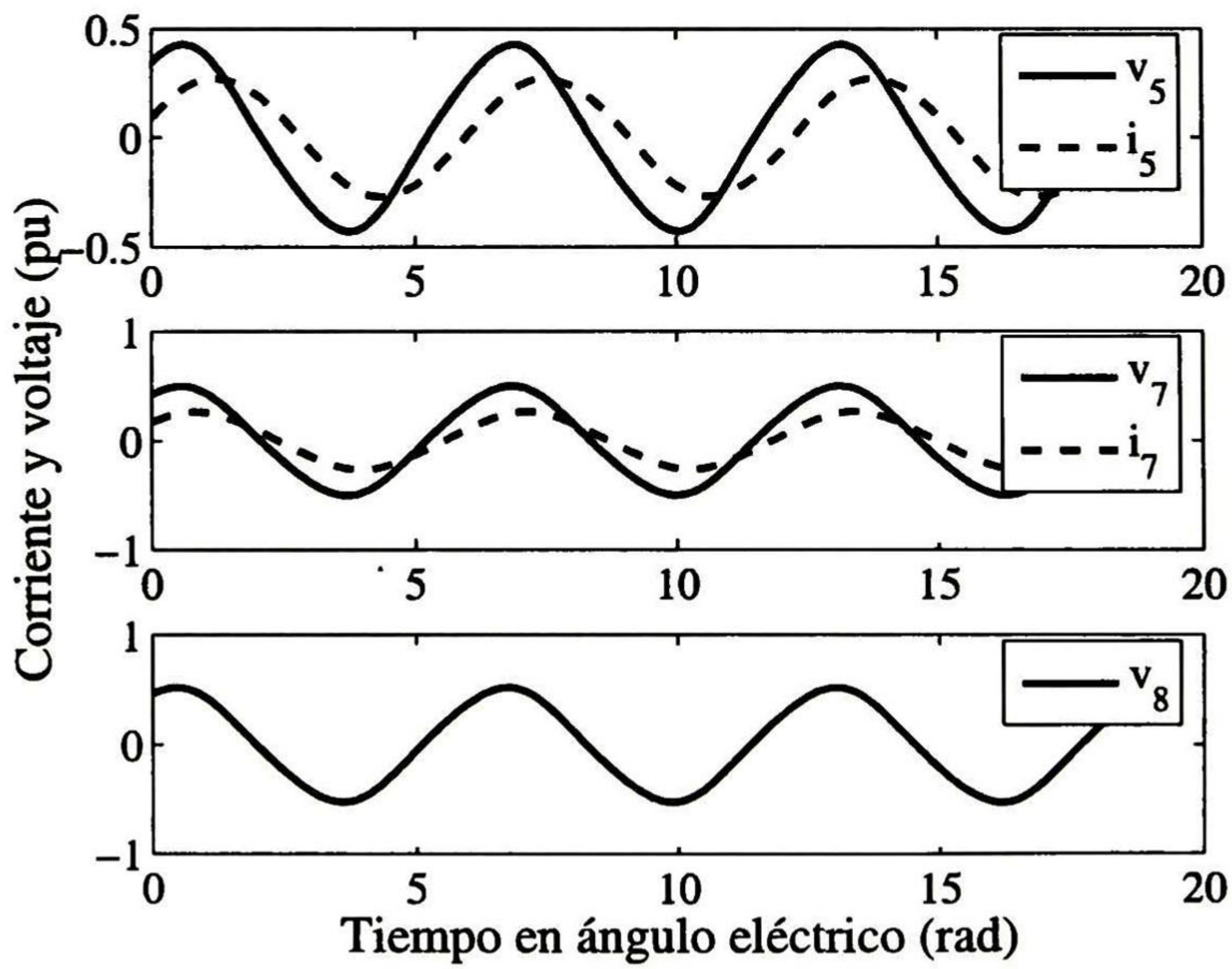


Fig. 3-4 Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico

La Fig. 3-5 muestra el contenido armónico en % de la frecuencia fundamental de la corriente de carga en los nodos 5 y 7, respectivamente.

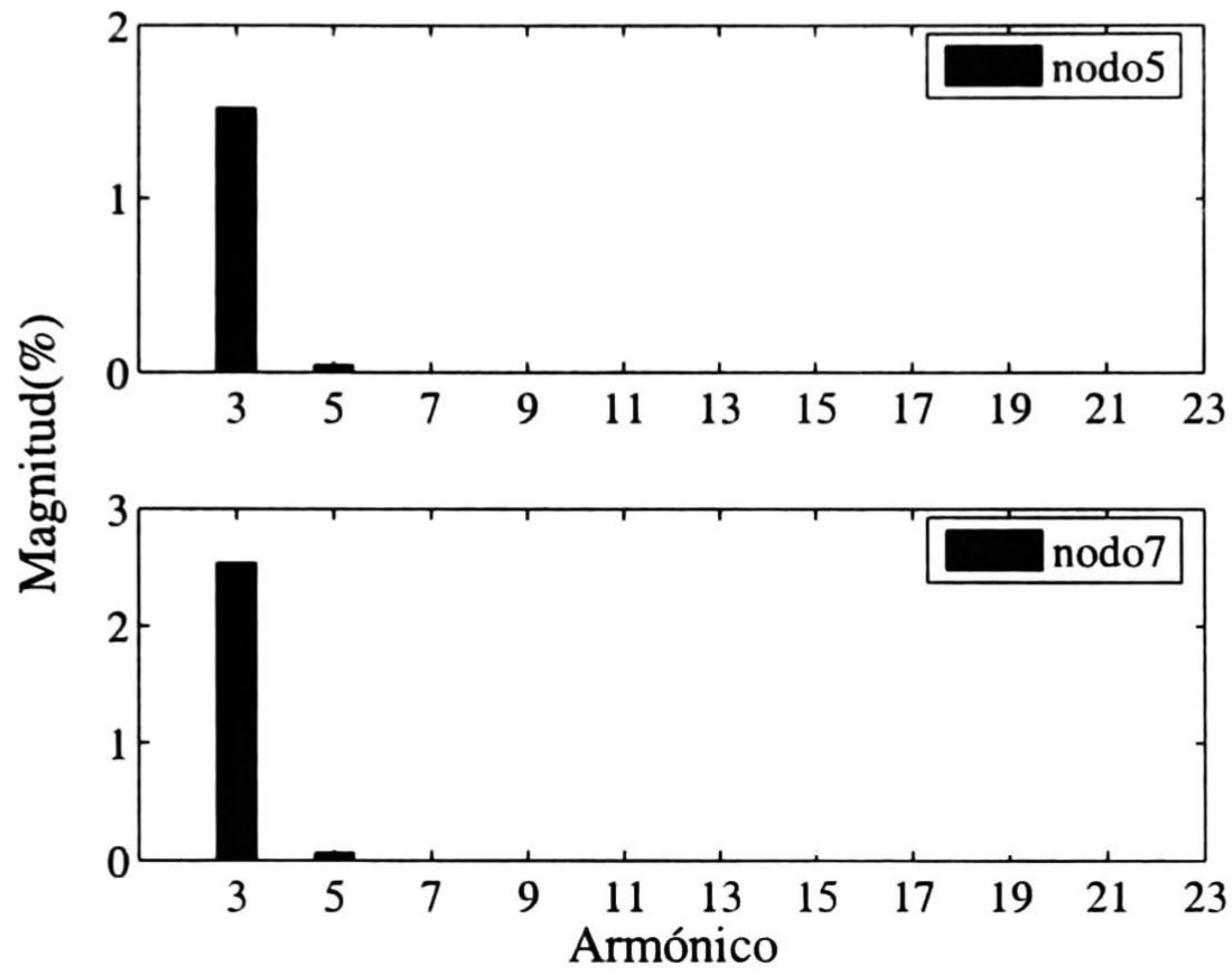


Fig. 3-5 Contenido armónico de la corriente de carga en nodos 5 y 7

En esta etapa la convergencia se logra en la cuarta iteración con un tiempo de cómputo de 1.2190 s. La Fig. 3-6 muestra el patrón de dicha convergencia.

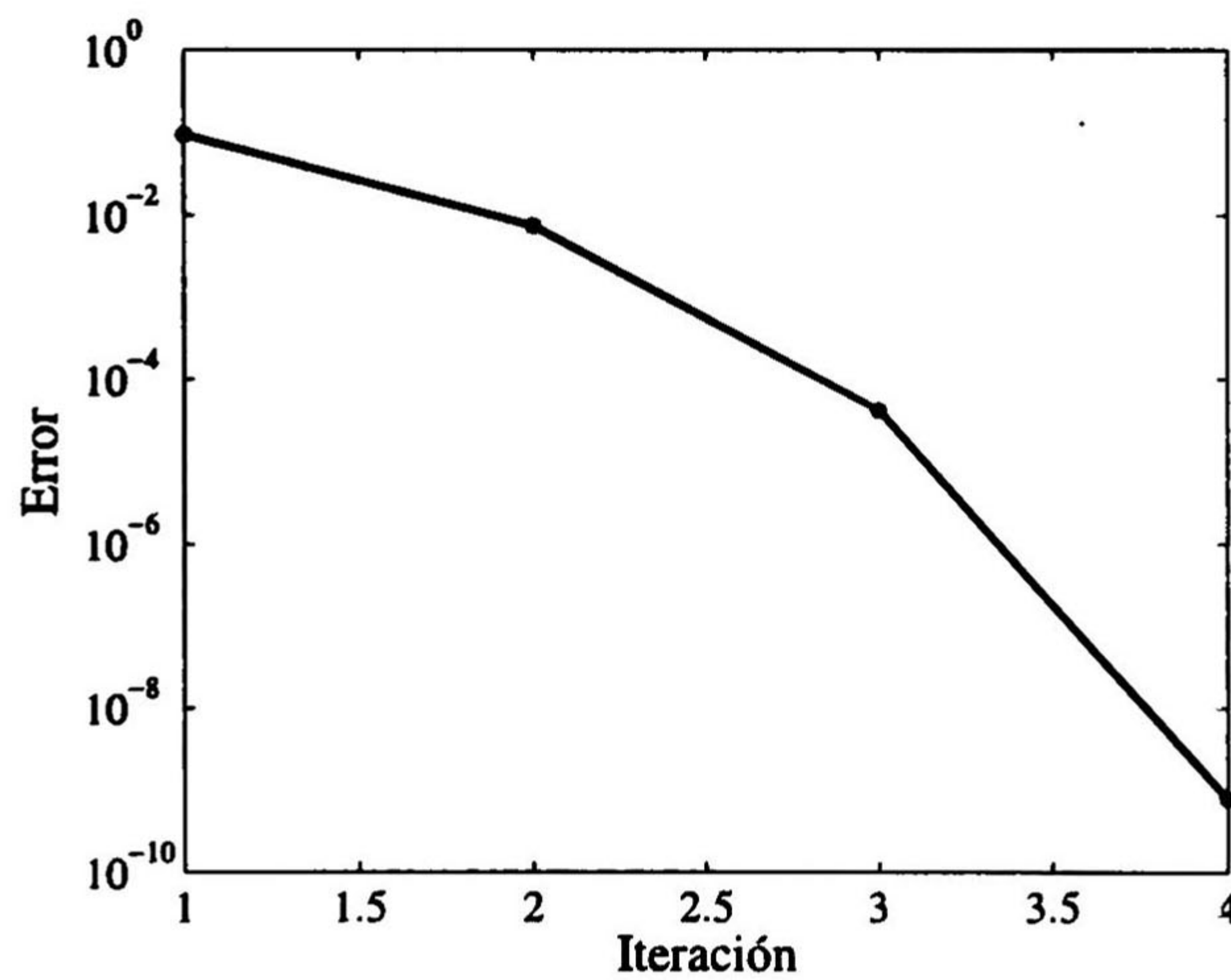


Fig. 3-6. Patrón de convergencia , sistema con cargas RL,  $\alpha\beta$  y PQ, caso monofásico

### 3.4.4 Sistema con Elementos de Conmutación SVC y TCSC

En esta etapa se incluyen adicionalmente los dispositivos de conmutación SVC (nodo 5) y TCSC (inicio de línea del nodo 4 al 7a). Los parámetros del SVC son  $L=8\text{pu}$ ,  $C=1/16\text{pu}$  y un ángulo de disparo de  $150^\circ$ , mientras para el TCSC son  $L=8\text{pu}$ ,  $C=1/16\text{pu}$  y un ángulo de disparo de  $150^\circ$

En las Figs. 3-7a y 3-7b se presentan las reactancias equivalentes del SVC y del TCSC para la frecuencia fundamental con respecto al ángulo de disparo. Nótese que para los ángulos de disparo mencionados anteriormente los dos elementos se encuentran en la zona capacitiva. La Fig. 3-8, presenta los voltajes y las corrientes de carga de los nodos 5 y 7 y el voltaje del nodo 8. En la Fig. 3-9 se muestra el contenido armónico de las corrientes de carga de los nodos 5 y 7. En la Fig. 3-10 puede observarse el patrón de convergencia. La corriente a través del SVC se muestra en la Fig. 3-11.

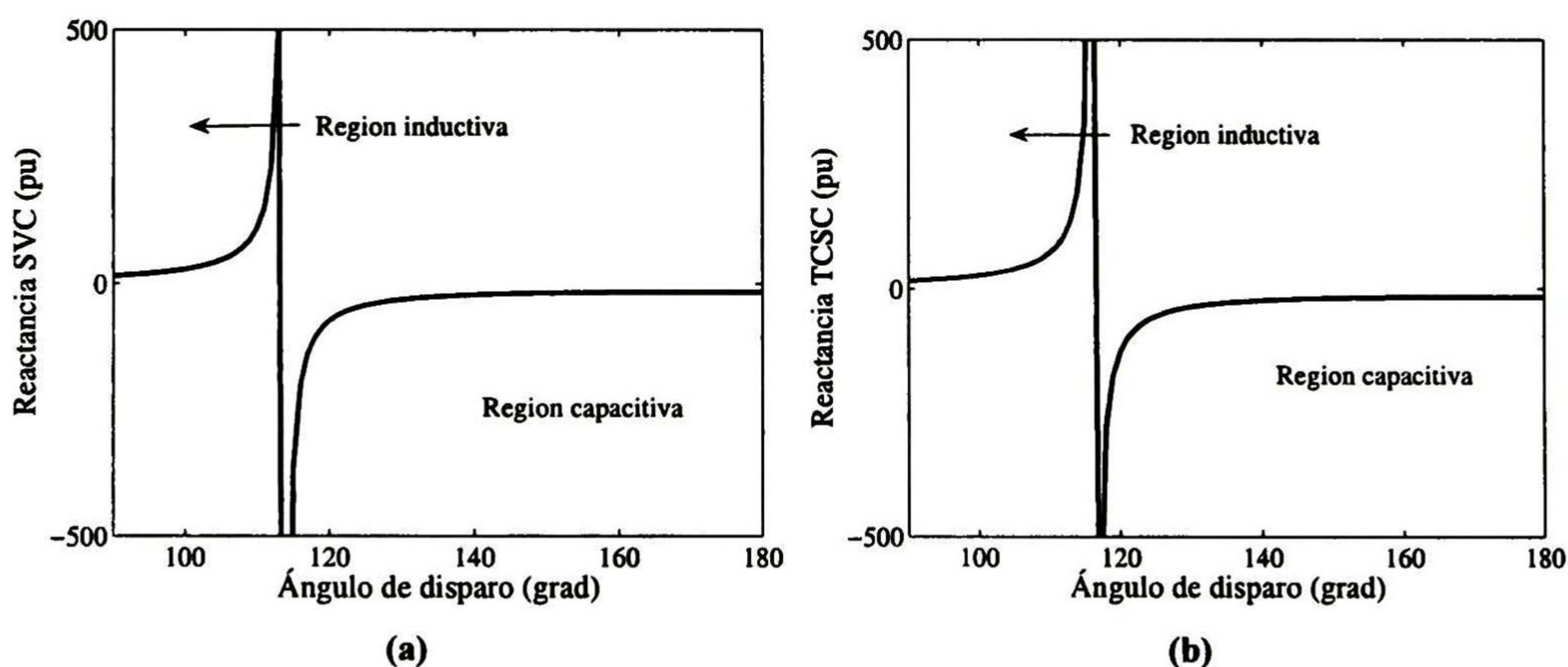


Fig. 3-7. Reactancia a frecuencia fundamental para el SVC y TCSC



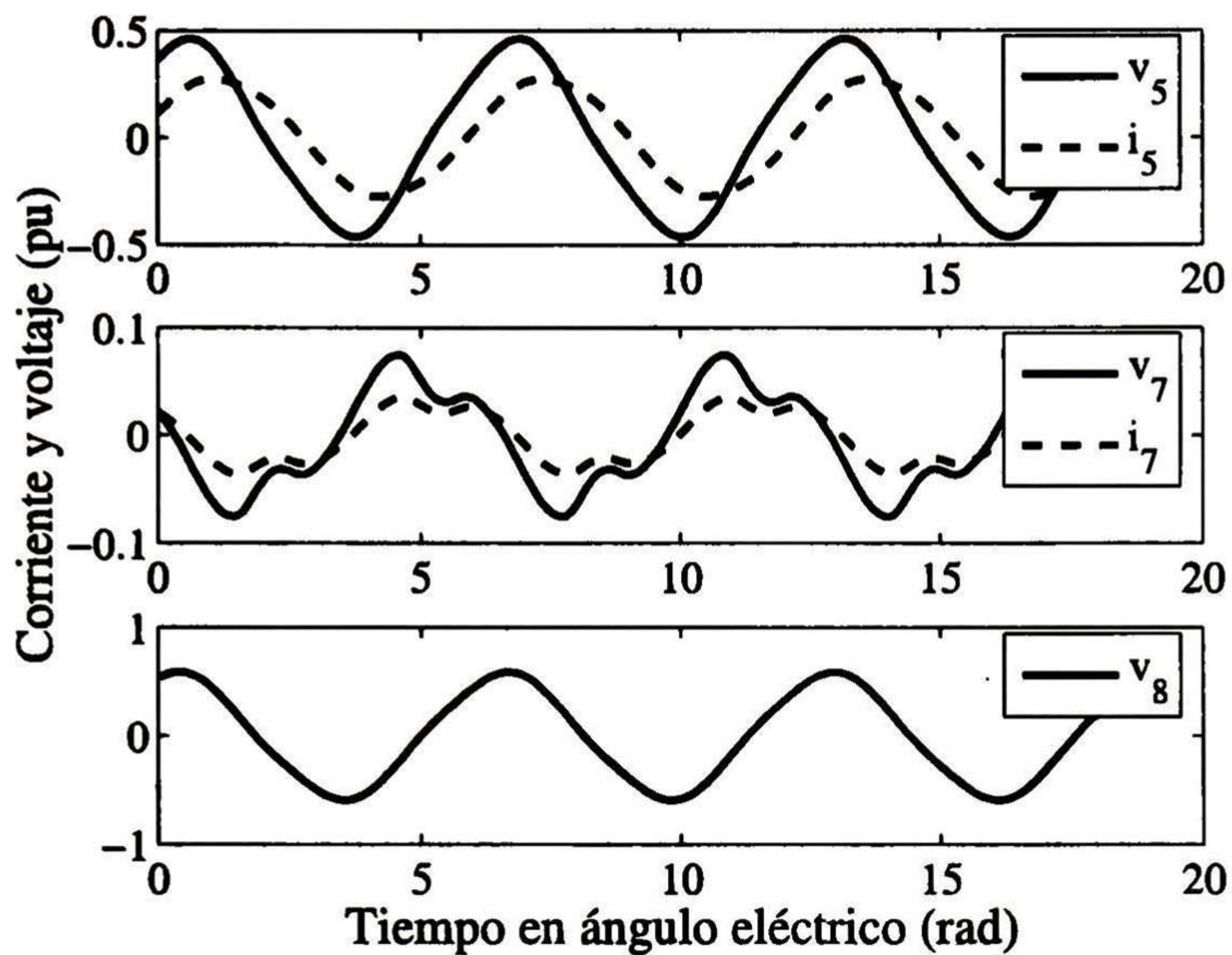


Fig. 3-8 Voltajes y corrientes en los nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico

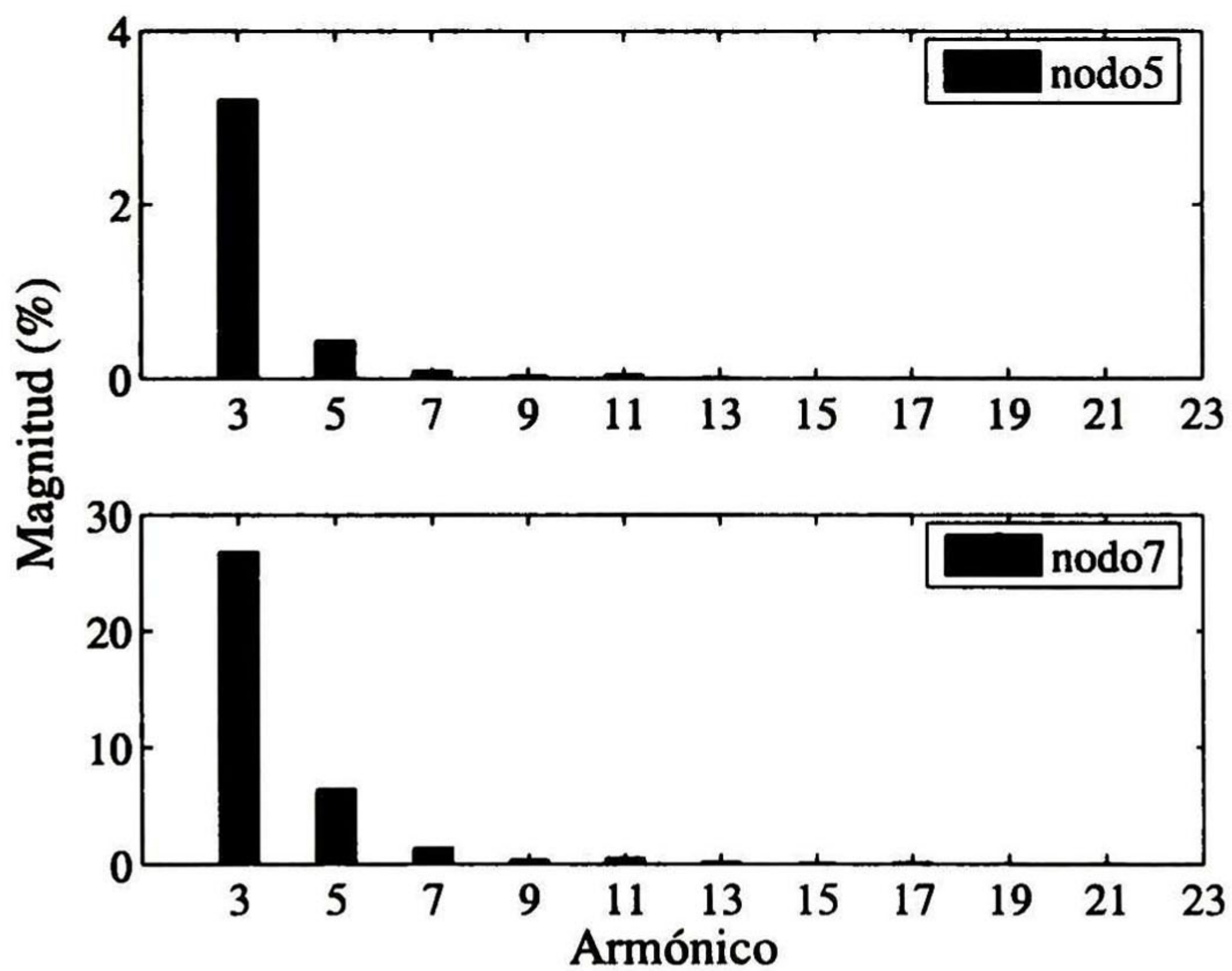


Fig. 3-9 Contenido armónico de la corriente de carga en nodos 5 y 7

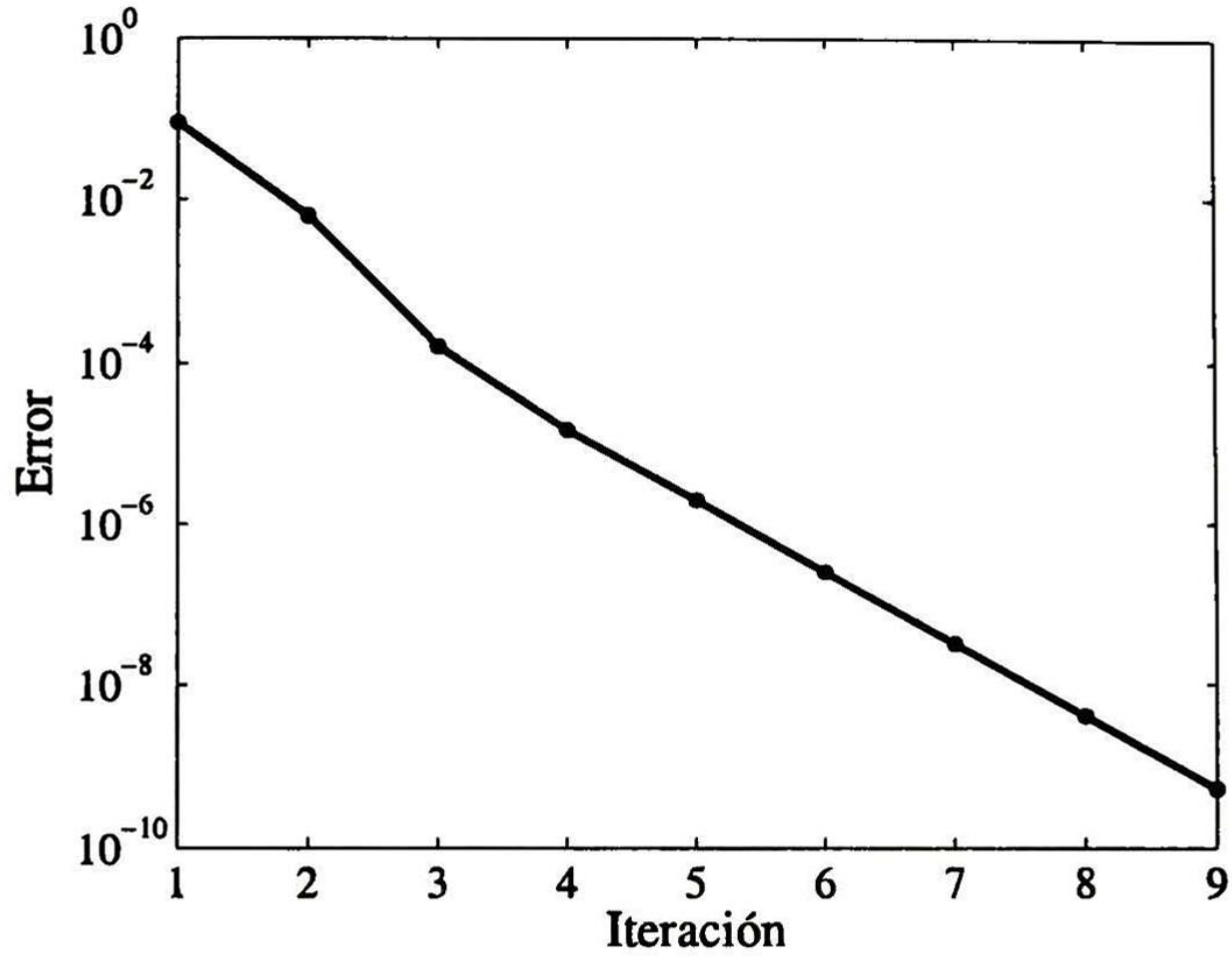


Fig. 3-10 Patrón de convergencia, sistema con SVC y TCSC, caso monofásico

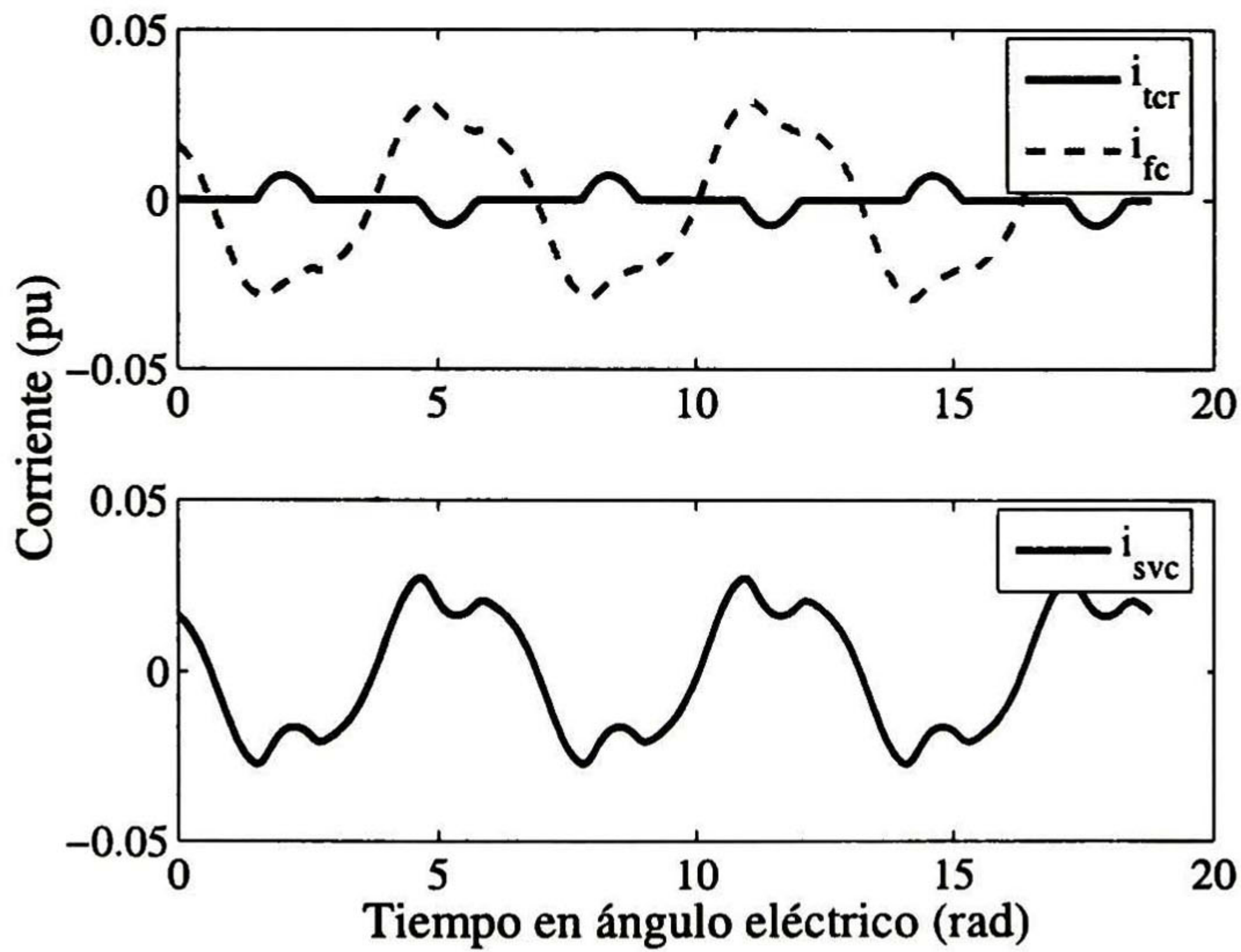


Fig. 3-11 Corrientes a través del SVC

De la Figs. 3-5 (sin dispositivos electrónicos) y 3-9 (con dispositivos electrónicos) para el nodo 5 se observa un aumento en todos los armónicos, debido a la señal de conmutación para el TCR. En el caso del nodo 7 (ver Figs. 3-5 y 3-9) el cual tiene conectividad con el TCSC (nodo 4 al 7a), se tiene también un incremento en todos los armónicos. Comparando las

Figs. 3-6 y 3-10 se observa que en la última el número de iteraciones es mayor. Esto se debe a que los elementos de conmutación no son elementos lineales. Estos dispositivos, por el contrario, aparte del proceso de linealización en el programa principal, tienen un proceso local para el cálculo de los ángulos de conducción y no conducción del TCR.

### *3.4.5 Sistema con Nodos PV (Completo)*

Como última etapa, se agrega un nodo PV (nodo 8, Fig. 3-1) a la red que se ha venido analizando. Los valores que se utilizan para la inclusión del nodo PV son los presentados en la Tabla 3-1 junto con una inductancia  $L=0.3$  (pu), está última para frecuencias distintas a la fundamental.

La inclusión del nodo PV representa una mayor dificultad computacional ya que el nodo PV tiene un reacomodo en su Jacobiano propio así como en las interconexiones con los otros nodos como se ilustra en la Sección 3.4.6, Fig. 3-17.

Para este caso, los voltajes de los nodos 5, 7 y 8 y corrientes de los nodos 5 y 7 se muestran en la Fig. 3-12. La Fig. 3-13 muestra el contenido armónico de las cargas de los nodos 5 y 7. El patrón de convergencia se muestra en la Fig. 3-14, logrando en esta etapa la convergencia deseada en 5.5160 s. En esta etapa se observa que la inclusión del nodo PV no afecta el patrón de convergencia comparado con la etapa anterior.

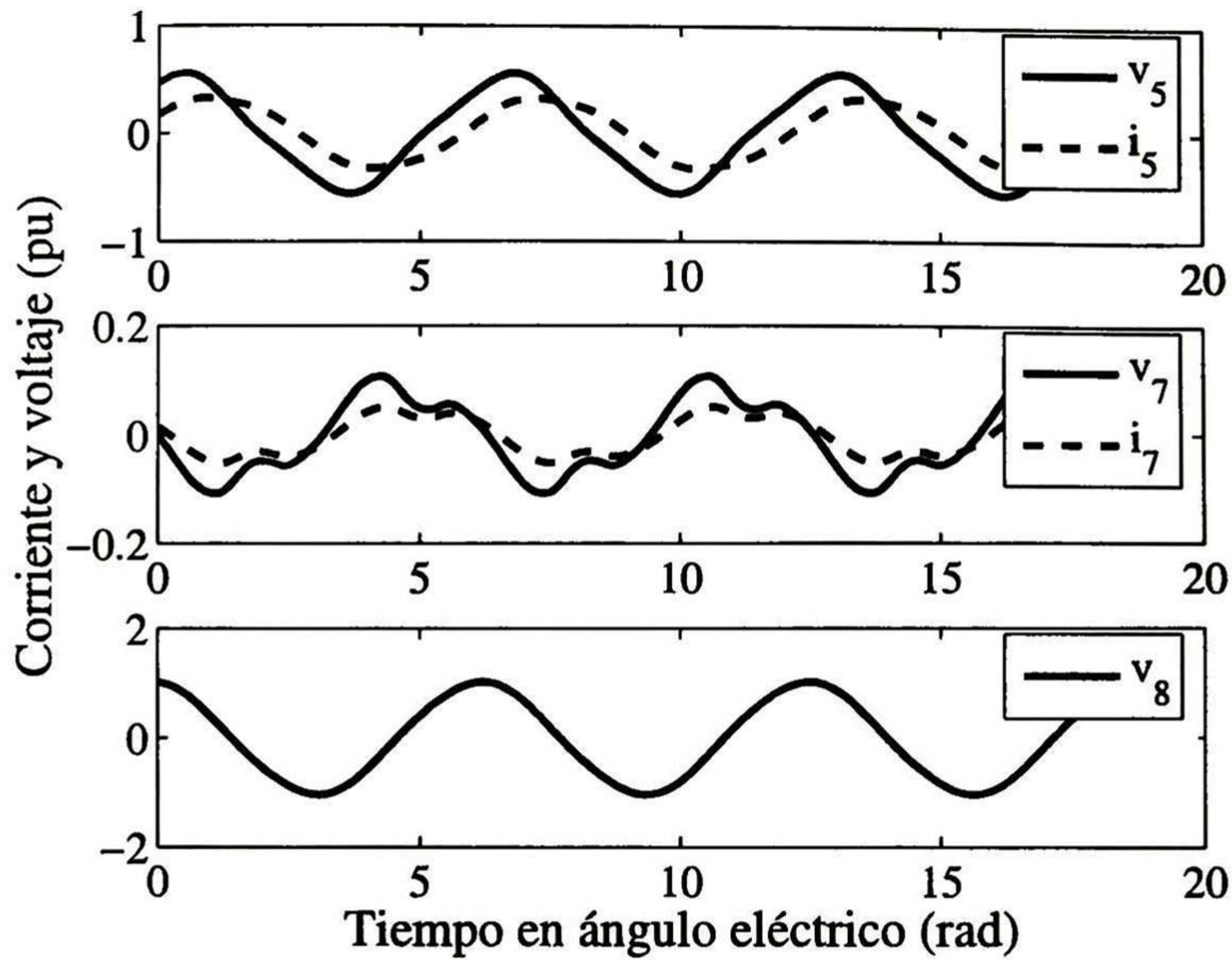


Fig. 3-12 Voltajes y corrientes en nodos 5, 7 y 8, sistema monofásico

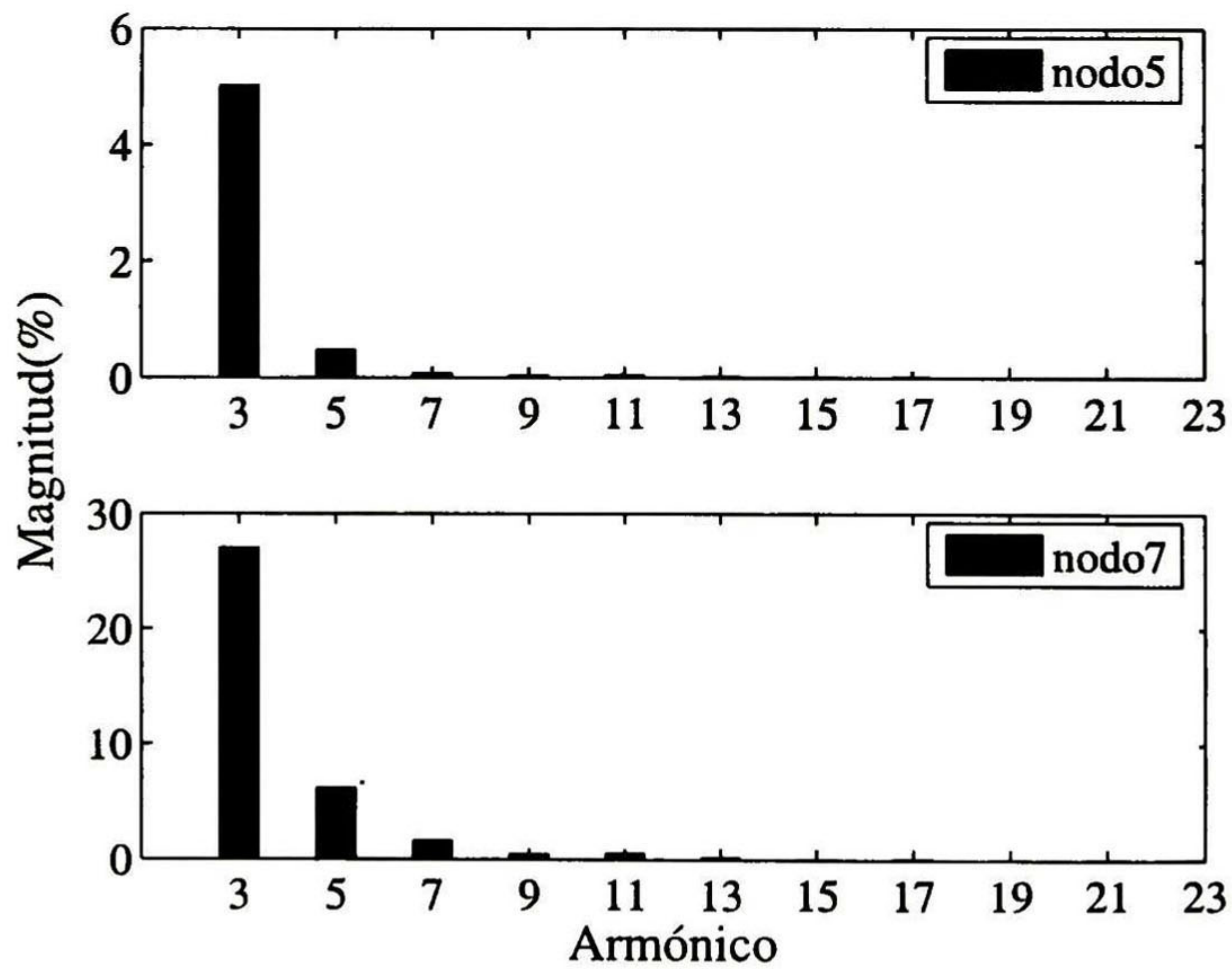


Fig. 3-13 Contenido armónico de la corriente de cargas en nodos 5 y 7

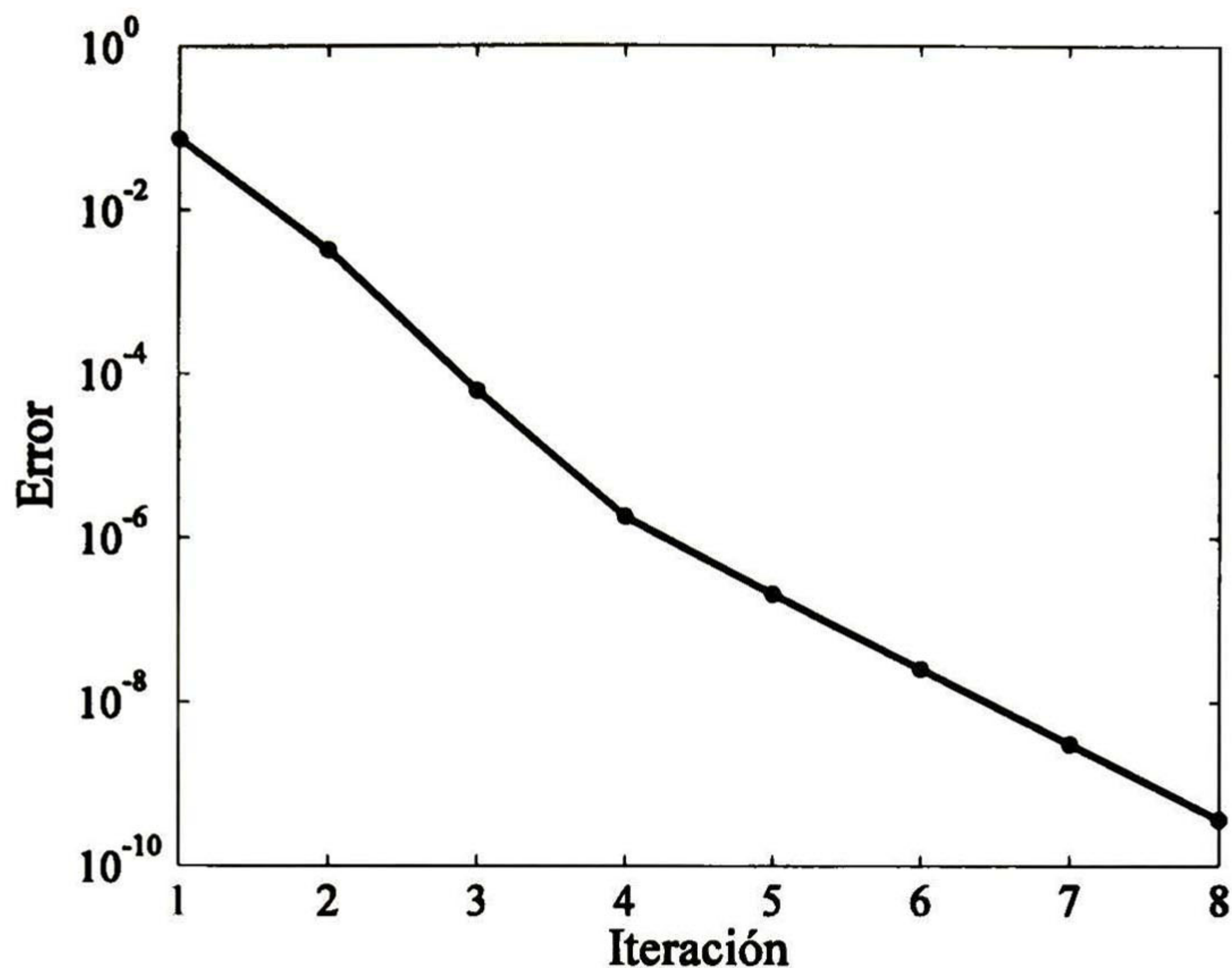


Fig. 3-14 Patrón de convergencia, sistema incluyendo nodo PV, caso monofásico

### 3.4.6 Estructura del Jacobiano Caso Monofásico

En esta Sección se presenta gráficamente la distribución numérica de los jacobianos producidos por cada elemento y su acoplamiento al Jacobiano total. Las gráficas presentadas corresponden únicamente a los 5 primeros armónicos impares y los puntos mostrados en ella corresponde a los valores distintos de cero.

La Fig. 3-15a muestra el Jacobiano producido por las cargas no lineales mientras que la Fig. 3-15b el Jacobiano producto de las cargas *PQ*.

La Fig. 3-16a, muestra el Jacobiano producido por el SVC y la Fig. 3-16b el Jacobiano producido por el TCSC. El TCSC, a diferencia del SVC que se conecta en derivación, es conectado en serie con la línea de transmisión; por lo tanto, el Jacobiano resultante del primero no sólo tiene elementos diferentes de cero en el nodo en el cual se conectó sino que se acopla a otros nodos como se observa en la Fig. 3-16b. En el algoritmo propuesto la colocación de un TCSC requiere la creación de un nodo extra, en este caso 7a de la Fig. 3-1. De esta forma, se genera otro grupo de incógnitas, el voltaje y la corrientes entrando y saliendo del nodo 7a y aumenta de dimensiones el Jacobiano total.

Por último, la Fig. 3-17a presenta el Jacobiano total producido por la inclusión de un nodo PV al sistema y en la Fig. 3-17b se observa el Jacobiano total sin la inclusión del nodo PV.

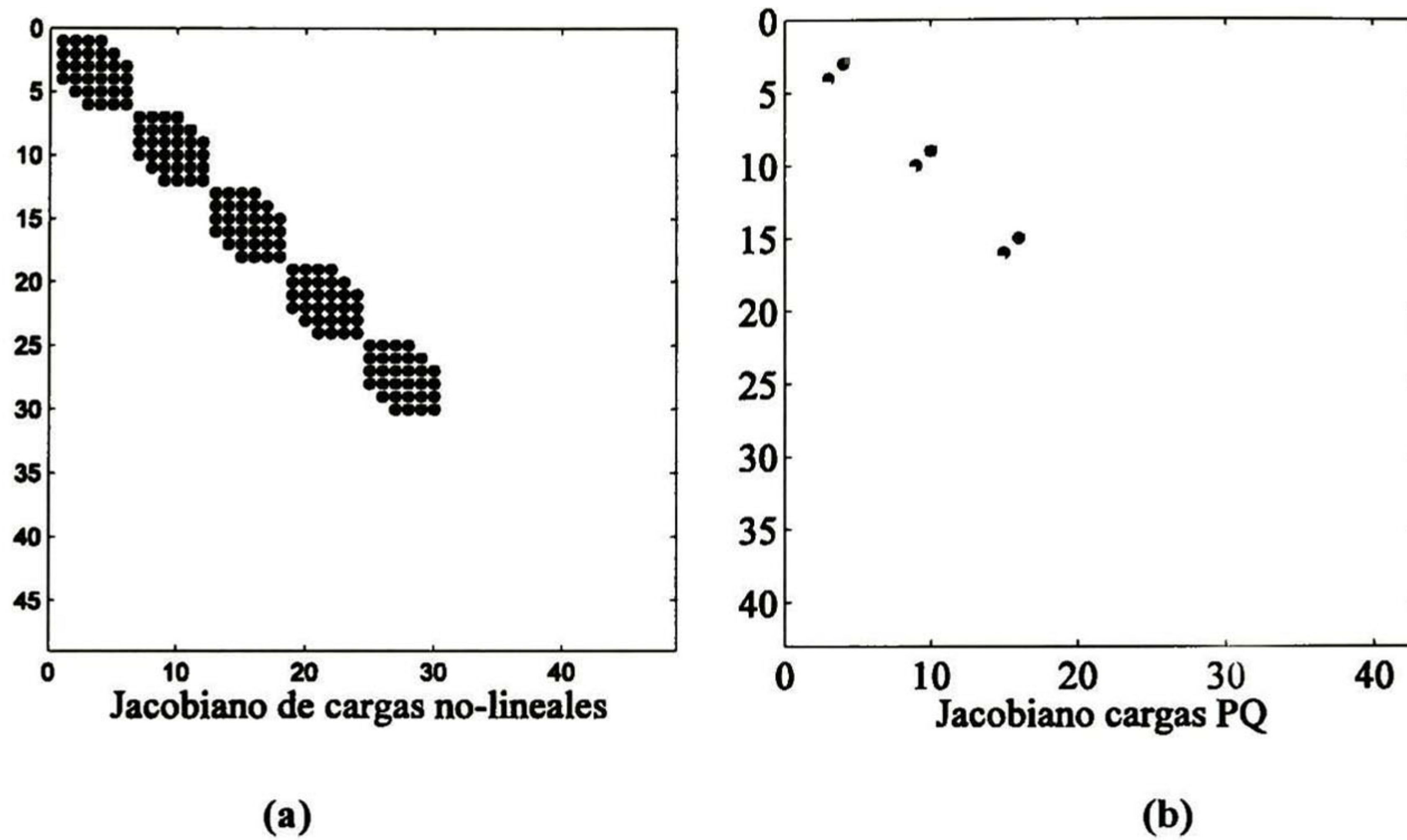


Fig. 3-15. Jacobiano caso monofásico, (a) de cargas no lineales y (b) cargas PQ

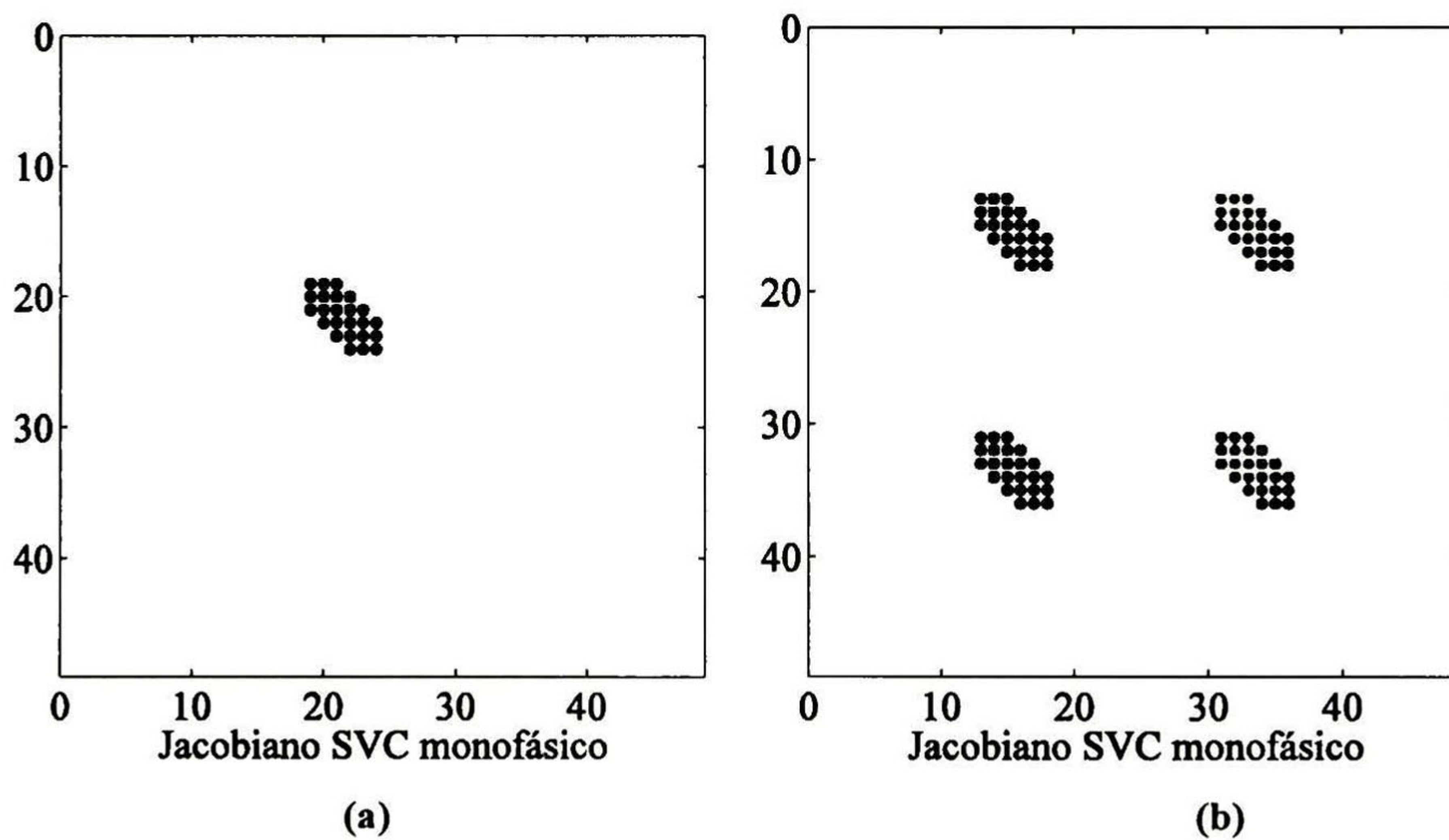


Fig. 3-16 Jacobiano caso monofásico, (a) SVC y (b) TCSC ,

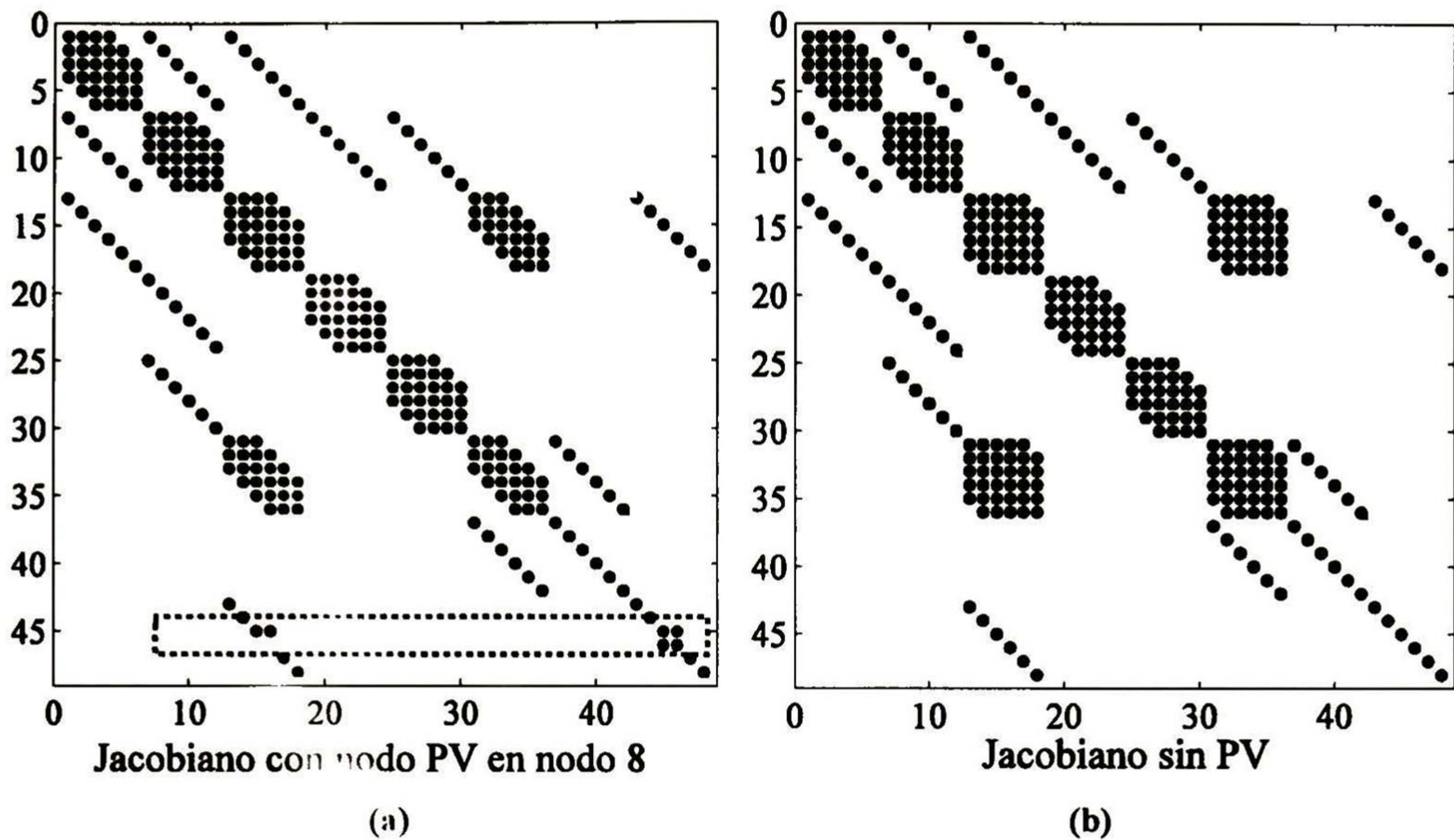


Fig. 3-17 Jacobiano caso monofásico, (a) con PV y (b) sin PV

### 3.5 Conclusiones

En este Capítulo se ha propuesto una metodología para el cálculo del estado estable de una red monofásica que incluya cargas lineales, no lineales y  $PQ$ , dispositivos SVC y TCSC y nodos PV. Esta metodología utiliza el Dominio Armónico y el método clásico de Newton-Raphson. Se ha observado que la convergencia del método de Newton-Raphson se ve ligeramente afectado cuando se introducen al sistema elementos de conmutación. Se ha observado también que para el cálculo de la matriz de conmutación, solo se requieren localmente alrededor de 3 iteraciones.

## Capítulo IV

---

# FLUJOS DE POTENCIA ARMÓNICOS – CASO TRIFÁSICO

## 4.1 Introducción

Se presenta la incorporación de los elementos descritos en el Capítulo II a una red eléctrica trifásica. La línea de transmisión, el SVC y la inserción del nodo PV son descritos nuevamente para el caso trifásico. Se considera que las cargas lineales, no lineales, PQ y el TCSC se conectan una por cada fase. El algoritmo para obtener el estado estable de dicha red es igual al descrito en la Sección 3.2.

## 4.2 Línea de Transmisión

En el caso trifásico se toma en cuenta el acoplamiento electromagnético que existe entre fases. La representación  $\pi$  (ver Fig. 4-1) de la línea de transmisión queda de la siguiente manera (utilizando notación de Matlab):

$$Z_{serie-T} = blkdiag \{ Z_{serie}^{-n} \cdots Z_{serie}^n \}, \quad 4.1$$

$$Y_{deriv-T} = blkdiag \{ Y_{deriv}^{-n} \cdots Y_{deriv}^n \}, \quad 4.2$$

donde  $Z_{serie}^h$  y  $Y_{deriv}^h$  se calculan con el mismo procedimiento descrito por la versión trifásica de las expresiones (2.23) a (2.26).



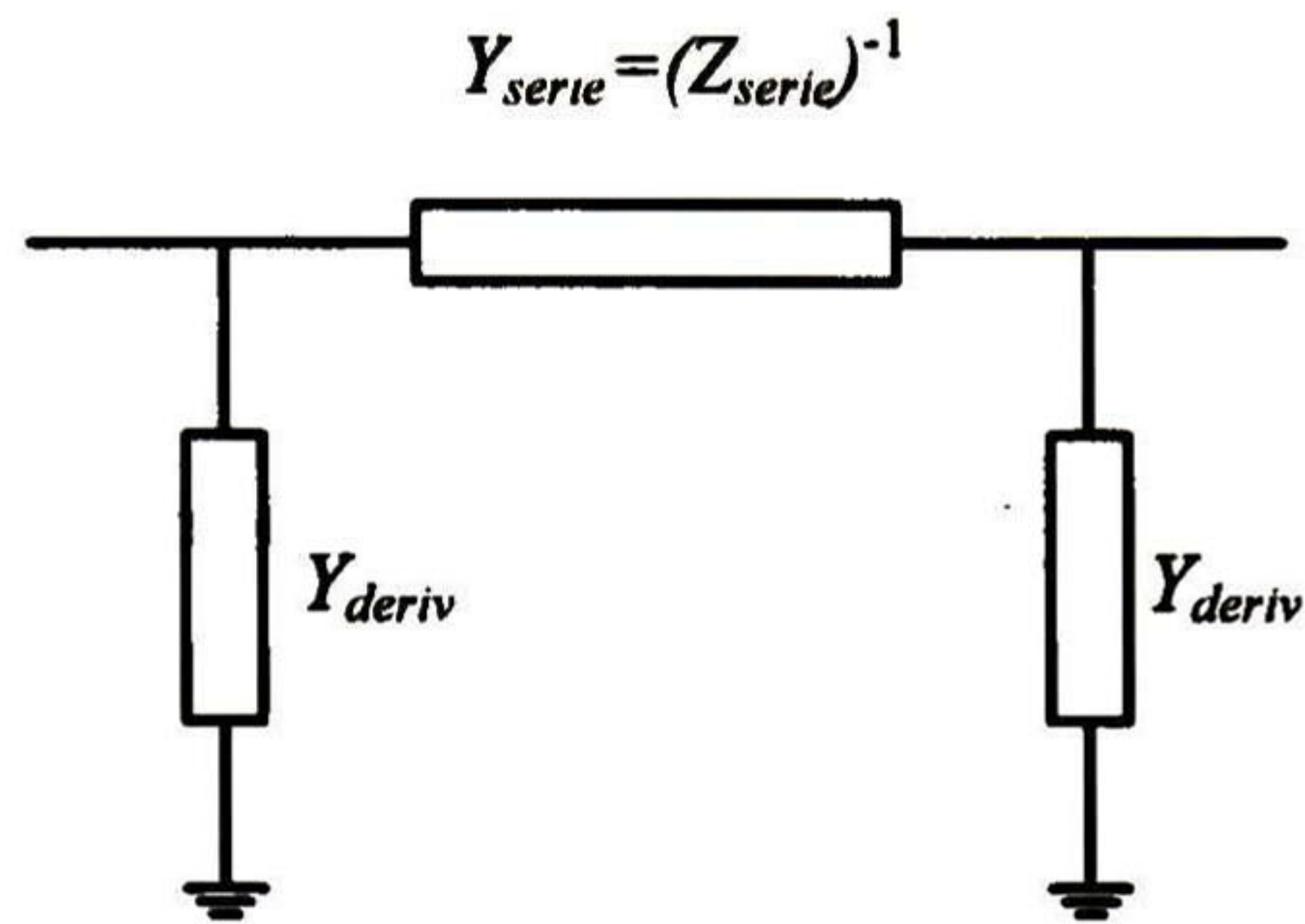


Fig. 4-1 Línea de transmisión modelo  $\pi$

### 4.3 El SVC Trifásico

Existen varias maneras de configurar un SVC trifásico, la más simple de ellas es la conexión de una unidad por cada fase (conexión estrella). Otra forma de conectar el SVC es en una conexión delta para los TCR y una conexión estrella para el banco de capacitores [9]. La conexión que se utiliza en este trabajo corresponde al arreglo en conexión delta de tres SVCs monofásicos como se muestra en la Fig. 4-2 [10], [11].

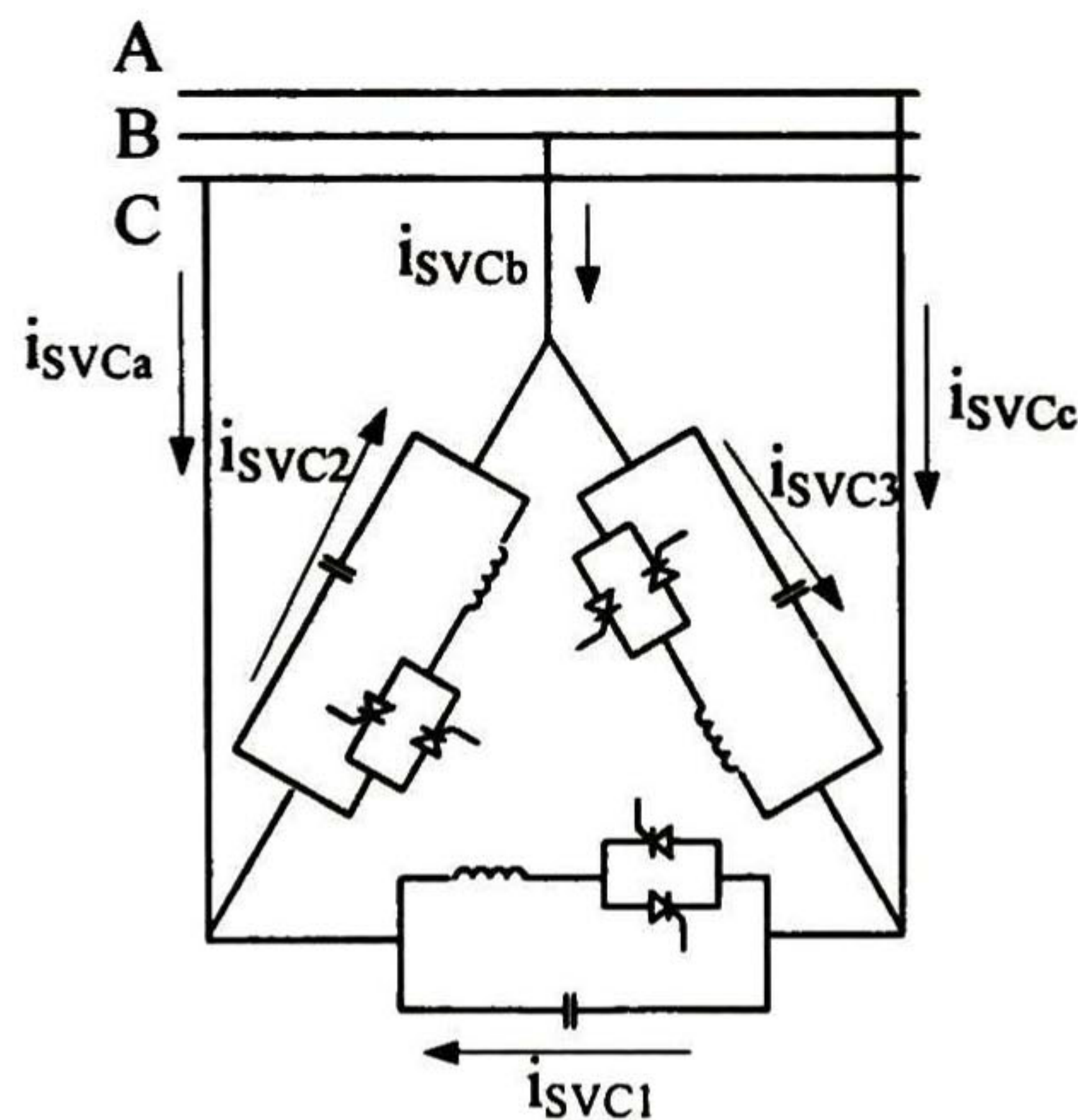


Fig. 4-2. Esquema de SVC trifásico en conexión delta

La representación nodal del SVC trifásico en conexión delta puede obtenerse utilizando la transformación estrella-delta y el resultado de (2.42). Primeramente, se parte de la configuración en estrella de tres SVCs monofásicos y se obtiene la siguiente relación nodal :

$$\begin{bmatrix} I_{SVC1} \\ I_{SVC2} \\ I_{SVC3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{SVC1} & & \\ & J_{SVC2} & \\ & & J_{SVC3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}, \quad 4.3$$

o en forma compacta

$$I_{SVC}^{123} = J_{SVC}^{123} V_{SVC}^{123}, \quad 4.4$$

Entonces, para transformar la conexión estrella en delta, se utilizan las matrices de conectividad siguientes:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{\pi/6}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad 4.5$$

$$\begin{bmatrix} I_{SVCa} \\ I_{SVCb} \\ I_{SVCc} \end{bmatrix} = \frac{-\pi/6}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{SVC1} \\ I_{SVC2} \\ I_{SVC3} \end{bmatrix}, \quad 4.6$$

o de una manera compacta

$$V_{SVC}^{123} = \frac{\pi/6}{\sqrt{3}} \Upsilon_{123} V_{SVC}^{abc}, \quad 4.7$$

$$I_{SVC}^{abc} = \frac{-\pi/6}{\sqrt{3}} \Upsilon_{abc} I_{SVC}^{123}. \quad 4.8$$

Premultiplicando (4.4) por  $\frac{-\pi/6}{\sqrt{3}} \Upsilon_{abc}$  obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{-\pi/6}{\sqrt{3}} \Upsilon_{abc} I_{SVC}^{123} = \frac{-\pi/6}{\sqrt{3}} \Upsilon_{abc} J_{SVC}^{123} V_{SVC}^{abc}. \quad 4.9$$

Finalmente se sustituyen (4.7) y (4.8) en (4.9). El resultado de esta sustitución es el equivalente Norton del SVC trifásico en conexión delta el cual queda expresado de la siguiente manera:

$$I_{SVC}^{abc} = \frac{1}{3} \Upsilon_{abc} J_{SVC}^{123} \Upsilon_{123} V_{SVC}^{123} \quad 4.10$$

De esta forma, la representación matricial del Jacobiano para el SVC en conexión delta es:

$$J_{SVC} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} J_{SVC1} + J_{SVC3} & -J_{SVC1} & -J_{SVC3} \\ -J_{SVC1} & J_{SVC1} + J_{SVC2} & -J_{SVC2} \\ -J_{SVC3} & -J_{SVC2} & J_{SVC2} + J_{SVC3} \end{bmatrix} \quad 4.11$$

#### 4.4 Nodo PV Trifásico

Asumiendo que, en un sentido práctico, los voltajes en las terminales del generador son balanceados, el nodo PV trifásico puede ser representado por su secuencia positiva. La transformación de fases a secuencia positiva (correspondiendo a la frecuencia fundamental) se realiza de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} v_{abc,-1} \\ v_{abc,1} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} v_{a,-1} \\ v_{a,1} \end{bmatrix}, \quad 4.12$$

donde:

$$v_{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^T, \quad 4.13$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^T, \quad 4.14$$

donde  $T$  indica transpuesta y  $a = e^{j2\pi/3}$ . La versión trifásica de (2.34) es:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{abc,-1} \\ \Delta i_{abc,1} \end{bmatrix}_n = Y_{nn} \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix}_n + Y_{nj} \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix}_j + Y_{nk} \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix}_k, \quad 4.15$$

mientras que (2.33) es representada de la manera siguiente:

$$A \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \Delta i_{abc,-1} \\ \Delta i_{abc,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \left(\frac{v^2}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad 4.16$$

donde:

$$A = \begin{bmatrix} i_{abc,1}^T & i_{abc,-1}^T \\ v_{abc,1}^T & v_{abc,-1}^T \end{bmatrix}, \quad 4.17a$$

$$B = \begin{bmatrix} v_{abc,1}^T & v_{abc,-1}^T \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad 4.17b$$

Sustituyendo (4.15) en (4.16) y utilizando la transformación (4.14) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta \left( \frac{V^2}{2} \right) \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \Delta v_{a,-1} \\ \Delta v_{a,1} \end{bmatrix}_n + B \left( Y_{nj} \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix}_j + Y_{nk} \begin{bmatrix} \Delta v_{abc,-1} \\ \Delta v_{abc,1} \end{bmatrix}_k \right), \quad 4.18$$

donde:

$$E = 3 \begin{bmatrix} i_{a,1} & i_{a,-1} \\ v_{a,1} & i_{a,1} \end{bmatrix} + BY_{nn}M \quad 4.19$$

Debido a que se considera sólo la secuencia positiva de los voltajes del generador, (4.18) contiene sólo 2 ecuaciones. Entonces, el conjunto de 6 ecuaciones para la frecuencia fundamental se reemplaza por las dos ecuaciones de (4.18). El efecto de  $M$  en el Jacobiano resultante se hace presente también en las respectivas columnas del nodo PV, por lo que el grupo de seis columnas se colapsan en dos columnas resultantes [4].

## 4.5 Ejemplo de Aplicación

### 4.5.1 Datos de la Red

Utilizando los conceptos de las secciones anteriores se lleva a cabo la solución para el estado estable de la red mostrada en la Fig. 4-3. Los parámetros de las cargas (conectadas en cada fase) que se utilizan para este sistema se muestran en la Tabla 4-1. La configuración de las líneas de transmisión se muestra en la Fig. 4-4.

El número de armónicos que se utiliza es igual a 50, con el criterio de convergencia

$$\| -i_n + i_{esp} \| = 10^{-10}$$

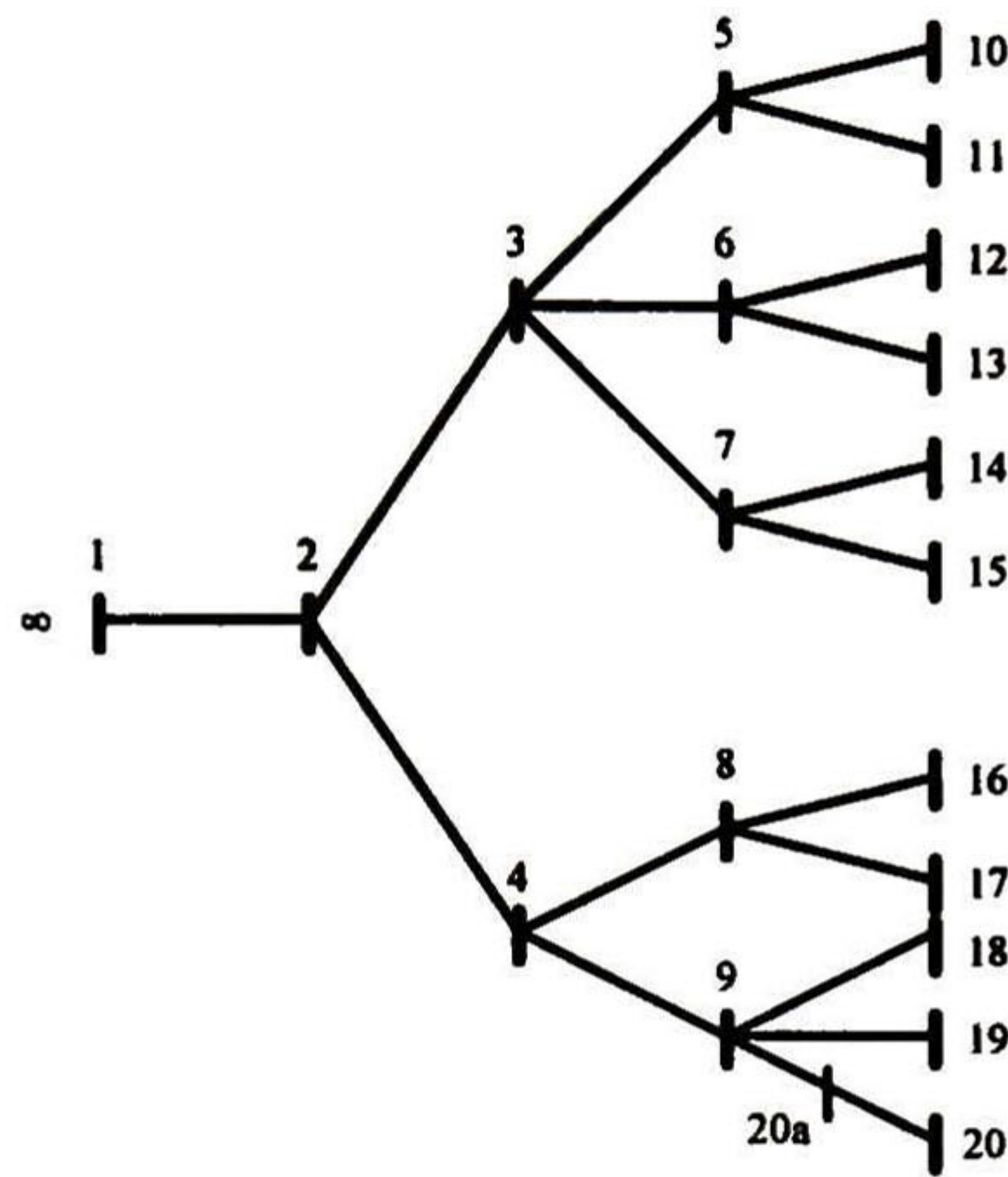


Fig. 4-3. Red trifásica

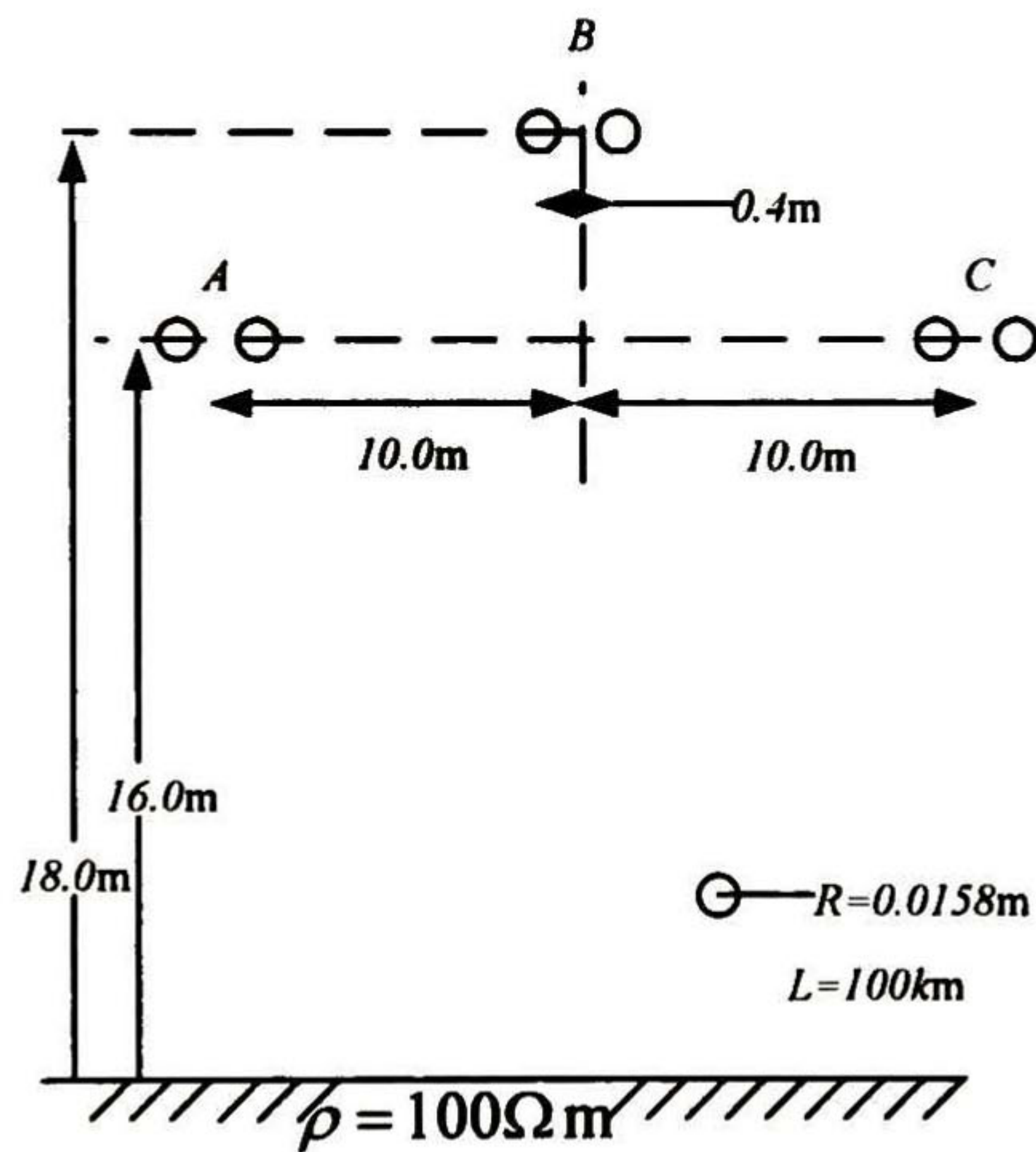


Fig. 4-4. Configuración de la línea de transmisión

Tabla 4- 1

DATOS DE CARGAS EN PU

CARGA $RL$		CARGA $\alpha\beta$		CARGA $PQ$		BUS PV		
$R$	$L$	$\alpha$	$\beta$	$P$	$Q$	$P$	$Q$	$V_{rms}$
5	9	0.2	0.9	0.1	0.2	0.1	0.1	0.75

### 4.5.2 Sistema con Cargas Lineales

En esta primer etapa se muestran los resultados del sistema cuando sólo cuenta con cargas lineales. Al igual que para el caso monofásico con cargas lineales, los voltajes en los nodos del sistema son puramente senoidales cambiando solamente su amplitud y fase debido a las cargas  $RL$  colocadas en los nodos 2 y 5 a 20; en los nodos 3 y 4 no se conecta ningún tipo de carga puesto que en estos nodos serán conectados los generadores PV.

La forma de onda del voltaje en las fases  $a, b$  y  $c$ , en los nodos 4, 10 y 20 se presenta en la Fig. 4-5, las corrientes de carga en las fases  $a, b$  y  $c$ , para los nodos 10 y 20 se presentan en la Fig. 4-6.

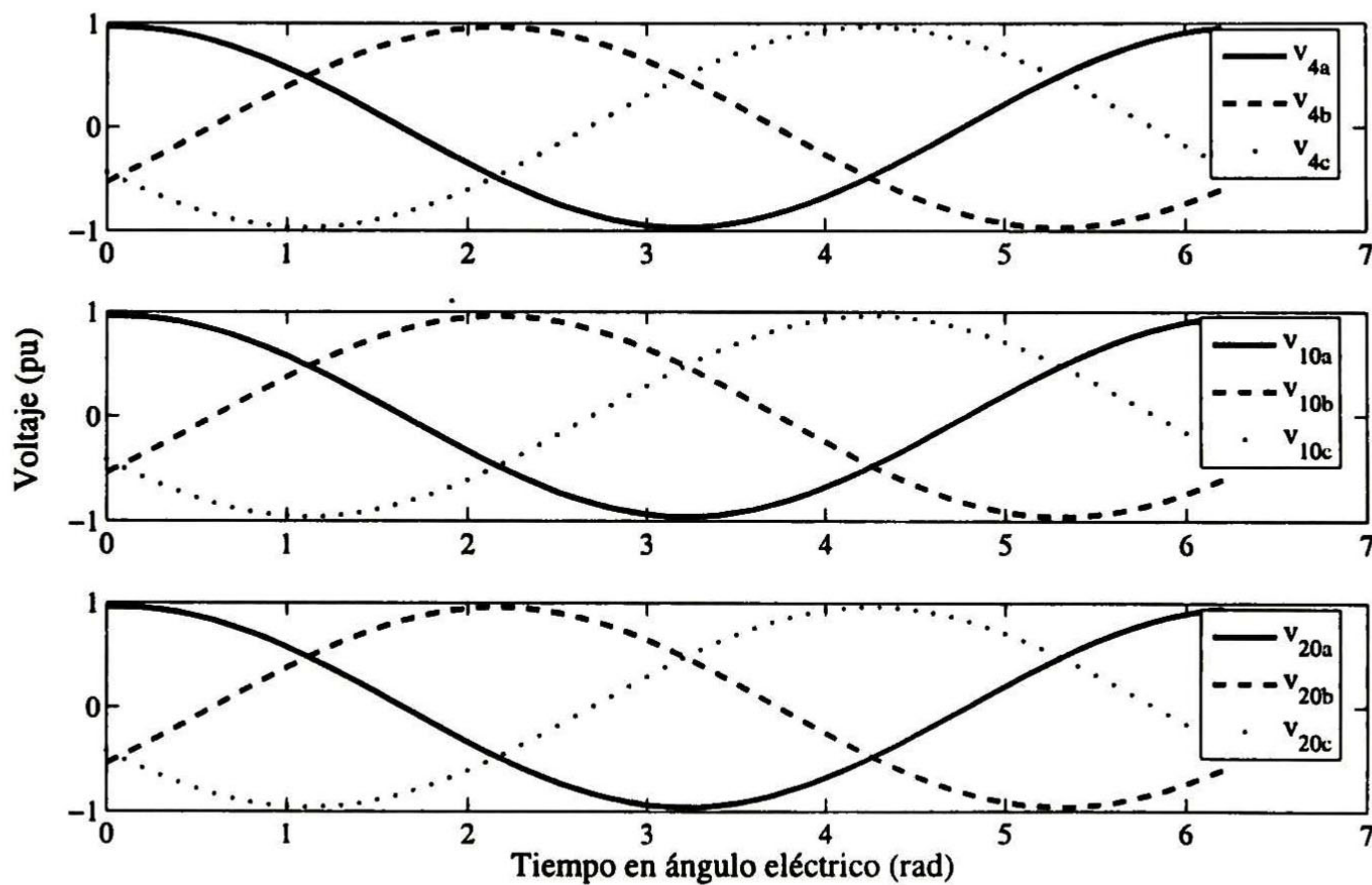
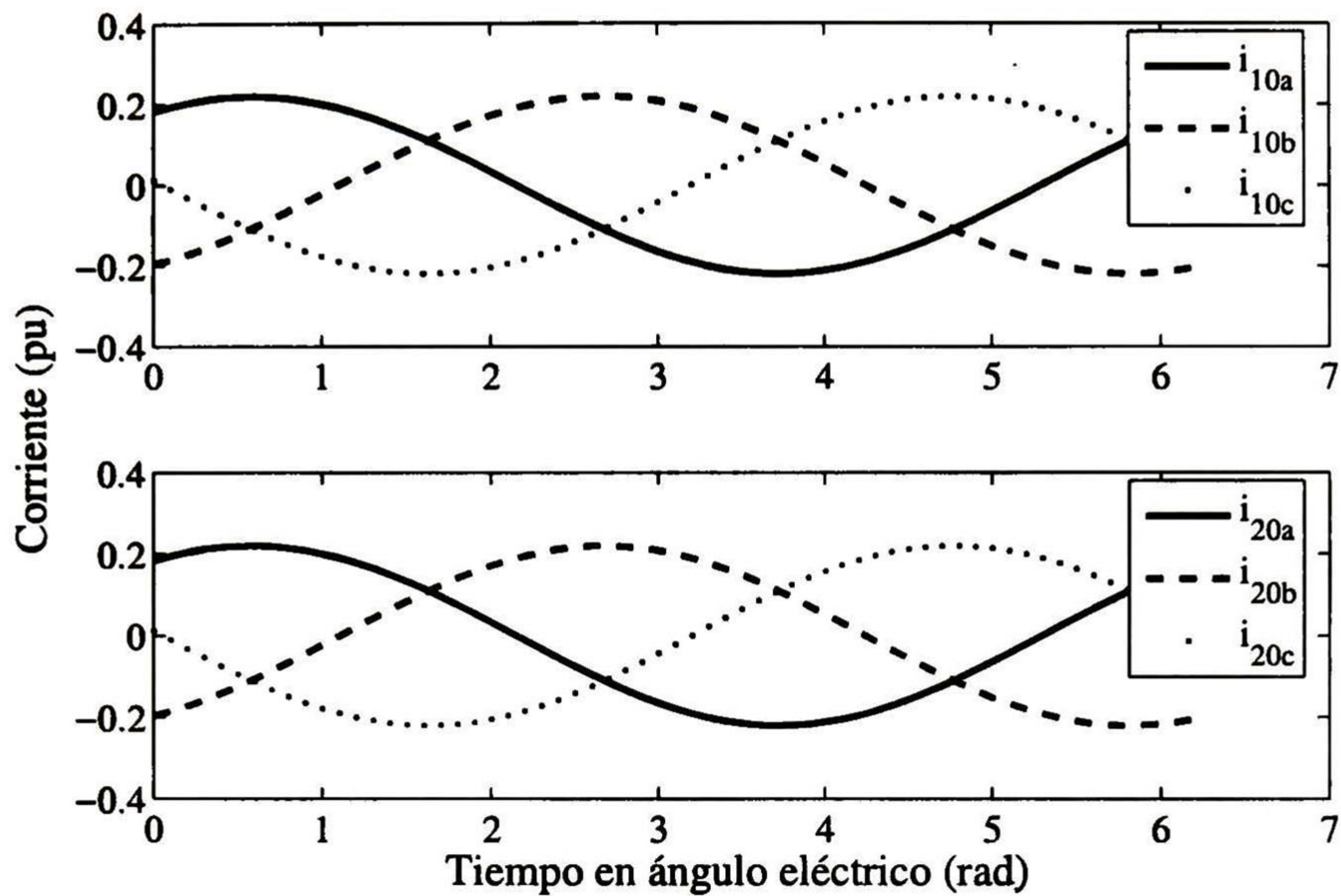


Fig. 4- 5.V oltajes en los nodos 3,1 0 y 20, con cargas  $RL$



**Fig. 4- 6.** Corrientes de carga en los nodos 10 y 20,c on cargas *RL*

### 4.5.3 Sistema con Cargas Lineales, No Lineales y PQ

Al igual que en la Sección 3.4.3, en esta etapa se añaden cargas no lineales y PQ en los nodos 2 y 5 al 19 adicionales a las cargas ya existentes.

La Fig. 4-7 presenta los voltajes en los nodos 4, 10 y 20. La Fig. 4-8 muestra las corrientes de carga en los nodos 10 y 20, donde claramente puede apreciarse una distorsión tanto en el voltaje como en la corriente, debido a la inserción de las cargas no lineales. La Fig. 4-9 muestra el contenido armónico en % con respecto a la frecuencia fundamental de la corriente de carga de los nodos 10 y 20. En la Fig. 4-10 se tiene el patrón de convergencia obteniendo la misma en 5 iteraciones en un tiempo de 9.4971min.

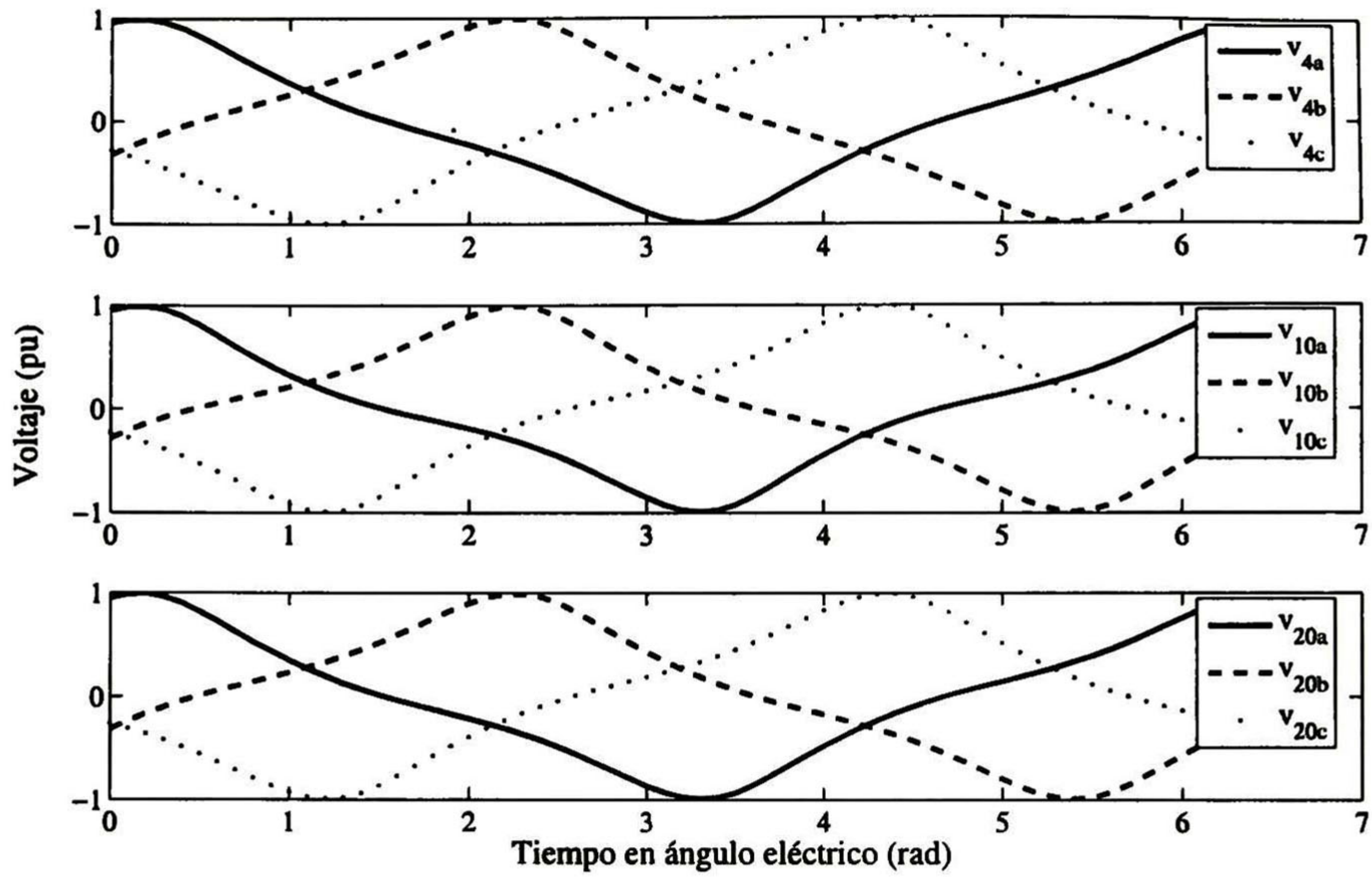


Fig. 4- 7. Voltajes en los nodos 3,1 0 y 20, con cargas  $RL$ ,  $\alpha\beta$  y  $PQ$

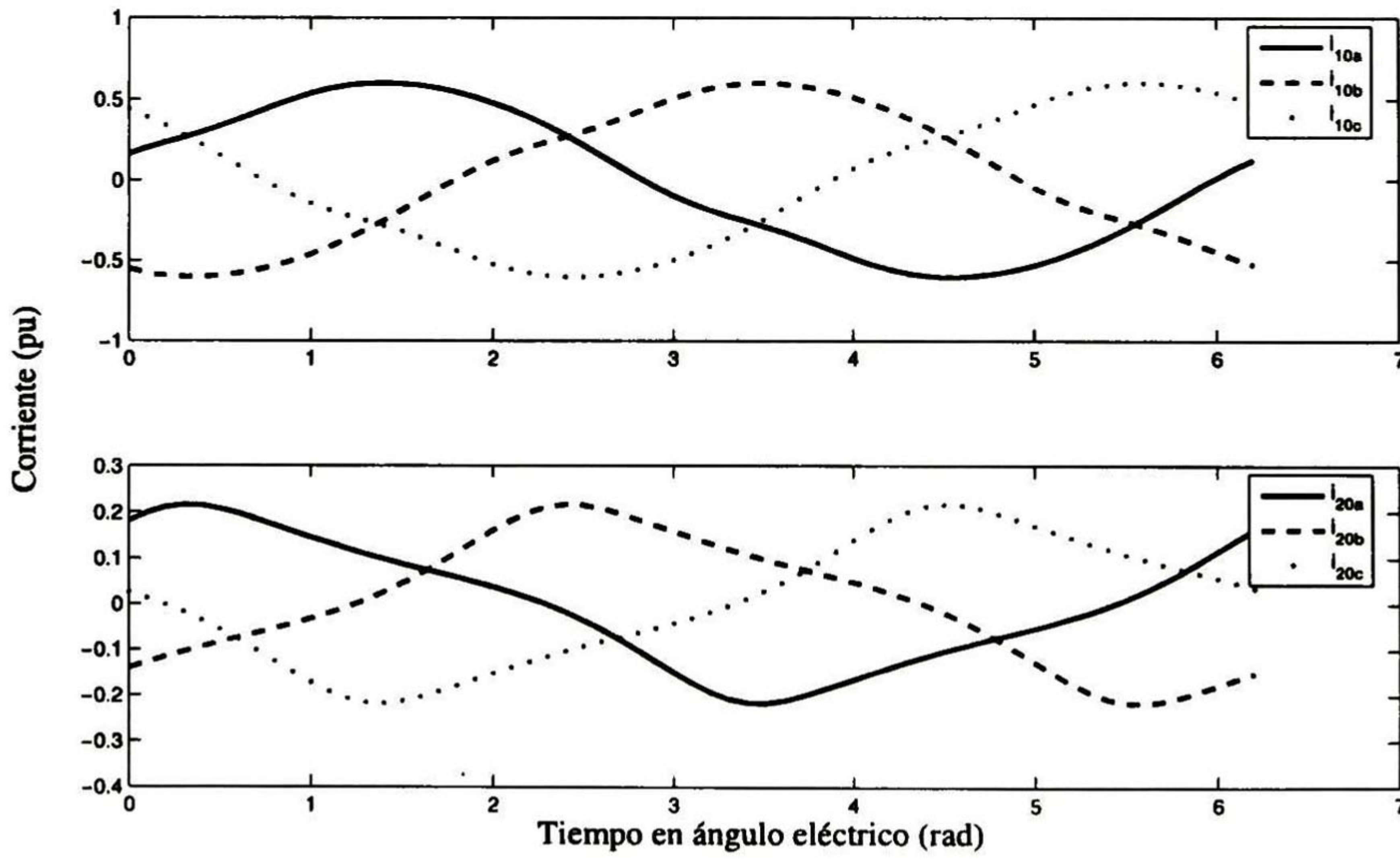


Fig. 4- 8. Corrientes de carga en los nodos 10 y 20,c on cargas  $RL$ ,  $\alpha\beta$  y  $PQ$



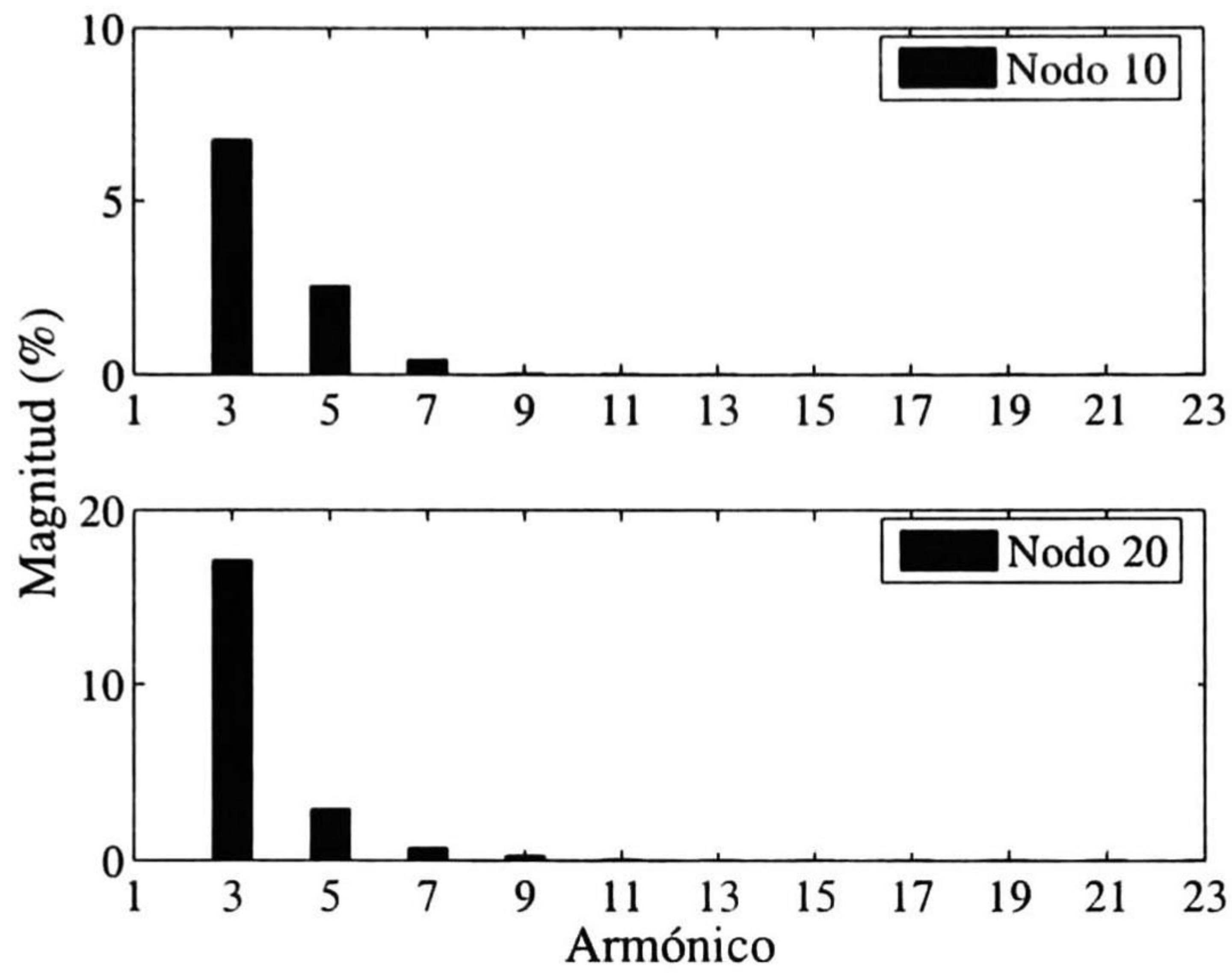


Fig. 4- 9. Contenido armónico de la corriente de carga en los nodos 10 y 20

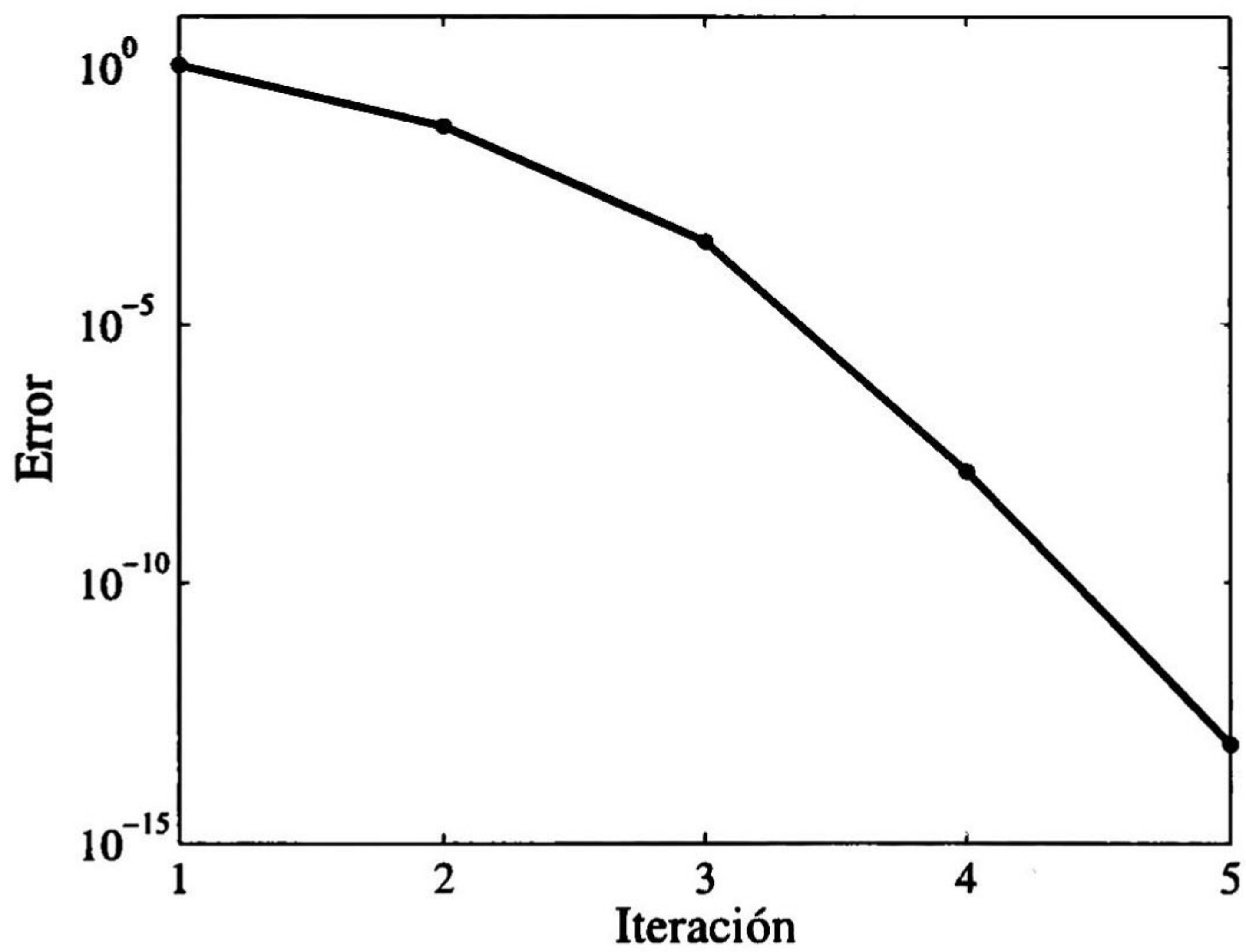


Fig. 4- 10. Patrón de convergencia, sistema con cargas  $RL$ ,  $\alpha\beta$  y  $PQ$ , caso trifásico

#### 4.5.4 Sistema con Elementos de Conmutación SVC y TCSC

En esta etapa se incorpora al sistema un SVC en el nodo 10 y un TCSC en los nodos 9 a 20a. Los parámetros del SVC son  $L=2\text{pu}$ ,  $C=1/8\text{pu}$  y un ángulo de disparo de  $140^\circ$ , mientras para el TCSC son  $L=6\text{pu}$ ,  $C=1/8\text{pu}$  y un ángulo de disparo de  $150^\circ$

Los voltajes de los nodos 3, 10 y 20 se presentan en la Fig. 4-11 y las corrientes de carga en los nodos 10 y 20 en la Fig. 4-12. La función de conmutación del TCR produce una gran cantidad de armónicos, la conexión delta de los tres SVC produce en todos los armónicos un incremento siendo mayor en los armónicos característicos  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $11^\circ$  y  $13^\circ$ . El dispositivo TCSC produce un incremento en todos los armónicos como se puede observar en la Fig. 4-9 donde se presenta el contenido armónico de las corrientes de carga en los nodos 10 y 20 sin la inclusión de los dispositivos SVC y TCSC y en la Fig. 4-13 donde se han conectado los dispositivos. La figura 4-14 muestra el patrón de convergencia el cual se alcanzó en 17.0067 min. En forma similar al caso monofásico, se observa el incremento en el número de iteraciones cuando se incluyen dispositivos de conmutación.

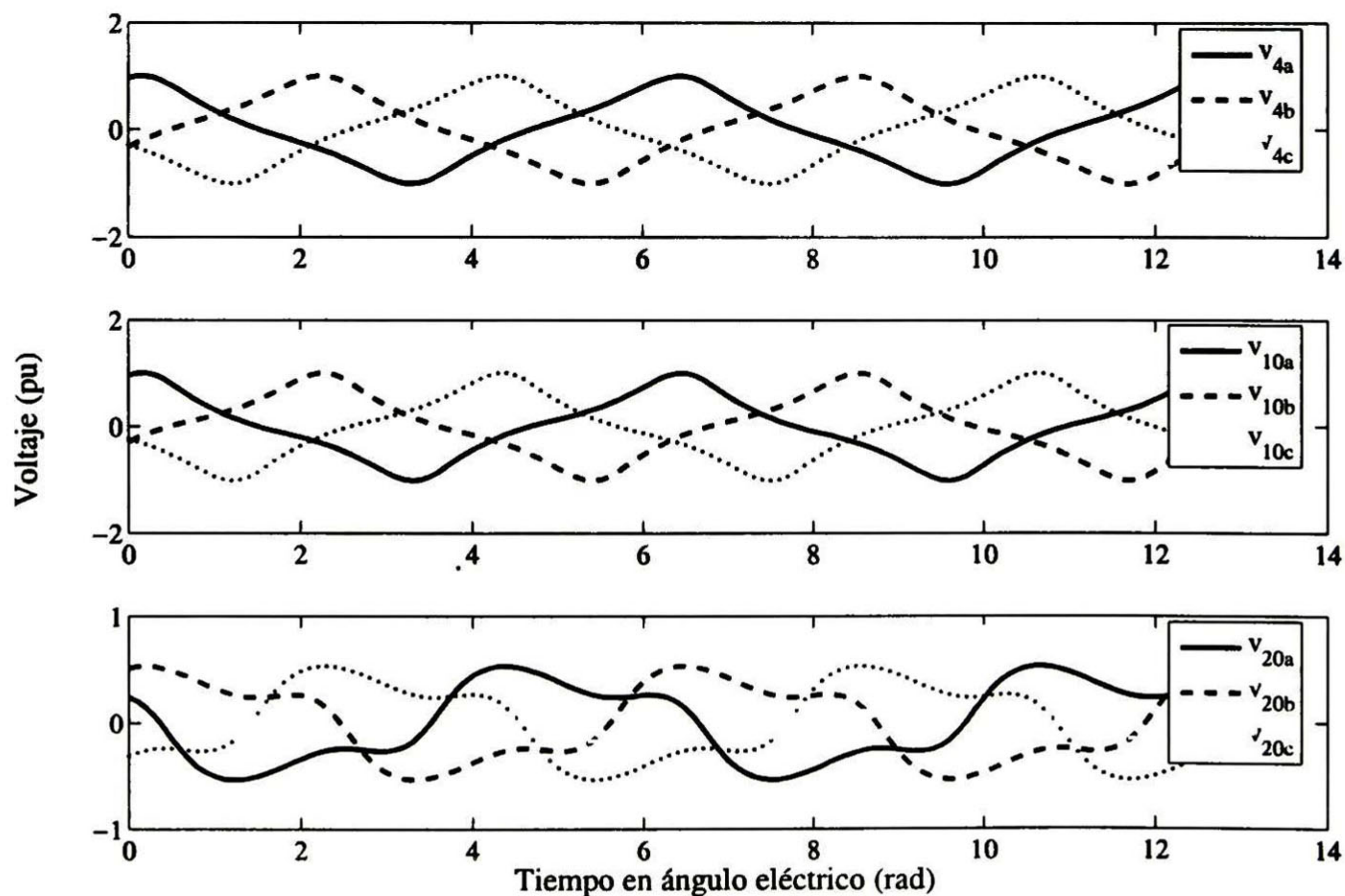


Fig. 4- 11. Voltajes en los nodos 3, 10 y 20, con dispositivos SVC y TCSC

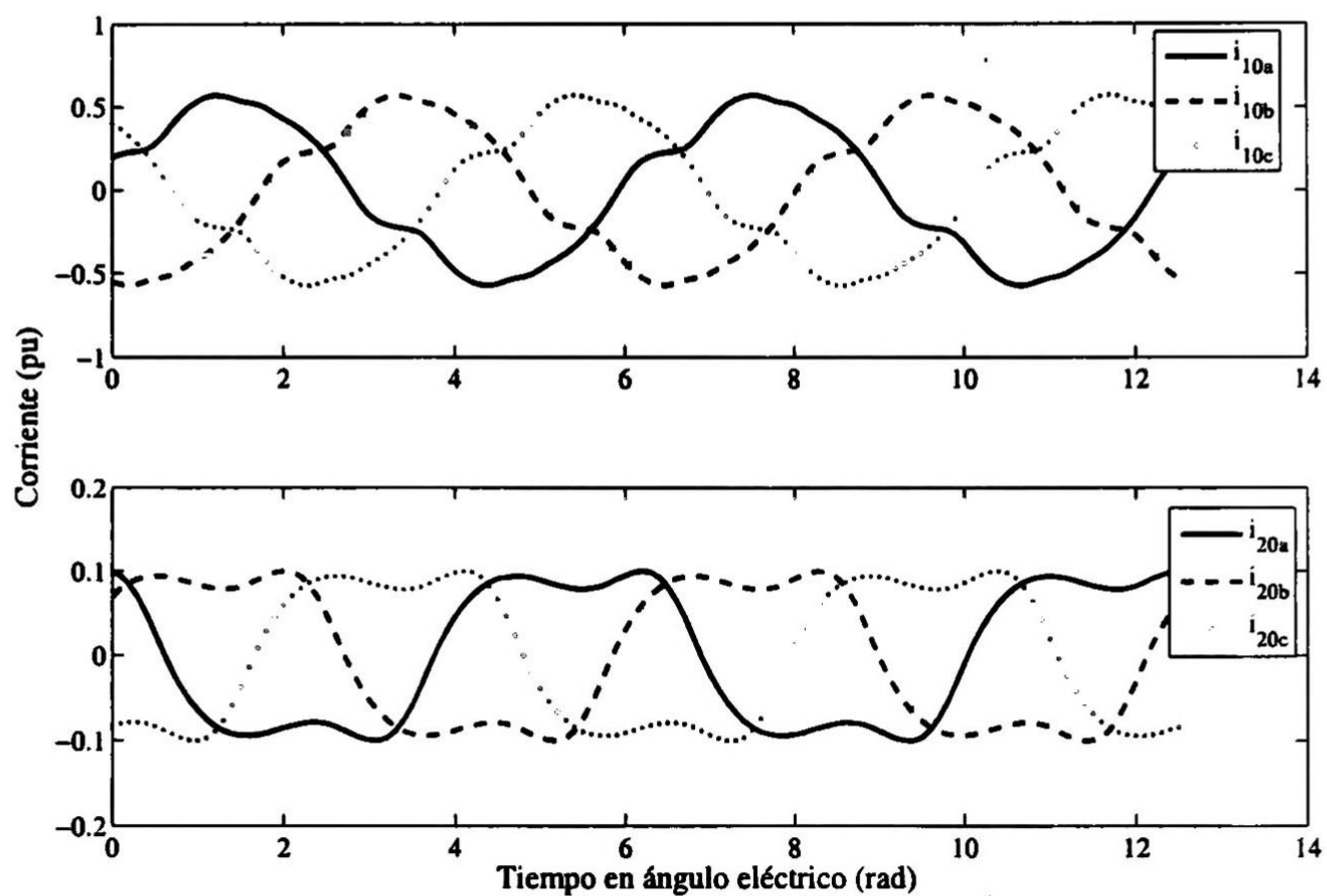


Fig. 4- 12. Co rrientes en los nodos 10 y 20, con SVC y TCSC

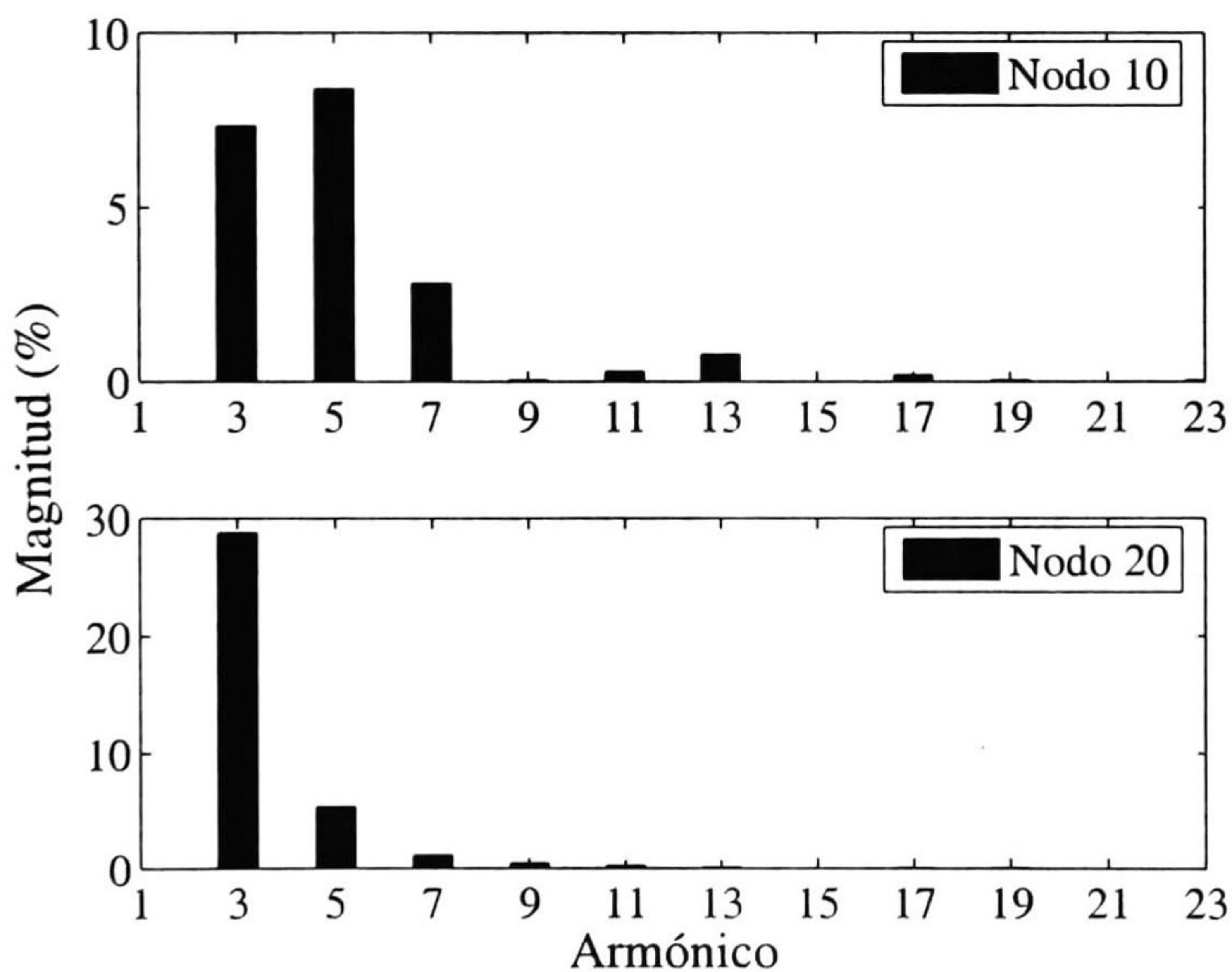


Fig. 4- 13. Co ntenido armónico de la corriente de carga en nodos 10 y 20

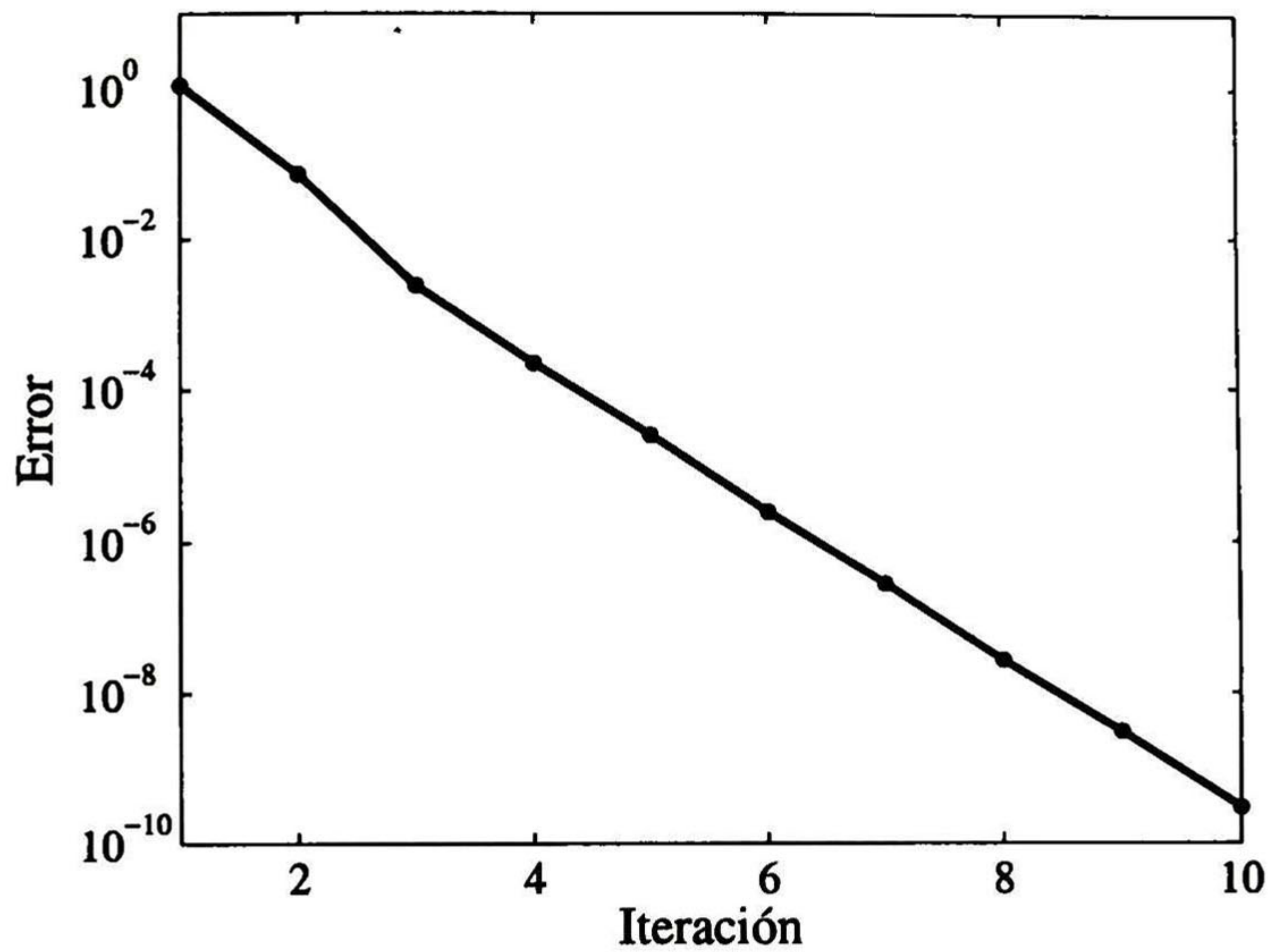
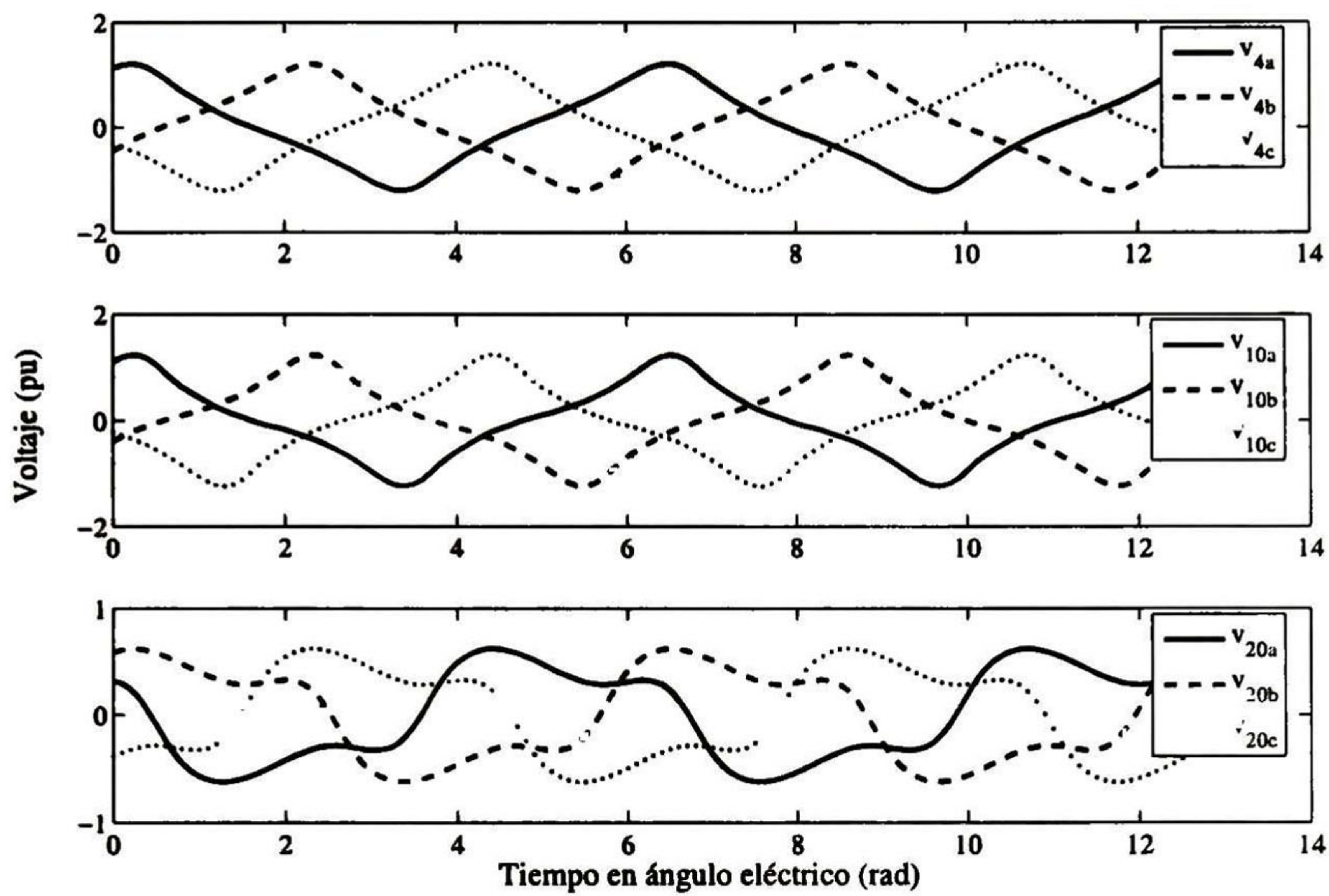


Fig. 4- 14. Patrón de convergencia, sistema incluyendo SVC y TCSC, caso trifásico

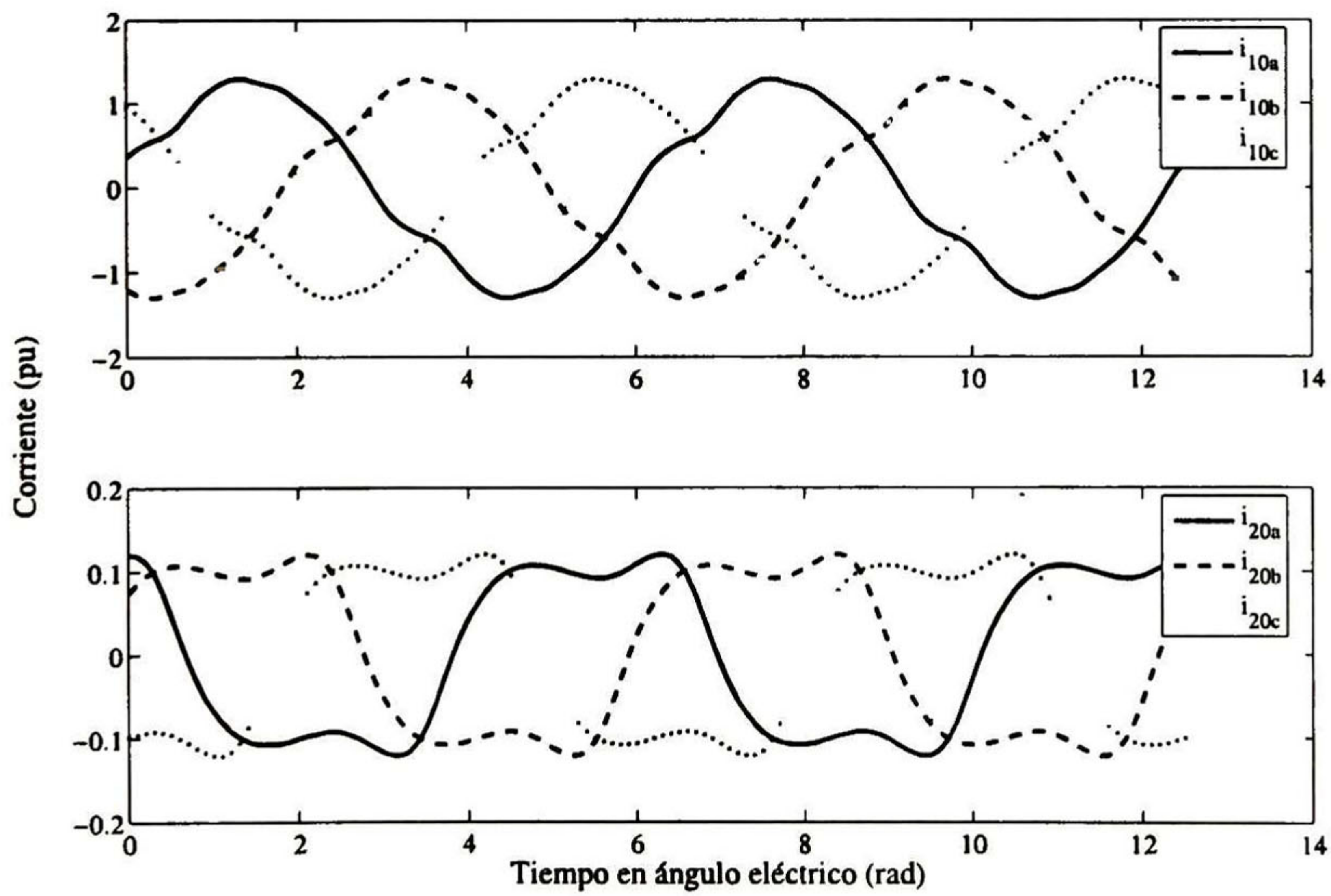
#### 4.5.5 Sistema con Nodos PV (Completo)

En esta última etapa se incorporan dos generadores PV, uno en el nodo 3 y otro en el nodo 4 (ver Fig. 4-3). El objetivo de su incorporación es compensar la caída de voltaje debido a las líneas/cargas a la izquierda de estos nodos. Los valores de los generadores están dados en la Tabla 4-1. En la Fig. 4-15 se observan los voltajes para los nodos 4, 10 y 20. Nótese la distorsión del voltaje en el nodo 20, esto debido a la magnitud del tercer armónico producto de la incorporación del TCSC.



**Fig. 4- 15.** Voltajes en los nodos 3, 10 y 20 incluyendo generadores PV

La Fig. 4-16 muestra las corrientes de cargas en los nodos 10 y 20. El contenido armónico de estas corrientes se muestra en la Fig. 4-17.



**Fig. 4- 16** Corrientes de carga en los nodos 10 y 20, incluyendo generadores PV

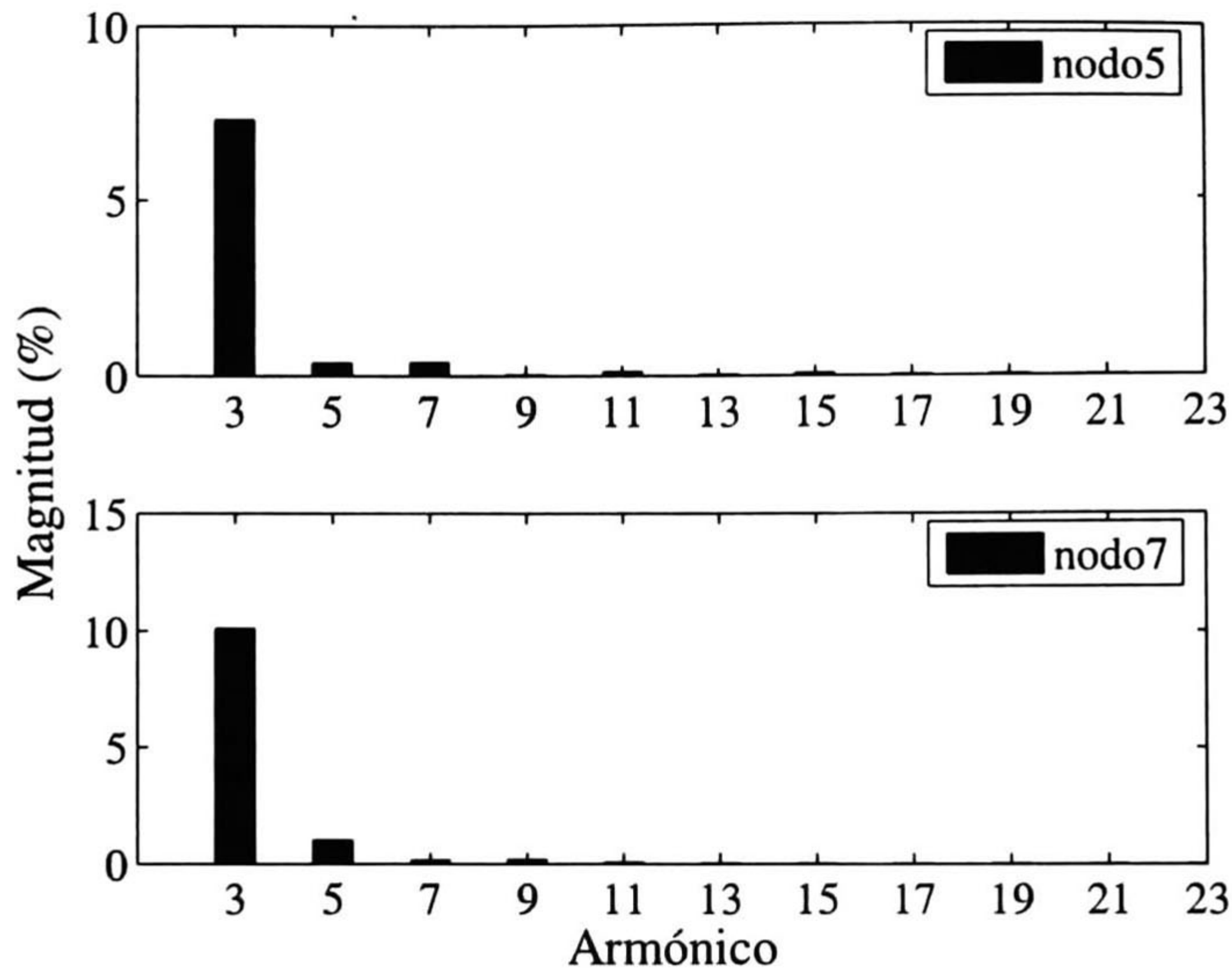


Fig. 4- 17.C ontenido armónico de la corriente de carga en los nodos 10 y 20

En la Fig. 4-18 se muestran tres gráficas correspondientes a las corrientes a través del TCSC, la primera de ellas muestra la corriente a través del banco de capacitores, la segunda la corriente a través del TCR y la tercera es la suma de las dos anteriores.

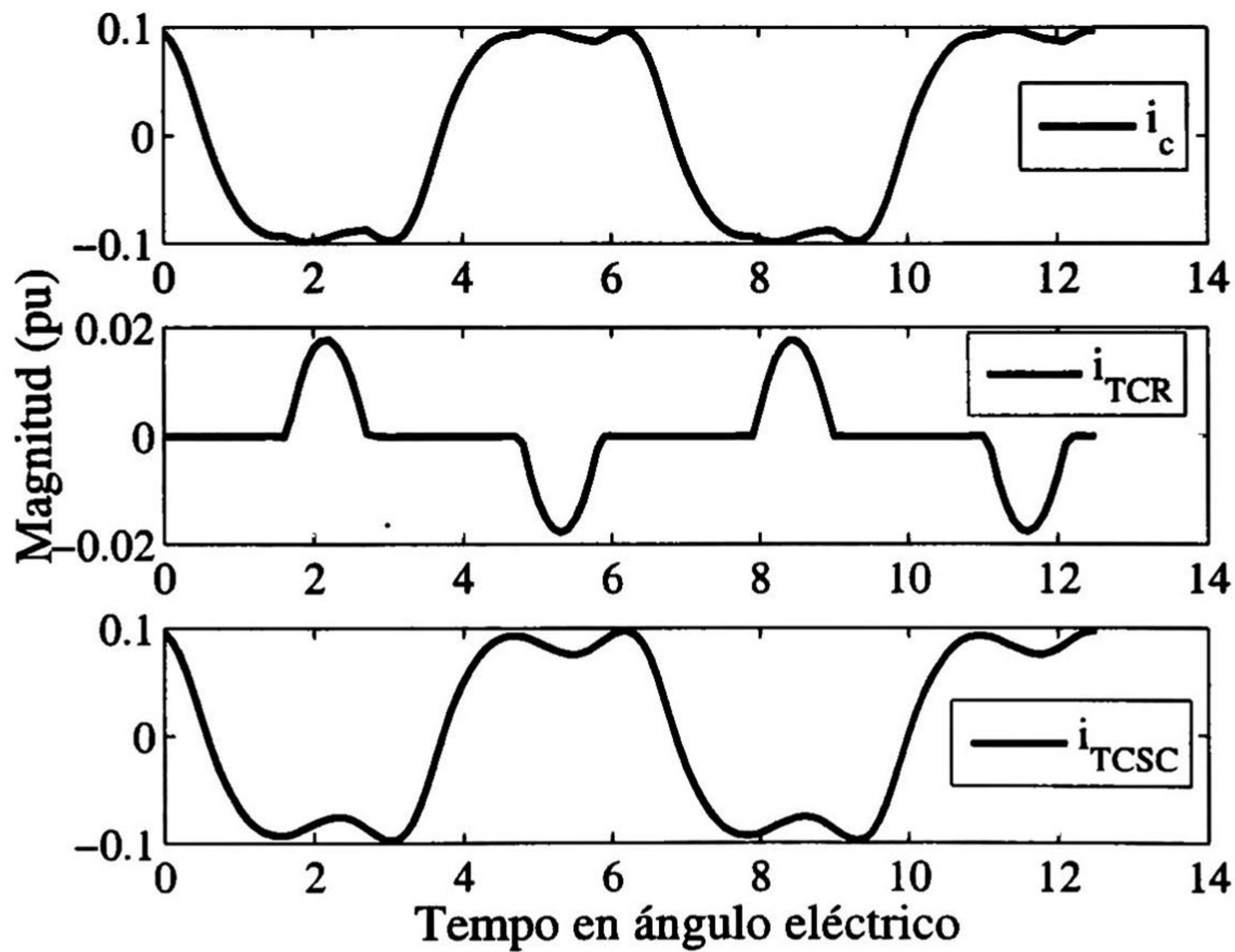


Fig. 4- 18.Co rriente a través del TCSC

La Fig. 4-19 muestra la corriente a través de los TCR correspondientes al acomodo delta del SVC.

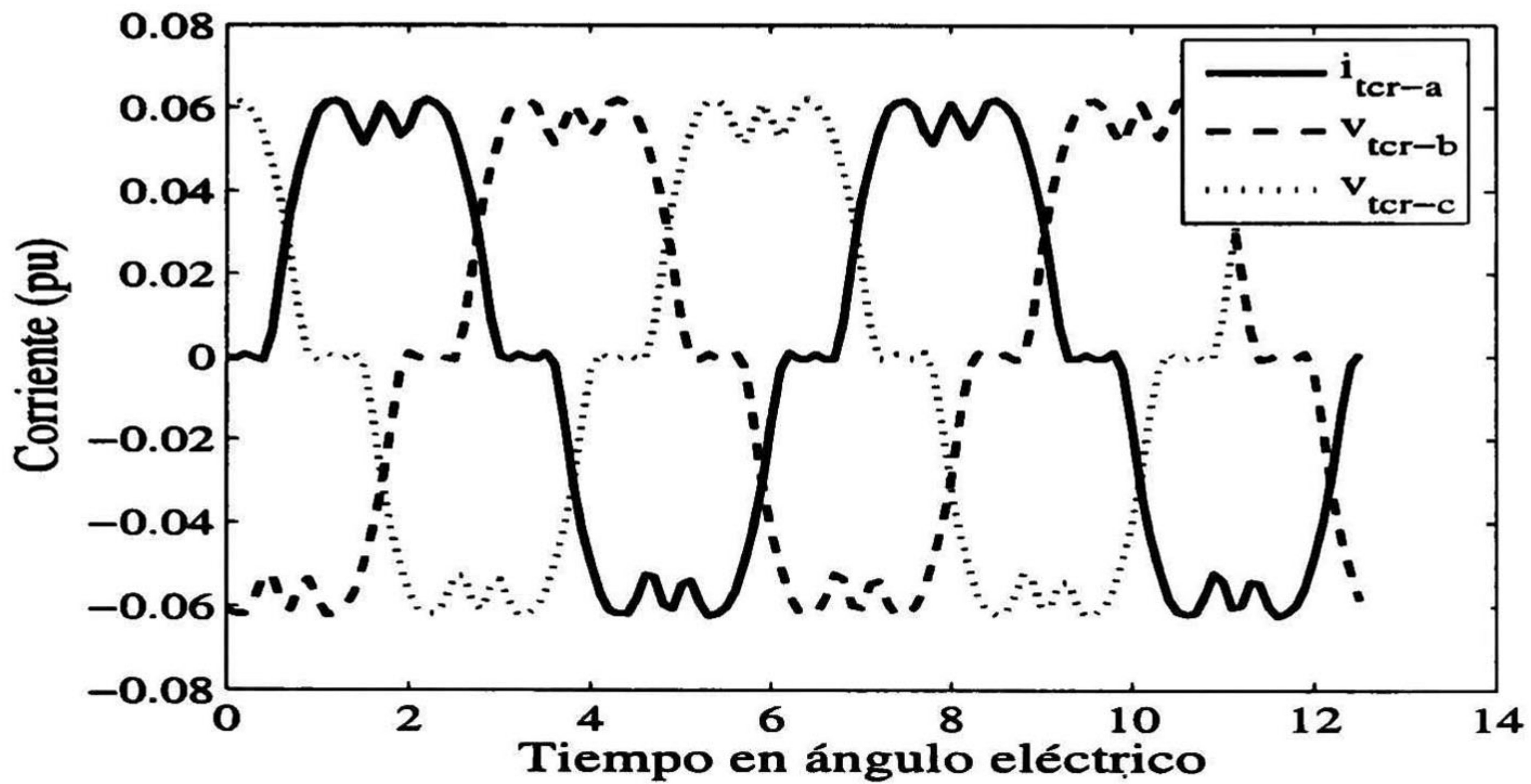


Fig. 4- 19. Corriente a través del acomodo delta de TCRs

Por último se tiene el patrón de convergencia para la red de estudio con todos los elementos anteriormente mencionados se presenta en la Fig. 4-20.

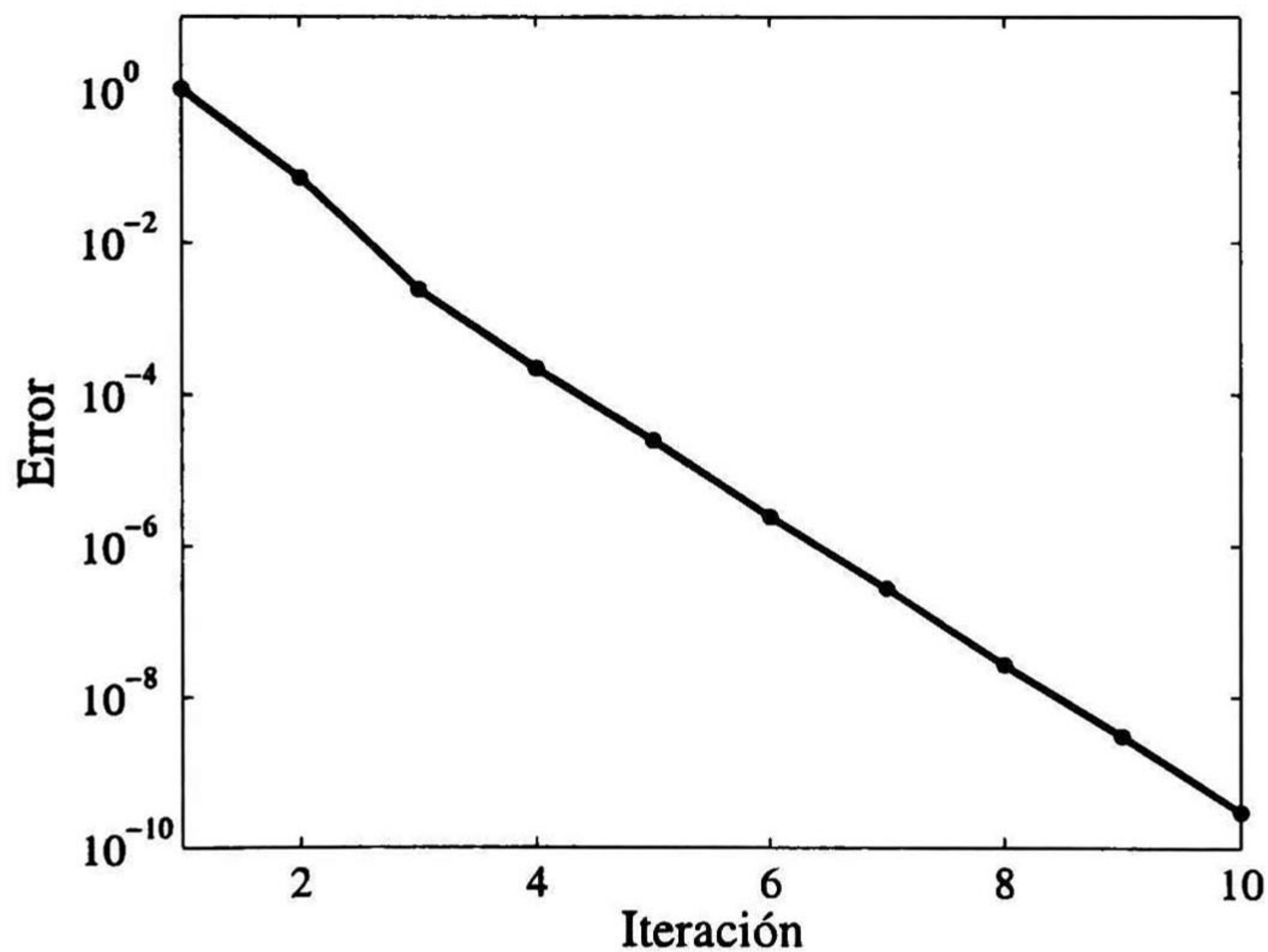


Fig. 4- 20. Patrón de convergencia sistema incluyendo generadores PV, caso trifásico

### 4.5.5 Estructura del Jacobiano Caso Trifásico

De una manera ilustrativa se presenta también la estructura de los jacobianos producidos por cada elemento para el caso trifásico. Las gráficas que se presentan se realizaron tomando en cuenta sólo los primeros tres armónicos para facilitar su visualización. En las dos primeras figuras (Fig. 4-21) se presentan los jacobianos producidos por la interconexión del sistema (líneas de transmisión) y las cargas lineales. La Fig. 4-22 presenta los jacobianos de las cargas no lineales y  $PQ$ . La Fig. 4-23 muestra los jacobianos del SVC y del TCSC. Por último la Fig. 4-24 muestra el Jacobiano total y la reducción de éste por la incorporación de los nodos PV.

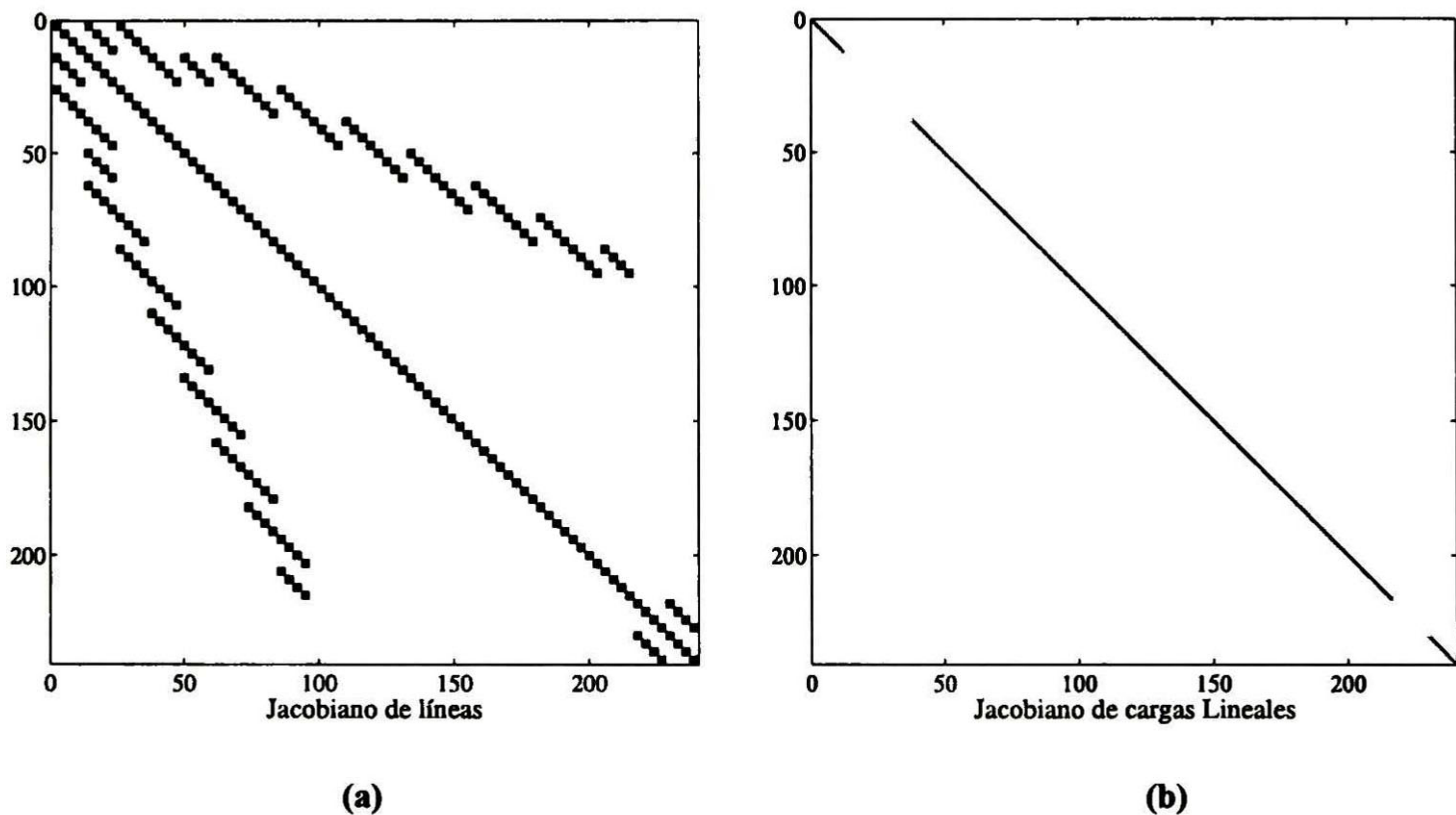
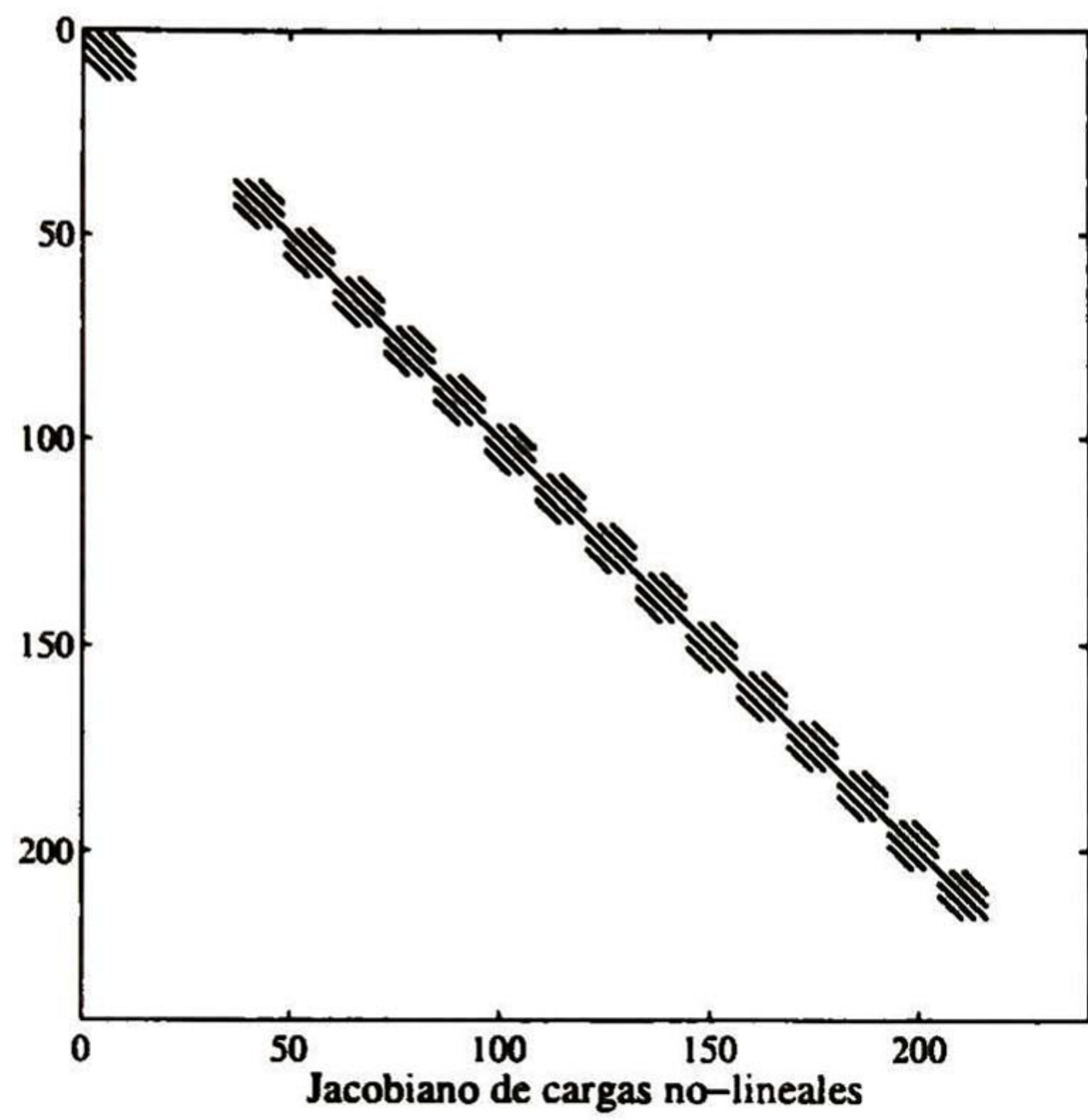
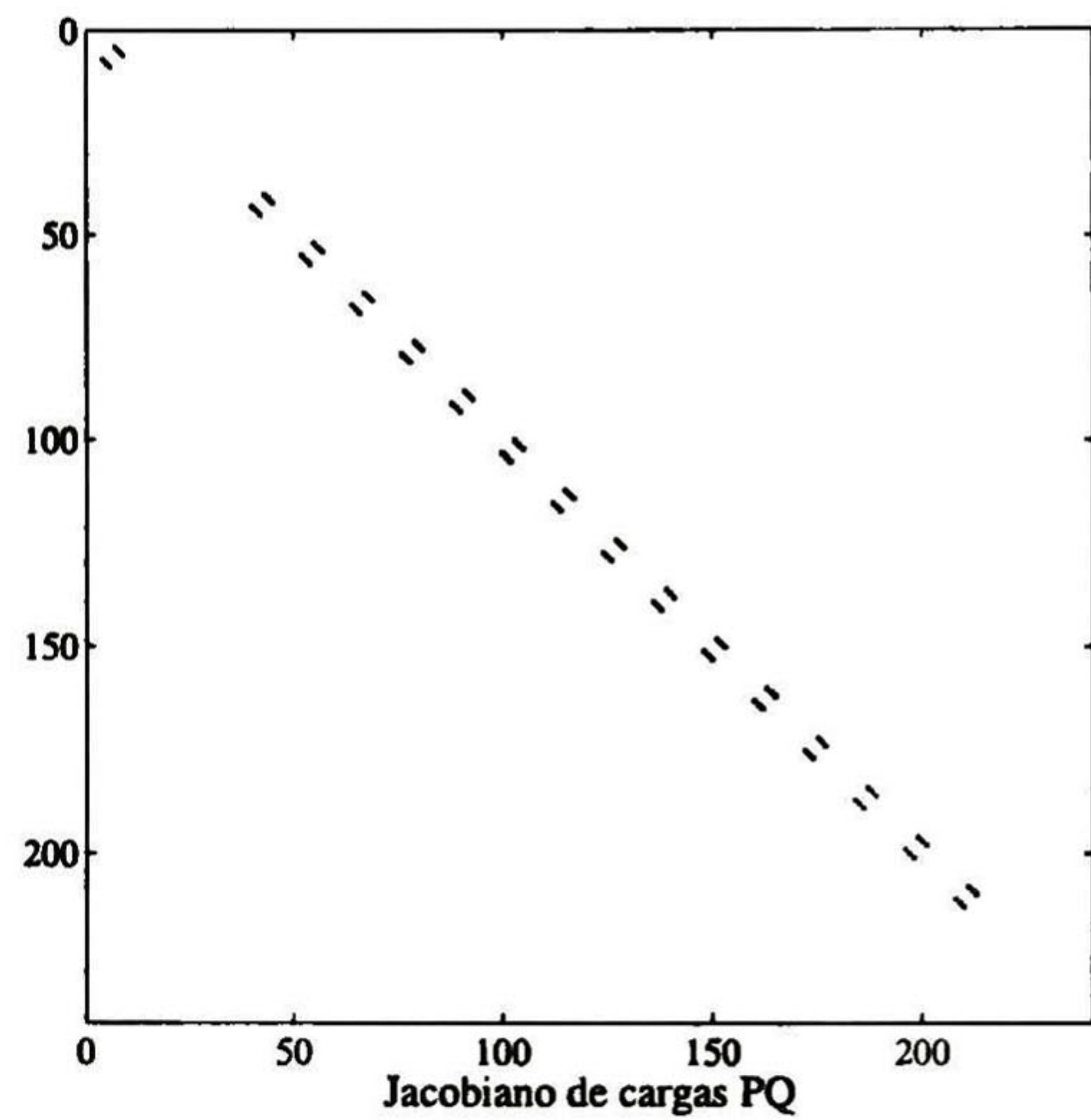


Fig. 4-21. Jacobiano (a) interconexión del sistema y (b) cargas lineales, sistema trifásico



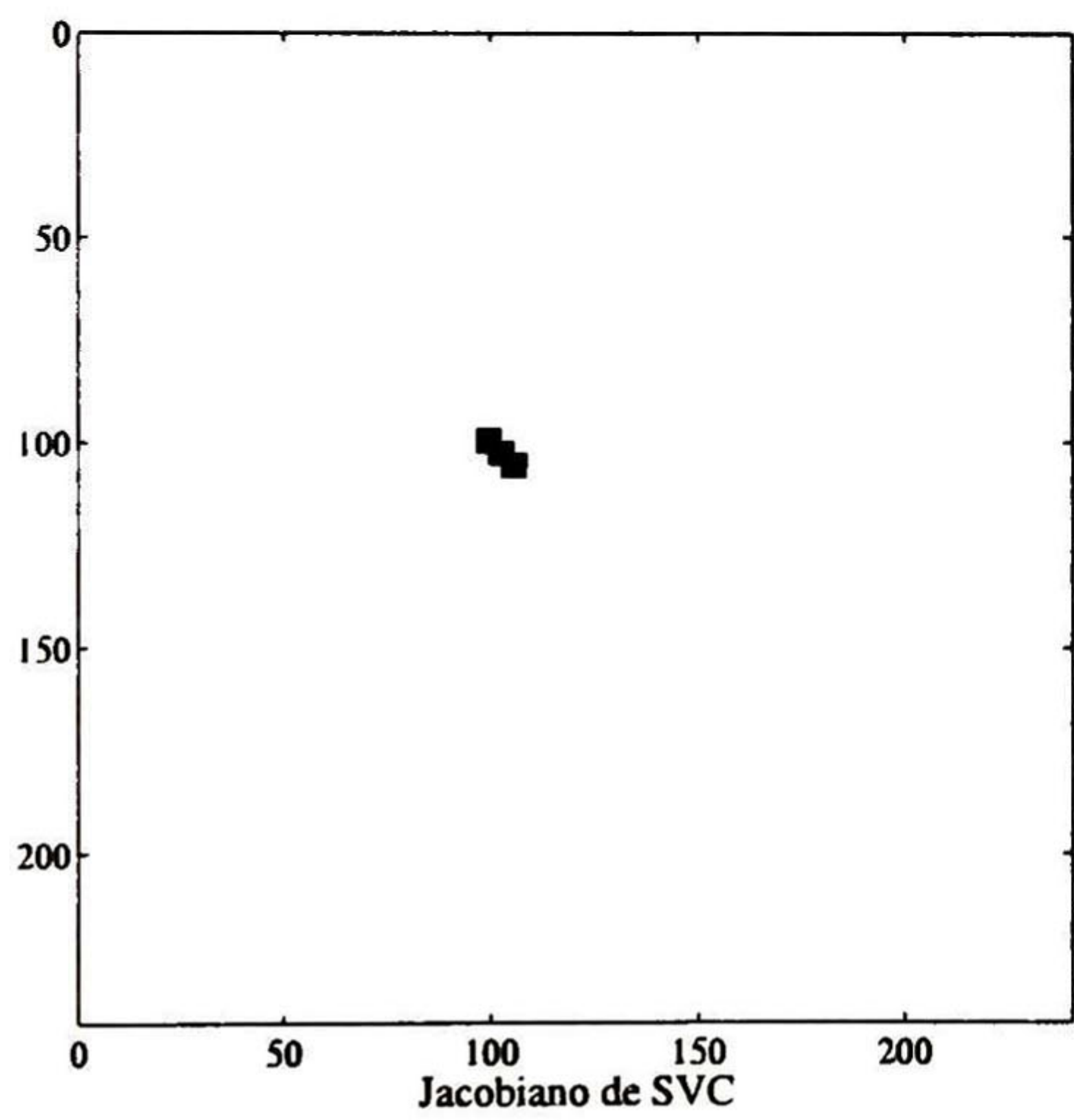


(a)

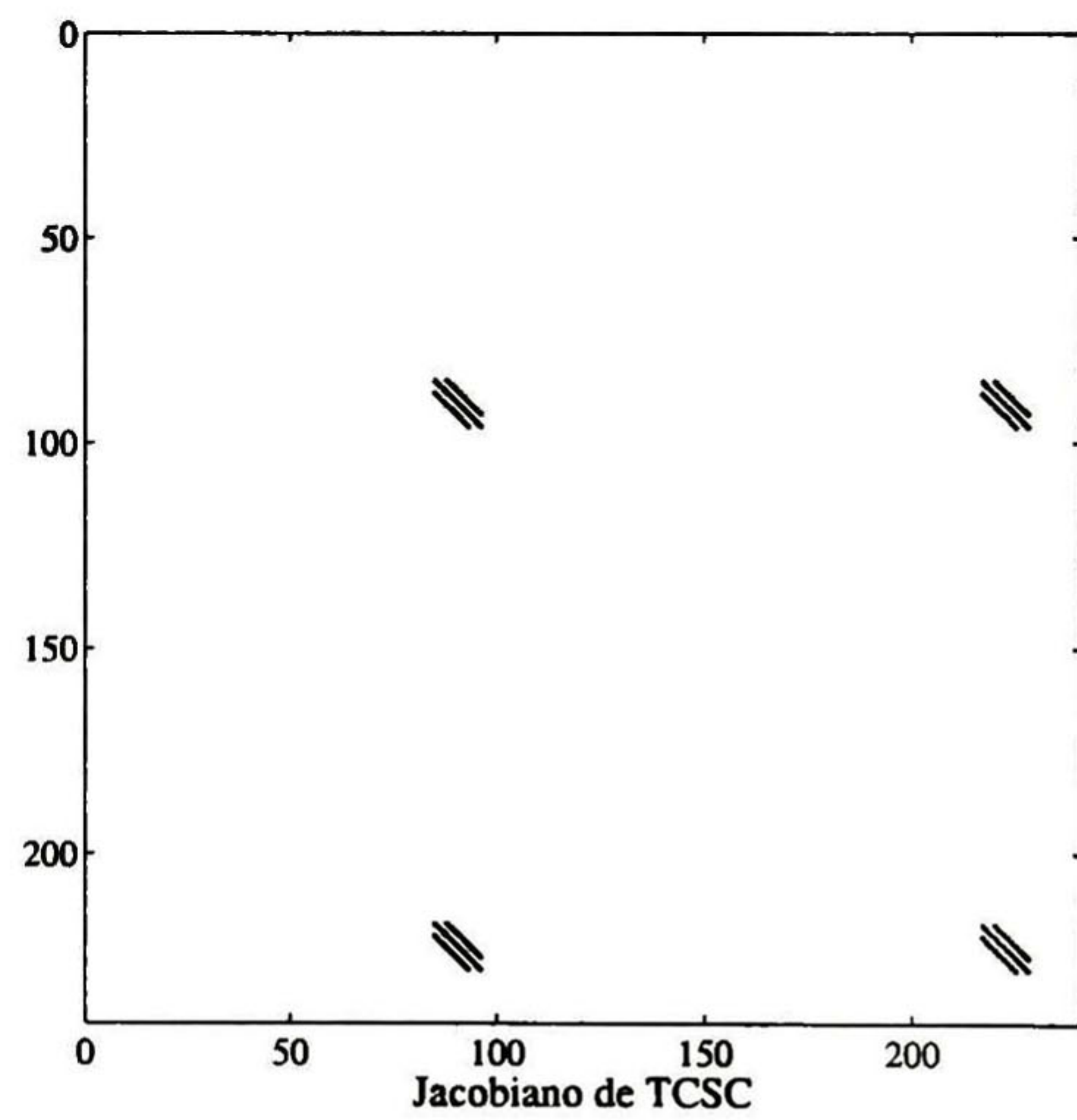


(b)

**Fig. 4-22.J** Jacobiano sistema trifásico, (a) de cargas no lineales y (b) cargas  $PQ$

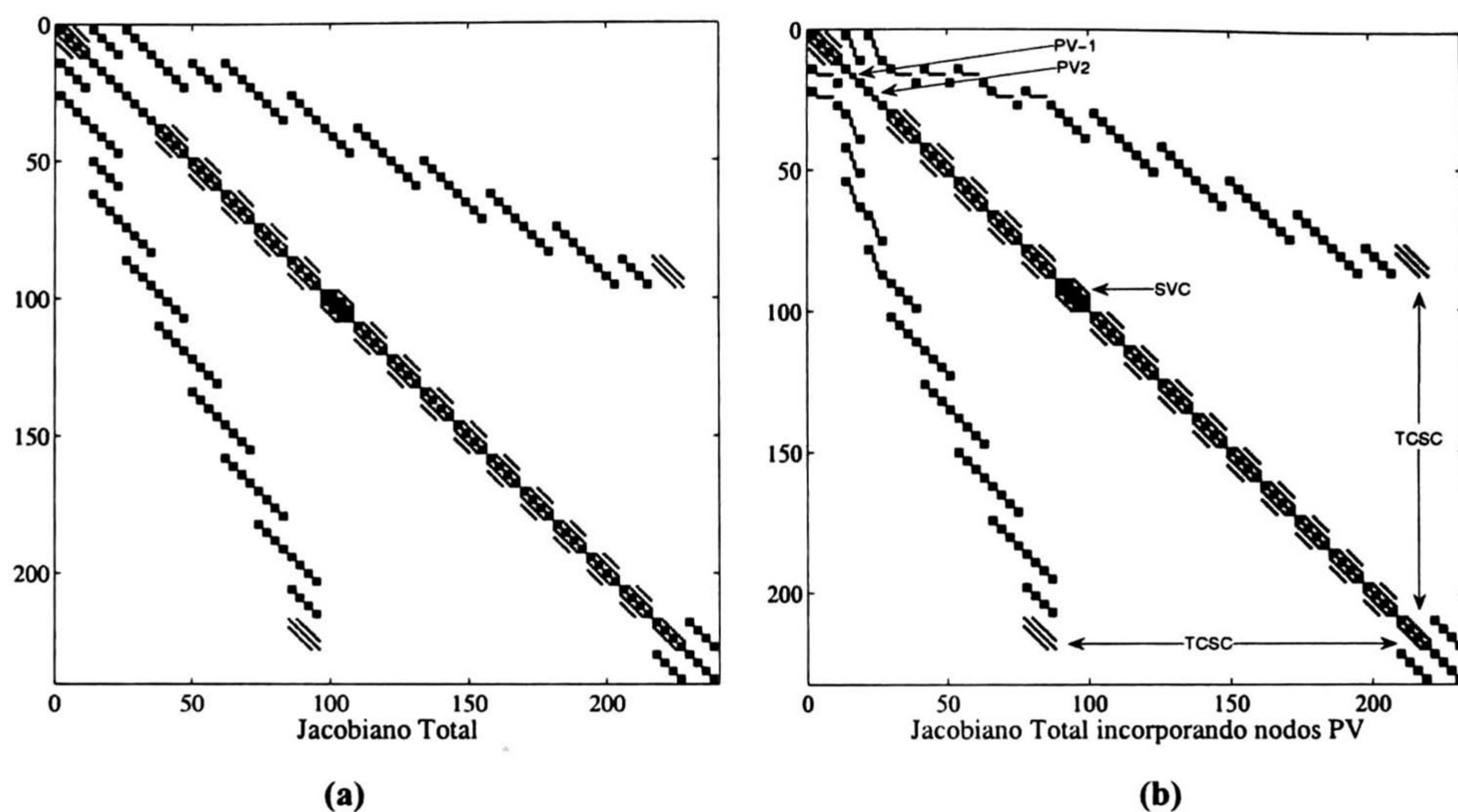


(a)



(b)

**Fig. 4-23.J** Jacobiano sistema trifásico, (a) de SVC y (b) TCSC



**Fig. 4-24.J** Jacobiano sistema trifásico, (a) total sin PV y (b) total con PV

## 4. 6 Conclusiones

En este Capítulo se ha extendido la metodología de Flujos de Potencia Armónicos al caso trifásico. Se ha observado claramente el impacto de los dispositivos electrónicos de las variables voltaje/corriente. El comportamiento del método de Newton-Raphson continúa con el mismo patrón de convergencia que en el caso monofásico. Esto es, los dispositivos electrónicos afectan ligeramente ( alrededor de 4 iteraciones más que sin ellos) el número de iteraciones.

## ***Capítulo V***

---

### **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

#### **5.1 Conclusiones**

En esta tesis se ha desarrollado una metodología para Flujos de Potencia Armónicos incluyendo cargas lineales, no lineales y  $PQ$ , dispositivos SVC y TCSC y generadores PV.

Se ha utilizado el dominio armónico, el cual se basa en una técnica matemática que permite calcular los armónicos y sus interacciones con diferentes dispositivos de una manera natural y con operaciones matriciales únicamente.

La metodología propuesta tiene como base el trabajo descrito en [4], [5] y [12]. La contribución de este autor es: la inclusión de dispositivos de conmutación SVC y TCSC en su forma monofásica y trifásica a la metodología de Flujos de Potencia Armónicos.

Se utiliza el método de Newton-Raphson para la solución del estado estable de la red. La convergencia del método con elementos lineales se lleva a cabo en la primera iteración. Añadiendo elementos no-lineales el método converge en no más de 5 iteraciones. La convergencia se ve afectada con la incorporación de elementos de conmutación obteniendo la solución deseada en no más de 10 iteraciones. La inclusión de generadores PV no afecta la convergencia en el caso de tener en la red dispositivos de conmutación.

La metodología antes señalada se pretende para aplicaciones en análisis de armónicos, localización óptima de dispositivos electrónicos, flujos de potencia y estimación de estado para inicialización de cálculos posteriores, entre otras.

## 5.2 Trabajos Futuros

Algunos de los trabajos que pueden desarrollarse a futuro son:

- Incorporación de dispositivos adicionales en el marco de sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS por sus siglas en Inglés).
- Utilización de un Jacobiano constante (flujos de potencias armónicos rápido).
- Extensión al dominio armónico extendido para el análisis de transitorios en redes no lineales.
- Combinación de la transformada  $z$  y el dominio armónico para análisis transitorio.
- Combinación de la transformada de Laplace y el dominio armónico para análisis transitorio.

# Referencias

---

1. E. L. Owen, "A History of Harmonics in Power Systems" , IEEE Industry Applications Magazine, pp. 6-12, January/February, 1998.
2. B. P. Lathi, Linear System and Signals, California: Berkeley Cambridge Press. Carmichael, 1992.
3. Mohan N., Power Electronics. USA: John Willey & Sons. 1995
4. A. Ramirez, A. Semlyen, and R. Iravani, " Representation of PV Buses in a Newton-Type Harmonic Power Flow Program" IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19 no. 3, July. 2004.
5. E. Acha and M. Madrigal, Power System Harmonics, England: John Wiley & Sons, LTD, 2001.
6. H. W. Dommel, EMTP Theory Book, Vancouver: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
7. W. Xu, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6. no.1, February. 1991.
8. "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electrical Power Networks Part. I and II" IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 11, no. 1, January. 1996.
9. R. Mohan M. and Rajiv K. V., Thiristor - Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, John Wiley & Sons,
10. J.J. Rico, E. Acha, and T.J.E. Millar, "Harmonic Domain Modelling of Thee Phase Thiristor – Controlled Reactors by Means of Switching Vectors and Discrete Convolutions". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, July. 1996.
11. E. Acha, C. Fuerte, H. Ambriz, and C. Angeles, FACTS Modeling and Simulation in Power Networks, Glasgow: John Willey & Sons. 1994.
12. T. Noda, A. Semlyen, and R. Iravani, "Entirely Harmonic Domain Calculation of Multiphase Nonsinusoidal Steady State". IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, no. 3, July. 2004.
13. J. B. J. Fourier, Théorie Analytique de la Chaluer, Paris , 1822.

14. J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Digital Signal Processing, Prentice Hall, USA. 1996.
15. D. Glover and D. M. Sarma, Power System Analysis & Design, Boston: PWS Publishing Company. 1996.
16. Yong Hua Song, and Allan T. Johns, “Flexible AC Transmission Systems (FACTS)” IEE Power and Energy, Series 30, London UK, 1999
17. N. G. Hingorani, and L. Gyugyi, Understanding FACTS, New York, USA: IEEE, New IEEE. 2000.
18. M. Madrigal, and E. Acha, “A New Harmonic Power Flow Method based on the Instantaneous Power Balance”. IEEE 2002
19. L. T.G. Lima, A. Semlyen, and M. R. Iravani, “Harmonic Domain Periodic Steady State Modeling of Power Electronics Apparatus: SVC and TCSC”, IEEE PE-269PRD, September. 2002.
20. A. Gómez Expósito, Análisis y Operación de Energía Eléctrica, Madrid: McGraw Hill, 2002.



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N.  
UNIDAD GUADALAJARA**

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Flujos de Potencia Armónicos Incluyendo los Dispositivos  
Electrónicos SVC y TCSC

del (la) C.

José de Jesús CHÁVEZ MURO

el día 25 de Agosto de 2006.

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Amner Israel Ramírez Vázquez  
Investigador CINVESTAV 2C  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Felipe Alejandro Uribe Campos  
Profesor Investigador Titular A  
Universidad de Guadalajara



CINVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000008548