

Análisis de corrientes y voltajes en los dispositivos SVC y TCSC

Pável Zúñiga H. Ricardo J. Dávalos Juan M. Ramírez Ixtláhuatl Coronado

CINVESTAV-IPN, Unidad Guadalajara. Apdo. Postal 45090

Guadalajara, Jal., 45090. MEXICO. pzuniga [rdavalos] [jramirez]
[icoronad]@gdl.cinvestav.mx

+

Resumen—En este trabajo se presenta el modelo del compensador estático de reactivos (SVC), así como del capacitor serie controlado por tiristores (TCSC). Se presentan las expresiones que describen el comportamiento del voltaje y la corriente en los componentes del SVC, considerando una resistencia asociada al reactor (inductor) del dispositivo, y mostrando las diferencias existentes en las señales cuando se toma en cuenta el valor de ésta resistencia y cuando se desprecia. Se presentan también las expresiones que describen el comportamiento del voltaje en el capacitor y la corriente en los tiristores del TCSC, mostrando las diferencias existentes en las señales cuando el dispositivo opera en la región inductiva y capacitiva.

Palabras Clave—SVC, TCR, TCSC.

I. INTRODUCCIÓN.

EL SVC y el TCSC son sistemas de transmisión flexibles de CA (FACTS) que presentan la misma configuración, un reactor controlado por tiristores (TCR) en paralelo con un

capacitor fijo (FC), la diferencia existente entre estos dispositivos estriba en la forma de conexión y en el impacto que tienen sobre las variables del sistema.

El SVC es uno de los dispositivos utilizados para mantener el voltaje dentro de niveles aceptables de operación. Los SVCs desarrollados a principios de los 70s son los precursores de los actuales controladores FACTS [2].

La función del SVC es regular el voltaje del sistema de transmisión en el punto de conexión [2].

Desde el punto de vista de operación, el SVC puede verse como una reactancia variable en derivación que depende del ángulo de disparo aplicado a los dispositivos electrónicos de potencia que lo componen. Dependiendo del valor de éste ángulo, el dispositivo se comporta como una reactancia ya sea capacitiva o inductiva. En la Fig. 1 se muestra el diagrama esquemático del SVC.

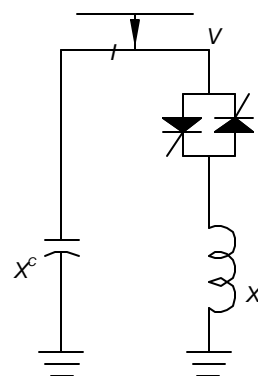


Fig. 1. Diagrama esquemático del SVC.

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

Al igual que el SVC, el TCSC también puede verse como una reactancia variable que, dependiendo del ángulo de disparo aplicado a los dispositivos electrónicos de potencia, puede ser capacitiva o inductiva, con la diferencia de que en éste caso la reactancia aparece en serie con la línea. Así, el TCSC es un dispositivo que ayuda a controlar el flujo de corriente a través de un línea determinada, controlando así la potencia transmitida por la misma [4]. El diagrama esquemático del TCSC se muestra en la Fig. 2.

+En este trabajo se estudia el SVC, primeramente analizando el TCR e incluyendo la resistencia asociada a la inductancia del dispositivo, esto trae como resultado la deformación de las ondas de corriente a través de los tiristores (I_t) y de voltaje en la carga (V_l) compuesta por el reactor y la resistencia; ésta deformación de las señales afecta el contenido armónico del dispositivo.

Se analiza también el TCSC, obteniendo las expresiones que describen el comportamiento del voltaje en el capacitor (v_c) y la corriente en los tiristores (i_t), mostrando las diferencias en el dispositivo cuando opera en la región inductiva y capacitiva, así como las formas de onda del capacitor y el TCR.

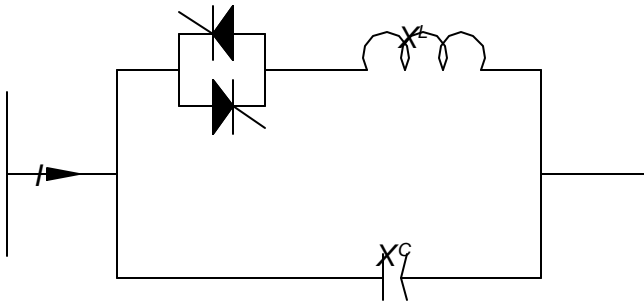


Fig. 2. Diagrama esquemático del TCSC.

II. MODELO DEL SVC

Para obtener las ecuaciones que describen el comportamiento del SVC, primeramente se analiza el TCR. Para obtener las expresiones de la corriente en los tiristores (I_t) y el voltaje en la carga (V_l) del TCR se utiliza un circuito sencillo que consta de un reactor (L_t), una resistencia (R_t) y un conmutador de CA formado por un par de tiristores conectados en antiparalelo, alimentados por una fuente de voltaje de 60 Hz con amplitud máxima V_m . En este circuito se asume que los tiristores son ideales y que operan de manera periódica. Este sistema se muestra en la Fig. 3.

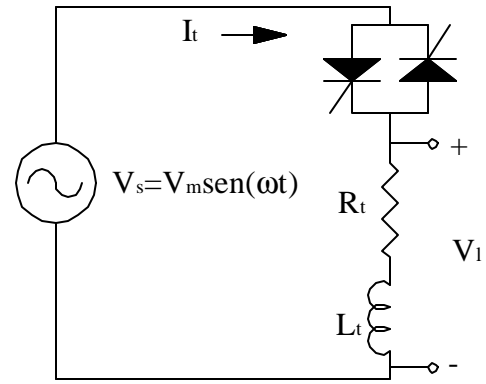


Fig. 3. Diagrama del TCR.

Se asume que la impedancia del TCR es una combinación de (L_t) y (R_t), debido a que un inductor en la operación real tiene asociada una resistencia.

A continuación se muestra la ecuación que describe el comportamiento del circuito, donde se ha sustituido $V_s = V_m \text{sen}(\omega t)$.

$$V_m \text{sen}(\omega t) = L \frac{dI_t(t)}{dt} + R I_t(t) \quad (1)$$

Ésta es una ecuación diferencial lineal de primer orden con coeficientes constantes.

Utilizando la solución para esta ecuación y arreglando para integrar con respecto a $d\omega$, para el intervalo (ω_1, ω) que corresponde al primer medio ciclo de operación, se obtiene la siguiente expresión para la corriente en los tiristores.

$$I_t(t) = \frac{-\omega L_t V_m \cos(\omega t) + V_m R_t \text{sen}(\omega t)}{R_t^2 + \omega^2 L_t^2} + \frac{\omega L_t V_m e^{-\frac{R_t}{\omega L_t}(\omega - \omega_1)} \cos(\omega_1)}{R_t^2 + \omega^2 L_t^2} - \frac{V_m R_t e^{-\frac{R_t}{\omega L_t}(\omega - \omega_1)} \text{sen}(\omega_1)}{R_t^2 + \omega^2 L_t^2} + C_1 e^{-\frac{R_t}{\omega L_t}(\omega - \omega_1)} \quad (2)$$

donde ω_1 es el ángulo de disparo en radianes.

Se asume que $C_1 = 0$ puesto que la corriente a través de los tiristores es cero al momento del disparo.

Para el intervalo correspondiente al siguiente medio ciclo de operación $(\mathbf{p} + \mathbf{w}_1, \mathbf{w})$, la expresión para la corriente en los tiristores queda como sigue.

$$I_t(t) = \frac{-\mathbf{w}L_t V_m \cos(\mathbf{w}) + V_m R_t \sin(\mathbf{w})}{R_t^2 + \mathbf{w}^2 L_t^2} - \frac{\mathbf{w}L_t V_m e^{-\frac{R_t}{\mathbf{w}L_t}(\mathbf{w}-\mathbf{p}-\mathbf{w}_1)} \cos(\mathbf{w}_1)}{R_t^2 + \mathbf{w}^2 L_t^2} + \frac{V_m R_t e^{-\frac{R_t}{\mathbf{w}L_t}(\mathbf{w}-\mathbf{p}-\mathbf{w}_1)} \sin(\mathbf{w}_1)}{R_t^2 + \mathbf{w}^2 L_t^2} + C_2 e^{-\frac{R_t}{\mathbf{w}L_t}(\mathbf{w}-\mathbf{p}-\mathbf{w}_1)} \quad (3)$$

donde $C_2 = 0$.

Los tiristores cesan su conducción cuando I_t cruza por cero, así, \mathbf{w} queda determinado para ambas expresiones.

El voltaje a través de la carga cuando los tiristores están en conducción está descrito por la siguiente expresión.

$$V_l(t) = V_m \sin(\mathbf{w}) \quad (4)$$

En la Fig. 4 se muestran I_t y V_l cuando $R_t = 0$ para un ciclo de operación, con un ángulo de disparo $\mathbf{a} = 130^\circ$, $V_m = 1V$ y $L_t = 2e - 3H$.

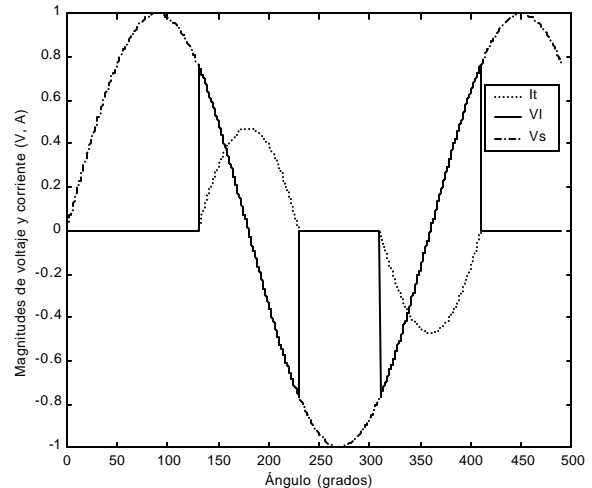


Fig. 4. Corriente y voltaje en el TCR con resistencia igual a cero.

En la Fig. 5 se muestran I_t y V_l con los parámetros de la simulación anterior y con $R_t = 1\Omega$.

Puede observarse que la inclusión de la resistencia deforma las señales de voltaje y corriente, esto afecta el contenido armónico de I_t .

Para tener la configuración del SVC solo se coloca un capacitor en paralelo con el TCR. El voltaje en el capacitor será el del punto de conexión,

$$V_c = V_m \sin(\mathbf{w}) \quad (5)$$

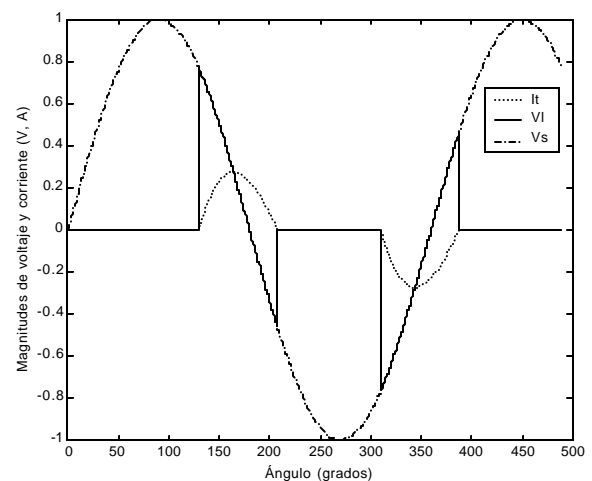


Fig. 5. Corriente y voltaje en el TCR con resistencia igual a 1Ω .

III. ECUACIONES DE EQUILIBRIO DEL TCSC

Las ecuaciones de voltaje y corriente en el TCSC se desarrollaron usando la transformada de Laplace para dos estados diferentes del sistema, cuando los tiristores están en conducción y cuando no hay conducción por ellos. Esto se representa ya sea con el interruptor abierto o cerrado en el circuito de la Fig. 6.

Las ecuaciones de voltaje y corriente en el TCSC se derivan del análisis en paralelo de un circuito LC con inductancia variable. Primero se asume que la corriente de línea es senoidal ($i_l(t) = I_m \sin(\omega t)$), y se toma como referencia para el disparo de los tiristores, ya que minimiza la generación de armónicas [5].

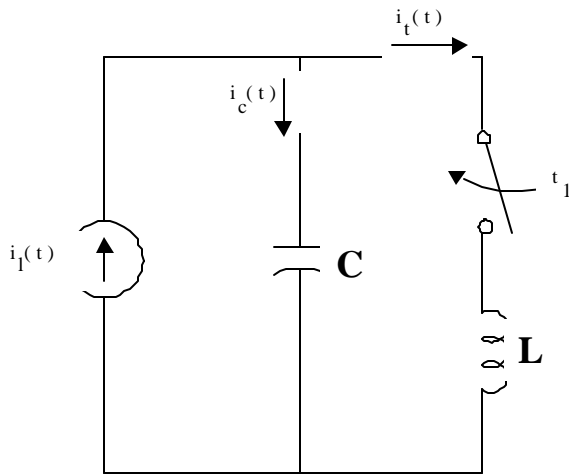


Fig. 6. Dispositivo TCSC en un sistema de potencia.

A. Conducción

Si el primer tiristor (simbolizado por el interruptor de la Fig. 6) se enciende en un tiempo $t = t_1$, aplicando leyes de Kirchoff se tiene que,

$$i_t(t)u(t-t_1) = I_c(t) + i_c(t) \quad (6)$$

Las ecuaciones de voltaje y corriente a través del TCSC en el periodo de conducción se obtienen a partir de la solución a la ecuación diferencial que a continuación de muestra,

$$L \frac{d}{dt} i_t(t) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_c(t) dt + V_c(t_1)u(t-t_1) \quad (7)$$

donde $v_c(t_1)$ es el voltaje del capacitor al momento del encendido del primer tiristor y $u(t-t_1)$ el operador retardo.

Las expresiones que se muestran a continuación son las

ecuaciones generales para la corriente en los tiristores y el voltaje en el capacitor en el primer periodo de conducción dado por el intervalo $t \in [t_1, t_{off}^1]$, donde t_{off}^1 es el tiempo de apagado del primer tiristor.

$$i_t(t) = A \sin(\omega t) + K_1 \cos(\omega_0 t) + K_2 \sin(\omega_0 t) \quad (8)$$

$$v_c(t) = AX_L \cos(\omega t) - kX_L K_1 \sin(\omega_0 t) + kX_L K_2 \cos(\omega_0 t) \quad (9)$$

donde:

$$K_1 = B \cos(\alpha) \sin(k\alpha) - A \sin(\alpha) \cos(k\alpha) - Dv_c(t_1) \sin(k\alpha)$$

$$K_2 = Dv_c(t_1) \cos(k\alpha) - A \sin(\alpha) \sin(k\alpha) - B \cos(\alpha) \cos(k\alpha)$$

$$k = \frac{\omega_0}{\omega}$$

$\alpha = \omega t_1$ es el ángulo de disparo del tiristor.

$$A = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} I_m$$

$$B = \frac{\omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} I_m$$

$$D = \omega_0 C$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Las ecuaciones para el segundo intervalo de conducción estarán dadas de igual forma por la ecuación (8) y la ecuación (9), sólo que en este caso el cierre del interruptor será en un tiempo $t = t_2 = t_1 + p/\omega$. Por lo tanto el segundo periodo de conducción se encuentra en el intervalo $t \in [t_2, t_{off}^2]$, donde t_{off}^2 es el tiempo de apagado del segundo tiristor.

B. No conducción

Para el periodo donde los tiristores no están en conducción, el circuito equivalente del TCSC es simplemente un capacitor en serie con una fuente de voltaje de corriente directa, la cual representa el voltaje del capacitor al momento de la conmutación. Para este caso la corriente del inductor es cero y la corriente del capacitor es igual a la corriente de

línea $(i_c(t) = i_l(t) = I_m \text{sen}(\mathbf{w}))$.

El voltaje del capacitor cuando los tiristores no están en conducción está dado por,

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t_{nc}}^t I_m \text{sen}(\mathbf{w}) dt + v_c(t_{nc}) \quad (10)$$

donde t_{nc} es el inicio del período de no-conducción

$v_c(t_{nc})$ es el voltaje del capacitor en t_{nc} .

IV. ESTADO ESTACIONARIO

De igual forma que en la sección anterior el análisis llevará a cabo para el período de conducción y el de no-conducción.

A. Conducción

El dispositivo alcanza su estado estacionario cuando el pico máximo de la corriente de línea coincide con el mínimo de la corriente que circula por los tiristores. Este comportamiento también es simétrica con respecto al cruce por cero del voltaje del capacitor. En la Fig. 7 se muestra el comportamiento transitorio del voltaje en el capacitor y la corriente en los tiristores, donde se observa el defasamiento que hay entre los máximos de las corrientes y la asimetría con respecto al cruce por cero del voltaje del capacitor. Con esta característica se puede calcular el voltaje del capacitor en estado estacionario al momento del disparo, $v_c(t_1)$, evaluando $\mathbf{w}t = \mathbf{p}/2$ en la ecuación (9).

$$v_c(t_1) = \frac{B}{D} \cos(\mathbf{a}) - \frac{A}{D} \text{sen}(\mathbf{a}) \tan\left(k\left(\frac{\mathbf{p}}{2} - \mathbf{a}\right)\right) \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación (11) en la ecuación (8) y la ecuación (9) se obtiene la corriente de los tiristores y el voltaje del capacitor en estado estacionario.

B. No conducción

Antes del primer pulso de disparo en $t = \mathbf{a}/\mathbf{w}$ los tiristores no están en conducción. El voltaje del capacitor en este intervalo, $\mathbf{w}t \in [0, \mathbf{a}]$ se obtiene con la ecuación (10) haciendo $t_{nc} = 0$.

$$v_c(t) = -I_m X_c [\cos(\mathbf{w}t) - 1] + v_c(0) \quad (12)$$

donde $v_c(0)$ es la condición inicial del voltaje del capacitor y está dada por la siguiente expresión,

$$v_c(0) = -I_m X_c [1 - \cos(\mathbf{a})] + V_0 \quad (13)$$

donde:

$$V_0 = AX_L \cos(\mathbf{a}) - AkX_L \text{sen}(\mathbf{a}) \tan\left(k\left(\frac{\mathbf{p}}{2} - \mathbf{a}\right)\right)$$

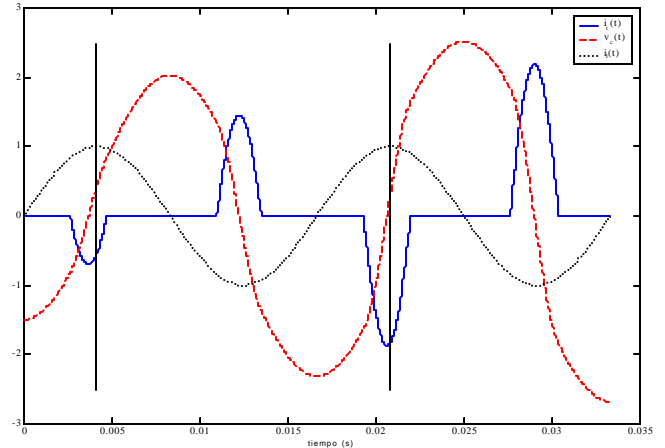


Fig. 7. Señales transitorias.

En la Fig. 8 y la Fig. 9 se muestran formas de onda típicas del TCSC en estado estacionario para un ángulo de disparo $\mathbf{a} = 57^\circ$. Las reactancias capacitiva e inductiva consideradas son las siguientes, $X_c = 15 \Omega$ y $X_L = 2.56 \Omega$.

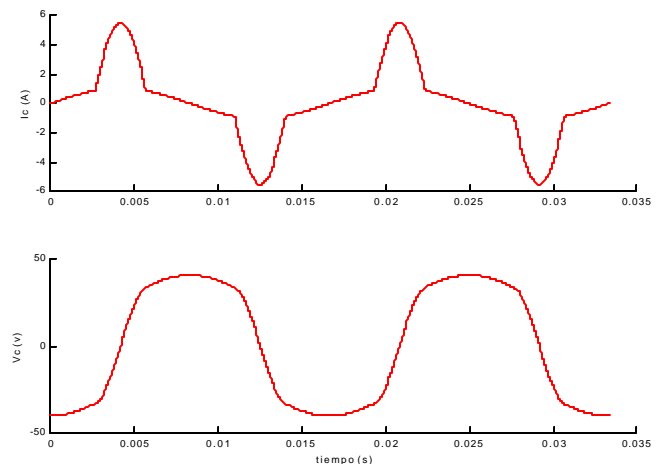


Fig. 8. Voltaje y corriente en el capacitor.

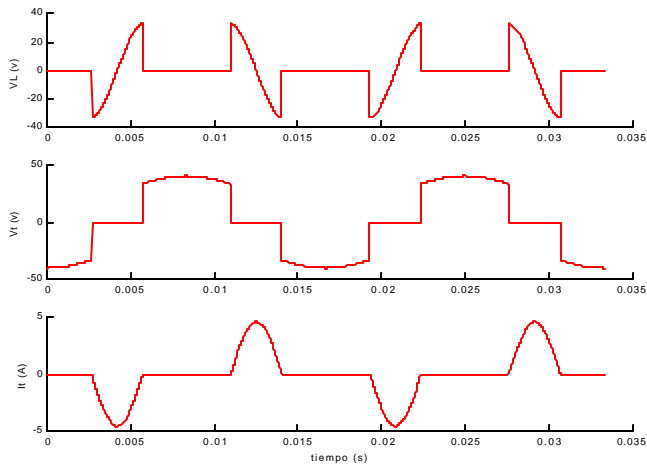


Fig. 9. Voltaje y corriente en el TCR.

En la Fig. 10 y la Fig. 11 se muestra el voltaje del capacitor para diferentes ángulos de disparo. En la Fig. 10 para valores que se encuentran dentro de la zona inductiva y en la Fig. 11 para valores que se encuentran dentro de la zona capacitiva. Se observa que el grado de distorsión en la onda del voltaje es mayor cuando el dispositivo opera dentro de la zona inductiva. Ambas gráficas también muestran cómo la amplitud del voltaje del capacitor se incrementa conforme el ángulo de disparo se acerca al punto de resonancia (para este caso el punto de resonancia se encuentra en $\alpha = 52.82^\circ$). En estas mismas gráficas se observa, como era de esperarse, que el voltaje del capacitor es senoidal cuando el TCSC opera en modo bloqueado esto es, $\alpha = 0^\circ$ y en modo de conducción total, $\alpha = 90^\circ$. La polaridad del voltaje en el capacitor depende de la zona de operación. Un comportamiento similar se tiene para las corrientes.

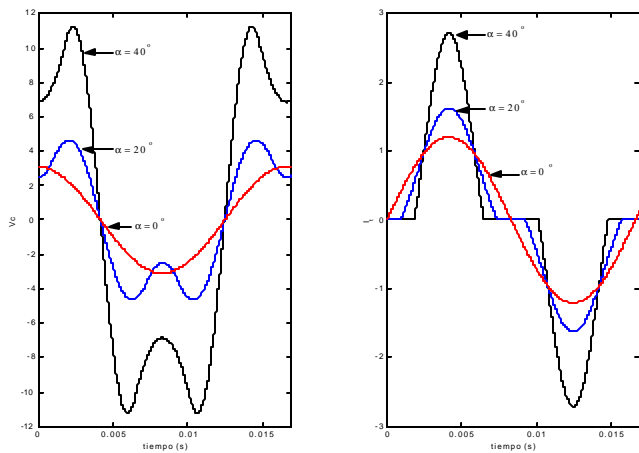


Fig. 10. Voltaje del capacitor y corriente de tiristores en la región inductiva.

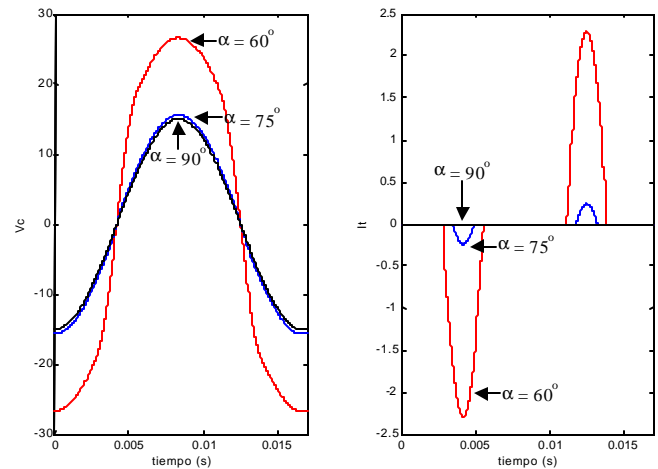


Fig. 11. Voltaje del capacitor y corriente de tiristores en la región capacitiva.

V. CONCLUSIONES

Se desarrollaron expresiones para la corriente en los tiristores y el voltaje en la carga del TCR, incluyendo la resistencia asociada a la inductancia del dispositivo; al utilizar estas expresiones con resistencia igual a cero se obtienen resultados similares a los obtenidos con las ecuaciones de [1].

Se observa que cuando se incluye la resistencia la forma de onda de las señales de corriente y voltaje en el TCR se deforman, esto trae como consecuencia un aumento en el contenido armónico de las señales.

Se presentaron expresiones para la corriente en los tiristores y el voltaje en el capacitor para el TCSC, éstas expresiones son una alternativa a las presentadas en [3].

Se mostraron las diferencias existentes en las señales del TCSC cuando el dispositivo opera en la región capacitiva o inductiva.

Los modelos desarrollados son útiles para llevar a cabo estudios estáticos y dinámicos de redes eléctricas donde intervengan los dispositivos, así como para el diseño de sus controladores.

VI. REFERENCIAS

- [1] T. J. E. Miller, *Reactive Power Control in Electric Systems*, John Wiley & Sons, 1982, pp. 187-191.
- [2] Yong Hua Song and Allan T. Johns, *Flexible ac transmission systems (FACTS)*, IEE Power and Energy, 1999, p. 89.
- [3] Sasan G. Jalali, Ron A. Hedin, Marcos Pereira y Kadry Sadek, "A stability model for the advanced series compensator (ASC)", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, Abril 1996.
- [4] E. V. Larsen, K. Clark, S. A. Miske, Jr. y J. Urbanek, "Characteristics and Rating Considerations of Thyristor

Controlled Series Compensation”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 9, Abril 1994.

- [5] Scott G. Helbing, G. G. Karady, “Investigations for an Advanced Series Compensation”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 9, Abril 1994.

VII. BIOGRAFÍAS

Pável Zúñiga H. recibió el grado en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro, México en 1999. Actualmente está trabajando para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Su interés de investigación actual es en dispositivos FACTS.

Ricardo Dávalos es originario de la ciudad de México. Recibió el grado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma de Guadalajara, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Actualmente se encuentra trabajando para obtener el grado de Doctor en Ciencias en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara. Su principal interés es el diseño, control y modelado de dispositivos FACTS.

Juan M. Ramírez recibió el grado en Ingeniería en Electricidad de la Universidad de Guanajuato, México en 1984, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica-sistemas de potencia de UNAM en 1987. Recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de UANL en 1992. Se unió al departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV en 1999 donde actualmente es profesor de tiempo completo. Su interés actual es en dispositivos FACTS, y control de sistemas de potencia.

Ixtláhuatl Coronado recibió el grado en Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Veracruzana, México en 1998. Actualmente está trabajando para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia en el CINVESTAV, Unidad Guadalajara, México. Su área de interés son los dispositivos FACTS.