

# **Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)**

Vigo, 2003

Camilo José Carrillo González  
José Cidrás Pidre

## Índice

<b>I. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>III. ELEMENTOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO</b>	<b>7</b>
<b>III.1 CONDENSADOR CONMUTADO POR TIRISTORES</b>	<b>7</b>
<b>III.2 BOBINA CONTROLADA POR TIRISTORES</b>	<b>11</b>
III.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	11
III.2.2 ANÁLISIS ARMÓNICO	14
III.2.3 CONFIGURACIÓN TRIFÁSICA DEL TCR	16
<b>III.3 MODELO SIMPLIFICADO DEL SVC</b>	<b>18</b>
<b>IV. APLICACIONES DEL SVC</b>	<b>20</b>
<b>IV.1 CONFIGURACIÓN DEL SVC</b>	<b>21</b>
<b>IV.2 CONTROL DE TENSIÓN Y CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA</b>	<b>22</b>
<b>IV.3 CONTROL DE TENSIÓN MEDIANTE SVC</b>	<b>23</b>
<b>IV.4 CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA MEDIANTE SVC</b>	<b>26</b>
<b>V. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>27</b>

# I. Objetivos

El objetivo de esta lección es el de presentar uno de los dispositivos empleados en las instalaciones eléctricas y basados en electrónica de potencia, como es el compensador estático de potencia reactiva. En esta lección se cubren los aspectos de modelado, comportamiento, configuración y control.

El contenido de esta lección está relacionado con diferentes contenidos de la propia asignatura, como son el estudio de armónicos, la utilización de filtros y el estudio de sistemas no-lineales. Aunque también se utilizan otros conceptos relacionados con la ingeniería eléctrica los de electrónica de potencia, la corrección del factor de potencia, y el modelo y comportamiento de las líneas de transporte.

Es necesario decir que la utilización de dispositivos basados en electrónica de potencia está cada vez más extendida, y son, cada vez más, una alternativa para superar situaciones de transporte de energía eléctrica, calidad de suministro...

## II. Introducción

Uno de los problemas habituales en ingeniería eléctrica resulta de la necesidad en introducir, bajo determinadas circunstancias, en la red elementos que controlen la potencia reactiva.

Una aplicación típica sería la de la corrección del factor de potencia de consumos, en la que se pone en paralelo con la carga un elemento que genere (o consuma) parte de la reactiva consumida (o generada) por la carga. De esta forma, el factor de potencia del conjunto formado por la carga más el elemento de compensación es mayor que el de la carga sola (ver Ilustración 1). Las ventajas de la compensación son:

- Aumento de la capacidad de transporte y dimensionado adecuado de la instalación, debido a la disminución en el valor eficaz de la intensidad consumida por el conjunto carga más equipo de compensación
- Reducción de la pérdidas
- Mantenimiento de la tensión, debido a la relación existente entre la reactiva y la tensión
- Ahorro en facturación, según la legislación española actual la compañía distribuidora puede aplicarle al cliente un recargo en la facturación si su consumo de reactiva supera unos determinados valores.

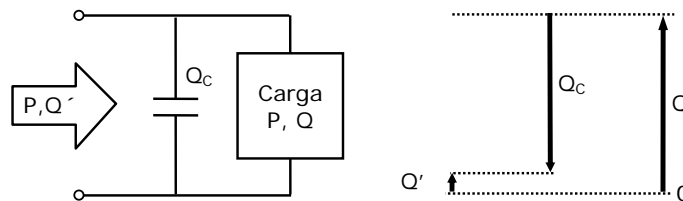


Ilustración 1: Ejemplo de compensación con una batería fija de condensadores.

Habitualmente el factor de potencia se corrige poniendo en paralelo con la carga a compensar, generalmente inductiva, una batería de condensadores fija (ver Ilustración 1). No obstante, estos elementos no están exentos de inconvenientes, como por ejemplo:

- La potencia reactiva depende de la tensión
- Son elementos sensibles armónicos, ya que su impedancia disminuye con la frecuencia
- Su inclusión en la red puede provocar resonancias con los elementos inductivos existentes en ella.
- Su envejecimiento afecta la potencia reactiva que son capaces de generar.
- Influyen en la estabilidad de las máquinas eléctricas presentes en la red.

Cuando se desea que la energía reactiva generada por los condensadores se adapte al posible comportamiento variable de la carga, es normal encontrar baterías de condensadores divididas en varios escalones de generación gobernados elementos mecánicos como interruptores (ver Ilustración 2). Sin embargo, y a pesar de su sencillez, la división en escalones tiene fundamentalmente los siguientes inconvenientes:

- La capacidad de adaptación al comportamiento de la carga depende del número de escalones disponibles, los cuales no suelen ser numerosos por razones tecnológicas y económicas.
- La corriente de conexión de una batería de condensadores puede alcanzar valores considerables (ver Ilustración 3).
- La utilización de elementos mecánicos para la conexión de las capacidades significa una limitación en cuanto a la velocidad de actuación y vida útil.

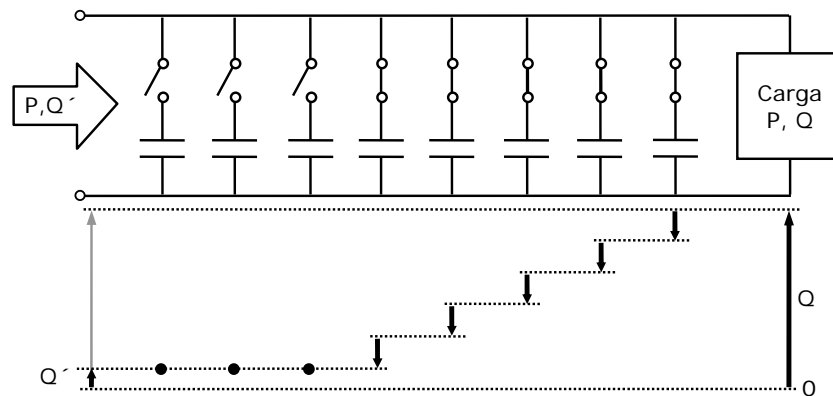


Ilustración 2: Compensación de reactiva mediante una batería automática de condensadores

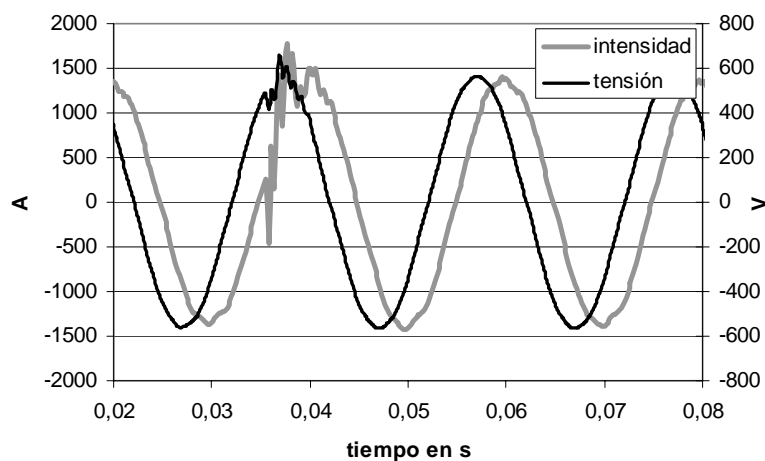


Ilustración 3: Medida de la tensión e intensidad, a la salida de un transformador de 1600 kVA en carga, en el instante que se conecta un escalón de una batería de condensadores.

Un elemento que se ha venido aplicando para obtener una regulación continua de reactiva, tanto generada como consumida, es el condensador síncrono. Se trata de un motor síncrono funcionando en vacío, de forma que, si se actúa sobre su excitación, éste se comporta como una carga inductiva si está subexcitada, o como una carga capacitiva si está sobreexcitado. Las características del condensador síncrono son:

- La regulación de la potencia reactiva es muy fácil y progresiva, pudiendo compensar tanto cargas inductivas como capacitivas, tanto en régimen estático como transitorio.
- A pesar de su marcha en vacío, el compensador síncrono absorbe una potencia activa apreciable debido a las pérdidas mecánicas.
- Su instalación implica considerables gastos de montaje y mantenimiento.

Lo anteriormente expuesto sirve para poner de manifiesto que en las aplicaciones en las que hay una necesidad un consumo o generación variable de potencia, se utilizan equipos basados en elementos electromecánicos, lo que limita en gran medida su utilización. Esta situación cambia en el momento en el que se introduce la electrónica de potencia en el diseño de estos equipos, apareciendo así el concepto del Compensador Estático de Potencia Reactiva o *Static Var Compensator* (SVC) cuyo funcionamiento se basa en la utilización de tiristores conjuntamente con condensadores y bobinas.

A continuación se describirán cuales son los principios de funcionamiento de los SVC, así como sus configuraciones más habituales y posibles aplicaciones.

### III. Elementos y Principio de Funcionamiento

Los elementos más característicos de un SVC son los condensadores conmutados por tiristores (TSC) y las bobinas conmutadas (TSR) o controladas (TCR) por tiristores, ya que estos dispositivos son los que incluyen la electrónica de potencia. En la Ilustración 4 se muestra un esquema simplificado para un SVC donde se incluyen los elementos anteriormente mencionados.

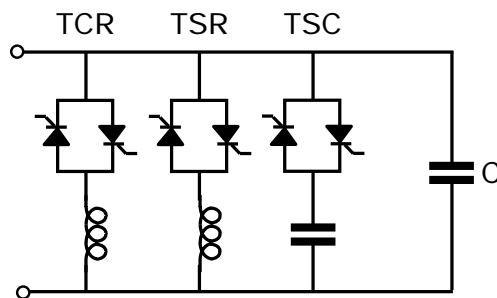


Ilustración 4: Esquema simplificado para un SVC

#### III.1 Condensador Conmutado por Tiristores

El esquema del condensador conmutado por tiristor o *thyristor switched capacitor* (TSC) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores (ver Ilustración 5).

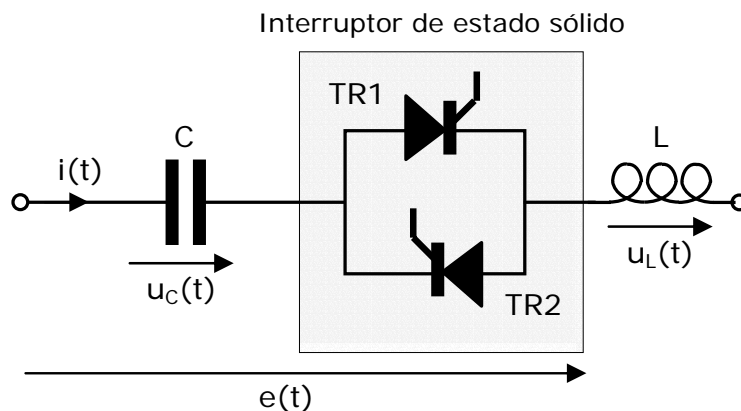


Ilustración 5: Configuración de un TSC

En la Ilustración 5 se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en antiparalelo. De forma que, para conectar

el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero.

En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L en Ilustración 5), ya sea para limitar la derivada de la intensidad  $di(t)/dt$  y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia.

La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria.

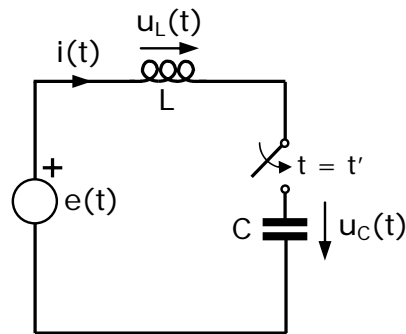


Ilustración 6: Esquema equivalente de un TSC

Para estudiar en detalle el transitorio de conexión del condensador C cuando éste está en serie con una bobina ideal L, se emplea el circuito de la Ilustración 6, donde se considera un comportamiento ideal para el interruptor estático.

La tensión de alimentación  $e(t)$  se puede poner como:

$$e(t) = \sqrt{2}E \cos \omega t \quad (1)$$

donde E es el valor eficaz de la tensión y  $\omega$  su pulsación.

Por consiguiente, la expresión para la tensión del condensador  $u_C(t)$  si el interruptor (ver Ilustración 6) se cierra en el instante  $t'$  es:

$$u_C(t) = u_a(t) + u_p(t) \quad (2)$$

siendo  $u_a(t)$  su componente natural y  $u_p(t)$  su respuesta en régimen estacionario sinusoidal:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= K_1 \cos \omega_0(t - t') + K_2 \sin \omega_0(t - t') \\ u_p(t) &= \sqrt{2}U_C \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

- $\omega_0$  es la frecuencia natural, que se puede poner como:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (4)$$

- $U_C$  es el valor de eficaz de la tensión en régimen permanente, tal que:



$$U_c = E \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \quad (5)$$

- $K_1$  y  $K_2$  son constantes que se pueden deducir de las condiciones iniciales.

El cálculo de la intensidad se puede realizar utilizando la relación  $i(t) = C du_c(t)/dt$ , con lo que se obtiene la expresión:

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t) \quad (6)$$

donde  $i_a(t)$  e  $i_p(t)$  son, respectivamente, la componente natural y estacionaria de la intensidad:

$$i_a(t) = -\omega_0 C K_1 \operatorname{sen} \omega_0 (t - t') + \omega_0 C K_2 \cos \omega_0 (t - t')$$

$$i_p(t) = -\omega C \sqrt{2} U_c \operatorname{sen} \omega t$$

Para el cálculo de  $K_1$  y  $K_2$  las condiciones iniciales que se consideran son la intensidad inicial del circuito y la tensión inicial del condensador:

$$\begin{aligned} u_c(t') &= U_0 \\ i(t') &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $U_0$  es la tensión inicial del condensador o tensión residual. Los valores obtenidos son:

$$K_1 = U_0 - \sqrt{2} U_c \cos \theta \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{2} U_c \operatorname{sen} \theta \quad (9)$$

siendo  $\theta$  el ángulo de disparo del interruptor estático:  $\theta = \omega t'$

Por otra parte, para que el transitorio de conexión sea mínimo es necesario que la componente natural de la corriente sea nula, es decir, que tanto  $K_1$  como  $K_2$  sean cero, o sea:

$$\begin{aligned} K_2 = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{2} U_c \operatorname{sen} \theta = 0 &\Rightarrow \theta = 0 \text{ ó } \pi \\ K_1 = U_0 \mp \sqrt{2} U_c = 0 &\Rightarrow U_0 = \pm \sqrt{2} E \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Resumiendo, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- El ángulo de conexión  $\theta$  ha de ser  $0$  ó  $\pi$ , esto se puede interpretar como que en el instante de conexión la tensión de alimentación ha de ser la máxima ( $\theta = 0$ ) o la mínima ( $\theta = \pi$ ).
- La tensión del condensador en el instante de realizar la conexión debería ser igual al valor de pico de su tensión en régimen permanente.

Por consiguiente, para la eliminación del transitorio de conexión del TSC, es necesario realizar la conexión cuando la tensión de alimentación alcance

su valor de pico ( $\pm\sqrt{2}E$ ) y mantener el condensador antes del disparo con una tensión residual determinada ( $U_0 = \pm\sqrt{2}U_C$ ). El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones no se puede garantizar, ya que la tensión de un condensador depende de su instante de desconexión y del tiempo que lleve desconectado. No obstante, para una tensión residual dada, se asume como aceptable que el instante más favorable para la conexión es aquel en que la tensión de alimentación es igual a la tensión residual, o lo que es lo mismo, cuando la tensión en los tiristores se anula, ya que:

$$K_1 = 0 \Rightarrow U_0 = \sqrt{2}U_C \cos \theta \approx \sqrt{2}E \cos \theta \Rightarrow e(t') \approx U_0 \quad (11)$$

donde se tiene en cuenta que  $\omega_0 \gg \omega$ , y por lo tanto,  $U_C \approx E$ .

En la Ilustración 7 se puede ver evolución del valor de pico de la corriente de conexión  $I_p$  (relativa al valor de pico de la corriente estacionaria  $\sqrt{2}I$ ) y en función de la tensión en el instante de conexión  $e(t')$  (relativa al valor de pico de la tensión  $\sqrt{2}E$ ) para varios valores de la tensión residual  $U_0$ ; para un TSC alimentado a 230 V, constituido por una batería de condensadores de 2.7 kVAr y una bobina de 0.67 mH.

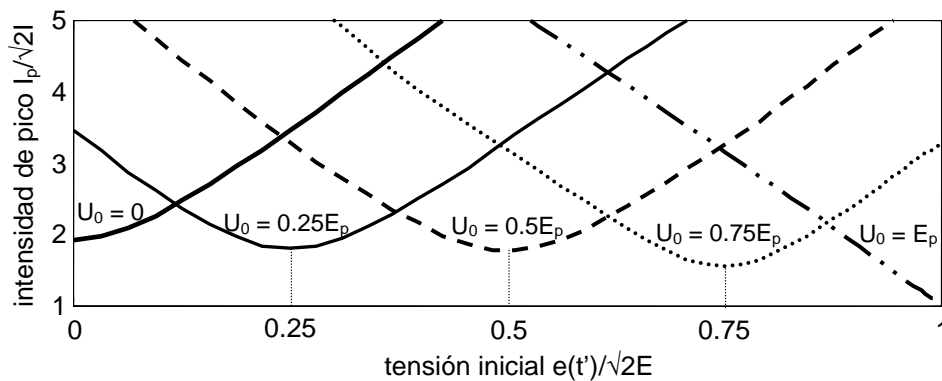


Ilustración 7: Evolución del valor de pico de la corriente de conexión ( $I_p/\sqrt{2}I$ ) en función de la tensión en el instante de conexión ( $e(t')/\sqrt{2}E$ ) para distintos valores de la tensión residual  $U_0$

Empleando la estrategia de conexión en  $e(t') = U_0$ , la situación más desfavorable se produce cuando  $U_0 = 0$ , donde, en el ejemplo anterior, la corriente de pico  $I_p$  es cerca de dos veces el valor de pico de la corriente estacionaria  $\sqrt{2}I$  (ver Ilustración 8).

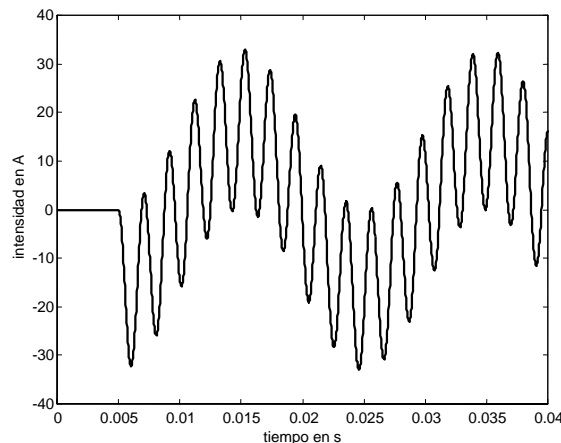


Ilustración 8: Intensidad de conexión en un TSC cuando  $e(t') = U_0 = 0$

Con el TSC se eliminan los interruptores empleados en el esquema de la Ilustración 2, de esta forma la conexión y desconexión de la batería es prácticamente instantánea y se suprimen las corrientes de conexión. No obstante, con este elemento la capacidad de regulación de la reactiva dependerá nuevamente del número de escalones empleado.

## III.2 Bobina Controlada por Tiristores

Otro elemento característico en los SVC es la bobina controlada por tiristores o *thyristor controlled reactor* (TCR). La principal misión de este elemento es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina.

El esquema de un TCR (ver Ilustración 9) está formado por una bobina ( $R+L$ ) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo. En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia.

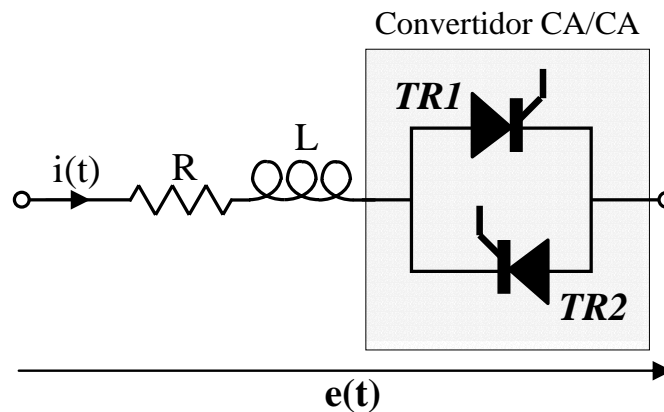


Ilustración 9: Configuración de un TCR

Si en vez de realizar un control de fase, los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático, la configuración descrita recibe el nombre de bobina conmutada por tiristores o *thyristor switthed reactor* (TSR). Para minimizar los transitorios de desconexión el instante más favorable sería cuando la tensión de alimentación alcanzase su nivel máximo o mínimo.

Otra alternativa podría ser la de utilizar los tiristores para controlar la intensidad de una batería de condensadores, no obstante, el aplicar el control de fase sobre capacidades ocasionaría fuertes corrientes de conexión que tendrían que soportar los propios tiristores, además de la dificultad que esto originaría en el control.

### III.2.1 Principio de funcionamiento

Al aplicar el control de fase sobre los tiristores, se consigue que vayan conduciendo alternativamente de forma que la intensidad resultante es una sucesión de transitorios sobre un conjunto RL. Esto es lo que se puede ver en la Ilustración 10, donde a partir de un instante definido por el ángulo de disparo  $\alpha$  se inicia la conducción de cada uno de los tiristores  $TR1$  y  $TR2$ .

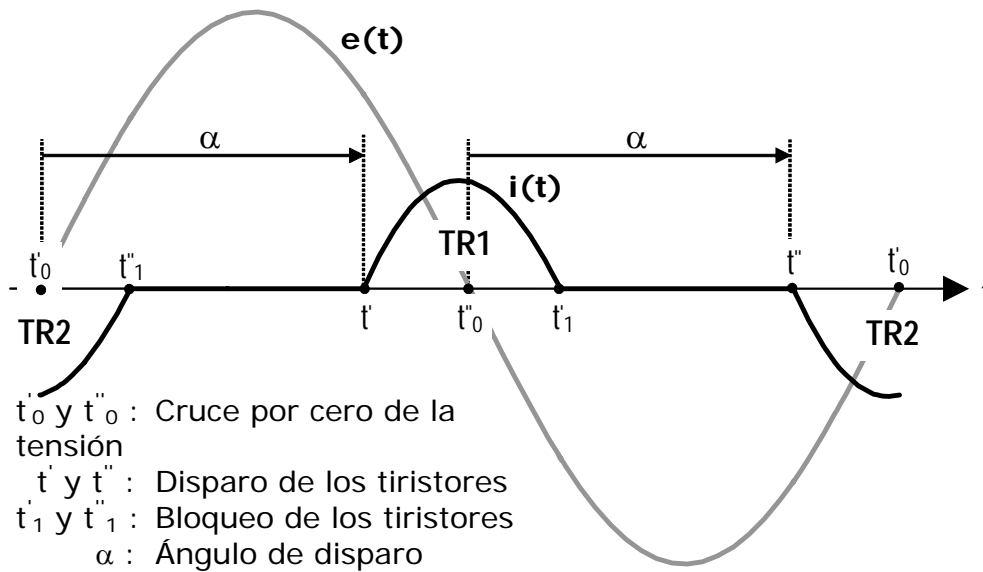


Ilustración 10. Formas de onda de intensidad en un TCR

Para el estudio del comportamiento del TCR se supone un comportamiento ideal de los tiristores y que la tensión de alimentación es sinusoidal pura, esto es:

$$e(t) = \sqrt{2}E \text{sen } \omega t \quad (12)$$

En primer lugar se van a estudiar los instantes de conexión de los tiristores. El tiristor de ciclos positivos, TR1, se activará en el instante  $t'$ , el cual teniendo en cuenta (12) se calcula como (ver Ilustración 10):

$$t' = t'_0 + \alpha/\omega = \alpha/\omega \quad (13)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de disparo y  $t'_0$  es el instante en de cruce por cero de la tensión con pendiente positiva.

Análogamente, el tiristor para ciclos negativos, TR2, se activará en el instante  $t''$  cuya expresión es:

$$t'' = t''_0 + \alpha/\omega = (\pi + \alpha)/\omega \quad (14)$$

donde  $t''_0$  es el instante es el instante en de cruce por cero de la tensión con pendiente negativa.

Los instantes de final de conducción de los tiristores (apagado, bloqueo), se producen en el cruce por cero de la intensidad, después de iniciada la conducción (ver  $t'_1$  y  $t''_1$  en Ilustración 10).

Una vez definidos los instantes de conducción y apagado, la intensidad se puede definir según los siguientes intervalos:

✓ Para los ciclos positivos,  $t' \leq t \leq t'_1$ , la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_1 e^{-a(t-t')} + \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (15)$$

✓ Para los ciclos negativos,  $t'' \leq t \leq t''_1$ , la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_2 e^{-a(t-t'')} + \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi) \quad (16)$$

✓ Para los instantes no incluidos en los intervalos anteriores se tiene:

$$i(t) = 0 \quad (17)$$

donde:

- $I$  es el valor eficaz de la intensidad en régimen estacionario, es decir:  
 $I = E / \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$
- $\phi$  es el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad en régimen estacionario:  $\phi = \arctan(\omega L / R)$ . Generalmente  $\omega L \gg R$ , con lo que se puede afirmar que  $\phi \approx \pi/2$  ( $90^\circ$ )
- $a$  es la atenuación y se define como:  $a = R/L$
- $K_1$  y  $K_2$  son constantes definidas a partir de las condiciones iniciales. Las constantes  $K_1$  y  $K_2$ , si se consideran las condiciones iniciales nulas de forma que,  $i(t') = 0$  e  $i(t'') = 0$ , resultan:

$$\begin{aligned} K_1 &= -\sqrt{2}I \sin(\omega t' - \phi) = -\sqrt{2}I \sin(\alpha - \phi) \\ K_2 &= -\sqrt{2}I \sin(\omega t'' - \phi) = -\sqrt{2}I \sin(\pi + \alpha - \phi) \end{aligned} \quad (18)$$

De donde se puede deducir, debido a la igualdad supuesta para los ángulos de disparo de TR1 y TR2, que:

$$K = K_1 = -K_2 \quad (19)$$

El ángulo de disparo  $\alpha$  tiene unos valores máximo y mínimo, tal y como se puede observar si se analiza el comportamiento del tiristor TR1:

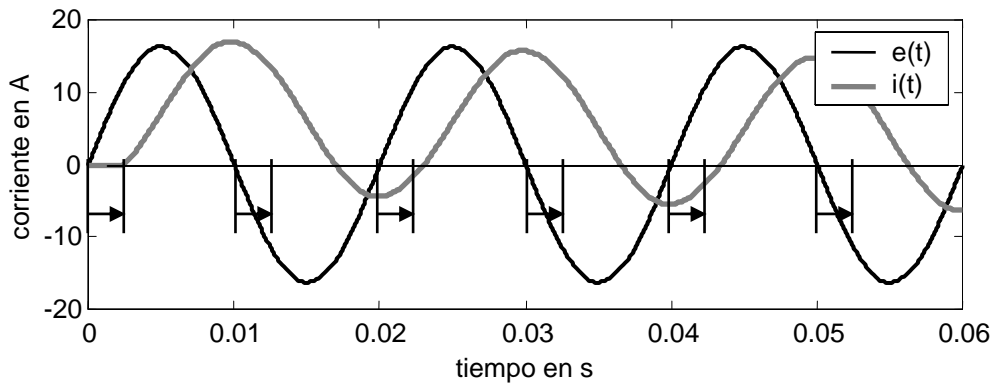
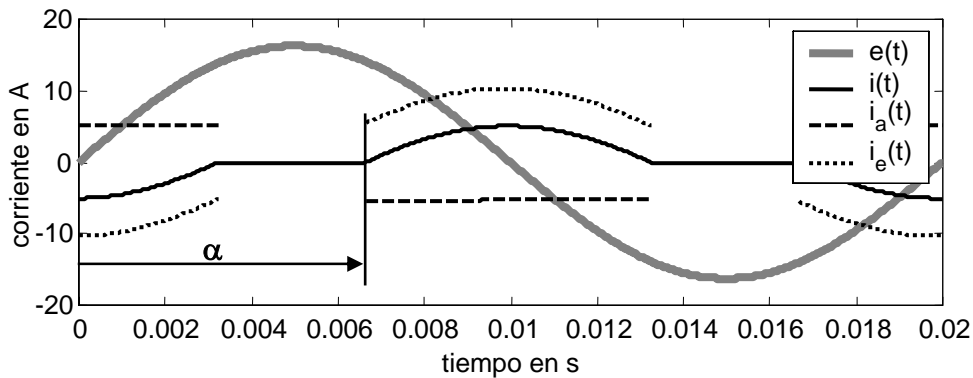
- Si  $\alpha > \pi$ , entonces la orden de disparo se produce en el instante que la tensión es negativa, por lo tanto no hay conducción e  $i(t) = 0$
- Si  $0 < \alpha < \phi$ , el apagado ( $i(t) < 0$ ) no se produce hasta que la tensión rebasa su valor mínimo  $-\sqrt{2}E$ , de forma que ya estaría disparado el tiristor de la otra rama TR2. En unos cuantos ciclos la intensidad sería la de régimen permanente,  $i(t) = i_e(t)$  (Ilustración 11)

Según lo expuesto, los límites para el ángulo de disparo son:

$$\phi \leq \alpha \leq \pi \quad (20)$$

de forma que para  $\alpha \leq \phi$  la intensidad es la de régimen permanente,  $i(t) = i_e(t)$ , y para  $\alpha \geq \pi$  la intensidad es nula  $i(t) = 0$ .

En la Ilustración 11 e Ilustración 12 se muestra la intensidad para un TCR con  $R = 1 \Omega$ ,  $L = 0,1 \text{ H}$ ,  $f_r = 50 \text{ Hz}$ ,  $E = 230 \text{ V}$  para  $\alpha = 45^\circ$  y para  $\alpha = 120^\circ$ , respectivamente.


 Ilustración 11. Formas de onda de intensidad en un TCR para  $\alpha = 45^\circ$ 

 Ilustración 12. Formas de onda de intensidad en un TCR para  $\alpha = 120^\circ$ 

### III.2.2 Análisis armónico

Para un estudio analítico de los armónicos de TCR se simplifican las ecuaciones recién obtenidas suponiendo que la bobina es ideal ( $R = 0$ ), por lo que la expresión de la intensidad para en el período de conducción de TR1 se puede poner como:

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \pi/2) - \sqrt{2}I \sin(\alpha - \pi/2) \quad (21)$$

Siendo además los límites de conducción el indicado en (13) y el resultante de la igualdad  $i(t) = 0$ , o sea:  $t'_1 = (2\pi - \alpha)/\omega$ .

Entonces, realizando un análisis de Fourier de la intensidad que circula por la bobina  $i(t)$ , teniendo en cuenta que tiene simetría de media onda, se obtiene la componente fundamental de la intensidad  $I_1$  (ver Ilustración 13) como:

$$I_1 = \frac{2}{\pi} \frac{E}{\omega L} \left( \pi - \alpha - \frac{\sin(2\alpha - \pi)}{2} \right) \quad (22)$$

La condición de simetría mencionada garantiza la no existencia de los armónicos pares. El valor eficaz del resto de armónicos de intensidad (ver Ilustración 13) de orden impar  $h$  ( $I_h$ , con  $h > 1$ ) se obtiene mediante la expresión:

$$I_h = \frac{4E}{\pi\omega L} \left[ \frac{\text{sen}(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\text{sen}(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos\alpha \frac{\text{sen}h\alpha}{h} \right] \quad (23)$$

A modo de ejemplo, en la Ilustración 14 se muestra el espectro de armónico de la intensidad representada en Ilustración 12.

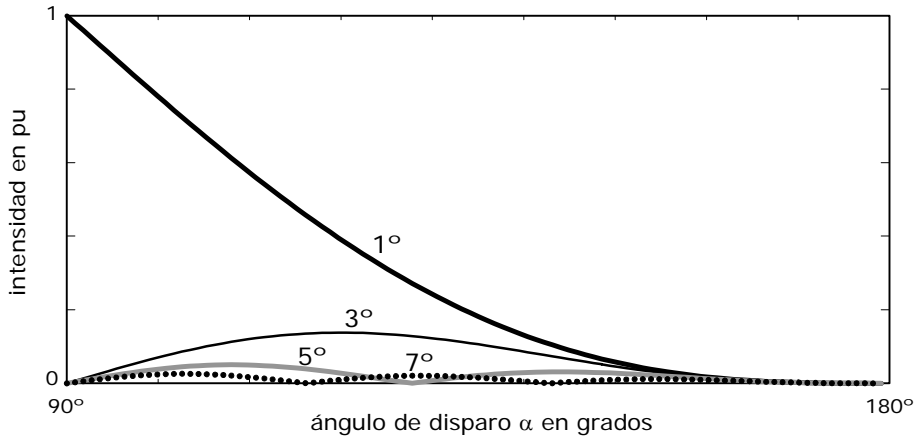


Ilustración 13: Evolución de los armónicos de intensidad según el ángulo de disparo

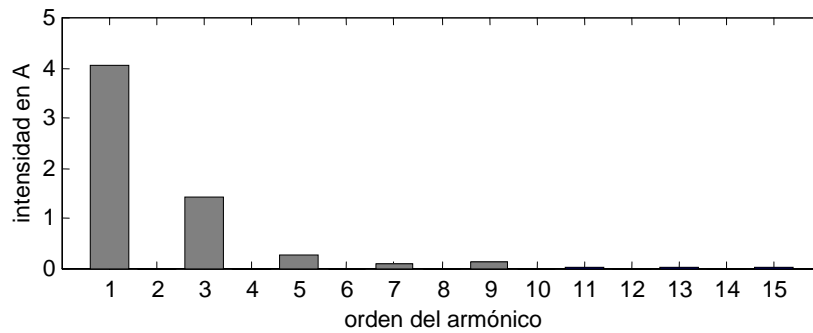


Ilustración 14: Espectro armónico de la intensidad en un TCR con un ángulo de disparo de 120°

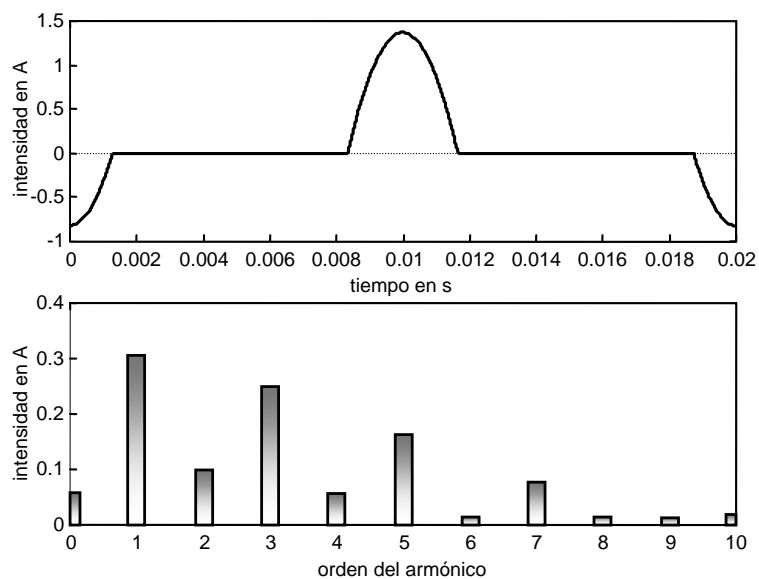


Ilustración 15: Forma de onda y espectro armónico para un TCR con un ángulo de disparo de 150° y con un 5% de diferencia entre el ángulo de disparo de TR1 y el de TR2.

Si se necesita hacer un cálculo más exacto del comportamiento del TCR se tendrían que considerar los posibles armónicos en la tensión de red, habría que tener en cuenta los tiempos de conmutación de los tiristores y la resistencia óhmica de la bobina.

Un problema que se puede presentar en un TCR es la aparición de armónicos de orden par en el caso de que los tiempos de disparo de los tiristores TR1 y TR2 sean distintos, tal y como se muestra en la Ilustración 15.

### III.2.3 Configuración trifásica del TCR

En cuanto a las configuraciones trifásicas, sólo el TCR merece un estudio particular en cuanto a los armónicos o el margen de funcionamiento, ya que tanto el TSR como el TSC tienen un comportamiento fácilmente deducible.

En la Ilustración 16 pueden verse las posibles configuraciones trifásicas (triángulo y estrella) de un TCR, aunque es habitual que la configuración empleada sea en triángulo.

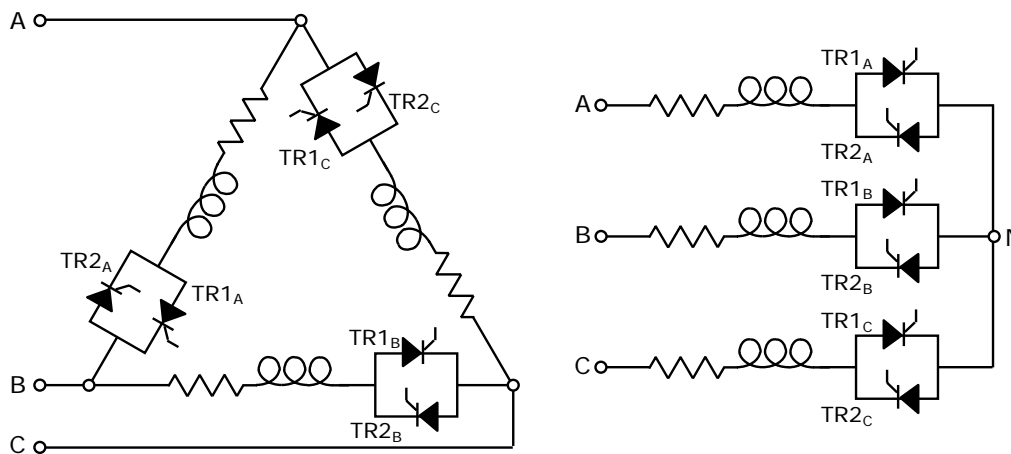


Ilustración 16: Configuraciones trifásicas del TCR

Si se supone un sistema de tensiones sinusoidales, trifásico y equilibrado y además todos los tiristores se disparan con el mismo ángulo, las intensidades de línea presentan las siguientes características:

- Sólo hay armónicos impares
- El caso de una configuración en estrella con neutro aislado, no existen componentes armónicas homopolares ( $h = 3, 9, 15\dots$ ), en cambio, si la conexión es en estrella con neutro sí que aparecen dichas componentes
- En el caso de configuración en triángulo, los armónicos homopolares en la intensidad de línea son nulos

El margen de variación del ángulo de disparo en la configuración en triángulo o en estrella con neutro es idéntico al del caso monofásico, ya que el funcionamiento de cada una de las ramas es independiente, de forma que se puede estudiar como si fuesen tres ramas monofásicas. De esta forma, el margen de variación sería:



$$\phi(\approx \pi/2) < \alpha < \pi \quad (24)$$

Por ese mismo motivo, las formas de onda por fase, que no las de línea (Ilustración 18), de ambas configuraciones son idénticas, y por lo tanto, la evolución de la componente fundamental de la intensidad en función del ángulo de disparo es la misma (ver Ilustración 17).

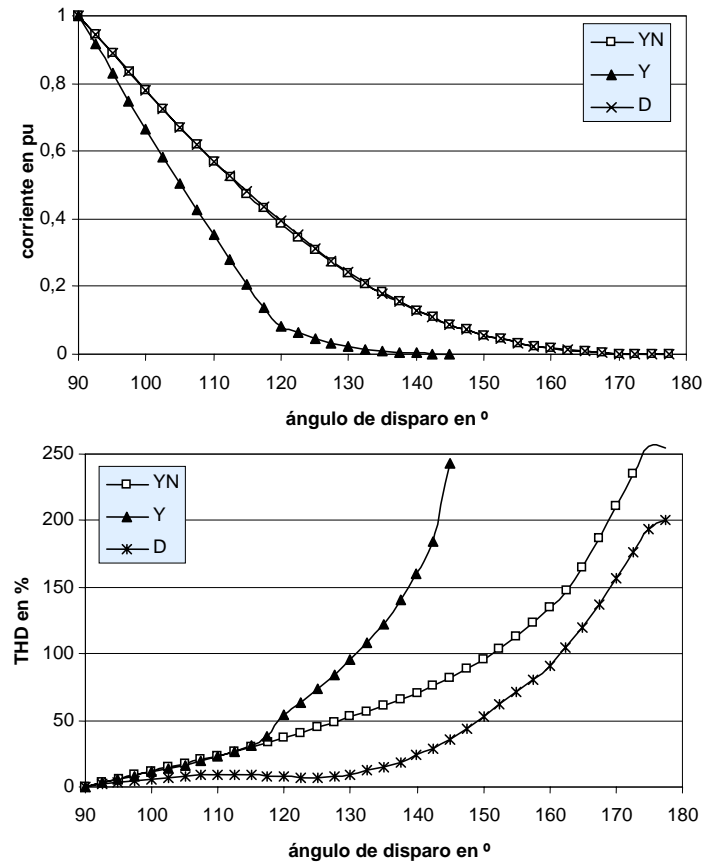


Ilustración 17: Evolución de la componente fundamental de la intensidad de línea y de su THD en función del ángulo de disparo para un TCR en estrella con neutro (YN), en estrella con neutro aislado (Y) y en triángulo (D)

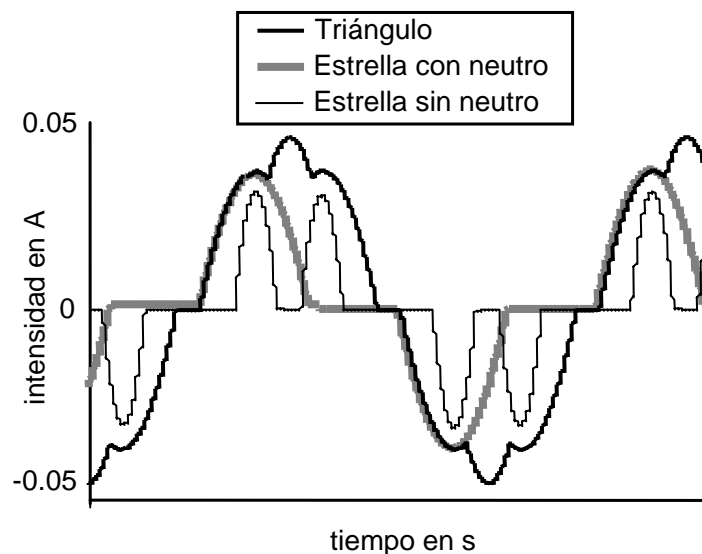


Ilustración 18: Intensidades de línea en un TCR trifásico para un ángulo de disparo  $\alpha = 160^\circ$

En el caso de la configuración en estrella con neutro aislado el funcionamiento es distinto (ver Ilustración 17 e Ilustración 18), ya que para haya circulación de corriente es necesario que conduzcan al menos dos ramas. El intervalo de funcionamiento para esta la configuración es:

$$\phi(\approx 90^\circ) < \alpha < 5\pi/6(150^\circ) \quad (25)$$

### III.3 Modelo simplificado del SVC

Si sólo se considera la componente fundamental de la intensidad en el TCR, se puede interpretar la variación de la intensidad con el ángulo de disparo como si se dispusiese de una inductancia  $L_\alpha$  variable, por la que circula una corriente igual a la componente fundamental de la corriente  $i(t)$ , ver ecuación (22), que en el caso monofásico, en estrella o en triángulo con neutro sería:

$$L_\alpha = \frac{\pi L}{2(\pi - \alpha) + \text{sen}2\alpha} \quad (26)$$

donde para  $\alpha = \pi/2$  la inductancia es mínima e igual a  $L$ , mientras que para  $\alpha = \pi$  es máxima e igual a infinito. Con la aproximación descrita la expresión de la potencia reactiva  $Q_L$  consumida por la bobina se puede poner como:

$$Q_{L_\alpha} = E^2/\omega L_\alpha \quad \text{ó} \quad Q_{L_\alpha} = B_\alpha E^2 \quad (27)$$

donde la expresión para la susceptancia  $B_\alpha$  del TCR es:

$$B_\alpha = \frac{1}{\omega L_\alpha} = \frac{2(\pi - \alpha) + \text{sen}2\alpha}{\pi \omega L} \quad (28)$$

En paralelo con el TCR es habitual que se dispongan de baterías de condensadores (fijas, TSC...) o incluso unidades adicionales de reactancias (TSR...). Por lo tanto, la potencia reactiva  $Q_{SVC}$  generada por el SVC (ver Ilustración 19) se puede obtener del balance:

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_{L_\alpha} \quad (29)$$

donde,  $Q_C$  es la potencia reactiva generada por los condensadores conectados y  $Q_{L_\alpha}$  la potencia reactiva consumida por el TCR en función del ángulo de disparo (en este término se incluiría la potencia de las reactancias adicionales en uso).

El comportamiento de un SVC como el mostrado en la Ilustración 21 y teniendo en cuenta (26) se puede se puede aproximar al de una susceptancia variable con un valor que depende del estado de funcionamiento del SVC, o sea, de condensadores conectados y del ángulo del TCR, es decir:

$$B_{SVC} = \omega C - 1/\omega L_\alpha \quad (30)$$

donde  $C$  es la capacidad de las baterías en funcionamiento.

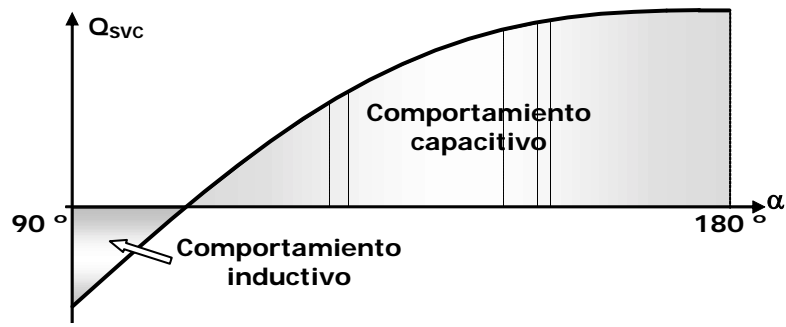


Ilustración 19: Evolución de la potencia reactiva generada por el TCR en función del ángulo de disparo ( $\alpha$ )

## IV. Aplicaciones del SVC

Dentro de las aplicaciones de los SVC destacan:

- Control de la tensión para aumentar la calidad del suministro permitiendo, por ejemplo, mitigar la aparición de *flicker* cuando existen hornos de arco.
- Desde el lado del transporte de energía eléctrica se emplean para mejorar la estabilidad y la capacidad de transporte de las líneas de transporte.
- El SVC se puede poner en paralelo con un determinado consumo cuyo comportamiento varíe rápidamente para obtener un factor de potencia cercano a la unidad en todo instante
- En el caso de consumos monofásicos variables, como es el caso de la tracción en trenes eléctricos, el SVC se usa para equilibrar el consumo en cualquier régimen de funcionamiento.

A continuación se explican las aplicaciones más típicas, como son la del control de tensión y corrección del factor de potencia, así como las configuraciones posibles.



Ilustración 20: SVC fabricado por Alstom de +30/-25MVAR en 66kV

## IV.1 Configuración del SVC

En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la Ilustración 21. De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad (TSC o controladas mecánicamente), del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en baterías o filtros LC (ver Ilustración 19).

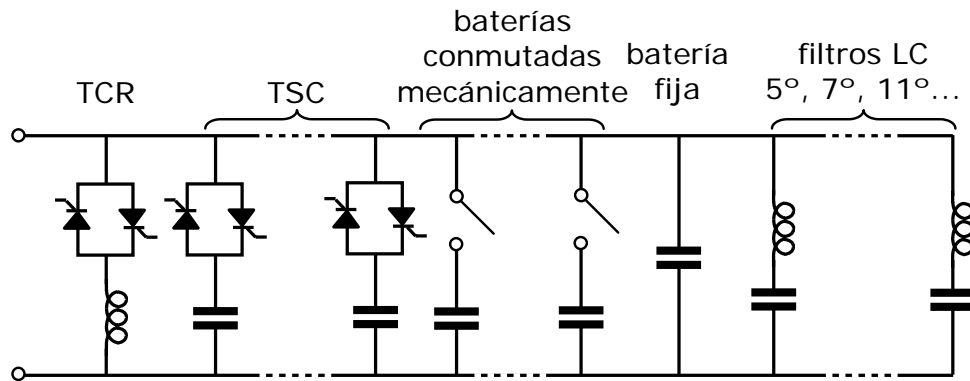


Ilustración 21: Composición por fase de un SVC

La utilización de unidades TSC en paralelo con el TCR permite disminuir la su inductancia para el funcionamiento en el lado capacitivo, ya que el TCR sólo tendría que cubrir el salto de reactiva entre dos escalones del TSC. Al reducir el tamaño del TCR también disminuirían los armónicos inyectados por éste a la red. En la Ilustración 22 se puede ver el comportamiento de un SVC formado por TCR más TSC's en función de una potencia reactiva demandada ( $Q_{ref}$ ).

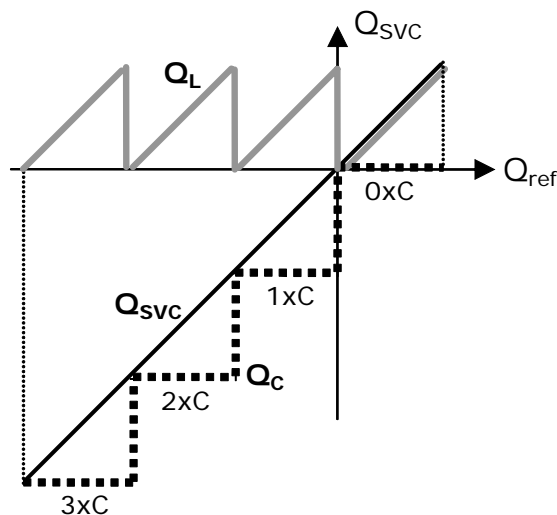


Ilustración 22: Evolución de la reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR

La inclusión de filtros LC, ya sea sintonizados a un determinado armónico o bien paso-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red. Con objeto de reducir los armónicos emitidos por el SVC también se pueden emplear estrategias como las del

rectificador de 12 pulsos, dividiendo el SVC en dos y conectando cada parte a un transformador YY e YD.

Las baterías de condensadores, o inductancias, accionadas mecánicamente pueden trabajar como unidades de reactiva de reserva que entrarían en funcionamiento en aquellas condiciones más severas para el control realizado por el SVC.

## IV.2 Control de tensión y corrección del factor de potencia

Para analizar el comportamiento de un SVC en control de tensión y corrección del factor de potencia se empleará el circuito mostrado en Ilustración 23; donde  $\underline{U}$  es la tensión en el consumo,  $\underline{E}$  es la tensión de suministro,  $P$  y  $Q$  representan el consumo de la carga y  $Q_{SVC}$  es la potencia reactiva generada por el SVC.

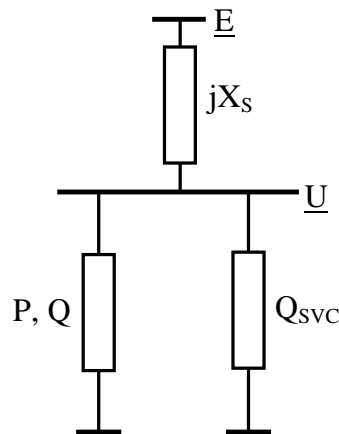


Ilustración 23: Circuito equivalente

La caída de tensión  $\Delta \underline{U}$  en el consumo se puede poner como:

$$\Delta \underline{U} = \underline{E} - \underline{U} = jX_s \frac{P - j(Q - Q_{SVC})}{\underline{U}} \quad (31)$$

donde se ha tomado como referencia la tensión  $\underline{U} = U \angle 0$ ,  $\underline{E}$  es la tensión de suministro y  $Q_{SVC} = B_{SVC} U^2$ .

Utilizando la ecuación (31), se puede poner el valor eficaz de la tensión en el suministro como:

$$E^2 = \left[ U + \frac{X_s (Q - Q_{SVC})}{U} \right]^2 + \left[ \frac{X_s P}{U} \right]^2 \quad (32)$$

El valor de  $Q_{SVC}$  que se requeriría para mantener constante la tensión se obtendría de la ecuación (32) con la condición de  $E = U$ . Por otra parte, si lo que se desea es hacer una corrección del factor de potencia, dicho valor sería  $Q_{SVC} = Q$ . De lo que se deduce que no se pueden controlar la tensión y el factor de potencia simultáneamente.

A continuación se muestran aplicaciones de control de tensión y de factor de potencia mediante la utilización de SVC.

### IV.3 Control de tensión mediante SVC

El SVC se desarrolló a principios de los años 70 para el control de la tensión en puntos de la red en los que hubiese hornos de arco de eléctrico. Este tipo de horno se carga con chatarra de acero en la que se introducen unos electrodos. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco entre los electrodos produce un calor intenso que funde el acero. Durante el proceso de fundición se producen unas variaciones bruscas y de carácter aleatorio en la corriente que se consume. De esta forma, el resto de los consumos conectados a la red en paralelo con el horno pueden padecer unas variaciones de tensión indeseables, por ejemplo, en forma de *flicker*.

El principio de funcionamiento del SVC, basado en electrónica de potencia, se adapta perfectamente a este tipo de situaciones, ya que se puede realizar un control progresivo y rápido de la tensión, o sea de la reactiva, en el punto de la red en el que se desee actuar.

En estas situaciones en las que la variable de control es la tensión, la actuación sobre el SVC se puede realizar a través de un regulador que actúe sobre el ángulo de disparo del TCR y que conecte o desconecte las unidades de TSC en función de la desviación de la tensión con respecto a la tensión de referencia, tal y como se muestra en la Ilustración 24.

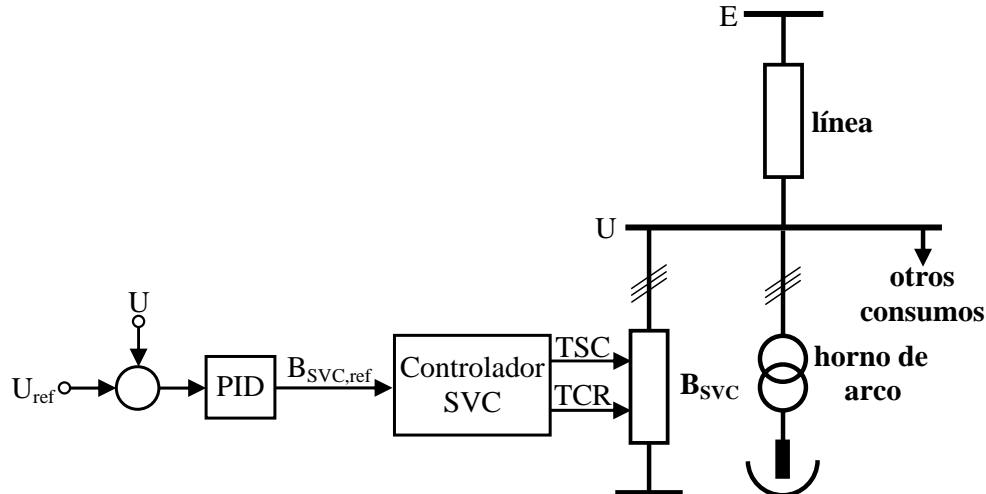


Ilustración 24: Configuración para el control de la tensión mediante un SVC

A continuación se muestra un ejemplo de simulación de la aplicación de un SVC para el control de la tensión, cuando se conectan y desconectan las cargas mostradas en Ilustración 25 de la siguiente manera:

- $t = 0 \text{ s}$  La Carga 1 está conectada y la Carga 0 está desconectada
- $t = 2.0 \text{ s}$  Se conecta la Carga 0
- $t = 2.5 \text{ s}$  Se desconecta la Carga 0
- $t = 2.6 \text{ s}$  Se desconecta la Carga 1
- $t = 3.5 \text{ s}$  Se conecta la Carga 1

Para el control se utiliza un PID cuya salida es directamente el valor de la susceptancia del SVC. La variación de la tensión en el nudo de las cargas con y sin SVC se puede ver en la Ilustración 26, además de la evolución de la susceptancia del SVC ( $B_{SVC}$ ).

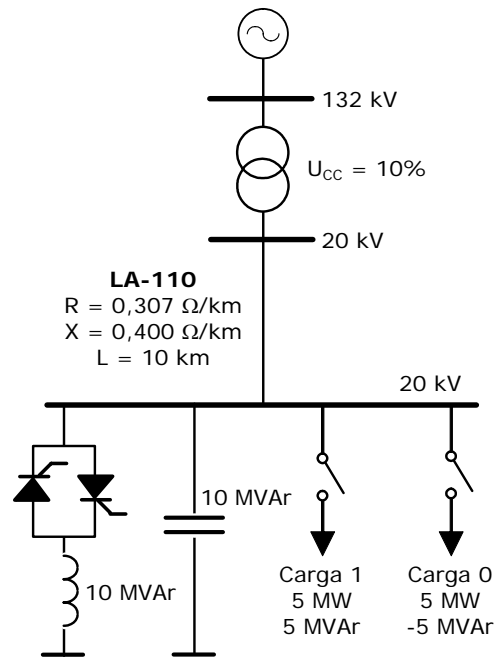


Ilustración 25: Circuito ejemplo de control de tensión con un SVC

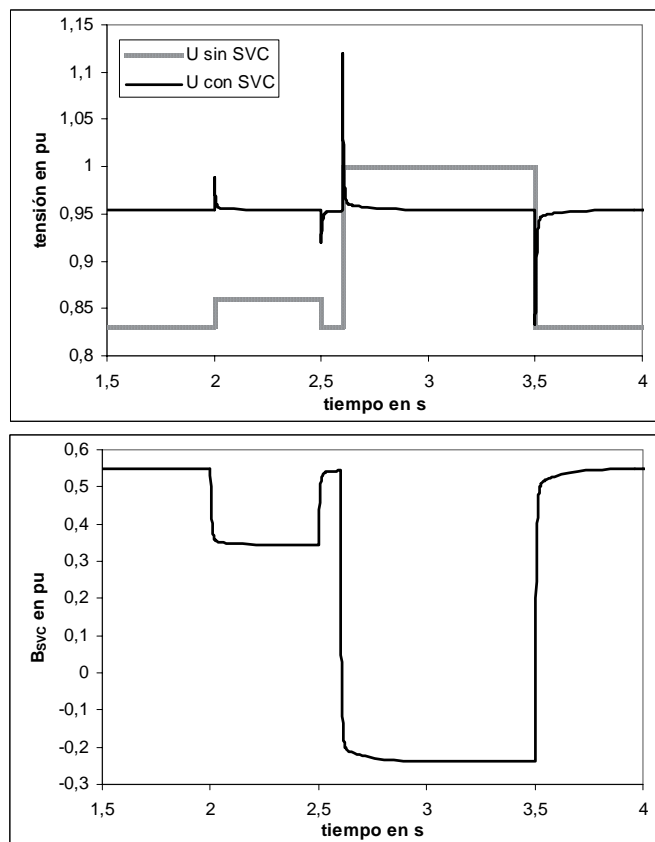


Ilustración 26: Tensión en las cargas y susceptancia del SVC



Los dispositivos basados en SVC se pueden emplear en los sistemas de transporte de la energía eléctrica para aumentar la capacidad de transporte y estabilidad de las líneas de transporte. Considérese el ejemplo de la Ilustración 27, en donde se representa una línea de transporte modelada como una reactancia serie  $X$  la cual está conectada a dos fuentes de tensión con un cierto desfase  $\delta$ . En estas condiciones la potencia que se puede transportar viene dada por la expresión (ver Ilustración 28):

$$P = \frac{U^2}{X} \text{sen } \delta \quad (33)$$

de donde la potencia máxima que se puede transferir es:

$$P_{\text{max}} = \frac{U^2}{X} \quad (34)$$

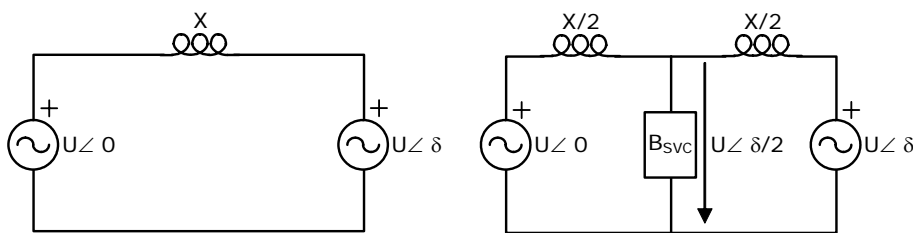


Ilustración 27: Aplicación del SVC en líneas de transporte

Para aumentar la capacidad de transporte de la línea se puede incluir en su punto medio (ver Ilustración 27) un SVC de forma que el valor eficaz tensión en ese punto sea igual al de sus extremos. De esta forma si aplicamos la expresión (33) a cada una de las partes en que ha quedado dividida la línea se obtiene una potencia máxima:

$$P'_{\text{max}} = 2 \frac{U^2}{X} \quad (35)$$

donde se puede comprobar que  $P'_{\text{max}} = 2P_{\text{max}}$ .

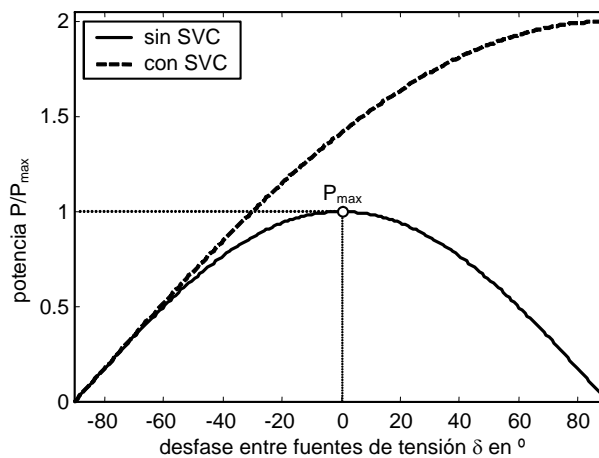


Ilustración 28: Evolución de la potencia en una línea de transporte en función del desfase  $\delta$  entre las fuentes de tensión conectadas a sus extremos

La aplicación en los sistemas de transporte de energía eléctrica de los sistemas como el mostrado, es decir, basados en electrónica de potencia, es

lo que se viene llamando *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). Dentro de este concepto entrarían el SVC, HVDC, STATCOM...

## IV.4 Corrección de factor de potencia mediante SVC

La utilización del TSC para el control del factor de potencia en aquellas aplicaciones donde se desee minimizar los transitorios de conexión es bastante habitual, teniendo los principales fabricantes (Circuitor, Schneider Electric...) equipos de estas características. No obstante, el comportamiento de estos equipos se puede mejorar incluyendo un TCR en el diseño, de forma que la regulación del factor de potencia sea continua.

El control de estos equipos puede realizarse en bucle abierto midiendo la potencia reactiva consumida por la carga y actuando sobre el SVC o bien en bucle cerrado midiendo la potencia reactiva consumida por el conjunto formado por la carga a compensar y el SVC. No obstante, el emplear la potencia reactiva como variable entrada no está exenta de problemas, ya que es necesaria la medida simultánea de la tensión y la intensidad, además de la problemática que acarrea su definición cuando hay armónicos en la red.

Si se atiende al comportamiento de la intensidad (ver Ilustración 29), su valor para el conjunto de la carga más el compensador se puede poner de forma aproximada como:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{SVC})^2}}{E} \quad (36)$$

donde  $P$  y  $Q$  son, respectivamente, las potencias activa y reactiva demandadas por la carga,  $Q_{SVC}$  es la reactiva generada por el SVC y  $E$  es el valor eficaz de la tensión de red. Según este comportamiento, el control del SVC se puede realizar de forma que se busque el valor mínimo de la intensidad.

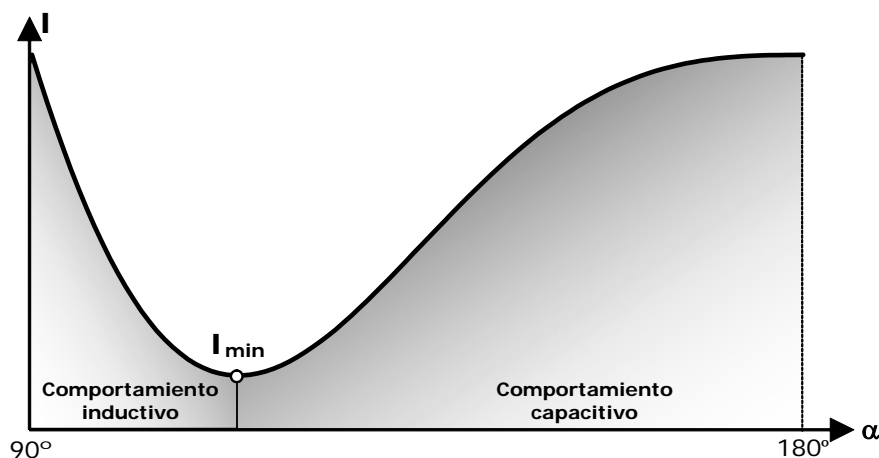


Ilustración 29: Evolución de la intensidad eficaz consumida por el conjunto del compensador más la carga en función del ángulo de disparo

## V. Bibliografía

GRUPO DE ELECTROTECNIA Y REDES ELÉCTRICAS (UNIV. DE VIGO): "Análisis de Redes Eléctricas", Tórculo, 1995

A. GÓMEZ EXPOSITO (COORDINADOR): "Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica", Mc Graw Hill, 2002

J. A. GUALDA, S. MARTÍNEZ Y P. M. MARTÍNEZ: "Electrónica Industrial: Técnicas de Potencia", Marcombo Boixareu Editores, 1982

M. H. RASHID: "Power Electronics", Prentice Hall International, 1998

E. ACHA, V.G. AGELIDIS, O. ANAYA-LARA Y T.J.E. MILLER: "Power Electronic Control in Electrical Systems", Newnes Power Engineering Series, 2002

VARIOS: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IEE Power and Energy Series, 1999

### Webs consultadas (Junio de 2003):

ABB

<http://www.abb.com>

ALSTOM Transmission and Distribution

<http://www.alstom.com>

TOSHIBA POWER DIVISION

[http://www.atals.com/tic/svc\\_home.htm](http://www.atals.com/tic/svc_home.htm)