

# CONFIGURACIÓN HÍBRIDA FC-TCR-FA PARA GESTIÓN DE REACTIVA EN REDES ELÉCTRICAS

Ángel Antonio Bayod Rújula  
José Antonio Domínguez Navarro  
Julio Melero Estela  
Joaquín Mur Amada

Departamento de Ingeniería Eléctrica, C.P.S. Universidad de Zaragoza  
aabayod@posta.unizar.es

## Resumen

En el presente artículo se presenta un sistema híbrido compuesto por un condensador, una bobina controlada por tiristores (TCR) y un filtro activo de pequeña potencia. Con él se logra una regulación suave de reactiva, sin generación elevada de armónicos y sin tener que instalar filtros pasivos, con la problemática que ello conlleva.

**Palabras Clave:** Potencia Reactiva, distorsión armónica, filtros activos.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la compensación es eliminar todas las componentes de potencia que no contribuyen a la transferencia neta de energía de la red a la carga. También interesa que las formas de onda de tensión e intensidad sean puramente senoidales, eliminando así los perjudiciales efectos de las distorsiones. La fuente sólo tendrá que suministrar corriente activa senoidal,  $i_{a1}$ .

La componente de corriente reactiva fundamental,  $i_{r1}$ , suele ser de gran magnitud en las cargas industriales, por lo que resulta interesante compensarla, total o parcialmente. Existen diversos sistemas de compensación cuyo objetivo es la cancelación de esta componente de la corriente.

Generalmente hay una variación amplia en la demanda diaria entre los valles y los picos de demanda en un sistema de potencia, por lo que se requiere una variación continua del compensador de potencia reactiva de desfase fundamental. Los bancos de condensadores conectables sólo permiten cambiar esta potencia en pasos discretos. Cuando se requiere un mejor seguimiento de las variaciones de la demanda de reactiva se utilizan otros dispositivos, denominados genéricamente SVC (Static Var Compensators). Static quiere decir que, a diferencia del condensador síncrono, no tienen partes móviles.

También pueden ayudar a la regulación de tensión en los sistemas en los que existan grandes y fluctuantes cargas industriales. Otras aplicaciones son la corrección de desequilibrios en corrientes de línea, amortiguamiento de las oscilaciones en sistemas de potencia y mejora de la estabilidad dinámica.

En la literatura se han descrito varias configuraciones avanzadas basadas en inversores (ASVC), que conllevan un uso más exigente de los dispositivos semiconductores de conmutación.

Algunos sistemas estáticos de compensación son a su vez fuente de distorsión, anulando algunas componentes de la potencia no activa pero generando otras. Es el caso de los TCR, que compensan la potencia reactiva fundamental pero generan corrientes armónicas. Si no se incluye otro tipo de compensación, puede incrementarse la potencia aparente ó dar lugar a peligrosas resonancias serie o paralelo, empeorándose la tensión en el punto de conexión, lo cual puede alterar su propia operación, (interacción armónica), produciéndose armónicos no característicos.

El uso combinado de compensadores de distinta potencia y velocidad de conmutación puede permitir disminuir los costes y una mejor optimización de la compensación aprovechando las diferentes respuestas dinámicas.

Indudablemente, el sistema más económico para compensación de reactiva (generalmente inductiva en redes eléctricas) es la instalación de condensadores. En el caso habitual de que el requerimiento de reactiva capacitiva varíe en el tiempo, pueden instalarse en paralelo diversos bancos de condensadores conectables (TSC) en función de la cantidad de reactiva necesitada en cada instante.

En un TSC para aplicación en sistemas de transmisión, el coste de los switches de tiristores y otras complicaciones hacen deseable minimizar el número de unidades de condensadores en paralelo.

Una cifra de 3 o 4 es típica en las instalaciones presentes o planeadas en la actualidad. Con este pequeño número de condensadores, una regulación suave es inobtenible. Por eso se suele conectar en paralelo una reactancia inductiva gobernada con control de fase, mediante tiristores (TCR). Se dispone así, además, de una cierta capacidad de limitación de sobretensiones.

## 2. CONEXIÓN DE INDUCTANCIA MEDIANTE TIRISTORES EN ANTI-PARALELO (TCR). PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

En este dispositivo, la conexión de una bobina es controlada por dos tiristores en antiparalelo, cuyos impulsos de disparo pueden regularse desde 90 a 180° respecto del paso por cero de la tensión. De esta manera la corriente que circula por la bobina se controla de forma continua y rápida. Tiene la ventaja de un control suave de vars sobre el rango del equipo. Permite un control por fase y por tanto la corrección de desequilibrios eventuales.



Figura 1

En el caso ideal de tensión senoidal, sin impedancia de red, y considerando los SCR como interruptores ideales,

$$i_L(t) = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha$$

$$i_L(t) = 0 \quad \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi$$

siendo  $\alpha$  el ángulo de retraso (respecto al instante de paso de la tensión por cero) en el disparo, y  $\sigma$  el ángulo de conducción, relacionado con  $\alpha$  por la relación



En la figura se muestra la evolución en el tiempo de la corriente absorbida por un TCR, para un ángulo de disparo dado,  $\alpha$ .

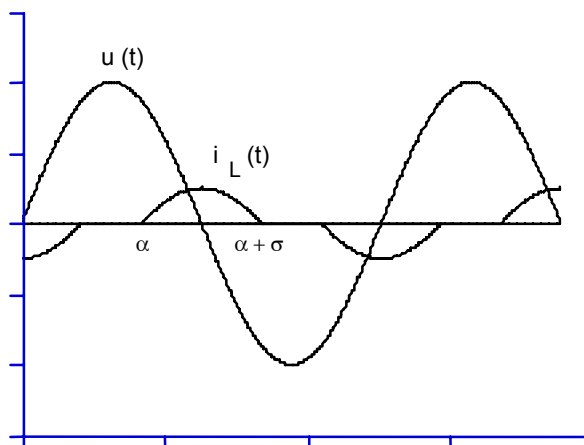


Figura 2

Desarrollando la expresión de la corriente en series de Fourier, pueden obtenerse los valores eficaces de la componente fundamental y de las componentes armónicas.

La expresión de la componente fundamental, en función del ángulo de conducción es

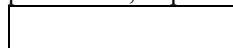
$$I_1 = \frac{\sigma - \text{sen } \sigma}{\pi \omega L} U$$

La componente fundamental de la intensidad varía con el ángulo de disparo (o lo que es lo mismo con el de conducción).

La susceptancia a la frecuencia fundamental, controlada por el ángulo de conducción, vale

$$B_{L1}(\sigma) = \frac{\sigma - \text{sen } \sigma}{\pi \omega_1 L}$$

siendo  $L$  el coeficiente de autoinducción de la bobina. Con esta susceptancia equivalente, la componente fundamental de la corriente absorbida por el TCR, se puede reescribir como



lo que puede interpretarse como que se dispone de una inductancia variable a frecuencia fundamental. El efecto de aumentar el ángulo de disparo es reducir la componente fundamental de la corriente. Es equivalente a aumentar la inductancia del reactor, reduciendo la potencia reactiva.

Este control se denomina control de fase. En algunos diseños el sistema de control responde a una señal que representa directamente la susceptancia deseada  $B_L$ ; en otros, el algoritmo de control procesa otros parámetros medidos del

sistema (por ejemplo la tensión) y genera los impulsos de disparo.

Como se ve en la figura, la corriente absorbida por el TCR no es sinusoidal.

Conforme se incrementa el ángulo de disparo, la forma de onda de la corriente se vuelve menos sinusoidal, es decir, aumentan los armónicos. Si los ángulos de disparo son equilibrados (iguales para los dos tiristores) se generan armónicos de todos los órdenes impares, de valor eficaz dado por la expresión

$$I_n = \frac{4 U}{\pi X_L} \left( \frac{\text{sen}(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\text{sen}(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \frac{\text{sen } n\alpha}{n} \right) \quad n = 3,5,7,\dots$$

Si se representa cada armónico frente al ángulo de conducción se ve una función formada a lóbulos, que van creciendo en amplitud en el sentido de ángulo de conducción crecientes. Los máximos de los armónicos no ocurren en los mismos ángulos de conducción.

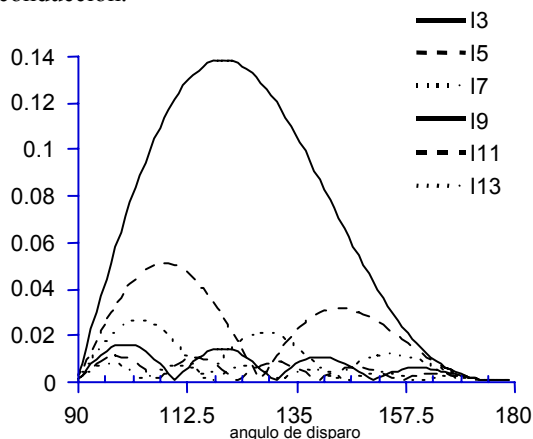


Figura 3

Dada la relación proporcional entre las magnitudes de armónicos y el tamaño del TCR, el gran reactor requerido puede ser una fuente de importantes armónicos impares.

Es importante asegurar que los ángulos de conducción de los dos tiristores en antiparalelo sean iguales; de lo contrario se producen armónicos pares en las corriente, incluso continua. También se producirían distintas fatigas térmicas en los tiristores.

Los valores que se representan en esta figura aparecen como tanto por ciento respecto al valor  $I_{10}$ , componente fundamental a plena conducción.

En la figura aparecen los valores de la componente fundamental de la corriente,  $I_1$  y el residuo

armónico total presente en la corriente absorbida por un TCR, en función del ángulo de disparo, considerando la tensión de suministro perfectamente sinusoidal.

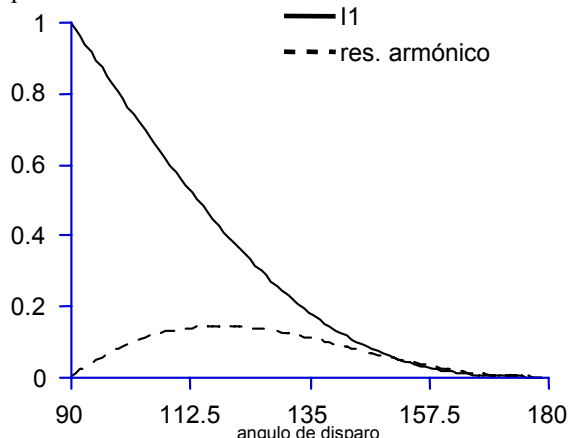


Figura 4

Como puede verse, para valores de ángulo de disparo elevado el residuo armónico es comparable e incluso superior a la componente fundamental. Por tanto se requiere el uso de filtros.

### 3. CONFIGURACIONES FC-TCR Y TSC-TCR.

Conectando en paralelo con el TCR un banco de condensadores fijo (FC), se tiene la posibilidad de compensación de reactiva inductiva y capacitiva.

El FC-TCR es deseable para aplicaciones de alta tensión. Generalmente sólo un switch de tiristores de alta tensión se usa por fase, y dependiendo del tamaño total, el switch con el inductor en serie puede conectarse directamente a las líneas ac.

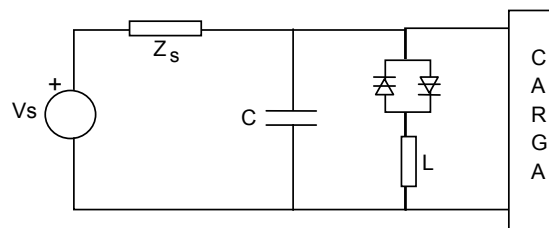


Figura 5

El sistema puede mejorarse con la conexión de bancos de condensadores conectables (TSC) en lugar de un banco de condensadores fijo.

Ya que los módulos de los armónicos son proporcionales al tamaño del reactor controlado, y éste es pequeño, se minimiza la generación de armónicos. Como contrapartida, se necesitan más tiristores, y una inversión inicial superior.

Por tanto, los TCR son a su vez fuente de distorsión armónica. Las corrientes armónicas que generan, al circular por las impedancias del sistema producen distorsión de tensión en el sistema de potencia y cambios en su propia operación, especialmente si ocurren resonancias. Los ángulos de disparo dependen de las condiciones de flujo de cargas de la red y de las distribuciones de tensiones armónicas.

Cada frecuencia individual en la tensión terminal produce un espectro entero de intensidades, así como todos los armónicos de la tensión contribuyen a la formación de cada armónico individual de la intensidad.

Es particularmente sensible a resonancias en el sistema de transmisión.

En la práctica existe siempre un cierto grado de desequilibrio en el sistema. Por consiguiente aparecerán armónicos no característicos en el bus del compensador. También se produce desequilibrio en los ángulos de disparo o en los reactores. En las configuraciones trifásicas, no es siempre posible tener ángulo de disparo idénticos en los TCR. Diferencias de 2 o 3 grados se consideran aceptables. En los reactores, una tolerancia de fabricación de entre un 2 a un 5% es típico. Ambas condiciones de asimetría pueden resultar en una notable inyección de armónicos no característicos.

#### 4. UTILIZACIÓN DE FILTROS PASIVOS PARA REDUCCIÓN DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS

Como se ha comentado, la utilización de TCR requiere la acción de sistemas de filtrado, pues de lo contrario, pueden producirse interacciones importantes, como inestabilidad de la tensión, inestabilidades en la operación de convertidores, generación de armónicos no característicos que aumentan las posibilidades de resonancias, etc.

Un filtro debe ser capaz de ejecutar su función incluso cuando la frecuencia de la red se desvía ligeramente de su valor nominal y para desviaciones de la frecuencia de resonancia debidas a cambios en los componentes (L y C) debido a envejecimientos y efectos de temperatura.

Los filtros deben ser diseñados y aplicados con cuidado ya que pueden formar una trayectoria no sólo para las corrientes producidas por las cargas distorsionadoras, sino también para todas las otras fuentes de distorsión cercanas.

Aunque diseñados para eliminar intensidades armónicas, los filtros conectados en paralelo puede generar el efecto contrario. La baja impedancia a

tierra que presentan causa una enorme concentración o convergencia de armónicos de intensidad de bajo orden, en este punto del sistema de potencia. La única diferencia entre esta situación y la de la operación del convertidor sin filtros es la dirección de los flujos de corrientes armónicas. Incluso puede ocurrir que se vean sobrecargados por armónicos de intensidad procedentes de otras partes del sistema.

A la vista de las consideraciones expuestas en los apartados anteriores, se propone una configuración de compensación híbrida, cuyo objetivo es la disminución del contenido armónico presente tanto en la corriente que circula por la red de suministro como en la tensión en el punto de conexión. Se obtiene también una compensación parcial de la corriente reactiva fundamental.

La eficacia del sistema propuesto se ha comprobado mediante la simulación de su operación, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia

#### 5. CONFIGURACION DEL SISTEMA FC-TCR-FA Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

El sistema de compensación híbrido consiste en un filtro activo, (FA), en serie con el sistema de compensación básico, constituido por el TCR en paralelo con uno de los escalones de condensadores. El filtro activo necesitará así un limitado requerimiento de potencia.



Figura 6

El filtro activo está constituido por un convertidor continua-alterna, con un condensador en el bus de continua, cuya tensión de salida será totalmente controlada mediante modulación por anchura de pulso. El acoplo al sistema eléctrico de potencia se realiza mediante transformadores de corriente.

En la figura aparece la configuración monofásica de dicho convertidor, que recibe el nombre de inversor puente en H, tipo fuente de tensión, PWM - VSI (Pulse Width Modulation - Voltage Source Inverter). (En configuraciones trifásicas se dispondrá de tres inversores monofásicos, conectados al mismo bus de continua, por su mejor controlabilidad en situaciones de desequilibrio).

La estrategia de control que gobernará la operación los inversores, permite evitar la posibilidad de resonancias entre los elementos pasivos y el sistema de suministro. El sistema quedará también aislado de interacciones armónicas con cargas circundantes.

El principio de control que se va adoptar es el siguiente:

El filtro activo será controlado de forma que su tensión de salida,  $v_{cs}$ , se oponga a la circulación por la línea de corrientes de frecuencias superiores a la fundamental, respondiendo a la expresión

$$v_{cs} = K i_{sh}$$

De esta forma, en la situación ideal se logrará que por la línea de alimentación circulen corrientes prácticamente senoidales.

En la configuración propuesta, el inversor se comportarán como fuente de tensión controlable, por lo que el esquema eléctrico básico de operación es el mostrado en la figura

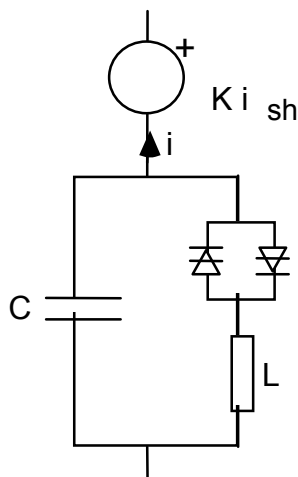


Figura 7

El sistema queda ahora

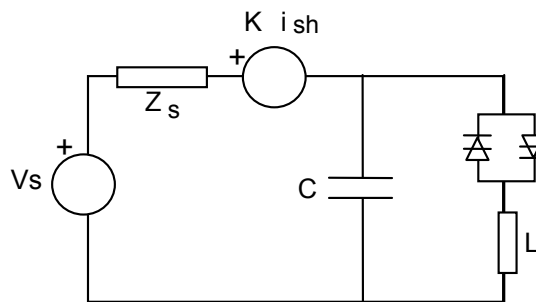


Figura 8

De un sencillo análisis del esquema eléctrico de la figura con el método de control enunciado, se deducen las expresiones de la corriente armónica que circula por la línea

$$I_{S_h} = \frac{1}{Z_s + K + Z_c} V_{S_h} + \frac{Z_c}{Z_s + K + Z_c} I_{TCR_h}$$

La cantidad de corriente armónica generada en el TCR y que penetra en el sistema de suministro viene expresada por la relación

$$\frac{I_{S_h}}{I_{TCR_h}} = \frac{Z_c}{Z_s + K + Z_c}$$

Esta relación, nos da una indicación de la efectividad del sistema de filtrado.

El coeficiente  $K$  aparece en el denominador de la expresión, y es siempre positivo, lo que se traduce en una menor circulación de corrientes armónicas por la red de suministro.

El filtro activo serie actúa además como una resistencia de amortiguamiento, ya que la impedancia equivalente que se ve desde el punto de conexión es  $Z_s + K$ , por lo que se puede eliminar el efecto de cualquier resonancia paralelo que pudiera establecerse entre el condensador básico, y la impedancia de la red.

## 6. EJEMPLO

Consideremos un sistema eléctrico caracterizado por su equivalente Thévenin más sencillo, en el que la impedancia viene definida por la asociación serie de una bobina de valor  $L_s = 0,1273$  mH, y una resistencia  $R_s$  de  $= 0,005 \Omega$ . Colocaremos un TCR, en paralelo con un condensador fijo de  $810 \mu F$ . Con la actuación del filtro activo (para varios valores de  $K$ ), las componentes armónicas de la corriente que se inyecta en el sistema eléctrico se ven multiplicadas por el valor que aparece en la siguiente gráfica, (atenuadas) en donde en abscisas se tiene el orden del armónico.

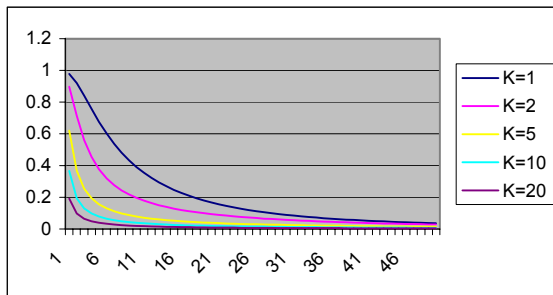


Figura 9

### Referencias

- [1] T.J. E. Miller, "Reactive Power Control in electric systems", John Wiley and Sons, Inc. N.Y. 1982.
- [2] L. Gyugyi, "Power electronics in electric utilities: Static Var Compensators", Proc. of the IEEE, Vol. 76, N° 4, Abril 1988, pp- 483-494
- [3] H. Akagi, H. Fujita. "A combined system of shunt passive and series active filters: an alternative to shunt active filters". EPE Firenze, 1991, Vol 3, pp.12-17
- [4] F.Z. Peng, H.Akagi, A. Nabae. "A new approach to harmonic compensation in power systems: a combined system of shunt passive and series active filters". IEEE Tr. on Industry Applications, Vol. 26, n° 6, Nov/Dic 1990, pp-983-990

