

4.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE CEV's.

Con el desarrollo de electrónica de potencia y las técnicas de control se han incrementado la aplicación de Compensadores Estáticos de Var's (CEV's) para control de voltaje.

Dadas sus características de control rápido y continuo, los CEV's facilitan el control de la inyección de potencia reactiva ante cambios normales en el sistema y también durante disturbios.

Los compensadores estáticos de Var's generalmente están integrados por capacitores y/o reactores, incluyendo un regulador de voltaje y lógica de control para el disparo de tiristores. La conexión/desconexión de capacitores se realiza en forma discreta mediante el control de tiristores en los períodos de conducción. La conexión de reactores se efectúa en forma controlada variando el ángulo de disparo de los tiristores, logrando de esta forma el control continuo de la corriente en el reactor.

El principio de operación de los CEV's se basa en la deformación de la onda de corriente, la cual da como resultado la aparición de armónicas que pueden producir efectos adversos en el sistema de potencia. Debido a este problema se han desarrollado diversas configuraciones de CEV's que permite reducir la generación de armónicas.

4.2. TIRISTORES.

El tiristor es un elemento fundamental en la operación de un CEV's. Este dispositivo tiene diversidad de aplicaciones en la industria y en diferentes niveles en la escala de potencia.

Los tiristores son conmutadores de estado sólido con poca probabilidad de falla cuando son usados bajo condiciones de operación estipuladas, virtualmente no consumen potencia, por lo tanto generan poco calor y permiten gobernar la corriente que se alimenta a través de ellos.

Existen varios tipos de tiristores, el más común es el tiristor triodo de bloqueo inverso comúnmente llamado RCS (Rectificador controlado de silicio) o simplemente tiristor que es utilizado en los CEV's.

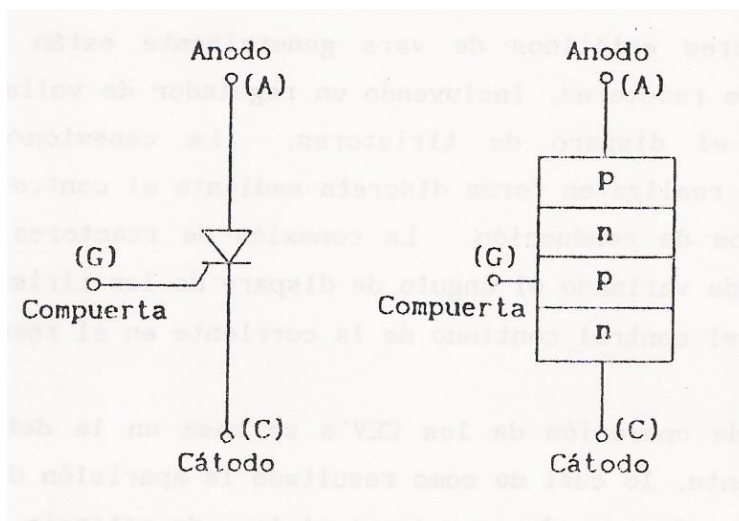


Figura 4.1 Estructura Básica y símbolo de un tiristor

El RCS es esencialmente un diodo de potencia cuyos periodos de conducción pueden ser controlados mediante una señal externa. Este es un dispositivo de tres terminales: las principales conexiones de potencia son hechas por el ánodo y el cátodo como en un diodo normal y una señal de disparo se aplica al electrodo de compuerta. La estructura simplificada y símbolo para un tiristor se ilustra en la figura 4.1.

Si el ánodo es polarizado positivamente con respecto al cátodo y si en el mismo tiempo la compuerta es polarizada positivamente con respecto al cátodo, el tiristor conducirá directamente como en un diodo ordinario. Después de un corto tiempo la corriente de compuerta puede ser reducida a cero sin que la corriente de ánodo desaparezca. El tiristor entonces se dice que está en conducción directa y conducirá mientras la corriente de ánodo-cátodo sea superior a un valor de sostenimiento. Si por otro lado no fluye corriente de compuerta (o no es suficiente) entonces el estado de conducción no inicia y el tiristor está en bloqueo directo. Una vez que el tiristor esta conduciendo la compuerta pierde el control y no puede ser usada para que el tiristor deje de conducir.

Bajo condiciones normales, cuando el ánodo es negativo con respecto al cátodo, el tiristor no conducirá (exceptuando corriente de fuga) y entonces se dice que está en boque inverso. Sin embargo una ruptura de avalancha ocurrirá en ambas direcciones directa e inversa si se aplican voltajes excesivos.

4.2.1. Característica Estática.

Las características estáticas de un tiristor son similares en algunos aspectos a las de un diodo semiconductor. Una curva característica típica de un tiristor es mostrado en la figura 4.2

Con un voltaje negativo aplicado al tiristor, esto es, el ánodo es negativo con respecto al cátodo, virtualmente no fluye corriente. Conforme el voltaje negativo se incrementa, la corriente de fuga inversa se incrementa lentamente hasta que ocurre la ruptura de avalancha. Esta parte de la característica es similar a la de un diodo semiconductor polarizado.

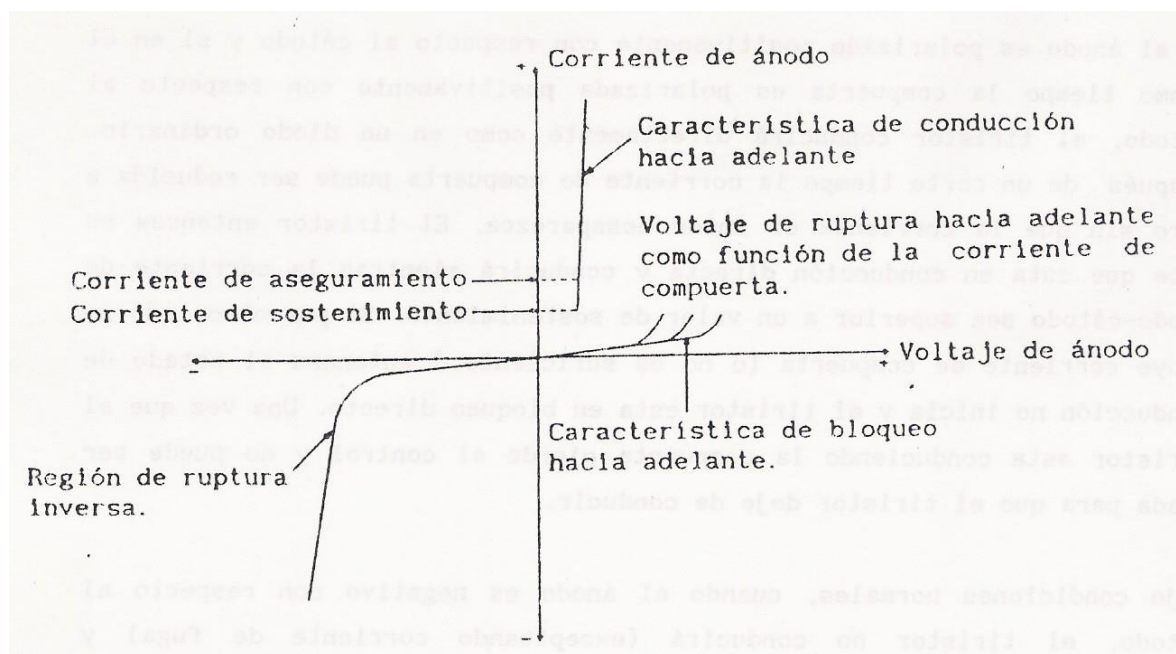


Figura 4.2. Característica estática

Si un voltaje positivo se aplica al tiristor, ahora el ánodo será positivo con respecto al cátodo, si el tiristor no se dispara permanece en estado de no conducción, la característica es similar a

la que se tiene con un voltaje negativo. Una pequeña corriente de fuga en adelante fluirá, incrementándose cuando el voltaje a través del tiristor se incrementa hasta que finalmente el estado de conducción es iniciado por acción de avalancha. Esto ocurre en un voltaje de ruptura hacia delante (V_{BO}). El voltaje a través del tiristor ahora cae hasta un voltaje V_T .

Cuando un voltaje positivo es aplicado al tiristor y este es disparado para llevarlo al estado de conducción, la característica es similar a la del diodo semiconductor polarizado hacia delante. La corriente fluyendo a través del tiristor debe exceder el valor de la corriente de aseguramiento antes de quitar el pulso de disparo. Si por alguna causa la corriente de carga crece lentamente (por ejemplo con una carga inductiva) y el pulso de disparo es quitado antes de que el valor de corriente de aseguramiento haya sido alcanzado, el tiristor deja de conducir. Otro valor de corriente señalado en la figura 4.2 es la corriente de sostenimiento. Esta es la mínima corriente que puede fluir a través del tiristor para que este permanezca en conducción. Por tanto para apagar el tiristor, esto es, para cambiar el estado de conducción en adelante al estado de no conducción, la corriente de carga debe disminuir por debajo del valor de corriente de sostenimiento. Un camino conveniente para hacer esto es reducir el voltaje positivo a través del tiristor a cero. Esto normalmente ocurre durante la operación con corriente alterna debido a la alternancia del voltaje de suministro.

El voltaje de ruptura hacia delante es dependiente de la magnitud de la corriente de compuerta, esto es indicado en la figura 4.2. En la medida en que la corriente de compuerta se incrementa el voltaje de ruptura hacia delante disminuye.

Aún cuando los tiristores son normalmente encendidos mediante señal de compuerta, existen otros posibles métodos, por ejemplo excediendo el voltaje de ruptura hacia delante (V_{BO}). Un tiristor puede ser así mismo llevado al estado de conducción excediendo el valor permitido de crecimiento de voltaje ánodo (dv/dt). Sin embargo estos dos métodos de conmutación para llegar al estado de conducción son usualmente accidentales y deben ser evitados por cuidados de diseño.

4.3. COMPENSADORES ESTÁTICOS MONOFÁSICOS.

Presentaremos los principios de operación de los compensadores estáticos de Var's monofásicos tipos RCT y CCT. Se incluyen la ecuación que describe el comportamiento de la corriente que el compensador tipo RCT inyecta a la red en función del ángulo de disparo de los tiristores. Mediante un análisis de fourier se determinan las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento de la componente de corriente fundamental y las armónicas que este compensador inyecta a la red, en función del ángulo de disparo (α) de los tiristores. Así mismo se presenta el control del RCT representando a este dispositivo como una susceptancia que varía en función del ángulo de disparo de los tiristores.

Para el compensador tipo CCT se presenta un análisis de su comportamiento bajo condiciones de operación ideales y en la cual se tiene una conmutación libre de transitorios, posteriormente, se analiza el caso en el cual se tiene una conmutación con transitorios.

4.3.1. Reactor Controlado Por Tiristores.

En la figura 4.3 se muestra el esquema básico del reactor controlado por tiristores (RCT). El elemento que controla es el tiristor, los dos tiristores polarizados opuestamente conducen en medios ciclos alternos de la frecuencia suministrada. Si los tiristores son disparados y puestos en conducción precisamente en los picos del voltaje de suministro, resulta una conducción completa en el reactor y la corriente es la misma que se tendría con el tiristor en cortocircuito. La corriente es esencialmente reactiva, retrasada respecto al voltaje aproximadamente 90° contiene una pequeña componente en fase ocasionada por pérdidas de potencia activa en el reactor. La conducción se muestra en la figura 4.4a.

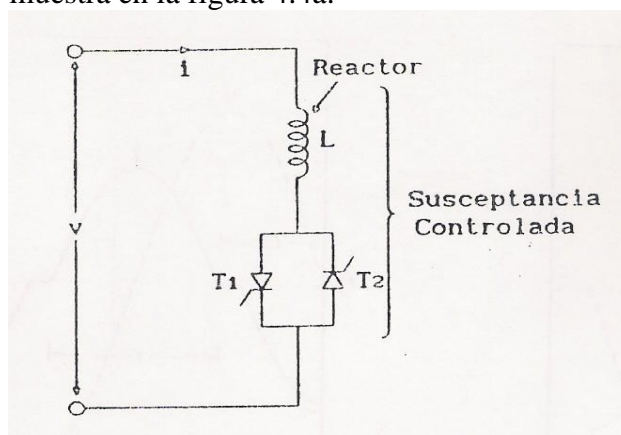


Figura 4.3. Circuito elemental de un reactor controlado por tiristores.

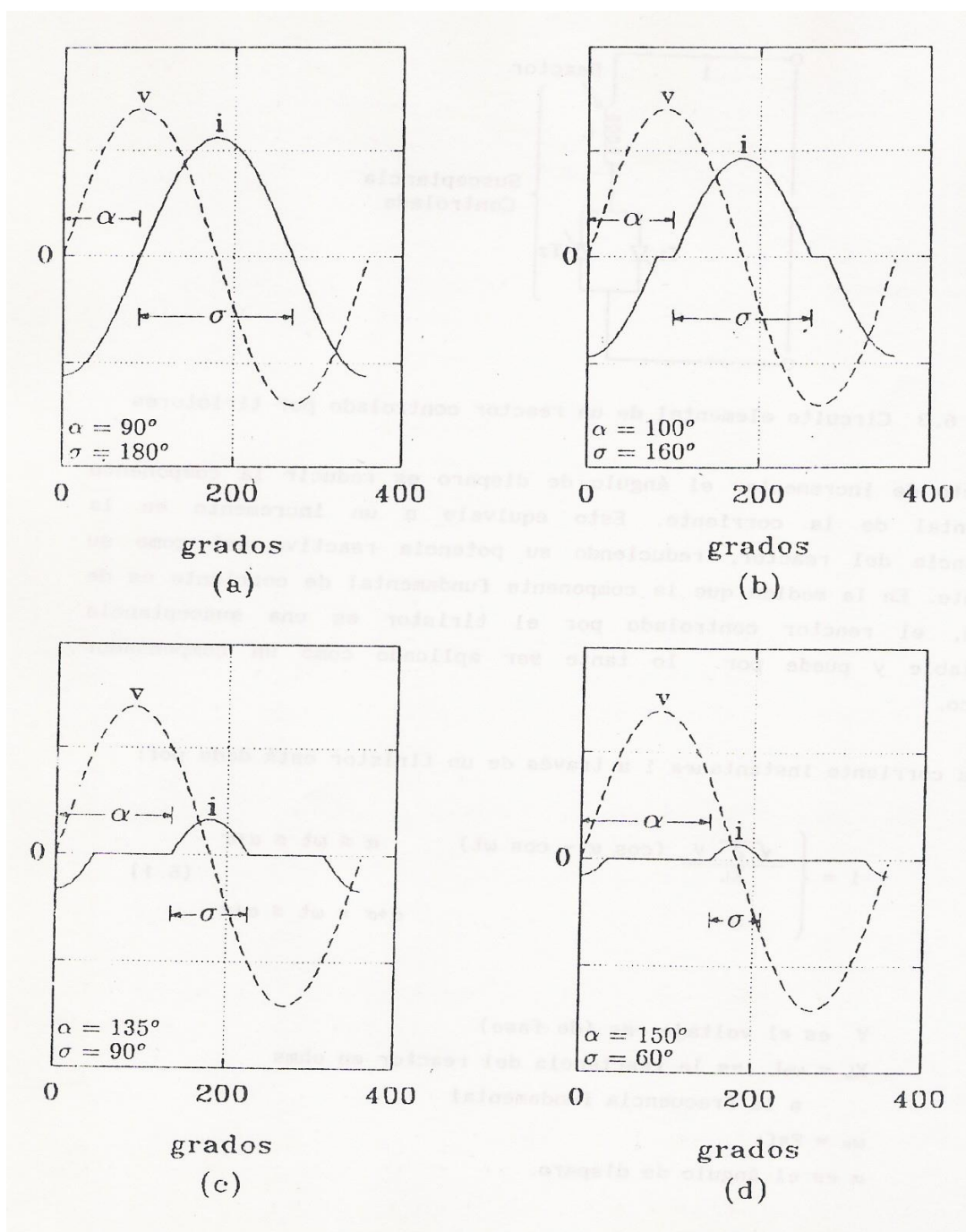


Figura 4.4. Forma de onda de la corriente en un RCT monofásico.

El efecto de incrementar el ángulo de disparo es reducir la componente fundamental de la corriente. Esto equivale a un incremento en la inductancia del reactor, reduciendo su potencia reactiva así como su corriente. En la medida que la componente fundamental de corriente es de interés, el reactor controlado por el tiristor es una susceptancia controlable y puede por lo tanto ser aplicado como un compensador estático.

La corriente instantánea I a través de un tiristor está dada por:

$$I = \frac{\sqrt{2} V}{XL} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

4.3.1.1. Análisis del RCT y del Disparo de los Tiristores.

Basado en la figura 4.5 se analiza el comportamiento del RCT y del disparo de los tiristores.

Para este análisis se considera el caso particular en que se tiene una conducción completa.

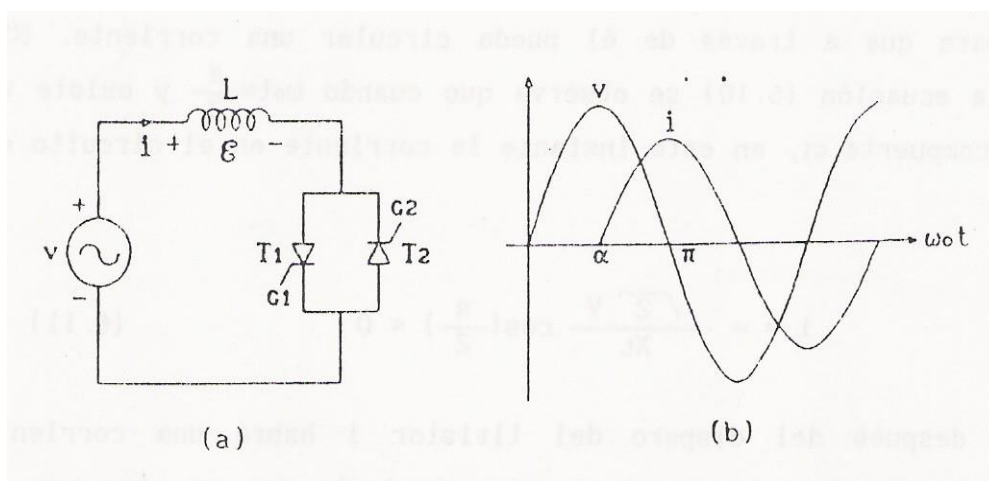


Figura 4.5. (a) Esquema elemental del RCT y (b) forma de onda de la corriente

Para $\alpha = 90^\circ$

Especificando el voltaje de la fuente de voltaje como:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2} V \sin \omega t \\ &= V_{MAX} \sin \omega t \end{aligned}$$

Donde

$$V_{MAX} = \sqrt{2} V$$

Así mismo el voltaje en terminales del reactor se obtiene mediante

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

De modo que

$$v + \varepsilon = 0$$

Para el caso particular en que $\alpha = \pi/2$ se tiene un voltaje máximo en la fuente, de modo que el tiristor 1 está directamente polarizado. Si en este instante se aplica un pulso a la compuerta del tiristor 1, éste se queda habilitado para que a través de él pueda circular una corriente. Sin embargo se observa que cuando $\omega_0 t = \pi/2$ y existe un pulso en la compuerta G1, en este instante la corriente en el circuito es cero.

$$I = \frac{\sqrt{2} V}{X_L} \cos(\pi/2) = 0$$

Un instante después del disparo del tiristor 1 habrá una corriente circulando a través de éste obteniendo el valor máximo de corriente en $\omega_0 t = \pi$.

Cuando el voltaje llega a un valor máximo negativo ($\omega_0 t = 3\pi/2$) la corriente 1 es cero, de modo que el tiristor 1 es polarizado inversamente y el tiristor 2 directamente por lo que el tiristor 1 deja de conducir. Así mismo, si en el instante ($\omega_0 t = 3\pi/2$) se aplica un pulso a la compuerta del tiristor 2, éste quedará habilitado para conducir. Durante este nuevo semiciclo únicamente el tiristor 2 permanecerá en conducción y el comportamiento del circuito es análogo al descrito para el tiristor 1 y se basa en las ecuaciones descritas al principio de este análisis.

4.3.2. Capacitor Conmutado a través de Tiristores.

La operación de este compensador es distinta a la del RCT en el sentido de que no opera bajo el principio de control de fase. Pues el valor de susceptancia que presenta este compensador durante su operación siempre es el nominal. La función de los tiristores es únicamente conectar o desconectar el capacitor o banco capacitivo. En un período de la onda de corriente cada tiristor conducirá medio período.

En la figura. 4.6 se muestra un circuito con un capacitor conmutado a través de tiristores, no se incluye ningún elemento adicional a la fuente de voltaje de suministro.

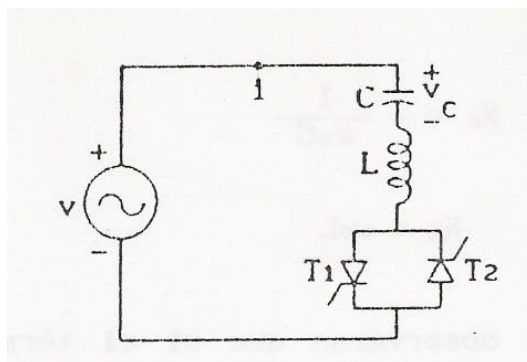


Figura 4.6. Circuito para el análisis de la conmutación libre de transitorios.

De acuerdo con el circuito de la figura 4.6, cuando la corriente en el capacitor alcanza el cruce natural por cero y se suprimen los pulsos de disparo de los tiristores, la corriente deja de fluir, entonces la potencia reactiva suministrada al sistema es cero. De acuerdo con la figura 4.7 (a) si el capacitor permanece con una carga equivalente a través de los tiristores alternará entre cero y dos veces el valor pico del voltaje de fase. El único instante en que los tiristores pueden ser disparados sin transitorios es cuando el voltaje a través de ellos es cero (figura 4.7 (b)).

Esto coincide con el pico de voltaje de la fuente.

De acuerdo con la figura 4.7:

- V es el voltaje de la fuente como una función del tiempo.
- V_{\max} es el voltaje máximo de la fuente
- v_c es el voltaje del capacitor como una función del tiempo
- V_c es el voltaje al cual queda cargado el capacitor cuando es desconectado
- V_{CD} es el voltaje de carga inicial del capacitor cuando es conectado a través de un Tiristor
- I es la corriente en el circuito como una función del tiempo.
- I_{ac} es el valor máximo de la corriente a la frecuencia fundamental.

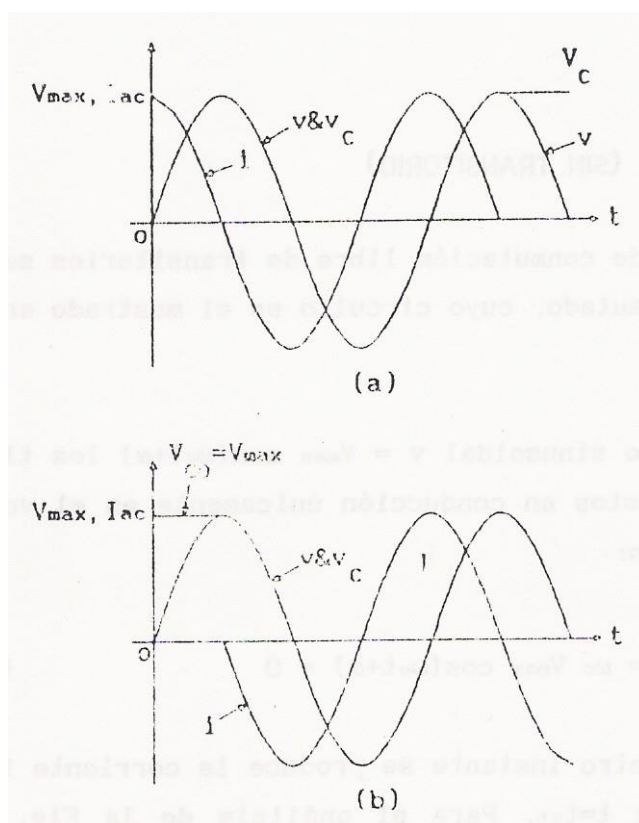


Figura 4.7 Formas de onda en una conmutación libre de transitorios (ideal)
 a) Desconexión b) conexión

4.4. COMPENSADORES ESTÁTICOS DE VAR'OS TRIFÁSICOS.

Los compensadores trifásicos básicamente están constituidos por tres unidades monofásicas que pueden ser conectadas en delta o en estrella.

Estos compensadores son llamados CEV's de seis pulsos debido al número de tiristores que operan en un periodo de la onda de corriente. Sin embargo, debido a las necesidades de reducir el problema de la generación de armónicas y de tener una compensación activa continua, se han desarrollado nuevas configuraciones basadas en compensadores RCT y CCT de seis pulsos. De este modo han surgido compensadores RCT de doce pulsos y el compensador híbrido CCT/RCT. Una ventaja de este tipo de CEV's es el de menor generación de armónicas

que con esquemas de seis pulsos y además se logra tener ambos tipos de compensación reactiva (capacitiva e inductiva) en forma continua.

4.4.1. El RCT de Seis Pulsos.

El RCT de seis pulsos está formado por tres unidades monofásicas conectadas en delta como se muestra en la figura 4.8. Para este tipo de arreglo se tienen 6 tiristores en operación correspondiendo a 2 tiristores a cada fase, para cada fase se utilizan dos pulsos (en un período para el control de disparo de los tiristores). La separación de los reactores en cada fase proporciona protección extra al tiristor si se presenta una falla en un reactor.

En esquemas reales, en cada fase del RCT se conectan dos grupos de tiristores. Un grupo está conectado de tal forma que sus tiristores conducen en una determinada dirección y el otro grupo conduce en dirección opuesta. Esto también se aplica a los otros tipos de compensadores que se analizan en este capítulo.

En los diagramas esquemáticos que se presentan en este capítulo para los diferentes tipos de CEV's un tiristor representa un grupo de tiristores conectados en paralelo.

Para analizar la operación del RCT de seis pulsos se asume que las tres unidades monofásicas son idénticas, que los voltajes aplicados son balanceados, que la conmutación es simétrica respecto a los medios ciclos positivos y negativos, y que los ángulos de disparo son iguales.

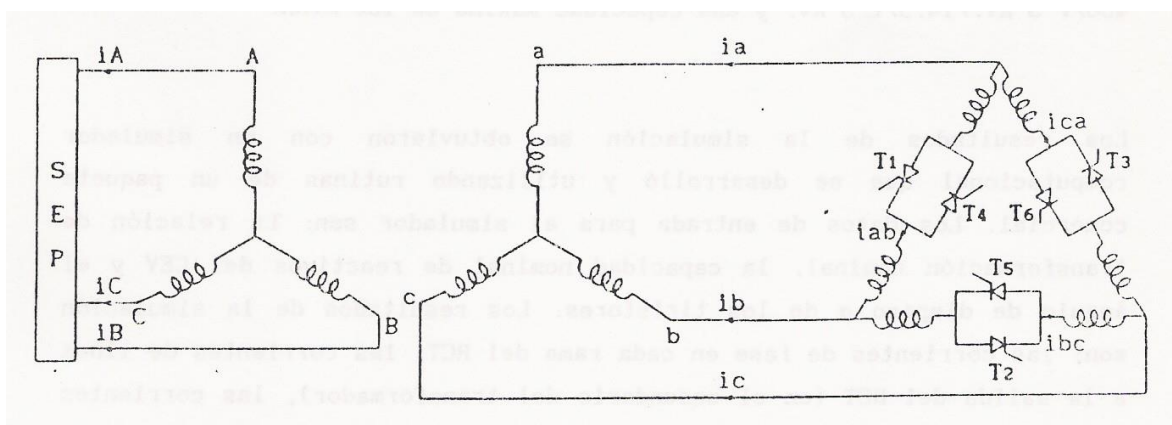


Figura 4.8 Compensador estático tipo RCT de seis pulsos

De acuerdo con la figura 4.8 se especifican los voltajes de línea aplicados al RCT como:

$$V_{ab} = V_{\max} \sin \omega t$$

$$V_{bc} = V_{\max} \sin (\omega t - 2\pi/3)$$

$$V_{ca} = V_{\max} \sin (\omega t - 4\pi/3)$$

La ecuación de la corriente que circula a través de un tiristor se cumple para cada uno de los tiristores del arreglo mostrado en la figura (4.8). Sin embargo, como el ángulo de disparo de cada tiristor es medido con relación al primer instante que aparece su voltaje de polarización hacia delante, entonces, al haber desfaseamiento entre los voltajes aplicados a las ramas delta, se tiene un desfaseamiento similar en los instantes de disparo de los tiristores y por lo tanto en las corrientes generadas en cada rama delta.

En general, la conexión del secundario del transformador mostrado en la figura 4.8 puede ser estrella o delta.

4.4.2. El CCT de Seis Pulsos.

El CCT trifásico está formado por tres unidades monofásicas que pueden estar conectadas en delta o en estrella. En este tipo de arreglos también se tienen 6 grupos de tiristores en operación correspondiente a 2 grupos de tiristores a cada fase.

Para el análisis de la operación del CCT trifásico se asume que las tres unidades monofásicas son idénticas, no se considera inductancia serie, se considera que los voltajes aplicados son balanceados y que la conmutación es simétrica respecto a los medios ciclos positivos y negativos. De esta forma el disparo de los tiristores se realiza en el valor pico de voltaje correspondiente a la fase a la cual se encuentra cada una de ellos

En la figura 4.9 se muestra el esquema de un CCT trifásico (de seis pulsos) conectado en delta. En este caso las corrientes presentan un desfaseamiento natural de 90° en adelanto respecto al voltaje de fase aplicado a la rama.

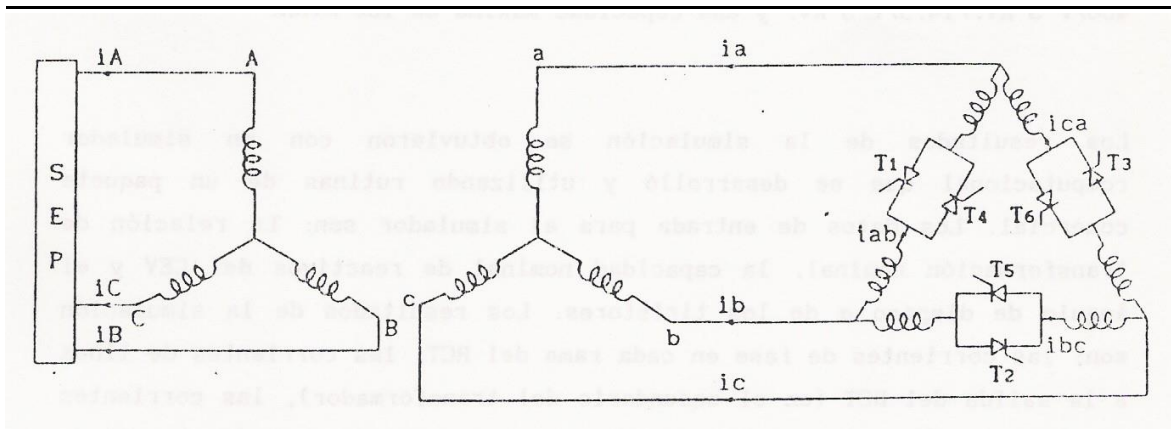


Figura 4.9. Compensador estático tipo CCT de seis pulsos.

4.4.3. RCT – Esquema de Doce Pulsos.

Una alternativa para eliminar la 5ª y 7ª armónica es dividir el RCT en dos partes alimentadas a través del secundario y terciario del transformador reductor. Un devanado se conecta en estrella y otro en delta como se muestra la figura 4.10. Esto produce un cambio de fase de 30° entre los voltajes y corrientes de los dos RCT, eliminando de esta manera las armónicas de la corriente de línea del lado primario. En este arreglo hay 12 grupos de tiristores que se disparan en cada período.

Con el esquema de 12 pulsos las armónicas de importancia de más bajo orden son la 11ª y la 13ª para los cuales se pueden utilizar filtros. En este tipo de arreglo ambas unidades RCT son controladas con ángulos de disparo iguales. Como los voltajes aplicados tienen una diferencia de fase de 30°, las corrientes armónicas $[6(2n-1)\pm 1]$ serán canceladas en el transformador. Las corrientes armónicas características inyectadas al sistema son de orden $(12n (\pm) 1)$.

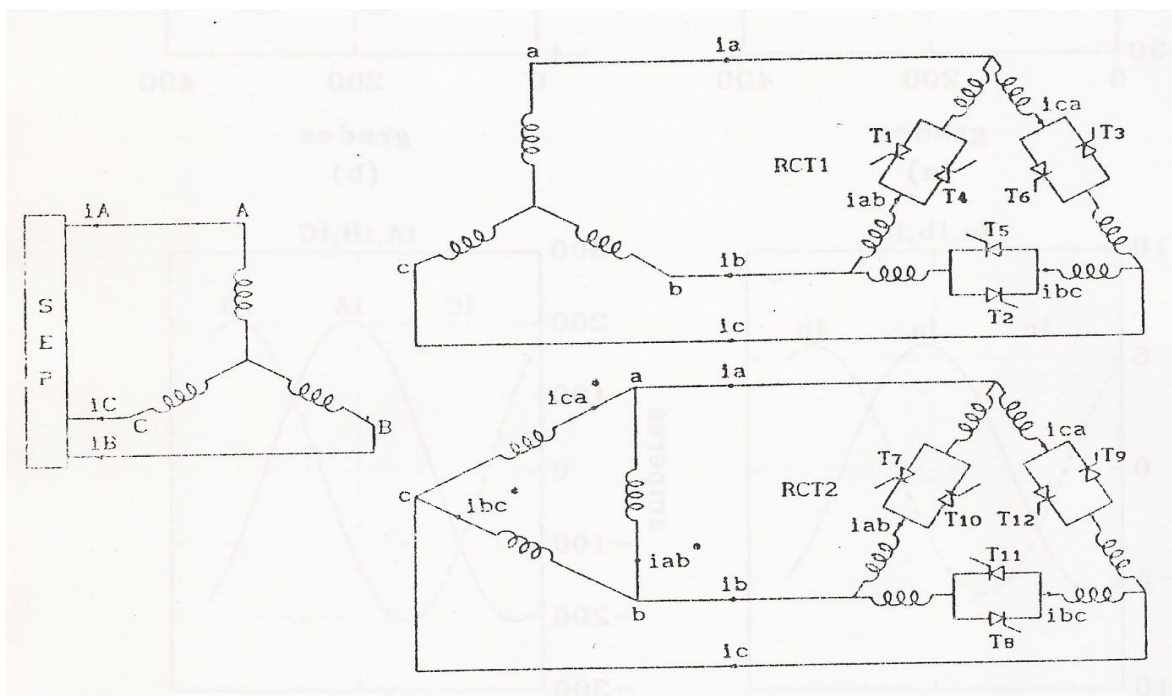


Figura 4.10 Compensador estático tipo RCT con arreglo de 12 pulsos

4.4.4. Compensador Estático combinado CCT/RCT.

El esquema básico de un compensador híbrido CCT/RCT consiste de bancos de unidades CCT (de seis pulsos) conectados en paralelo con una ó más unidades RCT (también de seis pulsos). Una de las ventajas que se tiene respecto a los esquemas CCT y RCT consiste en que el esquema híbrido proporciona los dos tipos de compensación reactiva (inductiva y capacitiva). Otra ventaja es que se tiene un control continuo de la compensación reactiva capacitiva, debido al control de la(s) unidad(s) inductivas, control que no se puede tener en el esquema CCT donde la compensación reactiva se logra en forma discreta.

En la figura 4.11 se muestra un compensador estático combinado CCT/RCT en el cual se dispone de una unidad CCT y una unidad RCT. Cuando solo se requiere compensación inductiva la unidad CCT no opera y el compensador funciona con la unidad RCT. Se tendrá un control continuo de la compensación inductiva desde un valor cero hasta un valor Q_{Imax} controlando el ángulo de disparo de los tiristores del RCT. Cuando se requiere compensación

capacitiva entonces entran en operación ambas unidades. El control continuo de la compensación capacitiva se logra controlando el ángulo de disparo de los tiristores de la unidad RCT.

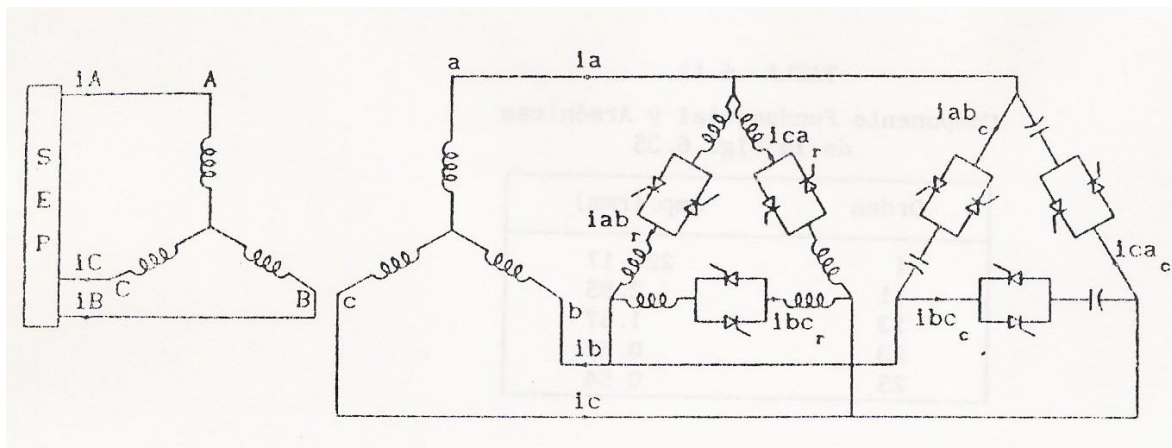


Figura 4.11 Compensador estático combinado CCT/RCT

4.4.5. Compensador combinado CCT/RCT con arreglo de 12 Pulsos.

Otro esquema práctico que se utiliza en este tipo de compensador consiste de un RCT con arreglo de doce pulsos combinado con unidades CCT. En la figura 4.12 se muestra un compensador con este esquema. La ventaja principal de un compensador es que genera pocas armónicas ya que las más importantes son canceladas debido al arreglo de doce pulsos del RCT. La compensación de potencia reactiva inductiva se logra operando simultáneamente ambas unidades RCT. Cuando se requiere compensar potencia reactiva capacitiva entonces se conectan ambas unidades CCT obteniéndose un control continuo de la compensación mediante el control del ángulo de disparo de los tiristores de las unidades RCT.

De acuerdo a la figura 4.12, cuando se compensa potencia reactiva capacitiva, ésta se lleva a cabo conectando los dos CCT. En el devanado secundario (conectado en estrella) el control continuo de la compensación capacitiva se logra con la unidad RCT₁ y en el devanado terciario (conectado en delta) se logra con la unidad RCT₂.

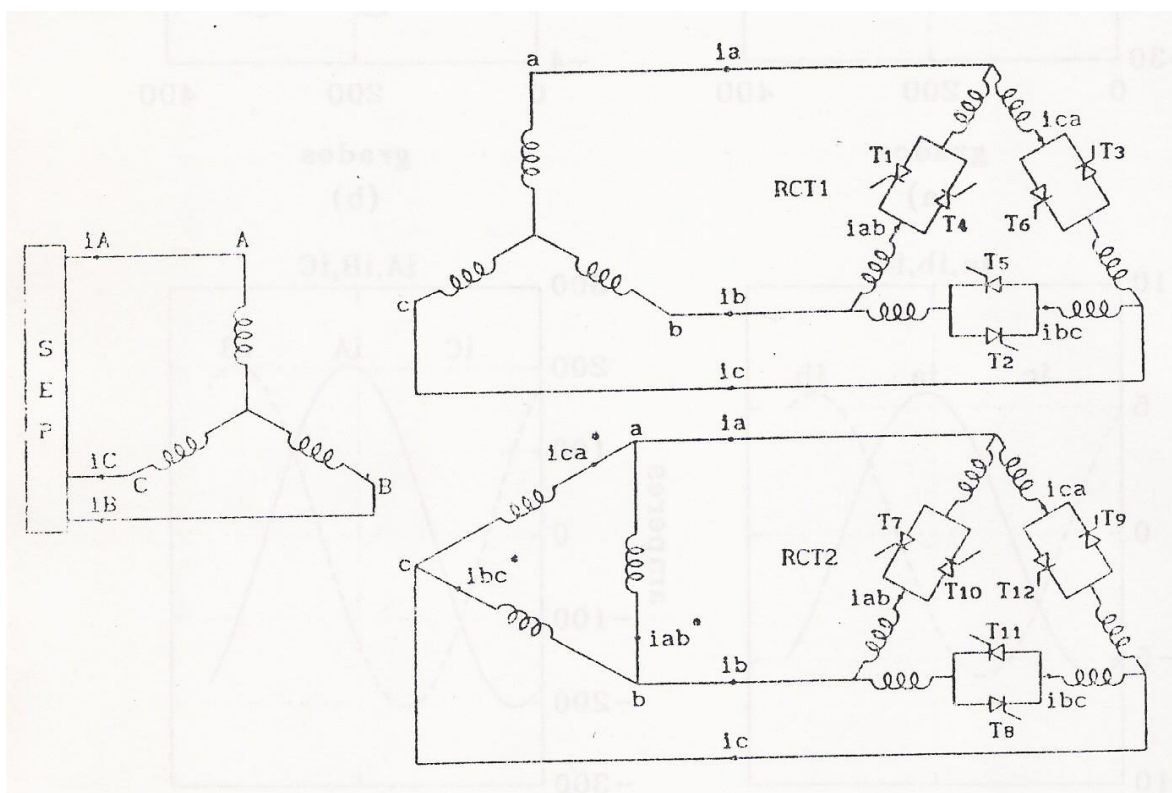


Figura 4.12. Compensador combinado CCT/RCT con arreglo de doce pulsos.