

## TEMA 8 Reguladores e interruptores estáticos de alterna

### Índice

8.1.- Introducción.....	1
8.2.- Interruptores estáticos de corriente alterna .....	1
8.2.1.- Interruptor monofásico de bloqueo natural.....	2
8.2.2.- Interruptores trifásicos de bloqueo natural.....	3
8.2.3.- Interruptores de bloqueo forzado.....	5
8.3.- Reguladores estáticos de corriente alterna.....	5
8.3.1.-Regulador total monofásico de c.a.....	8
8.3.2.- Regulador total trifásico de c.a.....	10

### 8.1.- Introducción.

Los **reguladores estáticos de alterna** son sistemas que transforman la corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable y de la misma frecuencia. En el límite donde la potencia entregada a la carga sea máxima o nula se obtienen **los interruptores estáticos de alterna**.

### 8.2.- Interruptores estáticos de corriente alterna

Un interruptor estático consta de uno o más elementos semiconductores que constituyen el “contacto”, y un circuito de mando que determina la posición del contacto : - abierto (los semiconductores ofrecerán una alta impedancia de entrada al paso de corriente) - cerrado (impedancia prácticamente nula).

Las características generales viene dadas por su elemento básico: el semiconductor de potencia. La principal diferencia entre los interruptores convencionales y los estáticos radica en la forma de efectuar el corte y el restablecimiento del circuito eléctrico. Las ventajas de la inserción de una impedancia alta y no de un corte real del circuito eléctrico son:

1. No hay arco eléctrico, lo cual implica no ruido eléctrico ni desgaste.
2. Son muy rápidos ( pocos microsegundos para el cierre y centenas de microsegundos para la apertura), pudiéndose realizar la conexión o desconexión del circuito en cualquier punto de la onda de tensión o corriente.
3. Su vida media, a diferencia de los convencionales, no depende del número de maniobras, logrando frecuencias de actuación muy elevadas (1kHz).
4. Menor consumo propio para realizar sus accionamientos.
5. Permiten una conexión gradual haciendo un control de fase en los primeros ciclos a fin de evitar las puntas de conexión cuando en la carga hay elementos magnéticos. De igual forma la apertura puede realizarse en un paso por cero de la intensidad para suprimir sobretensiones causadas por los  $di/dt$  en las inductancias.

Sin embargo también tienen sus inconvenientes:

1. La caída de tensión en los estáticos es apreciable (del orden de 1V). Esto da lugar a potencias apreciables de pérdidas que deben ser disipadas. Así mismo, la resistencia del estado de bloqueo no es infinita y existe una pequeña corriente circulante.
2. Los voltajes que pueden bloquear son más pequeños que los convencionales.
3. Son sensibles a sobrecargas, debiéndose diseñar unas redes de protección.
4. Son de mayor coste que los electromecánicos.

Analicemos a continuación los interruptores estáticos de C.A. con tiristores o triacs. En ellos la intensidad cambia de sentido forzada por la fuente de alimentación de corriente alterna. La apertura del interruptor puede obtenerse de dos maneras:

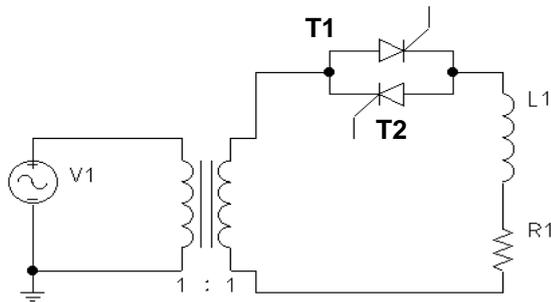
- De un **modo natural** en un paso por cero de la intensidad. Para lo cual sólo es necesario inhibir los pulsos de disparo de los tiristores principales.
- De un **modo forzado**. Pudiéndose dar en cualquier fase de la onda de intensidad, siendo necesarios componente adicionales para el bloqueo de los tiristores principales.

### 8.2.1.- Interruptor monofásico de bloqueo natural.

Representa la solución monofásica más simple y barata al no necesitar componentes adicionales para el bloqueo. El tiempo máximo de apertura viene dado por el semiperíodo de la onda alterna, para conseguir un bloqueo natural. Veamos las configuraciones más representativas.

#### Interruptor de c.a. con tiristores en antiparalelo

En la siguiente figura se muestra dicha configuración, donde T1 y T2 son tiristores principales.



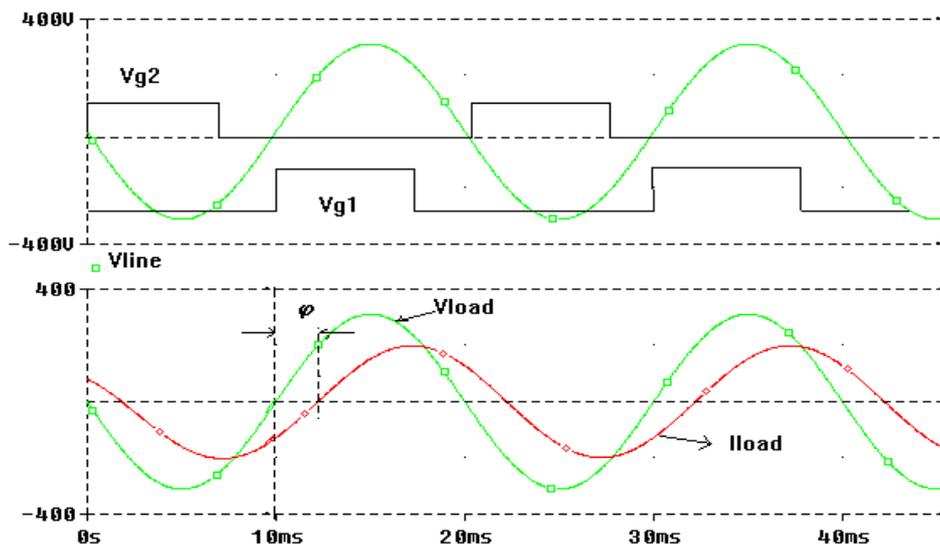
El bloqueo de los tiristores no ofrece ninguna dificultad pues se produce de forma natural en el primer cruce por cero de la corriente una vez eliminadas las señales de puerta. En el encendido los tiristores deben ser cebados alternativamente y simétricamente respecto de la onda de alimentación. Si la carga es resistiva pura (caso poco frecuente) la corriente irá en fase con la tensión, anulándose ambas simultáneamente.

Con carga inductiva, la corriente está retrasada respecto de la tensión de modo que cuando la tensión anódica de T1 pasa por cero, la energía almacenada en la carga tiende a mantenerlo en conducción, por lo que si cebamos entonces a T2 no se producirá su encendido por estar sometido a una tensión inversa dada la conducción de T1.

Mientras un tiristor, su caída de tensión polariza inversamente al otro tiristor, el cual solamente puede cebarse cuando el otro deje de conducir. Por tanto, en la puerta de cada tiristor debe haber impulso de disparo en el instante en que el otro deja de conducir, para lo cual se pueden recurrir a los siguientes métodos:

- Mandar una señal continua a ambas puertas.
- Enviar permanentemente un tren de impulsos de alta frecuencia, para disminuir las pérdidas.
- Mandar a la puerta de cada tiristor un impulso generado al iniciarse su correspondiente semionda de tensión y de duración mayor que  $\varphi_{\text{máx}}/\omega$ , siendo  $\varphi$  el retraso entre I-V y  $\omega$  la frecuencia angular de la fuente de alimentación alterna.

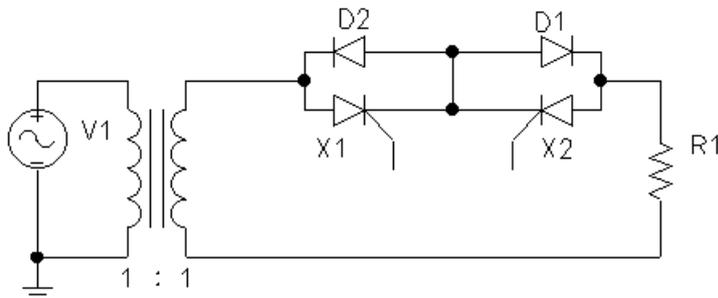
Veamos las formas de onda asociadas a este convertidor c.a./c.a.:





Para seleccionar el tipo de tiristor, consideremos que la máxima tensión que soportan los tiristores es la del pico de la fuente de alimentación, y la intensidad eficaz por cada uno de ellos es  $I_{ef}/\sqrt{2}$ .

**Interruptor de c.a. con tiristores con cátodo común**



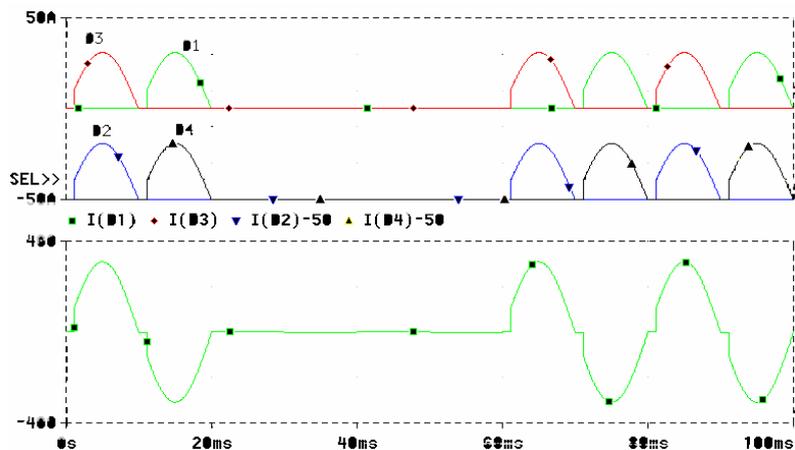
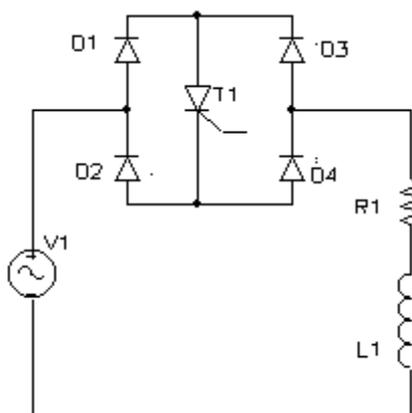
En la configuración del interruptor anterior, la señal de puerta de ambos tiristores debe de estar aislada. Ahora podemos modificar dicha estructura añadiendo dos diodos, de manera que ambos cátodos estén al mismo potencial, lo cual hace que la señal de puerta sea común. La semionda positiva de corriente es conducida por X1 y D1, siendo la negativa por X2 y D21. El

inconveniente reside en el aumento de la caída de tensión en conducción debido a los dos semiconductores, y por tanto mayor potencia a disipar.

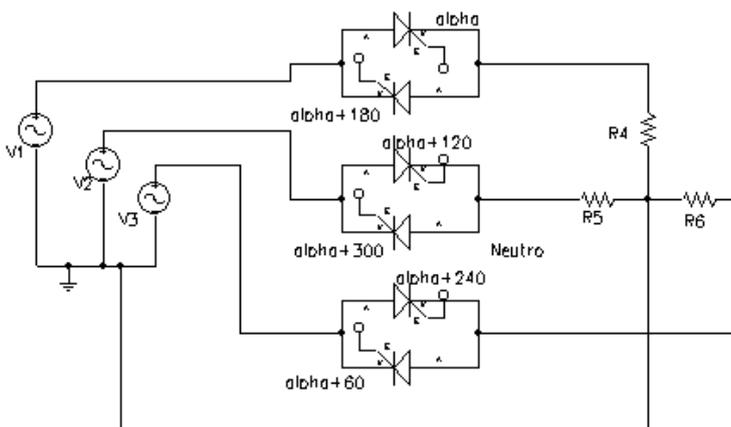
La ventaja que presenta esta configuración reside en la tensión inversa nula de los tiristores cuando se bloquean, gracias a la conducción de su diodo en antiparalelo.

**Interruptor de c.a. con un solo tiristor**

Consta de un solo tiristor y cuatro diodos, de forma que la conducción se realiza por D1,T y D4 o por D2,T y D3 según que el semiciclo de alimentación sea positivo o negativo. En comparación con el montaje anterior, este dispone de mayor caída de tensión y por tanto más pérdidas, pero sin embargo el tiristor conduce continuamente y la corriente eficaz es la misma que la de la carga.



Cuando el disparo debe de hacerse mediante una señal eléctricamente aislada del circuito de potencia, la solución más empleada consiste en aplicar al tiristor señales de alta frecuencia producidos por un oscilador externo y acopladas mediante un transformador.

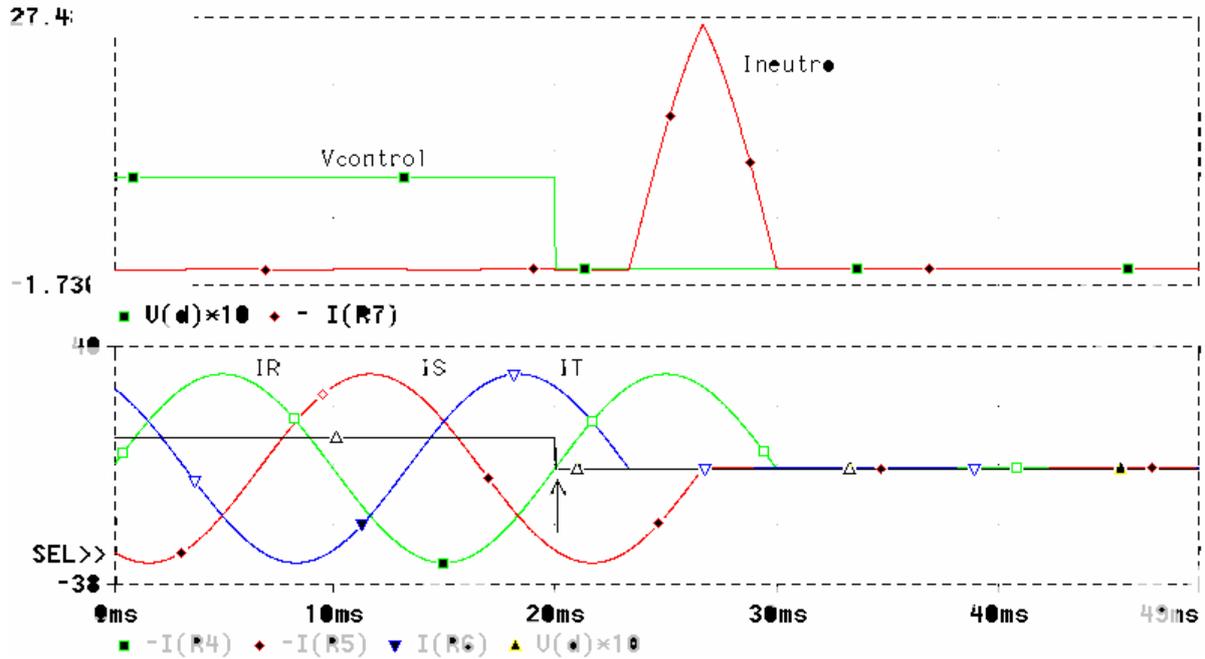


**8.2.2.- Interruptores Trifásicos de bloqueo natural.**

Si la alimentación es trifásica, siempre que el neutro sea accesible, se pueden colocar un par de tiristores en antiparalelo por cada fase, donde se supone la carga equilibrada., tal como se

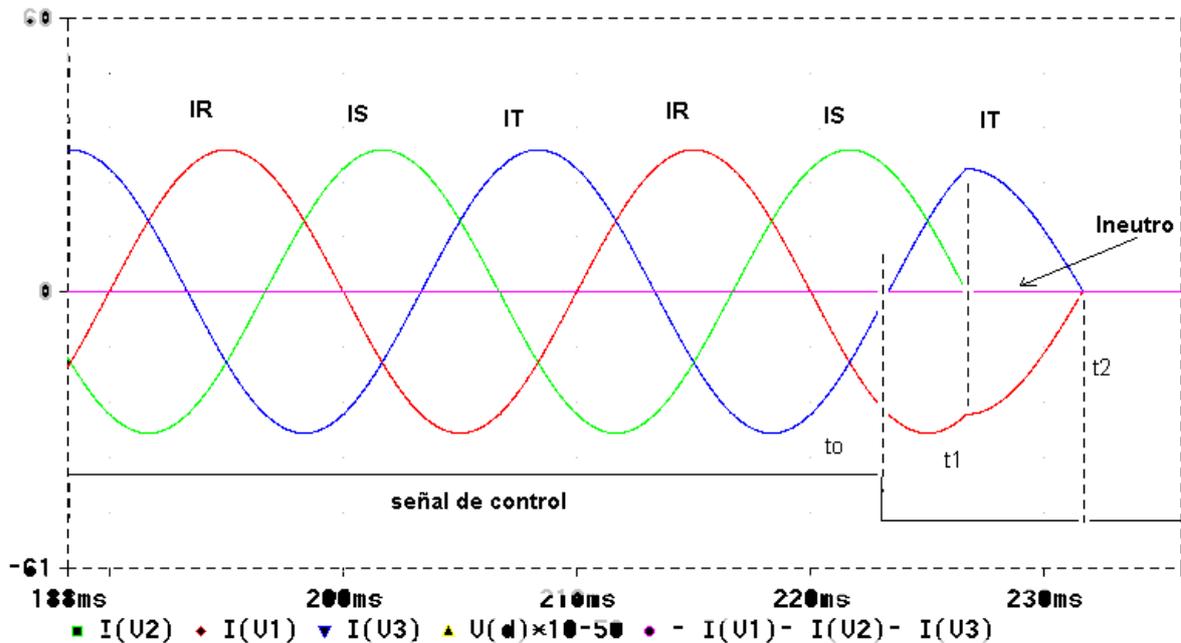
muestra a continuación.

Al igual que en los monofásicos, el máximo tiempo de apertura viene dado por el semiperíodo de la onda.



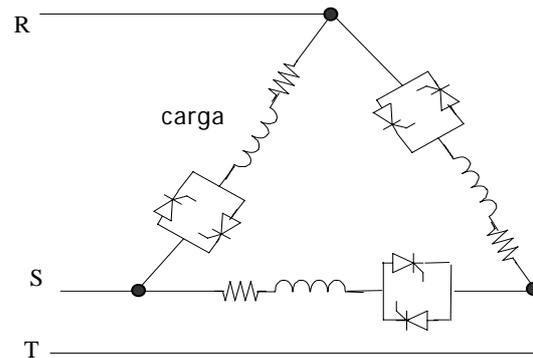
En la simulación anterior se observa el aumento considerable de la corriente por el neutro, cuando se comienza la maniobra de apertura. Esto es debido al desequilibrio entre las fases durante el transitorio de apertura de los interruptores ( $I_{neutro} = I_R + I_S + I_T$ )

☒ Si el neutro no es accesible, se puede sustituir en la configuración anterior un tiristor de cada fase por un diodo, de forma que la suma de las tres intensidades de línea es cero. Con esta configuración, si se mantienen los tiristores bloqueados, no es posible la circulación de corriente por la carga.



Desde el instante  $t_0$  de apertura, hasta  $t_1$  no se anula la corriente por  $i_S$ . Y tras  $t_1$  se verifica que  $i_R = -i_T$  y ambas se anulan a la vez.

Otra configuración que se puede adoptar, consiste en disponer los semiconductores en serie con cada fase, formando la carga en triángulo, tal como se muestra en la siguiente figura. Dado que la corriente de fase en un sistema trifásico es  $1/\sqrt{3}$  de la corriente de línea, ahora en este montaje, las especificaciones de corriente de los tiristores serán menores. Sin embargo en abierto la carga soporta la tensión de fase.

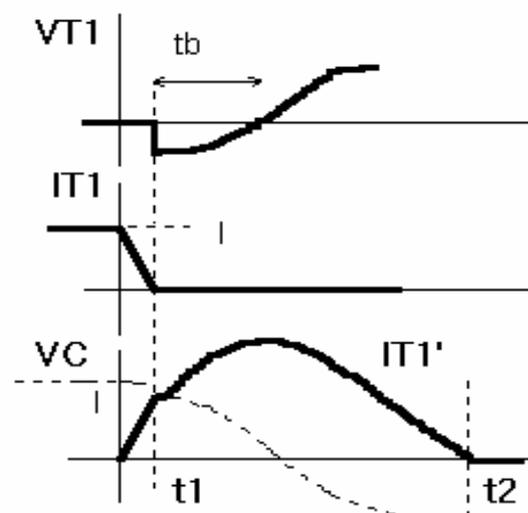
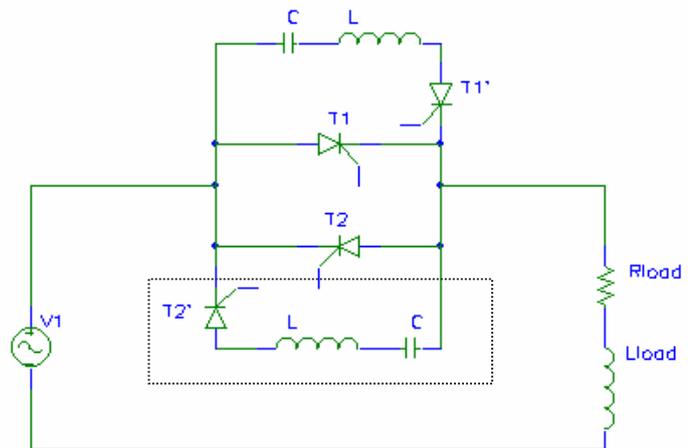


### 8.2.3.- Interruptores de bloqueo forzado.

En ciertas aplicaciones es necesario interrumpir la corriente en cualquier instante, con lo que se recurre a un bloqueo forzado. Las configuraciones vistas anteriormente son aplicables en el caso de conmutación forzada si se les añade unos componentes adicionales. Generalmente estos componentes suelen ser una bobina, un condensador y un tiristor auxiliar por cada tiristor principal.

Una de las configuraciones más empleadas se representa en la siguiente figura, para el caso de un interruptor de c.a. de onda completa monofásico. En paralelo con cada tiristor principal se ha colocado un circuito resonante y un tiristor auxiliar cuyo disparo provoca el bloqueo de cada uno de los tiristores principales.

1. Para la apertura del interruptor es necesario saber cual de los dos tiristores principales está conduciendo. Si conduce T1 hay que disparar a T1' y si es T2 quien conduce habrá que disparar a T2'.
2. Al mismo tiempo que se generan los impulsos del tiristor auxiliar hay que inhibir los del principal. Sin suponer que conducía T1, al disparar a T1' se genera una onda resonante en el circuito C,L,T1' y T1.
3. El pico de esa onda ha de superar el valor de la intensidad a cortar. La onda resonante crece de forma senoidal hasta que iguala a esa intensidad, instante t1, donde se anula la intensidad de T1, y toda la intensidad de carga la da la rama de bloqueo.
4. A partir de t1 y hasta t2 la corriente circula por T1'. La apertura se produce cuando la intensidad se anula, instante t2. Veamos las formas de onda más características.



Hay que destacar que los tiristores auxiliares actúan durante un tiempo tan pequeño que no necesitan radiador. Además se diseñara el circuito LC para que  $T_{resonante} \ll T_{conmt\_natural}$ .

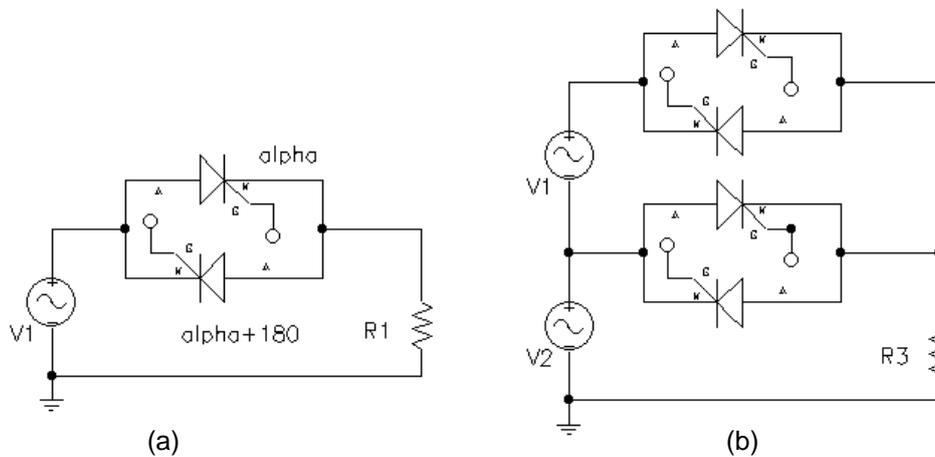
### 8.3.- Reguladores estáticos de corriente alterna.

Son convertidores directos de c.a.\c.a. de la misma frecuencia. Aprovechando el paso natural por cero de la intensidad, los tiristores no necesitarán bloqueo forzado. De acuerdo a **la técnica de control empleada**, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Control de fase.** El control se realiza dentro de cada semiciclo, dejando pasar una parte del mismo.
- **Control integral.** El control se realiza dejando pasar un número entero de semiciclos.

En función de los **límites de regulación** se puede realizar otra clasificación:

- **Reguladores totales.** Donde se permite la máxima variación desde el valor de la tensión del generador de entrada hasta cero. En cualquier instante, el valor instantáneo de la tensión a la salida es la de la entrada o cero. Su configuración se muestra en la siguiente figura (a).
- **Reguladores diferenciales.** La tensión de salida tiene un margen más estrecho de variación, necesitando un autotransformador. El valor instantáneo de la tensión a la salida es bien la tensión máxima  $V1+V2$  o la mínima  $V2$ . Su configuración se muestra en la siguiente figura (b).



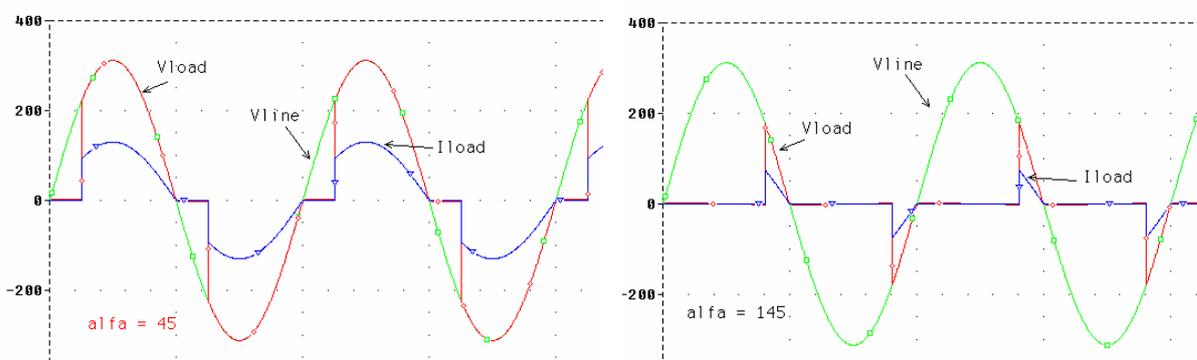
Veamos el funcionamiento de cada uno de estos tipos. Supongamos la carga resistiva, con lo que la tensión y corriente estarán en fase.

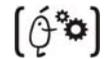
### Regulador total con control de fase

Tras el comienzo de cada semiciclo, se mantiene bloqueado al correspondiente tiristor, al que se le envía un impulso con un retardo  $\alpha/\omega$ . El ángulo  $\alpha$  de control, permite la variación de la potencia entregada a la carga. Los tiristores se bloquean de forma natural al anularse su intensidad. La principal ventaja de este regulador es su simplicidad. Sin embargo dispone de los siguientes inconvenientes:

- Disminución del factor de potencia, pues el ángulo  $\alpha$  hace que se retrase la corriente respecto de la tensión de entrada.
- La intensidad de la carga dispone de los armónicos de todos los órdenes.
- Elevados  $dv/dt$  y  $di/dt$  que producen ruido electromagnético.

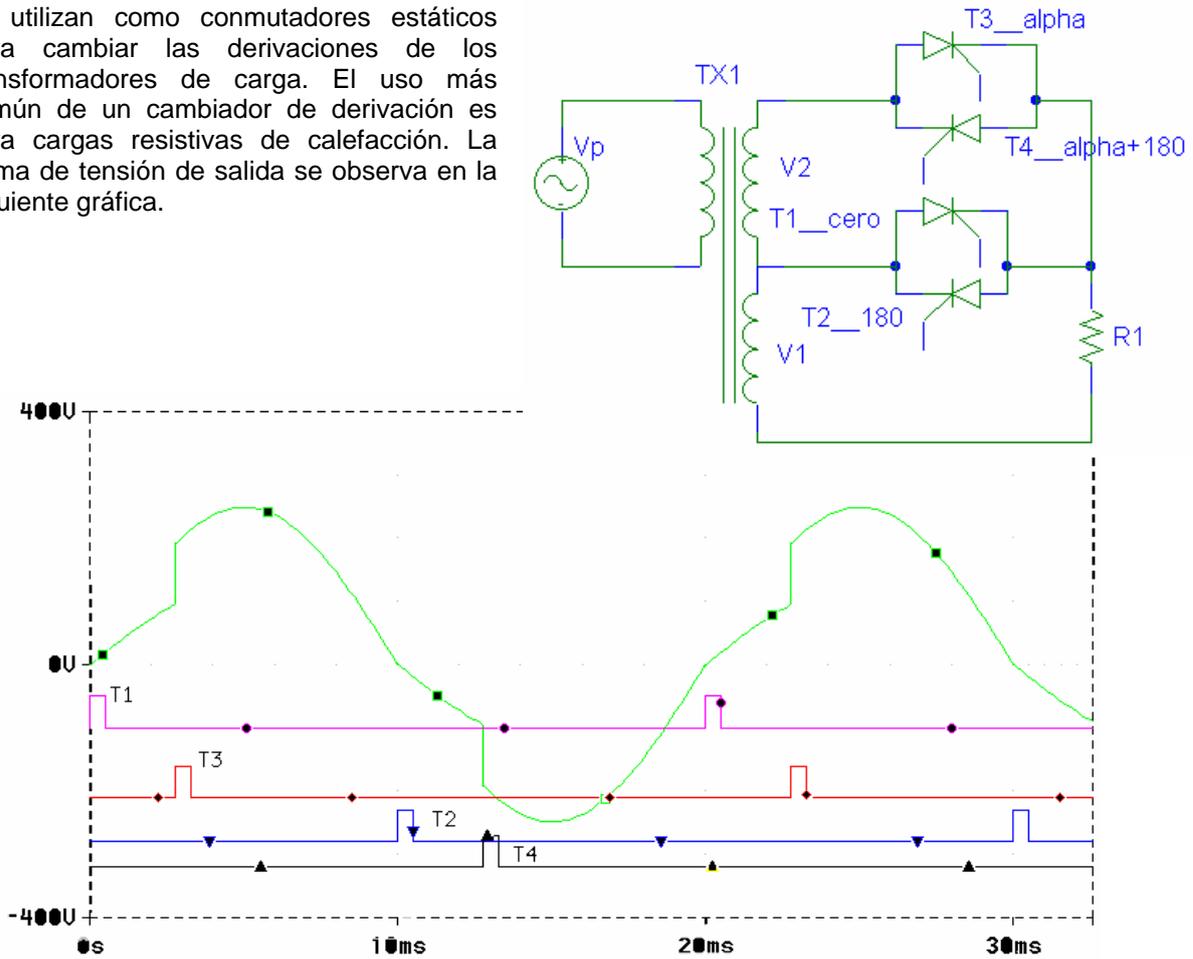
Veamos a continuación las formas de onda asociadas para distintos ángulos de control.





**Regulador diferencial con control de fase**

Su utilización es recomendada cuando los márgenes de regulación son más estrechos, y para lograr menor contenido armónico. También se utilizan como conmutadores estáticos para cambiar las derivaciones de los transformadores de carga. El uso más común de un cambiador de derivación es para cargas resistivas de calefacción. La forma de tensión de salida se observa en la siguiente gráfica.



Se puede controlar los pulsos de puerta de los tiristores, para variar el voltaje de la carga dentro de tres rangos posibles:

- **0 < Vo < V1** Aquí se desactivan los tiristores T3 y T4. Y los tiristores T1 y T2 actúan como un regulador monofásico. El voltaje eficaz en la carga resulta igual a:

$$V_o = V_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left( \pi - \alpha + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2} \right)}$$

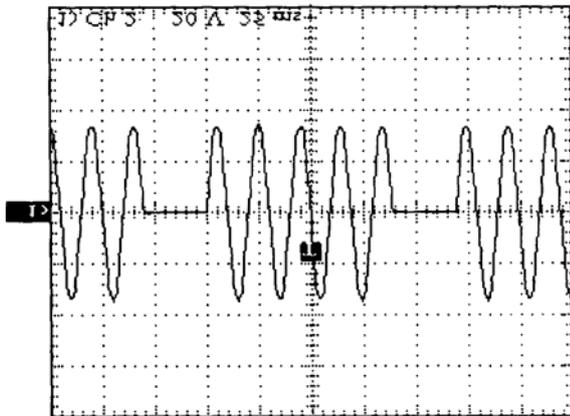
- **0 < Vo < (V1 + V2)** Ahora se desactivan T1 y T2 y funcionan T3 y T4 variando alfa desde 0 a  $\pi$ .

- **V1 < Vo < (V1 + V2)** Este modo es el representado en la simulación anterior. T1 se activa en cero y el voltaje secundario V1 aparece en la carga. Después el tiristor T3 se dispara en  $\alpha$  y el T1 se queda con polarización negativa debido al voltaje de V2, desactivándose y apareciendo en la carga V1+V2. En  $wt = \pi$  T3 se corta y T2 es disparado, apareciendo V1 en la carga. En  $wt = \pi + \alpha$  se dispara T4, cortándose T2 y apareciendo en la carga V1+V2. Ahora el voltaje eficaz aplicado a la carga será igual a:

$$V_o = \sqrt{\frac{V_1^2}{\pi} \cdot \left( \alpha - \frac{\text{sen } 2\alpha}{2} \right) + \frac{(V_1 + V_2)^2}{\pi} \cdot \left( \pi - \alpha + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2} \right)}$$

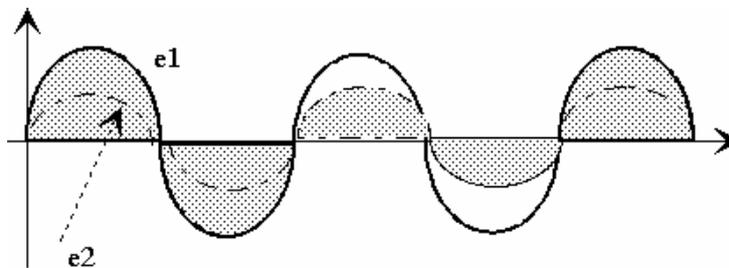
**Regulador total con control integral**

En estos reguladores la potencia entregada a la carga puede modificarse cambiando la relación entre el número entero de semiciclos que deja pasar a la carga y en número que no deja. Las variaciones de di/dt y dv/dt son más suaves, disminuyendo el contenido armónico. Sin embargo existen subarmónicos generados por el propio funcionamiento.

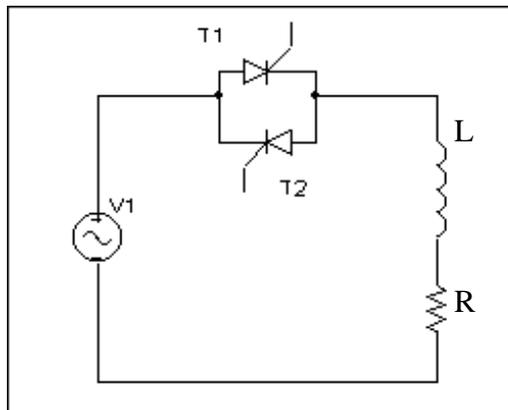


**Regulador diferencial con control integral**

Este tipo de circuitos es menos habitual, dada su complejidad en el control diferencial, pues hay que detectar los pasos por cero de la corriente y, además, en el entorno de estos pasos los impulsos de disparo de todos los tiristores deben estar inhibidos para dar tiempo a la recuperación del tiristor que ha de bloquearse. Veamos a continuación la forma de onda que se obtiene a la salida.



**8.3.1.-Regulador total monofásico de c.a.**

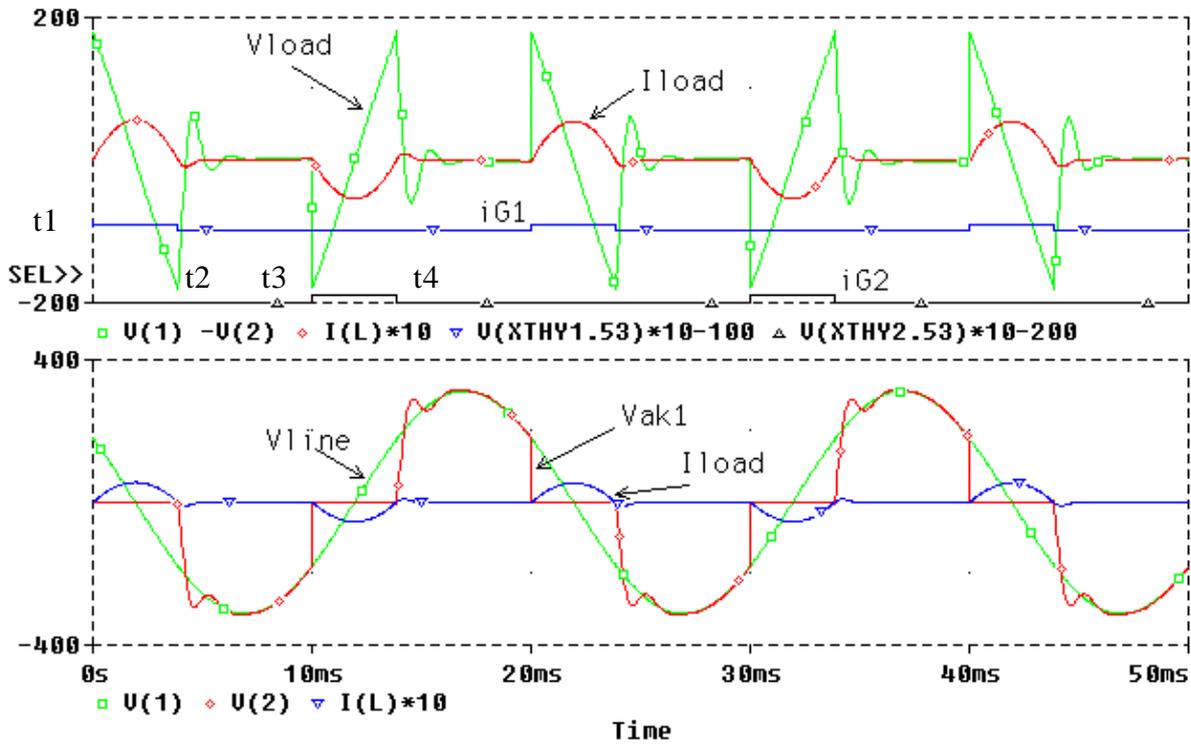
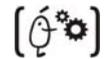


Corresponde al tipo de regulador más empleado, donde realizaremos el estudio de su funcionamiento con carga inductiva. El circuito se representa en la siguiente figura.

La carga del circuito está formada por una resistencia en serie con una inductancia, constituyendo una impedancia de módulo:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \text{ y de argumento } \varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Veamos a continuación las formas de onda de dicho regulador con control de fase.



En el instante t1, en el cual se dispara T1, se le aplica una tensión  $e = V_p \sin(\omega t)$  a la carga. Para hallar la expresión de la corriente, resolveremos la siguiente ecuación diferencial:

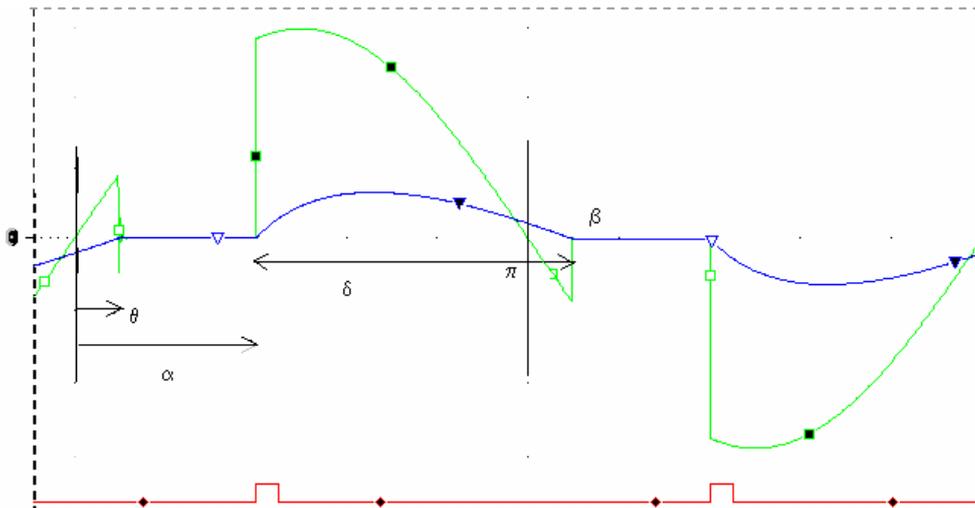
$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = V \cdot \sin(\omega t) \quad \text{con solución:} \quad i(t) = \frac{V}{Z} \cdot \left( \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \left( t - \frac{\alpha}{\omega} \right)} \right)$$

Llamando al ángulo de conducción  $\gamma$ , la corriente se anulará para un ángulo  $\beta = \alpha + \gamma$ , y sustituyendo en la ecuación anterior  $\omega t = \beta = \alpha + \gamma$  se obtiene:

$$\sin(\alpha + \gamma - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\gamma}{\omega} \right)} = 0$$

Dado que el máximo ángulo de conducción  $\gamma$  es  $\pi$ , si sustituimos en la ecuación anterior se obtiene:

$$\sin(\alpha + \pi - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \left( \frac{\pi}{\omega} \right)} = 0 \quad \text{cuya solución principal es:} \quad \alpha = \varphi$$



Esto significa que si  $\alpha < \varphi$ , resulta que el ángulo de conducción sería mayor que  $\pi$  y por tanto el otro tiristor no se dispararía, luego la condición que debe cumplirse es que el ángulo de disparo  $\alpha$  sea igual o mayor al ángulo  $\varphi$  de la carga.

Si el disparo se realiza para un  $\alpha > \varphi$ , y el impulso fuera de corta duración, el segundo tiristor no entraría en funcionamiento, comportándose el circuito como un rectificador de media onda. Para evitarlo, se realiza un disparo de larga duración o un tren de impulsos de forma que si, en el inicio del impulso de disparo se verifica que  $\alpha < \varphi$  el tiristor no se disparará al cabo de una serie de períodos hasta que  $\omega t = \varphi$  con lo que para  $0 < \alpha < \varphi$  se conserva la misma corriente de salida.

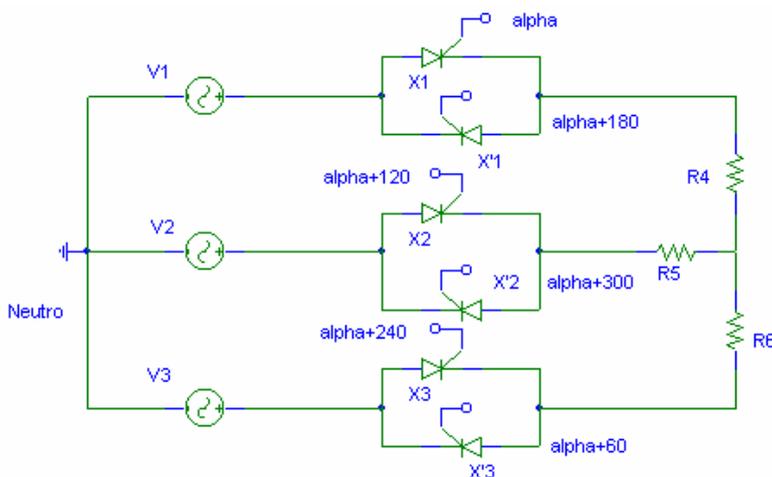
la corriente se salida que se obtendría, resulta de sustituir  $\alpha = \varphi$  en la expresión general, resultando:

$$i(t) = \frac{V}{|Z|} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad \text{que representa la misma corriente que si no existieran los tiristores y aplicáramos la carga directamente al generador.}$$

El voltaje eficaz en la carga se podrá calcular como:

$$V_{0\_RMS} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2V_s^2 \cdot \text{sen}^2(\omega t) \cdot d\omega t} = \sqrt{\frac{Vs^2}{\pi} \cdot (\beta - \alpha) + \frac{(Vs)^2}{\pi} \cdot \left( \frac{\text{sen}2\alpha}{2} - \frac{\text{sen}2\beta}{2} \right)}$$

### 8.3.2.- Regulador total trifásico de c.a.



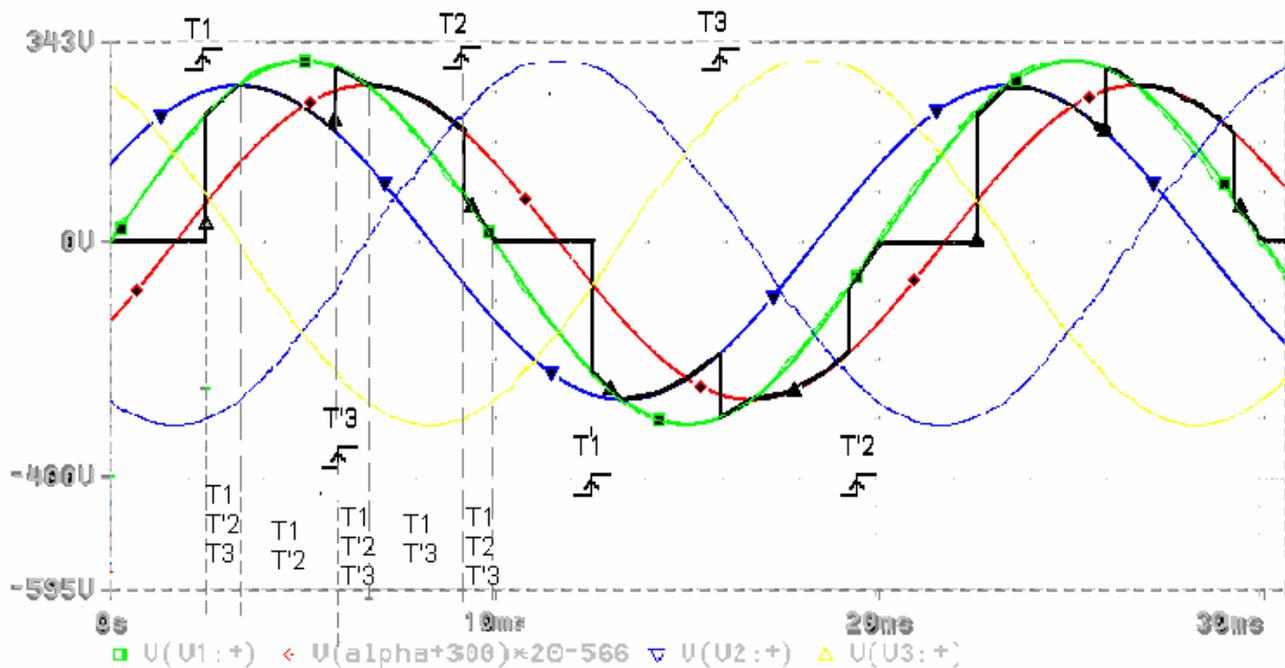
Quando en nuestro sistema el neutro de la carga está conectado al del generador, el sistema se reduce a tres reguladores monofásicos independientes. Cuando ambos neutros no están unidos, puede emplearse un regulador semicontrolado o uno totalmente controlado en el que en cada fase se controla la intensidad en los dos sentidos. Vamos a detallar el funcionamiento de una de las configuraciones más empleadas : **el regulador totalmente controlado con carga en estrella sin neutro**, la cual por simplificar la supondremos

equilibrada y resistiva, estudiando su regulación por control de fase. Estructura que se representa en la figura anterior.

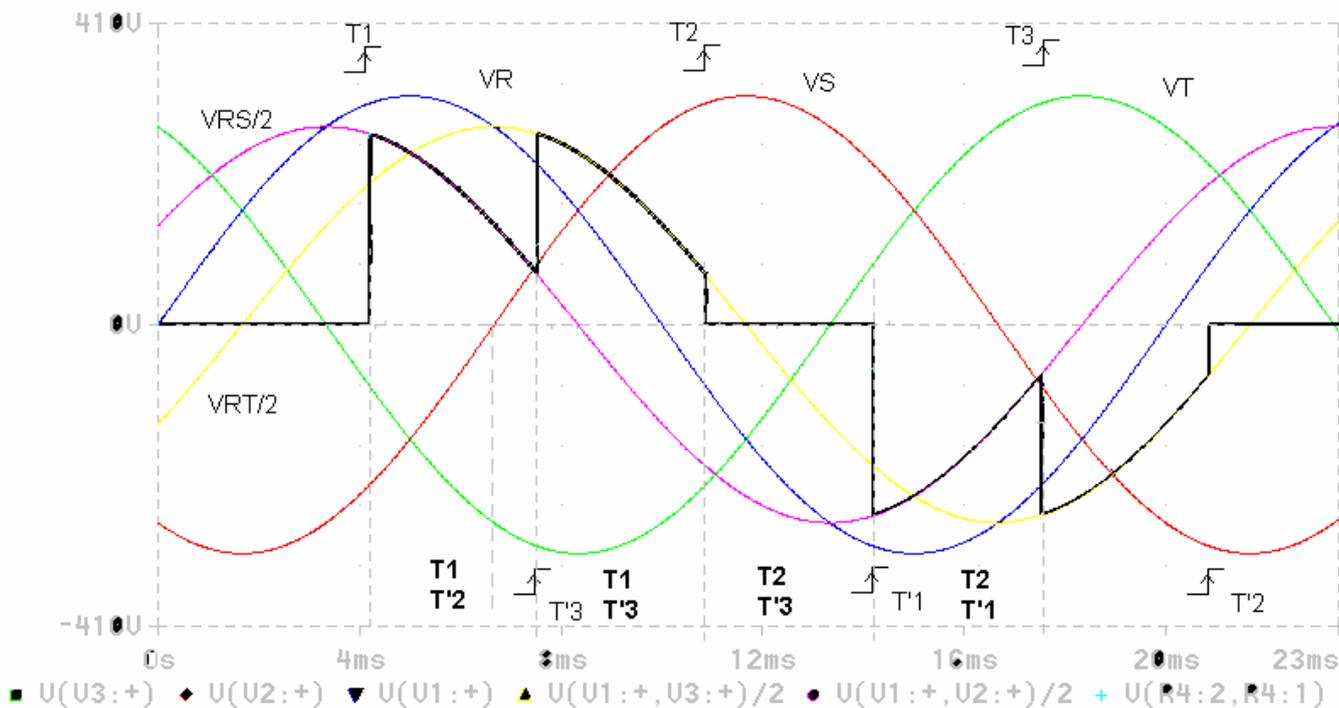
Los impulsos dirigidos a las parejas de tiristores de la misma fase, deben estar desfasados entre sí un ángulo  $\pi$  y los de una fase con respecto a otra lo mismo que los generadores correspondientes. Veamos a continuación las formas de onda cuando  $\alpha$  varia:

$$\varphi < \pi/3 \quad (\alpha < \pi/6)$$

Tal como se observa en la figura siguiente, como sólo conducen los tiristores de dos fases, la tensión simple en bornes de la carga resistiva es igual a la mitad de la tensión compuesta de la red trifásica, correspondientes a las fases que conducen la corriente. Cuando los tiristores de las tres fases conducen las mismo tiempo, la tensión simple en bornes de la carga es igual a la tensión simple de la red trifásica, a condición de que la carga sea simétrica.



$$\pi/3 < \varphi < \pi/2 \quad (\pi/6 < \alpha < \pi/3)$$



En la figura anterior se muestra como en todo momento están conduciendo dos tiristores y por consiguiente, no hay ningún intervalo en el que la tensión de la carga coincida con la de la línea. El ángulo de disparo  $\alpha$  puede variar desde cero hasta el punto en el que la tensión entre fases VAB se anule, es decir,  $\alpha = \pi - \pi/6 = 5\pi/6$ , en cuyo caso la tensión de salida es nula.

Veamos el último caso donde:

$$\pi/2 < \varphi < 5\pi/6:$$

La tensión eficaz de la salida se puede obtener como:

$$0 \leq \varphi \leq 60^\circ$$

$$60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

$$\dots \dots \dots \sqrt{1 - (\pi - \varphi) \sin(2\varphi)} \dots \dots \dots \sqrt{1 - (\pi - \sqrt{3} \cdot \cos(2\varphi) - \frac{3 \sin(2\varphi)}{16})}$$

