

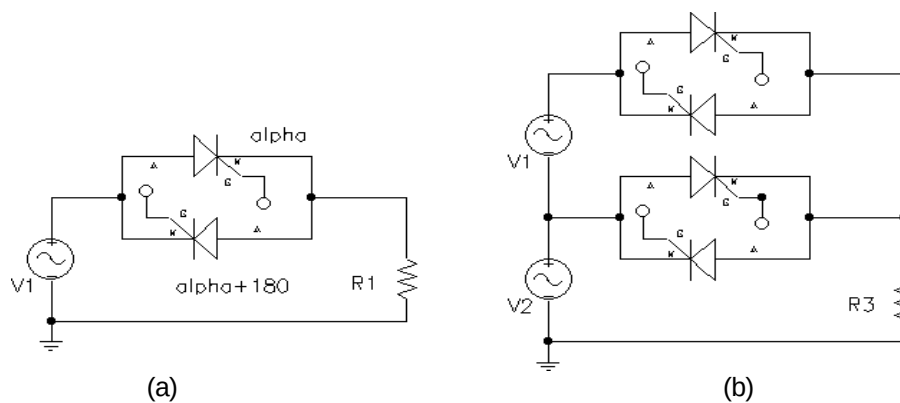
Reguladores estáticos de corriente alterna

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).



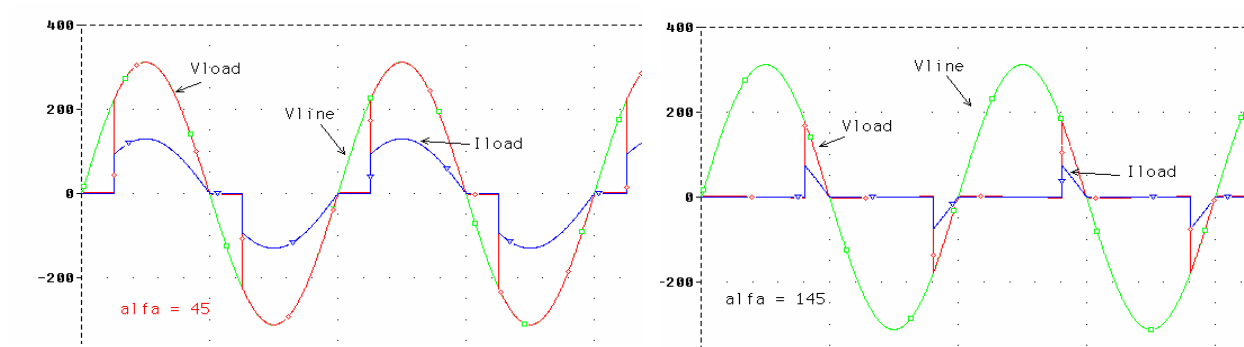
Veamos el funcionamiento de cada uno de estos tipos. Supongamos la carga resistiva, con lo que la tensión y corriente estarán en fase.

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 α/ω . El ángulo α 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:

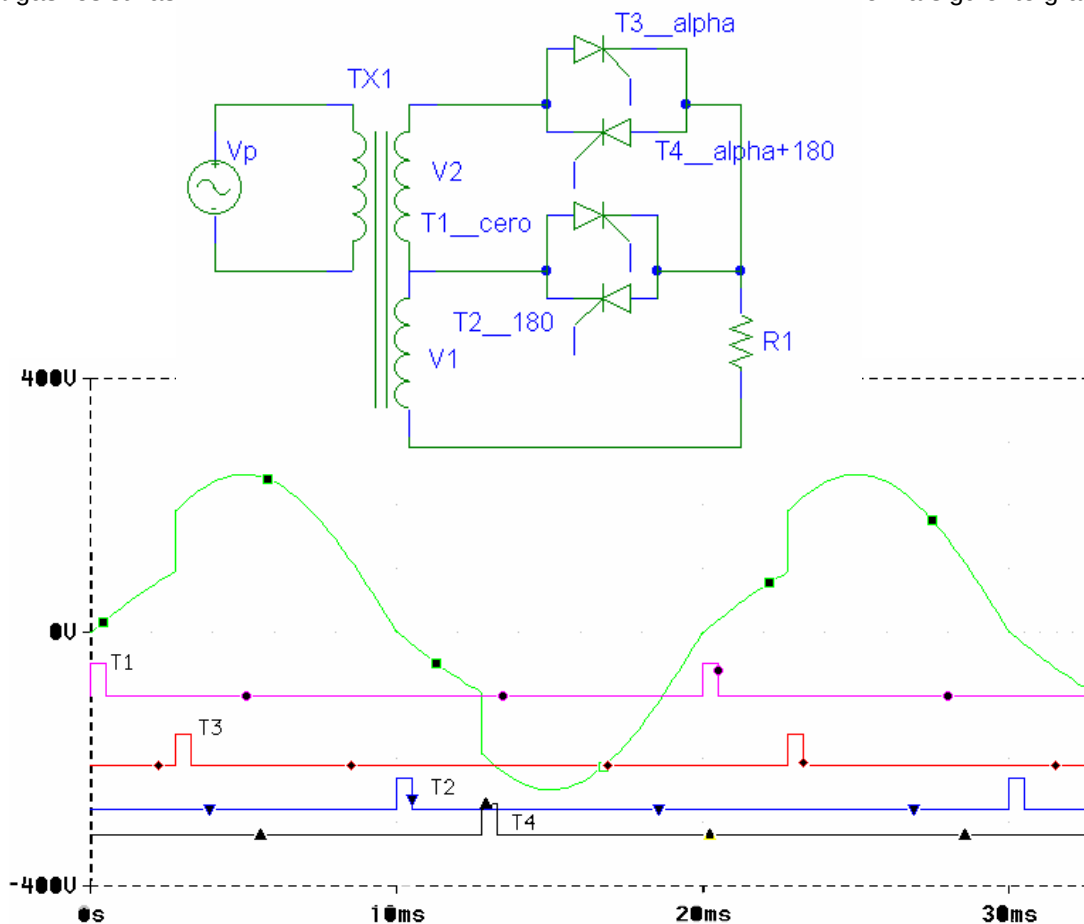
- Disminución del factor de potencia, pues el ángulo α hace que se retrase la corriente respecto de la tensión de entrada
- La intensidad de la carga dispone de los armónicos de todos los órdenes.
- Elevados dv/dt y di/dt que producen ruido electromagnético.

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:

- **$0 < V_o < V_1$** 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:

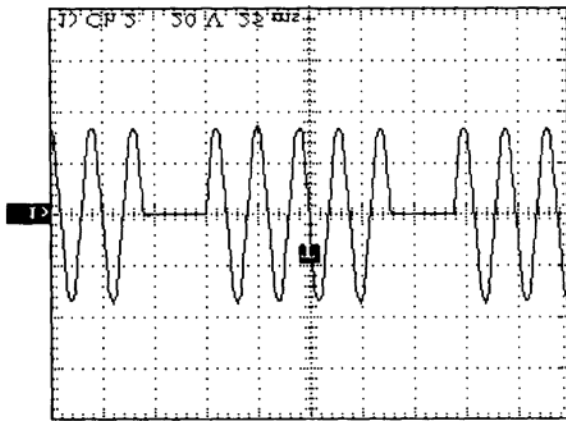
$$V_o = V_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}$$

- $0 < V_o < (V_1 + V_2)$ Ahora se desactivan T1 y T2 y funcionan T3 y T4 variando alfa desde 0 a π .
- $V_1 < V_o < (V_1 + V_2)$ 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 alfa y el T1 se queda con polarización negativa debido al voltaje de V2, desactivándose y apareciendo en la carga $V_1 + V_2$. En $\omega t = \pi$ T3 se corta y T2 es disparado, apareciendo V1 en la carga. En $\omega t = \pi + \alpha$ se dispara T4, cortándose T2 y apareciendo en la carga $V_1 + V_2$. Ahora el voltaje eficaz aplicado a la carga será igual a:

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

Regulador total con control integral

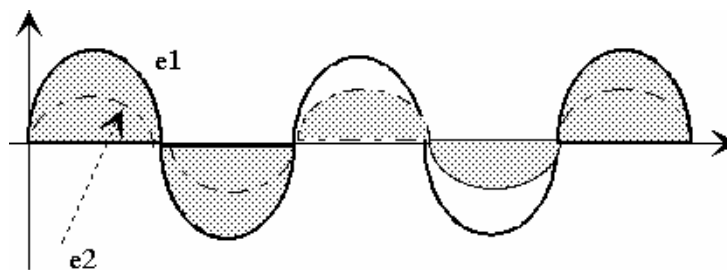
En estos reguladores la potencia entregada a la carga puede modificarse cambiando la relación entre el número entero de semiciclos que deja pasar a la carga y en número que no deja. Las variaciones de di/dt y dv/dt son más suaves, disminuyendo el contenido armónico. Sin embargo existen subarmónicos generados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



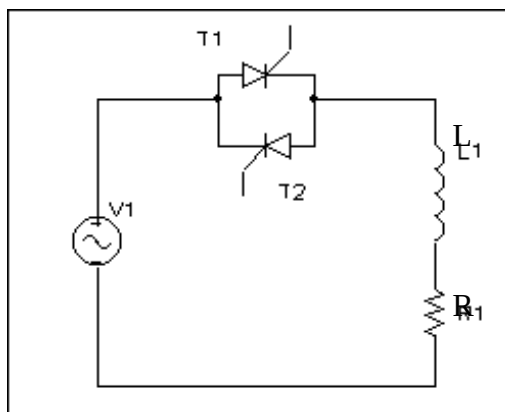
Regulador diferencial con control integral

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.



Regulador total monofásico de c.a.

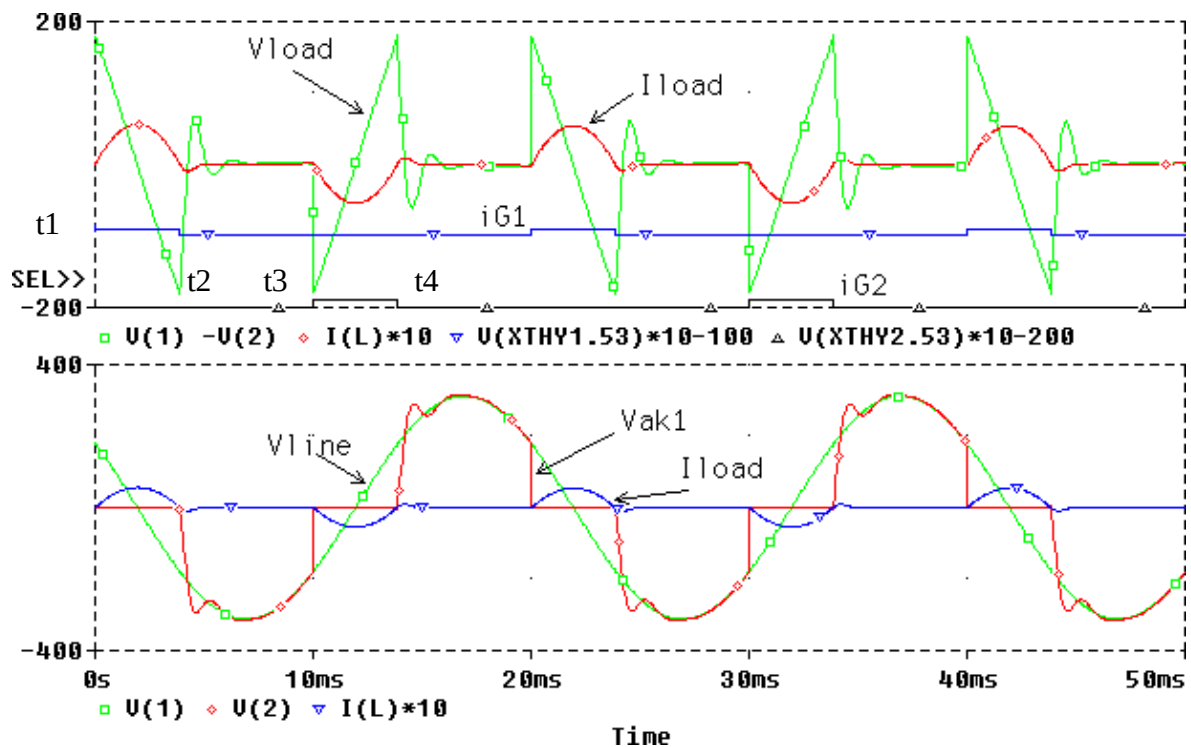


Corresponde al tipo de regulador más empleado, donde realizaremos el estudio de su funcionamiento con carga inductiva. El circuito se representa en la siguiente figura.

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 $e = V_{ps} \sin(\omega t)$ a la carga. Para hallar la expresión de la corriente, resolveremos la siguiente ecuación diferencial:

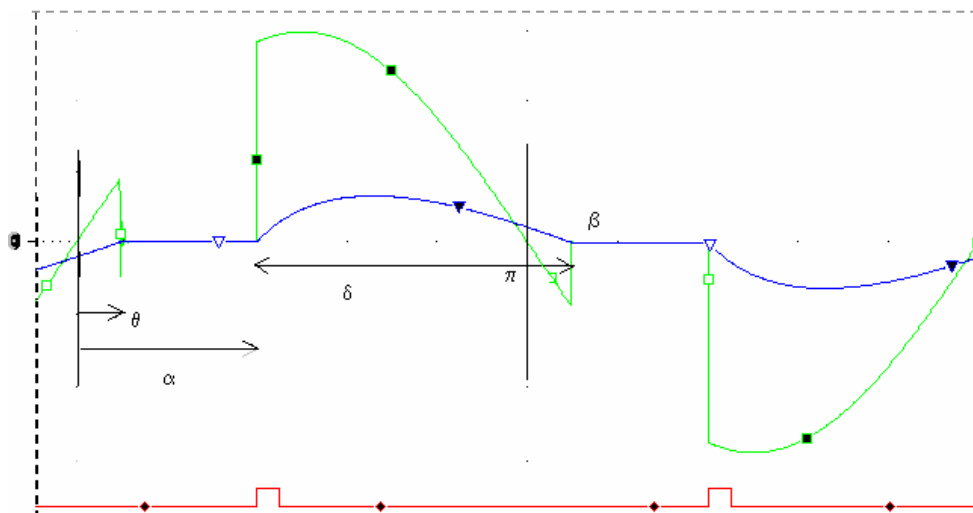
$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = V \cdot \sin(\omega t) \quad \text{con solución:} \quad i(t) = \frac{V}{Z} \cdot \left\{ \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L} \left(t - \frac{\alpha}{\omega} \right)} \right\}$$

Llamando al ángulo de conducción γ , 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 γ es π , si sustituimos en la ecuación anterior se obtiene:

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



Esto significa que si $\alpha < \varphi$, resulta que el ángulo de conducción sería mayor que π y por tanto el otro tiristor no se dispararía, luego la condición que debe cumplirse es que el ángulo de disparo α sea igual o mayor al ángulo φ 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 de salida que se obtendría, resulta de sustituir $\alpha = \varphi$ en la expresión general, resultando:

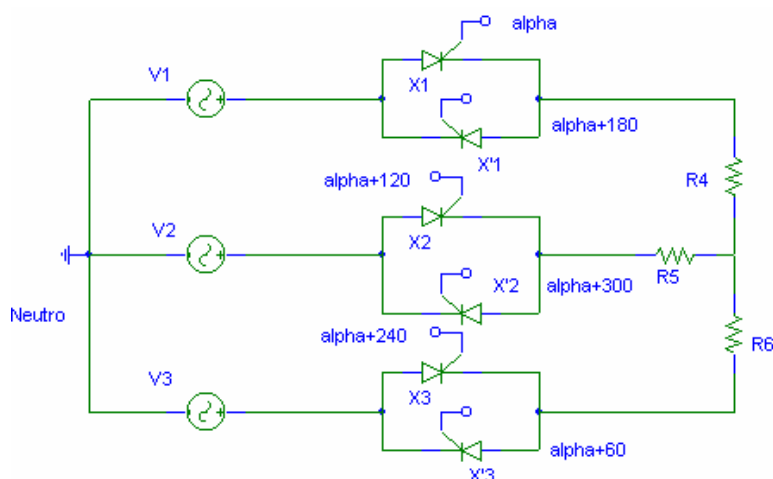
$$i(t) = \frac{V}{|Z|} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{que representa la misma corriente que si no existieran los tiristores y}$$

aplicáramos la carga directamente al generador.

El voltaje eficaz en la carga se podrá calcular como:

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

Regulador total trifásico de c.a.



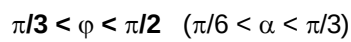
Cuando en nuestro sistema el neutro de la carga está conectado al del generador, el sistema se reduce a tres reguladores monofásicos independientes. Cuando ambos neutros no están unidos, puede emplearse un regulador semicontrolado o uno totalmente controlado en el que en cada fase se controla la intensidad 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 π y los de una fase con respecto a otra lo mismo que los generadores correspondientes. Veamos a continuación las formas de onda cuando α 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.



Veamos el último caso donde:

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

La tensión eficaz de la salida se puede obtener como:

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

$$V_o = \sqrt{6} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\varphi}{4} + \frac{\sin(2\varphi)}{8} \right)}$$

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

$$V_o = \sqrt{6} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{12} + \frac{\sqrt{3} \cdot \cos(2\varphi)}{16} + \frac{3 \sin(2\varphi)}{16} \right)}$$

$$90^\circ \leq \varphi \leq 150^\circ$$

$$V_o = \sqrt{6} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{5\pi}{24} + \frac{\sqrt{3} \cdot \cos(2\varphi)}{16} + \frac{\sin(2\varphi)}{16} - \frac{\varphi}{4} \right)}$$

