

Capítulo 6

Convertidores CA/CA directos

6.1 Introducción

En este capítulo se estudiará un tipo de convertidor que, a partir de una tensión de entrada alterna, produce en la salida una tensión también alterna pero de características distintas, sea en valor eficaz, sea en frecuencia, o en ambas.

Cuando únicamente se altera el valor de la tensión alterna (CA), tenemos los llamados reguladores de tensión alterna (o reguladores de potencia alterna) y los que permiten obtener una salida con frecuencia distinta a la presente en la entrada, son los cicloconvertidores. En este capítulo se estudian en detalle los reguladores de tensión alterna.

6.2 Reguladores de tensión alterna

Los reguladores de tensión alterna son convertidores estáticos de energía que permiten variar la potencia entregada a una determinada carga. En general, se controla la potencia mediante el control del valor eficaz de la tensión suministrada a la carga. De ahí el nombre de *reguladores* o *controladores* de tensión alterna

Las aplicaciones más comunes de éste tipo de reguladores son:

- Calentamiento industrial (control de temperatura);
- Control de intensidad luminosa en lámparas incandescentes;
- Accionamiento de motores de CA;
- Arranque suave de motores de inducción;
- Compensación de energía reactiva
- Control de transformadores

Los dispositivos semiconductores de potencia empleados en tales convertidores son,

típicamente, tiristores, trabajando en conmutación natural.

En aplicaciones de baja potencia se puede hacer uso de TRIACs, en cuanto que para potencias más elevadas se utilizan 2 SCRs en antiparalelo como se muestra en la figura 6.1.

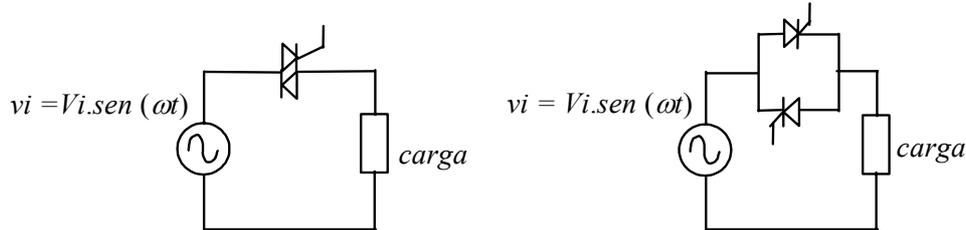


Figura 6.1. Regulador de tensión (monofásico) con TRIAC y con SCRs.

Si bien existen diversos modos de control para los reguladores de corriente alterna, los más utilizados son:

- Control “on-off”, de paso por cero o por secuencia.
- Control por ángulo de fase.
- Control por amplitud.

6.2.1 Control “ON-OFF”, de paso por cero o por secuencia

El circuito de potencia es el que se muestra en la figura 6.1. El control por secuencia consiste en conectar o desconectar la alimentación de la carga (en general una resistencia) durante un determinado número de ciclos de la tensión de entrada al regulador. De hecho, la regulación se consigue anulando la tensión en la carga durante ciertos periodos de la tensión de alimentación. El intervalo de conducción y el de bloqueo del interruptor es típicamente de varios ciclos de la red. Este tipo de control se utiliza en aplicaciones que tienen una gran inercia mecánica o una elevada constante de tiempo térmica, es decir, se utiliza en situaciones en que la constante de tiempo de la carga es mucho mayor que el período de la red CA, (por ejemplo, en el calentamiento industrial o en el control de velocidad de grandes motores).

Dado que se suelen utilizar tiristores como elementos de control, su disparo se realiza en el paso por cero de la tensión de alimentación. Ello permite una reducción importante en el número de armónicos generados. El control electrónico lleva incorporado un detector de paso por cero y un contador de semiperíodos para saber en qué instante se debe disparar cada tiristor.

Un método para conseguir el control por secuencia es usar un generador de señal triangular de frecuencia fija que se compara con una señal continua de control. La señal diente de sierra establece la base de tiempo del sistema. La señal de referencia proviene del circuito de control de la variable a controlar (por ejemplo del circuito de control de la temperatura). La potencia entregada a la carga varía proporcionalmente a esta señal. La figura 6.2 ilustra este funcionamiento. Durante “n” ciclos la carga permanece conectada a la alimentación, en

cuanto queda “m” ciclos permanece desconectada.

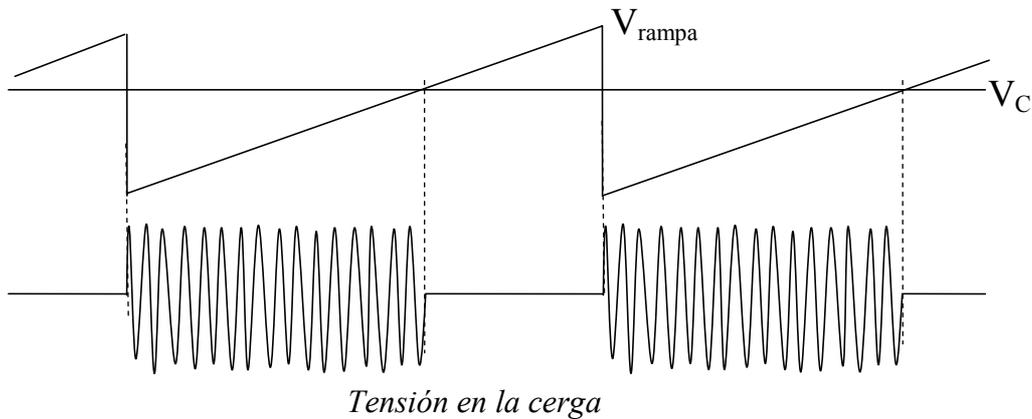


Fig. 6.2. Control por secuencia.

La figura 6.3 muestra una simulación de un control “ON-OFF”, en el que se conecta la tensión de red a la carga durante 3 (n) periodos completos y se desconecta durante 2 (m). La gráfica inferior representa los pulsos que se dan a los SCRs. Las otras dos gráficas muestran la tensión de entrada y la tensión de salida del convertidor.

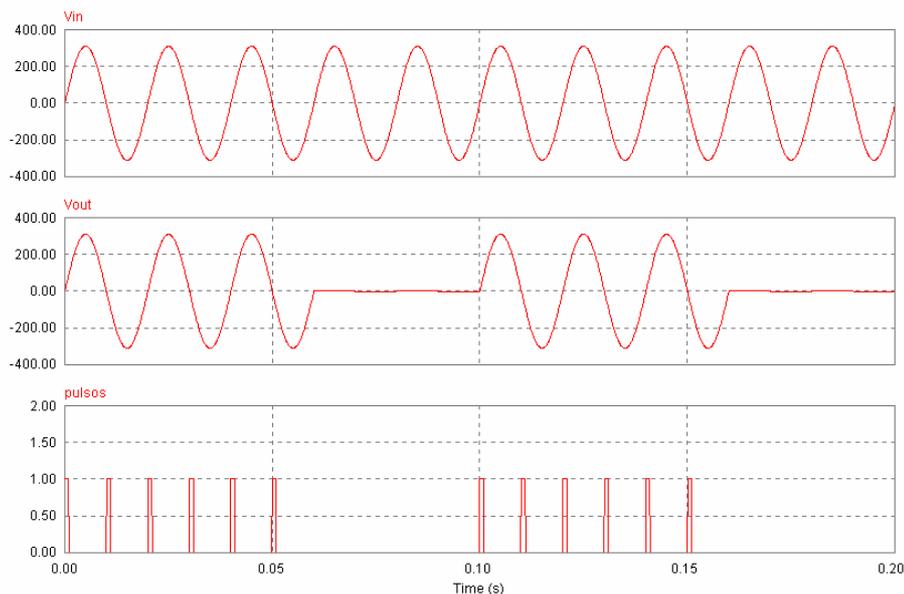


Fig. 6.3. Simulación de un control por secuencia ($n = 3$, $m = 2$).

Para una tensión de entrada senoidal, del tipo $v_s = \sqrt{2}V_{in,rms} \text{sen}(\omega t)$, considerando que se conecta la carga durante n ciclos de la tensión de entrada y se desconecta m ciclos, la tensión eficaz de salida puede obtenerse como:

$$V_{o_{rms}}^2 = \frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} 2V_{i_{rms}}^2 \text{sen}^2(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{o_{rms}} = V_{i_{rms}} \sqrt{\frac{n}{m+n}}$$

Uno de los inconvenientes del método descrito es la presencia de oscilaciones de baja frecuencia en la carga que se está alimentando. Por ejemplo, en el caso de que la carga sea un motor, se pueden provocar vibraciones mecánicas. En el caso de que la carga sea una lámpara, pueden aparecer oscilaciones de baja frecuencia, apreciables por el ojo humano, nada deseables. Para solucionar estos inconvenientes, se suele utilizar otro método, denominado control del ángulo de fase, tal y como se describe en el siguiente apartado.

6.2.2 Control por ángulo de fase

Uno de los métodos más comunes para variar el valor eficaz de una tensión alterna es por medio del llamado control por ángulo de fase, en el cual, dado un semiciclo de la red, el interruptor se acciona o dispara en un determinado ángulo, haciendo que la carga esté conectada a la entrada por un intervalo de tiempo menor o igual a un semiciclo.

Dicho de otro modo, el control por ángulo de fase, como su propio nombre indica, está basado en la regulación del ángulo de disparo de los tiristores. Usualmente se habla de ángulo de disparo, o ángulo de fase α , como el instante de tiempo (expresado en grados) a partir del paso por cero de la tensión de entrada en el que se dispara un tiristor. Para el caso de una carga resistiva, el ángulo de disparo puede valer entre 0° y 180° .

Los valores de tensión, corriente y potencia en la carga dependerán, no solo del ángulo de disparo, como también del tipo de carga alimentada, como se verá a continuación.

Carga resistiva

La figura 6.4 muestra el circuito y las formas de onda de un regulador de tensión CA con control por ángulo de fase y carga resistiva. La abertura del SCR se dará en el momento en que la corriente cae por debajo de la corriente de mantenimiento del componente. Lógicamente las formas de onda de tensión y corriente en la carga son las mismas, si bien con distintas escalas.

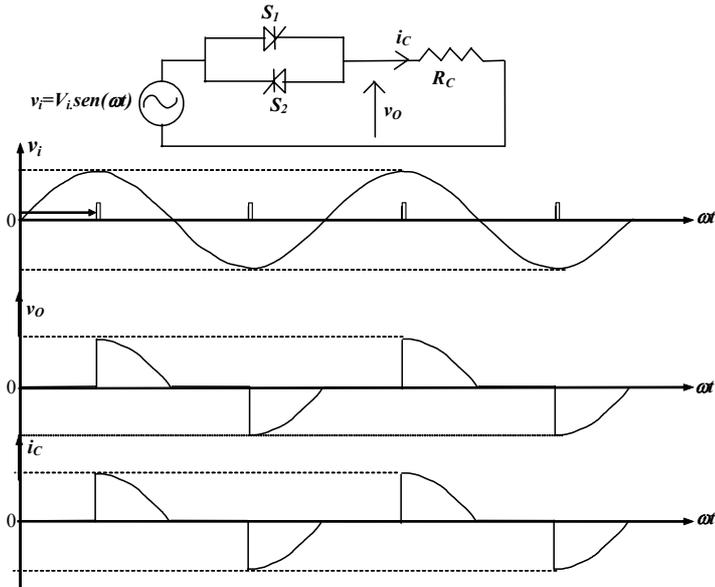


Figura 6.4. Control por ángulo de fase de un regulador de alterna con carga resistiva

Para una tensión de entrada senoidal, del tipo, $v_s = \sqrt{2}V_{i_{rms}} \text{sen}(\omega t)$, considerando que el disparo de los tiristores es idéntico y de valor α , el valor eficaz de la tensión de salida se puede calcular como:

$$V_{o_{rms}}^2 = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} 2V_{i_{rms}}^2 \text{sen}^2(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{o_{rms}} = V_{i_{rms}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right)}$$

En función del ángulo de disparo α , la tensión eficaz de salida puede variarse desde 0 ($\alpha = \pi$) hasta el valor máximo de la tensión de entrada ($\alpha = 0$), siempre y cuando la carga sea puramente resistiva.

Nótese que la potencia transferida a la carga se puede controlar regulando la tensión de salida, tal y como muestra la siguiente expresión:

$$P_o = \frac{V_{o_{rms}}^2}{R} = V_{i_{rms}}^2 \frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right)$$

La figura 6.4 muestra la variación de la tensión eficaz de salida como función del ángulo de disparo, suponiendo conducción simétrica de ambos interruptores (SCR).

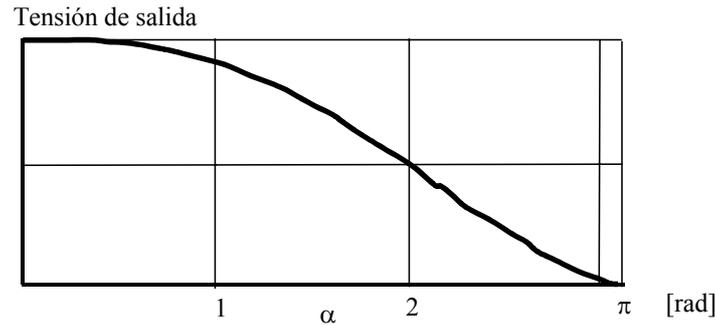


Figura 6.4. Tensión de salida (carga resistiva) normalizada en relación al valor eficaz de la tensión de entrada

Carga inductiva

En el caso de que la carga sea inductiva, el ángulo de control queda limitado por el argumento de la impedancia de carga. Suponiendo una carga genérica tipo RL (resistiva-inductiva) se tiene:

$$\bar{Z} = R + jX_L = R + j\omega L$$

$$\bar{Z} = |\bar{Z}| \angle \theta \quad |\bar{Z}| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad \theta = \arctang\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

con lo que el ángulo de disparo para poder regular la potencia de la carga puede variar entre:

$$\theta < \alpha < \pi$$

En el caso de una carga puramente inductiva, el ángulo de disparo puede valer entre 90° y 180° para poder regular la tensión.

La figura 6.5 muestra la topología y las formas de onda típicas en un regulador de alterna con control por ángulo de fase y con una carga puramente inductiva. Esta configuración es típica de una reactancia controlada por tiristores.

Obsérvese que el aumento del ángulo de disparo implica una reducción del valor eficaz de la corriente. Este efecto puede ser interpretado como un aumento de la inductancia vista por la red, considerando apenas la componente fundamental de la corriente, la cual está siempre 90° retrasada de la tensión. O sea, se consigue una inductancia (reactancia) variable con el ángulo de disparo.

Si el disparo ocurre para un ángulo inferior a 90° , la corriente por el interruptor S_1 no se habrá anulado cuando ocurra el pulso para S_2 , de modo que S_2 no podrá entrar en conducción. Después de algunos instantes la corriente llegará a cero, desactivando S_1 , lo cual, al recibir el nuevo pulso de disparo, entrará nuevamente en conducción. De esta forma, en lugar de tener una corriente CA sobre la inductancia, tendremos una corriente unidireccional. La figura 6.4 ilustra este comportamiento.

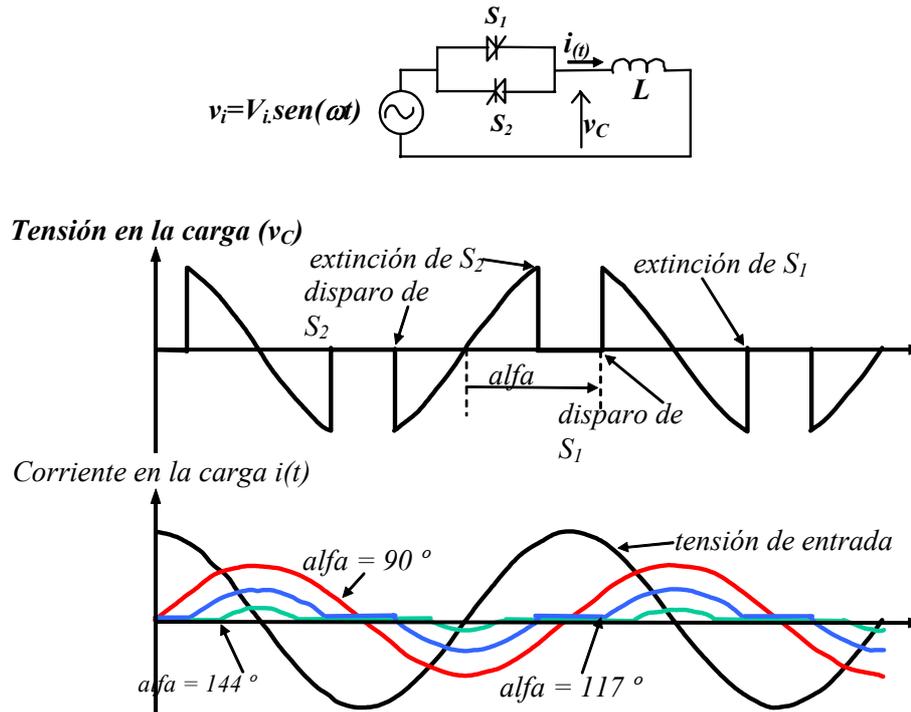


Fig. 6.5. Comportamiento de un control por ángulo de fase con un retardo de $\alpha = 45^\circ$ y carga inductiva.

Una alternativa para garantizar una corriente bidireccional es, en vez de enviar apenas un pulso de disparo, mantener la señal de control hasta el final de cada semiciclo. Esto hace que el regulador de tensión se comporte como un cortocircuito, manteniendo una corriente CA, pero sin regulación de potencia.

Carga RL

Cuando la carga alimentada tiene una característica resistivo-inductiva existe una limitación en términos del mínimo ángulo de conducción, lo cual depende de la impedancia de la carga, Z . La figura 6.6 muestra el circuito y las formas de onda típicas de un regulador de alterna con carga resistivo-inductiva y control por ángulo de fase.

Considerando una situación de conducción discontinua (en la cual la corriente por cada uno de los tiristores alcanza el valor cero dentro de un semiciclo), tenemos que en t_1 el tiristor S_1 , que está directamente polarizado, es disparado. La corriente crece y, aunque se invierta la polaridad de la tensión de entrada, el SCR continúa conduciendo, hasta que su corriente caiga por debajo del valor de mantenimiento (en t_2). El otro tiristor, S_2 , recibe el pulso de control en t_3 , iniciando el semiciclo negativo de la corriente, la cual se extingue en t_4 .

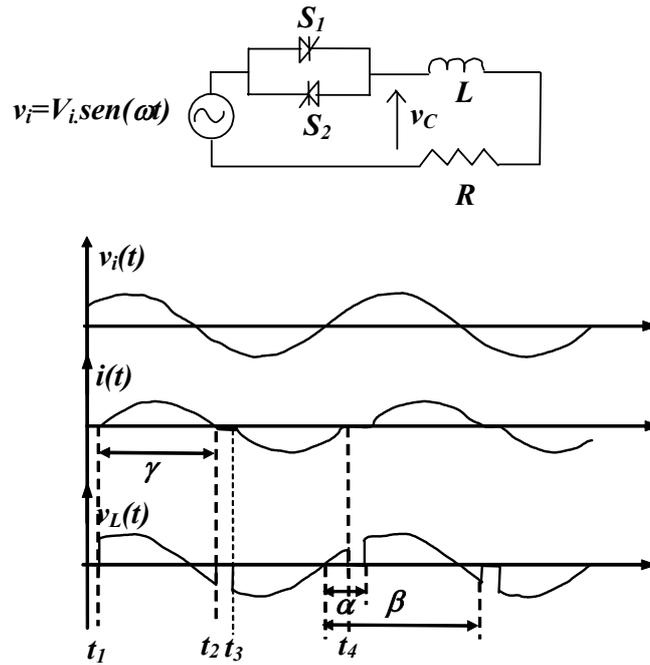


Figura 6.6. Regulador de tensión CA monofásico y carga RL con control por ángulo de fase.

El intervalo controlable del regulador es para ángulos de disparo en el intervalo $\theta \leq \alpha \leq \pi$. Para ángulos de fase menores de θ se obtiene una corriente unidireccional (para el caso en el que el pulso de disparo sea de corta duración), o conducción constante (para el caso en el que el pulso de puerta sea largo).

6.2.3. Control por amplitud

Este método de control modifica la amplitud de la tensión aplicada a la carga utilizando un transformador con una relación variable de espiras en el secundario. La conexión del secundario del transformador a la carga se realiza mediante interruptores de potencia, típicamente tiristores. Cada SCR accede a un punto diferente del secundario, con lo que se varía la tensión aplicada a la carga. La figura 6.7 muestra un esquema simplificado.

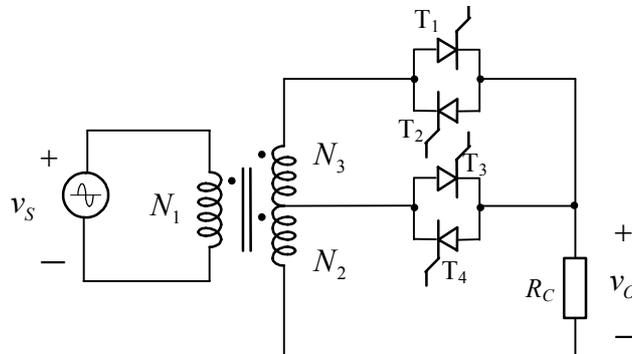


Figura 6.7. Esquema de un regulador de alterna con control de amplitud.

Recuerde que la relación de tensión en un transformador es directamente proporcional al número de espiras (idealmente).

$$\frac{v_{primario}}{v_{secundario}} = \frac{N_{primario}}{N_{secundario}}$$

Para el regulador de la figura 6.7, si los 2 tiristores superiores están conduciendo, se tendrá una tensión de salida:

$$\frac{v_S}{v_O} = \frac{N_1}{N_2 + N_3}$$

En el caso de que los tiristores inferiores estén conduciendo, la tensión de salida será inferior al caso anterior y vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\frac{v_S}{v_O} = \frac{N_1}{N_2}$$

A modo de ejemplo, si en la figura 6.8 suponemos que $N_1 = N_2 = N_3 = N$, y se realiza un control por amplitud con la siguiente secuencia: primero se dispara T_3 , luego T_1 , después T_4 y finalmente T_2 , se obtiene en la salida la forma de onda que se muestra en la figura 6.8.

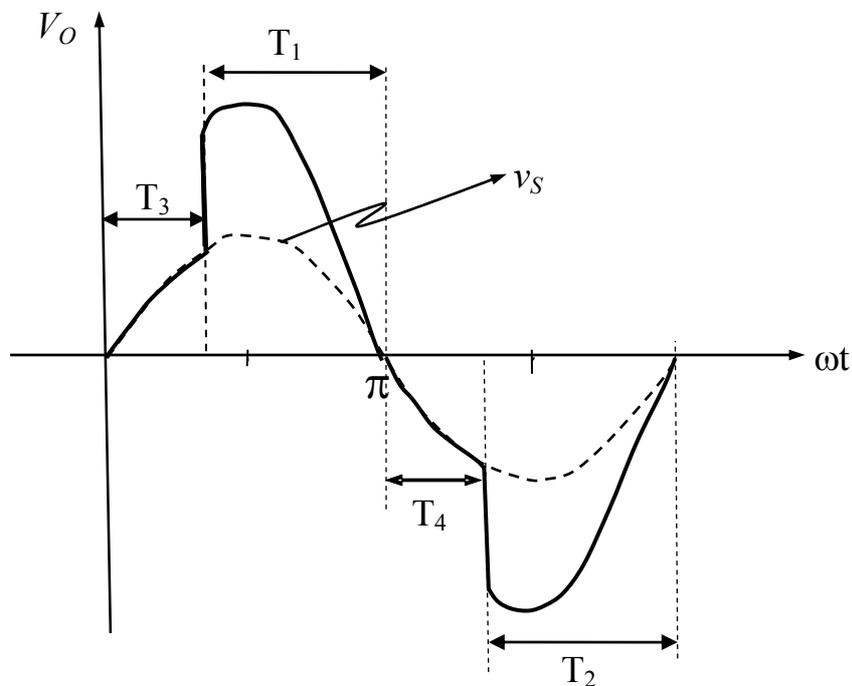


Figura 6.8. Formas de onda de un regulador de tensión controlado por amplitud.

Observando dicha figura (Fig. 6.8), cuando se dispara T_1 la amplitud en la salida se duplica, puesto que el número de espiras que hay que tener en cuenta es $N_2 + N_3 = 2N$. Cuando conduce T_3 , el número de espiras en el primario es igual al número de espiras en el secundario, con lo cual la amplitud de salida es igual a la de entrada. Lo mismo se puede deducir para el semiciclo negativo, donde los SCR que conducen son T_2 y T_4 . En éste caso, cuando conduce T_4 la amplitud de salida es el doble de la de entrada y cuando conduce T_2 las amplitudes de entrada y salida son iguales.

Obsérvese que de este modo, se modifica la tensión de salida del convertidor. Como mayor inconveniente de este tipo de sistemas es que la variación de tensión se realiza a escalones, con lo que si se desea una regulación fina de tensión es necesario un número muy elevado de secundarios y de interruptores de potencia, algo inviable económicamente.

6.3 Bibliografía

- Power Electronics. Converters, Applications, and Design (2ª edición). N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Editorial: John Wiley & Sons, 1995.
- “Eletrónica de Potência”, J. A. Pomilio, Universidade Estadual de Campinas, SP - Brasil.
- Electrónica de Potencia - Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Muhammad H. Rashid, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1993.