



TEMA 10 Reguladores e interruptores estáticos de continua

10.1.-Introducción.	1
10.1.1.- Funcionamiento básico:	1
10.2.- Interruptores estáticos de corriente continua.	2
10.2.1.-Interruptor de conmutación forzada por condensador en paralelo.	3
10.2.2.- Interruptor estático de bloqueo forzado por inductancia en serie con la carga.	5
10.3.- Reguladores estáticos de corriente continua.	7
10.3.1.- Regulador de frecuencia variable. Bloqueo por circuito resonante.	11
10.3.2.- Troceador de Morgan de autoconmutación por circuito resonante.	13
10.3.3.- Regulador de c.c. con bloqueo por condensador en paralelo o Troceador de oscilación.	13

10.1.-Introducción.

En los temas anteriores, cuando los dispositivos rectificadores estaban unidos a una fuente alterna, los semiconductores tenían un proceso de conmutación a corte de forma natural. Cuando la alimentación sea una fuente de voltaje continuo, el principio de conmutar de forma periódica las conexiones entre la fuente d.c. y la carga proporciona un mecanismo para controlar la potencia en la carga. Estos circuitos se les denomina **troceadores** ("choppers") o reguladores estáticos de continua.

Los **reguladores estáticos de continua** son sistemas que transforman la corriente continua de tensión constante en corriente continua 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 continua**.

Por otro lado, las aplicaciones de los convertidores DC/DC recaen fundamentalmente sobre dos campos:

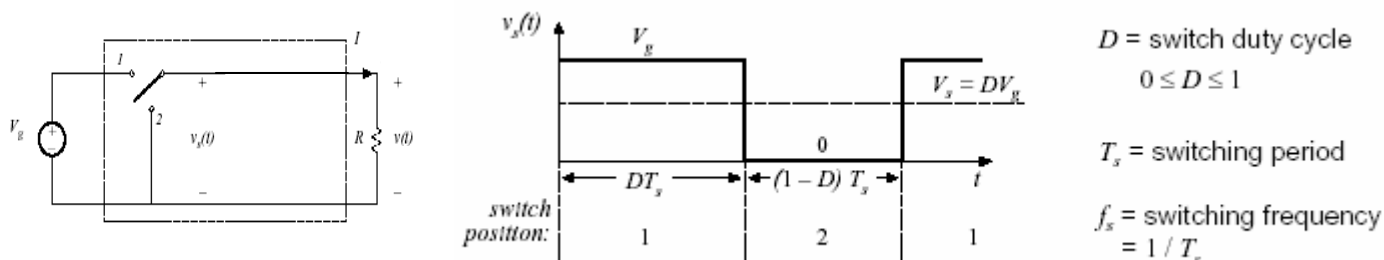
- **Fuentes de alimentación conmutadas.** Son fuentes de alimentación en las que el regulador en vez de ser lineal es conmutado, consiguiéndose un importante aumento del rendimiento y una buena respuesta dinámica.
- **Alimentación de motores de corriente continua**, cuya regulación requiere tensiones continuas variables. Las potencias utilizadas en este caso son considerables

10.1.1.- Funcionamiento básico:

Para introducirnos en el funcionamiento de los convertidores DC/DC, se considerará el circuito que se recoge en la siguiente figura, conformado exclusivamente por un interruptor y una carga resistiva pura.

El interruptor se abre y se cierra siguiendo una señal de periodo "T" denominada **periodo de convertidor**. El tiempo durante el cual el interruptor está cerrado, y por tanto la carga se encuentra conectada a la fuente primaria de energía, se denominará **tiempo de conducción**, "T_{ON}". Por otro lado el tiempo que el interruptor permanece abierto, dejando aislada la carga, se llamará **tiempo de bloqueo**, "T_{OFF}". La suma de T_{ON} y T_{OFF}, como se puede apreciar en la figura, da el periodo de convertidor (T).

Cuando el interruptor S está cerrado, 0 < t < T_{ON}, la tensión de la fuente se refleja en la carga, provocando la circulación de corriente a través de ella. Si por el contrario S está abierto, T_{ON} < t < T, el vínculo entre la fuente y carga se rompe, quedando esta última aislada de la primera. Como la carga es resistiva pura, la corriente circulante por la misma, en estas condiciones, se anula completamente.



La *tensión media* que existe en la carga será: $V_o = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o dt = \frac{T_{ON}}{T} \times E = \delta \times E$

Al cociente entre T_{ON} y T se le denomina **ciclo de trabajo**, δ .

También se puede obtener el *valor eficaz* de la tensión en la carga: $V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o^2 dt\right)} = \sqrt{\delta} E$

Considerando que todos los elementos que participan en el convertidor son ideales y que no se producen pérdidas en los mismos, se puede decir que la potencia de entrada es la misma que la obtenida a la salida del convertidor. Por tanto:

$$P_E = P_O = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} v_o i_o dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_{ON}} \frac{v_o^2}{R_o} dt = \delta \frac{E^2}{R_o}$$

Las conclusiones más destacadas son:

- La tensión media en la carga, V_o , es directamente proporcional a la tensión aplicada a la entrada del convertidor.
- Variando T_{ON} se consigue hacer oscilar δ entre 0 y 1, con lo que la señal de salida podrá variar entre 0 y E . De esta manera se podrá controlar el flujo de potencia a la carga. Los valores máximos de tensión y potencia media en la carga serán:

Si se presta un poco de atención a la expresión que define el ciclo de trabajo se podrá deducir que se presentan tres formas diferentes de modificar el ciclo de trabajo, y por tanto la tensión de salida.

- a) Variando el tiempo de conducción T_{ON} , al mismo tiempo que se mantiene T fijo. Llamado también **Modulación por Ancho de Pulso (PWM)** ya que la frecuencia de la señal del convertidor se mantiene constante mientras que no ocurre así con la anchura del pulso que define el tiempo de conducción del convertidor.
- b) Variando T y conservando T_{ON} constante. Denominado **Modulación de Frecuencia** ya que es la frecuencia del convertidor la que varía. El inconveniente más destacado de este método de control se encuentra en la generación indeseada de armónicos a frecuencias impredecibles, por lo que el diseño del consiguiente filtro se revestirá de una complejidad en algunos casos excesiva.
- c) Modificando ambos

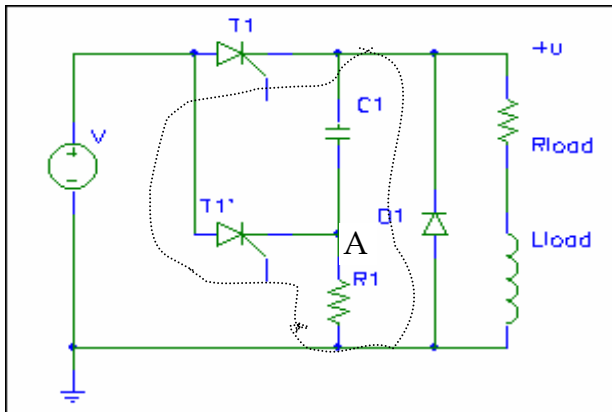
10.2.- Interruptores estáticos de corriente continua.

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 vienen 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 ya fueron detalladas en el tema anterior

Veamos a continuación los interruptores estáticos de C.C. con tiristores o triacs. En ellos la intensidad ya no cambia de sentido forzada por la fuente de alimentación, tal como ocurría en los interruptores de C.A., de forma que para poder bloquearlos se necesitará un **circuito de bloqueo auxiliar**:



10.2.1.-Interruptor de conmutación forzada por condensador en paralelo.



Su esquema se representa en la siguiente figura, donde el circuito de potencia esta constituido por la fuente V, el tiristor T1 y la carga Rload y Lload. El resto del circuito, es decir T1', C1 y R1 constituyen los elementos encargados de bloquear al tiristor principal T1. Además se ha colocado el diodo volante o de libre circulación D1 necesario cuando la carga tiene componente inductiva, y así evitar las sobretensiones en el momento del corte del tiristor principal.

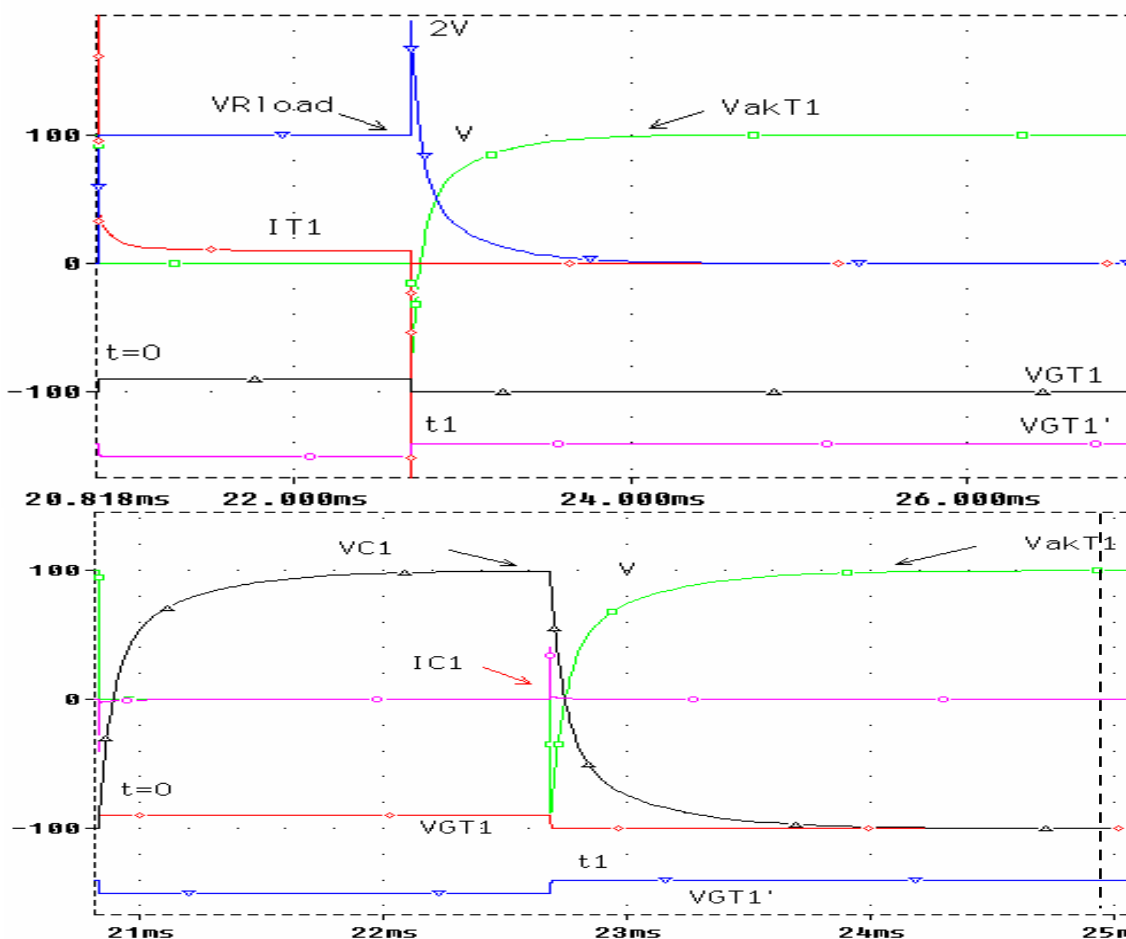
Analicemos el funcionamiento suponiendo carga resistiva, para lo cual eliminamos el diodo volante D1.

En el instante $t=t_0$:

se dispara el tiristor principal T1, estableciéndose después del tiempo de cebado una corriente, en la malla $V-T1-Rload$, igual a $V/Rload$, la tensión en la carga será V y el condensador C1 se carga hasta V a través de R1 con una constante $C \cdot R1$.

Para cortar a T1 se cebará T1' en el instante t_1 . Al pasar a conducción T1', el punto A que estaba a cero voltios, pasa a +V y por tanto el cátodo de T1 pasa a +2V, debido al condensador, recibiendo una polaridad negativa que lo obliga a cortarse.

En el instante en que T1' pasa a conducción, el condensador C1 recibe la corriente de la carga y al cabo de un instante determinado por su constante de tiempo $Cload$, se encontrará cargado con polaridad -+ a la tensión V, con lo que la tensión en la carga pasa a ser nula. Veamos las formas de onda de este proceso:



Para una posterior conexión de la carga, el circuito no se encuentra en las mismas condiciones que para $t=0$, pues el condensador $C1$ se encuentra cargado y $T1'$ en conducción. Veamos como a partir de $t1$ + tcebado el circuito permite ser disparado de nuevo en cualquier momento. Cuando se ceba de nuevo a $T1$, estando $T1'$ en conducción, el apagado de $T1'$ se produce de forma idéntica a como se ha explicado para $T1$. El **tiempo t_c** durante el cual la tensión ánodo-cátodo de $T1$ es negativa debe superar el tiempo de apagado t_{off} del tiristor para que este se bloquee, el cual se puede estimar de la siguiente manera:

$$V_{ak1} = V_a - V_k = V - (V_c + V) = V - \left[-V(1 - e^{-t/\tau}) + V \cdot e^{-t/\tau} + V \right]$$

simplificando:

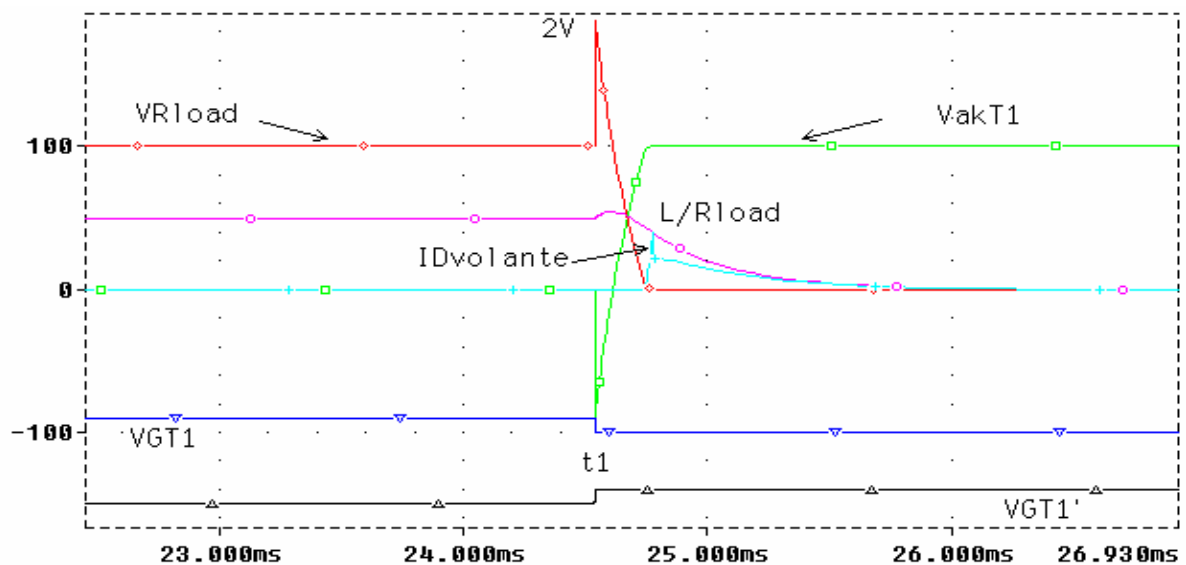
$$V_{ak1} = 2V \cdot (1 - e^{-t/\tau}) - V \text{ para } t > t1$$

en $t = t_c$ $V_{ak1} = 0$ por tanto: $t_c = R_{load} \cdot C1 \cdot \ln 2 = 0,69 \cdot R_{load} \cdot C1 = 0,69 \cdot C1 \cdot \frac{V}{I}$

para que t_c resulte mayor que t_{off} , el condensador deberá cumplir la siguiente condición:

$$C1 \geq \frac{t_{off} \cdot I_{m\acute{a}x}}{0,69 \cdot V} = 1,45 \cdot t_{off} \cdot \frac{I}{V}$$

Cuando **la carga disponga de una componente inductiva**, será necesario colocar un diodo volante $D1$ en paralelo con ella, permitiendo la descarga de la energía magnética almacenada en la bobina en el momento de ser interrumpida la corriente por la carga al abrir al interruptor. Si el valor de la inductancia de la carga es lo suficientemente grande podrá mantener la corriente constante en la carga durante el intervalo de apagado (a partir de $t1$) haciendo cambiar al condensador de $+V$ a $-V$ a corriente constante, tal como se muestra en las siguientes figuras:



Con estas condiciones de carga la tensión evoluciona de la siguiente manera:

$$V_{ak1} = V_a - V_k = V - (V_c + V) = -V_c = - \left[V - \frac{1}{C1} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt \right]$$

simplificando $V_{ak1} = -V + \frac{I \cdot t}{C}$ para $t > t1$

en $t = t_c$ $V_{ak1} = 0$ por tanto: $t_c = R_{load} \cdot C1 = C1 \cdot \frac{V}{I}$

para que t_c resulte mayor que t_{off} , el condensador deberá cumplir la siguiente condición:

$$C1 \geq \frac{t_{off} \cdot I_{m\acute{a}x}}{V}$$

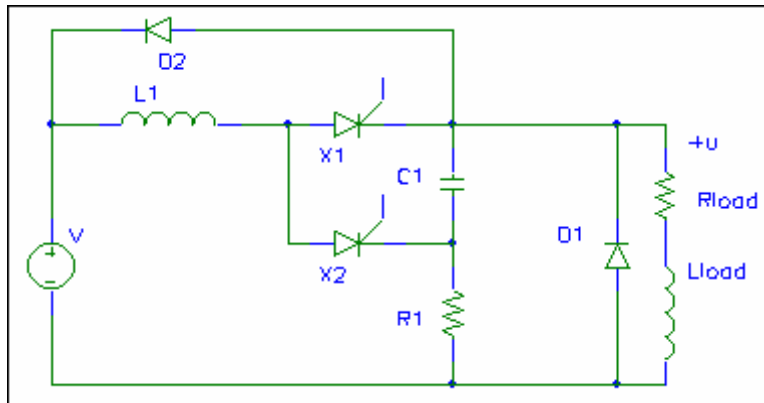
Como características de este interruptor estático, hay que destacar:



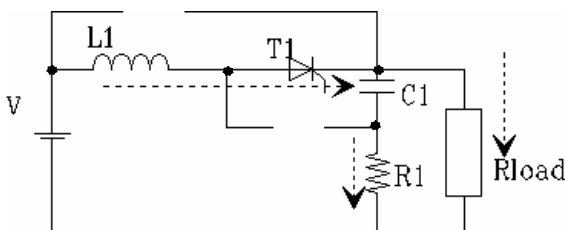
- El tiempo de bloqueo t_c impuesto al circuito depende de la carga utilizada.
- La carga, y por tanto del diodo volante, sufre un impulso de tensión de hasta $2V$ en el instante de bloqueo.
- No funciona en vacío.

10.2.2.- Interruptor estático de bloqueo forzado por inductancia en serie con la carga.

Esta configuración que se muestra en la siguiente figura, es como el interruptor anterior, al cual se le añade los componentes $L1$ y $D2$.



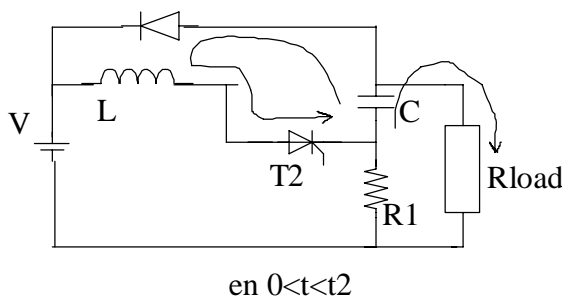
Este interruptor se cierra disparando $T1$, de forma que cuando se alcanza el régimen estacionario la corriente por $L1$ es constante y el condensador $C1$ se carga a la tensión V a través de $R1$.



en $t=0^-$

$T1 = ON$ interruptor cerrado
 $I_{L1} = I_{load}$
 $V_{C1} = V$
 $V_A = 0$

Para la apertura del interruptor se cebará el tiristor $T2$, de forma que la tensión del condensador $C1$ se aplique inversamente a $T1$, dejando de conducir. El condensador $C1$ se descargará de forma resonante a través de $D2, L1$ y $T2$. Cuando $D2$ deja de conducir, el condensador está cargado a $-V$ y el diodo volante $D1$ se polariza directamente, haciendo que la tensión en la carga sea cero. La corriente de $L1$ sigue cargando más negativamente a $C1$, hasta que esta intensidad se anule, bloqueándose $T2$. Finalmente la energía almacenada en $Lload$ se disipa en $Rload$ a través de $D1$. De forma que se eliminará el pico de tensión en la carga al bloquearse $T1$, tal como ocurría en el circuito anterior. Veamos las ecuaciones que gobiernan cada intervalo, así como las formas de onda más características.



en $0 < t < t2$

Una vez establecido el régimen estacionario, la corriente por $L1$ es constante y la carga ve la tensión V . Es en el instante $t=t_0$ donde se dispara el tiristor $T2$ y se bloquea $T1$, las condiciones iniciales de este intervalo son:

En $t=t_0$
 $V_{ak_T2} = 0$
 $V_{ak_T1} = -E$

En $t=t1$
 $V_{ak_T1} = -VC1 = 0$
 $I_{D1} \text{ máx}$

$V_{C1}(0) = V$ e
 $I_{T2}(0) = V/Rload.$

Tal

como se muestra en la figura anterior, el circuito resultante es un R-L-C, por tanto aplicando la solución de la ecuación diferencial que lo caracteriza, obtenemos :

$$IT2(t) = \frac{V}{\sqrt{L1}} \cdot \frac{sen\left(\frac{t}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right) + \frac{V}{R} \cdot \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right)}{\sqrt{C1}} \quad VC1(t) = -\sqrt{\frac{L1}{C1}} \cdot \frac{V}{R} \cdot \frac{sen\left(\frac{t}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right) + V \cdot \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right)}{\sqrt{L1 \cdot C1}}$$

El tiempo de bloqueo del circuito viene dado por el instante en que la tensión del tiristor se anula:

$$VT1(t1) = -VC1(t1) = 0 \quad \text{de donde } t1 = \sqrt{L1 \cdot C1} \cdot \arctg\left(R \sqrt{\frac{L1}{C1}}\right)$$

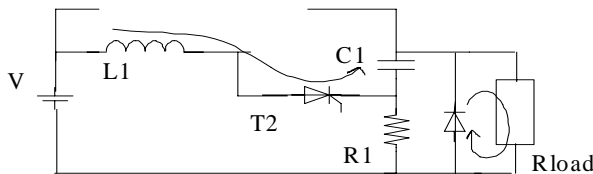
El intervalo acaba cuando D2 deja de conducir, de lo cual se obtiene la siguiente condición:

$$iD2(t2) = IT2(t2) - \frac{V}{R} = 0 \quad \text{de donde se obtiene } t2 = \sqrt{L1 \cdot C1} \cdot \arcsen\left(\frac{2R\sqrt{L1C1}}{R^2C1 + L1}\right)$$

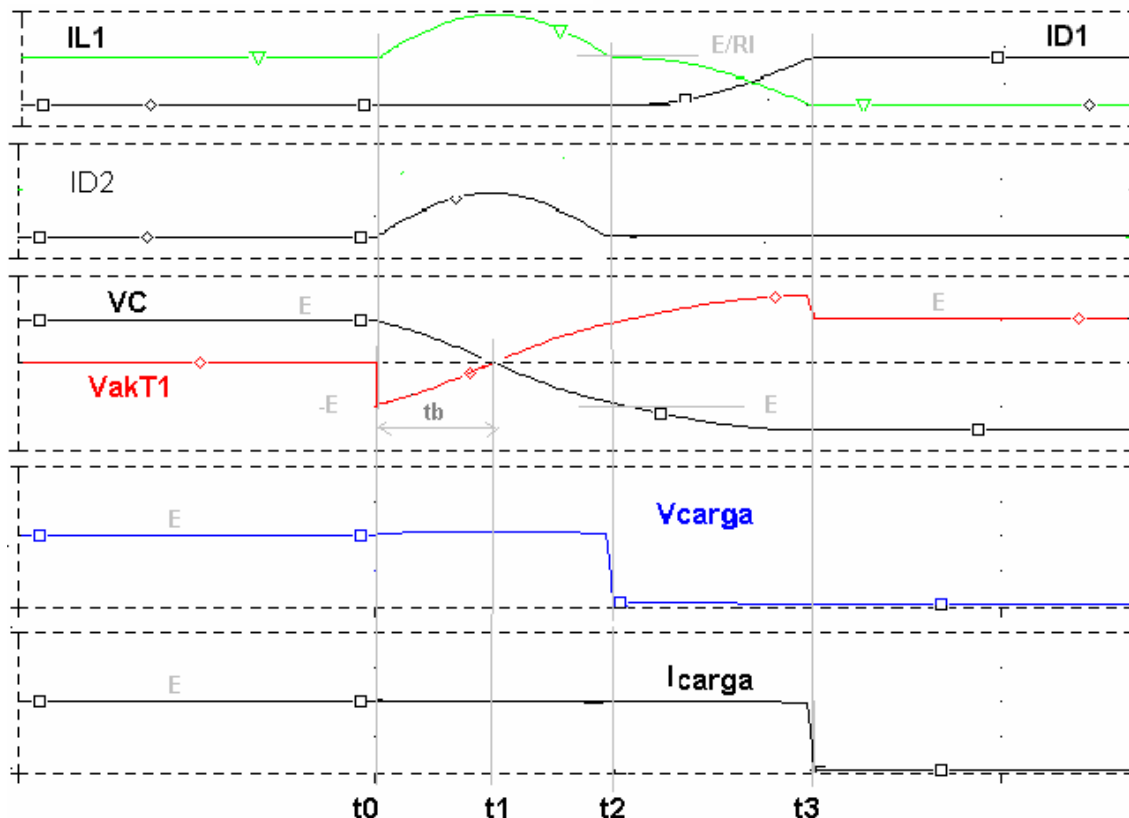
En el siguiente intervalo, la intensidad que consume la carga es V/R, si D1 no conduce pasaría por L1 haciendo que su caída sea nula y cargando más negativamente a C1, de forma que la tensión en la carga sería VC1+V<0, ya que VC<-V, y por tanto el diodo D1 conduciría. Las condiciones iniciales son las finales del intervalo anterior: IT2(t2)=V/R y VC(t2)=-V, por tanto la ecuación de este intervalo será:

$$IT2(t) = \frac{V}{R} \cdot \cos\left(\frac{t-t2}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right) \quad VC1(t) = -V - \frac{V}{R} \cdot \sqrt{\frac{L1}{C1}} \cdot \frac{sen\left(\frac{t-t2}{\sqrt{L1 \cdot C1}}\right)}{\sqrt{L1 \cdot C1}}$$

El intervalo acaba cuando IT2(t3) = 0 por tanto se cumple $t3 - t2 = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{L1 \cdot C1}$



Por último cuando IT2=0, el tiristor T2 se bloquea y la carga sigue cortocircuitada por D1. La intensidad disminuye exponencialmente con la constante de tiempo L/R, junto con la descarga de C1 por R1 y D1.

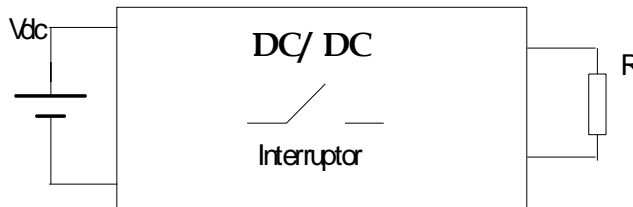




10.3.- Reguladores estáticos de corriente continua.

Estos reguladores se utilizarán en situaciones en las que se dispone de una fuente de corriente continua, tal como una batería o un rectificador conectado a la red de alterna, y se necesita una tensión continua pero de diferentes características tales como:

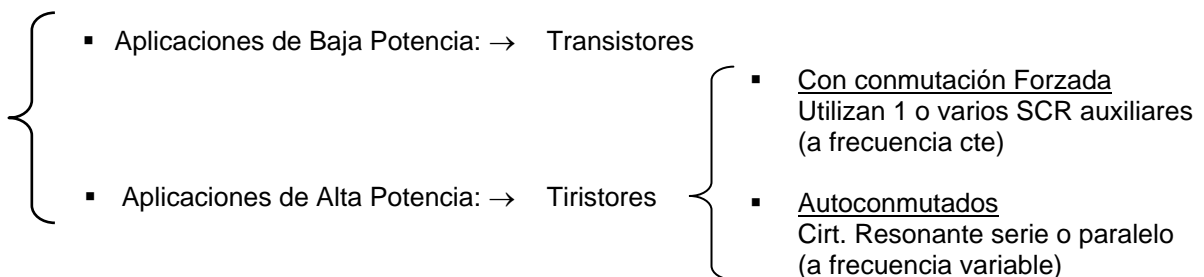
- Mayor estabilidad de la tensión y menor rizado.
- Distinto nivel de tensión del que suministra la fuente.
- Voltaje variable y controlable en ciertos márgenes.



Modificando de forma periódica las conexiones entre la fuente DC y la carga DC se puede variar el valor medio de la corriente en la carga

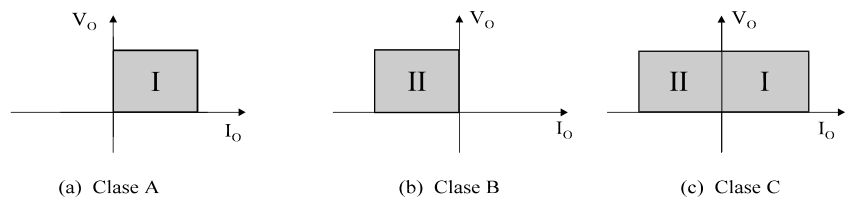
Se pueden realizar diversas clasificaciones:

1. Por ejemplo atendiendo al nivel de potencia y al tipo de conmutador utilizado, se diferencian los siguientes tipos:



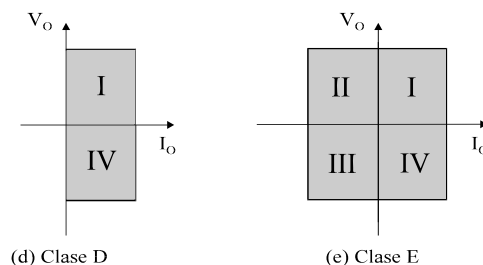
2. Existe otra forma de clasificarlos en función de la dirección en la que circulan la corriente y la tensión:

Troceador de clase A
Troceador de clase B
Troceador de clase C
Troceador de clase D
Troceador de clase E



Clasificación de los Troceadores.

Dependiendo del sentido de la intensidad y la tensión aplicada en la carga los convertidores se pueden clasificar en cinco clases bien diferenciadas.



Los dos primeros convertidores, clase A y clase B, se caracterizan porque el sentido que presentan tanto la tensión como la intensidad en la carga es invariable (operación en un solo cuadrante). Mientras, los convertidores clase C y D, como se puede observar en la siguiente figura, tienen su área de trabajo configurada por dos cuadrantes, con lo que un parámetro de los mismos, bien puede ser la intensidad como la tensión en la carga, puede adoptar diferente sentido. Por

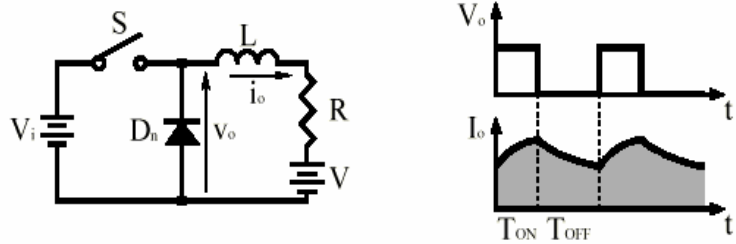
último, en el convertidor clase E la tensión y la intensidad pueden presentar cualquier combinación posible, pudiendo trabajar este convertidor en cualquiera de los 4 cuadrantes.

Convertidor clase A

La corriente circulante por la carga es positiva, o lo que es lo mismo, fluye hacia la carga. Lo mismo ocurre con la tensión en la misma. Es un convertidor que trabaja en un solo y único cuadrante, con lo que ni la tensión ni la intensidad pueden modificar su sentido.

Un convertidor que verifica este modo de operación es el que se recoge en la siguiente figura . Donde V puede representar la fuerza contraelectromotriz de un motor DC.

Cuando el interruptor se cierra, la fuente de tensión E se conecta a la carga, el diodo D queda polarizado en inverso. La intensidad crece exponencialmente mientras circula a través de R , L y V . Por otro lado, cuando el interruptor se abre, la carga queda totalmente aislada de la fuente primaria de energía, la intensidad tiende a decrecer y en la bobina se induce una f.e.m. negativa que provoca que el diodo D entre en conducción, actuando como un diodo volante o de libre circulación.

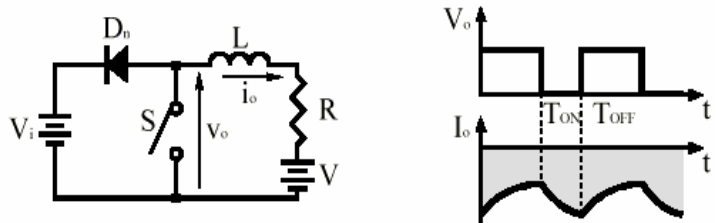


a) Convertidor tipo A

Convertidor clase B

Opera exclusivamente en el segundo cuadrante. Por tanto, la tensión en la carga sigue positiva, mientras que la intensidad que circula por la carga es negativa. En otras palabras, se puede decir que la intensidad escapa de la carga y fluye hacia la fuente primaria de tensión. Es por ello que este convertidor recibe también el apelativo de convertidor regenerativo.

Un convertidor de este tipo es el que se ofrece en la siguiente figura. Cuando el interruptor S se cierra, la tensión V_o se hace cero, quedando el diodo polarizado en inverso. Al mismo tiempo, la batería V , provocará la circulación de corriente a través de R - L - S , almacenando la bobina energía. Cuando se produzca la apertura del interruptor, la aparición de una fuerza electromotriz en la bobina se sumará a V . Si $V_o > E$, el diodo quedará polarizado en directo, permitiendo la circulación de corriente hacia la fuente.

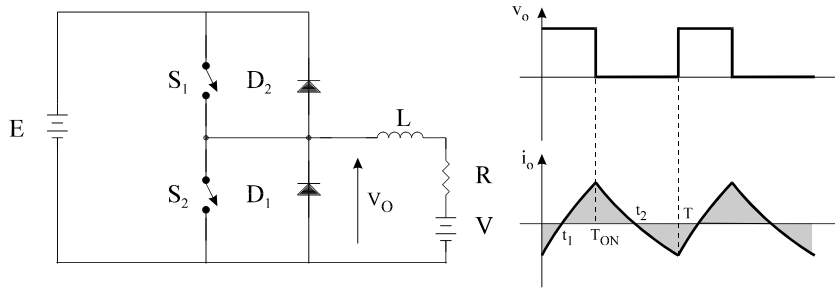


b) Convertidor tipo B

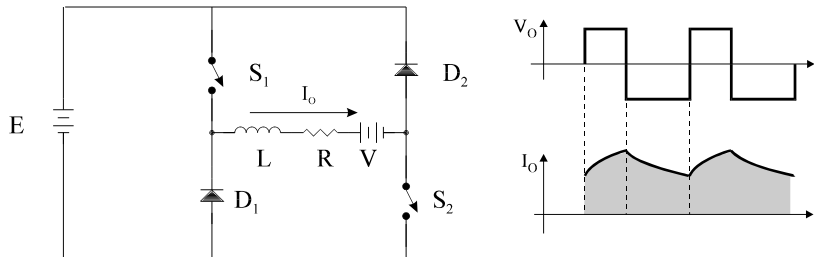
Convertidor clase C

Puede operar tanto en el primer como el segundo cuadrante. Por tanto, la tensión en la carga sólo puede ser positiva, mientras que la intensidad podrá adoptar tanto valores positivos como negativos. Es por ello que también se le pueda denominar chopper de dos cuadrantes.

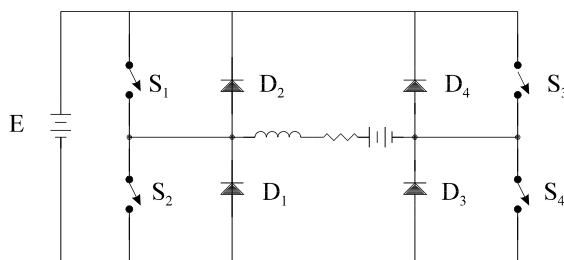
Este convertidor se obtiene a partir de la combinación de un chopper clase A con otro clase B, tal y como se puede observar en la figura.c. S_1 y D_1 constituyen un convertidor clase A. Por otro lado S_2 y D_2 configuran un convertidor clase B. Si se acciona S_1 funcionará en el primer cuadrante (intensidad positiva). Por el contrario, si manteniendo S_1 abierto se abre y se cierra S_2 funcionará como un convertidor regenerativo. Se debe asegurar que no se produzca el disparo simultaneo de los dos interruptores, ya que de lo contrario la fuente primaria de alimentación se cortocircuitaría.



(c) Convertidor tipo C



(d) Convertidor tipo D



(e) Convertidor tipo E

Convertidor clase D

Este convertidor también opera en dos cuadrantes, figura.d, en el primer y cuarto cuadrante. La intensidad en la carga permanece siempre positiva, mientras que la tensión en la carga es positiva cuando pasan a conducción los interruptores S_1 y S_2 . Por el contrario cuando se bloquean estos dos, la fuerza electromotriz inducida en L hace que el voltaje total en la carga sea negativo, polarizándose los diodos y provocando que la corriente circule hacia la fuente E .

Convertidor clase E

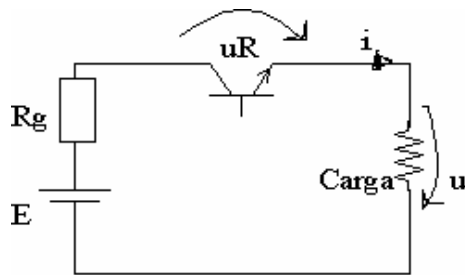
Si se quiere funcionar en los cuatro cuadrantes con el mismo convertidor, o lo que es lo mismo, disponer de cualquier combinación posible de tensión-intensidad en la carga se deberá recurrir al convertidor indicado en la figura e.

3. Atendiendo al modo de funcionamiento podemos destacar dos mecanismos para realizar este tipo de conversión:

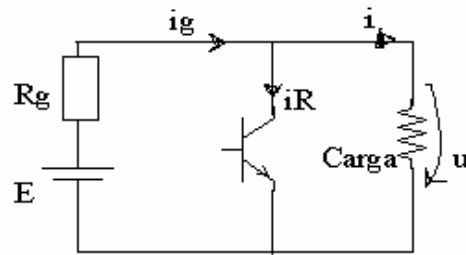
- **Reguladores estáticos de c.c. disipativos.**

Estos reguladores se caracterizan por que la potencia que entrega la fuente es superior a la consumida por la carga, siendo la diferencia una potencia disipada en el propio regulador. Su funcionamiento se particulariza colocando **un elemento no lineal en serie o en paralelo** con la carga,

en el que se produce una caída de tensión variable y controlable, por el elemento base que suele ser un transistor. Veamos en la siguiente figura la configuración básica de estos reguladores disipativos.



Regulador Serie



Regulador Paralelo

En el **regulador serie** la tensión a la salida y su rendimiento tienen la siguiente expresión:

$$u = E - R_g \cdot i - uR \quad \eta = \frac{u \cdot i}{(u + uR) \cdot i} = \frac{u}{E - R_g \cdot i}$$

De la expresión anterior se observa como el rendimiento es tanto menor cuanto menor es la tensión de salida.

En el **regulador paralelo** se obtienen las siguientes expresiones para la tensión de salida y para su rendimiento:

$$u = E - R_g \cdot i_g \quad \eta = \frac{u \cdot i}{u \cdot i_g} = \frac{i}{i + iR}$$

para compararlo con el serie hagamos que $i = u/R$ siendo R la resistencia de carga y $R = \alpha R_g$, obteniendo

$$\eta = \frac{u}{u + \alpha \cdot uR}$$

Si $\alpha > 1$ el rendimiento del regulador serie es mayor, para $\alpha = 1$ son iguales y para $\alpha < 1$ es mejor el paralelo. Normalmente R_g tiene poco valor ohmico, por lo que se utiliza más a menudo el regulador serie. Sin embargo el regulador paralelo tiene como propiedad inherente su protección ante sobrecargas.

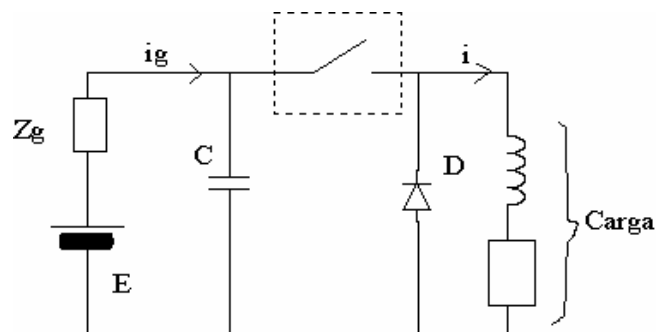
En general y para ambos tipos de reguladores otro inconveniente es que la tensión a la salida es siempre menor que la de la entrada, siendo el margen de variación no muy grande si se quiere un rendimiento aceptable. También destacar como ventaja su excelente estabilidad y la ausencia de rizado en la tensión de salida.

- **Reguladores estáticos de c.c. no disipativos.**

Su importancia radica en el elevado rendimiento que se extrae. Su estructura, tal como se muestra en la siguiente figura, consta de un interruptor conectando y desconectando la fuente a la carga, de manera que el valor medio de la tensión a la salida sea función del ritmo de cierre y apertura de ese interruptor controlable.

Este tipo de convertidores también se suele conocer con el nombre de troceadores ("choppers") o de fuentes de alimentación conmutadas. Tienen la ventaja de ser no disipativos y poder variar los voltajes en más amplios márgenes. Sin embargo tienen como inconveniente, en general, trabajar con ondas cuadradas, triangulares o trapezoidales, las cuales representan armónicos indeseados.

Dado que estamos hablando de





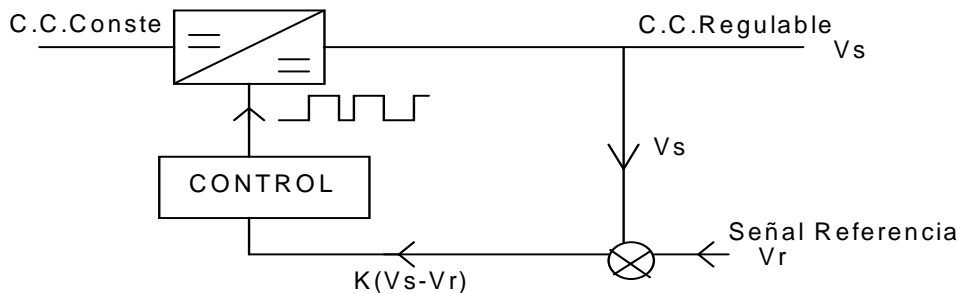
reguladores, todos estos convertidores dispondrán de un circuito de control capaz de regular y estabilizar la tensión a la salida ante cambios de carga o de la tensión de entrada. La tensión de salida en estos reguladores viene dada por :

$$\langle u \rangle = E (ton/T) = E \delta,$$

siendo δ el ciclo de trabajo del regulador, es decir, la relación entre el tiempo de conducción del interruptor (ton) y el período total de funcionamiento (T). Esta relación sugiere los siguientes modos de regulación:

1. Mantener ton constante y variar T . Lo que representa los circuitos de frecuencia variable.
2. Variar ton y mantener T constante. Dando lugar a los circuitos de tiempo de conducción variable o Modulación por anchura del pulso (PWM).

En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques con un circuito de control en lazo cerrado.

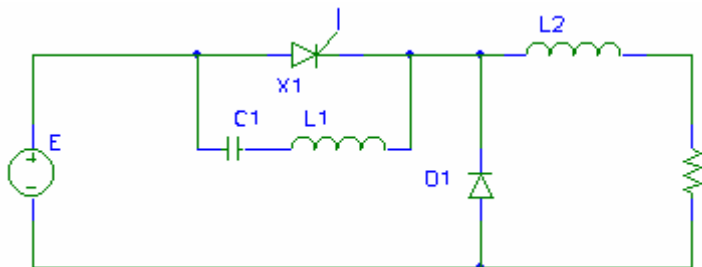


Los troceadores se caracterizan porque, al tener a la entrada una fuente de corriente continua, el paso del estado de conducción al de bloqueo, no se realiza por la inversión del voltaje de la fuente de entrada, sino que hay que acudir a otros procedimientos auxiliares. Estos procedimientos de conmutación tienen cada vez menos interés, ya que es de uso más generalizado los componentes que se pueden conmutar por electrodo de control, en lugar de tiristores. Veamos a continuación algunas de las principales estructuras aplicadas con tiristores para los limitados casos donde la aplicación necesite implementarse con tiristores debido a la utilización de elevadas tensiones y/o corrientes.

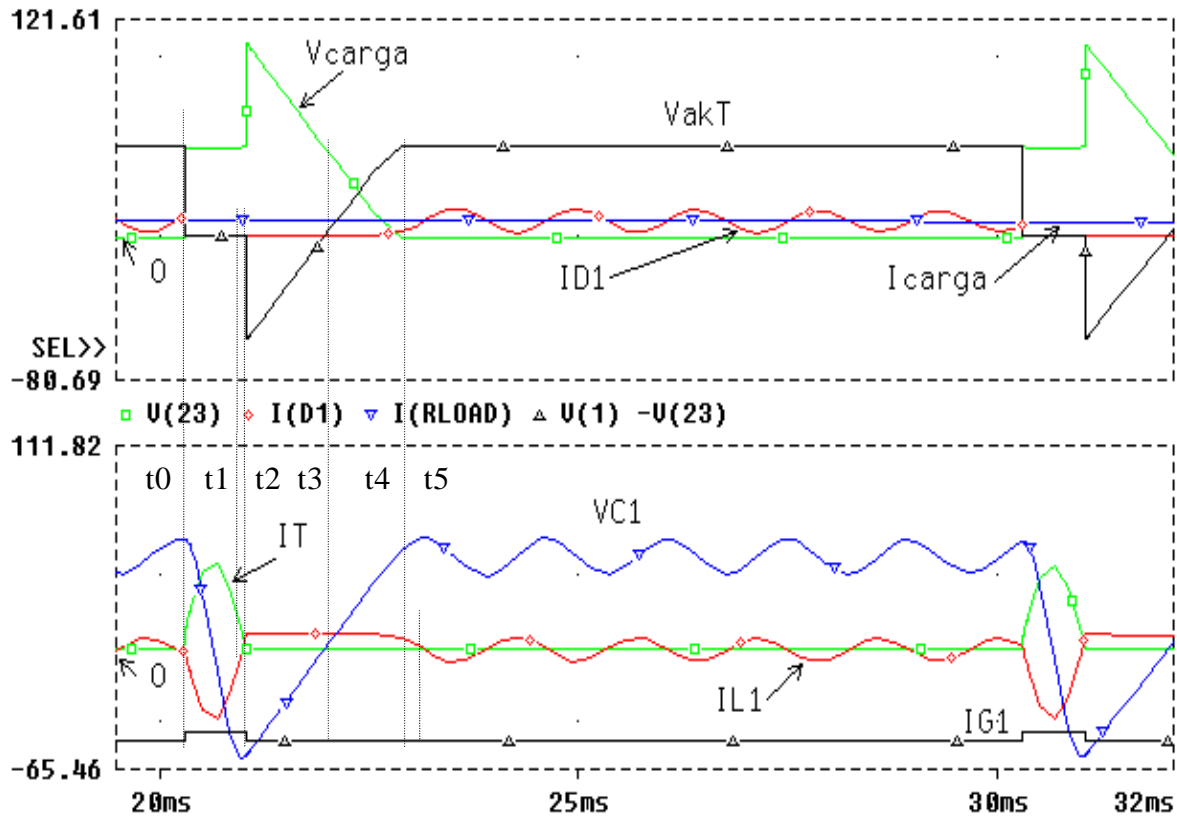
10.3.1.- Regulador de frecuencia variable. Bloqueo por circuito resonante.

En estos circuitos de frecuencia variable no hay tiristor auxiliar, y el tiempo de conducción ton está determinado por el circuito de bloqueo. En la siguiente figura se muestra la configuración básica de este regulador.

Una vez establecido el régimen permanente y estando T bloqueado, la corriente de la carga es uniforme, dado que se ha supuesto $L2$ muy grande, y es suministrada por $L2$ conduciendo el diodo $D1$ de libre circulación. La tensión en el condensador es igual a la tensión de entrada E . Al disparar al tiristor T se le aplica al diodo inversamente la tensión E , dejando de conducir, estableciéndose instantáneamente la corriente de la carga en T . A la vez se inicia una descarga resonante de $C1$ a través de T y $L1$.



Tras el primer semiciclo resonante el condensador queda cargado con polaridad negativa y el nuevo semiciclo fuerza a la corriente resonante en sentido contrario a la corriente de T . Cuando la corriente resonante igual a I , la intensidad en el tiristor pasa por cero y se bloquea. La intensidad de la carga sigue siendo suministrada por la fuente a través de $C1$ y $L1$ hasta el instante en el que la tensión en el condensador alcanza E y la tensión en bornes de $D1$ se hace nula y empieza a conducir. La corriente en $L1$ no puede decrecer bruscamente y oscila hasta amortiguarse. Este es el funcionamiento tal como se muestra en la siguiente figura.



Intervalo 1: $t_0 < t < t_2$

En el instante t_0 el tiristor recibe el impulso de puerta. La duración del semiciclo resonante está dada por :

$t_1 - t_0 = \pi \sqrt{L_1 C_1}$ Tras t_1 la corriente en L_1 sigue siendo senoidal $i_{L1}(t) = E \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \cdot \text{sen}(w(t - t_1))$

El instante t_2 se deduce de la condición $i_{L1}(t_2) = I$, de donde obtenemos:

$t_2 - t_1 = \frac{1}{w} \cdot \arcsen\left[\frac{I}{E \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}}\right]$ siendo la tensión en C_1 igual a : $VC_1(t_2) = -E \cdot \cos\left[\arcsen\left[\frac{I}{E \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}}\right]\right]$

Intervalo 2: $t_2 < t < t_4$

El tiristor se ha bloqueado y la corriente de la carga pasa por C_1 y L_1 . Como es una corriente constante, la caída de tensión en L_1 es nula y la tensión cátodo-ánodo en D_1 es $E - VC_1$. Al ser $VC_1 < E$ y el diodo sigue polarizado inversamente. El condensador se sigue cargando linealmente:

$$V_T = VC_1 = VC(t_2) + \frac{1}{C_1} \int_{t_2}^t I dt = VC(t_2) + \frac{I}{C_1} (t - t_2)$$

El tiempo de bloqueo del tiristor viene dado por el instante en el cual se anula su tensión $V_T = 0$,

por tanto: $t_b = t_3 - t_2 = \frac{C_1 \cdot |VC_1(t_2)|}{I}$ teniendo que ser el tiempo de off o de apagado igual a : $t_a = \frac{C_1 \cdot |VC_{1\min}(t_2)|}{I_{\max}}$

El intervalo se acaba cuando la tensión en el condensador alcanza a la tensión de la fuente (E):

$$E = VC(t_2) + \frac{I}{C_1} (t_4 - t_2)$$

Intervalo 3: $t_4 < t < t_6$



En t4 el diodo se polariza directamente y conduce, de forma que el circuito equivalente es un circuito LC serie con D1 conduciendo, por tanto si las condiciones iniciales son: VC1(t4)=E y IL1(t4)=I, la ecuación que gobierna este intervalo será:

$$iL1(t) = I \cdot \cos(\omega(t - t4)) \quad VC1(t) = E + I \sqrt{\frac{L1}{C1}} \sin(\omega(t - t4))$$

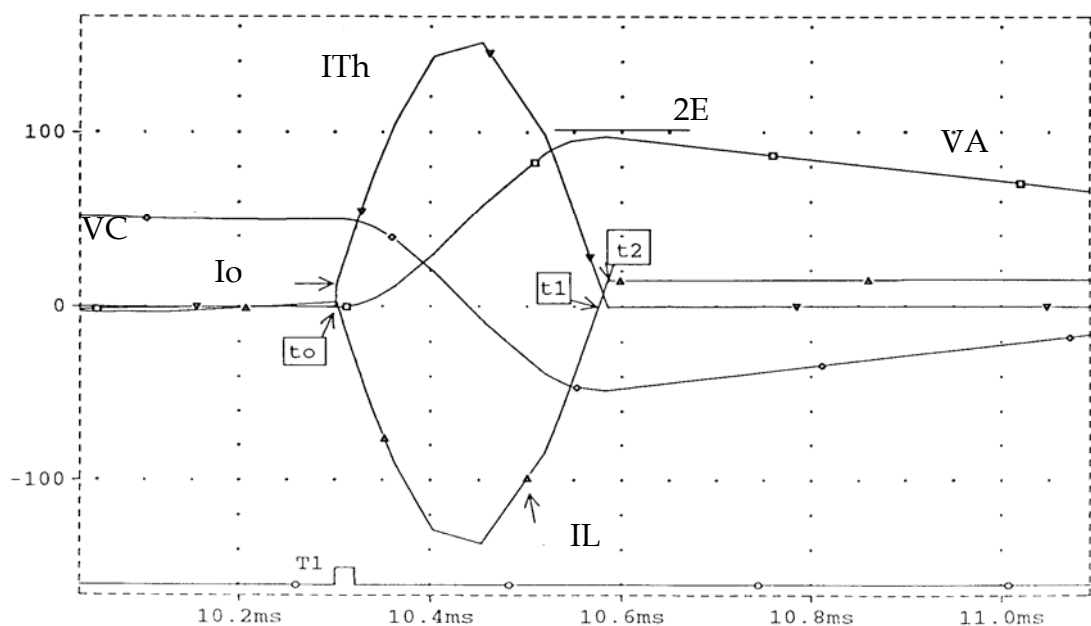
Una forma de diseñar el circuito LC de bloqueo consiste en fijar el valor de la corriente de pico por el tiristor. Así, si fijamos:

$$Ip = 1,5 \cdot Imáx \rightarrow IL(t1/2) = I_{peak} = 1 \cdot I_m = E \cdot \sqrt{\frac{C1}{L1}} \cdot \sin(\pi/2)$$

sustituyendo en la ecuación de la tensión de C1:

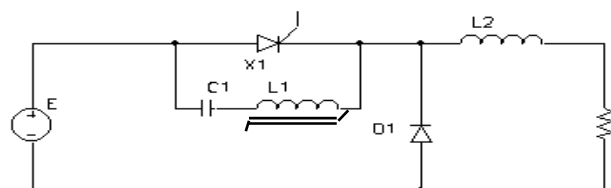
$$|VC1_{min}(t2)| = E \cdot \cos \left[\arcsen \left[\frac{I_{máx}}{E} \sqrt{\frac{L1}{C1}} \right] \right] = 0,74 \cdot E \quad y \quad t_a = 0,74 \cdot E \cdot \frac{C1}{I_{máx}} \quad y \quad \text{como } E \sqrt{\frac{C1}{L1}} = 1,5 \cdot I_{máx}$$

se obtiene : $C1 = 1,34 \cdot \frac{t_a \cdot I_{máx}}{E}$ y $L1 = 0,6 \cdot \frac{t_a \cdot E}{I_{máx}}$



10.3.2.- Troceador de Morgan de autoconmutación por circuito resonante.

El circuito anterior es susceptible de mejora si sustituimos la bobina L1 por un inductor saturable, para eliminar las oscilaciones de la corriente en la bobina y alargar el ton. Este circuito, que fue descrito por Morgan en 1961, tiene la estructura mostrada en la siguiente figura:



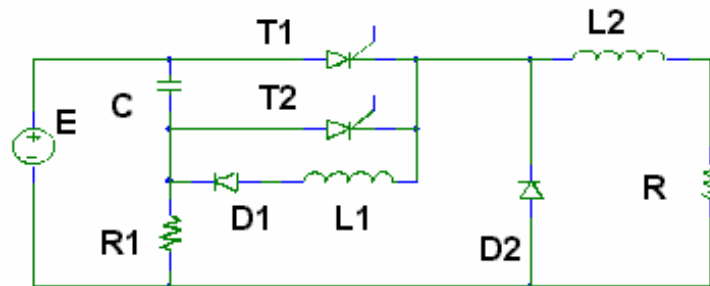
Si suponemos que la inductancia saturable L1 dispone de una característica ideal, lo cual representa que cuando no está saturada su inductancia es infinita y cuando se satura su inductancia es finita y de valor L1, el funcionamiento es muy similar al regulador anterior.

10.3.3.- Regulador de c.c. con bloqueo por condensador en paralelo o Troceador de oscilación.

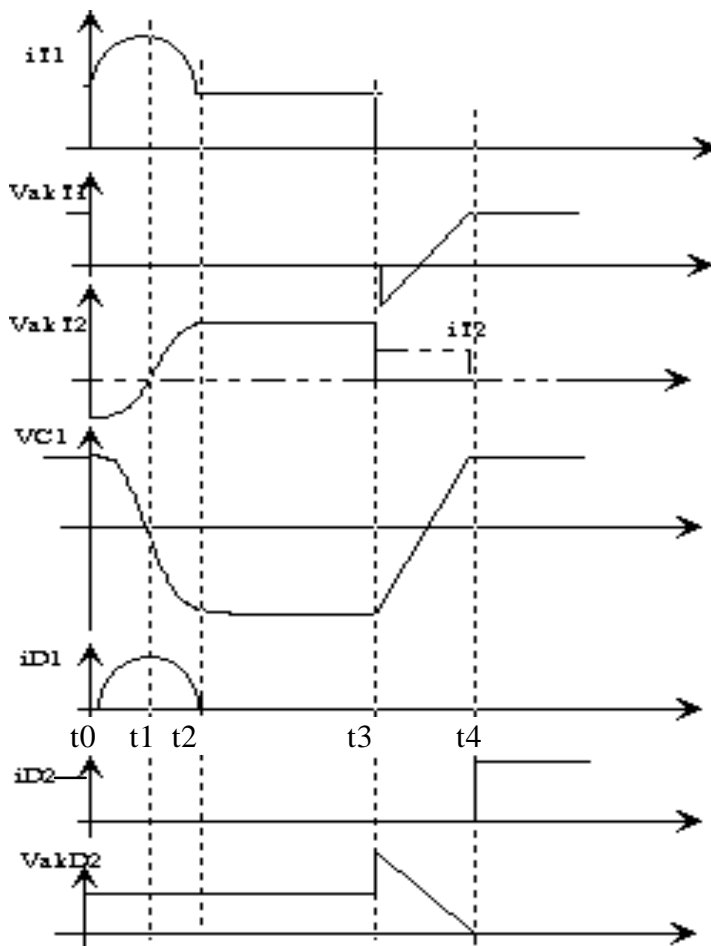
En estos circuitos la frecuencia se mantiene constante y la regulación se realiza variando el tiempo de conducción. Por ello hace falta un tiristor auxiliar complicando el circuito auxiliar. Su estructura, tal como se muestra a continuación, es muy parecida al interruptor estático de c.c. de conmutación forzada por condensador en paralelo. Ahora se han añadido L1 y C1 para invertir la polaridad del condensador. R sirve para procurar la carga inicial de C1 y en el arranque da igual

disparar un tiristor antes que el otro. Dado su gran valor óhmico, R no influye en el régimen de funcionamiento permanente.

Veamos la descripción del fenómeno de conexión y de desconexión de este “**contactor estático**”. Si admitimos que está desconectado. La corriente continua de salida pasa a través de la carga y del diodo D2. El condensador C1 está cargado como consecuencia de un fenómeno de desconexión precedente, o por su carga a través de R.



El disparo del tiristor principal T1 (instante t_0) provoca por una parte una corriente de descarga del condensador C1 a través de L1 y D1 de forma oscilante y por otra parte una corriente que pasa por la carga, eliminando la corriente de D2 el cual se cortará. La descarga de C1 por D1 será con una corriente que crece sinusoidalmente desde 0 y alcanza su valor de pico en t_1 igual a $I_p = E\sqrt{C/L_1}$,



anulándose en t_2 ya que el diodo D1 impide la circulación de corriente en sentido inverso. Durante este intervalo la tensión en el condensador cambia de polaridad alcanzando el valor $-E$ en t_2 . Al mismo tiempo, desde su cebado, el tiristor T1 aplica la tensión E en la carga, siendo la corriente máxima del tiristor igual a $I + I_p$ en el instante t_1 .

Pasado t_2 , la corriente por T1 será la de la carga mientras la tensión V_{akT2} habrá pasado de $-E$ en t_0 a $+E$ en t_2 polarizando adecuadamente a T2 para su cebado en el instante de apertura próximo. La conexión del regulador se ha terminado, circulando la corriente por la carga desde la fuente de alimentación.

Para “abrir” el circuito, se dispara a T2 en el instante t_3 . Con ello el condensador aplica un impulso negativo en el ánodo de T1, alcanzando la tensión ánodo-cátodo de T1 el valor $-E$ y cortándose. El condensador C1 se descarga a través de T1 y T2. La corriente resultante por T1 se anula rápidamente, provocando el bloqueo de T1. La corriente de carga circulará ahora por C1 y T2. Dado que la corriente de la carga es constante, El condensador C1 se descarga y se recarga con la polaridad opuesta,

haciendo que la tensión en bornes de la carga decazca, y cuando pasa por cero el diodo D2 vuelve a conducir (instante t_4).

La carga de C1 termina y T2 se bloquea, terminando la desconexión del **contactor estático**.

El tiempo t_c durante el cual la tensión V_{akT1} es negativa debe superar el tiempo de apagado del tiristor T1, para que este se bloquee. Su cálculo resulta igual al realizado para el interruptor de conmutación forzada por condensador en paralelo, obteniéndose:



para carga resistiva $C1 \geq \frac{toff \cdot Imáx}{0,69 \cdot V} = 1,45 \cdot toff \cdot \frac{I}{V}$ y para carga inductiva $C1 \geq \frac{toff \cdot Imáx}{V}$ Por

otra parte, para su funcionamiento correcto, es necesario que el condensador pase de -E a +E, lo cual exige que la conducción de T1 coincida, como valor mínimo, con la mitad del período de resonancia de la red C1-L1-D1, es decir, el intervalo de t0 a t2, por tanto:

$$w = \frac{2\pi}{T_{res}} = \frac{1}{\sqrt{L1 \cdot C1}} \text{ de donde se deduce: } ton(\text{mín}) = t2 - t0 = \pi \cdot \sqrt{L1 \cdot C1}$$

Indicar como inconveniente de este circuito, la dependencia de la carga en el tiempo de bloqueo, junto con el no-funcionamiento en vacío, pues la tensión del condensador deja de conmutar. Por último destacar como en el instante de bloqueo, aparece un impulso de tensión en la carga hasta 2E.