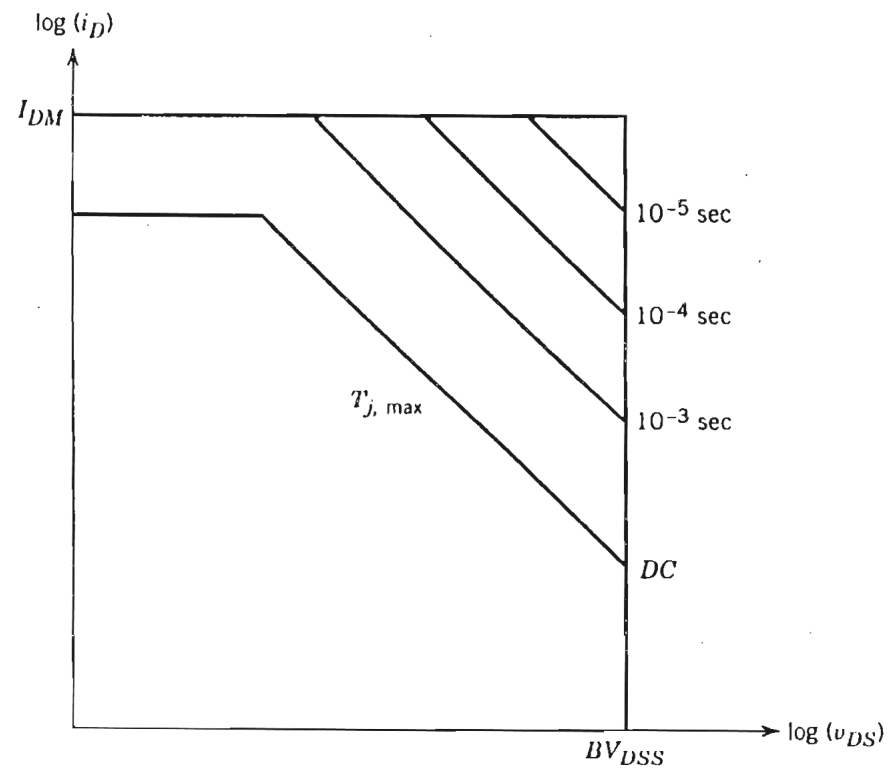


Reducción de las pérdidas por conmutación en los circuitos de conmutación dura.

Para un dispositivo de control de potencia específico, operando a unos niveles de corriente y tensión máximos dados, las pérdidas por conmutación solo pueden cambiarse cambiando la forma como varían $i_{ce}(t)$ y $v_{ce}(t)$ durante la conmutación.

En general esto solo es posible si se introducen elementos auxiliares que, en conjunto, forman los llamados circuitos de ayuda a la conmutación (CAC, en inglés “snubber circuits”).

Los CAC operan cambiando la trayectoria de conmutación en el plano V-I, haciendo que quede completamente dentro del área de operación segura (SOA) del dispositivo.



Área de trabajo segura (SOA) de un MOSFET de potencia.

En general es necesario incluir un circuito de ayuda para la conmutación de apagado (CAC-A) y otro para la conmutación de encendido (CAC-E).

Los circuitos de ayuda a la conmutación de apagado, CAC-A, controlan la velocidad de variación del voltaje entre los terminales del dispositivo que se apaga, y esencialmente deben comportarse como una impedancia capacitiva en paralelo con dichos terminales.

Los circuitos de ayuda a la conmutación de encendido, CAC-E, controlan la velocidad de variación de la corriente del dispositivo que se enciende, y esencialmente deben comportarse como una impedancia inductiva en serie con dichos terminales.

Básicamente la acción de los CAC se logra almacenando energía en un elemento reactivo.

En general esa energía debe ser removida después de cada conmutación, para que el circuito quede en condiciones de operar en forma adecuada durante la siguiente conmutación.

La inclusión de un CAC en el circuito de potencia produce tres efectos simultáneos:

1.- La energía disipada en el dispositivo principal durante la conmutación se reduce.

2.- La velocidad de variación de la variable manipulada ($di_{ce}(t)/dt$ en el CAC-E, $dv_{ce}(t)/dt$ en el CAC-A) cambia y se reduce.

3.- Se acumula energía en un elemento reactivo del CAC. Este es un efecto secundario no deseado pero inevitable con la tecnología actual. En general esta energía debe ser removida del elemento reactivo antes de que el CAC vuelva a actuar para que opere según lo deseado.

En la práctica los CAC se diseñan buscando maximizar uno de los dos efectos principales dando origen a dos tipos principales de aplicaciones de CAC:

- 1.- CAC aplicados para reducir las pérdidas de conmutación (a veces llamados “snubbers óptimos”), en los cuales se busca que el tiempo de acción del CAC sea aproximadamente igual al tiempo de conmutación nominal del dispositivo a proteger, para no reducir la frecuencia de conmutación “natural” del circuito de potencia.
Se emplean principalmente en circuitos con dispositivos completamente controlados cuando las pérdidas por conmutación son el factor que limita la frecuencia máxima de conmutación.

2.- CAC aplicados para controlar la velocidad de variación de la variable controlada (di/dt o dv/dt). En estos casos el tiempo de operación del CAC es muy superior al tiempo de conmutación nominal del dispositivo protegido, la frecuencia de conmutación es baja y las pérdidas por conmutación en el dispositivo principal son prácticamente nulas, dado que este opera en régimen de conmutación a cero voltaje (ZVC) o conmutación a cero corriente (ZCC) según sea el caso. En general se emplean en circuitos con GTO o SCR donde los valores del dv/dt reaplicado en el apagado o el di/dt de encendido deben ser estrictamente limitados por debajo de un máximo indicado por el fabricante para evitar daños en los dispositivos.

Debe señalarse que no existen diferencias topológicas entre los CAC usados en ambas aplicaciones. Las diferencias se limitan a los valores de los elementos empleados y aparece durante el proceso de cálculo, en base a las aproximaciones empleadas.

En aplicaciones de tipo “CAC óptimo” el análisis aproximado considera que el tiempo de acción del CAC es igual al tiempo de conmutación del dispositivo, y que durante este tiempo la variable de interés ($i_{ce}(t)$ o $v_{ce}(t)$, según el caso) cambia linealmente.

En aplicaciones del tipo “control de velocidad de variación”, se asume que el cambio en el estado del dispositivo principal es instantáneo y no interviene en el cálculo, por lo que se considera que la variable de interés (I_L o V_{CC} , según el caso) es constante durante el intervalo de acción del CAC.

Por supuesto, si no se emplean métodos de cálculo aproximado y se sigue con precisión el cambio instantáneo de todas las variables, ya sea con métodos analíticos o de cálculo numérico, diferenciar entre los dos tipos de CAC carece de utilidad práctica.

De acuerdo con su forma de manejar la energía atrapada en el elemento reactivo, se pueden considerar dos tipos de CAC:

- 1.- CAC disipativos. La mayor parte de la energía atrapada se disipa en una resistencia auxiliar.
- 2.- CAC no disipativos. Se incluyen elementos cuyo objeto es reciclar la energía atrapada, bien devolviéndola a la fuente, bien re-usándola en otra parte del ciclo.

Dado que todos los componentes reales tienen resistencias asociadas, estrictamente hablando todos los CAC (y en general todos los circuitos) tienen pérdidas, y por lo tanto no existe realmente un CAC totalmente sin pérdidas.

Los CAC no disipativos se clasifican en:

2.a.- CAC recuperadores de energía. Devuelven la energía atrapada en el elemento reactivo a la fuente de alimentación, recuperándola para que pueda ser reutilizada.

2.b.- CAC “sin pérdidas”. Reciclan la energía atrapada durante una etapa de su operación para usarla en la siguiente; por lo tanto en estado estacionario no hay flujo neto de energía entre el CAC y el resto del sistema.

De acuerdo con su forma de actuación se pueden considerar dos tipos de CAC:

1.- De operación automática (“CAC pasivos”), están constituidos exclusivamente por elementos no controlados (R, L, C y diodos), por lo que todos sus modos de actuación ocurren automáticamente en seguimiento a las conmutaciones de encendido y apagado del dispositivo principal al cual están asociados.

2.- De operación controlada (“CAC activos”), contienen por lo menos un dispositivo controlado (SCR, BJT, MOSFET, IGBT, etc.) y su circuito de disparo, además de los elementos no controlados; por lo tanto por lo menos uno de sus modos de actuación no ocurre automáticamente en seguimiento a las conmutaciones de encendido y apagado del dispositivo principal al cual están asociados, sino después de recibir una orden adicional emitida por el sistema de control de las conmutaciones de los elementos principales.

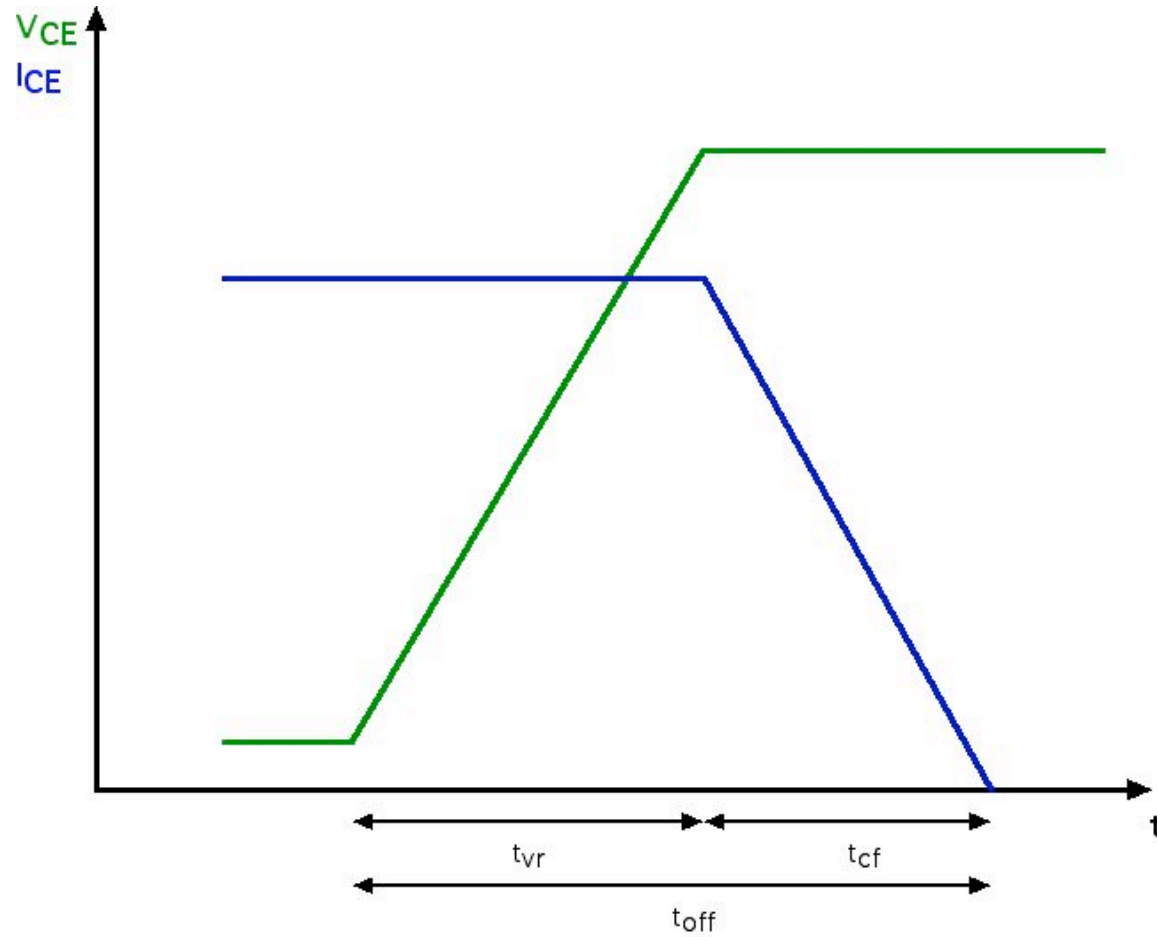
En muchos casos el elemento activo del CAC controla la función de reciclado de la energía atrapada.

En general los CAC activos son del tipo “no disipativo”.

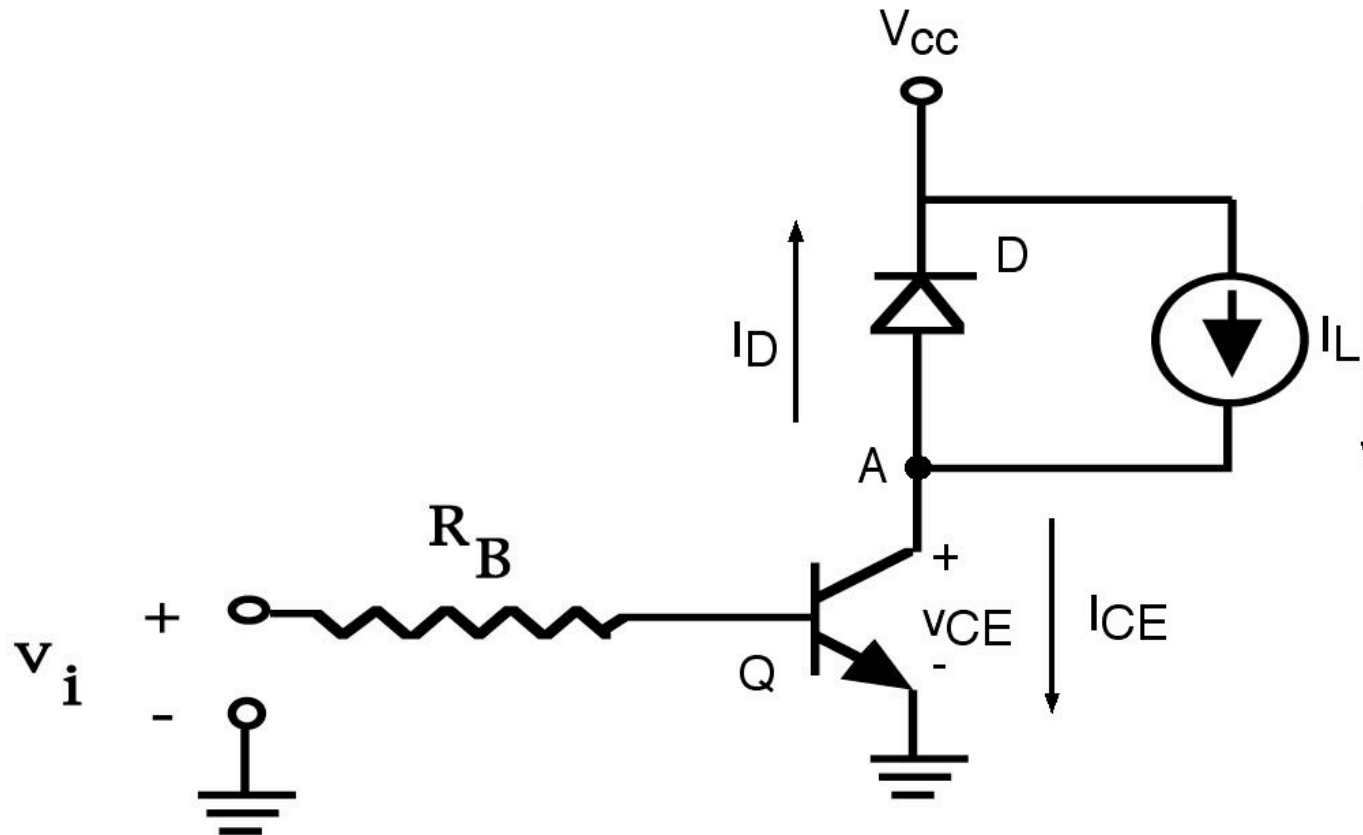
Análisis idealizado de algunas configuraciones CAC representativas.

I.- CAC disipativo de ayuda a la conmutación de apagado (turn-off snubber).

Esta configuración fue la primera en ser introducida en la práctica, su operación es simple y permite definir las técnicas de análisis de este tipo de circuitos y los valores de reducción de pérdidas obtenibles sirven como estándar de comparación para calibrar el rendimiento obtenible por los CAC propuestos posteriormente



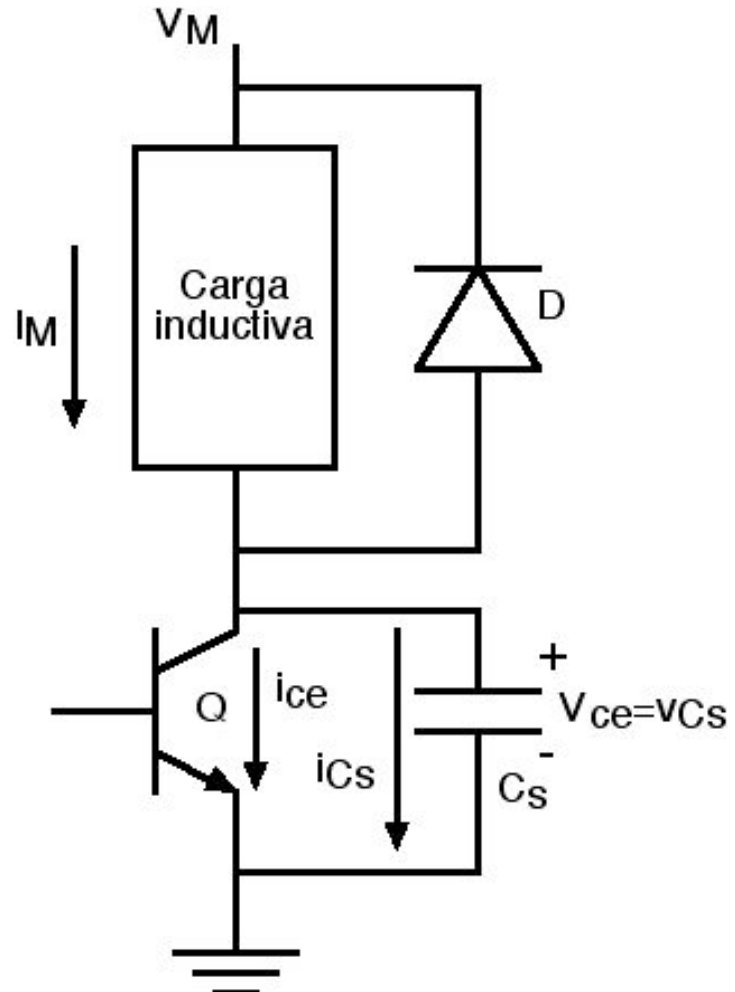
Conmutación de apagado: Formas de onda ideales del voltaje



Circuito básico de conmutación en electrónica de potencia.

Para reducir las pérdidas que se producen en el conmutador controlado en la conmutación de apagado cuando la carga es inductiva, es preciso abrir un camino para que la corriente $i_{ce}(t)$ pueda empezar a reducirse antes de que el diodo auxiliar quede polarizado en directo.

Esto se logra conectando un condensador auxiliar, C_a , en paralelo con el dispositivo principal de control de potencia.



Circuito básico de ayuda a la conmutación de apagado durante la conmutación de apagado.

En estas condiciones:

$$v_{ce}(t) = v_{C_S}(t) = \frac{1}{C_S} \int_0^t i_{C_S}(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$i_{C_S}(t) = I_M - i_{ce}(t) \quad (2)$$

La inclusión del condensador de amortiguamiento, C_s , abriendo un camino a la corriente de carga en paralelo con el conmutador principal permite que la caída de corriente en el dispositivo principal ocurra simultáneamente con el incremento de la tensión entre sus terminales principales, y hace que este incremento esté controlado por la ecuación de carga del condensador.

Cuando empieza la conmutación de apagado la corriente en el dispositivo principal empieza a reducirse y, siguiendo con la aproximación lineal a los cambios de las variables en el dispositivo principal durante la conmutación, se cumple:

$$i_{C_s}(t) = I_M - i_{ce}(t) = I_M - I_M \left(1 - \frac{t}{t_{cf}}\right) = I_M \frac{t}{t_{cf}} \quad (3)$$

$$v_{ce}(t) = v_{C_s}(t) = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_{C_s}(\tau) d\tau = \frac{1}{C_s} \int_0^t I_M \frac{\tau}{t_{cf}} d\tau = \frac{I_M t^2}{2C_s t_{cf}} \quad (4)$$

El intervalo de conmutación de apagado termina en el instante t_t , cuando:

$$v_{ce}(t_t) = v_{C_s}(t_t) = V_M = \frac{I_M t_t^2}{2C_s t_{cf}} \quad (5)$$

$$t_t = \sqrt{\frac{2C_s V_M t_{cf}}{I_M}} \quad (6)$$

La energía disipada en la juntura durante la conmutación asistida por el condensador es:

$$E_{toffC} = \int_0^{t_t} v_{ce}(\tau) i_{ce}(\tau) d\tau = \int_0^{t_t} \frac{I_M \tau^2}{2C_s t_{cf}} I_M \left(1 - \frac{\tau}{t_{cf}}\right) d\tau \quad (7)$$

$$E_{toffC} = \frac{I_M^2}{2C_s t_{cf}} \left(\frac{t_t^3}{3} - \frac{t_t^4}{4} \right) \quad (8)$$

Las pérdidas causadas por la conmutación de apagado pueden hacerse tan pequeñas como se desee seleccionando un condensador adecuado, pero esto podría traer como consecuencia un tiempo de conmutación muy largo y, por lo tanto, una reducción significativa en la frecuencia máxima de conmutación posible en el circuito.

Si no se desea afectar el tiempo de conmutación, se debe hacer $t_t = t_{cf}$, de forma que la duración del intervalo de conmutación de apagado es esencialmente el mismo.

Este amortiguador suele considerarse el “amortiguador óptimo” en tiempo de conmutación.

$$v_{ce}(t_{cf}) = v_c(t_{cf}) = V_M = \frac{I_M t_{cf}}{2C_s} \quad (9)$$

de donde, el valor óptimo del condensador, C_{sop} , es:

$$C_{sop} = \frac{I_M t_{cf}}{2V_M} \quad (10)$$

La energía disipada en el dispositivo principal de control de potencia durante la conmutación de apagado en este caso es:

$$E_{toff}C_{op} = \frac{I_M^2 t_{cf}^2}{24C_{sop}} = \frac{I_M^2 t_{cf}^2}{24 \frac{I_M t_{cf}}{2V_{cc}}} = \frac{V_M I_M t_{cf}}{12} \quad (11)$$

En igualdad de circunstancias, si no se usa el circuito amortiguador las pérdidas son:

$$E_{toff}2M = \frac{V_M I_M t_{cf}}{2} \quad (12)$$

El uso del amortiguador de apagado con condensador óptimo reduce las pérdidas durante la conmutación de apagado significativamente (idealmente en un factor de 6 en el caso de la aproximación lineal usada en este ejemplo).

La energía atrapada en el condensador al final del intervalo de conmutación de apagado es:

$$E_{sC} = \frac{1}{2} C_s V_M^2 \quad (13)$$

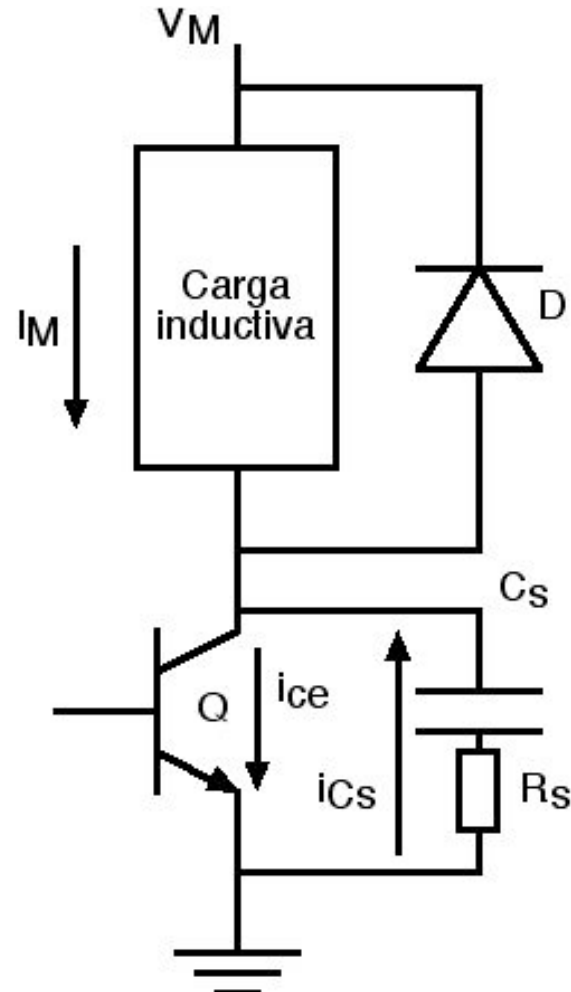
Si se emplea el condensador óptimo, la energía atrapada es:

$$E_{sCop} = \frac{1}{2} C_{sop} V_M^2 = \frac{1}{2} \frac{I_M t_{cf}}{2V_M} V_M^2 \quad (14)$$

$$E_{sCop} = \frac{I_M t_{cf}}{4} V_M \quad (15)$$

Dado que el condensador auxiliar está conectado en paralelo con el dispositivo principal de control de potencia, si no se toman medidas adicionales la siguiente conmutación de encendido cortocircuitará al condensador, y la energía atrapada en el mismo se disipará en el dispositivo principal de control de potencia, aumentando tanto las pérdidas de conmutación en encendido como el valor de la corriente que circula por el dispositivo, lo que por supuesto no debe permitirse.

La forma más simple de evitar esto consiste en incluir una resistencia auxiliar, R_s , en el circuito amortiguador, para disipar la energía, lo que convierte el amortiguador básico en un amortiguador disipativo.



Circuito básico de ayuda a la conmutación de apagado durante la conmutación de encendido.

El valor de la resistencia auxiliar, R_s , se puede calcular en base al valor pico de la corriente de descarga del condensador del amortiguador, I_{Cs} , que se desee tolerar.

$$I_{CsM} = \frac{V_M}{R_s} \Rightarrow R_s = \frac{V_M}{I_{CsM}} \quad (16)$$

Dado que el circuito amortiguador requiere que el condensador esté completamente descargado para operar correctamente, es preciso que la duración mínima de los pulsos de encendido del dispositivo principal de control de potencia, t_{onmin} , cumpla con la relación: $t_{onmin} > 5R_sC$.

Esto implica que el circuito generador de la señal PWM que controla al conmutador principal debe disponer de un mecanismo de eliminación de todos los pulsos de encendido que no cumplan con esta condición.

Suponiendo que toda la energía atrapada en el condensador auxiliar se disipa en la resistencia auxiliar en cada conmutación de apagado, la potencia promedio que se disipa en la resistencia auxiliar, P_{Rs} , cuando el dispositivo principal de control conmuta con una frecuencia f es:

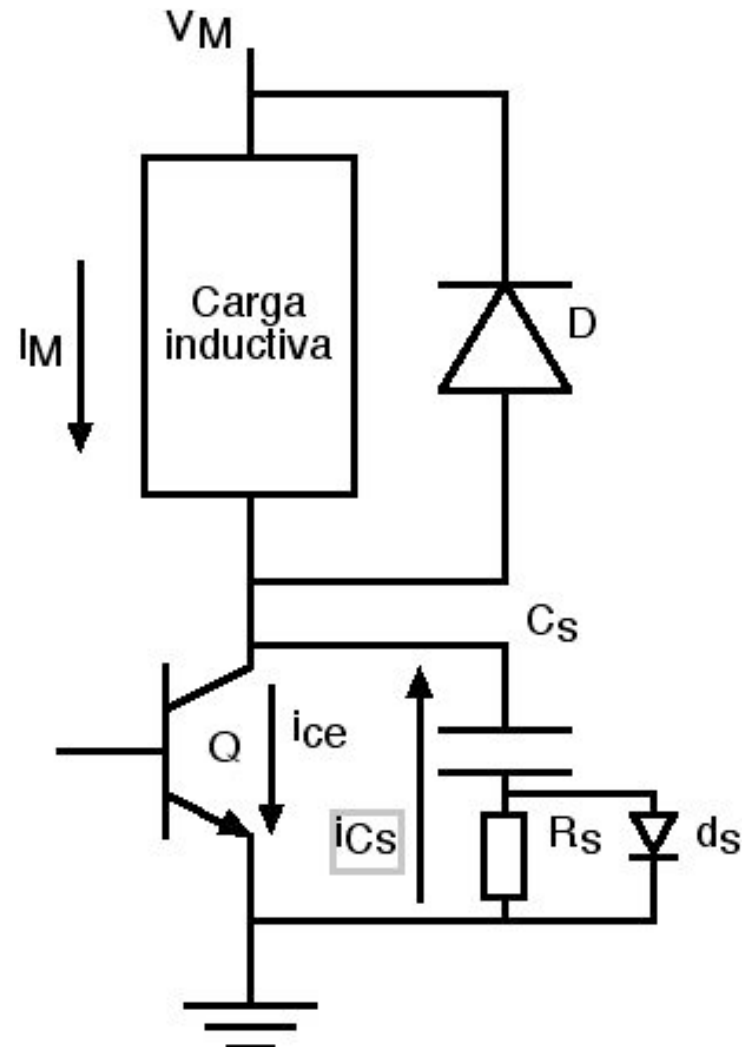
$$P_{Rs} = f \frac{I_M t_{cf}}{4} V_M \quad (17)$$

Si en el circuito de potencia hay N conmutadores principales operando en las mismas condiciones de carga, cada uno de los cuales tiene un circuito de ayuda a la conmutación de este tipo, la pérdida total en las resistencias auxiliares es:

$$P_{RsT} = NP_{RsT} = Nf \frac{I_M t_{cf}}{4} V_M$$

Estas pérdidas deben por supuesto ser consideradas cuando se determina la eficiencia del sistema completo.

Dado que la resistencia auxiliar no debe intervenir durante la conmutación de apagado para no interferir con la acción de amortiguamiento deseada y ya calculada, el circuito amortiguador de apagado disipativo debe incluir un diodo auxiliar en paralelo con la resistencia auxiliar que la cortocircuite durante el intervalo de la conmutación de apagado.



Circuito básico completo de ayuda a la conmutación de apagado.

El diodo y el condensador deben ser capaces de soportar la tensión V_{cc} (como mínimo) y su corriente pico será igual a la corriente I_{LM} del circuito principal.

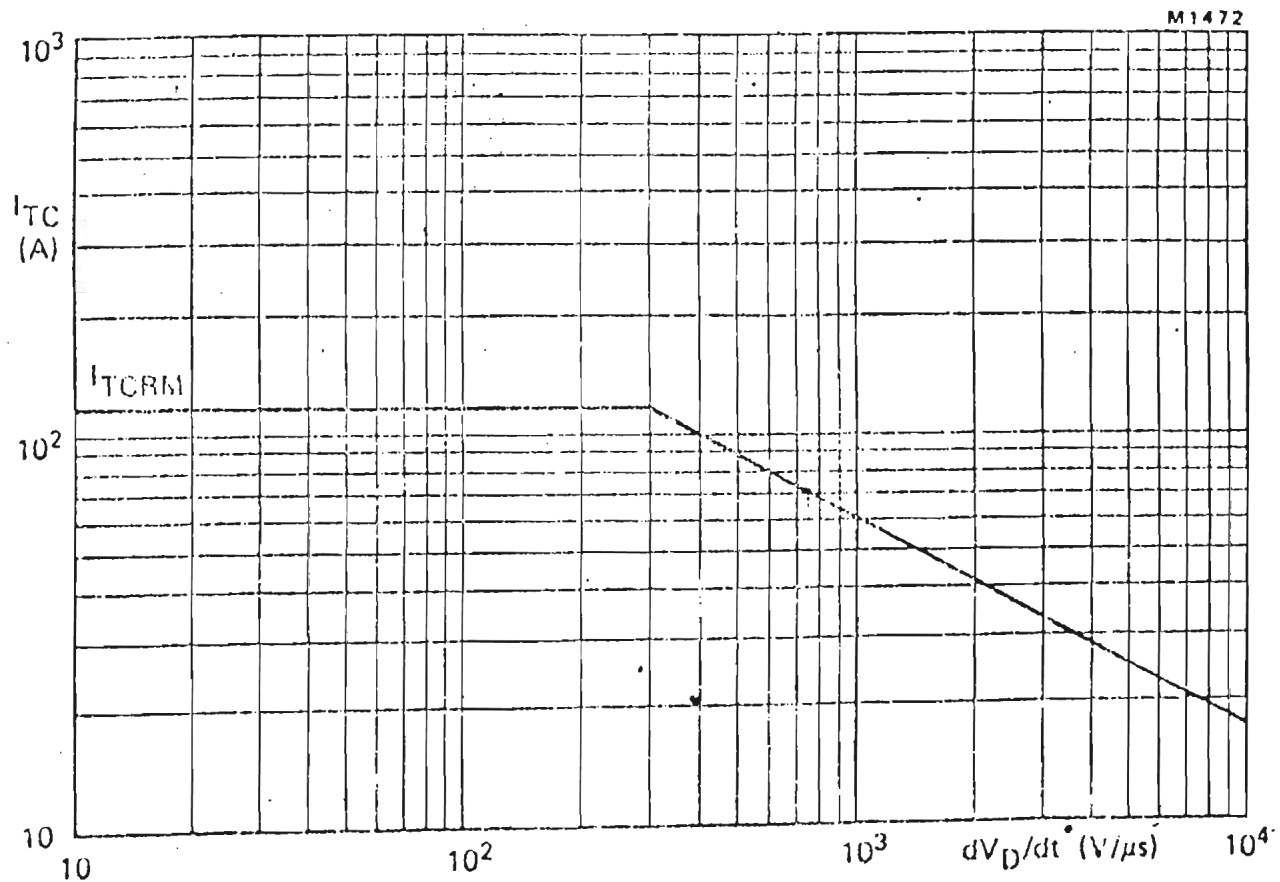
El valor de la corriente rms para estos componentes se puede aproximar como el valor de un pulso rectangular de corriente de amplitud I_{LM} , duración igual al tiempo de operación del CAC y período igual al mínimo período de conmutación del dispositivo principal.

Una característica implícita en el CAC-A disipativo básico es que el circuito opera de forma automática en cada conmutación de apagado, y que no requiere de circuitos auxiliares para fijar un valor inicial de tensión en el condensador.

En general se puede considerar que esta configuración es el estándar de referencia contra el cual debe compararse cualquier otra configuración amortiguadora de apagado, tanto en relación con la reducción de las pérdidas en el conmutador principal, como en lo referente a eficiencia general del sistema y complejidad circuital y de operación.

II.- CAC disipativo para controlar el dv_{ce}/dt re-aplicado durante la conmutación de apagado.

En el caso genérico de los GTO, el circuito de ayuda a la conmutación de apagado tiene como primera prioridad asegurar que la velocidad de variación del voltaje AK reaplicado durante el apagado, dV_{AK}/dt , sea menor que el valor máximo permitido, dV_{AKM}/dt para el nivel de corriente de carga máxima que se desea controlar, I_{LM} .



Relación corriente conmutable vs. dV_{AK}/dt reaplicado en el GTO BTV160.

Si se asume conmutación instantánea en el dispositivo principal, y corriente de carga constante, I_{LM} , y se desea limitar el valor del dv_{ce}/dt re-aplicado durante la conmutación de apagado a un valor dv_{ceM}/dt es preciso asegurar que el condensador del CAC de apagado sea tal que se cumpla:

$$\frac{I_{LM}}{C_S} = \frac{dv_{ceM}(t)}{dt}$$

De donde el valor del condensador del amortiguador resulta:

$$C_s = \frac{I_{LM}}{\frac{dv_{ceM}(t)}{dt}}$$

El CAC de apagado opera hasta que la tensión $v_{ce}(t)$ alcanza el valor de la fuente, cuando el diodo de libre conducción de la carga, D_L , queda polarizado en directo, atrapando la corriente de carga en lazo cerrado Carga- D_L .

Dada una tensión de alimentación V_{cc} , el tiempo empleado por el condensador del CAC para cargarse hasta este valor, t_{cacm} , cuando la corriente es la máxima de diseño, I_{LM} , t_{cacm} será:

$$t_{cacm} = \frac{C_s V_{cc}}{I_{LM}}$$

Para cualquier otra corriente de carga ($I_L < I_{LM}$) el tiempo necesario para cargar el condensador a su valor final, t_{cac} , será:

$$t_{cac} = \frac{C_s V_{cc}}{I_L}$$

cumpléndose que: $t_{cac} > t_{cacm}$

Si la siguiente conmutación en el circuito principal de potencia ocurre después de un intervalo mínimo de duración t_d , la corriente de carga mínima (I_{Lm}) necesaria para lograr cargar el condensador del CAC al valor final (V_{cc}) resulta:

$$I_{Lm} = \frac{C_s V_{cc}}{t_d}$$

Nota: para cualquier corriente de carga I_L menor que I_{Lm} ($I_L < I_{Lm}$), el condensador del CAC no estará completamente cargado cuando se produzca la siguiente conmutación en el circuito principal de potencia, lo que debe ser analizado en cada caso para determinar las posibles consecuencias sobre la operación del sistema.

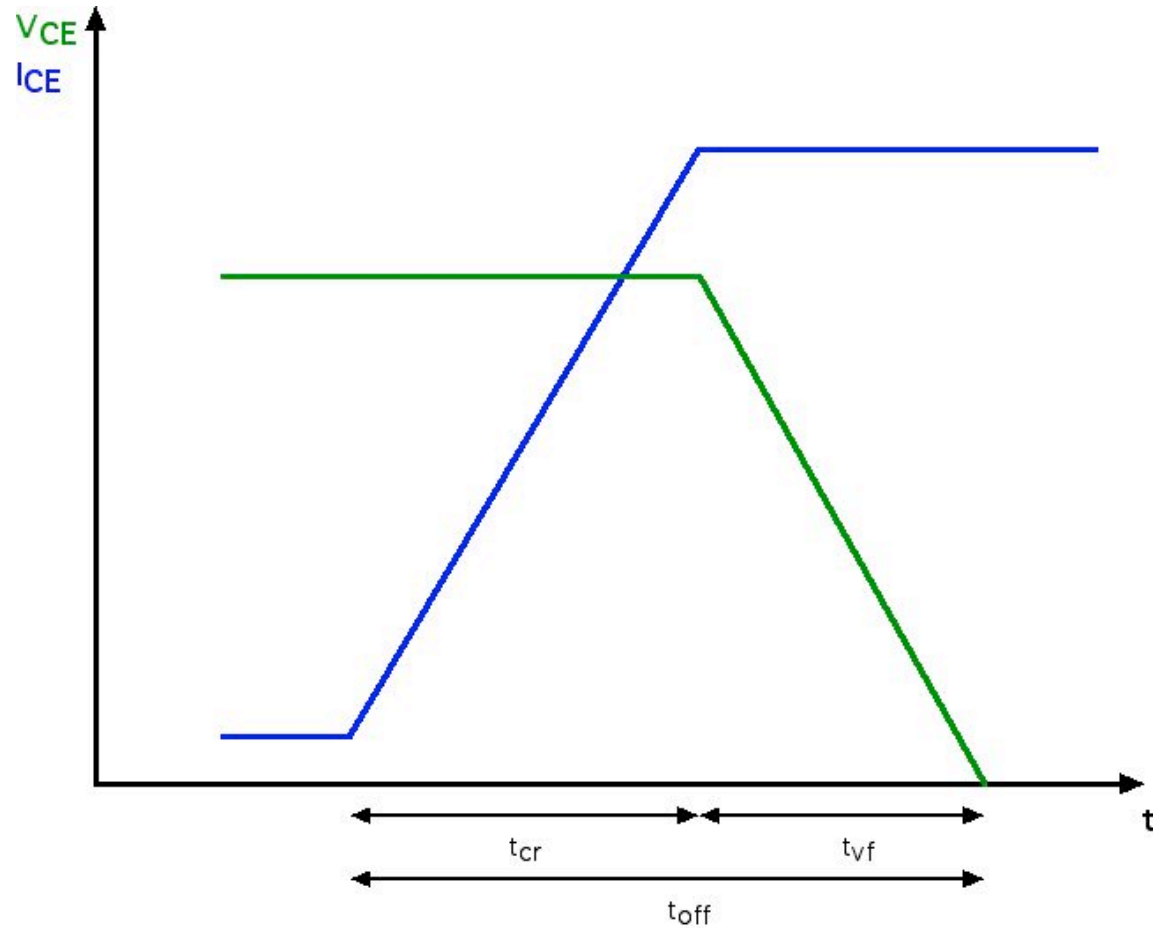
Una vez conocido el valor de C_s , el valor de la energía almacenada en el mismo al final del ciclo de carga y el valor de la resistencia auxiliar necesaria para disiparla se calculan como en caso del CAC I.

El diodo y el condensador deben ser capaces de soportar la tensión V_{cc} (como mínimo) y su corriente pico será igual a la corriente I_{LM} del circuito principal.

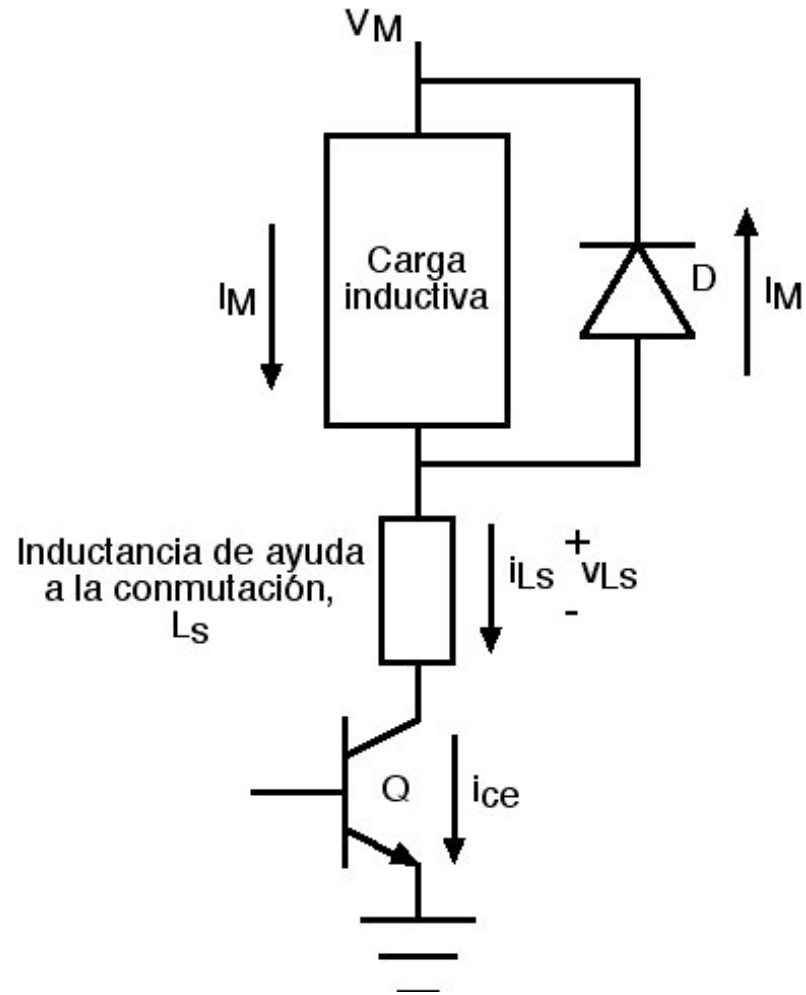
El valor de la corriente rms para estos componentes se puede aproximar como el valor de un pulso rectangular de corriente de amplitud I_{LM} , duración igual al tiempo de operación del CAC y período igual al mínimo período de conmutación del dispositivo principal.

III.- CAC disipativo de ayuda a la conmutación de encendido (turn-on snubber).

Para reducir las pérdidas en la conmutación de encendido es preciso lograr que la corriente $i_{ce}(t)$ crezca hasta su valor final antes de que el voltaje $v_{ce}(t)$ alcance su valor mínimo.



Conmutación de encendido: Formas de onda ideales del voltaje (verde) y la corriente (azul) en los terminales del dispositivo que conmuta.



Circuito básico de ayuda a la conmutación de encendido durante la conmutación de encendido.

Esto se logra conectando una inductancia en serie con el dispositivo principal de control de potencia.

Por lo tanto:

$$i_{ce}(t) = i_{L_s}(t) \quad (18)$$

Durante la conmutación de encendido hay corriente circulando en el diodo de libre conducción conectado en antiparalelo con la carga. Si este diodo se considera ideal, se cumple:

$$v_{akDa} = v_L = 0 \quad (19)$$

$$V_M = v_{ce}(t) + L_s \frac{di_{ce}(t)}{dt} \Rightarrow v_{ce}(t) = V_M - L_s \frac{di_{ce}(t)}{dt} \quad (20)$$

La inclusión de la inductancia de amortiguamiento, L_s , coloca transitoriamente una caída de tensión en serie con el conmutador principal, haciendo posible que el aumento de la corriente en el dispositivo principal ocurra simultáneamente con la caída de la tensión entre sus terminales principales, y hace que el proceso esté controlado por la ecuación de la tensión en la inductancia.

Es por lo tanto posible fijar el valor de la tensión aplicada al dispositivo principal durante el encendido en cualquier valor en el rango $0 < v_{ce}(t) < V_M$

Evidentemente el objetivo del diseño es fijar la tensión en el mínimo, para minimizar las pérdidas.

Si para propósito de este análisis se fija $v_{ce}(t) = 0$ durante el intervalo de la conmutación de encendido se tiene:

$$L_s \frac{di_{ce}(t)}{dt} = V_M \quad (21)$$

$$L_s = \frac{V_M}{\frac{di_{ce}(t)}{dt}} \quad (22)$$

En condiciones ideales (carga resistiva) y asumiendo linealidad en el crecimiento de la corriente, la máxima pendiente de crecimiento de la corriente en un dispositivo electrónico de control de potencia viene dada por:

$$di_{ceM}(t) = \frac{I_{ceM}}{t_{cr}} \quad (23)$$

donde t_{cr} es el tiempo de subida de la corriente en el dispositivo.

Para no alargar la conmutación de encendido, el amortiguador de encendido óptimo debe completar su acción sin aumentar el tiempo de encendido del conmutador principal.

Por lo tanto la inductancia óptima resulta:

$$L_a = \frac{V_M}{\frac{di_{ce}(t)}{dt}} = \frac{V_M}{\frac{I_{ceM}}{t_{cr}}} = \frac{V_M t_{cr}}{I_{ceM}} = \frac{V_M t_{cr}}{I_M} \quad (24)$$

En el caso ideal la conmutación con el amortiguador de encendido óptimo, ocurre en condiciones de “cero voltaje” sobre el dispositivo principal de control, por lo que las pérdidas de encendido son idealmente cero.

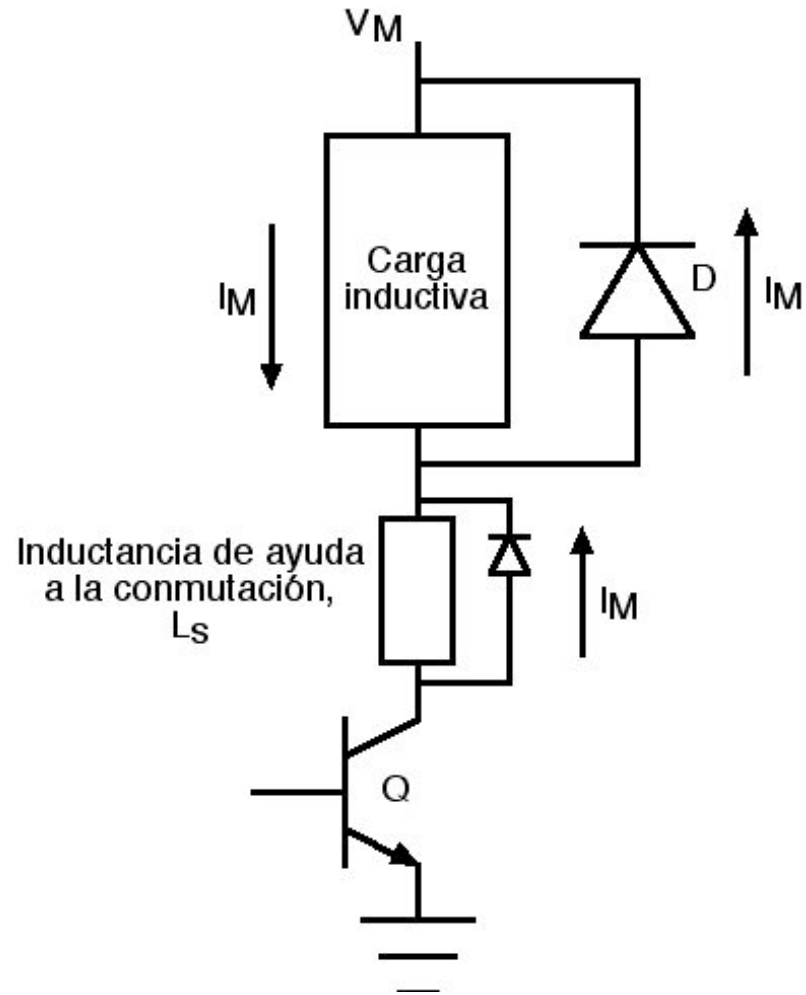
Al completarse el proceso de encendido la corriente se estabiliza en el valor:

$$i_{ce}(t_{cr})=i_{Ls}(t_{cr})=I_M \quad (25)$$

La energía atrapada en la inductancia auxiliar es:

$$E_{Ls} = \frac{I_M^2 L_s}{2} \quad (26)$$

esta energía no puede disiparse instantáneamente, lo que requiere la colocación de un diodo en antiparalelo con la inductancia auxiliar para crear un camino de libre conducción donde esta corriente queda atrapada cuando el dispositivo principal de control conmuta en apagado.

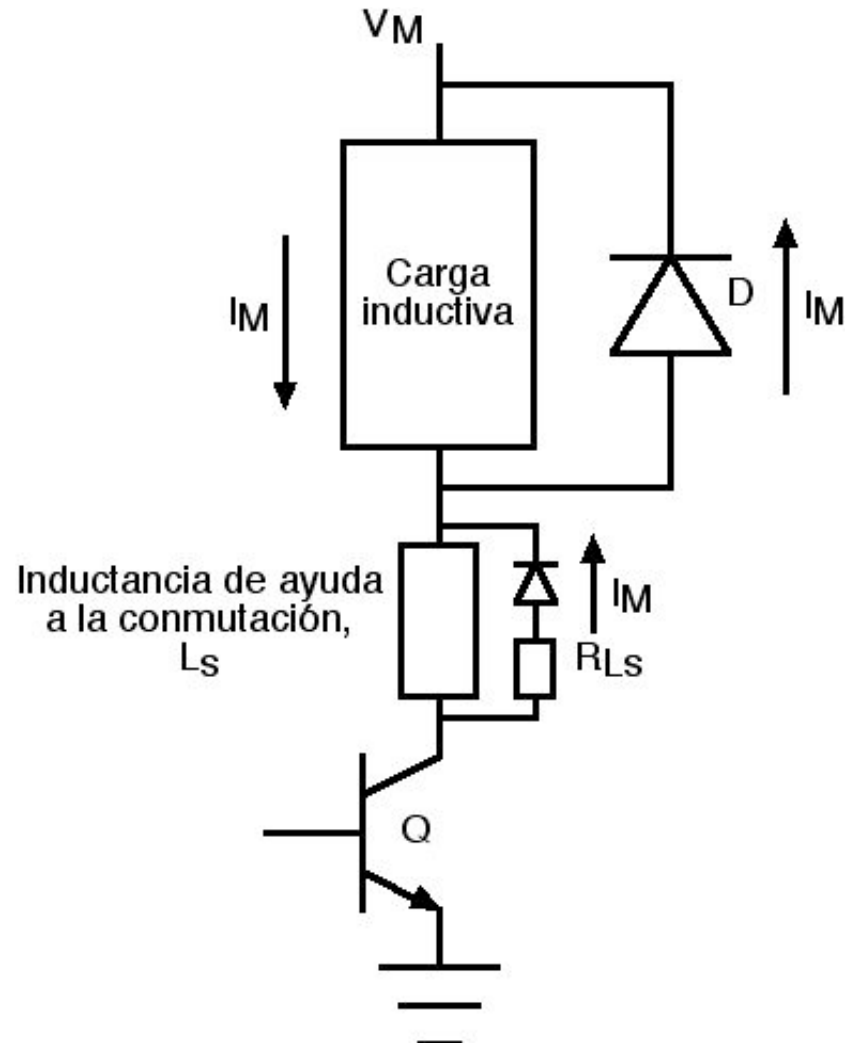


Circuito básico de ayuda a la conmutación de encendido durante la conmutación de apagado.

Para que el amortiguador de encendido opere adecuadamente no debe existir corriente en la inductancia auxiliar cuando se inicia el proceso de encendido del dispositivo principal de control.

Esto implica que la corriente atrapada debe disiparse durante el intervalo de apagado.

Para lograr esto de la manera más simple, se debe colocar una resistencia auxiliar, R_{Ls} , en serie con el diodo de libre conducción de la inductancia auxiliar.



Circuito básico completo de ayuda a la conmutación de encendido.

El valor inicial de la tensión en la resistencia auxiliar, V_{RLs} , es:

$$V_{RLs} = R_{Ls} I_M \quad (27)$$

Esta tensión se suma a la tensión de alimentación, V_M , y aumenta el valor de la tensión de bloqueo que debe soportar el dispositivo principal de control de potencia.

Si se desea limitar esta sobretensión adicional al valor V_a , la resistencia R_{aL} resulta ser:

$$R_{Ls} = \frac{V_a}{I_M} \quad (28)$$

Suponiendo que toda la energía atrapada en la inductancia auxiliar se disipa en la resistencia auxiliar en cada conmutación, la potencia que se disipa en la resistencia auxiliar, P_{RaL} , cuando el dispositivo principal de control conmuta con una frecuencia f es:

$$P_{RLs} = f \frac{I_M^2 L_s}{2} \quad (29)$$

Si en el circuito de potencia hay N conmutadores principales operando en las mismas condiciones de carga, cada uno de los cuales tiene un circuito de ayuda a la conmutación de este tipo, la pérdida total en las resistencias auxiliares es:

$$P_{RLsT} = NP_{RLs} = Nf \frac{I_M^2 L_s}{2}$$

Estas pérdidas deben por supuesto ser consideradas cuando se determina la eficiencia del sistema completo.

El diodo auxiliar debe ser capaz de soportar una corriente pico igual al valor pico máximo de la corriente principal.

Su capacidad de manejo de corriente rms debe calcularse para el peor caso, considerando que en todas las conmutaciones de encendido la corriente atrapada tiene el valor de la corriente pico máxima y que la frecuencia de conmutación es la máxima del sistema.

En esas condiciones:

$$I_{darms} = \sqrt{\int_{t_0}^{t_0+T} i_a^2(\tau) d\tau}$$

Donde t_0 es el comienzo de la conducción del diodo auxiliar y T es la duración de un intervalo de conmutación a la máxima frecuencia de operación.

El valor exacto viene dado considerando:

$$i_a(t) = I_{apM} e^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

donde I_{apM} es el valor máximo posible de la corriente atrapada y τ_s es L_s/R_{Ls} , la constante de tiempo del CAC.

Para tener una idea rápida sobreestimada del valor rms, la exponencial puede ser aproximada por un decaimiento lineal:

$$i_a(t) = I_{apM} \left(1 - \frac{t}{5\tau_s} \right)$$

Dado que el circuito amortiguador requiere que la inductancia esté completamente descargada para operar correctamente, es preciso que la duración mínima de los pulsos de apagado del dispositivo principal de control de potencia, t_{offmin} , cumpla con la relación: $t_{\text{offmin}} > 5L_s/R_{Ls}$.

Esto implica que el circuito generador de la señal PWM que controla al conmutador principal debe disponer de un mecanismo de eliminación de todos los pulsos de apagado que no cumplan con esta condición.

Versión recuperadora de energía.

En principio es posible aumentar la eficiencia total del circuito de potencia recuperando la energía atrapada en la inductancia auxiliar del circuito de ayuda a la conmutación de encendido reemplazando la resistencia de disipación por el primario de un transformador de que transfiera la energía a la fuente principal.

Esto aumenta la complejidad del circuito, por lo que la relación costo/beneficio obtenible de la inclusión de este elemento debe ser considerada antes de tomar la decisión correspondiente.

IV.- CAC disipativo para controlar el di_{ce}/dt aplicado durante la conmutación de encendido.

Si se asume conmutación instantánea en el dispositivo principal, y tensión de alimentación constante, V_{cc} , y se desea limitar el valor del di_{ce}/dt aplicado durante la conmutación de encendido a un valor máximo di_{ceM}/dt , es preciso asegurar que el inductor del CAC de encendido sea tal que se cumpla:

$$V_{cc} = L_{cac} \frac{di_{ceM}(t)}{dt}$$

De donde el valor de la inductancia del CAC resulta:

$$L_{cac} = \frac{V_{cc}}{\frac{di_{ceM}(t)}{dt}}$$

El CAC de encendido opera hasta que la corriente $i_{ce}(t)$ alcanza el valor de la corriente de carga, cuando la corriente en el diodo de libre conducción de la carga se anula.

Dada una corriente de carga máxima I_{LM} , el tiempo máximo empleado por la corriente en la inductancia del CAC para alcanzar este valor, t_{cacM} , cuando la tensión de operación es V_{cc} será:

$$t_{cacM} = \frac{L_{cac} I_{LM}}{V_{cc}}$$

Una vez conocido el valor L_{cac} , los valores de la energía atrapada en dicha inductancia, de la resistencia auxiliar necesaria para disiparla y de la sobre-tensión correspondiente se calculan como en el caso del CAC III

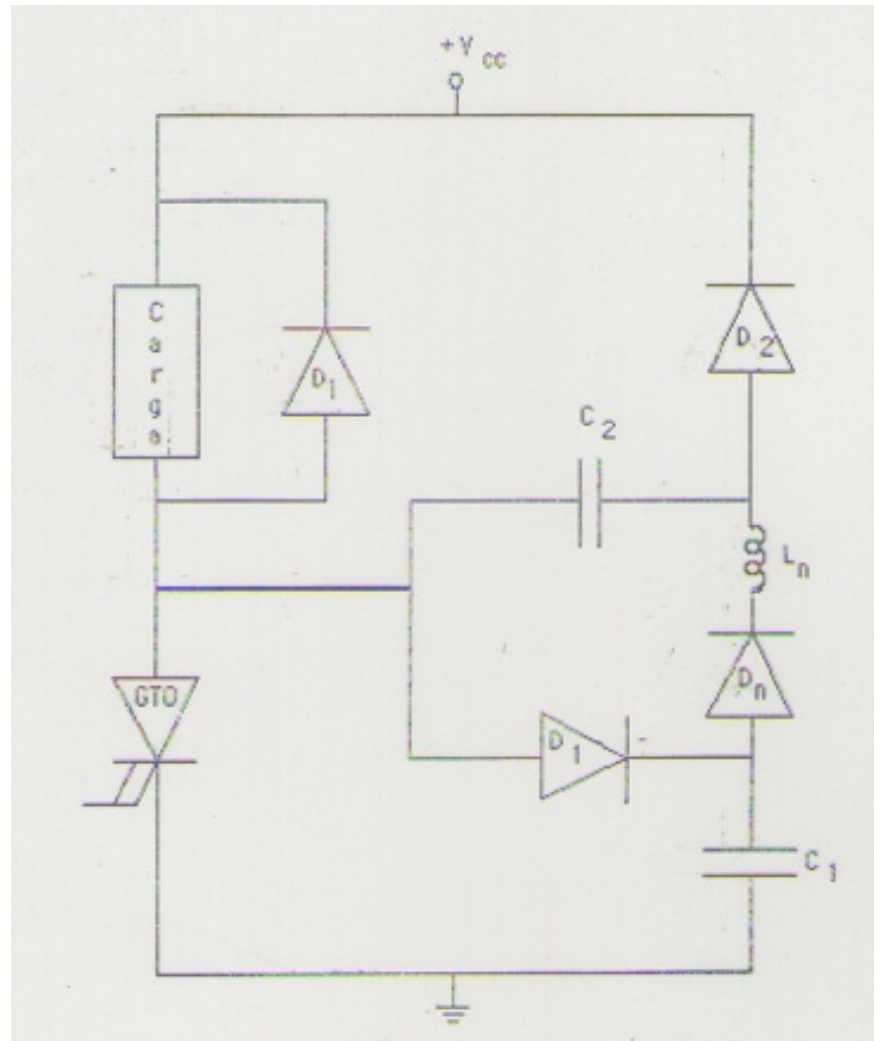
Nota: Si la corriente de carga es menor, el CAC completará su acción en un tiempo menor, lo cual usualmente no causa perturbaciones en la operación del circuito principal de potencia.

Como en el caso del CAC disipativo de ayuda a la conmutación de encendido, en el momento de la conmutación de apagado queda atrapada corriente en la inductancia de esta CAC; el análisis de las consecuencias de esto es idéntico al desarrollado en el punto III.

V.- CAC tripolar recuperador de energía de ayuda a la conmutación de apagado.

El circuito existe en dos versiones, según el dispositivo de conmutación principal este referido a tierra o a fuente.

El análisis que sigue considera la versión con el conmutador principal referido a tierra, la operación cuando el conmutador principal esta referido a fuente es equivalente.



Amortiguador de apagado tripolar recuperador de energía.

Condiciones de operación.

1.- Apagado del conmutador principal.

El dispositivo conmutador principal está encendido, llevando toda la corriente de carga, I_L , en el momento en que recibe la orden de apagarse y se inicia el proceso de apagado.

Se asume para el análisis que todos los dispositivos que forman el circuito de ayuda a la conmutación son ideales.

Refiriendo el tiempo al momento del inicio del proceso de apagado las condiciones en 0 son las siguientes:

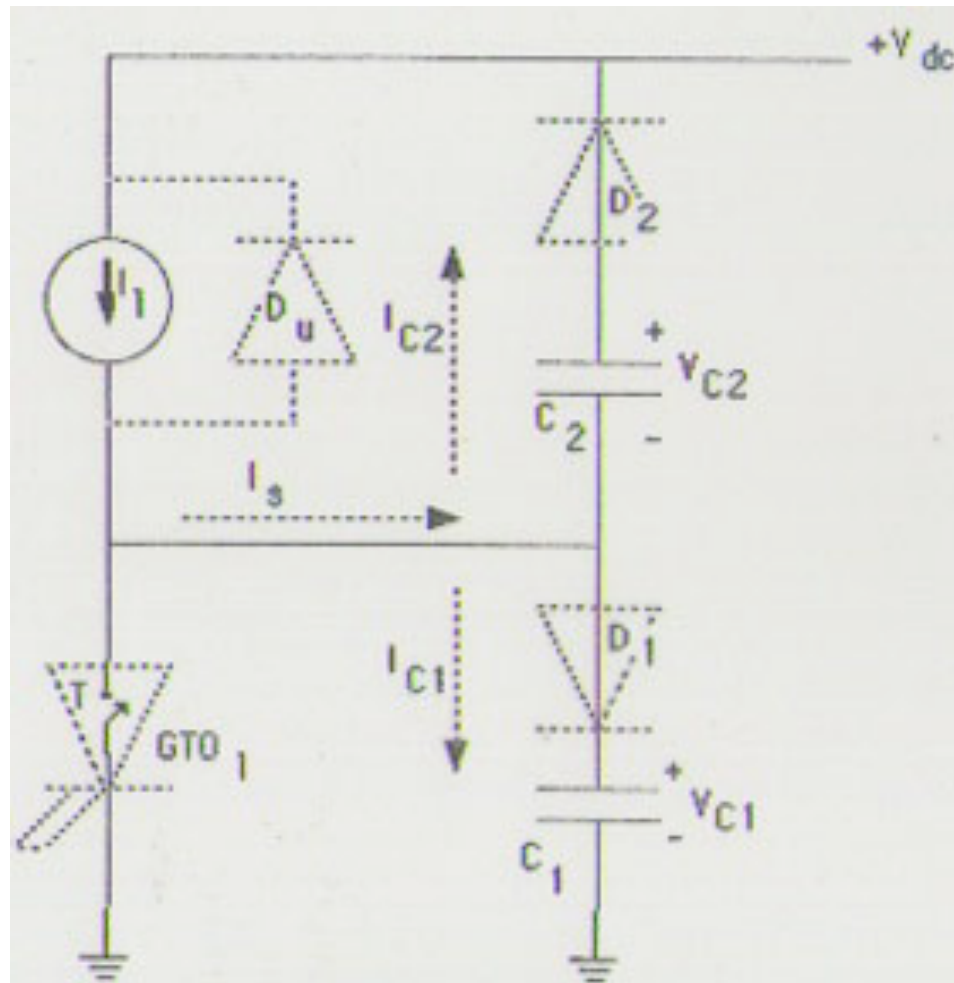
$$v_{C1}(0) = v_{AK}(0) \approx 0$$

$$v_{C2}(0) \approx V_{CC}$$

Al comenzar el proceso de apagado la tensión V_{AK} tiende a crecer, y empieza por lo tanto a circular una corriente en el circuito de ayuda a la conmutación, de acuerdo con:

$$i_S(t) = I_L - i_{AK}(t)$$

$$i_S(t) = i_{C1}(t) - i_{C2}(t)$$



Amortiguador de apagado tripolar recuperador de energía, circuito equivalente durante el apagado del conmutador principal.

La tensión en los condensadores empieza a cambiar de acuerdo con:

$$|\Delta v_{C_i}(t)| = \left| \frac{1}{C_i} \int_0^t i_{C_i}(\tau) d\tau \right|$$

Y, dada la configuración del circuito:

$$\Delta v_{C_1}(t) = -\Delta v_{C_2}(t)$$

$$v_{C_1}(t) + v_{C_2}(t) = V_{CC}$$

De donde:

$$\frac{C_1}{i_{C_1}} = \frac{C_2}{i_{C_2}}$$

Y, como los dos condensadores operan en paralelo:

$$C_s = C_1 + C_2$$

Para mantener el balance de energía se hace:

$$C_1 = C_2$$

Con lo que resulta:

$$i_{C1}(t) = i_{C2}(t) = \frac{i_s(t)}{2}$$

Durante el proceso de ayuda a la conmutación de apagado el condensador C1 se carga, almacenando energía proveniente del circuito principal, y el condensador C2 se descarga, retornando energía a la fuente principal de alimentación.

La energía almacenada en el condensador C₁ es:

$$\Delta E_{C1} = \frac{C_1 V_{cc}^2}{2}$$

Y la transferida desde el condensador C₂ a la fuente es:

$$\Delta E_{C2} = \frac{C_2 V_{cc}^2}{2} = \Delta E_{C1}$$

Una vez demostrado el hecho de que el valor del condensador de amortiguamiento equivalente es:

$$C_s = C_1 + C_2 = 2C$$

Una vez definido este punto, los cálculos para determinar el valor de C_s y el tiempo de acción del CAC tripolar son iguales a los realizados en los ejemplos I o III, dependiendo de si la aplicación requiere de un CAC configurado para minimizar las pérdidas de conmutación o para controlar el dv/dt reaplicado.

2.- Encendido del conmutador principal.

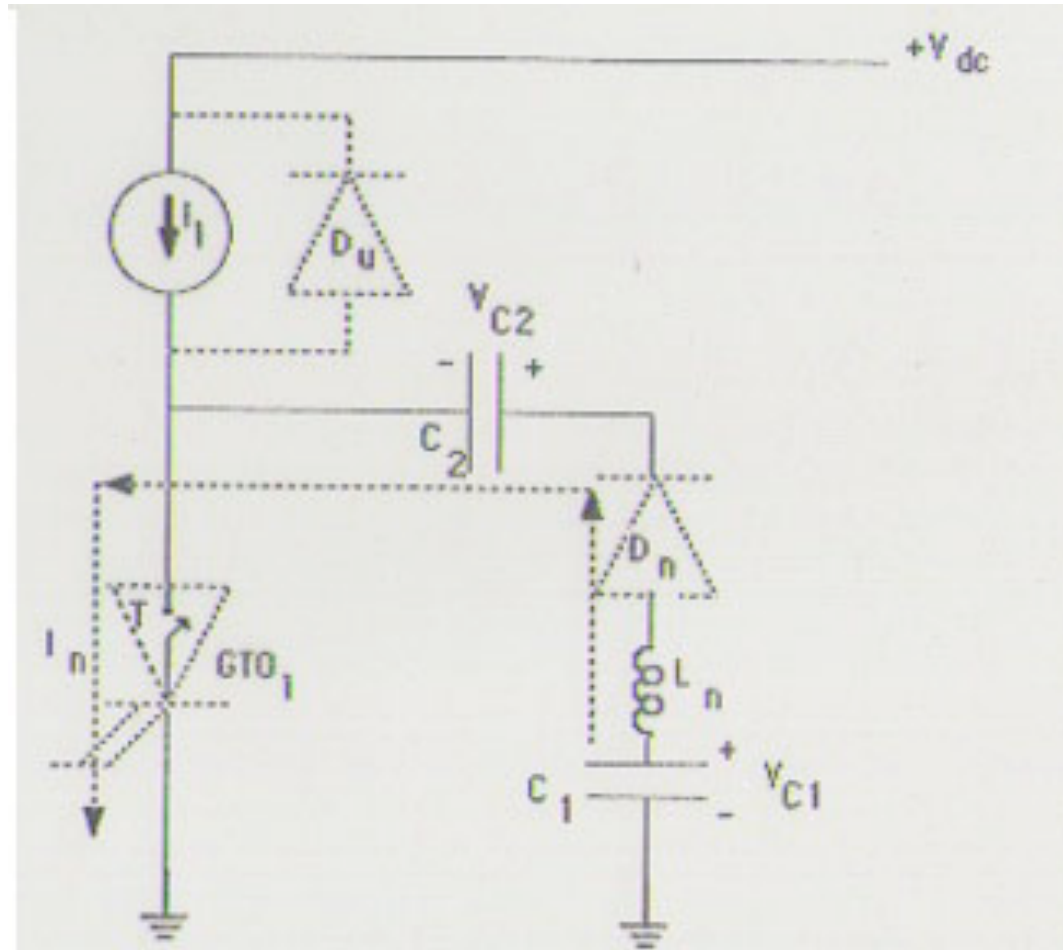
Cuando el conmutador principal se enciende, se cierra un camino de conducción en el lazo C_1 , D_n , L_n , C_2 y el conmutador principal.

Las condiciones iniciales en el circuito son:

$$i_{L_n}(0) = 0$$

$$V_{C_1}(0) = V_{cc}$$

$$V_{C_2}(0) = 0$$



Amortiguador de apagado tripolar recuperador de energía, circuito equivalente durante el encendido del conmutador principal.

En este circuito C_1 y C_2 están conectados en serie, por lo que la capacidad equivalente, C' , resulta:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C' = \frac{C_s}{4}$$

La corriente que circula en el lazo, $i_n(t)$ es:

$$i_n(t) = I_{np} \operatorname{sen} \omega t$$

$$I_{np} = \frac{V_{cc}}{2} \sqrt{\frac{C_s}{L_n}}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_n C_s}}$$

Por el lazo circula un semiciclo de corriente sinusoidal, y la circulación cesa cuando se revierte la polaridad.

Luego de este pulso de corriente el estado de los condensadores es:

$$V_{C2}(0) = V_{cc}$$

$$V_{C1}(0) = 0$$

el pulso de corriente ha transferido toda la energía almacenada en C_1 a C_2 , dejando el circuito de ayuda a la conmutación de apagado listo para actuar en el siguiente ciclo de apagado.

Dado que en el caso ideal la transferencia de energía del condensador C_1 al C_2 y de este a la fuente ocurren sin pérdidas, este circuito de ayuda a la conmutación es un 100% eficiente, y su inclusión no reduce la eficiencia general del sistema de potencia.

En la práctica por supuesto existirán pérdidas en los componentes, por lo que la eficiencia real no alcanzará el valor teórico, pero las pérdidas serán en todo caso significativamente menores a las que se producen en el circuito amortiguador básico.

La duración del pulso de corriente de transferencia , t_r , es:

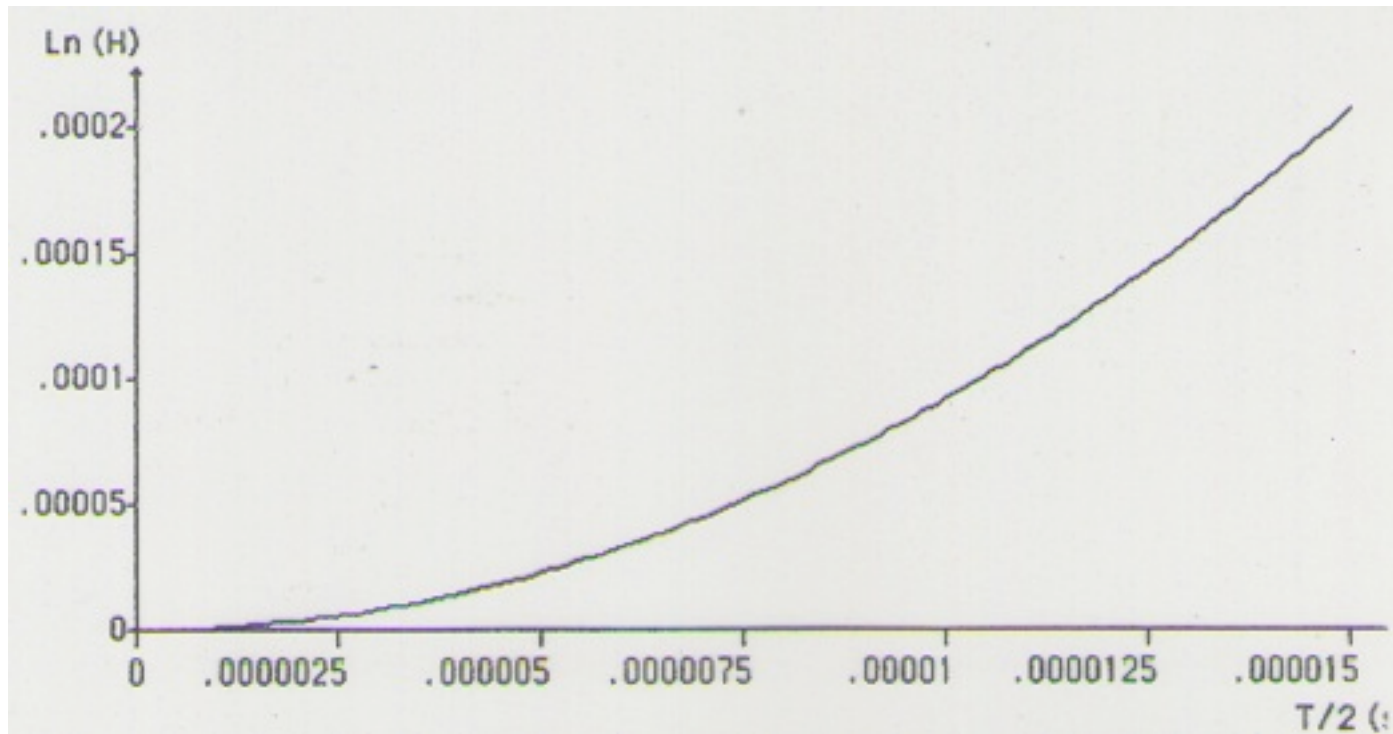
$$t_r = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} = \pi \sqrt{L_n C_s}$$

La condición de operación imprescindible es que el pulso de transferencia este completo antes de que concluya el mínimo tiempo de encendido del conmutador principal posible en el circuito, t_{onm} .

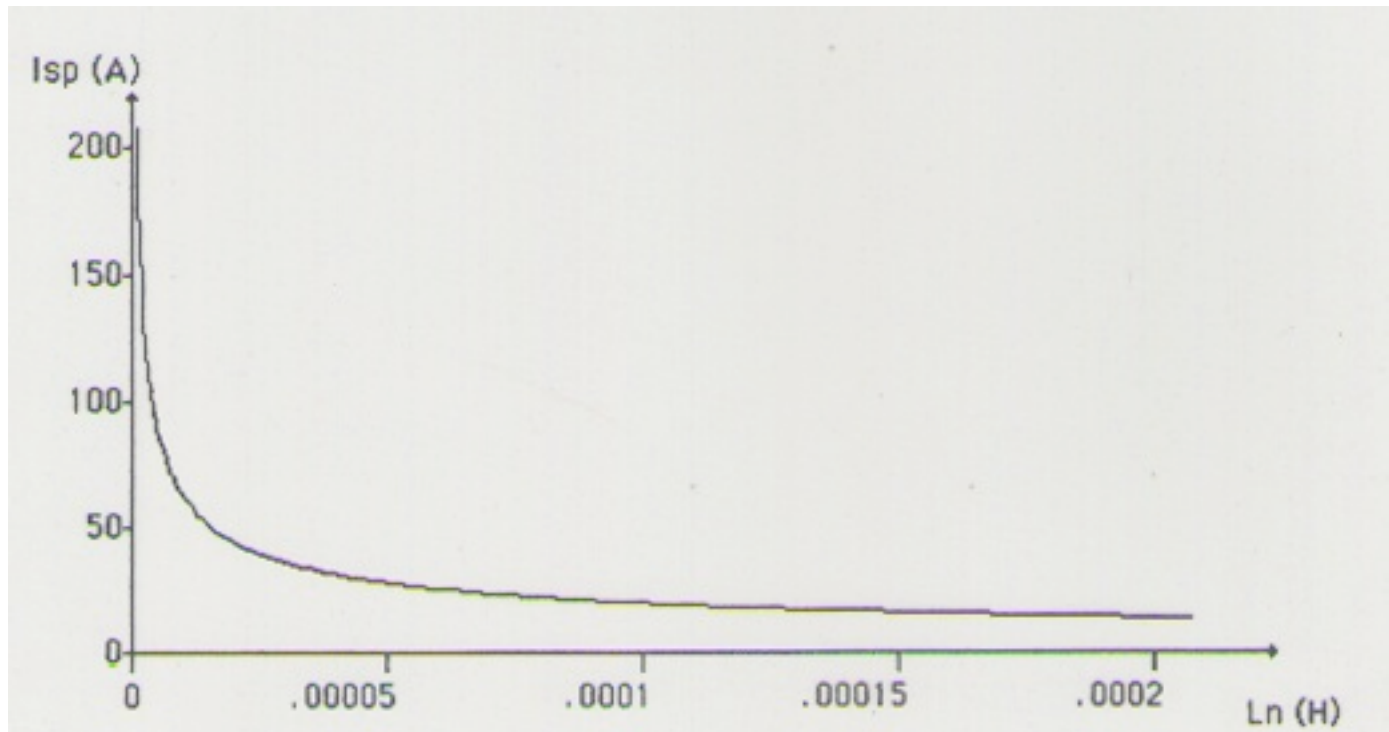
Luego la única condición estricta que debe cumplir L_n es:

$$L_n < \frac{t_{onm}^2}{\pi^2 C_s}$$

El valor de L_n se fija tomando en cuenta esta desigualdad, y buscando una condición de equilibrio adecuada entre el tiempo de reposición y el valor de la corriente pico que son inversamente proporcionales.



Curva típica de relación L_n vs. t_r , amortiguador tripolar.



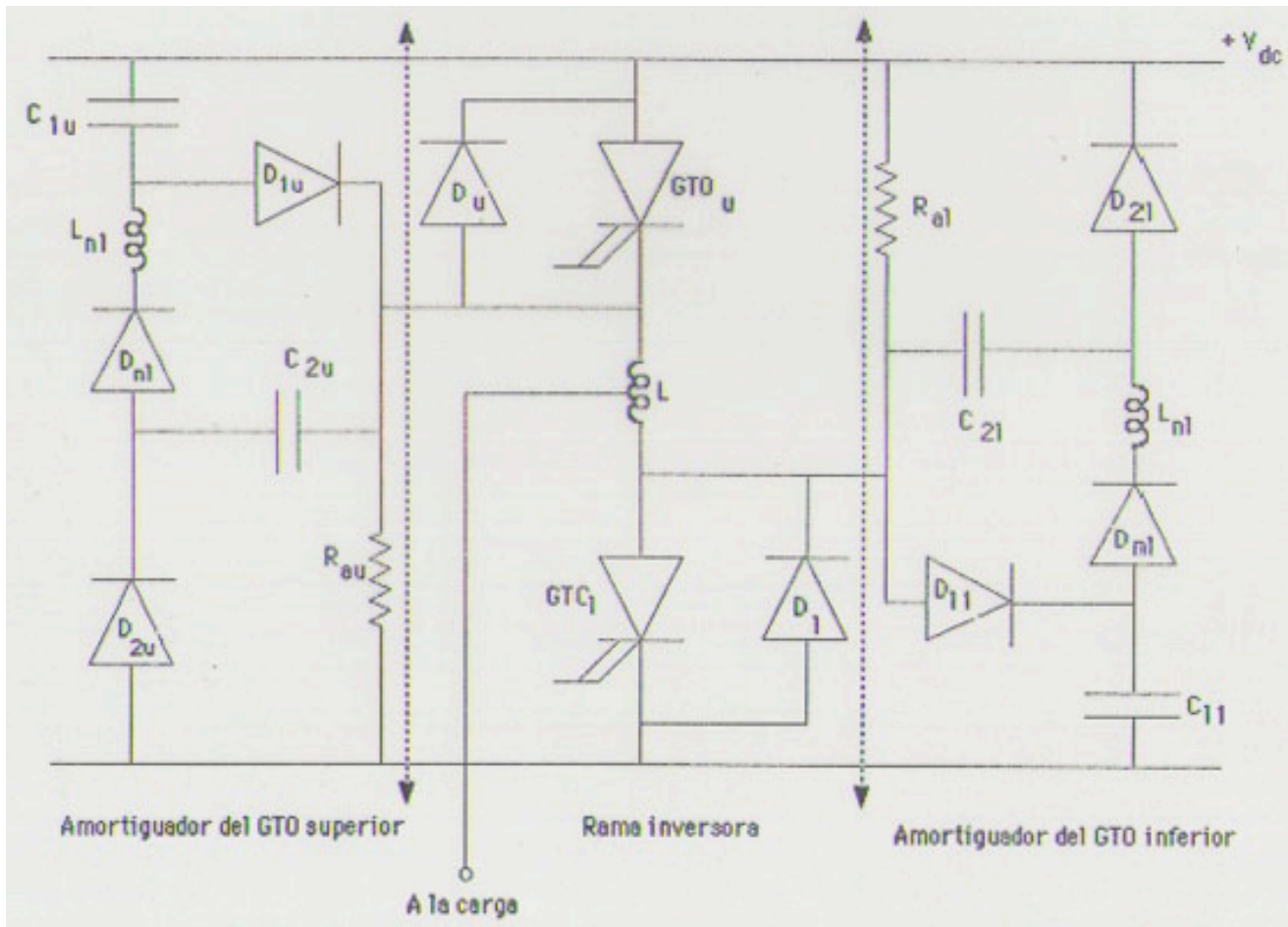
Curva típica de relación L_n vs. I_{np} , amortiguador tripolar.

Debe tomarse en cuenta que el circuito amortiguador tripolar requiere para su operación que los condensadores estén inicialmente cargados a tensiones específicas.

Esto se logra mediante una resistencia auxiliar que carga el condensador C_1 al valor de la tensión de la fuente, dejando al circuito de ayuda a la conmutación listo para la primera conmutación de encendido que inicia la operación del circuito conversor de potencia.

CONVERSORES EN CONFIGURACIÓN PUENTE.

En los convertidores en configuración puente el problema de la ayuda a la conmutación de apagado puede resolverse empleando dos circuitos de ayuda a la conmutación individuales, uno para cada dispositivo principal.



Controlador de potencia tipo puente inversor mostrado el arreglo de los dos circuitos de ayuda a la conmutación tripolares y sus respectivas resistencias auxiliares de precarga.

Una solución más compacta y con menor número de componentes se puede lograr si se emplea un circuito de ayuda a la conmutación capaz de operar en forma combinada, limitando las pérdidas en las conmutaciones de ambos dispositivos.

Un problema adicional que debe ser considerado con cuidado en los convertidores en configuración puente que trabajan con modulación PWM para generar señales AC es el hecho de que la corriente de carga es básicamente sinusoidal a la frecuencia fundamental de la salida, por lo que en muchos intervalos de conducción dicha corriente no circula por el dispositivo principal sino por su diodo auxiliar y, al producirse la conmutación de apagado de dicho dispositivo principal, la corriente efectiva en el dispositivo es cero, o muy cercana a cero, lo que interfiere con la operación normal del circuito de ayuda a la conmutación de apagado.

Esto lleva a que en principio se puedan distinguir tres modos de operación del circuito de conmutación de apagado, que dependen del valor final de la corriente en el dispositivo principal que se apaga, y son independientes de la topología específica de dicho circuito:

1.- Modo 1. La corriente en el dispositivo saliente es suficiente para cargar el condensador del circuito de ayuda de la conmutación de apagado hasta su valor final antes de que concluya el tiempo de espera y el dispositivo entrante reciba la orden de entrar en conducción.

2.- Modo 2. La corriente en el dispositivo saliente no es suficiente para cargar el condensador del circuito de ayuda de la conmutación de apagado hasta su valor final antes de que concluya el tiempo de espera y el dispositivo entrante reciba la orden de entrar en conducción.

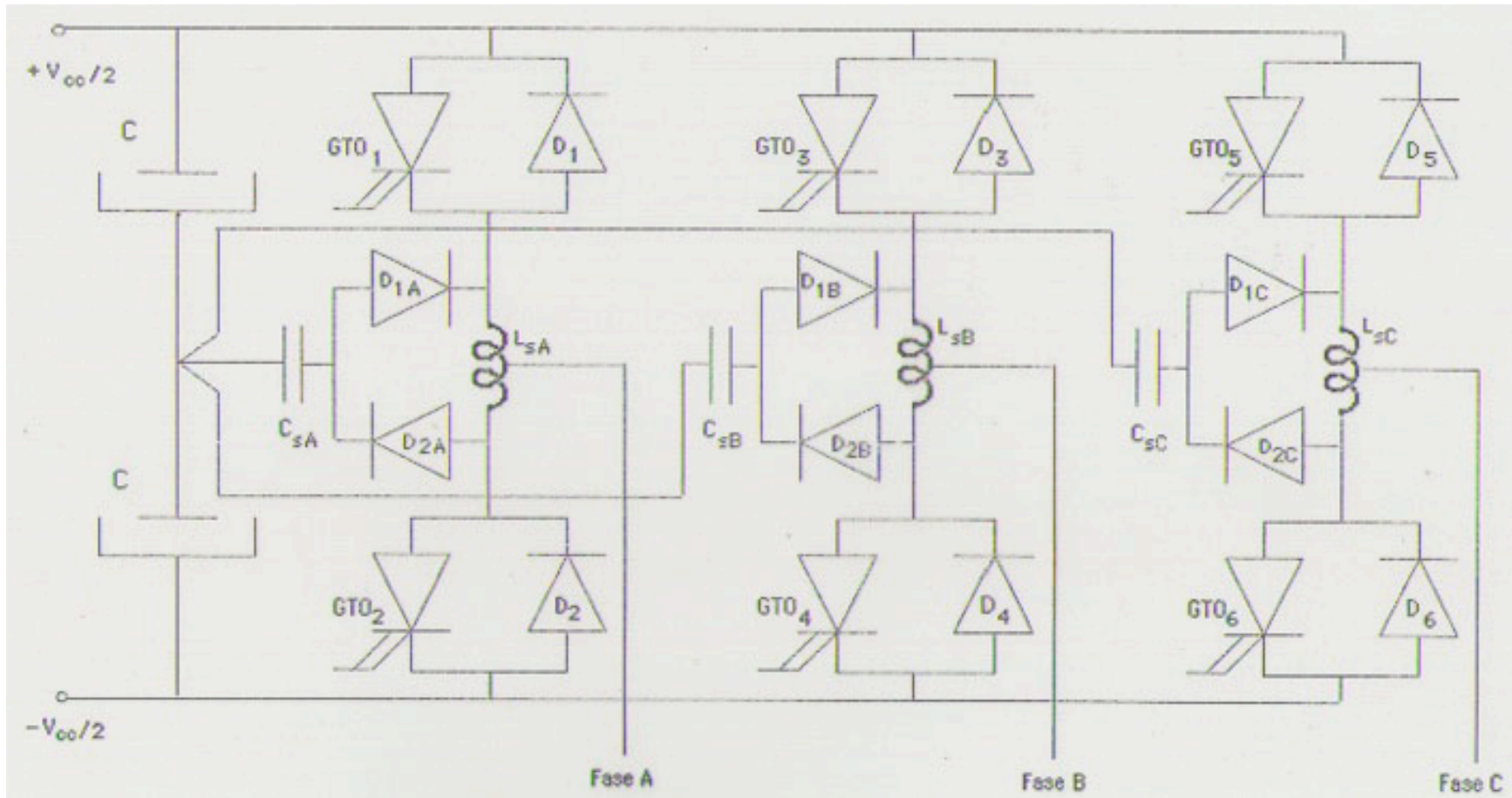
En estas condiciones circula un pulso de corriente a través del dispositivo entrante, llamado pulso de reposición, que termina de cargar el condensador hasta su valor final. En general la amplitud de la corriente de reposición debe ser limitada por una inductancia auxiliar.

3.- Modo 3. El dispositivo saliente no está conduciendo corriente en el momento que recibe la orden de apagado. El circuito de ayuda a la conmutación no opera hasta que termina el tiempo de espera y el dispositivo entrante reciba la orden de entrar en conducción.

En estas condiciones el pulso de reposición que circula a través del dispositivo entrante carga totalmente el condensador hasta su valor final. En general la amplitud de la corriente de reposición debe ser limitada por una inductancia auxiliar.

La existencia de estos tres modos de operación esta implícita en la operación del circuito medio puente, y es independiente de la topología específica del circuito de ayuda a la conmutación de apagado que se seleccione.

VI.- CAC de condensador único para circuitos tipo puente.

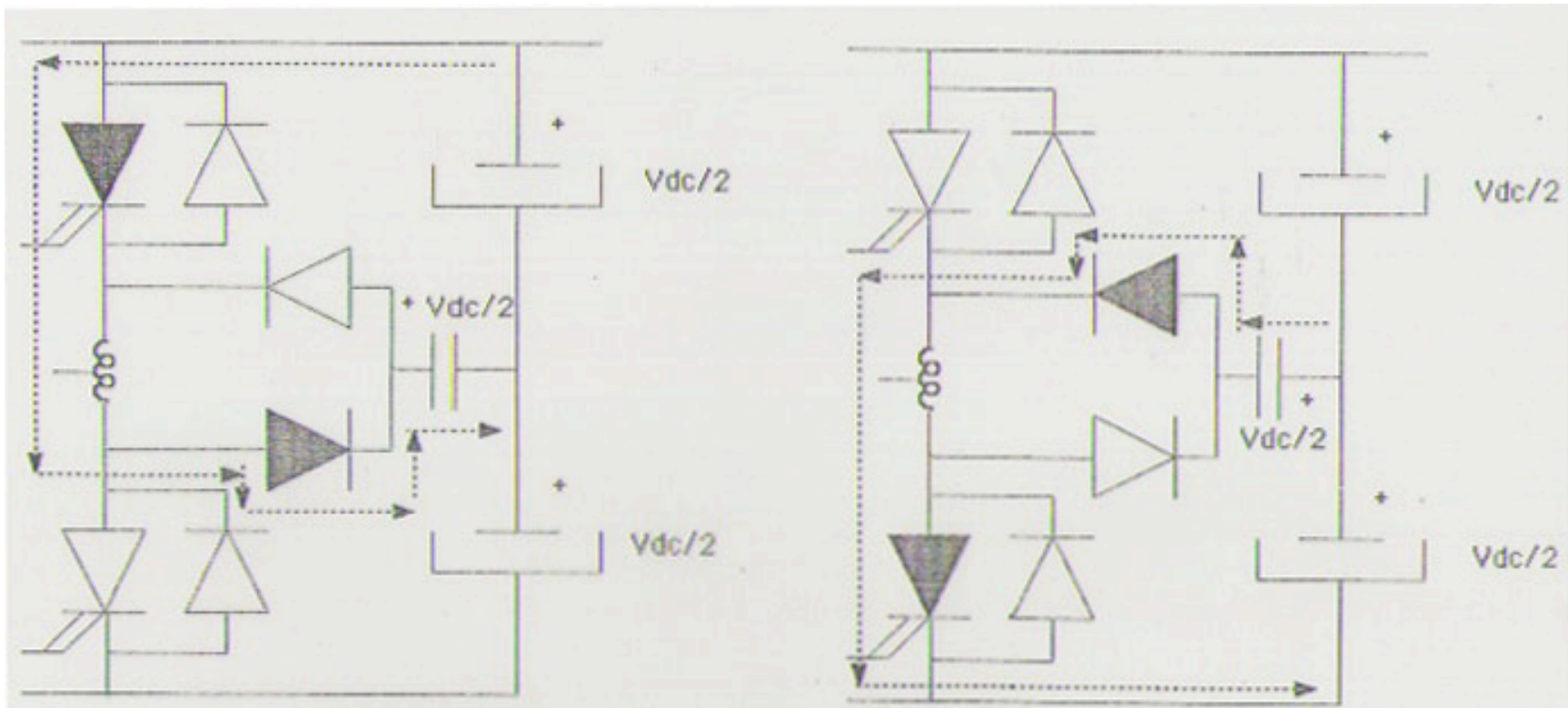


Circuito inversor puente trifásico con amortiguadores de apagado de condensador único en cada fase.

Condiciones iniciales.

El circuito amortiguador de apagado de condensador único requiere que el condensador de amortiguamiento, C_s , este inicialmente cargado a la mitad de la tensión de fuente para operar.

Esto se logra automáticamente sin necesidad de circuitos auxiliares, ya que la primera conmutación de encendido del circuito principal de control de potencia abre un camino que carga el condensador al valor necesario para operar correctamente en la siguiente operación de apagado, independientemente de cual de los dos conmutadores principales se enciende inicialmente.



Amortiguador de condensador único, carga inicial del condensador. La operación del inversor se inicia indistintamente encendiendo el dispositivo principal superior (izquierda) o el inferior (derecha). Los dispositivos sombreados son los que llevan la corriente en cada caso.

Considerando a todos los componentes como idéales, esto ocurre en la forma de un pulso sinusoidal de 180° eléctricos de duración que circula a través de el condensador del CAC, el dispositivo principal que entra en conducción, la inductancia del punto central del puente inversor, el diodo del CAC y la mitad de la fuente de alimentación correspondiente.

El pulso inicial viene definido por:

$$i_{icu}(t) = \frac{V_{cc}}{2} \sqrt{\frac{C_s}{L_n}} \operatorname{sen} \omega t$$

donde la frecuencia de la oscilación es:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_n C_s}}$$

La corriente inicial dura un semiciclo, y la condición necesaria es que la duración del primer pulso de conducción del circuito principal, t_{oni} , sea:

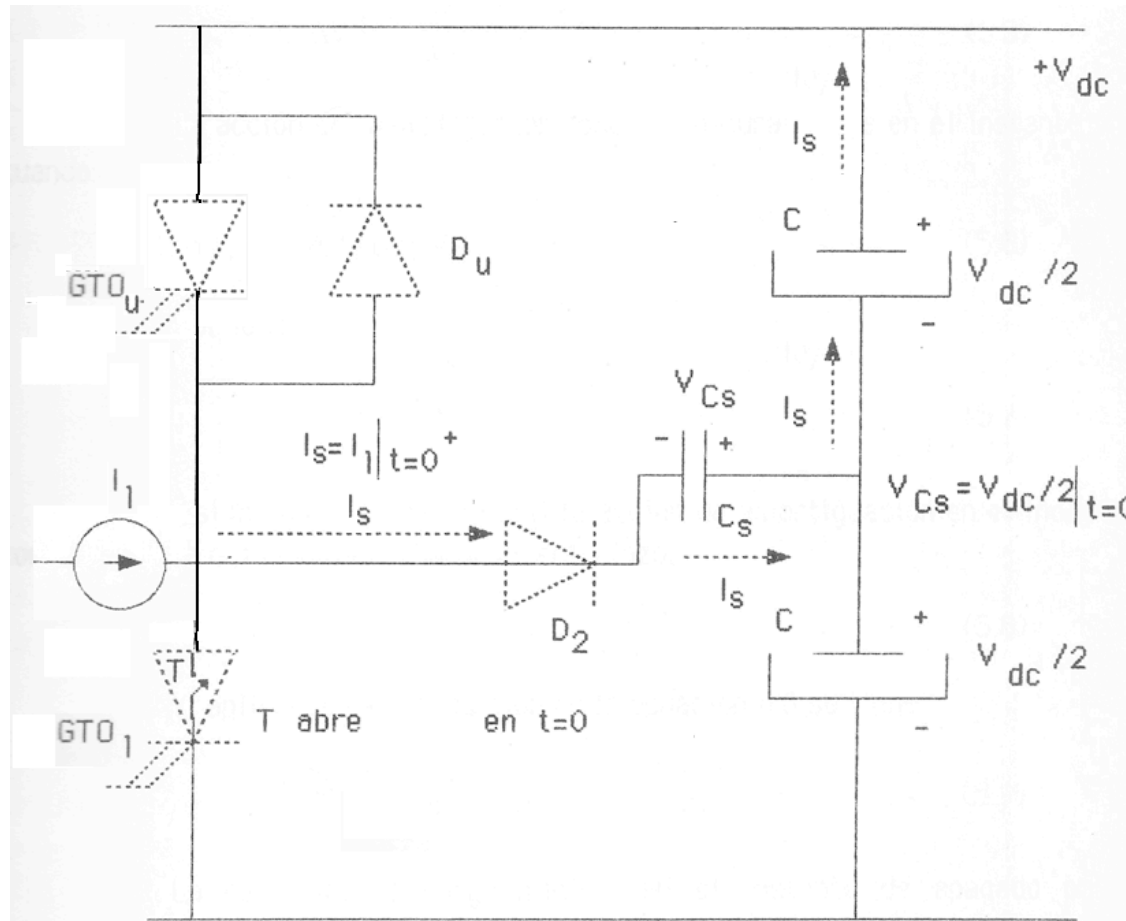
$$t_{oni} = \frac{\sqrt{L_n C_s}}{2}$$

Una vez transcurrido el pulso de carga inicial el CAC queda listo para operar en la conmutación de apagado del conmutador principal que está conduciendo.

1.- Operación en el modo 1:

La corriente de carga que circulaba por el conmutador saliente es suficientemente grande y la tensión en el condensador de amortiguamiento alcanza el valor final antes de que concluya el tiempo de espera y se encienda el conmutador entrante.

El proceso de apagado es equivalente para ambos conmutadores principales. A continuación se considera el proceso de apagado del conmutador principal inferior.



Condiciones al inicio de la conmutación de apagado del conmutador principal inferior, GTO_1 . Operación en modo 1.

A partir del momento en que el conmutador principal, GTO₁, inicia su conmutación de apagado, la corriente de carga, I_l , se trasfiere a la rama auxiliar a través de D2 y empieza a cambiar el estado de carga del condensador de amortiguamiento C_s .

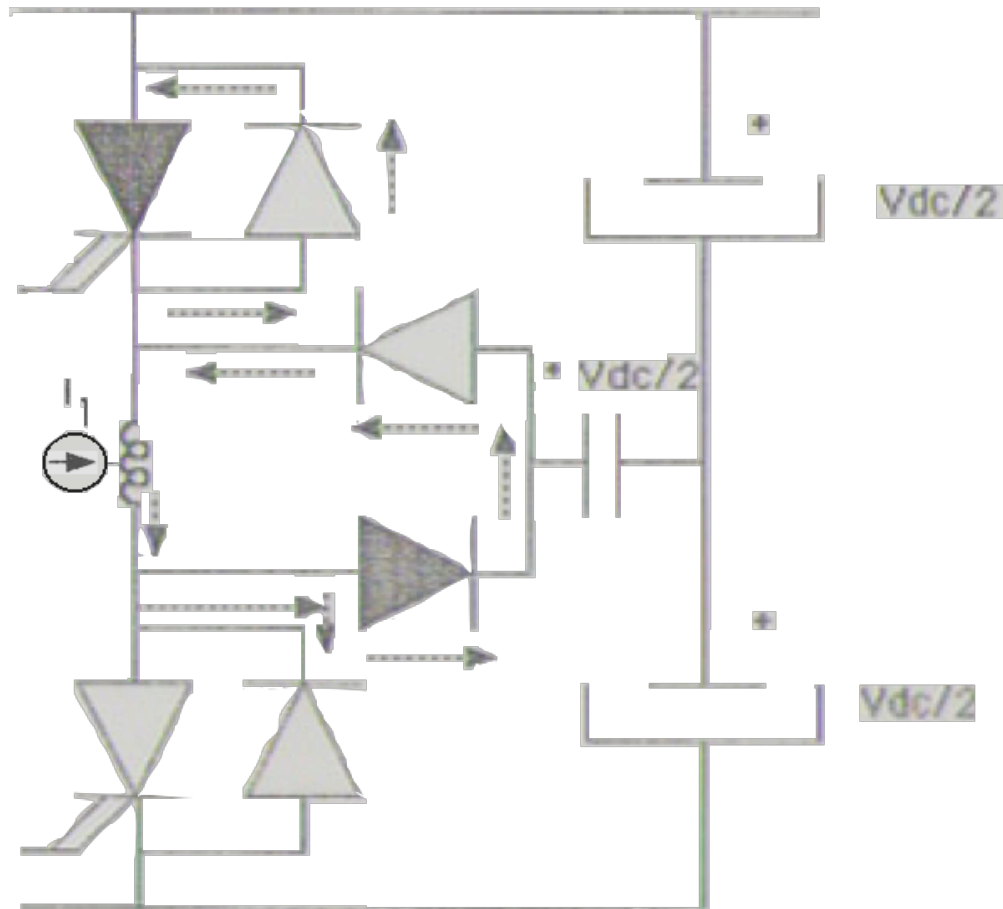
Los cálculos para determinar el valor de C_s y el tiempo de acción del CAC condensador único para circuitos tipo puente son iguales a los realizados en los ejemplos I o III, dependiendo de si la aplicación requiere de un CAC configurado para minimizar las pérdidas de conmutación o para controlar el dv/dt reaplicado.

La acción del CAC concluye en el momento que la tensión en C_s alcanza el valor $V_{dc}/2$, con lo que la tensión tiene el mismo módulo que al inicio del proceso de conmutación de apagado, pero la polaridad se ha invertido.

La energía almacenada en el condensador es la misma:

$$E_{C_s} = \frac{1}{2} C_s (V_{C_s})^2 = \frac{1}{2} C_s \left(\frac{V_{dc}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} C_s \left(\frac{-V_{dc}}{2} \right)^2$$

En ese momento la tensión en el punto A es igual a V_{dc} , lo que polariza en directo a D_1 y a D_u , y la corriente de carga se transfiere al terminal positivo de la fuente a través de la serie D_2 - D_1 - D_u .



Condiciones al final de la conmutación de apagado del conmutador principal inferior, GTO_1 . Operación en modo 1.

El valor final del voltaje en C_s alcanzado al final del ciclo de apagado del conmutador principal inferior es el que se requiere para la conmutación de apagado del conmutador principal superior, que es la que se producirá al final del siguiente pulso de conducción.

A partir de este punto la operación es cíclica y, considerando en primera aproximación que todos los componentes son ideales, todas las intervenciones del CAC son del tipo no disipativo, con intercambios de energía de tipo reactivo que producen la inversión de la polaridad de la tensión almacenada en C_s , sin cambiar la cantidad de energía neta acumulada.

En una columna inversora típica el apagado de uno de los dos conmutadores principales es seguido por el encendido del otro conmutador principal después de transcurrido el tiempo de espera t_d incluido en el algoritmo de modulación para evitar que exista solapamiento entre los intervalos de conducción de los dos conmutadores principales.

Para que el circuito opere en el modo 1 es necesario que la duración del intervalo de amortiguamiento, t_s cumpla con la relación:

$$t_s \leq t_d$$

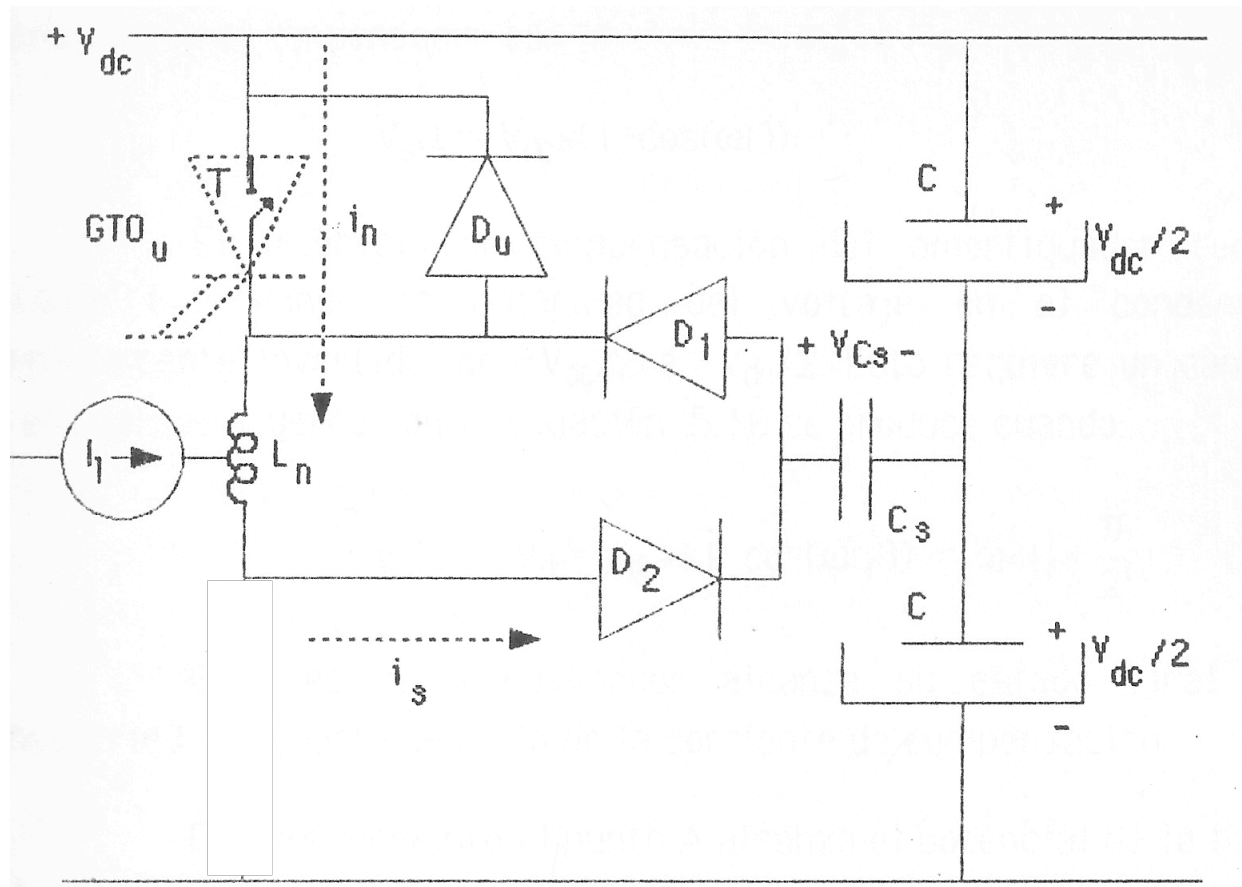
La corriente de carga mínima, I_{Lm1} que permite que el condensador de amortiguamiento se cargue al valor final en el tiempo de espera, t_d , asegurando que el circuito de ayuda a la conmutación opera en el modo 1 es:

$$I_{Lm1} = \frac{V_{Cdc} C_s}{t_d}$$

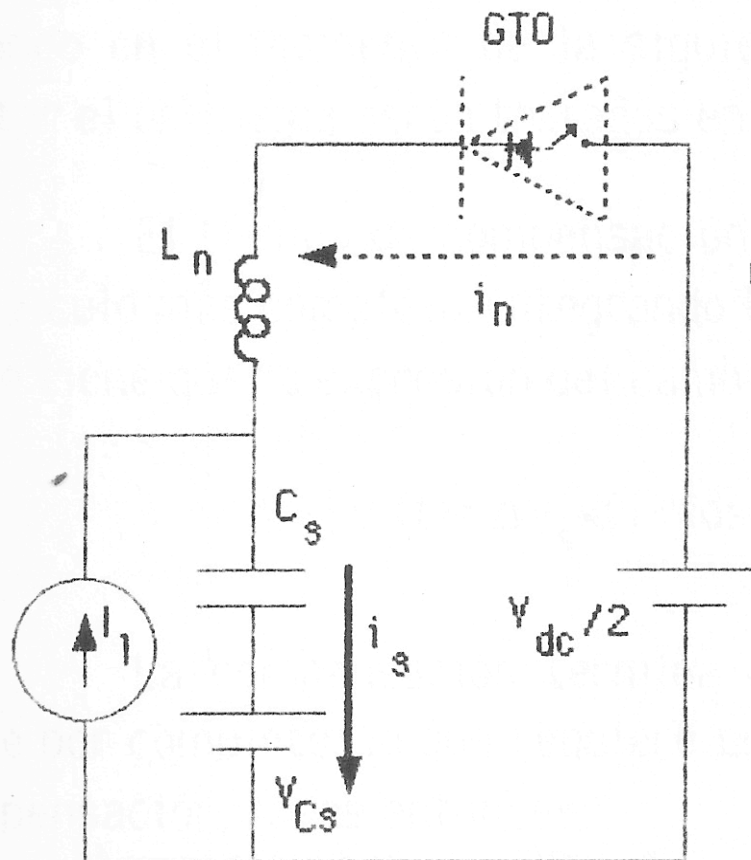
2.- Operación en el modo 2:

Si la corriente de carga que circulaba por el conmutador saliente es menor a I_{Lm1} , la tensión en el condensador de amortiguamiento no alcanzará el valor final antes de que concluya el tiempo de espera y se encienda el conmutador entrante.

Como consecuencia de esto el encendido del conmutador entrante fuerza la circulación de un pulso corriente de reposición, $i(t)$ que completa la carga del condensador.



Estado del circuito en el momento que se inicia el pulso de reposición al entrar en conducción GTO_u , mostrando todos los componentes que pueden conducir.



Condiciones en el momento del encendido

$$|V_{Cs}| < V_{dc}/2$$

$t=0$

$$i_s = \begin{cases} I_1 & \text{at } t=0^- \\ I_1 + i_n & \text{at } t=0^+ \end{cases}$$

Circuito equivalente del comportamiento del CAC en el modo 2 cuando el conmutador principal superior entra en conducción.

La corriente en el condensador después del encendido del conmutador entrante será un pulso con dos componentes, la corriente de carga, $i_L(t)$, y la corriente de reposición, $i_r(t)$:

$$i_S(t) = i_r(t) + i_L(t) = V_L \sqrt{\frac{C_S}{L_n}} \text{sen} \omega t + I_L$$

La frecuencia del pulso de reposición será:

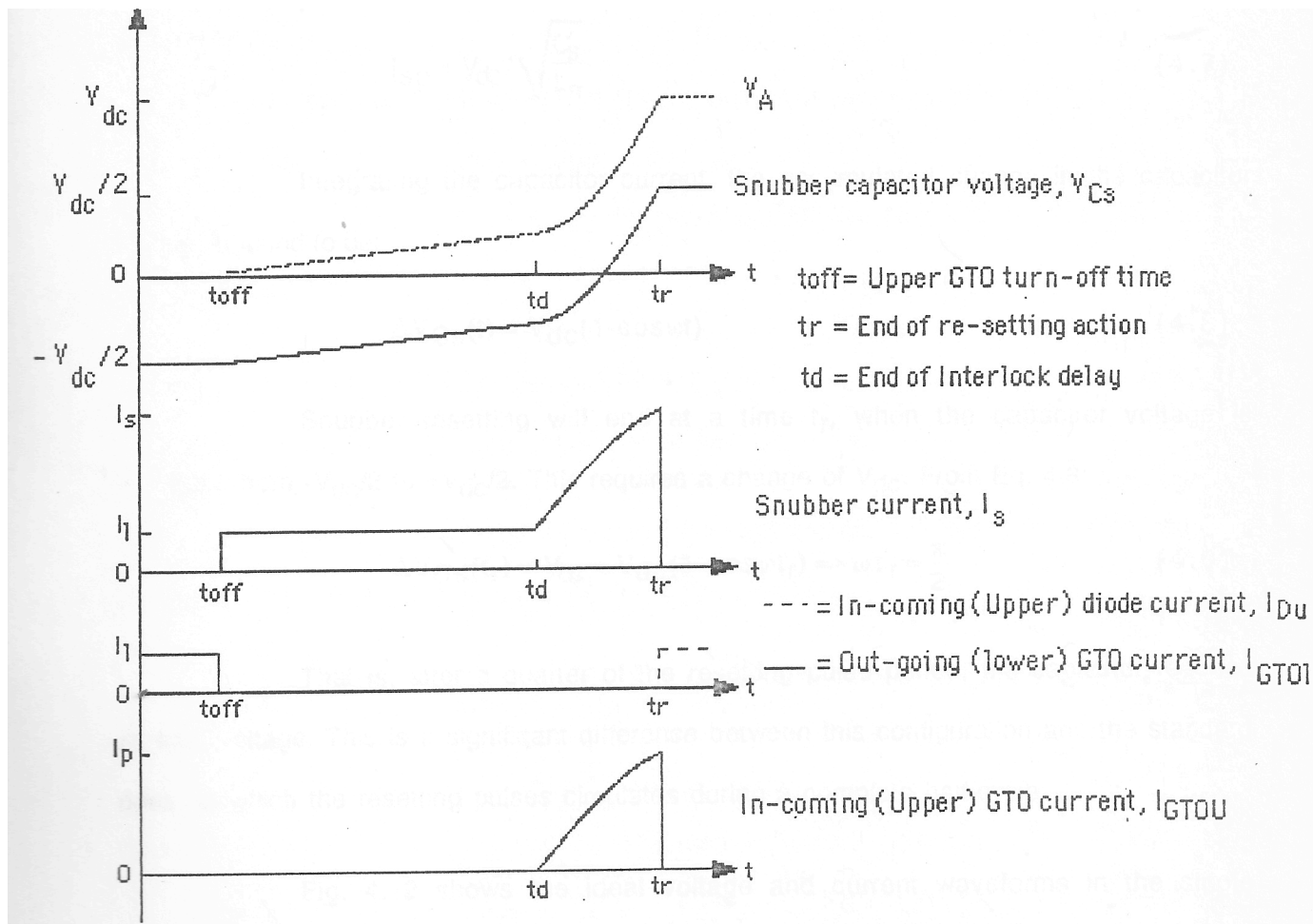
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_n C_S}}$$

La tensión en el condensador de ayuda a la conmutación será:

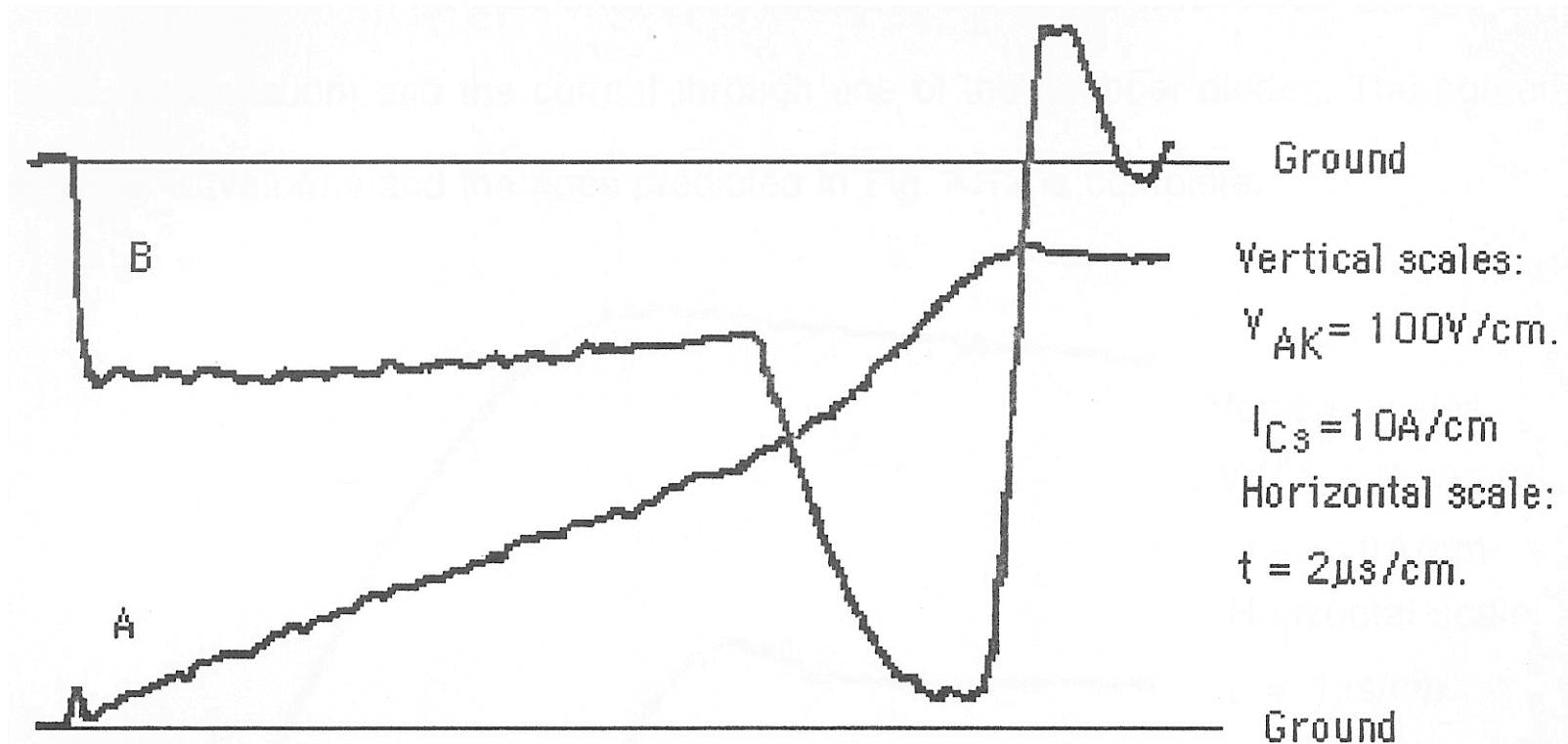
$$\Delta V_{C_S}(t) = V_L (1 - \cos \omega t) + \frac{I_L t}{C_S}$$

Y la duración del pulso de reposición resultará:

$$\Delta V_{C_S}(t_r) = V_{dc} - V_A = V_L (1 - \cos \omega t_r) + \frac{I_L t_r}{C_S}$$



Formas de onda de tensión y corriente ideales durante l operación en modo 2



Formas de onda de tensión y corriente ideales durante la operación en modo 2

A: Tensión en el condensador de amortiguamiento, V_{Cs} .

B: Corriente en el condensador de amortiguamiento, I_s .

3.- Operación en el modo 3:

Si no circula corriente de carga por el conmutador saliente al iniciarse la conmutación de apagado, la tensión en el condensador de amortiguamiento no cambia durante el tiempo de espera.

Como consecuencia de esto el encendido del conmutador entrante fuerza la circulación de un pulso corriente de reposición, $i(t)$ que es el que carga el condensador.

La situación en el circuito es similar a la mostrada en las figuras para la operación en modo 2, eliminando (o invirtiendo el sentido de circulación de I_1).

La corriente en el condensador después del encendido del conmutador entrante será un pulso sinusoidal puro, formado únicamente por la corriente de reposición, $i_r(t)$:

$$i_s(t) = i_r(t) = V_L \sqrt{\frac{C_s}{L_n}} \text{sen} \omega t$$

La frecuencia del pulso de reposición será:

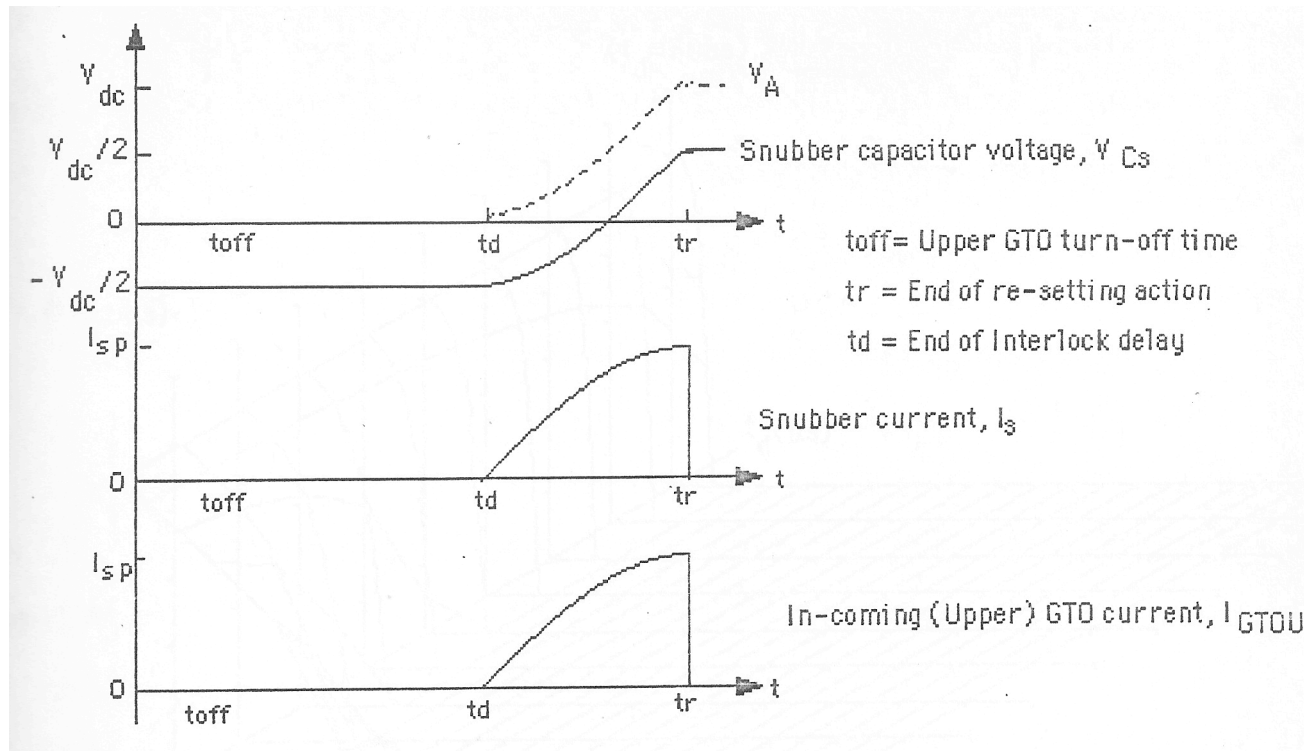
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_n C_s}}$$

La tensión en el condensador de ayuda a la conmutación será:

$$\Delta V_{C_s}(t) = V_L (1 - \cos \omega t)$$

Y la duración del pulso de reposición resultará:

$$\Delta V_{C_s}(t_r) = V_{dc} = V_L (1 - \cos \omega t_r)$$



Formas de onda de tensión y corriente ideales durante l
operación en modo 3

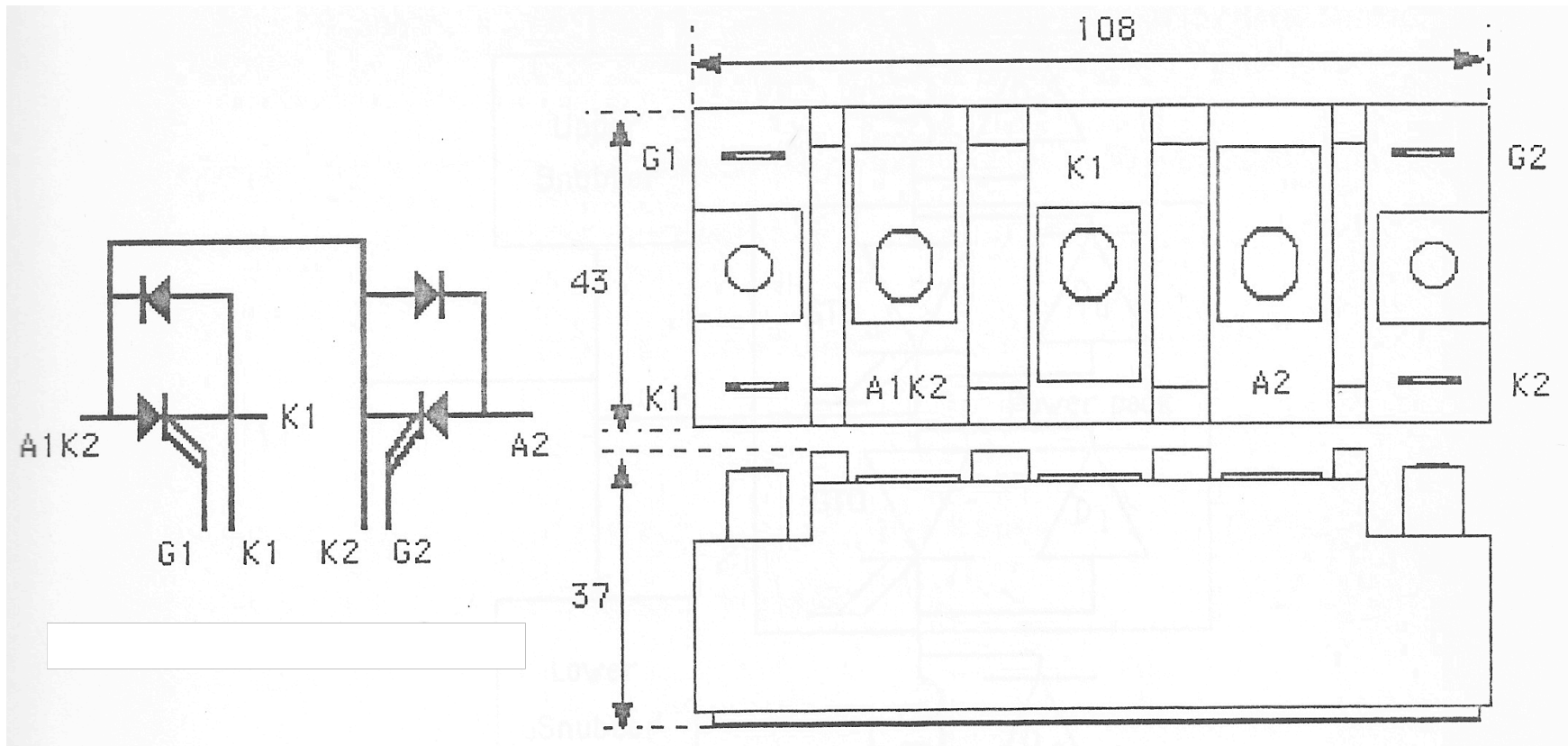
En todos caso el pulso de reposición que ocurre en las conmutaciones del modo 2 es una versión más reducida, tanto en amplitud como en duración del pulso de reposición que ocurre en el modo 3.

Adicionalmente, operado a plena carga y tratando de reproducir una senoide de corriente en la salida del inversor, la mayoría de las conmutaciones serán del modo 1 o del modo 3 (según el semiciclo de la corriente principal que se considere), y la operación en modo 2 ocurrirá solo en contadas ocasiones (o no se producirá).

Los pulsos de reposición deben ser tomados en cuenta para dimensionar los componentes del CAC y los conmutadores principales, tanto desde el punto de vista de la corriente pico como de la corriente rms que deben soportar los dispositivos.

VII.- CAC de condensador único e inductancia dividida para circuitos tipo puente.

El avance en la tecnología de encapsulado de los conmutadores de potencia ha impuesto el uso de "módulos de potencia" que contienen los cuatro componentes del circuito de potencia de una columna inversora (los dos conmutadores principales y sus dos diodos de libre conducción).



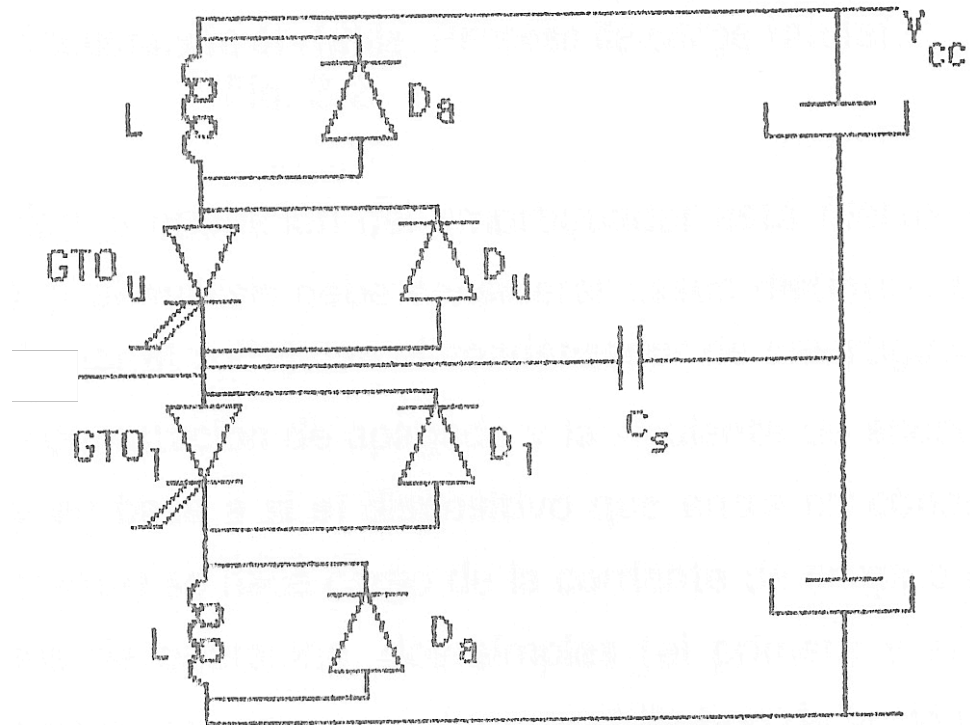
Módulo de potencia.

Izquierda: Circuito equivalente.

Derecha: Vista del módulo, indicando las dimensiones físicas.

En estas condiciones el CAC de condensador único no es aplicable, ya que no es posible intercalar la inductancia con toma central entre los dos conmutadores principales.

En su lugar se puede usar el CAC de condensador único e inductancia dividida, que es su equivalente directo en cuanto a modos de operación y ofrece las mismas ventajas en cuanto a mantener un conteo mínimo de componentes, tener una operación totalmente automática y no requerir de circuitos auxiliares para fijar las condiciones iniciales, ni imponer una secuencia de encendido particular en el inversor.



CAC de condensador único e indutância dividida.

CAC de condensador único e inductancia dividida puede usarse también con dispositivos encapsulados individualmente.

Todas las ecuaciones desarrolladas para el CAC de condensador único son directamente aplicables al CAC de condensador único e inductancia; la principal diferencia es que al transferirse la corriente de carga del condensador de amortiguamiento a la fuente al final de una conmutación de apagado en modo 1 la corriente atraviesa dos diodos en vez de tres, lo que da una ligera ventaja al aumentar aún más la eficiencia del CAC.