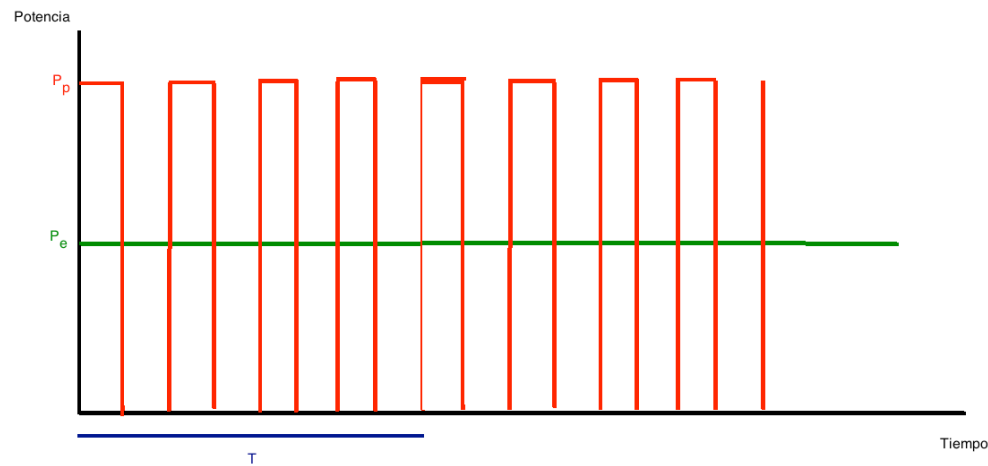


Consideraciones generales sobre el régimen de operación en un circuito electrónico de potencia

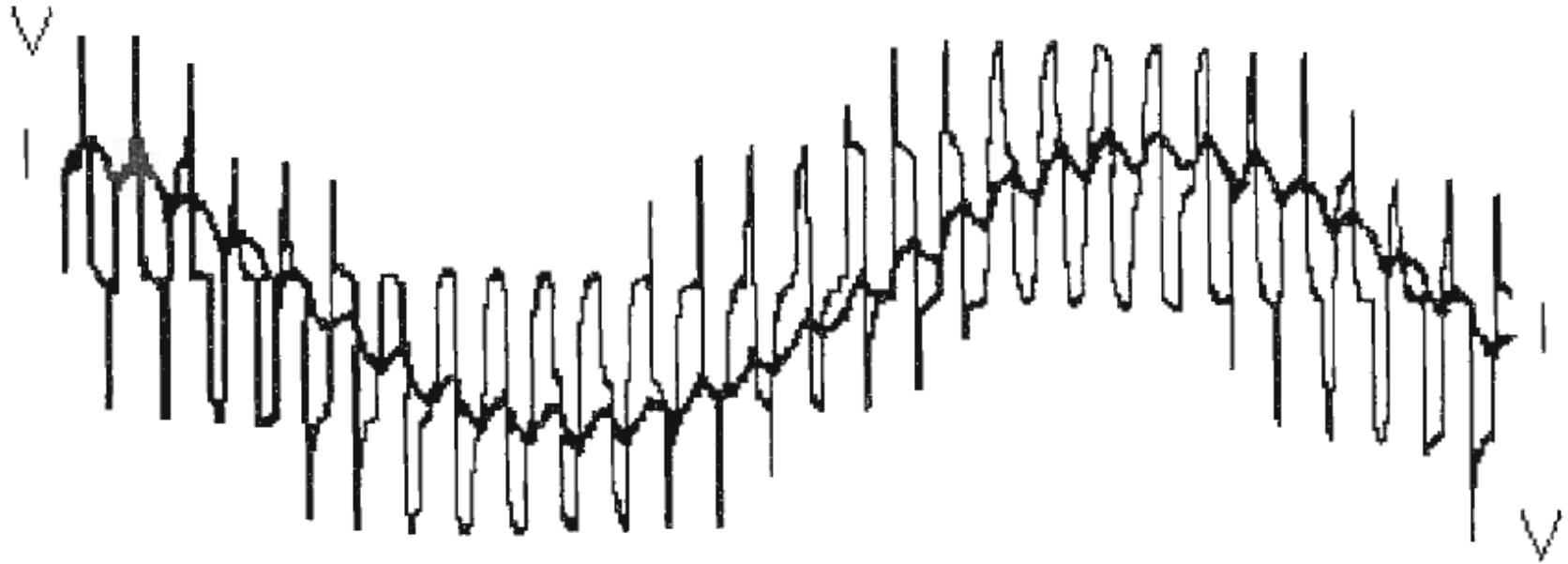
- 1.- Para minimizar las pérdidas, los dispositivos electrónicos de control de potencia deben trabajar siempre en régimen de corte o saturación.
- 2.- Como consecuencia de lo anterior, cuando es necesario regular la cantidad de energía entregada a la carga durante un ciclo de trabajo (P_e), es necesario operar en alguna forma de modulación por ancho de pulso (PWM), subdividiendo cada evento de conducción en una serie de sub-intervalos.



Proceso genérico de control de potencia entregada por modulación del ancho de pulso de salida (PWM), configuración convertora DC/DC genérica:
Potencia disponible a la entrada, P_p .
Potencia promedio entregada a la salida, P_e .

3.- Las cargas industriales suelen ser de naturaleza inductiva, y su constante de tiempo natural, τ_L , suele ser mucho mayor que los tiempos de ciclo de los convertidores electrónicos de control de potencia.

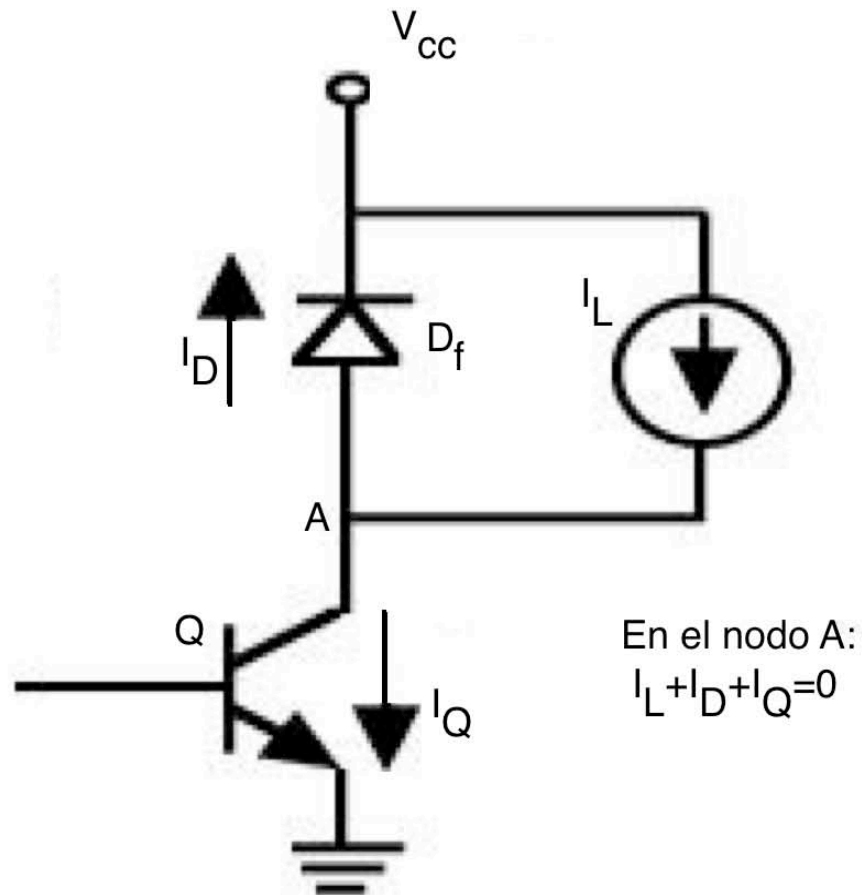
4.- Por lo tanto la mayoría de las conmutaciones ocurren cuando existe una corriente $i_L(t)$ en la carga, y esta corriente de carga no se anula en el tiempo de conmutación del dispositivo.



Formas de onda de corriente y voltaje a la salida de un conversor DC/AC alimentando a un motor de inducción con un algoritmo tipo V/Hz constante. Forma de onda de voltaje sintetizada mediante PWM. Resultados medidos experimentalmente.

5.- Es por lo tanto necesario incluir en el circuito electrónico de potencia un diodo conectado en anti-paralelo con la carga para abrir un camino auxiliar que permita la circulación de la corriente de carga $i_L(t)$ en lazo cerrado carga-diodo durante los intervalos de apagado del dispositivo electrónico de potencia principal.

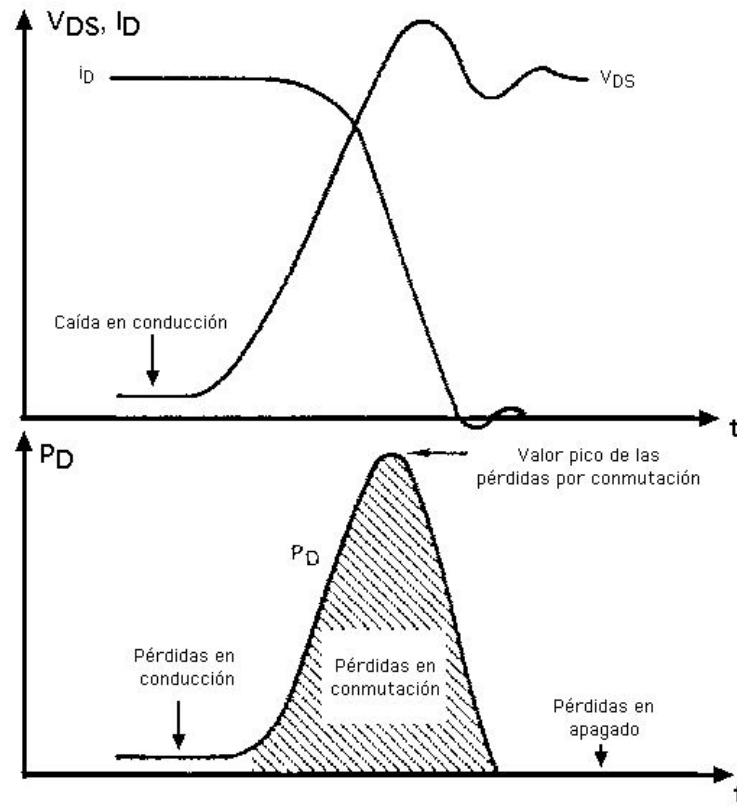
Este diodo auxiliar, imprescindible para la correcta operación del circuito se llama usualmente diodo de libre conducción (“free-wheeling diode”).



Circuito de conmutación típico con carga inductiva de constante de tiempo larga y diodo auxiliar de libre conducción ("free-wheeling diode").

6.- Como consecuencia de esta topología, durante la conmutación de apagado del conmutador controlado, la tensión en el dispositivo debe llegar al valor de la tensión de alimentación para polarizar en directo el diodo de libre conducción y abrir el camino auxiliar a la circulación de la corriente de carga, antes de que la corriente e el dispositivo empiece a descender, y durante la conmutación de encendido del conmutador controlado, la corriente en el dispositivo debe llegar al valor de la corriente de carga para conmutar al diodo de libre conducción en apagado, antes de que la tensión comience a descender.

Esta forma de operación, en la cual las pérdidas en cada conmutación son máximas se denomina conmutación dura (“hard commutation”).



Pérdidas en la conmutación de apagado.

Arriba: Trayectorias de I_D y V_{DS} durante la conmutación de apagado de un Power MOSFET

Abajo: Potencia instantánea disipada.

Aproximaciones consideradas en el análisis de las conmutaciones.

Las formas exactas de las trayectorias de subida y bajada de la tensión y la corriente dependen de cada dispositivo en particular.

Para simplificar los cálculos y obtener figuras de mérito de referencia, en el estudio que sigue se asume que los cambios son totalmente lineales.

Las pérdidas máximas ocurren cuando la corriente de carga y la tensión de alimentación son las máximas que se pueden presentar en el circuito (respectivamente I_M y V_M) en las peores condiciones posibles: máxima tensión de entrada y mínima impedancia de carga.

Todo el proceso de conmutación del dispositivo principal de control de potencia es influenciado por las características de encendido, apagado y corriente de recuperación del diodo de libre conducción.

Por simplicidad se considera que la tensión en conducción de los dos dispositivos semiconductores es 0V, y que el diodo es ideal y no introduce ninguna limitación a las variaciones de corriente en sus terminales. En los circuitos reales los diodos no son ideales y su presencia introduce retardos y pérdidas adicionales. Es por lo tanto conveniente usar el diodo más rápido que sea posible, preferentemente uno de tipo Schottky.

En todo caso la forma precisa de la conmutación debe ser medida en un prototipo o por lo menos simulada en un simulador circuital adecuado.

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONMUTACIÓN DE APAGADO DEL CONMUTADOR PRINCIPAL Q.

Condiciones iniciales:

a.-Toda la corriente de carga circula por el conmutador controlado Q:

$$I_Q = I_L \Rightarrow I_D = 0$$

b.-La tensión entre los terminales de Q es 0:

$$V_A = V_Q = 0 \Rightarrow V_{AKD} = -V_{cc}$$

En el caso genérico de una carga inductiva con corriente no nula antes del apagado, la conmutación se produce en dos etapas:

1.- Subida del voltaje en el dispositivo principal a corriente constante igual a la corriente de carga hasta que el diodo de libre conducción quede polarizado en directo.

El proceso de apagado se inicia cuando Q recibe la orden de conmutar en apagado y, transcurrido el tiempo de retardo de inicio de la conmutación de apagado, t_s , (el tiempo de almacenamiento o "storage time) propio de cada dispositivo, la tensión entre los terminales de Q empieza a crecer, pero la corriente I_Q permanece constante forzada por la naturaleza inductiva de la corriente I_L .

2.- Caída de la corriente en el dispositivo principal, con tensión en los terminales del dispositivo constante aproximadamente igual a la tensión de alimentación.

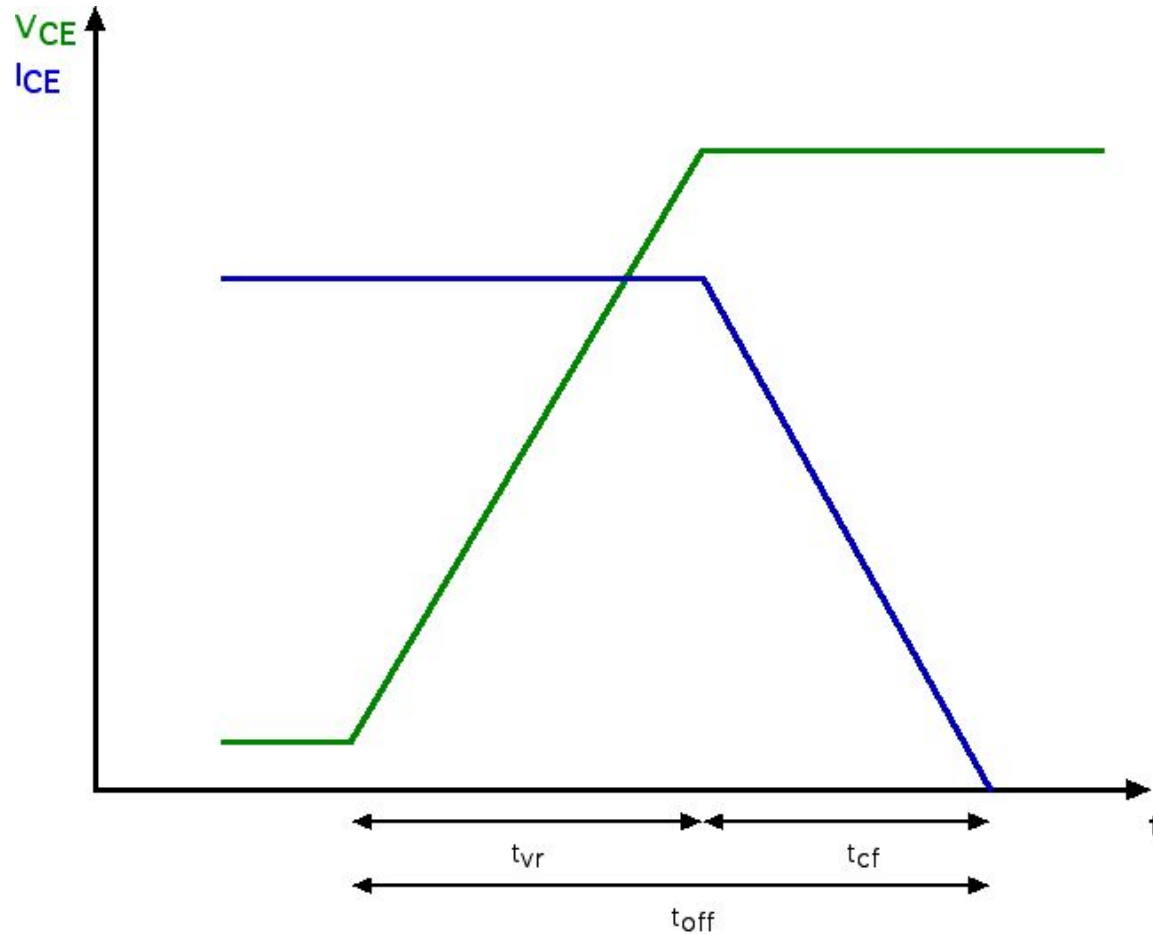
Transcurrido el tiempo de subida de voltaje, t_{vr} , propio de cada dispositivo conmutador, se cumple:

$$v_Q = V_{cc} + v_{akON} \approx V_{cc}$$

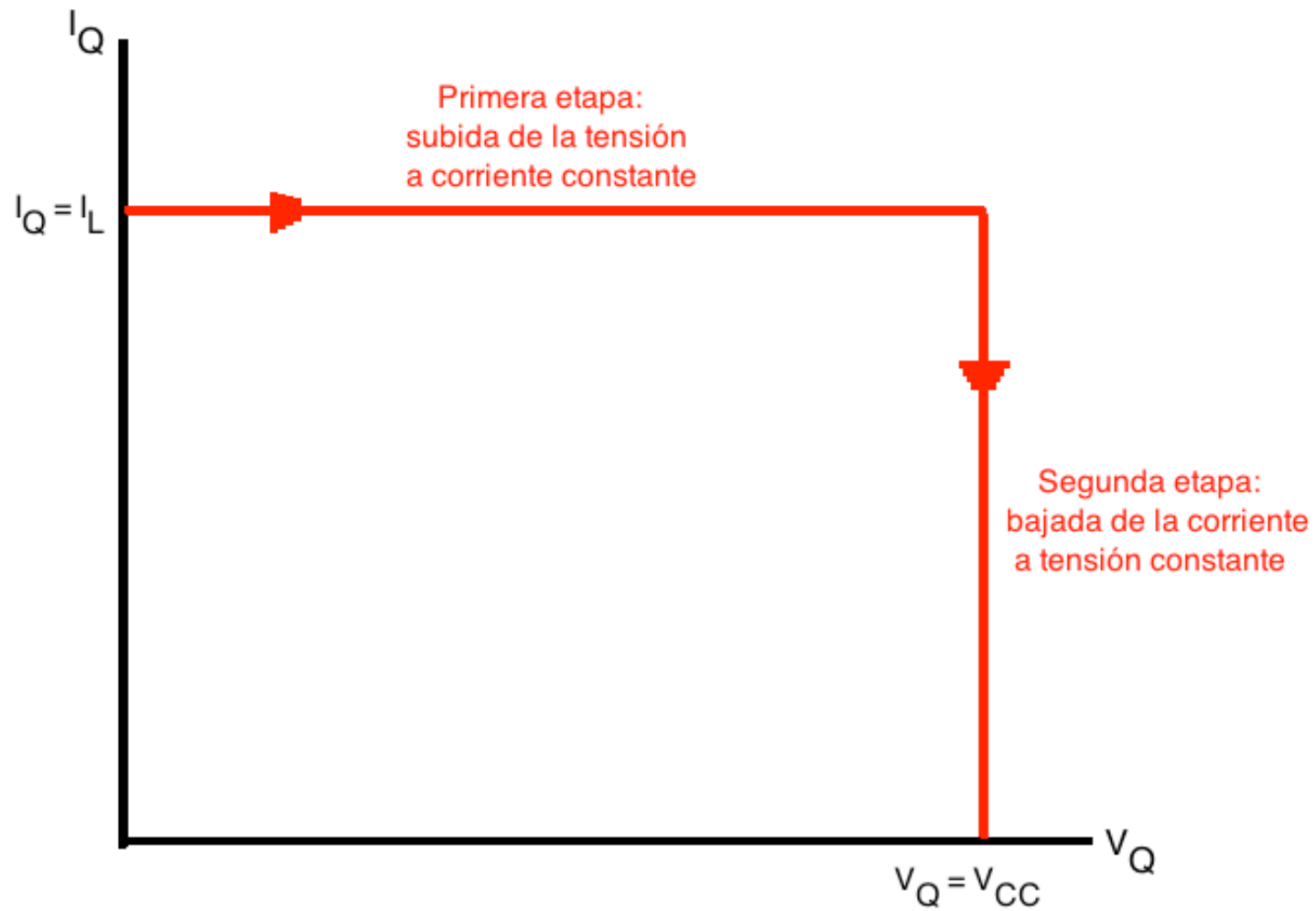
En estas condiciones la corriente I_Q se empieza a reducir, lo que va transfiriendo la corriente de carga al circuito cerrado carga-diodo de libre conducción.

El proceso de apagado termina cuando, transcurrido el tiempo de caída de la corriente en el conmutador Q , t_{cf} , propio de cada dispositivo conmutador, se cumple:

$$i_Q = 0 \Rightarrow I_D = I_L$$



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



Trayectoria de las variables V_Q e I_Q en el plano I/V durante la conmutación de apagado.

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS PRODUCIDAS EN EL CONMUTADOR PRINCIPAL
DURANTE EL APAGADO EN EL CASO IDEAL.

1.-Primera etapa: subida lineal de la tensión $v_{ce}(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en apagado.

Esta etapa comienza en el instante t_d , contado a partir del momento en que la señal de control del dispositivo alcanza el nivel de apagado, y termina al concluir el tiempo de subida del voltaje, t_{vr} , cuando $v_Q(t_r) = V_{cc}$.

En el intervalo t_{vr} el voltaje $Q(t)$ crece linealmente hasta el valor final:

$$Q(t) = V_{cc} \left(\frac{t}{t_{vr}} \right)$$

y la máxima energía disipada en la etapa de subida del voltaje durante el apagado, E_{toff1M} , es:

$$E_{toff1} = \int_0^{t_{vr}} v_Q(\tau) i_Q(\tau) d\tau = I_L \int_0^{t_{vr}} v_Q(\tau) d\tau = I_L \frac{V_{cc} t_{vr}}{2}$$

Para propósitos de diseño el valor de interés es el máximo,

$$E_{toff1M}$$

$$E_{toff1M} = I_{LM} \int_0^{t_{vr}} v_{QM}(\tau) d\tau = I_{LM} \frac{V_{ccM} t_{vr}}{2}$$

2.-Segunda etapa: caída lineal de la corriente $i_Q(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en apagado.

Esta etapa comienza en el momento t_{vr} , cuando $v_Q(t_{vr})=V_{CC}$ y el diodo de libre conducción entra en conducción, y termina al concluir el tiempo de caída de la corriente en el dispositivo principal, t_{cf} , cuando $i_Q(t_{cf})=0$.

En este análisis se considera al diodo como ideal, por lo que no introduce ningún retardo en el crecimiento de su corriente AK.

En el intervalo t_{cf} la corriente $i_Q(t)$ en el dispositivo cae linealmente:

$$i_Q(t) = I_L \left(1 - \frac{t}{t_{cf}} \right)$$

Las pérdidas en esta etapa son:

$$E_{toff2} = \int_0^{t_{cf}} v_Q(\tau) i_Q(\tau) d\tau = V_{cc} \int_0^{t_{cf}} i_Q(\tau) d\tau = V_{cc} \frac{I_Q t_{cf}}{2}$$

y la máxima energía disipada en la etapa de caída de la corriente,

E_{toff2M} , es

$$E_{toff2M} = V_{ccM} \int_0^{t_{cf}} i_Q(\tau) d\tau = V_{ccM} \frac{I_{LM} t_{cf}}{2}$$

Las pérdidas totales máximas durante la conmutación de apagado son:

$$E_{offM} = E_{off1M} + E_{off2M} = I_{LM} \frac{V_{ccM} t_{vr}}{2} + V_{ccM} \frac{I_{LM} t_{cf}}{2}$$

En algunos casos, cuando $t_{vr} \ll t_{cf}$, para simplificar los cálculos se asume que las pérdidas en encendido son iguales a E_{off2M} .

ANÁLISIS DEL PROCESO DE CONMUTACIÓN DE ENCENDIDO DEL CONMUTADOR PRINCIPAL Q.

Condiciones iniciales:

a.-Toda la corriente de carga circula por el diodo auxiliar D:

$$I_D = I_L \Rightarrow I_Q = 0$$

b.-El diodo D está polarizado en directo y permanece en este estado mientras la corriente I_{AK} es mayor que 0:

$$I_{AK} > 0 \Rightarrow V_{AKD} = V_{AKDON} \approx 0 \Rightarrow V_A = V_Q \approx V_{CC}$$

En el caso genérico de una carga inductiva con corriente no nula antes del encendido, la conmutación se produce en dos etapas:

1.- Subida de la corriente $i_Q(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en encendido.

Esta etapa comienza una vez que ha transcurrido el tiempo de retardo de encendido, t_d , medido a partir del momento en que la señal del circuito de control del dispositivo alcanza el nivel de encendido, y termina al concluir el tiempo de subida de la corriente, t_{cr} , cuando $i_Q(t_{cr})=I_L$.

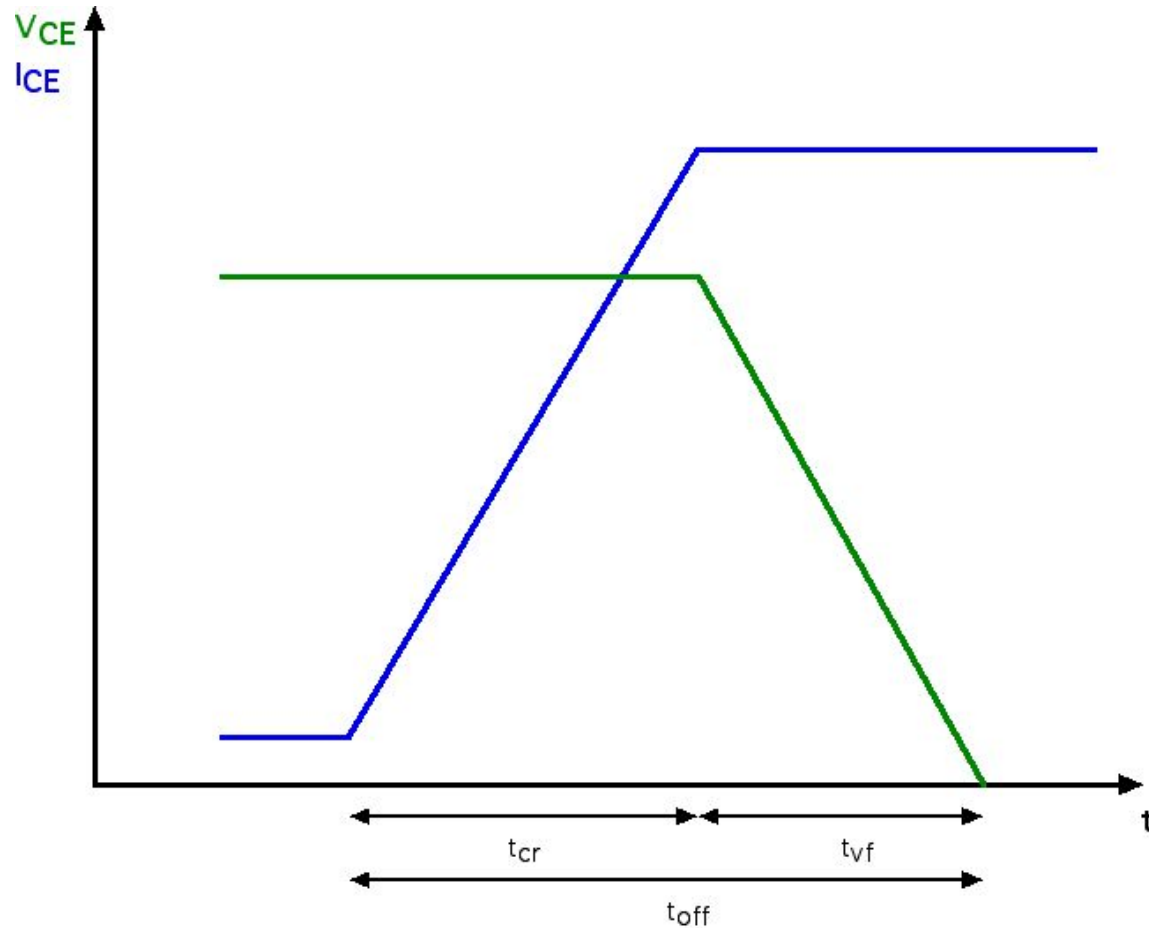
Durante este sub-intervalo el diodo de libre conducción está polarizado en directo, y su corriente cae desde el valor I_L a cero, instante en el cual el diodo sale de conducción.

En un caso real el diodo no es ideal, y al apagarse circula una corriente inversa que se suma a la corriente de carga que Q está conduciendo. Esto aumenta las pérdidas, por lo que se debe buscar un diodo que tenga la menor corriente inversa posible; este criterio también hace que sea preferible usar un diodo Schottky siempre que sea posible.

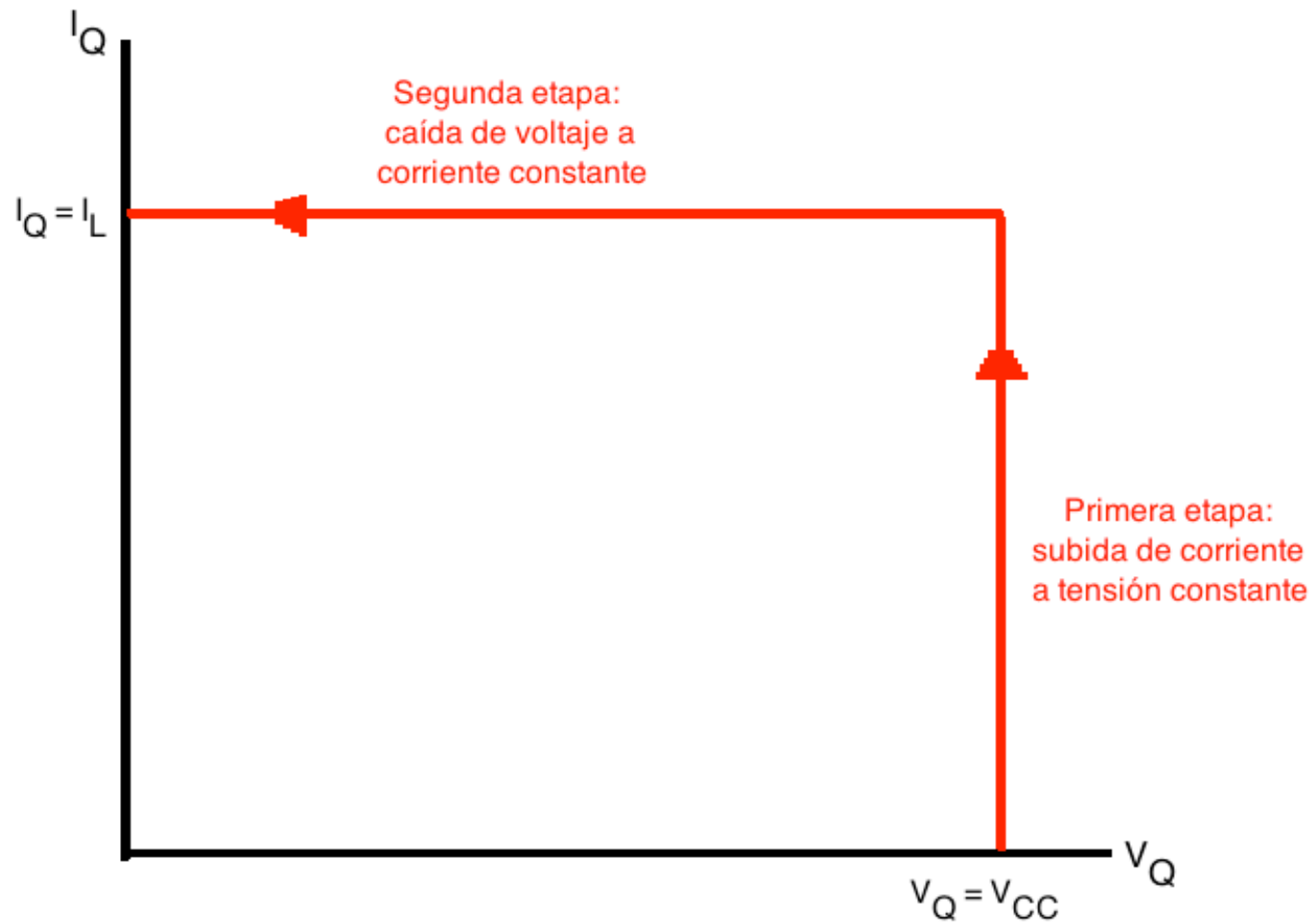
2.- Segunda etapa: caída de la tensión $v_Q(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en encendido.

Esta etapa comienza en el momento cuando $i_Q = I_L$ y el diodo de libre conducción se apaga, y termina al concluir el tiempo de caída de la tensión en el dispositivo principal, t_{vf} , cuando $v_Q(t_{vf}) = 0$.

Durante esta etapa el diodo de libre conducción está polarizado en inverso y no interviene en la operación del circuito.



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



Trayectoria de las variables V_Q e I_Q en el plano I/V durante la conmutación de encendido.

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS PRODUCIDAS EN EL CONMUTADOR PRINCIPAL
DURANTE EL APAGADO EN EL CASO IDEAL.

1.- Subida de la corriente $i_Q(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en encendido.

Esta etapa comienza una vez que ha transcurrido el tiempo de retardo de encendido, t_d , medido a partir del momento en que la señal del circuito de control del dispositivo alcanza el nivel de encendido, y termina al concluir el tiempo de subida de la corriente, t_{cr} , cuando $i_Q(t_{cr})=I_L$.

En el intervalo t_{cr} la corriente $i_Q(t)$ crece linealmente hasta el valor final:

$$i_Q(t) = I_L \left(\frac{t}{t_{cr}} \right)$$

La energía disipada en Q en la primera etapa de la conmutación de encendido es:

$$E_{ton1L} = \int_0^{t_{cr}} v_Q(\tau) i_Q(\tau) d\tau = V_{cc} \int_0^{t_{cr}} i_Q(\tau) d\tau = V_{cc} \frac{I_L t_{cr}}{2}$$

y la máxima energía disipada en esta etapa de encendido, E_{ton1M} , es:

$$E_{ton1M} = V_{ccM} \int_0^{t_{cr}} i_Q(\tau) d\tau = V_{ccM} \frac{I_{LM} t_{cr}}{2}$$

2.- Segunda etapa: caída de la tensión $v_Q(t)$ entre los terminales del dispositivo de potencia que conmuta en encendido.

Esta etapa comienza en el momento cuando $i_Q=I_L$ y el diodo de libre conducción se apaga, y termina al concluir el tiempo de caída de la tensión en el dispositivo principal, t_{vf} , cuando $v_Q(t_{vf})=0$.

En el intervalo t_{vf} la tensión v_Q en el dispositivo cae linealmente:

$$v_Q(t) = V_{cc} \left(1 - \frac{t}{t_{vf}} \right)$$

La energía disipada en la segunda etapa de encendido, E_{ton2} , es:

$$E_{ton2} = \int_0^{t_{vf}} v_Q(\tau) i_Q(\tau) d\tau = I_L \int_0^{t_{vf}} v_Q(\tau) d\tau = I_L \frac{V_{cc} t_{vf}}{2}$$

y la máxima energía disipada en segunda etapa de encendido,

E_{ton2M} , es:

$$E_{ton2M} = I_{LM} \int_0^{t_{vf}} v_Q(\tau) d\tau = I_{LM} \frac{V_{ccM} t_{vf}}{2}$$

Las pérdidas máximas totales durante la conmutación de encendido son:

$$E_{onM} = E_{on1M} + E_{on2M} = V_{ccM} \frac{I_{LM} t_{cr}}{2} + I_{LM} \frac{V_{ccM} t_{vf}}{2}$$

En algunos casos, cuando $t_{vf} \ll t_{cr}$, para simplificar los cálculos se asume que las pérdidas en encendido son iguales a E_{on2M} .

Las pérdidas máximas en un ciclo completo encendido-apagado, $E_{on-offM}$, son:

$$E_{on-offM} = E_{onM} + E_{offM}$$

Si la frecuencia de conmutación máxima del dispositivo principal de control es f_{cM} , la máxima potencia disipada en el dispositivo principal de control de potencia debido a las conmutaciones, P_{pcM} , es:

$$P_{pcM} = f_{cM} E_{on-offM}$$

Si la matriz de conmutación esta formada por N dispositivos operando bajo las mismas condiciones, la perdida total máxima en la matriz de conmutación debido las conmutaciones de los dispositivos principales de control, P_{pcTM} , es:

$$P_{pcTM} = Nf_{cM}E_{on-offM}$$