

# CAPÍTULO 3 CONMUTACIÓN SUAVE

## 3.1 Introducción

En este capítulo se explicará el funcionamiento de los semiconductores de potencia en el proceso básico de conmutación. Se muestran circuitos auxiliares para disminuir pérdidas como los *snubbers*. También se explicará la conmutación dura y suave, esta última se puede implementar ya sea a cero corriente o cero voltaje.

## 3.2 Proceso básico de conmutación.

La necesidad de usar dispositivos semiconductores empleados como interruptores, esta basada en su habilidad de manipular la gran cantidad de energía desde la entrada hasta la salida con pérdidas relativamente bajas, resultando esto en sistemas electrónicos de potencia con alta eficiencia. La eficiencia juega un rol muy importante; por ejemplo, si se tiene un sistema de baja eficiencia significa que la mayoría de la energía transferida se esta disipando en forma de calor. Al manejar grandes cantidades de energía, la cual la mayoría de esta se encuentra disipándose, hace que el semiconductor se tenga que operar en frecuencias bajas de conmutación, para poder manejar esta cantidad de energía sin tantas pérdidas. Esto da como resultado una respuesta más lenta, un ancho de banda limitado y lo

más importante el tamaño y peso de los componentes se vuelve mayor, debido a que la cantidad de energía que deben almacenar es mayor.

Por estas razones es preferible operar estos dispositivos a altas frecuencias. Para que la eficiencia y la transferencia de energía sean máximas. Siempre se ha deseado que el interruptor opere bajo condiciones ideales como las que se muestran a continuación [2]:

*Interruptor ideal*

- Sin límites en la cantidad de corriente que pueda manejar el dispositivo cuando se encuentre en estado de conducción (encendido)
- Sin límites en la cantidad de voltaje cuando el dispositivo se encuentre en estado de no conducción (apagado)
- Cero caída de voltaje en estado de conducción.
- Sin límites en la velocidad de operación del dispositivo cuando este cambia de estado.

Aunque estas condiciones son deseables en los dispositivos, estos todavía no logran satisfacerlas. Por lo que evaluando dispositivos de conmutación, se pudo obtener condiciones más reales que son mostradas a continuación [2]:

- Velocidad de conmutación limitada, causada por los tiempos finitos de encendido y apagado, el cual limita la máxima frecuencia de operación del dispositivo.

- Capacidad limitada para el manejo de energía; por ejemplo, corriente de conducción limitada cuando el interruptor se encuentra en estado de encendido, y bloqueo de voltaje limitado en estado de apagado.

### **3.3 Conmutación dura (“Hard switching”).**

La operación de los semiconductores de potencia consiste en regular la cantidad de energía deseada a la salida. Existen dos formas en las cuales puede trabajar el interruptor, en conmutación dura y en conmutación suave. También se puede adicionar un circuito llamado *snubber*, para ayudar en la conmutación o al circuito en general.

La conmutación dura es caracterizada por un excedente casi total en la caída de voltaje en  $V_k$  (Voltaje en interruptor), sobre la corriente acarreada en el interruptor en un tiempo de conmutación que causa pérdida de potencia considerable dentro del semiconductor de potencia. Es decir, cuando el interruptor se enciende, el voltaje en este idealmente debe caer a cero, pero en realidad tiene una pendiente transitoria y la corriente debe crecer a un valor  $X$  por lo que también sufre de una pendiente transitoria, debido a esto el cruce del voltaje y corriente representa una pérdida de energía, como se puede observar en la Figura 3.2. Además de esto, la conmutación dura provoca problemas con interferencias electromagnéticas “EMI” debido al cambio brusco del voltaje y la corriente, el cual puede afectar en los circuitos de control y aparatos cercanos.

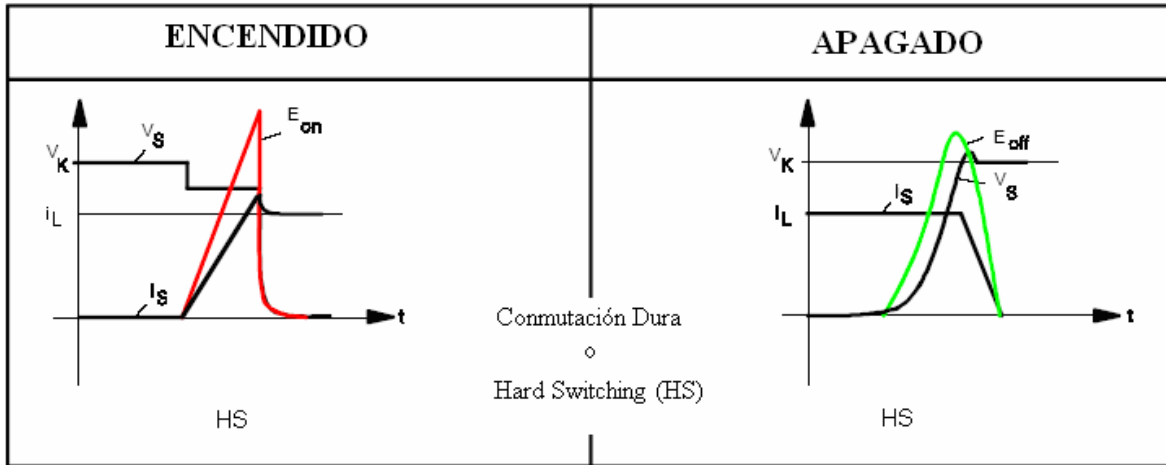


Figura 3.1. Conmutación dura en el interruptor en encendido y apagado ( $V_k$ = Voltaje en el interruptor,  $I_L$ =Corriente de carga,  $I_s$  = Corriente que circula por el interruptor). [13]

### 3.4 Conmutación suave (“Soft Switching”)

En ciertas topologías de convertidores conmutados, dispositivos LC resonantes pueden ser utilizados principalmente para moldear el voltaje y la corriente en el interruptor para proporcionar conmutación a cero voltaje y a cero corriente, es decir hacer que conmute de manera suave el interruptor. En dichos convertidores, durante un periodo de conmutación, existen intervalos de operación tanto resonantes como no resonantes. Es por esto que también suelen ser llamados Quasi-Resonantes, y se mencionan a continuación:

#### 1. Convertidores cd/cd resonantes

- Convertidores conmutación a cero corriente o ZCS (*Zero Current Switching*) por sus siglas en inglés.

- Convertidores conmutación a cero voltaje o *ZCS (Zero Voltage Switching)* por sus siglas en inglés.

2. Convertidores conmutación a cero voltaje – voltaje sostenido o *ZVS-CV* por sus siglas en inglés.

### **3.4.1 Conmutación a cero voltaje quasi-resonante.**

En un convertidor resonante, la red de conmutación de un convertidor por ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation) por sus siglas en inglés, es reemplazada por una red de conmutación que contiene elementos resonantes. El convertidor híbrido resultante combina las propiedades de la red de conmutación resonante y las del convertidor PWM. Para las diversas topologías de convertidores cd/cd, existen arreglos de Tipo M y L para el interruptor como se observa en la Figura 3.2, que se pueden utilizar. En estas topologías, el interruptor es encendido a cero voltaje o apagado a cero voltaje. Mientras el interruptor esta apagado, un pico de voltaje aparecerá a través de este, causando que el estrés sea mayor que cuando esta operando a conmutación dura. En la topología ZVS, el diodo a través del interruptor es usado para excitar el voltaje a través del capacitor, lo cual resulta en cero voltaje a través del interruptor. [1]

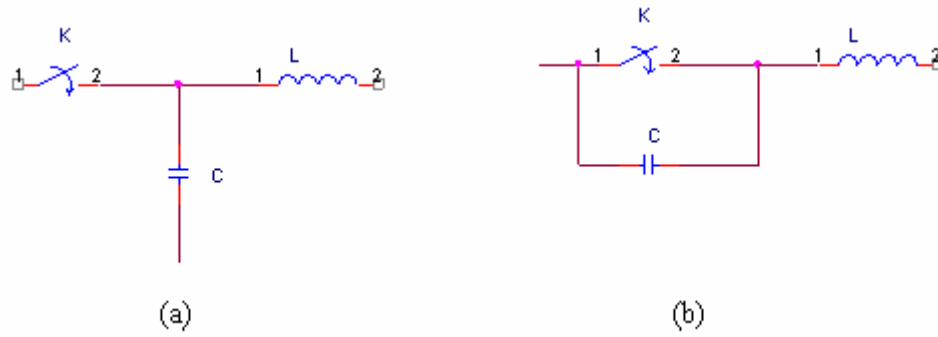


Figura 3.2 Tipos de arreglos de interruptor resonante para operar en ZVS. (a) Tipo L

(b) Tipo M. [1]

En la Figura 3.3 se muestran las dos posibles forma de implementación usando interruptor resonante tipo L y M.

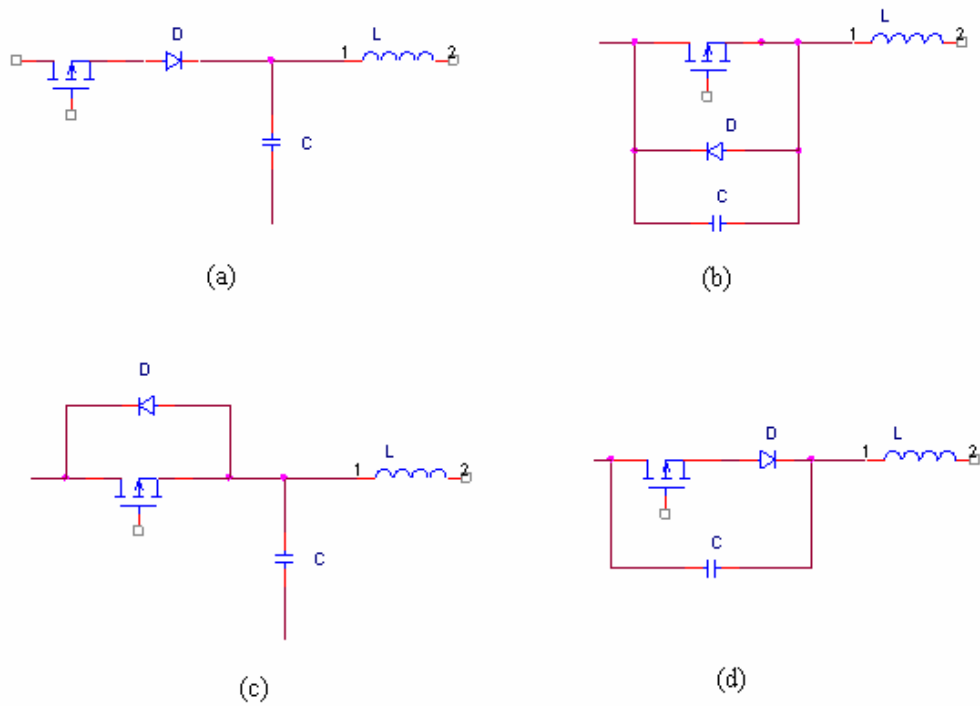


Figura 3.3 Arreglos de interruptores resonantes, implementación de media onda (a) Tipo L

(b) Tipo M, implementación de onda completa (c) Tipo L (d) Tipo M. [1]

Para la configuración de media onda, como se puede observar en la Figura 3.3 (a) y (b), donde el diodo D permite el flujo de corriente de manera unidireccional o de onda completa, como se muestra en la Figura 3.3 (c) y (d), donde la corriente de conmutación puede fluir de forma bidireccional. [3]

### **3.4.2 Conmutación a cero corriente ZCS-QR.**

En estos convertidores, los interruptores de potencia son conmutados a cero corriente, es decir, tienen un apagado “suave” pero al momento del encendido, el interruptor tiene un crecimiento brusco en la corriente, por lo que al momento del encendido este lo realiza en conmutación dura. Para esta técnica, se incorpora un circuito resonante LC, por lo cual la forma de onda de la corriente en el interruptor es forzada a oscilar de manera quasi-senoidal, creando así una condición de conmutación a cero corriente. [16]

En esencia, el circuito resonante LC es usado para moldear la forma de onda de la corriente a través del interruptor. En el encendido, el interruptor puede ser manejado en saturación antes de que la corriente crezca lentamente. Debido a la resonancia entre  $L_r$  y  $C_r$ , la corriente a través del interruptor oscila y regresa a cero, esto resultando en una conmutación natural. [16]

En la Figura 3.4 se muestran las dos posibles formas de implementación usando interruptor resonante tipo L y M.

Se puede observar en la Figura 3.4 (b) el interruptor para operación de media onda, ya que si el interruptor fuera ideal, este se implementaría como un interruptor unidireccional, y por esta razón el interruptor resonante opera en media onda. Pero si el interruptor es bidireccional (con un diodo en antiparalelo), el circuito resonante opera en modo de onda completa como se observa en la Figura 3.4 (c).

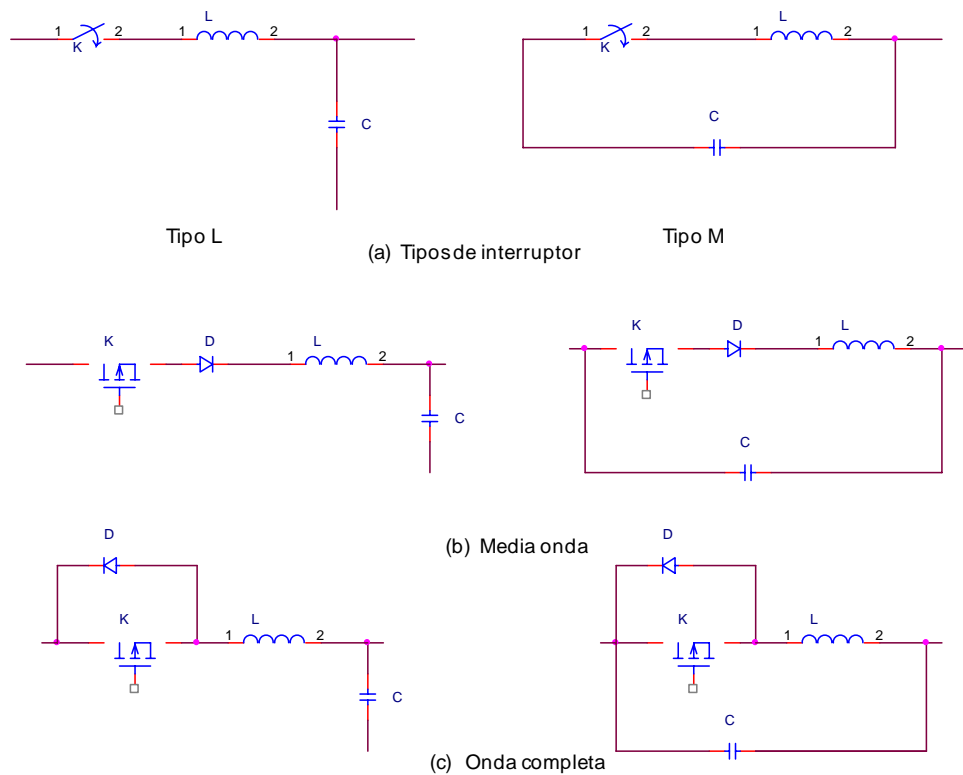


Figura 3.4 Configuraciones de interruptor para convertidores resonantes ZCS. [3]



### **3.5 Snubber.**

El *snubber* es un circuito auxiliar, se posiciona casi siempre a través de la célula de conmutación (en convertidores CD/CD se conforma del interruptor, diodo y bobina), que absorbe energía para después realizar una compensación de esta misma. Aunque se puede utilizar para reducir pérdidas de conmutación, algunos circuitos de este tipo (circuitos RC) sirven también para evitar un falso disparo de algún componente. En general, los *snubber* se pueden dividir en 3 categorías [10]:

1. Snubber en encendido para minimizar sobrecargas grandes de corriente a través del dispositivo cuando está encendido.
2. Snubber en apagado para minimizar grandes sobrecargas de voltaje a través del dispositivo durante el tiempo de apagado.
3. Snubber reducción de estrés, da forma a las formas de onda de conmutación del dispositivo, de tal manera que el voltaje y la corriente asociado con el dispositivo no son tan grandes al mismo tiempo.

### 3.6 Diseño de Circuito Resonante ZVS

Como se vió anteriormente, existen varios métodos como el ZCS o el ZVS, por los cuales se pueden reducir las pérdidas por conmutación. El método que se implementó en esta tesis fue el de Conmutación a cero voltaje Quasi – Resonante o ZVS-QR (*Zero Voltage Switching Quasi-Resonant* por sus siglas en inglés). El motivo por lo que se eligió este método es por que, en contraste con el ZCS, ZVS es preferible a altas frecuencias, debido a las capacitancias internas del MOSFET [11]. Cuando el switch enciende a cero corriente pero con voltaje finito, la carga en los capacitores internos es disipada en el interruptor, sin embargo estas pérdidas no ocurren si el interruptor es encendido a cero voltaje [11]. A partir de esto, se analiza el convertidor elevador con ZVS-QR. Se eligió para este circuito, el interruptor tipo M en operación de media onda.

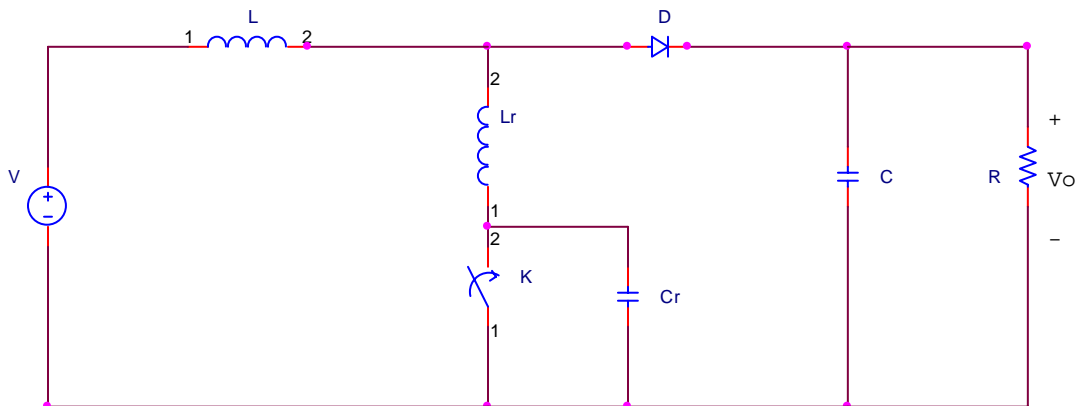


Figura 3.5 Implementación de circuito ZVS QR en un convertidor Elevador. [1]

Como el comportamiento del circuito es determinado en mayor parte por los valores de  $L_r$  y  $C_r$  los siguientes parámetros son definidos [15]:

- Impedancia característica  $Z_n = \sqrt{\frac{Lr}{Cr}}$  (3.1)

- Frecuencia angular resonante  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LrCr}}$  (3.2)

- Frecuencia de resonancia  $fn = \frac{\omega}{2\pi}$  (3.3)

- Resistencia de carga normalizada  $= \frac{Ro}{Zn}$  (3.4)

En la Figura 3.6 se tienen las formas de onda del voltaje aplicado al interruptor, corriente en el inductor y voltaje en el capacitor del circuito resonante.

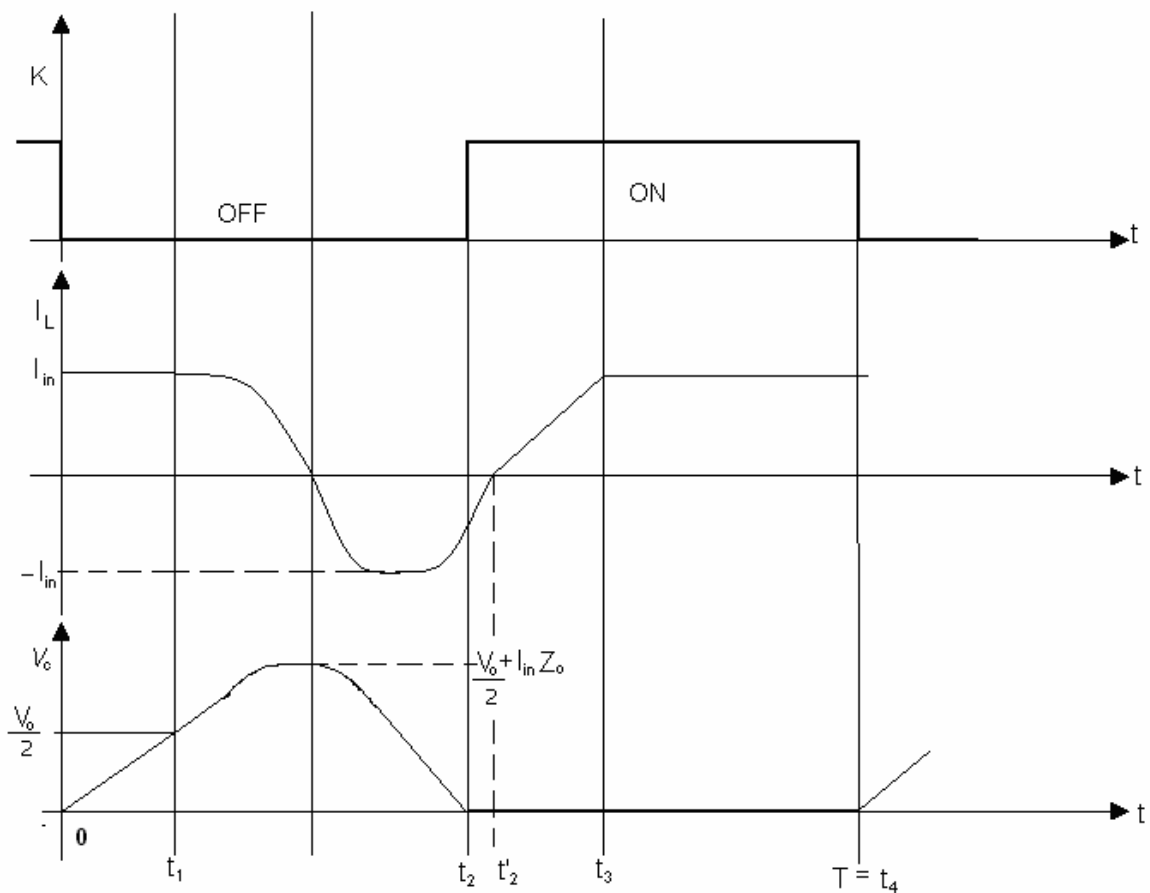


Figura 3.6 Formas de onda en estado estable del convertidor Elevador resonante. [1]

En estado de operación estable, un ciclo de conmutación completo se puede dividir en 4 etapas empezando en el momento en el que el interruptor K se abre. Suponiendo que antes de que K se abra, existe una corriente de entrada  $I_{in}$ . A continuación se describe la operación del circuito en cada una de sus 4 etapas [14]:

Etapas 1: Capacitor cargandose [ $t_0, t_1$ ]

El switch se apaga en  $t_0$ , la corriente  $I_{in}$  fluye a través de  $C_r$ , el voltaje en  $C_r$ ,  $V_c$ , crece linealmente.

Condición inicial:

$$V_c(0) = 0$$

Ecuación de estado:

$$C_r \frac{dV_c}{dt} = I_{in}$$

En  $t_1$ ,  $V_c$  alcanza el voltaje  $V_o/2$ , el diodo D conduce. La duración de esta etapa,  $t_{01}$ , puede ser determinada [14]:

$$t_{01} = C_r \frac{V_o}{2I_{in}} \quad (3.5)$$

El circuito equivalente de la etapa 1 se muestra en la Figura 3.7:

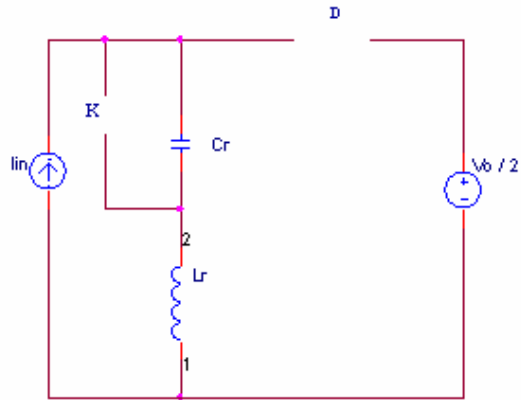


Figura 3.7 Circuito equivalente en  $[t_0, t_1]$ . [1]

Etapa 2: Resonancia  $[t_1, t_2]$ :

El diodo D conduce en  $t_1$ , una parte de  $I_{in}$  empieza a fluir en  $V_o/2$

Condiciones iniciales:

$$I_L(0) = 0$$

$$V_C(0) = \frac{V_o}{2}$$

Ecuaciones de estado:

$$L_r \frac{dI_L}{dt} = V_C - \frac{V_o}{2}$$

$$C_r \frac{dV_C}{dt} = I_{in} - I_L$$

Las ecuaciones de estado ya resueltas [14]:

$$I_L(t) = I_{in}(1 - \cos \omega t) \quad (3.6)$$

$$V_C(t) = \frac{V_o}{2} + Z_n I_{in} \sin \omega t \quad (3.7)$$

Donde:

$V_o$  = Voltaje de salida.

$Z_n$  = Impedancia característica.

$I_{in}$  = Corriente de entrada

El circuito equivalente de esta etapa se muestra en la Figura 3.8:

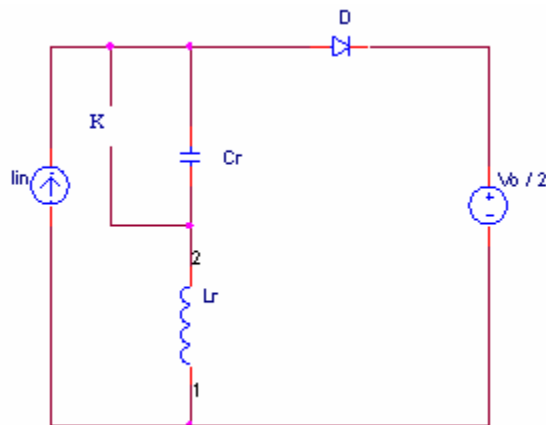


Figura 3.8 Circuito equivalente de la etapa 2. [1]

Etapa 3: Inductor descargándose [ $t_2, t_3$ ]:

Después del tiempo  $t_2$ , el voltaje en el capacitor  $V_c$  llega a cero y el interruptor  $K$  enciende a cero voltaje. El interruptor y el diodo están conduciendo, y la corriente en el inductor se incrementa linealmente hasta  $I_{in}$ , como se muestra en la Figura 3.6.

Condiciones iniciales

$$I_L = I_{in}(1 - \cos \alpha)$$

$$V_c(t_2) = 0$$

Ecuación de estado:

$$L_r \frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_o}{2}$$

La duración de este estado se puede determinar por [14]:

$$t_{23} = \frac{2L_r I_{in}(1 - \cos \alpha)}{V_o} \quad (3.8)$$

Donde:

$L_r$  = Inductor del circuito resonante.

$V_o$  = Voltaje de salida.

$I_{in}$  = Corriente de entrada.

En el modo de operación de media onda, cuando  $V_c$  cae a cero en  $t_2$ ,  $V_c$  es montado en el valor de  $\frac{V_o}{2} + I_{in} Z_n$  por el diodo que se encuentra en antiparalelo con el interruptor, el cual acarrea la corriente de reversa [1]. Las formas de onda para la operación de media onda pueden ser vistas en la Figura 3.6.

En la Figura 3.9 se puede observar el circuito equivalente de la Etapa 3.

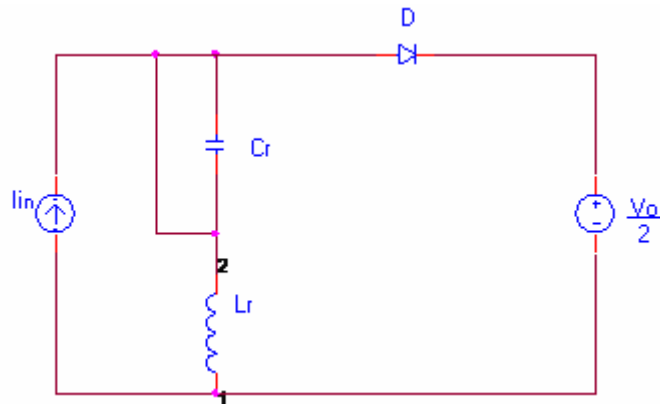


Figura 3.9 Circuito equivalente etapa 3. [1]

Normalmente, en la operación de media onda, el interruptor, deberá apagarse después de que el Voltaje en el capacitor ( $V_c$ ) decrece a cero en el tiempo  $t_2$  y antes de que la corriente a través de  $D$  llegue a cero en  $t'_2$ . De otra manera,  $V_c$  se empezaría a recargar y el interruptor perdería la oportunidad de encender bajo la condición de cero voltaje, como se observa en la Figura 3.6. [14]

#### Etapa 4: Flujo libre [ $t_3, t_4$ ]

En el tiempo  $t_3$ , toda la corriente de la fuente de entrada  $I_{in}$  fluye a través de interruptor.  $I_K$  se mantiene constante hasta que el interruptor  $K$  se apaga otra vez en  $T_4$ . El circuito equivalente de esta etapa se observa en la Figura 3.11. La duración de esta etapa,  $t_{34}$ , es una variable independiente expresada como [14]:

$$t_{34} = T - t_{01} - t_{12} - t_{23} \quad (3.9)$$



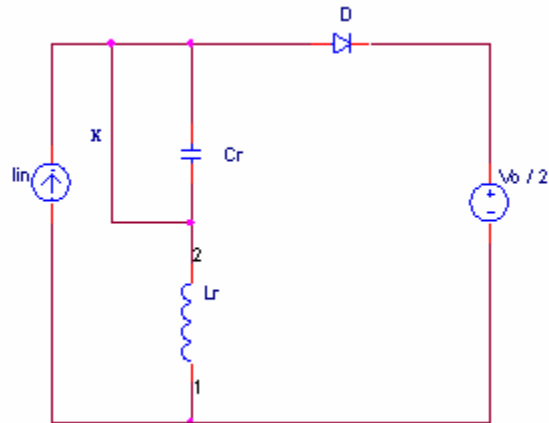


Figura 3.10 Circuito equivalente Etapa 4. [1]

Para poder obtener los valores de  $L_r$  y  $C_r$ , algunos de los parámetros como la frecuencia de resonancia y la impedancia característica son establecidos. El valor de  $L_r$ , no puede ser muy grande, ya que como se observa en la Figura 3.5  $L_r$  se encuentra en serie con  $L$ . Para poder seguir operando en MDC.