

Capítulo 5

Commutación Suave

Debido al estrés al que son sometidos los dispositivos semiconductores y en especial los transistores MOSFET, se necesitan técnicas que hagan que estas pérdidas por transiciones de voltaje y corriente sean menores. Una de esas técnicas es la conmutación suave y se estudia en el presente capítulo. Además se verán algunas de las técnicas de resonancia y se explicarán las ventajas que estas poseen para poder minimizar las pérdidas por disipación de energía en el circuito.

5.1 Introducción

En los convertidores de alta potencia que realizan transiciones por medio de técnicas de control como PWM, es importante usar circuitos que conmuten con técnicas de conmutación suave. Esto es debido a las pérdidas por conmutación natural debida a las formas de onda en las transiciones. A esto se le conoce como conmutación dura en un interruptor. Por sus siglas en inglés se encuentra la conmutación a cero corriente ZCS (Zero Current Switching) y la conmutación a cero voltaje ZVS (Zero Voltage Switching), las cuáles han emergido como una nueva tecnología para minimizar las pérdidas de potencia. Se trata de usar elementos capacitivos (C_r) e inductivos (L_r) dentro de un interruptor unidireccional y bidireccional. La Figura 5.1 muestra más claro el traslape del voltaje y la corriente dentro del interruptor:

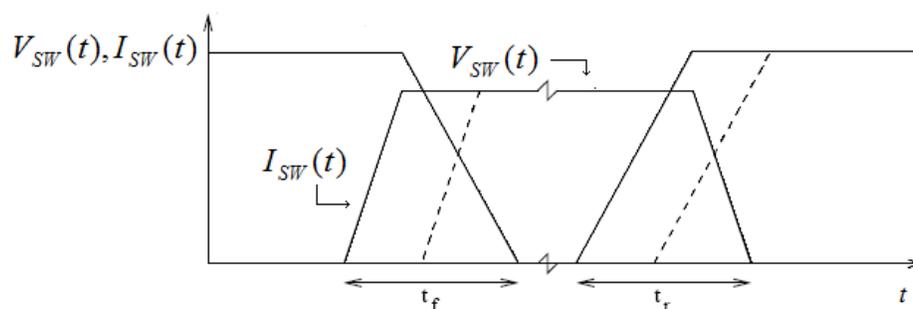


Fig. 5.1 Transición simultánea de Voltaje y Corriente en interruptor [22]

Debido al cruce del voltaje y corriente cuando se apaga y se enciende el transistor se tiene potencia disipada y que de no corregirse, se traduce en forma de calor en el dispositivo como se observa en la Figura 5.2

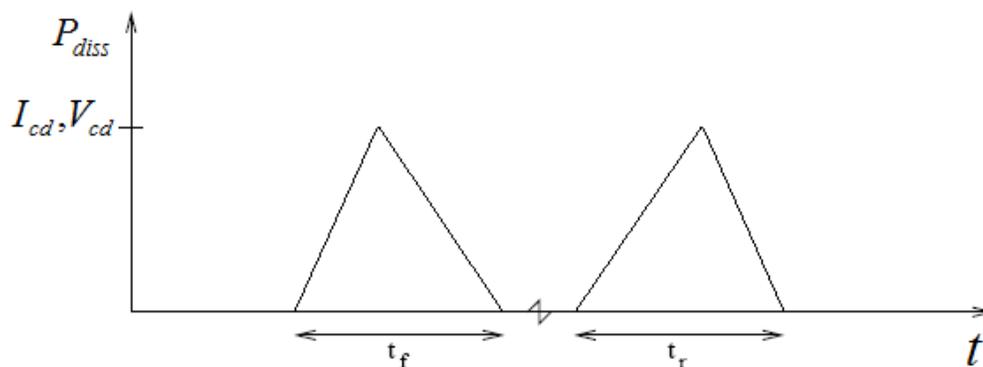


Fig. 5.2 Potencia Disipada en el transistor [22]

5.2 Técnicas de conmutación suave: ZCS y ZVS

En la conmutación a corriente cero un inductor L_r se conecta en serie con el interruptor S para poder obtener la conmutación de corriente a cero. Existen dos tipos de

implementación: tipo L y tipo M figura 5.3a y 5.3b. Estas configuraciones pueden estar en media onda y onda completa como en la figura 5.3c y 5.3d:

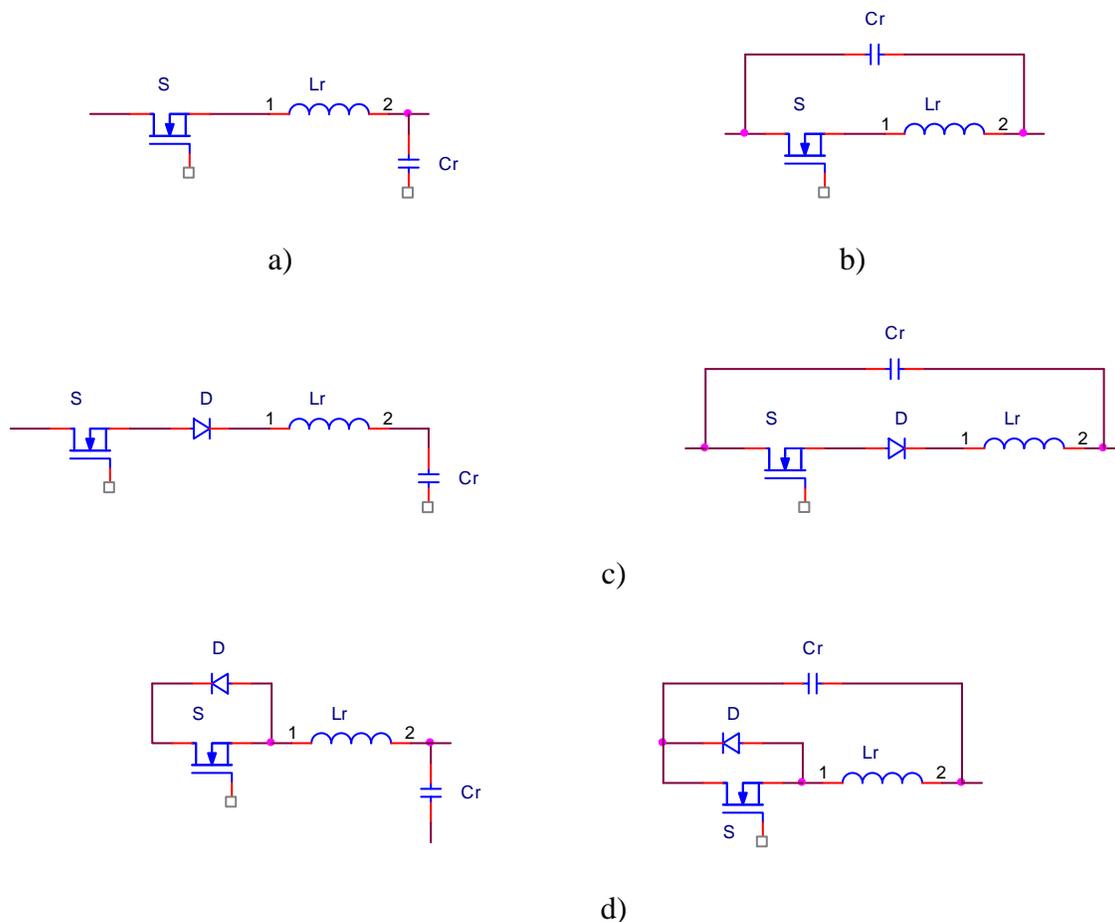


Fig. 5.3 Tipos de Interruptores a ZCS. a) Tipo L. b) Tipo M. c) ZCS en media onda. d) ZCS en onda completa.

Cuando el interruptor se enciende empieza a fluir la corriente y se incrementa desde cero para que comience a oscilar. El interruptor estará listo para conmutar a cero corriente cuando se apague el transistor. En las siguientes figuras se puede observar esta operación en el interruptor.

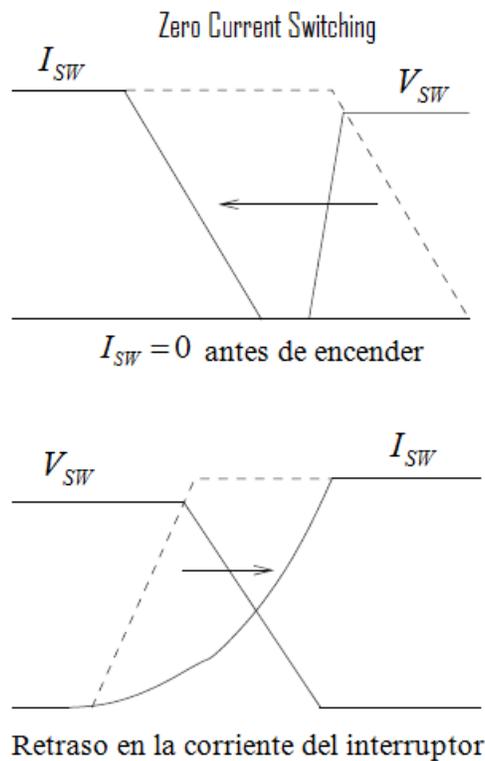
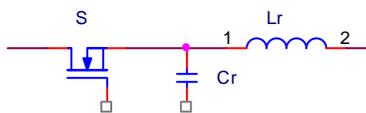


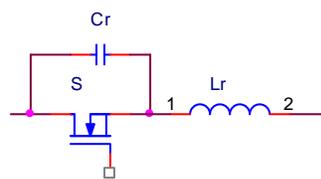
Fig. 5.4 Encendido y Apagado con ZCS [22]

En un interruptor resonante a voltaje cero el capacitor C_r se encuentra en paralelo con el interruptor para realizar la conmutación a voltaje cero (ZVS). Si el interruptor es unidireccional el voltaje a través del capacitor C_r puede oscilar en el ciclo positivo y negativo la mitad del periodo, por lo tanto el interruptor opera en modo de onda completa.

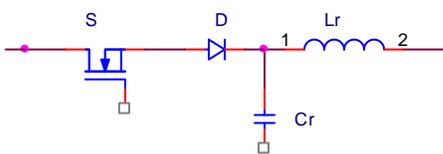
Si se le conecta un diodo en paralelo al interruptor unidireccional el voltaje en el capacitor resonante obligará a que el voltaje en el capacitor sea cero durante la mitad del ciclo negativo y opere en modo de media onda. Las siguientes figuras muestran los modos de operación para ZVS:



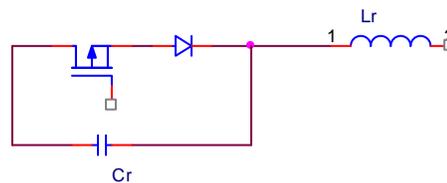
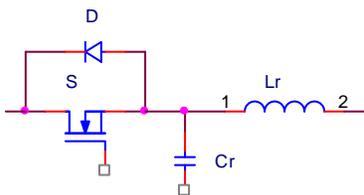
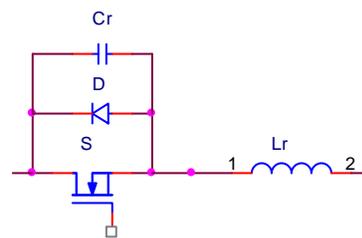
a) Tipo L



b) Tipo M



c) ZVS en media onda



d) ZVS en onda completa [22]

Fig. 5.5 Tipos de Interruptores a ZVS. a) Tipo L. b) Tipo M. c) ZVS en media onda. d) ZVS en onda completa.

La conmutación a cero voltaje usa el circuito resonante durante el tiempo de apagado para crear una condición de voltaje a cero cuando el interruptor encienda. Las transiciones se muestran en las figuras siguientes:

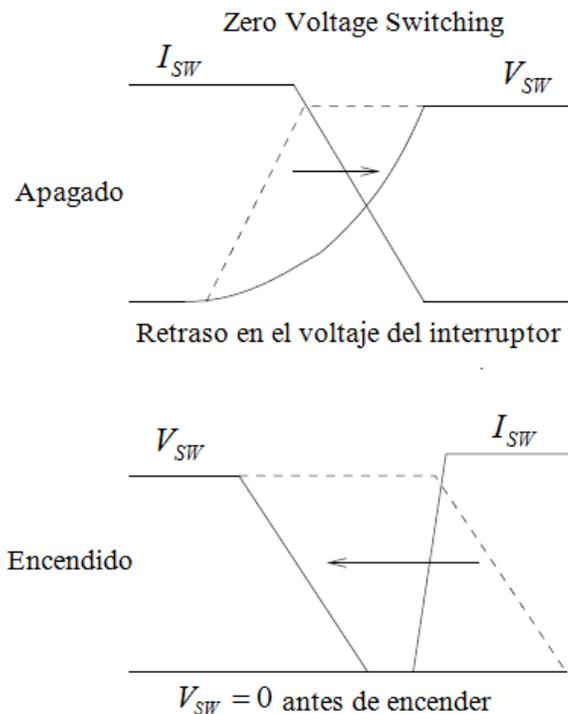


Fig. 5.6 Encendido y Apagado con ZVS [22]

5.3 Diseño del Reductor-Elevador con ZVS

Para el circuito resonante se ha elegido usar la célula de conmutación a cero voltaje tipo M y de media onda, debido a que es más conveniente usar las capacitancias internas del MOSFET en el diseño del reductor-elevador resonante. Por ello se analiza el circuito para la conmutación a cero voltaje.

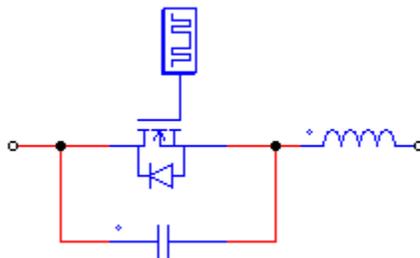


Fig. 5.7 Implementación del ZVS en media onda tipo M en el interruptor

En la siguiente figura se observa el reductor-elevador con ZVS tipo M el cual se analizará cuando el transistor este encendido y apagado.

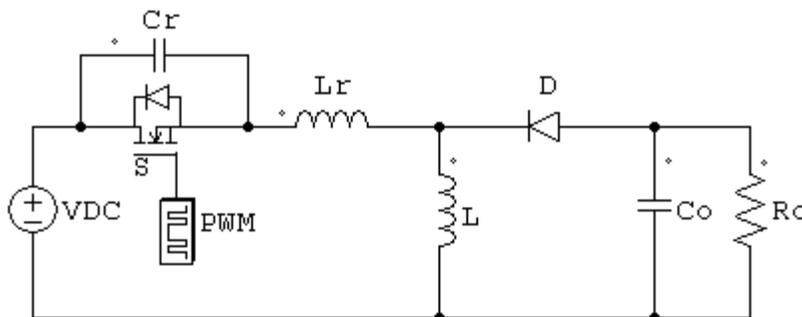


Fig. 5.8 Reductor-Elevador con conmutación a voltaje cero

En la siguiente figura se muestra el circuito resonante aplicado al convertidor reductor-elevador en el interruptor bidireccional. Se puede observar que se añade la célula de conmutación tipo M de media onda al transistor, conformada por un inductor y capacitor.

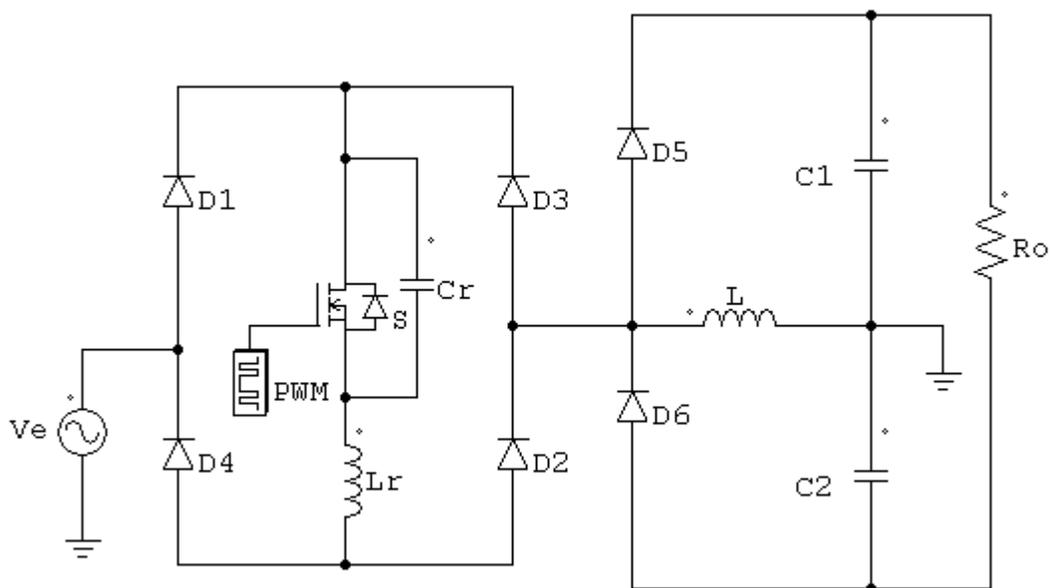


Fig. 5.9 Módulo CFP con conmutación suave

Debido a la celda de conmutación se obtienen las ecuaciones con un circuito resonante para el transistor abierto y cerrado. Cuando el transistor está cerrado se establecen las siguientes ecuaciones:

$$V_e - V_{L_r} - V_L = 0 \tag{5.1}$$

$$V_e = L \frac{di_i}{dt} + L_r \frac{di_i}{dt} \tag{5.2}$$

El circuito equivalente se muestra en la figura 5.10

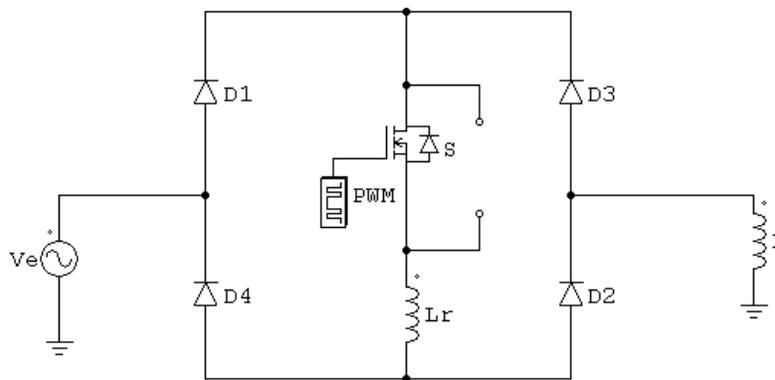


Fig. 5.10 CFP con conmutación suave e interruptor abierto

De nuevo se resuelve la ecuación diferencial y se evalúa $i(t)$ en αT . Considerando que para obtener la corriente máxima en inductor $V_e = V_m$.

$$I_{L_r \text{ max}} = \frac{\alpha T V_m}{L + L_r} \tag{5.3}$$

Cuando el transistor se apaga en el semiciclo positivo la fuente se encuentra en serie con el capacitor que se encuentra entre el drenador y la fuente del MOSFET, por lo que se forman las siguientes mallas de la Figura 5.11.

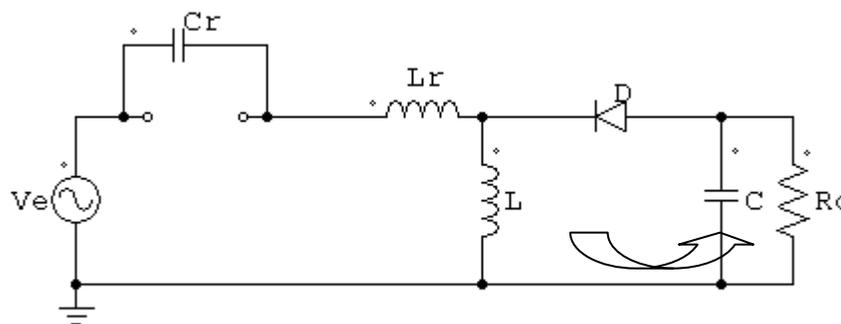


Fig. 5.11 Circuito equivalente con ZVS cuando el transistor está apagado

Al suponer que la corriente en la inductancia L no tiene rizado y es igual a la corriente de salida I_s , se puede considerar el modelo de la figura 5.12 para el convertidor conmutado a cero voltaje.

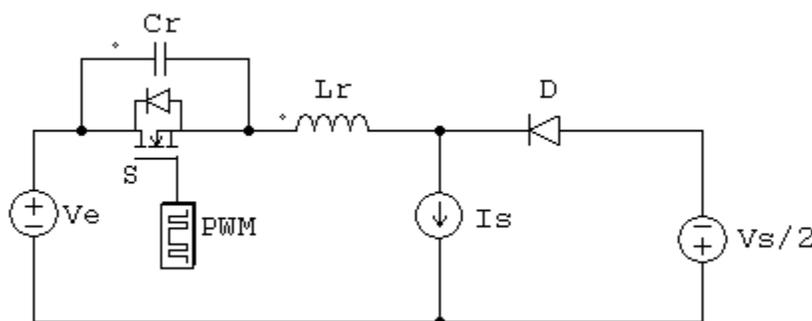


Fig. 5.12 Modelo equivalente cuando el transistor esta apagado

Este circuito presenta 4 modos de operación principales después de que se ha abierto el interruptor, los cuáles se modelarán con facilidad al suponer que la corriente de salida es constante. Los intervalos y las ecuaciones respectivas se muestran a continuación:

$[t_0 \leq t \leq t_1]$:

El interruptor se abre en el instante t_0 por lo que la corriente de entrada fluye en el capacitor C_r y crece linealmente hasta alcanzar el voltaje $\frac{V_o}{2}$ en t_1 . El diodo está polarizado en inversa. La corriente en ambos inductores no cambia y se mantendrá constante.

Condiciones Iniciales

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

$$V_{cr}(t) = \frac{I_s}{C_r}(t - t_0) \quad (5.4)$$

$$I_e(t) = I_s$$

$$V_c(t_1) = \frac{V_s}{2}$$

$$I_e(t_1) = I_s$$

El circuito equivalente a este intervalo es el siguiente:

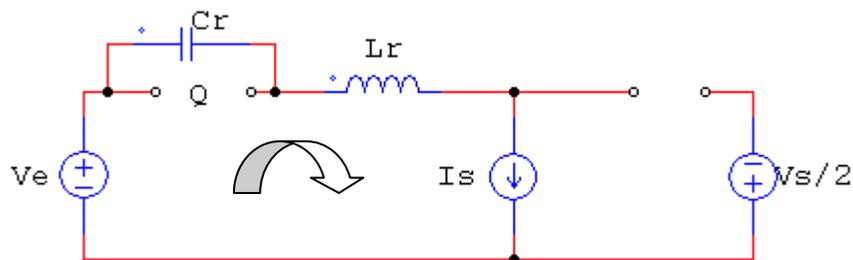


Fig. 5.13 Circuito equivalente Modo 1

$[t_1 \leq t \leq t_2]$:

En este modo el diodo se polariza en directa y conducirá para establecer la etapa resonante entre C_r y L_r . En t_2 el interruptor ya podrá encender en modo de conmutación a voltaje cero.

Condiciones Iniciales

$$V_c(t) = \frac{V_o}{2} + Z_o I_s \sin \omega_o(t - t_1) \quad (5.5)$$

$$I_L(t) = I_s \cos \omega_o(t - t_1)$$

$$V_c(t_2) = 0$$

$$I_L(t_2) = I_s \cos \omega_o(t_2 - t_1) \quad (5.6)$$

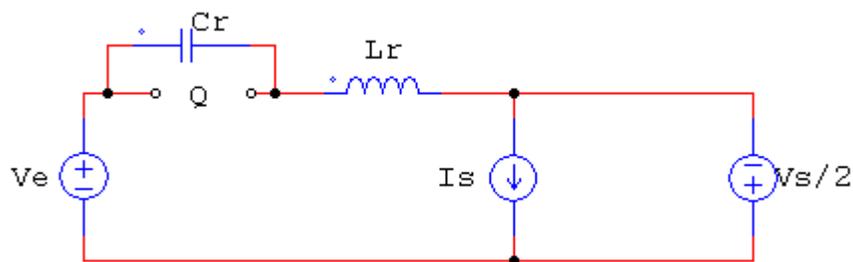


Fig. 5.14 Circuito equivalente al Modo 2

$[t_2 \leq t \leq t_3]$:

El interruptor se enciende a conmutación a cero voltaje mientras que el inductor empieza a cargarse linealmente hasta alcanzar la corriente de salida por lo que el diodo se apagará en $t=t_3$.

Condiciones Iniciales

$$V_c(t) = 0$$

$$i_1(t) = I_s \cos \omega_0(t_2 - t_1) + \frac{V_0}{2L}(t - t_2) \quad (5.7)$$

$$V_{Cr}(t_3) = 0$$

$$i_L(t_3) = I_s$$

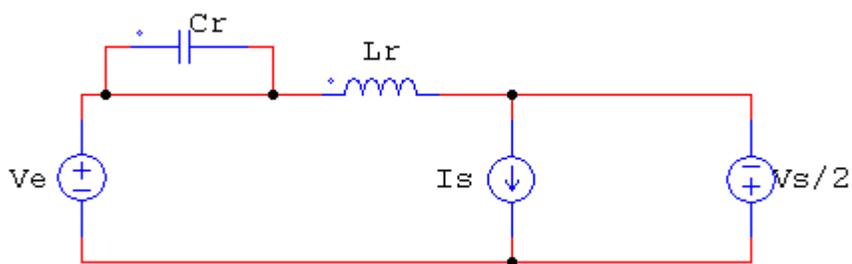


Fig. 5.15 Circuito equivalente al Modo 3

$$[t_3 \leq t \leq t_o + T_s]:$$

Durante este modo es un estado estacionario sin suceder nada con el interruptor hasta la próxima conmutación en el siguiente ciclo.

Condiciones Iniciales

$$V_c(t) = 0$$

$$i_L(t) = I_s$$

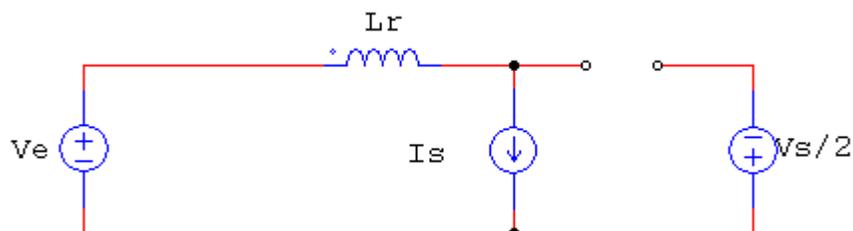


Fig. 5.16 Circuito equivalente al Modo 4

Existen ciertas condiciones de operación para cada modo, por lo que la Tabla 5.1 sintetiza el comportamiento de algunos elementos de la célula de conmutación durante los modos del ZVS donde:

S = MOSFET usado como interruptor

D = diodo del convertidor reductor-elevador

D_s = diodo a través de las terminales del MOSFET

		S	D	D_s
Modo 1	$t_0 \leq t \leq t_1$	Apagado	Apagado	Apagado
Modo 2	$t_1 \leq t \leq t_2$	Apagado	Encendido	Apagado
Modo 3	$t_2 \leq t \leq t_3$	Encendido	Encendido	Encendido
Modo 4	$t_3 \leq t \leq T$	Encendido	Apagado	No importa

Tabla 5.1 Condiciones de operación en el interruptor

Para calcular los valores de resonancia se necesitan saber algunos parámetros que se muestran a continuación:

$$M = \frac{V_0}{V_{in}} \text{ Voltaje de Salida Normalizado} \tag{5.8}$$

$$Q = \frac{R_0}{Z_0} \text{ Carga Normalizada} \quad (5.9)$$

$$f_{ns} = \frac{f_s}{f_0} \text{ Frecuencia de Conmutación Normalizada} \quad (5.10)$$

Se necesita establecer la Impedancia Característica

$$Z_n = \sqrt{\frac{Lr}{Cr}} \quad (5.11)$$

Frecuencia angular de resonancia del convertidor

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (5.12)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (5.13)$$

La siguiente gráfica muestra los modos de operación de la etapa resonante durante el instante que el capacitor se empieza a cargar y empieza a oscilar junto con el inductor resonante:

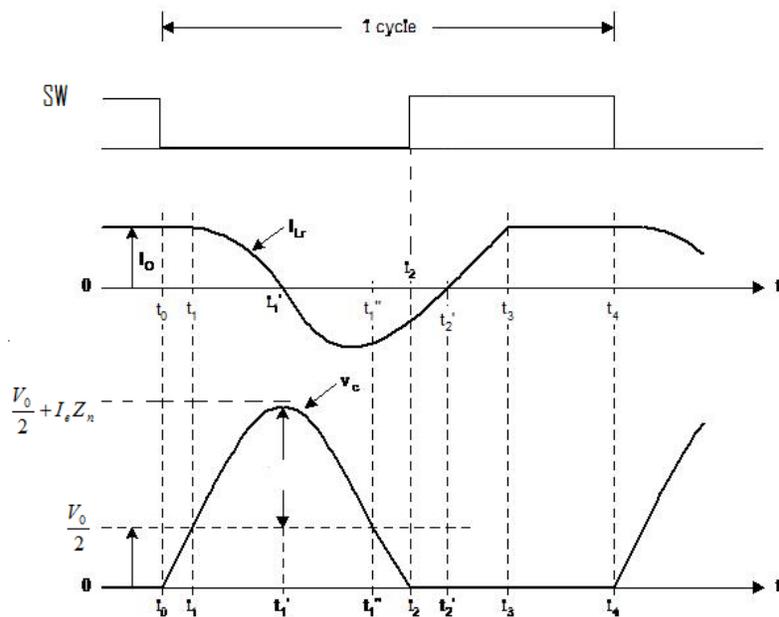
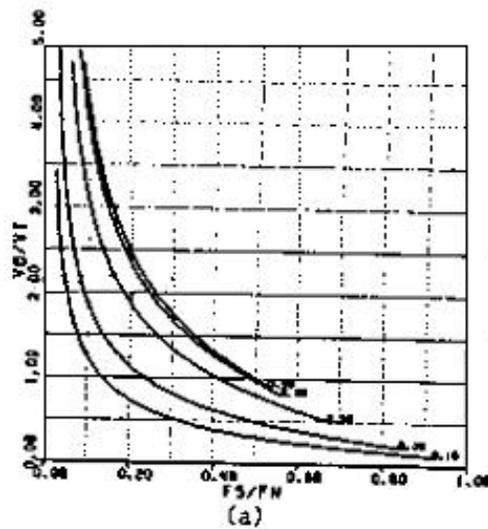


Fig. 5.17 Formas de Onda de los elementos de la celda de conmutación

Para un convertidor reductor-elevador se muestra en la siguiente figura 5.18 el cociente del voltaje de salida entre el voltaje de entrada en el eje Y, y la frecuencia de conmutación entre la frecuencia normalizada en el eje X. Esta gráfica es importante para considerar el diseño del convertidor resonante en modo de media onda. De aquí se obtendrán los parámetros para diseñar el circuito resonante.



5.18 Gráfica de la curva característica $\frac{V_0}{V_i}$ vs $\frac{f_s}{f_n}$ para un convertidor reductor-elevador

cuasi-resonante en modo de voltaje [9]

5.4 Conclusiones

Se mostraron algunas técnicas de conmutación suave a cero voltaje y cero corriente, así como el análisis del CFP al añadirle la conmutación a voltaje cero. Para ello se han visto algunos circuitos resonantes, y que se pueden aplicar para mejorar las transiciones de voltaje y corriente en dispositivos interruptores como los transistores MOSFET, dentro de las fuentes conmutadas. En el siguiente capítulo se simula el diseño del circuito para poder comparar los resultados.