CAPÍTULO III

Convertidores CD-CD

3.1.- Introducción

En muchas aplicaciones industriales se requiere convertir un voltaje fijo de una fuente de cd en un voltaje variable de suministro de cd. Un convertidor cd-cd convierte en forma directa de cd a cd y se llama simplemente convertidor de cd. Se puede considerar que un convertidor cd es el equivalente en cd de un transformador de ca, con una relación de vueltas que varía en forma continua. Al igual que un transformador, se puede usar para subir o bajar el voltaje de una fuente [15].

Los convertidores de cd se pueden usar como reguladores de modo de conmutación, para convertir de cd, normalmente no regulado, en un voltaje de salida regulado de cd. La regulación se suele obtener con PWM (modulación de ancho de pulso) a determinada frecuencia, y el dispositivo de conmutación es, en el caso normal, un BJT, MOSFET o IGBT [15].

Un método para convertir un voltaje de continua en otro de valor más bajo es utilizar el sencillo circuito de la figura 3.1. El voltaje de salida (Vo) es

$$V_O = I_L R_L \quad (1)$$

donde la corriente de carga (I_L) está controlada por el transistor. Ajustando la corriente de base del transistor se puede controlar el voltaje de salida en el rango comprendido entre 0 y voltaje de entrada (V_s). Se puede ajustar la corriente de base para compensar las variaciones del voltaje de alimentación (Vs) o las variaciones de la carga (R_L) y, de esta manera, regular la salida [5].

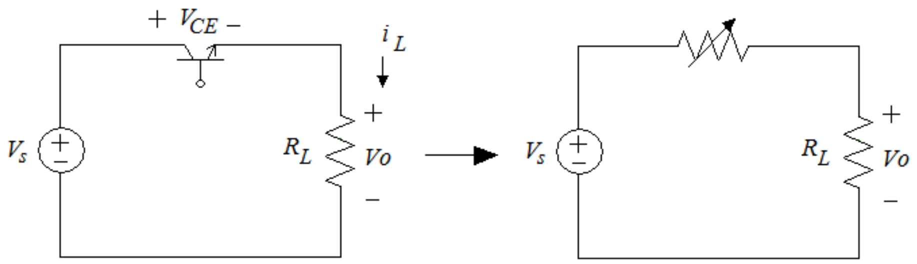

Figura 3.1.- Regulador lineal básico [5].

Este tipo de circuito se denomina convertidor cd-cd lineal o regulador lineal, porque el transistor opera en la región lineal, en lugar de en la zona de saturación o de corte. De hecho, el transistor se comporta como una resistencia variable [5].

3.2.- Convertidor conmutado básico

Una alternativa más eficiente al regulador lineal es el convertidor conmutado. En un convertidor conmutado, el transistor funciona como un interruptor electrónico, al estar completamente activado o completamente desactivado (saturación o corte) [5].

Si suponemos que el interruptor de la figura 3.2 es ideal, la salida es igual a la entrada cuando el interruptor está cerrado y es cero cuando está abierto. La apertura y cierre periódicos del interruptor producen la salida de pulsos mostrada en la figura 3.2c. La media o componente continua de la salida (*Vo*) es

$$V_O = \frac{1}{T}\int_0^T V_o(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} V_S dt = V_S\alpha \qquad (2)$$

La componente continua de la salida se controla ajustando el ciclo de trabajo α, que es la fracción del periodo (T) en la que el interruptor está cerrado:

$$\alpha = \frac{t_{conducción}}{t_{conducción}+t_{corte}} = \frac{t_{conducción}}{T} = t_{conducción}f \qquad (3)$$

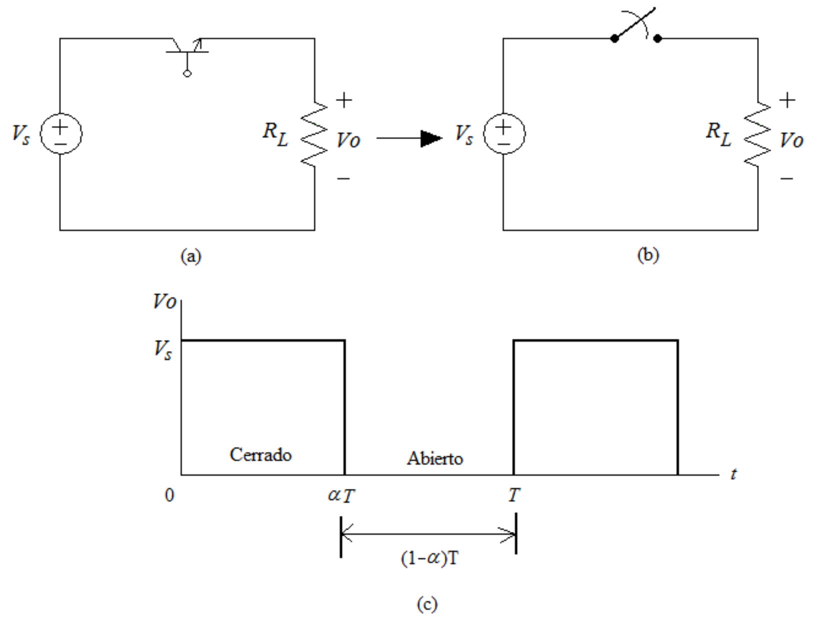

Figura 3.2. (a) Convertidor cd-cd básico conmutado. (b) Equivalente para conmutación. (c) Tensión de salida [5].

Siendo f la frecuencia de conmutación en hertz. En este circuito, la componente continua de salida será menor o igual a la entrada [5].

La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero. Cuando el interruptor está abierto, no pasa corriente por él; cuando el interruptor está cerrado, no cae tensión en el mismo. Por tanto, la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia de energía es del 100%. En un interruptor real se producirán pérdidas, porque la tensión del interruptor no será cero cuando conduzca y el interruptor deberá pasar por la región lineal al pasar de un estado a otro [5].

3.3.- Convertidor elevador

En la figura 3.3 se muestra el convertidor elevador. Éste es otro convertidor conmutado que funciona abriendo y cerrando periódicamente un interruptor electrónico. Se denomina convertidor elevador porque el voltaje de salida (Vo) es mayor que la de entrada [5].

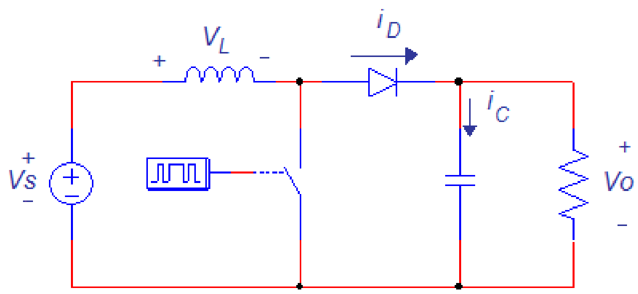

Figura 3.3.- Convertidor elevador

Cuando el interruptor está cerrado, el diodo está polarizado en inversa. La ley de Kirchhoff para los voltajes en la malla que incluye la fuente, el inductor (L) y el interruptor cerrado es

$$V_L = V_S = L\frac{di_L}{dt} \quad \text{o} \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{Vs}{L} \qquad (4)$$

El ritmo de variación de la corriente es una constante, por lo que la corriente aumenta linealmente cuando el interruptor está cerrado, como se muestra en la figura 3.4. La variación de corriente en el inductor se calcula utilizando

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{\alpha t} = \frac{Vs}{L} \qquad (5)$$

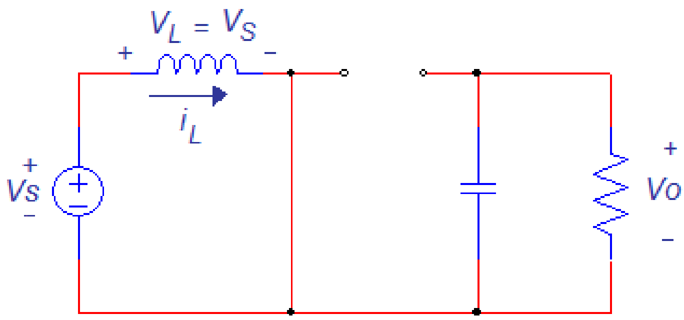

Figura 3.4. - Circuito equivalente con interruptor cerrado

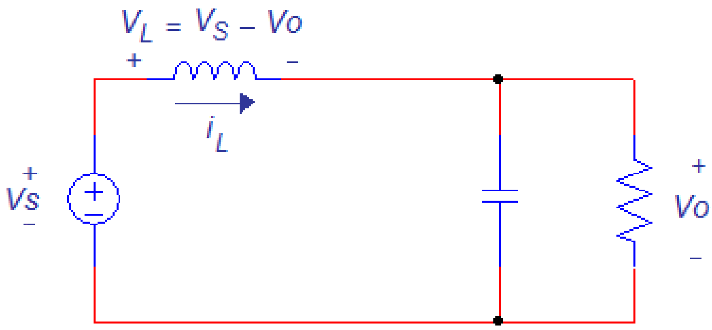

Figura 3.5 - Circuito equivalente con interruptor abierto

Despejando Δi_L cuando el interruptor está cerrado,

$$(\Delta i_L)_{cerrado} = \frac{Vs\alpha T}{L} \tag{6}$$

Cuando el interruptor está abierto, la corriente en el inductor no puede variar de forma instantánea, por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino a la corriente en el inductor. Suponiendo que la tensión de salida *Vo* es constante, la tensión en el inductor es

$$V_L = V_S - V_O = L\frac{di_L}{dt} \tag{7}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \tag{8}$$

El ritmo de variación de corriente en el inductor es una constante, por lo que la corriente debe variar linealmente cuando el interruptor esté abierto. La variación en la corriente en el inductor con el interruptor abierto es

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-\alpha)T} = \frac{V_S - V_O}{L} \tag{9}$$

Despejando Δi_L,

$$(\Delta i_L)_{abierto} = \frac{(V_S - V_O)(1-\alpha)T}{L} \tag{10}$$

En régimen permanente, la variación neta de la corriente en el inductor debe ser igual a cero. Utilizando las ecuaciones de $(\Delta i_L)_{cerrado}$ y $(\Delta i_L)_{abierto}$ obtenemos

$$(\Delta i_L)_{cerrado} + (\Delta i_L)_{abierto} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{V_S \alpha T}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1-\alpha)T}{L} = 0 \tag{12}$$

Despejando V_O,

$$V_S(\alpha + 1 - \alpha) - V_O(1-\alpha) = 0 \tag{13}$$

$$V_O = \frac{V_S}{1-\alpha} \tag{14}$$

La ecuación (14) muestra que, si el interruptor siempre está abierto y α es cero, la salida es igual a la entrada. Al aumentar el ciclo de trabajo la salida será mayor que la entrada.

Además, el voltaje en el inductor debe ser cero cuando el convertidor opere en régimen permanente. La expresión del voltaje medio en el inductor en un periodo de conmutación es

$$V_L = V_S\alpha + (V_S - V_O)(1-\alpha) = 0 \qquad (15)$$

Cuando el ciclo de trabajo del interruptor se aproxime a la unidad, la salida se hará infinita. Sin embargo, esto se basa en componentes ideales. Los componentes reales, que producen pérdidas, impedirán que la salida se haga infinita. En la figura 3.6 se muestran las formas de onda del voltaje y la corriente del convertidor elevador.

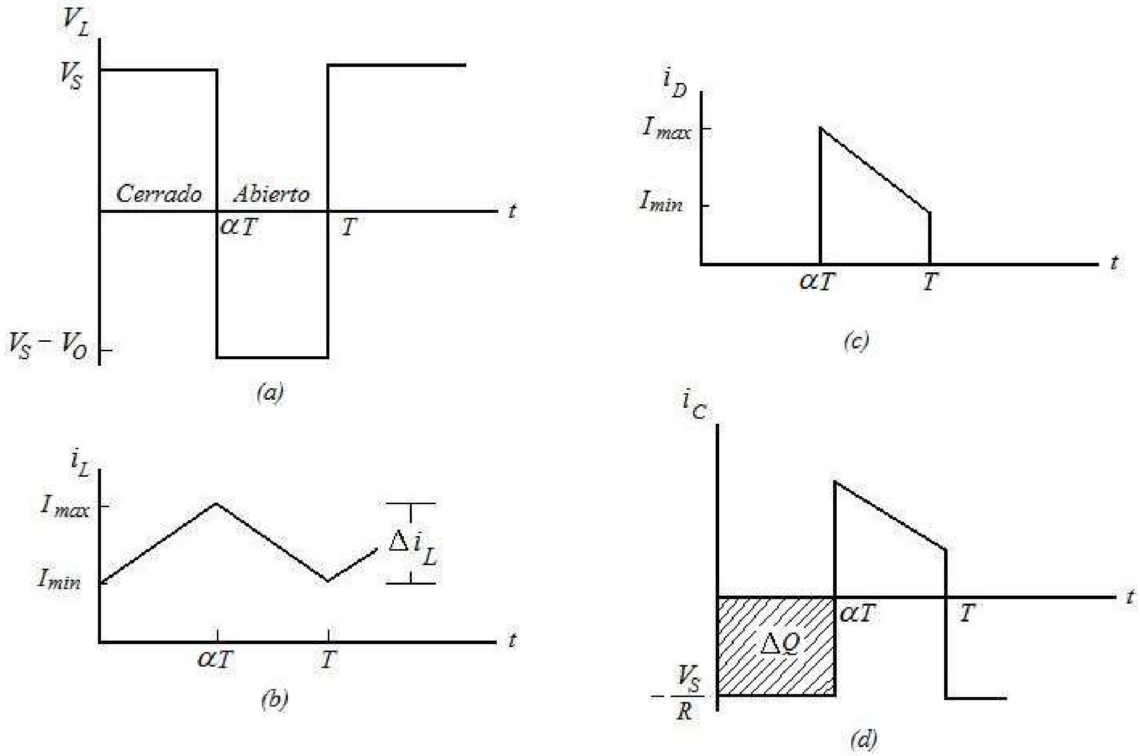

Figura 3.6.- Formas de onda del convertidor elevador. (a) Voltaje en el inductor. (b) Corriente en el inductor. (c) Corriente en el diodo. (d) Corriente en el capacitor [5].

La corriente media en el inductor se calculará teniendo en cuenta que la potencia entregada por la fuente debe ser igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga. La potencia de salida (P_O) es

$$P_O = \frac{V_O^2}{R} \tag{16}$$

y la potencia de entrada es $V_S I_S = V_S I_L$. Igualando la potencia de entrada y la potencia de salida y usando la ecuación de *Vo,*

$$V_S I_L = \frac{V_O^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_S}{1-\alpha}\right)^2}{R} = \frac{V_S^2}{(1-\alpha)^2 R} \tag{17}$$

O

$$I_L = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} \tag{18}$$

Las corrientes máximas y mínimas en el inductor se determinan utilizando el valor medio y la variación de corriente dada por la Ecuación (6)

$$I_{máx} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} + \frac{V_S \alpha T}{2L} \tag{19}$$

$$I_{mín} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} - \frac{V_S \alpha T}{2L} \tag{20}$$

La ecuación de *Vo* se ha desarrollado suponiendo que la corriente en el inductor era permanente y siempre positiva. Para que la corriente en el inductor sea permanente es necesario que I_{min} sea positiva. Por lo tanto, el límite entre las corrientes permanente y discontinua en el inductor se calcula utilizando

$$I_{mín} = 0 = \frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} - \frac{V_S \alpha T}{2L} \tag{21}$$

O

$$\frac{V_S}{(1-\alpha)^2 R} = \frac{V_S \alpha T}{2L} = \frac{V_S \alpha}{2Lf} \tag{22}$$

Por lo tanto, la combinación mínima de inductancia y frecuencia de conmutación para obtener corriente permanente en el convertidor elevador será

$$(Lf)_{mín} = \frac{\alpha(1-\alpha)^2 R}{2} \quad \text{O} \quad L_{mín} = \frac{\alpha(1-\alpha)^2 R}{2f} \tag{23}$$

Rizado del voltaje de salida

La ecuación anterior (23) se ha desarrollado suponiendo que el voltaje de salida era constante y, por tanto, que el valor del capacitor era infinito. En la práctica, una capacidad finita producirá una pequeña fluctuación o rizado en el voltaje de salida (Vo).

El rizado pico a pico del voltaje de salida puede calcularse a partir de la forma de onda de la corriente en capacitor. La variación de la carga del capacitor puede calcularse utilizando

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_O}{R}\right)\alpha T = C\Delta V_O \tag{24}$$

Por tanto, la expresión del rizado es

$$\Delta V_O = \frac{V_0 \alpha T}{RC} = \frac{V_O \alpha}{RCf} \tag{25}$$

O

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{\alpha}{RCf} \tag{26}$$

Siendo f la frecuencia de conmutación en hertz [5].

Los convertidores de cd se pueden usar como reguladores de modo de conmutación, para convertir un voltaje de cd, normalmente no regulado, en un voltaje de salida regulado de cd. La regulación se suele obtener con PWM (modulación de ancho de pulso) a determinada frecuencia, y el dispositivo de conmutación es, en el caso normal, un BJT, MOSFET o IGBT [15].

En este capítulo 3 se hablo sobre la topología del convertidor elevador. Este convertidor conmutado como su nombre lo dice, eleva el voltaje que le entra. En el siguiente capítulo se habla sobre los convertidores que transforman un voltaje de directa en un voltaje alterno. Este convertidor es muy importante para poder alimentar muchos de los aparatos electrodomésticos que se usan hoy en día.