

## 2.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO 2

Como ya se mencionó en la Sección 1.1 del capítulo anterior, existen 4 tipos de convertidores conmutados y se describen a continuación:

1.- Convertidores CA – CD. Producen una salida en directa a partir de una entrada alterna.

La potencia media se transfiere desde un generador de alterna a una carga de corriente continua. A estos convertidores también se les conoce como rectificadores. Por ejemplo, un convertidor CA – CD permite que los circuitos integrados operen a partir de un voltaje alterno de línea de 60Hz, convirtiendo la señal alterna en una señal directa del voltaje apropiado.

2.- Convertidores CD – CA. Se les denomina, específicamente, inversores. La potencia

media fluye desde el lado de la corriente directa hacia el lado de la corriente alterna. Entre los ejemplos de aplicación de los inversores se incluyen la generación de un voltaje de 120V eficaces (rms) a 60Hz a partir de una batería de 12V directos.

3.- Convertidores CD – CD. Resultan útiles cuando una carga requiere una corriente y un

voltaje directos específicos (normalmente regulados), pero el generador tiene un valor de continua diferente o no regulado. Por ejemplo, a partir de un generador de 12V y a través de un convertidor CD – CD pueden obtenerse 5V.

4.- Convertidores CA – CA. Pueden utilizarse para cambiar la amplitud y/o la frecuencia de

una señal alterna. Un ejemplo, entre otros, sería un simple atenuador para la iluminación doméstica y un control de velocidad para un motor de inducción.

Debido a las especificaciones de entrada y salida de este proyecto de tesis, es necesario realizar una conversión CD – CD para entregar una potencia en la carga de 50W.

Así que, de aquí en adelante se procederá a estudiar de manera más detallada el funcionamiento de dichos convertidores.

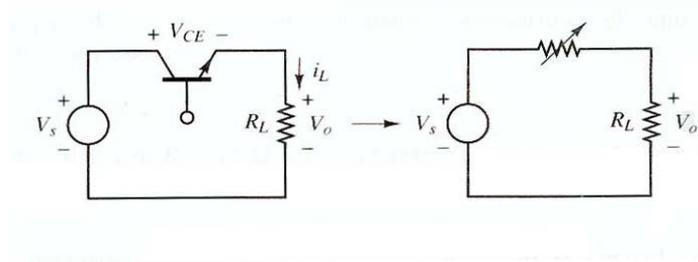
Para comenzar con el diseño del convertidor propuesto en este proyecto, es importante en primer lugar estudiar el funcionamiento de un convertidor reductor con conmutación dura, analizando sus características de voltaje y corriente, y sobre todo las pérdidas que se presentan en la conmutación del interruptor (Sección 2.6.2).

## 2.2 REGULADORES LINEALES DE VOLTAJE

Un método para convertir un voltaje directo a otro de valor más bajo es utilizar el sencillo circuito de la Figura 2.1. El voltaje de salida es:

$$V_0 = I_L R_L$$

donde la corriente de carga 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  $V_S$ . También, ajustando la corriente de base del transistor se pueden compensar las variaciones del voltaje de entrada o las variaciones de la carga y, así, regular la salida. A este circuito se le llama convertidor CD - CD lineal o regulador lineal de voltaje debido a que el transistor opera en la región lineal.



**Figura 2.1.** Regulador lineal básico [2]

Aunque esta es una manera muy sencilla de reducir el voltaje de entrada directo y regular la salida, la baja eficiencia de este circuito es una desventaja importante en las aplicaciones de potencia. La potencia absorbida por la carga es  $V_o I_L$  y la potencia absorbida por el transistor es  $V_{CE} I_L$ , suponiendo una corriente de base pequeña. La pérdida de potencia en el transistor es la causante de la baja eficiencia del circuito [4].

### 2.3 UN 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. A este circuito también se le conoce como troceador de continua (dc chopper).

Para ejemplificar a un convertidor conmutado se tiene el circuito de la Figura 2.2. Se supone que el circuito es ideal, entonces la salida es igual a la entrada cuando el interruptor está cerrado y cero cuando está abierto. La apertura y cierre periódicos del

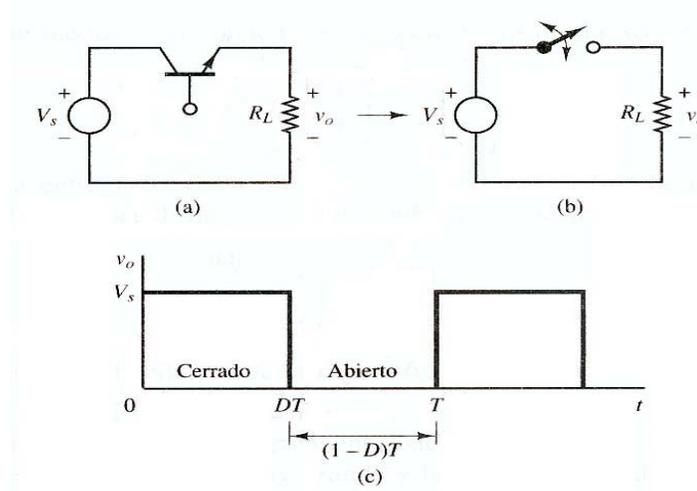
interruptor producen la salida de pulsos mostrada en la Figura 2.2c, la media o componente directa de la salida es:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (2.1)$$

La componente directa de la salida se controla ajustando el ciclo de trabajo  $D$ , que es la fracción del periodo en la que el interruptor está cerrado:

$$D \equiv \frac{t_{\text{conducción}}}{t_{\text{conducción}} + t_{\text{corte}}} = \frac{t_{\text{conducción}}}{T} = t_{\text{conducción}} f \quad (2.2)$$

siendo  $f$  la frecuencia de conmutación en Hertz.



**Figura 2.2.** (a) Convertidor CD-CD básico conmutado. (b) Equivalente para conmutación. (c) Voltaje de salida [2]

La potencia absorbida por el interruptor ideal es cero. Cuando el interruptor está abierto no pasa corriente por él; y cuando está cerrado, no hay caída de voltaje. Por tanto, la carga

absorbe toda la potencia y la eficiencia de energía es del 100%. Sin embargo, en un interruptor real se producen pérdidas debido a que el voltaje en el interruptor no será cero cuando conduzca y el interruptor deberá pasar por la región lineal al pasar de un estado a otro (ver Figura 2.6).

## 2.4 CONVERTIDOR REDUCTOR OPERANDO CON CONMUTACIÓN DURA [2]

En algunas aplicaciones puede ser suficiente controlar la componente de directa de una salida de pulsos, pero muchas veces el objetivo es producir una salida continua pura. Una manera de obtener una salida directa en el circuito de la Figura 2.2 es insertar un filtro pasa bajas después del interruptor. En la Figura 2.3 se muestra un filtro pasa bajas con un inductor y un capacitor (L-C) añadido al convertidor básico. El diodo proporciona un camino a la corriente del inductor cuando el interruptor se encuentra abierto y se polariza en inversa cuando el interruptor está cerrado. Este circuito se llama convertidor reductor, porque el voltaje de salida es menor que el de entrada.

### 2.4.1 Relaciones entre el voltaje y la corriente

Sí el filtro es ideal, el voltaje de salida es la media del voltaje de entrada del filtro. La entrada del filtro  $v_x$ , es  $V_S$  cuando el interruptor está cerrado y cero cuando está abierto, siempre que la corriente en el inductor sea positiva y el diodo conduzca. Si el interruptor se cierra de forma periódica con un ciclo de trabajo  $D$ , el voltaje medio en la entrada del filtro es  $V_S D$ .

Para el análisis, se supone que el diodo está activado siempre que el interruptor esté abierto, y que la corriente en el inductor es positiva. A una corriente en el inductor que es positiva en todo intervalo de conmutación se le denomina corriente permanente. Por el contrario, la corriente discontinua se caracteriza por que la corriente en el inductor pasa por cero en cada período.

Otra forma de analizar el comportamiento del convertidor reductor es examinando la corriente y el voltaje en el inductor. Este método de análisis será útil para diseñar el filtro.

A continuación se enumeran las propiedades del convertidor reductor cuando funciona en régimen permanente:

1. La corriente en el inductor es periódica:

$$I_L(t+T) = i_L(t)$$

2. El voltaje medio en el inductor es cero:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0$$

3. La corriente media en el capacitor es cero:

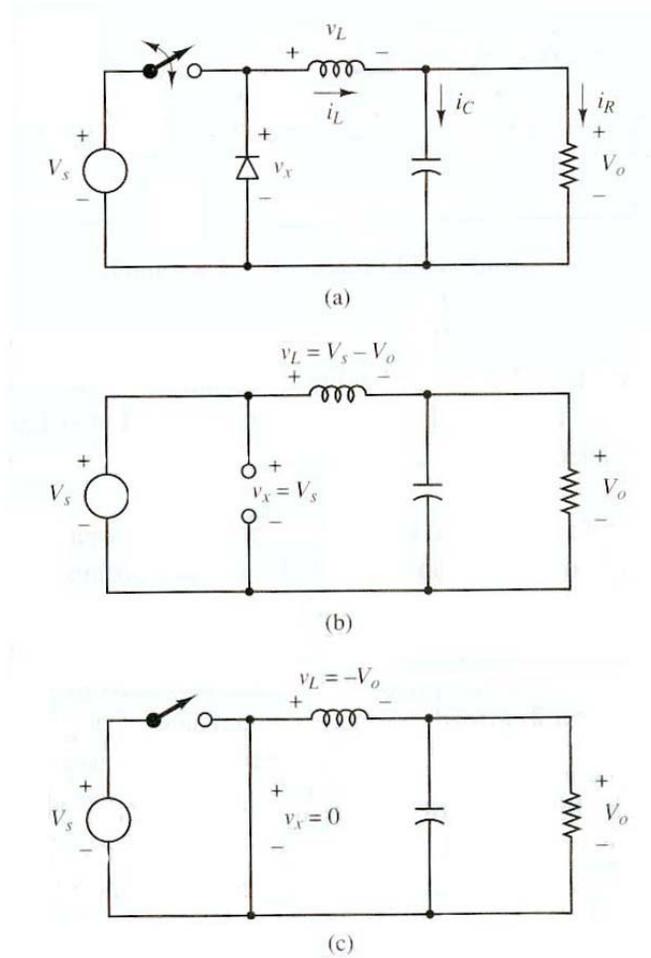
$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0$$

4. La potencia entregada por la fuente es igual a la suministrada por la carga.

Cuando los componentes no son ideales, la fuente también suministra las pérdidas:

$$P_S = P_o \quad (\text{ideal})$$

$$P_S = P_o + \text{pérdidas} \quad (\text{no ideal})$$



**Figura 2.3.** (a) Convertidor CD-CD reductor. (b) Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado. (c) Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto [2]

Para analizar el convertidor reductor, también se supone que:

1. El circuito opera en régimen permanente.
2. La corriente en el inductor es permanente (siempre positiva).
3. El valor del capacitor es muy grande y el voltaje de salida se mantiene constante a  $V_0$ .
4. El periodo de conmutación es  $T$ ; el interruptor estará cerrado en un tiempo  $DT$  y estará abierto el resto del tiempo,  $(1-D)T$ .
5. Los componentes son ideales.

#### 2.4.2 Análisis con el interruptor cerrado

El diodo se polariza en inversa y el circuito equivalente es el mostrado en la Figura 2.3b. El voltaje en el inductor es:

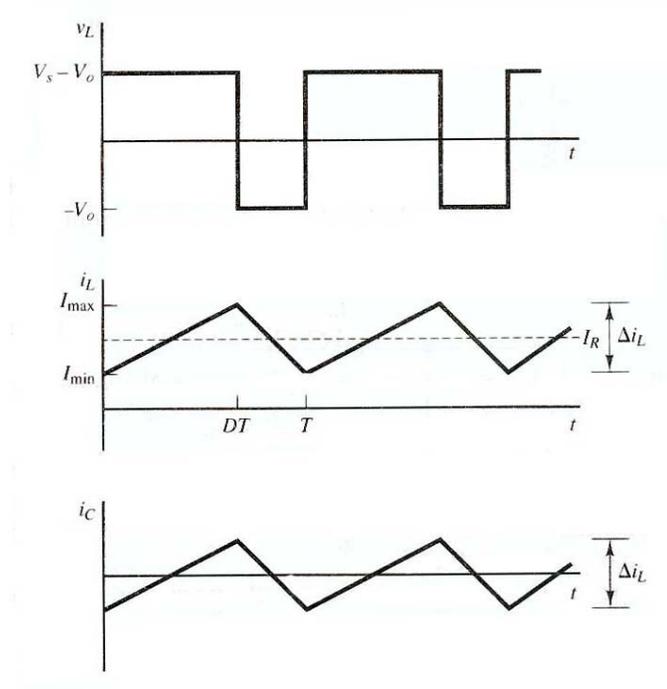
$$v_L = V_S - V_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_0}{L}$$

Como la derivada de la corriente es una constante positiva, la corriente aumenta linealmente como se muestra en la Figura 2.4b. La variación de corriente cuando el interruptor está cerrado se calcula modificando la ecuación anterior:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_0}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{cerrado}} = \left( \frac{V_S - V_0}{L} \right) DT$$



**Figura 2.4.** Formas de onda del convertidor reductor. (a) Voltaje en el inductor. (b) Corriente en el inductor. (c) Corriente en el capacitor [2]

### 2.4.3 Análisis con el interruptor abierto

El diodo se activa para dejar pasar la corriente del inductor y se aplica el circuito equivalente de la Figura 2.3c. El voltaje en el inductor es:

$$v_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_0}{L}$$

La derivada de la corriente en el inductor es una constante negativa, y la corriente disminuye linealmente como puede observarse en la Figura 2.4b. La variación de corriente en el inductor cuando el interruptor está abierto es:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_0}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{abierto} = -\left(\frac{V_0}{L}\right)(1-D)T$$

En la operación en régimen permanente es necesario que la corriente en el inductor sea la misma al final y al principio de cada ciclo de conmutación, por lo que la variación neta de  $i_L$  en un periodo será cero. Para ello se debe cumplir:

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

$$\left(\frac{V_s - V_0}{L}\right)DT - \left(\frac{V_0}{L}\right)(1-D)T = 0$$

Despejando  $V_0$ ,

$$V_0 = V_s D$$

(2.3)

que es el mismo resultado que el proporcionado por la Ecuación 2.1.

Una forma alternativa de calcular el voltaje de salida se basa en el voltaje del inductor como se muestra en la Figura 2.4a. Dado que el voltaje medio en el inductor es cero en régimen permanente,

$$V_L = (V_s - V_0)DT + (-V_0)(1-D)T = 0$$

Al despejar  $V_0$  en la ecuación anterior se obtiene el mismo resultado de la ecuación 2.3.

El voltaje de salida sólo depende de la entrada y del ciclo de trabajo  $D$ . Si el voltaje de entrada fluctúa, el voltaje de salida puede regularse ajustando el ciclo de trabajo adecuadamente. Se tiene que colocar un bucle de retroalimentación para muestrear el voltaje de salida, compararla con una referencia y configurar correctamente el ciclo de trabajo del conmutador.

La corriente media en el inductor debe ser igual a la corriente media en la resistencia de carga, porque la corriente media en el condensador debe ser nula cuando opera en régimen permanente:

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R}$$

Los valores máximo y mínimo de la corriente en el inductor se calculan de la siguiente manera:

$$I_{máx} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{L} (1-D)T \right] = V_0 \left[ \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

$$I_{mín} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{L} (1-D)T \right] = V_0 \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

siendo  $f = 1/T$  la frecuencia de conmutación en Hertz.

Para que todo el análisis anterior sea válido, es necesario verificar que existe corriente permanente en el inductor. Una forma sencilla de realizar esta comprobación es calcular la corriente mínima en el inductor. Como el valor mínimo de la corriente en el inductor debe ser positivo para tener una corriente permanente, no está permitido que el

mínimo calculado sea negativo, debido al diodo y dicha situación indicará que la corriente es discontinua. El circuito funcionará con corriente discontinua en el inductor pero se debe realizar otro análisis (Sección 2.7).

Para determinar la combinación de  $L$  y  $f$  que producirán una corriente permanente se toma como condición que  $I_{\min} = 0$ , este es el límite entre corriente permanente y corriente discontinua,

$$I_{\min} = 0 = V_0 \left[ \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right]$$

$$(Lf)_{\min} = \frac{(1-D)R}{2}$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f} \tag{2.4}$$

siendo  $L_{\min}$  la inductancia mínima necesaria para que exista corriente permanente en el circuito de la Figura 2.3a.

#### 2.4.4 Rizado del voltaje de salida

Para el análisis anterior se ha supuesto que el capacitor es muy grande para que el voltaje de salida fuese constante. En la práctica no será posible mantener perfectamente el voltaje de salida con una capacitancia finita. La variación periódica del voltaje de salida, o rizado, se calcula a partir de la relación entre el voltaje y la corriente en el capacitor. La corriente en el capacitor es:

$$i_C = i_L - i_R$$

dicha corriente se muestra en la Figura 2.5a.

El capacitor se cargará mientras la corriente en el mismo sea positiva. Aplicando la definición de capacidad,

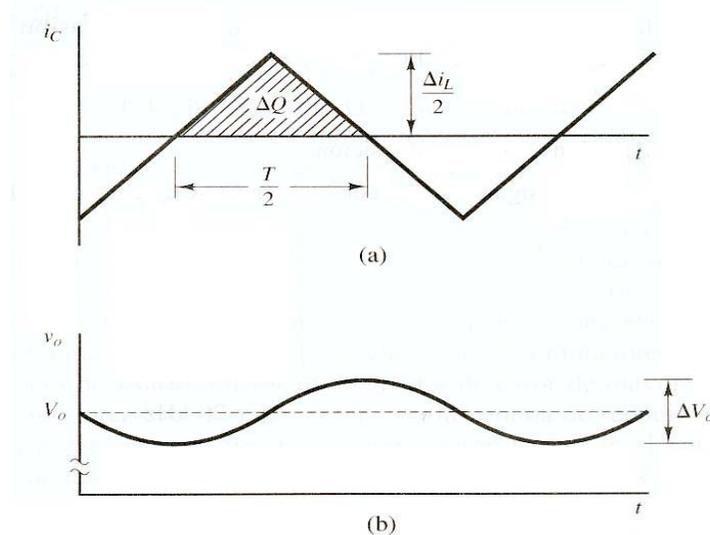
$$Q = CV_0$$

$$\Delta Q = C\Delta V_0$$

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C}$$

la variación de la carga,  $\Delta Q$ , es el área del triángulo situado por encima del eje de tiempo:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left( \frac{T}{2} \right) \left( \frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T\Delta i_L}{8}$$



**Figura 2.5.** Formas de onda del convertidor reductor. (a) Corriente en el capacitor. (b) Voltaje de rizado en el capacitor [2]

con lo que obtenemos

$$\Delta V_0 = \frac{T\Delta i_L}{8C}$$

En esta ecuación,  $\Delta V_0$  es el voltaje de rizado pico a pico en la salida, mostrada en la Figura 2.5b. También es útil expresar el rizado como una fracción del voltaje de salida:

$$\Delta V_0 = \frac{TV_0}{8CL}(1-D)T = \frac{V_0(1-D)}{8LCf^2}$$

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

si el rizado no es muy grande (inferior al 1% del voltaje de salida en directa), la suposición de que la salida es constante es razonable, y el análisis anterior será válido.

Dado que se supone a los componentes del convertidor ideales (en la Sección 2.6 se realiza un análisis con efectos no ideales), la potencia entregada por el generador debe ser igual a la potencia absorbida por la resistencia de carga:

$$P_S = P_0$$

$$V_S I_S = V_0 I_0$$

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{I_S}{I_0}$$

Se observa que la relación anterior es similar a la relación voltaje - corriente de un transformador en las aplicaciones de alterna. Por lo tanto, el circuito convertidor reductor de la Figura 2.3a es equivalente a un transformador de continua.

## 2.5 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los valores nominales del alambre del inductor deben poder tolerar la corriente eficaz, y el núcleo no deberá saturarse para la corriente de pico de la bobina. Debe seleccionarse un capacitor para limitar el rizado de la salida en función de las especificaciones de diseño, de manera que soporte el voltaje pico de salida y conduzca la corriente eficaz necesaria.

El interruptor y el diodo deben soportar el voltaje máximo cuando estén desactivados y la corriente máxima cuando estén activados. No deben superarse los valores nominales de temperatura, por lo que posiblemente será necesario utilizar un disipador de calor.

## 2.6 EFECTOS NO IDEALES EN EL FUNCIONAMIENTO DE UN CONVERTIDOR

### 2.6.1 Caídas de voltaje en los interruptores

Todos los cálculos anteriores se han realizado suponiendo que los interruptores eran ideales. Las caídas de voltaje en los transistores y diodos cuando están conduciendo pueden afectar significativamente el funcionamiento del convertidor, en especial cuando los voltajes de entrada y de salida son bajos. En el diseño de convertidores CD-CD hay que tener en cuenta los componentes no ideales. Se utilizará el convertidor reductor para mostrar los efectos de caídas de tensión en los conmutadores.

Basándonos de nuevo en el análisis del convertidor reductor de la Figura 2.3a, las relaciones de entrada - salida se han determinado utilizando el voltaje y la corriente del

inductor. Cuando se producen caídas de tensión distintas de cero en los interruptores en conducción, el voltaje en el inductor con el interruptor cerrado es

$$v_L = V_s - V_o - V_Q$$

siendo  $V_Q$  el voltaje del interruptor en conducción. Con el interruptor abierto, el voltaje en el diodo es  $V_D$  y el voltaje en el inductor es

$$v_L = -V_o - V_D$$

el voltaje medio en el inductor es nulo en el periodo de conmutación:

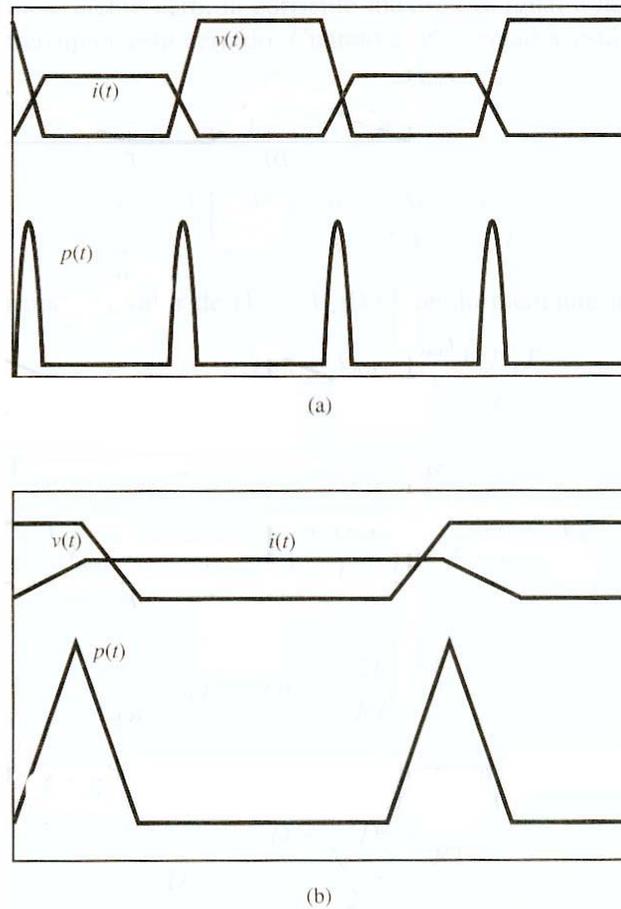
$$V_L = (V_s - V_o - V_Q)D + (-V_o - V_D)(1 - D) = 0$$

$$V_o = V_s D - V_Q D - V_D(1 - D)$$

(2.5)

### 2.6.2 Pérdidas por conmutación

Además de las caídas de voltaje y las pérdidas de potencia en conducción, se producen pérdidas adicionales en los interruptores cuando conmutan en los estados de conducción y corte. En la Figura 2.6a se ilustran las transiciones entre conducción y corte de los interruptores. En este caso, se supone que las variaciones de voltaje y de corriente no son lineales y que la secuencia en el tiempo es la mostrada en tal figura. En la Figura 2.6a se muestra la potencia instantánea disipada en el interruptor. En la Figura 2.6b se muestra otra posible transición entre conducción y corte de un interruptor. En este caso, las transiciones de voltaje y corriente no se producen simultáneamente. Esto se aproxima a los procesos de conmutación reales, y la pérdida de potencia provocada por la conmutación es mayor en este caso.



**Figura 2.6.** Voltaje, corriente y potencia instantánea del interruptor.  
(a) Transición simultánea de  $V$  e  $I$ . (b) Transición en peor caso [2]

La pérdida de energía en una transición del interruptor es el área situada bajo la curva de potencia. Dado que la potencia media es la energía dividida por el periodo, cuanto más altas son las frecuencias de conmutación, mayores son las pérdidas de conmutación y la eficiencia del convertidor ( $P_0/P_S$ ) se reduce debido a que una parte importante de la potencia de entrada es absorbida por el interruptor.

## 2.7 FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR CON CORRIENTE DISCONTINUA

En los análisis anteriores se ha supuesto que la corriente en el inductor era permanente. Cuando la corriente es permanente, la corriente en el inductor será positiva durante todo el periodo de conmutación. No es necesario que la corriente sea permanente para que funcione un convertidor, pero cuando la corriente es discontinua es necesario realizar un análisis diferente al de la Sección 2.4.

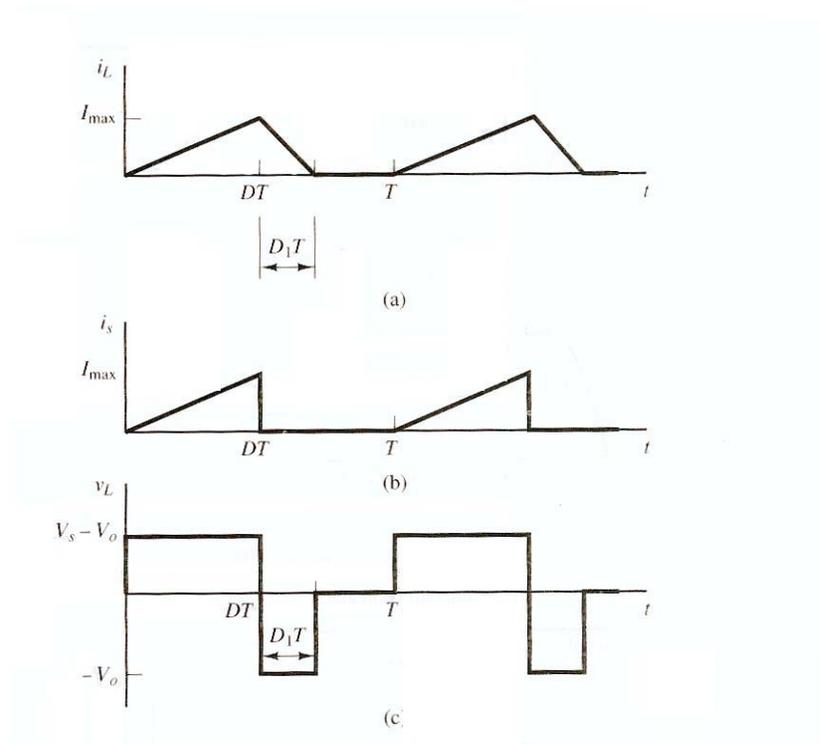
### 2.7.1 Convertidor reductor con corriente discontinua

En la Figura 2.7 se muestran la corriente en el inductor y la corriente de la fuente cuando el convertidor de la Figura 2.3a funciona con corriente discontinua. Se determinan las relaciones entre los voltajes de salida y de entrada teniendo en cuenta que el voltaje medio en el inductor es nulo en régimen permanente. A partir del voltaje en el inductor que se muestra en la Figura 2.7c,

$$(V_S - V_0)DT - V_0D_1T = 0$$

$$(V_S - V_0)D = V_0D_1$$

en donde  $D_1$  es el intervalo de tiempo en el cual el voltaje en el inductor es negativo.



**Figura 2.7.** Corriente discontinua en el convertidor reductor de la Figura 2.3a. (a) Corriente en el inductor. (b) Corriente de entrada. (c) Voltaje en el inductor [2]

Reordenando los términos, obtenemos la relación

$$\frac{V_0}{V_s} = \left( \frac{D}{D + D_1} \right)$$

La corriente media en el inductor es igual a la corriente media en la resistencia, ya que la corriente media en el capacitor es cero. Suponiendo que el voltaje de salida es constante,

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R}$$

Calculando la corriente media en el inductor usando la Figura 2.7a,

$$I_L = \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} I_{m\acute{a}x} DT + \frac{1}{2} I_{m\acute{a}x} D_1 T \right) = \frac{1}{2} I_{m\acute{a}x} (D + D_1)$$

con lo que tenemos

$$\frac{1}{2} I_{m\acute{a}x} (D + D_1) = \frac{V_0}{R}$$

Como la corriente es inicialmente cero, la corriente máxima es igual a la variación de corriente producida cuando el interruptor está cerrado. Cuando el interruptor está cerrado, el voltaje en el inductor es

$$v_L = V_S - V_0$$

con lo que se obtiene

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_0}{L} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{DT}$$

Despejando  $I_{m\acute{a}x}$  y utilizando el valor de  $(V_S - V_0)D$ ,

$$I_{m\acute{a}x} = \Delta i_L = \left( \frac{V_S - V_0}{L} \right) DT = \frac{V_0 D_1 T}{L}$$

Sustituyendo  $I_{m\acute{a}x}$ ,

$$\frac{1}{2} I_{m\acute{a}x} (D + D_1) = \frac{1}{2} \left( \frac{V_0 D_1 T}{L} \right) (D + D_1) = \frac{V_0}{R}$$

Con lo que se obtiene

$$D_1^2 + DD_1 - \frac{2L}{RT} = 0$$

Despejando  $D_1$ ,

$$D_1 = \frac{-D + \sqrt{\left(D^2 + \frac{8L}{RT}\right)}}{2}$$

Sustituyendo  $D_1$ ,

$$V_0 = V_s \left( \frac{D}{D + D_1} \right) = V_s \left( \frac{2D}{D + \sqrt{\left(D^2 + \frac{8L}{RT}\right)}} \right) \quad (2.6)$$

El límite entre la corriente permanente y la corriente discontinua se produce cuando

$D_1 = 1 - D$ . Recuerde que también se cumple otra condición en este límite,  $I_{min} = 0$  (ver página 23).

## 2.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Se ha observado que a pesar de que el convertidor reductor con conmutación dura presenta ciertas ventajas con respecto al regulador lineal de voltaje y al convertidor conmutado básico, existen pérdidas de potencia por conducción y por conmutación (ver Figura 2.6) que aumentan cuando mayor es la frecuencia de conmutación. Estas pérdidas afectan significativamente la eficiencia del convertidor, por lo que es necesario buscar la forma de atenuarlas para aumentar la eficiencia.