



Notas de Curso

Curso de Electrónica de Potencia

Convertidores de CD a CD en estado de conducción continua

José Castillo Hernández

10/04/2020

Institución Patrocinadora: ICAT

Financiamiento interno

Curso de Electrónica de Potencia: Convertidores de CD a CD en estado de conducción continua

José Castillo Hernández.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Circuito Exterior S/N,
C.P. 04510, A.P.70-186, Universidad Nacional Autónoma de México,
CDMX, México.

Resumen

La información que se ofrece en las siguientes notas, está encaminadas a estudiantes de Ingeniería Eléctrica Electrónica. El contenido del documento corresponde al análisis de convertidores CD-CD que forma parte del curso de Electrónica de potencia. Son tres las configuraciones básicas, en estado de conducción continua, las que se presentan en el documento y que corresponden con los convertidores Buck, Boost y Buck-Boost. Es importante mencionar que estos circuitos son el punto de partida para el desarrollo de convertidores más elaborados y se espera que estos conocimientos sean los mínimos que un estudiante de ingeniería debe tener sobre el tema de convertidores conmutados. En cada caso, se analiza el comportamiento del convertidor, procurando ofrecer la información detallada que permita calcular sus parámetros fundamentales, así como determinar el valor de los componentes asociados a cada configuración. Las notas se refuerzan con ejemplos en donde se aplican la información derivada de los análisis. Al final de las notas, se invita al lector para analizar un circuito más elaborado, explotando los procedimientos que se desarrollaron a lo largo de las notas. De igual forma, también se ofrecen algunos ejercicios que puede resolver y comprobar a través de simulaciones.

Nomenclatura

Símbolo	Significado
ΔI	<i>Rizo de corriente.</i>
ΔV	<i>Rizo de voltaje.</i>
ΔQ	<i>Incremento de carga</i>
C	<i>capacitor</i>
CD	<i>Corriente directa.</i>
D	<i>Ciclo de trabajo.</i>
D'	<i>Complemento de ciclo de trabajo que equivale a 1-D.</i>
f_s	<i>Frecuencia de conmutación.</i>
i_c	<i>Corriente instantánea del capacitor.</i>
I_c	<i>Corriente promedio del capacitor</i>
I_L	<i>Corriente promedio del inductor.</i>
I_{Lmax}	<i>Corriente máxima del inductor.</i>
I_{Lmin}	<i>Corriente mínima del inductor.</i>
L	<i>Inductor.</i>
P_D	<i>Potencia disipada</i>
P_{IN}	<i>Potencia de entrada</i>
P_O	<i>Potencia de salida</i>
PWM	<i>Modulación por ancho de pulso (del inglés Pulse Width Modulation).</i>
R	<i>Resistencia.</i>
T	<i>Periodo.</i>
t_{ON}	<i>Tiempo de encendido.</i>
V_{dc}	<i>Fuente de voltaje de CD.</i>
v_L	<i>Voltaje instantáneo del inductor.</i>
V_L	<i>Voltaje promedio del inductor.</i>
V_O	<i>Voltaje de salida</i>

Índice

Introducción	4
Convertidor de voltaje CD-CD	4
Convertidor CD-CD lineal	4
Convertidor de CD-CD conmutado elemental	5
Propiedades de Régimen Permanente	7
1. Convertidor reductor o Buck	8
1.1 Circuito Buck con interruptor cerrado	9
1.2 Circuito Buck con interruptor abierto	10
1.3 Voltaje de salida	10
1.4 Corriente del inductor	11
1.5 Rizo de corriente	12
1.6 Cálculo de la inductancia	14
1.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia	15
1.8 Ejemplo del convertidor Buck	17
2. Convertidor elevador o Boost	18
2.1 Circuito Boost con interruptor cerrado	19
2.2 Circuito Boost con interruptor abierto	20
2.3 Voltaje y corriente de salida	20
2.4 Corriente del inductor	21
2.5 Rizo de corriente	22
2.6 Cálculo de la inductancia	24
2.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia	25
2.8 Ejemplo del convertidor Boost	26
3. Convertidor inversor o Buck-Boost	27
3.1 Circuito Buck-Boost con interruptor cerrado	28
3.2 Circuito Buck-Boost con interruptor abierto	29
3.3 Voltaje y corriente de salida	29
3.4 Corriente del inductor	30
3.5 Rizo de corriente	31
3.6 Cálculo de la inductancia	33
3.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia	33
3.8 Ejemplo del convertidor Buck-Boost	34
4. Convertidor Ćuk	35
5. Ejercicios	36
Bibliografía	40

Introducción

A continuación, se presenta el análisis de las tres configuraciones básicas de convertidores conmutados que se estudian en el curso de electrónica de potencia en la Carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica en la facultad de Ingeniería de la UNAM. Estas notas ofrecen un punto de partida en el estudio de convertidores de corriente directa a corriente directa (CD-CD), en el régimen de estado permanente y conducción continua. Se espera que, con esta información los estudiantes sean capaces de diseñar reguladores conmutados en sus variantes de reductor, elevador e inversor. Esto involucra la obtención de los parámetros de diseño como son el voltaje de salida, la corriente de salida, el rizo de voltaje y el rizo de corriente, así como el cálculo del filtro LC. Las notas ofrecen la información de forma condensada, por lo que un estudio más profundo en libros especializados siempre es recomendable. La información que se ofrece en las notas se obtuvo de (Erickson, 2004), (Hart, 2001) y (Franco, 2015). El documento empieza con la definición de un convertidor de corriente directa en sus versiones lineal y conmutada, continúa con el convertidor elemental y establece las propiedades de régimen permanente en la que se basan estas notas. Se da el análisis del convertidor reductor o Buck, el convertidor elevador o Boost y se concluye con inversor o Buck-Boost. En cada caso se proponen ejercicios de diseño y análisis al final del documento.

Convertidor de voltaje CD-CD

Es un circuito electrónico que transforma un nivel de voltaje en otro. Se dice de corriente directa, debido a que la corriente que aporta el convertidor no cambia de polaridad, es decir no tiene cruces por cero. En este tipo de convertidores, tanto la entrada como la salida pueden o no ser regulados. Los convertidores CD-CD se pueden dividir en lineales y conmutados.

Convertidor CD-CD lineal

Una estrategia para transformar un nivel de voltaje de corriente continua en otro del mismo tipo es a través de un transistor TBJ trabajando en la región lineal. Este circuito controla el flujo de corriente de su terminal de emisor a partir de su corriente

de base. En la figura 1 se presenta el circuito elemental de un regulador de voltaje que corresponde con un convertidor lineal, donde el voltaje de salida V_o se puede calcular como el producto de la corriente de salida por la resistencia de carga, ver ecuación (1).

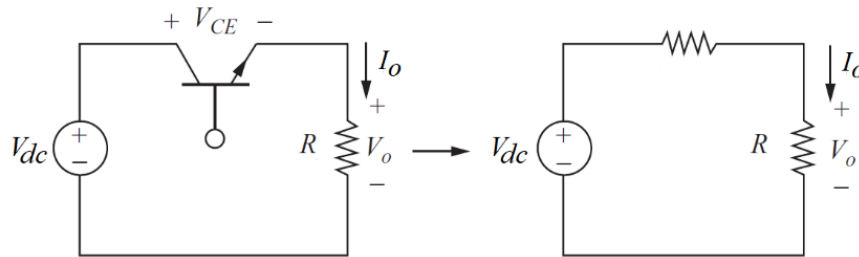


Figura 1. Circuito Elemental de un Convertidor CD-CD lineal.

$$V_o = I_o R \quad (1)$$

En este circuito, el transistor trabaja de forma similar que una resistencia. Si la potencia que demanda la carga es del 25% de la que aporta la fuente V_{dc} , entonces el transistor consume el 75% restante, debido a que la corriente que fluye de la fuente es en esencia I_o y por tanto el convertidor es poco eficiente.

Convertidor de CD-CD conmutado elemental

Los convertidores de CD-CD conmutados son circuitos electrónicos que ofrecen una mayor eficiencia en comparación que su contraparte lineal. Si el transistor de la figura 1 trabaja ahora en las zonas de corte y saturación, se puede considerar que, el transistor de forma ideal se comporta como un interruptor, con sus estados de corte y conducción, ver figura 2.

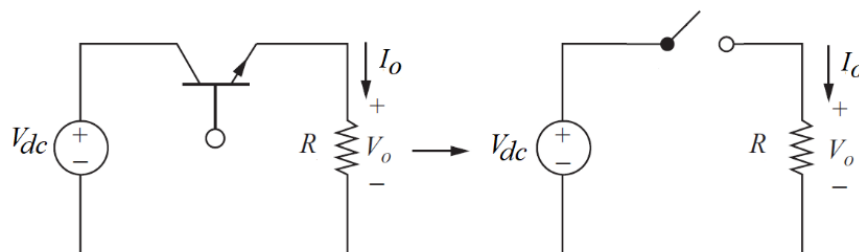


Figura 2. Circuito Elemental de un Convertidor CD-CD conmutado.

En este circuito, el voltaje $V_o(t)$ sobre la carga R es igual a V_{dc} cuando el interruptor está en conducción y 0 V cuando se mantiene apagado. Si se considera una señal de activación, con un periodo T , que mantenga en conducción el interruptor parte del tiempo y otra parte lo mantenga en corte, en la salida del circuito se producirá un tren de pulsos como se indica en la figura 3.

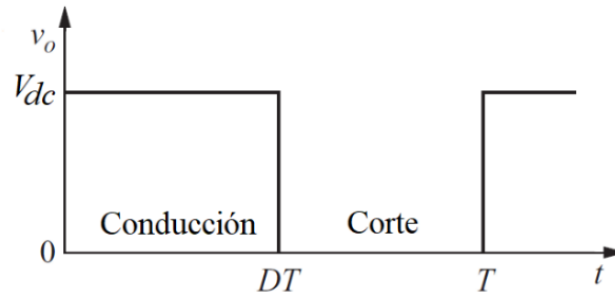


Figura 3. Voltaje de salida de convertidor conmutado elemental.

En esta gráfica, el voltaje promedio de la salida en un periodo se calcula según la ecuación (2).

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_{dc} dt = D V_{dc} \quad (2)$$

En la ecuación anterior, la variable D se denomina *Ciclo de Trabajo*. El ciclo de trabajo se calcula como la relación entre el tiempo de conducción t_{ON} y el periodo de tiempo T , ecuación (3).

$$D = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3)$$

Reflexión.

1. Cuando el interruptor conduce el voltaje entre sus terminales es cero y cuando está en corte no circula corriente a través de él. En ambos casos la potencia que se disipa es cero.

2. Con base en el punto anterior, en teoría toda la potencia se disipa sobre la carga y por tanto el convertidor conmutado tiene una eficiencia teórica del 100%.
3. En un caso real se tienen pérdidas por conducción porque la resistencia de un interruptor electrónico no es cero. En un contexto similar, la conmutación de cualquier dispositivo electrónico trabajando como interruptor no es instantánea y durante el paso de corte a conducción y viceversa, se generan pérdidas que se denominan pérdidas de conmutación.
4. En la ecuación (2) el valor promedio del voltaje sobre la carga R se ajusta a través del ciclo de trabajo D .
5. El valor promedio del voltaje en la salida será menor o igual al de la entrada; sin embargo, el voltaje de salida es un tren de pulsos y no un valor constante.
6. Hay aplicaciones en donde generar un tren de pulsos con algún valor promedio es suficiente como el caso de los motores eléctricos; sin embargo, en otras se requiere obtener como salida un valor constante. Para lograr esto se requiere agregar algún tipo de filtrado. El uso de un filtro inductor-capacitor o LC es común.

Propiedades de Régimen Permanente

Para analizar un convertidor conmutado y calcular el valor de sus componentes, es importante establecer las propiedades del circuito en un estado de régimen permanente. El siguiente conjunto de condiciones se consideran validas, cuando trabaja en régimen permanente, en los convertidores conmutados CD-CD que incluyen algún filtro de salida LC.

1. Si la corriente que circula a través de un inductor es periódica, su voltaje promedio es cero

$$V_L = 0 \quad (4)$$

2. Si el voltaje que se aplica entre las terminales de un capacitor es periódico, su corriente promedio es cero.

$$I_C = 0 \quad (5)$$

3. En un caso ideal, la potencia que demanda la carga es la misma que entrega la fuente de entrada. En un caso contrario, la fuente también suministra la potencia de pérdida.

$$P_O = P_{IN} \quad (ideal) \quad (6)$$

$$P_O = P_{IN} - P_D \quad (no\ ideal) \quad (7)$$

1. Convertidor reductor o Buck

Este circuito transforma un voltaje de entrada de corriente continua en otro de menor valor. El circuito está formado por un interruptor, un filtro LC y un diodo, ver figura 4. Cuando el interruptor en este circuito conduce, el diodo se mantiene apagado y la corriente fluye a través del inductor; en contraparte, cuando el interruptor se abre, el diodo se enciende y ofrece una ruta para que la corriente almacenada en el inductor siga fluyendo, siempre y cuando su valor sea mayor que cero. A partir de esto, el voltaje que se aplica al filtro LC es un tren de pulsos y el filtro permite extraer el valor promedio del convertidor elemental (figura 2), que como ya se dijo es igual al expuesto en la ecuación (2).

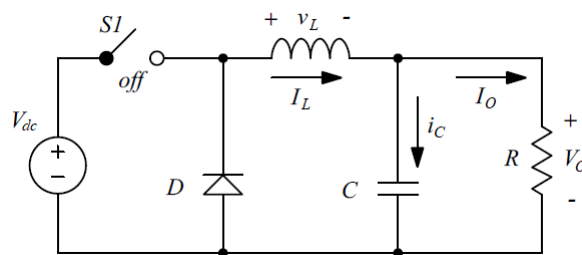


Figura 4. Convertidor Buck.

Para analizar este convertidor nos concentraremos en la corriente y voltaje del inductor, así como la corriente en el capacitor. Bajo este contexto se consideran los siguientes puntos:

1. El convertidor se encuentra en régimen permanente.
2. Todos los componentes del convertidor son ideales.
3. La corriente en el inductor se mantiene continua.
4. Los voltajes de entrada y salida se mantienen constantes.
5. La frecuencia de conmutación f_s y por tanto el periodo T se mantiene constante, de tal forma que el interruptor se mantiene cerrado durante el tiempo DT y abierto durante el tiempo $D'T$ donde $D' = 1-D$

Recuerde que D toma valores en el continuo de 0 a 1, por ejemplo: 0.1, 0.2, 0.999, etc. A partir de esto, el análisis de circuito se puede dividir en dos partes; en la primera se considera que el interruptor se mantiene cerrado y en la segunda el interruptor se mantiene abierto.

1.1 Circuito Buck con interruptor cerrado

En la figura 5 se muestra el convertidor cuando el interruptor permanece cerrado; esto ocurre durante el tiempo DT . En el circuito el diodo permanece en inversa.

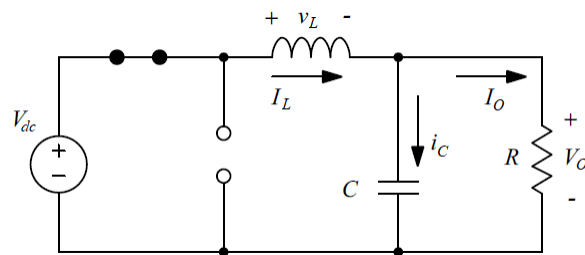


Figura 5. Circuito Buck en régimen permanente con el interruptor cerrado.

A partir del circuito, se puede plantear la ecuación de voltaje del inductor y la ecuación de la corriente del capacitor, ver ecuaciones (8) y (9). Recuerde que estas ecuaciones son válidas sólo cuando el interruptor está cerrado.

$$v_L = V_{dc} - V_0 \quad (8)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_0}{R} \quad (9)$$

1.2 Circuito Buck con interruptor abierto

Durante el tiempo $(1-D)T$ o $D'T$, el interruptor en un convertidor Buck se mantiene abierto y el diodo se polariza en activa directa, ofreciendo de esta forma una ruta para que fluya la corriente almacenada en el inductor, ver figura 6. Consideramos apropiado mencionar que, en el análisis de convertidores conmutados, como punto de partida se recomienda plantear siempre las ecuaciones del voltaje del inductor y de la corriente del capacitor, cuando el interruptor se encuentra abierto y cuando se mantiene cerrado.

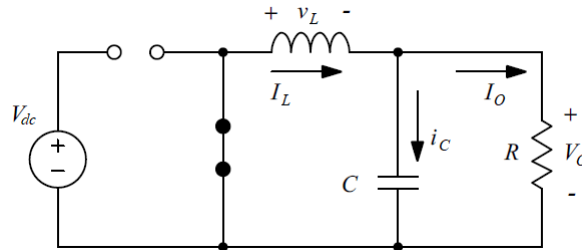


Figura 6. Circuito Buck en régimen permanente con el interruptor abierto.

$$v_L = -V_o \quad (10)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_o}{R} \quad (11)$$

1.3 Voltaje de salida

La grafica del voltaje del inductor, considerando las ecuaciones (8) y (10) se presentan en la figura 7

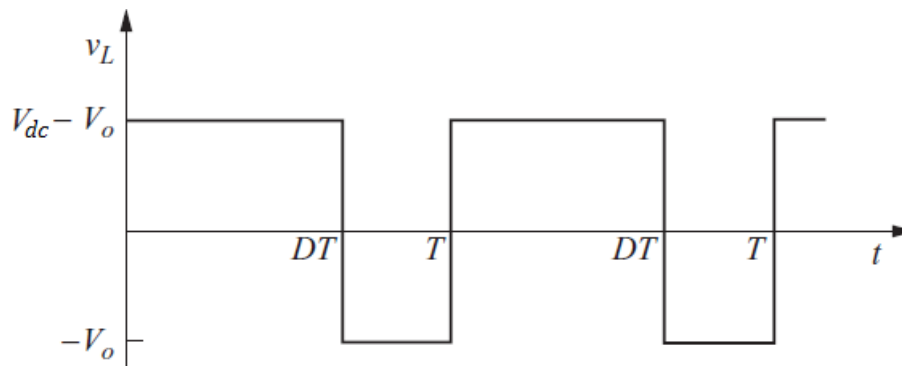


Figura 7. Voltaje del inductor en un convertidor Buck

Con base en esta gráfica, el voltaje promedio del inductor se puede expresar como:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0 \quad (12)$$

La igualación a cero se debe a la primera propiedad de régimen permanente, ver ecuación (4). Por tanto, la integral se plantea según las ecuaciones (13) y (14).

$$0 = \frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} (V_{dc} - V_0) dt + \int_{DT}^T -V_0 dt \right] \quad (13)$$

$$0 = \frac{1}{T} [(V_{dc} - V_0)DT - V_0(T - DT)] = (V_{dc} - V_0)D - V_0D' \quad (14)$$

Si se considera que $D+D'=1$, entonces el voltaje de salida del convertidor a partir de la expresión (14) se calcula como lo indica la ecuación (15).

$$V_0 = DV_{dc} \quad (15)$$

Es importante resaltar que, en el procedimiento anterior la integral se puede evitar si se observa que el periodo T al final se cancela y, por tanto, para calcular el promedio sólo es necesario multiplicar cada parte de la ecuación por su valor D o D' , según corresponda para después despejar la variable de interés. Este procedimiento directo se aplicará para el cálculo de la corriente del inductor.

1.4 Corriente del inductor

Tomando en cuenta las ecuaciones (9) y (11), la curva de la corriente del capacitor se puede graficar como se indica en la figura 8. A partir de la segunda propiedad de régimen permanente, ver ecuación (5), la corriente del capacitor se puede plantear según la expresión (16).

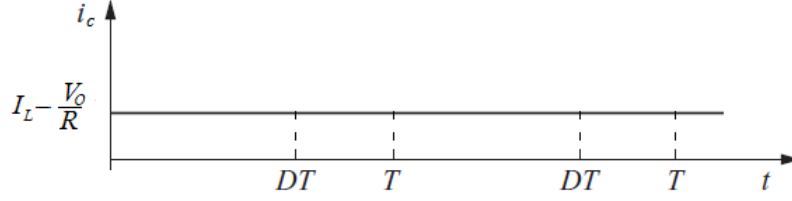


Figura 8. Corriente del capacitor en un convertidor Buck

$$I_c = \frac{1}{T} \int_0^T i_c dt = 0 \quad (16)$$

Por tanto, la curva $I_L - V_0/R$ en la gráfica debe estar ubicada en cero. Tomando en cuenta lo expuesto en el apartado anterior, el valor promedio se puede calcular de forma directa como:

$$\left(I_L - \frac{V_0}{R}\right)D + \left(I_L - \frac{V_0}{R}\right)D' = 0 \quad (17)$$

De esta expresión se puede despejar la corriente del inductor como se indica en la ecuación (18).

$$I_L = \frac{V_0}{R} \quad (18)$$

Por último, en este caso se observa que la corriente del inductor es la misma que la corriente de salida.

1.5 Rizo de corriente

Las gráficas de voltaje y corriente en el inductor se presentan en la figura 9. Se recuerda que el sistema está en régimen permanente, por tanto, la frecuencia, el voltaje de entrada, así como el voltaje de salida son considerados constantes. En la gráfica se observa que la corriente está compuesta por el valor promedio I_L el rizo Δi_L . La curva de la corriente se obtiene a partir de la definición del voltaje del inductor. Nuevamente se deben analizar dos casos.

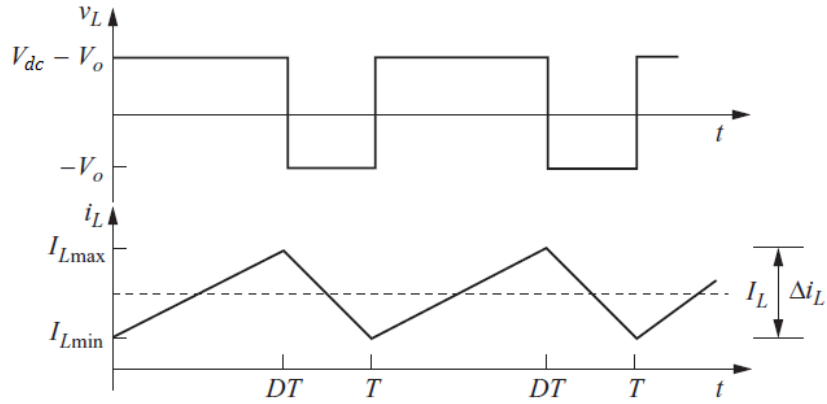


Figura 9. Gráficas del voltaje y corriente del inductor en un convertidor Buck.

Cuando el interruptor está cerrado, el voltaje del inductor se puede expresar como lo indica la ecuación (19)

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{dc} - V_o \quad (19)$$

Debido a que V_{dc} y V_o son constantes, la derivada de la corriente corresponde con la pendiente de una rampa y, por tanto, las diferenciales $di_L(t)$ y dt se pueden sustituir respectivamente por los incrementos Δi_L^+ y DT , de tal forma que Δi_L^+ se puede calcular a partir de la ecuación (20), en donde el signo + indica que se trata de una pendiente positiva.

$$\Delta i_L^+ = \left(\frac{V_{dc} - V_o}{L} \right) DT_s \quad (20)$$

Por otra parte, cuando el interruptor está abierto, voltaje del inductor se puede expresar como lo indica la ecuación (21).

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o \quad (21)$$

Como V_o continúa siendo constante, entonces la derivada de la corriente también se mantiene constante y las diferenciales se sustituyen por los incrementos Δi_L y $(1-D)T$, de tal forma que Δi_L se puede calcular a partir de la ecuación (22).

$$\Delta i_L^- = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T_s \quad (22)$$

Cabe mencionar que Δi_L^+ y Δi_L^- en valor absoluto son iguales, y su signo sólo indican el sentido de su pendiente, por tanto, la corriente mínima y máxima que experimenta el inductor se puede calcular a partir de las expresiones (23) y (24)

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (23)$$

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (24)$$

1.6 Cálculo de la inductancia

Siempre y cuando el convertidor funcione en modo continuo, es decir, la corriente fluya sin interrupción en un sólo sentido, la inductancia se puede calcular a partir de las ecuaciones (20) y (22). Para esto, se puede fijar el rizo de corriente como un porcentaje de la corriente promedio I_L ; no hay regla para esto, sin embargo, es usual encontrar aplicaciones que consideran de un 10 a un 25 %. Las ecuaciones (25) y (26) son equivalentes y permiten calcular la inductancia. El valor del inductor es una figura de mérito en un caso real; el inductor tiene asociadas pérdidas que dependen de su devanado y su núcleo. Los inductores de menor valor son más fáciles de construir y generalmente son más eficientes.

$$L = \left(\frac{V_{ac} - V_o}{\Delta i_L}\right)DT \quad (25)$$

$$L = \left(\frac{V_o}{\Delta i_L}\right)(1-D)T \quad (26)$$

Se puede calcular la inductancia mínima que cumpla con el modo de conducción continua. El límite de conducción continua ocurre cuando la corriente del inductor es cero, por tanto, de la ecuación (23) $\Delta i_L = 2I_L$ y sustituyendo en (26), la inductancia mínima se puede calcular como se indica a continuación

$$L_{min} = \frac{(1 - D)V_O}{2I_O} T \quad (27)$$

1.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia

Durante el análisis del convertidor Buck, se consideró que el voltaje de salida era constante, lo que implicó un capacitor de salida de valor infinito. En la realidad esto no es posible, la capacitancia es finita y el voltaje de salida tiene cierta fluctuación que se denomina rizo de voltaje ΔV_O alrededor de un valor promedio. Las curvas de corriente y voltaje del capacitor se presentan en la figura 10.

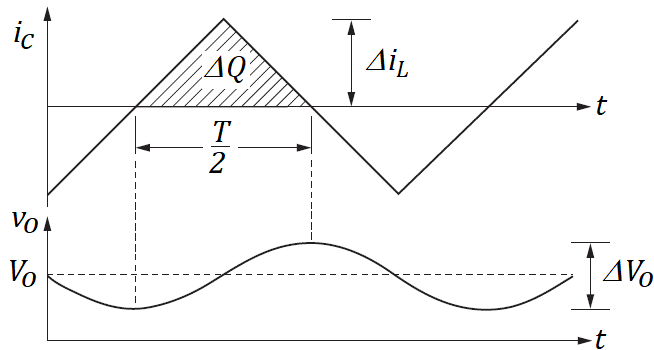


Figura 10. Gráficas del voltaje y corriente del capacitor en un convertidor Buck.

El análisis parte de las corrientes que están asociadas con el capacitor, ver figura 11. La corriente $i_L(t)$, está compuesta del valor promedio I_L más el rizo de corriente Δi_L . Una señal de CD no puede fluir a través del capacitor, por tanto, la salida I_O es igual a I_L y, la corriente que fluye por el capacitor es igual al rizo de corriente del inductor. Aplicando la definición de carga en un capacitor, la diferencia del voltaje de salida como función de un incremento de carga se puede expresar según la ecuación (28).

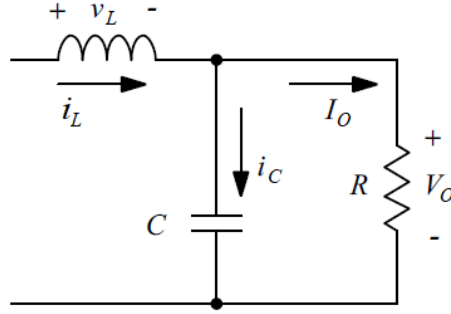


Figura 11. Corrientes involucradas en el capacitor en un convertidor Buck.

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (28)$$

Por otra parte, con base en la figura 10, la carga se puede calcular de la integral de la corriente que corresponde con el área bajo la curva, ver ecuación 29.

$$\Delta Q = \frac{\Delta i_L T}{8} \quad (29)$$

Por último, sustituyendo la ecuación (29) en (28) el rizo de voltaje se puede expresar como se indica a continuación:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta i_L T}{8C} \quad (30)$$

Si el rizo es moderado, la suposición de un voltaje de salida constante es razonable. Un rizo de voltaje menor de 200 mV en muchas aplicaciones se considera más que adecuado. La ecuación (30), también nos permite calcular la capacitancia en función del rizo de corriente del inductor, del rizo de voltaje en el capacitor y del periodo de conmutación, ver ecuación (31).

$$C = \frac{\Delta i_L T}{8\Delta V_o} \quad (31)$$

1.8 Ejemplo del convertidor Buck

Un convertidor Buck tiene una entrada de 50 V y una salida de 20 V. La frecuencia de conmutación es de 100 kHz y la potencia de salida a una resistencia de carga es de 200 W. (a) Determine el ciclo de trabajo. (b) Determine el valor del inductor para limitar la corriente máxima a 12 A. (c) Determine el valor de capacitor rizo de voltaje del 1.0 por ciento.

Datos:

$V_{dc} = 50 \text{ V}$, $V_o = 20 \text{ V}$, $f_s = 100 \text{ kHz}$, $\% \Delta V_o = 1 \%$, $P_o = 200 \text{ W}$, $I_{Lmax} = 12 \text{ A}$.

Procedimiento:

El ciclo de trabajo se calcula a partir de (15).

$$D = \frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{20 \text{ V}}{50 \text{ V}} = 0.4$$

Para calcular la inductancia, primero se debe calcular la corriente promedio del inductor y después el rizo de corriente:

$$I_L = I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{200 \text{ W}}{20 \text{ V}} = 10 \text{ A}$$

De (24) se despeja el rizo de corriente:

$$\Delta i_L = 2(I_{Lmax} - I_L) = 2(12 \text{ A} - 10 \text{ A}) = 4 \text{ A}$$

Con este dato, a partir de (25) se calcula la inductancia:

$$L = \left(\frac{V_{dc} - V_o}{\Delta i_L} \right) DT = \left(\frac{50 \text{ V} - 20 \text{ V}}{4 \text{ A}} \right) \left(\frac{0.6}{100 \text{ kHz}} \right) = 45 \mu\text{H}$$

Por otra parte, para calcular la capacitancia se tiene que:

$$\Delta V_o = 0.01V_o = 200 \text{ mV}$$

Con base en este valor y la ecuación (31), la capacitancia se calcula como:

$$C = \frac{\Delta i_L}{8\Delta V_o f_s} = \frac{4 \text{ A}}{8 \cdot 200 \text{ mV} \cdot 100 \text{ kHz}} = 25 \mu\text{F}$$

2. Convertidor elevador o Boost

El procedimiento planteado para el convertidor Buck es similar al que se debe aplicar en las configuraciones Boost y Buck-Boost, salvo algunas diferencias que se harán patentes en su momento. A final de cuentas, esto era de esperarse pues los tres tipos de convertidor están formados por el mismo conjunto de elementos, aunque dispuestos en forma diferente.

El circuito Boost tiene la característica de convertir el voltaje de entrada en otro de mayor valor a su salida. El voltaje que se produce es también de corriente directa. El circuito básico se presenta en la figura 12.

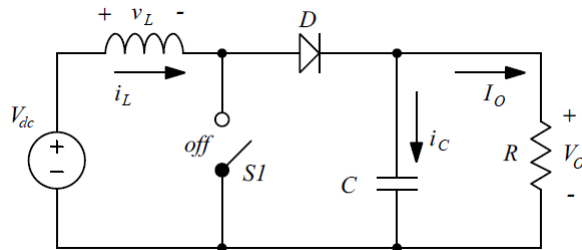


Figura 12. Circuito Boost.

Al igual que un convertidor Buck, el control del interruptor se realiza con base en un tren de pulsos, tal que el interruptor permanece cerrado cuando el pulso se mantiene activo y se abre cuando el pulso se apaga. Durante el tiempo que el interruptor se activa, el diodo entra en su estado de inversa y la corriente fluye a través del inductor. Por otra parte, en el intervalo que el interruptor se abre, la dinámica del sistema enciende el diodo, siempre y cuando la corriente que circula a través del

inductor sea mayor que cero. De esta forma, el inductor almacena la corriente que establece un valor promedio en la salida. Es importante enfatizar que, en el inductor, alrededor de esta corriente, se produce una componente de CA que se denomina rizo de corriente. El capacitor por su parte filtra el voltaje que produce el juego interruptor-diodo y extrae el voltaje promedio en la salida. Al igual que la corriente del inductor, el voltaje de salida presenta un rizo. Las siguientes condiciones se toman en cuenta para su análisis.

1. El convertidor se encuentra en régimen permanente.
2. Todos los componentes del convertidor son ideales.
3. La corriente en el inductor se mantiene continua.
4. Los voltajes de entrada y salida se mantienen constantes.
5. La frecuencia de conmutación f_s y por tanto el periodo T se mantiene constante, de tal forma que el interruptor se mantiene cerrado durante el tiempo DT y abierto durante el tiempo $D'T$ donde $D'=(1-D)$.

A continuación, se analiza el voltaje del inductor y la corriente del capacitor para los dos estados del interruptor.

2.1 Circuito Boost con interruptor cerrado.

Cuando el interruptor está cerrado, el inductor queda en paralelo con la fuente V_{dc} y a partir de esto se puede calcular su voltaje. Además de esto, el diodo está abierto y del circuito capacitor-resistencia se puede establecer una ecuación de la corriente del capacitor, ver figura 13.

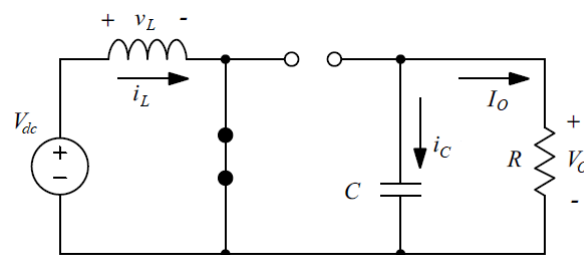


Figura 13. Circuito Boost en régimen permanente con el interruptor cerrado.

Tomando esto en cuenta, el voltaje del inductor y la corriente del capacitor cuando el interruptor está cerrado se pueden expresar con las ecuaciones (32) y (33)

$$v_L = V_{dc} \quad (32)$$

$$i_C = -\frac{V_0}{R} \quad (33)$$

2.2 Circuito Boost con interruptor abierto.

Cuando el interruptor se abre, la corriente del inductor no puede detener su flujo de manera instantánea. Esto permite que el diodo conduzca, como se muestra en la figura 14.

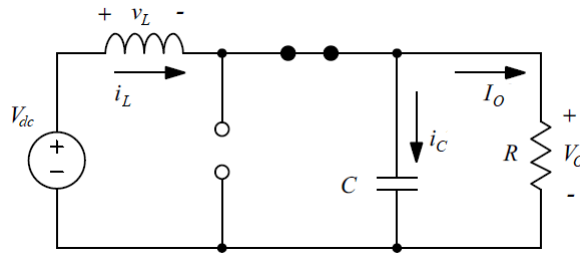


Figura 14. Circuito Boost en régimen permanente con el interruptor abierto.

Con base en este circuito, el voltaje del inductor y la corriente del capacitor se pueden expresar con las ecuaciones (34) y (35) como se indica a continuación.

$$v_L = V_{dc} - V_0 \quad (34)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_0}{R} \quad (35)$$

2.3 Voltaje y corriente de salida

Para obtener el voltaje de salida del convertidor, nos apoyaremos en la figura 15 que presenta la curva de voltaje instantáneo del inductor. En esta gráfica es importante recordar que la señal del interruptor está modulada en PWM y el sistema está en régimen permanente.

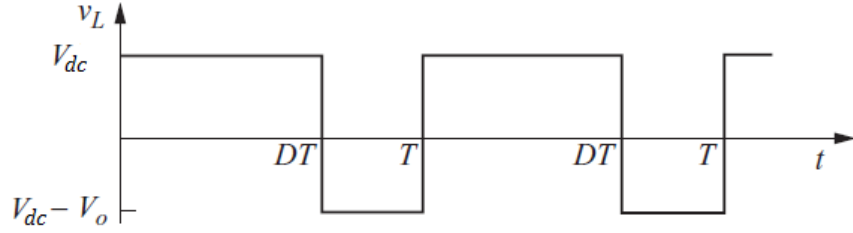


Figura 15. Voltaje instantáneo del inductor en un convertidor Boost

Tomando en cuenta que V_L es igual a 0 como se indica en (4) y aplicando el cálculo directo del valor promedio sobre las expresiones (32) y (34), se obtiene la ecuación (36).

$$0 = V_{dc} D + (V_{dc} - V_o) D' \quad (36)$$

A partir de ésta, se puede despejar el voltaje de salida en función del ciclo de trabajo que da como resultado la expresión (37).

$$V_o = \frac{V_{dc}}{D'} = \frac{V_{dc}}{1 - D} \quad (37)$$

Por otra parte, la corriente que entrega el convertidor se puede calcular aplicando la ley de Ohm y usando la ecuación (37), como se presenta a continuación.

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{V_{dc}}{R(1 - D)} \quad (38)$$

2.4 Corriente del inductor

La corriente del inductor se determina a partir de la ecuación del valor promedio de la corriente del capacitor, además de considerar que I_c es cero. Tomando en cuenta esto, en la figura 16 se presenta la corriente instantánea del capacitor que se obtuvo de las ecuaciones (33) y (35). A continuación, el valor promedio de la corriente del capacitor se obtiene aplicando el procedimiento directo, ver ecuación (39).

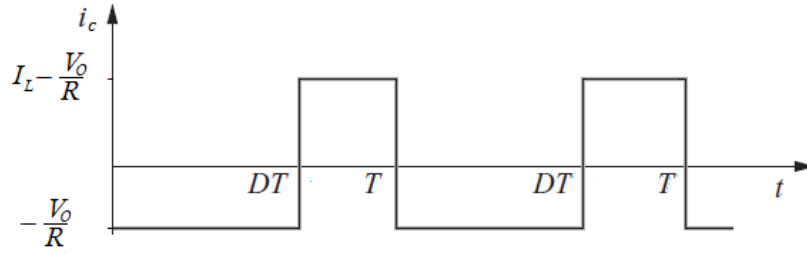


Figura 16. Corriente instantánea del capacitor en un convertidor Boost.

$$0 = \left(-\frac{V_o}{R}\right)D + \left(I_L - \frac{V_o}{R}\right)D' \quad (39)$$

Donde la corriente promedio que circula a través del inductor se determina con esta expresión como se indica en la ecuación (40).

$$I_L = \left(\frac{V_o}{R}\right)\left(\frac{1}{1-D}\right) \quad (40)$$

2.5 Rizo de corriente.

Para determinar el rizo de corriente nos apoyaremos en la figura 17, en donde se presenta los valores instantáneos del voltaje y corriente del inductor.

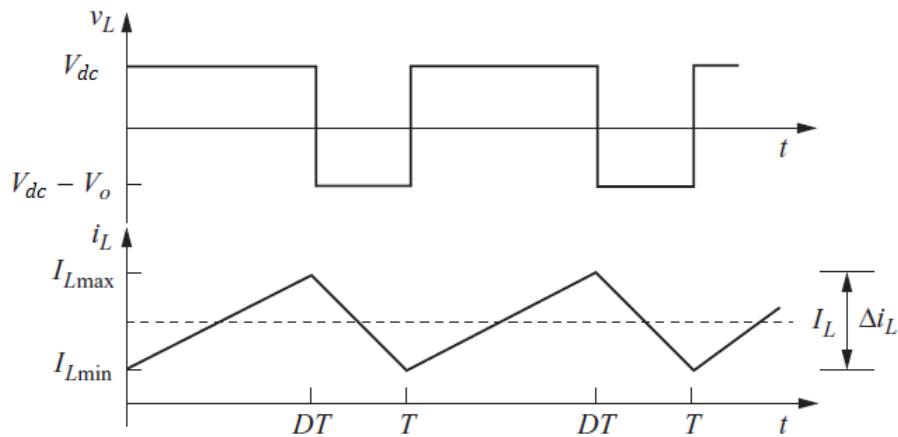


Figura 17. Gráficas del voltaje y corriente del inductor en un convertidor Boost.

La curva de corriente se obtiene a partir de la definición del voltaje del inductor. En la gráfica la corriente instantánea i_L está compuesta por el valor promedio I_L y el rizo

Δi_L . Debe recordarse que el sistema se considera en estado estable. En la sección anterior se obtuvo una ecuación para i_L . A continuación, se deduce la ecuación del rizo de corriente analizando dos casos. El primer caso ocurre cuando el interruptor está cerrado. Bajo esta condición, el voltaje del inductor se puede expresar como lo indica la ecuación (41)

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{dc} \quad (41)$$

Si tomamos en cuenta que, V_{dc} es constante y la derivada de la corriente es la pendiente de su rampa en el intervalo DT , entonces las diferenciales $di_L(t)$ y dt se pueden sustituir por los incrementos Δi_L^+ y DT . De esta forma, Δi_L^+ se puede calcular como se indica en (42) en donde el signo + se usa para resaltar que la pendiente es positiva.

$$\Delta i_L^+ = \frac{V_{dc}DT}{L} \quad (42)$$

El segundo caso ocurre cuando el interruptor está abierto. Bajo esta condición, el voltaje del inductor se puede expresar como se indica en (43).

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{dc} - V_o \quad (43)$$

Debido a que, $V_{dc} - V_o$ es constante, la pendiente de la corriente también se mantiene constante a través del tiempo $1-D$ y, se puede sustituir las diferenciales por los incrementos Δi_L^- y $(1-D)T$. De tal forma que, el rizo de corriente se puede calcular a partir de la ecuación (44), donde el signo - indica que la inclinación de la pendiente es negativa.

$$\Delta i_L^- = \left(\frac{V_{dc} - V_o}{L} \right) D'T \quad (44)$$

Por otra parte, es importante mencionar que Δi_L^+ y Δi_L^- en valor absoluto son iguales, y los signos indican únicamente el sentido de su pendiente, por tanto, la corriente mínima y máxima a través del inductor se calcula con las expresiones (45) y (46)

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (45)$$

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (46)$$

2.6 Cálculo de la inductancia

Este análisis se considera en un régimen de conducción continua, de tal forma que la corriente a través del inductor mantiene su polaridad. Tomando esto en cuenta, a partir de la ecuación (42) o (44) es posible calcular la inductancia del convertidor. Para esto, es necesario que el rizo de corriente se fije en un porcentaje de la corriente promedio I_L . Al igual que en el convertidor Buck, en el Boost un diseño conservador mantiene la consideración de un 10 a un 25 %; sin embargo, se debe notar que los inductores de menor valor son más fáciles de construir y generalmente son más eficientes. Las ecuaciones (47) y (48) permiten calcular la inductancia y es importante enfatizar que son equivalentes.

$$L = \frac{V_{dc}DT}{\Delta i_L} \quad (47)$$

$$L = \left(\frac{V_o - V_{dc}}{\Delta i_L} \right) D'T \quad (48)$$

La inductancia mínima que cumple con el modo de conducción continua se puede determinar si se considera que el límite de esta conducción ocurre cuando la corriente en el inductor llega a cero. Tomando esto en cuenta en la expresión (45)

el límite del rizo de corriente corresponde con $\Delta i_L = 2I_L$, de tal forma que sustituyendo en (47), la inductancia mínima se calcula a partir de la ecuación (49).

$$L_{min} = \frac{V_{dc}DT}{2I_L} \quad (49)$$

2.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia

A diferencia del convertidor Buck, en el convertidor Boost la corriente que carga al capacitor es discontinua, es decir, la corriente principal que proviene del inductor sólo se mantiene presente durante el lapso DT y se interrumpe durante $D'T$. Por esta razón, se puede aplicar un procedimiento similar al usado en la deducción del rizo de corriente, considerando ahora la corriente y voltaje instantáneos del capacitor. En la figura 18 se muestra las curvas de estos parámetros, en donde se destaca que el voltaje del capacitor corresponde además con el voltaje de salida. En la imagen, el voltaje del capacitor está formado por el valor promedio V_o más el rizo ΔV_o . En este punto, se resalta que la curva de voltaje se obtuvo de aplicar la ecuación fundamental del capacitor.

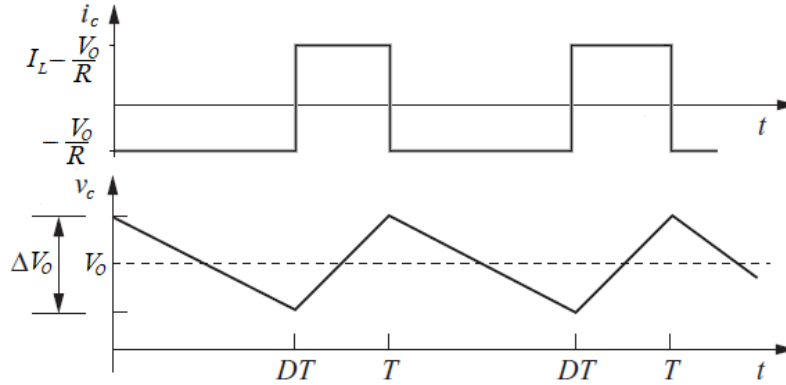


Figura 18. Gráficas de corriente y voltaje del capacitor en un convertidor Boost.

El rizo de voltaje se determina a partir de la ecuación de corriente que se muestra en la siguiente expresión.

$$i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} = -\frac{V_o}{R} \quad (50)$$

En esta ecuación, $dv_c(t)$ y dt se pueden sustituir por ΔV_o y DT respectivamente lo que da lugar a la ecuación (51).

$$C \frac{\Delta V_o}{DT} = -\frac{V_o}{R} \quad (51)$$

Donde se puede despejar ΔV_o como se indica a continuación.

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} \quad (52)$$

El signo negativo se omite porque indica únicamente el sentido de la pendiente y para fines prácticos no es relevante. Por otra parte, se menciona que una ecuación equivalente se determina analizando las gráficas en el intervalo $D'T$. Además de esto, la ecuación anterior se puede usar para calcular la capacitancia, fijando un valor particular de ΔV_o , lo que da lugar a la expresión (53)

$$C = \frac{V_o DT}{R \Delta V_o} \quad (53)$$

2.8 Ejemplo del convertidor Boost

Un convertidor Boost tiene los siguientes parámetros: $V_{dc} = 20 \text{ V}$, $D = 0.6$, $R = 12.5 \Omega$, $L = 10 \mu\text{H}$, $C = 40 \mu\text{F}$, y la frecuencia de conmutación es de 200 kHz . (a) Determine el voltaje de salida. (b) Determine la corriente promedio, mínima y máxima del inductor y (c) Determine el rizo del voltaje. Asumir componentes ideales.

Datos:

$V_{dc} = 20 \text{ V}$, $D = 0.6$, $R = 12.5 \Omega$, $L = 10 \mu\text{H}$, $C = 40 \mu\text{F}$, $f_s = 200 \text{ kHz}$,

Procedimiento:

El voltaje de salida se calcula a partir de (37)

$$V_0 = \frac{V_{dc}}{1-D} = \frac{20\text{ V}}{1-0.6} = 50\text{ V}$$

la corriente promedio y el rizo de corriente del inductor se calcula a partir de las ecuaciones (40) y (42).

$$I_L = \left(\frac{V_0}{R}\right)\left(\frac{1}{1-D}\right) = \left(\frac{50\text{ V}}{12.5\ \Omega}\right)\left(\frac{1}{1-0.6}\right) = 10\text{ A}$$

$$\Delta i_L^+ = \frac{V_{dc}DT}{L} = \frac{20\text{ V} \cdot 0.6}{10\ \mu\text{H} \cdot 200\text{ kHz}} = 6\text{ A}$$

A partir de esto, la corriente mínima y máxima del inductor se calcula a partir de (45) y (46).

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 10\text{ A} - \frac{6\text{ A}}{2} = 7\text{ A}$$

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = 10\text{ A} + \frac{6\text{ A}}{2} = 13\text{ A}$$

Por último, el capacitor se calcula con base en la ecuación (52).

$$\Delta V_O = \frac{V_O DT}{RC} = \frac{50\text{ V} \cdot 0.6}{12.5\ \Omega \cdot 40\ \mu\text{F} \cdot 200\text{ kHz}} = 300\text{ mV}$$

3. Convertidor inversor o Buck-Boost

El convertidor Buck-Boost es un circuito que transforma un voltaje positivo en uno negativo, además de controlar la amplitud de su salida. En la figura 19 se presenta el diagrama básico de este convertidor.

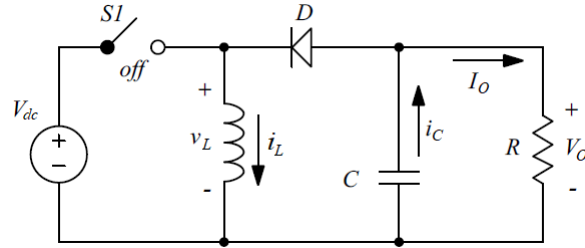


Figura 19. Circuito Buck-Boost.

Este circuito se analiza bajo las mismas condiciones que se plantearon en los anteriores, es decir, el circuito está controlado por una señal de PWM, trabaja en régimen permanente, se considera componentes ideales, etc. También se enfatiza que existe el mismo juego de conmutación interruptor-diodo, en donde este último mantiene la conducción, si y sólo si, el interruptor está apagado y la corriente a través del inductor es continua. De igual forma, el análisis se apoya en las condiciones de operación del interruptor.

3.1 Circuito Buck-Boost con interruptor cerrado.

En la figura 20, se muestra el convertidor cuando su interruptor está cerrado. Como se observa, el circuito en este caso se comporta de forma similar que la configuración Boost; es decir, en el intervalo DT , el inductor queda en paralelo con la fuente de entrada y el capacitor suministra la corriente en la salida.

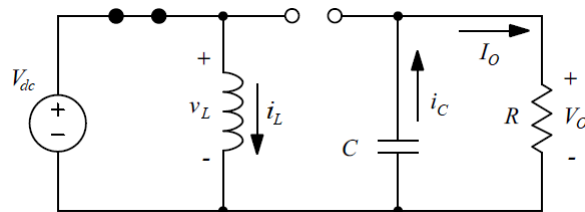


Figura 20. Circuito Buck-Boost con el interruptor cerrado.

Para este circuito, las ecuaciones del voltaje del inductor y la corriente del capacitor se pueden expresar a partir de las ecuaciones (54) y (55)

$$v_L = V_{dc} \quad (54)$$

$$i_c = \frac{V_0}{R} \quad (55)$$

3.2 Circuito Buck-Boost con interruptor abierto.

Durante el intervalo $D'T$, debido a que la corriente del inductor no puede detener su flujo de manera instantánea, el diodo del convertidor se enciende cuando el interruptor se abre. El circuito de la figura 21 ilustra este comportamiento.

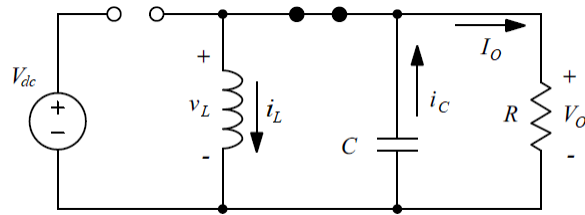


Figura 21. Circuito Buck-Boost con el interruptor abierto.

El voltaje del inductor y la corriente del capacitor se determinan a partir del circuito, como lo indican las ecuaciones (56) y (57).

$$v_L = V_0 \quad (56)$$

$$i_c = I_L + \frac{V_0}{R} \quad (57)$$

El comportamiento del circuito en este caso es similar al de una configuración Buck y por esta razón, en combinación con el caso anterior, a este convertidor se le denomina Buck-Boost. Es interesante notar que si bien, los signos de las ecuaciones en ambos casos parece que difieren, se demostrará más adelante que esto es parte del comportamiento del cambio de polaridad del voltaje en su salida.

3.3 Voltaje y corriente de salida

En la figura 22, se presenta el voltaje instantáneo del inductor que se obtiene a partir de la modulación de PWM que controla el encendido y apagado del interruptor.

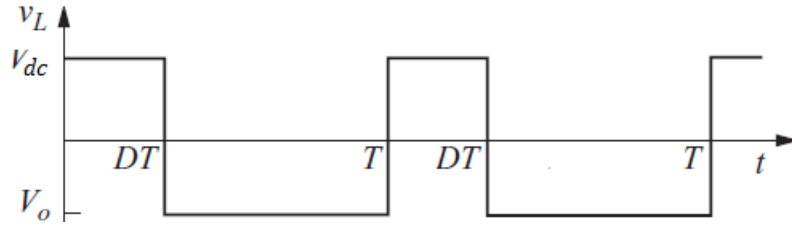


Figura 22. Voltaje instantáneo del inductor en un convertidor Buck-Boost

Tomando en cuenta que el voltaje promedio del inductor es cero, la ecuación (58) se obtiene de aplicar el cálculo directo del valor promedio sobre las ecuaciones (54) y (56).

$$0 = V_{dc} D + V_o(1 - D) \quad (58)$$

De este resultado, se puede despejar el voltaje de salida en función del ciclo de trabajo, ver ecuación (59).

$$V_o = -V_{dc} \left(\frac{D}{1 - D} \right) \quad (59)$$

Además de esto, la corriente que entrega el convertidor se calcula con base en la ley de Ohm y la ecuación anterior, como se indica a continuación.

$$I_o = \frac{V_o}{R} = -\frac{V_{dc}}{R} \left(\frac{D}{1 - D} \right) \quad (60)$$

3.4 Corriente del inductor

De las ecuaciones (55) y (57) se obtiene la corriente instantánea del capacitor y su gráfica se muestra en la figura 23. Si consideramos que su valor promedio es cero, a partir de esta gráfica se puede determinar la corriente promedio del inductor. Por tanto, aplicando el procedimiento directo, el valor promedio del capacitor se calcula según la ecuación (61).

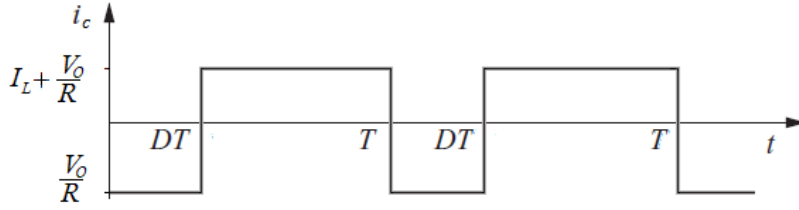


Figura 23. Corriente instantánea del capacitor en un convertidor Buck-Boost.

$$0 = \left(\frac{V_o}{R}\right)D + \left(I_L + \frac{V_o}{R}\right)D' \quad (61)$$

De esta expresión se puede determinar la corriente promedio que circula en el inductor, como lo indica la ecuación (62).

$$I_L = -\left(\frac{V_o}{R}\right)\left(\frac{1}{1-D}\right) \quad (62)$$

3.5 Rizo de corriente.

A continuación, nos apoyaremos en la figura 24, en donde se presenta los valores instantáneos del voltaje y corriente del inductor, para determinar el rizo de corriente.

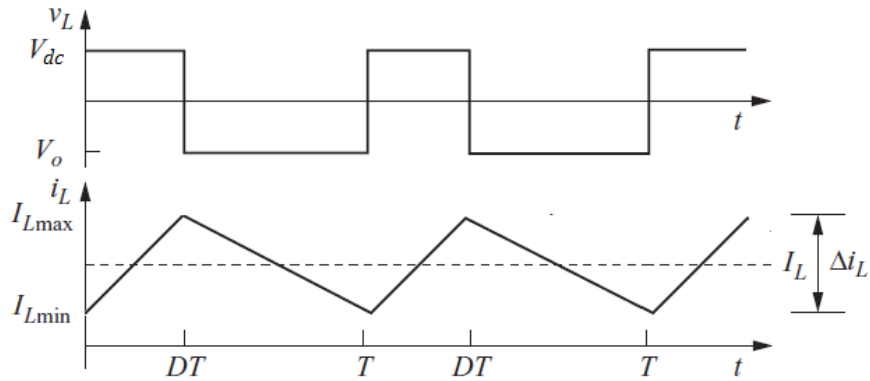


Figura 24. Gráficas del voltaje y corriente del inductor en un circuito Buck-Boost.

En la gráfica, la corriente instantánea i_L está compuesta por el valor promedio I_L y el rizo Δi_L . En la sección anterior se obtuvo una ecuación para I_L y es importante recordar que el sistema se considera en estado estable. A partir de la definición del voltaje del inductor se puede obtener la corriente. Tomando en cuenta lo anterior,

analizando dos casos, se deduce la ecuación del rizo de corriente. Para el primer caso, el voltaje del inductor se puede expresar como lo indica la ecuación (63), cuando el interruptor se mantiene cerrado.

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{dc} \quad (63)$$

Como se ha hecho antes, las diferenciales $di_L(t)$ y dt se pueden sustituir por los incrementos Δi_L^+ y DT , lo que permite calcular Δi_L^+ como se muestra en la ecuación (64).

$$\Delta i_L^+ = \frac{V_{dc}DT}{L} \quad (64)$$

Segundo caso, el interruptor está abierto. El voltaje del inductor, en esta condición, se puede expresar según la ecuación (65).

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_o \quad (65)$$

Dado que V_o es constante, se puede sustituir las diferenciales por los incrementos Δi_L^- y $(1-D)T$, de tal forma que el rizo de corriente se puede calcular a través de la ecuación (66).

$$\Delta i_L^- = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (66)$$

Nuevamente Δi_L^+ y Δi_L^- son iguales en valor absoluto, por tanto, la corriente mínima y máxima a través del inductor se calculan aplicando las expresiones (67) y (68).

$$I_{Lmin} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (67)$$

$$I_{Lmax} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (68)$$

3.6 Cálculo de la inductancia

Para este convertidor, a partir de las ecuaciones (69) y (70) se calcula el valor del inductor y es apropiado enfatizar que las expresiones son equivalentes. Como ya se ha mencionado, no hay reglas para fijar que porcentaje de I_L es apropiado para el rizo de corriente.

$$L = \frac{V_{dc}DT}{\Delta i_L} \quad (69)$$

$$L = \frac{|V_o|(1-D)T}{\Delta i_L} \quad (70)$$

Por otra parte, la inductancia mínima se calcula a partir de la ecuación (71) en donde se ha considerado que el rizo de corriente es igual a dos veces la corriente promedio que circula a través del inductor.

$$L_{min} = \frac{V_{dc}DT}{2I_L} \quad (71)$$

3.7 Rizo de voltaje y cálculo de la capacitancia

En la figura 25, se muestran las curvas de la corriente y voltaje instantáneos del capacitor. Cabe mencionar que el voltaje del capacitor también corresponde con el voltaje de salida. Por esta razón, podemos plantear que el voltaje del capacitor está formado por el valor promedio V_o más el rizo ΔV_o . El procedimiento para calcular el rizo de voltaje es similar al planteado en el convertidor Boost y da como resultado la expresión (72), de donde también es posible calcular la capacitancia como se indica en (73).

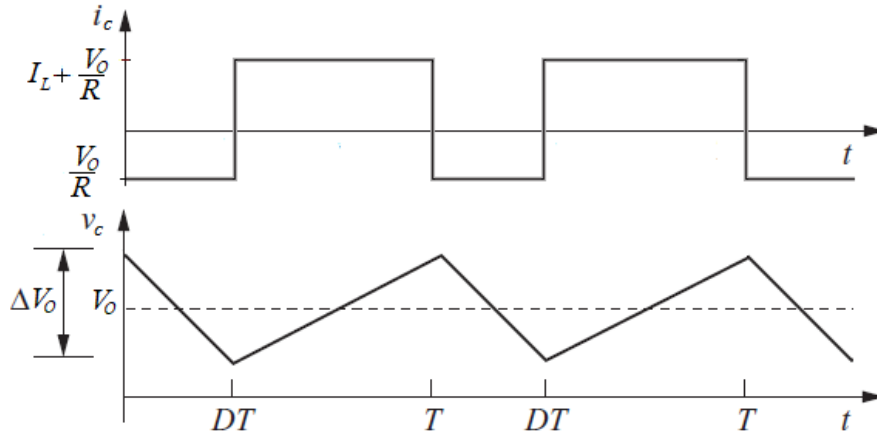


Figura 25. Gráficas de corriente y voltaje del capacitor en un circuito Buck-Boost.

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} \quad (72)$$

$$C = \frac{V_o DT}{R \Delta V_o} \quad (73)$$

3.8 Ejemplo del convertidor Buck-Boost

Diseñe un convertidor Buck-Boost que produzca -15 V de salida a partir de una fuente de 10 V. El rizo de voltaje no debe exceder el 0.5 %. La fuente tiene conectada una carga de 20 Ω . Considere que su diseño es para conducción continua. Determine el ciclo de trabajo, la frecuencia de conmutación, el valor del inductor y del capacitor. Asuma componentes ideales.

Datos: $V_o = -15 \text{ V}$, $V_{dc} = 10 \text{ V}$, $\% \Delta V_o = 0.5 \%$, $R = 20 \Omega$. Además, se propone $f_s = 60 \text{ kHz}$ (arbitrario, se puede elegir otro)

Procedimiento:

De (59) se despeja D:

$$D = \frac{V_o}{-V_{dc} + V_o} = \frac{-15 \text{ V}}{-10 \text{ V} - 15 \text{ V}} = 0.6$$

Por otro lado:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{0.5\%}{100} = 0.005$$

Por tanto, de la ecuación (73):

$$C = \frac{0.6}{20 \, \Omega \cdot 0.005 \cdot 60 \, kHz} = 100 \, \mu F$$

Para calcular L es necesario I_L de (62):

$$I_L = -\left(\frac{V_o}{R}\right)\left(\frac{1}{1-D}\right) = -\left(\frac{-15 \, V}{20 \, \Omega}\right)\left(\frac{1}{1-0.6}\right) = 1.875 \, A$$

Considerando un valor conservador del 25%:

$$\Delta i_L = 0.25 I_L \cong 0.469 \, A$$

Tomando este valor en cuenta, la inductancia se calcula de (69):

$$L = \frac{V_{dc} D T}{\Delta i_L} = \frac{10 \, V \cdot 0.6}{0.469 \, A \cdot 60 \, kHz} = 213 \, \mu H$$

4. Convertidor Ćuk

El convertidor Ćuk es similar al Buck-Boost, pero su configuración se apoya en la transferencia de energía a través del capacitor C1. En la figura 26 se presenta la configuración del circuito. Este circuito se puede analizar de la misma forma que los convertidores anteriores, la diferencia es que ahora se deben considerar dos capacitores y dos inductores, por lo que es necesario determinar dos ecuaciones más en cada condición de interruptor. Se invita al lector a deducir las siguientes expresiones, considerando el procedimiento expuesto en el documento.

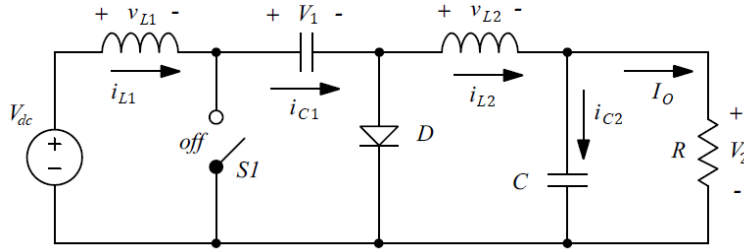


Figura 19. Circuito Ćuk.

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{V_{dc}}{D'} & \Delta i_{L1} &= \frac{V_{dc}DT}{2L_1} \\
 V_2 &= \frac{-DV_{dc}}{D'} & \Delta i_{L2} &= \frac{V_{dc}DT}{2L_2} \\
 I_{L1} &= -\frac{D}{D'} I_{L2} = \left(\frac{D}{D'}\right)^2 \frac{V_{dc}}{R} & \Delta V_2 &= \frac{V_{dc}D^2T}{2D'RC_1} \\
 I_{L2} &= \frac{V_2}{R} = -\frac{D}{D'} \frac{V_{dc}}{R} & \Delta V_2 &= \frac{\Delta i_L T}{8C_2}
 \end{aligned}$$

5. Ejercicios

A continuación, se presenta un conjunto de ejercicios que permiten reafirmar la información ofrecida en estas notas. Se recomienda que después de resolverlos, se verifiquen sus resultados con la ayuda de algún simulador de circuitos electrónicos. Para esta labor, se recomiendan los programas *LTspice* desarrollado por *Linear Technology* y el *PSIM* de la compañía *PowerSim Inc*, en donde el segundo está orientado específicamente al desarrollo de electrónica de potencia.

Ejercicio 1. Deduzca las siguientes ecuaciones para el convertidor Buck.

$$\begin{aligned}
 (a) \quad L_{MIN} &= \frac{V_{dc} - V_0}{2I_0 f_S} D \\
 (b) \quad \frac{\Delta V_0}{V_0} &= \frac{1 - D}{8LCf_S^2} \\
 (c) \quad I_{Lmax} &= V_0 \left[\frac{1}{R} + \frac{1 - D}{2Lf_S} \right] \\
 (d) \quad I_{Lmin} &= V_0 \left[\frac{1}{R} - \frac{1 - D}{2Lf_S} \right]
 \end{aligned}$$

Ejercicio 2. Elabore un formulario de las ecuaciones más relevantes del convertidor Buck. Este formulario le será útil en la resolución de los siguientes ejercicios.

Ejercicio 3. Para un convertidor Buck, considerando componentes ideales, calcule: (a) el voltaje de salida V_o , (b) la corriente mínima y máxima del inductor, y (c) el rizo del voltaje de salida. Considere los siguientes parámetros $V_{dc} = 50\text{ V}$, $D = 0.4$, $L = 400\text{ }\mu\text{H}$, $C = 100\text{ }\mu\text{F}$, $f_s = 20\text{ kHz}$, $R = 20\text{ }\Omega$.

Ejercicio 4. Diseñe un convertidor reductor que genere un voltaje de salida de 18 V en una resistencia de carga de $10\text{ }\Omega$. El rizo del voltaje de salida no debe exceder el 0.5% . La fuente de entrada es de 48 V . Considere que su diseño es para conducción continua. Determine el ciclo de trabajo, la frecuencia de conmutación, el valor del inductor y del capacitor. Indique el voltaje máximo que experimenta cada elemento del convertidor, así como la corriente eficaz del inductor y condensador. Asuma componentes ideales.

Ejercicio 5. En un convertidor Buck, se tienen los siguientes parámetros: $V_{dc} = 50\text{ V}$, $V_o = 15\text{ V}$ y $f_s = 50\text{ kHz}$. Si la potencia de salida es de 30 W , (a) calcule el valor del inductor, tal que la corriente mínima que circula a través de éste sea igual al 20% de su corriente promedio y (b) calcule la corriente promedio que aporta V_{dc} .

Ejercicio 6. Deduzca las siguientes ecuaciones del convertidor Boost.

$$(a) \quad L_{MIN} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s}$$

$$(b) \quad \Delta V_o = \left[I_L - \frac{V_o}{R} \right] \frac{(1-D)}{f_s C}$$

$$(c) \quad I_{LMAX} = V_{dc} \left[\frac{1}{(1-D)^2 R} + \frac{D}{2Lf_s} \right]$$

$$(d) \quad I_{LMIN} = V_{dc} \left[\frac{1}{(1-D)^2 R} - \frac{D}{2Lf_s} \right]$$

Ejercicio 7. Deduzca la corriente promedio que aporta la fuente V_{dc} en un convertidor Boost. Apoye su respuesta a partir de gráficas y ecuaciones.

Ejercicio 8. Elabore un formulario de las ecuaciones más relevantes del convertidor Boost. Este formulario le será útil en la resolución de los siguientes ejercicios.

Ejercicio 9. Un convertidor Boost tienen los siguientes parámetros: $V_{dc} = 10$ V, $V_o = 15$ V y $f_s = 40$ kHz. Si la potencia de salida es de 10 W calcule: (a) el valor del inductor, tal que la corriente mínima que circula a través de éste sea igual al 10 % de su corriente promedio, (b) la potencia de entrada del convertidor y (c) las corrientes de entrada y salida del circuito.

Ejercicio 10. Para un convertidor Boost, considerando componentes ideales, calcule: (a) el voltaje de salida V_o , (b) la mínima y máxima corriente del inductor, y (c) el rizo del voltaje. Tome en cuenta los siguientes datos: $f_s = 60$ kHz, $L = 100$ μ H, $C = 100$ μ F, $V_{dc} = 5$ V, $D = 0.6$ y $R = 20\Omega$

Ejercicio 11. Diseñe un convertidor Boost que produzca 25 V de salida a partir de una fuente de 10 V. El rizo de voltaje no debe exceder el 0.5%. La fuente tiene conectada una carga de 20 Ω . Considere que su diseño es para conducción continua. Determine el ciclo de trabajo, la frecuencia de conmutación, el valor del inductor y del capacitor. Indique el voltaje máximo que experimenta cada elemento del convertidor, así como la corriente eficaz del inductor y condensador. Asuma componentes ideales.

Ejercicio 12. Deduzca las siguientes ecuaciones del convertidor Buck-Boost.

$$(a) \quad L_{MIN} = \frac{(1 - D)^2 R}{2f_s}$$

$$(b) \quad \Delta V_o = \left[I_L + \frac{V_o}{R} \right] \frac{(1 - D)}{f_s C}$$

$$(c) \quad I_{L_{MAX}} = V_S \left[\frac{D}{(1-D)^2 R} + \frac{D}{2L f_s} \right]$$

$$(d) \quad I_{L_{MIN}} = V_S \left[\frac{D}{(1-D)^2 R} - \frac{D}{2L f_s} \right]$$

Ejercicio 13. Deduzca la corriente promedio que aporta la fuente V_{dc} en un convertidor Buck-Boost. Apoye su respuesta a partir de gráficas y ecuaciones.

Ejercicio 14. Elabore un formulario de las ecuaciones más relevantes del convertidor Buck-Boost. Este formulario le será útil en la resolución de los siguientes ejercicios.

Ejercicio 15. Un convertidor Buck-Boost tienen los siguientes parámetros: $V_{dc} = 20$ V, $V_o = -5$ V y $f_s = 80$ kHz. Si la potencia de salida es de 20 W calcule: (a) el valor del inductor, tal que la corriente mínima que circula a través de éste sea igual al 30 % de su corriente promedio, (b) la potencia de entrada del convertidor y (c) las corrientes de entrada y salida del circuito.

Ejercicio 16. Grafique las corrientes de inductor y condensador para el convertidor Buck-Boost del ejercicio anterior. Determine los valores RMS de estas corrientes.

Ejercicio 17. Diseñe un convertidor de CD-CD para producir una salida de -15 V desde una fuente que varía entre 12 y 18 V. La carga es una resistencia de 15 Ω . Este problema es de diseño libre, por tanto, explique cómo tomó sus decisiones.

Ejercicio 18. Diseñe un convertidor Buck-Boost que a partir de una fuente que varía de 15 a 20 V, produzca una salida de -10 V. La carga demanda entre 15 W y 20 W. El rizo debe ser inferior al 1 % para cualquier condición de funcionamiento. Determine el intervalo de operación del ciclo de trabajo. Especifique la frecuencia de conmutación y calcule los valores del inductor y el capacitor. Este problema es de diseño libre, por tanto, explique cómo tomó sus decisiones.

Bibliografía

Erickson, R., Maksimovic, D. (2004) *Fundamentals of power electronics*. 2nd edition. Colorado USA, Kluwer Academic Publishers.

Hart, D., (2011) *Power Electronics*. New York, USA, Mc Graw Hill.

Franco, S., (2015) *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. 4th edition, New York, USA, McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering.