

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TRABAJO ASIGNADO

“UN ACERCAMIENTO A LOS CONVERTIDORES DC”

Presentado por:

Ruth Juana Espino Puma

Davis Bremdow Salazar Roa

Curso:

Sistemas Electrónicos de Potencia

Profesor:

Christian Deyvi Villares Holguin

13 de diciembre de 2025

Resumen

El estudio de los convertidores de voltaje es de vital importancia dentro área de potencia y control para este tipo de dispositivos, siendo así que mediante el ajuste de un ciclo de trabajo es posible controlar la cantidad de energía eléctrica entregada a la carga, siendo este proceso aunque simple en su descripción pero que consta de un análisis riguroso matemáticamente y con vario pintas aplicaciones dentro de diferentes ramas de la ciencia.

Índice general

Índice de cuadros	V
Lista de Tablas	V
Índice de figuras	VI
Lista de Figuras	VI
1. Introducción	1
2. Convertidor Reductor DC	2
2.1.	2
3. Justificación	3
4. Convertidor elevador	4
4.1. Convertidor elevador con carga R	4
4.1.1. Principio de funcionamiento	4
4.1.2. Análisis del circuito	5
4.2. Convertidor elevador con carga R y fuente E	7
5. Convertidor elevador - Boost Regulator	11
5.1. Funcionamiento y estados del circuito	11
5.1.1. Voltaje rizo de salida V_C	14

5.2. Parámetros extremos de carga	15
5.2.1. Inductancia crítica L_C	15
5.2.2. Capacitancia crítica C_C	16
6. Alcances y Limitaciones	17
6.1. Alcances	17
6.2. Limitaciones	17
Bibliografía	18

Índice de cuadros

Índice de figuras

4.1. Convertidor Elevador - Chopper DC	4
4.2. Modo 1 - Convertidor elevador	5
4.3. Modo 2 - Convertidor elevador	5
4.4. Conversor elevador - Carga RE	7
4.5. Curvas de corriente en el inductor - carga y descarga	7
5.1. Circuito elevador - Configuración Boost Regulator	11
5.2. Circuito elevador - Boost Regulator Modo 1	11
5.3. Circuito elevador - Boost Regulator Modo 2	12

1 | Introducción

En la industrial actual elementos de control y aplicaciones específicas requieren de un control preciso de la cantidad de energía eléctrica/potencia es suministrada para llevar a cabo acciones atadas a su fin, es en tal sentido que los convertidores de voltaje DC - DC o comúnmente conocidos como Choppers DC son de vital importancia en áreas como la robótica para el control de actuadores, el sector automotriz para establecer un nivel de voltaje en los autos eléctricos, etc.

Es así que se presentan los diferentes tipos de convertidores DC - DC para expandir su estudio enfatizando el modelo matemático y el comportamiento del mismo para cargas del tipo R y RL-E.

2 | Convertidor Reductor DC

El primer elemento de estudio será el convertidor reductor de voltaje DC con una carga R, ello con la finalidad de comprender el funcionamiento básico de este tipo de convertidor.

Para iniciar el análisis es necesario conocer la topología del convertidor, mostrándose la misma

2.1.

3 | Justificación

4 | Convertidor elevador

Una vez definidos los convertidores reductores, una topología similar a estos se puede apreciar en los choppers DC elevadores que permiten elevar el nivel DC de salida empleando para ello un inductor en la etapa de entrada y que se utiliza para almacenar la energía en forma de campo magnético mediante las variaciones de corriente debido a la inductancia que esta genera por su composición.

4.1. Convertidor elevador con carga R

Para estudiar el comportamiento de este tipo de convertidor es necesario detallar su estructura, viéndose la misma en la figura 4.1 en la cual se muestra una bobina o inductor de entrada un switch, un diodo rectificador y finalmente la carga.

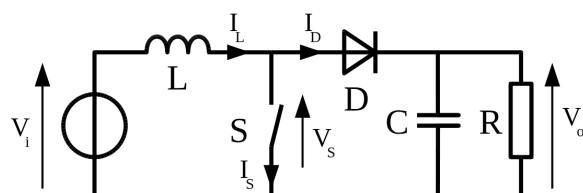


Figura 4.1: Convertidor Elevador - Chopper DC

4.1.1. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de este elevador se ejecuta por etapas o pasos considerando como elemento principal para elevar el voltaje la bobina capaz de almacenar energía, elevando así el voltaje de salida; la secuencia de pasos a considerar se detalla a continuación:

1. Cuando el switch se encuentra en funcionamiento el inductor se carga
2. Cuando el interruptor se apaga la energía almacenada es liberada incrementando el nivel de voltaje DC en la salida

4.1.2. Análisis del circuito

Este circuito al contar con 2 etapas de funcionamiento en función al switch o alternador se contará con 2 circuitos diferentes según la conmutación, considerando para el caso 1 cuando la compuerta de cortocircuito un circuito en serie con la fuente de alimentación de entrada y el inductor, mientras que en el caso contrario que el inductor se encuentra en serie con la carga, esto a grandes rasgos se muestra en las figuras 4.2 y 4.3 respectivamente.

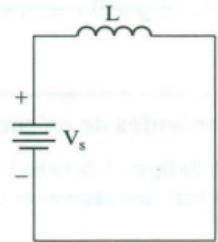


Figura 4.2: Modo 1 - Convertidor elevador

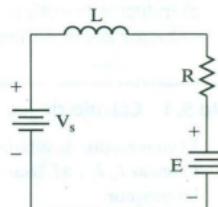


Figura 4.3: Modo 2 - Convertidor elevador

Cabe destacar que en cada caso el interruptor en paralelo a la etapa de salida define cada modo, siendo que para el primer caso genera un corto circuito hacia tierra separando así la carga de la entrada permitiendo almacenar la energía.

Por lo tanto para cada modo es necesario realizar el análisis eléctrico y posteriormente el matemático considerando además los fenómenos físicos que se experimentan en los componentes que lo integran.

Al aplicar la L.T.K en la malla se relaciona el voltaje del inductor con el voltaje de entrada obteniendo así una expresión que relaciona la variación en la corriente respecto al voltaje y el tiempo, recordando así que la inductancia es la oposición frente al flujo de corriente variable.

$$-V_S + V_L = 0 \quad (4.1)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_S \quad (4.2)$$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta T} = V_S \quad (4.3)$$

$$\Delta I = \frac{V_S * t_1}{L} \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

En el modo 2 cuando el interruptor esta abierto se tiene un circuito en serie polarizando en directa el diodo D_m hacia la carga descargándose en tal instante de tiempo t_2 el inductor elevando el voltaje de salida; Al aplicar L.T.K en circuito de la figura 4.3 se obtienen la relación *considerando un voltaje umbral equivalente a cero en el diodo* que vincula el voltaje de entrada con los diferentes elementos del circuito.

$$V_O - V_L = V_S \quad (4.6)$$

$$V_S + V_L = V_O \quad (4.7)$$

$$V_S + L \frac{\Delta I}{\Delta T} = V_O \quad (4.8)$$

$$\Delta T = t_2 \quad (4.9)$$

En función a la ecuación 4.5 se obtiene un valor el voltaje de salida considerando la variación en la corriente debido a la carga y descarga del inductor, relacionando así los diferentes voltajes.

$$V_O = V_S + L * \frac{V_S * t_1}{Lt_2}$$

$$V_O = V_S + V_S * t_1$$

$$V_O = V_S * \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right)$$

$$t_1 = KT$$

$$t_2 = (1 - K)T$$

$$V_O = V_S \left(1 + \frac{K}{1 - K}\right)$$

$$V_O = \frac{V_S}{1 - K} \quad (4.10)$$

La expresión final para el voltaje de salida definida en 4.10 nos indica una dependencia directa con el ciclo de trabajo del conmutador, por lo tanto a mayor % en el ciclo de trabajo se tendrá un mayor voltaje de salida.

4.2. Convertidor elevador con carga R y fuente E

En comparación al caso anteriormente definido con carga R, en la topología la diferencia se encontrará en la salida agregando una fuente de voltaje DC (E), lo cual agregará más detalles al análisis matemático y físico puesto que ahora se debe considerar un estado inicial en el circuito el cual se desconoce y el cual se puede deducir a partir de los teoremas del valor inicial y final para su análisis.

Un modelo topológico de este tipo se aprecia en la figura 4.4 siendo sus modelos equivalentes los mostrados previamente, sin embargo se puede destacar para este caso el uso de un BJT para la etapa de conmutación.

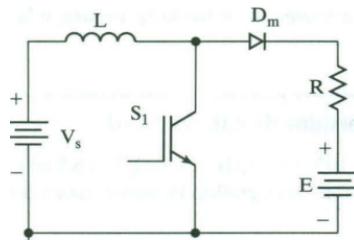


Figura 4.4: Conversor elevador - Carga RE

Para el análisis de corriente el añadir una fuente de voltaje no modifica los fenómenos físicos o compartiendo asociado a este parámetro, por lo tanto las curvas de transferencia no se ven alteradas considerando 2 rectas, una de pendiente positiva durante la carga y otra de pendiente negativa durante la descarga lo cual evidencia de forma gráfica un *cambio en la polaridad en la bobina durante la descarga* implicando al mismo tiempo un cambio en la dirección de la corriente, esto se ve reflejado en la figura 4.5

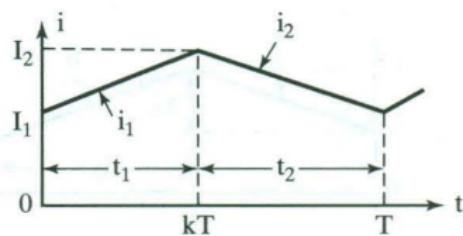


Figura 4.5: Curvas de corriente en el inductor - carga y descarga

Al considerarse nuevamente un circuito conmutado es necesario evaluar 2 casos en el circuito, estando delimitado cada etapa por el ciclo del trabajo de conmutación cada una equivalente a t_1 y t_2 , siendo así que en entre $0 < t \leq t_1$ se cuenta con el

circuito de la figura 4.2, aplicando la L.T.K se relational los voltajes de entrada y el voltaje del inductor, considerando esta vez la ecuación diferencial correspondiente para el inductor.

$$\begin{aligned}
 V_S &= V_L \\
 V_L &= L \frac{di_1(t)}{dt} \\
 di_1(t) &= \frac{V_S}{L} dt \\
 \int di_1(t) &= \int \frac{V_S}{L} dt \\
 i_1(t) &= \frac{V_S}{L} t + A
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Para obtener la constante A considerada en la ecuación 4.11 y limitar la familia de funciones resultantes de la solución de la ecuación diferencial se tendrá en cuenta el teorema del valor inicial y para ello se tendrá que para un tiempo $t = 0$ la corriente $i_1(t) = I_1$.

$$I_1 = A \tag{4.12}$$

$$i_1(t) = \frac{V_S}{L} t + I_1 \tag{4.13}$$

Obteniendo de esta forma el valor de $i_1(t)$ en función del voltaje de entrada e I_1 , luego considerando que el valor del corriente varía durante la descarga para obtener el valor pico máximo I_2 se hará uso del teorema del valor final definiendo $t = KT$ e $i_1(t) = I_2$ de tal relación se tiene:

$$I_2 = \frac{V_S}{L} KT + I_1 \tag{4.14}$$

En la ecuación 4.14 se define el pico máximo para la corriente I_2 , sin embargo para obtener la curva de corriente correspondiente a la descargar del inductor es imperativo hacer uso del circuito para el modelo 2 mostrado en 4.3 cuando el parámetro de tiempo varía entre $KT < t \leq (1 - K)T$ equivaliendo la diferencia entre ambos extremos a un tiempo t_2 .

Aplicando la L.T.K en el circuito serie resultante se obtienen la siguiente relación de voltajes considerando para ello la fuente DC (E).

$$\begin{aligned} V_L + i_2R + E &= V_S \\ L \frac{di_2(t)}{dt} + i_2R + E &= V_S \end{aligned}$$

De la ecuación diferencial resultante se implica que su solución contempla una función dividida en 2 etapas la transitoria y en régimen permanente otorgando así la división de la corriente $i_2(t)$ mediante el esquema

$$i_2(t) = i_s + i_{tr} \quad (4.15)$$

La solución de la Ec. diferencial en función a la expresión de control definida en 4.15 nos permite evidenciar que su parte constante es el valor final en régimen estacionario y la exponencial la parte transitoria puesto que cuanto más tiempo transcurra este valor irá constantemente en decrecimiento hasta anularse *idealmente*.

$$i_2(t) = \frac{V_S - E}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.16)$$

La ecuación 4.16 define la solución de la Ec. diferencial siendo en esta el valor de $\tau = \frac{L}{R}$ el cual detalla la dependencia del tiempo de estabilidad en función al valor de la inductancia y resistencia, sin embargo al igual que en el primer caso como solución se tiene una familia de función, por lo que se volverá aplicar el teorema del valor inicial y final.

Aplicando el teorema del valor inicial se espera que para un tiempo $t = 0$ la corriente $i_2(t) = I_2$, en tal sentido al evaluar 4.16 bajo estas condiciones, se tiene que:

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{V_S - E}{R} + A \\ A &= I_2 - \frac{V_S - E}{R} \end{aligned}$$

Finalmente

$$i_2(t) = I_2 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_S - E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

Al obtener el valor de $i_2(t)$ se puede continuar con la siguiente etapa obteniendo para ello el valor I_1 en la etapa de descarga siendo así que el teorema del valor final podrá proporcionar este valor al considerar $t_2 = (1 - K)T$ e $i_2(t) = I_1$

$$I_1 = I_2 e^{-\frac{R}{L}(1-K)T} + \frac{V_S - E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(1-K)T}) \quad (4.17)$$

En la ecuación 4.17 se describe la ecuación exponencial que describe la descarga del circuito elevador *relacionado al inductor* y en función al ciclo de trabajo y el periodo de la señal.

Finalmente a partir de las ecuaciones 4.14 y 4.17 se puede obtener una expresión general para la corriente rizo ΔI 4.18 ($\Delta I = I_2 - I_1$)

$$\Delta I = \frac{V_S}{L} KT \quad (4.18)$$

5 | Convertidor elevador - Boost Regulator

El convertidor elevador DC *Bosost Regulator* es una variación del convertidor elevador estudiado previamente con la diferencia de que en su topología este circuito agrega un capacitor en paralelo a la carga a modo de filtro para reducir el voltaje de rizo utilizando para ello el principio de carga y descarga de un elemento capacitivo (C)

5.1. Funcionamiento y estados del circuito

La configuración del circuito y disposición de componentes se muestra en la figura 5.1

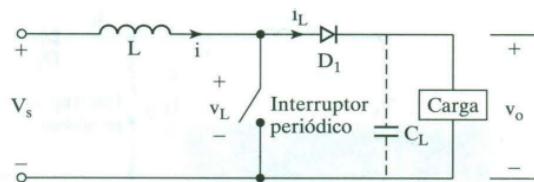


Figura 5.1: Circuito elevador - Configuración Boost Regulator

Y al igual que los conversores previamente vistos su análisis se divide en 2 etapas o modos de funcionamientos en función al ciclo de trabajo para la conmutación del elemento de control, es así que para este caso también se deberán considerar los tiempos de funcionamiento y límites previamente vistos.

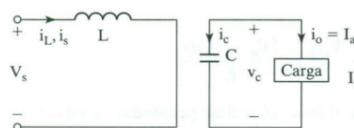


Figura 5.2: Circuito elevador - Boost Regulator Modo 1

En las figuras 5.2 y 5.3 se muestran los circuitos a verificar eléctrica y matemáticamente en función al ciclo de conmutación para obtener así las expresiones que permitan comprender su funcionamiento.

Al aplicar la L.T.K en el circuito del modo 1 5.2 se establece una relación entre el voltaje de entrada y el voltaje en el inductor durante la carga, por lo tanto la variación de la corriente queda en función a las siguientes expresiones matemáticas

$$V_L = V_S$$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = V_S$$

$$\Delta I = \frac{V_S}{L} t_1 \quad (5.1)$$

Considerando $\Delta t = t_1$ debido a que es en tal variación de tiempo en la cual se emplea el circuito en el modo 1 para su funcionamiento.

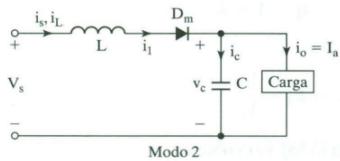


Figura 5.3: Circuito elevador - Boost Regulator Modo 2

Considerando la expresión 5.1 relevante para encontrar las expresiones de voltaje y corriente en este convertidor es necesario seguidamente analizar el circuito para el modo 2 mostrado en la figura 5.3 cuando el interruptor/conmutador es un circuito abierto, obteniendo de esta relación

$$V_O = V_S + V_L$$

$$V_L = V_O - V_S$$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = V_O - V_S$$

Considerando $\Delta t = t_2$ debido a que el funcionamiento del circuito en el modo ocurre en el intervalo off del conmutador, obteniendo finalmente la expresión rizo de la corriente para t_2 como

$$\Delta i = \frac{V_O - V_S}{L} t_2 \quad (5.2)$$

Al igualar las expresiones 5.1 y 5.2 se obtiene el voltaje de salida en función al voltaje de entrada y el ciclo de trabajo para el conmutador en función a la equivalencia de tiempos para $t_1 = KT$ y $t_2 = (1 - K)T$ y justificado mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \frac{V_S}{L}t_1 &= \frac{V_O - V_S}{L}t_2 \\
 V_S t_1 &= (V_O - V_S)t_2 \\
 V_O &= V_S \frac{(t_1 + t_2)}{t_2} \\
 V_O &= V_S \frac{KT + T - KT}{(1 - K)T} \\
 V_O &= V_S \frac{T}{(1 - K)T}
 \end{aligned}$$

Finalmente el voltaje de salida para el convertidor se muestra en la ecuación 5.3 que es un expresión similar a la descrita en el circuito elevador tradicional, sin embargo como se verá más adelante es posible afinar/ajustar la salida del circuito mediante el empleo del capacitor C *al reducir el voltaje rizo presente en la salida.*

$$V_O = \frac{V_S}{(1 - K)} \quad (5.3)$$

Además en la expresión final para el voltaje de salida al considerarse como una señal variable en el tiempo debido a la conmutación utilizada para su generación, es usado como valor referencia para la expresión 5.3 el valor promedio, por lo que esta expresión queda expresada como en 5.4

$$V_a = \frac{V_S}{(1 - K)} \quad (5.4)$$

Por tanto a usar esta expresión se puede obtener una relación de la corriente de entrada con la corriente promedio de salida I_a mediante las expresiones:

$$\begin{aligned}
 V_S I_S &= V_a I_a \\
 V_S I_S &= \frac{V_S}{1 - K} I_a \\
 I_S &= \frac{V_S}{1 - K} I_a
 \end{aligned}$$

Otra expresión que se puede obtener de las relaciones para el tiempo son las que se describen 5.1 y 5.2 al despejar t_1 y t_2 respectivamente, obteniendo así una expresión adicional para la corriente rizo ΔI definida mediante las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned}
T &= t_1 + t_2 \\
T &= L \frac{\Delta I}{V_S} + L \frac{\Delta I}{V_a - V_S} \\
T &= \frac{\Delta I L V_a}{V_S (V_a - V_S)} \\
\Delta I &= \frac{T V_S (V_a - V_S)}{L V_a} \\
\Delta I &= \frac{T V_S (\frac{V_S}{1-K} - V_S)}{L \frac{V_S}{1-K}} \\
\Delta I &= \frac{K T V_S}{L}
\end{aligned}$$

Al expresar $T = 1/F$ se obtiene la expresión final para la corriente rizo *diferencia de corrientes* como 5.5

$$\Delta I = \frac{K V_S}{F L} \quad (5.5)$$

La cual nos brinda una relación entre el rizo en la corriente relacionada con el inductor, frecuencia de commutación y el ciclo de trabajo además del voltaje de entrada en el circuito.

5.1.1. Voltaje rizo de salida V_C

El principal cambio para el elevador del voltaje es el añadido del capacitor en la etapa de salida, esto con la finalidad de reducir el voltaje de rizo (*voltage ripples*), siendo así que su comportamiento se puede estudiar a partir de su ecuación diferencial como se muestra

$$\begin{aligned}
i_C &= C \frac{dV_C(t)}{dt} \\
dV_C &= \frac{1}{C} \int i_C dt \\
\Delta V_C &= \frac{1}{C} I_a \Delta t
\end{aligned}$$

Expresando la función el voltaje de rizado en función a la capacitancia, corriente media de salida y el factor temporal de commutación KT como se define en 5.6

$$\Delta V_C = \frac{I_a T}{F C} \quad (5.6)$$

5.2. Parámetros extremos de carga

En el diseño de circuitos electrónicos es de vital importancia conocer el funcionamiento límite operativo, siendo esto determinado por los elementos que lo componen y los valores límites para ello es posible determinar la magnitud extremo de un componente antes de que este llegue al fallo, sin embargo para ello también es necesario conocer que **condiciones eléctricas** necesarias para que esto ocurra teniendo como resultado la fusión de estos 2 elementos (condiciones y componentes del circuito) para establecer los límites.

5.2.1. Inductancia crítica L_C

Uno de los parámetros a considerar es la inductancia que para el caso de un convertidor *Boost Regulator* es de vital importancia debido a su capacidad de incrementar el voltaje de salida y siendo este el componente a analizar.

Una vez definido el componente es necesario determinar la condición límite para establecer la magnitud extrema en el inductor, para esto se debe analizar el comportamiento eléctrico, determinando así que para una corriente $I_1 = 0$ esto debido a que en función a la corriente de inductor esta condición genera una corriente de rizo pico generando: sobrecalentamiento, perdidas por histeresis en el núcleo y generando voltajes pico peligrosos, además de la generación interferencia electromagnética (EMI).

Considerando esto se tiene las siguientes expresiones para obtener el valor crítico para la inductancia mediante

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_2 - I_1 \\ I_1 &= 0 \\ \Delta I &= I_2 \text{ Asumiendo} \\ I_{Lavg} &= I_a \\ I_2 &= 2I_a \\ \text{Definiendo} \\ \Delta I &= 2I_a \end{aligned}$$

Mediante tales expresiones es posible hacer uso de la ecuación 5.5 para obtener la inductancia crítica y cuyo valor debe ser mayor igual al obtenido a la expresión definida en 5.7

$$\begin{aligned}\frac{KV_S}{L_C F} &= 2 \frac{V_a}{R} \\ \frac{KV_S}{L_C F} &= 2 \frac{V_S}{(1-K)R} \\ \frac{K}{L_C F} &= \frac{2}{(1-K)R}\end{aligned}$$

Finalmente se tiene la expresión

$$L_C = \frac{K(1-K)R}{2F} \quad (5.7)$$

5.2.2. Capacitancia crítica C_C

6 | Alcances y Limitaciones

6.1. Alcances

- Primer Alcance.
- Segundo Alcance.
- Tercer Alcance.

6.2. Limitaciones

- Primera limitación.
- Segunda limitación.
- Tercera limitación.

Bibliografía