

CONVERTIDORES DC/DC SIN
AISLAMIENTO GALVÁNICO

COLECCIÓN MONOGRAFÍAS DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Sáez Pérez, Andrés. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla

Estepa Alonso, Antonio. Universidad de Sevilla

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla

Sáez Pérez, Andrés. Universidad de Sevilla

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Leopoldo G. Franquelo
Jose I. León
Sergio Vázquez
Abraham M. Alcaide

CONVERTIDORES DC/DC SIN AISLAMIENTO GALVÁNICO

Análisis teórico y problemas resueltos

 EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

 Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA

SEVILLA 2025

Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla

Núm.: 30

Comité editorial de
la Editorial Universidad de Sevilla:

Araceli López Serena
(Directora)

Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
Marina Ramos Serrano
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Motivo de cubierta: Intervalos de funcionamiento del convertidor elevador
en MCD.

© Editorial Universidad de Sevilla 2025
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451
Correo electrónico: info-eus@us.es
Web: <https://editorial.us.es>

© Leopoldo G. Franquelo, Jose I. León
Sergio Vázquez y Abraham M. Alcaide 2025

Impreso en papel ecológico
Impreso en España-Printed in Spain

ISBN 978-84-472-2742-6
Depósito Legal: SE 827-2025

Diseño de cubierta: Santi García Hernández
Diseño de maquetación: Francisco Javier Payán Somet
Maquetación: autores
Impresión: Podiprint

A nuestras familias
A nuestros maestros

Resumen

Este documento tiene como fin sentar las bases para el análisis de varias topologías de convertidores de potencia dc/dc. Este trabajo tiene un objetivo académico para servir como apoyo para el estudio de este tipo de convertidores de potencia a futuros alumnos que tengan que cursar materias que incluyan estos convertidores dentro de sus contenidos. Así, se incluyen en este libro los análisis de los convertidores tipo elevador, reductor, reductor-elevador, Ćuk y bidireccional.

Además de los análisis teóricos de las topologías de convertidores dc/dc más convencionales, se incluyen en el documento una serie de problemas, muchos de ellos realizados en exámenes oficiales de años anteriores de la asignatura de Electrónica de Potencia de tercer curso del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales y del Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica, resueltos con la metodología indicada en los análisis teóricos de los convertidores.

Se pretende con ello dar a conocer al alumno cómo abordar la resolución de problemas de una manera sencilla y comprensible una vez entendidos todos los conceptos incluidos en los análisis teóricos.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Índice</i>	V
1 Consideraciones Iniciales	1
2 Convertidor Elevador	5
2.1 Introducción	5
2.2 Modo de Conducción Continua	6
2.2.1 Análisis del intervalo de conducción	6
2.2.2 Análisis del intervalo de no conducción	7
2.3 Modo de Conducción Discontinua	8
2.4 Límite entre modos de conducción	11
2.5 Parámetros del convertidor elevador en MCC	13
2.5.1 Rizado de corriente en la bobina	13
2.5.2 Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	13
2.5.3 Corriente media por la bobina	14
2.5.4 Corriente media de salida	15
2.5.5 Corriente media de entrada	16
2.5.6 Rizado de la tensión de salida	16
2.6 Parámetros del convertidor en MCD	18
2.6.1 Rizado de la corriente en la bobina	18
2.6.2 Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	18

2.6.3	Corriente media por la bobina	19
2.6.4	Corriente media de salida	19
2.6.5	Corriente media de entrada	20
2.6.6	Rizado de la tensión de salida	20
2.7	Balance de potencia	21
2.8	Corrientes y tensiones máximas por el diodo y el interruptor de potencia	22
3	Convertidor Reductor	25
3.1	Introducción	25
3.2	Modo de Conducción Continua	26
3.2.1	Análisis del intervalo de conducción	27
3.2.2	Análisis del intervalo de no conducción	28
3.3	Modo de Conducción Discontinua	28
3.4	Límite entre modos de conducción	31
3.5	Parámetros del convertidor en MCC	32
3.5.1	Rizado de corriente en la bobina	32
3.5.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	33
3.5.3	Corriente media por la bobina	33
3.5.4	Corriente media de salida	34
3.5.5	Corriente media de entrada	35
3.5.6	Rizado de la tensión de salida	35
3.6	Parámetros del convertidor en MCD	37
3.6.1	Rizado de corriente en la bobina	37
3.6.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	37
3.6.3	Corriente media por la bobina	37
3.6.4	Corriente media de salida	37
3.6.5	Corriente media de entrada	38
3.6.6	Rizado de la tensión de salida	38
3.7	Balance de potencia	39
3.8	Corrientes y tensiones máximas por el diodo y el interruptor de potencia	40
4	Convertidor Reductor-Elevador	43
4.1	Introducción	43
4.2	Modo de Conducción Continua	44
4.2.1	Análisis del intervalo de conducción	45

4.2.2	Análisis del intervalo de no conducción	46
4.3	Modo de Conducción Discontinua	46
4.4	Límite entre modos de conducción	48
4.5	Parámetros del convertidor en MCC	50
4.5.1	Rizado de corriente en la bobina	50
4.5.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	50
4.5.3	Corriente media por la bobina	51
4.5.4	Corriente media de salida	52
4.5.5	Corriente media de entrada	53
4.5.6	Rizado de la tensión de salida	53
4.6	Parámetros del convertidor en MCD	55
4.6.1	Rizado de la corriente en la bobina	55
4.6.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	55
4.6.3	Corriente media por la bobina	55
4.6.4	Corriente media de salida	55
4.6.5	Corriente media de entrada	56
4.6.6	Rizado de la tensión de salida	56
4.7	Balance de potencia	57
4.8	Corrientes y tensiones máximas por el diodo y el interruptor de potencia	58
5	Convertidor Ćuk	61
5.1	Introducción	61
5.2	Modo de Conducción Continua	62
5.2.1	Análisis del intervalo de conducción	63
5.2.2	Análisis del intervalo de no conducción	65
5.3	Modo de Conducción Discontinua (MCD)	68
5.4	Parámetros del convertidor en MCC	71
5.4.1	Rizado de corriente en las bobinas	71
5.4.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	72
5.4.3	Corriente media por las bobinas	72
5.4.4	Corriente media por el diodo	75
5.4.5	Corriente media a la salida	76
5.4.6	Corriente media de entrada	77
5.4.7	Rizado de la tensión de salida	77
5.5	Parámetros del convertidor en MCD	78

5.5.1	Rizado de la corriente en las bobinas	78
5.5.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	79
5.5.3	Corriente media por las bobinas	80
5.5.4	Corriente media por el diodo	81
5.5.5	Corriente media a la salida	82
5.5.6	Corriente media de entrada	82
5.5.7	Rizado de la tensión de salida	83
5.6	Balance de potencia	84
5.7	Límite entre modos de conducción	84
5.8	Corrientes y tensiones máximas por el diodo y el interruptor de potencia	86
6	Convertidor Bidireccional	89
6.1	Introducción	89
6.2	Operación del convertidor	90
6.2.1	Análisis del primer intervalo	91
6.2.2	Análisis del segundo intervalo	92
6.3	Parámetros del convertidor bidireccional	94
6.3.1	Rizado de corriente en la bobina	94
6.3.2	Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida	95
6.3.3	Corriente media por la bobina	95
6.3.4	Corrientes medias a través de las fuentes de tensión V_1 y V_2	98
6.4	Corrientes y tensiones máximas por los diodos e interruptores de potencia	99
7	Problema Elevador 1	103
8	Problema Elevador 2	107
9	Problema Doble Elevador	111
10	Problema Reductor 1	121
11	Problema Reductor 2	125
12	Problema Reductor-Elevador 1	129
13	Problema Reductor-Elevador 2	135
14	Problema Reductor-Elevador 3	143

15 Problema Ćuk 1	151
16 Problema Ćuk 2	157
17 Problema Bidireccional 1	165
18 Anexos	173
<i>Índice de Figuras</i>	179
<i>Bibliografía</i>	183

1 Consideraciones Iniciales

En este libro se analiza el funcionamiento de las topologías más convencionales de convertidores de potencia de tipo dc/dc. La función de estos convertidores es, dada una tensión de continua de entrada, adaptarla gracias a una serie de componentes pasivos y activos para proporcionar otra tensión de continua a la salida.

Como consideración inicial, es importante indicar que los convertidores dc/dc basan su funcionamiento en una operación síncrona periódica de forma que se considera un periodo de trabajo T . El funcionamiento de los convertidores dc/dc es tal que, durante un intervalo de tiempo dentro del periodo de trabajo, el semiconductor de potencia se comporta como un interruptor que está cerrado, es decir, que permite la circulación de corriente de colector a emisor (o de drenador a fuente) pudiéndose modelar como un cortocircuito. Por otro lado, durante el resto del tiempo del periodo de trabajo, el semiconductor de potencia estará cortado comportándose como un circuito abierto y no dejando circular corriente a través de él. Sabiendo esto, se puede definir el ciclo de trabajo o duty cycle D de un convertidor dc/dc como la fracción de tiempo del periodo de trabajo T expresado en por unidad en la que el semiconductor de potencia está en estado de conducción, o en modo ON. Es decir:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \in [0,1]. \quad (1.1)$$

donde t_{on} es el tiempo que el semiconductor de potencia está conduciendo cada periodo de trabajo T . Para cada topología de convertidor dc/dc existirá una expresión matemática

que relacione la tensión de entrada con la tensión de salida del convertidor en función del parámetro D .

Además de todo lo comentado anteriormente, antes de comenzar el análisis de los convertidores dc/dc, se realizarán las siguientes suposiciones iniciales:

1. El convertidor dc/dc estará funcionando en régimen permanente. Por tanto, se debe cumplir que las formas de onda de las tensiones y corrientes características del circuito deben ser periódicas. En este caso, como la tensión de un condensador no puede variar instantáneamente su valor (ya que provocaría una sobrecorriente), la tensión inicial y final de un condensador en un periodo de trabajo T debe tener el mismo valor. De forma dual, lo mismo ocurrirá con el valor de la corriente que circula por una bobina, debiéndose cumplir que la corriente de la bobina en un periodo de trabajo T debe coincidir. Matemáticamente, esto se puede expresar en las siguientes ecuaciones de obligado cumplimiento:

$$\begin{aligned}V_L &= \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0, \\I_c &= \frac{1}{T} \int_0^T i_c dt = 0.\end{aligned}\tag{1.2}$$

2. Todos los componentes del circuito se consideran totalmente ideales. Al hacer esto, por ejemplo, los semiconductores de potencia se comportarán como interruptores totalmente ideales considerando despreciables las caídas de tensión que aparecen cuando los semiconductores están en estado de conducción, así como eliminando las dinámicas de corriente en el instante de conmutación. Por tanto, se están despreciando las pérdidas por conducción y conmutación del convertidor.
3. La tensión de salida del convertidor v_o es prácticamente constante con lo que la corriente i_o también lo es (al considerarse una carga puramente resistiva). Esto no es realmente así ya que tanto v_o como i_o presentan un rizado que depende del valor de los componentes pasivos así como de la operación del convertidor. En todo caso, se considerará que este rizado de las formas de onda de salida es pequeño en comparación con el valor medio de las señales.

Además, es importante indicar que para todas las topologías de convertidores dc/dc deberá cumplirse el denominado balance de potencia, que no es más que considerar que la

potencia media suministrada por la fuente de entrada P_s ha de ser igual a la potencia media consumida en la carga P_o , teniendo en cuenta que todos los elementos del circuito se han considerado ideales. Ambas potencias medias se pueden calcular del siguiente modo:

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{1}{T} \int_0^T V_d i_s dt = V_d I_s, \\ P_o &= \frac{1}{T} \int_0^T v_o i_o dt = V_o I_o. \end{aligned} \quad (1.3)$$

suponiendo que V_d e i_s son la tensión de entrada y la corriente que circula por la fuente de entrada, y v_o e i_o son la tensión y corriente en la carga del convertidor.

Igualando ambas potencias medias, se obtiene que:

$$V_d I_s = V_o I_o. \quad (1.4)$$

Por último, es importante indicar que la ecuación (1.4) deberá cumplirse siempre que el convertidor esté operando en régimen permanente en cualquier modo de operación del convertidor.

Nota acerca de la notación: Durante todo el libro, se seguirá una notación específica para describir las variables del convertidor. Se usan las letras minúsculas para describir el valor instantáneo de una variable. Si por el contrario se usan letras mayúsculas para describir una variable, dicha variable describe un valor medio dentro de un periodo de trabajo T .

2 Convertidor Elevador

2.1 Introducción

En este capítulo se realizará el análisis del convertidor dc/dc de tipo elevador, que como su propio nombre indica, es un convertidor de potencia que se emplea para elevar la tensión, de tal forma que dada una tensión a la entrada la incrementará para ofrecer una mayor tensión en la salida. Este convertidor es de gran utilidad en un amplísimo abanico de aplicaciones industriales tales como sistemas de automoción, fuentes de alimentación conmutadas, sistemas electrónicos de consumo, accionamiento de motores, integración de energías renovables y recarga rápida de vehículos eléctricos entre otros muchos sistemas eléctricos presentes en la actualidad [1]. El esquema del convertidor elevador se muestra en la fig. 2.1, donde se observa que en el circuito hay varios elementos: una bobina con inductancia L , un semiconductor de potencia cuyo estado de conducción se gestiona gracias a una señal de disparo S , un diodo, un condensador con capacitancia C , y una resistencia R que emula la carga conectada al convertidor.

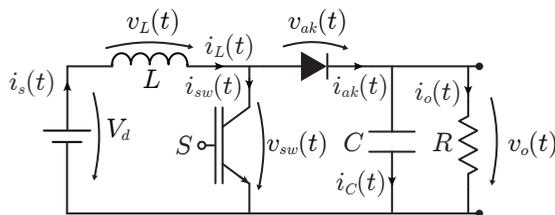


Figura 2.1 Esquema del convertidor elevador.

2.2 Modo de Conducción Continua

Se va a realizar un primer análisis suponiendo que el convertidor se encuentra en Modo de Conducción Continua (MCC), modo de operación del convertidor donde la intensidad que circula por la bobina nunca se llega a anular.

Para realizar el análisis del convertidor es necesario diferenciar dos tramos o intervalos de funcionamiento, uno en el que el semiconductor de potencia se encuentra en estado de conducción (ON), el cual se denominará intervalo de conducción; y otro en el que el semiconductor de potencia está cortado (OFF), el denominado intervalo de no conducción. Según el intervalo de operación, el circuito a analizar será distinto, tal y como se observa en la fig. 2.2. Como se observa, el circuito de la fig. 2.2a corresponde al intervalo de conducción, en el que el interruptor de potencia está en conducción, mientras que el diodo se encuentra en polarización inversa estando cortado. Por otro lado, el circuito de la fig. 2.2b corresponde al intervalo de no conducción, en el que el semiconductor está en estado de corte. Debido a ello, el diodo se encuentra en polarización directa dejando pasar la corriente a través de él hacia la carga.

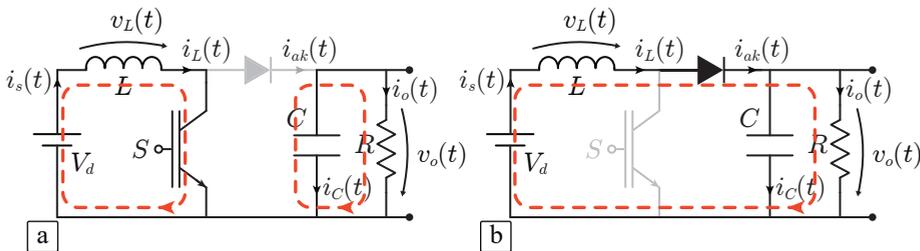


Figura 2.2 Intervalos de funcionamiento del convertidor elevador en MCC.

2.2.1 Análisis del intervalo de conducción

Si se empieza analizando el circuito en el intervalo de conducción mostrado en la fig. 2.2a, se obtienen las siguientes expresiones sin más que aplicar las leyes de Kirchoff:

$$v_L = V_d \quad (2.1)$$

$$i_C = -i_o \quad (2.2)$$

$$i_s = i_L \quad (2.3)$$

$$v_{ak} = -v_o \quad (2.4)$$

Se observa que efectivamente el diodo está cortado al presentar una tensión ánodo-cátodo negativa. Por otro lado, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de una bobina son las siguientes:

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.5)$$

$$i_L = \int \frac{v_L}{L} dt \quad (2.6)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (2.1) y (2.6), se llega a la conclusión de que la expresión de la corriente por la bobina en este primer intervalo del circuito en MCC es la siguiente:

$$i_L = \int \frac{v_L}{L} dt = \int \frac{V_d}{L} dt = \frac{V_d}{L} t + i_L^{min} \quad (2.7)$$

Como se observa, la ecuación (2.7) nos indica que la corriente que circula por la bobina es una recta con pendiente positiva $m_1 = V_d/L$, partiendo de un valor inicial de corriente igual a i_L^{min} .

Por otro lado, según la ecuación (2.2), la corriente por el condensador será negativa y constante asumiendo que el rizado de tensión de salida (y por lo tanto el rizado de la corriente en la carga) es muy pequeño comparado con su valor medio.

2.2.2 Análisis del intervalo de no conducción

Las ecuaciones que definen el comportamiento del circuito en el intervalo de no conducción en MCC representado en la fig. 2.2b, son las siguientes expresiones:

$$v_L = V_d - v_o \quad (2.8)$$

$$i_L = i_{ak} = i_C + i_o \quad (2.9)$$

$$i_s = i_L \quad (2.10)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (2.6) y (2.8), se obtiene que la expresión de la corriente por la bobina en este intervalo es:

$$i_L = \int \frac{v_L}{L} dt = \int \frac{V_d - v_o}{L} dt = \frac{V_d - v_o}{L} t + i_L^{max} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) indica que la corriente por la bobina durante este intervalo es una recta con pendiente $m_2 = (V_d - v_o)/L$. Esta pendiente m_2 debe ser necesariamente negativa. Esto se puede asegurar al recordar que se asume que el convertidor dc/dc se encuentra en régimen permanente y que la corriente en la bobina no puede cambiar instantáneamente su valor. Por tanto, la corriente por la bobina al terminar el intervalo de no conducción debe ser igual a la corriente inicial de la bobina en el intervalo de conducción. Por tanto, al cumplirse en el intervalo de conducción que la corriente por la bobina era creciente, en el intervalo de no conducción debe ser una corriente decreciente, forzándose entonces a que la pendiente m_2 sea negativa. Por tanto se debe cumplir que $(V_d - v_o) < 0$, llegándose necesariamente a la conclusión de que el convertidor que se está analizando es de tipo elevador ya que la tensión de entrada debe ser menor que la tensión de salida. Como resumen de todo lo expuesto anteriormente en este análisis del convertidor dc/dc tipo elevador en MCC se obtienen las gráficas características del convertidor representadas en la fig. 2.3.

2.3 Modo de Conducción Discontinua

El modo de conducción discontinua (MCD) del convertidor elevador se caracteriza por cumplir que la intensidad que circula por la bobina se hace cero durante algún tiempo del periodo de trabajo T . En el modo MCD del convertidor elevador, además de los dos

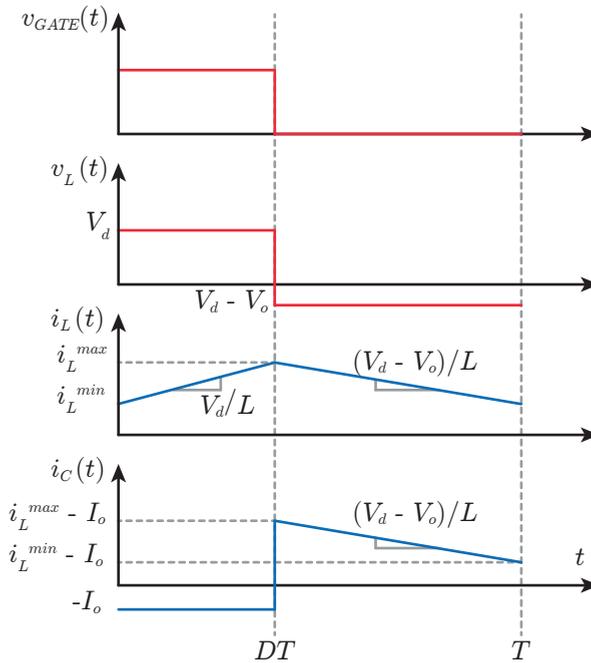


Figura 2.3 Curvas características del convertidor elevador en MCC.

intervalos de funcionamiento que fueron analizados en la operación del convertidor en MCC (intervalo de conducción e intervalo de no conducción), aparecerá un nuevo intervalo de funcionamiento en el que, al anularse la corriente por la bobina, consecuentemente la corriente que circula por el diodo es también nula, con lo que el diodo se corta.

En resumen, en MCD el convertidor elevador presenta tres circuitos equivalentes asociados a los diferentes intervalos de funcionamiento del mismo, tal y como muestra la fig. 2.4. Los circuitos representados en las fig. 2.4a y fig. 2.4b son iguales a los que aparecían en el MCC asociados a sus dos intervalos de funcionamiento. La diferencia en el MCD es que el intervalo de no conducción representado en la fig. 2.4b no acaba al final del periodo T , sino que la corriente en la bobina llega a anularse antes de dicho instante. Así, aparece un tercer intervalo de funcionamiento (mostrado en la fig. 2.4c) en el que tanto el semiconductor de potencia como el diodo están cortados. Por lo tanto, los análisis de los circuitos de la fig. 2.4a y fig. 2.4b darán lugar a las mismas ecuaciones que en el MCC, y lo único que se debe realizar en el MCD es el análisis del circuito de la fig. 2.4c, del que se extraen las siguientes expresiones:

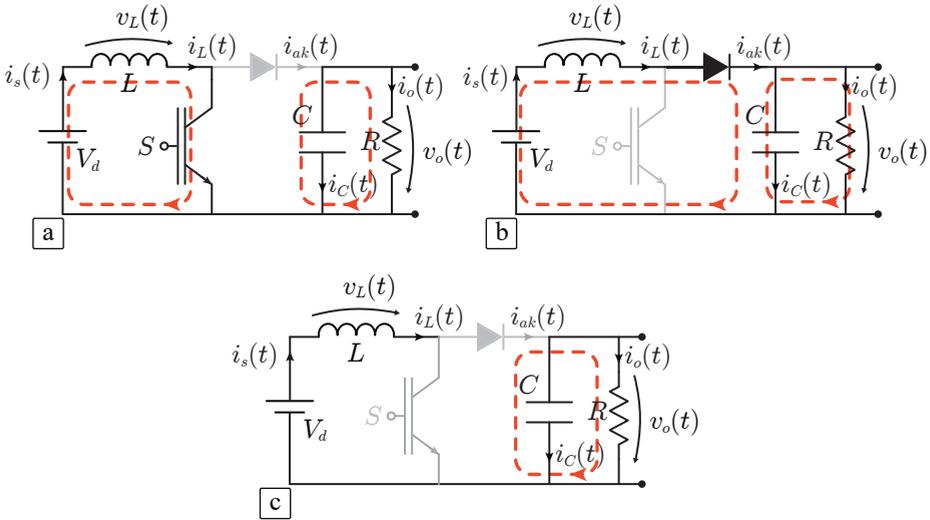


Figura 2.4 Intervalos de funcionamiento del convertidor elevador en MCD.

$$v_L = 0 \tag{2.12}$$

$$i_C = -i_o \tag{2.13}$$

$$i_s = i_L = 0 \tag{2.14}$$

Como en el MCD hay un intervalo más de funcionamiento, habrá que definir el tiempo de duración de cada uno de los tres intervalos de funcionamiento. Así, DT es la fracción del periodo de trabajo correspondiente al intervalo de conducción (correspondiente al circuito de la fig. 2.4a), D_1T se define como la fracción de periodo de trabajo correspondiente al intervalo de no conducción (correspondiente al circuito de la fig. 2.4b). Por tanto, D_1T es el tiempo que el diodo está en estado de conducción. El resto de tiempo hasta completar el periodo, igual a $(1 - D - D_1)T$, será el tiempo correspondiente al circuito de la fig. 2.4c donde la corriente por la bobina es nula y tanto el interruptor de potencia como el diodo se encuentran en estado de corte. La evolución de las formas de onda características del convertidor elevador en un periodo de trabajo en MCD es la mostrada en la fig. 2.5.

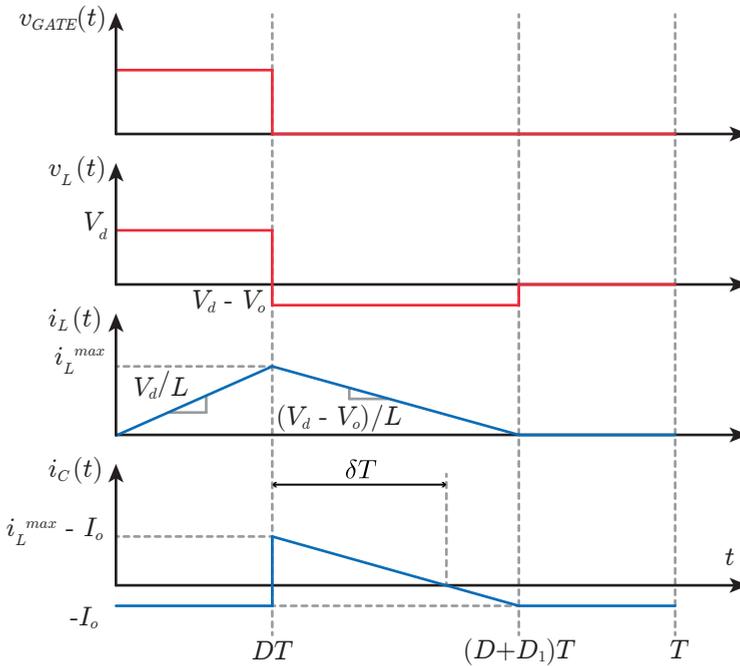


Figura 2.5 Curvas características del convertidor elevador en MCD.

2.4 Límite entre modos de conducción

El límite entre los modos de operación MCC y el MCD está marcado por el instante en el que la corriente por la bobina llega a ser cero, pero sólo durante un instante justo al final del periodo de trabajo, y no durante un intervalo de tiempo. Este caso se puede considerar como un caso particular del MCC donde $i_L^{min} = 0$. Esto se observa mejor en la fig. 2.6 donde se ha representado la corriente en la bobina cuando el convertidor está trabajando justo en el límite entre ambos modos de funcionamiento (i_{LB}).

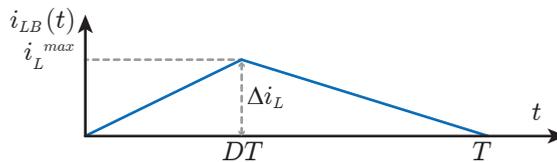


Figura 2.6 Corriente por la bobina en un convertidor elevador trabajando en el límite entre los modos MCC y MCD.

Si se calcula la corriente media por la bobina con el convertidor trabajando en el límite entre el MCC y el MCD, se obtendrá I_{LB} . Para conocer el estado de operación del convertidor (MCC o MCD), si en el convertidor se cumple que $I_L > I_{LB}$, éste estará en trabajando en MCC; por otro lado, si se cumple que $I_L < I_{LB}$, estará operando en MCD; y si $I_L = I_{LB}$ estará trabajando justo en el límite entre ambos modos de conducción.

$$I_{LB} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{LB} dt = \frac{1}{T} T \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{\Delta i_L}{2}. \quad (2.15)$$

donde Δi_L es el rizado de corriente en la bobina, que coincide con i_L^{max} cuando el convertidor está trabajando justo en el límite de ambos modos de funcionamiento.

Este mismo razonamiento se puede hacer para la corriente media en la carga, considerando la variable I_{oB} como valor para averiguar en qué modo de conducción se encuentra operando el convertidor. Al igual que cuando se consideró la corriente por la bobina, hay tres posibles casos: si en un convertidor se da que $I_o > I_{oB}$, éste estará trabajando en el MCC; si $I_o < I_{oB}$, estará operando en MCD; y si $I_o = I_{oB}$, estará trabajando justo en el límite entre ambos modos. Para calcular I_{oB} se utilizan todas las expresiones de i_o para cada uno de los intervalos de funcionamiento del convertidor:

$$\begin{aligned} I_{oB} &= \frac{1}{T} \int_0^T i_{oB} dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} -i_{CB} dt + \int_{DT}^T (i_{LB} - i_{CB}) dt \right] = \\ &= \frac{1}{T} (1 - D) T \frac{\Delta i_L}{2} = (1 - D) I_{LB} \end{aligned} \quad (2.16)$$

donde se ha tenido en cuenta que el convertidor está operando en régimen permanente y por tanto se debe cumplir que la corriente media por el condensador en un periodo de trabajo debe ser nula ya que la tensión inicial y final en el periodo de trabajo del condensador debe coincidir. Por tanto, para cualquier punto de operación del convertidor (incluyendo aquel que marca el límite entre MCC y MCD) se debe cumplir que:

$$I_c = \frac{1}{T} \int_0^T i_c dt = 0 \quad (2.17)$$

2.5 Parámetros del convertidor elevador en MCC

2.5.1 Rizado de corriente en la bobina

El rizado de la corriente en la bobina en MCC se define como:

$$\Delta i_L = i_L^{max} - i_L^{min} \quad (2.18)$$

siendo i_L^{max} e i_L^{min} los valores máximo y mínimo de la corriente que circula por la bobina durante el periodo de trabajo T , cuyos valores a priori se desconocen. Sin embargo, se puede hacer uso de las expresiones (2.7) y (2.11), que indicaban la evolución de la corriente en los dos intervalos de funcionamiento. De este modo, se puede determinar el valor de Δi_L de dos modos diferentes en función de las pendientes de la corriente por la bobina:

$$\Delta i_L = m_1 DT = \frac{V_d}{L} DT \quad (2.19)$$

$$\Delta i_L = -m_2(1-D)T = \frac{V_o - V_d}{L}(1-D)T \quad (2.20)$$

Nótese que se hará uso del valor constante V_o en lugar de v_o para la tensión de salida, tal y como se indicó en las suposiciones iniciales del análisis de los convertidores de potencia incluidos en el Capítulo 1.

2.5.2 Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida

Partiendo de las expresiones (2.19) y (2.20), se obtiene lo siguiente:

$$\Delta i_L = \frac{V_d}{L} DT = \frac{V_o - V_d}{L}(1-D)T \quad (2.21)$$

Partiendo de la expresión (2.21), se puede operar para conocer la relación que existe entre las tensiones de entrada y salida del convertidor elevador en MCC.

$$\begin{aligned}V_d D &= (V_o - V_d)(1 - D) \\V_d D &= V_o - V_o D - V_d + V_d D \\V_o &= \frac{V_d}{1 - D}\end{aligned}\tag{2.22}$$

La expresión (2.22) es la que relaciona la tensión de salida con la tensión de entrada en función del ciclo de trabajo (también llamado duty cycle utilizando el término en lengua inglesa) para el convertidor elevador en MCC. Además, es la expresión donde mejor se aprecia que el análisis se está centrando en un convertidor de tipo elevador ya que si $D = 0$, V_o será igual a V_d , mientras que si D tiende a 1, V_o tenderá a infinito. Es decir, el rango de valores que tomará V_o será siempre mayor o igual al valor de V_d , portando sentido a llamar a este convertidor como convertidor de tipo elevador.

2.5.3 Corriente media por la bobina

La corriente media que circula por la bobina se define teóricamente como:

$$I_L = \frac{1}{T} \int_0^T i_L dt\tag{2.23}$$

Como ya se dispone de la expresión de i_L en todo el periodo de trabajo, esta integral se puede calcular analíticamente. Sin embargo, otro modo de calcular I_L es hallar el área bajo la curva de i_L , con ayuda de la fig. 2.3. El área bajo esta curva se puede descomponer como un rectángulo de base T y de altura i_L^{min} , y un triángulo de base T y altura Δi_L . Empleando esto, se puede obtener que:

$$\begin{aligned}I_L &= \frac{1}{T} \left(T i_L^{min} + T \frac{\Delta i_L}{2} \right) \\I_L &= i_L^{min} + \frac{\Delta i_L}{2}\end{aligned}\tag{2.24}$$

Despejando i_L^{min} de la ecuación (2.24), y recordando la definición del rizado de corriente por la bobina Δi_L expresada en la ecuación (2.18), se puede obtener lo siguiente:

$$i_L^{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.25)$$

$$i_L^{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2.26)$$

Las ecuaciones (2.25) y (2.26) permiten saber que el valor medio de la corriente por la bobina es justo el valor medio de los valores límite del rizado de la corriente que circula por ella, es decir:

$$I_L = \frac{i_L^{max} + i_L^{min}}{2} \quad (2.27)$$

2.5.4 Corriente media de salida

Se define la corriente media a la salida del convertidor como:

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_o dt \quad (2.28)$$

Haciendo uso de las ecuaciones que describen i_o en los diferentes intervalos de funcionamiento del circuito, (2.2) y (2.9), se puede obtener que

$$I_o = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} -i_C dt + \int_{DT}^T (i_L - i_C) dt \right) \quad (2.29)$$

Además, al asumir que el circuito está operando en régimen permanente, tal como se indicó anteriormente en la expresión (2.17), debe cumplirse que la corriente media por el condensador debe ser nula. Sabiendo esto, la ecuación (2.29) se simplifica, obteniéndose:

$$I_o = \frac{1}{T} \int_{DT}^T i_L dt \quad (2.30)$$

Esta integral puede resolverse calculando el área bajo la curva de i_L , esta vez sólo en el intervalo de no conducción, llegándose a que:

$$I_o = \frac{1}{T} \left((1-D)T i_L^{min} + (1-D)T \frac{\Delta i_L}{2} \right)$$

$$I_o = (1-D) \left(i_L^{min} + \frac{\Delta i_L}{2} \right) = (1-D)I_L \quad (2.31)$$

2.5.5 Corriente media de entrada

Gracias a que se tienen las expresiones (2.3) y (2.10), se puede calcular la corriente media de la fuente de entrada como:

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T i_s dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_L dt = I_L \quad (2.32)$$

2.5.6 Rizado de la tensión de salida

El rizado de la tensión de salida puede expresarse de diferentes modos. Así, se puede definir como un rizado de tensión expresado en voltios, en por unidad, o en porcentaje.

$$\Delta v_o [V] = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.33)$$

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\text{pu}] = \frac{\Delta Q}{CV_o} \quad (2.34)$$

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\%] = 100 \frac{\Delta Q}{CV_o} \quad (2.35)$$

siendo ΔQ el valor absoluto de la variación de carga (bien sea positiva o negativa) en el condensador durante un periodo de trabajo. Esto se puede calcular como el área positiva o negativa de la corriente i_C , en valor absoluto.

Como ejemplo, para el convertidor elevador trabajando en MCC el rizado de la tensión de salida en por unidad se puede calcular como:

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\text{pu}] = \frac{\Delta Q}{CV_o} = \frac{DTI_o}{CV_o} \tag{2.36}$$

Nótese que para el cálculo de la expresión (2.36), se ha tenido en cuenta la forma de onda de i_C representada en la fig. 2.3, que suponía que se cumplía que $(i_L^{\text{min}} - I_o) \geq 0$. Sin embargo, esta condición no es siempre válida y se debe también analizar el caso contrario, es decir, cuando se cumpla que $(i_L^{\text{min}} - I_o) < 0$. En este caso, como se observa en la fig. 2.7, lo más sencillo para calcular la variación de carga ΔQ del condensador de salida es tener en cuenta el área del triángulo sombreado.

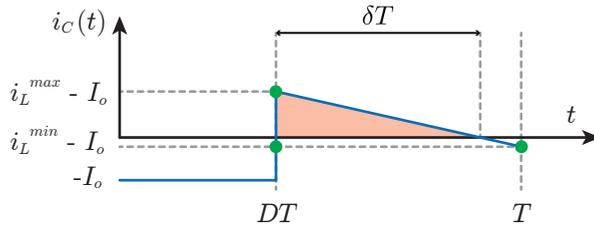


Figura 2.7 Evolución de la corriente por el condensador de salida del convertidor elevador en MCC suponiendo que $(i_L^{\text{min}} - I_o) < 0$.

Sin embargo, no se conoce cuándo la corriente por el condensador se anula, es decir, no se conoce la base de dicho triángulo definido como δT . Para calcular esto, se hará uso de la propiedad de semejanza de triángulos entre el triángulo sombreado ya mencionado, y el triángulo descrito por los tres vértices marcados en verde en la fig. 2.7. Por tanto, se debe cumplir que:

$$\begin{aligned}\frac{\delta T}{(1-D)T} &= \frac{i_L^{max} - I_o}{\Delta i_L} \\ \delta &= \frac{(i_L^{max} - I_o)(1-D)}{\Delta i_L}\end{aligned}\quad (2.37)$$

Y por lo tanto, el valor del rizado de tensión de salida en por unidad se podrá obtener utilizando la expresión del área de un triángulo, llegándose a que:

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\text{pu}] = \frac{\delta T (i_L^{max} - I_o)}{2CV_o} = \frac{(i_L^{max} - I_o)^2 (1-D)T}{2CV_o \Delta i_L} \quad (2.38)$$

2.6 Parámetros del convertidor en MCD

2.6.1 Rizado de la corriente en la bobina

Partiendo de la forma de onda de la corriente en la bobina representada en la fig. 2.5, el rizado de corriente por la bobina se determina como:

$$\Delta i_L = i_L^{max} = \frac{V_d}{L}DT = \frac{V_o - V_d}{L}D_1T \quad (2.39)$$

2.6.2 Relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida

Gracias a la expresión (2.39), se puede obtener la relación que existe entre la tensión de salida V_o , la tensión de entrada V_d , el valor de duty cycle D y el parámetro D_1 :

$$\begin{aligned}
 V_d D &= (V_o - V_d) D_1 \\
 V_o &= V_d \frac{D + D_1}{D_1}
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

2.6.3 Corriente media por la bobina

Se procede determinando el área bajo la curva de i_L representada en la fig. 2.5:

$$I_L = \frac{1}{T} \int_0^T i_L dt = \frac{1}{T} (D + D_1) T \frac{\Delta i_L}{2} = (D + D_1) \frac{\Delta i_L}{2} \tag{2.41}$$

2.6.4 Corriente media de salida

Se define teóricamente la corriente media en la carga como:

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_o dt \tag{2.42}$$

En este caso, haciendo uso de las expresiones de la corriente i_o en cada uno de los intervalos de funcionamiento del convertidor en MCD, introducidas en (2.2), (2.9) y (2.11), se tiene que:

$$I_o = \frac{1}{T} \int_0^T i_o dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} -i_C dt + \int_{DT}^{(D+D_1)T} (i_L - i_C) dt + \int_{(D+D_1)T}^T -i_C dt \right)$$

Una vez más, haciendo uso de que la integral en todo el periodo de trabajo de i_C es cero ya que suponemos que el convertidor está trabajando en régimen permanente, se tiene que:

$$I_o = \frac{1}{T} \int_{DT}^{(D+D_1)T} i_L dt = \frac{1}{T} D_1 T \frac{\Delta i_L}{2} = D_1 \frac{\Delta i_L}{2} \tag{2.43}$$

2.6.5 Corriente media de entrada

Gracias a que se tienen las expresiones (2.3), (2.10) y (2.14), se puede calcular la corriente media de la fuente de entrada como:

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^T i_s dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_L dt = I_L \tag{2.44}$$

2.6.6 Rizado de la tensión de salida

Como ejemplo, se puede determinar el rizado de tensión de salida en por unidad como:

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\text{pu}] = \frac{\Delta Q}{CV_o} = \frac{\delta T (i_L^{\text{max}} - I_o)}{2CV_o} \tag{2.45}$$

donde se ha tenido en cuenta la evolución de la corriente por el condensador de salida (representada en la fig. 2.8).

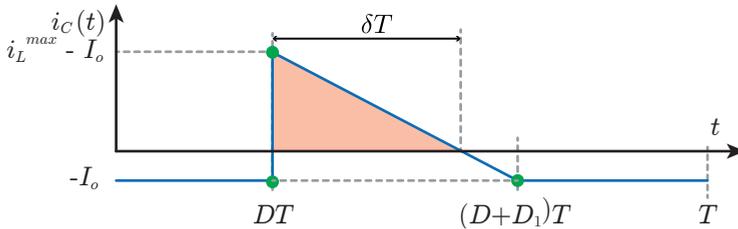


Figura 2.8 Evolución de la corriente por el condensador de salida del convertidor operando en MCD.

Procediendo del mismo modo que el indicado anteriormente en MCC, es decir, aplicando la propiedad de semejanza de triángulos entre el triángulo sombreado y el definido por los vértices verdes, se puede obtener el valor de δ como:

$$\frac{\delta T}{D_1 T} = \frac{i_L^{max} - I_o}{\Delta i_L}$$

$$\delta = \frac{D_1 (i_L^{max} - I_o)}{\Delta i_L} \quad (2.46)$$

Finalmente, el valor del rizado de tensión a la salida es:

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} [\text{pu}] = \frac{D_1 T (i_L^{max} - I_o)^2}{2 C V_o \Delta i_L} \quad (2.47)$$

2.7 Balance de potencia

En el capítulo 1 se introdujo el concepto de balance de potencia, obteniéndose la siguiente expresión:

$$V_d I_s = V_o I_o \quad (2.48)$$

En el convertidor elevador, tanto en el MCC como en el MCD, se cumple que la corriente media suministrada por la fuente de entrada es igual a la corriente media por la bobina: $I_s = I_L$. De este modo, aplicar el balance de potencia conlleva que:

$$V_d I_L = V_o I_o \quad (2.49)$$

En esta expresión, habrá que sustituir las expresiones correspondientes a I_L e I_o dependiendo del modo de funcionamiento en el que se encuentre el convertidor.

2.8 Corrientes y tensiones máximas por el diodo y el interruptor de potencia

Observando los circuitos equivalentes de la fig. 2.2 y la fig. 2.4, se puede conocer la evolución de las corrientes y las tensiones por el diodo (v_{ak} e i_{ak}) y de las correspondientes del interruptor de potencia (v_{sw} e i_{sw}). La evolución de dichas tensiones y corrientes, tanto en MCC como en MCD se puede observar en la fig. 2.9a y fig. 2.9b, respectivamente.

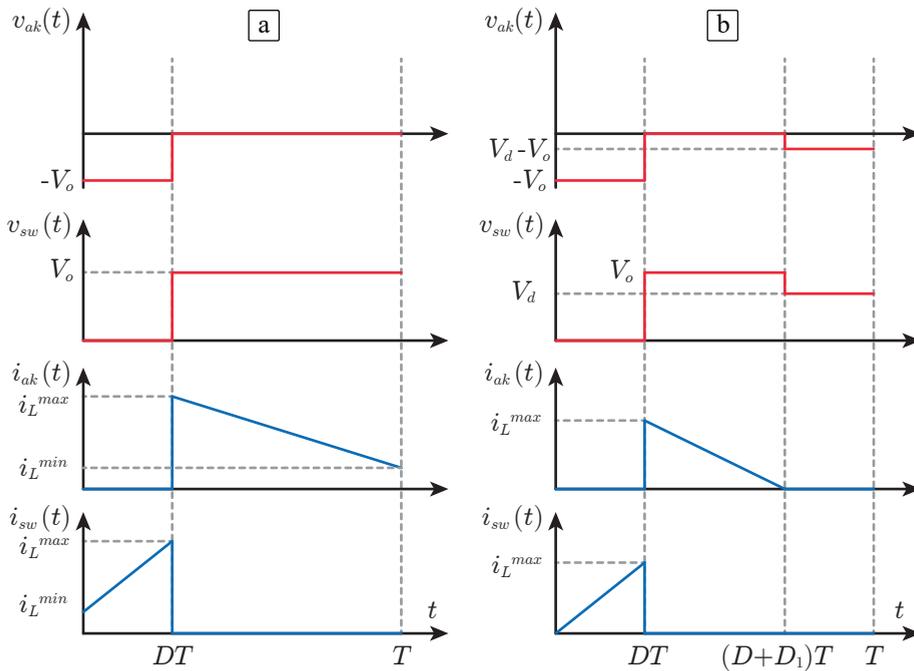


Figura 2.9 Evolución de las corrientes y tensiones por el diodo y el semiconductor de potencia cuando el convertidor elevador está operando en a) MCC b) MCD.

De este modo, las tensiones y corrientes máximas por el diodo y por el interruptor de potencia, estando operando el convertidor en MCC o en MCD, son las siguientes:

$$|v_{ak}^{max}| = V_o \quad (2.50)$$

$$i_{ak}^{max} = i_L^{max} \quad (2.51)$$

$$v_{sw}^{max} = V_o \quad (2.52)$$

$$i_{sw}^{max} = i_L^{max} \quad (2.53)$$