

Un método general para estudiar los modos de conducción múltiples en convertidores CC/CC con un único transistor

Javier Sebastián¹, Duberney Murillo-Yarce², Carlos Restrepo², Aitor Vázquez¹ y Diego G. Lamar¹
1) Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación. Campus de Viesques s/n, Universidad de Oviedo 33204 Gijón. España. Email: sebas@uniovi.es
2) Departamento de Electromecánica y Conversión de Energía. Facultad de Ingeniería. Universidad de Talca. Curicó. Chile. Email: duberney.murillo@utalca.cl

Resumen— En este artículo se va a describir un método general para estudiar los múltiples modos de conducción que existen cuando un convertidor CC/CC tiene varias bobinas y varios diodos. El método se basa en encontrar el número n de diodos en ramas inductivas y a partir de ese número generar un espacio de n dimensiones construido con los parámetros de conducción "k" asociados a la bobina o conjunto de bobinas en serie con cada diodo. En el espacio k se va a dibujar una recta, llamada trayectoria, que describe la evolución del punto de trabajo del convertidor cuando cambia la carga. Esta trayectoria atraviesa recintos de n dimensiones que corresponden directamente con los modos de trabajo. Estos modos de trabajo se definen en función de la situación de conducción de los n diodos al final del periodo de conmutación. La distribución de recintos en el espacio k cambia con el tipo de control usado (en bucle abierto o en bucle cerrado) y con los parámetros que definen la operación del convertidor en cada uno de estos controles. Como un ejemplo del uso del método propuesto, se estudian los modos de conducción de un convertidor SEPIC con un diodo adicional en la entrada. En este caso, los cuatro modos de conducción han sido estudiados exhaustivamente, calculando las relaciones de conversión en cada modo y las ecuaciones de las curvas que definen las fronteras entre modos de conducción con ambos tipos de control. Todas las predicciones teóricas consecuencia del análisis propuesto han sido verificadas por simulación con PSIM.

Palabras clave— Modos de conducción en convertidores CC/CC, Convertidor SEPIC.

I. INTRODUCCIÓN

ES bien conocido que las características de los convertidores CC/CC con una única bobina y un único diodo cambian notablemente con el modo de conducción. Se define el Modo Continuo de Conducción (MCC) como aquel en el que la corriente por la bobina del convertidor nunca llega a cero, mientras que en el llamado Modo Discontinuo de Conducción (MDC) la corriente llega a cero y queda enclavada en este valor hasta que la puesta en conducción del transistor hace que vuelva a empezar a crecer [1]. En MCC, los convertidores habituales presentan baja impedancia de salida en bucle abierto y relaciones de conversión que, además de ser independientes de la carga (propiedad intrínsecamente ligada a la característica anterior), sólo dependen del ciclo de trabajo d . Esta situación varía notablemente en MDC, donde la relación de conversión

sigue dependiendo del ciclo de trabajo d , pero también depende de la carga, la inductancia de la bobina y la frecuencia de conmutación. Todo esto se puede expresar matemáticamente del siguiente modo:

$$N = \left[\frac{V_o}{V_g} \right]_{MCC} = f_{MCC}(d), \quad (1)$$

$$M = \left[\frac{V_o}{V_g} \right]_{MDC} = f_{MDC}(d, k), \quad (2)$$

donde V_o es la tensión de salida, V_g es la de entrada, N es la relación de conversión en MCC, M es la relación de conversión en MDC y k es un parámetro adimensional que sirve para valorar en cuál de los dos modos opera el convertidor. Con este fin, se definen los valores frontera entre modos (también llamados "críticos") correspondientes a controlar el convertidor en bucle abierto y en bucle cerrado, de la siguiente manera:

$$k_{crit_BA} = f_{crit_BA}(d), \quad (3)$$

$$k_{crit_BC} = f_{crit_BC}(M). \quad (4)$$

Las condiciones para operar en MCC son, en función del tipo de control usado:

$$k > k_{crit_BA}, \quad (5)$$

$$k > k_{crit_BC}, \quad (6)$$

y para operar en MDC:

$$k < k_{crit_BA}, \quad (7)$$

$$k < k_{crit_BC}. \quad (8)$$

Cuando el convertidor tiene más de un diodo en ramas inductivas, la situación se complica, y no se ha planteado aún un método sistemático para poder determinar los modos de conducción que aparecen. Proponer un método que supla este vacío es precisamente el objetivo de este artículo.

II. PLANTEAMIENTO DEL MÉTODO

El método propuesto consta de los siguientes pasos:

A. Determinación del número n

El número n es el número de diodos no redundantes que están en una rama inductiva en el momento en el que el transistor del convertidor deja de conducir. Para ilustrar el cálculo del número n nos vamos a referir a los circuitos de la Fig. 1. En la Fig. 1a aparecen 5 diodos. Los diodos D_1 , D_2 y D_3 están en serie con bobinas o con combinaciones en paralelo de

las mismas. Sin embargo, D_4 no está en una rama inductiva (sino capacitiva), por lo que no debe ser contabilizado en la determinación de n . Eliminada la rama en la que está D_4 para esta determinación, se observa que D_5 es un diodo redundante con D_1 , D_2 y D_3 . Como consecuencia de lo dicho $n = 3$ en este caso. En el caso de la Fig. 1b, D_3 no es redundante con D_1 y D_2 , ya que D_3 impide la inversión de corriente en L_3 , lo que no ocurriría si existiera un cortocircuito en vez de D_3 . Por tanto, en este caso también $n = 3$.

B. Cálculo del número de modos de conducción

El número de modos de conducción se determina muy fácilmente definiendo un vector $D = (D_1, D_2, D_3, \dots, D_n)$, en el que el valor de D_x es 1 si el diodo correspondiente está conduciendo al final de periodo de conmutación y 0 si está en estado de bloqueo. Por tanto, en total habrá 2^n posibles valores del vector D . El valor $D = (1, 1, 1, \dots, 1)$ corresponde al MCC, mientras que los $2^n - 1$ casos restantes son MDCs.

C. Trayectorias del convertidor en el espacio k

Cada diodo que sirve para contabilizar el número n está en una rama inductiva, en la que el diodo impide la inversión de la corriente. Si en la rama inductiva en la que está el diodo D_x existe una única bobina L_x , entonces se define el parámetro k_x , de la siguiente forma:

$$k_x = \frac{2L_x}{RT}, \quad (9)$$

donde R es la resistencia de carga conectada a la salida del convertidor, T es el periodo de conmutación y x cumple $1 \leq x \leq n$. Si en la rama inductiva en la que está el diodo D_x confluyen otras ramas con bobinas, la bobina L_x que servirá para definir k_x en (9) será la bobina que no tenga un diodo en serie. Si todas lo tuvieran, D_x sería un diodo redundante que podría eliminarse. El conjunto de valores de k_x definen un espacio de n dimensiones, al que vamos a denominar "espacio k ". Los distintos valores que va tomando k_x verifican:

$$k_n = \frac{L_n}{L_{n-1}} k_{n-1}, \quad k_{n-1} = \frac{L_{n-1}}{L_{n-2}} k_{n-2} \dots k_2 = \frac{L_2}{L_1} k_1. \quad (10)$$

Cada una de las ecuaciones (10) determina un hiperplano de $n-1$ dimensiones en el espacio k . En total hay $n-1$ hiperplanos de $n-1$ dimensiones. Su intersección viene dada por el conjunto de ecuaciones (10) y es siempre una recta dibujada en el espacio k . Esta recta se llama "trayectoria" en el espacio k . La trayectoria siempre pasa por el origen del espacio k y queda completamente

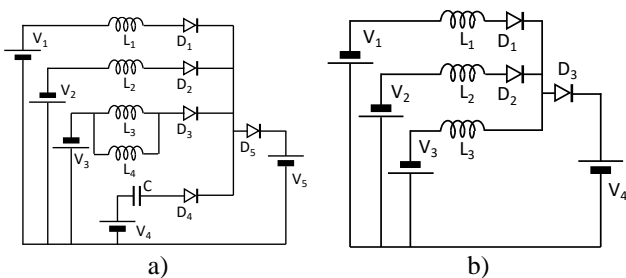


Fig. 1. Ejemplos de circuitos equivalentes durante el estado de bloqueo del transistor. a) Caso con diodo redundante. b) Caso sin diodos redundantes.

definida una vez que se conoce el valor de cada L_x . El punto de trabajo del convertidor en el espacio k será siempre un punto de la trayectoria. Ese punto será el origen del espacio k cuando R tienda a infinito. Nótese que la trayectoria en el espacio k es absolutamente independiente del valor del ciclo de trabajo d , o de los valores de las tensiones de entrada y salida, sólo dependiendo del valor de R una vez que los valores de las inductancias y la frecuencia de conmutación se han fijado.

D. Fronteras entre recintos en el espacio k

En el espacio k , cada modo de conducción será un recinto de n dimensiones, es decir una parte del espacio k . El MCC corresponderá a una zona del espacio k claramente alejada del origen, ya que este modo de conducción siempre corresponde a valores relativamente pequeños de R . La relación de conversión en este modo se seguirá expresando por (1). El resto del espacio k corresponderá a los $2^n - 1$ MDCs y las relaciones de conversión en cada uno de estos modos se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_m = \left[\frac{v_o}{v_g} \right]_{DCM_m} = f_{DCM_m}(d, k_1, k_2, \dots, k_n), \quad (11)$$

donde m cumple $1 \leq m \leq 2^n - 1$. Al igual que ocurre en el caso bien conocido de $n = 1$, las fronteras entre modos de conducción van a depender de la estrategia de control empleada. Así, habrá unas determinadas fronteras si el convertidor opera en bucle abierto a ciclo de trabajo y tensión de entrada constantes, y otras si opera en bucle cerrado a relación de conversión y tensión de entrada constantes. Las fronteras siempre se pueden calcular igualando relaciones de conversión de dos modos de conducción. Si como resultado de esta igualación la ecuación resultante tiene solución, esta solución será la frontera entre los dos modos y los modos serán adyacentes. La solución definirá un espacio de $n-1$ dimensiones, es decir, una hipersuperficie en el espacio k . Puede también ocurrir que haya fronteras entre tres modos de conducción, obteniéndose esta frontera igualando las tres relaciones de conversión correspondientes. En este caso, la frontera será una hipercurva de $n-2$ dimensiones. Procediendo recursivamente de esta manera puede ocurrir que exista un espacio de 0 dimensiones (un punto en el espacio k) que sea frontera de todos los modos de conducción. Por supuesto, si al plantear la resolución de la igualación de relaciones de conversión entre modos de conducción no existe solución, entonces las regiones no son adyacentes. Finalmente merece la pena comentar que, aunque la igualación de las relaciones de conversión es un método general para localizar fronteras entre modos, a veces los cálculos son más sencillos de realizar desde la condición siguiente:

$$\Delta i_x = 2I_x, \quad (12)$$

siendo Δi_x el rizado pico-pico de la corriente i_x e I_x su valor medio. Ésta sería la condición en la frontera entre los modos en los que el diodo D_x pasa de conducir a no conducir al final del intervalo de bloqueo del transistor.

E. Aplicación del método a $n \leq 3$

Si $n = 1$, estamos en el caso bien conocido, en el que sólo existe 1 MCC y 1 MDC, siendo válidas las expresiones (1)-(8).

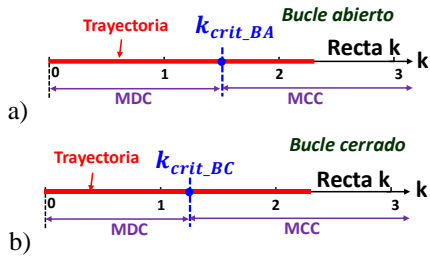


Fig. 2. Trayectorias en el espacio k cuando $n = 1$: a) Bucle abierto con $k_{crit_BA} = 1.5$. b) Bucle cerrado con $k_{crit_BC} = 1.25$.

El espacio k es una recta, en la que la trayectoria es otra recta dibujada en la primera. La frontera entre modos es un punto. La Fig. 2 ilustra todo esto.

Si $n = 2$, entonces existe 1 MCC y 3 MDCs (Tabla I). El espacio k es un plano definido por los parámetros k_1 y k_2 (Fig. 3a), en el que se puede dibujar la trayectoria del convertidor, que, como siempre, es una recta que pasa por el origen y cuya pendiente es $\alpha = L_2/L_1$. Las fronteras entre modos adyacentes son curvas en el plano k_1k_2 . Las curvas que delimitan las fronteras y los ejes (los parámetros k son siempre positivos) delimitan "regiones" en el plano k_1k_2 , una por cada modo de conducción. Existe una familia de "mapas" de regiones para control en lazo abierto, habiendo un mapa para cada valor del ciclo de trabajo d . De forma similar, existe otra familia de mapas de regiones en bucle cerrado, existiendo un mapa para cada valor de la relación de conversión del convertidor. Las fronteras entre regiones se calculan a partir de las relaciones de conversión entre modos. Así, por ejemplo, la frontera entre las regiones MDC2 y MDC3 en control en bucle abierto se calcularía igualando dos expresiones de la forma (11), ambas con $n = 2$, pero una con $m = 2$ y la otra con $m = 3$. Despejando, por ejemplo, el valor de k_2 , que vamos a llamar $k_{2,crit_2-3_BA}$ porque corresponde a la frontera entre las regiones MDC2 y MDC3 en bucle abierto, se obtiene:

$$k_{2,crit_2-3_BA} = f_{crit_2-3_BA}(d, k_1). \quad (13)$$

Por supuesto, procediendo de igual manera, pero en bucle cerrado, se obtendrá:

$$k_{2,crit_2-3_BC} = f_{crit_2-3_BC}(M, k_1). \quad (14)$$

Además de estas ecuaciones, las regiones quedan limitadas por el hecho de que k_1 y k_2 son siempre positivos y por el margen de validez de las citadas ecuaciones. Así, en el ejemplo de la Fig. 3b, la ecuación (13) sólo es válida para valores de k_1 mayores que los de la abscisa del punto P_c y que sean compatibles con $k_2 \geq 0$.

Una vez que es conocida la trayectoria y el mapa de regiones a usar, la superposición de ambos en el plano k_1k_2 nos muestra las regiones (y, por tanto, los modos) por los que el convertidor

Tabla I: Modos de conducción con $n = 2$.

Vector D		Modo de conducción	Nombre de región
D ₁	D ₂		
1	1	MCC	MCC
1	0	MDC	MDC1
0	1	MDC	MDC2
0	0	MDC	MDC3

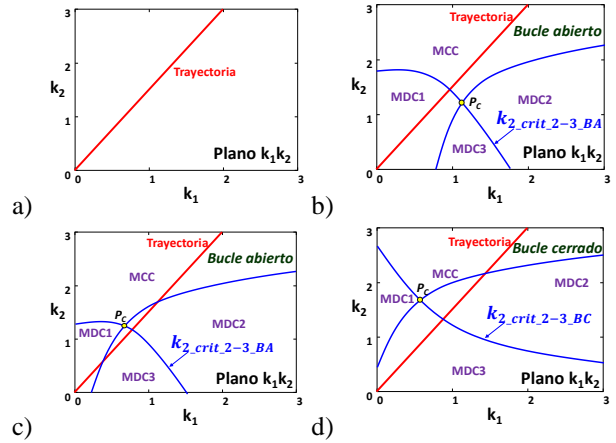


Fig. 3. a) Espacio k con $n = 2$ y trayectoria definida por $\alpha = 1.5$. b) Mapa de regiones en bucle abierto a un determinado ciclo de trabajo. c) Mapa de regiones en bucle abierto a otro ciclo de trabajo. d) Mapa de regiones en bucle cerrado a una determinada relación de conversión.

va a pasar cuando se vaya modificando su carga R . En el ejemplo de la Fig. 3b, el convertidor puede pasar exclusivamente del MCC al MDC1 cuando trabaja en bucle abierto con un determinado valor de d . Si cambia d y entonces el mapa de regiones es el de la Fig. 3c, la secuencia de modos al aumentar R sería (también en bucle abierto) MCC, MDC2, MDC3 y MDC1. Por el contrario, en bucle cerrado y con un determinado valor de la relación de conversión, la secuencia sería MCC, MDC2, y MDC3. Por supuesto, el trozo de trayectoria recorrido depende del margen de variación de R y puede cubrir sólo una parte de la trayectoria completa.

Si estamos en un caso con $n = 3$, entonces existe 1 MCC y 7 MDCs. El espacio k es un volumen definido por los parámetros k_1 , k_2 y k_3 . La intersección de los planos $k_3 = k_2 \cdot L_3/L_2$ y $k_2 = k_1 \cdot L_2/L_1$, que corresponden a particularizar (10), define la trayectoria de convertidor. Cada modo de conducción define un cuerpo tridimensional en el volumen $k_1k_2k_3$. Las fronteras entre cuerpos del volumen $k_1k_2k_3$ se calculan igualando relaciones de transformación, como en los casos anteriores. Igualando dos de ellas se podrá obtener una superficie frontera, mientras que con tres se obtendrá una curva frontera y con cuatro un punto común a todos los cuerpos. Por ejemplo, si los cuerpos correspondientes a los modos MDC4 y MDC5 tienen una superficie común en control en bucle abierto, ésta quedará definida por la ecuación:

$$k_{3,crit_4-5_BA} = f_{crit_4-5_BA}(d, k_1, k_2), \quad (15)$$

y si estos dos modos confluyen con un tercero (el MDC6), la frontera será la curva definida por las ecuaciones (15) y (16):

$$k_{3,crit_5-6_BA} = f_{crit_5-6_BA}(d, k_1, k_2). \quad (16)$$

III. EJEMPLO DE APLICACIÓN: EL CONVERTIDOR SEPIC CON DIODO EN LA ENTRADA

Como ejemplo de aplicación del método propuesto se va a utilizar el circuito de la Fig. 4. Se trata de un convertidor SEPIC [2], en el que se ha añadido un diodo a la entrada. Ésta es la situación topológica en la que se encuentra un convertidor SEPIC cuando tiene en la entrada un puente de diodos por ser usado en un Corrector del Factor de Potencia (CFP) [3] y [4].

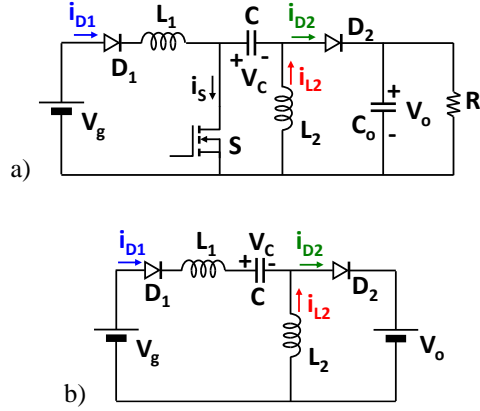


Fig. 4. a) SEPIC modificado añadiendo un diodo en la entrada. b) Circuito equivalente durante el intervalo de bloqueo del transistor.

Sin embargo, el estudio de los modos de conducción cuando el convertidor está formando parte de un CFP es distinto al que se va a hacer aquí, ya que en ese caso tanto la relación de conversión del convertidor como el valor de la carga que está viendo el convertidor están cambiando constantemente y de manera síncrona con el ángulo de red [5]. Su estudio es complejo y es un paso posterior al que se va a dar aquí.

La inspección de la Fig. 4b nos muestra que en este caso $n = 2$, por lo que el convertidor posee los modos y regiones listados en la Tabla I. Las formas de onda correspondientes a cada modo se muestran en la Fig. 5. Antes de calcular exhaustivamente las relaciones de conversión del convertidor, vamos a realizar una serie de consideraciones generales, que van simplificar los cálculos posteriores.

- En los modos de conducción $D = (1, 1)$, que es el MCC, y $D = (1, 0)$, que es el MDC1, el diodo D_1 conduce durante todo el periodo de conmutación, por lo que la caída de tensión en él es siempre 0. La valoración de la tensión media en la malla formada por la fuente V_g , el diodo D_1 , la bobina L_1 , el condensador C y la bobina L_2 , conduce a la siguiente conclusión:

$$V_C = V_g. \quad (17)$$

- En los modos de conducción $D = (1, 1)$, que es el MCC, y $D = (0, 1)$, que es el MDC2, el diodo D_2 conduce durante todo el intervalo de bloqueo del transistor. Aplicando el balance voltios-segundo a la bobina L_2 , se obtiene:

$$V_o = \frac{d}{1-d} V_C. \quad (18)$$

- En todos los modos de conducción, los valores medios de las corrientes i_{D1} e i_{D2} , I_{D1} e I_{D2} respectivamente, deben verificar el balance de potencias del convertidor. Por tanto:

$$I_{D1} = I_{D2} \frac{V_o}{V_g} = \frac{V_o^2}{RV_g} \quad (19)$$

A continuación se van a estudiar exhaustivamente los modos de conducción y las fronteras entre modos del convertidor propuesto como ejemplo de análisis.

A. Relación de conversión en MCC

Es bien conocida la relación de conversión en este modo:

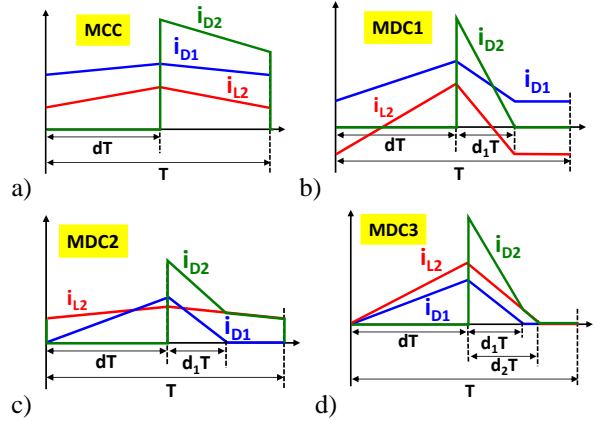


Fig. 5. Formas de onda representativas de los modos de conducción. a) MCC. b) MDC1. c) MDC2. d) MDC3.

$$N = \left[\frac{V_o}{V_g} \right]_{MCC} = \frac{d}{1-d}. \quad (20)$$

B. Relación de conversión en MDC1

Este modo coincide con el único MDC que existe en el convertidor SEPIC convencional, es decir, sin el diodo D_1 . En esta situación, también es bien conocido que la relación de conversión es:

$$M_1 = \left[\frac{V_o}{V_g} \right]_{MDC1} = \frac{d}{\sqrt{\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}}. \quad (21)$$

C. Relación de conversión en MDC2

Éste es un nuevo modo que aparece tras la inclusión del diodo D_1 . No se verifica (17), pero sí (18). La valoración de la tensión media en la malla formada por la fuente V_g , el diodo D_1 , la bobina L_1 y el transistor S conduce a la siguiente conclusión:

$$d_1 = d \frac{V_g}{V_o + V_C - V_g}, \quad (22)$$

siendo d_1 el ciclo de trabajo del diodo D_1 . La aplicación de la Ley de Faraday permite calcular fácilmente el valor del pico de corriente en el diodo D_1 :

$$i_{D1-p} = \frac{V_g}{L_1} dT. \quad (23)$$

La forma de onda triangular de i_{D1} en este modo determina:

$$I_{D1} = \frac{1}{2} i_{D1-p} (d + d_1). \quad (24)$$

Utilizando (19), (22), (23) y (24), se obtiene:

$$\left(\frac{V_o}{V_g} \right)^2 = \frac{d^2}{k_1} \frac{V_o + V_C}{V_o + V_C - V_g}. \quad (25)$$

Esta ecuación es válida siempre que el diodo D_1 acabe en estado de bloqueo al final del periodo de conmutación, es decir, no sólo en MDC2, sino también en MDC3. Centrándonos de nuevo en el MDC2, de (11), (18) y (25), se obtiene:

$$M_2 = \left[\frac{V_o}{V_g} \right]_{MDC1} = \frac{k_1 + \sqrt{k_1(4+k_1)}}{2k_1} d. \quad (26)$$

D. Relación de conversión en MDC3

En este modo de conducción, las corrientes por ambas bobinas comienzan en cero. Aplicando la Ley de Faraday se obtiene fácilmente el valor de pico de la corriente i_{L2} :

$$i_{L2,p} = \frac{V_C}{L_2} dT. \quad (27)$$

La aplicación del balance voltios-segundo a la bobina L_2 permite obtener una relación entre el ciclo de trabajo del diodo D_2 , d_2 , y el del convertidor:

$$d_2 = \frac{V_C}{V_O} d. \quad (28)$$

Como la corriente media inyectada a la salida por el diodo D_2 coincide con la corriente de salida, se cumple:

$$\frac{V_O}{R} = \frac{1}{2} (d_1 i_{D1,p} + d_2 i_{L2,p}). \quad (29)$$

Tras numerosas operaciones algebraicas, desde las ecuaciones (11), (22), (23), (25), (27), (28) y (29), se obtiene finalmente:

$$\frac{M_3}{d^2} = \frac{k_1 M_3^2 - d^2}{k_1 d^2} + \frac{M_3}{k_2} \left(\frac{M_3 k_1 (M_3 - 1) - d^2}{d^2 - k_1 M_3^2} \right)^2. \quad (30)$$

La ecuación (30) permite obtener el valor de la relación de conversión en este modo, M_3 , en función del ciclo de trabajo d y de los valores de k_1 y k_2 .

E. Fronteras del MCC en bucle abierto

Para calcular las fronteras de las regiones del plano $k_1 k_2$ correspondientes a los distintos modos, se comenzará por encontrar las fronteras del MCC con los restantes modos, lo que se hará igualando la relación de conversión expresada por (20) y las de los otros modos. Así, para ver cómo es la frontera con el MDC1, se igualan N y M_1 , obteniéndose:

$$k_{2,crit,0-1,BA} = \frac{k_1(1-d)^2}{k_1 - (1-d)^2}. \quad (31)$$

De igual forma, para ver cómo es la frontera con la región del modo MDC2 se igualarán N y M_2 , obteniéndose:

$$k_{1,crit,0-2,BA} = \frac{(1-d)^2}{d}. \quad (32)$$

Las curvas correspondientes a (31) y (32) confluyen en el punto $P_c = (P_{c1}, P_{c2})$, cuyas coordenadas son:

$$P_{c1} = \frac{(1-d)^2}{d}, \quad P_{c2} = (1-d). \quad (33)$$

Por tanto, la región correspondiente al MCC queda delimitada por los puntos (k_1, k_2) que cumplen simultáneamente:

$$k_1 > k_{1,crit,0-2,BA}, \quad k_2 > k_{2,crit,0-1,BA}. \quad (34)$$

F. Fronteras del MDC3 en bucle abierto

El modo más alejado del MCC es el MDC3. Sus fronteras con el MDC2 se obtienen igualando M_2 y M_3 en (26) y (30):

$$k_{2,crit,2-3,BA} = (1-d). \quad (35)$$

De manera similar se pueden calcular las fronteras entre MDC3 y el MDC1, obteniéndose:

$$k_{1,crit,1-3,BA} = k_2 \frac{-d + \sqrt{d^2 + 4k_2}}{2d}. \quad (36)$$

Se puede comprobar muy fácilmente que las curvas correspondientes a (35) y (36) también confluyen en el punto P_c , por lo que este punto es realmente el centro del mapa de regiones, ya que es el punto común a todas ellas. Por tanto, la región correspondiente al MDC3 queda delimitada por los puntos (k_1, k_2) del cuadrante positivo que cumplen simultáneamente:

$$k_1 < k_{1,crit,1-3,BA} < \frac{(1-d)^2}{d} \quad (37)$$

$$k_2 < k_{2,crit,2-3,BA}.$$

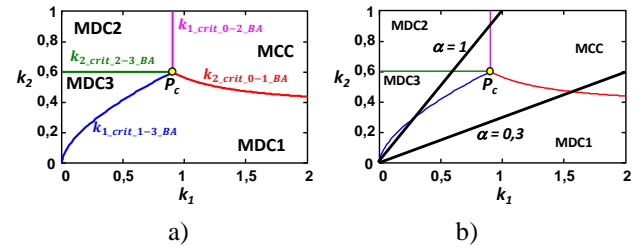


Fig. 6. a) Mapa de regiones en bucle abierto y para el caso $d = 0,4$. b) Trayectorias $\alpha = 1$ y $\alpha = 0,3$ en el anterior mapa.

G. Mapa de regiones en bucle abierto

Con la información obtenida es sencillo dibujar los mapas de regiones. El que aparece en la Fig. 6a corresponde a $d = 0,4$. En este mapa se pueden representar las trayectorias del convertidor, tal y como se ve en la Fig. 6b. Las trayectorias corresponden a la ecuación $k_2 = \alpha \cdot k_1$, donde α es la pendiente de la trayectoria. Existen 2 tipos de trayectoria:

- Si $\alpha > d/(1-d)$, entonces la trayectoria es del tipo MCC-MDC2-MDC3-MDC1.
- Si $\alpha < d/(1-d)$, entonces la trayectoria es del tipo MCC-MDC1.

H. Relaciones de conversión en bucle cerrado

Desde las relaciones de conversión de las ecuaciones (20), (21), (26) y (30) se pueden obtener las ecuaciones que nos informan de la evolución del ciclo de trabajo en función de la relación de conversión y de los valores de k_1 y k_2 . Estas ecuaciones son:

$$d_{MCC} = \frac{N}{1+N}, \quad (38)$$

$$d_{MDC1} = M_1 \sqrt{\frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}, \quad (39)$$

$$d_{MDC2} = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1(4+k_1)}}{2} M_2. \quad (40)$$

La expresión matemática de d_{MDC3} se obtendría despejando d en la ecuación (30).

I. Fronteras en bucle cerrado

Estas fronteras se obtienen igualando los ciclos de trabajo correspondientes a regiones contiguas. Llamando M a la relación de conversión en general, se obtiene:

$$k_{2,crit,0-1,BC} = \frac{k_1}{(1+M)^2 k_1 - 1}, \quad (41)$$

$$k_{1,crit,0-2,BC} = \frac{1}{M(M+1)}, \quad (42)$$

$$k_{2,crit,1-3,BC} = M k_1, \quad (43)$$

$$k_{2,crit,2-3,BC} = 1 - \frac{-k_1 + \sqrt{k_1(4+k_1)}}{2} M. \quad (44)$$

J. Mapa de regiones en bucle cerrado

Con la información suministrada por (41)-(44) es sencillo dibujar los mapas de regiones en bucle cerrado y las trayectorias, tal y como aparece en la Fig. 7. El punto de confluencia de las regiones se puede expresar en función de M , siendo:

$$P_{c1} = \frac{1}{M(M+1)}, \quad P_{c2} = \frac{1}{(M+1)}. \quad (45)$$

Existen 2 tipos de trayectoria:

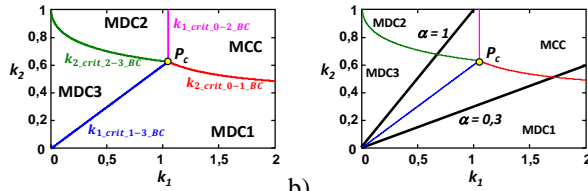


Fig. 7. a) Mapa de regiones en bucle cerrado y para el caso $M = 0,6$. b) Trayectorias $\alpha = 1$ y $\alpha = 0,3$ en el anterior mapa.

- Si $\alpha > M$, entonces la trayectoria es del tipo MCC-MDC2-MDC3.
- Si $\alpha < M$, entonces la trayectoria es del tipo MCC-MDC1.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las previsiones teóricas han sido validadas mediante el programa PSIM, utilizando los siguientes valores para el convertidor SEPIC de la Fig. 4a.: $V_g = 10$ V, $f = 100$ kHz, $d = 0,4$, $C = C_o = 50$ μ F, y $L_1 = 50$ μ H. La Fig. 8 muestra el mapa de regiones (con las trayectorias) y las formas de onda de las principales corrientes en 3 puntos de trabajo de la trayectoria definida por $\alpha = 1$, es decir, con $L_2 = 50$ μ H. La Fig. 9 muestra la misma información, pero en este caso con $\alpha = 0,3$, es decir, con $L_2 = 15$ μ H. En todos los casos, los resultados obtenidos encajan perfectamente con las previsiones teóricas.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha descrito un método para estudiar los múltiples modos de conducción que existen cuando un convertidor CC/CC tiene n diodos que quedan conectados en ramas inductivas cuando el transistor entra en estado de bloqueo. En estas condiciones, existe 1 MCC y $2^n - 1$ MDCs, que se pueden representar como recintos en un espacio de n dimensiones que se construye a partir de los parámetros de conducción k , llamado espacio k . Las fronteras entre recintos cambian en función del tipo de control usado y de los parámetros eléctricos que el control mantenga constante. En todos los casos, el punto de trabajo del convertidor describe una recta en el espacio k , recta que siempre pasa por el origen y que recibe el nombre de

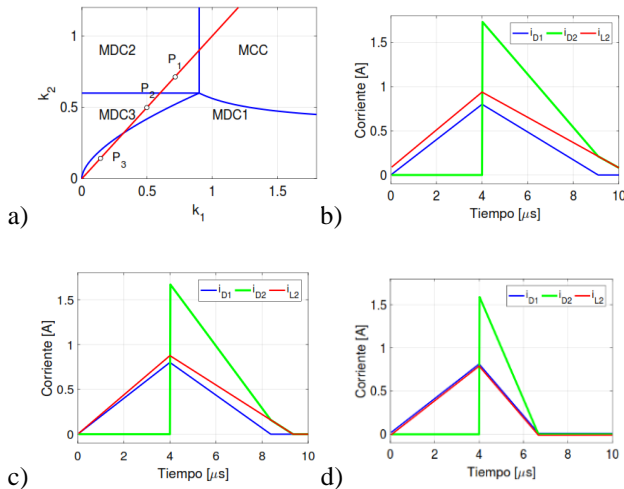


Fig. 8. a) Puntos de operación en bucle abierto con $\alpha = 1$. b) Corrientes en P_1 . c) Corrientes en P_2 . d) Corrientes en P_3 .

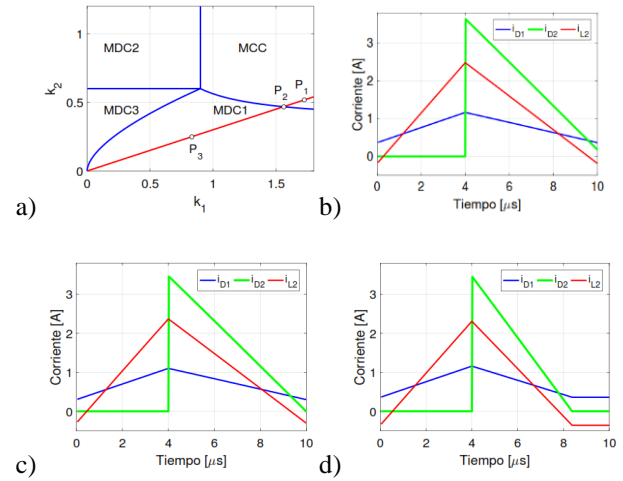


Fig. 9. a) Puntos de operación en bucle abierto con $\alpha = 0,3$. b) Corrientes en P_1 . c) Corrientes en P_2 . d) Corrientes en P_3 .

trayectoria. La posición del punto de trabajo en la trayectoria se acerca al origen cuando la resistencia de carga aumenta. En su desplazamiento cuando la resistencia de carga cambia, el punto de trabajo pasa por distintos recintos, con ecuaciones específicas para definir su comportamiento.

El método propuesto se ha aplicado al estudio de los modos de conducción de una versión modificada del convertidor SEPIC. En esta versión, existe un diodo extra en serie con la bobina de entrada. Los 4 modos de trabajo posibles han sido localizados y estudiados, incluyendo en el estudio la obtención de las curvas que delimitan las regiones del plano k de cada modo. Una conclusión importante es que existe un punto de confluencia de los 4 modos y que su posición con relación a la trayectoria determina los 2 tipos de trayectoria que pueden darse con cada estrategia de control. Finalmente, las predicciones teóricas han sido verificadas por simulación con PSIM.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió el apoyo económico del gobierno de Chile mediante los proyectos ANID/FONDECYT/1191680, ANID/FONDAP/15110019 y ANID-PFECHA/Doctorado Nacional/2019-21191663, del Principado de Asturias de los fondos FEDER a través del Proyecto SV-PA-21-AYUD/2021/51931 y del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos PID2019-110483RB-I00 y PID2021-127707OB-C21.

VII. REFERENCIAS

- [1] S. Cuk y R. D. Middlebrook, "A general unified approach to modelling switching DC-to-DC converters in discontinuous conduction mode", *IEEE PESC*, 1977, pp. 36-57.
- [2] R. P. Massey y E. C. Snyder, "High voltage single-ended DC-DC converter", *IEEE PESC*, 1977, pp.156-159.
- [3] J. Sebastián, J. Uceda, J. A. Cobos, J. Arau y F. Aldana, "Improving power factor correction in distributed power supply systems using PWM and ZCS-QR SEPIC topologies", *IEEE PESC*, 1991, pp. 780-791.
- [4] D. S. L. Simonetti, J. Sebastián y J. Uceda. "The discontinuous conduction mode SEPIC and Cuk power factor preregulators: Analysis and design". *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, nº 5, 1997, pp. 630-637.
- [5] J. Sebastián, J. A. Cobos, J. M. Lopera y J. Uceda. "The determination of the boundaries between continuous and discontinuous conduction modes in PWM dc-to-dc converters used as power factor preregulators". *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.10, nº 5, 1995, pp. 574-582.