

Análisis y Modelado de una Topología Elevadora con Red de Cancelación de Rizado

D. Diaz, D. Meneses, O. García, J. A. Oliver, P. Alou, J. A. Cobos

Centro de Electrónica Industrial
Universidad Politécnica de Madrid
C/José Gutiérrez Abascal N°2
28006 Madrid, España

Abstract — La topología elevadora con red de cancelación de rizado a la entrada permite anular el rizado de corriente a la entrada y a la salida del convertidor, lo cual permitiría reducir o incluso eliminar (a la entrada del convertidor) los respectivos filtros. Esta característica es ventajosa para algunas aplicaciones, como puede ser la espacial, pero para lograrlo se incrementa la complejidad y el número de componentes del convertidor. En este artículo se presenta el modelo promediado con el que se obtiene la compleja función de transferencia de la topología y el prototipo construido para la verificación de la cancelación del rizado en diversas condiciones de funcionamiento. Asimismo se han validado los resultados obtenidos con el modelo promediado mediante su comparación con las medidas de los diagramas de Bode.

I. INTRODUCCIÓN

En el diseño de un convertidor para una aplicación espacial, el peso y el volumen pasan a ser parámetros críticos del sistema, debido al aumento de la potencia consumida por los equipos electrónicos en las misiones espaciales.

Un elemento necesario para el buen funcionamiento del sistema es el filtro, tanto a la entrada como a la salida del convertidor. Estos elementos contribuyen significativamente a un sobredimensionamiento en peso y volumen en el sistema.

En una conferencia de especialistas en Electrónica de Potencia (APEC 1991) se propuso una topología elevadora novedosa [1], cuya ilustración puede verse en la Fig. 1. La topología es un elevador de dos bobinas [2] al que se le añade una red de cancelación del rizado ([3], [4]) a la entrada del convertidor que elimina la necesidad de utilizar un filtro de entrada. Dicho convertidor también cancela el rizado de corriente a la salida mediante la bobina L_3 de la Fig. 1, luego se reducen el peso y el volumen de ambos filtros. Por otro lado, se incrementará el número de componentes y aumentará también la complejidad de la topología.

Los componentes que forman la red de cancelación de rizado a la entrada de la Fig. 1 son L_{1C} , un devanado adicional del componente magnético principal, una bobina L_2 , dos condensadores C_2 y C_3 y una resistencia R_1 . La funcionalidad de cada elemento de la red de cancelación se detallará en el apartado II.

Pese al mayor peso de los componentes magnéticos respecto a otras soluciones como el convertidor elevador convencional, esta topología presenta algunas ventajas, como la reducción o incluso supresión del filtro de entrada debido a la cancelación de rizado. Permite asimismo una reducción del filtro de salida debido a la cancelación del rizado de corriente a la salida del convertidor.

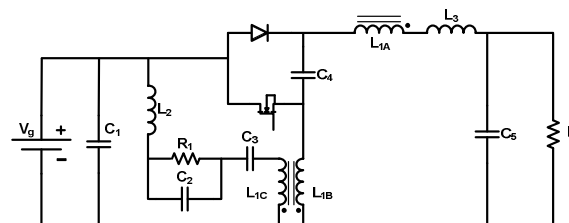


Fig. 1. Topología elevadora de dos bobinas con red de cancelación de rizado a la entrada

Estas características particulares de la topología hacen interesante su estudio más detallado, modelado y prototipado para poder evaluar con mayor precisión cuales son las mejoras que presenta esta topología respecto a otros convertidores elevadores.

II. FUNCIONAMIENTO DE LA TOPOLOGÍA

En primer lugar, realizando un balance de voltios por segundo en la bobina L_{1A} , podemos ver que la función de transferencia es la de un convertidor elevador convencional:

$$V_o = \frac{V_g}{1-d} \quad (1)$$

El componente magnético principal de la topología consta de tres bobinas acopladas, las dos principales L_{1A} y L_{1B} y una auxiliar L_{1C} para la cancelación del rizado a la entrada del convertidor.

La cancelación de rizado a la entrada se consigue mediante la adición de una red por la que circulará una corriente con valor medio cero y un rizado de corriente igual al demandado por el convertidor pero de fase opuesta. De esta manera, la suma de ambas, la corriente que se demanda a la fuente de alimentación, tiene un rizado prácticamente nulo.

Dicha red de cancelación, ilustrada en la Fig. 1, consta de L_{1C} , un tercer devanado del componente magnético principal, que inyecta una corriente en la rama de cancelación que permitirá la cancelación del rizado de corriente a la entrada.

También consta de una bobina, L_2 , cuya inductancia se calculará para ajustar el valor del rizado de corriente por dicha rama de manera que se produzca la cancelación de rizado de corriente a la entrada.

Otro componente de la misma es un condensador C_3 que actúa como bloqueador de continua, ya que se necesita un rizado de corriente con valor medio cero circulando por la red de cancelación.

Adicionalmente se añade una resistencia R_1 de amortiguamiento de la corriente de cancelación que circula por la rama. En paralelo con esta resistencia se pondrá un condensador C_2 para disminuir las pérdidas en dicha resistencia.

A la salida del convertidor, y para la cancelación del rizado de salida, se añade una bobina L_3 . Si elegimos la relación de transformación entre las bobinas acopladas L_{1A} y L_{1B} igual a uno, la tensión aplicada en ambas será la misma. Dado que la tensión a la que se cargan los condensadores C_4 y C_5 es la misma, la de salida, la tensión aplicada en L_3 será la diferencia entre las tensiones en C_4 y en C_5 , es decir, prácticamente nula. Por lo tanto, aun siendo el valor de su inductancia muy bajo, el rizado de salida será prácticamente nulo.

Una característica importante de la cancelación del rizado de corriente en esta topología es que se produce para cualquier condición de funcionamiento, ya sea en modo de conducción continuo (MCC) o en modo de conducción discontinuo (MCD) y para cualquier ciclo de trabajo.

Las fórmulas que relacionan L_{1A} y L_2 para conseguir el rizado nulo de corriente a la entrada pueden encontrarse en [1].

La misma idea para la cancelación del rizado puede aplicarse para otras topologías. En un convertidor reductor, en este caso a la salida, y con una red de cancelación similar [5], que puede verse en la Fig. 2, se consigue la cancelación del rizado a la salida del convertidor para cualquier condición de funcionamiento.

En este caso, una ventaja adicional es que dicho convertidor con red de cancelación a la salida puede realizarse con un solo componente magnético con dos devanados, utilizando la inductancia de dispersión del componente magnético como la bobina L_2 de la Fig. 2.

Adicionalmente, habrá que añadir un pequeño condensador de bloqueo de corriente continua C_2 , Fig. 2.

El devanado adicional para la red de cancelación será también de un tamaño reducido ya que por esa rama sólo circulará corriente alterna, con lo cual no influirá significativamente en el diseño del componente magnético.

La topología reductora con red de cancelación de rizado a la salida se ha presentado como otro ejemplo de aplicabilidad del concepto de red de cancelación en otras topologías.

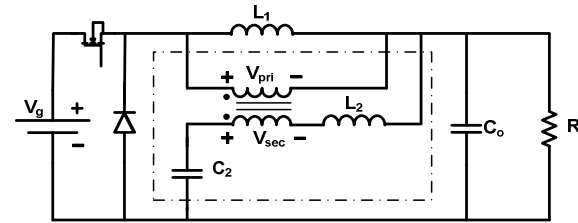


Fig. 2 Topología reductora con red de cancelación de rizado a la salida

El estudio de esta topología no se desarrollará en el presente artículo, centrándose el mismo en el estudio del convertidor elevador con bobinas acopladas y red de cancelación de rizado a la entrada.

III. MODELADO

Para el análisis de la dinámica de la topología y la obtención de los diagramas de Bode, se ha realizado el modelo promediado ([6], [7]) del convertidor elevador con red de cancelación de rizado a la entrada (Fig. 1). En dicho modelo, que se representa en la Fig. 3, n_A , n_B y n_C son los números de vueltas de los arrollamientos L_{1A} , L_{1B} y L_{1C} respectivamente.

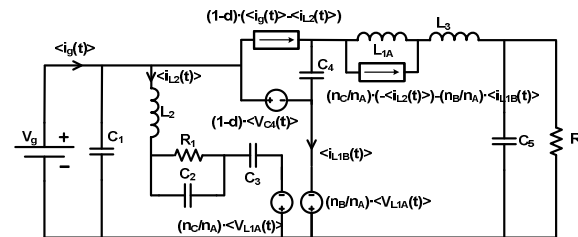


Fig. 3 Modelo promediado de la topología elevadora con red de cancelación de rizado

El transformador de tres devanados se ha modelado de la siguiente manera: L_{1A} mediante su inductancia magnetizante y una fuente dependiente de corriente en paralelo. El resto de devanados, L_{1B} y L_{1C} se han modelado como fuentes dependientes de tensión.

El interruptor (MOSFET) se ha modelado con una fuente dependiente de tensión y el diodo con una fuente dependiente de corriente.

En la Fig. 4 puede verse la validación del modelo promediado frente al modelo conmutado de la topología elevadora con red de cancelación de rizado a la entrada, realizada en PSpice. Para ello se realiza un escalón de ciclo de trabajo y se compara la respuesta en ambos modelos. Puede verse que tanto para la corriente de salida (gráfica superior) como para la tensión de salida

(gráfica inferior) hay una correspondencia entre ambos modelos.

Las condiciones para el ensayo de la validación del modelo promediado son una tensión de entrada de 40V y de salida de 100V (ciclo de trabajo $d=0.6$ y potencia de 500W). El escalón de ciclo de trabajo es de $d=0.6$ a $d_1=0.8$.

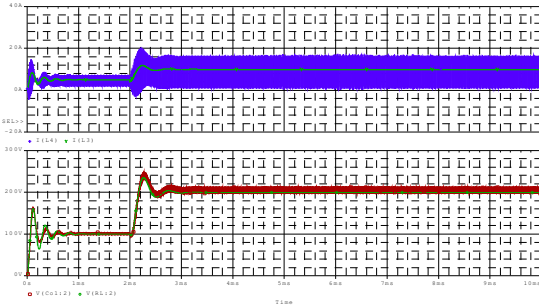


Fig. 4 Validación del modelo promediado de la topología elevadora con red de cancelación de rizado.

Una vez obtenido dicho modelo, y realizada su validación, podemos obtener los diagramas de Bode de la topología. Analizando el diagrama de Bode de tensión de salida frente a ciclo de trabajo (V_s/d), Fig. 5, se puede ver la existencia de dos polos y un cero en el semiplano derecho a baja frecuencia. A alta frecuencia se observa un par doble polo-doble cero conjugado y dos polos. A una frecuencia mayor, y aunque su efecto no se aprecia en el diagrama de la Fig. 5 en su totalidad, hay un cero, siendo la caída total de fase a alta frecuencia de -360° y la ganancia de -40dB/dec .

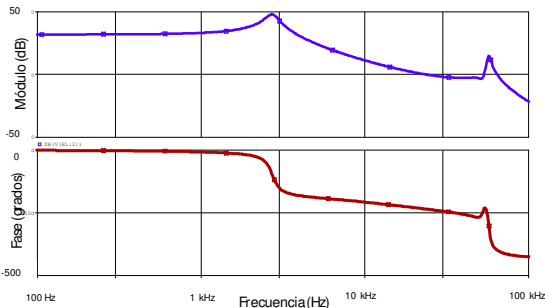


Fig. 5 Diagrama de Bode de tensión de salida frente a ciclo de trabajo (V_s/d)

El estudio dinámico de esta topología elevadora con red de cancelación de rizado a la entrada muestra que el cero en el semiplano derecho inherente a la topología elevadora se encuentra presente para cualquier condición de diseño. Por lo tanto, la mejora que ofrece frente a otras topologías elevadoras es una reducción de los filtros de entrada y salida del convertidor.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se ha realizado un prototipo, cuya fotografía se muestra en la Fig. 6, de la topología presentada para una potencia máxima de 500W, una tensión de salida de 100V, un rango de tensiones de entrada de 40-80V, siendo la frecuencia de conmutación de 150kHz.

Las medidas de rendimiento en el convertidor señalan que para éstas especificaciones está penalizado en pérdidas de conducción, ya que para una potencia de 500W obtenemos un 96.5% para 80V de entrada y de 92% para 40V entrada.

Para comprobar que el rizado de corriente a la entrada se anula para cualquier condición de funcionamiento, se han realizado pruebas para diferentes ciclos de trabajo y en ambos modos de conducción, obteniéndose resultados satisfactorios en ambos casos, como puede verse en las Fig. 7, 8 y 9.

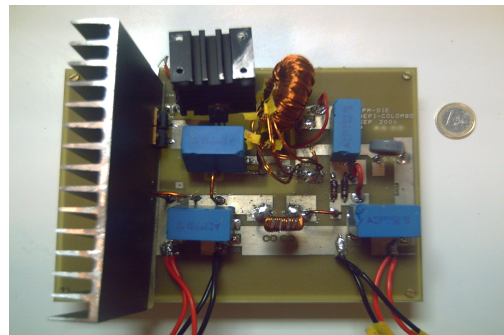


Fig. 6 Prototipo construido de la topología elevadora con red de cancelación de rizado

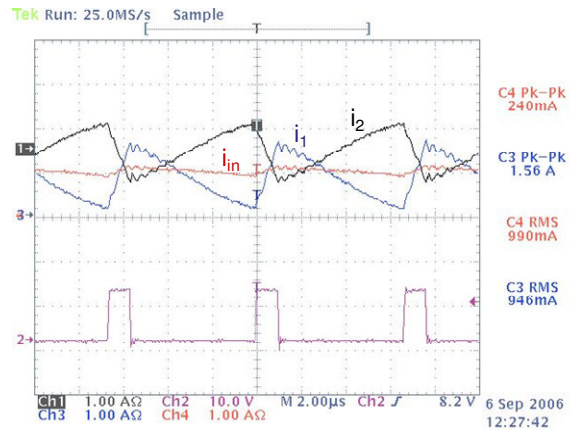


Fig. 7 Cancelación del rizado de corriente a la entrada para MCC.

En la Fig. 7 puede observarse en las formas de onda de la parte superior como los rizados de corriente son de igual amplitud y de fase opuesta anulándose prácticamente el rizado a la entrada. La corriente i_1 de las figuras 7 y 8 es la que circula por la rama de cancelación, i_2 es la corriente que entra en la red de

conmutación, siendo i_{in} la suma de ambas (corriente aportada por la fuente de alimentación).

En la Fig. 8 se muestra el mismo ensayo, en este caso en MCD, con un ciclo de trabajo del 30%, obteniéndose igualmente a la entrada una corriente prácticamente constante.

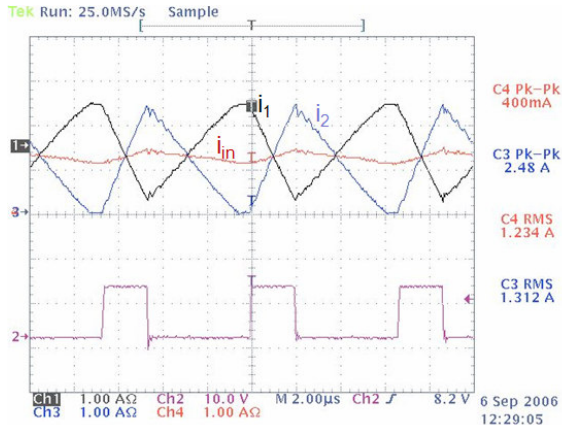


Fig. 8 Cancelación del rizado de corriente a la entrada en MCD

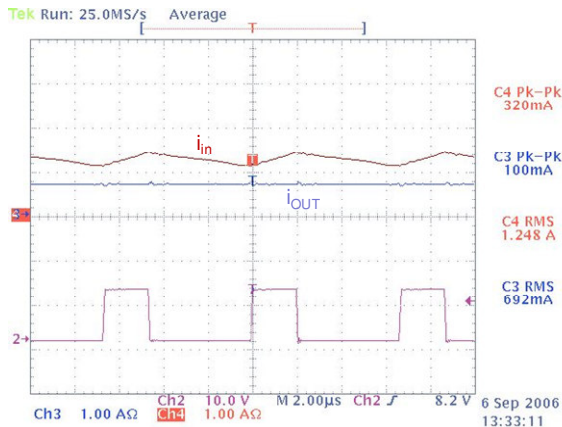


Fig. 9 Cancelación del rizado de corriente a la salida.

En la Fig. 9 puede observarse como también se produce la cancelación del rizado a la salida.

En función del rizado permitido por la carga a la salida del convertidor y de la inductancia de dispersión en el devanado L_{1A} , podría utilizarse ésta última como bobina L_3 , al estar en serie L_{1A} con L_3 . Así podría reducirse el número de componentes magnéticos de la topología, mejorándose el rendimiento y el peso del mismo.

También puede reducirse o eliminarse la bobina L_3 incrementando la capacidad de los condensadores C_4 y C_5 (Fig. 1) a un valor suficientemente alto.

Para la medición de los diagramas de Bode se han modificado las condiciones del ensayo. La tensión de entrada ha sido de 10V, con un ciclo de trabajo del 50%, una frecuencia de 150kHz y una potencia de 20W. Las

mediciones se han realizado con el convertidor operando en lazo abierto.

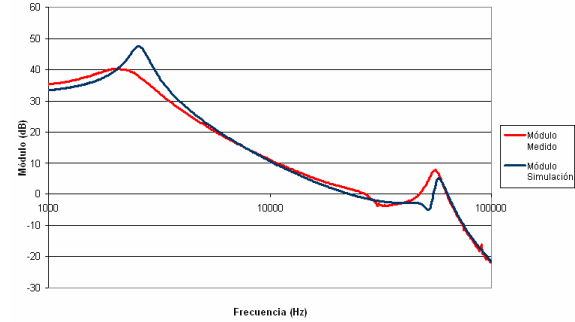


Fig. 10 Comparación de los diagramas de Bode medido y simulado del módulo de la tensión de salida frente a ciclo de trabajo (V_s/d).

En las figuras 10 y 11 puede verse el resultado de la comparación entre el modelo promediado y los diagramas de Bode medidos en el prototipo de la figura 6. Como puede apreciarse, existe una buena correspondencia en todo el rango de frecuencias entre ambos diagramas tanto en módulo como en fase.

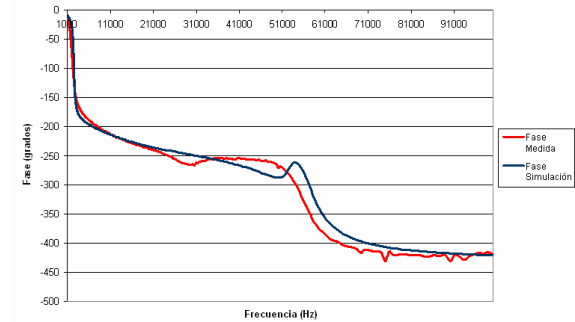


Fig. 11 Comparación de los diagramas de Bode medido y simulado de fase de la tensión de salida frente a ciclo de trabajo (V_s/d).

V. CONCLUSIONES

Se ha estudiado una topología elevadora con bobinas acopladas y con una red de cancelación de rizado a la entrada. Dicha topología, mediante la bobina L_3 , cancela asimismo el rizado de corriente a la salida. Se presenta el modelo promediado de la misma y diagramas de Bode simulados y medidos. Se ha construido un prototipo y ha sido validada la cancelación del rizado de corriente a la entrada y a la salida para cualquier condición de funcionamiento, en MCC y en MCD, presentándose formas de onda. También se ha comprobado experimentalmente como se produce la cancelación del rizado a la salida del convertidor. Se han comparado diagramas de Bode medidos y simulados del módulo y la fase de tensión de salida frente a ciclo de trabajo. El rendimiento del prototipo construido está entre un 92%

y un 96.5% para el intervalo de tensiones de entrada del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Robert Martinelli, Christopher Ashley, "Coupled Inductor Boost Converter with Input and Output Ripple Cancellation". IEEE APEC, 1991, pp. 567-572
- [2] J. L. White, W. J. Muldoon, "Two-Inductor Boost and Buck Converters" IEEE PESC, 1987, pp. 387-392
- [3] D.C. Hamill, P.T. Krein, "A 'zero' ripple technique applicable to any DC converter" IEEE PESC, 1999, pp. 1165-1171.
- [4] J.W. Kolar, H. Spree, N. Mohan, F.C. Zach, "Novel aspects of an application of 'zero'-ripple techniques to basic converter topologies" IEEE PESC, 1997, pp. 796-803 vol. 1.
- [5] Michael J. Schutten, Robert L. Steigerwald, Juan A. Sabaté, "Ripple Current Cancellation Circuit" IEEE APEC 2003, pp. 464 - 470 vol.1.
- [6] J.A. Oliver, J.A. Cobos, J. Uceda, M. Rascón and C. Quiñones, "Systematic approach for developing large-signal averaged models of multioutput PWM converters", IEEE PESC 2000, pp. 696-701 vol. 2.
- [7] B. Bryant and M. K. Kazimierczuk, "Voltage-loop power- stage transfer functions with MOSFET delay for Boost PWM converter operating in CCM", IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 54, No. 1, pp.347-353, Feb. 2007.