

# IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR DE DOS FASES EN MODO DE CONDUCCIÓN CONTINUA

Valdez Carrera Héctor Osiel (1), Limones Pozos César Augusto (2), Sosa Zúñiga José Miguel (3)

<sup>1</sup> [Ing. Electrónica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | [hosieltvc@gmail.com]

<sup>2</sup> [Maestría en ingeniería electrónica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | [cesar.limones@itesi.edu.mx]

<sup>3</sup> [Maestría en ingeniería electrónica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | [jmsosa@itesi.edu.mx]

## Resumen

En el presente trabajo se muestra la implementación de un convertidor de dos fases. Se muestra las aplicaciones y ventajas que presenta la topología multifase implementada respecto al convertidor convencional. Se realiza dos análisis de la topología presentada. El primer análisis consiste en obtener el modelo promedio en variables de estado. Por último, se corroboran los resultados derivados de la simulación con los resultados experimentales obtenidos de la implementación. El sistema implementado fue probado en un prototipo de 100 W.

## Abstract

In the present work it's shown the implementation of a two-phase elevator converter. The applications and advantages presented by the implemented multi-phase topology with respect to the conventional converter. The first analysis consists in obtaining the average model in state variables. Finally, the results derived from the simulation with the experimental results obtained of the implementation are corroborated. The system implemented was teste don a 100w prototype.

## Palabras Clave

Electrónica de potencia; reducción de rizo de corriente; multifase; convertidor DC-DC.

## INTRODUCCIÓN

Los convertidores de DC-DC son configuraciones de electrónica de potencia que adecuan la energía eléctrica que proviene de una fuente de corriente directa fija o variable. En un convertidor DC-DC elevador, su voltaje de salida es mayor y de la misma polaridad que el de la entrada [1]. Estos convertidores son usados para aumentar la potencia de salida y disminuir los rizados de la corriente de entrada y del voltaje de salida, dando lugar a la reducción de tamaño de los inductores de entrada y del capacitor del filtro de salida [2].

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra la topología de convertidor implementada.

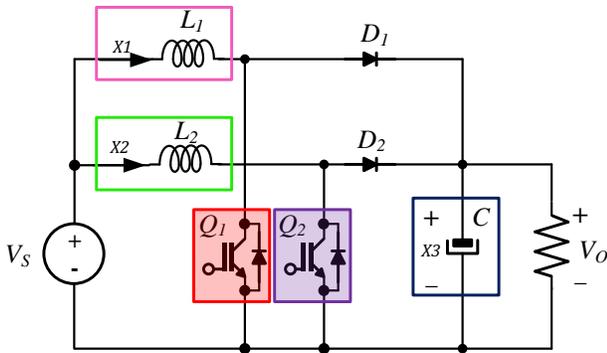


Figura 1: Convertidor elevador de dos fases.

En la Figura 1 se muestra el convertidor elevador de dos fases. La topología está compuesta por dos inductores, un capacitor, dos MOSFET's (IRFP60LC) y dos diodos ultrarrápidos (3060WT) estos dispositivos de conmutación son accionados mediante secuencias de conmutación desfasadas una respecto de la otra  $180^\circ$ . Dependiendo del ciclo de trabajo, se obtuvieron los circuitos equivalentes del convertidor. Esto resultó en tres

diferentes casos, dependiendo del ciclo de trabajo  $k$ :

Caso I:  $0 < k < 0.5$

Caso II:  $k = 0.5$

Caso III:  $0.5 < k < 1$

### Caso I

En la Figura 2 se muestran las secuencias de conmutación para un ciclo de trabajo menor al 0.5.

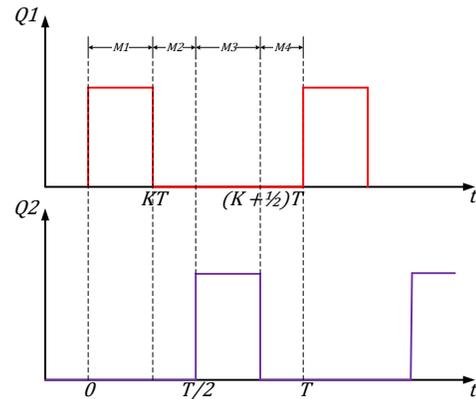


Figura 2: Secuencias de conmutación para el Caso I.

Como se ve en la Figura 2 existen cuatro modos de operación. Los intervalos de cada modo de operación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Intervalos de los modos de operación del Caso I.

| Modo de operación. | Estado.        | Intervalo.  |
|--------------------|----------------|---|
| $M_1$              | $Q_1$ ON       | $0 < t < KT$                                      |
| $M_2$              | $Q_1, Q_2$ OFF | $KT < t < \frac{T}{2}$                            |
| $M_3$              | $Q_2$ ON       | $\frac{T}{2} < t < \left(K + \frac{1}{2}\right)T$ |
| $M_4$              | $Q_1, Q_2$ OFF | $\left(K + \frac{1}{2}\right)T < t < T$           |

En la Tabla 1 se nota que en los modos de operación 2 y 4,  $Q_1$  y  $Q_2$  se encuentran en corte al mismo tiempo. Mientras que en los otros dos modos de operación (modo 1 y modo 3) se alternan sus estados.

### Caso II

En la Figura 3 se muestran las secuencias de conmutación para un ciclo de trabajo igual a 0.5. Como se observa en la Figura 3, solo existen dos modos de operación. En la Tabla 2, se muestran los intervalos para los modos de operación. Como se puede ver en la Tabla 2, aquí se presenta la misma situación de alternación entre los dos dispositivos semiconductores de conmutación que en el Caso I con la diferencia de los intervalos de tiempo.

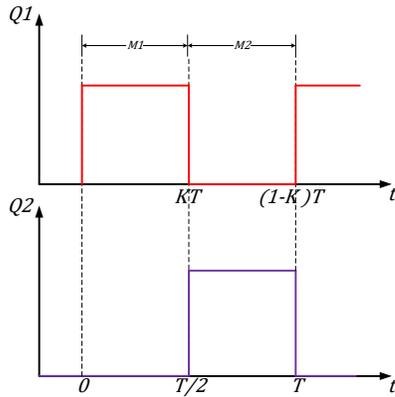


Figura 3: Secuencias de conmutación para el Caso II.

Tabla 2: Intervalos de los modos de operación del Caso II.

| Modo de operación. | Estado.               | Intervalo.        |
|--------------------|-----------------------|-------------------|
| $M_1$              | $Q_1$ ON<br>$Q_2$ OFF | $0 < t < KT$      |
| $M_2$              | $Q_2$ ON<br>$Q_1$ OFF | $KT < t < (1-K)T$ |

### Caso III

En la Figura 4 se aprecian las secuencias de conmutación para un ciclo de trabajo mayor a 0.5.

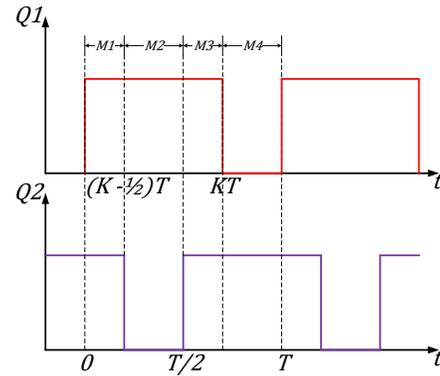


Figura 4: Secuencias de conmutación para el Caso III.

Como se ve en la Figura 4, este caso también presenta cuatro modos de operación al igual que el Caso I. En la Tabla 3, se observan los intervalos para los modos de operación.

En la Tabla 3 se muestra que en el modo 1 y el modo 3 los dos semiconductores se encuentran saturados, mientras que en el modo 2 y el modo 4 se alternan sus estados al igual que en los otros dos casos.

Tabla 3: Intervalos de los modos de operación del Caso III.

| Modo de operación. | Estado.       | Intervalo.  |
|--------------------|---------------|---|
| $M_1$              | $Q_1, Q_2$ ON | $0 < t < \left(K - \frac{1}{2}\right)T$           |
| $M_2$              | $Q_1$ ON      | $\left(K - \frac{1}{2}\right)T < t < \frac{T}{2}$ |
| $M_3$              | $Q_1, Q_2$ ON | $\frac{T}{2} < t < KT$                            |
| $M_4$              | $Q_2$ ON      | $KT < t < T$                                      |

Para entender el funcionamiento del convertidor elevador de dos fases era necesario entender cómo se comportaban  $Q_1$  y  $Q_2$ , ya que por cada modo de operación de cada uno de los tres casos antes descritos, se genera un circuito equivalente. De los cuales y de cada uno se obtienen ecuaciones en función de las corrientes en ambos inductores ( $i_1$  e  $i_2$ ) y del voltaje en el capacitor ( $v_o$ ) y que estén representadas en variables de estado.

En la Figura 1, se pueden identificar estas variables donde,  $x_1 = i_1$ ,  $x_2 = i_2$ ,  $x_3 = v_o$ .

Las ecuaciones obtenidas de los circuitos equivalentes nos ayudarán a encontrar un modelo promedio que describa el comportamiento

dinámico del convertidor en modo de conducción continua [3]. Este modelo promedio se muestra a continuación [4]

$$\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \dot{x} + u \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde:

$$u = 1 - k$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados de simulación

A continuación se muestran los resultados de simulación del convertidor elevador de dos fases. El convertidor fue sometido a dos pruebas para comprobar su correcto funcionamiento: una de cambio de carga y otra de cambio de ciclo de trabajo. En la Tabla 4, se muestran los parámetros utilizados para la simulación.

Tabla 4: Parámetros de simulación del convertidor.

| Parámetro. | Valor.                    |
|------------|---------------------------|
| $V_s$      | 12v                       |
| $L_1, L_2$ | 500 $\mu$ H               |
| $f_{sw}$   | 20kHz                     |
| $k$        | 0.3 - 0.6                 |
| $R$        | 60 $\Omega$ - 30 $\Omega$ |

En la Figura 5 se muestra la primera prueba que corresponde al cambio de carga. Como se puede apreciar el voltaje de salida no sufre ninguna alteración en su valor debido a que es el mismo que el voltaje en el capacitor, por otro lado, al hacer el cambio de resistencia de 60  $\Omega$  a 30  $\Omega$ , ambas corrientes aumentan su valor promedio, sin embargo, su rizo se mantiene.

En la Figura 6 se muestra la segunda prueba que corresponde al cambio de ciclo de trabajo. Aquí, el voltaje promedio de salida, si sufre un cambio debido a que el voltaje de salida en estos convertidores depende de su ciclo de trabajo. Las corrientes tienen el mismo valor, sin embargo, el rizo en ambas es mayor cuando el ciclo de trabajo aumenta.

### Resultados experimentales

Se muestran los resultados experimentales del prototipo del convertidor elevador de dos fases, la potencia del convertidor implementado es de 100 W. Se realizaron las mismas pruebas de cambio de carga y de cambio de ciclo de trabajo y se utilizaron los mismos parámetros de la Tabla 4.

En la Figura 7a se muestra el cambio de carga de 60  $\Omega$  a 30  $\Omega$  con un ciclo de trabajo de 0.6. Como se aprecia, el valor de voltaje promedio no cambio. Mientras que las corrientes  $i_1$  e  $i_2$  sufrieron un aumento en su valor promedio. En la Figura 7b, se muestra el cambio de carga de 30  $\Omega$  a 60  $\Omega$  en donde se sigue manteniendo el voltaje de salida y las corrientes en los inductores regresan a su valor inicial. En la Figura 8a se muestra el cambio de ciclo de trabajo de 0.3 a 0.6 con una resistencia de carga fija a 30 $\Omega$ . Debido a que  $V_o = \frac{1}{1-k}$  se puede ver el aumento en el valor promedio del voltaje de salida. Las corrientes en ambos inductores también se incrementan debido a la conservación de potencia que presentan los convertidores de DC-DC. En la Figura 8b se muestra el cambio de ciclo de trabajo de 0.6 a 0.3 en donde el voltaje de salida y las corrientes en los inductores regresan a su valor inicial. Algo que hay que notar es el incremento del rizo en las corrientes de ambos inductores cuando se hace el cambio de ciclo de 0.3 a 0.6.

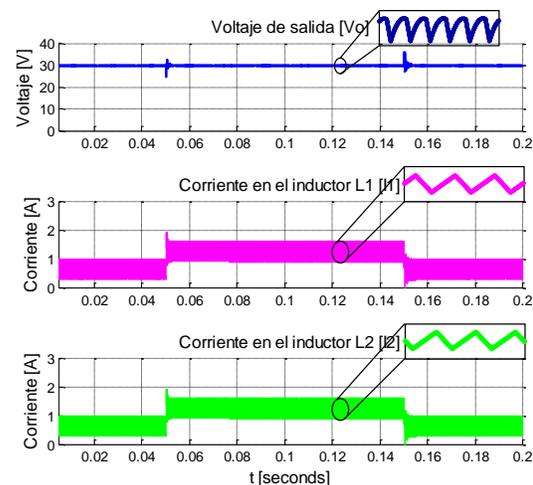


Figura 5: De arriba a abajo: Voltaje de salida, corriente del inductor L1 y corriente en el inductor L2.

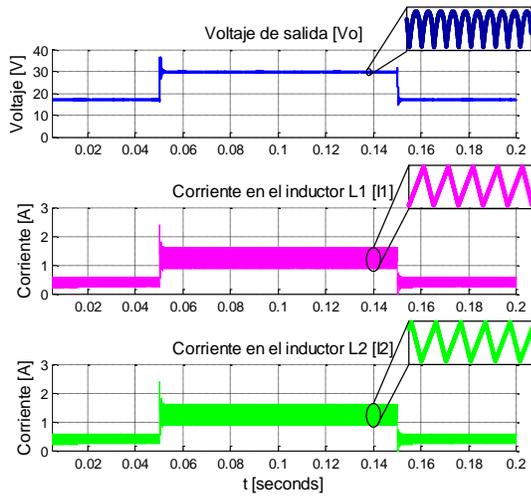


Figura 6: De arriba a abajo: Voltaje de salida; Corriente en el inductor L1 y; Corriente en el inductor L2.

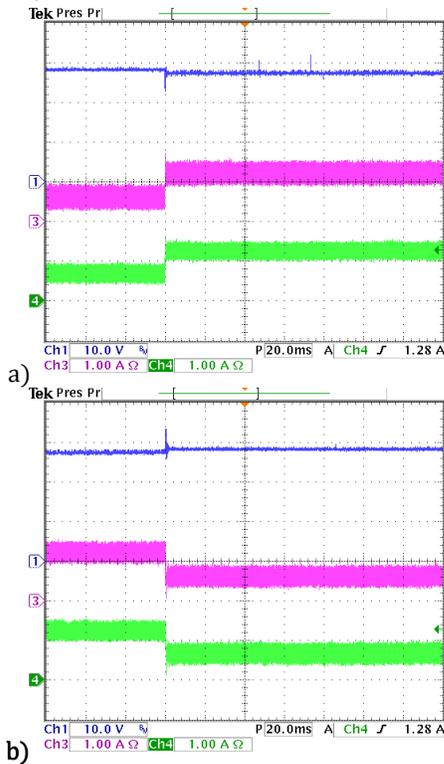


Figura 7: De arriba abajo, voltaje de salida  $V_o$ , corriente en el inductor  $L_1$  y corriente en el inductor  $L_2$ : a) cambio de carga de  $60 \Omega - 30 \Omega$ ; b) cambio de carga de  $30 \Omega - 60 \Omega$ . Con un ciclo de trabajo de 0.6

## CONCLUSIONES

Se presentó un convertidor DC-DC elevador de dos fases de 100w de potencia. Al ser sometido a un cambio de carga y cambio de ciclo de trabajo, los resultados de simulación y experimentales arrojaron un correcto funcionamiento del convertidor a lazo abierto y en modo de conducción continua. Por lo que da a pie a probar el convertidor con una ley de control derivada del modelo promedio y así someterlo a pruebas en lazo cerrado.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al ITESI al laboratorio de electrónica de potencia, a mi asesor M. I. César Limones por permitirme realizar esta investigación. De igual forma agradecer al Dr. José Miguel Sosa Zúñiga por apoyarme en análisis matemático que conlleva esta investigación.

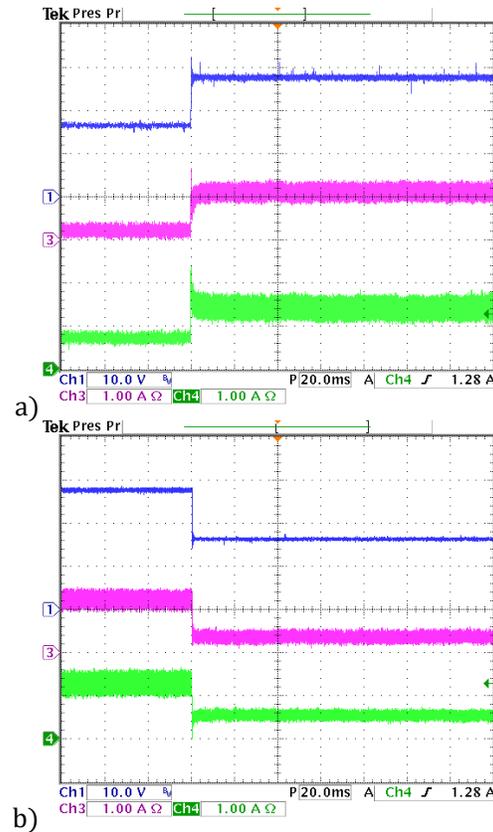


Figura 8 De arriba abajo, voltaje de salida  $V_o$ , corriente en el inductor  $L_1$  y corriente en el inductor  $L_2$ : a) cambio de ciclo de

**trabajo de 0.3 - 0.6; b) cambio de ciclo de trabajo de 0.6 -0.3. Con una carga de 30  $\Omega$ .**

## REFERENCIAS

[1] Rashid Mohammad, H., Electrónica de potencia, México, Pearson Educación, 2004.

[2] Sakulchotruangdet, S., Khwan-on S.,(2016), Three-Phase Interleaved Boost Converter with Fault Tolerant Control Strategy for Renewable Energy System Applications. 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016.

[3] J.-S. Lai, D. Chen, "Design consideration for power factor correction boost converter operating at the boundary of continuous conduction mode and discontinuous conduction mode," IEEE APEC'93, 1993, pp. 267-273

[4] [1] J. M. Sosa, G. Escobar, P. R. Martínez-Rodríguez, G. Vázquez, M. A. Juárez and J.C. Nava-Cruz, "A model-based controller for a DC-DC boost converter with an LCL input filter", IEECON 2015 -41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, 2015, pp. 000619-000624. doi: 10.1109/IECON.2015.7392168.