

CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL MULTIFASE PARA APLICACIONES DE MICRO REDES DE CD

Jorge Rubén Morfín Orozco

Tecnológico Nacional de México en Celaya

orozo_16@hotmail.com

Heriberto Rodríguez Estrada

Tecnológico Nacional de México en Celaya

joherodri@hotmail.com

Elías Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México en Celaya

elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un convertidor bidireccional multifase para compensar disturbios entre buses de CD en una micro red mediante la transferencia de energía entre ellos. La topología utilizada es una estructura compuesta por cuatro convertidores reductores-elevadores entrelazados, el uso de inductores acoplados permite la cancelación del rizo de corriente de salida, el aumento de la densidad de potencia, así como la disminución en el tamaño del convertidor. Al ser un convertidor bidireccional, se busca la regulación en el bus del lado de alto voltaje y eventualmente se regula el bus de bajo voltaje cada uno con una estructura de control que tiene como objetivo una rápida respuesta dinámica a los cambios incrementales y decrementales de carga del 20% al 100%, relativa a la aplicación.

Al inicio, se describe la metodología para el diseño del convertidor, después se presentan las consideraciones de diseño de los inductores, posteriormente el desarrollo de la estructura de control. Finalmente, para validar el convertidor propuesto, se presentan resultados de simulación y experimentales a una potencia de 500 W.

Palabras Claves: Convertidor bidireccional, inductores acoplados, transferencia de energía.

Abstract

This paper presents a bidirectional interleaved converter development for energy transference between two direct current buses in a micro grid with the objective of compensating disturbances between buses. The selected topology is a composed structure of four interleaved buck-boost converters. This converter includes coupled inductors that allows a reduced size, cancel the output current ripple and enhance power density. Because the topology is a bidirectional converter, regulation in the high voltage side is reached, eventually, the low voltage bus is regulated with a control structure whose objective is fast dynamic response to incremental and decremental changes of load from 20% to 100 %, depending on the application.

At the beginning, a methodology for the design of the converter is described. Then, the design considerations of the inductors are presented. Later, the development of the control structure. Finally, to validate this development, simulation results are presented, converter implementation a 500 W is on process.

Keywords: *Bidirectional converter, coupled inductors, energy transfer.*

1. Introducción

Gran parte de la electricidad producida alrededor del mundo es generada en centrales que utilizan combustibles fósiles. Estos sistemas son robustos y confiables, pero la eficiencia en el proceso de generación es baja (50-60%) y da lugar a grandes cantidades de residuos contaminantes [Tom, 2006].

En la actualidad se ha vuelto una necesidad el uso de energías alternativas como lo es la energía solar y eólica, ya que la contaminación producto de la quema de los combustibles y sus efectos son cada vez más elevados.

En lo que se refiere a la generación y uso de las energías renovables se observa que en 2014 tan solo se generaba el 19.2% del total de la energía producida en el planeta, figura 1. En el año 2015 se tiene un incremento en las energías limpias de

4.5% del total, figura 2, por lo que el uso de combustibles fósiles bajo hasta el 73.3%. Se espera que para finales de 2017 se registre un aumento considerable en el uso y producción de electricidad a partir fuentes renovables [Sawin, 2016].

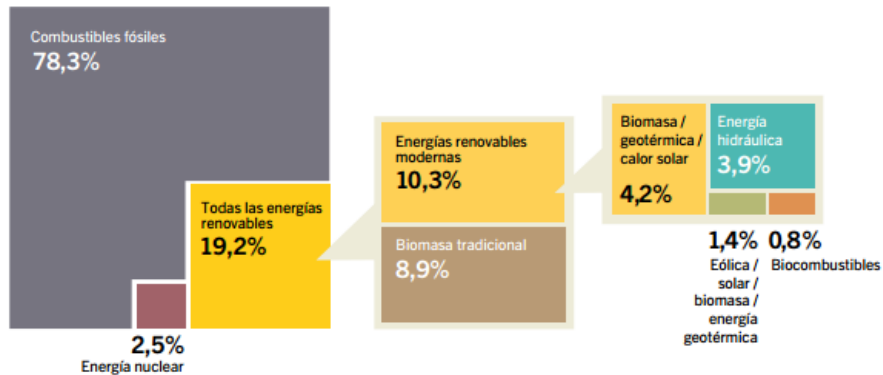


Figura 1 Energía renovable, en el consumo mundial final de energía, 2014.

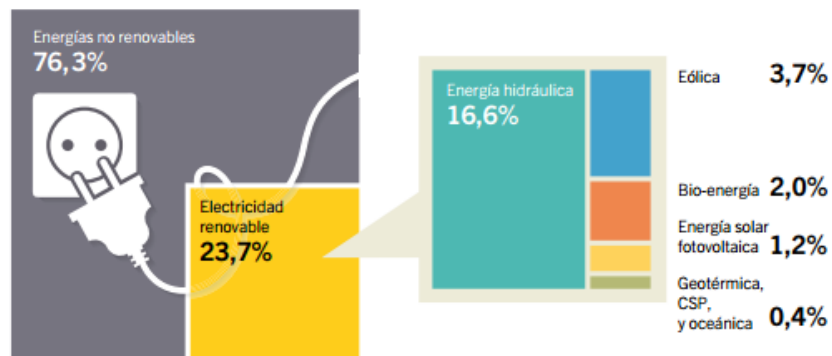


Figura 2 Energía renovable, en el consumo mundial final de energía, 2015.

Una solución que se tiene para la disminución de la utilización de recursos no renovables para la generación de energía y que ha comenzado a tomar importancia en años recientes es la micro red de CD. Una micro red de CD es un subconjunto autosustentable de un sistema de potencia que puede operar independientemente o conectado a la red. En aplicaciones de micro redes de CD es posible conectar diferentes fuentes de energía renovable para contar con energía disponible en los diferentes buses de CD, por lo que contar con un convertidor bidireccional entre éstos, nos permite compensar disturbios originados por la dinámica natural de la fuente de energía renovable y la conexión o desconexión de las cargas. Se propone el diseño de un convertidor de cuatro

etapas para disminuir el volumen del inductor sin afectar el rizo de corriente de salida, reducir las pérdidas y obtener una mejor disipación en los elementos magnéticos.

Marco Teórico

En la literatura se encuentran diversas topologías de convertidores relacionados al tema en cuestión, a continuación, se presenta una breve revisión de algunos tipos de convertidores.

En [Morichetti, 2002] se presenta un convertidor reductor-elevador bidireccional para aplicaciones en vehículos eléctricos. Este tipo de convertidores presentan beneficios en el manejo de vehículos eléctricos, ya que, cuando un vehículo es impulsado, la máquina funciona como motor y el convertidor transfiere energía a partir de las baterías a la máquina de corriente continua (MCC). Cuando el vehículo desacelera, la máquina trabaja como generador, suministrando energía hacia las baterías (frenado regenerativo), un convertidor similar se muestra en [Stahl, 2012].

Algunas otras topologías, como la que se muestra en [Valencia, 2010], permite observar un convertidor reductor-elevador bidireccional en cascada para aplicaciones en vehículos eléctricos. La dirección del flujo de potencia en el convertidor puede ser determinada por una operación reductora o elevadora, dicha topología tiene aplicación en sistemas fotovoltaicos.

Se ha comprobado que al utilizar múltiples etapas en un convertidor se obtienen mejores resultados, por ejemplo, se reduce el rizo de corriente de salida y se incrementa la densidad de potencia al disminuir el tamaño de los núcleos utilizados en los inductores de dichos convertidores, al igual que una mayor eficiencia al dividir la corriente total uniformemente en diferentes ramas, evitando así el aumento en la temperatura.

En la literatura se encuentran diferentes topologías para convertidores multifase al igual que diversas técnicas de diseño. En [Neacsu, 2010] se desarrolla un nuevo conjunto de ecuaciones para un modelo de pequeña señal para un convertidor reductor-elevador en paralelo y multifase. Estos modelos presentan el

comportamiento de este tipo de convertidores, incluyendo el control independiente del ciclo de trabajo para cada una de las etapas del convertidor multifase, tomando en cuenta el efecto de pérdida de energía inherente de la interacción de las etapas del convertidor.

Existen topologías de convertidores elevadores para aplicaciones en paneles solares [Abbasi, 2016], [Parveen, 2016] con una alta eficiencia de hasta un 98 % y avanzadas estrategias de control, los cuales hacen que los sistemas fotovoltaicos sean compatibles con altos rangos de potencia. Utilizan la técnica de convertidores multifase para disminuir el rizo de corriente de salida, al igual que reducen las pérdidas en el convertidor, obteniendo una mejor operación que los convertidores convencionales.

En [Yang, 2012] se muestra la topología de un convertidor reductor elevador multifase, en el cual se acoplan los inductores $L1$ con $L3$ y $L2$ con $L4$ teniendo un desfase de 180 grados entre cada par de inductores. Cabe mencionar que solo se discute el convertidor en modo reductor y en lazo abierto.

2. Métodos

Con la finalidad de reducir el rizo de corriente de salida, disminuir la densidad de potencia y obtener una mayor eficiencia que un convertidor de una sola etapa, se propone un convertidor reductor-elevador bidireccional multifase, a diferencia del convertidor presentado en [Yang, 2012] se analiza en modo reductor y elevador y se propone un lazo de control para cada caso. La topología se muestra en la figura 3. Para mejorar el rendimiento del convertidor de una sola etapa, se presenta un convertidor de cuatro etapas en paralelo, esta técnica se utiliza para dividir la corriente total en cuatro diferentes líneas, así se obtiene una disminución significativa en el diseño físico. Dicho convertidor cuenta únicamente con dos modos de operación, en forma de reductor o elevador.

En la figura 4 se muestra el convertidor en modo reductor alimentado por la fuente V_r que aplica 190 V en las terminales de entrada del convertidor, con una resistencia de carga R_r de 4.6 Ω . En este modo de operación, la fuente V_e y la resistencia R_e se desconectan. Los interruptores $sw1, sw3, sw5$ y $sw7$ se activan

con pulsos desfasados 90 grados eléctricos uno con respecto del otro. Los otros cuatro quedan operando como complementarios. La corriente total IT que circula a través de los interruptores, idealmente, se divide en valores iguales en cada una de las ramas desde $iL1$ hasta $iL4$.

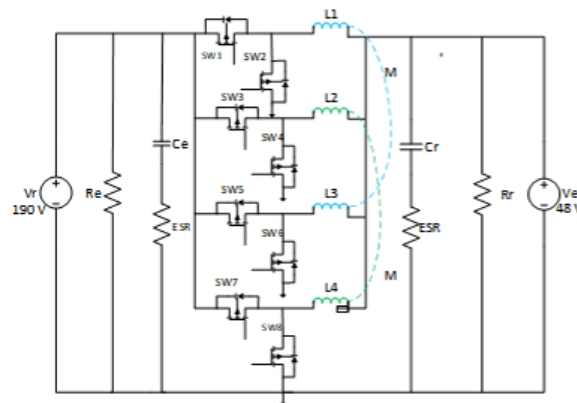


Figura 3 Convertidor reductor elevador bidireccional.

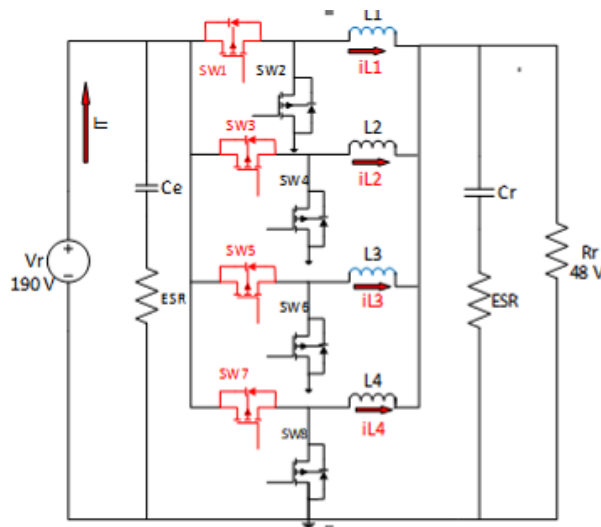


Figura 4 Convertidor en modo reductor.

En ambos modos de operación al activar los interruptores principales, los cuatro inductores quedan en paralelo por lo tanto quedaría el convertidor como un reductor o elevador simple, siendo la inductancia total $LT = \frac{L}{4}$, esto solo se toma en cuenta para el diseño del compensador.

Para el cálculo de los componentes se sigue el procedimiento descrito en [Hart, 2011], las especificaciones de diseño y valores calculados se muestran en tabla 1.

Tabla 1 Valores de los componentes (modo reductor).

Especificaciones de diseño	
V_r	190 V
V_o	48 V
P	500 W
F	50 KHz
Δi_L	1%
ΔV_o	0.001
Valores calculados	
Δi_L	0.1 A
ΔV_o	0.05 V
R_r	4.6 Ω
I_L	10.4 A
L	345 μ H
D	0.25
C	100 μ F

De acuerdo a la tabla anterior y usando el método de análisis en pequeña señal descrito en [Ang, 2005], la función de transferencia en modo reductor es la mostrada en la ecuación 1.

$$V_o = \frac{V_r (R_r + ESRCrRrS)}{S^2LCr(Rr + ESR) + S(L + ESRCrRr) + R_o} \quad (1)$$

Para el compensador en modo reductor se eligió un compensador *PI*, haciendo uso de la herramienta MATLAB se obtiene la función de transferencia del compensador $G_c(s)$, la cual se muestra en la ecuación 2.

$$G_c(s) = \frac{11(5.05S + 30)}{S} \quad (2)$$

Para el convertidor multifase en modo elevador, ahora se desconecta la fuente V_r y la carga R_r . Al igual que la configuración en modo reductor, la corriente total se divide en cada una de las diferentes ramas del convertidor, para este modo de operación se utilizan como interruptores principales $sw2, sw4, sw6$ y $sw8$, los cuales

se activan de forma descendente con un desfase de 90 grados eléctricos entre cada interruptor, los cuatro interruptores restantes se toman como complementarios, ver figura 5.

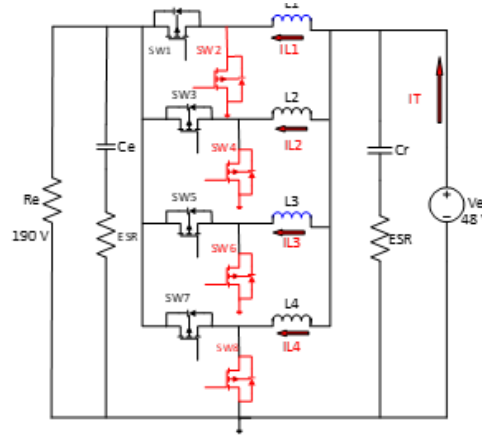


Figura 5 Convertidor en modo elevador.

Las especificaciones de diseño y valores calculados para el modo elevador, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Valores de los componentes (modo elevador).

<i>Especificaciones de diseño</i>	
<i>Ve</i>	48 V
<i>Vo</i>	190 V
<i>P</i>	500 W
<i>F</i>	50 KHz
<i>ΔiL</i>	1%
<i>ΔVo</i>	0.001
<i>Valores calculados</i>	
<i>ΔiL</i>	0.1 A
<i>ΔVo</i>	0.19 V
<i>Rr</i>	72 Ω
<i>IL</i>	10.4 A
<i>L</i>	345 uH
<i>D</i>	0.74
<i>C</i>	820 uF

Después de obtener el dimensionamiento de los materiales se llevó a cabo el análisis para el cálculo de la función de transferencia en modo elevador, la cual se muestra en la ecuación 3 [Ang, 2005].

$$G_{dv}(s) = \frac{(Re + ESR)(SCeESR + 1)(- (SL + rL)(Re + ESR) + D^2 Re^2) Re Ve}{P(s)(D Re(D Re + ESR) + rL(Re + ESR))} \quad (3)$$

Donde el valor de $P(s)$ es:

$$P(s) = S^2LCe(Re+ ESR)^2 + S(L(Re+ ESR) + rLCe(Re+ ESR)^2 + DReESR Ce(Re+ ESR)) + rL(Re+ ESR) + DRe(DRe+ ESR)$$

Para el lazo de control en modo elevador se utilizó un control denominado de tipo II. Los parámetros de diseño se muestran en la tabla 3, obteniendo $G_c(s)$ como se muestra en ecuación 4.

$$G_c(s) = \frac{315519(s+1920.43)}{s^2 + 157079} \quad (4)$$

Tabla 3 Valores del compensador $G_c(s)$.

V_{ref}	2.5 V
V_{osc}	3.3 V
ESR	0.2 Ω
F_{lc}	407.5 Hz
F_{esr}	970 Hz
F_o	5 KHz
F_{z1}	305.6 Hz
F_{p2}	25 KHz
R_{f2}	133.33 Ω
R_{f1}	10 K Ω
C_{c1}	25.92 nF
C_{c2}	316.9 pF

Consideraciones de Diseño

Diseño de los Inductores

De acuerdo a los resultados presentados para los inductores en ambos modos de operación de la tabla 1 y en la tabla 2, se determina que los valores de los cuatro inductores será de $320 \mu H$. Los inductores se acoplarán magnéticamente como se muestra en [Dang, 2017], con la finalidad de disminuir el tamaño, aumentar la densidad de potencia y la corriente de saturación. Por cada uno de los inductores estará circulando la misma corriente nominal por lo que $i_{L1} = i_{L2} = i_{L3} = i_{L4} = 5.2A$.

Diseño de los Capacitores

De acuerdo a los datos presentados en las tablas 1 y 2, los valores de los capacitores son $100 \mu F$ y $820 \mu F$, pero debido a que el convertidor elevador tiene un cero en el semiplano derecho y por naturaleza es inestable, el aumento de la

capacitancia del capacitor de salida permite la disminución del efecto causado por el cero del semiplano derecho. Por esto, se sobredimensiona el valor de los capacitores quedando $220\mu F$ y $1000\mu F$, por lo tanto nos permite controlar el convertidor de una manera más sencilla.

3. Resultados

En la figura 6 se muestra el prototipo experimental del convertidor bidireccional multifase reductor elevador.



Figura 6 Convertidor bidireccional multifase reductor/elevador.

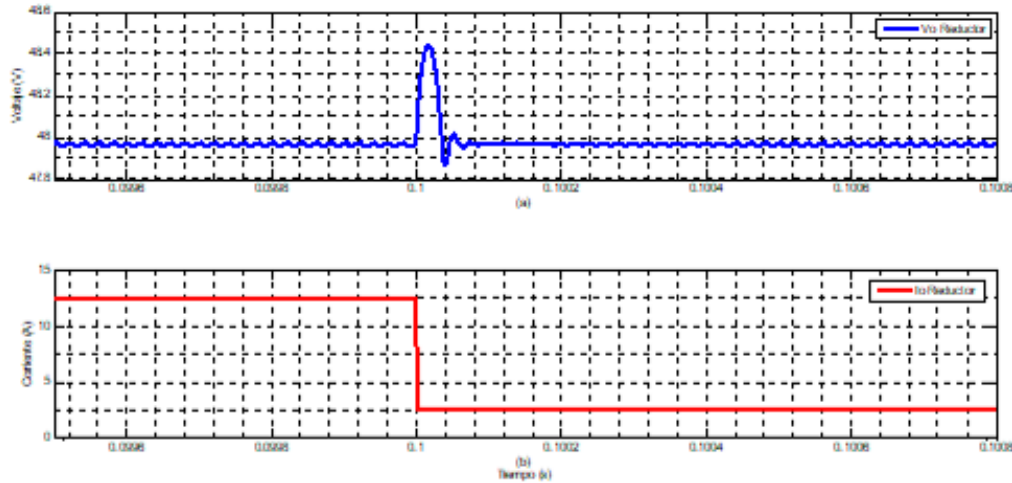
Resultados de Simulación y Experimentales en Modo Reductor

Para en análisis del convertidor reductor elevador multifase se realizaron dos cambios de carga del 20 al 100% y viceversa, con la finalidad de analizar su respuesta a los cambios.

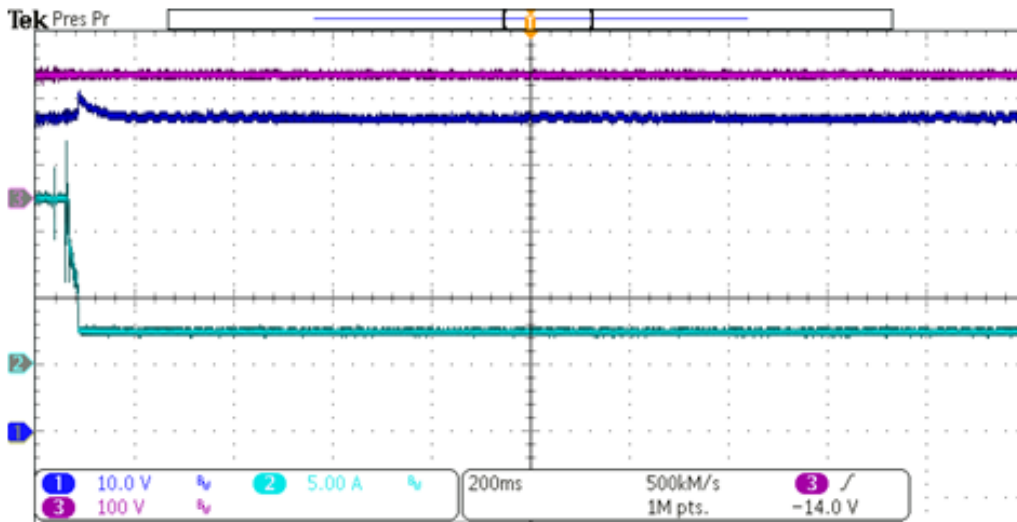
El primer cambio de carga, del 20 al 100% (500 a 100 W) (figura 7a), se observa un sobretiro de $0.4V$, un rizo de voltaje despreciable y se tiene un tiempo de estabilización de 15 ms . Por otra parte, el cambio en la corriente va de 12.5 A en carga máxima y disminuye a 2.5 A en carga mínima. En la figura 7b se aprecia la corriente y voltaje de salida de manera experimental, el voltaje presenta un sobre impulso de 3 V y un tiempo de estabilización de 100 ms . Se observa la caída de la corriente en el cambio de carga de 12.5 a 2.5 A .

En la figura 8a se muestra un cambio de carga del 20 al 100% (de 100 W a 500 W). Se observa un sobre impulso de 0.2 V y el rizo de voltaje es prácticamente despreciable. El tiempo de estabilización es de 0.3 ms . Se observa la variación de corriente de 2.08 A a 20.8 A , durante el cambio de carga. En la figura 8b se muestra

la respuesta experimental donde se aprecia un sobre impulso de voltaje de 3 V y un tiempo de estabilización de 100 ms. La corriente presenta un aumento durante el cambio de carga de 2.5 a 12.5 A.



a) Voltaje de salida, corriente de salida en simulación.

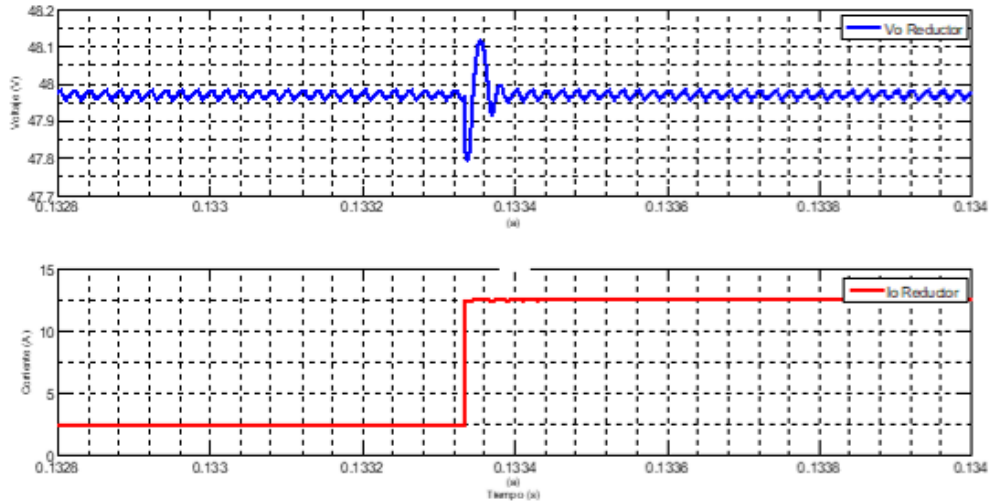


b) voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de salida experimental.

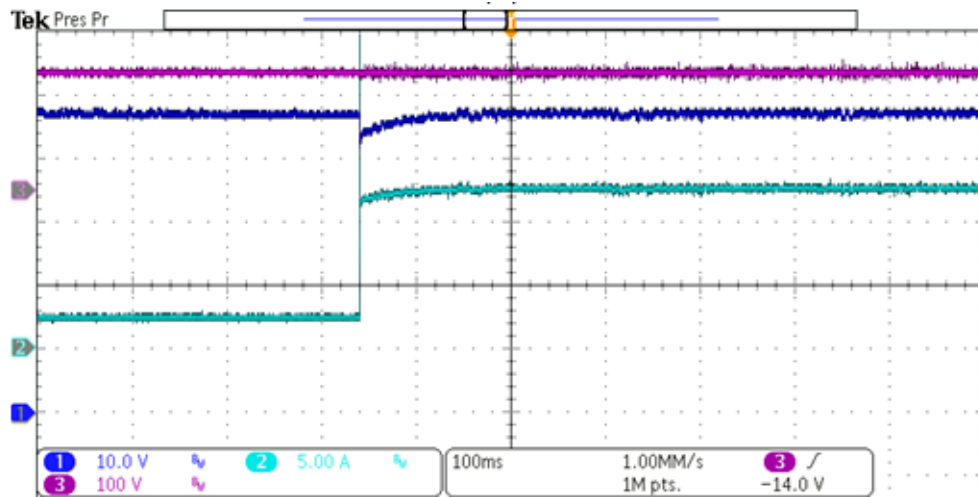
Figura 7 Cambio de carga del 100-20%.

Si se observa las formas de onda de las corrientes de entrada (en $iL1$ hasta $iL4$) se presenta un rizo de corriente 1 A en cada una de ellas, ver figura 9a. Se debe tomar en cuenta que la corriente del inductor $L1$ debe de estar desfasada 180 grados eléctricos con respecto de $L3$, al igual que las corrientes $L2$ y $L4$, con esto

se asegura que el rizo de corriente de salida será el mínimo. En la figura 9b se aprecia la corriente en cada uno de los inductores de manera experimental, en la cual se aprecia el desfase antes mencionado, la amplitud promedio de cada una de las corrientes es de 3 A, con un rizo aproximado de 2 A.



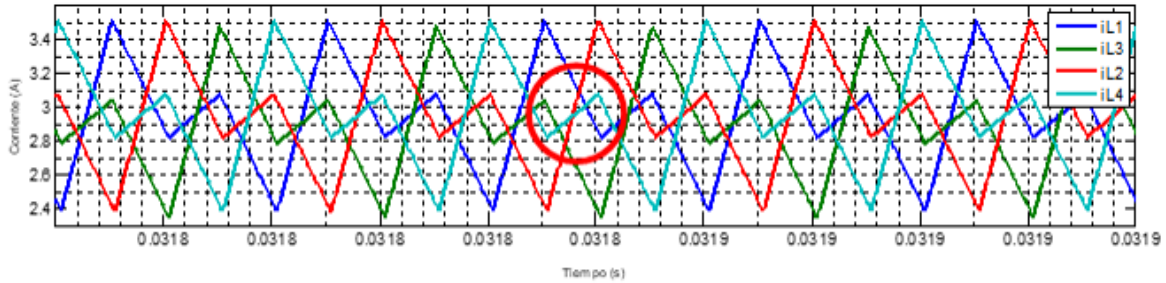
a) Voltaje de salida, corriente de salida en simulación.



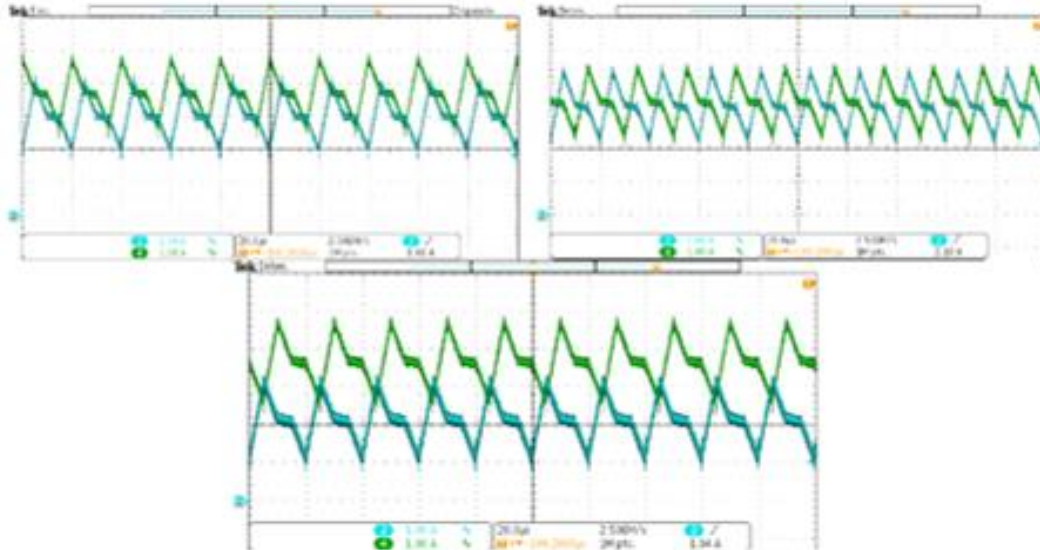
b) voltaje de entrada, voltaje de salida y corriente de salida experimental.

Figura 8 Cambio de carga del 20-100%.

En el círculo que se muestra en la figura 9^a se observa que la corriente antes de caer totalmente se vuelve a elevar, este fenómeno es por la inductancia que se presenta en los inductores acoplados. El aumento en la corriente se debe a que al activar el inductor complementario se induce una corriente en el otro inductor.



a) Simulación.



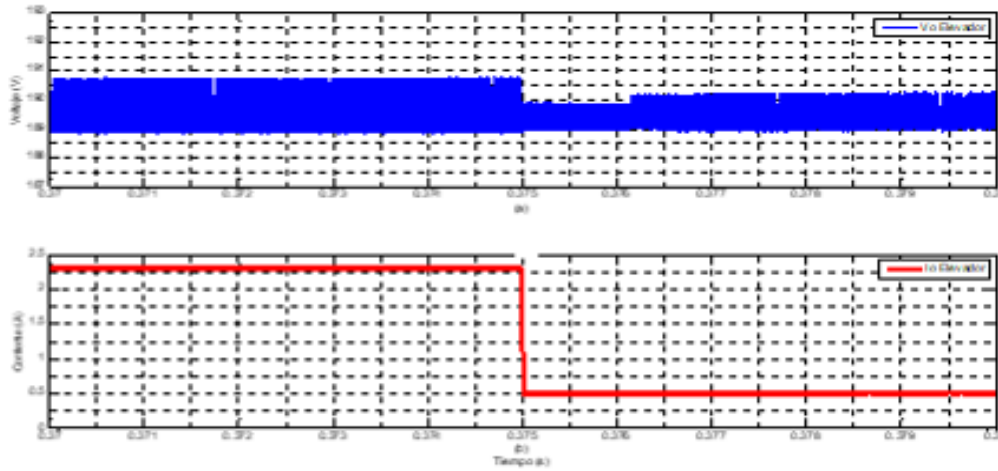
b) Experimental.

Figura 9 Corriente en los 4 inductores.

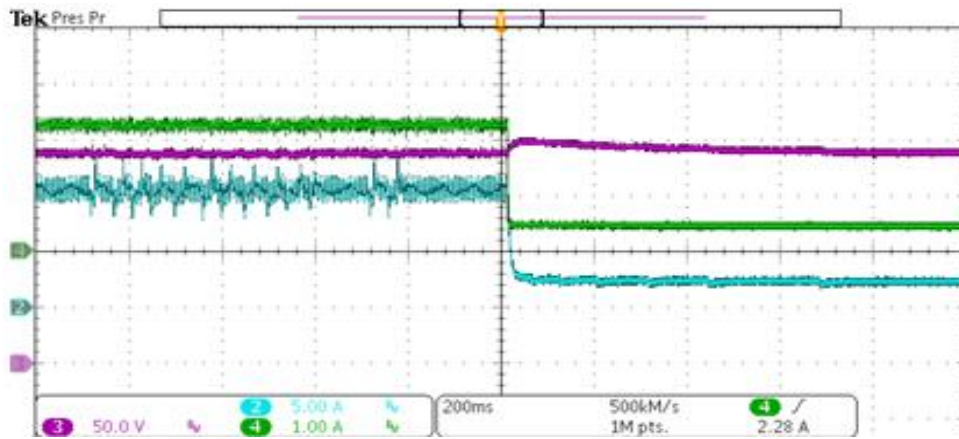
Resultados de Simulación y Experimentales en Modo Elevador

Al igual que para el convertidor en modo reductor se realizaron cambios de carga del 100 al 20% (500 a 100 W) y viceversa. En la figura 10a se observa un rizo de voltaje de 1.8 V y un sobre impulso nulo.

En la figura 10a se observa que el valor de la corriente a máxima potencia es de 2.5 A y al 20% se tiene una corriente de 0.5 A, donde se puede apreciar que no existe un sobre impulso importante de corriente al cambio de carga. En la figura 10b se aprecian los valores experimentales en los cuales se tiene un sobre impulso de voltaje de 11 V y un tiempo de estabilización de 400 ms, se aprecia un cambio en la corriente de salida de 2.4 A a 0.5 A. El rizo de corriente de salida es prácticamente despreciable.



a) Voltaje de salida, corriente de salida en simulación.

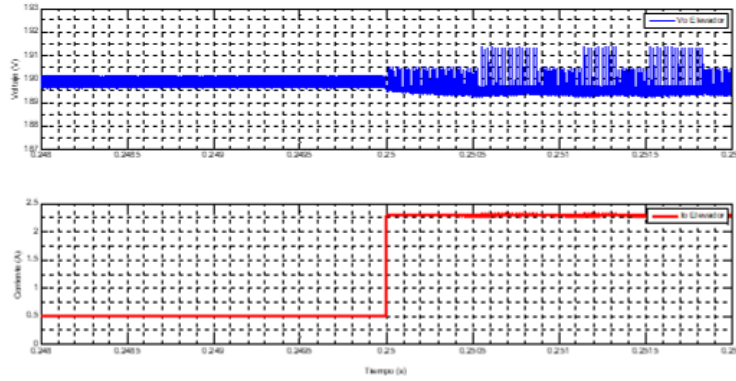


b) Corrientes de salida, voltaje de salida y corriente de entrada experimental.

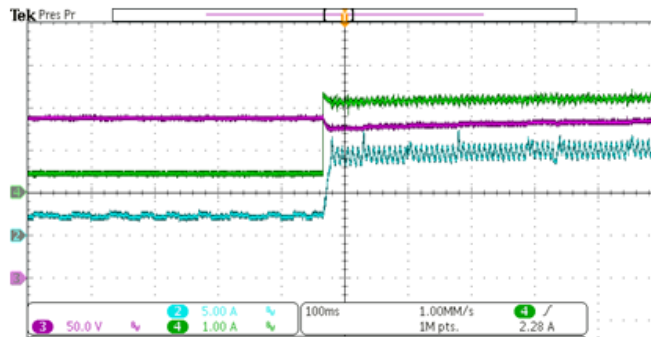
Figura 10 Cambio de carga del 100-20%.

En la figura 11 se muestra el cambio de carga para el convertidor en modo elevador del 20-100%, el sobre impulso de corriente es similar al cambio de carga de la figura 10, se tiene un sobre impulso de voltaje nulo y un rizo de 1.8 V. El tiempo que dura en alcanzar el estado estable después del cambio de carga es de **4ms**. De manera experimental se observa un sobre impulso de 11 V, la corriente de salida presenta un cambio de 0.5 a 2.4 A, al igual que se observa el cambio en la corriente de entrada.

En la figura 12a se observa las corrientes en cada uno de los inductores en simulación. En la figura 12b se puede apreciar que en promedio tienen un valor de 0.6 A y un rizo de corriente de aproximadamente 1 A al igual que un desfase de 90 grados eléctricos entre cada una de las corrientes.

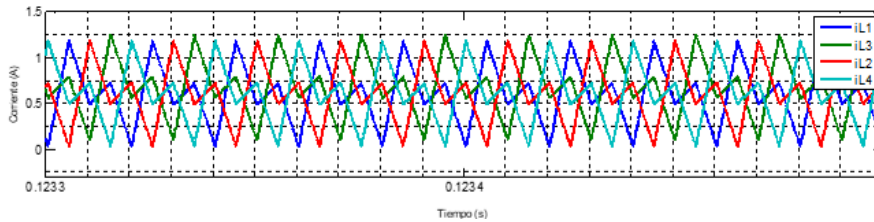


a) Voltaje de salida, corriente de salida en simulación.

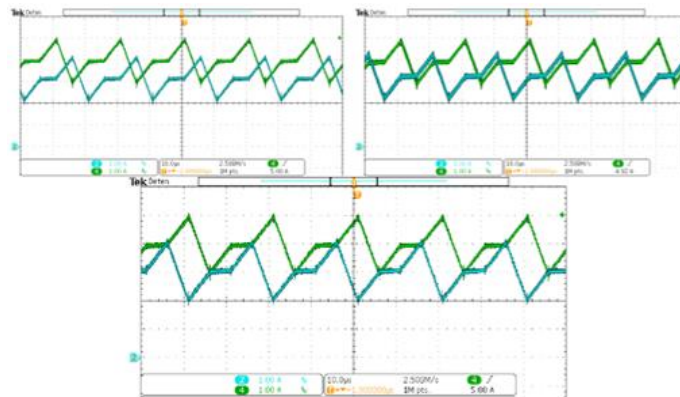


b) Voltaje de salida, corriente de salida y corriente de entrada experimental.

Figura 11 Cambio de carga del 20-100%.



a) Simulación.



b) Experimental.

Figura 12 Corriente en cada uno de los 4 inductores.

5. Conclusiones

Se propone un convertidor bidireccional multifase para la transferencia de energía entre dos buses de CD con aplicación en micro redes. La utilización de inductores acoplados permite la disminución del rizo de corriente, así como una mayor densidad de potencia y el aumento de la corriente de saturación. Los resultados de simulación permiten observar que el rizo de corriente de salida, que está compuesto por la suma de los rizados de corriente de los inductores, es pequeño el cual es ideal para la carga de baterías, que es uno de los objetivos de la micro red, al igual que para el uso de cargas en la misma.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Dang, Z., & Qahouq, J. A. A., Permanent-Magnet Coupled Power Inductor for Multiphase DC–DC Power Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(3), pp. 1971-1981, 2017.
- [2] Daniel W. Hart, *Power Electronics*, 1ra ed, McGraw-Hill. New York, pp. 198-220, 2011.
- [3] MARKVART, Tom. Microgrids, Power systems for the 21st century? *Refocus*, 2006, vol. 7, no 4, pp. 44-48, 2006.
- [4] D. O. Neacsu, W. Bonnice and E. Holmanský, On the small-signal modeling of parallel/interleaved buck/boost converters, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, pp. 2708-2713, 2010.
- [5] G. Stahl, M. Rodriguez and D. Maksimovic, A high-efficiency bidirectional buck-boost DC-DC converter, *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, 2012, pp. 1362-1367, 2012.
- [6] Janet L. Sawin and K. Seyboth, Energías renovables 2016 reporte de la situación mundial, Renewable energy policy network for the 21st century, July 2016.
- [7] M. Abbasi, A. Afifi and M. R. A. Pahlavani, Signal flow graph modeling and disturbance observer based output voltage regulation of an interleaved

- boost converter, 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, pp. 464-469, 2016.
- [8] M. G. Valencia, A. A. Gómez, Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional, Tecnura, Colombia, pp. 7-14, 2010.
- [9] Morichetti, G., Oggier, G., Bossio, G., De Angelo, C., & García, G., Implementación de un convertidor reductor-elevador bidireccional para vehículos eléctricos. presentado en Congreso Argentino de Control Automático, Argentina, 2002.
- [10] N. Parveen and Rupesh K C, Design and simulation of interleaved DC-DC boost converter for three-phase loads using solar panel, International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), pp. 514-519, 2016.
- [11] S. Ang, A. Oliva, Power-Switching Converters. Segunda edición, Taylor and Francis. New York, pp. 199-318, 2005.
- [12] Y. Yang, T. Li, J. Liu and H. Li, A comprehensive Analysis of Coupled Inductors in 4 Phases Interleaving Bidirectional DC/DC Converter, IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), China, 2012.