

Validación experimental de un convertidor resonante aislado para sistemas auxiliares en un tren

Joan Giles¹, A. Rodríguez¹, M. M. Hernando¹, J. Sebastián¹, B. Zelaa², J. Aguirre², A. Castro², J. M. Bermejo² y D. Ortega²

¹Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación. Universidad de Oviedo. Campus de Viesques s/n, 33204 Gijón. gilesjoan@uniovi.es

²Ingeteam Power Technology S.A. 48170 Zamudio. Vizcaya.

Resumen— En este artículo se propone la validación en simulación y de forma experimental de un convertidor resonante como solución a las necesidades en los sistemas auxiliares de un tren. Se utiliza un convertidor resonante serie del tipo LLC, ya que cuenta con características interesantes para este tipo de aplicaciones, tales como, el aislamiento galvánico, una buena densidad de potencia y altas eficiencias debido a su conmutación suave. Sin embargo, el bus de CC generado por la catenaria en sistemas ferroviarios tiene grandes variaciones de tensión, lo que afecta significativamente el desempeño del convertidor resonante. En este artículo se realiza una tabla comparativa cualitativa de diferentes topologías de convertidores aislados, algunos con convertidores pre-reguladores y otros con semiconductores de Carburo de Silicio (SiC). En este artículo, se propone el uso de un convertidor en lazo cerrado como pre-regulador, que regula su tensión de salida, conectado al convertidor resonante que se encuentra en lazo abierto trabajando cerca de su frecuencia de resonancia. La propuesta de solución es probada tanto en simulación como experimentalmente con la finalidad de comparar los resultados y validar el funcionamiento esperado.

Keywords—Sistemas auxiliares ferroviarios, convertidor resonante LLC, pre-regulador

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la electrificación de los sistemas de movilidad ha crecido rápidamente, esto no excluye a los sistemas ferroviarios, los cuáles optimizan cada vez más sus sistemas eléctricos, buscando tener sistemas más pequeños, ligeros y eficientes.

En la actualidad, en los sistemas ferroviarios la potencia eléctrica es transferida al tren a través de una catenaria colocada en la parte superior del mismo. La catenaria puede ser tanto en CC como en CA, y puede tener distintos valores de tensión. Luego, el tren cuenta con la electrónica de potencia necesaria para alimentar sus dos principales sistemas: el sistema de tracción y el sistema auxiliar. Dependiendo de si el tren cuenta con una topología independiente o integrada, el sistema de tracción y los sistemas auxiliares pueden ser o no ser alimentados con el mismo bus de CC.

Sin embargo, los valores de tensión de la catenaria pueden cambiar ampliamente durante los trayectos que recorre el tren, como se menciona en la norma UNE EN 50163. Esto último provoca variaciones en la tensión del bus de CC de alta potencia lo que afecta a la electrónica de

potencia de los sistemas auxiliares [1]. Los sistemas auxiliares son los encargados de suministrar energía eléctrica a los equipos eléctricos y electrónicos que se encuentren en el tren, tales como, los sistemas de iluminación, compresores, calentadores, ventiladores, bombas, aires acondicionados, etc. En general, los sistemas auxiliares demandan una potencia eléctrica de entre 20 kW a 200 kW, dependiendo del tipo de tren y de las cargas instaladas en el mismo.

Un sistema auxiliar se compone de un convertidor de potencia del tipo CC-CA, el cual por seguridad debe contar con aislamiento galvánico en alguna de sus etapas [2]. Asimismo, el convertidor debe tener en cuenta las variaciones en la tensión del bus de CC de entrada, así como, a la salida debe proporcionar una tensión trifásica de CA.

En la Fig. 1 se observa de manera general un ejemplo de un sistema eléctrico con una topología integrada de un tren. En la parte superior se encuentra una catenaria de CA, después, mediante un transformador se acondiciona la tensión para que un rectificador pueda convertir la tensión de CA en una tensión de CC, generando así, el bus de CC de alta potencia. Luego, al bus de CC de alta potencia se le conectan el sistema de tracción, el cual energiza los motores de tracción, y el sistema auxiliar que alimenta todo lo antes mencionado.

En los últimos años se han estudiado distintas topologías de convertidores para los sistemas auxiliares. En general, se divide el sistema en dos convertidores para tratar de aumentar su densidad de potencia. Un primer convertidor del tipo CC-CC, en el cual se proporciona el aislamiento galvánico, seguido de un convertidor del tipo CC-CA (inversor). En el

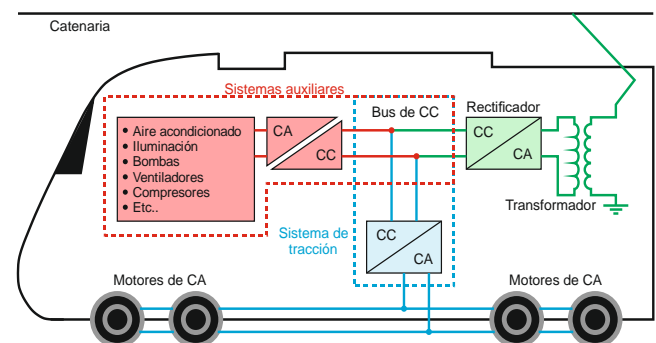


Fig. 1. Ejemplo del sistema eléctrico de un tren con una catenaria de CA y con una topología integrada en sus sistemas de tracción y auxiliares.

caso del inversor el problema se soluciona relativamente fácil, ya que sus criterios de diseño dependen principalmente de las cargas instaladas en el tren. Sin embargo, el caso del convertidor CC-CC implica un estudio más minucioso debido a las distintas necesidades del sistema, tales como, el aislamiento galvánico, una buena densidad de potencia, un tamaño lo más compacto y ligero posible, una buena disipación de calor y eficiencias relativamente buenas. Lo anterior aunado a las necesidades de regulación del sistema implica realizar un estudio de las distintas topologías de convertidores, y seleccionar o adaptar una para dicho sistema.

II. COMPARATIVA CUALITATIVA DE TOPOLOGÍAS PARA LA ETAPA CC-CC DEL CONVERTIDOR AUXILIAR

En los últimos años se han analizado distintas topologías para los convertidores CC-CC en sistemas auxiliares. El convertidor en puente completo (*FB*, de sus siglas en inglés) es una de las topologías preferidas para convertidores de media y alta potencia [3]. Sin embargo, este convertidor cuenta con conmutación dura, lo que se traduce en pérdidas para el sistema y una reducida frecuencia de conmutación máxima. Asimismo, varias soluciones basadas en enclavamientos activos, circuitos auxiliares o técnicas de conmutación han sido propuestas para este convertidor [4]. Sin embargo, el instalar más componentes disminuye la densidad de potencia y aumentan la complejidad del convertidor, y a menudo dichas soluciones no justifican el uso del convertidor para este tipo de aplicaciones [5].

El convertidor de simple puente activo (*SAB*, de sus siglas en inglés) y de doble puente activo (*DAB*, de sus siglas en inglés) son convertidores bien conocidos en este tipo de aplicaciones. El *SAB* es utilizado en aplicaciones donde el flujo de potencia es unidireccional y el *DAB* principalmente en aplicaciones con flujo de potencia bidireccional. Ambos convertidores cuentan con aislamiento galvánico y con una alta densidad de potencia [6], gracias en parte a sus conmutaciones suaves. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de carga la conmutación suave se puede perder. Además, las variaciones en la tensión provocan que la corriente *rms* del transformador incremente drásticamente [7]. Lo antes mencionado afecta el rendimiento de dichos convertidores, y por lo tanto, se limita su uso en este tipo de aplicaciones.

Distintas topologías de convertidores resonantes han sido propuestas para el uso de convertidores auxiliares en trenes, tales como topologías en serie, paralelo y serie paralelo, del tipo LLC y LCC [8], [9]. Los convertidores resonantes cuentan con características interesantes para este tipo de sistemas, tales como, el aislamiento galvánico, una alta eficiencia y una buena densidad de potencia [2]. Los convertidores resonantes tienen la ventaja de obtener un alto rendimiento cuando la frecuencia de resonancia es cercana a la frecuencia de conmutación [8]. Sin embargo, si se cambia la frecuencia de conmutación las prestaciones del convertidor resonante se reducen. Por lo tanto, dependiendo de las

variaciones de la tensión de entrada la frecuencia de conmutación del convertidor puede variar drásticamente, decrementando su rendimiento.

Además, se han propuesto distintas topologías de convertidores aislados, convertidores aislados en combinación con pre-reguladores, así como el uso de semiconductores de carburo de silicio (*SiC*) [1], [6], [10], [11]. El utilizar convertidores como pre-reguladores permite mejorar el desempeño del convertidor con aislamiento, sin embargo, se eleva el número de componentes. Asimismo, el utilizar semiconductores de *SiC* permite aumentar las frecuencias de conmutación, pero los costos de la topología aumentan considerablemente.

Por lo tanto, con el objetivo de tener una mejor comparativa de las distintas topologías se realizó un estudio con parámetros concretos del sistema. Se estableció una tensión de entrada nominal en el bus de CC de 3000 V, a una tensión de salida de 800 V y con una potencia máxima de 200 kW. En la Tabla 1 se observan los resultados más relevantes de la comparativa. Se compararon topologías *SAB*, *FB* y resonantes series, algunas de ellas con convertidores pre-reguladores conectados entre la catenaria y el convertidor de aislamiento. Asimismo, con la finalidad de aumentar la frecuencia de conmutación se evalúa el uso de dispositivos semiconductores *SiC* en las topologías de aislamiento.

La Tabla 1 se compone de seis columnas, las cuales describen los resultados más importantes de la comparativa de las topologías antes mencionadas. En la tabla, las celdas de color verde representan un beneficio, las celdas color amarillo un beneficio intermedio y las celdas color rojo un déficit de la topología. La primera columna describe la topología evaluada, si cuenta con pre-regulador o no, o si utiliza semiconductores *SiC*. La frecuencia de conmutación es clave para la selección de la topología, ya que determina el tamaño de los componentes reactivos. Por lo tanto, en la segunda columna se observa la frecuencia máxima a la que se pudo hacer trabajar el convertidor aislado, así como la frecuencia del pre-regulador. Es importante mencionar que todos los convertidores evaluados cuentan con una bobina en su funcionamiento. Dependiendo de la frecuencia de conmutación, dicha bobina puede ser de un valor relativamente tan pequeño que puede quedar integrada en el transformador del convertidor de aislamiento. Por lo tanto, en la tercera columna se observa si la bobina del convertidor aislado puede ser la del transformador o es necesario anexar una. En la cuarta columna se observa el coste promedio del convertidor, en el cual se toma en cuenta el incremento del coste del pre-regulador y de los dispositivos *SiC*, si es que cuenta con ellos. Algunas topologías implican considerar un mayor número de parámetros al diseñar su transformador lo cual dificulta su diseño, en la quinta columna se considera lo antes mencionado. Por último, algunos convertidores implican una mayor complejidad en su control al implementarse, lo cual se considera en la sexta columna.

Tabla 1. Comparativa de distintas topologías para convertidores CC-CC aislados en convertidores auxiliares.

Topología	Frecuencia máxima de conmutación [kHz]	Bobinas adicionales	Coste	Complejidad del transformador	Complejidad del control
SAB					
SAB	1	1			
SiC+SAB	7	0			
Elevador+SAB	1 (Elevador) + 2.5 (SAB)	1			
Reductor+SAB	1 (Reductor) + 4 (SAB)	1			
FB					
FB	2.5	1			
SiC+FB	10	1			
Elevador+FB	1 (Elevador) + 4 (FB)	1			
Reductor+FB	1 (Reductor) + 8 (FB)	1			
Resonante					
Resonante serie	0.5	1			
Reductor+Resonante serie	1 (Reductor) + 10 (Resonante)	0			
Elevador+Resonante serie	1 (Elevador) + 7 (Resonante)	0			

De acuerdo con la Tabla 1 las topologías con dispositivos SiC alcanzan buenas frecuencias de conmutación, sin embargo, sus beneficios no justifican sus costos relativamente muy altos, por los que no son una opción viable. Por otro lado, las topologías FB + pre-regulador tienen relativamente buenas frecuencias de conmutación, sin embargo, necesitan de una bobina adicional en su funcionamiento, en adición, el diseño de su transformador implica una cierta dificultad. Por último, las topologías resonantes serie + pre-regulador tienen relativamente altas frecuencias de conmutación, lo que permite que la bobina del convertidor quede integrada en el transformador, además, implican bajos costos, es relativamente sencillo diseñar su transformador y en general es fácil implementar su control.

III. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

De acuerdo con el apartado anterior, se considera que los convertidores resonante serie con pre-reguladores son los que cuentan con mejores prestaciones. Lo anterior se debe a que el convertidor pre-regulador tiene la función de regular la tensión a la entrada del convertidor resonante, lo que le permite al convertidor resonante trabajar cerca de la frecuencia de resonancia. Por lo tanto, se tiene un convertidor pre-regulador en lazo cerrado conectado a un convertidor resonante serie en lazo abierto.

En este artículo se realiza la validación en simulación y de manera experimental de un convertidor resonante serie. Sin embargo, para poder probar el convertidor resonante de manera experimental se necesita elevar la tensión de una fuente de laboratorio mediante un convertidor previo. En la Fig. 2 se observa el diagrama de bloques de la propuesta de solución para la validación experimental. En la Fig. 2 se observa la fuente de laboratorio de relativa baja tensión (LV) conectada a un convertidor elevador multifase de dos fases entrelazadas, este convertidor eleva la tensión LV a una alta tensión (HV), con la cual se alimenta el convertidor resonante. Después, la salida del convertidor resonante se conecta a la tensión LV, esto se realiza con la finalidad de hacer recircular la energía y no desperdiciar la potencia eléctrica en las pruebas. Asimismo, el convertidor multifase se encuentra

realimentado por un lazo de control de corriente la salida del convertidor resonante. Por otro lado, el convertidor resonante se encuentra en lazo abierto. Los valores de tensión, potencia y frecuencias de conmutación del sistema son los siguientes:

- Una tensión en la fuente de laboratorio de 1000 V, con tensiones mínimas de 500 V y tensiones máximas de 1500 V,
- Una frecuencia de conmutación de 800 Hz para el convertidor elevador multifase de dos fases. Y cada fase desfasada 180° respecto una de la otra.
- Una tensión de entrada del convertidor resonante de 2000V, con tensiones mínimas de 1000 V y tensiones máximas de 3000 V, a una frecuencia de conmutación de 7 kHz.
- Una potencia nominal máxima del sistema de 200 kW y picos de potencia máximos de 240 kW.

IV. RESULTADOS

En el siguiente apartado se muestran los resultados de la propuesta de solución. Primeramente, se observan los resultados en simulación, para después dar paso a los resultados de implementación experimental.

A. Simulaciones

Las simulaciones se realizaron con el software PSim, tomando en consideración todos los aspectos importantes para lograr simulaciones lo más cercanas a la implementación.

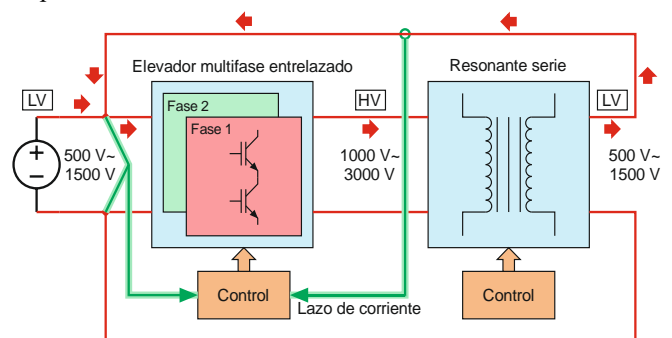


Fig. 2. Diagrama a bloques de la propuesta de solución.

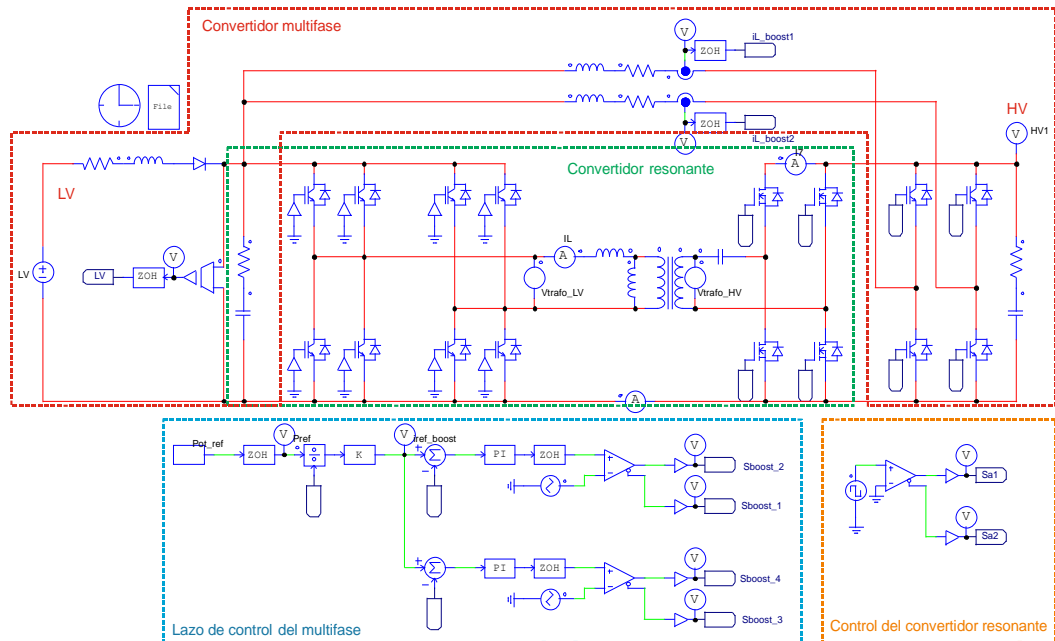


Fig. 3. Diagrama esquemático de la propuesta de solución para el sistema auxiliar.

En la Fig. 3 se observa el diagrama esquemático de la simulación, asimismo, se observa una división en bloques de color de las etapas de la propuesta de solución. El bloque de color rojo corresponde al convertidor elevador multifase. La tensión LV corresponde a la entrada de tensión de la fuente de laboratorio y HV la tensión de entrada del convertidor resonante. El bloque de color verde corresponde al convertidor resonante, en donde su salida realimenta LV para hacer recircular la energía. Por último, el bloque de color azul corresponde al lazo de control del convertidor multifase y el bloque de color naranja al control del convertidor resonante.

Con la finalidad de observar la dinámica de la propuesta de solución se realizó una simulación del sistema completo, al cual se le aplicaron cambios en la tensión LV y cambios en la potencia de recirculación (cambios de carga). En la Fig. 4 se observa el comportamiento de la tensión de LV, la potencia de recirculación (Prec) y la corriente de resonancia (IL). En la figura se observa que sin importar las perturbaciones el sistema mantiene la regulación de tensión y potencia. Esto significa que incluso ante los mayores cambios de tensión en LV el sistema seguirá proporcionando la potencia requerida.

En las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7. se observan las formas de onda de la corriente de resonancia (IL), la corriente de conducción de un IGBT (I_{a1}) y la tensión colector-emisor del IGBT (VCE) del convertidor resonante, a diferentes condiciones de operación. La Fig. 5 corresponde a una prueba a 50 kW, la Fig. 6 a 200 kW y la Fig. 7. a 240 kW. Todas las simulaciones están realizadas con una tensión LV de 1000 V y una tensión HV de 2000 V. Las formas de onda de la corriente IL de todas las pruebas son relativamente similares en forma, aunque no en magnitud. Esto se debe a que el convertidor resonante se encuentra trabajando cerca a la frecuencia de resonancia. Por otro lado, en las gráficas de corriente I_{a1} se observa una diferencia en sus formas de onda.

En la prueba a 50 kW es apreciable un pico de corriente negativo al momento del encendido del IGBT, necesario para la conmutación suave. Sin embargo, este pico de corriente, aunque existente, es poco apreciable en pruebas de mayor potencia. Por otro lado, las gráficas VCE corresponden a la tensión aplicada al IGBT. Asimismo, las pérdidas son relativamente pequeñas, en comparación con la potencia del convertidor, esto es gracias a la conmutación suave del convertidor resonante.

Además, en la Fig. 8. se observan las gráficas de las corrientes por fase (iL_{boost1} y iL_{boost2}) del convertidor multifase de dos fases. La prueba corresponde a

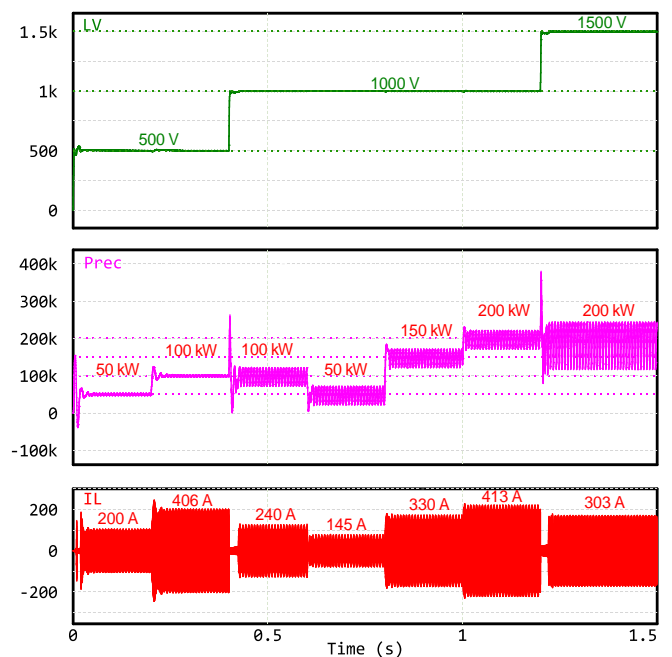


Fig. 4. Respuesta dinámica en simulación de la propuesta de solución ante cambios de tensión y cambios de carga. La tensión de entrada está representada por la gráfica color verde, la potencia de recirculación por la gráfica color morado y la corriente de resonancia del convertidor resonante por la gráfica rojo.

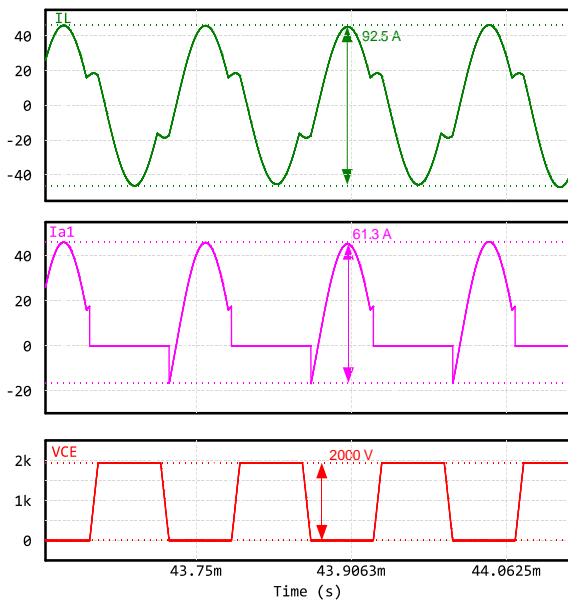


Fig. 5. Simulación correspondiente a una tensión en LV de 1000 V a una potencia de 50 kW en el convertidor resonante. La corriente de resonancia (IL) está representada por la gráfica color verde, la corriente de conducción del IGBT (Ia1) por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT (VCE) en la gráfica de color rojo.

una tensión de 500 V en LV y a una potencia de 10 kW. En la figura se observa que las corrientes iL_boost1 y iL_boost2 se encuentran desfasadas 180° una respecto a la otra. Esto último se realizó con el objetivo de disminuir el rizado de la corriente del capacitor.

B. Resultados experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron en el laboratorio de *Ingeteam*, en *Zamudio, España*, debido a que allí se cuenta con las capacidades necesarias para suministrar las potencias eléctricas del prototipo. En la Fig. 9 se observa una imagen del prototipo implementado. En la figura se observa el transformador del convertidor resonante y las bobinas del convertidor multifase, además, se indica la ubicación de la tensión de HV y LV. En los siguientes apartados se comparan los resultados experimentales con los resultados de simulación.

En la Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 12 se observan las formas de onda de la corriente de resonancia, la tensión colector-emisor y la corriente de conducción de un IGBT del convertidor resonante. Los resultados de estas figuras son comparables con los resultados de simulación de la Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7, respectivamente, ya que cuentan con los mismos parámetros de simulación e implementación. Asimismo, es importante mencionar que las formas de onda de la corriente de conducción del IGBT en implementación se encuentran invertidas debido a la colocación de las sondas de corriente. De igual forma, en las tres pruebas se puede observar la conmutación suave del convertidor resonante. Asimismo, todas las pruebas tienen formas de onda similares en simulación e implementación. Y si bien, existen diferencias

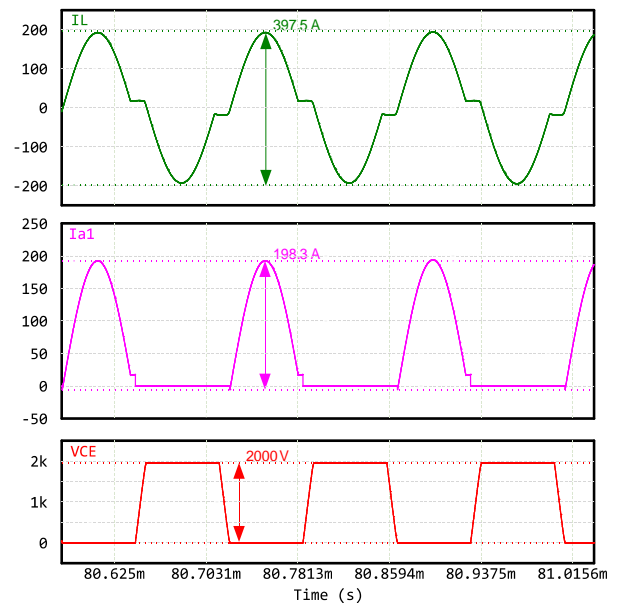


Fig. 6. Simulación correspondiente a una tensión en LV de 1000 V y una potencia de 200 kW. La corriente de resonancia (IL) está representada por la gráfica color verde, la corriente de conducción del IGBT (Ia1) por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT (VCE) en la gráfica de color rojo.

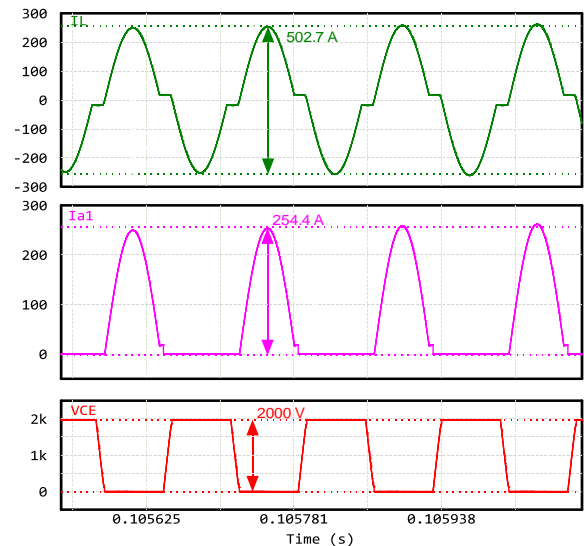


Fig. 7. Simulación correspondiente a una tensión en LV de 1000 V y una potencia de 240 kW. La corriente de resonancia (IL) está representada por la gráfica color verde, la corriente de conducción del IGBT (Ia1) por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT (VCE) en la gráfica de color rojo.

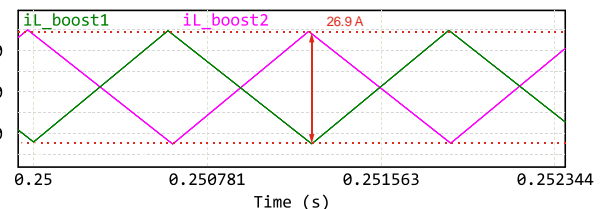


Fig. 8. Gráficas de las corrientes por fase (iL_boost1 y iL_boost2).

en las magnitudes, las diferencias son mínimas con respecto a la potencia del sistema. En la experimentación se ha podido comprobar que el convertidor resonante tiene mayores pérdidas en el apagado del IGBT, siendo prácticamente nulas las del encendido. Las pérdidas de apagado son incluso

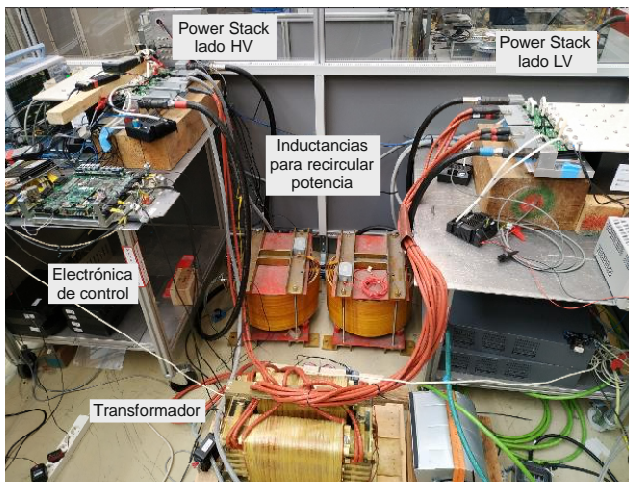


Fig. 9. Prototipo experimental.

predominantes sobre las pérdidas de conducción. En las pruebas se midió 85 mJ de energía que a 7 kHz implica unas pérdidas de apagado de casi 600 W .

Además, en la Fig. 13 se observan las gráficas de las corrientes por fase del convertidor multifase. La prueba es comparable con la simulación de la Fig. 8. De igual forma, en la implementación las corrientes de fase se encuentran desfasadas 180° una respecto a la otra.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso una solución para el convertidor CC-CC aislado encargado de suministrar potencia eléctrica a los sistemas auxiliares de un tren. La solución propuesta se trató de un convertidor resonante del tipo LLC en lazo abierto más un convertidor en lazo cerrado como pre-regulador.

El convertidor resonante muestra relativamente buen desempeño en varios puntos de operación. Sobre todo, ante las variaciones de tensión y potencia, que se presentan de manera continua en el tren. En cuanto a la topología se pudo comprobar que el convertidor resonante tiene un buen desempeño, siempre y cuando la frecuencia de conmutación trabaje cerca a la frecuencia de resonancia. Las formas de onda tanto en simulación como en implementación son similares en forma y magnitud.

Tras las pruebas experimentales preliminares presentadas en este artículo se procede, como trabajo futuro, al análisis de la operación del convertidor resonante en distintos puntos de operación, como por ejemplo con distintos valores de tiempos muertos, funcionamiento en el arranque, con picos de potencia, etc.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación para la investigación Científica y Técnica (FICYT) a través del proyecto SV-PA-21-AYUD/2021/51931 y por la UE a través del proyecto UE-23-POWERIZED-101096387.

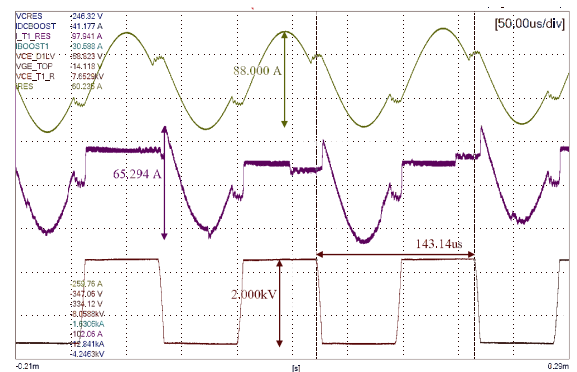


Fig. 10. Prueba en experimentación con una tensión en LV de 1000 V y a una potencia de 50 kW . La corriente de resonancia está representada por la gráfica color amarillo, la corriente de conducción del IGBT por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT en la gráfica de color rojo.

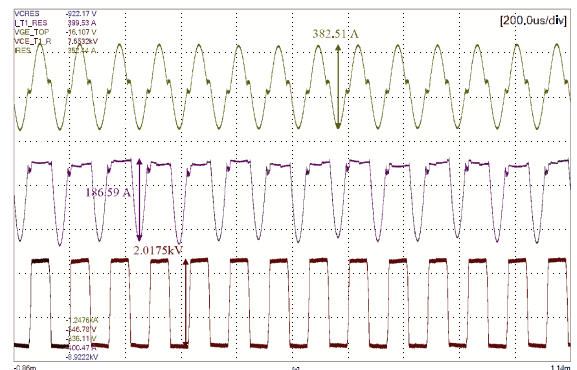


Fig. 11. Prueba en experimentación con una tensión en LV de 1000 V y a una potencia de 200 kW . La corriente de resonancia está representada por la gráfica color amarillo, la corriente de conducción del IGBT por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT en la gráfica de color rojo.

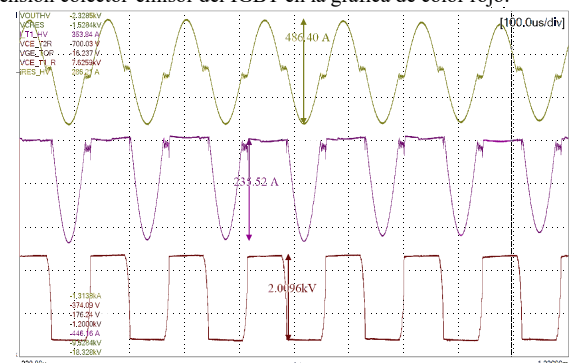


Fig. 12. Prueba en experimentación con una tensión en LV de 1000 V y a una potencia de 240 kW . La corriente de resonancia está representada por la gráfica color amarillo, la corriente de conducción del IGBT por la gráfica color morado y la tensión colector-emisor del IGBT en la gráfica de color rojo.

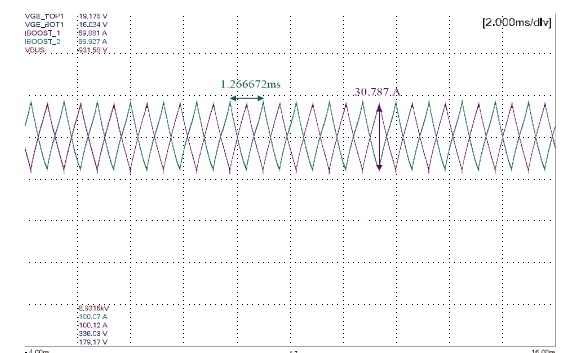


Fig. 13. Gráficas de las corrientes por fase del convertidor multifase de dos fases.

REFERENCIAS

- [1] M.-A. Ocklenburg, M. Döhmen, X.-Q. Wu, y M. Helsper, «Next generation DC-DC converters for Auxiliary Power Supplies with SiC MOSFETs», en *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607463.
- [2] A. Maerz y M.-M. Bakran, «Designing a low weight low loss auxiliary converter for railway application», en *PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2014, pp. 1-8.
- [3] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, y M. H. Kheraluwala, «A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 27, n.º 1, pp. 63-73, 1991, doi: 10.1109/28.67533.
- [4] V. R. K. Kanamarlapudi, B. Wang, N. K. Kandasamy, y P. L. So, «A New ZVS Full-Bridge DC-DC Converter for Battery Charging With Reduced Losses Over Full-Load Range», *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, n.º 1, pp. 571-579, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2756031.
- [5] N. H. Baars, H. Huisman, J. L. Duarte, y J. Verschoor, «A 80 kW isolated DC-DC converter for railway applications», en *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2014, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2014.6910741.
- [6] Y. Li, A. Junyent-Ferré, y P. D. Judge, «A Boost-Full-Bridge-Type Single-Active-Bridge Isolated AC-DC Converter», en *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2019, pp. 2021-2028. doi: 10.1109/APEC.2019.8722294.
- [7] M. R. Rogina *et al.*, «Design and operation of a DC/DC converter to integrate energy storage into a railway traction system», en *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, 2021, p. P.1-P.9. doi: 10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570470.
- [8] M. Youssef, J. A. A. Qahouq, y M. Orabi, «Analysis and design of LCC resonant inverter for the transportation systems applications», en *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 1778-1784. doi: 10.1109/APEC.2010.5433474.
- [9] A.-Y. Ko, S.-Y. Kang, I.-K. Won, J. Yi, y C.-Y. Won, «Development of a Resonant Auxiliary Power Supply Control Algorithm and Resonant Destruction Detecting for Railway Vehicles», *Energies (Basel)*, vol. 15, n.º 21, p. 8029, 2022.
- [10] P. Ellams, *Resonant DC Link Converters and Their Use in Rail Traction Applications*. University of Salford, 1994. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=oABHHAACAAJ>
- [11] F. Alkayal y J. B. Saada, «Compact three phase inverter in Silicon Carbide technology for auxiliary converter used in railway applications», en *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6631779.