

Topología Reconfigurable para la Integración de Baterías Extraíbles al Bus CC de un Vehículo Eléctrico con Compatibilidad de 400 V y 800 V

Duberney Murillo-Yarce*, Gabriel D. Colvero, Diego. G. Lamar, Alberto Rodríguez y Aitor Vázquez
Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación, Campus de Viesques s/n, Universidad de Oviedo, 33204 Gijón. España.
Email: murilloduberney@uniovi.es*

Resumen—Los vehículos eléctricos (VEs) representan una solución sostenible para la descarbonización del transporte, donde las baterías desempeñan un papel fundamental. Para mejorar la flexibilidad en la gestión de la energía de los VEs y contribuir a mejoras en el rendimiento general del sistema de tracción, surge la integración de múltiples baterías extraíbles como un enfoque alternativo. Esta solución es adecuada tanto para el estándar de bus de 400 V ampliamente adoptado como para el estándar emergente de 800 V, que está ganando aceptación en el mercado de vehículos comerciales debido a sus interesantes características. Este documento presenta una topología reconfigurable con la capacidad de conectar una batería extraíble a ambos buses de 400 V y 800 V. Una batería extraíble cargada externamente ofrece un nivel adicional de flexibilidad, permitiendo la opción de ajustar la capacidad del VE según la ruta elegida. La topología reconfigurable propuesta puede operar tanto en los estándares de 400 V como de 800 V sin necesidad de interruptores externos para adaptarse a cada nivel de tensión. Gracias a la modularidad es posible emplear dispositivos semiconductores cuyas tensiones de ruptura son inferiores a los 800 V. La topología se basa en el convertidor Dual Active Bridge (DAB) utilizando las configuraciones de entrada y salida paralelas (IPOP) y entrada paralela y salida en serie (IPOS). Los resultados experimentales en un prototipo escalado en potencia y tensión demuestran la viabilidad de la topología reconfigurable.

Palabras clave—Batería extraíble, convertidor CC-CC, convertidor modular, dual active bridge, topología reconfigurable, vehículos eléctricos.

I. INTRODUCCIÓN

El vehículo eléctrico (VE) ha sido un foco de interés en los últimos años, debido al esfuerzo generalizado por desarrollar métodos de transporte con una huella ambiental reducida [1]. Un componente esencial de un VE es la batería, encargada de almacenar y suministrar energía no solo al sistema de tracción, sino también a los sistemas auxiliares de todo el vehículo. La arquitectura de potencia más común para los VEs se muestra en Fig. 1. Un sistema de gestión de energía central es responsable de cargar y descargar la batería según las condiciones de conducción y la potencia solicitada en general. Este sistema en conjunto con el sistema de gestión de batería (Battery Management System (BMS)), determina el punto de operación óptimo de la batería. La capacidad y la tecnología de la batería son cruciales para el rendimiento general [2]. Este rendimiento puede mejorarse y hacerse más flexible mediante la incorporación de baterías

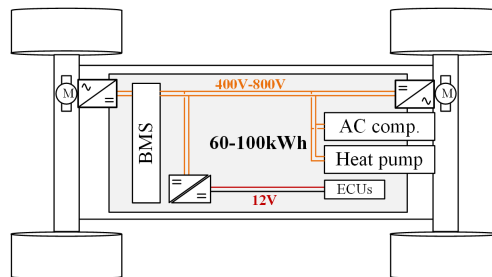


Fig. 1. Arquitectura de potencia del vehículo eléctrico.

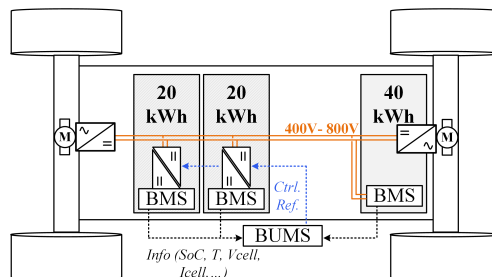


Fig. 2. Sistema de potencia para VE con múltiples baterías.

adicionales conectadas al bus CC, capaces de operar colectiva o independientemente [3]. Una propuesta en la arquitectura de potencia de un VE con múltiples baterías se muestra en Fig. 2. Cada batería está equipada con su propio BMS, complementado por un controlador central conocido como el sistema de gestión de unidades de batería (Battery Unit Management System (BUMS)).

La batería no extraíble suministra principalmente una mayor potencia y opera durante la mayor parte del tiempo. En escenarios específicos, entran en juego baterías adicionales que suministran una potencia menor. Se activan, por ejemplo, durante el arranque o cuando se producen picos de corriente. Además, pueden almacenar energía recuperada del VE, como ocurre durante el frenado regenerativo, y posteriormente devolverla al bus CC para suministrarla al sistema de tracción. La capacidad de integrar varias baterías para la operación de un VE permite adaptar la capacidad de la batería, es decir, de 60 kWh o 80 kWh a 40 kWh, y algunas baterías externas, extraíbles e intercambiables, cada

una con una capacidad de 20 kWh, para obtener la capacidad deseada. Además, este enfoque de integración de baterías facilita la utilización de baterías con diversas tecnologías, aprovechando sus respectivas ventajas [4]. Sin embargo, a pesar de los beneficios de conectar baterías adicionales, hay un inmediato compromiso con un aumento en el número de componentes, lo que resulta en un mayor peso del vehículo y una mayor complejidad en el sistema de gestión de energía.

Una batería extraíble es un caso particular del uso de múltiples baterías en un VE. Una batería extraíble cargada externamente ofrece un nivel adicional de flexibilidad, permitiendo la carga externa y la opción de ajustar la capacidad del VE según la ruta elegida [5]. La energía almacenada también puede ser útil en aplicaciones externas de un VE, como uso residencial o como fuente de energía para otro VE. La batería extraíble puede ser una batería de segunda vida y potencialmente utilizar una tecnología diferente a la de la batería no extraíble.

La conexión de la batería extraíble al bus CC se establece mediante una topología de conversión de energía de CC a CC. Según el estándar actual en niveles de potencia más bajos en VEs de pasajeros (Clase Uno en el estándar de EE. UU., o M1 en el estándar de la UE) [6], [7], la tensión nominal del bus CC es de 400 V. Sin embargo, ciertas publicaciones sugieren la posible utilización de buses que operan a 800 V [8]. Aumentar la tensión del bus CC ofrece notables ventajas, como una mayor potencia y una corriente reducida. Además, esto resulta en un tiempo de carga más corto. Actualmente, los VEs de Clase 1 equipados con un bus CC de 800 V constituyen el 18 % del total, un porcentaje que aumentará en los próximos años [9]. Cuando coexisten VEs equipados con un bus CC de 400 V y aquellos que se adhieren a un estándar de 800 V, es recomendable utilizar topologías de conversión de energía reconfigurables capaces de adaptarse a los requisitos de tensiones de los sistemas de 400 V y 800 V. Varias publicaciones discuten topologías reconfigurables capaces de operar a dos tensiones diferentes (siendo una el doble de la otra). Una topología reconfigurable basada en un Dual Active Bridge (DAB) que utiliza interruptores en serie y en paralelo para adaptarse a cada bus de tensión se presenta en [10]. Otros trabajos se centran específicamente en cargadores de baterías capaces de operar en un amplio rango de tensiones, compatibles con los buses estándar de 400 V y 800 V [11], [12]. Estas topologías se basan en un puente completo con desplazamiento de fase con una rama de condensador y un interruptor en el puerto de entrada [11], y en un convertidor resonante LLC con lados secundarios duales y tres interruptores externos [12]. Una desventaja de estas topologías reconfigurables radica en la necesidad de interruptores externos o interruptores adicionales para cambiar entre niveles de tensión, lo que conlleva un aumento en el número de componentes y una reducción en la eficiencia de conversión.

Este artículo presenta una topología reconfigurable capaz de conectar una batería extraíble a los buses de 400 V y 800 V. La

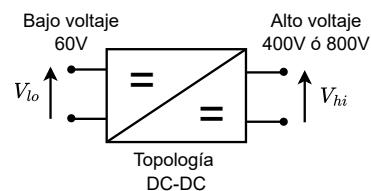


Fig. 3. Especificaciones de tensiones nominales de la topología modular.

topología propuesta se basa en el convertidor DAB y no utiliza interruptores externos. Esta topología reconfigurable permite una adaptación sencilla al estándar del bus CC sin someter la operación de los semiconductores a las solicitaciones máximas de corriente y tensión. La estructura de este artículo es la siguiente. La Sección II presenta la topología reconfigurable para vincular la batería extraíble tanto al bus de 400 V como al de 800 V. El esquema de control se incluye en la Sección III. Se construye un prototipo experimental escalado en potencia y tensión, y se realizan pruebas de validación en la Sección IV. Finalmente, las conclusiones se presentan en la Sección V.

II. TOPOLOGÍA MODULAR PARA BUS CC DE ALTA TENSIÓN

A. Modularidad y reconfiguración

La solución propuesta se basa en un convertidor modular, formado por módulos que procesan una parte de la potencia total del convertidor. En todo convertidor modular, es necesario determinar la configuración (o conexión entre módulos), el control y el circuito de potencia más conveniente según la configuración entre módulos.

La topología reconfigurable propuesta debería facilitar la conexión a los buses CC estándar de 400 V y 800 V. Las tensiones nominales se ilustran en Fig. 3. La batería extraíble se conecta al lado de baja tensión, mientras que el lado de alta tensión corresponde al bus CC de alta tensión dentro de la arquitectura del VE. Para salidas reconfigurables tanto a 400 V como a 800 V, con una entrada constante mucho menor que la tensión de salida, es recomendable conectar en paralelo en la entrada, ya sea en serie o en paralelo en la salida, según el estándar del bus CC. Específicamente, conexión entrada paralelo salida paralelo (Input Parallel Output Parallel (IPOP)) es adecuada para el estándar de 400 V, mientras que la conexión entrada paralelo salida serie (Input Parallel Output Series (IPOS)) es recomendable para el estándar de 800 V. Por ejemplo, en el caso de solo dos convertidores modulares, sus entradas siempre se conectan en paralelo, y las salidas de ambos módulos se conectan en paralelo para el estándar de 400 V o se conectan en serie para el bus de 800 V.

El próximo desafío, después de establecer la topología modular, implica reconfigurarla para alinearse con el nivel de tensión del bus CC. Adaptarse a dos niveles de tensión significativamente diferentes se puede lograr mediante interruptores externos [10]–[12]. Sin embargo, este enfoque no solo aumenta el número de componentes, sino que también disminuye la eficiencia de conversión de energía. En

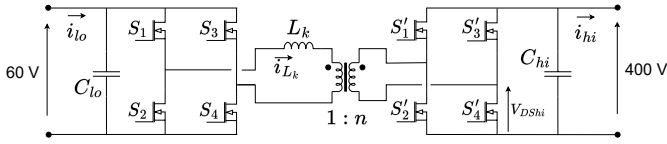


Fig. 4. Estructura del convertidor DAB.

consecuencia, es aconsejable evitar el uso de elementos externos siempre que sea posible. En la topología reconfigurable propuesta, este desafío se aborda activando o desactivando selectivamente los semiconductores dentro de uno de los módulos.

B. Convertidor modular y topología

Se elige el convertidor DAB como el módulo más simple en la topología reconfigurable propuesta. El DAB es reconocido por sus excelentes características de control y eficiencia [13]. Este convertidor presenta un interés especial en el campo de los VEs debido a sus características relevantes, como aislamiento galvánico y operación bidireccional. La estructura del convertidor DAB se muestra en Fig. 4. El DAB puede procesar energía a niveles de tensión tanto de 400 V como de 800 V. Sin embargo, no funciona de manera óptima en ambos casos (es decir, con un amplio rango de tensión).

Tradicionalmente se utilizan configuraciones modulares IPOPOP para 400 V e IPOS para 800 V. En ambos escenarios, cada módulo opera bajo condiciones de diseño similares (conversión de tensión de 60 V a 400 V), y garantiza una alta eficiencia de conversión utilizando transistores de potencia con una tensión de ruptura de 600 V/650 V en el lado de alta tensión.

Para asegurar la capacidad de reconfiguración de la topología como que cada módulo procese como máximo una parte de la potencia total (P), se requiere al menos tres módulos. La topología propuesta se muestra en Fig. 5(a). Dos módulos (DAB1 y DAB2) siempre operan en configuración IPOPOP, mientras que el tercer módulo (DAB3) siempre está conectado en serie con DAB1 y DAB2. El módulo DAB3 permite que pase corriente sin procesamiento de potencia en el escenario de 400 V. Para lograr esto, los transistores MOSFETs del puente de alta tensión están continuamente encendidos, mientras que los transistores MOSFETs del lado de baja tensión están apagados (circuito abierto). En el estándar de 800 V, DAB3 se conecta en serie con la conexión en paralelo de DAB1 y DAB2, y procesa una parte de la potencia total. En cada escenario, el módulo DAB está diseñado para suministrar una potencia máxima de $P/2$, convirtiendo $P/2$ en un criterio crucial de diseño para construir cada DAB. La configuración para el estándar de 400 V se muestra en Fig. 5(b). Es evidente que sólo DAB1 y DAB2 están en funcionamiento, cada uno entregando la mitad de la potencia ($P/2$). La configuración para el estándar de 800 V se ilustra en Fig. 5(c). En esta disposición, los tres

módulos están involucrados en la transformación de potencia: DAB1 y DAB2 contribuyen cada uno con $P/4$, mientras que DAB3 suministra la potencia restante ($P/2$).

III. ESQUEMAS DE CONTROL

La topología reconfigurable requiere acciones de control para gestionar las operaciones de carga y descarga de la batería extraíble. Un lazo de corriente es obligatorio en cualquier caso (conexión a buses de 400 V o 800 V), mientras que el lazo de tensión depende de la tensión del bus CC. En la conexión al bus CC de 400 V sólo se regula la potencia, siendo necesario sólo un lazo de corriente. En cambio en la conexión a 800 V se requiere además de regular la potencia, regular la distribución de la tensión entre los módulos [14]. Por tanto, se requiere implementar lazos de control de corriente y tensión.

En una topología modular, pueden surgir mediciones redundantes y existe la posibilidad de omitir ciertos sensores. Por un lado, en la conexión IPOPOP, en el caso extremo se requiere un único sensor de corriente. Por otro lado, el número de sensores requeridos en la conexión IPOS depende del número de módulos conectados en serie. En el caso particular de la topología reconfigurable propuesta se utilizan tres módulos. En el escenario de 400 V, los convertidores de procesamiento de potencia DAB1 y DAB2 se controlan en modo corriente, como se muestra en Fig. 6(a), lo que permitiría que cada uno opere con una referencia diferente. En el escenario de 800 V representado en Fig. 6(b), DAB1 y DAB2 tienen la tarea de regular la corriente, mientras que DAB3 se enfoca en mantener el equilibrio de tensión en la conexión en serie.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se ha construido un prototipo a escala reducida para validar experimentalmente las conexiones IPOPOP para baja tensión e IPOS para alta tensión. El prototipo consiste de 2 unidades DAB (DAB1 y DAB2), suficientes para determinar la viabilidad de las conexiones IPOPOP e IPOS. Cada DAB es de 500 W (ver Fig. 7). La Tabla I muestra las principales características de cada DAB. La diferencia principal entre ambos convertidores radica en la configuración de la inductancia de dispersión (L_k). En DAB1, L_k es un componente externo conectado en serie con el transformador de aislamiento (Fig. 7(b)). Por otro lado, en DAB2, L_k está integrada dentro del propio transformador (Fig. 7(b)). En segundo lugar, se han seleccionado intencionalmente inductancias de dispersión diferentes para evaluar la viabilidad de la topología reconfigurable propuesta para convertidores modulares no idénticos. Las tensiones seleccionadas para las pruebas en el lado de alta tensión fueron 160 V y 320 V respectivamente.

En este escenario de prueba con dos módulos, DAB1 se encarga del control de corriente, mientras que DAB2 se centra en la regulación de tensión (ver Fig. 8). La referencia de tensión para DAB2 se establece en la mitad de la tensión del bus, asegurando que DAB1, al estar controlado por

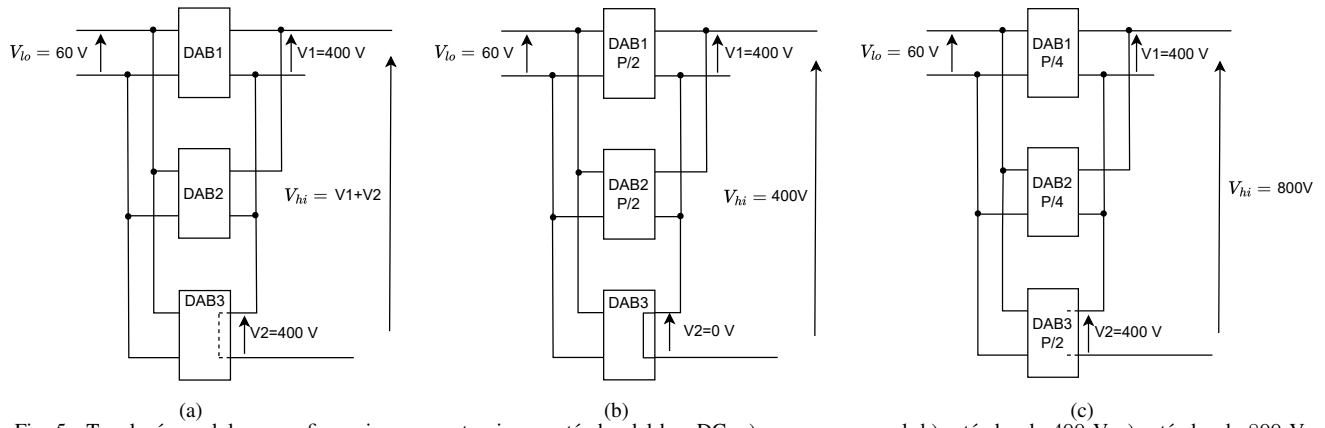


Fig. 5. Topología modular y configuraciones para tensiones estándar del bus DC: a) esquema general, b) estándar de 400 V, c) estándar de 800 V.

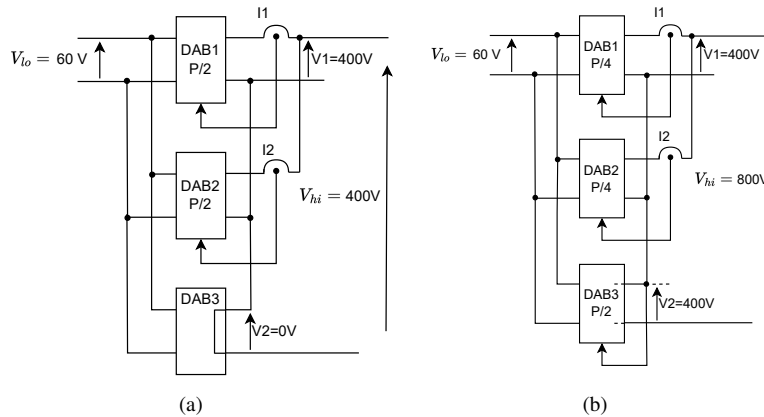


Fig. 6. Esquemas de control de topologías modulares: a) Estándar de 400 V, b) Estándar de 800 V.

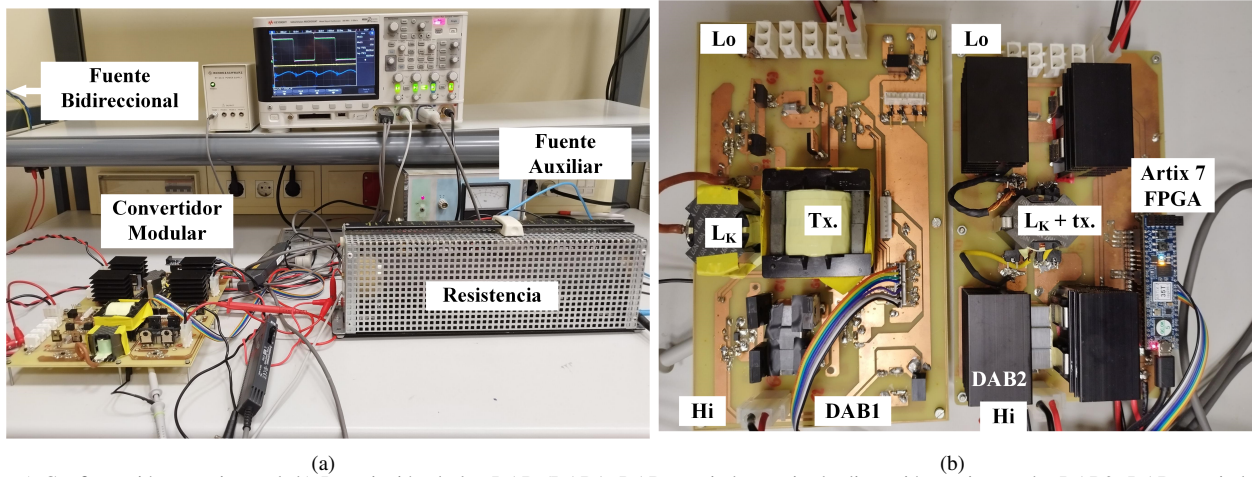


Fig. 7. a) Configuración experimental, b) Descripción de los DAB (DAB1: DAB con inductancia de dispersión no integrada; DAB2: DAB con inductancia de dispersión integrada).

corriente, mantenga naturalmente una regulación de tensión en la diferencia entre el bus CC y la tensión del DAB2.

Los convertidores DAB son controlados por la FPGA Artix 7, operando a una frecuencia de conmutación fija de 100 kHz. Se realizaron algunas pruebas en conexiones IPOS con carga resistiva, de acuerdo con las configuraciones

presentadas en Fig. 8. Las pruebas involucraron configuraciones de tensión de entrada y salida de 20 V a 160 V (ver configuración en Fig. 8(a)) y de 20 V a 320 V (ver Fig. 8(b)). Es significativo verificar el funcionamiento a 160 V cortocircuitando los MOSFET del puente de alta tensión de un DAB, así como examinar la conexión a 320 V

TABLA I
PARÁMETROS PRINCIPALES DE LOS DAB EN LA TOPOLOGÍA RECONFIGURABLE

Parámetro	DAB1	DAB2
L_k [μH]	6,2	3,3
C_{lo} [μF]	50	60
C_{hi} [μF]	3	3
n	8,0	8,4

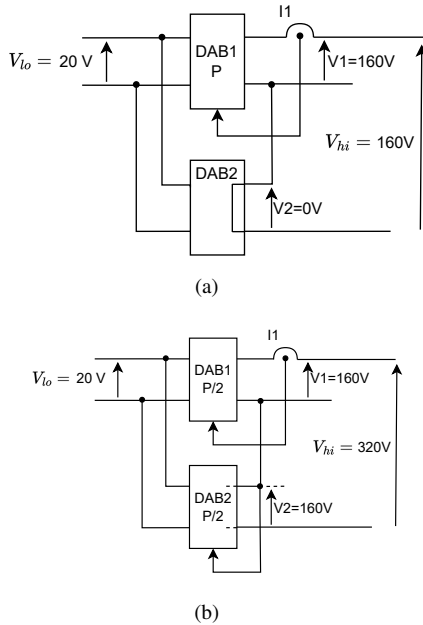


Fig. 8. Configuraciones de validación experimental para la topología reconfigurable propuesta: a) IPOS 160 V, b) IPOS 320 V.

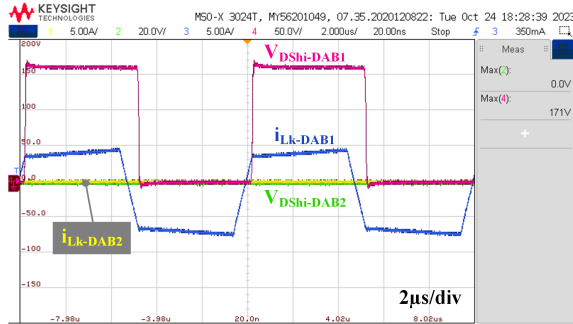


Fig. 9. Formas de onda experimentales de la topología reconfigurable con 160 V en el puerto de salida.

donde ambos DAB están operando. Los resultados experimentales para ambos escenarios se presentan respectivamente en Fig. 9 y Fig. 10. En cada caso, se muestran la corriente en la inductancia de dispersión i_{Lk} y la tensión drenador-fuente en uno de los MOSFETs del lado de alta tensión ($V_{DS_{hi}}$) para cada DAB. En el escenario de baja tensión (ver Fig. 9), DAB2 no procesa corriente en el lado de baja ni soporta tensión en el lado de alta (ver canales CH1, CH2), y es sólo DAB1 quien procesa toda la potencia

(ver CH3, CH4). CH3 muestra la forma de onda de tensión $V_{DS_{hi-DAB1}}$, que mide aproximadamente 160 V de valor pico, mientras que CH4 muestra la forma de onda de la corriente $i_{Lk-DAB1}$.

Por el contrario, en el escenario de alta tensión, ambos DAB están conmutando (ver Fig. 10). Uno de ellos es responsable de la regulación de tensión y el otro regula la corriente suministrada a la carga. Se realizaron pruebas utilizando varias referencias de tensión, manteniendo la corriente constante. Los resultados para DAB1 se presentan en CH1 ($i_{Lk-DAB1}$) y CH2 ($V_{DS_{hi-DAB1}}$), mientras que los resultados correspondientes para DAB2 se encuentran en CH3 ($i_{Lk-DAB2}$) y CH4 ($V_{DS_{hi-DAB2}}$). En Fig. 10(a), las formas de onda muestran tensiones aproximadamente iguales de 160 V de valor pico (equilibrio de tensión). Sin embargo, se observa una notable disparidad en las formas de onda de corriente por la inductancia de dispersión, debido a las variaciones en el valor de inductancia, aunque la corriente media de salida sea idéntica debido a la conexión serie. Además, se puede observar que cada convertidor opera con un desfase distinto debido a los valores diferentes de L_k , sin embargo, se logra un equilibrio de tensión. En Figs. 10(b,c,d), cada convertidor opera de manera intencionada con diferentes tensiones, para validar la propuesta modular. En los resultados mostrados en Fig. 10(b), DAB1 soporta un nivel de tensión más alto en comparación con DAB2 (indicado por la mayor amplitud de la forma de onda en CH4 en comparación con CH2). Fig. 10(c) muestra que DAB2 soporta una tensión mayor. El caso de estudio representado en Fig. 10(d) muestra un desequilibrio notable en la tensión, que también se refleja en disparidades significativas en las formas de onda de corriente i_{Lk} .

Aunque el equilibrio de tensión es la preferencia de control inherente en la configuración IPOS, los hallazgos demuestran que es factible operar la topología modular con tensiones de salida diferentes para cada convertidor modular según la aplicación específica. Además, es razonable utilizar convertidores modulares no idénticos en escenarios que involucren desequilibrio de tensión.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo presenta una topología de potencia modular reconfigurable que permite la integración de baterías extraíbles en el sistema de tracción de un vehículo eléctrico, proporcionando una mayor flexibilidad en la gestión de la energía. La topología está diseñada para proveer una integración eficiente de las baterías extraíbles con la batería no extraíble, tanto con el estándar de 400 V como el de 800 V. Los resultados preliminares demuestran la validación exitosa de la topología reconfigurable sin la necesidad de interruptores externos en pruebas tanto de baja como de alta tensión. Además, la selección intencional de distintas inductancias de dispersión muestra la capacidad del sistema para utilizar convertidores modulares no idénticos, destacando su flexibilidad y potencial para aplicaciones

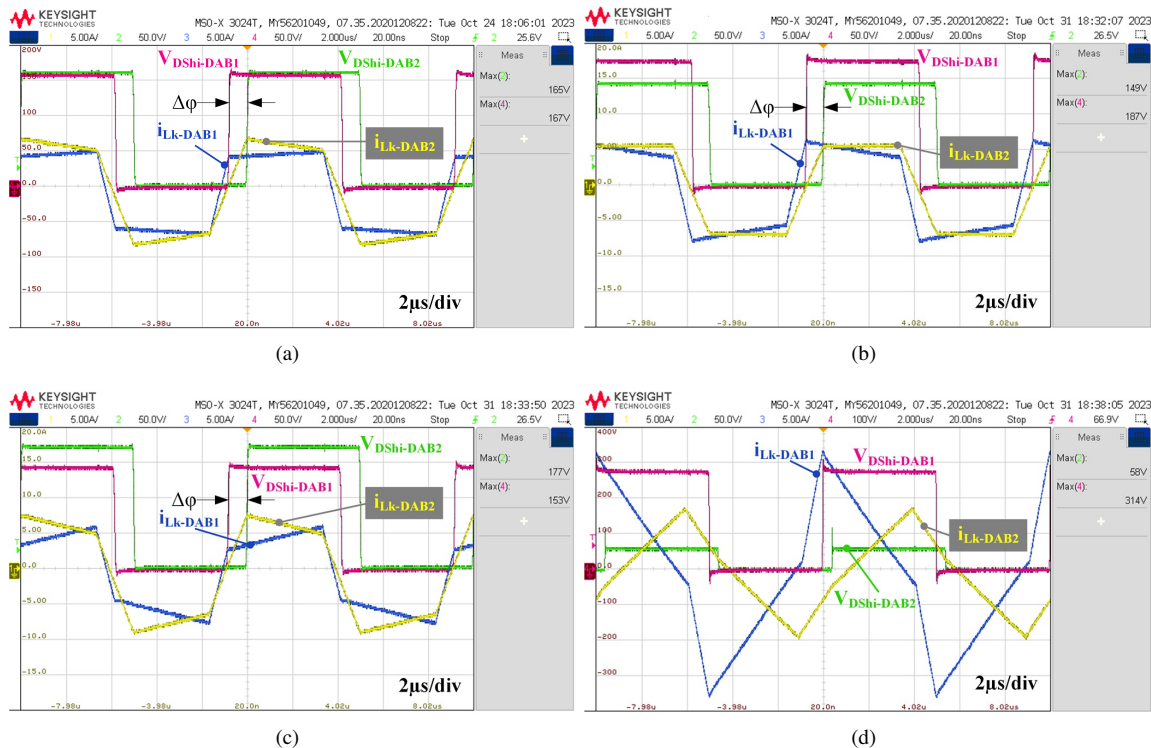


Fig. 10. Formas de onda experimentales de la topología reconfigurable en conexión IPOS con convertidores modulares operando con la misma tensión (a), y con tensiones diferentes en sus puertos de salida (b, c, d).

prácticas. Mediante un enfoque modular, cada convertidor se puede configurar individualmente con un sensor de corriente y un sensor de tensión. La cantidad precisa de sensores requeridos para cada aplicación se determina teniendo en cuenta la interconexión y la cantidad total de módulos conectados. Los futuros esfuerzos de investigación se centrarán en perfeccionar los bucles de control y avanzar en el desarrollo de un prototipo de mayor potencia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada en parte por el Gobierno de España mediante los proyectos MCINN-22-TED2021-130939B-I00 y PID2021-127707OB-C21.

REFERENCES

- [1] F. Blaabjerg, H. Wang, I. Vernica, B. Liu, and P. Davari, "Reliability of power electronic systems for ev/hev applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1060–1076, 2021.
- [2] S. Chowdhury, M. N. B. Shaheed, and Y. Sozer, "State-of-charge balancing control for modular battery system with output dc bus regulation," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 4, pp. 2181–2193, 2021.
- [3] P. Jangir, V. Sangwan, R. Kumar, and A. K. Rathore, "Optimal power management of multiple battery units by power converter system in electric vehicle," in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2018, pp. 1–6.
- [4] S. C. Brofferio and E. Marazzi, "A multi battery erev: an innovative structure to improve flexibility and performances," in *2020 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, 2020, pp. 1–6.

- [5] A. Cárcamo, A. Vázquez, A. Rodríguez, D. G. Lamar, M. M. Hernando, A. A. Gómez, and D. Remón, "Control strategy for dab using sps for integration of modular batteries in ev," in *2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe)*, 2023, pp. 1–8.
- [6] "U.S. Department of Energy," Consultado el 29-05-2024 en <https://afdc.energy.gov/>.
- [7] "Reglamento UE 2018/858 del Parlamento Europeo y del Consejo," Consultado el 29-05-2024 en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX>
- [8] I. Aghabali, J. Bauman, P. J. Kollmeyer, Y. Wang, B. Bilgin, and A. Emadi, "800-v electric vehicle powertrains: Review and analysis of benefits, challenges, and future trends," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 927–948, 2021.
- [9] "Electrical Vehicle Database," Consultado el 29-05-2024 en <https://ev-database.org/>.
- [10] E. Serban, C. Pondiche, and M. Ordonez, "Analysis and design of bidirectional parallel-series dab-based converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 8, pp. 10 370–10 382, 2023.
- [11] H. Karneddi and D. Ronanki, "Reconfigurable battery charger with a wide voltage range for universal electric vehicle charging applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 9, pp. 10 606–10 610, 2023.
- [12] B. O. Aarninkhof, D. Lyu, T. B. Soeiro, and P. Bauer, "A reconfigurable two-stage 11kw dc-dc resonant converter for ev charging with a 150-1000v output voltage range," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, pp. 1–1, 2023.
- [13] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando, and J. Sebastián, "Different purpose design strategies and techniques to improve the performance of a dual active bridge with phase-shift control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 790–804, 2015.
- [14] W. Chen, X. Jiang, W. Cao, J. Zhao, W. Jiang, and L. Jiang, "A fully modular control strategy for input-series output-parallel (isop) inverter system based on positive output-voltage-amplitude gradient," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 4, pp. 2878–2887, 2018.