

Diseño de Controlador para la Integración de Baterías Extraíbles al bus CC de un Vehículo Eléctrico con Compatibilidad de 400 V y 800 V

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

Resumen— La conexión de una batería removable al bus CC de un vehículo eléctrico (VE), es una estrategia alternativa para mejorar la flexibilidad del sistema de gestión de energía del vehículo. Esta opción es compatible tanto con el estándar de bus de 400 V ampliamente utilizado como con el estándar emergente de 800 V. Este artículo presenta una topología flexible capaz de vincular una batería extraíble tanto a los buses de 400 V como de 800 V. La topología modular se basa en dos convertidores *Dual Active Bridge* (DAB) conectados en conexión de Entrada Paralelo Salida Serie (*Input Parallel Output Series* - IPOS), adaptándose a los posibles buses estándar sin el uso de interruptores externos. El enfoque principal de la investigación se centra en los bucles de control necesarios para regular la potencia suministrada por la batería extraíble al bus de CC. Los resultados de simulación y experimentales validan la efectividad de los controladores diseñados bajo criterios de estabilidad.

Palabras clave— *Convertidor CC-CC, Convertidor Dual Active Bridge, vehículos eléctricos, topología reconfigurable, batería extraíble.*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los vehículos eléctricos (VEs) han recibido una considerable atención debido al impulso global para desarrollar métodos de transporte con menor impacto ambiental [1], [2]. Un componente fundamental de estos vehículos es la batería a bordo, responsable de almacenar y suministrar energía tanto para el sistema de propulsión como para los sistemas auxiliares. La arquitectura de energía predominante para los VEs típicamente incluye un sistema de gestión de energía, que regula la carga y descarga de la batería según las condiciones de conducción y las demandas de energía [3], como se muestra en la Fig.1. La capacidad y la tecnología de la batería juegan roles cruciales en el rendimiento general, que pueden mejorarse mediante la incorporación de baterías adicionales conectadas al bus de CC, proporcionando una mayor flexibilidad operativa.

La batería principal suministra la mayor parte de la energía del VE, mientras que las baterías adicionales complementan su función, especialmente durante picos de corriente o frenado regenerativo [4]. Esta integración puede reducir la capacidad necesaria de la batería principal y permitir la utilización de diversas tecnologías de baterías [5]. Sin embargo, añadir baterías adicionales puede incrementar la complejidad del sistema y el peso del vehículo.

Las baterías removibles son una alternativa para aumentar la capacidad total de un VE, donde la batería removable puede ser cargada externamente y conectarse al bus CC, aumentando la capacidad del VE de acuerdo con el recorrido a realizar. Pueden utilizar baterías removibles de segunda vida o recicladas, y de tecnologías diferentes a la batería a bordo, permitiendo mayor flexibilidad en la gestión de energía del vehículo [6].

Cada batería está equipada con su propio Sistema de Gestión de Baterías (Battery Management System - BMS), complementado por un controlador central conocido como Sistema de Gestión de Unidades de Baterías (Battery Unit Management System - BUMS).

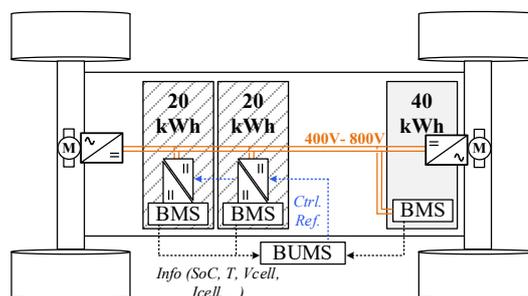


Fig. 1. Sistema de energía para vehículos eléctricos con múltiples baterías.

La conexión de baterías extraíbles al bus CC se logra mediante sistemas de conversión CC-CC [7]. Aunque el estándar actual en VEs de pasajeros es un bus CC de 400 V, ya se están utilizando buses de 800 V en algunos vehículos comerciales y la tendencia sigue en ascenso [8], [9]. Esta transición a un bus CC mayor ofrece ventajas como mayor potencia y tiempos de carga más cortos, pero requiere topologías de conversión reconfigurables para adaptarse a diferentes tensiones de buses [8], [9]. Varios enfoques han sido propuestos, incluyendo el uso de un convertidor *Dual Active Bridge* (DAB) [10] o convertidores resonantes LLC [11], cada uno con ventajas y desafíos técnicos específicos.

Este documento describe una topología modular que permite la conexión de una batería removable tanto a buses de 400 V como de 800 V, utilizando dos convertidores DAB en conexión de Entrada Paralelo Salida Serie (IPOS). Los lazos de tensión y corriente de cada módulo han sido diseñados siguiendo criterios que garantizan el funcionamiento seguro de todos los componentes. La estructura de este documento es la siguiente, la Sección II presenta las características de modularidad del convertidor DAB para su aplicación en VEs. Todo el proceso de diseño y control se detalla en la Sección III. La discusión de los resultados experimentales para los lazos de control de tensión y corriente se incluye en la Sección IV. Finalmente, se presentan las conclusiones en la Sección V.

II. CARACTERÍSTICAS DE LA TOPOLOGÍA MODULAR PARA LA INTEGRACIÓN AL BUS CC

El convertidor DAB se define como el módulo más simple para la topología reconfigurable propuesta. El DAB es reconocido por sus excelentes características de control y eficiencia.

Este convertidor tiene un interés especial en el campo de los VEs debido a sus características relevantes como el aislamiento galvánico y la operación bidireccional. La estructura del convertidor DAB se muestra en la Fig. 2. El DAB puede procesar energía para niveles de voltaje tanto de 400 V como de 800 V. Sin embargo, no exhibe un rendimiento óptimo en ambos casos (es decir, sobre un amplio rango de tensión) [11].

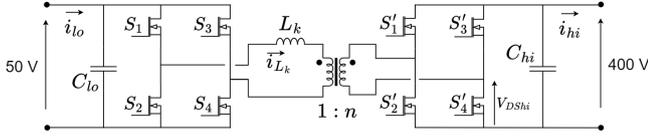


Fig. 2. Estructura del convertidor DAB.

Los desafíos relacionados con lograr un rendimiento óptimo y la compatibilidad con los estándares de 400 V y 800 V se abordan mediante la implementación de un enfoque modular. Para alcanzar los niveles de tensión deseados de 400 V o 800 V [12], se requieren diferentes configuraciones de conexión entre los DABs [13]. En ambos escenarios, cada DAB opera bajo condiciones de diseño similares, garantizando una alta eficiencia de conversión y utilizando transistores de potencia con una tensión de ruptura de 600 V/650 V en el lado de alta tensión, incluso en la configuración para 800 V.

Un enfoque común para implementar una topología modular implica conexiones en serie o paralelo entre los módulos fundamentales. Cuando la tensión de entrada es considerablemente menor que la de salida, es recomendable conectar los módulos en paralelo y ajustar la conexión de salida según el estándar del bus de CC [12]. Para el estándar de 400 V, la configuración de Entrada Paralelo Salida Paralelo (IPOP) es apropiada, mientras que, para el estándar de 800 V, se sugiere la IPOS [13]. La topología modular propuesta se basa en la conexión IPOS para ambos estándares, como se ilustra en la Fig. 3. En el escenario de baja tensión, DAB1 maneja toda la potencia, mientras que DAB2 permite solo el paso de corriente (ver Fig. 3(a)). Para la operación de DAB2, los transistores MOSFETs del lado de alta están permanentemente en estado ON, mientras que los transistores MOSFETs de baja tensión están permanentemente en estado OFF. En el escenario de 800 V, ambos convertidores DAB operan, procesando cada uno una parte de la potencia total (Fig. 3(b)). Ambos DABs están diseñados para operar con tensiones de 50 V en el lado bajo y 400 V en el lado alto.

III. ESQUEMA DE CONTROL

Para garantizar el correcto funcionamiento de la topología modular bajo diferentes condiciones de operación, es fundamental la estrategia de control. En este estudio, primero se diseñan de forma independiente el lazo de tensión y el lazo de corriente, considerando el lazo de corriente mucho más rápido que el de tensión. Finalmente, la estrategia de control propuesta para la topología IPOS, es la utilización de los lazos diseñados sin considerar su integración en la configuración modular. La estrategia se muestra en la Fig. 4., donde se observa la conexión IPOS, donde el DAB1 es responsable del control de tensión, mientras que el DAB2 hace la regulación de corriente. La referencia de tensión del DAB1 se define como la mitad de la tensión del bus. De forma implícita, la referencia de tensión del DAB2, es la diferencia entre la tensión del bus y la referencia del DAB1.

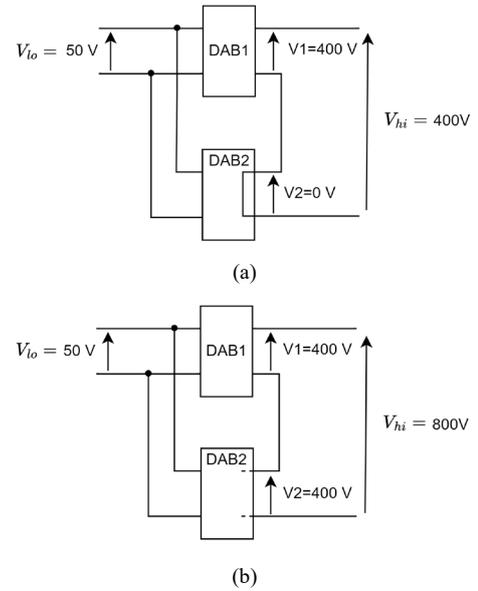


Fig. 3. Topología modular reconfigurable para tensiones estándar de bus CC: a) 400 V, b) 800 V.

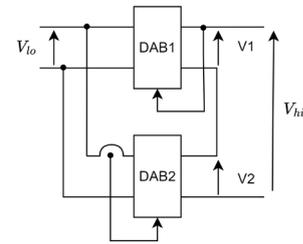


Fig. 4. Descripción de variables de realimentación para la estrategia de control.

Estas expresiones se muestran a continuación:

$$\bar{i}_{lo} = \frac{(1-d)dTv_{hi}}{nL_k}, \quad (1)$$

$$\bar{i}_{hi} = \frac{(1-d)dTv_{lo}}{nL_k}, \quad (2)$$

donde T es la mitad del período de conmutación y d es el ciclo de trabajo del convertidor, calculado como $d = t_c/T$. t_c corresponde al intervalo en el que se aplica una tensión positiva a la inductancia L_k , como se muestra en la Fig. 5.

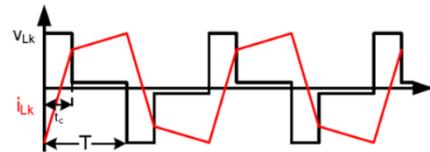


Fig. 5. Corriente (i_{lk}) y tensión en la inductancia de dispersión (v_{lk}) del convertidor DAB [15].

Un posible método para diseñar los lazos de tensión y corriente se basa en el estudio del modelo promediado del DAB. Donde el comportamiento del convertidor se reemplaza por el de un cuadripolo compuesto principalmente por dos fuentes de corriente no lineales y un transformador ideal [15]. Estas fuentes de corriente deben comportarse de la misma manera que el valor promedio de las corrientes que reemplazan. \bar{i}_{lo} es la corriente media en el lado de baja tensión del convertidor, mientras que \bar{i}_{hi} es la corriente media en el lado de alta tensión.

El primer paso en el modelamiento dinámico del DAB es el obtener el modelo no-lineal de valores promediados. Luego, este modelo es linealizado en un punto de trabajo, perturbando las variables de entrada. En este caso, las variables de entrada son el ciclo de trabajo (d) y los voltajes en los puertos de entrada y/o de salida (v_{lo}, v_{hi}). Respecto a la notación, a manera de ejemplo para del ciclo de trabajo, \hat{d} representa la perturbación de la variable instantánea, mientras que D es el valor de d en el punto de trabajo. Las ecuaciones del modelo de pequeña señal pueden obtenerse a partir del análisis del modelo promediado mostrado en el circuito de la Fig. 6. Las ecuaciones (3) y (4) permiten estudiar la dinámica de las corrientes de entrada y salida [15]. El modelo de pequeña señal correspondiente se presenta en la Fig. 7.

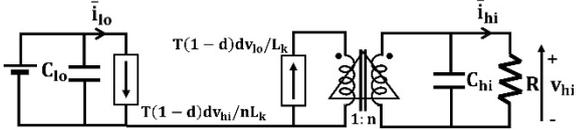


Fig. 6. Modelo promedio del convertidor DAB.

$$\hat{i}_{hi} = \left. \frac{\partial i_{hi}}{\partial d} \right|_o \hat{d} + \left. \frac{\partial i_{hi}}{\partial v_{lo}} \right|_o \hat{v}_{lo} = g_{od} \hat{d} + g_{ov_{lo}} \hat{v}_{lo}, \quad (3)$$

$$\hat{i}_{lo} = \left. \frac{\partial i_{lo}}{\partial d} \right|_o \hat{d} + \left. \frac{\partial i_{lo}}{\partial v_{hi}} \right|_o \hat{v}_{hi} = g_{id} \hat{d} + g_{iv_{hi}} \hat{v}_{hi}, \quad (4)$$

Donde:

$$g_{od} = \frac{V_{hi}(1-2D)}{(1-D)DR}, \quad (5)$$

$$g_{ov_{lo}} = \frac{V_{hi}}{V_{lo}R}, \quad (6)$$

$$g_{id} = \frac{V_{hi}^2(1-2D)}{V_{lo}(1-D)DR} = \frac{V_{hi}}{V_{lo}g_{od}}, \quad (7)$$

$$g_{iv_{hi}} = \frac{V_{hi}}{V_{lo}R}, \quad (8)$$

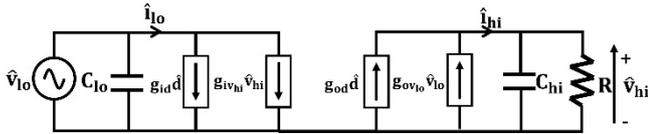


Fig. 7. Circuito de pequeña señal del convertidor DAB.

Los lazos de control de tensión y corriente se diseñan para implementar la configuración IPOS. En ambos casos se sigue un procedimiento sistemático, empleando una hoja de cálculo de Matlab, y los resultados se validan posteriormente utilizando el software PSIM. El controlador ha sido diseñado considerando un prototipo a escala con tensiones $V_{lo} = 10\text{ V}$ y $V_{hi} = 80\text{ V}$. Además, se ha colocado una resistencia en el puerto de salida en lugar de una fuente de tensión, como se ve en los circuitos equivalentes en la Fig. 6 y la Fig. 7.

A. Lazo de Tensión

Tomando apenas un DAB independiente, a partir de las expresiones (3) y (4), podemos representar las variaciones de tensión en el lado de alta tensión en función de las variaciones en el ciclo de trabajo y la tensión en el lado de baja tensión:

$$\hat{v}_{hi} = \frac{R}{RCs + 1} \cdot (g_{od} \hat{d} + g_{ov_{lo}} \hat{v}_{lo}), \quad (9)$$

La variación del lado de baja tensión siempre será más lenta en comparación con el ciclo de trabajo, que se utiliza como la acción de realimentación. Por lo tanto, se asume que v_{lo} es constante y se elimina de (9).

$$\frac{\hat{v}_{hi}}{\hat{d}} = \frac{V_{hi}(1-2D)}{(1-D)DR} \cdot \frac{R}{RCs + 1}, \quad (10)$$

La expresión resultante es una función de primer orden con un polo en el semiplano negativo. La Fig. 8 muestra el diagrama de Bode de la función de transferencia resultante, discretizado a frecuencia $f_s = 100\text{ kHz}$. Dado que el convertidor DAB tiene estabilidad inherente bajo condiciones de funcionamiento normales, se propone un control relativamente simple utilizando un integrador.

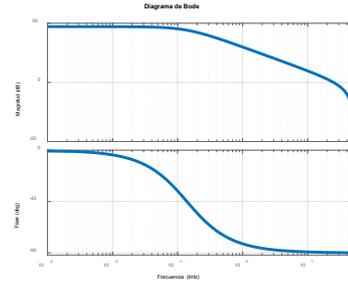


Fig. 8. Diagrama de Bode de la función del lazo de tensión.

La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques del lazo de control para el convertidor DAB. El lazo de control incluye componentes como el modulador de ancho de pulso (H_{PWM}), el compensador ($C(z)$), el sensor de realimentación y el convertidor analógico a digital ($H_{ADC} \cdot H_{sens}$), y la planta del convertidor DAB ($G(z)$), como se muestra en la Tabla I.

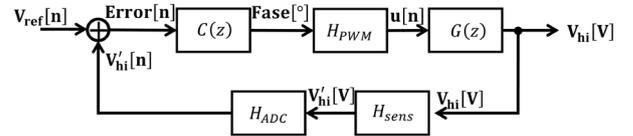


Fig. 9. Diagrama de bloques de la implementación del lazo de tensión.

TABLA I. PRINCIPALES PARÁMETROS DEL LAZO DE TENSIÓN

Parámetro	Valor
H_{PWM}	373.7678
H_{ADC}	$9.7752 \cdot 10^{-4}$
H_{sens}	$5.2 \cdot 10^{-3}$

El regulador propuesto para lograr una respuesta rápida y sobreamortiguada corresponde a la ecuación (11). Su funcionamiento ha sido validado en PSIM mediante un escalón en la referencia de tensión, como se muestra en la Fig. 10.

$$C(z) = \frac{100}{(z-1)} \quad (11)$$

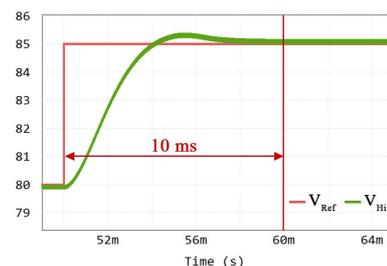


Fig. 10. Validación del regulador de tensión propuesto mediante PSIM.

Se puede observar en Fig. 10 que, con un aumento de 5 V en la tensión del puente de alta, el tiempo de establecimiento es de 10 ms, y el sistema presenta una respuesta sobreamortiguada.

B. Lazo de Corriente

En el diseño del lazo de corriente y su posterior validación en un DAB independiente, se consideró mediciones de corriente en el lado de baja tensión, lado donde el convertidor tenía implementado el sensor con su correspondiente circuito de acondicionamiento. La expresión para la variación de corriente del lado de baja (4) es idealmente instantánea ante variaciones en el ciclo de trabajo (variable de control), lo que sugiere que idealmente un cambio en la variable de control produce un cambio instantáneo en la corriente. Por lo tanto, se decide utilizar un integrador para controlar el lazo de corriente, al igual que el enfoque utilizado en el lazo de tensión. Sin embargo, se elige una respuesta 10 veces más rápida para el lazo de corriente que para el lazo de tensión, considerando que a característica dinámica es equivalente al control de doble lazo, donde el lazo interno de corriente opera mucho más rápido que el lazo externo de tensión. En consecuencia, la respuesta del regulador calculada usando Matlab para el lazo de corriente (12):

$$C(z) = \frac{800}{(z-1)}, \quad (12)$$

Al igual que en el caso anterior, se muestra en la Fig. 11 el diagrama de bloques que representa el comportamiento dinámico del convertidor.

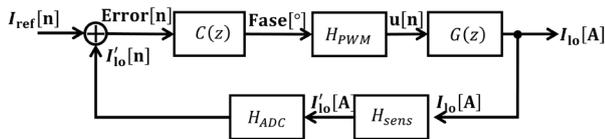


Fig. 11. Diagrama de bloques de la implementación del lazo de corriente.

Dado que se utiliza la misma FPGA para el control, el único valor que cambia con respecto al lazo de tensión es la ganancia del sensor de corriente, como se muestra en la Tabla II.

TABLA II. PRINCIPALES PARÁMETROS DEL LAZO DE CORRIENTE

Parámetro	Valor
H_{PWM}	373.7678
H_{ADC}	$9.7752 \cdot 10^{-4}$
H_{sens}	0.4

En la Fig. 12 se presentan resultados de simulación obtenidos en PSIM. Se puede observar que, para una variación de 500 mA en la referencia de corriente, el tiempo de establecimiento del convertidor es aproximadamente de 1,5 ms.

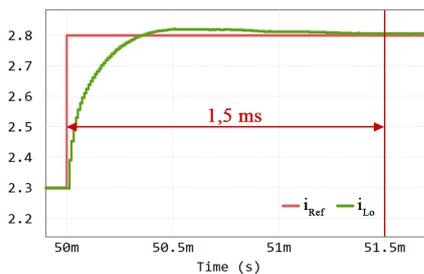


Fig. 12. Validación del regulador de corriente propuesto mediante PSIM.

Los resultados demuestran la efectividad del lazo de control, acercándonos lo más posible a los posibles resultados experimentales.

C. Configuración IPOS

El uso de técnicas de control en la configuración IPOS, donde uno de los convertidores DAB implementa un lazo de corriente y el otro un lazo de tensión ofrece ventajas significativas en términos de rendimiento del sistema y robustez. Esta configuración permite soportar altas tensiones en la salida con dispositivos de menor tensión.

La implementación de un control de un DAB en IPOS exige una técnica de desacoplo en determinados casos, tal y como se expone en [16]. En este trabajo se plantea el uso de dos lazos diseñados de manera independiente tal y como se ha expuesto en la anterior sección: un lazo de corriente notablemente más rápido que el lazo de tensión. A continuación, se explorará la efectividad de este planteamiento pese a la existencia del acoplamiento en las acciones de control reportadas en [16].

El convertidor con lazo de corriente asegura una carga equilibrada y una rápida respuesta a las fluctuaciones en la corriente de salida, mientras que el convertidor con lazo de tensión es responsable de mantener una tensión de salida estable y distribuir la tensión de salida entre los dos DABs. Como se muestra en la Fig. 4, el DAB1 es controlado en tensión, mientras que el DAB2 es controlado en corriente. En la Fig. 13 se muestra la respuesta dinámica de la topología propuesta en conexión IPOS, con fuente de tensión en ambos lados, obtenida en el software PSIM. Las tensiones del lado de alta del DAB1 y DAB2 son $V_{Hi-DAB1}$ y $V_{Hi-DAB2}$ respectivamente, y las corrientes correspondientes en la inductancia de dispersión son $i_{Lk-DAB1}$ para el DAB1 y $i_{Lk-DAB2}$ para el DAB2.

En la primera parte de la simulación ($t < 50 \text{ ms}$), ambos convertidores operan con tensión del lado de baja de 10 V, y tensión de 80 V en el lado de alta. El voltaje total de la conexión serie es 160 V. En $t = 50 \text{ ms}$, se incrementa la tensión de referencia del DAB1 en 5 V (su nueva referencia es 85 V).

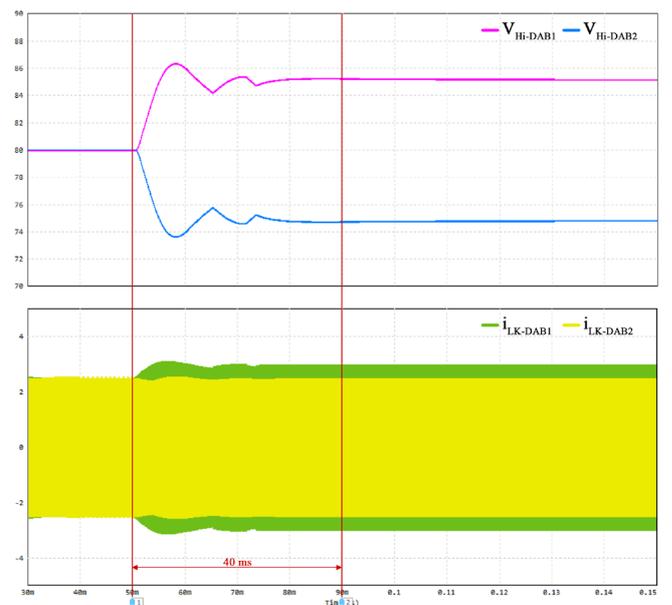


Fig. 13. Simulación de un salto de tensión en IPOS en PSIM.

El sistema alcanza estado estacionario 40 ms después. Los valores finales de tensión del DAB1 y DAB2 son 85 V y 75 V respectivamente, manteniendo el voltaje de la conexión serie constante en 160 V. En la Fig. 13 también se observa que el cambio en la referencia de tensión produce cambios en la corriente de la inductancia de dispersión. El DAB2 mantiene constante su corriente, mientras que el DAB1 presenta un pequeño incremento. Este incremento es para mantener la potencia del sistema constante.

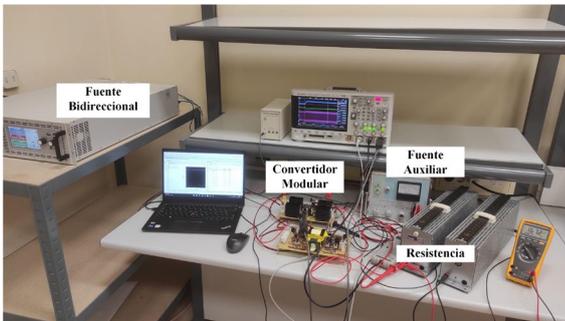
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados teóricos son validados experimentalmente. Se utilizan dos convertidores DAB (DAB1 y DAB2), cada uno con una potencia nominal de 500 W, como se muestra en la Fig. 14. Estos DABs exhiben ligeras diferencias en su construcción en sus elementos magnéticos (inductancia de dispersión (L_k) y en el transformador de aislamiento). En el DAB1, L_k está integrada dentro del propio transformador, mientras que en DAB2, L_k es un componente externo conectado en serie con el transformador. Esto resulta en diferencias menores en los valores de L_k y la relación de transformación, como se muestra en la Tabla III.

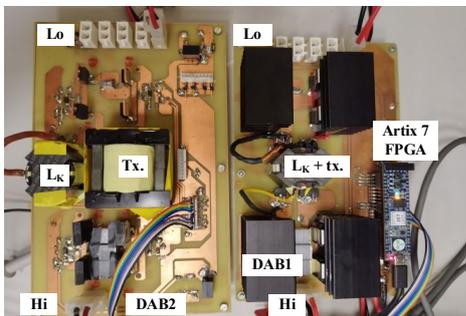
TABLA III. PRINCIPALES PARÁMETROS DE LOS DABS

Parameter	DAB1	DAB2
L_k [μ H]	3.3	6.2
C_{Lo} [μ F]	60	50
C_{Hi} [μ F]	3	3
n	8.4	8

Los convertidores DAB son controlados por una FPGA Artix 7 Cmod A7-35T, como se ilustra en la Fig. 14(b), y operan a una frecuencia de conmutación fija de 100 kHz.



(a)



(b)

Fig. 14. a) Configuración experimental para pruebas, b) DAB1 y DAB2.

Los parámetros de control de los lazos de tensión y corriente se implementan en la FPGA. Las pruebas iniciales se realizaron sólo con el DAB2, que incluye sensores de tensión y corriente, verificando el rendimiento independiente de los lazos respectivos.

Las constantes de los lazos de tensión y corriente son respectivamente $k_{i_v} = 100$ y $k_{i_c} = 800$, de acuerdo con los reguladores propuestos en (11) y (12). Primero se realizaron pruebas independientes de cada uno de los lazos. Posteriormente, se validó la configuración IPOS utilizando una carga resistiva.

A. Lazo de Tensión

Esta prueba se enfoca exclusivamente en el DAB2, con el objetivo de confirmar la programación del FPGA y validar los parámetros de diseño del análisis teórico.

Los datos de tensión del lado de alta tensión del DAB2 fueron adquiridos utilizando el sensor HCPL-7520. Además, se utilizó el entorno de Entrada/Salida Virtual (VIO) presente en el software Vivado, para realizar un incremento de la tensión de referencia para observar el comportamiento del lazo implementado.

Con un $k_{i_v} = 100$ en el lazo de tensión, se aplicó un incremento en la tensión de referencia de 6 V. Este incremento resultó en un aumento correspondiente de 6 V en la tensión del lado de alta tensión, con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 6 ms.

Se observa que este resultado se acerca a las características observadas en las simulaciones, lo que indica una implementación correcta del lazo de tensión, ver Fig. 15. Esta prueba demuestra así la efectividad del enfoque adoptado en la implementación del sistema.

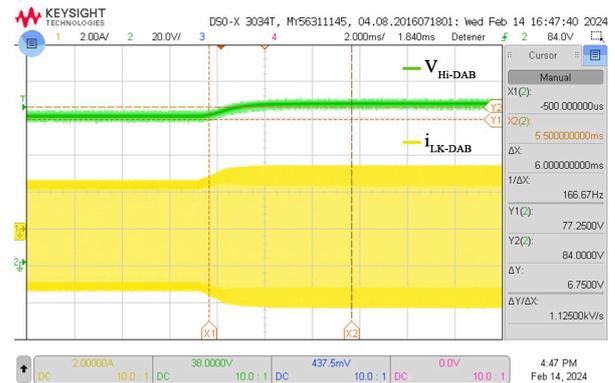


Fig. 15. Formas de onda experimentales del lazo de tensión con $k_{i_v} = 100$. CH1: i_{Lk} (2 A/div), CH2: V_{hi} (20 V/div), y una base de tiempo de 2 ms.

B. Lazo de Corriente

Los datos de corriente del DAB fueron obtenidos con el sensor ACS711-25. Utilizando el ambiente VIO, se realizó un incremento en la corriente de referencia, y así poder evaluar el desempeño del lazo implementado.

Durante la prueba realizada con un $k_{i_c} = 800$, se aplicó un incremento en la referencia de la corriente de entrada correspondiente a 260 mA, lo que resultó en una observación práctica de un aumento de 250 mA, con un tiempo de establecimiento de 1,875 ms.

Una vez más, se encontró que la parametrización y el diseño del lazo demostraron resultados satisfactorios y consistentes con las simulaciones realizadas (ver Fig. 16). Esta prueba valida el enfoque adoptado en la etapa de diseño, destacando el desempeño experimental del controlador.

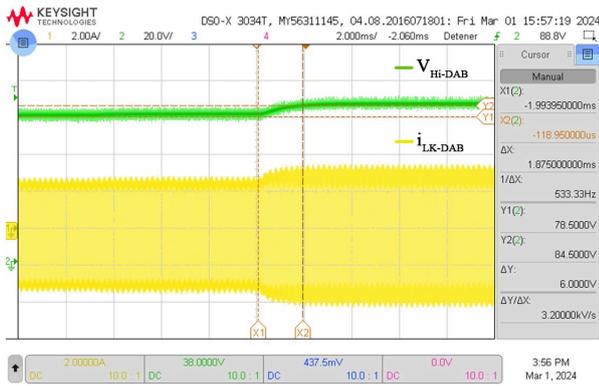


Fig. 16. Formas de onda experimentales del lazo de corriente con $k_{i,c} = 800$. CH1: i_{Lk} (2 A/div), CH2: V_{hi} (20 V/div), y una base de tiempo de 2 ms.

C. Configuración IPOS

Después de validar de forma independiente los lazos de tensión y de corriente, se realizaron pruebas experimentales con ambos lazos en un sistema que incluye dos DABs en configuración IPOS. Dado que hay una interacción entre ambos lazos de control, la simulación es determinante para comprender el comportamiento esperado en la práctica. En la Fig. 17 se presentan resultados experimentales equivalentes a los resultados de simulación presentados en la Fig 13. Los comportamientos observados en las respuestas de tensión y corriente son equivalentes a los resultados de simulación. Experimentalmente, los convertidores alcanzan estado estacionario después de 60 ms de aplicado el cambio de 5 V en la tensión de referencia del DAB1, mientras que en simulación el tiempo de establecimiento fue 40 ms. Esta diferencia se debe a las características no ideales de los convertidores.

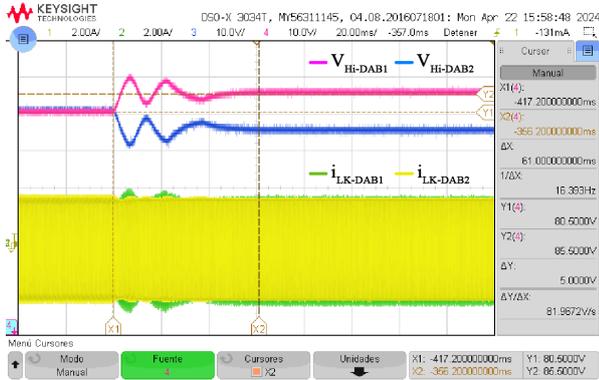


Fig. 17. Formas de onda experimentales del lazo de tensión y el lazo de corriente con $k_{i,v} = 100$ y $k_{i,c} = 800$. CH2: V_{hi_DAB2} (5 V/div), CH3: V_{hi_DAB1} (5 V/div), CH4: i_{Lk_DAB1} (2 A/div), y una base de tiempo de 5 ms.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo propone una topología modular con dos convertidores DAB para integrar baterías extraíbles en Vehículos Eléctricos (VEs) de 400 V y 800 V. Los lazos de control se diseñaron mediante simulaciones ajustadas a las especificaciones del proyecto y se validaron experimentalmente. Los resultados muestran la integración de los lazos de control de tensión y corriente en la configuración IPOS.

La simulación predice el comportamiento de los resultados que pueden ser observados en la práctica, pero se observan pequeñas diferencias debido a efectos no-ideales presentes en los dispositivos. Las pruebas experimentales validan la estabilidad en la operación de ambos convertidores.

Como trabajo futuro, se planea optimizar la implementación de los lazos de control en la FPGA y validarlos experimentalmente. Por otro lado, se realizarán pruebas experimentales en un prototipo operando a tensiones nominales y potencia de 5 kW.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada en parte por el Gobierno de España mediante el proyecto MCINN-22-TED2021-130939B-I00.

REFERENCIAS

- [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] R. Hou, P. Magne, B. Bilgin, and A. Emadi, "A topological evaluation of isolated dc/dc converters for auxiliary power modules in electrified vehicle applications," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2015, pp. 1360–1366.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] A. Cárcamo, A. Vazquez, A. Rodriguez, D. G. Lamar, M. M. Hernando, and D. Remón, "A comparative analysis of power converter topologies for integration of modular batteries in electric vehicles," in *2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*, 2022, pp. 1–11.
- [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] C. Jung, "Power up with 800-v systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 5, no. 1, pp. 53–58, 2017.
- [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] R. Peña-Alzola, G. Gohil, L. Mathe, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 380–387.
- [12] H. Chen, H. Kim, R. Erickson, and D. Maksimovic, "Electrified automotive powertrain architecture using composite dc-dc converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 1, pp. 98–116, 2017.
- [13] A. Rodríguez, A. Vázquez, D. G. Lamar, M. M. Hernando, and J. Sebastian, "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] S. Cuk y R. D. Middlebrook, "A general unified approach to modelling switching DC-to-DC converters in discontinuous conduction mode", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 36-57, 19.
- [15] A. R. Rodríguez Alonso, J. Sebastian, D. G. Lamar, M. M. Hernando and A. Vazquez, "An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC/DC conversion," *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 1129-1135, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617847.
- [16] P. Zumel et al., "Modular Dual-Active Bridge Converter Architecture," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2444-2455, May-June 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2527723.