

Estrategia de Control para el DAB utilizando SPS para la Integración de Baterías Extraíbles en Vehículos Eléctricos

Alberto Cárcamo, Aitor Vázquez, Alberto Rodríguez, Alexis A. Gómez, Diego G. Lamar, Marta M. Hernando
Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación
Universidad de Oviedo
Gijón, España
carcamoalberto@uniovi.es

Daniel Rémon
Departamento de Innovación
E+ Ecoeficiencia e Ingeniería S.L.
Gijón, España
innovacion@emasingenieria.es

Resumen— Este trabajo presenta una estrategia de control para el convertidor *Dual Active Bridge* (DAB) utilizado para la integración de baterías extraíbles en vehículos eléctricos. La estrategia consiste en utilizar la técnica de modulación *Single Phase Shift* (SPS), conmutando a distintas frecuencias con el propósito de incrementar la potencia máxima del convertidor, al igual que permitir trabajar con conmutaciones a tensión cero (*Zero Voltage Switching*, ZVS) en un rango más amplio de potencias. Además, se implementa un modo ráfaga para extender aún más este rango de operación para bajas potencias. La propuesta de control se valida con un prototipo experimental de 7kW y tensiones de 60 a 400V.

Palabras clave—DAB, Cargador de Baterías, Convertidores Bidireccionales.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al esfuerzo y al compromiso de la reducción de emisiones de CO₂ mediante leyes y tratados, ha incrementado el interés por la investigación y desarrollo de tecnologías aplicadas a vehículos eléctricos en muchos países alrededor del mundo. Aunque la mayoría de los vehículos eléctricos cuentan con una sola fuente de almacenamiento de energía, típicamente una batería no extraíble, existen propuestas a lo largo de los años para implementar el uso de baterías extraíbles para permitir el cambio de baterías [1], [2].

Este proyecto está realizado en colaboración con la industria, con el objetivo de integrar baterías extraíbles en vehículos eléctricos que ya cuentan con una fuente de almacenamiento de energía principal, típicamente una batería.

La integración de baterías extraíbles en el sistema de potencia de un vehículo eléctrico se puede realizar a través de un convertidor de potencia. Entre las distintas topologías de convertidores que pueden utilizarse con este propósito, se encuentra el DAB, una topología ampliamente conocida, que ha sido estudiada exhaustivamente y ha probado ser apta para este tipo de aplicación, ya que ofrece una alta densidad de potencia y alto rendimiento debido a la posibilidad de operar con ZVS [3]–[8].

La Fig. 1 muestra el diagrama del sistema de potencia de un vehículo eléctrico, donde el convertidor DAB sirve como enlace entre las baterías extraíbles y el bus de potencia, conectado en paralelo con la batería principal.

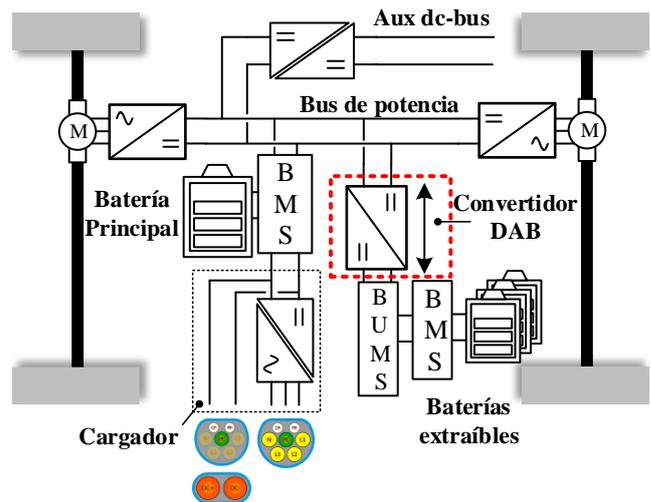


Fig. 1. Diagrama del sistema de potencia de un vehículo eléctrico.

La Fig. 2 muestra el esquema de la estrategia de control aplicada para la integración de las baterías extraíbles al vehículo eléctrico, donde se pueden identificar tres elementos principales. El primero es el *Battery Management System* (BMS), el cual entre otros parámetros, supervisa las tensiones en las celdas, la temperatura y la corriente. El segundo elemento es el *Battery Unit Management System* (BUMS), el cual es responsable de la gestión de la energía del sistema que se está integrando al vehículo eléctrico. Por último, se encuentra el convertidor DAB, el cual se encarga de la transferencia de energía entre la batería extraíble y el bus de potencia.

Para la implementación del control de la gestión de energía, se utiliza un lazo de control en cascada, como se observa en la Fig. 2, donde el BUMS ejecuta un lazo de potencia como el lazo externo, que genera la referencia de corriente, para el lazo interno, que es un lazo de corriente en el propio DAB. El BUMS se comunica con el BMS y con el DAB mediante los protocolos de comunicación RS-485 y *Controller Area Network* (CAN), respectivamente. También se comunica mediante un *Electronic Control Unit* (ECU) externo con el sistema de potencia del vehículo eléctrico.

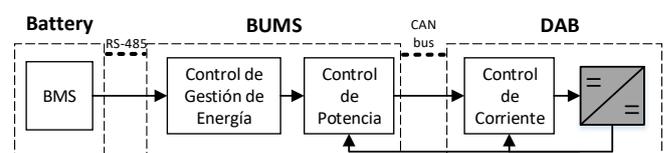


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema para la integración de baterías extraíbles.

Este trabajo se enfoca en el control del DAB, en el cual se utilizan distintos modos de operación que dependen de la corriente de referencia proporcionada por el BUMS, por ende, se investiga una estrategia de control para diferentes escenarios junto con sus transiciones.

II. ESTRATEGIA DE CONTROL

El esquemático del DAB es mostrado en la Fig. 3, donde las tensiones V_1 y V_2 , corresponden a la tensión de las baterías extraíbles en el lado de baja y a la tensión del bus de potencia en el lado de alta respectivamente. La inductancia de dispersión, L_{Lk} , representa la suma de la propia inductancia de dispersión del transformador, más un inductor externo.

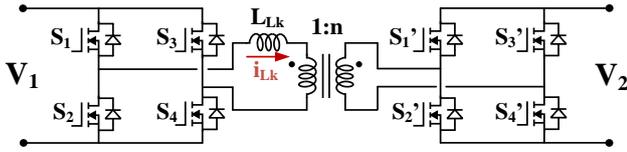


Fig. 3. Esquemático del convertidor DAB.

La estrategia de control propuesta para el convertidor DAB consiste en la implementación de dos modos distintos de operación, los cuales dependen de la referencia de corriente del lado del bus de potencia, i_{ref} . Los modos de operación son los siguientes: lazo cerrado y modo ráfaga.

El siguiente análisis del convertidor DAB se hace asumiendo un desfase positivo, lo que implica la transferencia de potencia desde el lado de baja hacia el lado de alta, aunque es importante aclarar que este análisis es igualmente válido independientemente del signo del desfase, es decir, de la dirección de la transferencia de energía.

Existen distintas técnicas de modulación para el DAB, como *Single Phase Shift* (SPS), *Double Phase Shift* (DPS), *Triple Phase Shift* (TPS), entre otros [9]–[11]. Para este proyecto se utiliza exclusivamente la modulación SPS, la cual consiste en conmutar las 4 ramas con un 50% de ciclo de trabajo, ambas ramas de cada puente conmutan de forma complementaria mientras se desfasan ambos puentes, lo que genera la transferencia de potencia.

Existen varias propuestas para garantizar ZVS, como utilizar la inductancia magnetizante del transformador [12], o bien utilizar otras técnicas de modulación [13], [14]. Utilizando el método de modulación SPS, el DAB no es capaz de operar con ZVS a lo largo de todo el rango de potencia, debido a que necesita un valor mínimo de corriente para cargar/descargar las capacidades parásitas de los transistores MOSFET. Otro factor que afecta la operación con ZVS es la relación de tensiones entre ambos lados, la cual está definida como:

$$M = \frac{V_2}{n \cdot V_1} \quad (1)$$

donde n es la relación de vueltas del transformador.

La Fig. 4 muestra la forma de onda de la corriente en el inductor, i_{Lk} , cuando opera en SPS, donde los puntos i_1 e i_2 , corresponden a los valores de la corriente en el instante que

conmuta el puente del lado de baja y el puente del lado de alta, respectivamente. Ambas corrientes deben ser positivas y suficientemente grandes para proveer la energía suficiente para cargar/descargar las capacitancias parásitas y trabajar con ZVS.

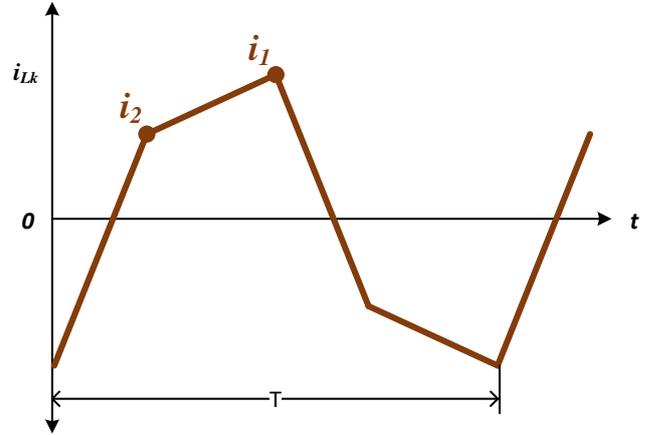


Fig. 4. Forma de onda de la corriente del inductor, i_{Lk} , durante el período de conmutación, T , donde se muestra su valor al momento de conmutación del puente de baja, i_2 , y del puente de alta, i_1 .

El valor de la corriente en los puntos i_1 e i_2 , en función del desfase, φ , la frecuencia de conmutación, f_s , y las tensiones V_1 y V_2 , están definidas por [12]:

$$i_1 = \frac{1}{4\pi f_s L_{Lk}} \left(V_1 \pi + \frac{V_2}{n} \frac{2k}{2k+1} (2\varphi - \pi) \right) \frac{2k+1}{2k+\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{1}{4\pi f_s L_{Lk}} \left(V_1 (2\varphi - \pi) + \frac{V_2}{n} \frac{2k}{2k+1} \pi \right) \frac{2k+1}{2k+\frac{1}{2}} \quad (3)$$

donde k es la relación entre la inductancia magnetizante del transformador, L_m , y la inductancia de dispersión, L_{Lk} , y definida como [12]:

$$k = \frac{L_m}{L_{Lk}} \quad (4)$$

Estas ecuaciones se utilizan para estimar el desfase mínimo necesario para garantizar ZVS en el puente de baja, en el peor caso de M . El mismo proceso se realiza, utilizando ecuaciones similares, para asegurar ZVS en el puente de alta.

Una vez obtenido el desfase mínimo, φ_{min} , que garantiza ZVS en ambos puentes, se define la potencia mínima como [12]:

$$P_{min} = \frac{V_1 V_2 \varphi_{min} (\pi - \varphi_{min})}{2\pi^2 n f_s L_{Lk}} \frac{2k}{2k+\frac{1}{2}} \quad (5)$$

A. Saltos de Frecuencia de Conmutación

Como ha sido planteado previamente, el convertidor DAB propuesto en este trabajo opera utilizando SPS. Con esta modulación, la potencia máxima es alcanzada a 90° de desfase, aunque para este proyecto, el desfase máximo está definido en 63° . Este desfase está seleccionado para conservar la linealidad entre la potencia y el desfase.

El convertidor está diseñado para operar a una frecuencia de conmutación de 75 kHz, lo que permite alcanzar una potencia máxima de 4,4 kW. Sin embargo, es posible incrementar este valor reduciendo la frecuencia de conmutación, por lo que se define una nueva frecuencia de conmutación de 35 kHz, permitiendo incrementar la potencia máxima a 9,4 kW, aproximadamente. El utilizar dos frecuencias de conmutación permite la reducción de corriente reactiva y a su vez permite trabajar en un rango más amplio de potencias con ZVS.

Para operar el convertidor con distintas frecuencias de conmutación, existen ciertos aspectos que deben ser tomados en cuenta en las transiciones, definidas como saltos de frecuencia. En primer lugar, debe actualizarse el controlador de corriente proporcional-integral (PI). Esto es debido a que la lectura del conversor analógico-digital (ADC) se realiza a la misma frecuencia de conmutación, en muestreo sincrónico, por lo que es necesario que la discretización del PI se realice con una frecuencia de muestreo que corresponda con la frecuencia de conmutación.

En segundo lugar, en un salto de frecuencia debe compensarse el desfase. Debido a que la frecuencia de conmutación cambia de manera abrupta, el desfase debe ser compensado con un *feed-forward*, para evitar oscilaciones, ya que el cambio de una frecuencia a otra sin esta compensación en el desfase, provocaría que la potencia se incremente o se reduzca de forma instantánea, afectando el controlador PI. Los valores para el PI a distintas frecuencias de conmutación, al igual que las compensaciones en el desfase, son valores previamente definidos para cada salto de frecuencia.

La Fig 5 muestra la trayectoria de la estrategia de control (negro) sobre las curvas de potencia en función del desfase, conmutando a 35 kHz (azul) y a 75 kHz (rojo). Las letras mayúsculas indican la potencia máxima (A), los saltos de frecuencia (B-E) y el cambio hacia y desde el modo ráfaga (F y G), el cual se muestra con un área verde. Las flechas indican la dirección del cambio, ya que el control cuenta con una histéresis para evitar oscilaciones entre los saltos de frecuencia y en la entrada/salida del modo ráfaga. Las líneas discontinuas azul y roja muestran la potencia mínima necesaria para garantizar ZVS conmutando a 35 kHz y 75 kHz, respectivamente, mientras que la línea discontinua negra indica el desfase máximo a 63°.

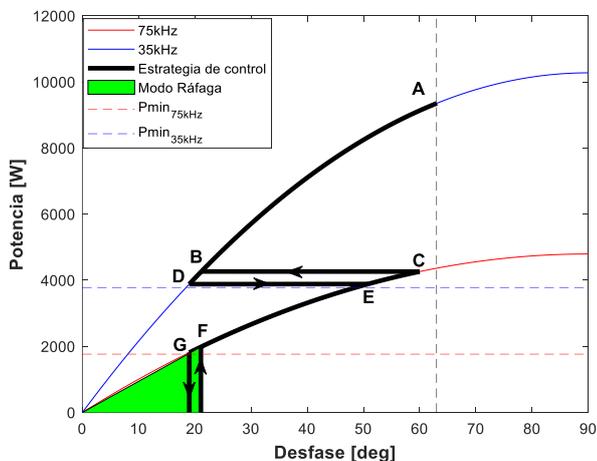


Fig. 5. Camino de la estrategia de control (negro) sobre las curvas de potencia a frecuencias de conmutación de 35 (azul) y 75 kHz (rojo). El modo ráfaga se muestra como el área verde.

Para este proyecto, el convertidor está pensado para operar la mayor parte del tiempo entre los puntos F y E, por lo que no se espera que opere en puntos cercanos a la potencia máxima ni a potencias mínimas que necesiten del modo ráfaga. Los puntos óptimos para realizar los saltos de frecuencia son determinados por la potencia mínima necesaria para ZVS, la cual es obtenida utilizando (5), y que da como resultado 3,76 y 1,75 kW para las frecuencias de conmutación de 35 y 75 kHz.

B. Modo Ráfaga

El convertidor entra a operar en modo ráfaga a potencias bajas, como se observa en la Fig. 5, con el propósito de mantener ZVS. Este modo de operación consiste en encender y apagar el convertidor, con un desfase fijo, φ_B , durante un porcentaje de tiempo de un periodo previamente definido. Para esta aplicación, el modo ráfaga está configurada para operar a 300 Hz, con el porcentaje de tiempo que está encendido siendo el ciclo de trabajo del modo ráfaga, d_B , que está dado por:

$$d_B = \frac{i_{ref}}{i_B} \quad (6)$$

donde i_B es la corriente en el lado de alta cuando el convertidor opera con el desfase φ_B .

En esta aplicación, se espera que el convertidor opere en modo ráfaga en casos excepcionales, ya que no es un requisito que la batería opere a bajas potencias, aunque esto dependerá de la configuración del control de gestión de energía, la cual está fuera del alcance de este trabajo.

La Fig. 6 muestra el diagrama de bloques de la estrategia de control, donde ambos modos de operación alimentan un selector conectado al módulo PWM y que es accionado por el algoritmo de control en función de la referencia de corriente, i_{ref} . La figura también muestra la compensación del desfase como un *feed-forward*, donde es importante mencionar que éste se utiliza solamente una vez cuando existe un salto de frecuencia. Como ha sido explicado previamente en la sección I, el BUMS es un dispositivo externo, el cual es responsable de ejecutar el control de la gestión de la energía, y entre otras cosas, es el que envía la señal i_{ref} al convertidor.

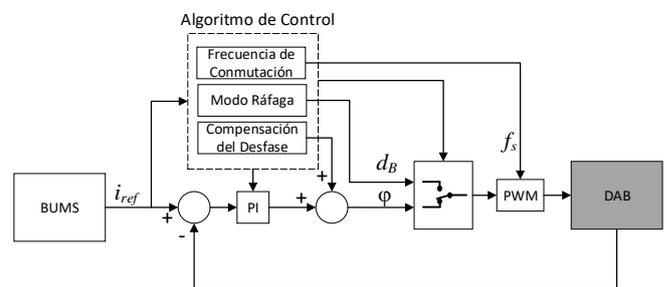


Fig. 6. Diagrama de bloques de la estrategia de control.

C. Prototipo del Convertidor DAB

La Fig. 7 muestra el prototipo del convertidor DAB construido en el laboratorio para la validación de la estrategia de control. En la figura se observan los distintos subsistemas: las etapas de potencia y de control, *drivers*, sensores y

elementos magnéticos. En la Tabla I se muestran los principales componentes utilizados para este prototipo.

TABLA I. LISTA DE COMPONENTES PRINCIPALES

MOSFETs (Lado de baja)	IXTQ180
MOSFETs (Lado de alta)	IPWS65R075CFD7A
Sensor de tensión	LV 25-P
Sensor de corriente	LA 25-NP
Drivers	Si8233
DSP	TI F28335
Núcleo del inductor	3F3

Uno de los componentes más importantes del DAB es el inductor, el cual, para este prototipo, está diseñado con un núcleo planar, con una vuelta, colocado en el lado de baja. Este diseño del inductor ha mostrado tener mayor rendimiento, como se ha analizado en [15].

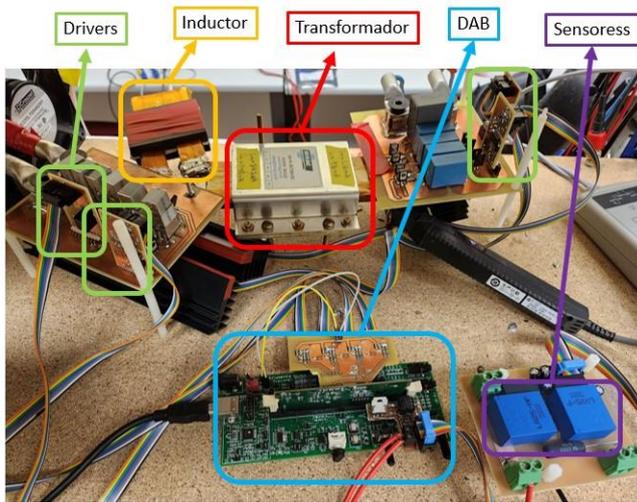


Fig. 7. Prototipo del convertidor DAB.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Tabla II muestra los parámetros y condiciones de operación del convertidor DAB bajo los cuales son obtenidos los resultados experimentales.

TABLA II. PARÁMETROS Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

Parámetro	Valor
V_1 [V]	54-66
V_2 [V]	390-470
$L_{Lk} = L + L_k$ [μ H]	1,182
n	7
f_s [kHz]	35 y 75
L_k [nH]	142
L_m [μ H]	24
L [μ H]	1,04

La Fig. 8 muestra la forma de onda de la corriente en lazo cerrado durante un salto de frecuencia de 35 a 75 kHz, donde se observa que la transición se produce casi de forma

instantánea, tardando aproximadamente de 5 a 6 ciclos de conmutación para estabilizarse. El convertidor transfiere la misma potencia con ambas frecuencias, sin observarse ninguna dinámica debido al salto. Esto se debe a la compensación en el desfase, lo que permite que el salto de frecuencia se produzca de forma que no afecta el lazo de corriente.

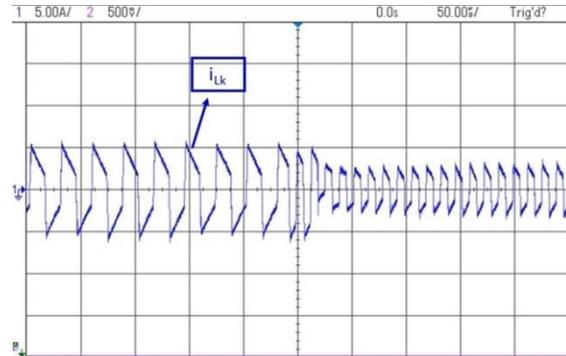
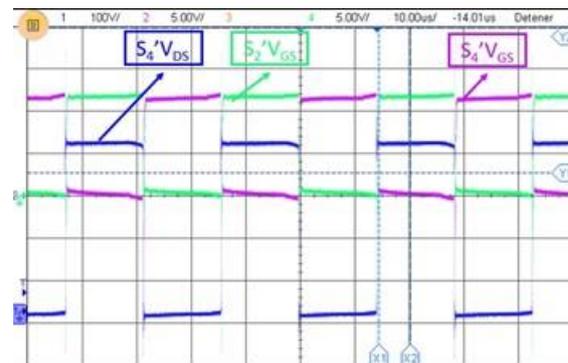
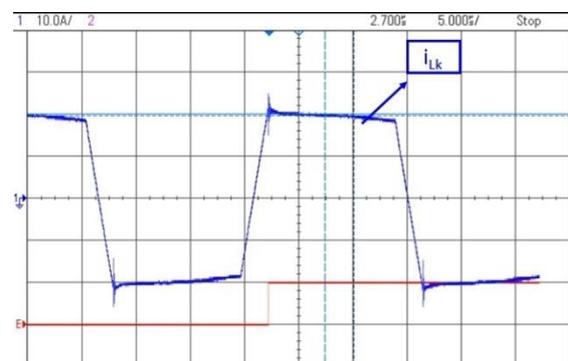


Fig. 8. Corriente por el inductor durante un salto de frecuencia.

La Fig. 9 muestra las formas de onda del convertidor trabajando a 7 kW en régimen permanente, donde (a) muestra las tensiones V_{GS} de los MOSFETs S_2' y S_4' , y la tensión V_{DS} del MOSFET S_4' , mientras que (b) muestra la corriente i_{Lk} .



(a)



(b)

Fig. 9. Formas de onda del convertidor a una potencia de 7 kW.

El rendimiento del convertidor se mide en ambas frecuencias de conmutación, donde la Fig. 10 muestra el rendimiento en función del desfase, mientras que la Fig. 11 lo muestra en función a la potencia. Se puede observar que el rendimiento del convertidor para ambas frecuencias es bastante similar a desfases bajos. Esto se debe a que la corriente reactiva incrementa con el desfase, lo que reduce el rendimiento. A 35 kHz, la eficiencia tiende a ser menor, esto se debe principalmente a las pérdidas de conducción, ya que la potencia, y por consecuencia la corriente, es más del doble que cuando conmuta a 75 kHz con el mismo desfase.

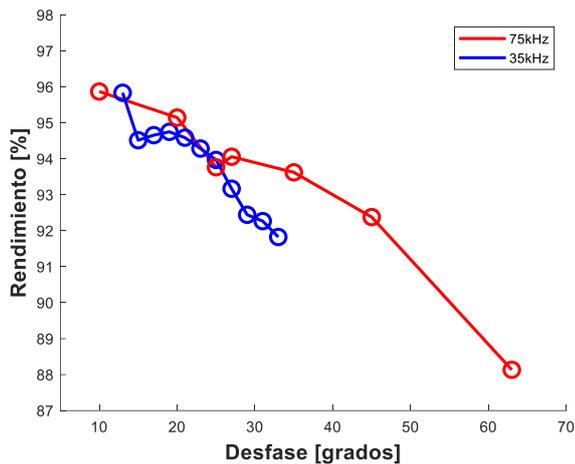


Fig. 10. Rendimiento del convertidor en función del desfase.

La Fig. 11 muestra con una línea discontinua aproximadamente el punto donde ocurre un salto de frecuencia, lo que permite observar claramente una de las ventajas de trabajar con más de una frecuencia, y es el hecho que permite incrementar la potencia con un desfase menor, incrementando así el rendimiento del convertidor. Está claro que el salto de frecuencia sucede cuando el rendimiento del convertidor es menor de un 90%, lo que implica que del uso de dos frecuencias sería beneficioso para trabajar con corrientes reactivas bajas y mantener un rendimiento alto.

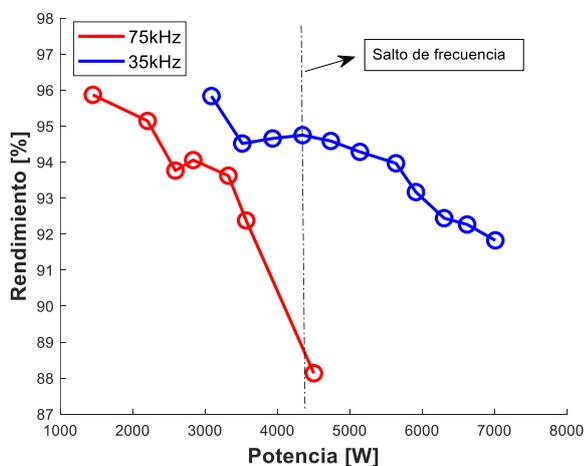


Fig. 11. Rendimiento del convertidor en función de la potencia.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Con el propósito de la integración de baterías extraíbles en vehículos eléctricos, se analiza experimentalmente un prototipo del convertidor DAB trabajando con SPS, donde se evalúa una estrategia de control que utiliza dos frecuencias de conmutación y un modo ráfaga para bajas potencias.

Los resultados demuestran que cambiar la frecuencia de conmutación, ya sea para incrementar la potencia del DAB o poder trabajar con ZVS a potencias más bajas, no tiene ningún impacto visible en el lazo de corriente, y a su vez permite trabajar con corrientes reactivas más bajas mientras se incrementa la potencia.

El modo ráfaga es una alternativa para trabajar con ZVS a potencias bajas, ya que permite seleccionar un punto de operación en el cual el convertidor trabaje con un rendimiento alto, el cual puede ser seleccionado dependiendo de las condiciones de operación.

Además, se desarrolla una estrategia global de control de todo el sistema, utilizando los protocolos de comunicación RS-485 y CAN para enviar de manera adecuada las variables al sistema de alto nivel de gestión de las baterías.

Como trabajo futuro se plantea comparar la estrategia de control expuesta en este trabajo con otras estrategias que utilizan otros métodos de modulación como DPS y TPS, para evaluar el rendimiento y los posibles ventajas o desventajas que ofrece. Además, la estrategia de control debe considerar incluir más frecuencias de conmutación con el propósito de reducir las corrientes reactivas.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SV-PA-21-AYUD/2021/51931 dentro del Programa de Ayudas para grupos de investigación de organismos del Principado de Asturias durante el período 2021-2023, de la Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT) y por los proyectos MCIU-22-PID2021-127707OB-C21 y MCINN-22-TED2021-130939B-I00 del Gobierno de España.

VI. REFERENCIAS

- [1] M. A. H. Rafi, R. Rennie, J. Larsen, and J. Bauman, "Investigation of fast charging and battery swapping options for electric haul trucks in underground mines," in *2020 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2020, pp. 1081–1087. doi: 10.1109/ITEC48692.2020.9161654.
- [2] Z. Chen, "The combination of battery swapping system and connected vehicles technology in intelligent transportation," *Proceedings - 2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, ICITBS 2020*, pp. 72–75, 2020, doi: 10.1109/ICITBS49701.2020.00023.
- [3] F. Krismer and J. W. Kolar, "Accurate small-signal model for the digital control of an automotive bidirectional dual active bridge," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 24, no. 12, pp. 2756–2768, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2027904.
- [4] M. Ryu, D. Jung, J. Baek, and H. Kim, "An optimized design of bi-directional dual active bridge converter for low voltage battery charger," in *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2014, pp. 177–183. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980709.

- [5] D. J. Costinett, "Analysis and Design of High Efficiency, High Conversion Ratio, DC-DC Power Converters," University of Colorado Boulder, 2013.
- [6] F. Krismer, "Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC – DC Converter Topologies," ETH ZURICH, 2010.
- [7] 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 Trans Power Electron*, vol. 30, no. 2, pp. 790–804, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2309853.
- [8] A. Cárcamo, A. Vázquez, A. Rodríguez, 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.
- [9] H. Bai and C. Mi, "Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converters using novel dual-phase-shift control," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 23, no. 6, pp. 2905–2914, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.2005103.
- [10] B. Zhao, Q. Song, and W. Liu, "Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converter with dual-phase-shift control," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 27, no. 9, pp. 4172–4176, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2189586.
- [11] H. Gu, D. Jiang, R. Yin, S. Huang, Y. Liang, and Y. Wang, "Power characteristics analysis of bidirectional full-bridge DC-DC converter with triple-phase-shift control," *Proceedings of the 2015 10th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2015*, pp. 363–368, 2015, doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334140.
- [12] K. Martín Díaz, "Análisis , diseño y construcción de un proveedor de bus para sistemas de distribución en corriente continua domésticos," Universidad de Oviedo, 2018.
- [13] F. Krismer and J. W. Kolar, "Closed form solution for minimum conduction loss modulation of DAB converters," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 27, no. 1, pp. 174–188, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2157976.
- [14] C. Calderón, A. Barrado, A. Rodríguez, A. Lazaro, C. Fernández, and P. Zumel, "Dual active bridge with triple phase shift by obtaining soft switching in all operating range," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017. doi: 10.1109/ECCE.2017.8096004.
- [15] Z. Zhang and M. A. E. Andersen, "High frequency AC inductor analysis and design for dual active bridge (DAB) converters," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2016, pp. 1090–1095. doi: 10.1109/APEC.2016.7468006.