

Identificación no paramétrica de la impedancia de entrada de convertidores CC/CC conectados en cascada

M. A. Granda, C. Fernandez, A. Barrado, P. Zumel
Grupo de sistemas electrónicos de potencia (GSEP)
Departamento de Tecnología Electrónica
Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)
Leganés (Madrid)

Abstract— Los sistemas de energía distribuida (DPS) ofrecen flexibilidad, reducción de coste, eficiencia energética y la capacidad de integrar múltiples fuentes y cargas. Los DPS son sistemas de convertidores múltiples y su diseño requiere una atención especial a la interacción dinámica entre los convertidores de potencia. La impedancia de salida y entrada de los convertidores son los parámetros clave para estudiar y asegurar la estabilidad del sistema. Los controladores digitales modernos permiten la medición en línea de las impedancias de los convertidores y la integración de nuevas capacidades como la monitorización y la vigilancia de la estabilidad. El controlador puede medir la respuesta en frecuencia del sistema y tomar decisiones sobre el ajuste de los compensadores. Este trabajo describe la medida en línea de la impedancia de un convertidor que es alimentado por otros convertidores de potencia utilizando un sistema de identificación no paramétrica implementado en un System on Chip.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de energía distribuida (Distributed Power Systems con sus siglas en inglés DPS) integran una red con múltiples cargas y fuentes, y convertidores de energía que las interconectan para adaptar los niveles de tensión y corriente. En general los convertidores que alimentan las cargas están localizados muy próximos a ellas, reduciendo el efecto de los parásitos y favoreciendo la integración. Los sistemas de alimentación distribuidos presentan ventajas como redundancia, facilidad de mantenimiento, flexibilidad y una mejor gestión del calor. Por otro lado, los sistemas distribuidos presentan una dinámica compleja debido a la interconexión de la red de convertidores, lo que puede originar inestabilidades que deben ser analizadas cuidadosamente durante el proceso de diseño del sistema [1]-[3].

Existen diferentes criterios de estabilidad que se pueden aplicar al estudio de inestabilidades en sistemas multiconvertidores. Uno de los más populares es el criterio de estabilidad de Middlebrook, que es muy restrictivo. La condición para obtener un sistema estable [4] cuando un convertidor actúa como carga de otro (Fig. 1) es que la impedancia de entrada del convertidor de carga Z_i (Fig. 1) sea menor que la impedancia de salida del convertidor fuente Z_o (Fig. 1) es que la impedancia de entrada del convertidor de carga está fuertemente definida básicamente por su capacitor de entrada y la potencia demandada (resistencia negativa en el enfoque de señal pequeña) [5]. Por lo tanto, el conocimiento de la impedancia de entrada del convertidor de carga es fundamental para

monitorizar la estabilidad del sistema. Por otra parte, la impedancia de salida depende no solo de los componentes pasivos del convertidor, sino también del compensador de la etapa de control [6]. Eventualmente, la impedancia de salida del convertidor puede modificarse variando su comportamiento dinámico, para adaptarse a la impedancia de entrada real del convertidor carga y garantizar la estabilidad, pero esto requiere el conocimiento in situ de la impedancia de entrada del convertidor.

Existen diferentes alternativas para medir la impedancia de entrada de los convertidores. Típicamente se trata de técnicas fuera de línea que requieren instrumentación adicional. Sin embargo, el control digital de los convertidores ha proporcionado nuevas posibilidades, como la capacidad de reconfigurar el lazo de control, de realizar tareas de monitorización del sistema, identificar el comportamiento dinámico del propio convertidor, etc. [7][8]. Para ello, en los últimos años se ha propuesto la implementación de técnicas de identificación paramétricas y no paramétricas en el control digital de los convertidores, que permiten introducir una señal de perturbación en el sistema y, a partir de la medida de distintas señales del sistema, obtener el diagrama de Bode de la respuesta en frecuencia del convertidor o medir su condensador de salida.

Este trabajo está centrado en la descripción de cómo estas técnicas de identificación no paramétrica se han utilizado para medir las impedancias de los convertidores en sistemas multiconvertidor [9] [11], de tal modo que no sería necesario emplear instrumentación adicional. En concreto se introduce la perturbación directamente en la etapa de control digital del Convertidor 1 en la Fig. 1. Esta perturbación se propaga a través del control y el convertidor de potencia hasta la tensión de salida del "Convertidor 1". Suponiendo un comportamiento lineal, la impedancia de entrada del "Convertidor 2" (o de cualquier otra carga lineal) podría determinarse midiendo el voltaje de salida perturbado y la corriente de salida del "Convertidor 1".

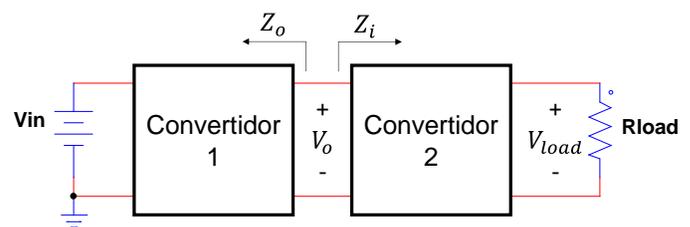


Fig. 1 Ejemplo con dos convertidores para medir la estabilidad del sistema

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN NO PARAMÉTRICA ESPECTRAL DIGITAL PARA LA MEDIDA DE LA IMPEDANCIA

En el convertidor reductor CC-CC con control analógico de la Fig. 2, para medir su respuesta en frecuencia se introduce una señal de perturbación representada como una fuente de tensión v_{pert} , añadiéndola a la medida de la tensión de salida v_o . La perturbación se propaga a través del control y del convertidor y su efecto se puede medir en diferentes señales del sistema. Por ejemplo, la relación entre la tensión de salida y el ciclo de trabajo es la respuesta de frecuencia del convertidor G_{vd} . Otro ejemplo es la medida de la ganancia de lazo del convertidor, obtenida como la relación entre las tensiones v_A y v_B para el ejemplo particular de la Fig. 2, y cuyo resultado obtenido a través de simulación con el simulador PSIM es el mostrado en la Fig. 3. Esta respuesta en frecuencia es congruente con las especificaciones dinámicas del controlador diseñado con el método del factor k, ya que el margen de fase es 45 grados y la frecuencia de cruce 10 kHz.

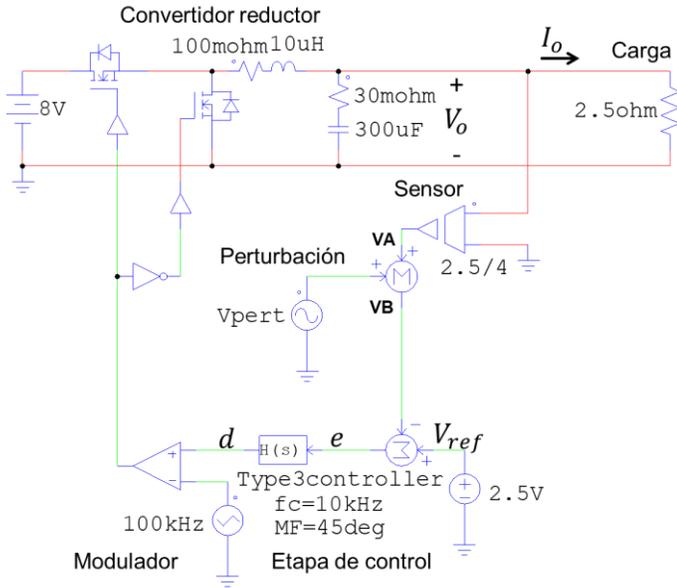


Fig. 2 Esquema eléctrico de un convertidor reductor con control analógico al que se introduce una perturbación en la tensión de salida medida

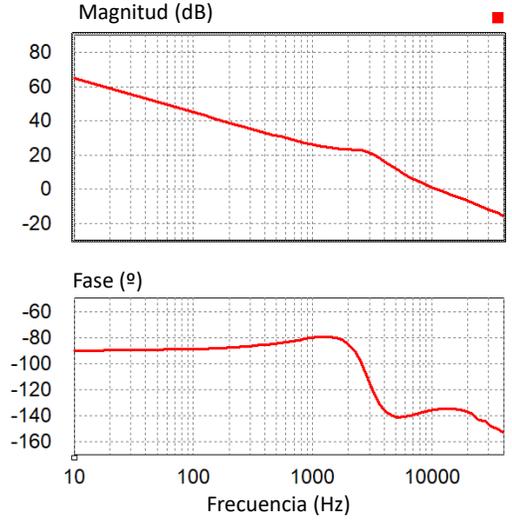


Fig. 3 Ganancia de lazo del convertidor (simulación)

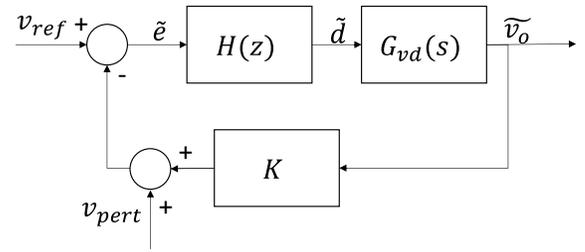


Fig. 4 Diagrama de bloques del sistema introduciendo la perturbación

El diagrama de bloques del sistema de identificación digital es similar al analógico, tal y como se recoge en el diagrama de bloques de la Fig. 4. La implementación digital requiere elementos de hardware adicionales, como un convertidor A/D para medir la tensión de salida y algunos elementos diferentes, como el compensador $H(z)$ y el DPWM (modulador de ancho de pulso digital). Debido a la naturaleza discreta del control, existen efectos particulares como la cuantificación y los efectos de muestreo que pueden tener un impacto en el proceso de identificación.

La señal de perturbación elegida es una Pseudo Random Binary Sequence (PRBS), una señal muy utilizada por su sencilla generación mediante registros [12][13]. Además, es una señal de banda ancha que excita varias frecuencias simultáneamente, reduciendo el tiempo de la prueba. El sistema de identificación puede medir el efecto de la perturbación en diferentes señales. En este caso, la perturbación se propaga a través de la etapa de control y del convertidor, y se mide su efecto en la tensión de salida del convertidor v_o y la corriente de salida i_o . Después se realiza el análisis de Fourier de estas señales para calcular la impedancia de la carga Z_i [12] sin necesidad de instrumentación adicional. Esta técnica de identificación es una técnica de identificación no paramétrica espectral.

$$Z_i = \frac{\tilde{v}_o}{\tilde{i}_o} \quad (1)$$

III. IDENTIFICACIÓN DE LA IMPEDANCIA DE ENTRADA UTILIZANDO LA PRBS Y LA TÉCNICA ESPECTRAL

Para validar la técnica propuesta, se ha simulado un sistema formado por un convertidor reductor que alimenta un bus de CC al que hay conectados dos convertidores CC/CC con diferentes topologías: elevadora y flyback (Fig. 5). El gráfico de la Fig. 6 las impedancias identificadas mediante simulación con la herramienta PSIM realizando un barrido de alterna y un análisis en el dominio del tiempo inyectando la PRBS como señal de perturbación. El barrido de alterna lo realiza la herramienta de simulación y consiste en una serie de simulaciones consecutivas en el dominio del tiempo que aumentan la frecuencia de una perturbación de un solo tono. Este procedimiento es transparente para el usuario, ya que el simulador eléctrico lo hace de forma automática, y el resultado es directamente el diagrama de Bode de las variables seleccionadas (v_o e i_o en este caso) en el ancho de banda de interés. Pero como la simulación solo tiene en cuenta la tensión y la corriente a la frecuencia de la perturbación, las posibles no linealidades del sistema no estropean la medida.

Por otro lado, la perturbación PRBS es una señal multitono que excita simultáneamente varias frecuencias [14], por lo que es importante comprobar su idoneidad para medidas en convertidores conmutados de potencia.

Los resultados de la simulación muestran una muy buena concordancia de la impedancia de entrada medida con PRBS y el barrido de alterna. Para comprender completamente estos resultados, es importante tener en cuenta que la perturbación PRBS se genera con una frecuencia de 100 kHz. Por otro lado, el voltaje y la corriente a la salida del convertidor reductor se obtuvieron directamente de la simulación, por lo que la frecuencia de muestreo es significativamente mayor. Gracias a este sobremuestreo se pueden identificar impedancias por encima de los 50 kHz, lo cual es muy interesante en diversas aplicaciones que requieren medir impedancias por encima de la frecuencia de Nyquist del convertidor de entrada. En cuanto a la frecuencia más baja identificada, la perturbación es un PRBS de 11 bits, por lo que la frecuencia mínima identificada es igual a $100 \text{ kHz}/2^{11} = 48.828 \text{ Hz}$.

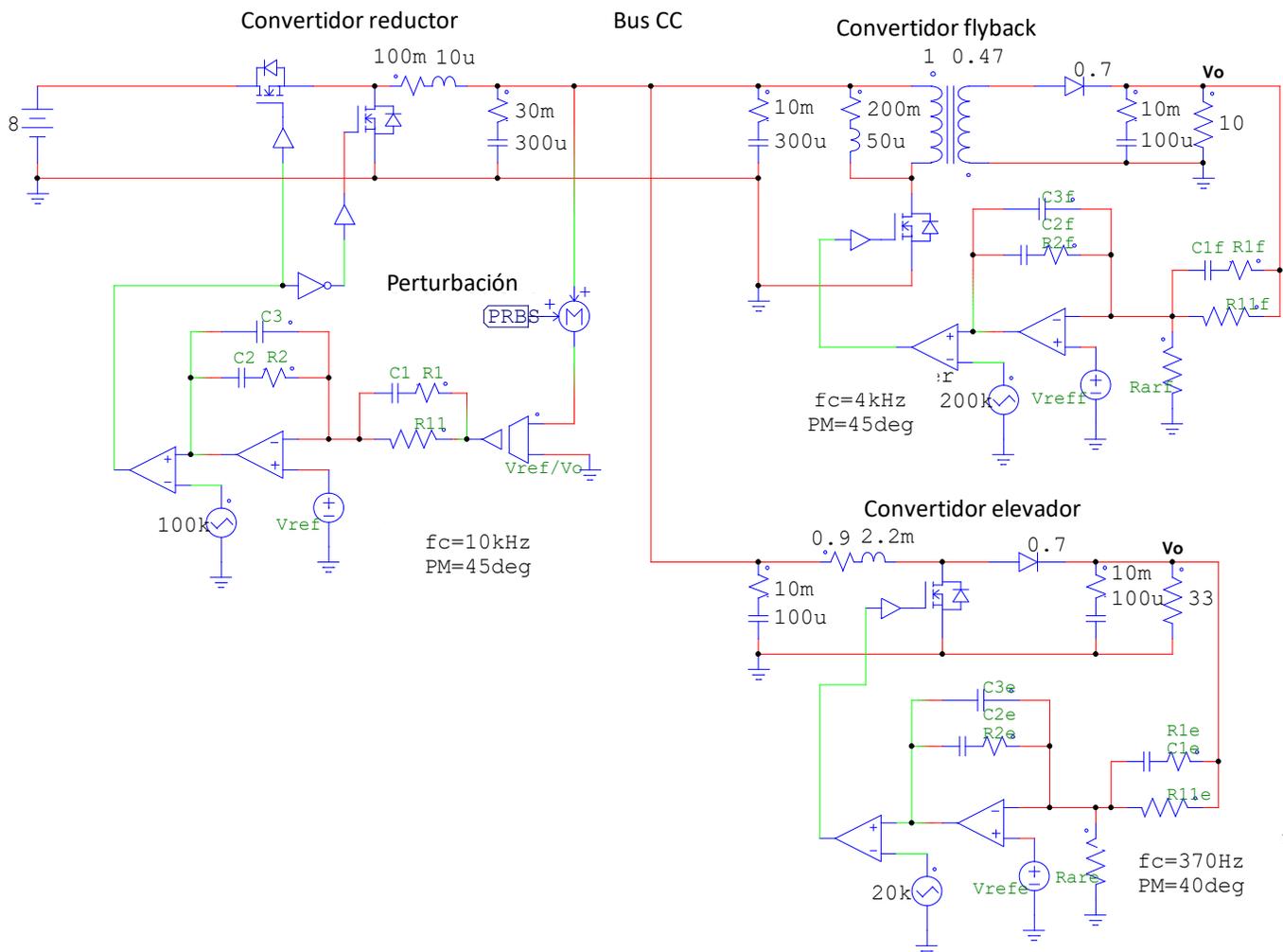


Fig. 5 Esquema eléctrico para la validación de la medida de la impedancia de entrada mediante simulación

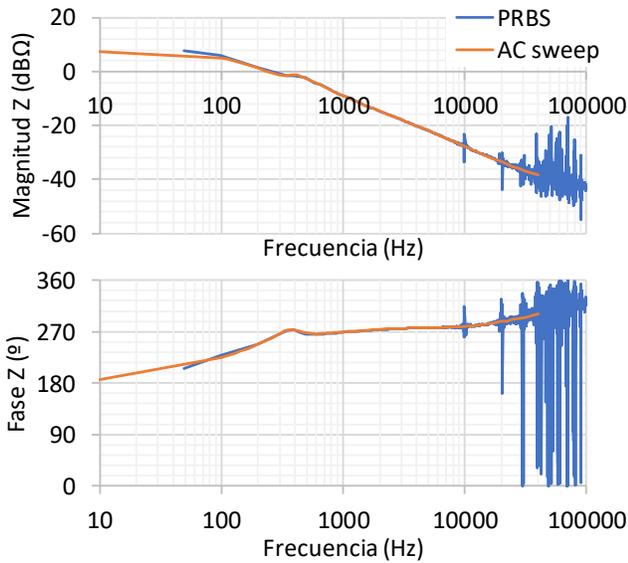


Fig. 6 Identificación mediante simulación de la impedancia de entrada del convertidor elevador y el flyback

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar la propuesta se ha construido un sistema multiconvertidor, formado por un convertidor reductor con control digital implementado en un System on Chip (Zybo en la Fig. 7). La PRBS de 11 bits y el sistema de identificación no paramétrica están implementados en el microcontrolador, mientras que el DPWM y el compensador digital están implementados en la FPGA. A este convertidor reductor se ha conectado un convertidor elevador trabajando con un lazo de tensión implementado en un controlado analógico UC3823A, diseñado con el método del factor K [15] para tener una frecuencia de cruce igual a 370 Hz y un margen de fase igual a 40°.

Para validar la propuesta, la corriente de salida del convertidor reductor se mide con una sonda de corriente Tektronics TCP202A y utilizando el 1103 TekProbe Power Supply. Esta sonda podría considerarse instrumentación adicional, pero su utilización solo tiene como objetivo la validación de la idea, y la corriente podría medirse por cualquier otro método que no requiriese un osciloscopio. La corriente y la tensión medidas a la salida del convertidor reductor se introducen en el System on Chip empleando el conversor A/D AC7476A. Aunque la medida se realiza por el System on Chip y es posible realizar los cálculos dentro del dispositivo, en esta prueba concreta la tensión y corriente medida se han exportado a un ordenador. Empleando un script de Matlab offline se calcula la FFT de las señales con un promediado de 20 ciclos, y se calcula la impedancia.

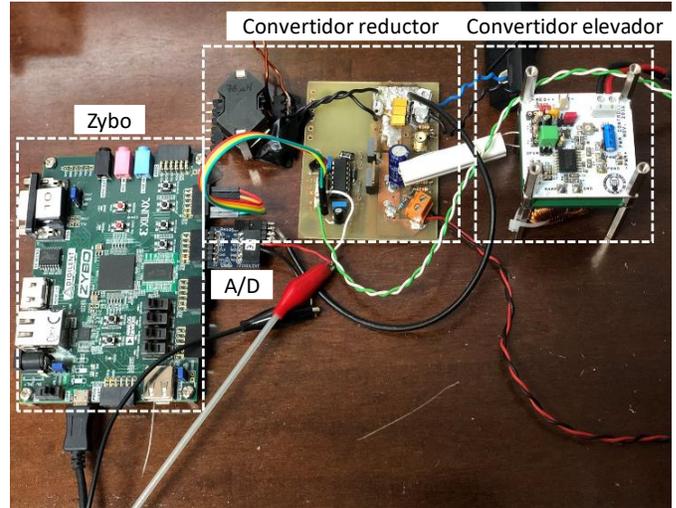


Fig. 7 Fotografía de los prototipos

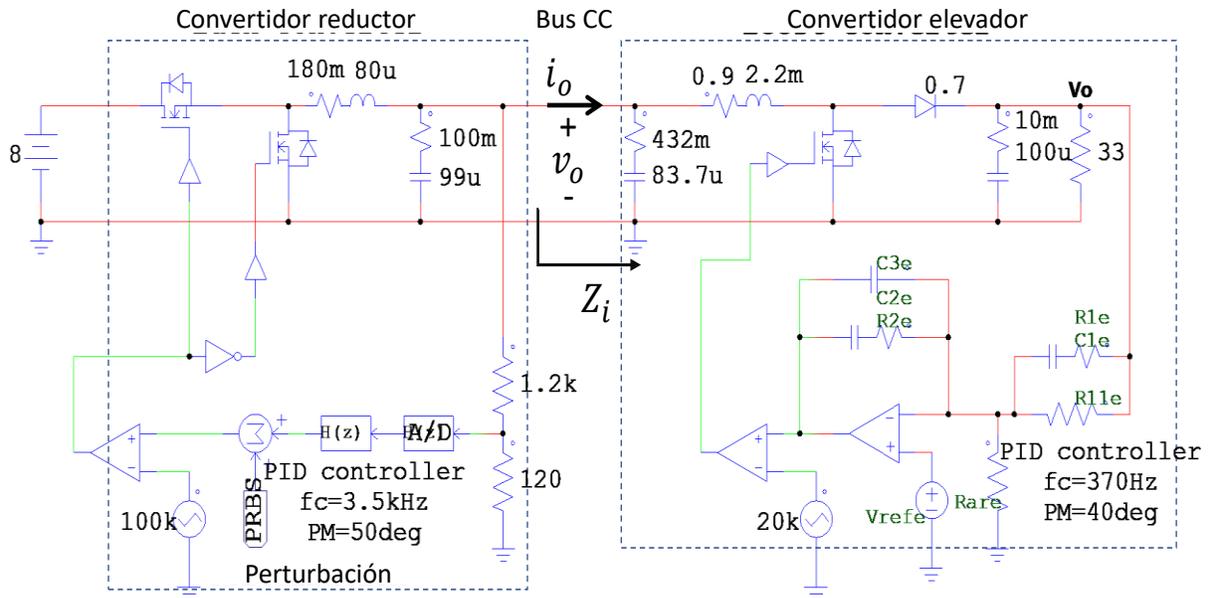


Fig. 8 Esquema eléctrico para la validación del sistema multiconvertidor

V. CONCLUSIONES

Este trabajo está centrado en presentar el uso de la identificación no paramétrica implementado en el control digital de un convertidor para medir la impedancia de entrada de los convertidores conectados a su salida. La perturbación (PRBS) es una señal de banda ancha que excita simultáneamente muchas frecuencias, se introduce directamente en el lazo de control digital y no se precisa instrumentación adicional, salvo los sensores para medir la tensión y la corriente a la salida.

En este artículo se ha mostrado la utilidad de esta técnica para medir la impedancia de entrada de convertidores, pero también puede utilizarse para caracterizar la respuesta en frecuencia de cualquier otro sistema con comportamiento lineal, como por ejemplo el estado de carga de una batería, o incluso caracterizar cualquier impedancia conectada como carga al convertidor.

La propuesta se ha validado mediante simulación por comparación con un barrido en alterna, y mediante resultados experimentales en un sistema multiconvertidor. En ambos casos se ha validado la utilidad de la propuesta y la similitud de los resultados con las técnicas de medida basadas en tonos simples, en contraposición con la excitación de banda ancha de la propuesta. La utilización de la PRBS permite no solo una fácil implementación en un sistema digital, sino acortar significativamente el tiempo de medida.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación de la Comunidad de Madrid a través del proyecto DROMADER-CM (Y2020/NMT-6584 / SINERGICOS) y por la acción financiada por la Comunidad de Madrid a través de la línea "Estímulo a la Investigación de Jóvenes Doctores" del Convenio Plurianual con la UC3M (UNION-CM-UC3M), en el marco del V PRICIT (V Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica).

REFERENCIAS

- [1] M. Barry, "Design issues in regulated and unregulated intermediate bus converters", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2004, pp. 1389-1394.
- [2] L. Brush, "Distributed power architecture demand characteristics", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2004, pp.342 2004.
- [3] A. Emadi, Sheldon S. Williamson, and Alireza Khaligh, "Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, pp. 567-577, May 2006
- [4] A. Riccobono and E. Santi, "Comprehensive Review of Stability Criteria for DC Power Distribution Systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, pp. 3525-3535, Sept.-Oct. 2014
- [5] M. Sanz et al., "Low-cost input impedance estimator of Dc-to-Dc converters for designing the control loop in cascaded converters," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 3090-3096
- [6] M. Sanz; M. Bernejo; A. Lazaro; D. Lopez-del-Moral; P. Zumel; C. Fernandez; A. Barrado, "Simple input impedance converter model to design regulators for dc-distributed system", IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2016, pp. 1-6
- [7] Shirazi, M.; Zane, R.; Maksimovic, D., "An Autotuning Digital Controller for DC-DC Power Converters Based on Online Frequency-Response

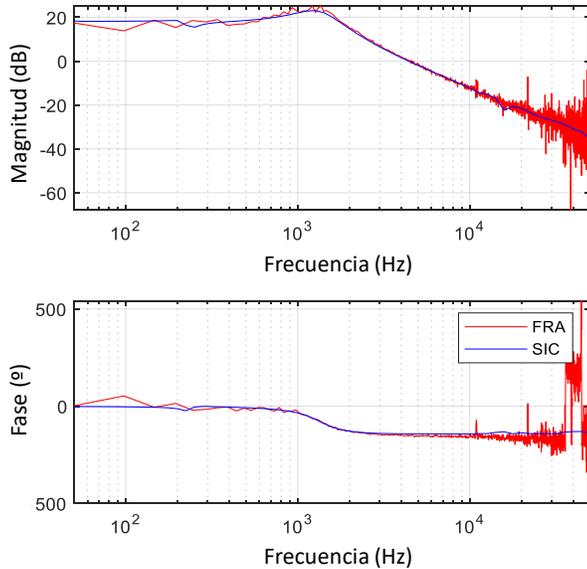


Fig. 9 Respuesta en frecuencia identificada de la tensión de salida respecto al ciclo de trabajo del convertidor reductor

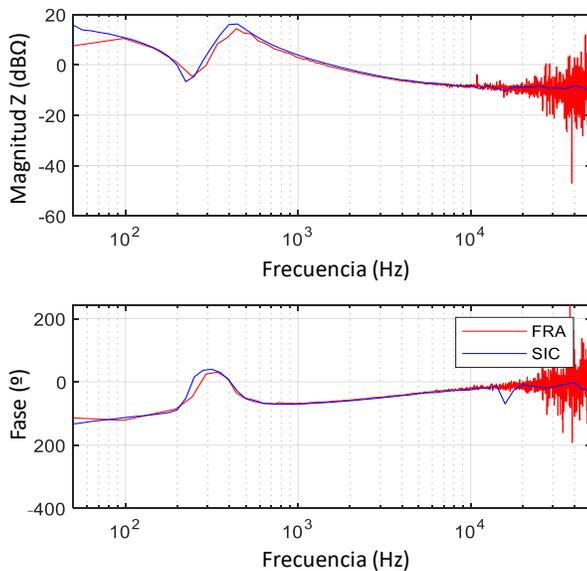


Fig. 10 Impedancia de entrada del convertidor elevador identificada usando el sistema propuesto

La impedancia de entrada del convertidor elevador se ha identificado con el convertidor reductor funcionando en lazo cerrado, inyectando la perturbación PRBS en su lazo de control (Fig. 7). Como se mencionó anteriormente, la perturbación circulando por el sistema permite identificar diferentes respuestas en frecuencia dependiendo de las señales medidas. La respuesta en frecuencia de la función de transferencia del convertidor reductor (Fig. 9) o la impedancia de entrada del convertidor elevador (Fig. 10). En ambos casos la medida realizada con el sistema propuesto (SIC) es muy parecida a la medida con una instrumentación específica (FRA), validando la utilidad de la propuesta.

- Measurement," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.11, pp.2578,2588, Nov. 2009
- [8] Morroni, J.; Corradini, L.; Zane, R.; Maksimovic, D., "Adaptive Tuning of Switched-Mode Power Supplies Operating in Discontinuous and Continuous Conduction Modes," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.24, no.11, pp.2603,2611, Nov. 2009
- [9] T. Roinila, M. Vilkkö and J. Sun, "Online Grid Impedance Measurement Using Discrete-Interval Binary Sequence Injection," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 985-993, Dec. 2014
- [10] A. Riccobono et al., "Stability of Shipboard DC Power Distribution: Online Impedance-Based Systems Methods," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 55-67, Sept. 2017
- [11] C. Fernandez, M. Granda, P. Zumel, M. Sanz, A. Lazaro, A. Barrado, "Identification system applied to the characterization of the input impedance of cascaded dc-dc converters", Nineteenth IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, IEEE COMPEL 2018
- [12] Botao Miao; Zane, R.; Maksimovic, D., "System identification of power converters with digital control through cross-correlation methods," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.20, no.5, pp.1093,1099, Sept. 2005
- [13] C. Fernandez, P. Zumel, M. Granda, M. Sanz, A. Lazaro and A. Barrado, "SoC implementation of an autonomous identification and control system for DC/DC power converters," 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Trondheim, 2016, pp. 1-6
- [14] T. Roinila, M. Vilkkö and J. Sun, "Broadband methods for online grid impedance measurement," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 3003-3010
- [15] Venable, H. D. "The k-factor: A New mathematical Tool for Stability, Analysis, and Synthesis". *Proceeding of. Powercon 10*, San Diego, CA, March 22-24, 1983