

Operación en régimen permanente del convertidor Modular Multi Active Bridge

Leonardo Ortega*, Cristina Fernández, Andrés Barrado, y Pablo Zumel

*Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia

Universidad Carlos III de Madrid

Madrid, España

Abstract—Los convertidores multipuerto son elementos esenciales en muchos sistemas de distribución de potencia con múltiples fuentes y cargas. El convertidor Modular Multi Active Bridge (MMAB) es una alternativa interesante como convertidor multipuerto modular y escalable en aplicaciones de movilidad eléctrica, avión más eléctrico, etc. El control de los flujos de potencia presenta cierta complejidad por el acoplamiento de las variables de control, constituyendo un sistema multivariable. En el presente trabajo se realiza un análisis en régimen permanente para encontrar las zonas de operación más representativas que están ligadas a puntos críticos de control debido al acoplamiento de los lazos de control. El grado de desacoplamiento se comprueba mediante la matriz de Bristol y mediante números de condición (CN). Los resultados se validan para varios casos mediante simulaciones con MATLAB.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años han crecido las aplicaciones de sistema de distribución de potencia complejos con arquitecturas multi-convertidor en las que el uso de convertidores modulares se plantea como una alternativa que redundaría en una mejora de la eficiencia global del sistema, la escalabilidad y la reducción de coste de producción [1]. Algunos ejemplos de este tipo de arquitecturas se dan en aplicaciones de procesamiento diferencial de potencia [2], movilidad eléctrica [1], o avión más eléctrico (MEA) [3], [4].

Los elementos característicos de estos sistemas de distribución de potencia son la diversidad de fuentes de energía, elementos de almacenamiento como baterías y super-condensadores, cargas a veces reversibles que pueden generar energía, y convertidores de potencia interconectando todos estos elementos. Estos convertidores pueden ser un conjunto independiente, o un convertidor multipuerto [2], [5], [6].

El convertidor Modular Multi Active Bridge (MMAB) se presentó y analizó en [5], [6]. Se trata de un convertidor multipuerto con transformadores independientes y conexión en paralelo en el lado secundario (Fig. 1), lo que hace que sea escalable y que incluso en sistemas ya construidos se pueda variar fácilmente el número de puertos. El convertidor MMAB es eléctricamente equivalente a otros convertidores de múltiples puentes activos, como el Quad Active Bridge (QAB) [7], o a otras propuestas basadas en transformadores multidevanado.

Este trabajo está financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Agencia Estatal de Investigación (Proyecto DPI2017-88062-R).

El control de estos convertidores multipuerto plantea diversos desafíos y puede resultar complejo [6], [8], [9], principalmente por el número e interdependencia de las variables de control involucradas y la no linealidad del sistema. En el convertidor MMAB estudiado en este artículo, las variables de control son los desfases entre las tensiones cuadradas generadas por cada puente. Las magnitudes que se quieren controlar son las corrientes medias en cada puerto, dado que se asume que en cada uno de ellos se conecta una fuente de tensión, aunque en algunos casos las cargas pueden ser pasivas. En ciertas condiciones, el control multivariable se puede simplificar dado que las variables de control presentan un bajo acoplamiento ([8], [10]).

En publicaciones recientes sobre convertidores multipuerto de tipo MMAB se suele trabajar típicamente en puntos de operación con desfases pequeños. En [4], para una aplicación de MEA se trabaja con desfases entre 2° y 15° , equivalentes a 0.0111 y 0.0833 p.u. Estos desfases tan pequeños están ligados a puntos de funcionamiento de baja corriente circulante, sin embargo no se llega a explorar la totalidad de las zonas de operación y su problemática.

La caracterización precisa de los límites de transferencia de potencia entre los puertos (potencia máxima por puerto, potencia entre dos puertos, potencia máxima del sistema) no es evidente y puede ser de utilidad para el diseño del convertidor de acuerdo a cada aplicación. El objetivo de este artículo es estudiar y caracterizar dichos límites de transferencia de potencia o puntos de funcionamiento representativos. Además de ser útil en el diseño de los convertidores, podrá aplicarse posteriormente al control en lazo cerrado del convertidor MMAB para identificar los márgenes en los que se puede aplicar un control simplificado por el bajo acoplamiento de las variables de control.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta el comportamiento del MMAB en régimen permanente y los puntos de funcionamiento representativos; la sección 3 incluye un análisis de sensibilidad; en la sección 4 se presentan los resultados de simulación y finalmente en la sección 5 se obtienen las conclusiones de este trabajo.

II. COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN PERMANENTE

En este trabajo se utiliza una modulación por desplazamiento de fase [11], siendo los voltajes en cada puente

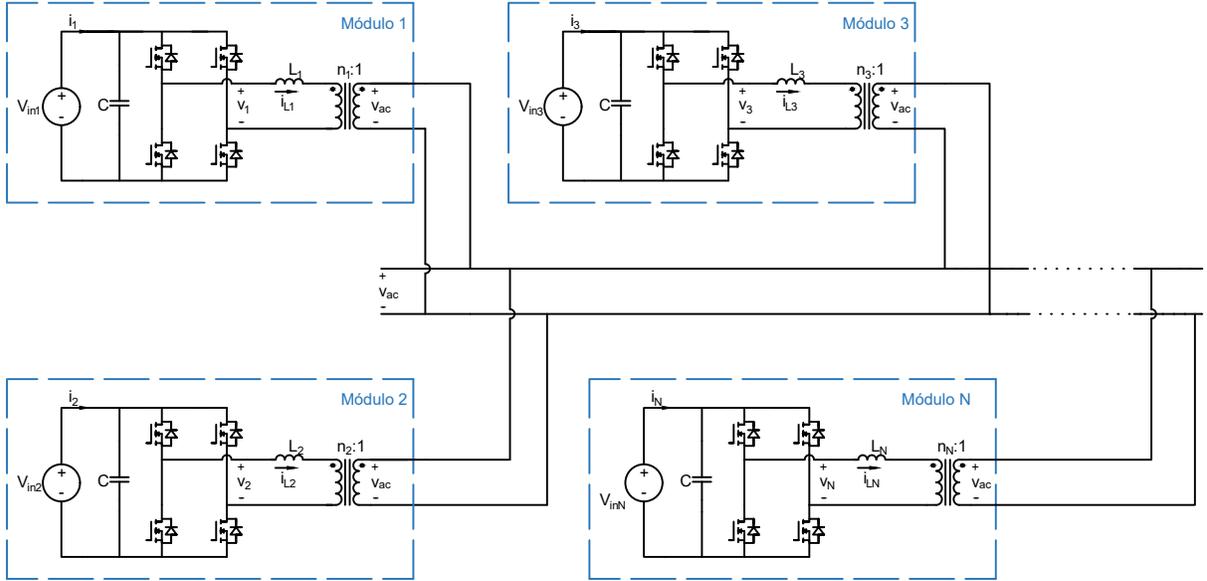


Fig. 1: Convertidor Modular Multi Active Bridge (MMAB).

(v_1, v_2, \dots, v_n) (Fig. 1) ondas cuadradas. Las variables de control (desfases δ_k) tienen un rango de variación de -1 a 1 correspondiente a -180° y 180° . Los desfases en tiempo se calculan como el producto de las variables de control y el intervalo de tiempo T correspondiente a la mitad del periodo de conmutación (T_{sw}).

La corriente media en cada puerto i_k para N puertos se calcula mediante (1), con $V_{in,j}$ como tensión media de entrada en el puerto j [5].

$$i_k = \sum_{j=1}^N K_{kj} (\delta_j - \delta_k) (1 - |\delta_j - \delta_k|) V_{in,j} \quad (1)$$

donde,

$$K_{kj} = T \frac{n_k n_j}{L_k L_j} \quad (2)$$

$$L_{eq} = \left(\sum_{k=1}^N \frac{n_k^2}{L_k} \right)^{-1} \quad (3)$$

En (2) y (3), L_1 a L_N son las inductancias en serie con los transformadores y n_1 a n_N , son las relaciones de transformación para cada uno de ellos. En el presente estudio se considera la condición de maximizar el rango de ZVS utilizando puertos equivalentes (4) [12].

$$\frac{V_{in,k}}{n_k} = V_0 \quad (4)$$

$$\frac{L_k}{n_k^2} = L_0$$

A. Puntos de funcionamiento representativos

1) *Potencia máxima en un puerto:* Partiendo de (1) y considerando puertos equivalentes se obtiene (5).

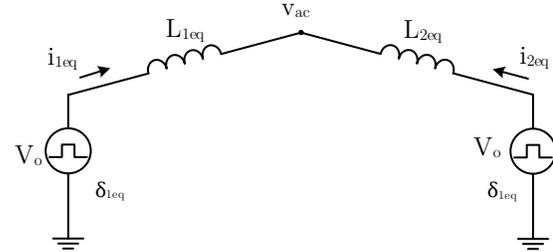


Fig. 2: Circuito equivalente para potencia máxima del convertidor

$$i_k = \frac{TV_o}{NL_o n_k} \sum_{j=1}^N (\delta_j - \delta_k) (1 - |\delta_j - \delta_k|) \quad (5)$$

Para el presente estudio se considera $\delta_1 = 0$, de manera que el puerto 1 siempre será el puerto de referencia. Aplicando el gradiente a (5) e igualando a cero podemos encontrar la expresión para la potencia máxima recibida o entregada por un puerto x (6), la cual ocurre cuando $\delta_k = \delta_x \pm 0.5$ para todo $\delta_k \neq \delta_x$.

$$P_{maxp} = \pm \left(\frac{N-1}{N} \right) \left(\frac{V_0^2 T}{4L_0} \right) \quad (6)$$

2) *Potencia máxima del convertidor:* Para cierta aplicación podría ser de interés conocer la potencia máxima que puede manejar el convertidor MMAB, para obtener dicha potencia se ha dividido el total de puertos en dos conjuntos. Cada conjunto tiene el mismo desfase, por lo que se puede obtener el equivalente Thevenin de cada conjunto, obteniéndose el circuito equivalente de la Fig. 2, donde $L_{1eq} = L_o/x$, $L_{2eq} = L_o/y$ y $x + y = N$.

Para obtener la máxima circulación de potencia, la suma de las inductancias equivalentes debería ser mínima, para la cual maximizamos el producto $x \cdot y$. Se identifican dos casos:

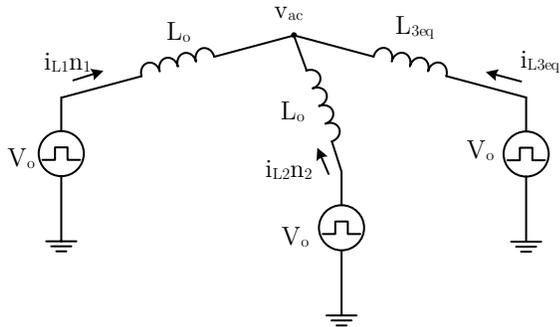


Fig. 3: Circuito equivalente potencia máxima entre dos puertos

- Número de puertos pares: $x = y = N/2$, de donde la inductancia equivalente total corresponde a (7).

$$L_{eq} = \frac{4L_o}{N} \quad (7)$$

- Número de puertos impares $y = (N + 1)/2$ y $x = (N - 1)/2$, de donde la inductancia equivalente total corresponde a (8).

$$L_{eq} = \frac{4L_o N}{N^2 - 1} \quad (8)$$

El circuito equivalente corresponde a un convertidor Dual Active Bridge (DAB). Para obtener la potencia máxima consideramos $\delta_{1eq} = 0$ y $\delta_{2eq} = 0.5$. Se calculan las potencias de acuerdo a [11] y dejándolas en función de (6) obtenemos la potencia máxima del convertidor MMAB cuando el número de puertos es par (9) y cuando el número de puertos es impar (10).

$$P_{maxcp} = P_{maxp} \left(\frac{N^2}{4(N-1)} \right) \quad (9)$$

$$P_{maxci} = P_{maxp} \left(\frac{N+1}{4} \right) \quad (10)$$

A manera de ejemplo para un MMAB de 5 puertos y potencia máxima por puerto de 10 kW la máxima potencia que puede transferir un conjunto de puertos a otro es de 15 kW, cuando tres de sus puertos tengan desfase de 0 y los otros dos desfase de ± 0.5 . Dos puertos transferirían o recibirían cada uno 7500 W y los otros se repartirían cada uno 5 kW.

3) *Potencia máxima transferida entre dos puertos:* es relevante señalar que la potencia máxima que puede enviar o recibir un puerto no es la misma que puede manejar directamente con otro puerto. Para calcular la expresión de esta potencia, se han agrupado los puertos como se muestra en la Fig.3. La tercera rama correspondiente a L_{3eq} corresponde al equivalente de Thevenin desde el puerto 3 hasta el puerto N considerando que todos sus voltajes están en fase. La inductancia equivalente tiene un valor de $L_{3eq} = L_o/(N-2)$.

Aplicando (1) y (2) y considerando como referencia el puerto 3 ($\delta_3 = 0$), se obtienen las expresiones para las potencia P_1 y P_2 .

$$P_1 = K_A [(\delta_2 - \delta_1)(1 - |\delta_2 - \delta_1|) - \delta_1(N-2)(1 - |\delta_1|)] \quad (11)$$

$$P_2 = K_A [(\delta_1 - \delta_2)(1 - |\delta_1 - \delta_2|) - \delta_2(N-2)(1 - |\delta_2|)] \quad (12)$$

donde,

$$K_A = \frac{TV_o^2}{NL_o}$$

Considerando que $\delta_2 = -\delta_1$, podemos encontrar la expresión de la potencia P_1 cuando $P_1 = -P_2$ y $P_{3eq} = 0$.

$$P_1 = K_A \cdot \delta_1 [(2 + N)|\delta_1| - N] \quad (13)$$

A partir de (13), podemos encontrar el valor de δ_1 para obtener la potencia máxima transferida del puerto 1 al puerto 2.

$$|\delta_1| = \frac{N}{2(2 + N)} \quad (14)$$

Por ejemplo, para un convertidor MMAB de 5 puertos la potencia máxima transferida entre un par de puertos (Puerto1 y Puerto2) se daría cuando $|\delta_1| = \pm 0.3571$, $|\delta_2| = \mp 0.3571$ y $\delta_3 = \delta_4 = \delta_5 = 0$. Resulta relevante, ya que la condición implica un desfase mayor de 0.5 entre un par de puertos, en este caso de 0.7142.

Para obtener el valor de la potencia máxima transferida entre un par de puertos (P_{maxpp}), se ha reemplazado (14) en (13), y dejando la expresión en función de P_{maxp} se obtiene (15).

$$P_{maxpp} = P_{maxp} \left(\frac{N^2}{(N-1)(N+2)} \right) \quad (15)$$

Considerando el ejemplo anterior y para una potencia máxima por puerto de 10 kW, lo máxima potencia que podrían transmitirse entre dos puertos es de 8929 W cuando el resto de puertos tienen una potencia teórica de 0 W.

III. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta sección se estudia la interacción entre las variables de control y las variables controladas. Como se indicó previamente, las variables controladas serán las corrientes medias en cada puerto.

El comportamiento en pequeña señal de las corrientes respecto a las variables de control queda establecido por la matriz de ganancias estáticas del sistema (\mathbf{A}) (17) [12].

En el presente trabajo se han considerado puertos equivalentes con voltajes constantes, por lo que la matriz (\mathbf{A}) se puede reescribir como (18). El determinante de esta matriz es cero $|\mathbf{A}| = 0$, por lo que estamos frente a un sistema singular, y no es posible aplicar la análisis clásicos de sensibilidad, o la matriz de Bristol que se describirá después.

Considerando la variable de control $\delta_1 = 0$ y que no se va a controlar la corriente 1 (puerto "sumidero"), se puede eliminar una fila y una columna de la matriz \mathbf{A} , con lo cual de manera general obtenemos una matriz no singular, que la llamaremos \mathbf{A}_r .

Se han identificado dos "casos críticos" donde la matriz \mathbf{A}_r se convierte en una matriz singular:

- Cuando un puerto alcanza la máxima potencia entregada o recibida (6)

- Cuando se alcanza la máxima potencia del convertidor (9) o (10).

A. Matriz de Bristol

Antes de realizar el análisis de las interacciones de las variables mediante la matriz de Bristol, vamos a escalar la matriz de acuerdo a (19) [13].

$$\mathbf{A}_r = \mathbf{D}_e^{-1} \cdot \mathbf{A}_r \cdot \mathbf{D}_u \quad (19)$$

Donde la matriz \mathbf{D}_e es una matriz diagonal cuyos elementos de la diagonal se corresponden con los máximos errores de control permitidos, que en nuestro caso los definiremos como el 1% de $I_{max,k}$ en cada puerto.

La matriz \mathbf{D}_u es una matriz diagonal cuyos elementos de la diagonal se corresponden con el máximo cambio permitido de las variables de entrada, en nuestro caso definiremos todos estos elementos como 0.5.

La matriz de ganancias relativas λ o matriz de Bristol, se puede obtener con (20) [14], donde \circ representa el producto de Hadamard o producto elemento a elemento.

$$\lambda = \mathbf{A}_r \circ (\mathbf{A}_r^{-1})^T \quad (20)$$

B. Número de Condición (CN)

El número de condición CN se calculan como la relación entre el valor singular máximo ($\bar{\sigma}$) y el valor singular mínimo ($\underline{\sigma}$) de la matriz \mathbf{A}_r (21). En [13] se indica que valores grandes del número de condición, $CN > 10$, pueden indicar potenciales problemas de control: puede ocurrir que el valor singular mínimo $\underline{\sigma}$ sea demasiado pequeño, que la matriz de Bristol tenga elementos muy grandes, o que el sistema sea demasiado sensible a la incertidumbre de entrada. Por ello, se analizará también CN en la siguiente sección.

$$CN = \frac{\bar{\sigma}}{\underline{\sigma}} \quad (21)$$

TABLE I: Parametros del Convertidor MMAB

Parametro	Cantidad
N	5
Voltajes de entrada (V)	$V_{g1}=V_{g2}=V_{g3}=270; V_{g4}=V_{g5}=540$
Relaciones de transformación	$n_1=1; n_2=1; n_3=1; n_4=2; n_5=2$
Inductancias (μH)	$L_1=L_2=L_3=7.29; L_4=L_5=29.16$
C_i (μF)	$C_1=C_2=C_3=C_4=C_5=670$
Frecuencia de Conmutación(kHz)	100

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A. Puntos representativos de operación

Para validar los puntos representativos de operación del convertidor MMAB se ha desarrollado un *script* en MATLAB para obtener las potencias de un convertidor MMAB de 5 puertos con los parámetros de la Tabla I. Se parte de los voltajes de entrada y una potencia máxima por puerto de 10 *kW* (parámetro de diseño). Junto con (4) y (6) se han obtenido los valores de relaciones de transformación (n_k) y los valores de las inductancias (L_k).

El *script* calcula las combinaciones de potencias cuando varían las variables de control entre -1 y 1 ($-1 < \delta_k < 1$) con una resolución de 0.05. Se ha incluido una condición para que los desfases equivalentes entre puertos se encuentren siempre entre -1 y 1 (-180° y 180°). Para la simulación se ha considerado en todo momento $\delta_5 = 0$.

Se han eliminado las combinaciones iguales aunque se encuentren en diferente orden y se han redondeado los resultados a 2 decimales. De esta manera, se evita repetir combinaciones. Por ejemplo, la combinación para un puerto entregando potencia máxima (10 *kW*) solo se presentará una vez, de igual manera la combinación de un puerto recibiendo potencia máxima (-10 *kW*) solo aparecerá en una ocasión.

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{A} \cdot \Delta \boldsymbol{\delta} \rightarrow \Delta \boldsymbol{\delta} = \mathbf{A}^{-1} \Delta \mathbf{i} \quad (16)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sum_{k \neq 1} V_{ik} K_{1k} (1 - 2|\delta_k - \delta_1|) & V_{i2} K_{12} (1 - 2|\delta_1 - \delta_2|) & \dots & V_{iN} K_{N1} (1 - 2|\delta_1 - \delta_N|) \\ V_{i1} K_{12} (1 - 2|\delta_2 - \delta_1|) & -\sum_{k \neq 2} V_{ik} K_{2k} (1 - 2|\delta_k - \delta_2|) & \dots & V_{iN} K_{N2} (1 - 2|\delta_2 - \delta_N|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{i1} K_{N1} (1 - 2|\delta_N - \delta_1|) & V_{i2} K_{N2} (1 - 2|\delta_2 - \delta_N|) & \dots & -\sum_{k \neq N} V_{ik} K_{Nk} (1 - 2|\delta_k - \delta_N|) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = K_A \begin{bmatrix} -\frac{1}{n_1} [(N-1) - 2\sum_{k \neq 1} (|\delta_k - \delta_1|)] & \frac{1}{n_1} (1 - 2|\delta_1 - \delta_2|) & \dots & \frac{1}{n_1} (1 - 2|\delta_1 - \delta_N|) \\ \frac{1}{n_2} (1 - 2|\delta_2 - \delta_1|) & -\frac{1}{n_2} [(N-1) - 2\sum_{k \neq 2} (|\delta_k - \delta_2|)] & \dots & \frac{1}{n_2} (1 - 2|\delta_2 - \delta_N|) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{n_N} (1 - 2|\delta_N - \delta_1|) & \frac{1}{n_N} (1 - 2|\delta_2 - \delta_N|) & \dots & -\frac{1}{n_N} [(N-1) - 2\sum_{k \neq N} (|\delta_k - \delta_N|)] \end{bmatrix} \quad (18)$$

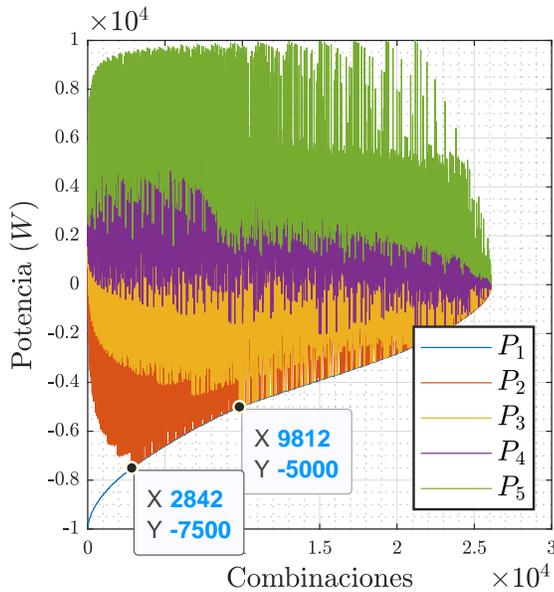


Fig. 4: Combinaciones de Potencias para 5 puertos.

Finalmente, se organizan las combinaciones de potencia en función de P_1 para que las combinaciones aparezcan en orden ascendente de P_1 . Cuando existan combinaciones que impliquen iguales valores de P_1 se ordenan las combinaciones en orden ascendente de P_2 . El resultado se muestra en la Fig. 4. Es interesante señalar que existen combinaciones de potencia que no se pueden alcanzar. En el tramo desde la combinación 0 hasta la combinación 2842 ($P_1 = P_2 = 7500 W$) la potencia 2 no está definida en ciertos valores de potencia. De igual manera en el tramo desde la combinación 2842 hasta 9812 ($P_1 = P_2 = P_3 = 5000 W$), la potencia 3 tiene un rango de potencia donde no se encuentra definida.

De la observación de este caso concreto, y considerando que la gráfica de potencia es simétrica, se deduce que es posible tener cualquier combinación de potencia si las potencias de todos los puertos tienen un valor menor o igual a la mitad de la potencia máxima por puerto. Esto es relevante para establecer las referencias para un lazo cerrado de control del MMAB.

1) *Potencia máxima del convertidor:* Para validar la potencia máxima que puede alcanzar el convertidor, se han reemplazado por cero todas las potencias positivas y se ha realizado la suma de las potencias negativas. El resultado se muestra en la Fig. 5. De esta manera se comprueba la expresión (10). Existen dos combinaciones debido a que corresponden a $P_1 = P_2 = -7500 W$ y $P_3 = P_4 = P_5 = 5000 W$ y a la combinación $P_1 = P_2 = P_3 = -5000 W$ y $P_4 = P_5 = 7500 W$. Cabe mencionar que las combinaciones se muestran también en la Fig. 4.

2) *Potencia máxima transferida entre dos puertos:* Para validar este parámetro se ha restado la potencia 1 de la potencia 5 y se presenta el resultado en la Fig. 6. La potencia máxima entre los dos puertos es de $17850 W$ en la combinación 640. En esta combinación el valor de las potencias es $P_1 = -P_5 = -8925$ y $P_2 = P_3 = P_4 = 0$. Existe un error de 0.044% respecto a lo esperado por (15). Este error se debe a la resolución de las variables de control y al redondeo.

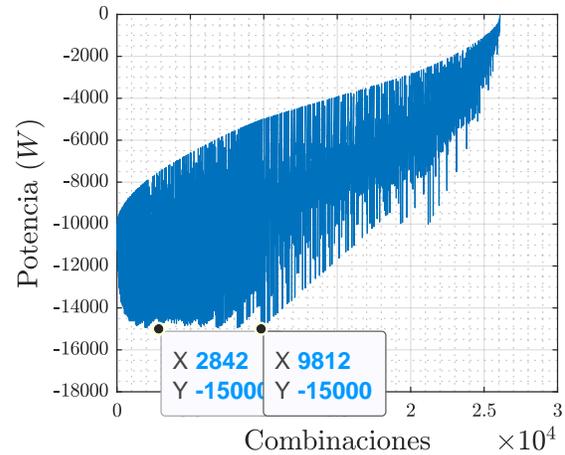


Fig. 5: Sumatoria de potencias negativas.

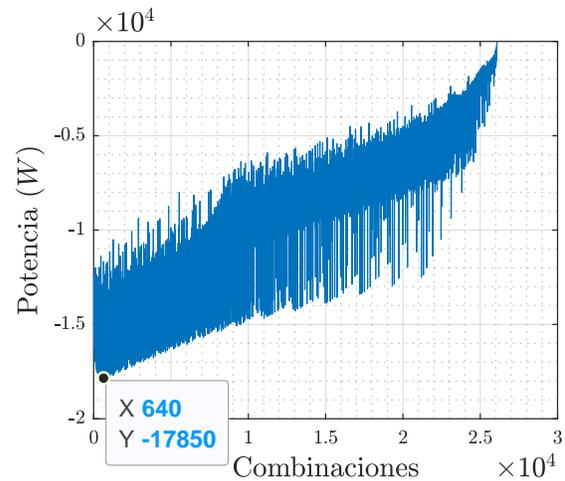


Fig. 6: Potencia 1 menos potencia 5

B. Análisis de Sensibilidad

Para ilustrar la sensibilidad de las salidas respecto a las entradas del MMAB hemos trabajado con el convertidor del apartado anterior y hemos considerado varios casos de distribución de potencia, los mismos que se muestran en la Fig. 7, donde:

- Caso 1, caso 9 y caso 12 corresponde a casos muy cercanos a II-A1. No se ha trabajado con los casos exactos ya que la matriz se vuelve singular, como se mencionó en apartados anteriores
- Caso 2 corresponde a un caso muy cercano a II-A3, donde todos los puertos entregan potencia cero excepto dos que se transfieren su máxima potencia.
- Caso 11 corresponde a un caso muy cercano a II-A2, donde se tiene la máxima potencia entregada o recibida por el convertidor MMAB.
- Caso 10 corresponde a una combinación de potencia donde la diferencia de δ es mayor a 0.5.

Al calcular la matriz de Bristol para estas situaciones, se obtienen matrices diagonales en todos los casos. Sin embargo, para los casos 1,9,10,11 y 12 algunos elementos de

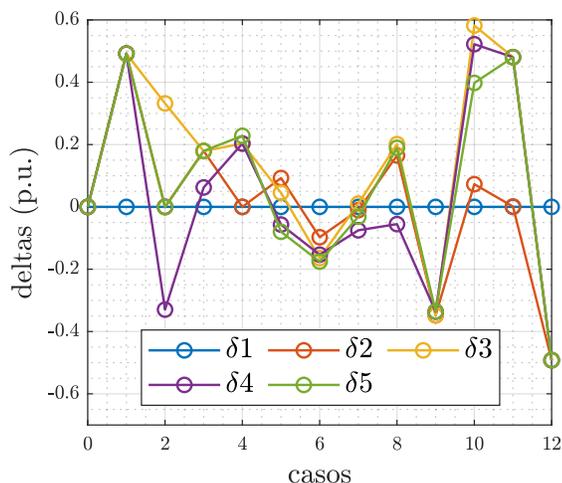


Fig. 7: Valores de δ_k para los diferentes casos.

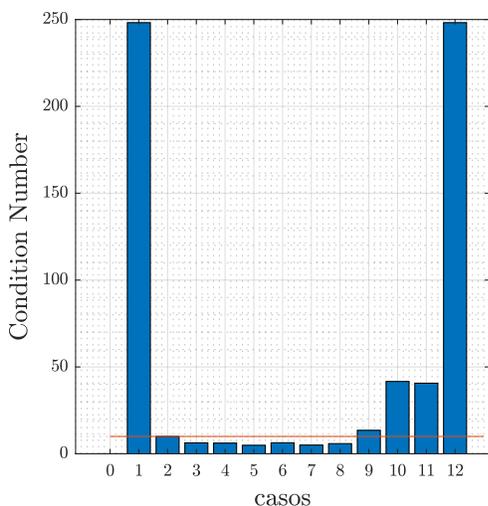


Fig. 8: Valores de CN para los diferentes casos.

la diagonal son mayores a 9. En particular para los casos 1 y 12 los elementos de la diagonal son mayores a 40, con lo cual en estos puntos de operación el convertidor presentará una alta interacción entre variables, lo cual conlleva a una dificultad de desacoplar los lazos de control.

Se han obtenido también los CN para todos los casos, y se confirma que los casos 1,2,9,10,11, y 12 presentan CN superiores a 10.

Los resultados obtenidos validan la estrategia de independizar directamente lazos de control en el convertidor MMAB dentro de zonas de operación que no se encuentren cercanos los casos mencionados en el apartado II-A.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se determina zonas de operación del convertidor MMAB, identificando tres puntos representativos de operación. Mediante un análisis de sensibilidad se explora la interacción de las variables de control para comprobar si el convertidor constituye un sistema multivariable donde se pueden independizar los lazos de control.

Se encuentra que el convertidor MMAB tiene zonas donde no es posible obtener todas las combinaciones de potencia a pesar de que estas se encuentren en potencias inferiores a la potencia máxima que puede recibir o entregar cada puerto. Esto permitirá determinar referencias de lazo cerrado que sean posibles de alcanzar para evitar futuras saturaciones en controladores.

El análisis de sensibilidad comprueba que siempre que no se trabaje alrededor de los puntos representativos de operación y siempre que los desfases sean menores a 0.5 el aplicar controladores independientes a cada lazo arrojará resultados satisfactorios.

REFERENCES

- [1] A. K. Soltani, M. Kandidayeni, L. Boulon, and D. L. St-Pierre, "Modular Energy Systems in Vehicular Applications," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 14–23, apr 2019.
- [2] P. Wang, Y. Chen, Y. Elasser, and M. Chen, "Small Signal Model for Very-Large-Scale Multi-Active-Bridge Differential Power Processing (MAB-DPP) Architecture," in *2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1–8, 2019.
- [3] G. Buticchi, L. F. Costa, D. Barater, M. Liserre, and E. D. Amarillo, "A quadruple active bridge converter for the storage integration on the more electric aircraft," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, pp. 8174–8186, Sep. 2018.
- [4] B. Karanayil, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "Power flow management of isolated multiport converter for more electric aircraft," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 7, pp. 5850–5861, 2017.
- [5] P. Zumel, C. Fernández, A. Lázaro, M. Sanz, and A. Barrado, "Overall analysis of a modular multi active bridge converter," in *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2014*, 2014.
- [6] L. Ortega, P. Zumel, C. Fernández, J. López-López, A. Lázaro, and A. Barrado, "Power distribution algorithm and steady-state operation analysis of a modular multiactive bridge converter," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1035–1050, 2020.
- [7] S. Falcones, R. Ayyanar, and X. Mao, "A DC-DC Multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2192–2203, 2013.
- [8] P. Zumel, L. Ortega, A. Lázaro, C. Fernández, A. Barrado, A. Rodríguez, and M. Hernando, "Modular Dual-Active Bridge Converter Architecture," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, 2016.
- [9] V. Repecho, J. M. Olm, R. Griñó, A. Dòria-Cerezo, and E. Fossas, "Modelling and nonlinear control of a magnetically coupled multiport dc-dc converter for automotive applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 63345–63355, 2021.
- [10] L. Ortega, C. Fernández, F. Huertas, A. Barrado, and P. Zumel, "Control en lazo cerrado para un convertidor multiactive bridge modular," *XX Seminario Anual de Automática, Electrónica e Instrumentación Ciudad Real*, 2020.
- [11] 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.
- [12] L. Ortega, P. Zumel, C. Fernández, J. López-López, A. Lázaro, and A. Barrado, "Power distribution algorithm and steady-state operation analysis of a modular multiactive bridge converter," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 3, pp. 1035–1050, 2020.
- [13] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable feedback control: analysis and design*, vol. 2. Citeseer, 2007.
- [14] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. Doyle III, *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2010.