

Modulador Simple con Control del Equilibrio de Tensiones para un Convertidor Híbrido ANPC + Flying-capacitor de Cinco Niveles

Jose I. Leon*, Leopoldo G. Franquelo*, Samir Kouro⁺, Bin Wu⁺ and Sergio Vazquez*

* Electronic Engineering Department
University of Seville
Seville, Spain 41092

Email: jileon@gte.esi.us.es

+ Department of Electrical and Computer Engineering

Ryerson University

Toronto, Canada

Email: skouro@ee.ryerson.ca

Abstract—El convertidor híbrido basado en una celda active-neutral-point-clamped conectada en serie con celdas con condensadores flotantes es una topología multinivel reciente con propiedades interesantes como una tensión de salida de alta calidad y una fácil extensión para lograr un elevado número de niveles con un reducido número de dispositivos de potencia. Este trabajo se centra en la introducción de un modulador monofásico simple para el convertidor híbrido de cinco niveles. El control de la tensión de los condensadores flotantes del convertidor se realiza mediante una técnica de control que aprovecha el gran número de estados de conmutación redundantes presentes en la topología. Utilizando esta técnica de modulación, la tensión de los condensadores del dc-link y las tensiones de los condensadores flotantes se controlan a sus valores deseados. Los resultados de la simulación muestran el buen desempeño del control de las tensiones obteniendo simultáneamente buenos resultados en cuanto a la calidad de las tensiones y corrientes de salida.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores multinivel se han convertido en una solución muy atractiva para diversas aplicaciones industriales, tales como bombas, ventiladores, grandes cintas transportadoras, sistemas HVDC, convertidores de transmisión directa de la energía eólica y sistemas de propulsión de buques, entre otros. Desde que nacieron en las últimas décadas del siglo XX, paso a paso sus problemas asociados se han superado. En la actualidad, la minimización de las pérdidas de potencia, el equilibrio de los condensadores del dc-link, la complejidad de los métodos de modulación y el diseño de estrategias de control eficientes han llegado a la madurez al menos para convertidores de tres niveles. De esta manera, en la última década se pueden encontrar en el mercado un gran número de productos comerciales con topologías neutral-point-clamped (NPC), condensador flotante (FC) y cascada (CHB) [1]–[3]. Este hecho muestra el éxito actual y futuro de los convertidores multinivel para una amplia gama de aplicaciones de media tensión y alta potencia.

Entre los convertidores multinivel, el convertidor NPC de tres niveles es hoy en día la topología más comercializada

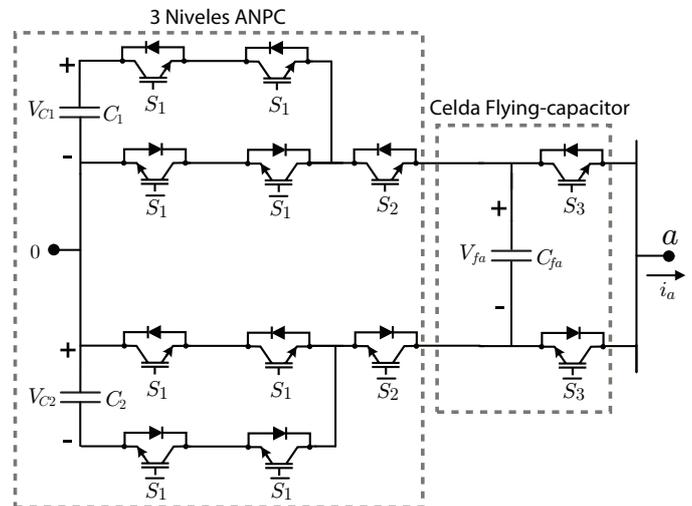


Fig. 1. Topología Híbrida ANPC formada por la conexión en serie de un convertidor ANPC de tres niveles y una celda de potencia con topología de condensador flotante. Esta es una topología de cinco niveles si $V_{C1}=V_{C2}=V_{dc}$ y $V_{fa}=V_{dc}/2$.

en todo el mundo alcanzando una potencia nominal de hasta 44 MVA [1]. Uno de los problemas de esta topología es la distribución desigual de pérdidas de los semiconductores de potencia. Este tema ha sido ampliamente estudiado en los últimos años y ha sido resuelto gracias a la introducción de la topología active-neutral-point-clamped de tres niveles (ANPC) donde se utilizan semiconductores de potencia en lugar de diodos de fijación [4]. La topología ANPC ha sido aplicada por ABB como un power electronic building block (PEBB) para construir convertidores de alta tensión con IGBTs como semiconductores de potencia [5].

La extensión del convertidor ANPC con el fin de lograr una mayor número de niveles se puede llevar a cabo con facilidad. Al igual que en el caso de tres niveles, el convertidor ANPC de

TABLE I
ESTADOS DE CONMUTACIÓN DEL CONVERTIDOR HÍBRIDO DE CINCO NIVELES BASADO EN ACTIVE-NPC Y FLYING-CAPACITOR.

S_1	S_2	S_3	Tensión de fase v_a	Tensión de fase v_a si $V_{C1}=V_{C2}=2V_{fa}=V_{dc}$	Influencia en V_{fa} si $i_a > 0$	Influencia en V_{C1} si $i_a > 0$	Influencia en V_{C2} si $i_a > 0$
0	0	0	$-V_{C2}$	$-V_{dc}$	—	—	—
0	0	1	$V_{fa} - V_{C2}$	$-V_{dc}/2$	↓	—	—
0	1	0	$-V_{fa}$	$-V_{dc}/2$	↑	↑	↓
0	1	1	0	0	—	↑	↓
1	0	0	0	0	—	↑	↓
1	0	1	V_{fa}	$V_{dc}/2$	↓	↑	↓
1	1	0	$V_{C1} - V_{fa}$	$V_{dc}/2$	↑	—	—
1	1	1	V_{C1}	V_{dc}	—	—	—

N niveles tiene la misma estructura que la del convertidor NPC de N niveles, pero se utilizan semiconductores de potencia en lugar de los diodos de fijación [6]. Sin embargo, un convertidor ANPC de N niveles tiene los mismos inconvenientes que el convertidor NPC de N niveles en cuanto al control de la tensión de los condensadores del dc-link y a un alto número de dispositivos de potencia. Recientemente, ha sido introducido un nuevo convertidor híbrido basado en una topología ANPC con celdas de topología de condensador flotante para superar los problemas de la topología convencional ANPC [7]. Este artículo estudia el funcionamiento de este convertidor híbrido.

II. EL CONVERTIDOR HÍBRIDO ANPC+FLYING CAPACITOR

El convertidor híbrido ANPC con celdas de condensador flotante está formado por la conexión en serie de un convertidor ANPC de tres niveles y celdas con topología de condensador flotante. A modo de ejemplo, el convertidor monofásico ANPC con una celda de condensador flotante se muestra en la figura 1. Se puede observar en la figura 1 que todos los semiconductores de potencia de la topología deben bloquear la misma tensión. Los posibles estados de conmutación de esta topología se muestran en la Tabla I. Este convertidor se denomina de cinco niveles híbrido ANPC (5L-ANPC), ya que logra cinco niveles de tensión de salida simétricos si $V_{C1}=V_{C2}=V_{dc}$ y la tensión del condensador flotante V_{fa} es igual a $V_{dc}/2$ tal como se puede observar en la tabla I. Aunque la topología 5L-ANPC es reciente, ABB ya la ha comercializado como una topología de media tensión back-to-back (400 kVA-1000 kVA) en el equipo llamado ACS2000 y que puede ser utilizado para aplicaciones tales como bombas, ventiladores, cintas transportadoras, mezcladoras, compresores y molinos [5]. Recientemente, la topología 5L-ANPC ha sido propuesta para aplicaciones de energía eólica trabajando como un inversor de 6 MVA conectado a un rectificador de tres niveles tipo ANPC [8].

III. TÉCNICAS DE MODULACIÓN TÍPICAS PARA EL CONVERTIDOR 5L-ANPC

Tal como se puede observar en la tabla I, hay varios estados de conmutación que obtienen la misma tensión de salida y afectan a la tensión del condensador flotante en sentido opuesto. Anteriores publicaciones han demostrado que

el control de la tensión del condensador flotante de la topología 5L-ANPC se puede lograr mediante la elección adecuada de los estados redundantes en la secuencia de conmutación. Recientemente, una técnica de modulación tipo space vector se ha aplicado a un convertidor trifásico 5L-ANPC para el lado del rectificador de una topología en configuración back-to-back [9]. La región de control del convertidor es el típico hexágono representado en los ejes alfa-beta formado por los estados de conmutación. La secuencia de conmutación y los tiempos de cada uno de los estados se determinan con los tres vectores más cercanos al vector de referencia. Sin embargo, para un sistema de trifásico, el nivel de la flexibilidad y la complejidad de esta técnica de modulación space vector es significativo debido al elevado número de posibles vectores y sus redundantes presentes en la modulación.

Por otra parte, se han introducido varias técnicas PWM basadas en múltiples portadoras para ser aplicadas al convertidor híbrido ANPC con celdas de condensador flotante. Las técnicas PWM con múltiples portadoras son de tipo level-shifted [8] ó de tipo phase-shifted [10]. Especialmente interesante es la técnica phase-shifted que aplica las portadoras triangulares de forma similar al caso del convertidor multinivel en cascada. El efecto del desplazamiento de fase de las portadoras conlleva un equilibrio natural de la tensión de los condensadores flotantes pero perdiendo respuesta dinámica cuando se presenta un cambio de carga importante. Este mismo fenómeno también aparece en los convertidores multinivel de tipo condensador flotante convencionales.

La redundancia de los estados de conmutación también ha sido utilizada para la introducción de otras técnicas de modulación pre-programadas, tales como la eliminación selectiva de armónicos (SHE). En este caso, las conmutaciones del convertidor se determinan a priori con el fin de eliminar la distorsión armónica de algunos armónicos de bajo orden. Los niveles de tensión que se deben generar por el convertidor se obtienen finalmente gracias a la elección cuidadosa del mejor estado de conmutación para lograr el control de la tensión del condensador flotante [11]–[13]. Una técnica similar se ha introducido también para reducir online al mínimo la distorsión armónica total (THD) [14].

IV. MODULADOR PROPUESTO PARA EL CONVERTIDOR MONOFÁSICO 5L-ANPC

En este artículo, se propone una técnica de modulación simple teniendo en cuenta el concepto de modulación introducido en [15] denominado IDM. La técnica IDM se puede aplicar a cualquier convertidor multinivel monofásico y sólo las señales de disparo finales dependerán de la topología de convertidor multinivel. La técnica IDM se basa en la generación de la tensión de referencia como la media de los niveles de tensión más cercanos. El problema de la modulación monofásica se reduce a cálculos muy simples determinando de una forma sencilla la secuencia de conmutación (formada por dos estados de conmutación) y los correspondientes tiempos de conmutación. El modulador IDM sólo determina los niveles de tensión de salida que se deben utilizar para generar la tensión de fase con baja distorsión. Sin embargo, no incluye ningún objetivo de control adicional tales como el equilibrado de la tensión del dc-link, la minimización de las pérdidas de potencia, etc. De esta forma, el modulador IDM podría necesitar de un procesamiento auxiliar posterior si otros objetivos adicionales han de lograrse. Este concepto se muestra en la figura 2 donde está representado el diagrama típico de un controlador más un modulador para cualquier convertidor de potencia.

En este artículo, se añade un controlador adicional a la técnica de modulación IDM a fin de equilibrar la tensión del condensador flotante del convertidor 5L-ANPC. Como se puede observar en la Tabla I, siempre hay un estado en la secuencia de conmutación que tiende a equilibrar el condensador flotante del convertidor. Este algoritmo de control adicional para conseguir el equilibrado del condensador flotante se basa en elegir el estado de conmutación redundante adecuado teniendo en cuenta los valores instantáneos de la dirección de la corriente de fase y valor del desequilibrio del condensador flotante.

Utilizando el modulador propuesto, se realiza un máximo de una sola conmutación durante el tiempo de muestreo T_s en cada pareja de semiconductores de potencia comandados por las variables S_1 , S_2 y S_3 . El diagrama de flujo del modulador para el convertidor monofásico 5L-ANPC se muestra en la figura 3. El coste computacional de la técnica de modulación propuesta es muy baja ya que sólo implica expresiones matemáticas simples. En el diagrama de flujo, la variable s toma valores ± 1 , ya que se define como

$$s = \text{sign}(V_{ref}). \quad (1)$$

En el diagrama de flujo representado en la figura 3, la variable de conmutación S_i ($i = 1, 2, 3$) toma el valor S_{i1} durante $t_1/2$, S_{i2} en $1 - t_1$ y finalmente otra vez S_{i1} durante $t_1/2$. La señal de conmutación S_1 se genera por simple comparación con cero de la tensión de referencia de la fase V_{ref} . Por lo tanto, el modulador fuerza una frecuencia de conmutación fundamental en los semiconductores de potencia comandados por S_1 conllevando a una reducción de las pérdidas de

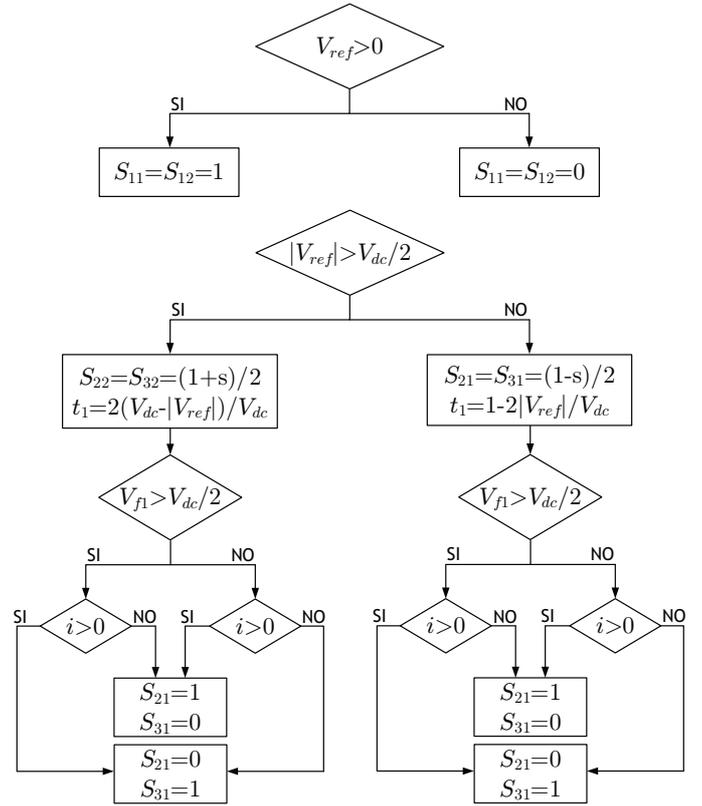


Fig. 3. Diagrama de flujo del modulador monofásico para el convertidor 5L-ANPC con control de la tensión del condensador flotante.

conmutación del sistema. Esta reducción es debida al hecho de que S_1 es la señal de la puerta de ocho semiconductores, mientras que S_2 y S_3 comandan el estado de una pareja de ellos respectivamente.

V. RESULTADOS DEL MODULADOR PARA EL CONVERTIDOR MONOFÁSICO 5L-ANPC

El modulador propuesto se ha aplicado a la topología 5L-ANPC donde los condensadores del dc-link C_1 y C_2 son iguales a 7 mF, el condensador flotante C_{fa} es igual a 2 mF y la tensión total del dc-link $2V_{dc}$ es igual a 3000 voltios y se mantiene constante gracias a una fuente de tensión. El condensador flotante está inicialmente descargado y su tensión deseada es igual a 750 voltios. El convertidor 5L-ANPC está conectado a una carga resistiva-inductiva formada por la conexión en serie de $R=10\Omega$ y $L=3\text{mH}$. La tensión de referencia V_{ref} es una tensión sinusoidal pura con una amplitud igual a 1500 voltios. La frecuencia de muestreo f_s del modulador es igual a 800 Hz.

El diagrama de flujo representado en la figura 3 ha sido aplicado al convertidor 5L-ANPC monofásico y los resultados obtenidos son representados en la figura 4 donde están presentes la tensión de fase v_a , la corriente de fase i_a , la tensión del condensador flotante V_{fa} y la mitad de la tensión del dc-link V_{C1} . Imágenes detalladas de la tensión y la corriente de fase, la tensión del condensador flotante y la tensión de uno de los condensadores del dc-link en condiciones de régimen

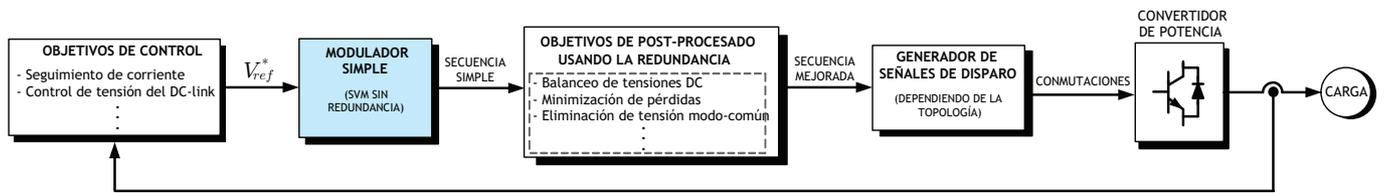


Fig. 2. Diagrama general de control de un convertidor de potencia incluyendo el controlador, el modulador y los controladores adicionales para la obtención de los objetivos de control auxiliares

permanente se muestran en la figura 5. Se puede observar que la tensión del condensador flotante alcanza su valor deseado, mientras que la tensión y corriente de fase presentan baja distorsión. La frecuencia de conmutación de semiconductores de potencia comandados por S_1 es de 50Hz mientras que el promedio de la frecuencia de conmutación de aquellos comandados por S_2 y S_3 es aproximadamente 675Hz.

Como se puede observar en la figura 4 y la figura 5, las tensiones de los condensadores del dc-link se equilibran de forma natural porque la tensión del condensador C_1 (V_{C1}) toma un valor aproximado de 1500 voltios (la mitad de la tensión del dc-link). Este fenómeno puede explicarse teniendo en cuenta el experimento que se muestra en la figura 6 y la figura 7. En este nuevo experimento, el convertidor de potencia inicia su operación con una situación de desequilibrio en el dc-link (V_{C1} y V_{C2} son iguales a 1000 y 2000 voltios respectivamente). La tensión del condensador flotante V_{fa} es de 750 voltios que es la tensión deseada. En este caso, los condensadores del dc-link C_1 y C_2 son iguales a 2 mF y el condensador flotante C_{fa} es igual a 1 mF. La carga RL es $R=10\Omega$ y $L=35mH$. En la figura 6, se puede observar que el desequilibrio en las tensiones del dc-link disminuye alcanzando el punto de operación deseado donde ambas tensiones de los condensadores del dc-link son iguales a 1500 voltios. Un detalle de las formas de onda de este experimento se muestra en la figura 7. Las variables S_1 y S_2 se incluyen en esta gráfica ya que afectan directamente a las tensiones del dc-link V_{C1} y V_{C2} .

Las tensiones de los condensadores del dc-link se equilibran de forma natural porque el desequilibrio de tensiones crea un offset en la tensión de fase cuando se aplica el modulador propuesto. Como se puede observar en la parte ampliada de la figura 7, el nivel de tensión cero no se genera cuando el dc-link no está equilibrado. Este hecho genera un offset en la corriente de fase que afecta directamente a las tensiones de los condensadores del dc-link como se introdujo en la tabla I. De esta manera, si la tensión del dc-link V_{C1} es inferior a 1500 voltios, un offset positivo aparece en la tensión y en la corriente de fase. Esto, en promedio, tiende a aumentar la tensión del condensador C_1 reduciendo con ello el desequilibrio de la tensión del dc-link.

VI. CONCLUSIONES

El convertidor active-neutral-point-clamped (ANPC) está centrando cada vez más atención por parte de la industria y la academia. En este artículo, se ha estudiado una topología híbrida de cinco niveles, llamada 5L-ANPC, formada por la

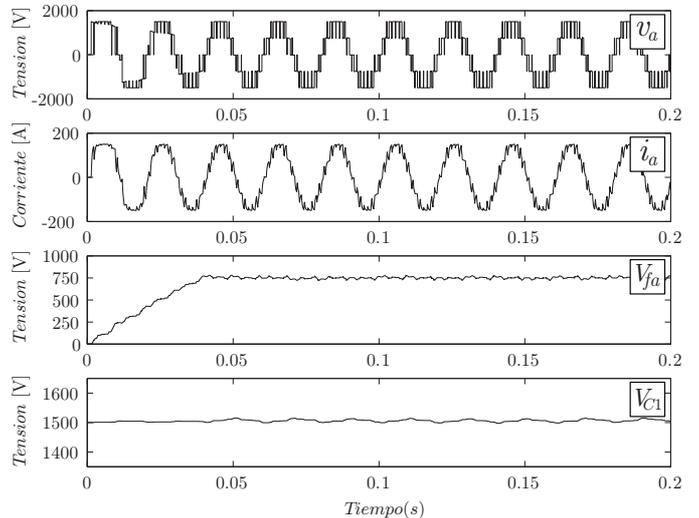


Fig. 4. Resultados de la técnica de modulación propuesta aplicada al convertidor monofásico 5L-ANPC. De arriba a abajo: Tensión de fase, corriente de fase, tensión del condensador flotante y tensión de la parte superior del dc-link.

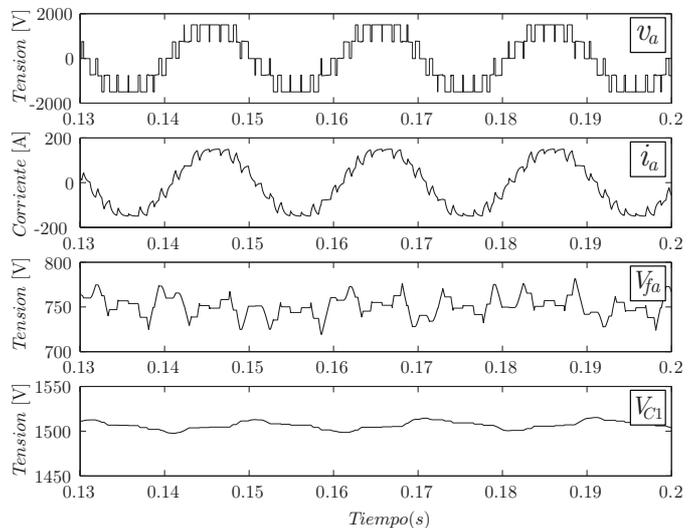


Fig. 5. Detalle de los resultados de la técnica de modulación propuesta aplicada al convertidor monofásico 5L-ANPC. De arriba a abajo: Tensión de fase, corriente de fase, tensión del condensador flotante y tensión de la parte superior del dc-link..

conexión en serie de un convertidor ANPC de tres niveles con una celda de condensador flotante. El objetivo de este trabajo

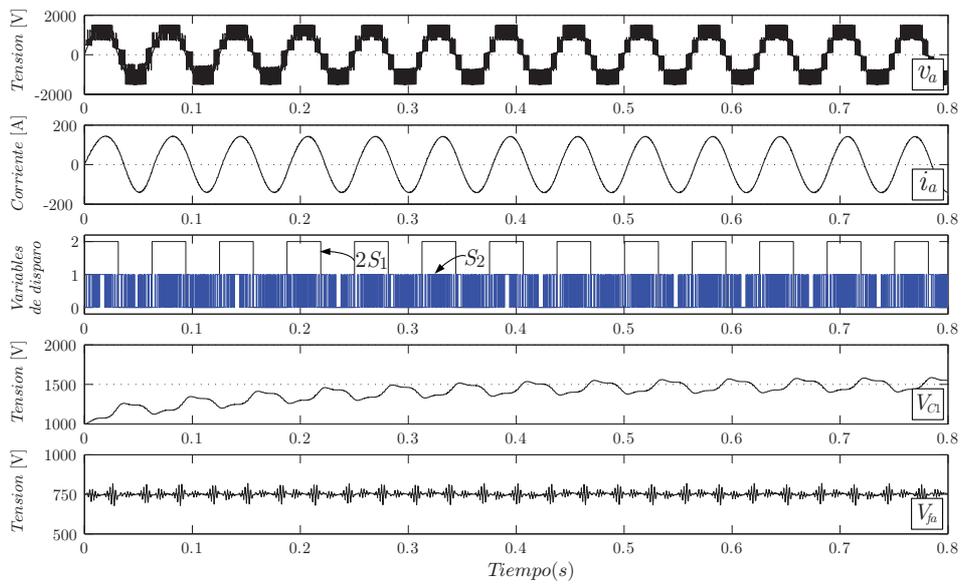


Fig. 6. Resultados de la técnica de modulación propuesta aplicada al convertidor monofásico 5L-ANPC comenzando a partir de una situación de desequilibrio en el dc-link. De arriba a abajo: Tensión de fase, corriente de fase, variables S_1 y S_2 , mitad superior de la tensión del dc-link V_{C1} y tensión del condensador flotante.

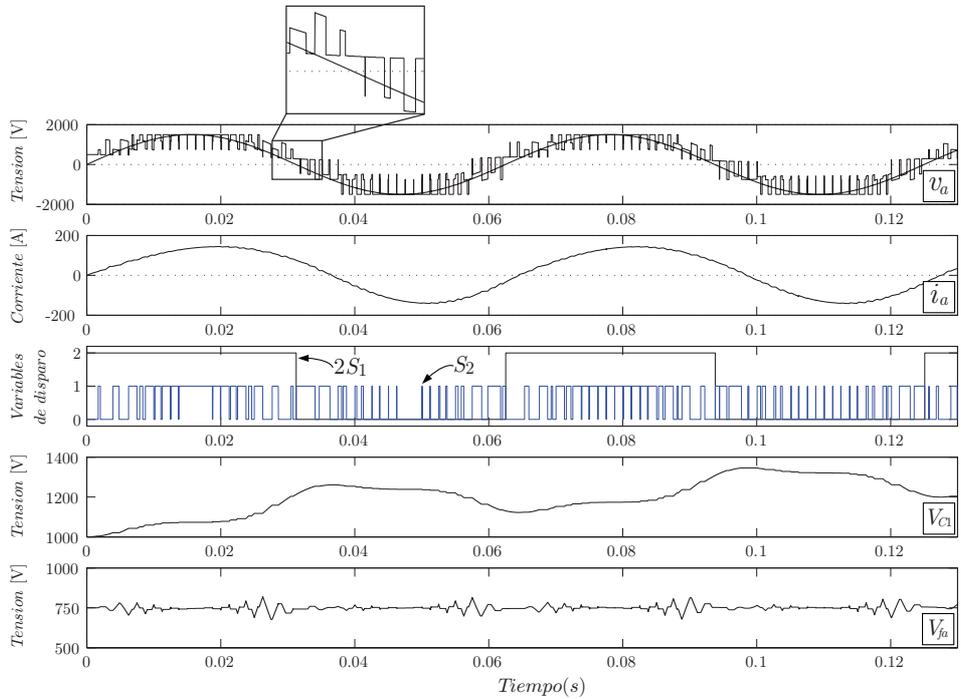


Fig. 7. Detalle de los resultados de la técnica de modulación propuesta aplicada al convertidor monofásico 5L-ANPC comenzando a partir de una situación de desequilibrio en el dc-link. De arriba a abajo: Tensión de fase, corriente de fase, variables S_1 y S_2 , mitad superior de la tensión del dc-link V_{C1} y tensión del condensador flotante.

es presentar una técnica de modulación simple para obtener unas formas de onda de salida con baja distorsión y con control del equilibrio de tensiones del condensador flotante y los condensadores del dc-link. El método de modulación propuesto se basa en un sencillo modulador monofásico introducido previamente para ser aplicado a otras topologías de convertidores multinivel. Se añaden a esta técnica de modulación cálculos

auxiliares para lograr el control de la tensión del condensador flotante y las tensiones del dc-link. La técnica de modulación resultante tiene muy bajo coste computacional incluyendo sólo ecuaciones simples y comparaciones.

La aplicación de la estrategia de modulación propuesta al convertidor 5L-ANPC monofásico consigue obtener el control de la tensión del condensador flotante a su valor deseado,

que es del 25% de la tensión total del dc-link, con el fin de para generar los cinco posibles niveles de tensión de la topología distribuidos de forma simétrica. Este control del equilibrio de tensión se logra mediante una adecuada selección de las señales de conmutación del convertidor teniendo en cuenta los valores reales de la tensión del condensador flotante y la corriente de fase. Además, las tensiones de los condensadores del dc-link se equilibran de forma natural por el efecto de compensación que presenta el modulador si aparece un desequilibrio de tensiones del dc-link. El método de modulación propuesto puede ser aplicado con muy baja frecuencia de conmutación. En los experimentos presentados, la frecuencia de muestreo del modulador es 800Hz con una frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia de 675Hz aproximadamente (excepto los comandados por S_1 que presentan frecuencia de conmutación fundamental).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran mostrar su agradecimiento a los proyectos PR2010-0162, Fondecyt 1110783 y CCTVal (N°FB0821).

REFERENCES

- [1] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez and J. I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
- [2] J. Rodriguez, L. G. Franquelo, S. Kouro, J. I. Leon, R. Portillo, M. M. Prats and M. A. Perez, "Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1786–1817, Nov. 2009.
- [3] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo and M. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, Jun. 2008.
- [4] T. Bruckner, S. Bernet, and H. Guldner, "The active NPC converter and its loss-balancing control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 855–868, June 2005.
- [5] ABB, "New inverter modules for optimum performance," [Online]. Available: <http://www.abb.com>.
- [6] S. Busquets-Monge and J. Nicolas-Apruzzese, "An m-level active-clamped converter topology - Operating principle," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 3211–3217, 4–7 July 2010, Bari (Italy).
- [7] P. Barbosa, P. Steimer, J. Steinke, M. Winkelkemper and N. Celanovic, "Active-neutral-point-clamped (ANPC) multilevel converter technology," in *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'05)*, pp. 1–10, 11–14 Sept. 2005, Dresden (Germany).
- [8] M. Winkelkemper, F. Wildner and P. K. Steimer, "6 MVA five-level hybrid converter for windpower," in *39th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'08)*, pp. 4532–4538, 15–19 June 2008, Rhodes (Greece).
- [9] F. Kieferndorf, M. Basler, L. A. Serpa, J.-H. Fabian, A. Coccia, and G. A. Scheuer, "A new medium voltage drive system based on ANPC-5L technology," in *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2010)*, pp. 643–649, March 2010, Valparaiso (Chile).
- [10] S. R. Pulikanti, S. G. Konstantinou and V. G. Agelidis, "An n-level flying capacitor based active neutral-point-clamped converter," in *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 553–558, 16–18 June 2010, Hefei (China).
- [11] S. R. Pulikanti and V. G. Agelidis, "Five-level active NPC converter topology: SHE-PWM control and operation principles," in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp.1–5, 9–12 Dec. 2007, Perth (Australia).
- [12] S. R. Pulikanti and V. G. Agelidis, "Control of neutral point and flying capacitor voltages in five-level SHE-PWM controlled ANPC converter," in *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 172–177, 25–27 May 2009, Xi'an (China).
- [13] J. Meili, S. Ponnaluri, L. Serpa, P. K. Steimer and J. W. Kolar, "Optimized Pulse Patterns for the 5-Level ANPC Converter for High Speed High Power Applications," in *IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics (IECON)*, pp. 2587–2592, 6–10 Nov. 2006, Paris (France).
- [14] Jun Li, Yu Liu, S. Bhattacharya and A. Q. Huang, "An optimum PWM Strategy for 5-level active NPC (ANPC) converter based on real-time solution for THD minimization," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1976–1982, 20–24 Sept. 2009, San Jose (EEUU).
- [15] J. I. Leon, R. Portillo, S. Vazquez, J. J. Padilla, L. G. Franquelo and J. M. Carrasco, "Simple Unified Approach to Develop a Time Domain Modulation Strategy for Single-Phase Multilevel Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 9, pp. 3239–3248, Sept. 2008.
- [16] J. I. Leon, S. Vazquez, J. A. Sanchez, R. Portillo, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco and E. Dominguez, "Conventional Space-Vector Modulation Techniques Versus the Single-Phase Modulator for Multilevel Converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp. 2473–2482, July 2010.