

Control en lazo cerrado de un Inversor Multinivel Alimentado en Corriente

Juan Luís Ramírez Mata

Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico y A. García Cubas S/N AP 57, CP 38010, Celaya, Gto.

Teléfono: 01 (461) 611 75 75

juma_3161@hotmail.com

Héctor Juan Carlos López Tapia

Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico y A. García Cubas S/N AP 57, CP 38010, Celaya, Gto.

Teléfono: 01 (461) 611 75 75

hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Nimrod Vázquez Nava

Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico y A. García Cubas S/N AP 57, CP 38010, Celaya, Gto.

Teléfono: 01 (461) 611 75 75

n.vazquez@ieee.org

Resumen

Los inversores tiene como finalidad la conversión de energía eléctrica de tipo directa a una de tipo alterna, donde la capacidad del manejo de potencia en topologías tradicionales se ve limitada por la capacidad de los dispositivos de conmutación empleados, las topologías de inversores multinivel pueden manejar mayor potencia ya que su principal ventaja es que dividen los esfuerzos de tensión y corriente de los dispositivos de conmutación, además de que a mayor cantidad de niveles los requerimientos de filtrado para la salida se ven reducidos. Por ello aún son interés de estudio enfocado en: variantes a las estructuras básicas y nuevas técnicas de modulación o esquemas de control [1-2]. Existen dos tipos de alimentación para las topologías multinivel: alimentados en tensión o voltaje y alimentados en corriente. Dentro de las estructuras básicas alimentadas en voltaje se encuentran: diodo fijador, capacitor flotado y cascada [3]. Mientras que dentro de las topologías multinivel alimentadas en corriente

se tienen: multi-celdas, o etapas con entrada elevadora. En este artículo se describen brevemente algunas topologías de inversor multinivel alimentado en corriente y su técnica de modulación, posteriormente se describe con mayor profundidad el funcionamiento de una topología en particular así como la descripción del control empleado para la regulación de la corriente de salida.

Palabras claves: Topología, Inversor multinivel, corriente, modulación.

1. Introducción

El concepto del inversor multinivel consiste en un convertidor que tiene acceso a diferentes niveles de tensión o de corriente según sea el caso de la entrada con la que se trabaje, la Fig. 1 muestra la estructura general del inversor multinivel alimentado en voltaje [4].

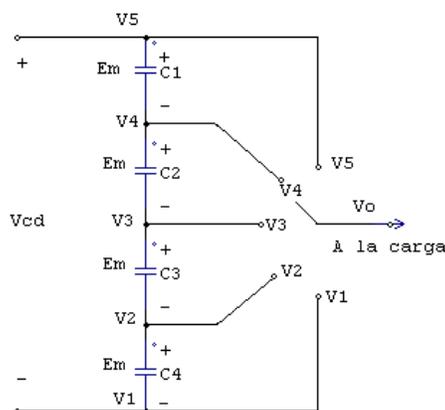


Fig. 1. Esquema de un polo de inversor multinivel por un interruptor alimentado en voltaje.

Por la forma en que se dividen los esfuerzos en tensión o corriente de los dispositivos conmutadores, permite manejar altas potencias con pocas armónicas [5]. A mayor número de niveles de tensión disminuye la distorsión armónica de la onda de salida. La forma más general de entender los convertidores CD/CA multinivel es considerarlo como un seleccionador, en la Fig. 2 se muestra la estructura general de un inversor multinivel alimentado en corriente.

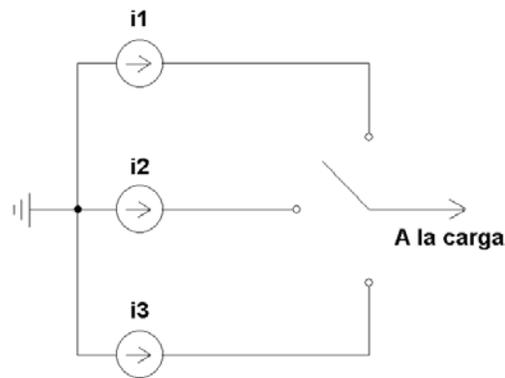


Fig. 2. Esquema de un polo de inversor multinivel por un interruptor alimentado en corriente.

La señal alterna de salida se obtiene a partir de diferentes niveles de continua a la entrada. Siendo esta la diferencia básica respecto a un convertidor CD-CA convencional, donde el voltaje de continua de entrada presenta un único nivel más el cero. El convertidor multinivel sintetiza una señal senoidal a partir de varios niveles de voltaje o corriente directa, los cuales se obtienen a través de fuentes de CD, la Fig. 3 muestra la forma de onda de salida de un inversor multinivel formada por escalones.

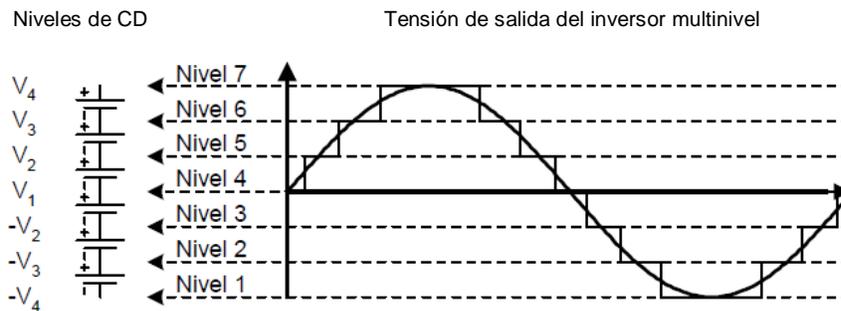


Fig. 3. Tensión de salida de un inversor multinivel.

1.2 Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes (FCMLI) [6]

Este tipo de inversor multinivel utiliza una estructura escalonada de capacitores, en donde la salida puede expresarse como las posibles combinaciones de conexión de los capacitores de los que se compone, utiliza capacitores para establecer los niveles de

tensión. Esta topología introduce más estados de conmutación que pueden ser usados para mantener balanceada el voltaje de los capacitores. En la estructura de un inversor multinivel monofásico de cinco niveles, ver Fig. 4. Se observa que no necesita de diodos extra para proporcionar los niveles de voltaje.

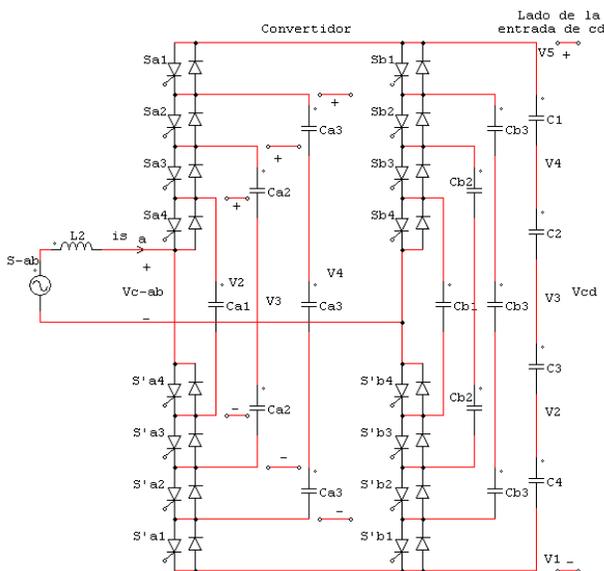


Fig. 4. Inversor multinivel de cinco niveles FCMLI.

Las principales características del FCMLI son las siguientes:

- Conforme aumenta el número de niveles se requiere de más capacitores.
- El esfuerzo en tensión de los dispositivos disminuye conforme aumenta el número de niveles.
- Proporciona redundancia de estados para la generación de ciertos niveles, permitiendo flexibilidad para mantener la carga en los capacitores.
- El arranque es más complejo que en el inversor multinivel diodo fijador.
- Maneja potencia activa y reactiva.

1.3 Inversor Multinivel en Cascada (CMLI) [7]

Este tipo de inversor consiste en una serie de unidades inversoras de puente completo, ver Fig. 5, y tiene como objetivo sintetizar la tensión deseada a partir de la suma de varios niveles de tensiones de CD que pueden ser obtenidos de baterías, celdas solares, o

cualquier otro tipo de fuente de CD que sean independientes, es por ello que es muy recomendable el uso de esta estructura en sistemas de energía renovable, en vehículos eléctricos, en variadores de velocidad y en fuentes de CA.

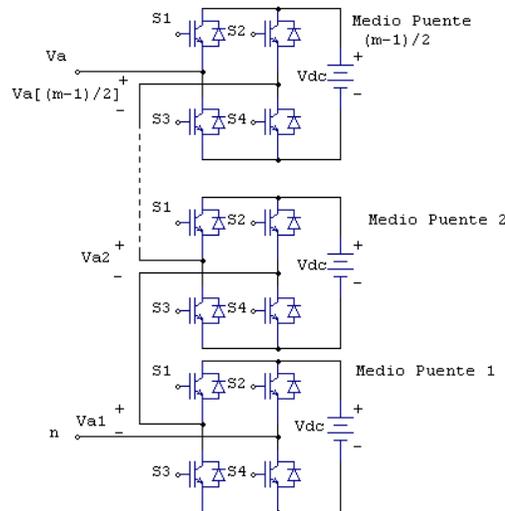


Fig. 5. Inversor multinivel monofásico en cascada.

El inversor en cascada no requiere de diodos fijadores o de capacitores de balanceo de tensión. Sus principales características son:

- Gran flexibilidad para poder incrementar el número de niveles, solo se necesita agregar inversores sin tener que rediseñar la etapa de potencia.
- La tensión de fase es la suma de las tensiones de salida de los inversores puente completo individuales.
- Maneja potencia activa y reactiva.

Las topologías multinivel son muy estudiadas, se proponen variantes a las estructuras básicas y se estudian nuevas técnicas de modulación o esquemas de control [8]. La principal área de investigación en las topologías de diodos fijadores y de capacitores flotantes es el balance de tensión de cada capacitor, mientras que para la topología de inversores en cascada el principal objetivo es reducir el número de fuentes de cd que necesita. Recientemente se ha encontrado en la literatura nuevos trabajos relacionados con la estructura multinivel con la capacidad de elevación de tensión, la cual ofrece

mejores características con respecto a las topologías convencionales. A continuación se muestra un breve resumen de cada uno de ellos.

1.4 Inversor Multinivel Elevador Alimentado en Corriente y sus Aplicaciones en Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados a la Red [9].

En [9] se presenta una topología de un inversor multinivel alimentado en corriente, como se muestra en la Fig. 6, para un sistema fotovoltaico monofásico, utilizando dos elevadores conectados en serie y que se pueden trabajar de manera serial o individual, posteriormente se lleva a cabo la etapa de inversión con un puente completo tradicional trabajando en baja frecuencia.

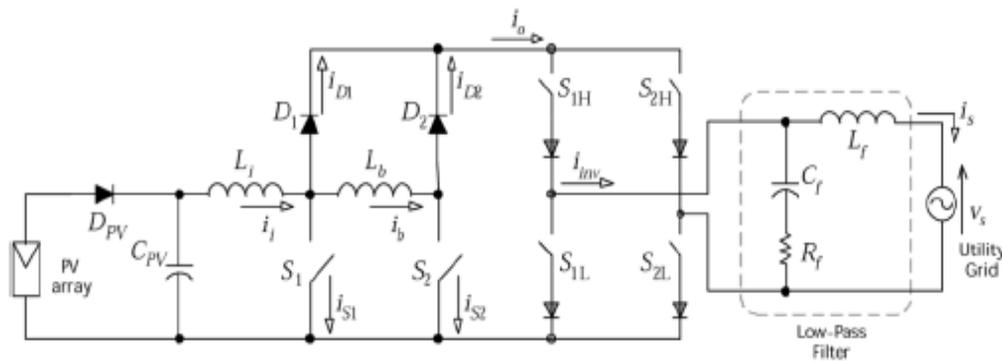


Fig. 6. Inversor elevador multinivel alimentado en corriente.

Cada uno de los inductores contribuye con un nivel de energía, mientras que en el momento de mayor energía son ambos inductores los que entregan corriente hacia la carga. Por otro lado los interruptores S1 y S2 son controlados mediante una técnica PWM senoidal como se muestra en la Fig. 7.

En este caso las señales para los interruptores S1 y S2 se obtienen directamente por la comparación entre la senoidal rectificada con la triangular portadora para un interruptor, y la misma senoidal rectificada con otra portadora con un desfase de 180° para el otro interruptor.

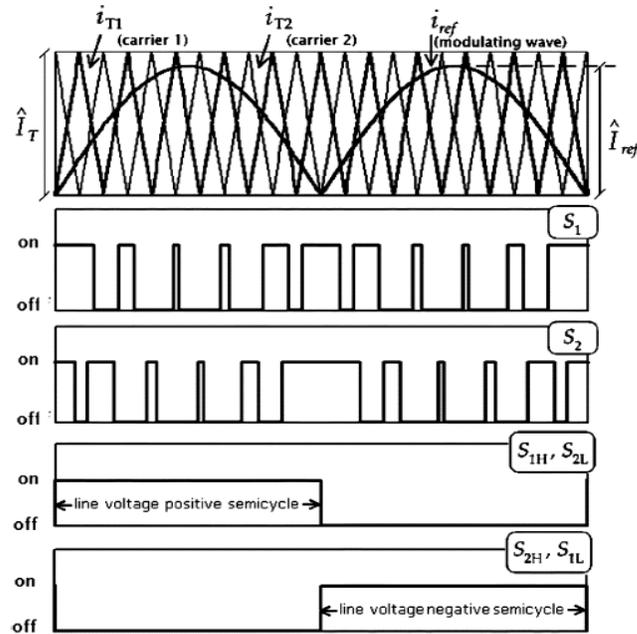


Fig. 7. Técnica de modulación para los interruptores S1 y S2.

2. Topología de inversor multinivel alimentado en corriente propuesto para la regulación de la corriente de salida.

La topología del inversor multinivel propuesta es la que se muestra en la Fig. 8, como se puede ver cuenta con dos fuentes de corriente independientes las cuales generan los en combinación dos niveles más el nivel de corriente cero. A continuación se detallan los modos de operación.

2.1 Modos de operación

El inversor es operado en 3 diferentes estados para asegurar una corriente de salida con una baja distorsión armónica. Para obtener los estados de operación se considera que ambas corrientes de entrada tienen la misma magnitud.

2.1.1 Nivel de corriente 0

En la Fig. 9 se aprecian el flujo de corriente para las dos maneras con las cuales se puede generar el nivel de corriente 0 a la salida.

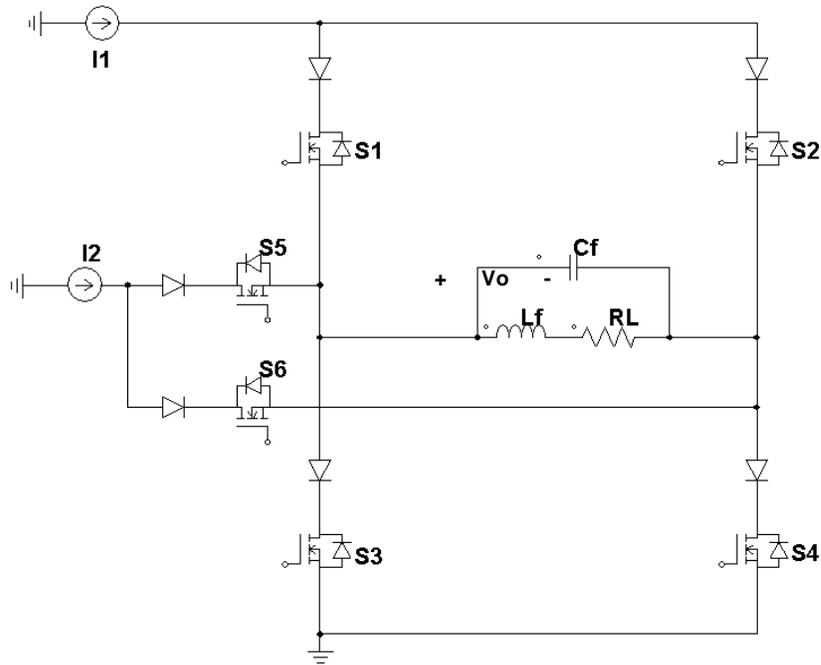


Fig. 8. Inversor multinivel alimentado en corriente.

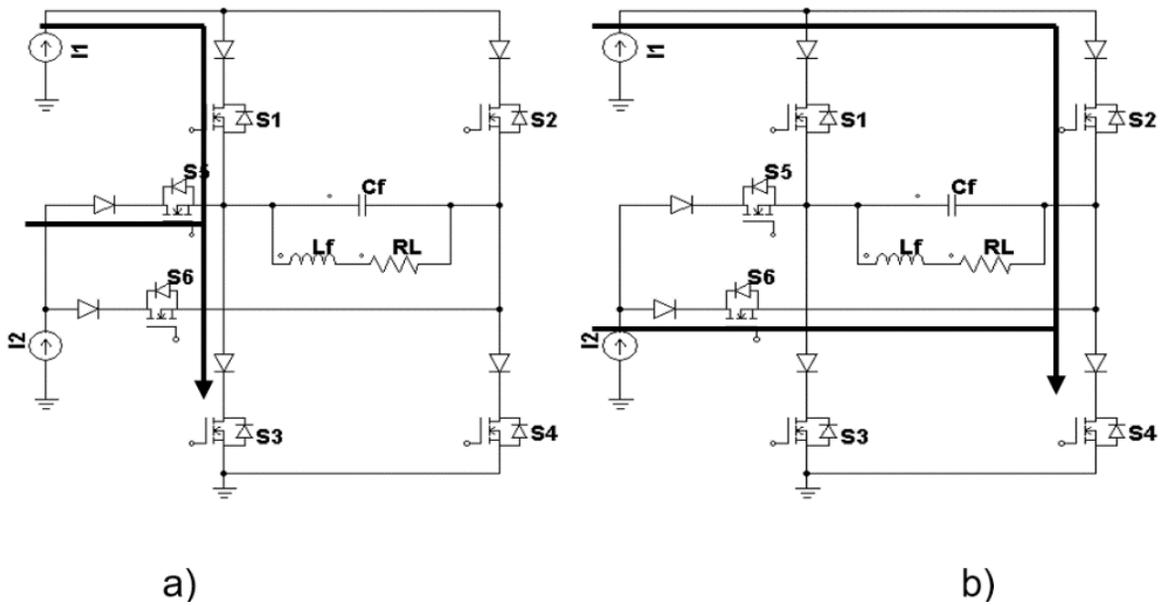


Fig. 9. Nivel de corriente 0 a) encendiendo los interruptores S1, S3 y S5, b) encendiendo los interruptores S2, S4 y S6.

2.1.2 Nivel de corriente I1 o I2 (semiciclo positivo)

Por otro lado, en la Fig. a) se aprecian el flujo para generar el nivel de corriente I1 y en la Fig. b) para genera el nivel I2.

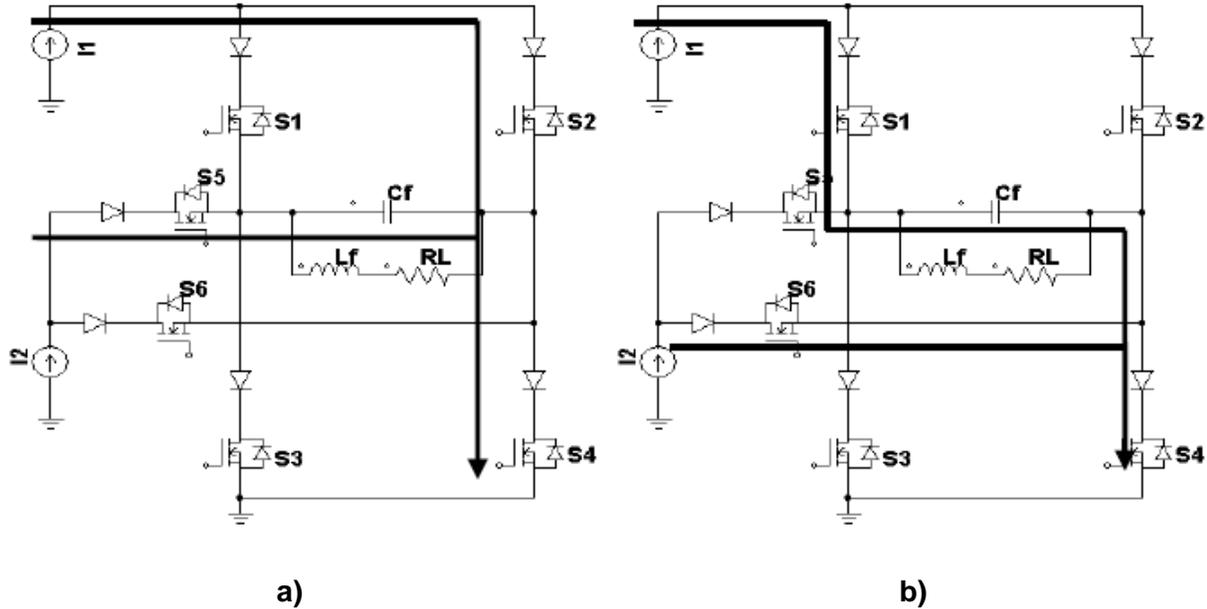


Fig. 10. Nivel de corriente con una sola fuente a) encendiendo S5, S4 y S2 entrega la fuente I2, b) encendiendo S2, S4 y S6 entrega la fuente I1.

2.1.3 Nivel de corriente L1+L2 (semiciclo positivo)

Para el nivel donde se suma la corriente de ambas fuentes solo se tiene una posibilidad la cual se muestra en la Fig. 11.

2.1.4 Nivel de corriente I1 o I2 (semiciclo negativo)

En la Fig. 12 a) se aprecia la entrega de la fuente I1 activando los interruptores S2, S5 y S3; por otro lado, en la Fig. 12 b) se entrega de corriente de parte de la fuente L2 es a través de los inductores S2 y S3.

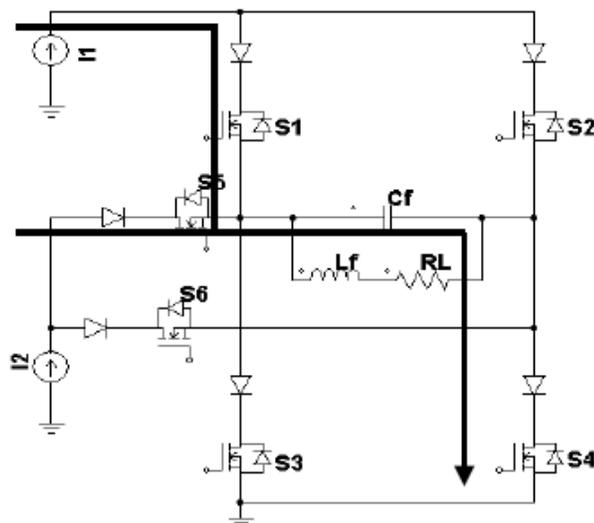


Fig. 11. Entrega de corriente a la línea de parte ambas fuentes en semiciclo positivo.

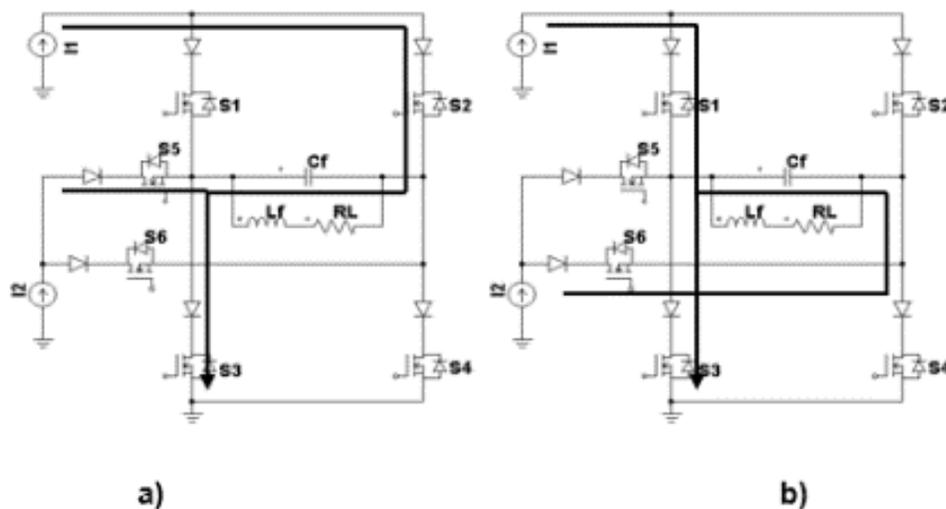


Fig. 12. Entrega de corriente de la fuente I1 a) encendiendo S2, S5 y S3 b) encendiendo S1, S3 y S5.

2.1.5 Nivel de corriente L1+L2 (semiciclo negativo)

En este modo de operación, tanto la fuente I1 e I2 se encuentran suministrando corriente a la línea, cabe destacar que para este caso sólo existe una combinación de interruptores;

para el semiciclo positivo, como se aprecia en la Fig. 13, la entrega se lleva a cabo mediante los interruptores S2, S6 y S3.

En la Fig. 14 se muestra una síntesis de los modos de operación del inversor propuesto y las opciones para el salto de niveles.

Basado en la Fig. 14 se obtienen la tabla 1 de las combinaciones óptimas en función de 7 condiciones.

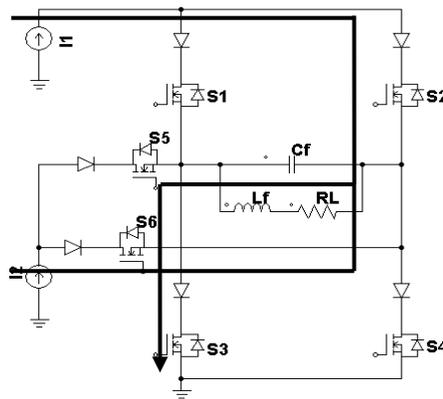


Fig. 13. Entrega de corriente por ambos inductores en el semiciclo negativo.

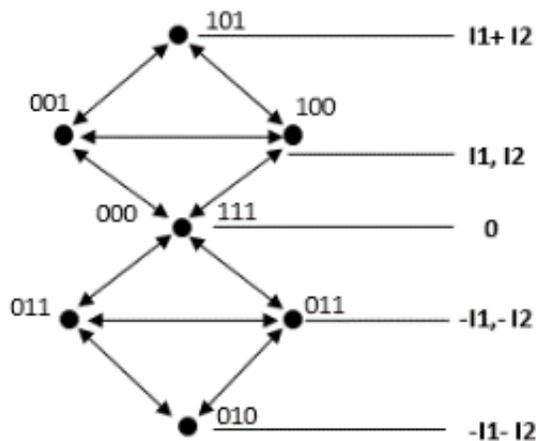


Fig. 14. síntesis de los modos de operación del inversor multinivel alimentado en corriente propuesto.

Tabla 1. Combinaciones óptimas el seguimiento de la señal senoidal de referencia tomando en cuenta 7 condiciones.

'0' Semiciclo positivo '1' semiciclo negativo	'0' I2>IREF2 '1' I2≤IREF2	'0' I1>IREF1 '1' I1≤IREF1	Diferencia entre Corrientes de entrada '0' I2>I1 '1' I2≤I1	Nivel de transición Origen - destino	IoREF>Io			IoREF≤Io		
					S1	S3	S5	S1	S3	S5
CICLO	I2>IREF2	I1>IREF1	BAL	NIVEL	S1	S3	S5	S1	S3	S5
0	0	0	0	0-I1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	I1-I12	1	0	1	0	0	1
0	0	0	1	0-I1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	I1-I12	1	0	1	1	0	0
0	0	1	0	0-I1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	I1-I12	1	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0-I1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	I1-I12	1	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0-I1	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	I1-I12	1	0	1	0	0	1
0	1	0	1	0-I1	0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	I1-I12	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0-I1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	I1-I12	1	0	1	0	0	1
0	1	1	1	0-I1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	I1-I12	1	0	1	1	0	0
1	0	0	0	I1-0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	I12-I1	0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	I1-0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	I12-I1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	0	I1-0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	I12-I1	0	1	0	0	1	1
1	0	1	1	I1-0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	1	I12-I1	0	1	0	0	1	1
1	1	0	0	I1-0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	I12-I1	0	1	0	1	0	0
1	1	0	1	I1-0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	1	I12-I1	0	1	0	1	1	0
1	1	1	0	I1-0	0	1	1	0	0	0
1	1	1	0	I12-I1	0	1	0	0	1	1
1	1	1	1	I1-0	0	1	1	0	0	0
1	1	1	1	I12-I1	0	1	0	0	1	1

3. Resultados experimentales

Al establecer las condiciones para las cuales se seleccionará alguno de los modos de operación del inversor multinivel alimentado en corriente se busca considerar la mayor

parte de los casos que se pudiesen presentar durante su operación para llevar a cabo un buen seguimiento de la señal de referencia ante cambios en la misma o en la carga. En la Fig. 15 se muestra la señal multinivel de la corriente de salida y la señal filtrada ante un cambio de frecuencia y amplitud de la referencia. Como se puede apreciar la señal de salida sigue a la referencia lo cual indica una buena respuesta del control.

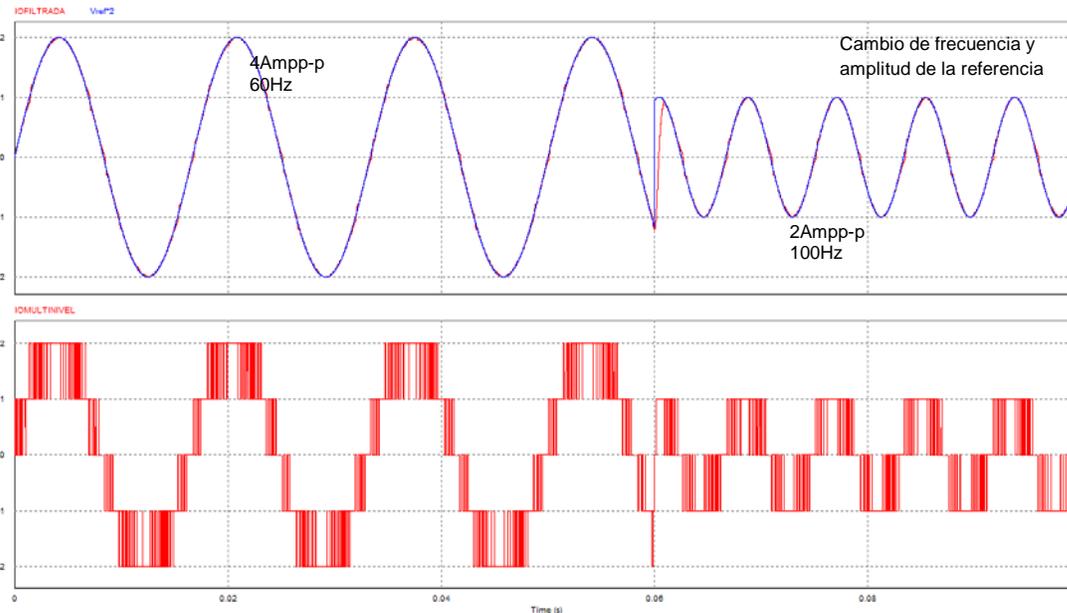


Fig. 15. señal multinivel y filtrada de la corriente de salida ante cambios de frecuencia y amplitud de la referencia.

La Fig. 16 muestra la respuesta del control ante un cambio en la carga de los 10Ω a los 7.14Ω , en la parte superior de la figura se aprecia la corriente mientras que en la inferior se parecía el voltaje, como se puede ver la corriente mantiene su amplitud constante mientras que el voltaje se ajusta para compensar el cambio de carga.

En la parte inferior de la Fig. 17 se aprecia la transformada el espectro de armónicos desde la frecuencia fundamental hasta los 10kHz como se ve los armónicos fuera de la componente fundamental se encuentran distribuidos alrededor de los 4kHz pero con una amplitud pequeña los cuales mediante la acción de filtrado quedan prácticamente eliminado y se muestran en la parte superior de la Fig. 17.

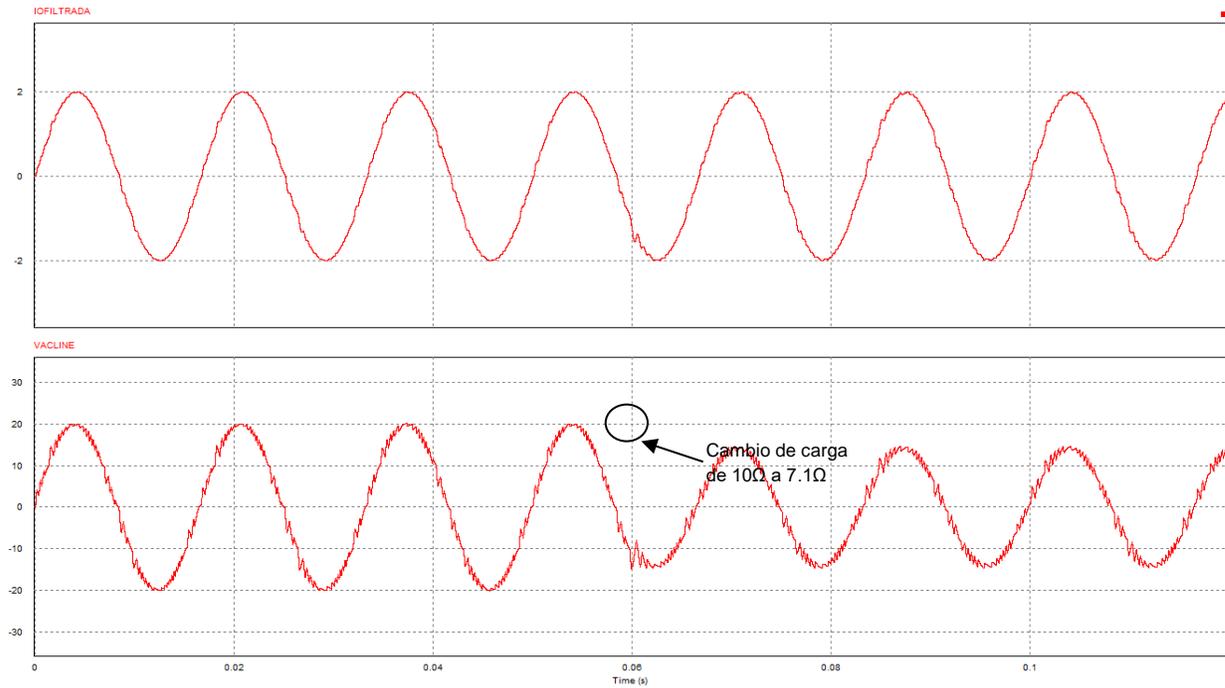


Fig. 16. respuesta dinámica del inversor multinivel alimentado en corriente ante un cambio en la carga.

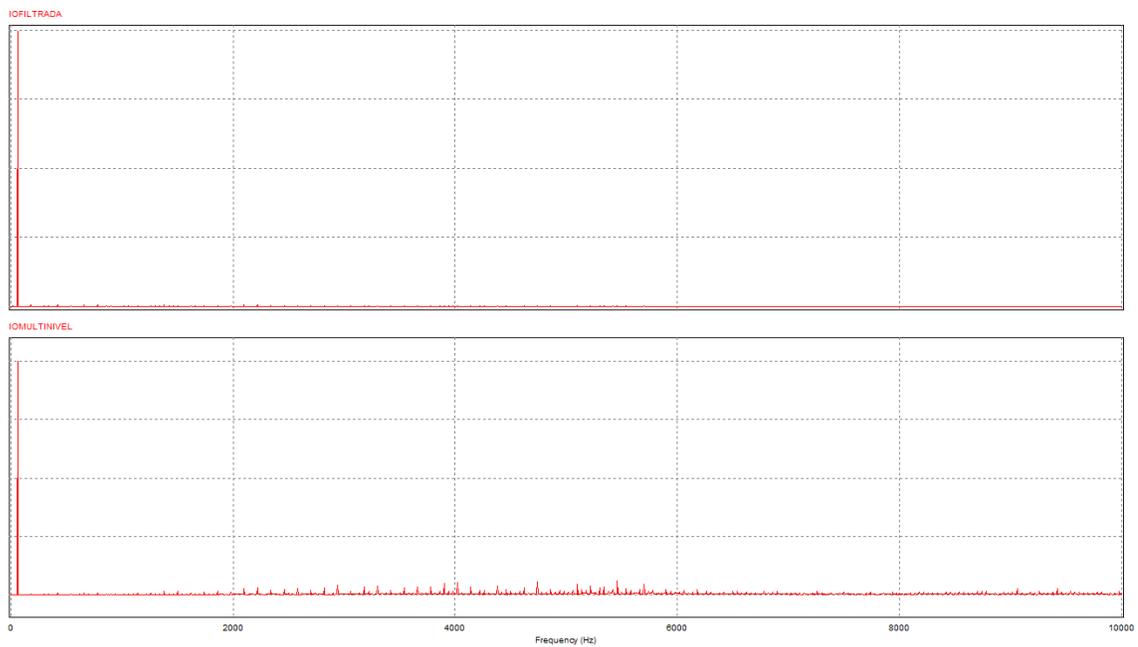


Fig. 17. espectro de Fourier de la señal de salida multinivel y filtrada del inversor propuesto.

Para tener una idea más clara sobre el contenido armónico de la señal de salida filtrada se muestra el contenido por armónicas en la tabla 2.

Tabla 2 componentes armónicas de la señal de salida filtrada del inversor propuesto.

ARMÓNICA	Valor	Porcentaje
FUNDAMENTAL	1.994	99.7%
2	0.000231	0.012%
3	0.00789	0.395%
4	0.000150	0.008%
5	0.00349	0.175%
6	0.000524	0.026%
7	0.00762	0.381%
8	0.000241	0.012%
9	0.00505	0.253%

4. Conclusión

Se ha empleado una estrategia de máquina de estados para la regulación de la corriente de salida de un inversor multinivel alimentado en corriente de 3 niveles y se realizaron pruebas de simulación de cambios de carga, frecuencia y amplitud ante las cuales en control responde de manera adecuada por lo que la técnica empleada funciona correctamente; aunque depende en su totalidad de considerar todos los casos posibles bajo los cuales puede operar el convertidor y puede ser algo extenso el establecer cuál es la mejor combinación a utilizar para cada caso, el contemplar la mayoría de los casos ayuda a mejorar la respuesta del sistema.

5. Referencias

- [1] Kouro, S.; Malinowski, M.; Gopakumar, K.; Pou, J.; Franquelo, L.G.; Bin Wu; Rodriguez, J.; Perez, M.A.; Leon, J.I.; "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 57. No. 8. pp. 2553-2580, 2010.
- [2] Muhammad H. Rashid; Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, tercera edición.

- [3] Mittal, N.; Singh, B.; Singh, S.P.; "Multilevel Inverters: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies," Power, Control and Embedded Systems (ICPCES) 2nd International Conference on, pp. 1-11, 2012.
- [4] Nilkar, M.; Babaei, E.; Sabahi, M.; "A New Single-Phase Cascade Multilevel Inverter Topology Using Four-Level Cells," Electrical Engineering (ICEE), 20th Iranian Conference on, pp. 348-353, 2012.
- [5] Panagis, P.; Stergiopoulos, F.; Marabeas, P.; Manias, S.; "Comparison of State of the Art Multilevel Inverters," Power Electronics Specialists Conference. PESC. IEEE, pp. 4296- 4301, 2008.
- [6] Koblre, P.; Pavelka, J.; "Analysis of Permissible State of Flying Capacitors Multilevel Inverter Switch," Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 14th International, pp. T3-42-T3-45, 2010.
- [7] Bahravar, S.; Babaei, E.; Hosseini, S.H.; "New Cascade Multilevel Inverter Topology with Reduced Variety of Magnitudes of DC Voltage Sources," Power Electronics (IICPE), IEEE 5th India International Conference on, pp. 1-6, 2012.
- [8] Keith Corzine, "Multilevel Converter" The Power Electronics Handbook, Universidad de Wisconsin-Milwaukee, Capítulo 6, 2002.
- [9] Barbosa, P.G, Braga, H.A.C. "Boost current multilevel inverter and its application on single-phase grid-connected photovoltaic systems", Transactions on Power Electronics, IEEE , Julio 2006.

6. Autores

Ing. Juan Luis Ramirez Mata obtuvo el título de Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica del Norte de Guanajuato en 2012, estudia actualmente la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

M.C. Héctor Juan Carlos López Tapia obtuvo el título de Ingeniero Electrónico y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente es docente en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Nimrod Vázquez Nava obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en 1994, los grados de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el CENIDET en 1997 y 2003 respectivamente, actualmente es Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya e Investigador nivel 1 en el SIN.