

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS SPWM MODIFICADAS PARA EL EQUILIBRIO DE POTENCIA EN UN CHB-MLI

EVALUATION OF MODIFIED SPWM TECHNIQUES FOR POWER BALANCING IN A CHB-MLI

Benjamín Chavarría Domínguez

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
d18ce092@cenidet.tecnm.mx

Jesús Aguayo Alquicira

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
jesus.aa@cenidet.tecnm.mx

Susana Estefany de León Aldaco

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
susana.da@cenidet.tecnm.mx

Fernando Chavarría Domínguez

Universidad Veracruzana / Campus Coatzacoalcos, México
fchavarría@uv.mx

Jesús Alfonso Medrano Hermosillo

Tecnológico Nacional de México / IT de Chihuahua, México
jesus.mh@chihuahua.tecnm.mx

Recepción: 22/noviembre/2022

Aceptación: 22/diciembre/2022

Resumen

Los CHB-MLI son un tipo de inversor formado por celdas de puentes H conectadas en cascada. Cada celda requiere un conjunto de pulsos para efectuar las conmutaciones de sus interruptores.

Las técnicas de modulación SPWM utilizadas para la generación de los pulsos presentan la desventaja de ordenar a ciertas celdas tiempos de conmutación de mayor duración, con respecto a otras celdas. Estas celdas procesan mayores cantidades de potencia y se encuentran más estresadas. La literatura reporta versiones modificadas de las técnicas SPWM con la capacidad de distribuir equitativamente la cantidad de potencia que cada celda debe procesar. Para lo cual, se reordena la posición de las señales portadoras que son comparadas con la señal moduladora.

Este trabajo presenta tres técnicas de modulación SPWM modificadas que son implementadas en un CHB-MLI de 7 niveles. Se analiza el comportamiento de cada técnica sobre la potencia procesada en las celdas del CHB-MLI.

Palabras Clave: Balance de potencia, inversores multinivel, SPWM.

Abstract

CHB-MLIs are a type of inverter made up of H-bridge cells connected in cascade. Each cell requires a set of pulses to effect the commutations of its switches.

The SPWM modulation techniques used to generate the pulses have the disadvantage of ordering longer switching times for certain cells than for other cells. These cells process higher amounts of power and are more stressed. The literature reports modified versions of SPWM techniques with the ability to equally distribute the amount of power that each cell must process. For which, the position of the carrier signals that are compared with the modulating signal is reordered.

This work presents three modified SPWM modulation techniques that are implemented in a 7-level CHB-MLI. The behavior of each technique on the processed power in the CHB-MLI cells is analyzed.

Keywords: *Power balancing, multilevel inverter, SPWM.*

1. Introducción

La electrónica de potencia es la rama de la ingeniería encargada del estudio y desarrollo de sistemas capaces de regular la corriente y la tensión en redes eléctricas de niveles significativos. Dentro de la electrónica de potencia existen cuatro grandes topologías encargadas de la conversión de corriente eléctrica entre su forma directa y su forma alterna. A continuación, se enlistan los nombres asignados a estas topologías y su tipo de conversión de corriente:

- Convertidor CD-CD.
- Inversor CD-CA.
- Rectificador CA-CD.
- Cicloconvertidor CA-CA.

Las cuatro topologías, independiente de su aplicación, hacen uso de dispositivos semiconductores en modo de conmutadores para llevar a cabo el proceso de conversión de corriente. La conmutación de estos dispositivos está sujeta diversas estrategias para obtener los resultados de conversión de corriente.

La figura 1 muestra el principio de funcionamiento del inversor de puente H. Esta topología consiste en cuatro interruptores denominados “Q1”, “Q2”, “Q3” y “Q4”; dichos elementos se encuentran conectados por uno de sus extremos a un bus de alimentación de CD denominado “ V_{CD} ”. Mientras que en el otro extremo de los interruptores se conecta una carga “R”. Esta configuración hace fluir la corriente de un bus de alimentación de CD en ambos sentidos. [Koshti, 2017].

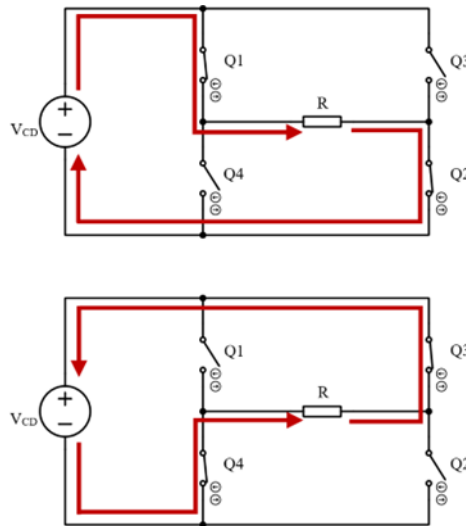


Figura 1 Principio de funcionamiento de un inversor de puente H.

Dentro de los inversores, existe una variante denominada inversor multinivel o CHB-MLI (del inglés: *Cascaded H-Bridge Multi-Level Inverter*), constituido por múltiples puentes H y fuentes de alimentación de CD. La conexión en cascada de los puentes H permite obtener a la salida dos terminales (“A” y “B”) para conectar la carga. Cada celda de puente H genera un estado positivo (corriente en flujo positivo) y un estado negativo (corriente en flujo negativo).

Los inversores multinivel poseen una gran cantidad de interruptores y por cada uno de ellos se requiere un pulso de conmutación adecuado; ya que de esto depende la

correcta conversión de corriente eléctrica. Por este motivo las técnicas de modulación encargadas de generar los pulsos de comando para los interruptores en el puente H son un tema ampliamente estudiado.

Una de las propuestas más comunes para la generación de estos pulsos de comando son las técnicas de modulación de múltiple portadora o SPWM (del inglés: *Sinusoidal Pulse Width Modulation*). Se trata de la comparación de una señal patrón (comúnmente una función senoidal denominada señal moduladora), con un grupo de señales a mayor frecuencia basadas en funciones triangulares (que el reciben el nombre de señales portadoras). Al comparar cada señal portadora con la señal moduladora se obtiene su respectivo pulso de comando, con varios de ángulos de disparo por ciclo. Los ángulos de disparo son el momento de cambio del estado lógico "0" al estado lógico "1" [Kumar, 2018].

Sin embargo, la técnica de modulación SPWM convencional presenta la desventaja de generar pulsos de comando con diferentes tiempos de conmutación netos entre cada una de las celdas del puente H. Esto propicia que las celdas con conmutaciones más prolongadas (en estado lógico "1") tarden más tiempo conduciendo energía eléctrica, en comparación con las otras celdas, figura 2. Esta situación propicia un desgaste prematuro de las celdas con los tiempos de conmutación más prolongados debido al estrés alcanzado [Nimmi, 2018].

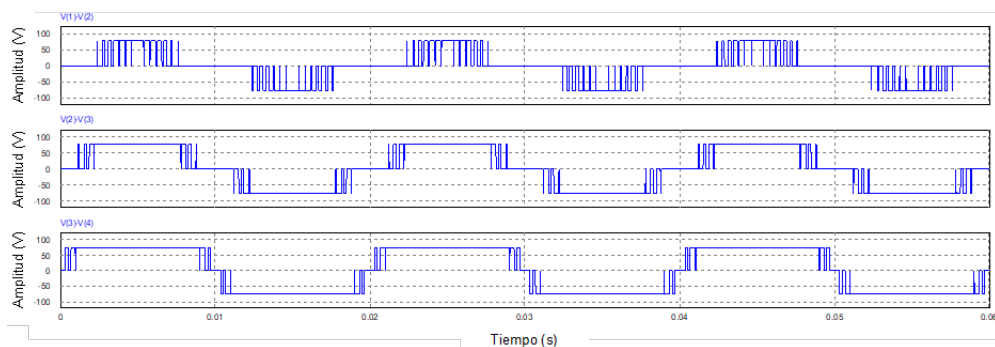


Figura 2 Lecturas de tensión diferencial para cada celda de CHB-MLI de 7 niveles.

Técnicas de modulación SPWM para balance de energía entre celdas

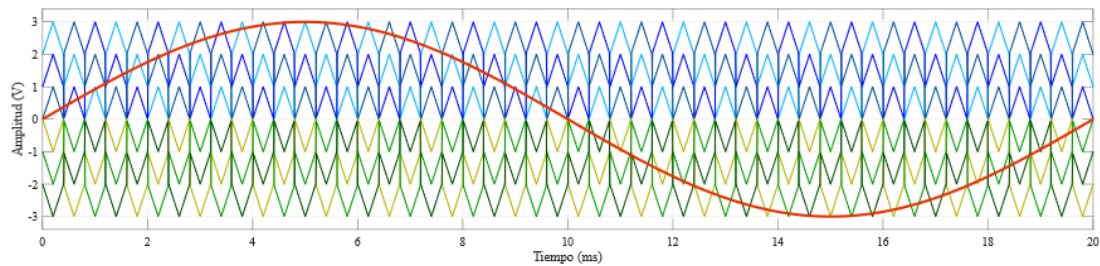
Una alternativa para mitigar el inconveniente de la técnica de modulación SPWM convencional consiste en emplear versiones modificadas. A continuación, se

presenta una revisión de artículos donde se proponen diferentes métodos basados en técnicas de modulación SPWM modificadas, para atacar el problema de los diferentes tiempos de conmutación netos entre las celdas del CHB-MLI.

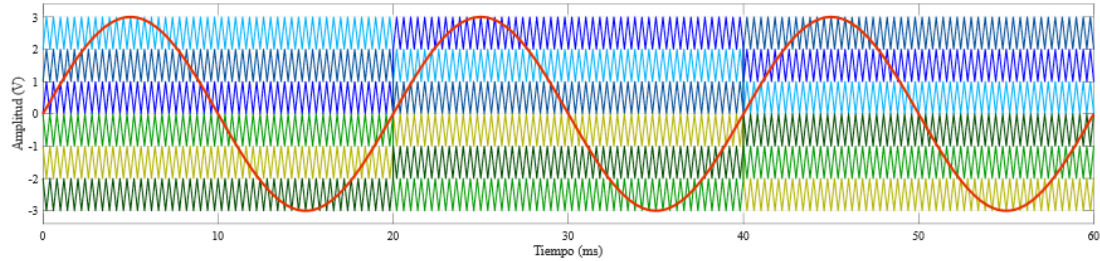
Tabla 1 Revisión de trabajos enfocados a técnicas de modulación SPWM modificadas.

Núm.	Título	Año	Revista / Conferencia	- Hardware - Interruptor	-Topología - Modulación
1	<i>Power balance modulation strategy for hybrid cascaded H-bridge multi-level inverter</i> [Gong, 2022]	2022	<i>Springer: Electrical Engineering</i>	- FPGA - IGBT	- Multinivel puente H - SPWM modificada
2	<i>A new modulation strategy and power balance method of unsymmetrical CHB inverter</i> [Gong, 2021]	2021	<i>Wiley: IET Renewable Power Generation</i>	- FPGA EP4CE6F17C8N - No conocido	- Multinivel puente H - SPWM modificada
3	<i>Performance Analysis of A New Carrier Rotation Method for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter</i> [Singh, 2020]	2020	<i>IEEE: STPEC 2020</i>	- Simulación - Simulación	- Multinivel puente H - SPWM modificada
4	<i>Research on Power-Balance Control Strategy of CHB Multilevel Inverter Based on TPWM</i> [Ye, 2019]	2019	<i>IEEE: Access</i>	- FPGA y DSP, TX-KP101 - IGBT IXGH12N60BD1	- Multinivel puente H - SPWM modificada
5	<i>Carrier rotation schemes for equal device conduction periods in Cascaded H-bridge Multilevel Inverter</i> [Nimmi, 2018]	2018	<i>IEEE: ICPEEIC 2018</i>	- Simulación - Simulación	- Multinivel puente H - SPWM modificada
6	<i>An Improved Modulation Strategy Combining Phase Shifted PWM and Phase Disposition PWM for Cascaded H-Bridge Inverters</i> [Xiao, 2017]	2017	<i>MDPI: Energies</i>	- DSP TMS320F2812 y FPGA EPF10K20T - IGBT 2MBI100VA	- Multinivel puente H - SPWM modificada - PS-PWM
7	<i>Hardware implementation of carrier rotation strategy for Cascaded H-bridge multilevel inverters</i> [Rao, 2017b]	2017	<i>IEEE: ICCCA 2017</i>	- dSPACE DS1104 - IGBT	- Multinivel puente H - SPWM modificada
8	<i>Evaluating the capacity of power and energy balance for cascaded H-bridge multilevel inverter using different PWM techniques</i> [Gadalla, 2017]	2017	<i>Wiley: The Journal of Engineering</i>	- Simulación - Simulación	- Multinivel puente H - SPWM tipo PD y PS-PWM
9	<i>Carrier Rotation Strategies for Equal Power Distributions in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters</i> [Rao, 2017a]	2017	<i>De Gruyter: International Journal of Emerging Electric Power Systems</i>	- dSPACE DS1104 - IGBT	- Multinivel puente H - SPWM modificada
10	<i>New active capacitor voltage balancing method for five-level stacked multicell converter</i> [Sadigh, 2016]	2016	<i>IEEE: APEC 2016</i>	- Simulación - Simulación	- Multinivel de capacitor flotado - SPWM
11	<i>Carrier based PWM for even power distribution in cascaded H-bridge multilevel inverters within single cycle</i> [Gupta, 2016]	2016	<i>IEEE: 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society</i>	- dsPace DS1103 - MOSFET IRF460	- Multinivel puente H - SPWM modificada
12	<i>Performance evaluation of carrier rotation strategy in level-shifted pulse-width modulation technique</i> [Sreenivasarao, 2014]	2014	<i>Wiley: IET Power Electronics (Volume: 7, Issue: 3, March 2014)</i>	- No conocido - IGBT	- Multinivel puente H - SPWM modificada, PS-PWM
13	<i>Modified hybrid multi-carrier PWM technique for cascaded H-Bridge multilevel inverter</i> [Sarkar, 2014]	2014	<i>IEEE: IECON 2014</i>	- Simulación - Simulación	- Multinivel puente H - SPWM modificada, PS-PWM
14	<i>Energy-Balance Control of PV Cascaded Multilevel Grid-Connected Inverters Under Level-Shifted and Phase-Shifted PWMs</i> [Chavarria, 2013]	2013	<i>IEEE: IEEE Transactions on Industrial Electronics</i>	- FPGA Spartan 3 - MOSFET IRFP240, Driver IR21084	- Multinivel puente H - PS-PWM y SPWM modificada

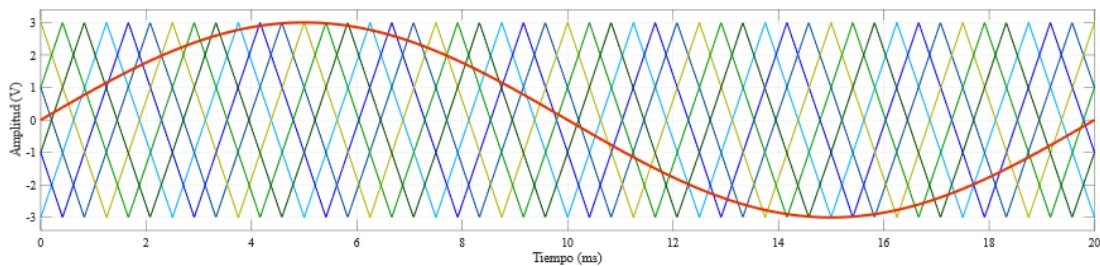
En la técnica PWM Rotativo (Figura 3a) todas las portadoras comienzan a variar su desplazamiento en nivel una vez terminan uno de sus propios ciclos, esto permite intercalar sus posiciones. Una determinada señal portadora es comparada con la señal moduladora en diferentes niveles. La técnica PWM Distribuido (Figura 3b) posee similitud con la técnica PWM Rotativo. Sin embargo, en este caso las señales portadoras efectúan la variación de nivel cada vez que se finaliza un ciclo de la señal portadora. En la modulación PS-PWM (Figura 3c) las señales portadoras tienen la misma amplitud que la señal moduladora y están desplazadas en fase según una determinada cantidad de grados, la separación de las portadoras es la misma.



a) Técnica de modulación PWM Rotativo para un CHB-MLI de 7 niveles.



b) Técnica de modulación PWM Distribuido para un CHB-MLI de 7 niveles.



c) Técnica de modulación PWM Rotativo para un CHB-MLI de 7 niveles.

Figura 3 Técnicas de modulación del tipo SPWM modificadas para balance de energía.

Las técnicas SPWM modificadas fueron implementadas en un CHB-MLI de 7 niveles prototipo. Esta etapa del trabajo se presenta en la siguiente sección.

2. Métodos

A continuación, se describe la implementación en el CHB-MLI prototipo de las pruebas de laboratorio para las técnicas de modulación SPWM modificadas y SPWM convencional. Las señales que conforman a las modulaciones estudiadas y que generan los pulsos de comando para el CHB-MLI fueron elegidas dentro de los rangos de valores empleados en trabajos previos, presentes en la tabla 1. Las frecuencias de 50 Hz (señal senoidal moduladora) y 2.5 kHz (señales triangulares portadoras) al ser comparadas permiten obtener submúltiplos exactos, sin cifras a la derecha del punto decimal. Esta es una característica conveniente al discretizar señales analógicas para dispositivos digitales.

El CHB-MLI elegido para desarrollar las pruebas de laboratorio está constituido por 7 niveles, es decir 3 puentes H con su respectivo bus de CD. Cada bus de alimentación entrega 58.5 Vrms para cada celda de puente H, mientras que la carga conectada a la salida del CHB-MLI es una resistencia de 22 Ω . El valor designado a la carga resistiva considero la máxima corriente que los buses son capaces de suministrar sin deficiencias. La figura 4 muestra el esquema general del CHB-MLI de 7 niveles empleado como prototipo para pruebas de laboratorio.

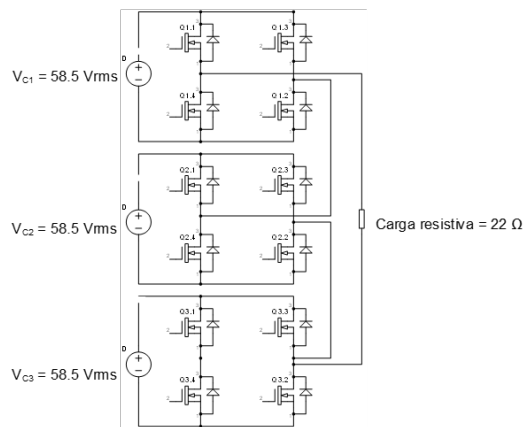


Figura 4 Esquema general del CHB-MLI prototipo para pruebas de laboratorio.

Implementación del CHB-MLI prototipo

Una vez conocida la configuración y operación de los módulos que integran al CHB-MLI. Se procedió a conectar la FPGA, este dispositivo fue previamente programado

con los pulsos de comando producidos por las diferentes técnicas de modulación estudiadas en este trabajo. La figura 5 muestra físicamente al circuito de mando (tarjeta Tiny FPGA BX en el recuadro rojo), los circuitos de aislamiento (optoacopladores HCPL-2611 en el recuadro azul) y el circuito de potencia (puente H trifásico IRAMS10UP60B en el recuadro verde). Mientras que la figura 6 muestra una vista general del CHB-MLI prototipo, trabajando a baja potencia para verificar su operación y conexiones.

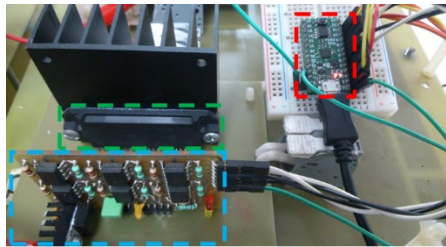


Figura 5 Circuitos de mando, aislamiento y potencia utilizados en el CHB-MLI prototipo.

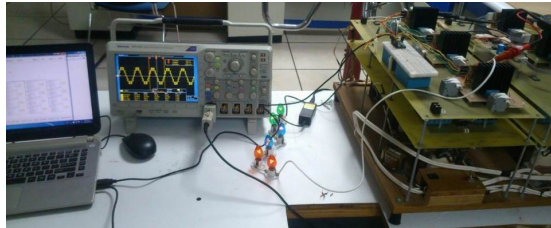


Figura 6 Implementación del CHB-MLI prototipo a baja potencia.

Mediciones

Después de verificar la correcta operación de todas las etapas que integran al CHB-MLI prototipo, se comenzó el proceso de medición. Para lo cual, se conectaron las siguientes sondas en diferentes puntos del CHB-MLI:

- 3 sondas de tensión diferencial, a la salida de cada celda del CHB-MLI.
- 1 sonda de tensión diferencial, en ambos extremos de la carga.
- 3 sondas de corriente, a la salida de cada celda del CHB-MLI.

Se muestran las mediciones realizadas para cada una de las cuatro técnicas de modulación evaluadas en este trabajo (SPWM convencional, PWM Rotativo, PWM

Distribuido y PS-PWM). Las mediciones efectuadas a la técnica de modulación SPWM convencional, se muestran en las figuras 7 y 8.

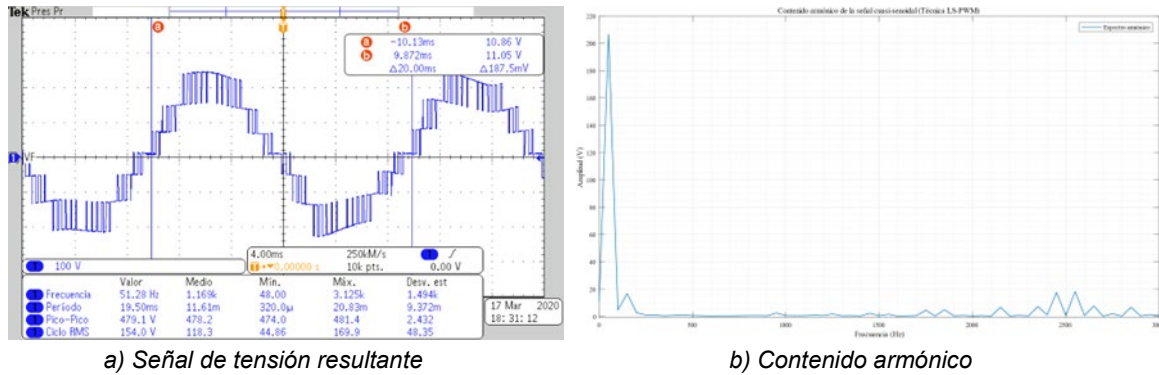


Figura 7 Forma de onda a la salida del CHB-MLI y su análisis de contenido armónico.

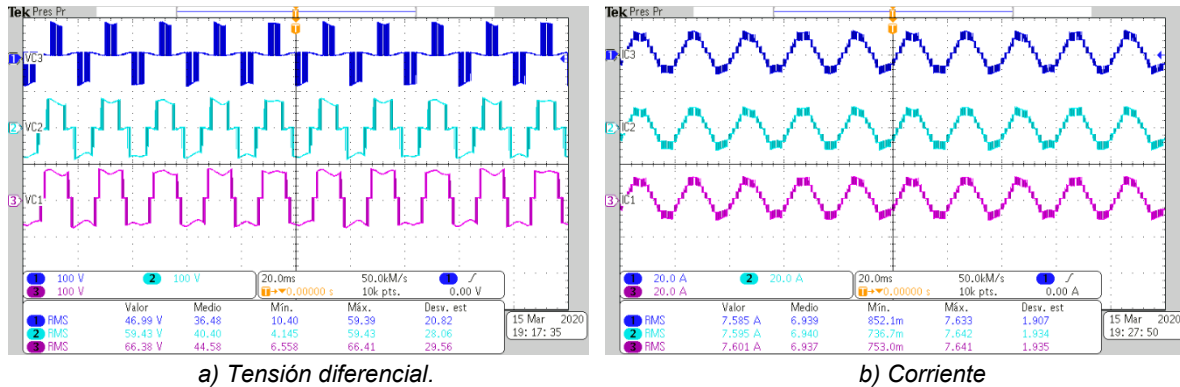


Figura 8 Mediciones efectuadas en cada celda del CHB-MLI.

Las mediciones efectuadas a la técnica de modulación PWM Rotativo, se muestran en las figuras 9 y 10.

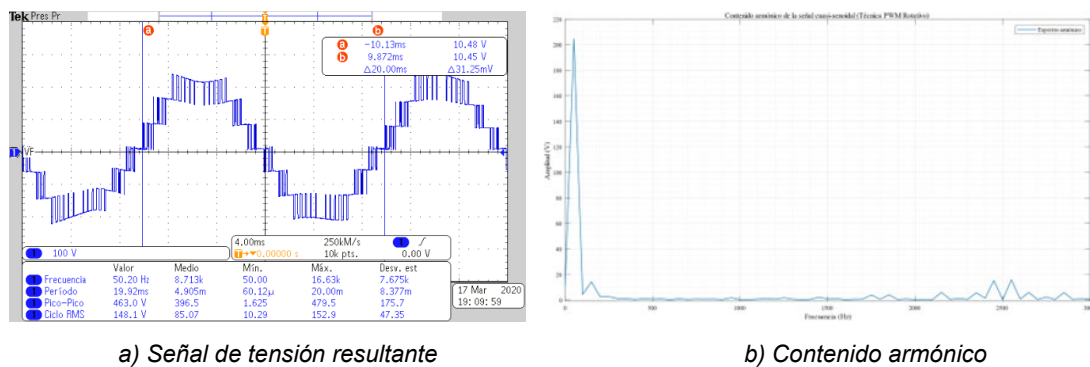
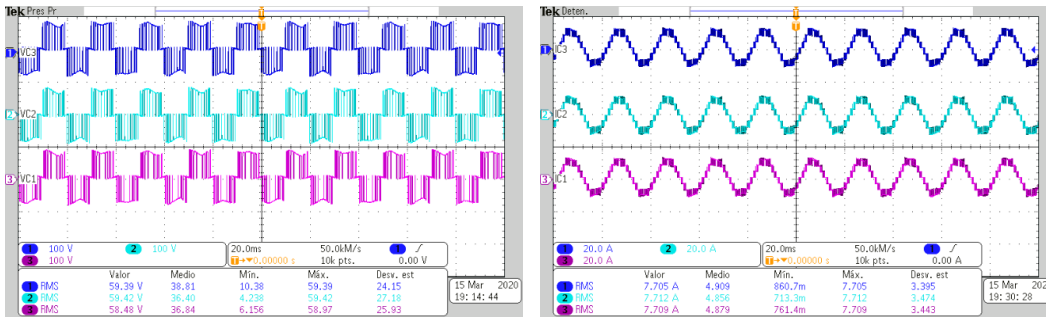


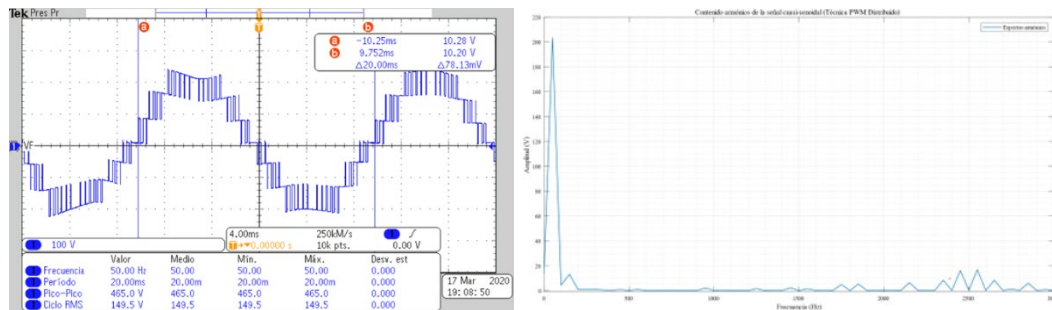
Figura 9 Forma de onda a la salida del CHB-MLI y su análisis de contenido armónico.



a) Tensión diferencial b) Corriente

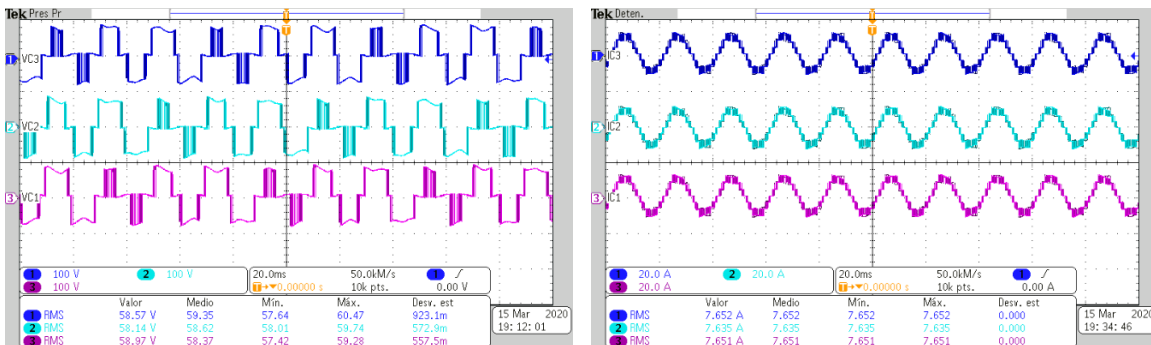
Figura 10 Mediciones efectuadas en cada celda del CHB-MLI.

Las mediciones efectuadas a la técnica de modulación PWM Distribuido, se muestran en las figuras 11 y 12.



a) Señal de tensión resultante b) Contenido armónico

Figura 11 Forma de onda a la salida del CHB-MLI y su análisis de contenido armónico.



a) Tensión diferencial b) Corriente

Figura 12 Mediciones efectuadas en cada celda del CHB-MLI.

Las mediciones efectuadas a la técnica de modulación PS-PWM, se muestran en las figuras 13 y 14.

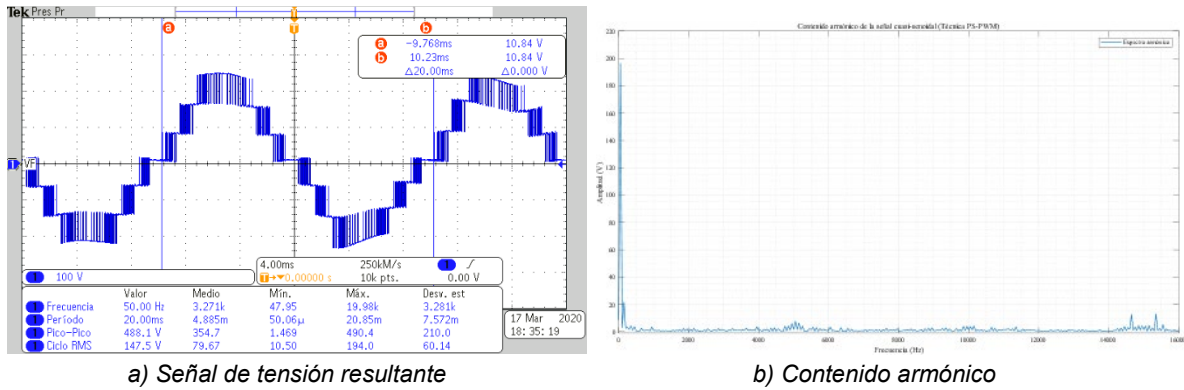


Figura 13 Forma de onda a la salida del CHB-MLI y su análisis de contenido armónico.

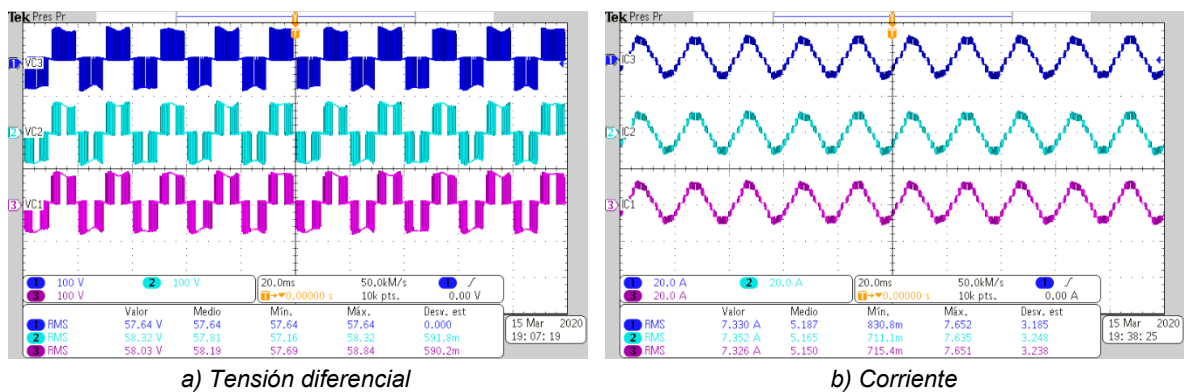


Figura 14 Mediciones efectuadas en cada celda del CHB-MLI.

3. Resultados

En esta sección se presenta la información obtenida de las mediciones que se llevaron a cabo en el CHB-MLI prototipo. Con la información recabada se puede analizar el comportamiento de cada una de las cuatro técnicas de modulación.

Valores obtenidos de las mediciones efectuadas

La tabla 2 presentan los valores de frecuencia, tensión pico-pico, tensión RMS por ciclo y fundamental obtenidos de las cuatro técnicas de modulación evaluadas. La tabla 3 muestra las tensiones RMS y corriente para cada celda del CHB-MLI. Estos valores corresponden a tres ciclos de la señal moduladora, es decir 60 ms. La tabla 4 muestra los valores de potencia procesada por celda, estos valores son el producto de la tensión RMS y corriente de la tabla 3. La suma de las potencias procesadas por celda resulta en la potencia a la salida del CHB-MLI (potencia

recibida por la carga resistiva). Se observa que la potencia en la carga es sustancialmente mayor en las técnicas PWM Rotativo y PWM Distribuido.

Tabla 2 Mediciones efectuadas a la forma de onda a la salida del CHB-MLI.

	LS-PWM	PWM Rotativo	PWM Distribuido	PS-PWM
Frecuencia	51.28 Hz	50.2 Hz	50 Hz	50 Hz
Tensión Pico-Pico	479.1 Vpp	463 Vpp	465 Vpp	488.1 Vpp
Tensión RMS por ciclo	154 Vrms	148.1 Vrms	149.5 Vrms	147.5 Vrms
% de THD	1.9215	1.8781	1.6365	2.1473
Fundamental	206.44 V 50 Hz	204.65 V 50 Hz	203.41 V 50 Hz	196.6 V 50 Hz
Armónico de Portadora	18.21 V 2.55 kHz	15.8 V 2.55 kHz	16.84 V 2.55 kHz	13.11 V 15.35 kHz

Tabla 3 Mediciones de tensión y corriente por celda del CHB-MLI.

	LS-PWM	PWM Rotativo	PWM Distribuido	PS-PWM
Tensión RMS en Celda 1	46.99 Vrms	59.39 Vrms	58.57 Vrms	57.64 Vrms
Tensión RMS en Celda 2	56.43 Vrms	59.42 Vrms	58.14 Vrms	58.32 Vrms
Tensión RMS en Celda 3	66.38 Vrms	58.48 Vrms	58.97 Vrms	58.03 Vrms
Corriente en Celda 1	7.585 A	7.705 A	7.652 A	7.33 A
Corriente en Celda 2	7.595 A	7.712 A	7.635 A	7.352 A
Corriente en Celda 3	7.601 A	7.709 A	7.651 A	7.326 A

Tabla 4 Potencia procesada por celda y total para cada técnica de modulación.

	LS-PWM	PWM Rotativo	PWM Distribuido	PS-PWM
Potencia en Celda 1	356.419 W	457.599 W	448.177 W	422.501 W
Potencia en Celda 2	428.585 W	458.247 W	443.898 W	428.768 W
Potencia en Celda 3	504.554 W	450.822 W	451.179 W	425.127 W
Potencia total	1,289.558 W	1,366.668 W	1,343.254 W	1,276.396 W

Potencia procesada por las celdas del CHB-MLI

Se efectuó un análisis de la potencia procesada en cada una de las 3 celdas del CHB-MLI de 7 niveles para corroborar su equitativa distribución. El procedimiento consistió en calcular, a lo largo de 3 ciclos de moduladora (60 ms), el producto de las señales de tensión diferencial y corriente para cada técnica de modulación evaluada. Los resultados se muestran de la figura 15 a la 18.

Tomando como referencia a la celda con mayor cantidad de potencia procesada (Tabla 4), se calcularon los porcentajes de variación de las otras dos celdas con respecto a su referencia. Los resultados se presentan en la tabla 5.

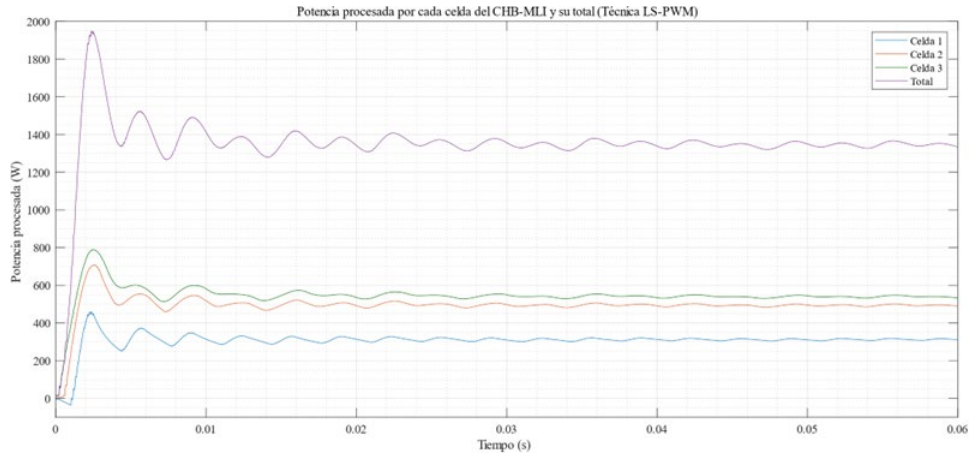


Figura 15 Potencia a la salida del CHB-MLI y por celda, con la técnica LS-PWM.

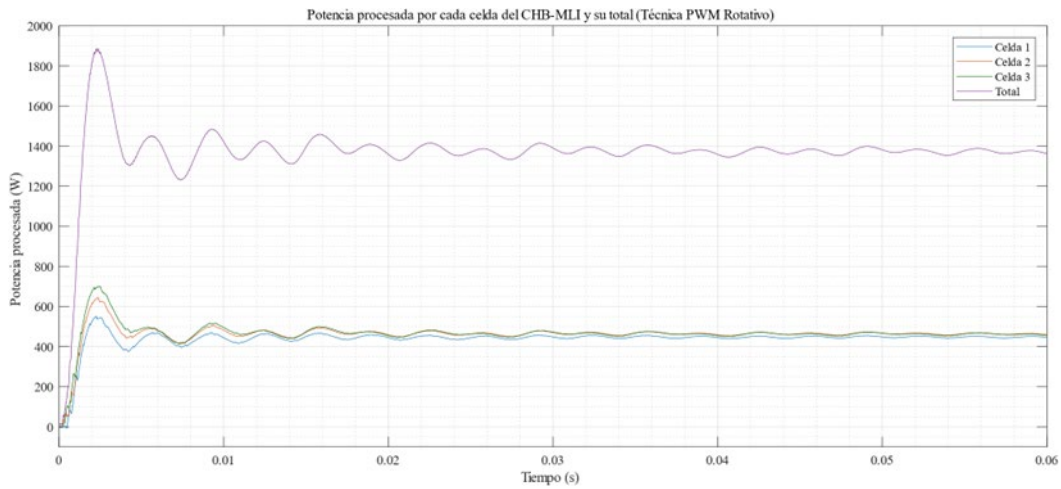


Figura 16 Potencia a la salida del CHB-MLI y por celda, con la técnica PWM Rotativo.

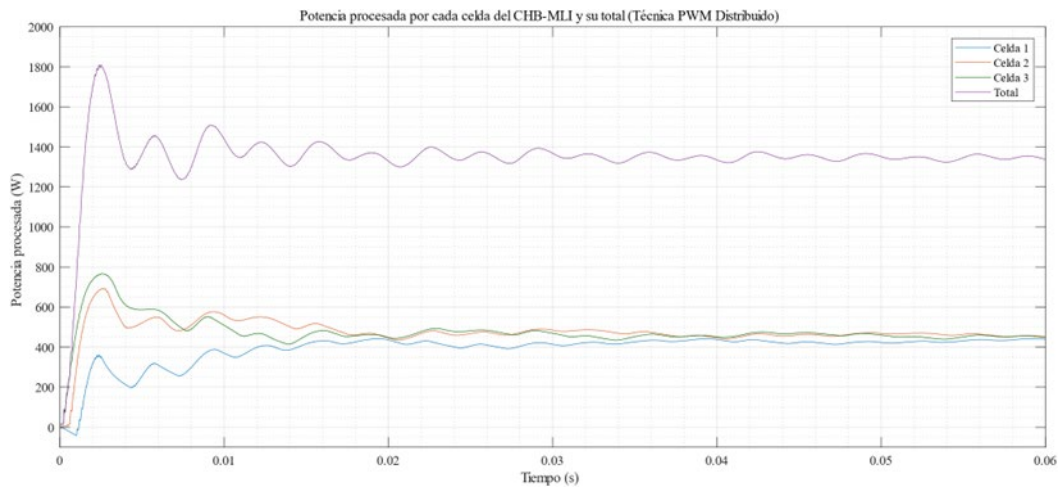


Figura 17 Potencia a la salida del CHB-MLI y por celda, con la técnica PWM Distribuido.

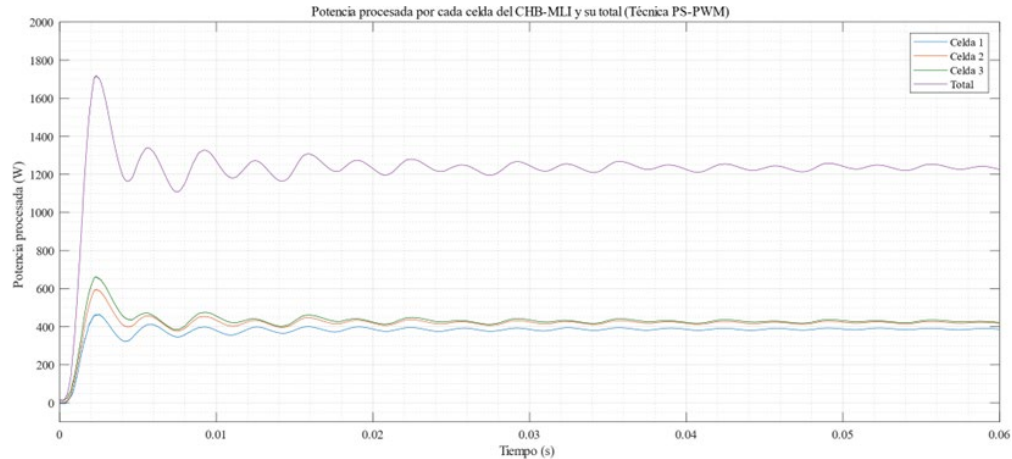


Figura 18 Potencia a la salida del CHB-MLI y por celda, con la técnica PS-PWM.

Tabla 5 Variación de la potencia procesada entre las celdas del CHB-MLI prototipo.

	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Acumulado
LS-PWM	29.35 %	15.05 %	Referencia	44.4 %
PWM Rotativo	0.14 %	Referencia	1.62 %	1.76 %
PWM Distribuido	0.66 %	1.61 %	Referencia	2.27 %
PS-PWM	1.46 %	Referencia	0.84 %	2.3 %

4. Discusión

La revisión de trabajos previos arrojó tres técnicas de modulación capaces de generar el balance de potencia procesada en las celdas de un inversor multinivel, dichas técnicas son: PWM Rotativo, PWM Distribuido y PS-PWM. La técnica PWM Rotativo es la más utilizada en los trabajos de investigación encontrados.

Ciertos parámetros de las técnicas SPWM modificadas varían con respecto a la técnica SPWM convencional. En el caso de la técnica PWM Rotativo solo es necesario variar la distribución de las portadoras, esto mejora crucialmente la distribución de la potencia desde del primer ciclo de moduladora. Sin embargo, en la técnica PWM Distribuido el balance de potencia solo se consigue cada cierto número de ciclos. Y la técnica PS-PWM incrementa el número de pulsos generados drásticamente. Por lo tanto, se concluye que la técnica PWM Rotativo presenta menores compromisos al reemplazar una técnica SPWM convencional.

La implementación de las cuatro técnicas de modulación en un prototipo para pruebas basado en un CHB-MLI de 7 niveles permitió validar el comportamiento de

las técnicas de modulación. Al observar los valores de las tablas 4 y 5 se observa que las técnicas PWM Rotativo, PWM Distribuido y PS-PWM mejoran la distribución de potencia en cada celda del CHB-MLI, en comparación con la distribución de potencia de la técnica SPWM convencional.

5. Conclusiones

Una vez descrito este trabajo de investigación, se analizaron los resultados obtenidos y se llegó a las siguientes conclusiones:

- La técnica PWM Rotativo en comparación con las otras técnicas, obtuvo los valores de potencia procesada más elevados, debido a que efectúa un mejor aprovechamiento de los buses de alimentación.
- El comportamiento de la potencia procesada por celda con menor variación fue registrado por la técnica PWM Rotativo.
- Se concluye que la técnica de modulación PWM Rotativo brinda mejores prestaciones en comparación a las otras técnicas analizadas. Esta técnica de modulación es la más cercana a generar el balance de potencia.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chavarria, J., Biel, D., Guinjoan, F., Meza, C., & Negroni, J. J. Energy-Balance Control of PV Cascaded Multilevel Grid-Connected Inverters Under Level-Shifted and Phase-Shifted PWMs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no.1, pp. 98-111, 2013.
- [2] Gadalla, A. S., Yan, X., Altahir, S. Y., & Hasabelrasul, H. Evaluating the capacity of power and energy balance for cascaded H-bridge multilevel inverter using different PWM techniques. *Wiley: The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1713-1718, 2017.
- [3] Gupta, K. K., Bhatnagar, P., Vahedi, H., & Al-Haddad, K. Carrier based PWM for even power distribution in cascaded H-bridge multilevel inverters within single power cycle. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6470-6475, 2016.

- [4] Gong, R., Xue, B. & Liu, J. Power balance modulation strategy for hybrid cascaded H-bridge multi-level inverter. Springer: Electrical Engineering, no. 104, pp. 753-762, 2022.
- [5] Gong, R., Zhang, X., Liu, J. & Xue, B. A new modulation strategy and power balance method of unsymmetrical CHB inverter. Wiley: IET Renewable Power Generation, vol. 15, pp. 3891-3900, 2021.
- [6] Koshti, A. K. & Rao, M. N. A brief review on multilevel inverter topologies. 2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI), pp. 187-193, 2017.
- [7] Kumar, A. R. & Deepa, T. Multilevel Inverters: A Review of Recent Topologies and New Modulation Techniques. 2018 International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC), pp. 196-203, 2018.
- [8] Nimmi & Mahesh, A. Carrier rotation schemes for equal device conduction periods in Cascaded H-bridge Multilevel Inverter. 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), pp. 696-701, 2018.
- [9] Rao, J. V., & Mahesh, A. Carrier Rotation Strategies for Equal Power Distributions in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters. De Gruyter: International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 18, no. 5, pp. 76-91, 2017.
- [10] Rao, J. V., & Mahesh, A. Hardware implementation of carrier rotation strategy for Cascaded H-bridge multilevel inverters. 2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), pp. 1578–1583, 2017.
- [11] Sadigh, A. K., Dargahi, V., & Corzine, K. New active capacitor voltage balancing method for five-level stacked multicell converter. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1191–1197, 2016.
- [12] Sarkar, I., & Fernandes, B. G. Modified hybrid multi-carrier PWM technique for cascaded H-Bridge multilevel inverter. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4318–4324, 2014.

- [13] Singh, S., Agnihotri, A., Bind S. & Kumar, S. Performance Analysis of A New Carrier Rotation Method for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter. 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), pp. 1-6, 2020.
- [14] Sreenivasarao, D., Agarwal, P., & Das, B. Performance evaluation of carrier rotation strategy in level-shifted pulse-width modulation technique. Wiley: IET Power Electronics, vol. 7, no. 3, pp. 667–680, 2014.
- [15] Xiao, M., Xu, Q., & Ouyang, H. An Improved Modulation Strategy Combining Phase Shifted PWM and Phase Disposition PWM for Cascaded H-Bridge Inverters. MDPI: Energies, vol. 10, no. 9, 2017.
- [16] Ye, M., Ren, W., Chen, L., Wei, Q., Song, G. & Li, S. Research on Power-Balance Control Strategy of CHB Multilevel Inverter Based on TPWM. IEEE Access, vol. 7, pp. 157226-157240, 2019.