

Análisis de diferentes Técnicas de Modulación PWM: Comparación y Diseño.

J.S. Artal-Sevil, R. Dufo-López y J.L. Bernal-Agustín.

Dpto. Ingeniería Eléctrica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA.

Universidad de Zaragoza. Campus Río Ebro. María de Luna, 3.

Edificio Torres Quevedo, 50018. Zaragoza, Spain.

email: {[jsartal](mailto:jsartal@unizar.es); [rdufo](mailto:rdufo@unizar.es); [jlbernal](mailto:jlbernal@unizar.es)}@unizar.es

Abstract— El principio de funcionamiento de los convertidores de potencia está basado en la implementación de estrategias o técnicas de modulación PWM. Por lo general la adopción del algoritmo o estrategia de modulación PWM tiene por objeto mejorar el comportamiento del sistema: mejorar el contenido armónico (THD) o la respuesta dinámica, reducir las pérdidas de conmutación, incrementar la eficiencia de la conversión, etc. La literatura académica recoge diferentes técnicas de modulación PWM que se han ido complicando con el propósito de conseguir una mayor fiabilidad, eficacia y un menor ruido en el equipo. El objetivo del presente documento ha sido desarrollar un análisis comparativo de los diferentes algoritmos de control y técnicas PWM. Matlab/Simulink ha sido el software utilizado para el análisis y desarrollo de las diferentes técnicas de modulación PWM presentadas, así como las topologías de convertidores. El propósito ha sido desarrollar la simulación de las diferentes técnicas de modulación PWM (métodos continuos y discontinuos) y contrastar los resultados con el montaje experimental. La finalidad es que el estudiante pueda entender de manera más fácil y visual su funcionamiento. Desde el punto de vista del estudiante es importante comprender cada una de las estrategias de modulación, así como observar las ventajas e inconvenientes de los diferentes métodos presentados. En este documento también se discuten el método y detalles para la adquisición de conocimientos y su implementación en el aula.

Keywords— *Pulse Width Modulation (PWM), Discontinuous Modulation (DPWM), Power Quality, Delta-Sigma Modulation, Modular Multilevel Converter (MMC), Efficiency, SiC, Switching Losses, Control Techniques, Inverter.*

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de potencia tienen una amplia utilización en la industria. La aparición de modernos microcontroladores (μ Cs) o dispositivos electrónicos configurables (FPGAs) ha favorecido su implementación en diferentes equipos. Aunque el principio de funcionamiento de estos sistemas está basado en las diferentes técnicas o estrategias de modulación usadas. Los convertidores de potencia pueden utilizar diferentes estrategias de modulación PWM (SPWM, THIPWM, SVM, DPWM, etc.). Frecuentemente la adopción del algoritmo o tipo de modulación tiene por objeto mejorar el comportamiento del convertidor, por ejemplo: reducir las pérdidas de conmutación, incrementar el índice de modulación (MI), incrementar la eficiencia en la conversión, disminuir el contenido armónico

(THD), mejorar la respuesta dinámica, etc. Por lo tanto la modulación específica utilizada es muy importante para conseguir un rendimiento óptimo del convertidor.

En los últimos años, la tecnología FACTS (Flexible AC Transmission System) se ha desarrollado con el propósito de la utilización eficiente de la energía, estabilización de voltaje, control de la demanda y mejora en la calidad de red, corrección del factor de potencia y eliminación de armónicos. Algunas aplicaciones adicionales incluyen control de flujo de potencia, regulación de voltaje, compensación de potencia reactiva, mejora de la estabilidad del voltaje transitorio, reducción de la pérdida de potencia, acondicionamiento de potencia y mejora de la calidad, etc.

El uso emergente de la generación renovable y distribuida (DG) ha acelerado y ampliado el papel de los dispositivos electrónicos de potencia para una utilización eléctrica eficiente. Recientemente se ha desarrollado el concepto de smartgrid o red de distribución inteligente, incrementando así el uso y aplicación de los convertidores de potencia. Lo que se traduce en un incremento de la confiabilidad de la red de suministro y una mejora en su rendimiento.

Debido a la importancia actual de estos dispositivos se han desarrollado numerosas estrategias y técnicas modernas de control con diferentes algoritmos de modulación. Aplicaciones de estas técnicas de modulación sobre dispositivos de electrónica de potencia incluyen modelos como: SVC (Static Variable Compensator), Sistemas Fotovoltaicos, STATCOMs (Static Synchronous Compensator), HVDC Converter o SST (Solid-State Transformer), etc.

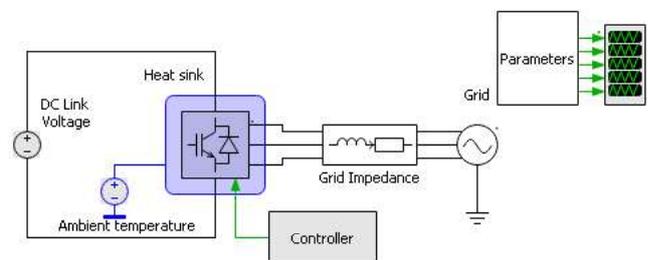


Fig. 1. Diagrama esquemático de un inversor trifásico de 2 niveles con IGBTs. Aplicación del software interactivo SEMIS ABB semiconductor.

Por todo ello, esta serie de conceptos y conocimientos son incluidos dentro del desarrollo curricular del Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética (EERR). De este modo cumplir con los objetivos de aprendizaje supone no sólo adquirir los conocimientos transmitidos por el profesor sobre las topologías electrónicas mostradas en el aula, sino también comprender el funcionamiento y uso de los sistemas indicados. Así pues no basta con conocer las diferentes herramientas de simulación disponibles en el mercado, ver fig. 1. De este modo resulta necesario entender de antemano los principios de funcionamiento de los diferentes dispositivos electrónicos, así como los algoritmos y estrategias de modulación PWM más utilizadas en los convertidores de potencia.

Ahora bien, explicar los principios básicos de la modulación PWM en el aula (así como otras técnicas basadas en la modulación $\Delta/\Sigma\Delta$) o desarrollar ejercicios donde los estudiantes puedan apreciar las diferencias de comportamiento entre una y otra técnica suele ser una tarea laboriosa y compleja. Como es lógico, esta dificultad se incrementa exponencialmente en función del nivel de conocimientos previos de los estudiantes. Hay que advertir que la procedencia de los estudiantes en el Master EERR es muy diversa, lo que dificulta sobremedida la transmisión y adquisición de estos conceptos. Entre otros estudios académicos incluyen los grados en ingeniería: eléctrica, electrónica, tecnologías industriales, mecánica, telecomunicaciones, química, etc.

Así el objetivo del presente documento es recoger y mostrar diferentes topologías que expliquen claramente el principio de funcionamiento de estas técnicas de modulación PWM, bien en formato experimental o como ejemplos de simulación. Matlab/Simulink ha sido el software utilizado para el análisis y desarrollo de las diferentes técnicas de modulación PWM. De forma que los estudiantes puedan comprender su significado desarrollando el algoritmo de control y modulación donde se aprecie claramente estos conceptos. Y de esta forma entender, mejor si cabe, su implementación sobre los diferentes sistemas, estructuras y topologías que constituyen los Convertidores Electrónicos de Potencia mencionados.

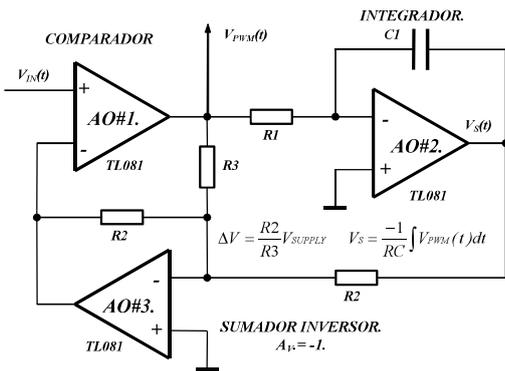


Fig. 2. Ejemplo de circuito analógico para obtener la modulación ΔV (banda de histéresis) mediante el uso de amplificadores operacionales (AO's TL081).

Así pues el presente trabajo presenta un análisis de los principales algoritmos de modulación PWM. Su finalidad es dar un repaso a las diferentes estructuras, enfatizando en las

diferentes técnicas y presentando sus características más relevantes. La descripción teórica se centra en el proceso de modulación y se apoya en resultados experimentales o de simulación. El propósito ha sido conseguir un mejor entendimiento del proceso; desde la comparación de una señal de referencia con una o más portadoras, hasta la modulación por banda de histéresis o modulación $\Delta/\Sigma\Delta$, ver figs. 2 y 3. Este trabajo se complementa con una actividad práctica basada en el diseño de moduladores para sistemas de potencia por medio del entorno Matlab/Simulink.

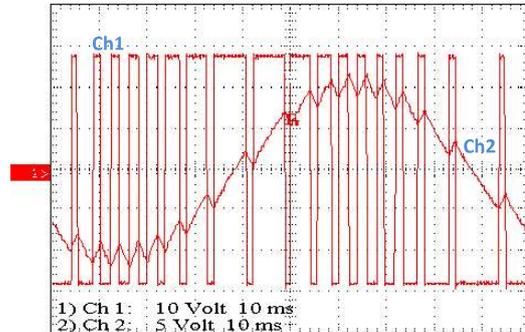


Fig. 3. Representación de las señales de Modulación PWM V_{PWM} (Ch1) y salida del integrador V_s (Ch2). En el oscilograma Ch2 se puede observar la banda de histéresis ΔV sobre la señal de entrada senoidal V_{in} .

II. ESTADO DEL ARTE.

Con el desarrollo de nuevos algoritmos de control, técnicas y estrategias de modulación PWM se ha podido mejorar el rendimiento y eficiencia de las topologías de convertidores de potencia. De este modo Antonio-Ferreira et al. [1] presentan una revisión de las diferentes técnicas de modulación aplicadas sobre un convertidor multinivel modular (MMC). Este tipo de convertidor es una tecnología de inversor razonablemente joven con un futuro prometedor en sistemas de distribución DC de media tensión (MVDC). El trabajo académico proporciona una revisión exhaustiva de las técnicas basadas en portadora con modulación (CB-PWM) propuestas para ser aplicadas en versiones previas de inversores multinivel.

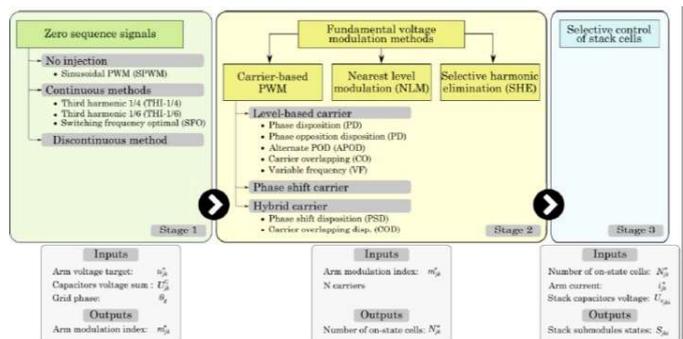


Fig. 4. Diferentes técnicas de modulación (métodos continuos y discontinuos) y etapas en el proceso de diseño.

Otros autores como Hassan et al. [2], Prabakaran et al. [3] o Kava et al. [4] presentan una revisión de diferentes topologías de convertidor multinivel, clásicas e híbridas, para su

implementación en sistemas de energías renovables (RES). De igual forma examinan las diferentes técnicas de modulación adoptadas. Así es posible analizar los conceptos básicos correspondientes a los diferentes convertidores: Neutral-Point Clamped (NPC), Flying Capacitor, Cascaded H-Bridge (CHB) y Modular Multilevel Converter (MMC). Estas topologías han recibido una gran atención debido a sus características más relevantes, entre las que destacan: una mejora en la calidad de la forma de onda, un pequeño voltaje de modo común y una corriente de entrada con baja distorsión. Entre sus aplicaciones podemos destacar: accionamientos de alta potencia en media tensión, filtros de potencia activa, microgrids, control de flujos de potencia, vehículo eléctrico, etc.

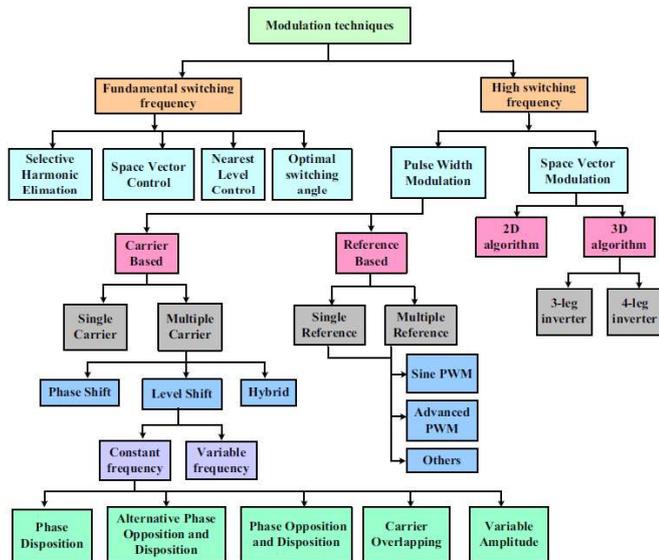


Fig. 5. Diagrama esquemático que presenta diferentes técnicas de modulación PWM para convertidores de potencia.

Las técnicas de modulación son una parte crucial para el inversor porque están relacionadas con la eficiencia general de todo el sistema. Diferentes tipos de técnicas de modulación han sido propuestas en la literatura académica, ver fig. 5. McGrath et al. [5] y Chen & Zhao [6] analizan distintas estrategias de modulación proponiendo compensaciones y modificaciones sobre las mismas en función de la aplicación. Otros autores como Asiminoaei et al. [7], Nguyen et al. [8] o Prieto et al. [9] estudian técnicas de modulación discontinua DPWM para minimizar las pérdidas de conmutación en cualquier punto de operación. De este modo presentan los conceptos asociados a la modulación discontinua de acuerdo a la inyección de la señal de secuencia cero (ZSS).

La selección de la estrategia de modulación depende del grado de linealidad deseado, del rango de modulación, de la calidad en la forma de onda y de su implementación numérica sobre el microcontrolador μC . Así Hava et al. [10] investigan las características de ganancia de tensión y la calidad de onda en la región de sobremodulación. También desarrollan una pequeña revisión de los métodos PWM basados en portadora CB-PWM comparando el índice de modulación (MI) para cada

supuesto analizado. Por otro lado Madorell et al. [11], Rus et al. [12] y Artal-Sevil et al. [13] han estudiado estrategias de control destinadas a accionamientos de bajo coste. Diferentes tipos de técnicas de modulación PWM continua y discontinua son implementadas. Estas estrategias se evalúan y comparan para cada aplicación específica a fin de definir cuál de ellas obtiene un mejor rendimiento del convertidor.

Las estructuras multinivel (MLI) se utilizan cada vez más en aplicaciones de media y alta potencia (FACTS) debido a las bajas interferencias electromagnéticas (EMI) y bajo contenido armónico. Así Babaei et al. [14], Venkataramanaiah et al. [15] o Colak et al. [16] presentan una revisión de las diferentes topologías del inversor multinivel (VSI). Algunos esquemas de control también son incluidos. La selección de topología y técnicas de control puede variar de acuerdo con las demandas de potencia del inversor.

De este modo se han estudiado métodos de modulación basados en portadora (SPWM), modulación con eliminación de armónicos (SHE), space-vector (SVM), modulación $\Delta/\Sigma\Delta$, etc. Las ventajas y limitaciones de cada topología también han sido mencionadas. En los documentos se efectúa una comparación entre el número de dispositivos electrónicos necesarios en cada una de las estructuras presentadas (configuración simétrica, asimétrica, híbrida o celda básica) en función del número de niveles del inversor. Los inversores multinivel presentan como principal desventaja el elevado número de dispositivos semiconductores que necesitan. De este modo el objetivo de estos documentos ha sido, en muchos de los casos, presentar estructuras con las mismas prestaciones pero con un número reducido de dispositivos.

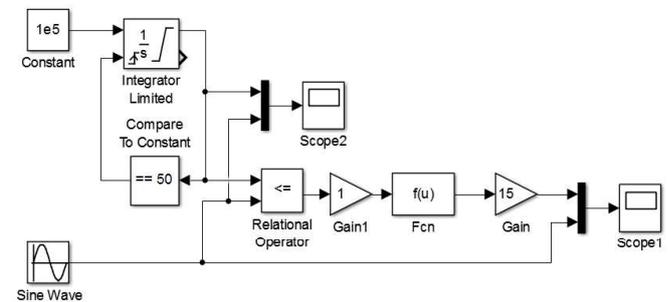


Fig. 6. Diagrama de bloques del modulador PWM. Modulación mediante portadora en diente de sierra (CB-PWM).

III. FUNDAMENTOS DE LAS TÉCNICAS DE MODULACIÓN.

En general un inversor es un sistema que genera una señal senoidal con amplitud y/o frecuencia variable a partir de varias fuentes DC. La secuencia de conmutación de los diferentes interruptores que integran cada topología de inversor viene impuesta por el algoritmo de modulación y control [17]. En la actualidad existen distintas técnicas de modulación PWM aplicadas al control de los convertidores. En este documento se presentan algunas estrategias junto con un pequeño análisis de los algoritmos de modulación PWM. Así el desarrollo teórico está basado en el proceso de modulación y apoyado en los resultados obtenidos en la simulación Matlab/Simulink. El

objetivo ha sido facilitar el entendimiento del proceso a los estudiantes. Dentro de la técnica de modulación PWM se han propuesto diferentes algoritmos de modulación, cada uno con el propósito de incorporar mejoras, como por ejemplo: disminuir las pérdidas de conmutación o el contenido armónico (THD), aumentar la eficiencia del convertidor, reducir la distorsión de la señal, etc. [18], [19].

A. Modulación basada en portadora (CB-PWM)

En este supuesto las señales de control de los dispositivos se obtienen mediante la comparación entre la señal portadora (triangular o diente de sierra) y la señal de referencia (en la mayoría de las ocasiones senoidal de baja frecuencia SPWM), ver fig. 7. La señal portadora es periódica y su frecuencia suele estar determinada por la velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores o el nivel de pérdidas [20]. Una alta relación de frecuencias permite obtener un gran número de pulsos por periodo de señal fundamental.

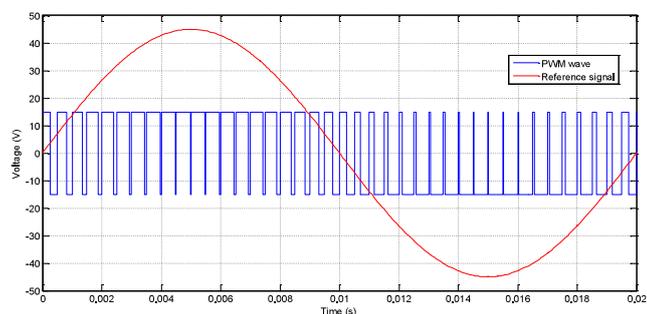


Fig. 7. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación mediante portadora en diente de sierra (CB-PWM). Valor de pico de la señal portadora $\hat{u}_{tw} = 50V$.

Una característica importante en la modulación PWM es el índice de modulación de amplitud (MI). Se define como el cociente entre la amplitud de la señal de referencia A_w con respecto a la amplitud de la portadora \hat{u}_{tw} .

$$MI = \frac{A_w}{\hat{u}_{tw}} \quad (1)$$

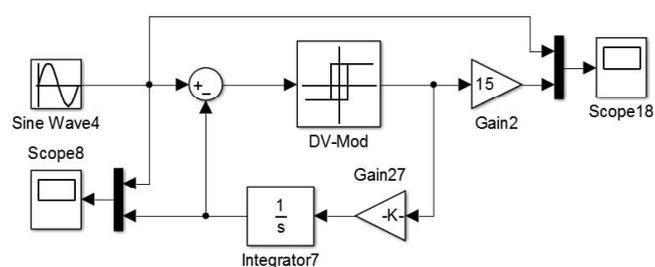


Fig. 8. Diagrama de bloques del modulador ΔV (banda histéresis).

En el modo de operación lineal la amplitud de la señal de referencia A_w es menor o igual al valor de pico de la señal triangular portadora \hat{u}_{tw} , $MI \leq 1$. Mientras que en modo no lineal la amplitud de la señal moduladora es superior a la señal portadora, $MI > 1$. Este modo de operación es conocido como sobremodulación; de forma que el número de pulsos obtenidos es inferior. En general el método de modulación senoidal

SPWM es una técnica simple que proporciona buenos resultados, incluido en modo sobremodulación y por lo general presenta un bajo contenido armónico. Ello es debido a que opera a frecuencia constante. Hava et al. [10] han investigado la sobremodulación y la calidad de onda generada mediante métodos PWM basados en portadora. Los resultados obtenidos fueron testeados sobre un inversor VSI.

B. Modulación ΔV (banda histéresis)

La técnica de modulación delta ΔV o banda de histéresis es un método de control de realimentación instantánea, ver fig. 8. En este método de modulación se deja que una onda triangular oscile dentro de la banda de histéresis predefinida por ΔV . Esta banda de histéresis está situada por encima y debajo de la onda de referencia, ver oscilograma de la fig. 10.

La función de conmutación PWM es generada a partir de la intersección de los límites superior e inferior $A_w \pm \Delta V$ con los vértices de la onda moduladora, ver figs. 9 y 10. Así pues si se modifica la frecuencia o amplitud de la forma de onda de referencia, manteniendo constante la pendiente, se obtiene como resultado un número mayor o menor de pulsos alterando de este modo la resolución. Así pues, con una banda ΔV pequeña se incrementa el número de pulsos PWM obtenidos (frecuencia de muestreo) y disminuye el rizado.

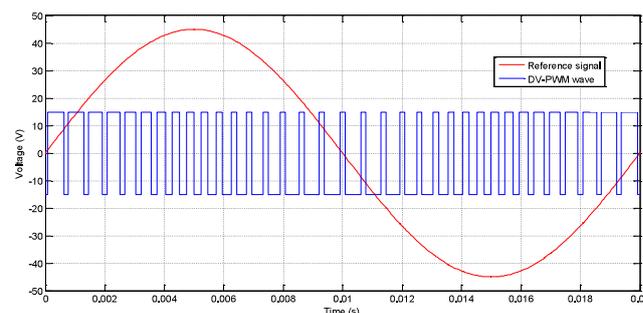


Fig. 9. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación por banda de histéresis (ΔV -PWM).

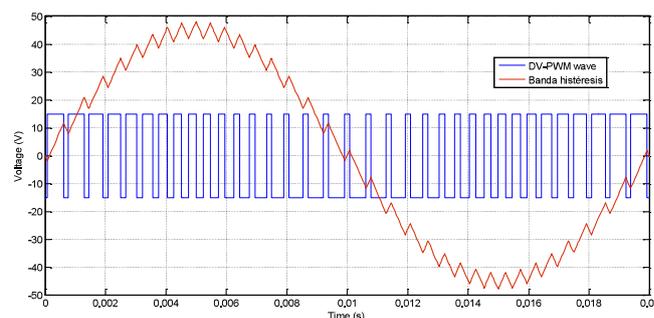


Fig. 10. Señal PWM obtenida y la banda de histéresis ΔV sobre la señal senoidal de referencia.

C. Modulación $\Sigma\Delta$

La modulación sigma-delta ($\Sigma\Delta$ -PWM) es un tipo de conversión analógica-digital de bajo coste implementada en gran cantidad de circuitos analógicos. Las diferencias a nivel conceptual entre los moduladores tradicionales y los basados

en modulación $\Sigma\Delta$ dificultan su aplicación en metodologías de diseño. Un convertidor de primer orden está compuesto por un integrador, un bloque de muestreo y un cuantificador de 1-bit. Este modulador convierte la señal de entrada en un tren de pulsos cuya media temporal es proporcional a la tensión de entrada. El principio de funcionamiento está dado en el diagrama mostrado en la fig. 11.

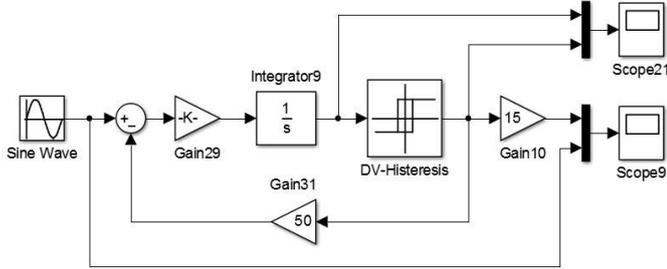


Fig. 11. Diagrama de bloques del modulador $\Sigma\Delta$ -PWM desarrollado en Matlab-Simulink.

Así las figs. 12 y 13 muestran el procesado de la señal de referencia desarrollado por los diferentes bloques del sistema. El modulador recibe la señal de referencia de magnitud variable y es comparado con los pulsos de salida. El error resultante (operación delta) es integrado (operación sigma).

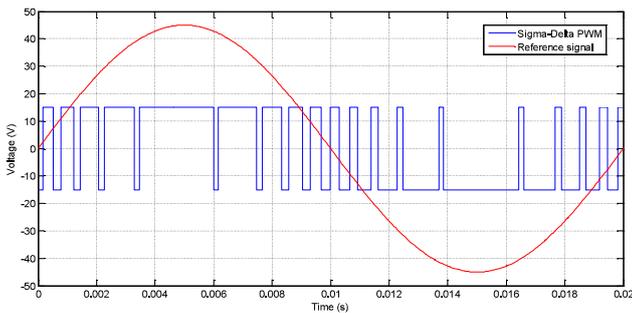


Fig. 12. Señal PWM y señal senoidal de referencia. Supuesto de modulación sigma-Delta $\Sigma\Delta$ -PWM.

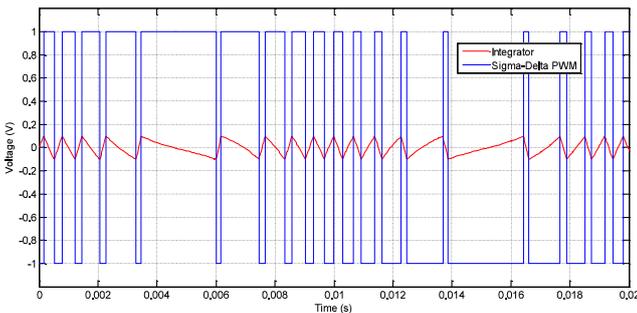


Fig. 13. Modulación $\Sigma\Delta$ -PWM junto con la señal de salida del integrador. La amplitud de la señal del integrador indica la banda de histéresis.

D. Inyección del tercer armónico (THIPWM)

La modulación PWM con inyección del tercer armónico THIPWM (Third Harmonic Injection) es una técnica de modulación continua basada en la incorporación de una señal armónica sobre el voltaje de modulación en los convertidores

trifásicos. El principal objetivo es maximizar el uso del bus de continua DC. De este modo es posible incrementar la tensión de salida del inversor hasta un 15,5% con respecto a la técnica SPWM. Hace más de una década algunos autores propusieron inyectar una señal de secuencia cero (ZSS) con una frecuencia superior de la onda fundamental $3\omega_s$ y una amplitud $1/6$. Esta técnica de modulación es conocida como THIPWM1/6, su diagrama desarrollado en Matlab/Simulink es mostrado en la fig. 14. De este modo, la señal senoidal de secuencia cero inyectada viene expresada por la siguiente ecuación.

$$v_{ZSS} = \frac{A_w}{6} \sin(3\omega_s t) \quad (2)$$

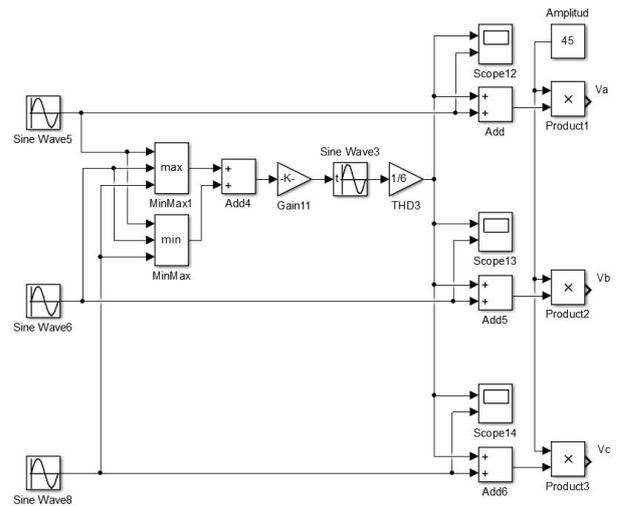


Fig. 14. Diagrama de bloques del modulador THIPWM1/6.

En este supuesto la señal de referencia, con la inyección del 3 armónico, es la suma de las dos ondas senoidales, ver fig. 15. Esta reducción en la amplitud de la señal de referencia permite hacer uso de mayores índices de modulación $MI > 1$ sin entrar en conflicto con la región de sobremodulación. Para el caso de la modulación THIPWM1/6, el valor lineal máximo viene dado por $MI_{max} = 1,15$.

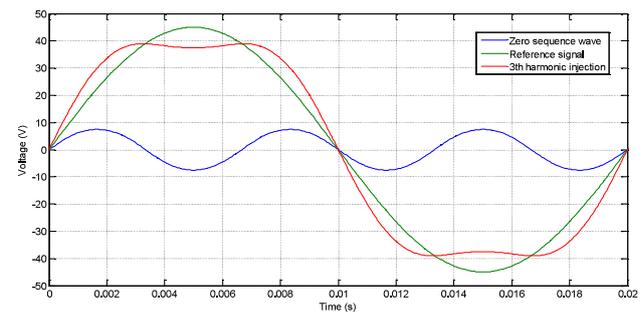


Fig. 15. Generación de la señal considerada como referencia mediante la inyección de una onda de secuencia cero. Modulación THIPWM1/6.

La señal obtenida puede incorporarse como referencia en cualquiera de los diagramas vistos en los epígrafes anteriores. El oscilograma de la fig. 16 muestra la señal THIPWM1/6 como resultado de utilizar el diagrama de modulación basado en portadora (CB-PWM) con diente de sierra. Esta técnica

resulta ventajosa por el incremento en el rango de modulación lineal. Al tratarse de un inversor trifásico el efecto del tercer armónico sobre la carga se ve atenuado.

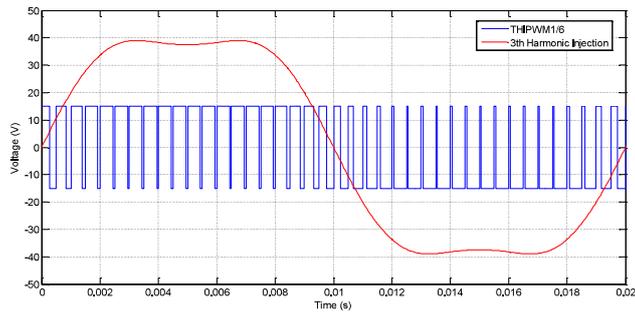


Fig. 16. Modulación PWM y señal senoidal de referencia Va con inyección del tercer armónico. Supuesto de modulación THIPWM1/6.

E. Modulación Space-Vector (SVM)

Esta estrategia denominada SVM es comúnmente utilizada en convertidores trifásicos asociados con aplicaciones AC relacionadas con variadores de velocidad. Para extender el rango lineal de la modulación SPWM puede ser inyectada una señal de secuencia cero (en este supuesto una señal ZSS triangular). La amplitud de la onda triangular es ahora 1/4 de la magnitud de la señal senoidal deseada. El rango de modulación también se amplía un 15% en comparación con la técnica SPWM. La fig. 17 muestra la señal de referencia resultante, tras la inyección de la onda triangular, junto con el tren de pulsos obtenido al utilizar un modulador PWM.

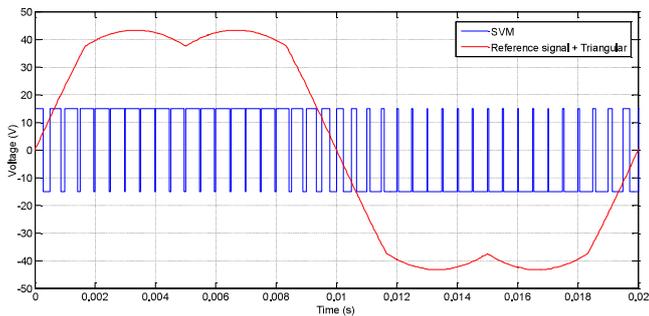


Fig. 17. Ejemplo de modulación SVM y señal de referencia Va con inyección de onda triangular (amplitud 1/4).

F. Modulación PWM Discontinua (DPWM)

Una de las técnicas más importantes en la actualidad es la modulación PWM Discontinua (DPWM). Existen varios tipos de algoritmos que poseen en común la inyección de una señal de secuencia cero (ZSS). En los convertidores trifásicos, estas señales de secuencia cero se pueden agregar en la modulación con el propósito de mejorar su rendimiento. Esta estrategia permite aumentar el rango lineal del índice de modulación en el convertidor. A su vez, los armónicos incorporados se cancelan en las tensiones de línea. Su principal objetivo es la reducción de las pérdidas de conmutación en los dispositivos electrónicos que conforman la topología del inversor. Esto es posible ya que por lo general estos sistemas sólo realizan conmutaciones en 2/3 del ciclo de la señal, ver distintos tipos en las figs. 19 a 22.

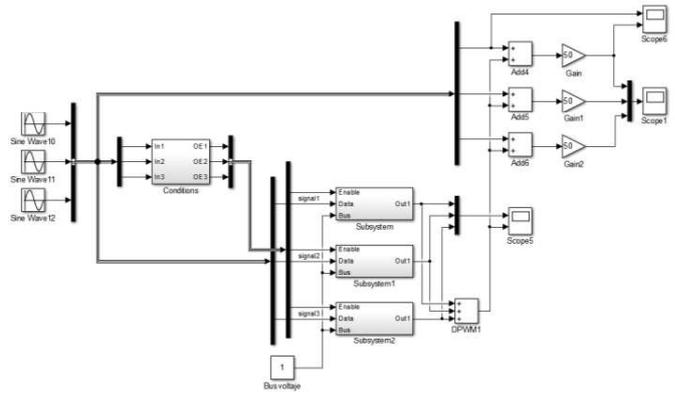


Fig. 18. Diagrama de bloques del modulador DPWM desarrollado mediante el software Matlab/Simulink.

La fig. 18 muestra el diagrama de bloques del modulador DPWM implementado en Matlab/Simulink. La diferencia entre las diferentes técnicas analizadas radica en el algoritmo usado para la obtención de la señal ZSS. Esta función matemática se encuentra incorporada dentro del bloque “conditions”.

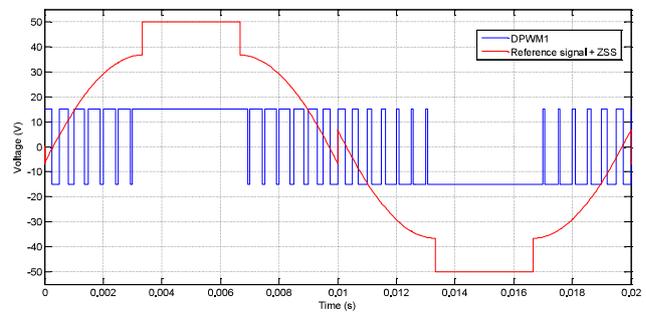


Fig. 19. Ejemplo de modulación DPWM1 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

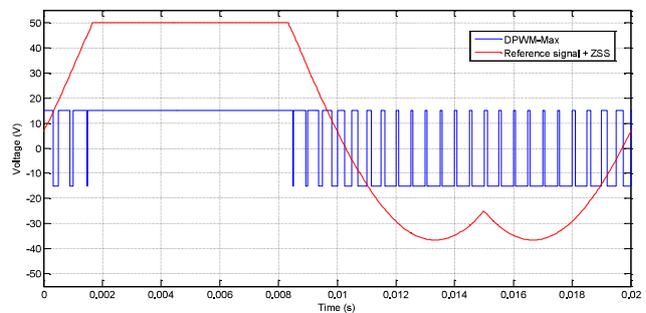


Fig. 20. Ejemplo de modulación DPWM-Max y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

La literatura académica recoge distintos tipos de algoritmos discontinuos, entre los que se puede destacar: DPWM0, DPWM1, DPWM2, DPWM3, DPWM-Max, DPWM-Min, etc. Algunos de los cuales están representados en las siguientes figuras. La señal de secuencia cero generada se caracteriza por ser periódica del triple de la frecuencia fundamental y además discontinua. Esta señal es obtenida a través del sumador que conecta la salida de cada uno de los subsistemas en la fig. 18. En los oscilogramas mostrados puede apreciarse la onda senoidal de referencia con la inyección de la señal de secuencia

cero junto con el DPWM obtenido al utilizar un modulador PWM (CB-PWM).

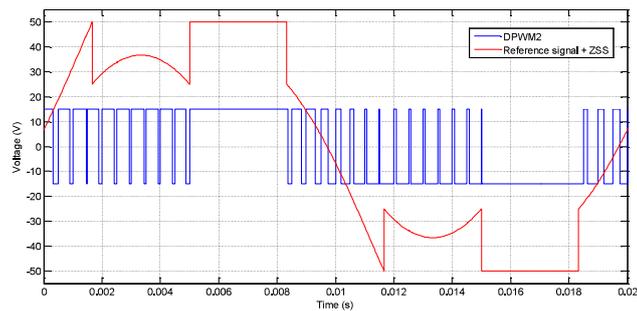


Fig. 21. Ejemplo de modulación DPWM2 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

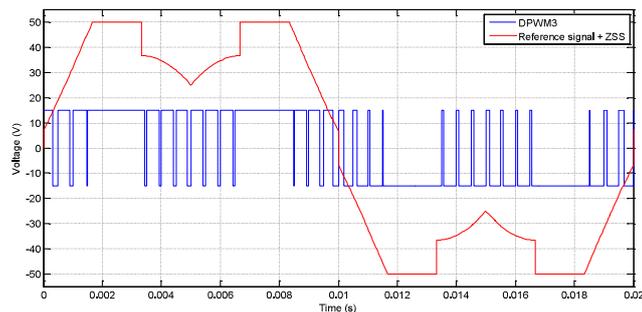


Fig. 22. Ejemplo de modulación DPWM3 y señal de referencia con inyección de onda de secuencia cero (ZSS).

De entre las diferentes estrategias de modulación DPWM mostradas, suelen implementarse aquellos métodos que son simétricos y que por tanto producen las mismas pérdidas en los dispositivos superiores e inferiores del convertidor.

G. Modulación PWM con Múltiple Portadora

Este tipo de estrategias son aplicadas principalmente en los convertidores multinivel NPC (Neutral Point Clamped) y FC (Flying Capacitor). Los niveles de ondas portadoras pueden estar en disposición de fase (PD), oposición de fase (POD), oposición de fase alternada (APOD), etc., ver diagrama en fig. 5. Las portadoras poseen la misma amplitud y frecuencia pero están ubicadas a diferentes niveles. En esta última década, varios estudios académicos han analizado el espectro armónico generado por estos diferentes métodos de modulación [21].

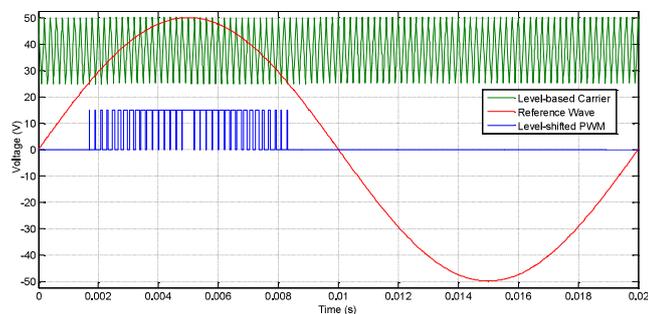


Fig. 23. Señal senoidal de referencia y portadora triangular multinivel. Como resultado se obtiene la señal de disparo PWM del IGBT.

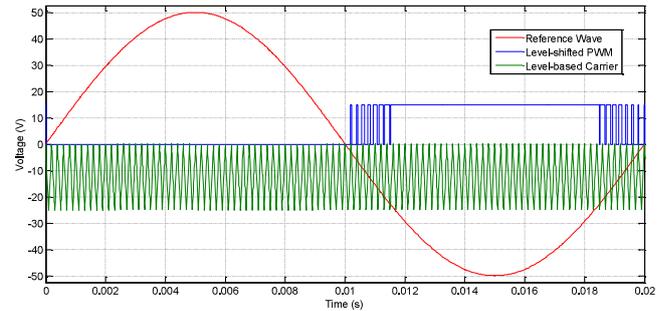


Fig. 24. Señal senoidal de referencia y portadora triangular multinivel. Como resultado se obtiene la señal de disparo PWM del IGBT.

En las figs. 23 y 24 se puede observar la señal senoidal de referencia, junto con la portadora triangular a distintos niveles. También se ha representado la señal de disparo de los IGBTs resultante de la modulación PWM con múltiple portadora. Estas señales están destinadas al control de un convertidor del tipo 5L-NPC. La fig. 25 muestra los 5 niveles del inversor.

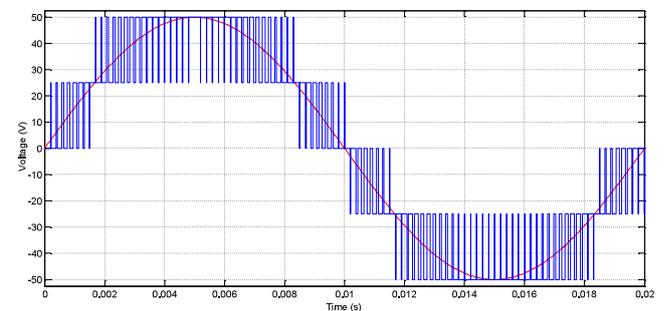


Fig. 25. Niveles de salida deseados en el inversor 5L-NPC.

IV. CONCLUSIONES.

El documento presentado ha proporcionado una revisión comparativa de diferentes técnicas de modulación PWM. De este modo además de los principios fundamentales también han sido señalados los recientes desarrollos. Además se ha comprobado que tanto los algoritmos continuos como los discontinuos precisan de pocos cálculos matemáticos, por lo que resulta sencillo su simulación mediante Matlab/Simulink o incluso programar las diferentes técnicas en μC 's o DSP's.

El impacto de la distorsión armónica, la eficiencia y rendimiento del convertidor también han sido mencionados. Al analizar los diferentes escenarios de modulación, se puede concluir que la selección de la técnica de modulación adoptada depende en gran medida del factor que requiera una mayor optimización. En general, el tipo de modulación es el responsable de generar un bajo contenido de armónicos en las corrientes de la red así como, generar menos pérdidas de potencia en los dispositivos. Finalmente las técnicas de modulación PWM de base discontinua con inyección de onda de secuencia cero (ZSS) son las soluciones que reducen los eventos de conmutación y las pérdidas de potencia correspondientes a los dispositivos semiconductores. Estas estrategias han permitido optimizar la capacidad de control y facilitar también su manejo.

El propósito ha sido cumplir los objetivos de aprendizaje; lo que supone no sólo adquirir los conocimientos transmitidos por el profesor sobre las topologías electrónicas mostradas en el aula sino también comprender el funcionamiento y uso de estos sistemas. Para ello resulta necesario conocer los algoritmos y técnicas de modulación PWM más utilizadas en los convertidores de potencia. Evaluar satisfactoriamente las competencias, habilidades y destrezas adquiridas por los estudiantes durante su proceso de formación universitaria también ha sido otro de los objetivos marcados al inicio de la experiencia. Como resultado se ha observado un incremento en el interés y grado de motivación del estudiante durante el estudio y desarrollo de pequeñas actividades académicas relacionadas.

Por último las simulaciones realizadas han proporcionado un nuevo punto de vista al estudiante. Le han permitido comprender cada una de las estrategias o técnicas de modulación, así como observar las ventajas e inconvenientes de los algoritmos presentados. Con el desarrollo de las diferentes simulaciones ha conseguido al mismo tiempo profundizar en los contenidos y coger soltura en el desarrollo de los modelos. Los alumnos han podido comprender de forma más visual los diferentes conceptos expuestos en el aula al mismo tiempo que avanzaban en el desarrollo de las diferentes actividades académicas. Por otro lado el profesor ha obtenido un feedback más real e instantáneo. De esta forma, como conclusión los objetivos iniciales de aprendizaje se han podido resolver de manera satisfactoria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Universidad de Zaragoza para el desarrollo del presente trabajo, a través del Programa de Innovación e Investigación Educativa (PIIDUZ 2017/18). Referencia de Proyecto: PIIDUZ_17_059.

REFERENCIAS

- [1] A. Antonio-Ferreira, C. Collados-Rodríguez and O. Gomis-Bellmunt. Modulation techniques applied to medium voltage modular multilevel converters for renewable energy integration: A review. *Electric Power Systems Research, Elsevier ScienceDirect*. Volume 155, February 2018, pp. 21-39.
- [2] N.S. Hasan, N. Rosmin, D.A.A. Osman and A.H. Musta'amal@Jamal. Reviews on multilevel converter and modulation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 80, pp.: 163-174, December 2017.
- [3] N. Prabaharan and K. Palanisamy. A comprehensive review on reduced switch multilevel inverter topologies, modulation techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 76, pp.: 1248-1282, September 2017.
- [4] P. Kala and S. Arora. A comprehensive study of classical and hybrid multilevel inverter topologies for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 76, pp.: 905-931, September 2017.
- [5] B.P. McGrath and D.G. Holmes. Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEEExplore Digital Library*. Vol.: 49, issue: 4, pp.: 858-867, 2002.
- [6] H. Chen and H. Zhao. Review on Pulse-Width Modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters. *IET Power Electronics. IEEEExplore Digital Library*. Vol.: 9, issue: 14, pp.: 2611-2620, 2016.
- [7] L. Asiminoaei, P. Rodriguez and F. Blaabjerg. Application of Discontinuous PWM Modulation in Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics, IEEEExplore Digital Library*. Volume: 23, issue: 4, pp.: 1692-1706, 2008.
- [8] T.D. Nguyen, J. Hobraiche, N. Patin, G. Friedrich and J.P. Vilain. A Direct Digital Technique Implementation of General Discontinuous Pulse Width Modulation Strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEEExplore Digital Library*. Volume: 58, issue: 9 pp. 4445-4454, 2011.
- [9] J. Prieto, M. Jones, F. Barrero, E. Levi and S. Toral. Comparative Analysis of Discontinuous and Continuous PWM Techniques in VSI-Fed Five-Phase Induction Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEEExplore Digital Library*. Vol.: 58, issue: 12; pp.: 5324-5335, 2011.
- [10] A.M. Hava, R.J. Kerkman and T.A. Lipo. Carrier-based PWM-VSI Overmodulation strategies: analysis, comparison and design. *IEEE Transactions on Power Electronics, IEEEExplore Digital Library*. Vol.: 13, issue: 4, pp. 674-689, 1998.
- [11] R. Madorell, J. Pou, J. Zaragoza, P. Rodriguez and R. Pindado. Modulation Strategies for a Low-Cost Motor Drive. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEEExplore Digital Library*. July 2006. Montreal, Canada. Vol.: 2, pp.: 1492-1497.
- [12] D.C. Rus, N.S. Preda, I.I. Inceza, M. Imecs and Cs. Szabó. Comparative analysis of PWM techniques: Simulation and DSP implementation. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR'10). IEEEExplore Digital Library*. May 2010, Romania. Vol.: 3, pp.: 1-6.
- [13] J.S. Artal-Sevil, R. Dufo, J.L. Bernal-Agustín and J.A. Domínguez. Asymmetrical multilevel inverter with staircase modulation for variable frequency drives in fractional horsepower applications. *17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE'15 Europe. IEEEExplore Digital Library*. September 2015. Geneva; Switzerland; pp.: 1-10.
- [14] E. Babaei and S.H. Hosseini. New cascaded multilevel inverter topology with minimum number of switches. *Energy Conversion and Management. Elsevier ScienceDirect*. Volume 50, issue 11; pp.: 2761-2767, November 2009.
- [15] J. Venkataramanaiah, Y. Suresh, A. Kumar Panda. A review on symmetric, asymmetric, hybrid and single DC sources based multilevel inverter topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier ScienceDirect*. Volume 76; pp.: 788-812, September 2017.
- [16] I. Colak, E. Kabalcı and R. Bayindir. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management. Elsevier ScienceDirect*. Vol. 52, issue 2; pp.: 1114-1128, February 2011.
- [17] A.M. Mahfuz-Ur-Rahman, Md. Mazharul Islam and Md. Rabiul Islam. Performance analysis of modulation techniques in multilevel inverters for direct grid connected photovoltaic arrays. *9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE'16). IEEEExplore Digital Library*. December 2016, Bangladesh; pp.: 66-69.
- [18] M.C. Di Piazza and M. Pucci. Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives. *Electric Power Systems Research. Elsevier ScienceDirect*. Volume 136, pp.: 270-280, July 2016.
- [19] Y. Ko, M. Andresen, G. Buticchi, J.S. Lee and M. Liserre. Modulation strategy for highly reliable cascade H-Bridge inverter based on discontinuous PWM. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'17). IEEEExplore Digital Library*. March 2017. Tampa, Florida (USA). pp.: 3241-3246.
- [20] A. Babaie, B. Karami and A. Abrishamifard. Improved equations of switching loss and conduction loss in SPWM multilevel inverters. *7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference, PEDSTC'16. IEEEExplore Digital Library*. February 2016. Tehran, Iran; pp.: 559-564.
- [21] D.A.B. Zambra, C. Rech, F.A.S. Goncalves and J.R. Pinheiro. Power losses analysis and cooling system design of three topologies of multilevel inverters. *IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEEExplore Digital Library*. June 2008. Rhodes, Greece; pp.: 4290-4295.