

ALGORITMO SPWM BASADO EN REGLAS PARA EL CONVERTIDOR MATRICIAL MONOFÁSICO

RULE-BASED SPWM ALGORITHM FOR THE SINGLE-PHASE MATRIX CONVERTER

Ingrid Vanessa Villegas Juárez

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
lis19111809@irapuato.tecnm.mx

Sergio Constantino Yáñez Campos

Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, México
sergio.yc@irapuato.tecnm.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 12/junio/2024

Resumen

En este artículo se presenta un algoritmo SPWM simplificado basado en reglas de inferencia para controlar un CM como divisor y multiplicador de frecuencia. El desarrollo del escrito es como sigue. En la sección 1 se aborda el estado del arte del CM como divisor y multiplicador de frecuencia y se propone un algoritmo SPWM simplificado para controlar el CM como variador de frecuencia. En la sección 2 se discute el principio de operación del CM como variador de frecuencia, sus modos de operación y se presenta el diseño del algoritmo SPWM simplificado. El desempeño del CM controlado con el algoritmo propuesto se corrobora mediante simulaciones en la sección 3. En la sección 4 se discute el comportamiento del algoritmo propuesto y se describen algunas ventajas respecto a otros trabajos presentados en esta área de investigación. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del artículo.

Palabras Clave: Algoritmo SPWM, Convertidor matricial, Reglas de decisión, Reglas de inferencia, Variador de frecuencia.

Abstract

This paper presents a simplified SPWM algorithm based on inference rules to control a CM as a frequency divider and multiplier. The development of the writing

is as follows. Section 1 addresses the state of the art of the CM as a frequency divider and multiplier and proposes a simplified SPWM algorithm to control the CM as a frequency converter. Section 2 discusses the principle of operation of the CM as a frequency converter, its operating modes, and the design of the simplified SPWM algorithm is presented. The performance of the CM controlled with the proposed algorithm is corroborated by simulations in section 3. In section 4 the behavior of the proposed algorithm is discussed, and some advantages are described with respect to other works presented in this research area. Finally, section 5 presents the conclusions of the article.

Keywords: *Decision rules, Frequency multiplier and divider, Inference rules, Matrix converter, SPWM algorithm.*

1. Introducción

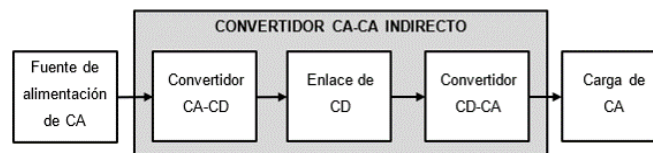
A continuación, se señalan los principales convertidores de potencia haciendo énfasis en el de CA-CA. Se presentan sus características y el diagrama a bloques general de estos, para después hablar de sus aplicaciones. Posteriormente se abordan el cicloconvertidor y el convertidor matricial; se presentan sus topologías y sus formas de onda como divisores de frecuencia. Finalmente se discute el estado del arte del convertidor matricial como variador de frecuencia.

Actualmente, los sistemas electrónicos de potencia hacen frente al problema de realizar una conversión de energía eficiente para alimentar la carga con un voltaje que cumpla con sus valores nominales. Con este propósito, los convertidores electrónicos de potencia realizan los siguientes tipos de conversiones de energía: Conversión de CD (Corriente Directa) a CA (Corriente Alterna), Conversión de CD a CD, Conversión de CA a CA y Conversión de CA a CD.

Convertidores CA-CA

Los convertidores electrónicos de potencia CA-CA tienen la capacidad de transformar un voltaje de CA con una amplitud y frecuencia determinados en una forma de onda de voltaje de CA con amplitud y frecuencia deseadas que cumpla con las características nominales de la carga. Existen dos métodos para realizar la

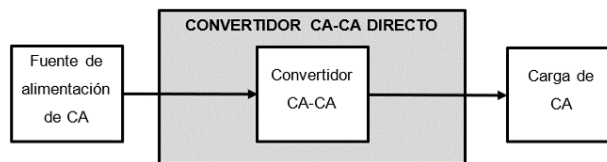
conversión CA-CA. Un método realiza la conversión de forma indirecta o en dos etapas. El segundo método, realiza la conversión CA-CA de forma directa empleando cicloconvertidores o convertidores matriciales directos. El método de conversión CA-CA indirecto o de dos etapas está formado por un rectificador, un inversor y un capacitor o un sistema de almacenamiento de energía llamado enlace de CD. La figura 1 ilustra el diagrama de bloques general de la conversión de dos etapas.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Diagrama de bloques de un convertidor CA-CA indirecto.

Normalmente, el método indirecto utiliza tres algoritmos de control; uno para la etapa CA-CD (rectificador controlado), otro para la etapa CD-CA (inversor), y otro para controlar el nivel de voltaje en el enlace de CD. Además, es necesario incluir los esquemas de modulación del rectificador controlado y el inversor [Cobreces, 2005], [Qin, 2014], [Tcai, 2017]. Por otro lado, el método de conversión directa CA-CA no incluye el capacitor o enlace de CD en su topología, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Diagrama de bloques de un convertidor CA-CA directo.

Esto representa una ventaja debido a que el capacitor es el elemento que se daña con más frecuencia en los convertidores electrónicos de potencia y acorta la vida útil de los convertidores [Szcześniak, 2015]. En adición, solo es necesario un controlador y un esquema de modulación para generar las señales de disparo que

gobiernan el encendido y apagado de los elementos de conmutación del convertidor. Normalmente, el esquema de control y modulación de los convertidores CA-CA directos es más sencillo y transparente en contraste a los convertidores CA-CA de dos etapas. Los convertidores CA-CA como el cicloconvertidor y el convertidor matricial directo tienen una gran variedad de aplicaciones. Entre ellas, se pueden mencionar las siguientes:

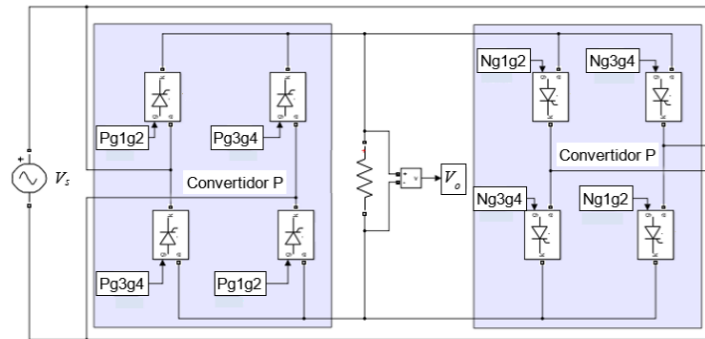
- Control de velocidad de máquinas de CA [Brindha, 2018], [Vargas, 2008].
- Calentamiento por inducción [Kumar, 2018], [Hosseini, 2008]
- Sistemas de propulsión de barcos [Maimon, 2021], [Shivam, 2020]
- Sistemas de tracción eléctrica [Drabek, 2011], [Vinodhini, 2016].
- Sistemas eólicos [Barakati, 2009], [Boumassata, 2013].

Convertidores CA-CA como variadores de frecuencia

En términos generales, un cicloconvertidor es un convertidor CA-CA sin enlace de CD que tiene la capacidad de transformar el voltaje de entrada de CA con una frecuencia de entrada (f_i), en un voltaje de salida de CA con una frecuencia de salida (f_o). Comúnmente, los cicloconvertidores están formados por elementos electrónicos de potencia que operan por conmutación natural como los tiristores, y la frecuencia de salida (f_o) está limitada a valores que son una fracción de la frecuencia (f_i) de la fuente de alimentación. El modelo de un cicloconvertidor monofásico implementado en el entorno Simulink de Matlab se ilustra en la figura 3. El modelo del cicloconvertidor está formado por dos rectificadores completos controlados. Cuando el convertidor P está funcionando, el cicloconvertidor proporciona un voltaje positivo a la carga, y cuando el convertidor N está en operación, el cicloconvertidor proporciona un voltaje negativo a la carga.

Por otro lado, el convertidor matricial directo también es un convertidor CA-CA de una sola etapa y sustituye varias etapas de conversión y el enlace de CD por una sola etapa de conversión que no emplea el enlace de CD [Vijayakumar, 2013]. El convertidor matricial ha sido adoptado en una gran variedad de aplicaciones trifásicas; sin embargo, debido a su versatilidad y capacidad de realizar los cuatro tipos de conversión de energía su popularidad en aplicaciones monofásicas ha

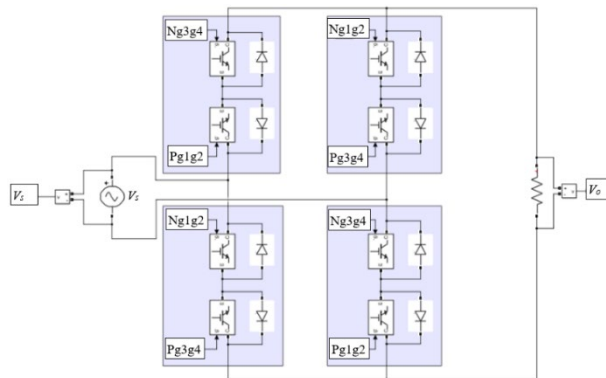
estado en crecimiento. La figura 3 ilustra el modelo del convertidor matricial monofásico implementado en el ambiente Simulink de Matlab. El convertidor está constituido por cuatro interruptores bidireccionales capaces de bloquear el voltaje inverso y pueden conducir corriente en ambas direcciones. Los interruptores bidireccionales están formados por dos IGBTs y dos diodos.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Modelo de un cicloconvertidor monofásico implementado en Simulink de Matlab.

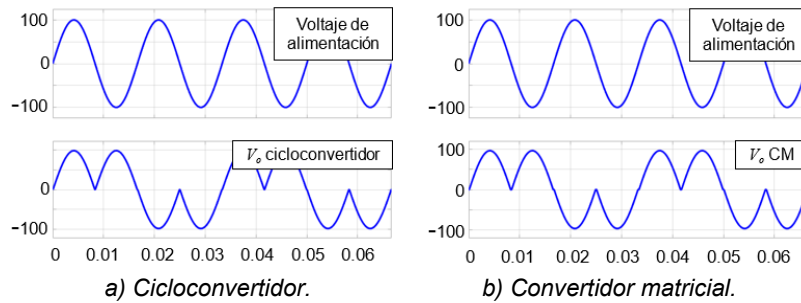
Comparativamente, tanto el cicloconvertidor como el convertidor matricial están constituidos por ocho elementos de conmutación controlados. Sin embargo, el convertidor matricial proporciona algunos beneficios adicionales sobre el cicloconvertidor. El convertidor matricial, al igual que el cicloconvertidor puede operar como divisor de frecuencia. La figura 5 ilustra las formas de onda del voltaje de alimentación y las formas de onda de salida del cicloconvertidor correspondiente a la figura 3 y del convertidor matricial que se muestra en la figura 4.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Modelo del convertidor matricial monofásico implementado en Simulink.

La figura 5 muestra claramente que no hay diferencia en el funcionamiento de ambos convertidores como divisores de frecuencia. En adición, el convertidor matricial puede operar como multiplicador de frecuencia. Además, cuenta con la capacidad de un control suave y continuo de la frecuencia de salida; estas son características de las que carece el cicloconvertidor.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Formas de onda del cicloconvertidor y el convertidor matricial.

Esquemas de modulación y estado del arte

La eficiencia de conversión de energía del convertidor matricial depende en gran medida al esquema de modulación seleccionado. Con el propósito de obtener un buen desempeño se han propuesto varias estrategias de modulación y control. Entre ellas se pueden mencionar las técnicas escalares, los métodos PWM (Modulación por Ancho de Pulso) y otras estrategias como control por histéresis y control deslizante entre otras. En este sentido, existen diversas investigaciones orientadas al mejoramiento de las estrategias de modulación del convertidor matricial monofásico. [Prakash, 2016] propone un esquema de modulación basado en SPWM (PWM Senoidal). La implementación del modelo en simulink que presentan emplea un generador de señal triangular, dos generadores de señales de referencia senoidales y un generador de pulsos por cada interruptor bidireccional; es decir, cuatro generadores de pulsos. [Rahman, 2019] propone un convertidor matricial monofásico utilizando solo cuatro elementos de conmutación controlados para realizar los cuatro tipos de conversión de energía; sin embargo, en la conversión de energía CA-CA no muestran resultados del convertidor matricial como divisor y multiplicador de frecuencia. [Satish, 2014] presenta el convertidor

matricial como un cicloconvertidor y muestra su desempeño como divisor de frecuencia empleando la estrategia SPWM. En [Chawda, 2014] presentan el desempeño del convertidor matricial monofásico como multiplicador de frecuencia, rectificador, inversor y troceador empleando la estrategia SPWM. El esquema SPWM que proponen para controlar el convertidor matricial como multiplicador de frecuencia involucra dos generadores de señales senoidales para las referencias, dos generadores de señales triangulares como señales portadoras y cuatro generadores de pulsos; un generador de pulsos para cada uno de los interruptores bidireccionales.

En este trabajo, se presenta un esquema de modulación por ancho de pulso senoidal simplificado para el convertidor matricial monofásico. La estrategia SPWM presentada se basa en reglas de inferencia que son codificadas en el lenguaje de programación de alto nivel de Matlab. Esta estrategia proporciona el beneficio de solamente utilizar como entradas al algoritmo de modulación el voltaje de alimentación del convertidor matricial, la señal portadora triangular y la señal de referencia senoidal; a diferencia de los esquemas de modulación mencionados anteriormente donde se emplean dos señales de referencia senoidales, dos señales portadoras triangulares y cuatro generadores de pulsos.

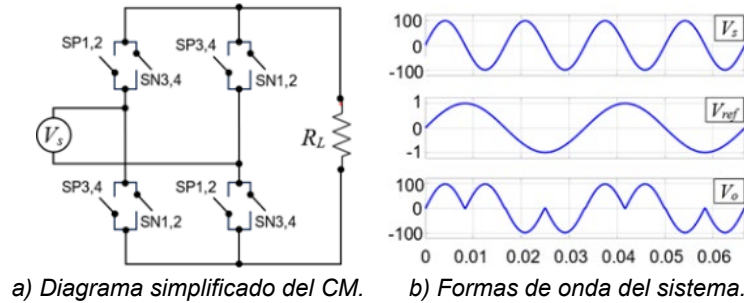
2. Métodos

En este apartado se discute el principio de operación del CM monofásico y sus modos de operación. También se aborda el esquema de modulación SPWM que es ampliamente adoptado para sintetizar el voltaje de salida de este convertidor. Finalmente, se expone la parte central de este trabajo que consiste en el establecimiento de reglas de inferencia que son la parte principal del SPWM simplificado propuesto.

Principio de operación del CM como variador de frecuencia

Hoy en día, el convertidor matricial monofásico está siendo ampliamente adoptado en una gran variedad de aplicaciones, y una de ellas es como variador de frecuencia. Para ilustrar el principio de operación del CM como variador de

frecuencia considérese la figuras6 muestra el diagrama simplificado del convertidor matricial correspondiente a la figura 4 y sus formas de onda como divisor de frecuencia sin PWM.



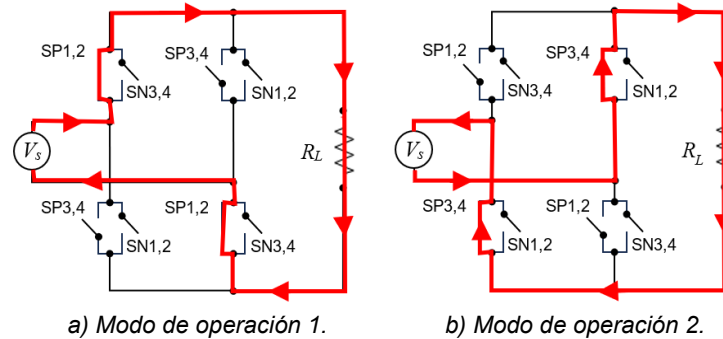
a) Diagrama simplificado del CM. b) Formas de onda del sistema.
Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Esquema simplificado del CM y sus formas de onda.

Como puede apreciarse en la figura 6b, la frecuencia de la fuente de alimentación (V_s) es igual a 60 Hz, la frecuencia del voltaje de referencia (V_{ref}) y la frecuencia del voltaje de salida (V_o) del convertidor matricial son de 30 Hz. De esta forma, el convertidor matricial opera como un divisor de frecuencia. En un periodo del V_o el CM presenta cuatro topologías o modos de operación:

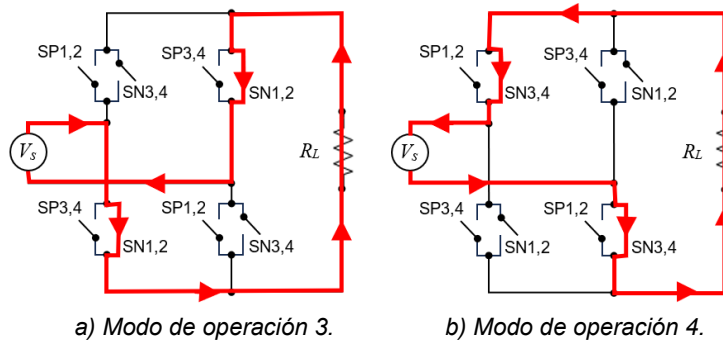
- **Modo de operación 1.** En el intervalo de tiempo de 0 a 8.3 ms, los interruptores SP1,2 se cierran y los demás interruptores permanecen abiertos. La figura 7a ilustra la topología del convertidor matricial en este modo de operación.
- **Modo de operación 2.** En el intervalo de tiempo de 8.3 a 16.6 ms, los interruptores SP3,4 se cierran y los demás interruptores permanecen abiertos. La figura 7b ilustra la topología del convertidor matricial en este modo de operación.
- **Modo de operación 3.** En el intervalo de tiempo de 16.6 a 24.9 ms, el voltaje de alimentación es positivo y el voltaje de referencia negativo. Por lo tanto, los interruptores SN1,2 se cierran para proporcionar un voltaje negativo a la carga, y los demás interruptores se abren como se ilustra en la figura 8a.
- **Modo de operación 4.** En el intervalo de tiempo de 24.9 a 33.3 ms, los voltajes de alimentación y de referencia son negativos. Por lo tanto, para

proveer un voltaje negativo a la carga, se cierran los interruptores SN3,4, y los demás interruptores se abren como se ilustra en la figura 8b.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Modos de operación 1 y 2 del convertidor matricial.



Fuente: elaboración propia.

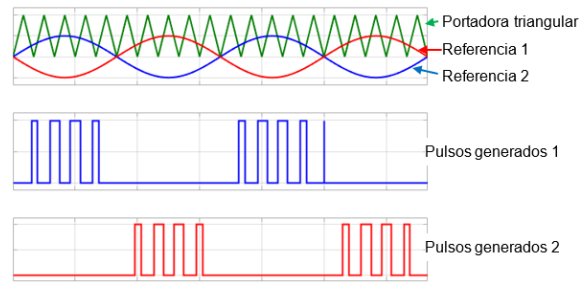
Figura 8 Modos de operación 3 y 4 del convertidor matricial.

Para obtener voltajes de salida a una frecuencia diferente a la que ilustra la figura 6b, solo es necesario ajustar el voltaje de referencia a la frecuencia deseada y verificar las condiciones del voltaje de salida para ordenar los modos de operación en una secuencia correcta que sintetice de forma adecuada el voltaje de salida deseado.

Modulación por ancho de pulso senoidal

El esquema de modulación por ancho de pulso senoidal es una estrategia ampliamente usada en una gran variedad de aplicaciones de convertidores electrónicos de potencia. El objetivo principal del SPWM es generar las señales de disparo que gobiernan el encendido y apagado de los elementos de conmutación

de los convertidores electrónicos de potencia. Las señales de disparo deben de ser generadas en una secuencia apropiada de tal forma que el convertidor sintetice un voltaje de salida con amplitud y frecuencia deseadas. La figura 9 ilustra las formas de onda típicas de un SPWM.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Modulación por ancho de pulso senoidal, SPWM.

Las señales de entrada al SPWM son una señal portadora triangular y dos señales de referencia senoidales. Las salidas del SPWM consisten en dos secuencias de pulsos que encienden y apagan los elementos de conmutación de los convertidores. La secuencia de pulsos 1 es obtenida al comparar la señal portadora triangular con la señal de referencia 1; y la secuencia de pulsos 2 se obtiene de la comparación entre la señal portadora y la señal de referencia 2. Para generar una secuencia de pulsos apropiada, se debe considerar una frecuencia de la señal portadora triangular mayor a la frecuencia del voltaje de alimentación del sistema, y la frecuencia de las señales de referencia deben de ser iguales a la frecuencia deseada del voltaje de salida del convertidor. El principal beneficio de emplear la estrategia de modulación SPWM en convertidores matriciales radica en que presenta un buen desempeño dinámico y su implementación es transparente y de baja complejidad.

Diseño del algoritmo SPWM modificado

En esta sección se presenta el diseño del algoritmo SPWM simplificado para aplicaciones del convertidor matricial monofásico como variador de frecuencia. El desarrollo del algoritmo consiste en establecer reglas de decisión a partir del

conocimiento del principio de operación del convertidor matricial; además, considera dos partes fundamentales: a) la estrategia de modulación SPWM, y b) los modos de operación del convertidor matricial.

El establecimiento de las reglas de decisión para el SPWM es transparente y pueden ser implementadas a partir de la figura 9 como muestra la ecuación 1.

$$\text{Si } V_{ref1} \text{ es mayor que } Tri \text{ entonces Pulso1 es igual a 1} \quad (1)$$

Donde: V_{ref1} es el voltaje de referencia 1, Tri es la señal portadora triangular y $Pulso1$ es el pulso generado por el SPWM.

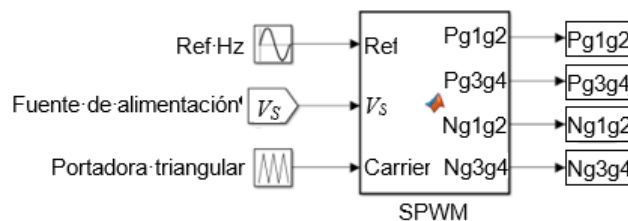
Las reglas de decisión para el tren de pulsos 2 se establece de manera similar. Ahora bien, los modos de operación del convertidor matricial son determinados por el voltaje de alimentación V_s y el voltaje de referencia V_{ref} que se ilustran en la figura 6b. Tomando esto en consideración, en la ecuación 2 se construye la regla de decisión.

$$\text{Si } V_{ref1} \text{ y } V_s \text{ son mayores que cero entonces } SP_{1,2} \text{ es igual a 1} \quad (2)$$

Esta regla de decisión establece el Modo de operación 1 que se ilustra en la figura 7a. Combinando las reglas de decisión de las ecuaciones 1 y 2 se tiene la regla de decisión de la ecuación 3.

$$\text{Si } V_{ref} > Tri \text{ y } V_{ref} > 0 \text{ entonces } SP_{1,2} = 1 \quad (3)$$

Esta regla de decisión es muy importante puesto que es clara, sencilla, y además combina el esquema de modulación SPWM y la selección del Modo de operación del convertidor matricial. Las reglas de decisión obtenidas bajo este procedimiento fueron codificadas en el lenguaje de programación de alto nivel de Matlab. Para esto se empleó el bloque de funciones de Matlab en Simulink, figura 10.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Bloque de funciones de Matlab en Simulink.

El diseño del SPWM modificado bajo este procedimiento proporciona el beneficio de solo emplear tres variables de entrada al algoritmo. Las entradas al algoritmo son el voltaje de referencia, el voltaje de alimentación del sistema y la señal portadora triangular. En contraparte, algunos trabajos de investigación utilizan hasta nueve variables de entrada al SPWM que incluyen el voltaje de alimentación, dos señales de referencia, una o dos señales portadoras triangulares y cuatro generadores de pulsos.

3. Resultados

Se evalúa el desempeño del SPWM simplificado propuesto por medio de simulaciones realizadas en la plataforma Simulink de Matlab. En las simulaciones se consideran los casos del CM como divisor de frecuencias, multiplicador de frecuencias, y también se plantean casos especiales donde la frecuencia de salida no corresponde a múltiplos o divisores enteros de la frecuencia de entrada al CM. El modelo del convertidor matricial monofásico se implementó como se muestra en la figura 4 y el esquema de modulación SPWM, figura 10. La tabla 1 muestra los parámetros del sistema usados en las simulaciones.

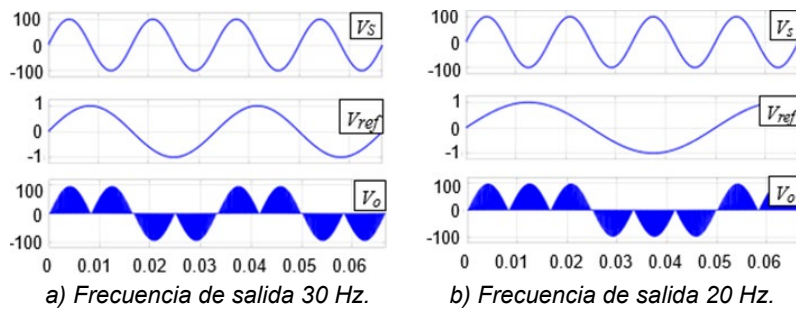
Tabla 1 Lista de parámetros.

Fuente de alimentación	100 Vp, 60 Hz
Resistencia de carga	100 Ω
Señal portadora triangular	6 kHz

Fuente: elaboración propia.

Convertidor matricial como divisor de frecuencias

La figura 11 muestra las formas de onda del voltaje de entrada y salida al convertidor matricial como divisor de frecuencias. La figura 11a ilustra el caso donde el voltaje de referencia V_{ref} tiene una frecuencia de 30 Hz. Como puede apreciarse, el algoritmo propuesto presenta un buen desempeño puesto que el voltaje de salida V_o tiene una frecuencia de salida de 30 Hz. El caso para un voltaje de referencia con frecuencia de 20 Hz se ilustra en la figura 11b. Como se aprecia, el voltaje de salida del convertidor matricial muestra una frecuencia de 20 Hz. Por lo tanto, el algoritmo propuesto presenta un buen desempeño en este caso.

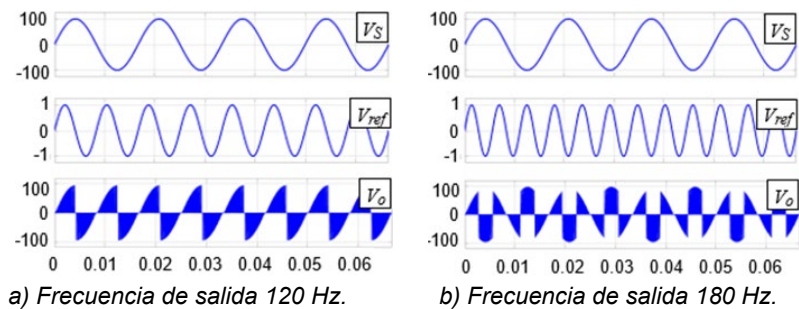


Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Convertidor matricial como divisor de frecuencia.

Convertidor matricial como multiplicador de frecuencias

En esta sección se corrobora el desempeño del algoritmo propuesto en el caso del convertidor matricial como multiplicador de frecuencias. La figura 12a ilustra el caso donde la frecuencia de la señal de referencia es de 120 Hz. Como se aprecia, el voltaje de salida del convertidor matricial efectivamente muestra una frecuencia de 120 Hz. En consecuencia, el algoritmo propuesto presenta un buen desempeño en este caso. El caso donde la frecuencia de la señal de referencia es de 180 Hz se ilustra en la figura 12b. Como se muestra, la frecuencia del voltaje de salida del convertidor matricial es de 180 Hz. Por esta razón, el algoritmo propuesto presenta un buen desempeño en este caso.



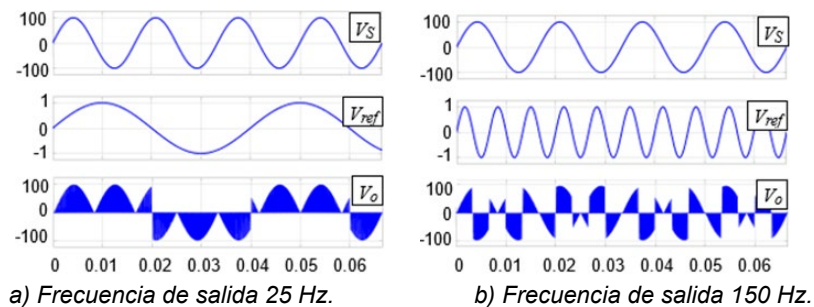
Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Convertidor matricial como multiplicador de frecuencia.

Casos especiales

Comúnmente, los variadores de frecuencia basados en convertidores matriciales son diseñados para operar como divisores de frecuencia o como multiplicadores de frecuencia y es poco común que realicen ambas operaciones.

En el caso de los multiplicadores de frecuencia, las frecuencias de salida corresponden a múltiplos enteros de la frecuencia de entrada y no se consideran múltiplos fraccionarios. Es decir, si la frecuencia de entrada es de 60 Hz, las primeras frecuencias de salida son 120 y 180 Hz y no se consideran frecuencias intermedias como 150 Hz. En el caso de los divisores de frecuencia se presenta la misma situación. Por ejemplo, si la frecuencia de entrada es de 60 Hz, las primeras frecuencias de salida son 30 y 20 Hz y no se consideran frecuencias intermedias como 25 Hz. Esto se debe a que comúnmente los modos de operación del convertidor matricial son implementados en hardware o software como “máscaras de asignación” denominadas “secuencias de conmutación” y, por lo tanto, solo son operables en frecuencias específicas. Sin embargo, puede ser conveniente que el diseño de los variadores de frecuencia considere las frecuencias intermedias mencionadas. Esto sería especialmente útil en aplicaciones donde una transición suave entre frecuencias mejora el desempeño del sistema como en el control de velocidad de motores donde el control se realiza por medio de variadores de frecuencia. A diferencia de los variadores de frecuencia diseñados bajo el concepto de “secuencias de conmutación”, el algoritmo SPWM simplificado que se presenta en este trabajo es capaz de operar satisfactoriamente en frecuencias intermedias y, por lo tanto, realizar una transición suave entre frecuencias. En este sentido, la figura 13a ilustra el caso donde el voltaje de referencia tiene una frecuencia de 25 Hz. Como se aprecia, la frecuencia del voltaje de salida efectivamente es de 25 Hz. Por lo tanto, el algoritmo SPWM presentado es capaz de operar a frecuencias intermedias menores a la frecuencia del voltaje de alimentación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Casos especiales.

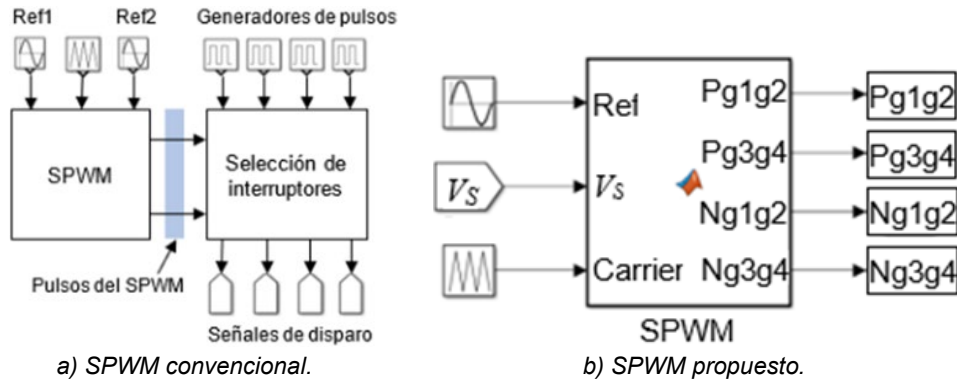
El caso del convertidor matricial como multiplicador de frecuencia y operando a frecuencias intermedias se ilustra en la figura 13b. En este caso, la señal de referencia y el voltaje de salida tienen una frecuencia de 150 Hz. En consecuencia, el algoritmo SPWM propuesto tiene un desempeño satisfactorio en frecuencias intermedias cuando el convertidor matricial opera como multiplicador de frecuencia.

4. Discusión

En este trabajo se propone un algoritmo para la estrategia de modulación SPWM que controla el encendido y apagado de los elementos de conmutación de un convertidor matricial monofásico para aplicaciones en variadores de frecuencia. El algoritmo propuesto se basa en reglas de inferencia que determinan los interruptores que deben de ser encendidos o apagados a partir de condiciones establecidas que rigen la relación entre las señales de entrada al algoritmo. En este caso, las señales de entrada al algoritmo son: el voltaje de alimentación del convertidor matricial, la señal portadora triangular y la señal de referencia.

En primer término, los resultados obtenidos mediante simulaciones corroboran un buen desempeño del algoritmo propuesto cuando el convertidor matricial se emplea como divisor de frecuencia y como multiplicador de frecuencia. Además, el algoritmo también presenta un buen comportamiento cuando las frecuencias del voltaje de salida del convertidor no son múltiplos o divisores enteros de la frecuencia del voltaje de entrada del convertidor. Cabe mencionar que esta es una característica de la que carecen otros trabajos presentados en la literatura; por ejemplo [Prakash, 2016], [Satish, 2014], [Chawda, 2014].

Por otro lado, la figura 14 muestra la estructura del algoritmo SPWM propuesto es mucho más simple y transparente que la presentada en otros trabajos [Prakash, 2016], [Satish, 2014], [Chawda, 2014]. La figura 14a muestra claramente que la generación de las señales de disparo se divide en dos sistemas: el SPWM que genera dos secuencias de pulsos y el sistema de selección de los elementos de conmutación. De esta forma, el sistema involucra siete entradas para la generación de las señales de disparo. En contraparte, el sistema propuesto solo necesita tres señales de entrada como muestra la figura 14b.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14 Estructura del SPWM.

Un beneficio sobresaliente del algoritmo propuesto consiste en que si se desea cambiar la frecuencia del voltaje de salida del convertidor solo se debe cambiar la frecuencia de la señal de referencia; a diferencia de la estructura de la figura 14a donde se debe cambiar el valor de las frecuencias de las dos señales de referencia y las frecuencias de los cuatro generadores de pulsos. Además, es claro que la implementación física de un sistema con siete entradas es mucho más complicada que la de un sistema con tres entradas.

Finalmente, cabe mencionar que el algoritmo propuesto se codificó en el lenguaje de programación de alto nivel de Matlab para posteriormente ser implantado en un microcontrolador e implementar el prototipo del sistema completo.

5. Conclusiones

En este trabajo se propone un algoritmo SPWM basado en reglas de inferencia que controla el comportamiento dinámico de un convertidor matricial aplicado como variador de frecuencia. Los resultados obtenidos mediante simulaciones muestran que el algoritmo propuesto presenta un buen desempeño al controlar el convertidor matricial como divisor y multiplicador de frecuencias. Además, el algoritmo propuesto es claro y sencillo. Por lo tanto, el algoritmo propuesto es una buena opción para controlar convertidores matriciales como variadores de frecuencia. Cabe mencionar que, como trabajo a futuro, se realizará la implementación del algoritmo propuesto en un microcontrolador y se construirá el prototipo del convertidor matricial para llevar a cabo pruebas experimentales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato por el apoyo del Proyecto de Investigación con clave 17706.23-PD.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. D., (2009). Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, No. 3, pp. 705-713.
- [2] Brindha, B., Porselvi, T., & Ilayaraja, R., (2018). Speed control of single and three phase induction motor using full bridge cycloconverter. In *2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, pp. 318-327.
- [3] Boumassata, A., Kerdoun, D., Cherfia, N., & Bennecib, N., (2013). Performance of wind energy conversion systems using a cycloconverter to control a doubly fed induction generator. *Energy Procedia*, Vol. 42, pp. 143-152.
- [4] Chawda, S., Ahirrao, D., Gaware, B., Kakade, P., & Kharade, P., (2014). Analysis of single phase matrix converter. *J. Eng. Res. Appl*, Vol. 4, No. 1, pp. 856-861.
- [5] Cobreces, S., Bueno, E., Espinosa, F., Rodríguez, F. J., & Martín, C. J., (2005). Contributions to the DC-bus voltage controller of back-to-back voltage source converters. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005*. pp. 6-pp.
- [6] Drabek, P., Peroutka, Z., Pittermann, M., & Cedi, M., (2011). New configuration of traction converter with medium-frequency transformer using matrix converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 11, pp. 5041-5048.
- [7] Hosseini, S. H., Sharifian, M. B., Sabahi, M., Yazdanpanah, A., & Gharehpetian, G. H., (2008). Bi-directional power electronic transformer for

- induction heating systems. In 2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 000347-000350.
- [8] Kumar, A., Kumar Sadhu, P., Kumar Mohanta, D., & Bharata Reddy, M. J., (2018). An effective switching algorithm for single phase matrix converter in induction heating applications. *Electronics*, Vol. 7, No. 8, pp 149.
- [9] Maimon, D., (2021). Electric propulsion of ships and its advantages for anchor lifting towing vessels. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XI Shipbuilding*, Vol. 44, No. 51-58.
- [10] Prakash, R., Nyekha, S., Sahu, P., Tiwari, D., (2016). SPMC as Single Phase to Single Phase Cycloconverter with SPWM using MATLAB/Simulink. *International Journal of Scientific Development and Research*, Vol. 1, No. 10, pp. 59-67.
- [11] Qin, Z., Wang, H., Blaabjerg, F., & Loh, P. C., (2014). Investigation into the control methods to reduce the DC-link capacitor ripple current in a back-to-back converter. In 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 203-210.
- [12] Rahman, A., (2019). Realization of single phase matrix converter using 4 controlled switches. *International Journal of Engineering, Applied and Management Sciences Paradigms*, Vol. 54, No. 7, pp. 1-4.
- [13] Satish, V., Konathala, S. K., & Kiran, A. U. R., (2014). Design and implementation of single phase matrix converter for cycloconverter operation. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3, No. 1, pp. 922-927.
- [14] Shivam, S., Singh, R., Singh, R. R., & Sitharthan, R., (2020). A Review on Power Electronics and Drives in Electric Propulsion System. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 937, No. 1, p. 012050.
- [15] Szcześniak, P., Kaniewski, J., & Jarnut, M., (2015). AC-AC power electronic converters without DC energy storage: A review. *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, pp. 483-497.

- [16] Tcai, A., Shin, H. U., & Lee, K. B., (2017). DC-link capacitor-current ripple reduction in DPWM-based back-to-back converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No.3, pp.1897-1907.
- [17] Vargas, R., Rodríguez, J., Ammann, U., & Wheeler, P. W., (2008). Predictive current control of an induction machine fed by a matrix converter with reactive power control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 12, pp. 4362-4371.
- [18] Vijayakumar, K., Raj, R. S., & Kannan, S., (2013). Realization of matrix converter as revolutionized power electronic converter employing sinusoidal pulse width modulation. In 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, pp. 1-5.
- [19] Vinodhini, J. S., Babu, R. S. R., & Glenn, J. A., (2016). Single phase to single phase step-down cycloconverter for electric traction applications. In 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), pp. 4914-3647.