

Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables

Irandi Gutiérrez Carmona
Eduardo Campos Mercado
Luis Angel Otamendi Cruz

Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables



Cómo citar este artículo: Gutiérrez-Carmona I, Campos-Mercado E, Otamendi-Cruz LA. 2023. Algoritmos de control para el aprovechamiento de las energías renovables. Revista Ciencia y Naturaleza 01 (1035): 00-00.





Conversión de energía eléctrica

La conversión de energía eléctrica es un proceso con el cual se puede pasar de corriente continua a corriente alterna o viceversa, con el fin de utilizarla en una aplicación específica. En general, el proceso de conversión, puede involucrar distintos componentes, como convertidores de energía, transformadores e incluso motores eléctricos. Los convertidores de energía llamados “inversores”, convierten la energía de corriente continua (CC) en energía de corriente alterna (CA). Este dispositivo cuenta con diferentes configuraciones: inversor monofásico, inversor trifásico e inversores multinivel.

El proceso de conversión por medio de inversores trifásicos, está dividido en tres etapas principales: modulación, potencia y filtrado. En la Figura 2 se muestra la configuración de un inversor electrónico de potencia trifásico, compuesto por tres ramas de transistores, además de su filtro compuesto por inductancias y capacitancias.

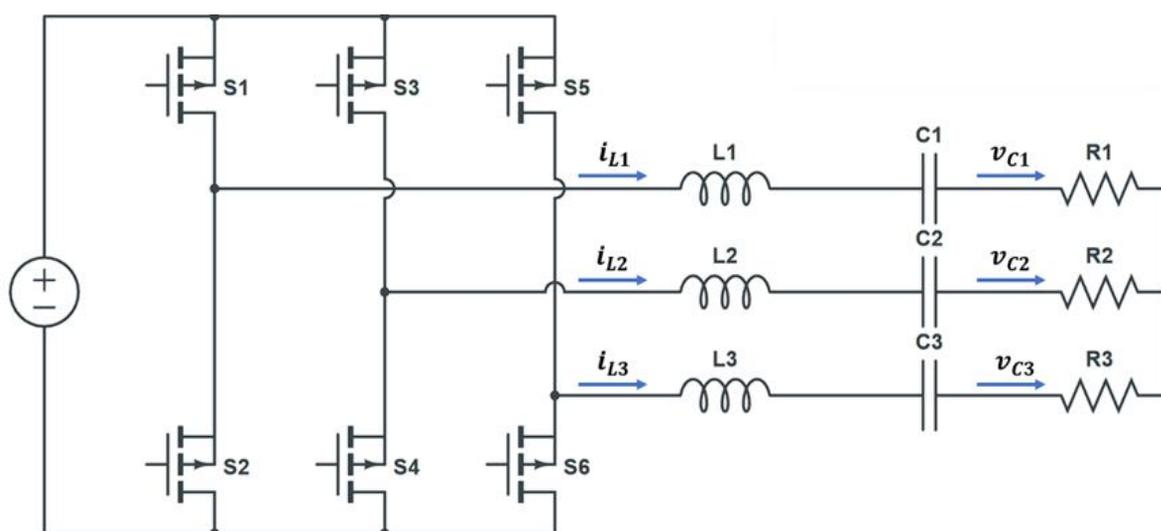


Figura 2. Funcionamiento interno del inversor electrónico de potencia trifásico.



Dentro de las etapas principales de la conversión de energía en convertidores electrónicos de potencia trifásicos, como primera etapa se encuentra la modulación, esta es generada a través de una técnica de conmutación, sirve para producir una señal que imita una forma de onda de corriente alterna. Como segunda etapa, la etapa de conmutación se utiliza para controlar los interruptores de potencia del inversor, generalmente MOSFETs o IGBTs, el control de los interruptores varía con respecto al control de modulación de ancho de pulsos (PWM por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation). Por última instancia, la etapa de filtrado funciona para eliminar cualquier ruido o fluctuación que pueda afectar el rendimiento.

En la modulación, las técnicas de conmutación juegan un rol importante. Existen diferentes técnicas de conmutación que abren paso a manipular las características de la señal eléctrica con las características dependiendo las necesidades, generalmente amplitud y frecuencia. Las distintas técnicas de conmutación, como lo son modulación de ancho de pulso de portadora aleatoria y triangular, por inyección de armónicos y pulsos múltiples, tienen diferentes aplicaciones dependiendo del objetivo de control y el sistema a controlar.

Técnicas de conmutación

Una técnica de conmutación es una manera de controlar el flujo de energía en un circuito eléctrico por medio de convertidores electrónicos de potencia, ya sea monofásico, trifásico o multinivel. Las diferentes maneras de hacerlo implican diferentes situaciones. Hablando en términos generales, es como cambiar un interruptor de encendido a apagado. En este contexto, dos de las técnicas más populares son: modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés, Sinusoidal Pulse Width Modulation) y modulación por ancho de pulso de vector espacial (SVPWM, por sus siglas en inglés, Space Vector Pulse Width Modulation).



Modulación por ancho de pulso senoidal

La técnica SPWM se basa en la comparación de magnitudes entre la señal triangular (onda portadora) y señal sinusoidal (onda moduladora). Es una técnica utilizada para sistemas de conversión de energía. Por medio de un comparador es que se otorgan las instrucciones para que el interruptor actúe de manera adecuada.

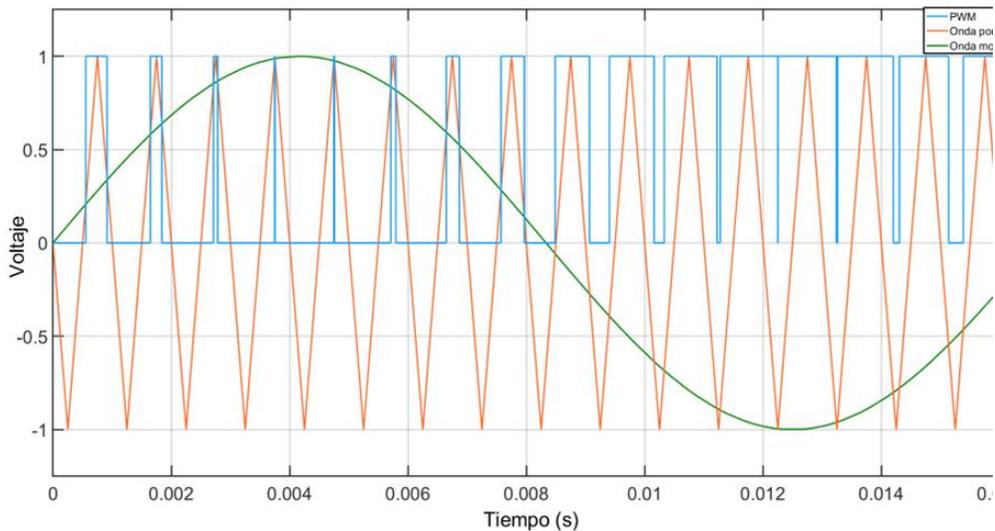


Figura 3. Representación gráfica de onda moduladora, onda portadora y el tren de pulsos.

Es importante recordar que el uso de las técnicas de conmutación depende directamente del sistema a controlar, no suelen ser precisas porque no están basadas en una estimación de la salida del sistema, además de que en algunos casos no se conocen los elementos por los que esté compuesto el sistema. Dentro de la literatura, es una de las más conocidas y empleadas para realizar comparaciones y aplicaciones que no sean exigentes. A pesar de eso, el desempeño logra ser satisfactorio, incluso, en términos de la rapidez de aplicación y funcionalidad esta es la mejor opción.



Modulación por ancho de pulso de vector espacial

En la técnica SVPWM, la señal de control se convierte en un vector representado en un marco de referencia de dos dimensiones. Además de presentar magnitud y dirección, se puede generar una señal de control para que los transistores interpreten como deben de funcionar, de tal manera que la cantidad de energía se ajuste a las necesidades del sistema de forma concisa y eficiente. La Figura 4 muestra una forma de onda de doble cresta generada con la SVPWM. La técnica SVPWM tiene una amplia gama de aplicaciones en electrónica de potencia, incluyendo:

- Control de potencia de carga en sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
- Control de energía suministrada a los sistemas de refrigeración en el procesamiento de alimentos y bebidas.
- Control de energía suministrada al control de procesos en la industria química y petroquímica.

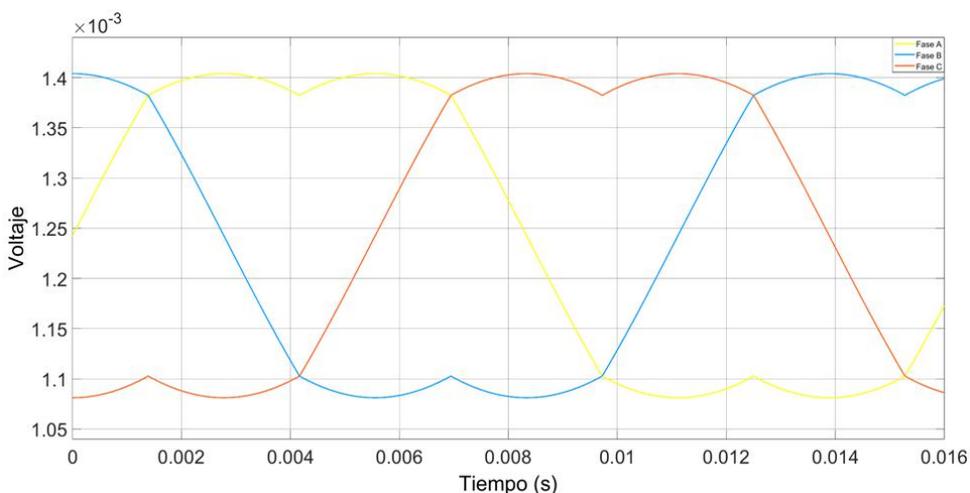


Figura 4. Onda resultante de doble cresta del SVPWM.



Tanto la técnica de conmutación SPWM y SVPWM son utilizadas en inversores para controlar la forma de onda de la señal de salida. En resumen, las técnicas de conmutación son herramientas para el control eficiente y preciso de la energía en sistemas de electrónica de potencia. La elección de una técnica de conmutación depende de las necesidades, como la potencia, eficiencia energética y la calidad de la señal de salida. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas en términos de complejidad, costo, eficiencia y rendimiento, la elección va a depender de la aplicación específica.

Las técnicas de conmutación pueden mejorar la calidad y eficiencia de la energía en sistemas de electrónica de potencia, lo que se traduce en beneficios tanto económicos como ambientales. La técnica SPWM es una buena opción para aplicaciones que no requieran una forma de onda sinusoidal de alta calidad, en cambio, SVPWM es más adecuada en aplicaciones de alta potencia que requieren una alta eficiencia.

Comparación entre las técnicas SPWM y SVPWM



La técnica SPWM en donde la distorsión armónica a nivel simulación presenta un rendimiento aceptable desde el punto de vista práctico. El rendimiento a lo largo del tiempo es estable, donde la calidad de energía por medio de esta técnica está por debajo del 5% que es adecuado según la norma IEEE-519. En cambio, la técnica SVPWM genera una mejor calidad de energía, hablando en términos de armónicos. La frecuencia de la onda portadora que se encuentra en la Tabla 1 en ambas técnicas tiene una amplia diferencia, además de su amplitud.

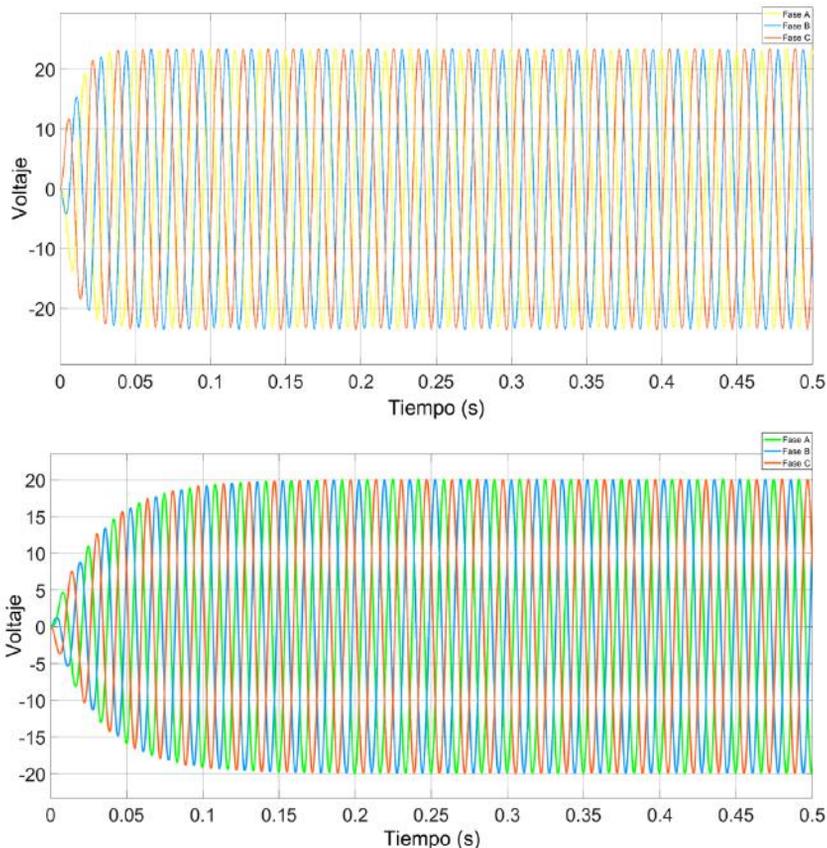


Figura 5. Forma de onda de salida de un inversor trifásico (a) SPWM (b) SVPWM.

Como se muestra en la Tabla 1, existen diferencias entre la SPWM y la SVPWM. El filtro que se menciona al inicio, es un componente esencial dentro del sistema con una enorme influencia en el rendimiento. Tanto la SPWM como la SVPWM tienen el mismo objetivo en el sistema, pero con necesidades diferentes. La SVPWM muestra un bajo nivel de distorsión armónica (THD, por sus siglas en inglés) en contraste con la SPWM. Esta diferencia entre las técnicas se extiende desde el diseño y parámetros del filtro, hasta la frecuencia de conmutación y la tensión de referencia.



Tabla. Tabla de comparación entre técnicas de conmutación.

Parámetros de SPWM	
V_{in}	30 VCD
$f_{ref} (rms) [f_a, f_b, f_c]$	35 V
$L [f_a, f_b, f_c]$	0.027 H
$C [f_a, f_b, f_c]$	230 μF
$R [f_a, f_b, f_c]$	20 Ω
$F_c [f_a, f_b, f_c]$	5KHz
$F_s [f_a, f_b, f_c]$	60 Hz
Resultados	
$V_{out}(rms) [f_a, f_b, f_c]$	[16.45, 16.49, 16.57] V
THD $[f_a, f_b, f_c]$	[0.6882, 0.597, 0.6543] %

a) Parámetros del sistema SPWM

Parámetros de SVPWM	
V_{in}	30 VCD
$f_{ref} (rms) [f_a, f_b, f_c]$	-63.3×10^{-4} V
$L [f_a, f_b, f_c]$	7700 μH
$C [f_a, f_b, f_c]$	900 μF
$R [f_a, f_b, f_c]$	20 Ω
$F_c [f_a, f_b, f_c]$	1×10^5 Hz
$F_s [f_a, f_b, f_c]$	60 Hz
Resultados	
$V_{out}(rms) [f_a, f_b, f_c]$	14.15 V
THD $[f_a, f_b, f_c]$	[0.3013, 0.2971, 0.2983] %

b) Parámetros del sistema SVPWM

Conclusiones

La SPWM es una técnica que genera una señal de control a partir de la comparación de magnitudes entre la onda portadora y onda moduladora, empleada en algunas ocasiones para control de potencia de un aerogenerador. Modular es el proceso de incluir información a una señal de forma que se pueda procesar de manera eficiente, esto es de lo que la señal de control se encarga de realizar mediante el cambio de la señal portadora.



La SVPWM representa el estado actual de un sistema dinámico mediante un vector con magnitud y dirección para controlar el sistema en función del ancho de pulso de la señal de control. Además de ser preciso, reduce los problemas de ruido en el sistema. Sin embargo, es más compleja y requiere un procesamiento mayor que el promedio para su implementación.



Comparando estas dos técnicas, SVPWM es superior a SPWM. En primer lugar, SVPWM reduce los armónicos en la señal de salida, lo que significa que la calidad de la señal de salida es sobresaliente, además, tiene una eficiencia de conversión de energía más alta que SPWM. En general, las técnicas de conmutación deben ser seleccionadas según las características del sistema a controlar y el objetivo del control. 

Conceptos

Estrategia de control: Es un plan para dirigir o fijar el comportamiento de un sistema o incluso algún proceso.

Técnica de conmutación: Definida como una herramienta o método que explica como un interruptor debe funcionar, "conecta" y "desconecta". Es una forma de controlar la electricidad con el objetivo de tener al sistema en un resultado previamente calculado.

Calidad de energía: No es más que la pureza y estabilidad en la energía eléctrica, es importante porque reduce el desgaste en los aparatos electrónicos que se conectan.

Agradecimientos

Al CONAHCYT por permitirme seguir estudiando con la beca de posgrado CVU 1039422).

Para Consulta

[1] <https://engineeringmedia.com/map-of-control>

[2] Manias SN. 2017. Inverters (DC-AC Converters). In Power Electronics and Motor Drive Systems (pp. 271-500). Elsevier <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811798-9.00006-8>

[3] Mohammad Noor SZ, Hamzah MK, Abdul Rahman NF, Hapani AF, Idris Z. 2011. XILINX FPGA design for Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) control of single-phase matrix converter. In 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, ISIEA 2011 (pp. 714–719). <https://doi.org/10.1109/ISIEA.2011.6108810>

[4] Yu X, Feng Y, Man Z. 2020. Terminal Sliding Mode Control – An Overview. In IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2 (pp. 36-52). doi: 10.1109/OJIES.2020.3040412.

[5] Khalil HK. 2002. Nonlinear Systems. Prentice Hall.

[6] Kumar KV, Michael PA, John JP, Kumar SS. 2010. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 5.

Crédito de imágenes en orden de aparición: siriwannapatphotos, peshkov (Getty Images, GI), Smileus (GI), Sketchify, Jupiterimages (Photo Images), Zffoto (GI Pro), scotspencer (GI Signature), gjp311 (GI Pro), phive2015 (GI Pro), Kester (sparklestroke), MarianVejcik (GI Pro), crstrbrt (GI), creativepriyanka, meen_na (GI), grafimedia.



Irandi Gutiérrez Carmona

Profesor del departamento de ingeniería mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Monterrey en Campus Tampico, adscrito al grupo de investigación “conversión, almacenamiento y gestión de la energía” del mismo instituto. Es especialista en control automático y ha trabajado en vibraciones mecánicas, robótica, conversión de energía.

Contacto: irandi_gutierrez@tec.mx



Eduardo Campos Mercado

Doctor en Ciencias con especialidad en control automático. Investigador por México CONAHCYT–Universidad del Istmo.

Contacto: camposmela@hotmail.com



Luis Angel Otamendi Cruz

Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo. Actualmente estudiante de la maestría en Ciencias de la Energía Eólica por la Universidad del Istmo, campus Tehuantepec.

Contacto: luis.anglk@gmail.com