

IMPACTO DE LA

MODULACIÓN EN LA VIDA ÚTIL DE UN

INVERSOR FOTOVOLTAICO



Chan Puc Freddy¹, Flota Bañuelos Manuel², Espinoza Trejo Diego³, Pacheco Catalán Daniella⁴, Sánchez Huerta Víctor⁵ y Escobedo Hernández Enrique⁶

^{1,5} Universidad de Quintana Roo
Blvd Bahía, S/N
Chetumal Quintana Roo,
México, C.P. 77019
freddy@uqroo.edu.mx

² Universidad Autónoma
de Yucatán

³ Universidad Autónoma de San
Luis Potosí

^{4,6} Centro de Investigación
Científica de Yucatán

Recibido: Noviembre 11, 2016.

Recibido en forma revisada: Diciembre 7, 2016.

Aceptado: Enero 7, 2017

Resumen: Los inversores son el elemento más débil dentro de la cadena de conversión en un sistema de generación fotovoltaico, con un tiempo de vida útil de unos cinco años, mucho menor que la vida útil de los módulos fotovoltaicos de casi 20 años. Existen diversos trabajos enfocados al estudio de sistemas fotovoltaicos y a la estimación de la confiabilidad de los convertidores de potencia. En este trabajo, se presenta un análisis del impacto de la modulación por ancho de pulso (PWM) a la vida útil de un inversor fotovoltaico. Se analiza la afectación tanto en el tiempo de vida útil como en la tasa de fallo ante un control PWM de portadora sinusoidal, una onda cuadrada y un PWM con eliminación selectiva de armónicos (2, 3, 4 y 5 ángulos de conmutación). Se presentan los resultados experimentales y el análisis de pérdidas, eficiencia y vida útil del convertidor de potencia.

+ **Palabras clave:** Confiabilidad, inversores, modulación por ancho de pulsos, sistemas fotovoltaicos.

Abstract: Inverters are the weakest link in the chain of conversion in a photovoltaic generation system element. With a lifespan of about 5 years, much less than the lifetime of photovoltaic modules almost 20 years. There are several focused on the study of photovoltaic systems and the estimation of the reliability of the power converters work. This paper presents an analysis of the impact of the pulse-width modulation (PWM), the lifetime of a photovoltaic inverter is presented. The affectation is analyzed both at the lifetime and the failure rate to a PWM control sinusoidal carrier, a square wave and a PWM with selective harmonic elimination (2, 3, 4 and 5 switching angles). Experimental results and loss analysis, efficiency and service life of the power converter are presented.

+ **Keywords:** Reliability, inverters, PWM, photovoltaic systems.

Introducción

Los sistemas fotovoltaicos (SFV) son arreglos de módulos conectados entre sí, en serie o en paralelo, cuya función es convertir la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última por medio de convertidores de potencia para los requerimientos de una aplicación.

Los principales elementos de un SFV son:

- + Arreglo de módulos solares.
- + El inversor de corriente de C D a C A.
- + Transformador de acoplamiento a la red.

El inversor es un convertidor electrónico de potencia, también llamado convertidor electrostático, cuya función principal es convertir la tensión de CD de salida de un sistema fotovoltaico (SFV) en una tensión de CA sincronizada con la red, a éste se le refiere como el elemento central de la interfaz entre la fuente de generación de energía fotovoltaica y la red eléctrica. La energía eléctrica de salida de este dispositivo puede ser monofásica o trifásica de acuerdo al tipo de carga instalada en el inmueble. Los inversores realizan otras funciones, tales como protección y control para el funcionamiento eficiente y seguro de la energía generada, por lo que es referenciado como un subsistema de acondicionamiento de potencia.

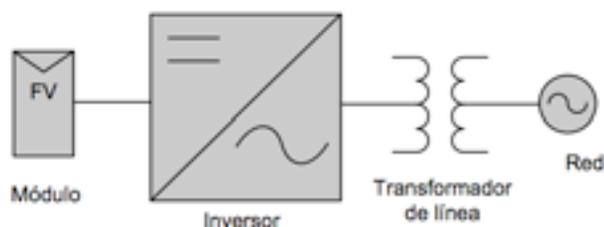


Figura 1. Elementos principales de un sistema fotovoltaico.

El rendimiento de los sistemas de conversión (inversor) depende en gran medida de la selección de la técnica particular de modulación de ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation). Las técnicas PWM se pueden clasificar de manera general como:

- + PWM a base de portadora sinusoidal (SPWM, Carrier-based Sinusoidal).

+ Modulación de vector espacial (SVM-PWM, Space Vector Modulation).

+ Eliminación selectiva de armónicos (SHE-PWM, Selective Harmonic Elimination).

En este trabajo, se analiza el impacto que tiene la técnica de SHE-PWM en la confiabilidad de un inversor. Se analiza para una eliminación de los primeros cuatro armónico simpaes ($3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$). De igual manera, se compara con una modulación SPWM y una conmutación de onda cuadrada. Dado que existe una afectación directa de la modulación sobre la distorsión armónica total (THD, Total Harmonic Distortion) de la corriente, existe una afectación en los esfuerzos eléctricos de los dispositivos del inversor. Se analiza la afectación sobre la vida útil del inversor ante variaciones de la modulación.

Técnicas de modulación

A principios de la década de 60's, fue cuando se descubrió que los armónicos de bajo orden podrían ser suprimidos mediante la adición de varios ángulos de conmutación en una tensión de onda cuadrada. Años más tarde, la idea se extendió con el uso de series de Fourier para expresar matemáticamente los contenidos armónicos de una forma de onda PWM por un grupo de ecuaciones no lineales y trascendentales. Las transiciones se calcularon entonces de tal manera que los armónicos de bajo orden se establecen en cero mientras se mantiene la fundamental en un valor predefinido. Desde su introducción, SHE-PWM ha atraído el interés de investigación y también ha sido desarrollado para diversas aplicaciones, principalmente para convertidores de alta potencia y de alta tensión, donde las pérdidas de conmutación son una preocupación importante y su reducción es de primordial importancia.

El concepto de técnicas de SHE-PWM se basa en la descomposición de la forma de onda del PWM de tensión/corriente, utilizando la teoría de Fourier, y simplemente depende de la formulación de la forma de onda dada y sus propiedades (Ecuación 1). Las diferentes formulaciones de la forma de onda se han considerado y analizado en la literatura técnica, incluyendo bipolar, unipolar y formas de onda PWM de un solo nivel o PWM multi-nivel (Enjeti, Ziogas y Lindsay, 1990; Lipo y Holmes, 2003). Encontrar la solución analítica de la forma de onda SHE-PWM es el principal reto, y la selección de un algoritmo de resolución adecuado o método se basa en gran medida en la formulación de la forma de onda. Numerosas técnicas de resolución, tales como los enfoques iterativos, las técnicas de optimización y la teoría resultante se han propuesto para la obtención de los ángulos de conmutación para diferentes formas de onda SHE-PWM (Turnbull, 1964; Enjeti y Lindsay, 1987; Kato, 1999; Wells, Nee, Chapman y Krein, 2005; Konstantinou y Agelidis, 2005 y Konstantinou y Agelidis, 2014). En este trabajo se empleó MATLAB para la resolución de cuatro casos correspondientes a la eliminación de un ángulo específico (Tabla 1).

$$f_{N(t)} = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (1)$$

Casos	Ángulos de conmutación (n)	Eliminación selectiva del armónico
I	2	3°
II	3	$3^\circ, 5^\circ$
III	4	$3^\circ, 5^\circ, 7^\circ$
IV	5	$3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ$

Tabla 1. Casos analizados de SHE-PWM.

Estimación de parámetros de confiabilidad

La confiabilidad $R(t)$, se define como la capacidad (probabilidad) de un producto de funcionar adecuadamente, bajo condiciones de operación dadas y por un periodo de tiempo especificado, sin exceder los niveles aceptables de fallas. La confiabilidad está definida por (Ecuación 2).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

La (Ecuación 1) se conoce como el modelo exponencial de la Confiabilidad.

Siendo λ , la tasa de fallo, y se define como la razón del número de fallas por unidad de tiempo; sus unidades son fallas por 10⁶ horas. Esta es quizá la distribución más importante en trabajos de confiabilidad y se usa casi exclusivamente para la predicción de confiabilidad de equipo electrónico (Hnatek, 2002; Kales, 2008; O'Connor, 2002; Pecht y Nash, 1994).

El tiempo medio entre fallas (MTBF, Mean Time Between Failures) es el promedio de la vida útil de un elemento. Cuando la tasa de fallo λ es constante, la relación entre el MTBF y la tasa de fallo está definida por:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

El Rome Air Development Center (RADC) usa el modelo de Eyring, un refinamiento del modelo de Arrhenius para estimar la tasa de fallo, considerando los ajustes π relacionados con los esfuerzos eléctricos y de medio ambiente (Military Handbook 338-B; Military Handbook 217-F; Economou, 2004; Morris y Reilly, 1993; Kleyner y Bender, 2003).

Un modelo típico para la estimación de la tasa de fallo es:

$$\lambda_c = \lambda_b (\pi_E \pi_A \pi_Q \pi_P \pi_S \pi_{CX} \dots) \quad (4)$$

Donde:

- λ_c = tasa de fallo ajustada (fallas por 10⁶ horas)
- λ_b = tasa de fallo base, (fallas por 10⁶ horas)
- π_E = el factor ambiental
- π_A = el factor de aplicación
- π_Q = el factor de calidad
- π_P = el factor del rango de potencia
- π_S = el factor de esfuerzo
- π_{CX} = el factor de complejidad.

Todos los factores π sirven para ajustar la tasa de fallo (λ_b) a las condiciones de operación y a las del medio ambiente de la aplicación particular. Los factores ambientales consideran el medio ambiente (por ejemplo: laboratorio, industria, carretera, aéreo, etc.). Los factores de aplicación consideran los diversos usos del dispositivo, los factores de calidad consideran los materiales de fabricación, la cantidad de partes blindadas y otras variables que afectan la calidad; los factores del rango de potencia consideran el nivel de potencia (watts) del dispositivo, el factor de esfuerzo considera la cantidad de degradación en la aplicación del dispositivo; el factor de complejidad (en ocasiones es más de uno) trata con los ajustes de la complejidad electrónica del dispositivo.

Pruebas experimentales

Se implementaron los casos descritos en la Tabla 1, para un control SHE-PWM. En las Figuras 2b, 2c, 2d y 2e se observa la modulación para 2, 3, 4 y 5 ángulos de conmutación respectivamente. De manera adicional se implementó un control para onda cuadrada (Figura 2a) y un control para onda sinusoidal SPWM (Figura 2f).

La Figura 3 muestra el contenido armónico para la corriente de salida del inversor para cada tipo de modulación implementada. La Figura 3a) muestra el contenido armónico para un control de onda cuadrada. Puede notarse el amplio contenido armónico para este caso, donde se visualizan todos los armónicos impares. En las figuras 3b, 3c, 3d y 3e se observa la eliminación del 3°, el 5°, el 7° y el 9° armónico respectivamente. En el caso de la Figura 3f), corresponde a una modulación SPWM, en la cual puede observarse un bajo contenido de armónicos de baja frecuencia.

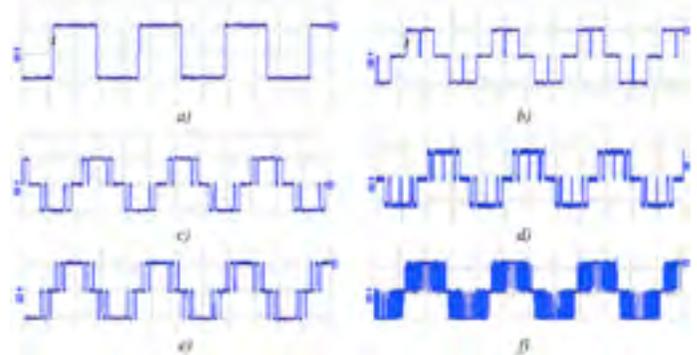


Figura 2. Formas de onda del voltaje de salida para los diferentes tipos de modulación.





La distorsión armónica total (THD) es la razón entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o armónica fundamental. Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales, ya que se constituye una medida de la coincidencia de formas entre una onda y su componente fundamental (IEC 61000-3-6 y EEE 519-1992). Con el contenido armónico obtenido, es posible calcular la distorsión armónica total THD, en cada caso empleando (Ecuación 5).

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_{h(rms)}^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

La Figura 4 muestra la distorsión armónica total (THD), así como la corriente Irms para cada tipo de modulación. La corriente Irms puede calcularse empleando (Ecuación 6). Puede notarse una disminución en la THD a medida que se incrementa el número de ángulos de conmutación a la modulación. Es debido a que la eliminación selectiva de armónicos permite reducir el número de elementos I_h en la ecuación (Ecuación 6). Sin duda, el caso del SPWM es el mejor dado que el contenido armónico es cercano a cero; en el caso de la señal de onda cuadrada, se tiene el peor caso con un valor aproximado de 40%.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_{h(rms)}^2} \quad (6)$$

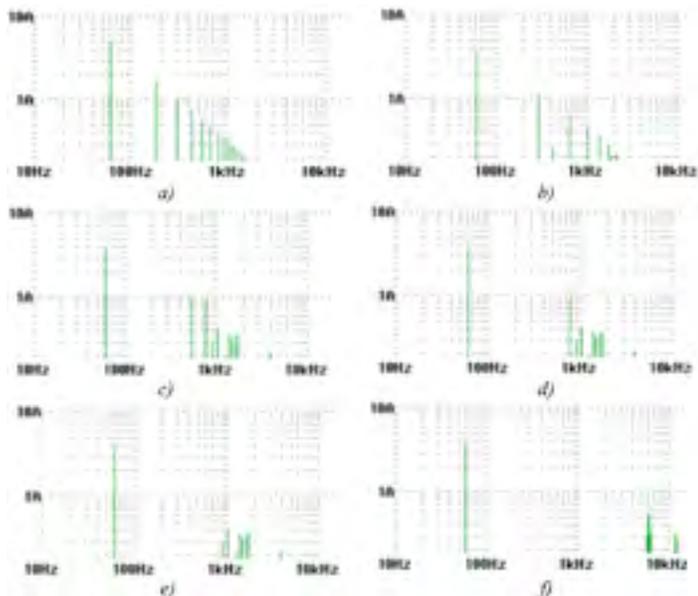


Figura 3. Contenido armónico para cada tipo de modulación.

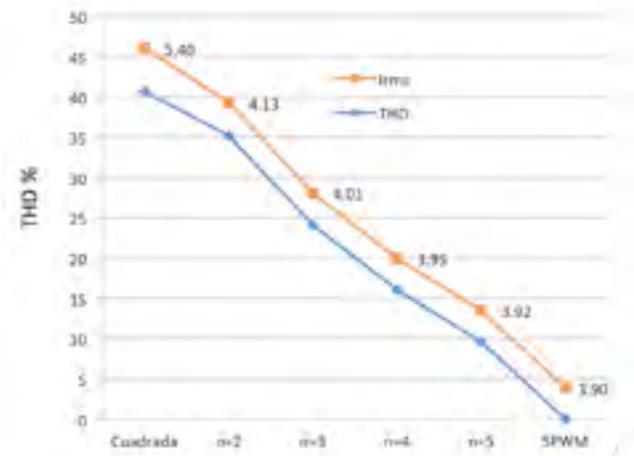


Figura 4. Distorsión armónica total THD y corriente Irms para cada tipo de modulación.

La Figura 5 muestra la eficiencia obtenida para cada tipo de modulación. Puede notarse un incremento en la eficiencia a medida que aumenta el número de ángulos de conmutación (n). Sin embargo, para n=5 se tiene una reducción de la eficiencia respecto a n=4, esto debido a que al aumentar los ángulos de conmutación se incrementa las pérdidas por conmutación Psw y las pérdidas por conducción Pcond (Figura 6). Las pérdidas por capacitancia de compuertas Pxc prácticamente se mantienen para los diferentes valores de n.

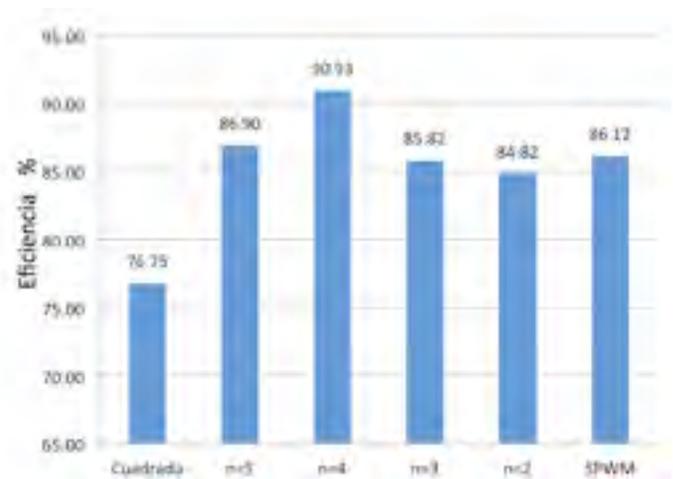


Figura 5. Eficiencia global del inversor para cada caso analizado



Figura 6. Distribución de pérdidas.

El incremento en pérdidas se ve reflejado en la vida útil del inversor (MTBF). En el caso de la señal de onda cuadrada se observa un gran contenido armónico, una baja eficiencia y, por ende una vida útil menor que en los demás casos. En la Figura 7 se observa el comportamiento para cada caso analizado. Para temperaturas mayores a 40 grados, la vida útil se reduce a menos de 10 años de operación.

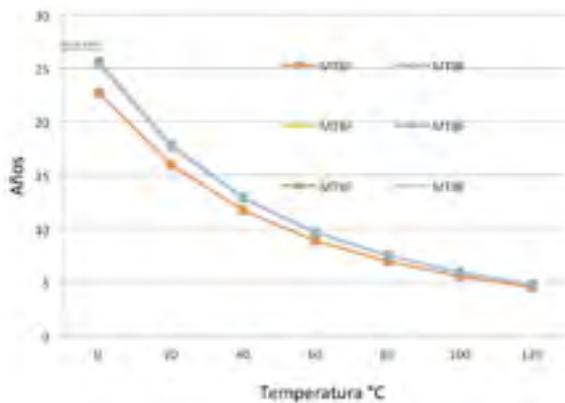


Figura 7. Tiempo de vida útil del inversor para cada tipo de modulación.

La Figura 8 muestra el comportamiento de la tasa de fallo para la modulación SHE-PWM con $n=5$, SPWM y la forma de onda cuadrada. No se nota una diferencia considerable entre estos tipos de modulación; incluso a temperaturas elevadas, no se incrementa la diferencia en la tasa de fallo entre ellas.

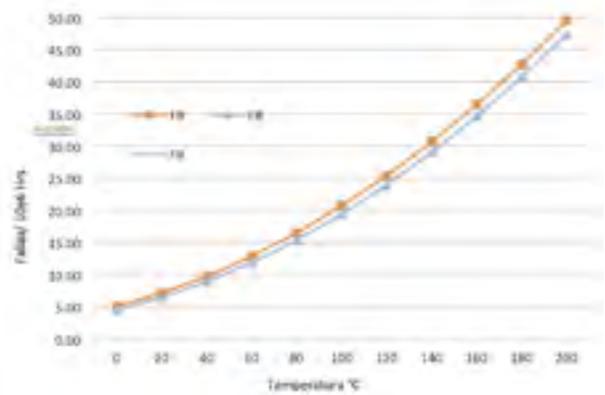


Figura 8. Tasa de fallo del inversor para modulaciones SPWM, Onda Cuadrada y SHEPWM.

Conclusiones

El tipo de modulación en un inversor tiene una afectación sobre el tiempo de vida útil, sin embargo en todos los casos analizados el valor máximo diferencial fue de un 8% entre el caso de mayor contenido armónico (onda cuadrada) y el de menor contenido armónico ($n=5$ y SPWM).

A pesar que la diferencia en THD es de casi 40% y en eficiencia fue una diferencia de 14%, en el caso del MTBF no fue tan amplia. El parámetro que sigue determinando el mayor impacto sobre el MTBF es la temperatura. Para el inversor analizado, una temperatura de operación menor a los 40 °C, permitirá un tiempo de vida de al menos unos diez años.

Bibliografía

- †P. N. Enjeti, P. D. Ziogas and J. F. Lindsay, "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation," in *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 2, pp. 302–316, Mar./Apr. 1990.
- †T. A. Lipo and D. G. Holmes, *Pulse-width modulation for power converters principles and practice*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2003.
- †F. G. Turnbull, "Selected harmonic reduction in static dc-ac. inverters," *IEEE Trans. Communication and Electronics*, vol. 83, no. 73, pp. 374–378, Jul. 1964.
- †P. Enjeti and J. F. Lindsay, "Solving nonlinear equations of harmonic elimination PWM in power control," in *IEE Electronics Letters*, vol. 23, no. 12, pp. 656–657, Jun. 1987.
- †T. Kato, "Sequential homotopy-based computation of multiple solutions for selected harmonic elimination in PWM inverters," in *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 46, no. 5, pp. 586–593, May 1999.
- †J. R. Wells, B. M. Nee, P. L. Chapman and P. T. Krein, "Selective harmonic control: A general problem formulation and selected solutions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, pp. 1337–1345, 2005.
- †G. Konstantinou and V. G. Agelidis, "Bipolar switching waveform: Novel solution sets to the selective harmonic elimination problem," in *Proc. IEEE ICIT*, 2010, pp. 696–701.
- †G. Konstantinou and V. G. Agelidis, "On re-examining symmetry of two-level selective harmonic elimination PWM: Novel formulations, solutions and performance evaluation," *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 185–197, 2014.
- †Eugene Hnatek, *Practical Reliability of Electronic Equipment and Products*. Marcel Dekker Inc. 2002.
- †Paul Kales. *Reliability for technology*, Engineering and Management. Editorial Prentice Hall, 2008.
- †Patrick D.T. O'Connor; *Practical reliability engineering*; John Wiley and Sons, Chichester; England 2002.
- †M. Pecht, F. Nash, "Predicting the reliability of electronic equipment"; *Proc. of the IEEE Vol. 82, Issue 7; July 1994* Page(s):992 – 1004.
- †*Electronic Reliability Design Handbook, Military Handbook 338-B*, 1998.
- †*Reliability Prediction of Electronic Equipment, Military Handbook 217-F*, 1991.
- †M. Economou, "The Merits and limitations of reliability Predictions," *Proc. of Reliability and Maintainability Annual Symposium, RAMS 2004* Page(s):352 – 357.
- †S.F. Morris, J.F. Reilly, "MIL-HDBK-217 a favorite target", *Proc. of Reliability and Maintainability Annual Symposium, RAMS 1993* Page(s):503 – 509.
- †A. Kleyner, M. Bender; "Enhanced reliability prediction method based on merging military standards approach with manufacturer's warranty data", *Proc. of Reliability and Maintainability Annual Symposium. RAMS 2003* Page(s):202 – 206.
- †IEC 61000-3-6: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of disturbing installations to MV, HV and EHV power systems*, 2008.
- †*IEEE Std. 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE, 1992.*

