

Algoritmo Mppt Mediante Variación de Fase de Amplitud en Inversor Fotovoltaico Multinivel Conectado a la Red

Mppt Algorithm Using Amplitude Phase Variation in Multilevel Grid Connected Photovoltaic Inverter

^aLuis David Pabón-Fernández, ^bJésus Andres Camargo-Pacheco, ^cEdison Caicedo-Peñaranda, ^dJorge Luis Díaz-Rodríguez, ^eAldo Pardo-García

 ^aMagíster controles industriales, davidpabon@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 ^bIngeniero eléctrico, jacp_3008@hotmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 ^cMagíster controles industriales, eacaicedop@gmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 ^dMaestría en automática, jdiazcu@gmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 ^ePosdoctor en ingeniería eléctrica, apardo13@hotmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Recibido: Julio 10 de 2020 Aceptado: Noviembre 19 de 2020.

Forma de citar: L.D. Pabón-Fernández, J.A. Camargo-Pacheco, E. Caicedo-Peñaranda, J.L. Díaz-Rodríguez, A. Pardo-García, “Algoritmo Mppt Mediante Variación de Fase de Amplitud en Inversor Fotovoltaico Multinivel Conectado a la Red”, *Mundo Fesc* vol. 10, no. 19, pp. 195-213, 2021

Resumen

En este artículo se presenta un inversor fotovoltaico multinivel monofásico de puente H en cascada, de fuente común de dos etapas, que adopta un algoritmo de seguimiento de máximo punto de potencia que al mismo tiempo permite realizar la sincronización y monitoreo de la red, se utiliza el convertidor de puentes H en cascada de fuente común de 2 etapas con el fin de que el dispositivo completo funcione con una única fuente, proporcionada por el arreglo de paneles fotovoltaicos, y permita tener el máximo número de niveles en la onda de tensión que para este caso sería de 9. Para el algoritmo se utiliza un PLL como técnica de sincronización y la estrategia de control propuesta permite regular la potencia activa y reactiva de una manera simplificada mediante el cambio del ángulo de fase y amplitud de la señal sinusoidal modulada que controla el inversor. Para obtener el máximo punto de potencia se controla el ángulo de fase y para regular el aporte de reactivos se varía la amplitud de la onda modulada. En el artículo se describe los principios de funcionamiento tanto del inversor como de la técnica propuesta, de igual forma se presenta el modelado del sistema en el software especializado Simulink de Matlab y se prueba frente a diferentes escenarios de irradiancia, temperatura y carga con el fin de verificar la respuesta del dispositivo propuesto frente a cambios que permitan validar el correcto funcionamiento del control y el inversor.

Palabras clave: Inversor multinivel, sistema fotovoltaico, seguimiento de máximo punto de potencia, algoritmo de sincronización, amplitud y fase modulada

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: apardo13@hotmail.com



Abstract

This paper presents a two-stage, common-source, single-phase, cascade, H-bridge, multilevel photovoltaic inverter that adopts a maximum power point tracking algorithm that at the same time enables synchronization and grid monitoring. the 2-stage common source cascade H-bridge converter allows that the entire device works with a single source, provided by the array of photovoltaic generator, and allows the maximum number of levels in the voltage waveform, for this case it would be 9. For the algorithm, a PLL is used as a synchronization technique and the proposed control strategy allows to regulate the active and reactive power in a simplified way by changing the phase angle and amplitude of the modulated sinusoidal signal that controls the inverter. To the maximum power point tracking, the phase angle is controlled and to regulate the supply of reactive power the amplitude of the modulated wave is modified. The article describes the operating principles of both the inverter and the proposed technique, in the same way the modelling of the system is presented in the specialized software Matlab Simulink and it is tested in different irradiance, temperature and load scenarios in order to verify the response of the proposed device faces changes that allow validating the correct operation of the control and the inverter.

Keywords: Multilevel inverter, photovoltaic system, maximum power point tracking, synchronization algorithm, amplitude and phase modulated

Introducción

En la actualidad las fuentes alternativas de energía han tenido un auge sin precedentes, ya que es de suma importancia para la mitigación del cambio climático la reducción del impacto negativo de las fuentes convencionales de energía. Por ello se ha extendido el uso de sistemas fotovoltaicos (FV), ya que estos se ajustan como solución del deterioro ambiental provocado por las emisiones de gases de invernadero [1].

En los sistemas fotovoltaicos conectados a red, la energía eléctrica generada es inyectada íntegramente, con el fin de que sea utilizada en la distribución local. En el escenario actual, de baja penetración en la red de energía solar fotovoltaica, este tipo de energía no debe satisfacer ninguna demanda de consumo de forma directa [2], por tanto, no necesitan incorporar equipos de acumulación de energía ya que la potencia generada se entregará en los instantes de buena irradiancia y en condiciones de baja irradiancia o instantes nocturnos no se entregará potencia, el sistema convencional respaldará la energía requerida por las cargas en esos instantes [3].

Este comportamiento se ajusta muy bien a

la curva de demanda de energía eléctrica en zonas comerciales o industriales en donde las principales labores se hacen en el día, en los momentos en que más energía generan los paneles, (cuando hay luz solar), [4] Esto junto con la no emisión de gases de invernadero hacen atractiva a la energía solar fotovoltaica como alternativa para avanzar en la lucha contra el cambio climático y la contaminación ambiental [1].

A pesar del gran auge de la energía solar fotovoltaica los inversores utilizados en estos sistemas, elementos primordiales en este tipo de generación, aun no son dispositivos completamente desarrollados, por lo que en los últimos años se han planteado diferentes estrategias para optimizar el funcionamiento de estos [4]; utilizar topologías de convertidores multinivel y técnicas de modulación avanzadas son propuestas que han tenido auge dentro del campo de las optimizaciones [5]- [8].

Dentro de estas propuestas, la topología de inversor multinivel en cascada puente H ha llamado la atención, ya que requiere la cantidad mínima de componentes, y tiene el potencial para aplicaciones de interconexión con el servicio eléctrico, además de brindar posibilidades de aplicar técnicas de

modulación y de conmutación suave [9], a comparación de otras topologías como la de diodos anclados y capacitor flotante [10].

En relación al número de fuentes de corriente directa requeridas y los niveles de voltaje de cada puente H, la topología presenta dos variantes, la simétrica y la asimétrica, esta última se caracteriza porque los voltajes de cada puente son diferentes, la diferencia de voltajes y el aislamiento galvánico pueden ser obtenidos por medio de transformadores, permitiendo obtener más niveles de tensión a la salida con una única fuente de tensión, esta variante es conocida como puentes H en cascada de fuente común [11]. Con esta topología se puede obtener hasta nueve niveles utilizando tan solo dos etapas de puentes H y dos transformadores, estos además de brindar una construcción de onda escalonada permiten tener un aislamiento galvánico entre la entrada y la salida del inversor [12],[13].

En cuanto a las técnicas modulación utilizadas en el control de los convertidores multinivel [14], existe una muy popular conocida como modulación PD-PWM (Phase disposition pulse width modulation), esta se caracteriza por la obtención de la secuencia de conmutación de los diversos puentes en H a partir de la comparación entre la señal moduladora y n portadoras de frecuencia fija uniformemente desplazadas en su nivel de continua. Se genera un pulso cuando la onda moduladora es mayor que la onda portadora; esta técnica es muy llamativa por su aplicabilidad y por permitir obtener ondas escalonadas PWM, sin embargo, no es la única, múltiples técnicas de modulación han sido desarrolladas y descritas en varios trabajos clásicos y recientes [15].

Los inversores conectados a la red deben proporcionar una forma de onda de AC sinusoidal estable que coincida con la tensión y la frecuencia de la red [16]. Para conectar

el inversor a la red se debe usar una técnica de sincronización, una técnica sencilla para realizar esto es la llamada bucle de bloque de fase (PLL); en su forma simplificada se basa en el uso de un detector de cruce por cero y un contador para medir el tiempo entre los cruces por cero de la onda de tensión de la red. Mediante la determinación de estos dos parámetros el controlador ajusta la salida del inversor según sea necesario para que coincida con los cruces por cero del voltaje de la red [16]. Sin embargo, esto presenta problemas frente a ondas distorsionadas ya sea por armónicos o muescas; la continua investigación ha permitido determinar técnicas más robustas y versátiles se han presentado en trabajos recientes [17]- [19] algunas de ellas permiten solucionar el problema de pérdida de sincronía frente a armónicos o muescas, a cambio de mayores requerimientos de cálculo y complejidad.

Los inversores de conexión a la red para sistemas fotovoltaico también integran algoritmos de búsqueda de máximo punto de potencia [20], con el fin de aprovechar la energía generada por los paneles de una mejor manera; estos algoritmos por lo general involucran un convertidor de corriente directa a corriente directa (CD/CD) que se encarga de manejar el punto de voltaje y corriente de salida del panel y mediante un inversor inyectar la energía a la red [21]-[24], estas técnicas junto con las técnicas descritas de sincronización y modulación hacen que los inversores de conexión a la red sean dispositivos complejos y con altos requerimientos de cálculo.

Dada de la versatilidad actual de los sistemas de cómputo se han realizado mejoramientos internacionales, nacionales y regionales a diversos sistemas de múltiples campos de aplicaciones [25]-[32] a un costo relativamente bajo, lo cual implica que los procesos se pueden mejorar con estrategias que involucren bajos recursos inclusive en el

área del aprendizaje [33] lo cual implica que los sistemas pueden optimizarse con soluciones económicas y versátiles.

Con el fin de simplificar los cálculos requeridos y omitir la etapa de conversión CD/CD, en este trabajo se presenta una estrategia de control de potencia simple, como alternativa para obtener el punto de máxima potencia (MPPT). Esto se hace mediante el cambio de fase y amplitud de la señal modulada del inversor fotovoltaico multinivel. El control de fase controla la potencia activa del inversor y el control de amplitud la potencia reactiva del inversor, este control sería análogo a la forma de control de los generadores síncronos en estado estacionario.

Modelado del Inversor Multinivel Conectado a la Red

A. Topología del inversor multinivel

Se selecciona la topología de fuente común con asimetría 3:1, con dos etapas de puentes H en cascada, ya que presenta grandes ventajas sobre las otras topologías al necesitar sólo una fuente de alimentación y realizar el escalonado mediante transformadores en la salida brindando el aislamiento galvánico y obteniéndose 9 niveles en la tensión de fase [12].

La topología de inversor multinivel en cascada puente H fuente común con asimetría 3:1 se muestra en la figura 1.

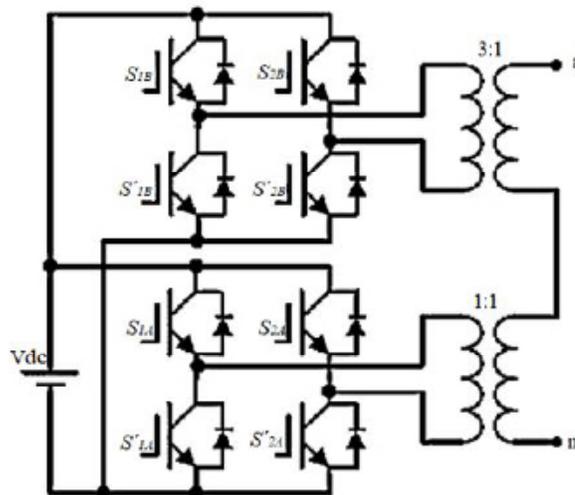


Figura 1. Inversor multinivel en cascada puente H fuente común con asimetría 3:1[12].

B. Técnica de modulación PWM

La técnica de modulación PD-PWM empleada para la obtención de 4 niveles se describe en la figura 3. Donde M es la señal moduladora, P_n es la señal portadora del nivel n positivo, P_n' es la señal portadora del nivel n negativo. La figura 2 muestra mediante un diagrama de flujo las operaciones lógicas y las señales de conmutación de cada puente H para la obtención de 4 niveles del inversor.

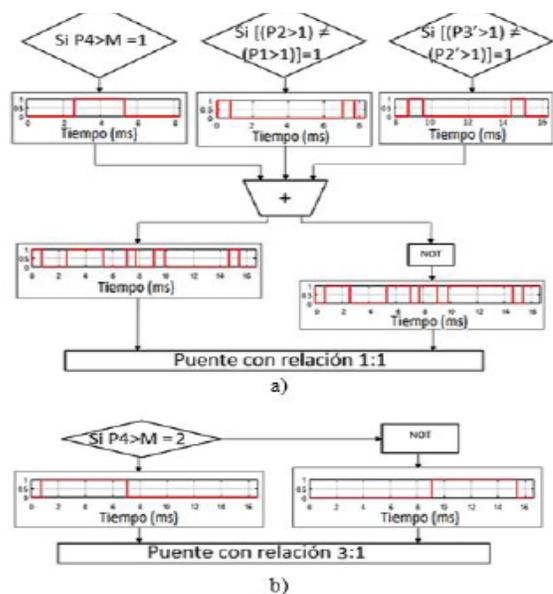


Figura 2. Operaciones lógicas de la técnica de modulación PD-PWM. a) puente H con relación 1:1. b) puente H con relación 3:1.

La forma de onda del inversor multinivel con la técnica de modulación se muestra en la figura 3. La frecuencia de las señales portadoras es de 42 kHz, la frecuencia de la señal moduladora es de 60 Hz.

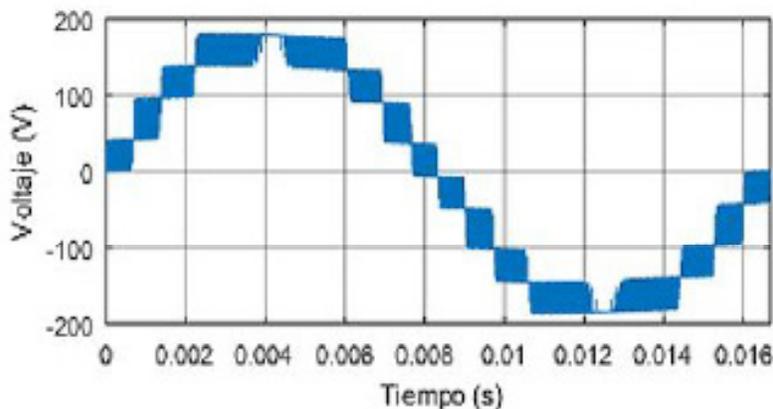


Figura 3. Forma de onda del inversor multinivel.

C. Técnica de sincronización

Son cinco condiciones que deben cumplirse para que el proceso de sincronización con la red sea posible, estas son [34]:

- Voltaje de línea.
- Frecuencia.
- Secuencia de fase.
- Angulo de fase.
- Forma de onda con la que se sincroniza el sistema.

El bucle de bloqueo de fase (PLL), rastrea la frecuencia y la fase de una señal sinusoidal mediante el uso de un oscilador de frecuencia interno. El sistema de control ajusta la frecuencia del oscilador interno para mantener la diferencia de fases en cero [35]. En la figura 4 se muestra el bucle de bloqueo de fase (PLL) empleado.

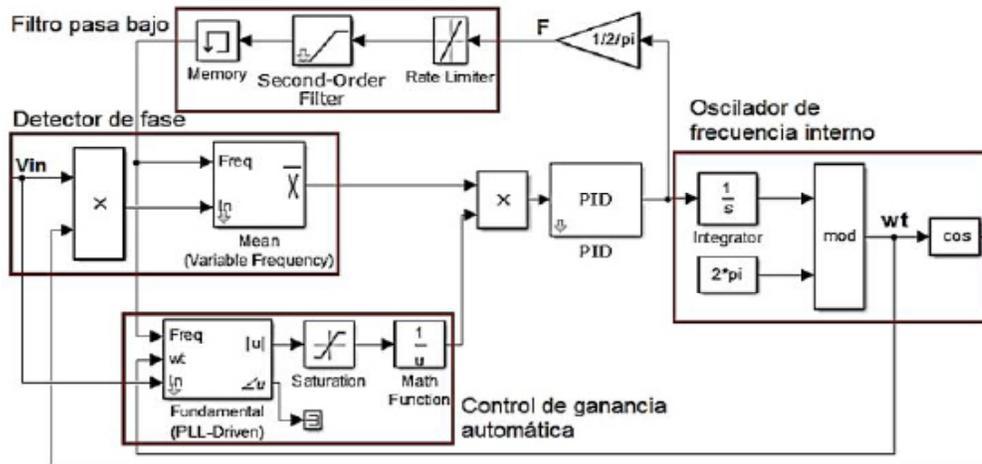


Figura 4. Bucle de bloqueo de fase (PLL) empleado.

El PLL empleado multiplica la señal de entrada (red eléctrica) con la señal del ‘Oscilador de frecuencia interno’, el resultado es una señal mixta sinusoidal, cuando la fase de las dos señales es igual, la señal tendrá un valor promedio igual a cero, al existir diferencia entre las fases de estas dos señales el producto será una señal desplazada (offset-DC), cuyo desplazamiento es proporcional a la diferencia de fase de las dos señales [35].

El ‘Detector de fase’ compara la fase y la frecuencia entre la señal de referencia y la señal generada por la etapa ‘Oscilador de frecuencia interno’ y determina el error de fase. Un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) junto con el ‘Control de ganancia automática’ mantiene la diferencia de fase igual a cero al actuar sobre un oscilador controlado.

La salida del PID, correspondiente a la velocidad angular, se filtra y se convierte a la frecuencia, en hercios, que es utilizada por el bloque ‘Mean (Variable Frequency)’ para calcular el valor promedio de la señal mixta. El controlador PID se ajusta para que opere con el valor en p.u del valor promedio.

El ‘Oscilador de frecuencia interno’ integra el valor de la frecuencia angular (w) y este valor se reinicia cuando el valor sea igual a 2π para obtener la fase cuya forma de una es diente de sierra, al aplicarle la operación coseno a dicha frecuencia se obtiene una señal que oscila y posteriormente se opera junto con la señal de la red en la etapa ‘Detector de fase’[35].

El ‘Control de ganancia automática’ calcula la magnitud de la señal de entrada en función del análisis de Fourier de una señal periódica y calcula su valor inverso, al dividir el valor promedio obtenido por la etapa ‘Detector de fase’ entre la magnitud del voltaje de la red, se obtiene el valor en p.u de la señal promedio, el controlador PID se ajusta para que el control se realice con el valor en p.u del valor promedio, el valor promedio representa la diferencia entre las fases.

El filtro pasa bajo filtra los armónicos de menor orden.

Al conectar el PLL con el inversor multinivel, la medición de frecuencia de la red por parte del PLL dicta el funcionamiento de la señal moduladora, la señal portadora tendrá entonces una frecuencia cuyo valor es un múltiplo entero de la señal moduladora, 42 kHz.

Estrategia de Control del Inversor

A continuación, se presenta una alternativa de seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) del panel fotovoltaico, evitando el uso de un convertidor DC/DC. Para ello se realizan variaciones en la fase y la amplitud de la señal moduladora del inversor multinivel.

A. Principio de funcionamiento

Mediante el diagrama fasorial del inversor multinivel mostrado en la figura 5 se explica el control de la potencia activa y reactiva del convertidor. Donde E es la tensión generada por el convertidor, R es la resistencia del convertidor, X la reactancia del convertidor, V es el voltaje de conexión en paralelo con la red, I es la corriente del convertidor, θ es el ángulo entre la tensión generada por el convertidor y el voltaje de conexión.

El diagrama fasorial mostrado anteriormente multiplicado por el factor $3V/X$ se convierte en un diagrama de potencias, donde en color rojo se representa el aporte de potencia activa y reactiva en la figura 5 b).

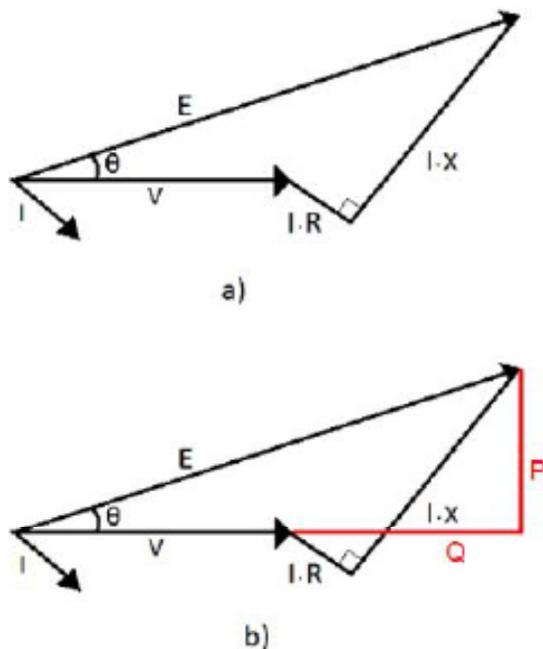


Figura 5. a) Diagrama fasorial del inversor multinivel b) Representación de P y Q en el diagrama fasorial del inversor multinivel.

Al variar el ángulo θ , varía la potencia activa y la potencia reactiva, siendo la potencia activa la que presenta mayor variación, al variar la amplitud de la tensión generada por el convertidor, de igual forma se presenta variación en la potencia activa y reactiva,

siendo la potencia reactiva la que presenta mayor variación. La figura 6 representa la variación de la potencia activa y la potencia reactiva al variar la fase y la amplitud respectivamente, donde θ' y E' son los nuevos valores de fase y amplitud al controlar P y Q.

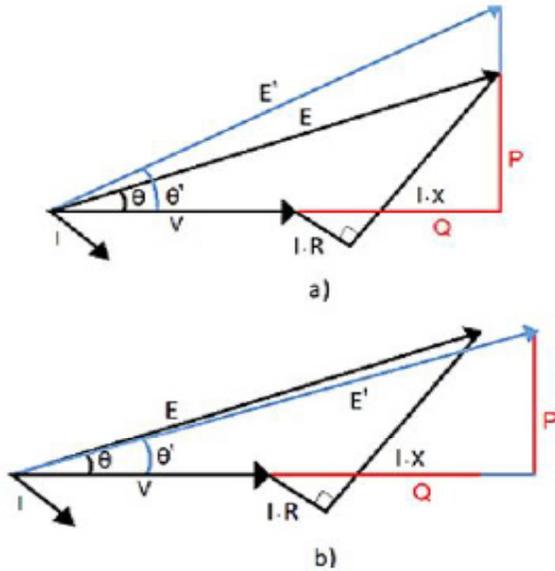


Figura 6. Diagrama fasorial del inversor multinivel. a) Variación de P. b) Variación de Q.

Como se mencionó anteriormente, para que exista una variación en potencia activa o potencia reactiva, debe variar tanto θ como la amplitud de la señal moduladora. Los controladores a diseñar deberán recibir un valor de P y un valor de Q, el convertidor debe estabilizarse en un θ y amplitud específica para cumplir esa condición.

B. Efectos de la variación en la amplitud de la señal modulada

Con el fin de observar los cambios en las potencias frente al cambio de la amplitud de la señal modulada se realizó una variación desde 0.4 hasta 1.6 en la amplitud, con pasos de 0.1 cada 0.1 segundos. Cuando el tiempo es igual 0.6 segundos la amplitud de la señal tiene un valor igual a la unidad. La figura 7 muestra los valores de la potencia activa y reactiva a la salida del inversor multinivel. El bus de CD es de 150 V y el voltaje de la

red de 127 V RMS.

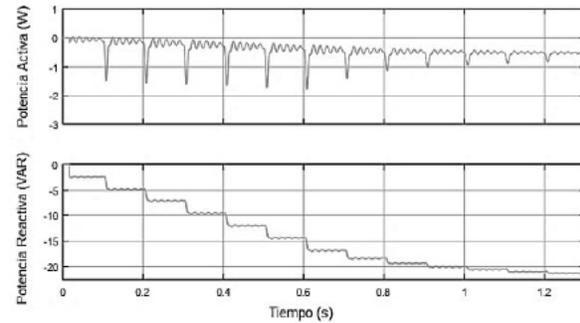


Figura 7. Representación de la potencia activa y reactiva a la salida del inversor multinivel con la variación de la amplitud de la señal moduladora

Como se puede ver al variar la amplitud, se modifica el aporte de potencia reactiva del inversor multinivel, la potencia activa refleja los cambios en la amplitud con un transitorio.

De acuerdo a lo anterior, se observa de la variación en la amplitud que:

- Cuando es menor a 1, el inversor multinivel consume reactivos y la red suministra dichos reactivos.

B. Variación en la fase de la señal moduladora

Para determinar los cambios en el aporte de potencia activa con respecto a la fase, se realiza una variación de la señal moduladora desde -60 hasta 60 grados de fase, con pasos de 10 grados cada 0.1 segundos. Cuando el tiempo es igual 0.6 segundos, la fase de la señal tendrá un valor igual a la fase medida por el PLL, o sea 0, es decir está en fase con la red. La figura 8 muestra los valores de la potencia activa y reactiva a la salida del inversor multinivel.

Al variar la fase, se modifica el aporte de potencia activa del inversor multinivel, la potencia reactiva refleja los cambios en la fase con pequeñas variaciones, después de

suministrar cierta potencia activa, el convertidor empieza a consumir reactivos, esto se debe a que el convertidor debe mantener el valor de tensión igual al de la red.

- Cuando es mayor a 1, el inversor multinivel suministra reactivos a la red, respaldando a la red con el consumo de r

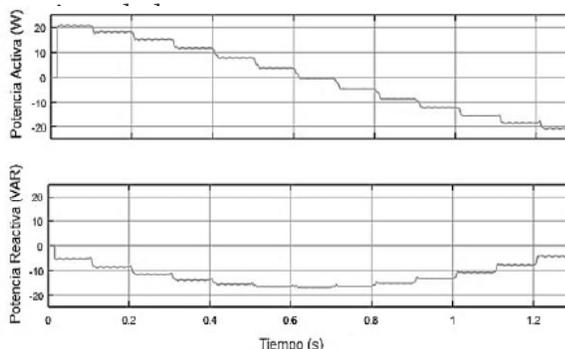


Figura 8. Representación de la potencia activa y reactiva a la salida del inversor multinivel con la variación de la fase de la señal moduladora

De acuerdo a lo anterior, se observa de la variación de fase que:

- Cuando fase es negativa con respecto a la red, el inversor multinivel consume potencia activa.
- Cuando la fase es positiva con respecto a la red, el inversor multinivel suministra potencia activa,

Control de Potencia Reactiva y Control Directo de Fase

Se conecta un panel fotovoltaico al inversor multinivel, como se observa en la figura 9. A la salida del panel hay un capacitor en paralelo con el inversor multinivel, el capacitor tiene un valor igual a 2600 uF, su función es filtrar el voltaje y así tener un comportamiento más estable. La resistencia a la salida del panel es necesaria para realizar la simulación, con un valor en el orden de $1e-5 \Omega$.

Las características del panel fotovoltaico en condiciones estándar de medida son:

- Voltaje en vacío (V_{oc}): 46.3 [V]
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): 8.87 [A]

- Voltaje de máxima potencia (V_{mpp}): 37 [V]
- Corriente de máxima potencia (I_{mpp}): 8.25 [A]
- Potencia máxima (P_{mpp}): 305.25 [W]

El controlador PID encargado del control de potencia reactiva del inversor fotovoltaico multinivel, mediante la variación de la amplitud de la se señal moduladora se sintonizó determinando las constantes son, $P= 0$, $I= -149.0127$, $D= 0$. Para disminuir el THD del convertidor, se limita la amplitud del controlador en un valor igual a 2.

El suministro de potencia activa del inversor fotovoltaico multinivel está limitado por el panel fotovoltaico, si en el lazo de control, la potencia activa que se desea obtener del inversor fotovoltaico es superior al límite de potencia, el controlador aumentará la fase de la señal moduladora y el inversor fotovoltaico empezará a consumir potencia reactiva para mantener la tensión del inversor multinivel igual a la tensión de la red, a la fase establecida por el controlador PID en el control de potencia activa.

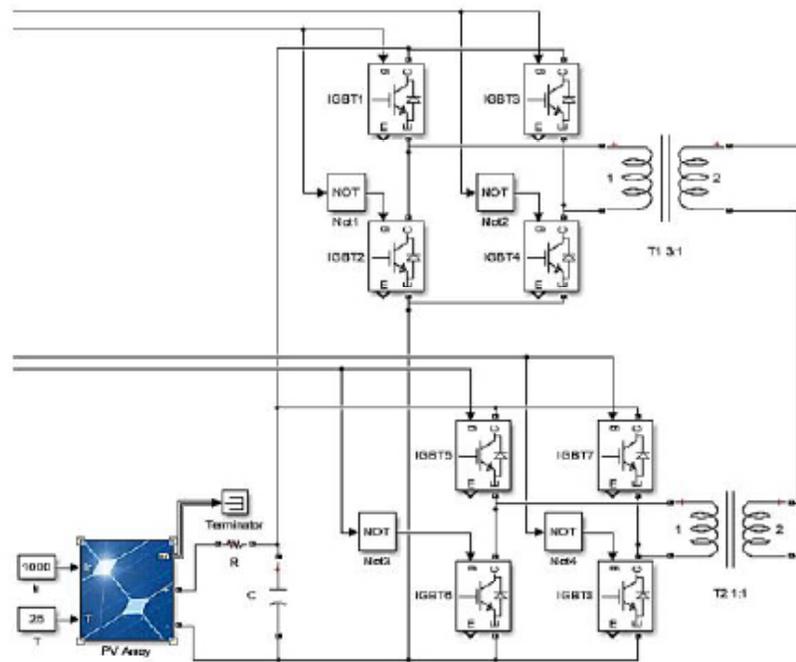


Figura 9. Puente H multinivel 3:1 con panel fotovoltaico.

Después de que el convertidor suministre la máxima potencia posible, el aumento de la fase, producto del controlador PID, hará que el inversor fotovoltaico pase de suministrar la máxima potencia activa a suministrar un valor inferior de potencia activa y consumir más reactivos, a este efecto se lo conoce como “windup”. Una solución a este efecto es saturar la constante de integración a un valor de fase en el cual el convertidor puede dar la máxima potencia posible, a esta técnica se le conoce como “anti-windup” [36].

Al disminuir la irradiancia, el valor de la fase a la cual el inversor fotovoltaico entrega la máxima potencia posiblemente es menor, por esta razón, establecer un valor constante en el límite de saturación de la fase va provocar el efecto windup descrito anteriormente.

Para solucionar este efecto se emplea una estrategia de control directo de fase, para evitar el aumento de fase por

parte del controlador PID de la potencia activa, se reemplaza el controlador PID de potencia activa descrito anteriormente, por un controlador PID de fase de la señal moduladora del inversor fotovoltaico, este controlador ayuda a que la dinámica del control de fase sea más suave.

Las constantes del controlador PID de la fase son, $P=0$, $I=101.7421$, $D=0$. La constante de integración tiene una saturación para un valor de fase igual a 50° , valor cercano a la máxima fase en el cual el inversor fotovoltaico entrega la máxima potencia posible en condiciones estándar de medida. El esquema de la estrategia de control del sistema se muestra en la figura 10.

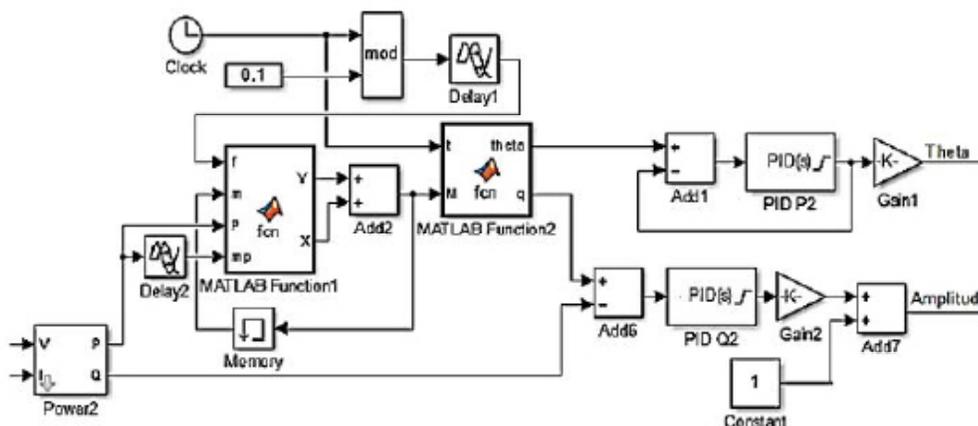


Figura 10. Esquema de control final.

Para realizar el control final de potencia activa se establecen dos funciones. donde una memoria guarda el valor de la fase de la señal moduladora a la que opera el inversor fotovoltaico más un valor que está dado por la condición que define el comportamiento de la potencia activa, esta condición determina cuando el convertidor ha dejado de suministrar la potencia máxima posible por el aumento de fase.

La primera función detecta el pico de una función diente de sierra, verifica si la medición de potencia es mayor al valor de potencia un paso anterior, si es así, entonces el inversor fotovoltaico ha dejado de suministrar la máxima potencia posible y se disminuye la fase, entonces el controlador deja de aumentar la fase y de esta forma vuelve a un valor de fase anterior para suministrar la potencia máxima posible; si la potencia medida no cumple la condición, entonces aumenta la fase para que suministre más potencia. A este algoritmo se le conoce como perturbar y observar.

Se selecciona la relación de variación en la fase de la señal moduladora de -2 grados y +1 grados, ya que, al entrar la fase en saturación por variaciones de potencia, la potencia buscará estabilizarse en un valor de fase cercano, al valor en su estado

anterior. Si la relación es simétrica, a partir de ese valor de fase el control hará la técnica de perturbar y observar, estabilizando a la potencia en un punto en el cual no entrega la máxima potencia posible.

La segunda función establece el valor inicial de la fase hasta un tiempo de estabilización, después el valor de la fase va ser igual a la salida de la primera función. El valor de la potencia reactiva se va mantener en 0 para que consuma los mínimos reactivos posibles.

Simulación del Sistema

Se simula todo el sistema con la estrategia de control descrita anteriormente. El valor de irradiancia es de 1000 W/m², la temperatura del panel fotovoltaico es de 25° C. La fase inicial de la señal moduladora del inversor fotovoltaico multinivel es de 42°. El esquema de la simulación completa se observa en la figura 11.

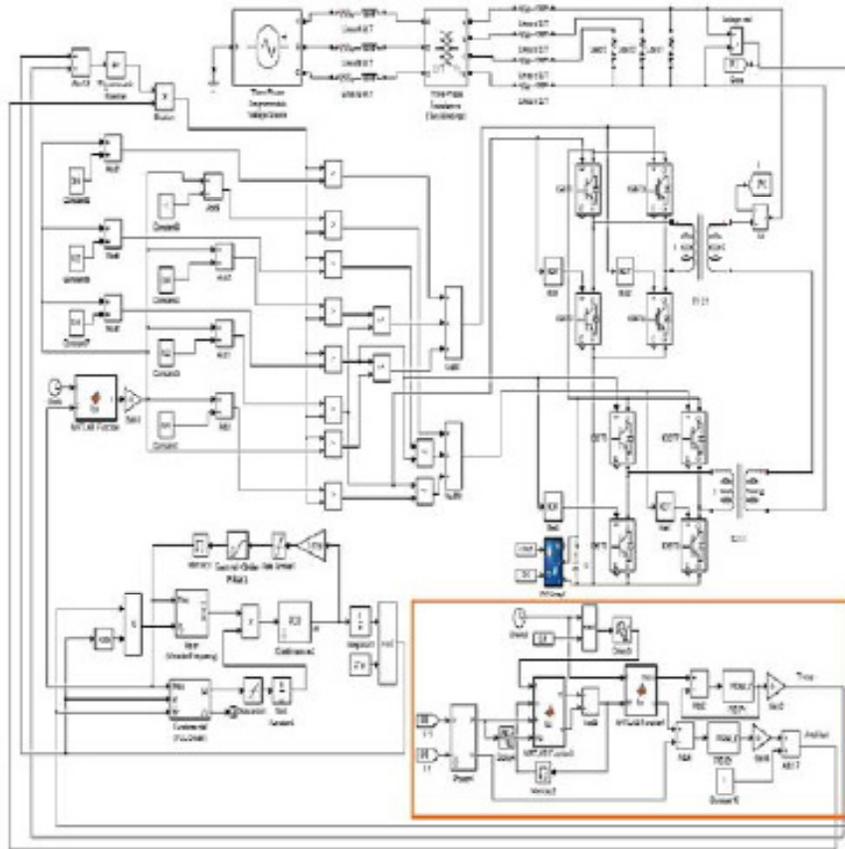


Figura 11. Esquema de simulación.

El comportamiento de la potencia activa del inversor fotovoltaico con el control final se muestra en la figura 12.

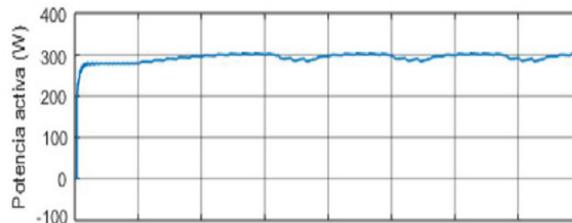


Figura 12. Potencia activa del inversor fotovoltaico con el control final.

Se observa que la potencia activa presenta una pequeña oscilación en estado estable debido al método de perturbar y observar. La potencia activa llega a un valor cercano al valor de máxima potencia del panel fotovoltaico y oscila alrededor de ese valor después de la saturación. El factor de potencia del inversor fotovoltaico multinivel en estado estable es de aproximadamente 0.87.

El comportamiento de la corriente RMS que se inyecta a la red se muestra en la figura 13.

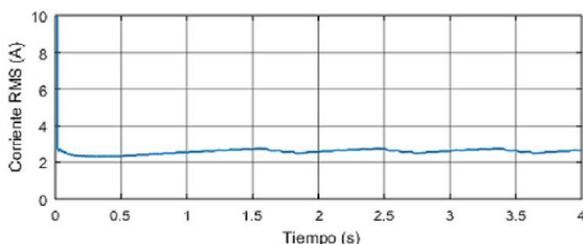


Figura 13. Corriente RMS del inversor fotovoltaico multinivel.

En la figura 13 se puede observar que la corriente oscila en estado estable, como el inversor fotovoltaico está generando potencia activa, esta corriente está siendo inyecta hacia la red. La saturación de la amplitud evita que el THD (distorsión armónica total) del inversor fotovoltaico sea muy alta. El THD de la corriente del inversor fotovoltaico multinivel es de 8.66% aproximadamente.

El comportamiento de la potencia a la salida del panel fotovoltaico con el control directo de fase y control de potencia reactiva se muestra en la figura 14.

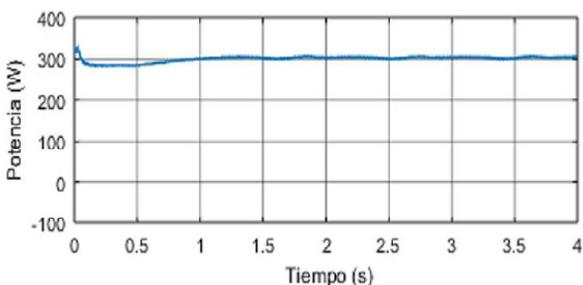


Figura 14. Potencia a la salida del panel fotovoltaico con el control final de potencia del inversor fotovoltaico.

Se observa que, en el control, las variaciones de fase y amplitud de la señal moduladora, provocan variaciones en la potencia del panel fotovoltaico. El valor de potencia del panel fotovoltaico oscila entre los valores del punto de máxima potencia, 305,23 W respectivamente.

La potencia presenta oscilaciones iniciales debido a la presencia del capacitor; la magnitud de la oscilación dependerá del valor del condensador, para un valor menor

de capacitancia las oscilaciones del voltaje aumentan, pero la dinámica del sistema es más rápida.

Simulación del Sistema Frente a Diferentes Escenarios

A continuación, se presenta la simulación del sistema frente a diferentes escenarios de, irradiancia, temperatura y carga; analizando el comportamiento del inversor fotovoltaico multinivel, la red y la carga.

A. Escenarios de irradiancia

Se simula el sistema con la estrategia de control planteada ante variaciones de irradiancia. La fase inicial de la señal moduladora del inversor fotovoltaico es de 42 grados y la temperatura del panel fotovoltaico es de 25° C. Las variaciones de irradiancia se realizan desde 1000 W/m² hasta 600 W/m², la primera variación, de 1000 W/m² a 800 W/m² se realiza un tiempo igual a 1.5 segundos, la siguiente variación a 600 W/m² se realiza en un tiempo igual a 2.5 segundos, estas variaciones se muestran en la figura 15, de igual forma de muestra el comportamiento de la potencia activa con el control directo de fase.

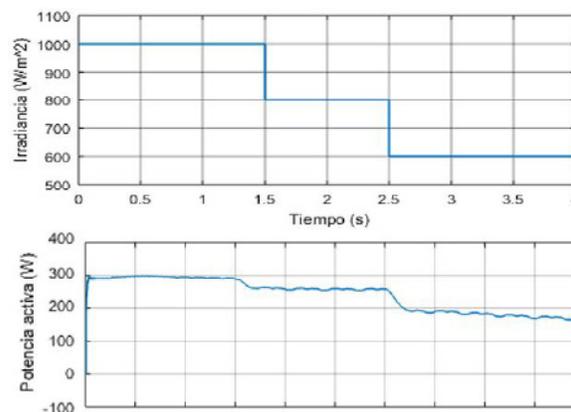


Figura 15. Variación de irradiancia y comportamiento de la potencia activa a del inversor fotovoltaico multinivel ante variaciones de irradiancia.

Las variaciones de irradiancia generan cambio de potencia, al disminuir la irradiancia, disminuye el punto de máximo generación. Para variaciones decreciente de 200 W/m^2 , la variación de la potencia es rápida, la potencia activa busca estabilizarse en un valor inferior el cual será el nuevo valor de del MPP, esta potencia, mostrada en la figura, es la salida del inversor, la cual será el máximo punto de potencia del panel menos las pérdidas propias del convertidor. El control directo de fase permite que la potencia activa del inversor fotovoltaico se estabilice. Para un valor inferior de irradiancia, la fase a la cual el inversor fotovoltaico puede entregar la máxima potencia posible es menor. La última oscilación después de 3.5 segundos, se debe a que la potencia se estabiliza con el método de perturbar y observar.

El comportamiento de la corriente RMS inyectada a la red por el inversor fotovoltaico multinivel con el control directo de fase y variaciones de irradiancia se muestra en la figura 16.

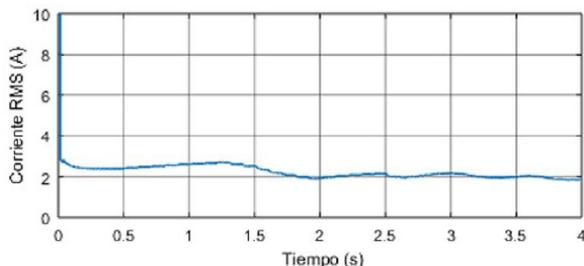


Figura 16. Corriente RMS inyectada a la red por el inversor fotovoltaico multinivel ante variaciones de irradiancia.

La variación de la corriente con respecto a la irradiancia es directamente proporcional, la corriente en estado estable para un valor de irradiancia específico presenta una pequeña oscilación debido al método de perturbar y observar.

El comportamiento de la potencia del panel fotovoltaico con el control directo de fase y

variaciones de irradiancia se muestra en la figura 17.

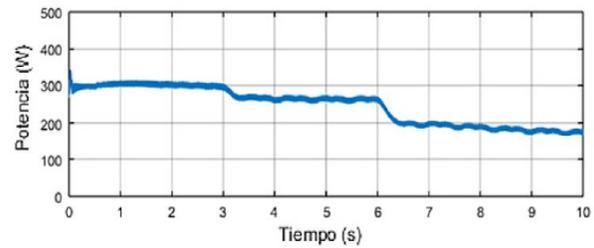


Figura 17. Potencia del panel fotovoltaico ante variaciones de irradiancia.

Se evidencia que la potencia presenta pequeñas oscilaciones, sin embargo, son oscilaciones transitorias mientras se estabiliza el sistema debido al algoritmo de perturbar y observar.

B. Escenarios de temperatura

A continuación, se simula el sistema ante variaciones de temperatura. La fase inicial de la señal moduladora del inversor fotovoltaico es de 42 grados y la irradiancia del panel fotovoltaico es de 1000 W/m^2 .

Las variaciones de temperatura se realizan desde 35° C a 30° C , y de 30° C a 25° C , en un tiempo igual a 1 segundo y 2 segundos respectivamente. La variación de temperatura del panel fotovoltaico se muestra en la figura 18.

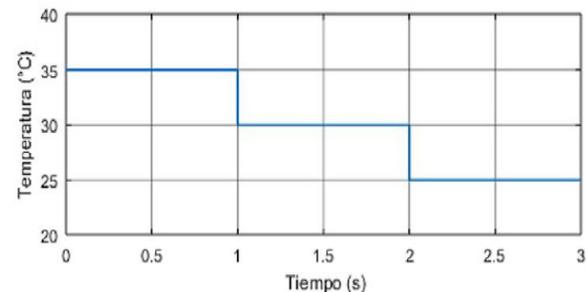


Figura 18. Variación de temperatura del panel fotovoltaico.

El comportamiento de la potencia activa del inversor fotovoltaico multinivel con el control directo de fase ante variaciones temperatura

del panel fotovoltaico se muestra en la figura 19.

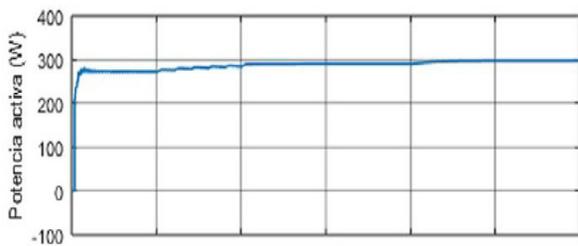


Figura 19. Potencia activa del inversor fotovoltaico multinivel ante variaciones en la temperatura del panel fotovoltaico.

Las variaciones en la temperatura del panel fotovoltaico generan variaciones en el punto de máxima potencia, al disminuir la temperatura el punto de máxima aumenta, el algoritmo de control planteado es capaz de seguir este cambio y permitir que el panel entregue su mayor potencia. El comportamiento de la corriente RMS inyectada a la red por el inversor fotovoltaico multinivel frente a las variaciones de temperatura del panel fotovoltaico se muestra en la figura 20.

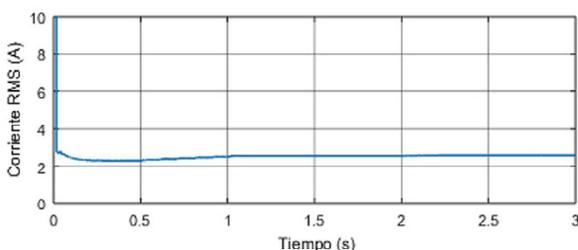


Figura 20. Corriente RMS inyectada a la red por el inversor fotovoltaico multinivel ante variaciones en la temperatura del panel fotovoltaico.

Para variaciones de temperatura, la corriente no presenta oscilaciones, solo un ascenso en su valor debido al aumento del punto de máxima potencia del panel. El comportamiento de la potencia a las salidas del módulo fotovoltaico se muestra en la figura 21, en donde se observa el aumento de la potencia de salida en concordancia con la reducción de la temperatura.

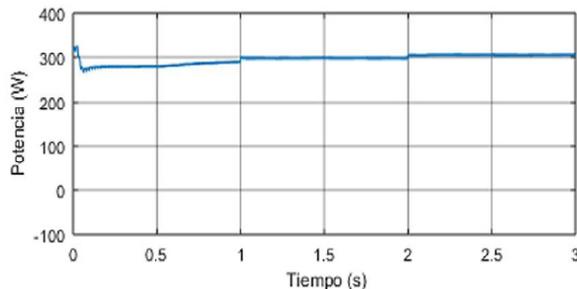


Figura 21. Potencia del panel fotovoltaico ante variaciones en la temperatura del panel fotovoltaico.

C. Escenarios de carga

Se conecta en paralelo al inversor multinivel y la red, cargas de potencia constante, estas cargas entran en operación cada 0.7 segundos, la primera carga consta de 250 W y conmuta en 1.2 segundos, luego se conmuta una carga de 500 W en 1.9 segundos, posteriormente se adiciona una carga inductiva de 200 VAR en 2.6 segundos y finalmente se conmuta una carga capacitiva de 200 VAR en 3.3 segundos. La conmutación de las cargas se muestra en la figura 22.

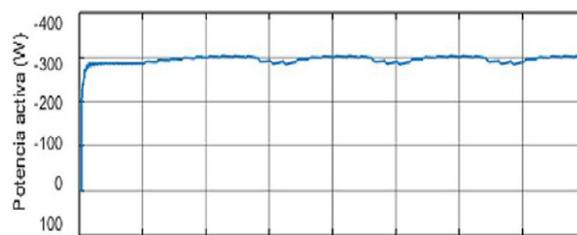


Figura 22. Conmutación de cargas resistivas, inductiva y capacitiva.

El valor inicial de la fase del inversor fotovoltaico es 42° , el valor de irradiancia es de 1000 W/m^2 y la temperatura del panel fotovoltaico es de 25° C . El comportamiento de la potencia activa del inversor fotovoltaico ante variaciones de carga se muestra en la figura 23.

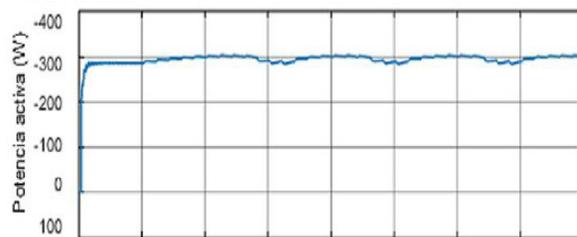


Figura 23. Potencia activa y potencia reactiva del inversor fotovoltaico ante variaciones de carga.

Las variaciones de carga en el sistema no perturban el comportamiento del inversor multinivel en estado estacionario, si se presenta un pequeño transitorio en el instante de la conexión, pero el control suprime estas variaciones. La estrategia de control del sistema permite que el inversor fotovoltaico suministre la máxima potencia posible sin sobrepasar el límite superior de saturación establecido en 50 grados en la fase de la señal moduladora del inversor fotovoltaico. El comportamiento de la potencia activa y la potencia reactiva de la red ante variaciones de carga se muestra en la figura 24.

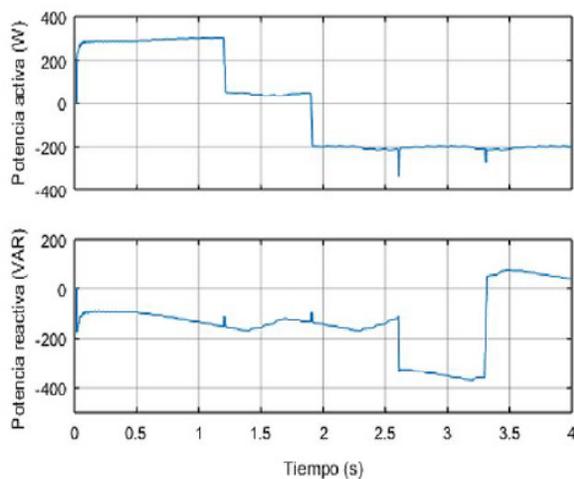


Figura 24. Potencia activa y potencia reactiva de la red ante variaciones de carga

Como se observa en la figura, se está inyectando potencia activa proveniente del inversor fotovoltaico multinivel a la red, esta a su vez aporta la potencia reactiva necesaria para mantener el voltaje de fase. Al conectarse las diferentes cargas, la red supe la potencia necesaria para que el balance de potencias del sistema se cumpla. La corriente RMS del inversor fotovoltaico ante variaciones de carga se muestra en la figura 25. En estado estable la corriente oscila entre 2.5 A y 2.7 A. debido a la aplicación del método de perturbar y observar.

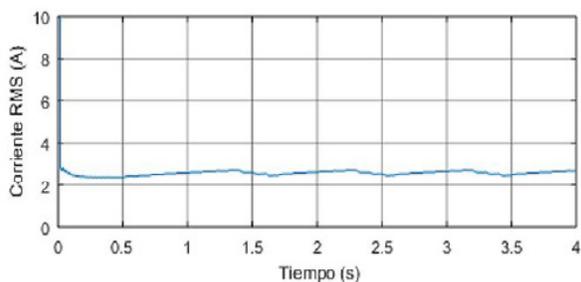


Figura 25. Corriente RMS del inversor fotovoltaico ante variaciones de carga

El comportamiento de la potencia del panel fotovoltaico en el control del inversor fotovoltaico ante variaciones de carga se muestra en la figura 26.

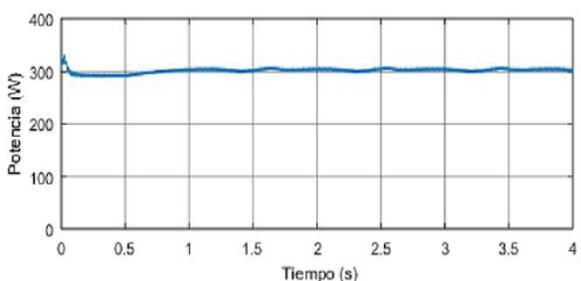


Figura 26. Potencia del panel fotovoltaico.

La potencia del panel fotovoltaico se ajusta a valores tales que el panel entrega la máxima potencia, las pequeñas variaciones presentes se deben a la aplicación del método de perturbar y observar.

Conclusiones

- Controlar la potencia del panel fotovoltaico con la estrategia de control empleada presenta una alternativa para el el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT), obteniendo valores muy cercanos a los valores de máxima potencia, controlando la fase y la amplitud de la señal moduladora del inversor multinivel, evitando el uso de un convertidor DC/DC, cálculos complejos y el uso de transformadas de Clark y Park.
- Para evitar una alta distorsión armónica del inversor multinivel, las ondas portadoras deben tener una frecuencia

múltiplo entero de la frecuencia de la onda modulada. La operación normal de la red y la tolerancia en la frecuencia del sistema, presenta algunas variaciones en la frecuencia, por lo tanto, un inversor conectado a la red, con una técnica de sincronización como el bucle de bloque de fase (PLL), debe ajustar las frecuencias de las portadoras en términos de la frecuencia de la señal modulada con el fin de evitar el exceso de contenido armónico.

- Las variaciones de irradiancia hacen que el límite de saturación de la fase varié, por lo tanto, para cada nivel de irradiancia habrá un límite de saturación diferente, por esto se propone un control directo de fase con el método “perturbar y observar”, con este método se mide el valor de potencia activa y se varia la fase en dependencia de un valor anterior de potencia activa, controlar directamente la fase hace que la respuesta de la potencia activa sea más rápida pero se generan transitorios mayores.
- Una relación simétrica en los cambios generados por la técnica de perturbar y observar, hará que la fase, al entrar en saturación frente a variaciones de potencia, busque estabilizarse en un valor de fase cercano al valor en su estado anterior, a partir de ese valor el control hará que la potencia se establezca y oscile en un valor en el cual no se entrega la máxima potencia debido a las saturaciones del ángulo de fase.
- Las variaciones de irradiancia causan variaciones directamente proporcionales en la potencia del panel fotovoltaico, si se disminuye la irradiancia en un valor de fase saturado (debido al método de perturbar y observar), se producen grandes variaciones en el voltaje del panel fotovoltaico y la potencia activa del inversor fotovoltaico multinivel cae rápidamente, sin embargo las estrategias implementadas permiten superar estos

inconvenientes y generar un control satisfactorio con baja complejidad.

Referencias

- [1] REN21, *Renewables 2019 Global Status Report*, 2019
- [2] A. Cantejon, y G. Santa María, "Instalaciones solares fotovoltaicas" Editex. 2010
- [3] CREG. Documento CREG 066. Autogeneración a Pequeña escala y generación distribuida. 2017
- [4] A. Akbari, F. Poloei and A. Bakhshai, "A Brief Review on State-of-the-art Grid-connected Inverters for Photovoltaic Applications," *IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1023-1028, 2019
- [5] S. R. Mohapatra and V. Agarwal, "Model Predictive Controller With Reduced Complexity for Grid-Tied Multilevel Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 11, pp. 8851-8855, Nov. 2019
- [6] D. Kalyanraj and S. L. Prakash, "Design of sliding mode controller for three phase grid connected multilevel inverter for distributed generation systems," *21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications (ICTFCEN)*, Kharagpur, pp. 1-5, 2016
- [7] S. Amamra, K. Meghriche, A. Cherifi, A. and B. Francois, "Multilevel Inverter Topology for Renewable Energy Grid Integration". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, 8855–8866, 2017
- [8] S. Chaudhary, Z. Ahmad and S. N. Singh, "Single Phase Grid Interactive Solar Photovoltaic Inverters: A Review," *National Power Engineering Conference (NPEC)*, Madurai, pp. 1-6, 2018

- [9]H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, "Multilevel Converter/ Inverter Topologies and Applications". In *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications* (p. 1), 2014
- [10]E. Bárcenas Bárcenas, "Análisis y desarrollo de un inversor multinivel," centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico, 2002
- [11]L. D. Pabón Fernández, E. A. Caicedo Peñaranda, J. L. Díaz Rodríguez, and A. Pardo García, "Configurable converter for performance assessment of cascaded multilevel power converters," *Wseas Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 199–209, 2016
- [12]J. L. Diaz. Rodríguez, L. D. Pabón Fernández, and A. A. A. Acero, "Comportamiento con carga de un inversor multinivel fuente común con transformadores a la salida." in *12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, pp. 22-24, 2014
- [13]L. Pabón-Fernández, J. Díaz-Rodríguez, and A. Pardo-García, "Simulación del inversor multinivel de fuente común como variador de frecuencia para motores de inducción," *Rev. Investig. Desarro. e Innovación*, vol. 7, no. 1, 2016
- [14]D. Patel, R. Saravanakumar, K. K. Ray and R. Ramesh, "A review of various carrierbased PWM methods for multilevel inverter," *India International Conference on Power Electronics (IICPE2010)*, New Delhi, 2011, pp. 1-6, 2010
- [15]J. Posada Contreras, "Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación," *El Hombre y la Máquina*, vol. 25, pp. 70–83, 2005
- [16]S. Evanczuk, "Synchronizing Small-Scale PV Systems with the Grid," *Electronic Products*, 2015. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/sep/synchronizing-small-scale-pv-systems-with-the-grid>.
- [17]Q. Huang and K. Rajashekara, "An Improved Delayed Signal Cancellation PLL for Fast Grid Synchronization Under Distorted and Unbalanced Grid Condition," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 5, pp. 4985–4997, 2017
- [18]H. A. Hamed and M. S. El Moursi, "A New Type-2 PLL Based on Unit Delay Phase Angle Error Compensation During the Frequency Ramp," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 3289–3293, 2019
- [19]M. Ramezani, S. Golestan, S. Li, and J. M. Guerrero, "A Simple Approach to Enhance the Performance of Complex-Coefficient Filter-Based PLL in Grid-Connected Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 6, pp. 5081–5085, 2018
- [20] P. Mochi, "Primary Review on MPPT Method and Size of Grid Connected Solar Photovoltaic Inverter," *8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), JAIPUR, India*, pp. 1-6, 2018
- [21]H. Li, D. Yang, W. Su, J. Lü, and X. Yu, "An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 1, pp. 265–275, 2019
- [22]S. Sajadian, R. Ahmadi, and H. Zargazadeh, "Extremum Seeking-Based Model Predictive MPPT for Grid-Tied Z-Source Inverter for Photovoltaic Systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 216–227, 2019
- [23]O. Lopez-Santos et al., "Analysis, Design, and Implementation of a Static

- Conductance-Based MPPT Method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1960–1979, 2019
- [24] S. Al-Majidi, M. Abbod, and H. S. Al-Raweshidy, *A Modified P&O-MPPT based on Pythagorean Theorem and CV-MPPT for PV Systems*. 2018
- [25] E. J. Santiago, J. S. Allende. . Diseño de un sistema multiagentes híbrido basado en aprendizaje profundo para la detección y contención de ciberataques. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 2 Núm. 28. 2016
- [26] S.A. Castro Casadiego, C.V. Niño Rondón, B. Medina Delgado. Caracterización para la ubicación en la captura de video aplicado a técnicas de visión artificial en la detección de personas. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 2, Núm. 36. 2020
- [27] E. Flórez Solano, R. A. G. León, E.A. Sánchez Ortiz. Diseño de un sistema alimentador para un horno rotatorio en la producción de fosfato en norte de santander design of a feeding system for a rotary oven in the production of phosphate in norte of santander. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol 1 – Núm 29 – 2017
- [28] D. Ospina-Toro, E. M. Toro-Ocampo, R. A. Gallego-Rendón. Solución del mdvrp usando el algoritmo de búsqueda local iterada. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 1, Núm. 31. 2018
- [29] E. D. Lambraño García, J. L. Lázaro Plata, J. L. Lázaro Plata, Alfredo Emilio Trigos Quintero, Alfredo Emilio Trigos Quintero. Revisión De Técnicas De Sistemas De Visión Artificial Para La Inspección De Procesos De Soldadura Tipo Gmaw. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 1, Núm. 29. 2017
- [30] J. A. Gómez, H. Y. Jaramillo, L. A. Coronel Rojas. Sistema Para Detección De Fallos Críticos En Tuberías Horizontales Detection System Of Critical Faults In Horizontal Pipes. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 1 – Núm. 35 – 2020
- [31] H. Acevedo Meza, J.L. Mendoza García, S Sepúlveda Mora. Estrategias De Control Mppt Aplicadas En Un Convertidor Dc/Dc Tipo Boost Para Sistemas Fotovoltaicos. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 2, Núm. 30. 2017
- [32] W L. Bermeo, Antonio B Souza, Tobias R. Fernandes N., Dalton A. Honório, Laurinda L. Nogueira dos Reis, Luiz H. S. C. Barreto. sliding model control applied in current loop for a dspsbased position control applied to squirrel-cage induction motor. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, volumen 1 - no. 27 – 2016
- [33] E. Bayona Ibáñez, I. K. Ricon Parada. Hábitos De Estudio Y Rendimiento Académico En Los Estudiantes De Ingeniería mecánica. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, vol. 1, Núm. 29. 2017
- [34] A. Sheril and R. Babu, “Synchronization Control of Grid Connected Photovoltaic System,” *Middle-East J. Sci. Res.*, vol. 25, p. 17 p, 2017
- [35] MathWorks, “PLL,” 2013. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pll.html?searchHighlight=pll&s_tid=doc_srchtml#btrxrns-2.
- [36] A. Pardo Garcia and J. L. Díaz Rodríguez, “Aplicación De La Acción Anti-Windup En Un Sistema De Accionamiento Eléctrico,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, p. 16, 2004