

Control basado en reglas para la generación de señales de disparo para un inversor monofásico con seguimiento de fase

Gadiel Dzahuindanda Velázquez Cordova

Itesi, Carr. Irapuato – Silao km 12.5, Teléfono: (462) 606 7900

gaddzhoi@gmail.com

Sergio Constantino Yáñez Campos

Itesi, Carr. Irapuato – Silao km 12.5, Teléfono: (462) 606 7900

seyanez@itesi.edu.mx

Heber Bernabé Pérez Márquez

Itesi, Carr. Irapuato – Silao km 12.5, Teléfono: (462) 606 7900

heperez@itesi.edu.mx

Resumen

Actualmente, las energías renovables son ampliamente explotadas debido a la escases de los combustibles fósiles. Mediante un sistema fotovoltaico es posible generar energía eléctrica a partir de la energía solar. La energía eléctrica generada debe cumplir con las características de la red eléctrica para poder ser inyectada a la misma. Por esta razón, se requiere un inversor que convierta la energía de CD a CA. La estrategia de control empleada juega un papel fundamental ya que determina la forma de onda de CA generada por el inversor a partir del voltaje de cd. Tradicionalmente se han empleado esquemas de control basados en técnicas PWM. Sin embargo, la naturaleza no lineal de estos sistemas impone un reto para obtener una solución óptima. Por otro lado, las soluciones obtenidas por medio de técnicas de inteligencia artificial y soft computing han mostrado muy buenos resultados en este tipo de problemas. En este trabajo se presenta un control basado en reglas para generar las señales de disparo para un inversor

monofásico con seguimiento de fase. El algoritmo de control que determina las señales de disparo es programado en un microcontrolador PIC.

Palabras Claves: Control basado en reglas, Seguimiento de fase, Señales de disparo.

1. Introducción

La crisis energética y ambiental actual debida al sobreuso de combustibles fósiles, ha provocado la búsqueda de energías alternativas amigables con el ambiente para producir electricidad. En los últimos años se han desarrollado muchas tecnologías de energía renovable que son fiables y de costos competitivos respecto de los convencionales generadores de combustión. La mayoría de las tecnologías de energía renovable producen energía cd (corriente directa) y por lo tanto es necesario equipo de control y electrónica de potencia para convertir la energía cd en ca (corriente alterna). Los acondicionadores de potencia, específicamente los inversores, son la clave en la conexión entre el sistema de generación de energía y la línea de distribución de la red eléctrica en los sistemas FV conectados a la red. Estos actúan como una interface que convierte el voltaje cd producido por los paneles FV en un voltaje de ca como el de la red eléctrica. De esta forma, los inversores deben producir una forma de onda de salida senoidal que debe seguir la frecuencia y voltaje de la red eléctrica. Para esto, el control del inversor debe muestrear las fases de la red eléctrica, y la salida del inversor debe ser controlada en términos de la variación de voltaje y frecuencia. Varias configuraciones de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y diferentes topologías de los inversores de potencia empleados en estos sistemas son revisados en [1]. Las topologías más comunes de inversores multinivel son revisadas en [2].

El control de flujo de energía hacia la red eléctrica puede llevarse a cabo por medio de un sistema de control analógico o con un microcontrolador. El sistema de control genera las formas de onda y regula su forma y fase para controlar el flujo de energía entre el inversor y la red eléctrica. De esta forma, se requiere un controlador apropiado para evitar

cualquier error en la inyección de energía debido a los errores de sincronización, los cuales pueden provocar sobrecargas en los inversores. Una investigación de diferentes esquemas de control para inversores monofásicos y trifásicos es presentada en [1]. Diferentes esquemas de control para inversores multinivel son abordados en [2]. Un estudio comparativo de diversas estrategias de control para sistemas generadores de energía monofásicos de baja escala es presentado en [3]. Generalmente, los esquemas de control para inversores se basan en técnicas PWM. Debido a la naturaleza no lineal de los inversores y las técnicas PWM se obtienen soluciones muy complejas y en ocasiones intratables. A diferencia de estos esquemas, existen técnicas de control basadas en inteligencia artificial o soft computing. Estos esquemas de control intentan emular el razonamiento humano por lo que presentan soluciones relativamente sencillas y transparentes al razonamiento humano. Diferentes técnicas de soft computing aplicadas al control de inversores en sistemas de energía renovable son revisadas en [4]. Un controlador neuro-difuso adaptivo programado en una tarjeta dSPACE para un inversor es presentado en [5]. Un controlador basado en lógica difusa para un inversor trifásico es presentado en [6]. Para el diseño del controlador se seleccionan las variables lingüísticas de una manera apropiada para modular el ángulo de disparo. Además, un microcontrolador PIC es programado para generar las señales de disparo del inversor. Un esquema de control para seguimiento de fase sin PLL en un sistema monofásico es presentado en [7].

En este trabajo se presenta un controlador de generación de señales de disparo para un sistema de generación de energía monofásico. El controlador se basa en reglas y ha sido diseñado para que las señales de disparo estén sincronizadas con la red eléctrica sin emplear algún esquema de seguimiento de fase (PLL). Para propósitos de portabilidad y bajo costo el control ha sido diseñado para programarse en un microcontrolador PIC.

2. Desarrollo

Los inversores conectados a la red eléctrica proporcionan una interface entre las fuentes de energía renovables (RES) y la red eléctrica. La corriente o voltaje inyectado a la red

debe estar en fase con el voltaje de línea. El diagrama de bloques general de un inversor conectado a la red eléctrica se muestra en la Fig. 1. Este consiste de una fuente energía renovable, un inversor y un filtro LC de salida. La fuente de energía renovable puede ser un sistema FV o una turbina eólica entre otras. El filtro LC es empleado para reducir los armónicos de alta frecuencia debidos al encendido y apagado de los elementos de conmutación del inversor.

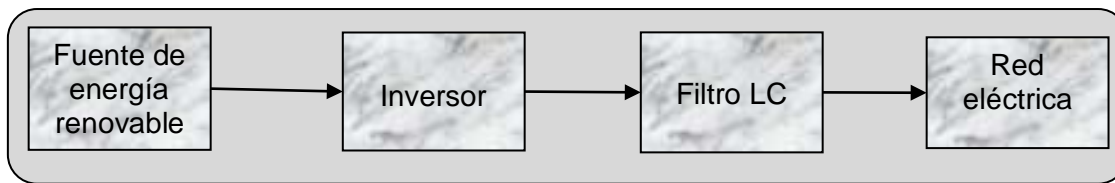


Fig. 1. Diagrama de bloques general de un inversor conectado a la red eléctrica.

Control basado en reglas

En años recientes se han incrementado las investigaciones para entender la habilidad del humano para razonar y tomar decisiones, frecuentemente con un conocimiento parcial de un problema determinado. Bajo este razonamiento, nos encontramos en el dilema de tomar decisiones para resolver un problema con información incompleta. De esta forma se puede tomar un razonamiento aproximado de un problema, lo que se conoce comúnmente como lógica difusa. Como resultado, la inteligencia artificial usando lógica difusa ha probado ser extremadamente segura en atribuir un mecanismo lógico a un amplio rango de tópicos, entre ellos, ingeniería de control y su aplicación en electrónica de potencia. El propósito de la lógica difusa es tomar decisiones basadas en un número de reglas aprendidas o predefinidas, en lugar de cálculos numéricos. Esta incorpora un conocimiento o estructura basado en reglas para tomar decisiones. Para esto, los datos de entrada deben ser representados de tal forma que tengan significado para su manipulación por medio de las reglas. La lógica difusa es un agregado de reglas condicionales sobre las variables de entrada y así obtener una salida deseada. Con el

desarrollo de las nuevas tecnologías en microcontroladores, el FLC ha sido utilizable en el control de electrónica de potencia debido a que estos sistemas no necesitan modelos matemáticos y son insensibles a los cambios en los parámetros del sistema.

Arquitectura del Control basado en reglas

La idea principal del control basado en reglas reside en un procedimiento que proporciona un método para establecer reglas de asignación que determinan el comportamiento del controlador. En este trabajo, el objetivo de control es que el voltaje de salida del inversor monofásico este lo más cercano posible al voltaje de la red eléctrica. Bajo este enfoque, se establece el siguiente razonamiento lógico: cuando el voltaje de red es positivo el inversor debe entregar un voltaje positivo y cuando el voltaje de red es negativo el inversor debe entregar un voltaje negativo. Para establecer las reglas del sistema de inferencia se toma el voltaje de red V_{red} como la variable de entrada. Para la salida, se establecen las variables V_{pos} y V_{neg} ; V_{pos} activara la rama positiva del inversor y V_{neg} la rama negativa. Ahora, el voltaje de red puede ser dividido en tres regiones delimitadas por dos valores “alto” y “bajo”. Con estas variables se pueden establecer las siguientes reglas del sistema de inferencia que activan la rama positiva y negativa del inversor:

Regla 1: Si $V_{red} > alto$ ENTONCES V_{pos}

Regla 2: Si $V_{red} < bajo$ ENTONCES V_{neg}

De esta forma se comprueban las condiciones lógicas sobre la variable de entrada V_{red} para inferir la asignación de V_{pos} o V_{neg} a la salida.

Sistema propuesto

La Fig. 2 ilustra el diagrama de bloques del sistema propuesto para generar las señales de disparo. El voltaje presente en la red eléctrica es muestreado y posteriormente se acondiciona a niveles de energía que soporta el microcontrolador. El PIC recibe la señal

acondicionada y convierte la señal analógica a digital para ser manipulada por el control basado en reglas. De esta forma, el PIC por medio del control basado en reglas, genera las señales de disparo sincronizadas con la red eléctrica.

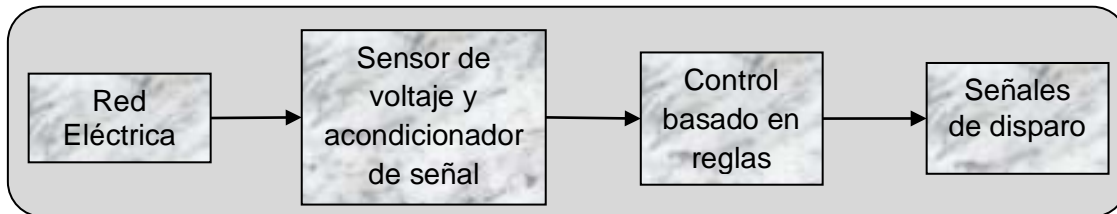


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema propuesto.

3. Resultados

El sistema que genera las señales de disparo está formado por dos etapas: Etapa 1, sensor de voltaje y acondicionador de señal. Etapa 2, controlador PIC. La Fig. 3.a) ilustra el diagrama esquemático de la etapa de muestreo y acondicionamiento de señal. Esta etapa, muestrea de manera continua, el voltaje de la red eléctrica y acondiciona el voltaje muestreado para alimentar la entrada analógica del PIC. El acondicionamiento de la señal debe ser de acuerdo a las características del PIC para que este no sufra ningún daño. La Fig. 3.b) muestra el microcontrolador PIC. En la figura se pueden apreciar las terminales de entrada y salida del controlador. La terminal 2 es la entrada analógica del PIC. Esta, recibe la señal acondicionada de la etapa 1. El microcontrolador procesa la señal de entrada analógica y por medio del control basado en reglas genera las señales de disparo. Las señales de disparo salen por las terminales 15 y 16 del PIC. Una genera el semiciclo positivo y la otra el semiciclo negativo. Estas señales son aptas para un inversor monofásico.

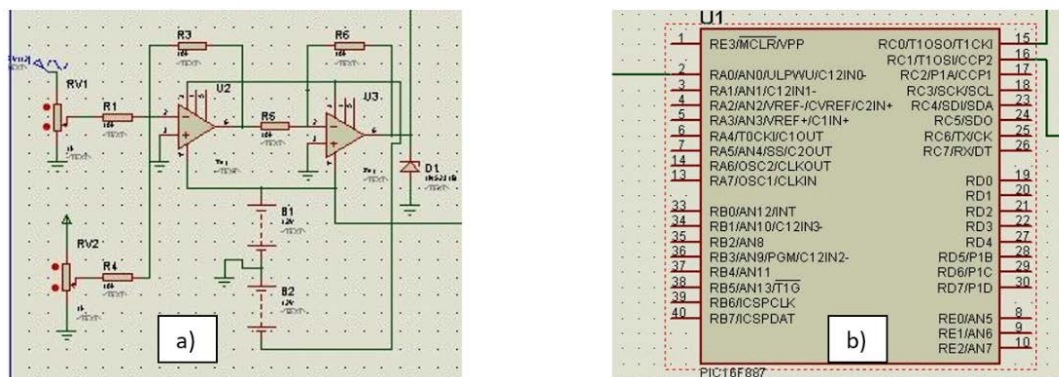


Fig. 3. a) Diagrama esquemático de la etapa de muestreo y acondicionamiento de señal. b) Microcontrolador PIC.

La Fig. 4.a) muestra la señal muestreada y acondicionada que alimenta el PIC; así como las señales de disparo que genera el controlador basado en reglas. Estas señales de disparo gobiernan el comportamiento del inversor. La Fig. 4.b) ilustra el voltaje de salida del inversor y el voltaje de la red muestreado.

Finalmente, la Fig. 5 ilustra el voltaje de red muestreado y el voltaje a la salida del inversor con filtro LC. En la figura se puede apreciar como el voltaje a la salida del inversor prácticamente está en fase con el voltaje de la red muestreado; por lo tanto se tiene un buen seguimiento de fase.

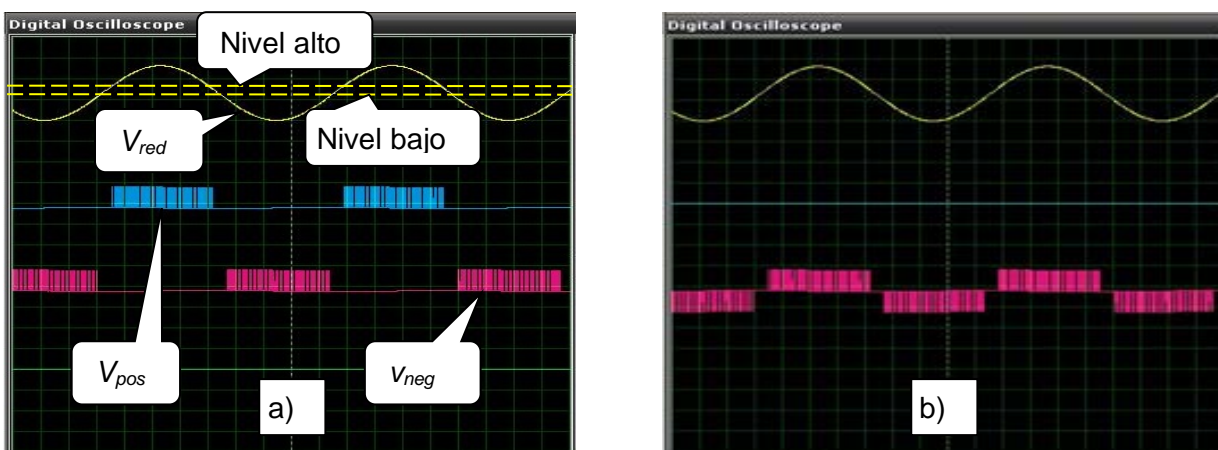


Fig. 4. a) Señal de entrada al PIC y los pulsos que genera el controlador. b) Voltaje de red muestreado y voltaje de salida del inversor.

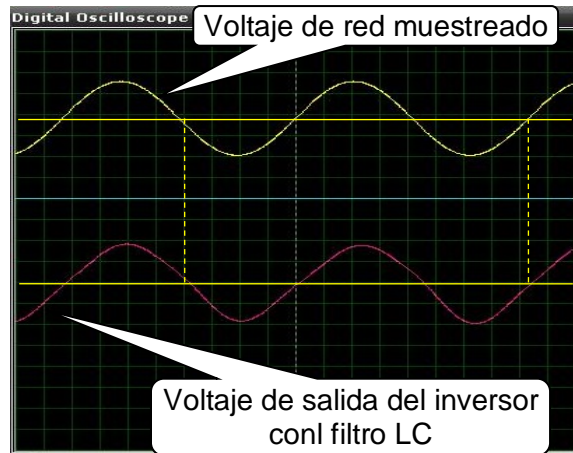


Fig. 5. Señal de entrada al PIC y el voltaje de salida del inversor con filtro LC.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una alternativa para el control de señales de disparo con seguimiento de fase sin PLL. Esta alternativa es viable debido a que se puede implementar en un dispositivo de bajo costo. Además, por su peso y tamaño facilita su portabilidad. Por otro lado, el control basado en reglas permite establecer una buena sincronización del sistema de generación de energía con la red eléctrica como se muestra en las simulaciones. En este sentido, el control basado en reglas es insensible a perturbaciones y las simulaciones muestran un buen seguimiento de fase y rechazo a perturbaciones. Como trabajo a futuro se pretende implementar el prototipo de este sistema así como un inversor monofásico de baja potencia para probar el comportamiento del controlador.

5. Referencias

- [1] L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, V. Salas, "Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 30, Febrero 2014, Pages 796-807.

- [2] I. Colak, E. Kabalci, R. Bayindir, "Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes". *Energy Conversion and Management*, Volumen 52, Número 2, Febrero 2011, 1114-1128.
- [3] M. Monfared, S. Golestan, "Control strategies for single-phase grid integration of small-scale renewable energy sources: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 16, Número 7, Septiembre 2012, 4982-4993.
- [4] A. M. Amjad, Z. Salam, "A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 33, Mayo 2014, 141-153.
- [5] N. Altin, İ. Sefa, "dSPACE based adaptive neuro-fuzzy controller of grid interactive inverter". *Energy Conversion and Management*, Volumen 56, Abril 2012, 130-139.
- [6] N. A. Gounden, S. A. Peter, H. Nallandula, S. Krithiga, "Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid-connected 909-915.
- [7] K.M. Tsang, W.L. Chan, X. Tang, "PLL-less single stage grid-connected photovoltaic inverter with rapid maximum power point tracking". *Solar Energy*, Volumen 97, Noviembre 2013, 285-292

6. Autores

Gadiel Dzahuindanda Velázquez Córdova, estudia ingeniería Electrónica con especialidad en Sistemas Digitales en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Desarrolla su tesis titulada "SPWM digital para Inversor Monofásico en FPGA". Sus áreas de interés son: Robótica, Procesamiento de Señales, Control Digital, Programación y diseño de sistemas embebidos (SoC) en FPGA, además con Arduino, PIC y dsPIC.

M.I. Sergio Constantino Yáñez Campos nació en la ciudad de San Luis Potosí, México. Obtuvo el grado de licenciatura en Electrónica en Sistemas Digitales en el año 1997 en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Grado de

Maestría en Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Control Automático en el año 2001 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Actualmente es Investigador adscrito a la coordinación de Electrónica, en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Dentro de los principales intereses de investigación se encuentra el control lineal y no lineal de sistemas electrónicos de potencia enfocado al área de calidad de la energía, utilización de energías renovables y control inteligente.

Ing. Heber Bernabé Pérez Márquez nació en Celaya Gto., México, en 1973. Recibió el grado de licenciatura en Ingeniero electrónico en el año 1997 en el Instituto Tecnológico de Celaya Gto. y el grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Instrumentación y Control en 2002, en la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato. Actualmente es Investigador adscrito a la coordinación de Electrónica, en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Dentro de los principales intereses de investigación se encuentra los sistemas electrónicos digitales y control inteligente.