

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL CD-CA EMPLEADO PARA TRANSFERIR ENERGÍA ENTRE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO Y LA RED ELÉCTRICA DE CORRIENTE ALTERNA

PROPOSAL FOR A CONTROL SYSTEM FOR AN EMPLOYED CD-CA BIDIRECTIONAL CONVERTER TO TRANSFER ENERGY BETWEEN A PHOTOVOLTAIC SYSTEM AND THE ALTERNATE CURRENT ELECTRICAL NETWORK

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional en Celaya, México
juan.martinez@itcelaya.edu.mx

Stefanny Lizet Rangel Pichardo

Tecnológico Nacional en Celaya, México
15030763@itcelaya.edu.mx

Francisco Gutiérrez Vera

Tecnológico Nacional en Celaya, México
francisco.gutierrez@itcelaya.edu.mx

Horacio Orozco Mendoza

Tecnológico Nacional en Celaya, México
horacio.orozco@itcelaya.edu.mx

Recepción: 25/septiembre/2019

Aceptación: 14/noviembre/2019

Resumen

Uno de los principales retos en las Micro-Redes de Corriente Directa (μ R-CDs) es el diseño e implementación de los sistemas de control encargados de la manipulación de los convertidores electrónicos de potencia. En este trabajo se presenta una propuesta para el diseño e implementación de un sistema de control embebido capaz de manipular la transferencia de energía entre un sistema fotovoltaico y la red eléctrica principal de corriente alterna. Este sistema de control se aplica sobre el convertidor bidireccional CD-CA que forma parte de un prototipo experimental de una μ R-CD conformada por un par de Arreglos Fotovoltaicos (AFs)

de 500 W cada uno, interconexión a la Red Eléctrica Principal (REP) de Corriente Alterna (CA) con una capacidad de 1 kW y cargas de CD y CA (cargas resistivas y cargas no lineales como luminarias LED, luminarias fluorescentes y equipo de cómputo) que trabajara en corriente directa.

Palabra(s) Clave: Convertidor electrónico de potencia, corriente alterna, corriente directa, micro-red, transferencia de energía.

Abstract

A main concern in DC Micro-Grids (μ R-CDs) is the design and implementation of control systems which are in charge of manipulation of power converters. In this paper, an embedded control system design and implementation is proposed in order to transfer energy from a photovoltaic system to the main grid. This control system is applied over a bidirectional DC-AC converter which is part of a μ R-CD comprised by two 500 W PV arrays (AFs), a 1 kW point of common coupling (REP) with the AC main grid, as well as AC and DC loads (resistive and non-linear loads such as LED and fluorescent lamps and computer equipment) which operates in DC.

Keywords: AC, DC, power converters, transfer energy.

1. Introducción

Las Micro-Red de Corriente Directa (μ R-CDs) se están convirtiendo en uno de los principales temas de investigación hoy en día, esto debido a que podrían resolver el problema de escasez de energía que enfrentamos en la actualidad (Yu et al., 2014). Usualmente, una μ R-CD se compone de: fuentes generadoras de energía que alimentan la μ R-CD, Convertidores Electrónicos de Potencia (CEPs), así como de fuentes de almacenamiento como Bancos de Baterías (BBs) y Bancos de Super-Capacitores (BSCs), además de las cargas conectadas al bus de CD. Todos los componentes antes mencionados requieren de un Sistema de Administración (SA) cuya función es monitorear la μ R-CD, tomar decisiones con base en los datos obtenidos y conmutar entre las distintas formas de operación con el objetivo de proporcionar estabilidad al bus de CD, cuyas variaciones usualmente

se establecen en un rango del $\pm 5\%$ del voltaje nominal [Bae y Kwasinski, 2012; Jin et al., 2014; Shadmand y Balog, 2014; Dizqah et al., 2015; Morstyn et al., 2016].

Para lograr la estabilidad en la μR cada CEP es manipulado por un controlador local, diversos autores proponen el uso de técnicas de control clásico en el diseño de controladores para μR -CDs que utilizan sistemas fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento de energía y convertidores CD-CA para interconectarse a la Red Eléctrica Principal (REP), en estos diseños se reportan datos experimentales utilizando cargas resistivas [Zhang et al., 2011; Sun et al., 2011; Zhang et al., 2011; Hasanein, 2016]. El uso de cargas puramente resistivas puede considerarse como una situación ideal, sin embargo, una red doméstica o industrial contiene cargas lineales y no-lineales cuyo comportamiento difiere de un elemento a otro, lo cual se puede ver reflejado en el bus de CD de la μR -CD con caídas o picos de voltaje más pronunciados y con tiempos de estabilización más largos.

Por tales motivos, la finalidad de este trabajo es presentar una propuesta para el diseño de un sistema de control clásico encargado del control de un convertidor bidireccional CD-CA utilizado en una μR -CD para transferir energía entre el bus de CD y la red eléctrica principal de corriente alterna con la finalidad de mantener el bus de CD operando en un rango de 190 V $\pm 5\%$, condición necesaria para la correcta operación de las cargas que se conectarán al bus de CD. Este convertidor será parte de un prototipo experimental de una μR -CD con generación de energía limpia por medio de dos Arreglos Fotovoltaicos (AFs) de 500 W cada uno y un banco de baterías encargado de almacenar energía eléctrica.

2. Métodos

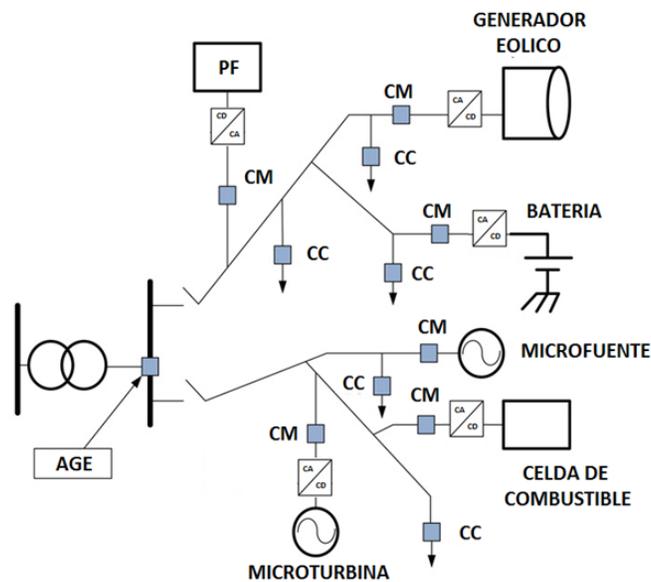
Micro-Redes de CD

El concepto de una μR ha recibido considerable atención debido a que utiliza fuentes de energía renovable y suministra energía a cargas críticas en caso de un fallo en la REP. Las μR s son redes de baja tensión o sistemas de energía distribuidos que proporcionan energía a un área en particular mediante generadores de energía, funcionan de forma independiente y se aíslan de la REP en caso de fallas. Una μR cuenta con micro-turbinas, turbinas eólicas, celdas de combustible,

AFs, interconectadas mediante CEPs y conectadas a la REP por medio de un punto de acoplamiento común.

Una μR puede operar en modo aislado, en este modo de operación la μR se desconecta de la REP, la transición de conexión de la REP al modo aislado debe ser estable. Si la μR está consumiendo o suministrando energía a la REP antes de la desconexión, se produce un desequilibrio. Esto se compensa por las unidades almacenadoras de energía debido a que las μR s tienen una respuesta dinámica lenta [Mahmoud et al., 2015].

En la figura 1 se muestra la arquitectura general de una μR , en esta es posible observar: un Administrador General de Energía (AGE), Controladores de Micro-Fuentes (CM), Controladores de Carga (CC), Micro-Turbinas, Celda de Combustible, Banco de Baterías, Cargas y Generadores de Energía Renovables como AFs.



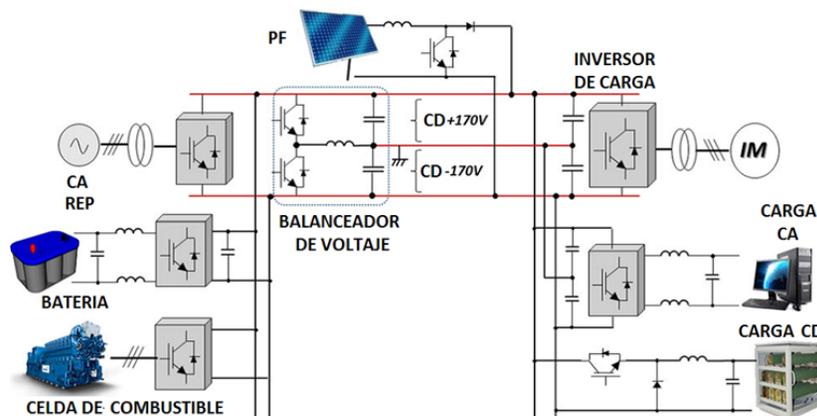
Fuente: Dragicevic, 2016.

Figura 1 Arquitectura general de una micro-red.

La integración de los elementos de una μR genera retos operativos que deben ser abordados desde el punto de vista de diseño de sistemas de control que garanticen el funcionamiento confiable y económico de la μR . Las características más relevantes de un sistema de control de una μR son [Olivares, 2014]:

- Control de salida: la salida de voltaje y corriente de las Fuentes de Energía (FEs) deben seguir valores de referencia y garantizar oscilaciones adecuadamente amortiguadas.
- Balance de energía: las FEs deben adaptarse a los desequilibrios de energía manteniendo las variaciones de voltaje y frecuencia en un rango aceptable.
- Administración de la Demanda (AD): Se deben diseñar sistemas de AD para incorporar la capacidad de controlar una parte de la carga.
- Transición entre modos de operación: Es la capacidad de trabajar interconectada a la REP o en modo autónomo, incluyendo una suave transición entre estos modos.

Las μ R-CDs han ganado interés en los ámbitos académico e industrial. Esto se debe a características como: alta fiabilidad y eficiencia, uso de sistemas de control simples, interface natural con fuentes de energía renovables, cargas electrónicas y sistemas de almacenamiento de energía. Existe una serie de topologías de μ R-CDs reportadas en la literatura, pero en general se clasifican en tres categorías, topología de un bus, topología multi-bus y topología reconfigurable. En la figura 2 se muestra la estructura general de una μ R-CD con un bus bipolar [Dragicevic, 2016].



Fuente: Dragicevic, 2016.

Figura 2 Micro-Red de CD con bus bipolar.

En general una μ R-CD consiste en una serie de CEPs trabajando en paralelo que deben operar en armonía, las funciones del control local para estos convertidores

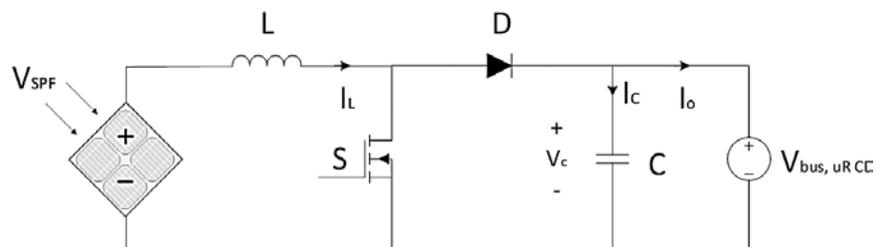
normalmente son las siguientes: corriente, voltaje y control de caída para cada unidad; funciones de fuentes dependientes como el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (SPMP) para los AFs y los generadores eólicos, o la estimación del EC de las baterías.

Descripción General de una Micro-Red de Corriente Directa

En la figura 3 se presenta el diagrama de una estructura general de una μ R-CD, la fuente principal de energía de la μ R-CD son los AFs, los cuales alimentan cada uno a un convertidor CD-CD elevador. El segundo elemento que forma parte de la μ R-CD es el convertidor CD-CA bidireccional, el cual permite interconectar la μ R-CD con la REP, encargándose de transferir a la REP la energía generada por los AFs que no es utilizada por las cargas locales o por el sistema de almacenamiento de energía. La μ R-CD cuenta con un BB, este BB se conecta al bus de CD por medio de un convertidor CD-CD bidireccional. Además, se tiene un BSC con el propósito de mantener el nivel de voltaje del bus de CD durante los intervalos de conexión o desconexión de la REP, el BB, los AFs y las cargas. A continuación, se describen los elementos encargados de la transferencia de energía entre los AFs y la REP.

Convertidor CD-CD elevador

Cada AF alimenta a un convertidor CD-CD en topología elevadora. En la figura 3 se presenta el diagrama esquemático de este CEP, este convertidor se emplea para transferir la energía de los AFs al bus de CD. En [Attanasio et al., 2013] se presenta la metodología de diseño del convertidor de la figura 3.

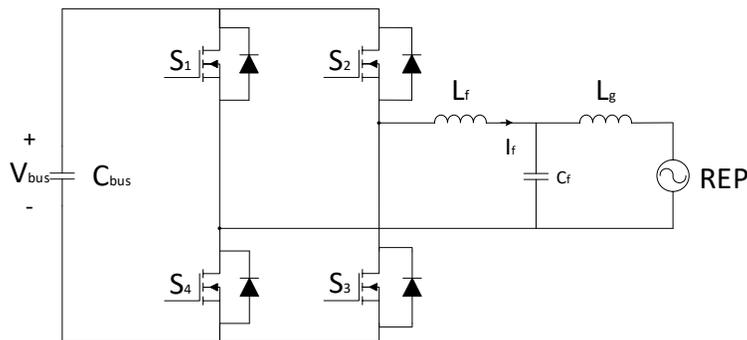


Fuente: Attanasio, 2013.

Figura 3 Diagrama esquemático del convertidor CD-CD elevador.

Convertidor CD-CA Bidireccional

Si se desea extraer la potencia máxima de los sistemas fotovoltaicos es necesario contar con un sistema para transferir la energía que no consumen las cargas conectadas al bus de CD en una μ R-CD. Por lo tanto, si la cantidad de energía generada por los AFs es mayor que la energía demandada por las cargas conectadas al bus de CD, se habilita el convertidor como inversor para transferir la energía restante a la REP. En la figura 4 se presenta el diagrama esquemático del convertidor CD-CA bidireccional implementado. Cuando este convertidor trabaja como rectificador, se toma energía de la REP y se transfiere al bus de CD para ayudar a suministrar la energía demandada por las cargas conectadas al bus de CD. En [Attanasio et al., 2013] se presenta la metodología de diseño del convertidor de la figura 4.



Fuente: Attanasio, 2013.

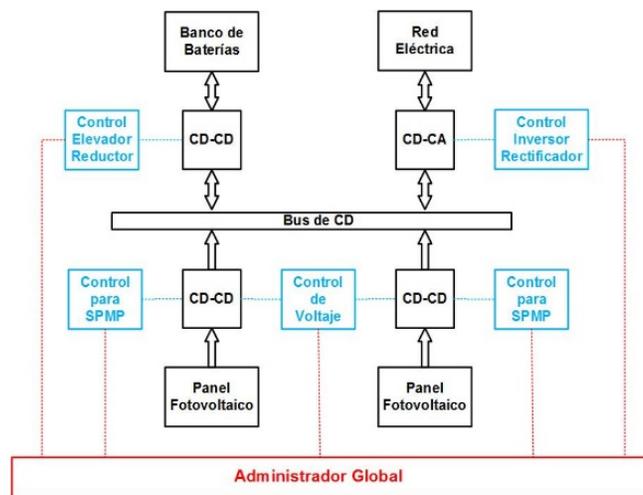
Figura 4 Diagrama esquemático del convertidor CD-CA bidireccional.

Cada uno de los convertidores presentados necesita un sistema de control para mantener estable la energía en cada uno de los convertidores que conforman la μ R-CD. En la siguiente sección se describen los sistemas de control propuestos.

3. Resultados

Para la manipulación de la energía en una μ R-CD es necesario definir un sistema encargado de la administración y el control. El sistema propuesto cuenta con controladores que operan en cada uno de los elementos (controladores locales) de la μ R-CD y un administrador global. En la figura 5 se presenta el esquema general

del sistema de administración y control en la μ R-CD, los bloques en color negro representan los elementos de la μ R-CD (CEPs, AFs, BB y la REP), los elementos en color azul representan los controladores locales que conforman el sistema (CV, SPMP, control del elevador y reductor, y el control para el inversor y rectificador), mientras que en color rojo se representa el administrador global del sistema. En este artículo solo se presenta una propuesta de los controladores del convertidor CD-CD elevador y el convertidor CD-CA bidireccional, convertidores necesarios para transferir la energía eléctrica generada por los AFs a la REP.

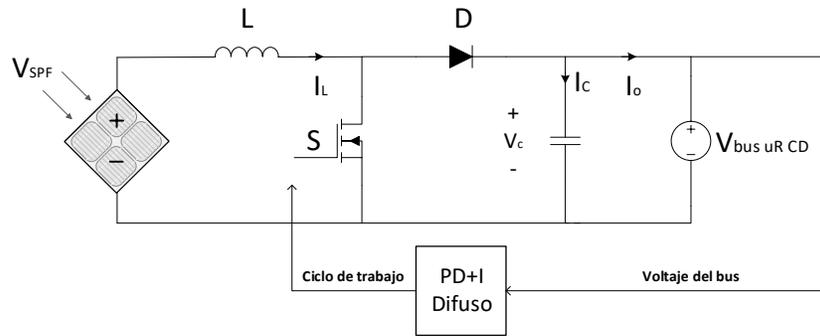


Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Esquema general del sistema de administración.

Controlador de Voltaje para los Convertidores CD-CD Elevadores

Los convertidores CD-CD elevadores conectados con los AFs pueden operar en modo control de voltaje, en este modo de operación el control se realiza con un controlador PI clásico encargado de mantener el voltaje de salida del convertidor CD-CD (voltaje del bus de CD) en un nivel deseado. En la figura 6 se ilustra el diagrama del convertidor con el controlador, este controlador monitorea el nivel de voltaje de salida del convertidor y en base a los cambios realiza acciones correctivas para eliminar los efectos generados por las perturbaciones del sistema. Cuando el sistema opera con este algoritmo de control no es posible transferir energía eléctrica a la REP.

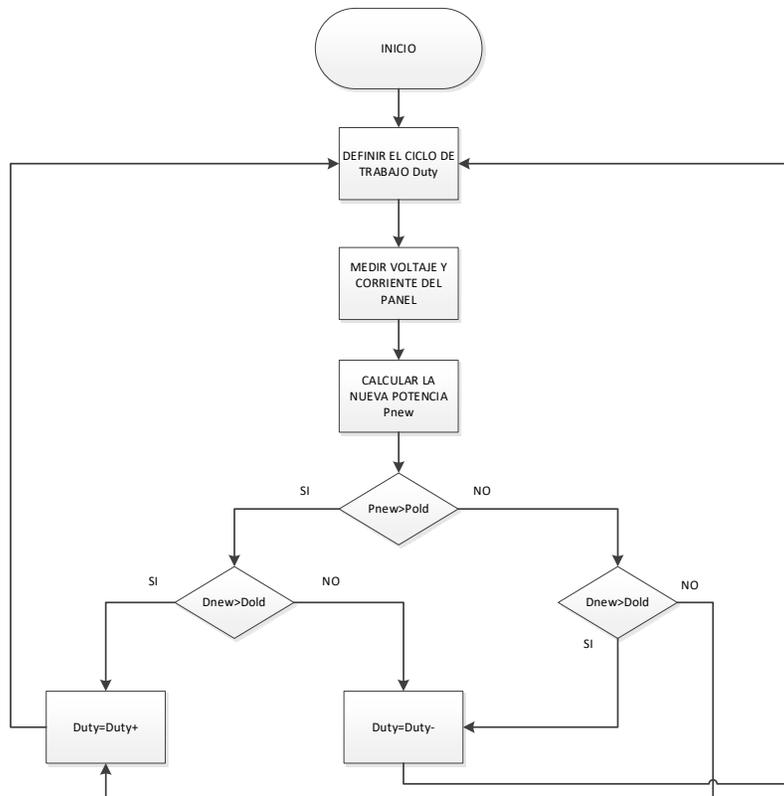


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Control en modo voltaje para el convertidor CD-CD elevador.

Controlador para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia

El segundo modo de operación de los dos convertidores CD-CD elevadores conectados a los AFs se encarga de extraer la potencia máxima de los AFs utilizando un algoritmo de control clásico para el SPMP Perturbar y Observar (P&O) que se ilustra en la figura 7.

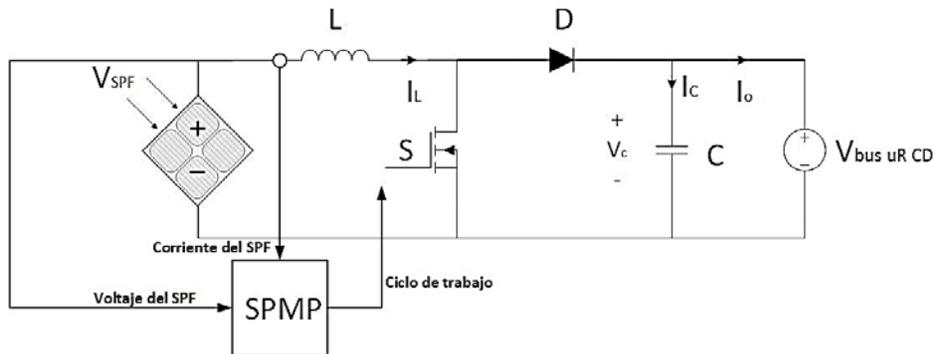


Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Algoritmo del control Perturbar y Observar.

El principio de funcionamiento de este algoritmo implica perturbar la salida del AF, esta perturbación genera cambios en la potencia de salida del AF, estos cambios son juzgados con el principio de generar un aumento en la potencia del AF. Si la perturbación genera un aumento en la potencia del sistema, la perturbación se sigue generando en esa dirección; de lo contrario, si la perturbación genera una disminución en la potencia, la perturbación se realizará en sentido opuesto.

En la figura 8 se presenta el diagrama del convertidor con el controlador SPMP. Este controlador modifica el ciclo de trabajo del interruptor de potencia y monitorea los cambios en la potencia de los AFs.

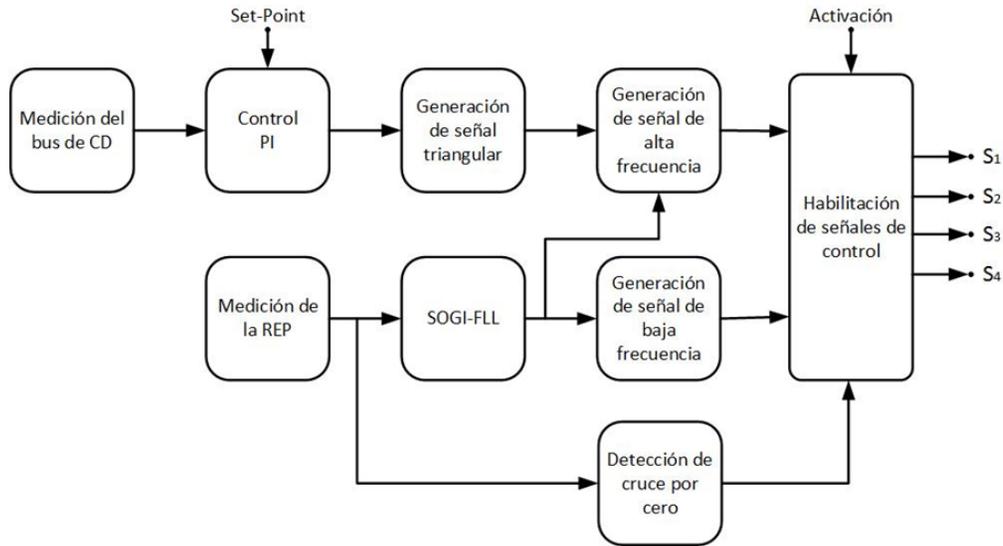


Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Diagrama del sistema de control SPMP.

Sistema de Control para el Convertidor CD-CA Bidireccional

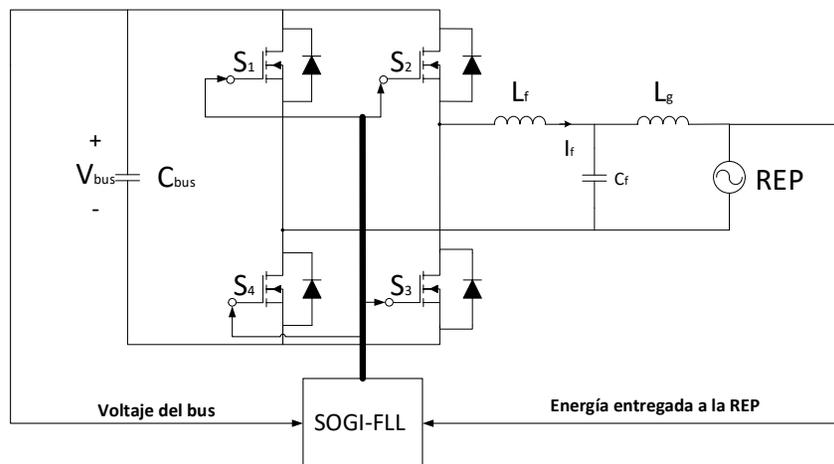
El convertidor utilizado para interconectarse a la REP puede operar como rectificador (tomar energía de la REP y la suministra a las cargas conectadas al bus de CD) o como inversor (tomando energía del bus de CD y la transfiere a la REP). En la figura 9 se presenta el diagrama a bloques del sistema de control implementado para el convertidor cuando opera como inversor. El control implementado cuenta con un control PI, cuyas decisiones dependen del estado del nivel de voltaje del bus de CD. Si el nivel de voltaje del bus disminuye, entonces la cantidad de energía transferida a la REP también disminuye, lo que por consecuencia se refleja en un aumento del nivel de voltaje del bus de CD; caso contrario, se aumenta la cantidad de energía suministrada a la REP para disminuir el nivel de voltaje en el bus de CD.



Fuente: Elaboración propia.

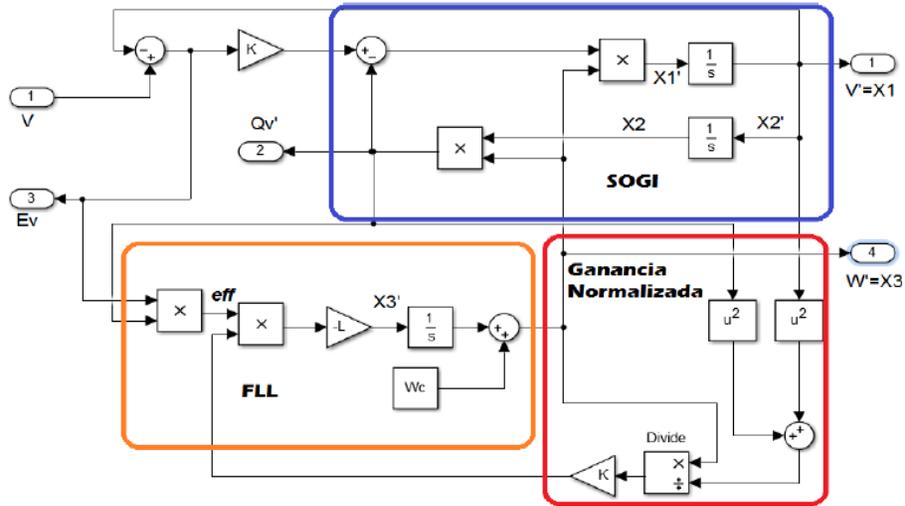
Figura 9 Diagrama del algoritmo implementado para el control del inversor.

El diagrama del convertidor con el control se muestra en la figura 10. En la figura 11 se ilustra el algoritmo para la sincronización entre la señal generada por el inversor y la REP, esta se lleva a cabo a través de los módulos de detección de cruce por cero y del algoritmo SOGI-FLL en el momento que se requiera. Las señales de control de los cuatro interruptores del inversor de puente completo se generan al comparar la señal de salida del bloque SOGI-FLL (Patil y Patel, 2016) con una señal triangular de alta frecuencia.



Fuente: Elaboración propia.

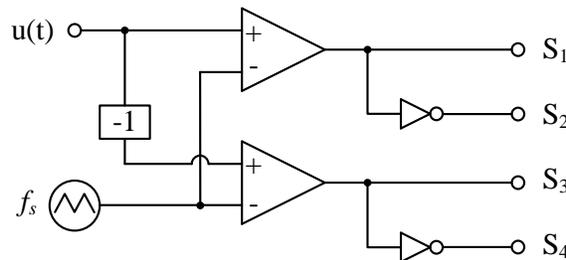
Figura 10 Control para el convertidor CD-CA trabajando como inversor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11 Algoritmo de control SOGI-FLL para el inversor.

Cuando el convertidor CD-CA bidireccional opera como rectificador, el sistema de control se realiza con un controlador clásico PI, el cual se encarga de estabilizar el bus de CD en el nivel de voltaje deseado, aumentando o disminuyendo la amplitud de la señal triangular de alta frecuencia (f_s) que se compara con una señal senoidal de baja frecuencia $u(t)$ como se ilustra en la figura 12.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12 Control para el convertidor CD-CA trabajando como rectificador.

4. Discusión

Con la propuesta de los sistemas de control que se presenta en este trabajo se espera que al implementarse en tarjetas de desarrollo para sistemas embebidos se logre estabilizar el bus de CD de la micro-red al transferir energía entre la micro-red y la red eléctrica principal de corriente directa.

Con este sistema de control implementado se podrán incorporar más elementos a la micro-red, incrementando con esto las opciones de manejo de la energía. Una siguiente etapa puede ser la incorporación de un sistema de control para un convertidor CD-CD que se encargue de la transferencia de energía entre la micro-red y un banco de baterías.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Attanasio, R., Gennaro, F., & Scuderi, G. (2013, October). A grid tie micro inverter with reactive power control capability. In *AEIT Annual Conference, 2013* (pp. 1-6). IEEE.
- [2] Bae, S., & Kwasinski, A. (2012). Dynamic modeling and operation strategy for a microgrid with wind and photovoltaic resources. *IEEE Transactions on smart grid*, 3(4), 1867-1876.
- [3] Dizqah, A. M., Maheri, A., Busawon, K., & Kamjoo, A. (2015). A multivariable optimal energy management strategy for standalone dc microgrids. *IEEE transactions on power systems*, 30(5), 2278-2287.
- [4] Sun, K., Zhang, L., Xing, Y., & Guerrero, J. M. (2011). A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(10), 3032-3045.
- [5] Dragičević, T., Lu, X., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2016). DC microgrids—Part I: A review of control strategies and stabilization techniques. *IEEE Transactions on power electronics*, 31(7), 4876-4891.
- [6] Hasanien, H. M. (2016). An adaptive control strategy for low voltage ride through capability enhancement of grid-connected photovoltaic power plants. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3230-3237.
- [7] Zhang, L., Wu, T., Xing, Y., Sun, K., & Guerrero, J. M. (2011, March). Power control of DC microgrid using DC bus signaling. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE* (pp. 1926-1932). IEEE.

- [8] Jin, C., Wang, P., Xiao, J., Tang, Y., & Choo, F. H. (2014). Implementation of hierarchical control in DC microgrids. *IEEE transactions on industrial electronics*, 61(8), 4032-4042.
- [9] Mahmoud, M. S., Rahman, M. S. U., & Fouad, M. S. (2015). Review of microgrid architectures—a system of systems perspective. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 1064-1078.
- [10] Morstyn, T., Hredzak, B., Demetriades, G. D., & Agelidis, V. G. (2016). Unified distributed control for DC microgrid operating modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 802-812.
- [11] Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., & Jimenez-Estevez, G. A. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4), 1905-1919.
- [12] Patil, K. R., & Patel, H. H. (2016). Modified Dual Second-order Generalized Integrator FLL for Frequency Estimation Under Various Grid Abnormalities. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 1(4), 10-18.
- [13] Shadmand, M. B., & Balog, R. S. (2014). Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2635-2643.
- [14] Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., Feng, L., & Ge, H. (2011). A modular grid-connected photovoltaic generation system based on DC bus. *IEEE transactions on power electronics*, 26(2), 523-531.