

Bidirectional and Bifunctional Three-Phase Converter Using FCS-MPC Control for Distributed Generation Hybrid Systems

Juan Tisza, M.Sc.¹, Félix Santos, B.Sc.¹ and Jesús Arteaga¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtisza@uni.edu.pe, felixsantoscanari@gmail.com, jesus.arteaga.v@uni.pe

Abstract— *The development of a three-phase electronic power converter is presented, the converter uses IGBTs as electronic power devices, it can act bi-functionally as a three-phase full-wave rectifier or as a three-phase three-arm inverter, using the same three-phase power bridge. For the conversion, the control design is carried out using the FCS-MPC technique (Finite Commutations Set -Model Predictive Control). The quality of the electrical energy conversion is evaluated, evaluating the average and effective parameters of the voltages and currents, with various types of loads. As well as distortion with the THD coefficient, frequency and phase. The converter seeks to be very flexible and somewhat universal for the conversion of AC-DC and DC-AC energy, for diverse applications in the field of distributed power generation systems, particularly with the presence of renewable energy sources. Modeling and testing have been done with MATLAB, SIMULINK. The loads have also been modeled for typical applications with real characteristics, so in the case of rectifier the test load has been considered a lithium ion battery, then with a 5HP, 240 v and 1750 rpm DC motor, to later test with a general load of RL characteristics. For the inverter, it is tested with a balanced three-phase RL load and then with a three-phase squirrel cage-type asynchronous motor. The results are presented by means of graphs and tables for a better understanding of said results obtained in the simulations. The functionality and operation of the developed converter is explained by means of block diagrams that incorporate the units that make up the converter including the control units, the command unit, the operation selection switch unit, as well as the power unit. The results obtained show good functional characteristics of the converter in its two modes of operation, reflected in the parameters measured in the simulation tests.*

Keywords: *FCS-MPC Control, Three Phase Rectifier, Three Phase Inverter, Isolated Gate Bipolar Transistor (IGBT), Total Harmonic Distortion (THD), Bi-functional and Bi-Directional Converter.*

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.418>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Convertidor Trifásico Bidireccional y Bifuncional Usando Control FCS-MPC para Sistemas Híbridos de Generación Distribuida

Juan Tisza, M.Sc.¹, Félix Santos, B.Sc.¹, and Jesús Arteaga¹

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtisza@uni.edu.pe,
felixsantoscanari@gmail.com,
jesus.arteaga.v@uni.pe

Resumen— Se presenta el desarrollo de un convertidor electrónico trifásico de potencia, el convertidor utiliza IGBTs como dispositivos electrónicos de potencia, puede actuar de manera bifuncional como rectificador trifásico de onda completa o como inversor trifásico de tres brazos, utilizando el mismo puente trifásico de potencia para la conversión, el diseño del control se realiza mediante la técnica de FCS-MPC (Finite Commutations Set -Model Predictive Control). Se evalúa la calidad de la conversión de energía eléctrica, evaluando los parámetros medio y eficaz de las tensiones y corrientes, con diversos tipos de cargas. Así como también la distorsión con el coeficiente THD, la frecuencia y la fase. El convertidor busca ser muy flexible y en cierta forma universal para la conversión de energía AC-DC y DC-AC, para aplicaciones diversas en el campo de los sistemas de generación distribuida de energía, en particular con presencia de fuentes renovables de energía. El modelamiento y las pruebas han sido realizados con MATLAB, SIMULINK. Las cargas también han sido modeladas para aplicaciones típicas con características reales, así en el caso de rectificador la carga de ensayo se ha considerado una batería de iones de litio, después con un motor de DC de 5HP, 240 v y 1750 rpm, para posteriormente ensayar con una carga general de características RL. Para el inversor se ensaya con una carga trifásica RL balanceada y a continuación con un motor asíncrono trifásico de tipo jaula de ardilla. Los resultados son presentados mediante gráficos y tablas para una mejor comprensión de dichos resultados obtenidos en las simulaciones. La funcionalidad y la operación del convertidor desarrollado es explicado mediante diagramas de bloques que incorporan las unidades que conforman el convertidor incluyendo las unidades de control, la unidad de comando, la unidad de conmutación de selección de operación, así como también la unidad de potencia. Los resultados obtenidos muestran buenas características funcionales del convertidor en sus dos modos de operación, reflejado en los parámetros medidos en las pruebas de simulación.

Palabras Claves—Control FCS-MPC, rectificador trifásico, inversor trifásico, transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT), distorsión total de armónicos (THD), convertidor bifuncional y bidireccional.

I. INTRODUCCIÓN

En los tiempos actuales es indudable el rol protagónico que están adquiriendo los recursos energéticos renovables en la generación de energía y en particular en la energía eléctrica, que permita satisfacer la demanda de la población mundial (el 13% de la población mundial, unos 1000 millones de personas carecen de suministro de energía eléctrica, según estadísticas de hace dos años atrás [26]), esto es solo en el

requerimiento básico para combatir la “pobreza energética” mundial. Evidentemente esta situación se agudiza en las poblaciones aisladas de las redes convencionales públicas o privadas de distribución de energía eléctrica. Sin embargo aún en las zonas cercanas a las redes de distribución eléctricas convencionales por razones medioambientales y por razones económicas viene adquiriendo importancia la Generación Distribuida (DG del acrónimo en inglés), la aplicación de la DG presenta claras ventajas, respecto a los sistemas de generación centralizadas, entre las que se puede considerar, la cercanía entre las fuentes de generación y los centros de consumo, la reducción de costos en cableado, la flexibilidad de adaptación a las necesidades de los usuarios, la reducción de contaminación al incluir fuentes renovables, entre otras ventajas más.

Asociado al concepto de DG, se tiene el concepto de microrredes de energía (MG por su acrónimo en inglés). Con el objetivo de potenciar las ventajas de la generación distribuida, se observa un desarrollo y evolución de las microrredes, que conjuntamente con el desarrollo tecnológico en evolución continua conduce al desarrollo del concepto de microrredes inteligentes (“smartgrids”) cuyas aplicaciones son prácticamente una realidad en los tiempos actuales y con una proyección de mayor incidencia en los próximos años.

El tema de las MG, tanto en las MG interconectadas a la red de distribución principal, así como las MG que funcionan en modo aislado, llamado en modo isla (IMG), son estudiados e investigados por la academia y la industria. Estos estudios de las MG en la DG, incorporan variados y muy dispersos aspectos, como planeamiento, gestión, operación, eficiencia, rentabilidad, sostenibilidad, sustentabilidad, impactos económicos y sociales, entre otros más.

En la figura 1 se muestra un esquema típico de una MG integrándose a una DG en la cual se incorpora fuentes de energías renovables (RE) con recursos energéticos fotovoltaico (PV) y eólico, se incluye almacenadores de energía mediante un banco de baterías. La MG esta interconectada a la red principal, también se incorpora compensadores estáticos y capacitores conmutados.

Es importante observar la presencia de 5 convertidores electrónicos de energía, los cuales pueden incluir en sus unidades de control de disparo, desarrollos de diversas estrategias de control (EdC) para mejora y optimización del funcionamiento de la red, que se necesitará para un eficiente y

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.418>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

seguro funcionamiento, también se presenta un convertidor conectado al banco de baterías el cual presenta una funcionalidad bidireccional.

Lo anterior se ha presentado a fin de evidenciar la importante función que tienen los convertidores electrónicos de potencia en un sistema de generación y distribución de energía. En este sentido queda establecido que implementar mejoras en la funcionalidad, con una mayor versatilidad, flexibilidad y eficiencia en el diseño de los convertidores, es fundamental para un funcionamiento optimizado de la red.

En forma específica la opción de tener un convertidor DC-AC y AC-DC incorporado con una sola unidad de potencia y con la posibilidad de actuar de manera bifuncional y bidireccional, con la versatilidad de trabajar en una forma o en la forma inversa proporciona una solución estandarizada, que tiene importantes beneficios técnicos y económicos, como consecuencia de tener la versatilidad y flexibilidad que se ha mencionado anteriormente, más aun si el diseño tiene la opción de trabajar automáticamente en forma dual, dependiendo del valor del parámetro que se selecciona para determinar los cambios de operatividad en forma automática. En este artículo se desarrolla una versión primaria del convertidor universal optimizado cuyas características funcionales se ha descrito líneas arriba.

La utilización del convertidor desarrollado en este artículo facilita la optimización de redes de generación y de suministro eléctrico, de acuerdo a los requerimientos particulares que se tengan, también se puede decir lo mismo en otras aplicaciones de la electrónica de potencia y de la electrónica industrial.

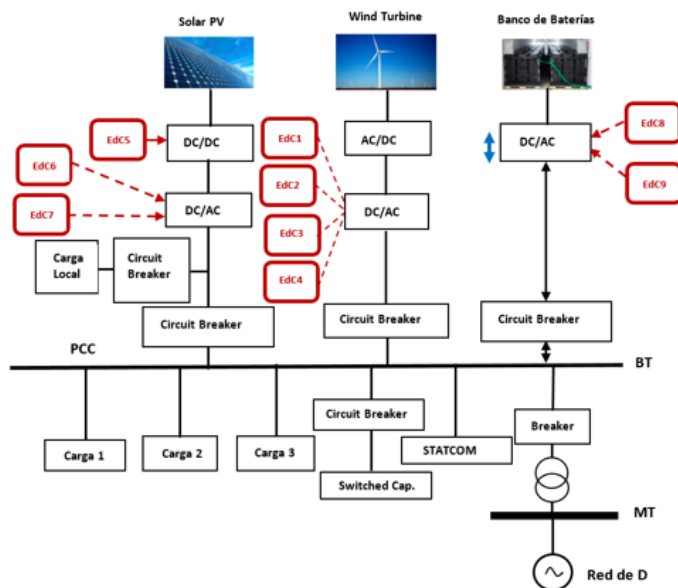


Fig. 1 Microred de generación híbrida de estructura no aislada.

A. La metodología de la investigación desarrollada.

La metodología que se adopta en la presente investigación está sustentada en los siguientes pasos:

- 1.- Concepción y evaluación de la problemática a considerar.
- 2.- Presentación del objetivo propuesto, basados en la problemática, estableciendo requerimientos fundamentales.
- 3.- Breve evaluación del estado del arte, en base a trabajos previos en temáticas similares consideradas en las referencias.
- 4.- Presentación y explicación del sistema desarrollado
- 5.- Explicación y evaluación de las unidades constituyentes del sistema desarrollado.
- 6.- Experimentación del sistema desarrollado, ensayo simulado del sistema con diversos tipos de entradas y salidas.
- 7.- Evaluación de resultados y conclusiones.

B. Descripción de los objetivos

Uno de los objetivos del artículo es presentar el desarrollo de un convertidor electrónico bidireccional y bifuncional, implementado mediante técnicas de control avanzado, como el control predictivo basado en modelos (FCS-MPC), que presente funcionalidades duales óptimas, como rectificador trifásico de onda completa y como inversor trifásico utilizando una única unidad de potencia, el convertidor puede ser configurado para su funcionalidad como rectificador o como inversor, pudiendo trabajar con bastante flexibilidad y versatilidad, ya que puede codificarse para trabajar eventualmente en forma automática en un sentido o en el otro sentido dependiendo del valor del parámetro funcional que se seleccione para activar el comando de cambio de operación.

Otro objetivo importante es demostrar que se puede conseguir las mejores características del funcionamiento individual de los convertidores de funcionamiento aislado en el sistema bidireccional y bifuncional que se desarrolla.

Un objetivo considerado en este artículo es evidenciar que los sistemas de control diseñados son lo suficientemente eficientes en diferentes condiciones de operación.

C. Descripción de la estructura del artículo.

En el primer capítulo, el artículo desarrolla una introducción que describe las condiciones actuales de los sistemas de generación y su distribución eléctrica mediante microrredes (MG) con fuentes de generación renovables. Se hace una breve explicación de los requerimientos que produce la evolución tecnológica, el advenimiento de las redes inteligentes y las exigencias de calidad en la energía, indicando las consideraciones en los sistemas actuales respecto a la optimización y la confiabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, en un escenario de generación distribuida (DG). Las consideraciones expuestas en la introducción muestran la importancia de los convertidores electrónicos, donde la flexibilidad y la versatilidad son condiciones importantes actualmente y en futuros desarrollos. Se incluye una explicación de la metodología de la investigación desarrollada para el artículo y se describen los objetivos.

En el segundo capítulo se ejecuta la evaluación del estado del arte y las fundamentaciones teóricas.

Inicialmente se describe el estado del arte mediante una evaluación de algunos trabajos previos cuya temática está en las áreas de análisis, diseño y desarrollo de convertidores electrónicos de potencia con características relacionadas con el tema que presentamos en este trabajo.

En el subtítulo siguiente se presenta una fundamentación teórica de conceptos y técnicas que se utilizan en el desarrollo del sistema, como es el caso de la filosofía de control MPC con la técnica para sistemas que trabajan con conjuntos finitos de estados de conmutación denominado FCS, también se explica la transformación de Clarke.

En el capítulo tres se ejecuta el desarrollo del convertidor, inicialmente se describe el sistema desarrollado a partir de un diagrama de bloques que presenta el sistema general y las unidades constitutivas del sistema que representa el convertidor completo implementado en la investigación.

En los siguientes subtítulos se describen y explican las diversas unidades, cuyas implementaciones se han ejecutado en códigos de programación en Matlab y Simulink.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para diversos casos experimentados, siendo los fundamentales los siguientes:

a). En el inversor con la carga general RL trifásica balanceada, después con la carga del motor trifásico asíncrono tipo jaula de ardilla.

b). En el rectificador, se ensaya primero con la carga correspondiente a una batería de iones de litio, segundo con la carga de un motor de corriente continua alimentado por la armadura y en tercer lugar con una carga general RL.

En general todos los datos de las cargas con que se han realizados los ensayos son presentados en las tablas 3 y 4.

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y prospectivas de la investigación efectuada.

II. ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Estado del arte y antecedentes

En las referencias [20], [21] y [22] se tienen, documentos que presentan estudios relacionados con la investigación que se aborda en este artículo, se revisa muy brevemente algunas características más importantes que se presentan en dichas investigaciones. En [20] se presenta una aplicación del control predictivo al diseño de un convertidor bidireccional monofásico de cinco niveles. El circuito propuesto incorpora un filtro pasivo en la puerta de salida AC y en el puente monofásico de la unidad de potencia se ha incorporado un conjunto de dos IGBT con dos diodos adicionales que permiten tener un camino para la corriente en consideraciones que la tensión del generador de entrada entregue tensión positiva o negativa, su funcionamiento y la estrategia de control está basada en la filosofía del control MPC-FCS y es validada experimentalmente reportándose buenos resultados funcionales en la calidad de la potencia eléctrica.

En el caso de [21] el documento presenta un convertidor bidireccional aislado de DC a AC trifásico, el aislamiento lo realiza en base a un transformador trifásico que trabaja en alta frecuencia, en esta propuesta no se utiliza la estrategia de control predictivo, a cambio de esto se propone una estrategia de control que busca controlar el flujo de potencia en ambas direcciones, el circuito presentado utiliza veinte IGBTs y se reportan resultados buenos en la calidad de la energía eléctrica y el control del factor de potencia, además de tener conmutaciones suaves, el convertidor que se describe está orientado para aplicaciones que integren fuentes renovables a la red principal de energía eléctrica.

En el caso de [22] se presenta un estudio orientado a evaluar el comportamiento de la estrategia de control MPC-FCS aplicado a circuitos electrónicos de potencia, mediante la utilización de un modelo denominado UPPAAL SMC, modelo que tiene por objeto comprobar el buen funcionamiento de la técnica de control MPC-FCS, el ensayo es realizado en un convertidor de dos niveles de DC a AC trifásico, el resultado demuestra que la técnica de control utilizada tiene un comportamiento bueno y confiable.

Como resultado de esta breve revisión se puede concluir que los estudios recientes indican que la filosofía y técnica del control predictivo basado en modelos, en su vertiente denominada FCS, aplicado a los circuitos electrónicos de potencia en general y en particular a los convertidores electrónicos de potencia, constituye un tema vigente y se encuentra en constante estudio y evolución.

Por otro lado, la aplicación abordada en el presente trabajo relativo a los convertidores bidireccionales y bifuncionales usando técnicas de control predictivo, constituye una óptica diferente en relación a otros estudios e investigaciones relativas a la utilización del control MPC-FCS, para la optimización de la funcionalidad de los convertidores electrónicos de potencia.

B. La metodología de control FCS-MPC

El método de control de conjunto finito de conmutaciones (FCS) es una forma de implementar el control predictivo basado en modelos (MPC). En razón a que la topología del convertidor electrónico de potencia con tres ramas presenta un conjunto finito de posibles conmutaciones, la aplicación de esta técnica de control resulta bastante adecuada para ser usada en los convertidores de potencia.

En las figuras 2 y 3 se muestra el principio de funcionamiento y la descripción del proceso que se implementa al aplicar el método.

Para realizar la explicación se utilizan los dos gráficos, el primer gráfico presenta un diagrama de secuencias en el tiempo y el segundo gráfico presenta un diagrama de bloques. La figura 2 presenta un diagrama en el tiempo que grafica la selección de un estado de conmutación a partir de un conjunto finito de estados posibles, esta selección se realiza en cada instante de tiempo discreto cuyo periodo de repetición es el tiempo de muestreo.

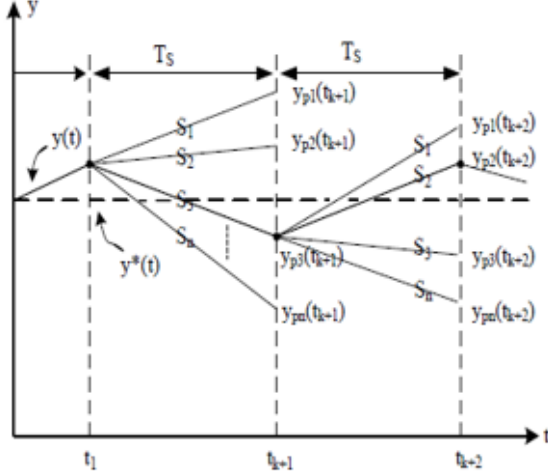


Fig. 2 Principio básico del método FCS-MPC [3]

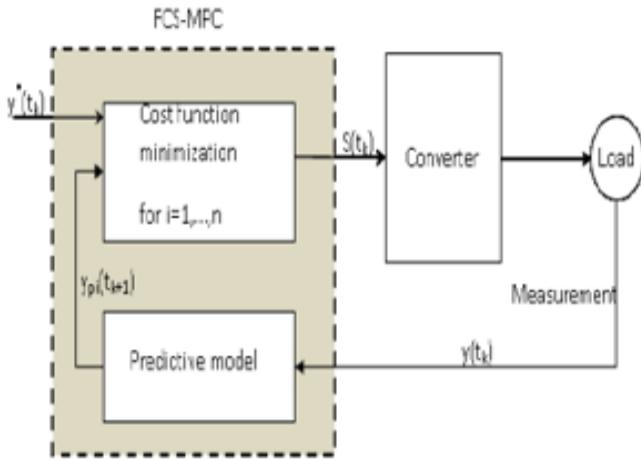


Fig. 3 Diagrama de bloques del método FCS-MPC [3]

En cada selección se hace una evaluación de cada uno de los posibles estados de conmutación y se ejecuta la selección siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la figura 3, para realizar el procedimiento se mide el valor de la variable de salida, con dicho valor medido y teniendo en cuenta cada estado de conmutación posible se introducen estos datos al modelo establecido, esto permite determinar todos los valores pronosticados correspondientes al punto de muestreo en que se encuentra el proceso de cálculo, luego se evalúa cada error mediante una diferencia entre el valor de referencia y cada valor pronosticado, la identificación del estado óptimo se consigue al encontrar la salida pronosticada que tenga el menor error entre todos los errores obtenidos con los valores pronosticados anteriormente, este proceso se repite en cada instante de muestreo.

En el caso específico que se desarrolla en este trabajo, se está frente a un sistema eléctrico, por lo tanto, el modelo está constituido por las ecuaciones de tensiones y corrientes, en los

nodos y mallas del circuito (ecuaciones de Kirchhoff), las salidas pronosticadas que se obtiene del modelo para el caso del convertidor que se trata en este trabajo, lo constituyen las corrientes de fase en la carga. Estas corrientes pronosticadas son diferenciadas con la corriente de referencia (que es la corriente de fase ideal que se busca obtener), en este sentido la función de costo viene a ser el valor absoluto del error entre las corrientes de fase pronosticadas y la corriente de fase de referencia.

C. La Transformación de Clarke.

Las tensiones trifásicas se pueden representar mediante vectores ortogonales en un plano de dos ejes (α , β).

Estas transformaciones se pueden hacer mediante la transformación de Clarke.

$$\mathbf{y}_{\alpha\beta} = \mathbf{T}\mathbf{y} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_a \\ y_b \\ y_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

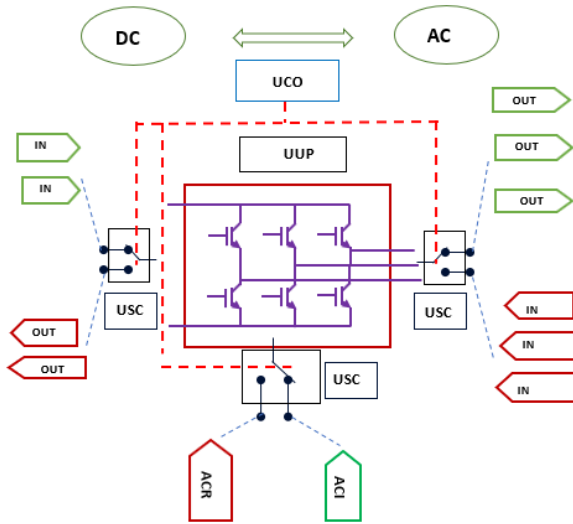
En donde y puede representar tensión o corriente trifásica en el dominio del tiempo, por ejemplo, las tensiones de fase v_a, v_b, v_c se pueden llevar al plano alfa-beta. Mediante la relación

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

III. DESARROLLO DEL CONVERTIDOR

A. Descripción del convertidor

En la figura 4 se muestra la estructura completa del convertidor bidireccional y bifuncional, en donde se presentan las diversas unidades que conforman el sistema de conversión que se realiza entre AC y DC en ambos sentidos, la unidad de comando de operación se encarga de activar las unidades de selección de conmutación para la operación sea como rectificador o sea como inversor, como se puede apreciar solo existe una única unidad de potencia constituida fundamentalmente por el puente trifásico de transistores IGBT. Por otro lado, las unidades que proporcionan el control de disparo de los transistores de compuerta aislada son dos unidades de control denominadas ACI y ACR que contiene los algoritmos de control para el inversor y el algoritmo de control para el rectificador respectivamente, los cuales son activados cuando el comando de funcionalidad lo determina de manera que cuando actúan comandan la unidad de potencia. El sistema tiene en el lado correspondiente las entradas y salidas respectivas, en el lado de energía eléctrica DC se tienen dos terminales de entrada y dos de salida, mientras que en el lado de la energía eléctrica en AC se tienen instalados tres terminales de entrada y tres de salida.



LEYENDA	
ACR	Algoritmo de Control para Rectificador
ACI	Algoritmo de Control para Inversor
USC	Unidad Selectora de Conmutación
UCO	Unidad de Comando de Operación
UUP	Unidad Única de Potencia
DC	Corriente continua
AC	Corriente Alterna
OUT	Terminal de salida del sistema de conversión
IN	Terminal de Entrada del sistema de conversión

Figura 4. Estructura del sistema de conversión bidireccional y bifuncional AC / DC, DC / AC, con una única unidad de potencia.

B. El algoritmo de control del inversor (ACI)

Es la unidad que comanda los tiempos de conmutación de los IGBTs de la unidad de potencia, cuando se está operando como inversor.

El algoritmo de control es desarrollado en un código de programación de Matlab y es aplicado como un bloque de función fcn en Simulink.

Se implementa la estrategia de control MPC-FCS

El modelo para el FCS-MPC se obtiene analizando la dinámica en la carga. El voltaje en la carga sigue la siguiente ecuación:

$$V = R(i) + L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (3)$$

En donde R y L son la carga resistiva e inductiva respectivamente, i es la corriente en la carga y v es el voltaje generado por el inversor. Usando el método de Euler, la corriente en la carga se puede aproximar en tiempo discreto como:

$$\frac{di}{dt} = \frac{(i(k+1) - i(k))}{T_s} \quad (4)$$

De la ecuación 3 y 4 se puede obtener el modelo que prediga la corriente en el instante k+1 dado un voltaje generado en la salida del inversor

$$\hat{i}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L} \right) i(k) + \frac{T_s V(k)}{L} \quad (5)$$

En donde k es el instante presente, k+1 el instante futuro/predicho, T_s es el periodo de muestreo.

Para encontrar el estado de conmutación S(k) óptimo se define una función de costo para cada voltaje de salida generado por el inversor. El estado de conmutación óptimo es aplicado al inversor en el siguiente periodo de muestreo.

La función costo que se busca minimizar es la diferencia entre la corriente predicha y la corriente de referencia en la carga en el instante k+1. Generalmente se elige un periodo de muestreo suficientemente pequeño de modo que la corriente de referencia se mantiene constante en el siguiente instante. En consecuencia, la función de coste se define como:

$$J(k+1) = |\hat{i}(k+1) - i_{ref}(k)| \quad (6)$$

En donde i_{ref} es la corriente a la que se le buscará aproximarse en el seguimiento que realiza el algoritmo como resultado la minimización de la función de costo. La función de costo J se calcula para todos los estados de conmutación S(k) y se escoge el estado de conmutación que produzca $J = \min(J)$.

En la figura 5 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo de solución del diseño del funcionamiento como inversor, mientras que en la tabla I se presentan todas las posibles combinaciones que existen durante el funcionamiento como inversor, el algoritmo prueba con todas estas posibilidades y selecciona la combinación que tenga el menor error entre la corriente de referencia y la corriente pronosticada.

En la figura 6 se muestra el bloque funcional que implementa el bloque de función que ejecuta el control MPC-FCS en Simulink para el funcionamiento como inversor.

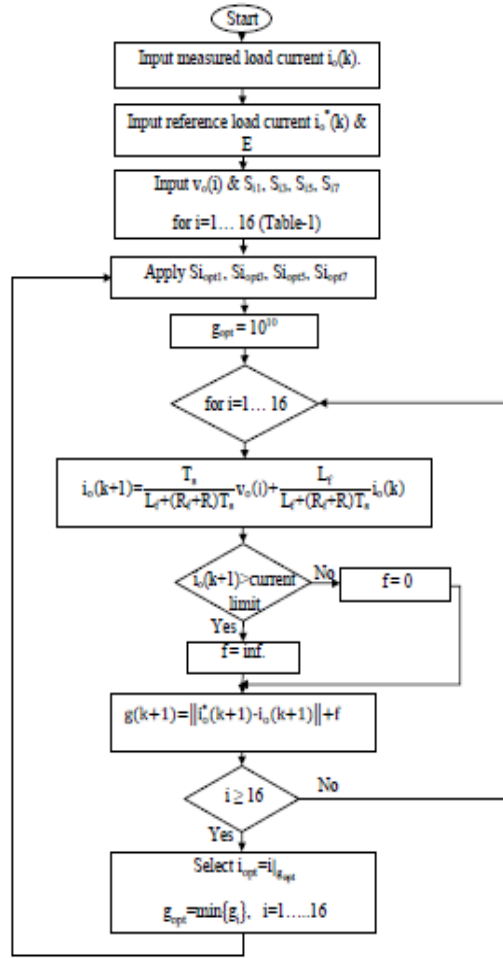


Fig. 5. Diagrama de flujo del algoritmo FCS-MPC en el inversor

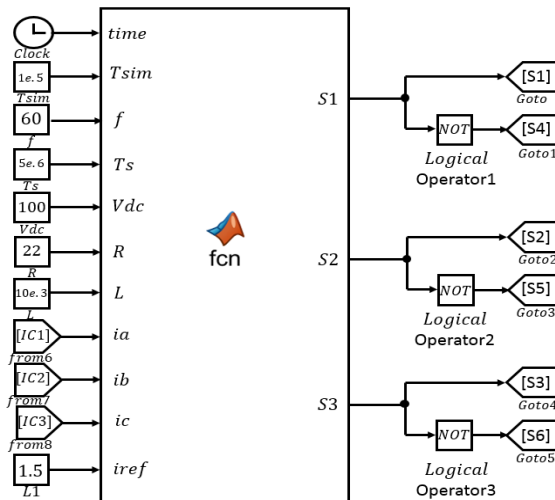


Fig. 6. Bloque de función que contiene el algoritmo de control MPC-FCS en código Matlab utilizado en Simulink

TABLA I.
CONJUNTO DE CONMUTACIONES POSIBLES, PARA EL INVERSOR.

Vector	Leg a	Leg b	Leg c	Van	Vbn	Vcn
V0	0	0	0	0	0	0
V1	0	0	1	-E/3	-E/3	2E/3
V2	0	1	0	-E/3	2E/3	-E/3
V3	0	1	1	-2E/3	E/3	E/3
V4	1	0	0	2E/3	-E/3	-E/3
V5	1	0	1	E/3	-2E/3	E/3
V6	1	1	0	E/3	E/3	-2E/3
V7	1	1	1	0	0	0

C. El algoritmo de control del rectificador (ACR)

El algoritmo de control del rectificador es desarrollado siguiendo la misma técnica aplicada en el inversor, solamente que para este caso se toma como modelo para la tensión de salida de referencia la que se obtendría con un rectificador con tiristores idealizados.

Mostramos un caso: En un análisis específico para ángulos de disparo menor de 60° , ($\alpha \leq 60^\circ$), se obtiene para la tensión DC en la carga como tensión de referencia en la que su valor está dado por la siguiente expresión:

$$V_{dc} = \frac{(3V_m)}{\pi} \left[1 + \frac{\cos(\alpha)}{2} - \frac{\sin(\alpha)\sqrt{3}}{2} \right] \quad (7)$$

Para el funcionamiento como rectificador se tiene otro bloque funcional que contiene el algoritmo ACR. En la tabla 2 se indican las secuencias de conmutación de los IGBTs.

TABLA II
SECUENCIA DE CONMUTACIÓN DE LOS IGBTs

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	1	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	1
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0
6	1	0	0	0	1	0

D. La unidad única de potencia (UUP)

Lo conforma fundamentalmente el puente de 6 IGBTs, ordenados en tres brazos.

E. La unidad de comando de operación (UCO)

Se implementa en un código de programa en Matlab y comandan las conexiones de los selectores de conmutación.

F. La unidad selectora de conmutación

Se implementan con dispositivos de conmutación que ejecutan las órdenes dadas por UCO.

G. Los puertos de entrada y de salida (IN, OUT)

Son los puertos físicos, preparados para las conexiones de las fuentes y de las cargas correspondientes a cada forma de operación. En la tabla 3 y la tabla 4 se presentan las características de las cargas con que se ha implementado las simulaciones.

TABLA III
TABLA DE CARACTERISTICAS DE LAS CARGAS USADAS DE ENSAYO DEL CONVERTIDOR -RECTIFICADOR

	Tensión (V)	Potencia (Hp)	R _a (ohm)	La (Henrios)
Motor DC	240	5	2.581(**)	0.028(**)
Batería de Litio	8.3807	0.02638 (*)	0.013333	-----
Rama RL	---	---	5.0	1.0
(*) Potencia entregada por una celda básica				
(**) Datos de armadura del motor				

TABLA IV
TABLA DE CARACTERISTICAS DE LAS CARGAS USADAS PARA ENSAYO DEL CONVERTIDOR -INVERSOR

	Tensión (V)	Potencia (Hp)	R _a (ohm)	La (Henrios)
Motor Asincrono, Jaula de ardilla Rotor	460	20	0.164	2.18×10^{-3}
Motor Asincrono, Jaula de ardilla Estator	----	-----	0.2756	2.18×10^{-3}
Rama RL	---	---	22	10×10^{-3}

IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan un resumen de resultados obtenidos de la simulación del sistema de conversión bilateral y bifuncional. Se muestran los resultados gráficos y al final de esta sección se especifican las referencias consideradas.

A. Tensiones y corriente de salida del inversor

A.1.- Inversor con carga trifásica balanceada tipo RL Tensión de Salida de una fase.

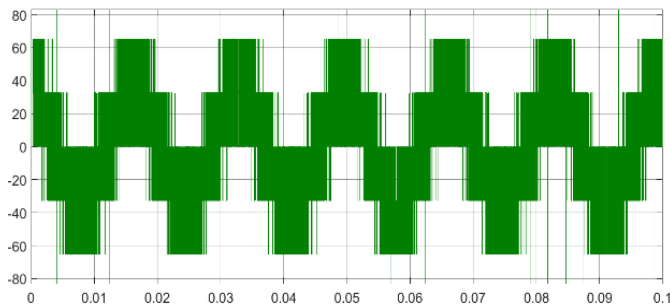


Fig. 7 Tensión en la salida de inversor (RL-balanceado)

Armónicos de tensión de salida de una fase de salida con carga RL (balanceada)

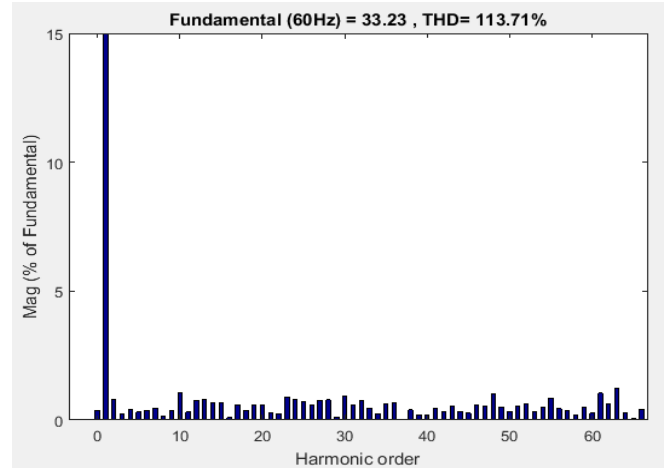


Fig.8 Armónicos de tensión de salida (RL-Balanceado)

Corriente de salida de una fase inversor trifásico (carga RL-balanceada)

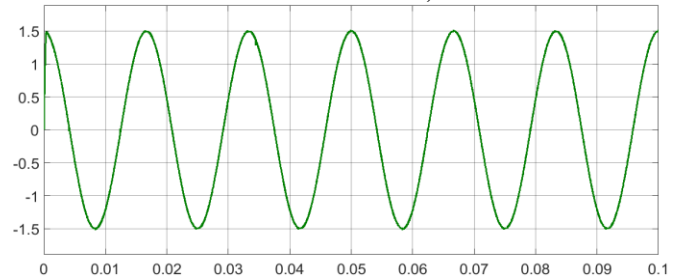


Fig. 9 corriente de salida de una fase (RL balanceado)

Armónicos de corriente de salida de una fase con carga RL- (balanceada)

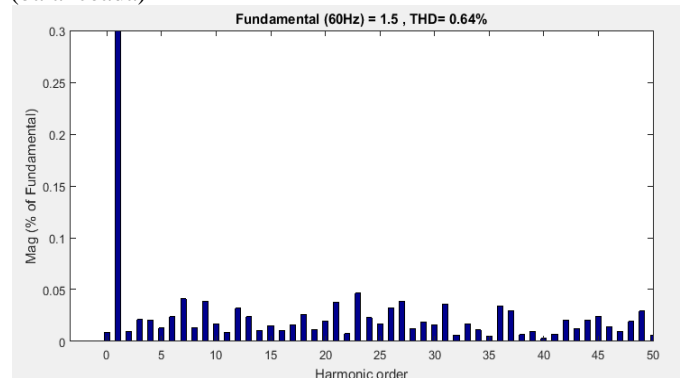


Fig. 10 Armónicos de corriente de fase (carga RL balanceada)

A2. Inversor con carga motor asíncrono de tipo jaula de ardilla.

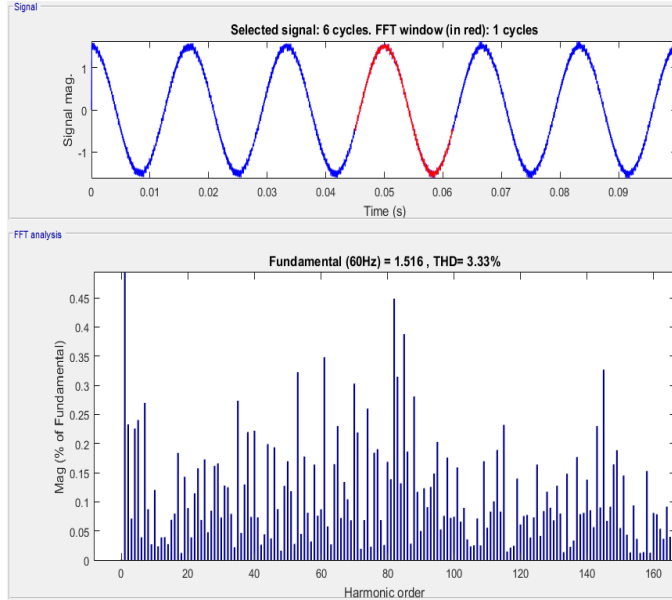


Fig. 11 Corriente y armónicos en la corriente de fase a la salida (carga motor jaula de ardilla)

A3. Inversor con carga RL-desbalanceada

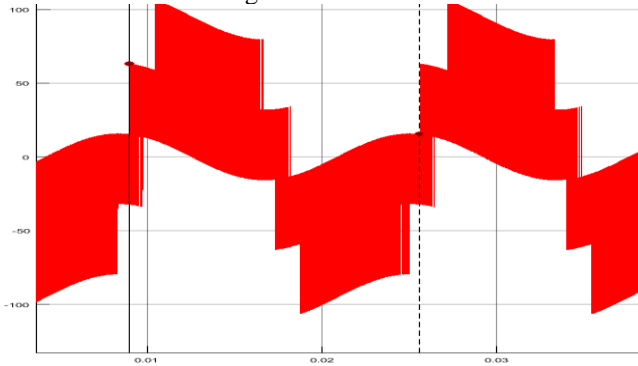


Fig. 12 Voltaje de salida de la fase en el inversor (carga desbalanceada)

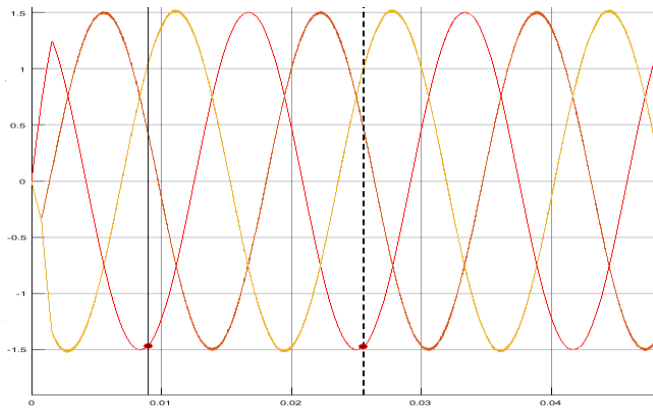


Fig. 13 Corrientes de salida de la fase en el inversor (carga desbalanceada)

B. Tensiones a las salidas de del convertidor actuando como como rectificador.

B1. Rectificador alimentando a batería de litio.

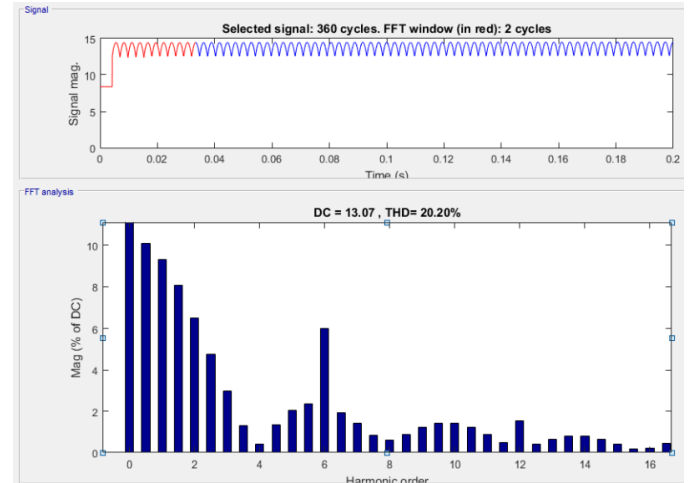


Fig. 14 Tensión de salida y sus armónicos como rectificador (carga batería de litio)

B2. Rectificador alimentando a un motor DC

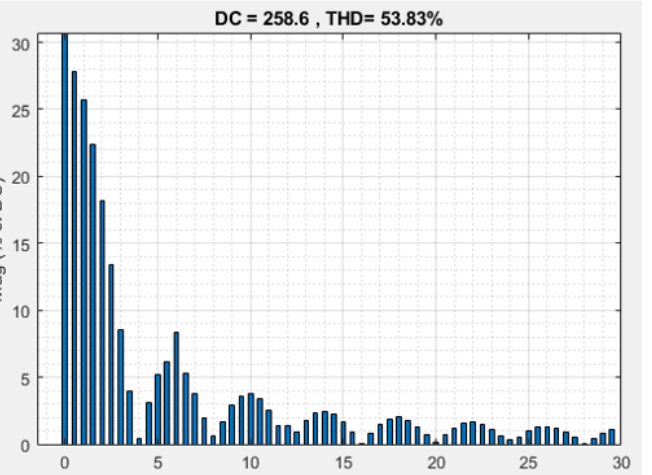
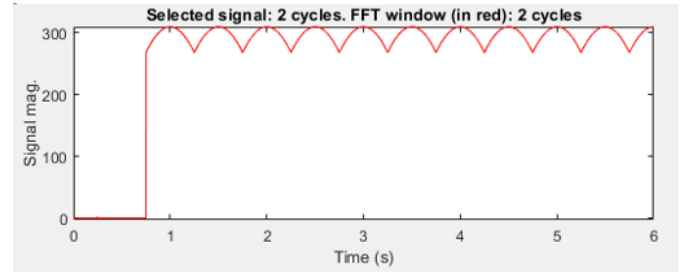


Fig. 15 Tensión de salida y sus armónicos como rectificador (carga motor DC)

B3. Rectificador alimentando a una carga RL.

1) Para $\Theta = 30^\circ$:

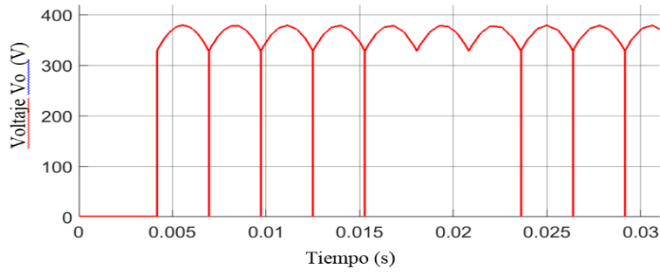


Fig. 16 Tensión de salida como rectificador (carga RL) $\Theta=30^\circ$

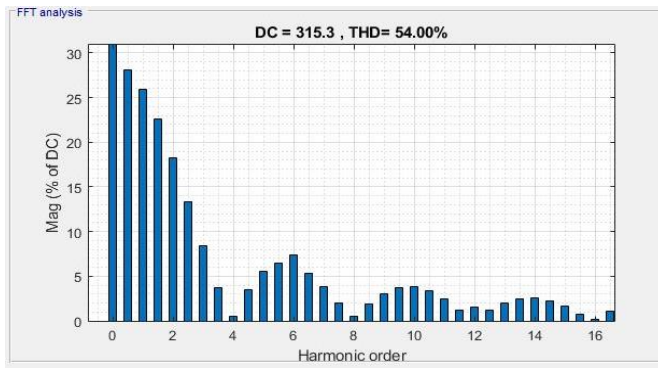


Fig. 17 Armónicos de salida como rectificador (carga RL) $\Theta=30^\circ$

2) Para $\Theta = 60^\circ$:

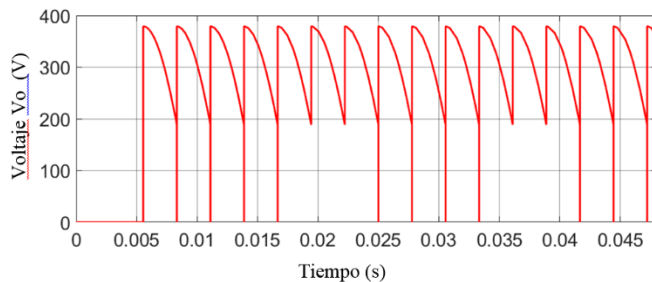


Fig. 18 Tensión de salida como rectificador (carga RL) $\Theta=60^\circ$

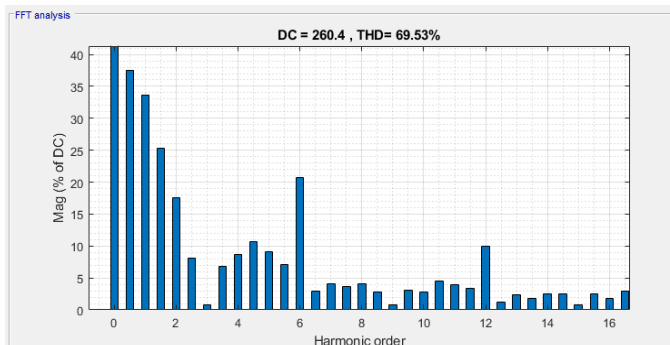


Fig. 19 Armónicos de salida como rectificador (carga RL) $\Theta=60^\circ$

En la figura 7,8,9 y10 se presentan los resultados, tanto para la tensión como para la corriente de salida del convertidor, en funcionamiento como inversor con carga R-L balanceada, estos resultados son satisfactorios, considerando que el objetivo del control es la corriente, el valor de THD de 0.64% es bueno de acuerdo a las normas técnicas de referencia [23].

En las figuras 11,12 y 13 se presentan los resultados de salida en corriente y tensión, cuando la carga es un motor eléctrico asíncrono, también se presentan los resultados para cargas RL balanceadas y desbalanceadas, los resultados obtenidos son satisfactorios para los requerimientos de la carga; así el valor de 3.33 % de THD satisface el requerimiento de ser menor de 5% para el caso del motor asíncrono [24]. Los resultados anteriores son presentados en la tabla V .

Los resultados del conversor funcionando como rectificador, son presentados en las figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19, se muestran respuestas para diversos ángulos de control, las salidas obtenidas son satisfactorias en comparación con la implementación usando tiristores [25].

TABLA V
TABLA DE RESULTADOS DEL CONVERTIDOR – MODO INVERSOR

Operación	Carga	THD	Requerimiento
Inversor	Motor AC	3.33%	<5%
	RL	0.64%	<3%

V. CONCLUSIONES

1. Los resultados de las corrientes en el dominio del tiempo para el funcionamiento como inversor, presenta errores que están debajo del 0.63% para cargas balanceadas de tipo general RL, mientras que para cargas de tipo motor trifásico asíncrono de inducción este error sube al 3.33%, en ambos casos con cargas balanceadas.

2. Los resultados para el funcionamiento como inversor con cargas desbalanceadas presenta una fuerte distorsión en las tensiones de fase de salida sin embargo la corriente no presenta esta fuerte distorsión lo que nos indica que la acción de control está actuando de manera correctiva, en la variable a la que le estamos aplicando la técnica FCS.

3. Los resultados en el convertidor trabajando como rectificador presenta muy poco error (debajo del 3%) respecto a los valores de referencia que se han considerado, confirmando el buen rendimiento que tiene la técnica de control utilizada

4. En este trabajo la flexibilidad se hace manifiesta pues la unidad de mando operativo se implementa en código de programación, el cual es desarrollado en la misma plataforma de desarrollo de todo el proyecto Matlab-Simulink.

5. La versatilidad del sistema presentado es manifiesta por cuanto dependiendo la configuración cargada por software se puede obtener un operación del convertidor como rectificador solo o como inversor solo y tiene la opción de

poder hacer los cambios automáticamente mediante el valor de un parámetro que se designe.

PESPECTIVAS Y TRABAJOS A FUTURO

1. La automatización en los comandos para la operación es un tema que requiere tener un desarrollo más elaborado, además que debe buscarse una integración total de todo el sistema que no es de potencia (unidades de comando y de control).

2. El desarrollo y depuración del software de comando y de control debe ser mejorado, y después de haberse sometido a pruebas necesarias se debería cargar a un sistema embebido.

3. En la Unidad de Potencia la presencia de los dispositivos de protección genera una interacción con la operatividad del sistema, lo cual se ha superado mediante el uso de selectores que aíslan y conectan de manera que no interrumpen la operación programada, sin embargo una mejor solución es necesario investigar para funcionamiento más continuo y autónomo

REFERENCIAS

- [1] M. Judewicz, J. Fischer, M. Herran, S. Gonzalez, D. Carrica, MPC con Modelo Predictivo basado en Observador de Estados, 23º Congreso Argentino de Control Automático, (2012).
- [2] M. Judewicz, J. Fischer, M. Herran, S. Gonzalez, D. Carrica, A Robust Model Predictive Control For Grid-Connected Voltage-Source Inverters, Latin America Transactions, IEEE vol.11, no.1, (2013) 27-33.
- [3] C. Burdon, C. Montero, Basic Principles of MPC for Power Converters, IEEE Industrial Electronics Magazine 9 (2015) 31 – 43
- [4] G. O. Riyadh, H.T. Rabee', Finite Control Set Model Predictive Current Control-MPC Based on Cost Function Optimization, with Current Limit Constraints for Four-Leg VSI, Iraq J. Electrical and Electronic Engineering 12 (2016) 43 – 53
- [5] V. Monteiro, J. Ferreyra, Model Predictive Control Applied to an Improved Five-Level Bidirectional Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics 63 (2016) 5879-5890
- [6] P. Arul, V. Ramachandramurthy, and R. Rajkumar, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, (2015) 597–608.
- [7] N. Hatzargyriou, Microgrids: architectures and control, (John Wiley & Sons, 2014), pp. 4-30
- [8] J. Rodríguez, and P. Cortes, "Predictive Control of Power Converters And Electrical Drives", a John Wiley & Sons, Ltd. Publication, first edition, 2012, ISBN 978-1-119-96398-1.
- [9] A. Almaktoof, A. Raji, and M. Kahn, "Modeling and Simulation of Three-Phase Voltage Source Inverter Using a Model Predictive Current Control", International Journal of Innovation, Management and Technology, vol. 5, no. 1, Feb. 2014.
- [10] J. Wang, "Model Predictive Control of Power Electronics Converter", Msc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, pp.1-7, 2012.
- [11] T. Geyer, "Low Complexity Model Predictive Control in Power Electronics and Power Systems", PhD. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, 2005.
- [12] S. Kouro, P. Cortés, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodríguez, "Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, Jun. 2009.
- [13] J. Rodríguez, J. Pontt, C. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, and U. Ammann, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no.1, Feb. 2007.
- [14] M. Rivera, V. Yaramasu, J. Rodríguez, and B. Wu, "Model Predictive Current Control of Two-Level Four-Leg Inverters—Part II: Experimental Implementation and Validation", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 28, no. 7, Jul. 2013.
- [15] J. Rodríguez, B. Wu, M. Rivera, C. Rojas, V. Yaramasu, and A. Wilson, "Predictive Current Control of Three-Phase Two-Level Four-Leg Inverter", The 14th International Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE/PEMC), pp. T3-106 - T3-110, Sept. 2010.
- [16] M. Rivera, V. Yaramasu, A. Llor, J. Rodríguez, B.Wu, and M. Fadel, "Digital Predictive Current Control of a Three-Phase Four-Leg Inverter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 60, no. 11, Nov. 2013.
- [17] V. Yaramasu, M. Rivera, M. Narimani, B. Wu, and J. Rodríguez, "Model Predictive Approach for a Simple and Effective Load Voltage Control of Four-Leg Inverter with an Output LC Filter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 10, Oct. 2014.
- [18] X. Zhang, T. C. Green, and A. Junyent-Ferr', "A New Resonant Modular Multilevel Step-Down DC–DC Converter with Inherent-Balancing", IEEE Tans. on Power Electronics, vol. 30, no. 1, Jan. 2015.
- [19] Riyadh G. Omar, Rabee' H. Thejel, " Matlab/Simulink Modeling of Four-leg Voltage Source Inverter With Fundamental Inverter output Voltages Vector Observation" Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, Vol.11 No.1 , 201 5.
- [20] V.Monteiro,J.C. Ferreiraq, A. Nogueiras,"Model Predictive Control Applied to an Improved Five-Level Bidirectional Converter",Transaction on Industrial Electronics,vol 63,No.9,September 2016.
- [21] J. E. Bosso,M. Llomplat, G.Oggier, G.Garcia, "Isolated Bidirectional DC to Three-Phase AC Converter for Integration of Renewable Energy Sources to Electric Grid",The Institution of Engineering and Technology Journal, April 2019.
- [22] M. Novak, T. Dragicevic, F. Blaabjerg, U. M. Nyman, "Analytical Performance Verification of FCS-MPC Applied to Power Electronic Converters: A Model Checking Approach", 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics,2017, july.
- [23] Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad, Normas Tecnicas de Calidad de Servicios Eléctricos, Perú, 1997.
- [24] F. Weinbissinger, "Alimentación Eléctrica de Motores Asíncronos", SOCOMEC UPS Stransburg, France, 2010
- [25] M. Villablanca, C. Cádiz, J. Tapia, "Thyristor-based a AC/DC Rectifiers with High-quality Waveforms", Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 18 N° 1, 2010, pp. 132-14
- [26] International Energy Agency, World Bank Group, "Tracking SDG7: The Energy Progress Report -2018" The World Bank Publications, The World Bank Group, 2018.