

Enseñando el Funcionamiento de los Inversores Puente H: Análisis del Intercambio de Potencia entre Bobinas y Condensadores

Nicolás Muñoz-Galeano, Juan B. Cano-Quintero, y Jesús M. López-Lezama

Fac. de Ingeniería, Depto Ing. Eléctrica, Grupo de Manejo Eficiente de la Energía – GIMEL, Universidad de Antioquia, Calle 67 No. 53-108, Oficina 19-437, Medellín, Colombia
(e-mail: nicolas.munoz@udea.edu.co, bernardo.cano@udea.edu.co, jmaria.lopez@udea.edu.co)

Recibido May. 18, 2015; Aceptado Jul. 9, 2015; Versión final Ago. 11, 2015, Publicado Feb. 2016

Resumen

Se realiza la descripción detallada del funcionamiento de los inversores puente H, explicando el intercambio de energía entre el condensador y las bobinas del sistema, para la enseñanza en ingeniería eléctrica. Para hacerlo se parte del control de corriente de banda de histéresis que permite observar los cambios de la corriente a controlar cuando conmutan los interruptores del inversor puente H. Se realiza el análisis energético para cada uno de los estados de los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) y diodos del puente H, permitiendo entender el funcionamiento del inversor en cada uno de sus estados. El análisis detallado del intercambio de energía permitirá diseñar controladores más efectivos puesto que puede partirse del conocimiento del funcionamiento del sistema. Se presentan resultados simulación que corroboran la descripción presentada.

Palabras clave: control de banda de histéresis, puente H, inversor, intercambio de energía.

Teaching the Operation of Full Bridge Converters: Power Interchange Analysis between Inductors and Capacitors

Abstract

A detailed description of the performance of H bridge inverters, explaining the energy exchange between the capacitor and coils of the system, for the teaching of electrical engineering is presented. To do so hysteresis band current control is done, allowing to observe changes in the controlled current when the switches of the H bridge inverter commute. Energy analysis is performed on each of the states of Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) and H bridge diodes, allowing to understand the performance of the inverter on each of the states. Detailed analysis of the energy exchange will allow designing more effective controllers since the process can begin from the knowledge of the system performance. Simulation results are presented to corroborate the given description.

Keywords: hysteresis band control current, full bridge, converters, energy interchange.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se pretende explicar de forma detallada la dinámica de los inversores de potencia conectados a la red eléctrica, para esto se usó un control de banda de histéresis. El control de banda de histéresis es simple, fácil de implementar y es de respuesta rápida. Es por esto que su uso es bastante común en aplicaciones que requieren inyección de corriente tales como: rectificadores controladores con corrección de factor de potencia (Fangrui et al., 2006), convertidores elevadores de medio puente (Ramesh et al., 1998), compensadores activos (Orts et al., 2010), compensadores activos híbridos (Lam et al., 2012), entre otras.

El control de banda de histéresis es un control simple que no requiere el conocimiento de los parámetros del sistema. Sin embargo, para mejorar el desempeño de los equipos, se requiere el conocimiento amplio de los sistemas a controlar. El objetivo del artículo es explicar de forma detallada la dinámica de los inversores puente H independiente de la aplicación, por lo que no se fijan objetivos de diseño o de control. Se utiliza el control de banda de histéresis para la explicación ya que permite observar los cambios de la corriente a controlar cuando conmutan los interruptores del inversor puente H. La explicación del inversor puente H presentada en este artículo servirá para obtener las ecuaciones que modelan la dinámica de los inversores. Trabajos futuros de nuestro grupo de investigación estarán relacionados con el modelado y el diseño integrado para inversores puente H basados en el conocimiento amplio del sistema a controlar tal y como lo hace (Vega et al., 2014) para procesos químicos.

El diseño integrado es una metodología de diseño comprensiva donde el análisis sistemático de las dinámicas del sistema es incluido en el proceso de diseño, esto para obtener una solución adecuada entre los aspectos de control y los costos del sistema. En la industria, el objetivo principal es desarrollar productos que alcancen las especificaciones de diseño consiguiendo el mínimo costo en la implementación y el máximo beneficio económico. En un mercado competitivo, los equipos industriales deben operar lo más flexible posible para adaptarse fácilmente a los cambios de las especificaciones, demanda y condiciones de operación. En este contexto, se requiere el uso del diseño integrado como alternativa para lograr todos los objetivos planteados en el desarrollo de prototipos (Edgar, 2004). La etapa de modelamiento, en el diseño integrado, es una de las etapas que requiere un análisis exhaustivo porque precisa el conocimiento amplio del sistema. Este artículo explica de forma detallada el funcionamiento del inversor puente H, planteando todos los estados del sistema y sus modos de funcionamiento.

La mayoría de los artículos consultados no explican el comportamiento del sistema a controlar, otros ni siquiera la tienen en cuenta. (Ramesh et al., 1998) diseñan el control de banda de histéresis para un convertidor elevador de medio puente, ellos parten de los circuitos para cada estado de conmutación pero no explican el intercambio de energía entre la bobina y los condensadores del sistema. (Chen et al., 2015) y (Serban, 2015) parten de expresiones de potencia instantánea para los condensadores de inversores puente H, donde el condensador intercambia energía con la red al doble de la frecuencia de la red, es de notar que no explican cómo los condensadores intercambian energía con otros elementos del sistema. (Suroso et al., 2012) presentan un inversor multinivel CSI para regular por niveles la corriente de salida del inversor pero no explican el principio de funcionamiento.

En este artículo se parte de los circuitos para cada estado de conmutación del inversor puente H, se explica el intercambio de potencia entre bobinas y condensadores del sistema, también se detalla la polaridad de tensión y el sentido de corriente en cada elemento. Este artículo considera el caso en el que el inversor debe inyectar potencia reactiva (caso general), a diferencia de algunos de los artículos reportados en la literatura técnica que solo consideran la inyección de potencia activa (Fangrui et al., 2006) (Mansour et al., 2011). Adicionalmente se considera la conexión a la red del inversor y la red de suministro en la salida del inversor, diferenciándose de otros artículos que no la incluyen (Donald et al., 2013) (Saleh et al., 2011) (Ajay et al., 1992) (Bimal, 1990).

FUNCIONAMIENTO DEL INVERSOR PUENTE H: ANALISIS ENERGETICO

La Fig. 1 muestra un inversor monofásico VSI (Voltage Source Inverter) acoplado a la red eléctrica a través de una bobina de acople (L_r). El inversor está compuesto por un bus DC y un puente H de dos ramas. Cada rama contiene dos interruptores que conmutan de acuerdo a la estrategia de control, para este artículo se considera un control de banda de histéresis de corriente. Cada interruptor del puente H está compuesto por un IGBT (Q1, Q2, Q3 y Q4) y un diodo en antiparalelo (D1, D2, D3 y D4). El disparo de los interruptores se realiza mediante señales digitales en las puertas G1, G2, G3, y G4. El inversor convierte la tensión DC del bus de continua en corriente alterna AC inyectando corriente a la red eléctrica.

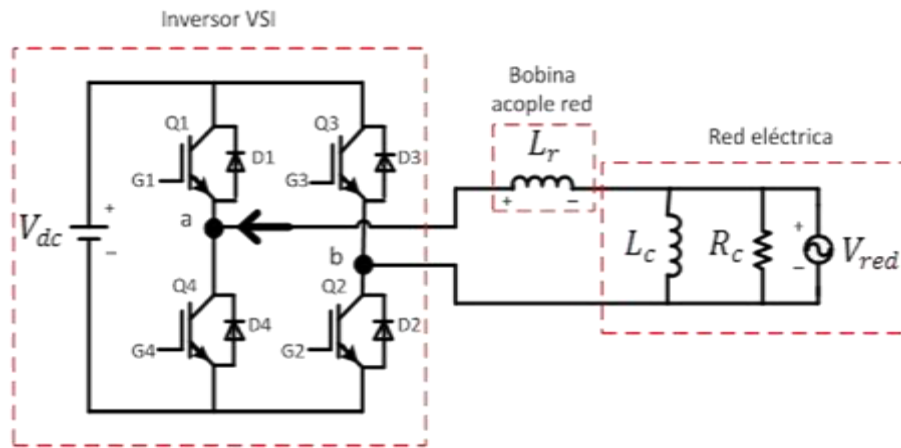


Fig.1: Inversor VSI conectado a la red eléctrica.

La tensión de red eléctrica se modela mediante la fuente V_{red} . La carga de la red eléctrica se modela mediante la resistencia R_c y la inductancia L_c . La fuente V_{red} debe suministrar a la carga las corrientes necesarias para satisfacer sus necesidades energéticas. Para la resistencia R_c , la fuente debe suministrar una corriente que esté en fase con la tensión V_{red} (corriente activa). Mientras que para la inductancia L_c , la fuente debe suministrar una corriente que está en cuadratura con V_{red} (corriente reactiva). Cuando se cierra el interruptor Q_{red} , el inversor se conecta a la red inyectando corriente. El inversor puede inyectar corriente activa o corriente reactiva o una combinación de ambas. Normalmente, los inversores conectados a la red eléctrica deben inyectar corriente activa. Sin embargo, para algunas aplicaciones, deben inyectar corriente reactiva (en este caso el inversor funciona como compensador de potencia reactiva). Cuando el inversor inyecta corriente, el inversor debe suplir parte de las necesidades energéticas de la carga disminuyendo las corrientes suministradas por la red eléctrica. Para este artículo, se considera el caso para el control de banda de histéresis de corriente en el que el inversor debe inyectar corriente reactiva a la red. La inyección de otras corrientes (activas, no fundamentales y desequilibradas) puede extrapolarse fácilmente mediante la siguiente explicación.

Cada interruptor está compuesto por un IGBT y un diodo en antiparalelo. Debido a las características de los semiconductores de cada interruptor, los IGBTs permiten la circulación de corriente de arriba hacia abajo y los diodos permiten la conducción de corriente de abajo hacia arriba, ver Fig. 1. La circulación de corriente a través de los IGBTs se da cuando tienen señal en la puerta, los IGBTs de una misma rama no deben estar cerrados simultáneamente porque pondrían en corto al bus DC. La circulación de corriente a través de los diodos se da cuando los diodos se polarizan directamente y los IGBTs no tienen señal en la puerta. En la Fig. 1 se ilustran las referencias para: el voltaje para la fuente (V_{red}), la bobina (L_r) y el bus DC (V_{dc}); también muestra la referencia para la corriente del inversor (entrando al nodo a del inversor). En la Fig. 2 se muestran las formas de onda de: la corriente de salida del inversor, la corriente de referencia, las bandas de histéresis y la tensión de la red. Todas con respecto a las referencias establecidas en la Fig. 1.

La Fig. 2 se dividió en 4 zonas de acuerdo a la polaridad de la tensión de la red y el sentido de la corriente de referencia, esto para contemplar todas las posibilidades del control de banda de histéresis. La zona 1 está comprendida entre 0 y $\pi/2$, donde la tensión de red es positiva y la corriente de referencia es negativa. La zona 2 está comprendida entre $\pi/2$ y π , donde la tensión de red es positiva y la corriente de referencia es positiva. La zona 3 está comprendida entre π y $3\pi/2$, donde la tensión de red es negativa y la corriente de referencia es positiva. La zona 4 está comprendida entre $3\pi/2$ y 2π , donde la tensión de red es negativa y la corriente de referencia es negativa. A continuación se describe en detalle la operación del inversor en la zona 1. La tensión de la red eléctrica está en el semiciclo positivo de la onda y la corriente de referencia es negativa (sale del punto a y entra por el punto b en la Fig. 1). En esta zona se consideran dos recorridos: 1) Recorrido de la corriente del inversor desde el punto A hacia el punto B. 2) Recorrido de la corriente del inversor desde el punto B hacia el punto C.

1) Recorrido desde el punto A hacia el punto B. Cuando la corriente de salida del inversor supera el límite superior de la banda histéresis, se debe ejecutar una acción de control que evite que la corriente salga de la banda. Para que la corriente entre nuevamente a la banda de histéresis, la bobina L_r , sobre la cual se ejerce el control de corriente debe aumentar la energía almacenada (aumentar la magnitud de corriente). En este caso, la corriente del inversor aumenta de magnitud pasando del punto A al punto B, para esto los IGBT's 1 y 2 deben estar cerrados. En la Fig. 3 se resaltan en negro el circuito del recorrido de la corriente para el inversor. Despreciando las pérdidas, el bus DC suministra energía a las bobinas L_r y L_c que la almacenan.

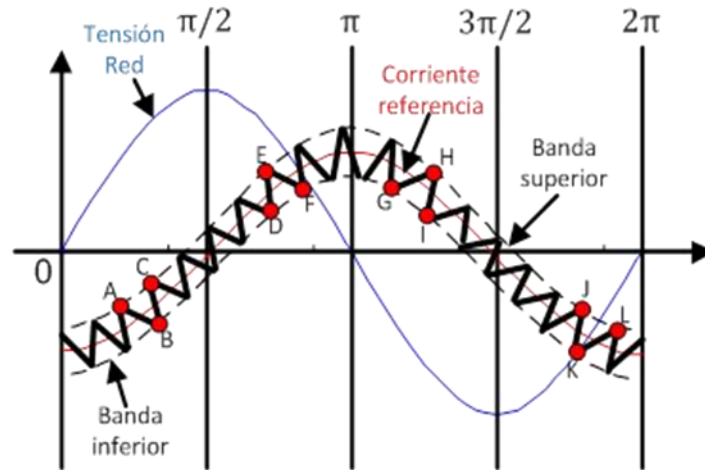


Fig.2: Formas de onda control de corriente banda de histéresis.

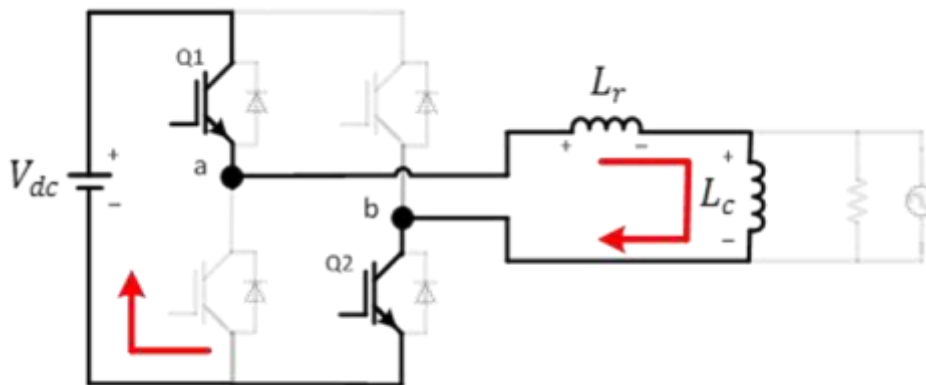


Fig.3: Circuito para la zona 1 cuando los IGBT's 1 y 2 están cerrados.

2) Recorrido desde el punto B hacia el punto C. Cuando la corriente de salida el inversor supera el límite inferior de la banda histéresis, se debe ejecutar una acción de control que evite que la corriente salga de la banda. Para que la corriente entre nuevamente a la banda de histéresis, la bobina L_r sobre la cual se ejerce el control de corriente debe disminuir la energía almacenada (disminuir la magnitud de corriente). En este caso, la corriente del inversor debe disminuir de magnitud pasando del punto B al punto C, para esto se deben abrir los IGBT's 1 y 2. Al abrir el IGBT 1, el diodo 4 reacciona y se cierra. Mientras que al abrir el IGBT 2, el diodo 3 se cierra. La Fig. 3 muestra resaltado en negro el circuito del recorrido de la corriente para el inversor, la corriente circula por los diodos D3 y D4. Despreciando las pérdidas, la bobina L_r le suministra energía al bus DC y a la bobina L_c .

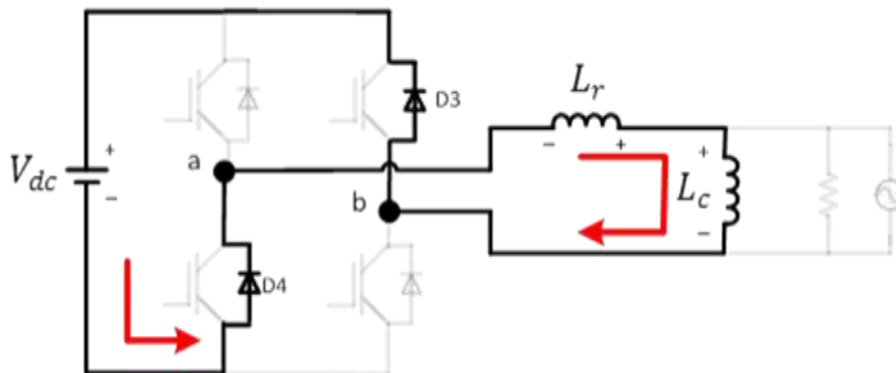


Fig.4: Circuito para la zona 1 cuando los IGBT's están abiertos.

La descripción anterior referente al intercambio de energía entre C_{dc} , L_r y L_c no viola las leyes físicas para bobinas y condensadores: 1) La tensión V_{dc} no cambia de polaridad, lo que cambia es el sentido de corriente. En la fuente DC, la corriente entra por el (-) cuando los IGBT's 1 y 2 están cerrados (entrega energía), mientras que la corriente entra por el (+) cuando los IGBT's 1 y 2 están abiertos (recibe energía); 2) El sentido de la corriente en la bobina L_r no cambia, lo que cambia es la polaridad de la tensión. Cuando los IGBT's 1 y 2 están cerrados la polaridad de L_r es (+-) ((+) a la izquierda y (-) a la derecha de L_r , ver Fig. 3), en este caso la corriente entra por el (+) de L_r almacenando energía. Cuando los IGBT's 1 y 2 están abiertos L_r reacciona cambiando la polaridad (-+), la corriente entra por el (-) de L_r cediendo energía al sistema (Fig. 4); y 3) El sentido de la corriente no cambia en la bobina L_c , tampoco lo hace su polaridad puesto que es impuesta por la red de suministro. Para IGBT's 1 y 2 abiertos o cerrados la bobina L_c almacena energía.

Se puede concluir que cuando los IGBT's 1 y 2 están cerrados el condensador del bus DC transfiere energía a las bobinas, mientras que cuando los IGBT's 1 y 2 se abren la bobina L_r le suministra energía al bus DC y a la bobina L_c . Para las zonas 2, 3 y 4, la descripción del intercambio de energía entre C_{dc} , L_r y L_c es similar a la descripción en la zona 1. La Tabla 1 contiene el resumen de las polaridades de las tensiones y sentidos de corrientes para C_{dc} , L_r y L_c incluyendo los semiconductores activos para las 4 zonas. Las referencias para la polaridad de las tensiones y el sentido de las corrientes deben tomarse la de la Fig. 1. Los recorridos de la corriente deben tomarse de la Fig. 2. La tabla 1 puede usarse para construir los circuitos para las zonas 2, 3 y 4 similar a como se hizo para la zona 1. La tabla 2 se obtiene a partir de la tabla 1 y resume el intercambio de energía entre C_{dc} , L_r y L_c para las 4 zonas. La columna 4 de la tabla 2 se obtiene al multiplicar las columnas 4 y 5 de la tabla 1. La columna 5 de la tabla 2 se obtiene al multiplicar las columnas 6 y 7 de la tabla 1. La columna 6 de la tabla 2 se obtiene al multiplicar las columnas 8 y 9 de la tabla 1. Cuando la casilla de la tabla 2 es positiva indica que el elemento está cediendo energía, mientras que si la casilla es negativa indica que el elemento esto almacenando energía.

Tabla 1: Resumen polaridades de tensiones y sentidos de corrientes para C_{dc} , L_r y L_c .

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zona	Semiconductores activos	Recorrido Corriente	Polaridad bus DC	Sentido corriente en bus DC	Polaridad bobina L_r	Sentido corriente inversor	Semiciclo voltaje de red	Sentido corriente bobina L_c
1	IGBT's 1 y 2	A-B	Positiva	Positivo	Positivo	Negativa	Positivo	Negativa
	Diodos 3 y 4	B-C	Positiva	Negativo	Negativo	Negativa	Positivo	Negativa
2	IGBT's 3 y 4	D-E	Positiva	Positivo	Negativo	Positiva	Positivo	Positivo
	Diodos 1 y 2	E-F	Positiva	Negativo	Positivo	Positiva	Positivo	Positivo
3	IGBT's 3 y 4	G-H	Positiva	Positivo	Negativo	Positiva	Negativo	Positivo
	Diodos 1 y 2	H-I	Positiva	Negativo	Positivo	Positiva	Negativo	Positivo
4	IGBT's 1 y 2	J-K	Positiva	Positivo	Positivo	Negativa	Negativo	Negativa
	Diodos 3 y 4	K-L	Positiva	Negativo	Negativo	Negativa	Negativo	Negativa

Tabla 2: Resumen para intercambio de energía entre C_{dc} , L_r y L_c para las 4 zonas.

1	2	3	4	5	6
Zona	Semiconductores activos	Recorrido Corriente	Bus DC	Bobina L_r	Bobina L_c
1	IGBT's 1 y 2	A-B	Positivo	Negativo	Negativo
	Diodos 3 y 4	B-C	Negativo	Positivo	Negativo
2	IGBT's 3 y 4	D-E	Positivo	Negativo	Positivo
	Diodos 1 y 2	E-F	Negativo	Positivo	Positivo
3	IGBT's 3 y 4	G-H	Positivo	Negativo	Negativo
	Diodos 1 y 2	H-I	Negativo	Positivo	Negativo
4	IGBT's 1 y 2	J-K	Positivo	Negativo	Positivo
	Diodos 3 y 4	K-L	Negativo	Positivo	Positivo

De la tabla 2 se puede obtener lo siguiente: (1) Cuando se activan los IGBT's 1 y 2 en las zonas 1 y 4 o cuando se activan los IGBT's 3 y 4 en las zonas 2 y 3 el condensador C_{dc} entrega energía (casillas de la columna 4 "positivo") y la bobina L_r almacena energía (casillas de la columna 5 "negativo"); (2) Cuando se activan los diodos 3 y 4 en las zonas 1 y 4 o cuando se activan los diodos 1 y 2 en las zonas 2 y 3 el condensador C_{dc} almacena energía (casillas de la columna 4 "negativo") y la bobina L_r entrega energía (casillas de la columna 5 "positivo"). Los diodos se activan cuando no existe señal de activación para los IGBT's, es decir, el puente H funciona como rectificador; (3) El condensador C_{dc} y la bobina L_r intercambian energía a la frecuencia de conmutación. Esto puede ser observado de los numerales 1 y 2; y (4) Para las

zonas 1 y 3 la bobina L_c almacena energía (casillas de la columna 6 “negativo”), mientras que para las zonas 2 y 4 la bobina L_c entrega energía (casillas de la columna 6 “positivo”). Esto indica que el condensador C_{dc} y la bobina L_c intercambian energía al doble de la frecuencia de la red.

SIMULACIONES

La simulación de la dinámica del inversor para validar la explicación del artículo se realizó en Matlab-Simulink, ver Fig. 5. El voltaje del bus DC se fijó en 210V, el condensador del bus DC es de 4700 microfaradios con una resistencia de 0,001 ohm, la bobina de red es de 6 mH, la bobina de carga es de 50 mH con una resistencia de 0,001 y el voltaje de red se fijó en 120 Vrms con una frecuencia de 60 Hz. Las señales de control S1, S2, S3 y S4 se obtuvieron mediante la implementación de una S-Function que tiene como entradas el voltaje de red y la corriente de salida del inversor. El control de corriente se fijó con 1 Arms a una frecuencia de 60 Hz atrasada 90° con el voltaje AC.

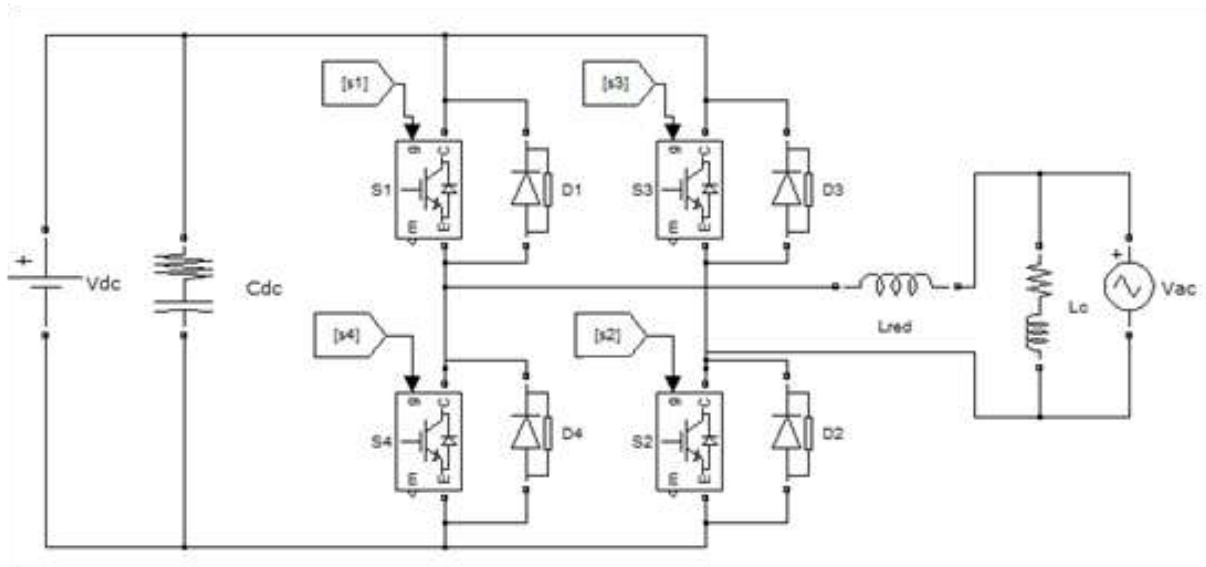


Fig. 5: Esquema de montaje para la simulación.

En la Fig. 6 se ilustra el voltaje AC de la red, la corriente de salida del inversor y la potencia que intercambia el inversor con la carga inductiva L_c . Se marcan las zonas 1, 2, 3 y 4 para que se pueda verificar la información de las tablas 1 y 2. La potencia es una función sinusoidal que tiene valor medio cero. Esto corrobora que el inversor (bobinas y condensadores del inversor) intercambia energía con la bobina de la carga al doble de la frecuencia de alimentación.

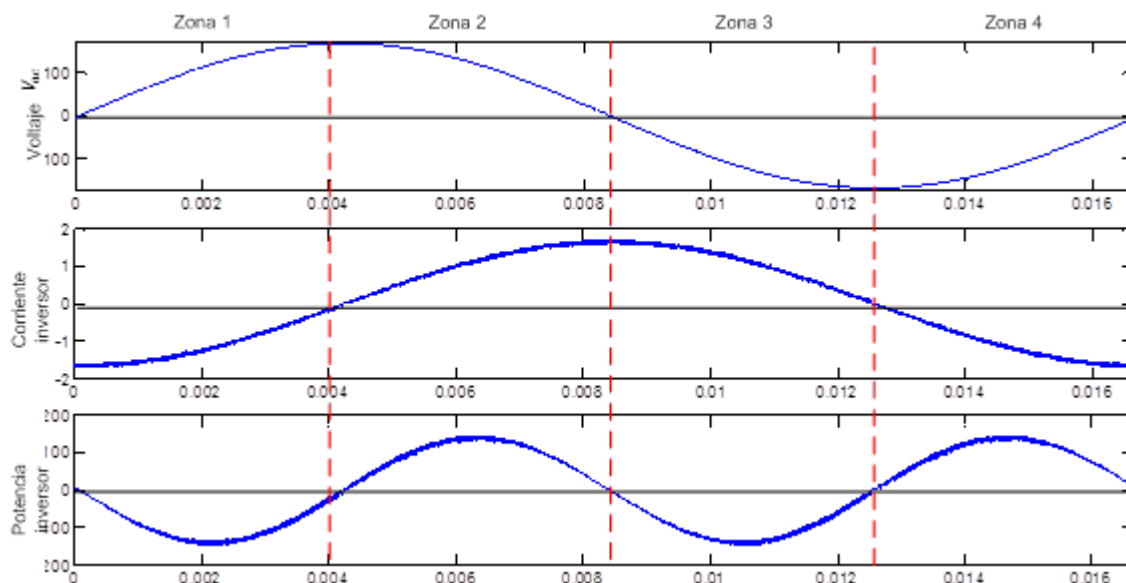


Fig. 6: Voltaje AC, corriente salida del inversor, potencia del inversor.

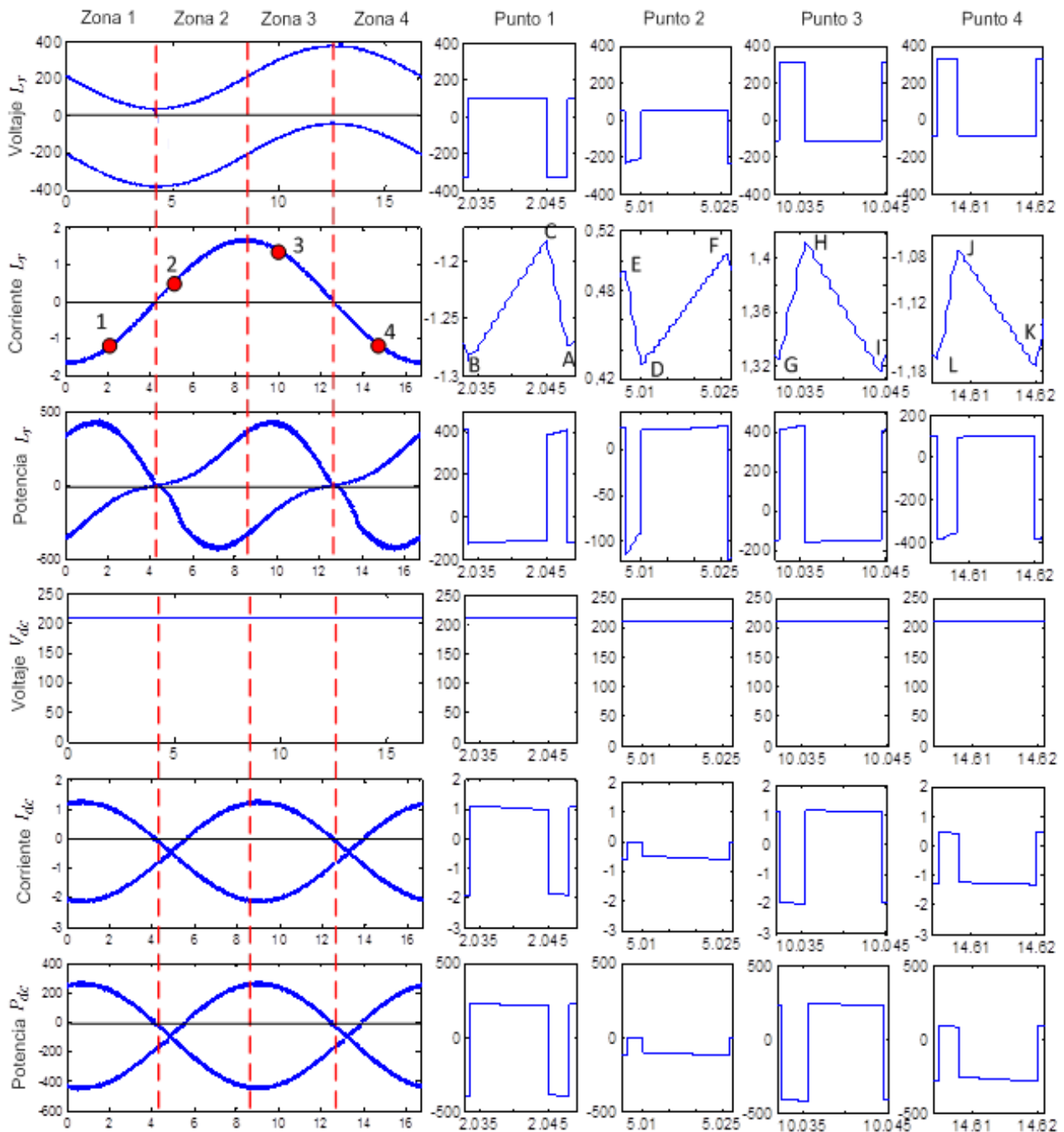


Fig. 7: Voltaje, corriente y potencia en la bobina L_r y bus DC.

La figura 7 muestra el voltaje, corriente y potencia en la bobina L_r ; también muestra el voltaje, corriente y potencia en el bus DC. El voltaje en la bobina L_r cambia de polaridad: cuando la polaridad es positiva los IGBT's están accionados; cuando es negativa, los diodos están conduciendo. La Fig. 6 de la corriente L_r tiene marcado 4 puntos en cada zona, esto con el propósito de realizar ampliación y poder observar los fenómenos que se presentan. La ampliación de los 4 puntos se muestra a la derecha de la Fig. 7, es posible comparar la ampliación de la corriente L_r con la figura 2 que es la base de la explicación del artículo. La potencia de la bobina L_r y la potencia del bus DC alternan al doble de la frecuencia de alimentación y a la frecuencia de conmutación, ambas potencias tienen valor medio cero. Si se observan las Fig. 6 y 7, se verifica que la bobina L_r y el bus DC intercambian energía con la bobina L_c de la carga al doble de la frecuencia de alimentación coincidiendo con (Chen et al., 2015) y (Serban, 2015) que presentan potencias instantáneas para el bus DC cuyo argumento es $2\omega t$. También se puede verificar que la bobina L_r intercambia energía con el bus DC a la frecuencia de conmutación. Las Fig. 6 y 7 se pueden comparar con las Tablas 1 y 2; los sentidos de las corrientes, las polaridades de los elementos y el signo de las potencias coinciden, indicando que la descripción del artículo está bien realizada.

CONCLUSIONES

El artículo presenta un análisis riguroso del intercambio de energía entre el bus DC y las bobinas del sistema, se concluye lo siguiente:

- 1) Los artículos que presentan controles basados en el control de banda de histéresis no se preocupan por explicar la dinámica del sistema. Este artículo explica la dinámica del inversor y hace un análisis detallado del intercambio de energía entre las bobinas y condensadores. Este artículo puede servir como base obtener sistemas de control más eficientes, se pueden plantear las ecuaciones que modelan el sistema para los diferentes estados del inversor y plantear sistemas de control basados en el conocimiento del sistema.
- 2) El bus DC y la bobina L_r intercambian energía a la frecuencia de conmutación. Esto puede ser observado de los numerales 1 y 2 y también en la Fig. 7 donde se observa que la bobina de la red se carga y se descarga continuamente.
- 3) El bus DC y la bobina L_r intercambian energía con la bobina L_c al doble de la frecuencia de la red. Esto se presenta porque el voltaje de la bobina L_c es impuesto por la red y la corriente es impuesta por el inversor (ambos a 60 Hz). Esto explica el intercambio a la frecuencia de la red.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia (UdeA) por el apoyo de "Sostenibilidad 2014-2015".

REFERENCIAS

- Ajay, T., Paresh, C., *Comparative Analysis of Fixed and Sinusoidal Band Hysteresis Current Controllers for Voltage Source Inverters*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 39(1), 63-73, (1992)
- Bimal, K. *An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 37(5), 402-408, (1990)
- Chen, R., Liu, Y., Zheng, F., *DC Capacitor-Less Inverter for Single-Phase Power Conversion With Minimum Voltage and Current Stress*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 30(10), 5499-5507, (2015)
- Donald, G., H., Reza, D., Brendan, P., *An Improved Three-Phase Variable-Band Hysteresis Current Regulator*, IEEE Transaction on Power Electronics, 28(1), 441-450, (2013)
- Edgar, T., F., *Control and operations: when does controllability equal profitability?*, Computers and Chemical Engineering, 29(1), 41-49, (2004)
- Fangrui, L., Maswood, A., *A Novel Variable Hysteresis Band Current Control of Three-Phase Three-Level Unity PF Rectifier With Constant Switching Frequency*, IEEE Transaction on Power Electronics, 21(6), 1727-1734, (2006)
- Lam, C. S., Wong, M. C., Han, Y.-D., *Hysteresis current control of hybrid active power filters*, IET Power Electronics, 5(7), 1175-1187, (2012)
- Mansour, M., Islam, M., Mohammad, A. S., *Enhanced Hysteresis-Based Current Regulators in Vector Control of DFIG Wind Turbines*, IEEE Transaction on Power Electronics, 26(1), 223-234, (2011)
- Ramesh, S. Ramesh, O., *A Unity Power Factor Converter Using Half-Bridge Boost Topology*, IEEE Transaction on Power Electronics, 13(3), 487-500, (1998)
- Orts-Grau, S., Gimeno-Sales, F.J., Abellán-García, A., Seguí-Chilet, S., Alfonso-Gil, J. C., *Improved Shunt Active Power Compensator for IEEE Standard 1459 Compliance*, IEEE Transaction on Power Delivery, 25(4), 2692-2701, (2010)
- Saleh, S. A., Moloney, C. R., Azizur, M., *Analysis and Development of Wavelet Modulation for Three-Phase Voltage-Source Inverters*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 58(8), 3330-3348, (2011)
- Serban, L. *Power Decoupling Method for Single-Phase H-Bridge Inverters With No Additional Power Electronics*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 62(8), 4805-4813, (2015)
- Suroso, Noguchi, T., *Multilevel Current Waveform Generation Using Inductor Cells and H-Bridge Current-Source Inverter*, IEEE Transaction on Power Electronics, 27(3), 223-234, (2011)
- Vega, P., Lammana de Rocco, R., Revollar, S., Francisco, M., *Integrated design and control of chemical processes – Part I*, Elsevier Computer and Chemical Engineering, 71(1), 602-617, (2014)