MODULO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE PROCESOS DE CONVERSION DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Cristian Roberto Ruschetti[1], Carlos Javier Verucchi[2], Marcelo Alberto Spina[3], Roberto César Leegstra[4], Guillermo Rubén Bossio[5]

Abstract *— The design, functionality and application of a module destined to the electric energy conversion for didactical purposes is presented in this work. This device allows the analysis of an AC induction motor driver operation, from the basis of all the signals that are involved in that conversion process. It is relevant as support in the teaching proceedings for the advanced disciplines of the Electromechanical Engineering career from the UNCPBA, because the inner variables associated with the conversion process on the commercial equipment are not available. The modular design of the system allows to analyze different processes of energy conversion with simply modifications of the configuration, and those involved in the speed variation too. It is shown the constructed didactic module, used as didactic resource for laboratory practices and its impact on the students learning process.*

Index Terms — AC induction motor driver, didactical laboratory device, electric energy conversion, speed variation.

INTRODUCCIÓN

La Electrónica de Potencia (EP) se define como el área de conocimiento que estudia la conmutación, conversión, control y procesamiento de la energía eléctrica a través del uso de los dispositivos semiconductores de potencia. Dentro de las aplicaciones de la EP está el Control de Maquinas Eléctricas (CME).

A su vez; la solidez del Motor de Inducción Trifásico (MIT), el bajo costo y el escaso mantenimiento hacen que sea la máquina eléctrica de mayor utilización en la industria.

Actualmente, gracias al avance tecnológico en el desarrollo de los semiconductores de potencia, es posible obtener convertidores de energía de gran robustez y con un elevado rendimiento. De esta manera, es posible simplificar los inconvenientes vinculados a la variación de velocidad en los MIT. El desafío, para la enseñanza de la EP, no solo se encuentra en el hecho de conocer y estudiar las topologías existentes; sino en el desarrollo de convertidores y sistemas de control, tanto por los alumnos como por los docentes de dichas cátedras.

En artículos relacionados al tema tratado se encuentran diseños similares al objetivo presentado. Una de las posturas se basa en el control por medio de una Computadora Personal (PC), la cual se encarga, mediante un software realizado a medida para este equipo, de generar las señales necesarias para la modulación de ancho de pulso. El resto del proceso se lleva a cabo por medio del circuito electrónico de control [1]-[2].

Existe otro punto de vista por medio del cual se plantea el uso de señales moduladoras de frecuencia fija, implementado mediante circuitos electrónicos. En este sentido, el sistema conforma una fuente de alimentación ininterrumpida (UPS - Uninterrupted Power Supply) [3].

Otra de las propuestas se basa en el uso de un procesador digital de señales (DSP - Digital Signal Processor) cuya función es el control completo del variador de velocidad. Además posee una PC que actúa como interfaz entre el operador y el módulo didáctico [4].

Una nueva opción analizada corresponde a un convertidor conformado por un panel sinóptico modular, con módulos de potencia y señal, configurables por hardware [5]. Con una topología similar se presenta un sistema compuesto por módulos de potencia, retardos y control, con la posibilidad de implementar controles PID para máquinas de corriente continua [6].

En [7] se presenta el desarrollo de un sistema didáctico que permite el control de diferentes máquinas eléctricas con un grado de flexibilidad importante. El mismo utiliza para su funcionamiento un controlador digital (DSC - digital signal controller), posibilitando de esta manera el desarrollo de diferentes estrategias de control sin necesidad de equipos adicionales.

En el presente trabajo se presenta el diseño y funcionalidad de un equipo destinado la enseñanza de la conversión de energía eléctrica aplicado a variación de velocidad de MIT y desarrollado en la Facultad de Ingeniería

1 Cristian Roberto Ruschetti, Grupo Intelymec, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, cruschet@fio.unicen.edu.ar
2 Carlos Javier Verucchi, Grupo Intelymec, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina , verucchi@fio.unicen.edu.ar
3 Marcelo Alberto Spina, Grupo Intelymec, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina , mspina@fio.unicen.edu.ar
4 Roberto César Leegstra, Grupo Intelymec, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, rleegs@fio.unicen.edu.ar
5 Guillermo Rubén Bossio, Grupo GEA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina , gbossio@ing.unrc.edu.ar

de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Este equipamiento permite conocer la totalidad de las señales del proceso de conversión de la energía involucrado en el control de una máquina eléctrica.

Así, el trabajo se organiza de la siguiente manera: presentación de la configuración general del módulo didáctico; descripción específica de cada una de las partes que lo componen, implementación física de equipamiento descripción de las funciones didácticas del módulo y, finalmente, se introducen las conclusiones del trabajo.

CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO

El equipamiento esta compuesto por cuatro módulos funcionales:

- Módulo de generación de señales para la modulación de ancho de pulso y control de la ley Tensión-Frecuencia (V/F).
- Módulo dedicado a la modulación de ancho de pulso por tensión (VPWM – Voltage Pulse Width Modulation).
- Módulo de retardos temporales y drivers de disparo.
- Módulo de potencia.

Además de lo expuesto anteriormente, el equipo posee dos Fuentes de alimentación, una de uso general para alimentación del control y otro para alimentación de los drivers de disparo.

En el diagrama de bloques de la Figura 1 se detalla la interconexión de cada uno de los módulos, para lograr la función de variación de velocidad en un MIT.

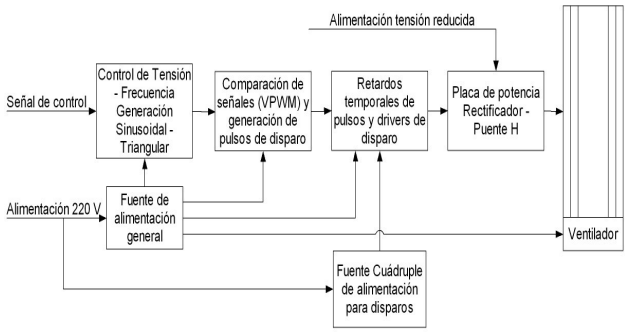

FIGURA 1.
DIAGRAMA EN BLOQUES DEL MÓDULO DIDÁCTICO.

Módulo de generación de señales y ley tensión frecuencia

En este módulo se realiza la generación de las señales necesarias para la modulación de ancho de pulso por tensión VPWM, además de permitir el control de la ley tensión-frecuencia adoptado para este inversor. Esto se realiza a través de bloques independientes, en cuanto a sus funciones.

La generación de la señal portadora (triangular) la efectúa un circuito integrado lineal XR8038 (generador de funciones) y su correspondiente circuito asociado.

La generación de la señal moduladora (sinusoidal) se realiza con un circuito integrado lineal XR2206 (generador de funciones). Un potenciómetro doble en tándem realiza el control de la frecuencia y amplitud, con el cual es posible controlar ambas magnitudes en forma conjunta.

La generación de la señal trifásica se efectúa a través de la Transformada Inversa de Park (TIP), debido a que esta transformación permite pasar de un sistema bifásico, a un sistema trifásico. Partiendo de la base de un sistema bifásico como el siguiente:

$$V_d = V_{Max} \cdot sen(\omega t) \tag{1}$$

$$V_q = V_{Max} \cdot sen(\omega t + \pi/2) \tag{2}$$

y siendo

$$\frac{dV_d}{dt} = \omega \cdot sen(\omega t + \pi/2) = \frac{V_q}{\omega} \tag{3}$$

Por medio de las siguientes ecuaciones, correspondientes a la TIP, es posible obtener el sistema trifásico.

$$V_a = V_d \tag{4}$$

$$V_b = \frac{1}{2} \cdot \left(-V_d + \sqrt{3} \cdot V_q\right) \tag{5}$$

$$V_c = \frac{1}{2} \cdot \left(-V_d - \sqrt{3} \cdot V_q\right) \tag{6}$$

La implementación de la TIP se realiza por medio de sumadores implementados mediante amplificadores operacionales. La forma de onda de cada una de las señales descriptas anteriormente pueden observarse en las siguientes imágenes. En la Figura 2 se muestran las señales generadas para la modulación, obtenidas con el empleo de un osciloscopio digital. En la Figura 3 se observa la señal bifásica empleada para la transformada inversa de Park, y en la Figura 4, pueden verse dos fases de la señal trifásica generada.

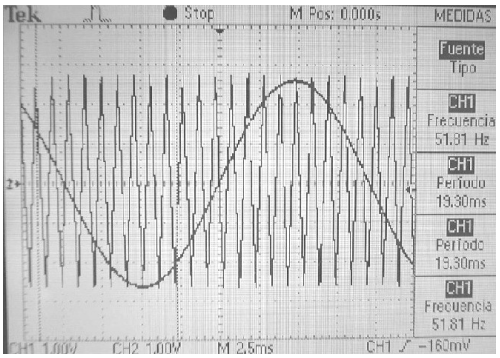

FIGURA 2.
SEÑALES GENERADAS PARA LA MODULACIÓN.

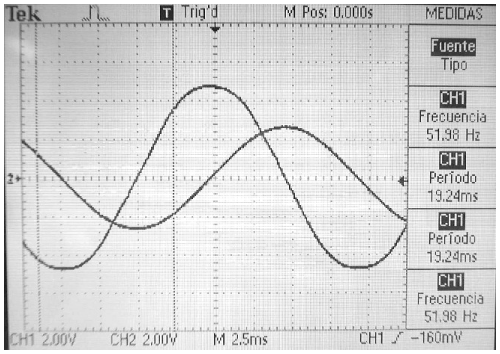

FIGURA 3.
SEÑAL BIFÁSICA UTILIZADA PARA LA TRANSFORMADA INVERSA DE PARK.

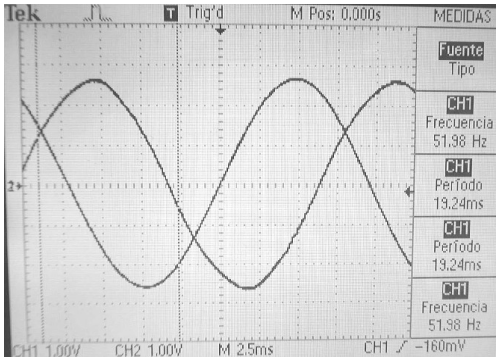

FIGURA 4.
DOS FASES DE LA SEÑAL TRIFÁSICA UTILIZADA PARA LA TRANSFORMADA INVERSA DE PARK.

Módulo de comparación de señales (VPWM) y generación de pulsos de disparo

En este módulo se desarrolla la modulación de ancho de pulso por tensión VPWM, con una señal moduladora trifásica sinusoidal y una señal portadora triangular de 1 kHz. Esta función se realiza por medio de un amplificador operacional LM324.

Luego de realizada la comparación entre ambas señales, los pulsos generados ingresan a una serie de circuitos digitales para obtener transiciones prácticamente instantáneas. Además se generan las señales invertidas para el control de ambos semiconductores de cada una de las ramas del ondulador.

La salida de este módulo corresponde a las seis señales de los puntos de disparo del puente H trifásico.

En la Figura 5 se muestran las señales de disparo correspondientes a los semiconductores de una rama del ondulador.

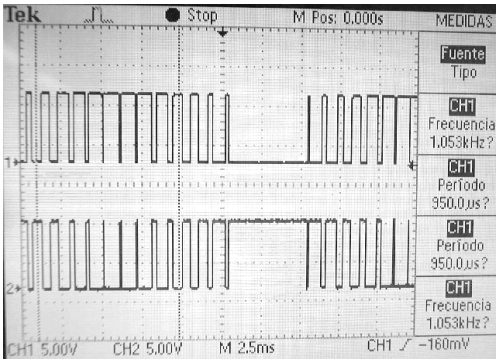

FIGURA 5.
PULSOS DE DISPARO DE LOS SEMICONDUCTORES DE UNA RAMA.

Módulo de retardos temporales de pulsos y drivers de disparo.

Dentro de este módulo se implementó el circuito cuya función es generar los retardos de tiempo para eliminar la posibilidad de cruce de los semiconductores de la misma rama del ondulador y los drivers de disparo para los semiconductores de potencia.

Para la implementación de los retardos temporales se utilizaron circuitos integrados digitales de compuertas NAND de tres entradas CD4023, con el objetivo de generar los retardos y la inhibición de los pulsos de disparo para la detención del MIT. La salida de esta etapa corresponde a la entrada del circuito de los drivers de disparo. El retardo impuesto a las señales de los pulsos de disparo es de 12µs.

Los drivers de disparo se realizaron por medio de una fuente cuádruple de tensión, empleando un transformador con cuatro secundarios totalmente independientes, para aislar los niveles de tensión de cada una de las referencias de los semiconductores de potencia. Para separar los niveles correspondientes al ondulador, de los que posee la placa de control, se utilizaron optoacopladores 4N26. Dentro de este módulo puede observarse el retardo temporal de los pulsos de disparo. En la Figura 6 se observan dichos retardos.

Módulo o placa de potencia

En esta placa se encuentran implementados los circuitos correspondientes al rectificador de potencia y las conexiones que conforman el inversor tipo puente H.

Los semiconductores del puente H se encuentran montados sobre un disipador de aluminio, debido a la potencia que disipan los mismos durante la conmutación. En función de las características de la carga y del circuito de control se utilizaron seis MOSFET 2SK1119.

El rectificador trifásico de onda completa está compuesto por seis diodos 1N5408. Actualmente se encuentra alimentado a tensión reducida a través de un transformador reductor de 220V/110V, por seguridad ante contactos accidentales durante la operación.

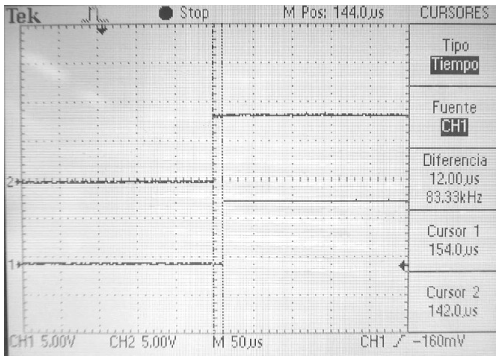

FIGURA 6.
RETARDO EN LOS FLANCOS ASCENDENTES DE LOS PULSOS DE DISPARO.

El filtro de tensión del bus de continua fue calculado en función de la corriente absorbida por el motor trifásico de 1/3 HP, utilizado como carga para las pruebas en el laboratorio. Se incluyó una resistencia de drenaje para evitar descargas eléctricas accidentales luego de haber desconectado el equipo. Los capacitores se encuentran ubicados fuera de la placa de potencia por una razón constructiva, debida al tamaño de los mismos.

En el conexionado exterior a la placa se encuentra, en serie con una de las fases del motor, una resistencia shunt de valor 0.1Ω, que permite monitorear la corriente de salida del inversor. De la placa de potencia es posible obtener: la señal de corriente en la fases del motor, como así también la tensión en cada una de las mismas. En las siguientes figuras se muestra la forma de onda de las señales a las que se hizo referencia. En la Figura 7 se muestra la señal de tensión aplicada sobre el MIT, y en la Figura 8 se observa la señal de corriente en una fase.

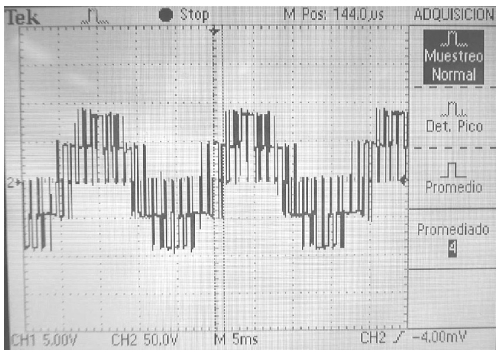

FIGURA 7.
SEÑAL DE TENSIÓN APLICADA SOBRE EL MIT RESPECTO AL CENTRO DE ESTRELLA DEL MISMO.

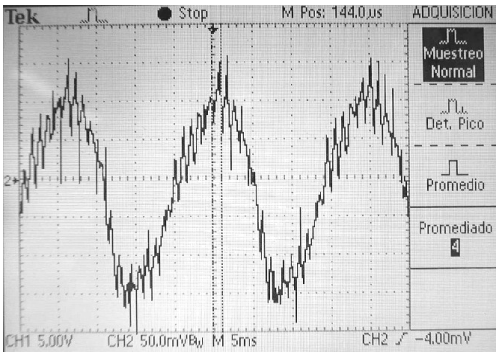

FIGURA 8.
SEÑAL DE CORRIENTE EN UNA FASE DEL MIT.

Fuentes de alimentación

La fuente de alimentación general, que entrega energía a los circuitos de control, es una fuente partida de $\pm 8V$, formada por reguladores monolíticos. Además posee una salida de $12V$ que proporciona la ventilación forzada al módulo de potencia.

En lo que refiere a alimentación de los drivers de disparo, se implementó una fuente cuádruple que se encarga de energizar los circuitos de disparo, posterior a la optoaislación. Cada una de las fuentes se compone de un puente rectificador y filtros capacitivos para disminuir tanto el ripple de tensión como los ruidos de alta frecuencia que puedan afectar a los disparos de los semiconductores del ondulador.

IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL EQUIPO

La implementación de los circuitos descriptos en la sección anterior se realizó a través de placas multipropósito. En la Figura 9 se observa la implementación modular del equipamiento. El equipo se encuentra dispuesto dentro de un gabinete con frente transparente de policarbonato, de manera de poder apreciar los distintos módulos que lo componen. Sobre este frente se encuentra serigrafía de la topología de los bloques de los módulos, incluyendo la indicación de cada uno de los puntos de medición de las distintas señales involucradas en todo el proceso de conversión.

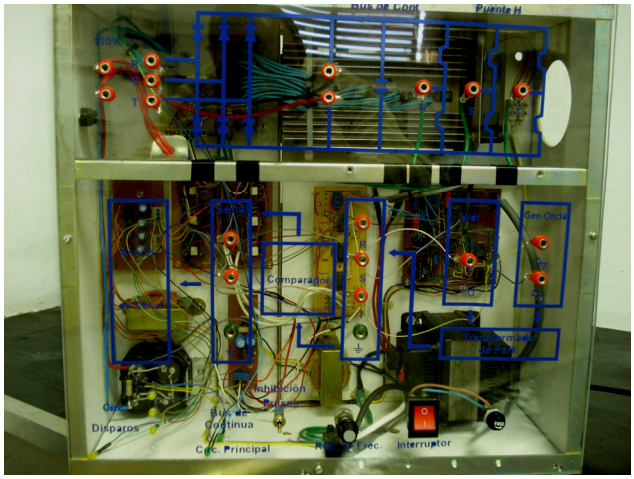

FIGURA 9.
IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL EQUIPAMIENTO.

ASPECTOS DIDÁCTICOS

Se trata de contribuir a que el alumno comprenda las diferentes instancias que ocurren en la conversión de energía y el proceso de construcción de las mismas. Fundamentalmente esto se logra con la medición y visualización de las formas de onda en cada etapa, vinculando así los conocimientos desarrollados en la faz teórica. En este sentido, el empleo de un variador de velocidad didáctico posee una diferencia relevante con respecto a un equipamiento comercial, pues en estos últimos solo es posible el acceso a la tensión de entrada, del bus de continua y salida de tensión alterna. Con el empleo del módulo didáctico es posible medir, analizar y visualizar las siguientes señales:

- Señal sinusoidal generada.
- Señal portadora Triangular.
- Señal bifásica para aplicar la TIP.
- Señal moduladora trifásica generada a través de la TIP.
- Modulación de ancho de pulso.
- Retardo temporal de los pulsos de disparo.
- Corriente en las fases del motor.
- Tensión entre fases del MIT.
- Tensión de fase respecto al centro estrella del MIT.

El equipamiento fue concebido para la utilización como variador de velocidad para MIT, no obstante se pueden desarrollar experiencias relacionadas con el control de maquinas de Corriente Continua y otros convertidores estáticos, mediante el reemplazo del módulo generación de señales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un variador de velocidad desarrollado específicamente para fines de enseñanza, cuyo control se realiza de manera autónoma, donde el operador fija la consigna de velocidad deseada, manualmente.

Mediante el empleo de este equipamiento se pueden visualizar las principales formas de onda que forman parte de un proceso de conversión de energía eléctrica involucrado en la variación de velocidad en los motores de inducción trifásica, que no es posible de lograr utilizando equipos comerciales.

La aplicación en prácticas de laboratorio permitió contribuir a la formación de los alumnos de la asignatura de Electrónica de Potencia.

El módulo didáctico se utilizará en los cursos de Electrónica de Potencia, Maquinas Eléctricas y Accionamientos Eléctricos, dictados en la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA. También se prevé su utilización en cursos técnicos de capacitación de personal vinculados con el sector industrial de la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de la UNCPBA, UNRC y del CONICET.

REFERENCIAS

[1] García, G., Leidhjold, R., Bossio, G., de Angelo, C., Forchetti, D., "Laboratorio modular para la enseñanza de electrónica de potencia y control de máquinaseléctricas", *I CAEDI (Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería),*, 1996, 1-7.

[2] De la Barrera, P., Curti, M., Forchetti, D.,de Angelo, C., Bossio, G., García, G., "Inversor trifásico para control de máquinas eléctricas con fines didácticos", *XVIII Congreso Argentino de Control Automático (AADECA 2002),* 2002.

[3] Soares dos Reis, F., Gross, A., Tonkoski, R., Rodrigues, L,W., Lima, J.C.M., Canalli, V.M., "Plataforma didáctica para o ensino da electrônica de potência", *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia (COBENGE 2001),* 2001.

[4] Muñoz, M.O., Correa, J.C., Kuchen, B.R., "Banco didáctico experimental y de investigación para el desarrollo de algoritmos de control de motores de inducción", *XVIII Congreso Argentino de Control Automático (AADECA 2002),* 2002.

[5] Palma, J.P., Antonio, F.A., Virtuoso, V.F., "A didactic configurable converter for training on inverter and chopper topologies", *8th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 1996),*1996.

[6] Cordeiro, A.; Foito, D.; Guerreiro, M., "Power electronics didactic modules for direct current machine control," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. POWERENG '09. Portugal*, pp.635-639, 18-20 March 2009.

[7] Batista, F. A. B.; Petry, C. A.; Santos, E. L. F.; Almeida, B. R., "Didactic system for digital control of power electronics applications," *Power Electronics Conference. COBEP '09. Brazilian*, pp.1093-1098, Sept. 27 -Oct. 1 2009.