

Desarrollo de un Convertidor Electrónico Multinivel para Aplicaciones de Compensación de Potencia Reactiva

J.C. Viola † F. Quizhpi ‡

† *Dpto. Electrónica y Circuitos, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Investigador*

‡ *Proyecto Prometeo, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.*

Resumen— El trabajo presenta el proceso completo de diseño y construcción de un convertidor electrónico de potencia de 9 niveles en configuración cascada, destinado para su uso como compensador estático de potencia reactiva en instalaciones industriales trifásicas. El trabajo abarca el dimensionamiento y montaje de la etapa de potencia compuesta por 24 módulos de transistores bipolares de compuerta aislada (IGBTs) de 150A y 1 200V cada uno y por 3 disipadores de aluminio, como así también todo el diseño y desarrollo de las tarjetas de adquisición, disparo y control necesarias para manejar el convertidor a lazo cerrado. Las tarjetas de adquisición se diseñaron utilizando sensores de efecto Hall para tensión y corriente y transmisión de datos por fibra óptica para asegurar aislación entre la tarjeta de control y la etapa de potencia. Para el control del convertidor de diseño una tarjeta basada en un arreglo de lógica programable (FPGA) interconectada con un procesador digital de señales (DSP) que permite la alta velocidad de procesamiento requerida para probar distintas técnicas de control. El convertidor es controlado por modulación de ancho de pulso (PWM) conmutando a una frecuencia de 10kHz y pudiendo ser conectado a tensiones de hasta 3kV.

Palabras clave— Convertidor multinivel, compensación de potencia reactiva, modulación de ancho de pulso.

1. INTRODUCCIÓN

Existen numerosas aplicaciones en las que se utilizan los convertidores electrónicos como compensadores de factor de potencia, siendo las primeras propuestas en las décadas del 50 y 60. Estas utilizaban el rectificador controlado de silicio (SCR) como elemento para conmutar condensadores o inductores, en paralelo o en serie con la carga y lograr mejoras en el factor de potencia global de una línea [1][2].

Con la aparición de los transistores de potencia los cuales podían ser conmutados a mayores frecuencias aparecen las aplicaciones que hacen uso de la modulación de ancho de pulso (PWM) permitiendo una variedad mucho mayor de técnicas de control y la posibilidad de lograr ajustes mucho más precisos en el factor de potencia. Los primeros transistores en ser utilizados en la década del 60 y 70 son los bipolares (BJT), siendo lentamente desplazados a partir de los 80 y 90 primeramente por los transistores de efecto de campo (MOSFET) y posteriormente y hasta la actualidad por los bipolares de compuerta aislada (IGBT).

Los IGBT comerciales de hoy en día soportan tensiones de operación entre los 100V y los 1700V, siendo la versión comercial más difundida la que opera a 1 200V. En cuanto a su capacidad para manejo de corriente oscilan entre 40A y más de 600A. Para aplicaciones en las que el convertidor electrónico opere conectado a tensiones de línea relativamente bajas (i.e. 110V, 220V) se emplean configuraciones denominadas de 2 niveles, con solo 2 IGBT por cada fase que se desea compensar. Para aquellas aplicaciones de corrección de factor de potencia donde el convertidor electrónico compuesto por IGBT deba conectarse a tensiones de línea que superen las tensiones de operación de éstos, deben utilizarse configuraciones multinivel las cuales consisten en agrupaciones seriales de módulos IGBT de manera de que logren soportar la tensión total de trabajo que impone la línea en particular [3]. Existen numerosas topologías multinivel propuestas entre las que se cuentan la de acoplamiento de diodo, la de acoplamiento de condensador, celdas en cascada, etc. En particular la topología en cascada resulta más atractiva porque permite ser escalada fácilmente a configuraciones con más niveles y porque utiliza un mismo tipo de componente electrónico [3][4].

La utilización de configuraciones multinivel trae acarreada una ventaja adicional que es la mayor cantidad de estados de conmutación disponibles, lo que permite una mejora en el control general del sistema, logrando mejores compensaciones de factor de potencia que las obtenidas con convertidores de IGBT de solo 2 niveles.

Dada la mayor cantidad de niveles disponibles puede, inclusive, obviarse la necesidad de realizar modulación por ancho de pulso, obteniéndose igualmente buenos resultados y disminuyendo los requerimientos de hardware de la tarjeta de control. Las configuraciones multinivel tienen como contra, sin embargo, de que se requiere sensar una cantidad de variables de corriente y tensión mayor que las requeridas en una configuración de 2 niveles, aunque con métodos de estimación puede obviarse la medición de algunas variables y utilizar sus valores estimados.

Como tendencia general en el control de convertidores multinivel se observa entonces la necesidad de tarjetas de adquisición con más canales y tarjetas de control con procesadores digitales de señal (DSP) que tienen una mayor capacidad de procesamiento de los datos adquiridos para entonces calcular la acción de control correspondiente [4]. En el presente trabajo se presentan los pasos para el diseño de un convertidor electrónico trifásico multinivel con capacidad de ser conectado a tensiones de hasta 1 200V, manejando corrientes de hasta 150A, con un manejo total de potencia de 10kW. En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques que resume las distintas etapas que componen al convertidor. Cada uno de estos bloques fue diseñado íntegramente en Ecuador demostrando que es viable desarrollar este tipo de tecnologías y que el camino queda abierto para futuros emprendimientos que deseen ahondar en el tema.

El presente trabajo se divide de la siguiente manera: en la sección 2 se muestra la metodología de diseño utilizada para dimensionar las distintas partes que componen al convertidor multinivel, incluyendo el modelado tridimensional de las partes mecánicas más importantes y el diseño circuital de las tarjetas de circuitos. En la sección 3 se presenta el ensamblaje de las distintas partes del convertidor y se presenta el producto terminado. La sección 4 desarrolla los trabajos futuros que se pretenden llevar a cabo con el convertidor, fundamentalmente en el área de la compensación de energía reactiva y el control de máquinas eléctricas. Finalmente la sección 5 presenta las conclusiones y recomendaciones de los autores.

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Basándonos en el diagrama de la Figura 1 puede observarse que el funcionamiento de todo el sistema gira en torno a la etapa de potencia y se comenzó,

en consecuencia, primeramente por el diseño de ésta, realizándose posteriormente el diseño de las tarjetas de sensores, drivers y control.

2.1. Etapa de potencia

De las distintas topologías reportadas para convertidores multinivel la configuración de puentes H en cascada es la que ofrece mayor escalabilidad y puede ser construida con un mismo tipo de dispositivo de potencia. Otras topologías como la de acoplamiento por diodo o acoplamiento por condensador son preferibles para configuraciones de pocos niveles (3 a 5), pero para mayor cantidad de niveles se vuelven más complejas y más caras de construir [4][5].

La configuración en cascada elegida se muestra en la Figura 2, donde solo se muestra una rama de las 3 que componen al convertidor. En este caso se decidió construir una configuración de 9 niveles que permite fácilmente ser escalada a un número mayor de niveles simplemente agregando más puentes H en cascada. El número de niveles escogido está de acuerdo a los estándares usados en la industria actualmente [4].

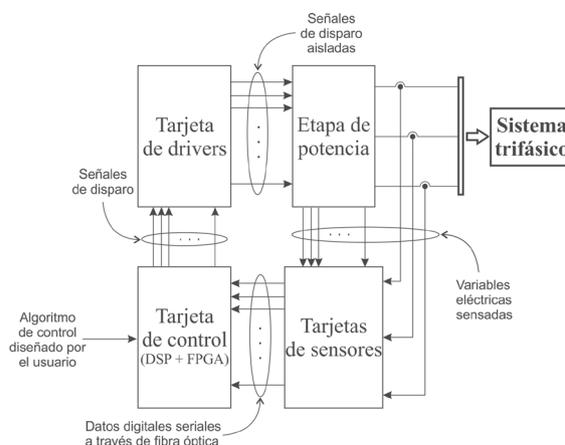


Figura 1: Diagramación de bloques de convertidor multinivel

A cada puente H se le denomina también celda y como se observa cada celda posee un condensador asociado que actúa como reserva local de energía. Dependiendo del tipo de aplicación para la que se utilice el convertidor el valor de la capacitancia puede variar, en este caso se optó por un condensador electrolítico de 2 200uF x 450V, el cual es un estándar industrial que se caracteriza por su relativo bajo costo.

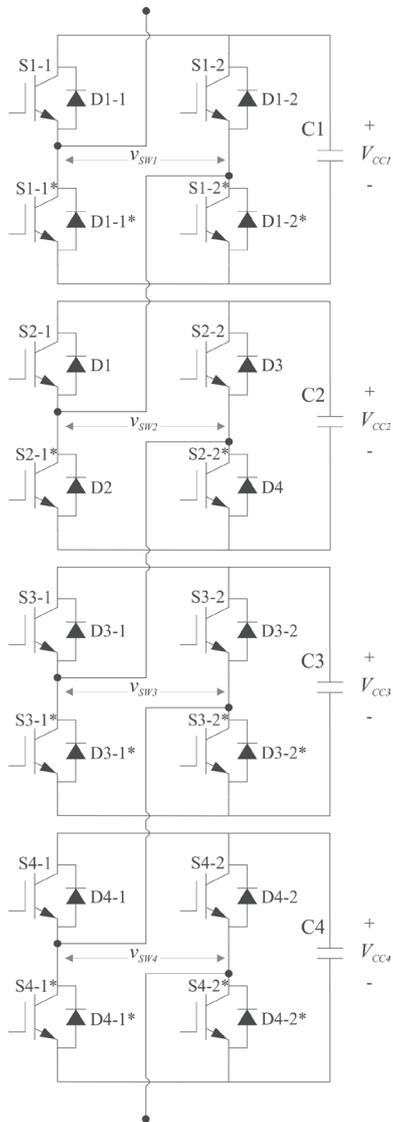
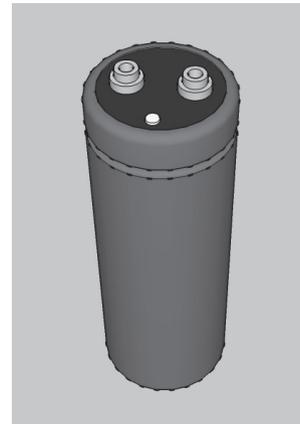


Figura 2: Circuito esquemático de una de las ramas del convertidor

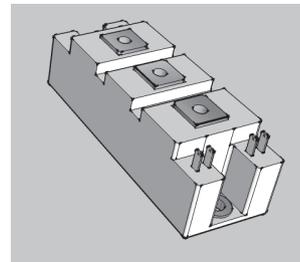
El modelo elegido es el E36D451HPN222MCE3M del fabricante United Chemi-Con [6] y en base a las especificaciones de la hoja de datos dada por el fabricante se realizó el modelado tridimensional de este componente el cual se muestra en la Figura 3(a).

Los conmutadores elegidos son módulos dobles de IGBT, los cuales tiene la ventaja de ser más fáciles de encender y apagar en comparación a otros dispositivos como BJT o SCR. Los módulos elegidos fueron los SKM150GB12T4-SEKG del fabricante Semikron, teniendo como características principales las de soportar una tensión de bloqueo de 1 200V y una corriente máxima de 150A [7]. La tecnología de semiconductores para operar con estas tensiones es la más desarrollada y resulta por lo tanto la más económica. Si bien existen dispositivos IGBT de

1 700V, son al día de hoy poco usados debido a su precio, quedando restringido su uso a aplicaciones muy específicas. La Figura 3(b) muestra una vista del modelo tridimensional realizado para el módulo IGBT en base a las dimensiones físicas dadas por el fabricante.



(a)



(b)

Figura 3: (a) Modelo mecánico del condensador E36D451HPN222MCE3M. (b) Modelo mecánico del módulo IGBT SKM150GB12T4-SEKG.

Los módulos IGBT escogidos son diseñados por el fabricante para poder ser montados mediante tornillos directamente a un disipador sin necesidad de material aislante. Se escoge por lo tanto un disipador realizado en aluminio extruido diseñado específicamente para este tipo de módulos el cual incluye las ranuras necesarias para deslizar los tornillos que harán la fijación mecánica. Estos perfiles de aluminio son fabricados por unas pocas empresas alrededor del mundo y se eligió por costo y servicio el modelo MM12878 del fabricante Alexandria Industries. Este modelo de disipador es fabricado en barras de 8 pies de longitud y se solicitaron 3 piezas cortadas de 500mm cada una, de manera de que hubiera espacio suficiente para alojar los 8 módulos de IGBT que componen cada rama. En base a las dimensiones dadas por el fabricante se realizó el modelado tridimensional del disipador una de cuyas vistas se muestra en la Figura 4.

Una vez determinados los componentes que iban a ser utilizados para la etapa de potencia se procedió a ensamblar todo en único modelo tridimensional de manera de descartar eventuales incompatibilidades de forma o tamaño obteniéndose el esquema que se observa en la Figura 5, donde se muestra el aspecto que tendría una de las tres ramas que componen al convertidor. La unión de los módulos se realizó con barras rígidas de manera de que sirvan de soporte mecánico a los condensadores asociados a cada bus CC.

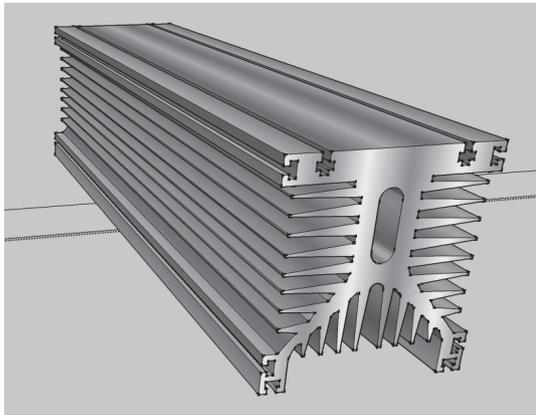


Figura 4: Modelo mecánico del disparador MM12878

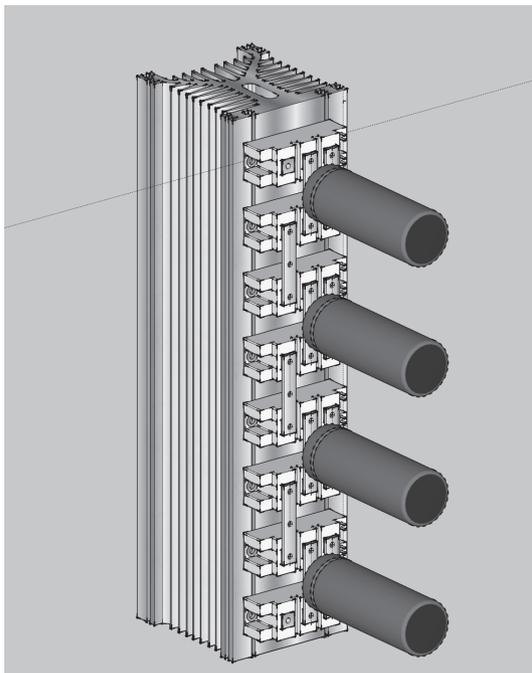


Figura 5: Modelado de una rama del convertidor multinivel

2.2. Tarjeta de sensores

Las tarjetas de sensores están a cargo de la medición y conversión analógica a digital de las variables de tensión y corriente eléctrica. Para computar la cantidad de canales de medición y conversión que se requieren se tomaron en cuenta las siguientes variables que se

desean medir: 12 tensiones correspondientes a los 12 buses CC de las 3 ramas del convertidor, 3 tensiones alternas del sistema trifásico al cual eventualmente pueda conectarse el convertidor, 3 corrientes alternas que circulen por las ramas del convertidor y 3 corrientes alternas que circulen por alguna carga en paralelo al convertidor. Esta última condición es típica en aplicaciones en las que el convertidor se utilice como compensador paralelo de potencia reactiva. La totalidad de variables alcanza a 21, repartidas a razón de 7 por cada rama. Dado que el convertidor puede ser extendido con relativa facilidad a una versión de 11 niveles agregando una celda más a cada rama se decidió contemplar esta eventual expansión a futuro y se decidió diseñar la tarjeta de sensores considerando 8 variables a ser medidas por cada rama.

Como las variables a ser medidas son tensiones y corrientes relativamente altas se debe asegurar una aislación total entre el circuito de medición y el resto del sistema. Para atender este requerimiento se incluyeron 2 niveles de seguridad en el diseño de la tarjeta realizando el sensado de las variables mediante sensores de efecto Hall y transmitiendo los datos digitales convertidos mediante fibra óptica, evitando en todo momento conexiones galvánicas entre la tarjeta y la etapa de potencia y entre la tarjeta y el resto de los bloques que componen el sistema. Además de esto el diseño incluyó un convertidor analógico-digital de 8 canales con una resolución de 14 bits. Todo el diseño circuital fue realizado mediante el software Altium y en la Figura 6 se muestra el aspecto de la tarjeta antes de ser enviada para su manufacturación.

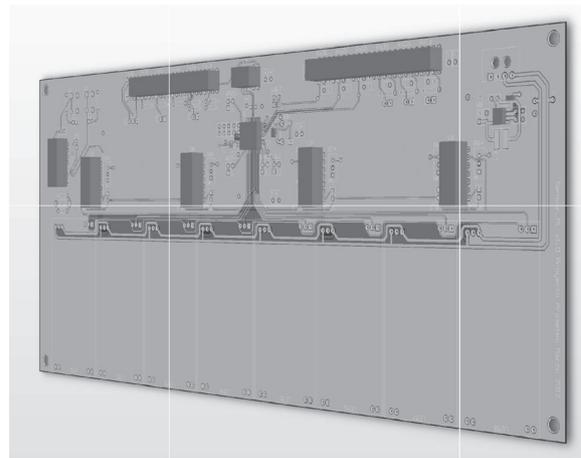


Figura 6: Vista del diseño de la tarjeta de sensores

2.3. Tarjeta de drivers

Las tarjetas de drivers tienen 2 funciones principales: aislar galvánicamente los circuitos de control de la etapa de potencia y amplificar los pulsos enviados por la etapa de control para

que tengan la suficiente intensidad para poder encender y apagar los IGBT. Tomando en cuenta estas consideraciones se diseñaron estas utilizando convertidores CC-CC aislados, asegurando tensiones de aislación de hasta 3 000V entre la etapa de potencia y la etapa de control. Para el manejo de los pulsos de disparo se utilizó el driver HCPL-316J del fabricante Agilent, especialmente diseñado para módulos de IGBT tales como los utilizados en este desarrollo. Cada tarjeta de drivers se diseñó con 4 canales independientes de manera de que cada una maneje una celda completa, requiriéndose 4 tarjetas por cada rama del convertidor. Igualmente al caso de la tarjeta de sensores el diseño se realizó con Altium y el modelado obtenido previo a su manufacturación se muestra en la Figura 7.

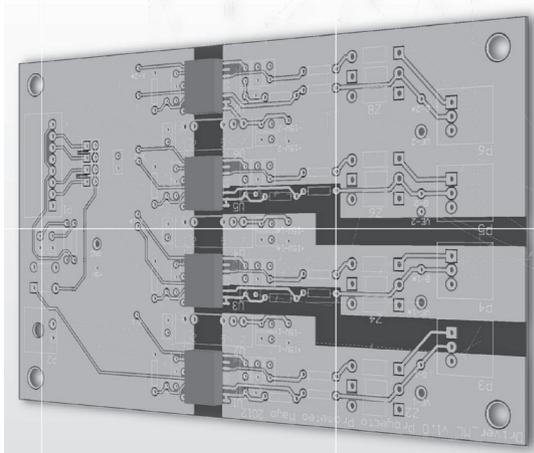


Figura 7: Vista del diseño de la tarjeta de drivers

2.4. Tarjeta de control

La tarjeta de control tiene a su cargo la generación de los disparos para el control del convertidor. La técnica más comúnmente usada para el control de convertidores es la PWM, la cual consiste en conmutar los IGBT a una frecuencia fija pero variando el porcentaje de tiempo en que cada conmutador permanece encendido o apagado. Dado que esta es una tarea que insume mucho tiempo al procesador encargado del control, se decide delegar esta función en un FPGA el cual puede ser programado para realizar múltiples operaciones en paralelo. De los múltiples modelos de FPGA disponibles en el mercado se decide utilizar el XC3S500E-4PQ208C de Xilinx que tiene como características principales poseer 500 000 compuertas y 208 pines. Por pruebas previas hechas con tarjetas de desarrollo del fabricante Xilinx se sabe que ese número de compuertas es suficiente para alojar toda la lógica correspondiente a las 48 salidas de disparo requeridas para controlar el convertidor.

La otra importante tarea que realiza la FPGA es la conversión serial a paralelo de los datos que llegan desde las tarjetas de sensores a través de las fibras ópticas. Dado que nuevamente esta es una tarea que consume tiempo y que debe ser realizada en simultáneo para 24 canales de datos a la vez, se le delega a la FPGA la cual entregará al procesador 24 datos de 14 bits en formato paralelo todos al mismo tiempo. En este caso el modelo elegido de 208 pines da suficiente margen para la implementación física de estas líneas, quedando incluso algunos pines libres para funciones extras que puedan requerirse a futuro. Al igual que para el resto de las tarjetas el diseño se realizó con Altium y una vista del modelo final para la tarjeta se muestra en la Figura 8. Dada la complejidad de este diseño se optó por una tarjeta de 4 capas en la que se usaron las 2 capas internas para planos de tierra y para las tensiones de 1.2V, 2.5V, 3.3V y 5V requeridas por la FPGA y sus periféricos.

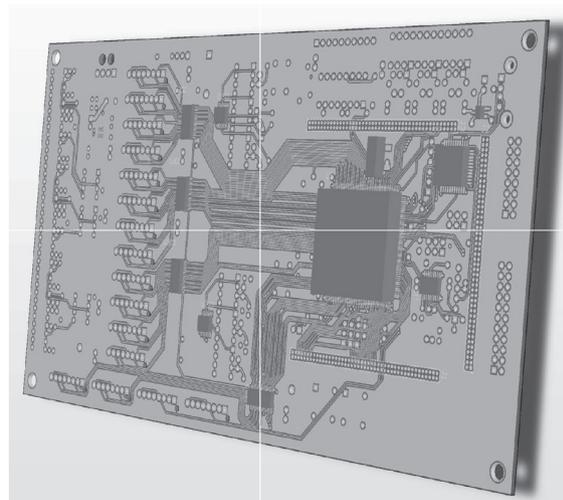
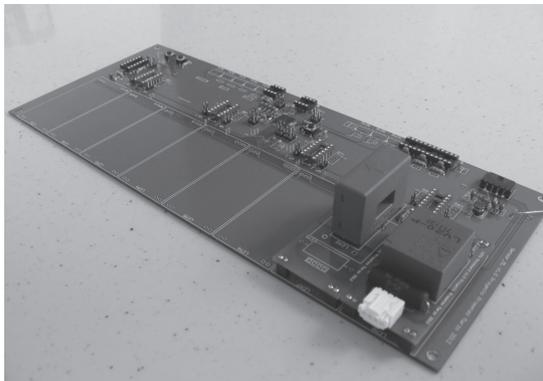


Figura 8: Vista del diseño de la tarjeta de control

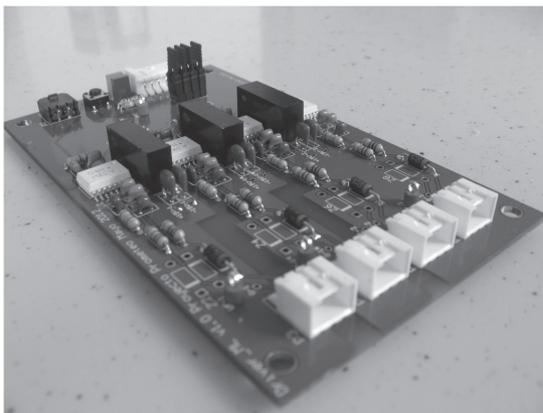
El procesador utilizado es un ADSP-21369 del fabricante Analog Devices que tiene como características más resaltantes el de operar a 450MHz y trabajar con variables de 32 bit de tipo punto flotante. El fabricante ofrece la tarjeta de desarrollo 21369-EZ-Kit Lite [8] que incluye el ADSP-21369 y por lo tanto se diseñó la interfaz de la tarjeta de control de manera de poder acoplarla a la 21369-EZ-Kit Lite. De esta manera el DSP puede enviar los comandos de PWM a la FPGA directamente usando los buses de dirección y datos e igualmente puede leer los datos convertidos de serie a paralelo. La acción de comando y la posterior realimentación permiten llevar a cabo controles a lazo cerrado en los cuales el DSP irá calculando en tiempo real la mejor acción a tomar siguiendo una ley de control que dependerá del algoritmo que se esté probando.

3. ENSAMBLAJE DEL SISTEMA

Una vez terminado el diseño de las distintas tarjetas y ya elegidos los componentes que conforman la etapa de potencia se adquirieron todos los materiales y se ordenó la manufactura de las tarjetas de circuito impreso. Los componentes fueron montados localmente en los Laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, con la ayuda puntual del Laboratorio de Electrónica de la Universidad Simón Bolívar de Venezuela, que prestó su apoyo gratuitamente para la soldadura de los componentes de montaje superficial. Cada tarjeta fue probada posteriormente al ensamblaje para determinar su correcto funcionamiento. En las Figs. 9(a) y 9(b) se muestran las fotografías de una de las tarjetas de sensores y una de las tarjetas de drivers ya terminadas.



(a)



(b)

Figura 9: (a) Tarjeta de sensores. (b) Tarjeta de drivers

Para el montaje de la etapa de potencia se requirió fabricar previamente las barras de cobre que unen los módulos y los condensadores. Este proceso se realizó enteramente en los Laboratorios de Mecánica de la UPS. Se agregó pasta térmica a la parte posterior de cada módulo IGBT antes de fijarlos al disipador mediante tornillos y tuercas. El uso de la pasta

maximiza la transferencia de calor entre el módulo y el disipador ayudando a mantener el chip de silicio a bajas temperaturas, lo cual amplía la capacidad de manejo de potencia de todo el convertidor. Los condensadores fueron atornillados a su vez a las barras de cobre resultando el montaje final que se muestra en la Figura 10.

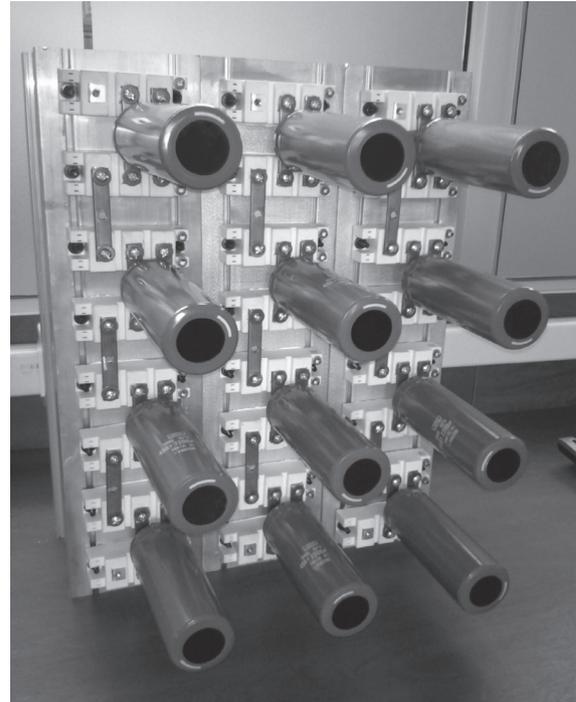


Figura 10: Imagen de la etapa de potencia correspondiente a las 3 ramas del convertidor

4. TRABAJOS FUTUROS

La construcción de esta plataforma de hardware es apenas el primer paso requerido para poder desarrollar una variedad inmensa de aplicaciones industriales y académicas, las cuales requieren tener la plataforma física donde poder probarlas. Se enumeran a continuación las líneas principales de investigación que se han abierto y que se deben mantener en el tiempo, a partir del desarrollo de este equipo.

4.1. Compensación de potencia reactiva

La topología del convertidor desarrollado permite básicamente dos configuraciones posibles en las que puede operar como compensador de potencia reactiva: en paralelo y en serie.

Para cualquiera de ellas el desafío consiste en controlar la etapa de potencia de acuerdo a distintos criterios para que la acción del convertidor logre eliminar los componentes reactivos de corriente que alguna carga no lineal impone a la línea. Los métodos de control

más utilizados son el control directo de potencia y el control directo de corriente, teniendo cada uno de éstos numerosas variantes las cuales requieren ser analizadas para determinar cual resulta más apropiada para cada caso de compensación en particular.

4.2. Control de máquinas eléctricas

En este caso el convertidor se utiliza en configuración inversor en la cual cada bus CC es alimentado mediante una fuente externa y a partir de la cual se obtiene un sistema trifásico de tensiones con amplitud y frecuencia variable. Esta configuración permite controlar distintos los tipos de máquinas más comunes en el ambiente industrial y de laboratorio tales como máquinas de inducción, máquinas sincrónicas, máquinas de continua, etc. Igualmente al caso de las aplicaciones de control de potencia reactiva la plataforma es suficientemente flexible para aceptar cualquier algoritmo de control que el usuario desee programar.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo presenta los pasos seguidos para el desarrollo íntegro de un convertidor electrónico multinivel incluyendo la etapa de potencia y todo el hardware necesario para su control. Puede afirmarse con total certeza que es el primer trabajo de esta magnitud que se emprende en el Ecuador lográndose obtener un producto cuya operación aún debe ser probada pero que lo colocan por características de diseño a la altura de productos comerciales fabricados por las empresas líderes en el área.

La plataforma desarrollada tiene además una ventaja fundamental sobre versiones comerciales y es que otorga total libertad al usuario para programar los algoritmos de control que desee probar, ya que el código utilizado para programar el DSP lo define el usuario y de ahí la posibilidad de probar técnicas novedosas y no reportadas al día de hoy. Esto contrasta con el caso de convertidores comerciales en los que solo pueden probarse aquellos algoritmos previamente programados por el fabricante, dejando muy pocas opciones para probar nuevas técnicas.

En conclusión la disponibilidad de esta plataforma abre la puerta a numerosas investigaciones las cuales deben ser llevadas adelante en forma de tesis de pregrado y postgrado. Los autores consideran que la mayoría de los estudios que se realicen sobre estos temas son factibles de ser publicados en forma de artículos científicos dada la gran actualidad que poseen estos tópicos hoy en día en el área de la electrónica de potencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana y al Proyecto Prometeo – SENESCYT por el apoyo económico e institucional brindado al proyecto. Adicionalmente desean agradecer a los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca: Danny Peñafiel, Paul Ramón, Tatiana Suquilanda y Marlon Idrovo, quienes han colaborado en el marco de sus proyectos de tesis con actividades complementarias a este proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Garcia O., Cobos J.A., Prieto R., Alou P. & Uceda J. (2001). “Power factor correction: a survey”, IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC. 2001, vol. 1, pp. 8-13, USA.
- [2] Dixon J., Moran L., Rodriguez J. & Domke R. (2005). “Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review”, Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2144-2164.
- [3] Abu-Rub H., Holtz J., Rodriguez J. & Ge B. (2010). “Medium-Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 8, pp. 2581-2596.
- [4] Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J. & Pérez M.A. (2010). “A Survey on Cascaded Multilevel Inverters,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206.
- [5] Rodriguez J., Jih-Sheng L. & Fang Zheng P. (2002). “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 49, no. 4, pp. 724-738.
- [6] United Chemi-Con Condensadores Electrolíticos Serie E36D. Disponible (online) en: http://www.chemi-con.com/components/com_catalog/uploaded/1/0/7/19624344024f674edd8e175.pdf
- [7] Semikron Fast IGBT Semitrans Modules Disponible (online) en: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM150GB12T4_22892040.pdf
- [8] Analog Devices Inc. Digital Signal Processors Disponible (online) en: <http://www.analog.com/en/processors-dsp/sharc/ADSP-21369/products/21369-EZLITE/eb>



Julio César Viola.- Nació en La Paz (ER), Argentina, en 1975. Está afiliado desde el año 2002 al Departamento de Electrónica y Circuitos de la Universidad Simón Bolívar en Caracas, Venezuela, siendo profesor asociado desde el año 2008.

Obtuvo el título de Ingeniero Electrónico en el año 2000 en la Universidad Tecnológica Nacional, Paraná (ER), Argentina, y el título de Doctor en Ingeniería en el año 2008 en la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Durante todo el año 2012 ha estado en la Universidad Politécnica Salesiana como Investigador Invitado del Proyecto Prometeo – SENESCYT.

Sus intereses en investigación se centran en la electrónica de potencia para el control de máquinas eléctricas y compensación de energía reactiva, controles neuronales y difusos y energías alternativas, áreas en las cuales posee más de 20 artículos científicos arbitrados.



Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque.- Nació en Cuenca, Ecuador, en 1969. Recibió el Título de Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana en el 2003, Licenciado en Ciencias de la Educación en la Universidad Politécnica Salesiana

en el 1999, Especialista en Educación Superior en la Universidad del Azuay en el 2002. Actualmente cursando el programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Simón Bolívar de Venezuela. Dedicado al área de investigación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, Confiabilidad, FACTS e Inversores Multinivel.