

Convertor Dual con Control de Corriente Circulante

Carlos Pavón Vargas, Patricio Chico Hidalgo

Escuela Politécnica Nacional (EPN). Quito-Ecuador

Resumen— El proceso de aprendizaje en la ingeniería requiere poder relacionar de manera directa la información adquirida a partir de conceptos matemáticos abstractos con la experimentación. La necesidad de estudiar el comportamiento y las potenciales aplicaciones de los rectificadores síncronos polifásicos a nivel de laboratorio han incentivado al diseño y construcción de un módulo de convertor dual con control de corriente circulante para el laboratorio de convertidores estáticos de energía del Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional.

El sistema de convertidor dual con control de corriente circulante implementado consiste en tres módulos independientes que puede trabajar de manera individual o de manera conjunta por medio de un protocolo de comunicaciones que permite utilizar los módulos como un conjunto con la finalidad de mantener una corriente circulante constante en la configuración dual de los convertidores. Para el proyecto se puso especial énfasis en la independencia de cada una de las partes del sistema para poder utilizarlo de manera individual o en conjunto según la configuración que se desee implementar en el laboratorio para la demostración práctica de los conceptos estudiados en la teoría.

Índices— Convertor AC/DC de seis pulsos, convertor dual, control cuatro cuadrantes, control PI digital, HVDC, transmisión de energía.

I. INTRODUCCIÓN

Un convertidor dual con la característica de mantener corriente circulante, mostrado en la Fig.1, se utiliza para el control de máquinas eléctricas rotativas de corriente continua de gran potencia, permitiendo el funcionamiento del motor en los cuatro cuadrantes de operación; también es utilizado en la transmisión de energía eléctrica por un enlace de corriente continua con la finalidad de acoplar los parques eólicos a la red eléctrica o para la transmisión de energía entre sistemas eléctricos de diferentes características por medio de un enlace de alto voltaje en corriente continua permitiendo además la transmisión de energía en largas distancias con bajas pérdidas.

También a partir de la configuración de convertor dual se puede construir un ciclo convertor polifásico con modificaciones menores al sistema de control. Se puede realizar además aplicaciones un poco menos conocidas como el método de recuperación de energía de Kramer para motores trifásicos de rotor bobinado.

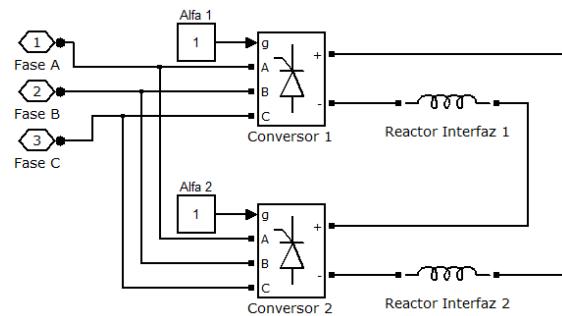


Fig.1. Modelo de convertidor dual.

De los ejemplos mencionados se puede observar la importancia del sistema y la necesidad de contar con un módulo que permita la investigación de las diversas aplicaciones a nivel de laboratorio.

II. CONVERTOR AC/DC DE SEIS PULSOS

La base del convertidor dual diseñado es un convertidor AC/DC trifásico de seis pulsos conmutado por la red eléctrica como el que se muestra en la Fig.2. Las características de funcionamiento del convertidor permiten el control del voltaje por medio de la variación del ángulo alfa a lo largo de la curva de transferencia de la Fig.3 [1].

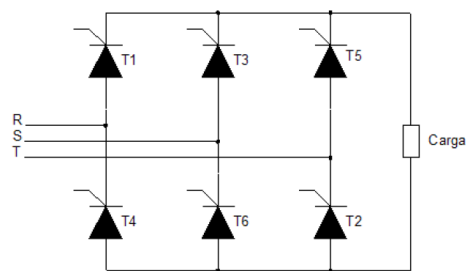


Fig.2. Configuración del convertor AC/DC

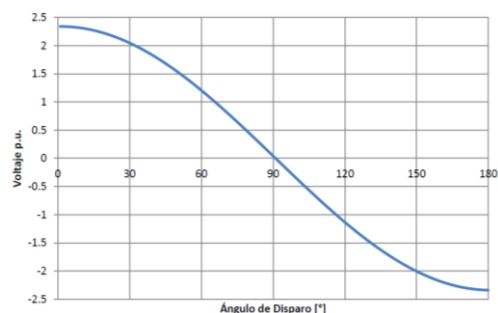


Fig.3. Función de transferencia de voltaje

La ecuación que describe el voltaje de salida de la Fig.3 se indica en (1).

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}V_{FF}}{\pi} \cos(\alpha) \quad (1)$$

III. CONVERSOR DUAL [1]

El control del voltaje a lo largo de la curva de la Fig.3 por medio de la variación del ángulo de disparo alfa requiere dos condiciones: que exista conducción continua y que a partir de los 90° se tenga una carga de tipo RL(-E).

La configuración dual permite que cada convertidor tenga a su salida conectado otro convertidor que se comporta como una carga (-E); en conjunto con el reactor de interfaz, cada convertidor tiene una carga del tipo RL(-E) permitiendo la variación de voltaje desde V_{max} hasta $-V_{max}$.

A. Topología y Modelo a Corriente Continua.

La conexión del convertidor dual se presenta en la Fig.4. Donde se puede ver que consiste en la conexión de dos convertidores AC/DC conectados en antiparalelo. Cada convertidor se comporta como la carga de tipo (-E) del segundo convertidor.

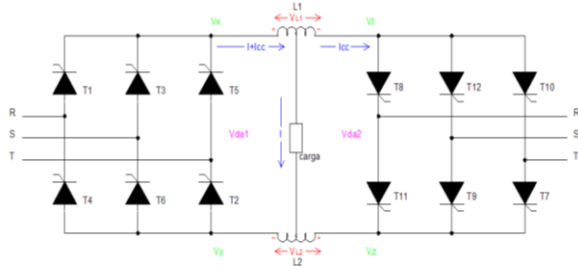


Fig.4. Configuración dual con carga.

Para definir el comportamiento de los ángulos de disparo se realiza el análisis del sistema con un equivalente ideal a corriente continua como se muestra en la Fig.5.

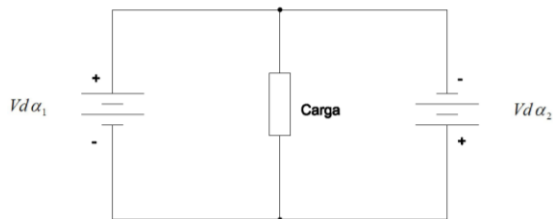


Fig.5. Modelo ideal a DC de un convertidor dual

El modelo ideal de la Fig.5 es posible de implementar si $Vd\alpha_1 = -Vd\alpha_2$. Por lo que los ángulos de disparo de cada convertidor se definen a partir de (1).

En la ecuación (2) se indica la condición que deben tener los ángulos de disparo de cada convertidor.

$$\frac{3\sqrt{3}V_{max}}{\pi} \cos(\alpha_1) = -\frac{3\sqrt{3}V_{max}}{\pi} \cos(\alpha_2)$$

$$\alpha_1 = \pi - \alpha_2 \quad (2)$$

B. Voltaje de Convertidor Dual

De la ecuación (2) se conoce que los ángulos de disparo del convertidor dual deben ser suplementarios.

En la Fig.6 se indica el análisis de las formas de onda de voltaje del a la salida de cada convertidor constituyente de convertidor dual considerando la condición de (2) con un ángulo de disparo de $\alpha_1 = 30^\circ$.

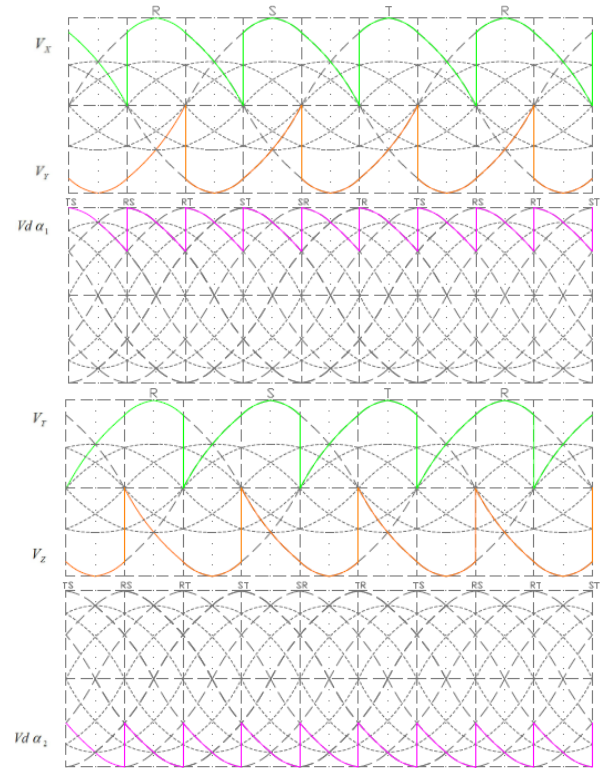


Fig.6. Formas de onda de voltaje del convertidor dual.

En la Fig.7 se muestra la forma de onda de voltaje en la carga del convertidor dual.

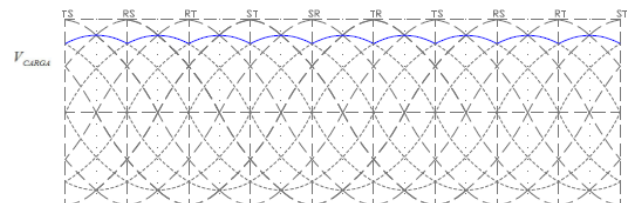


Fig.7 Formas de onda de voltaje en la carga.

El voltaje en la carga se describe en (3).

$$V_L = 3 V_{max} \left(\cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad (3)$$

C. Corriente del Conversor Dual [2].

La corriente circulante es independiente del ángulo de disparo y su rizado está limitado por el valor de la inductancia del reactor de interfaz. Una particularidad que demuestra la independencia de la corriente respecto al ángulo de disparo es cuando $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$. Pese a que el voltaje de cada convertidor es 0V, los convertidores funcionan en conducción continua, debido a la corriente circulante.

El rizado de la corriente circulante se calcula en base al voltaje de carga descrito en la Ecuación 3. La componente continua de la corriente circulante no puede ser calculada, es un parámetro definido de acuerdo a las necesidades del sistema. La Ecuación (4) describe el rizado de la corriente circulante.

$$i_{cc} = \frac{3V_{max}}{\omega L} \left(\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - \sin(\alpha) \right) \quad (4)$$

Mientras mayor sea el valor de la inductancia menor será el rizado, por lo que las inductancias que funcionan como reactor de interfaz deben ser diseñadas con un alto $\frac{di}{dt}$ para garantizar corriente plana.

D. Potencia del Conversor Dual.

La potencia del convertidor dual se analiza como la potencia en cada uno de los convertidores AC/DC. La corriente es unidireccional y el voltaje es invertible lo que permite el funcionamiento de cada convertidor en dos cuadrantes, dando como resultado de la configuración el funcionamiento en los cuatro cuadrantes.

La potencia a la entrada de cada convertidor se define en (5).

$$P_{in} = 3V_f I_1 \cos(\alpha) \quad (5)$$

Los ángulos de disparo en cada convertidor son suplementarios. La potencia se vuelve positiva para todo ángulo menor a 90° y negativa para un ángulo mayor a 90° lo que implica que mientras un convertidor consume energía de la red eléctrica el segundo convertidor devuelve la energía no utilizada hacia la red. En el caso de no tener una carga acoplada al sistema el sistema se convierte en un medio de transmisión de energía en corriente continua.

Esta característica es utilizada para acoplar parques eólicos a la red eléctrica convencional, o también para transmitir energía a largas distancias en corriente continua permitiendo incluso acoplar sistemas de distintas características facilitando la interconexión de sistemas eléctricos.

IV. ALGORITMO DE CONTROL [3] [4]

El modelado de la planta para implementar el controlador digital se obtiene a partir de la respuesta de la planta a una excitación de tipo escalón y con la ayuda del Toolbox de Identificación de Sistemas se realiza el modelado y el diseño del controlador.

En la Fig.8 se muestra la excitación y la respuesta obtenida de la planta y en la Fig.9 el modelo obtenido en el computador para ser trabajado en Matlab.

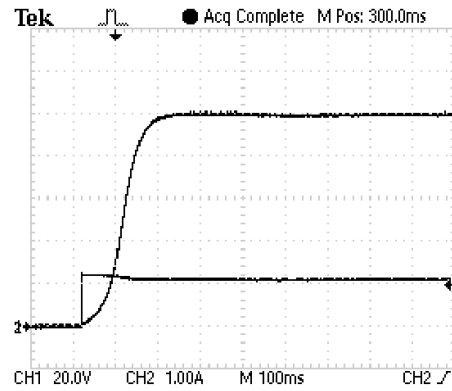


Fig.8. Respuesta de la planta

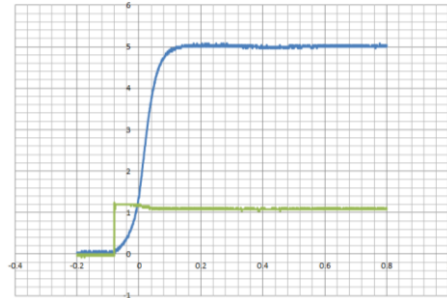


Fig.9. Modelo para trabajar en Matlab

A. Ley de Control

Con el modelo obtenido de la Fig.9 y utilizando el toolkit de Identificación de Sistemas de Matlab se obtiene la ley de control que se implementa como un bloque de programación en el microcontrolador. La ley de control obtenida se muestra en (6).

$$U(k) = U(k-1) + 5.4301 E(k) - 5.3106 E(k-1) \quad (6)$$

B. Consideraciones del diseño

Se debe tomar en cuenta que la corriente circulante en el conversor es una condición inicial que debe ser definida por el usuario. Por lo tanto la condición de (2) se cumple únicamente cuando se ha definido un valor inicial de corriente circulante, es decir para el estado estable.

Para definir el valor inicial de la corriente se debe crear un desbalance en los voltajes de los convertidores para que la diferencia de potencial sobre el reactor de interfaz ocasione la circulación de corriente en el convertidor.

Para esto se mantiene el valor del ángulo de disparo fijo sobre uno de los convertidores y el ángulo de disparo del segundo convertidor es controlado por la ley de control obtenida en Matlab.

Sin embargo si la diferencia de potencial en el reactor de interfaz cambia de manera abrupta el crecimiento de la corriente es limitado únicamente la inductancia [5] [6] [7]. Esto ocasiona que un cambio brusco en el ángulo de disparo lleve al sistema de convertidor dual a un estado de inestabilidad por el rápido crecimiento de la corriente.

Para evitar este problema se aplica límites a los valores de los ángulos de disparo modificando el controlador como se muestra en el diagrama de bloques de la Fig.12. En la Fig.10 se muestra los límites del controlador a lo largo de la curva de transferencia de voltaje. La región sombreada es el rango en el cual actúa el controlador digital. En la Fig.11 se presenta el área de variación de voltaje para los límites de los ángulos de disparo de la Fig.10.

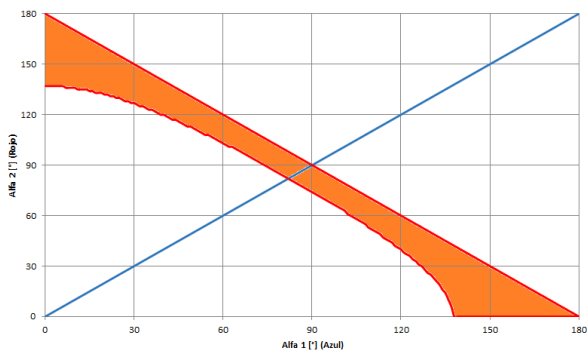


Fig.10. Límites de alfa del convertidor

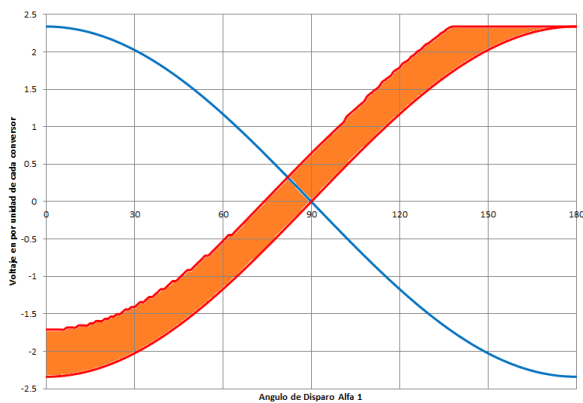


Fig.11. Límites de voltaje

La Fig.11 muestra en el área sombreada la región de variación del voltaje del convertidor en la cual actúa el controlador PI digital creando un desbalance de voltaje dependiendo del valor de consigna de la corriente circulante.

C. Diagrama de Bloques del Controlador

El controlador implementado considerando las variaciones máximas del ángulo de disparo se indica en la Fig.12. [8] [9]

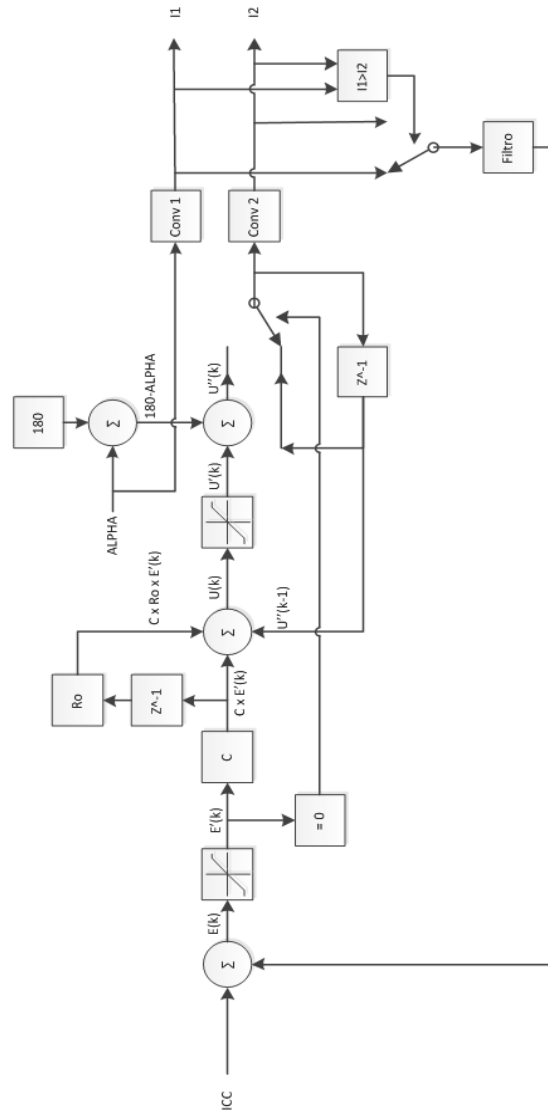


Fig.12. Diagrama de Bloques del controlador

El controlador cuenta con limitación en los valores máximos y mínimos de salida hacia el actuador como lo describe la Fig.10, así como una limitación en el error máximo permisible.

V. MÓDULO IMPLEMENTADO

La Fig.13 muestra el módulo de convertidor AC/DC de seis pulsos y la Fig.14 muestra el módulo de control de corriente circulante que se implemento en el laboratorio de Convertidores Estáticos de Energía.

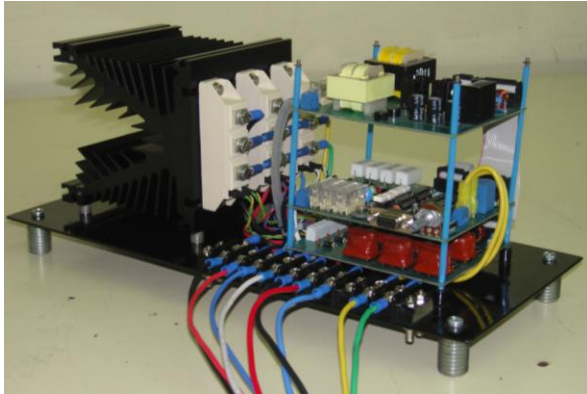


Fig.13. Módulo de convertidor AC/DC de seis pulsos

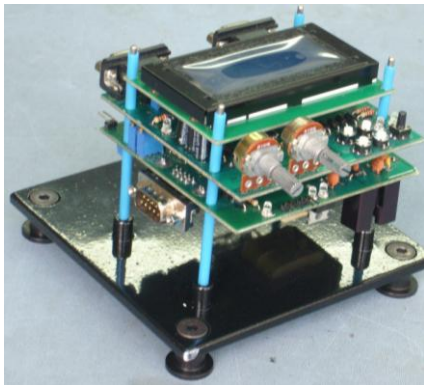


Fig.14. Módulo de control de corriente circulante

En la Fig.15 se muestra el módulo completo implementado acoplado los dos submódulos de convertidor AC/DC y el submódulo de control de corriente circulante. Las pruebas y medidas se realizaron en la implementación de la Fig.15.



Fig. 15 Módulo de Convertor dual trifásico

VI. RESULTADOS OBTENIDOS

A. Pruebas sin Carga

La conexión del convertor dual sin carga permite que el módulo funcione como un enlace de corriente continua que permite la transferencia de energía entre los dos convertidores. Las formas de onda de voltaje y corriente obtenidas en las pruebas realizadas sobre el convertor dual en vacío se presentan a continuación.

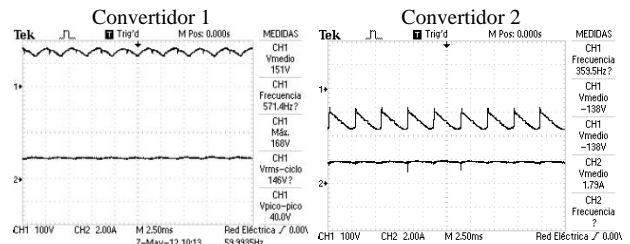


Fig.16. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=0^\circ$

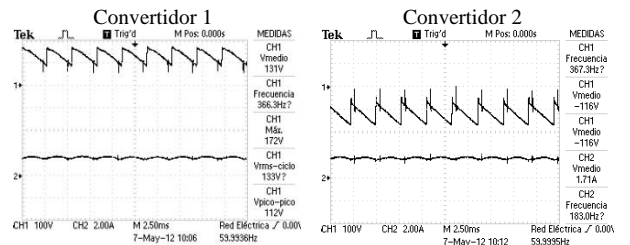


Fig.17. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=30^\circ$

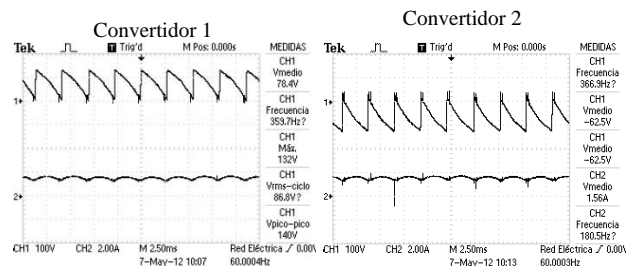


Fig.18. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=60^\circ$

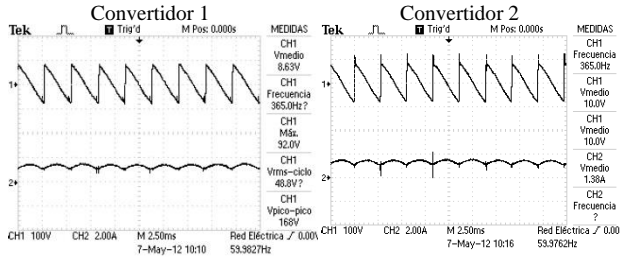


Fig.19. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=90^\circ$

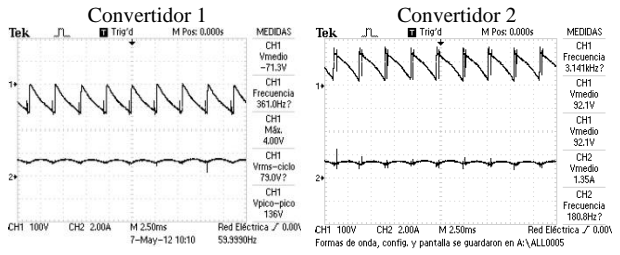


Fig.20. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=120^\circ$

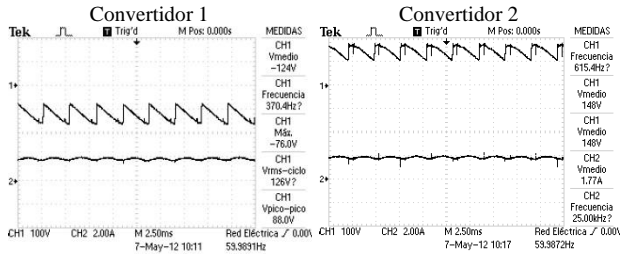


Fig.21. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=150^\circ$

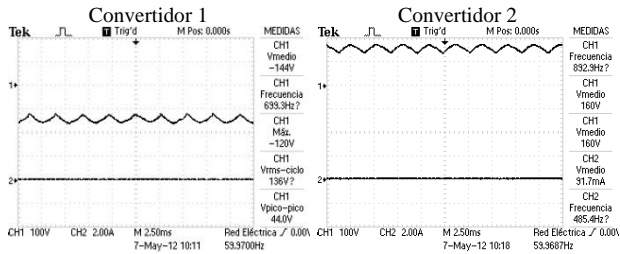


Fig.22. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=180^\circ$

Las medidas de potencia obtenidas en el convertidor se presentan en la Tabla 1. Se puede observar como el flujo de potencia varia de acuerdo al ángulo de disparo para ángulos menores a 90° el convertidor 1 consume potencia de la red eléctrica y el convertidor 2 devuelve energía eléctrica lo que se constata por el signo negativo de la potencia. Para ángulos mayores a 90° sucede el caso inverso.

Alfa	Potencia en la entrada del convertidor 1	Potencia en la entrada del convertidor 2	Pérdidas (P1-P2)
30°	246 [W]	-191 [W]	55 [W]
60°	130 [W]	-71 [W]	59 [W]
90°	-2 [W]	56 [W]	54 [W]
120°	-115 [W]	168 [W]	53 [W]
150°	-242 [W]	291 [W]	49 [W]
Equipo	Powermate™330	Fluke 41B	

Tabla1. Mediciones de potencia en el convertidor dual

El modelo de un tiristor de potencia consiste en un interruptor ideal en serie con una resistencia y una inductancia, además el reactor de interfaz presenta una resistencia interna debido a la longitud del bobinado. Esto ocasiona que la configuración de convertidor dual en vacío produzca pérdidas en la transmisión de energía. Estas pérdidas se ocasionan en la resistencia interna del reactor de interfaz y en el voltaje que se pierde en los tiristores debido a la circulación de corriente.

B. Pruebas con Carga

La carga utilizada es un motor de corriente continua el cual es accionado por el módulo de convertidor dual, permitiendo el funcionamiento del motor en los cuatro cuadrantes. Las formas de onda obtenidas de las pruebas realizadas el convertidor dual cuando se acopla una carga al sistema se muestran a continuación.

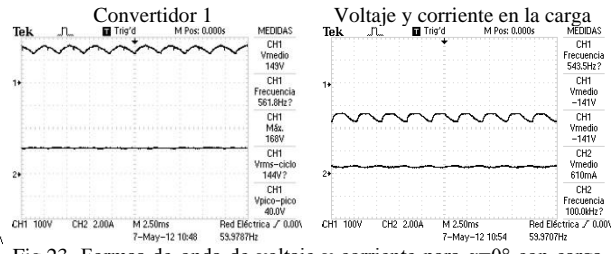


Fig.23. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=0^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

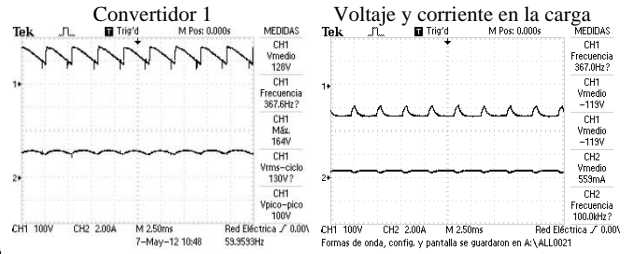


Fig.24. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=30^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

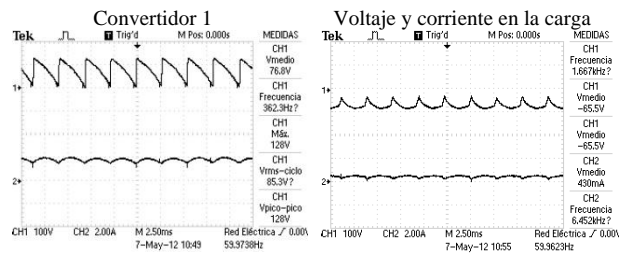


Fig.25. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=60^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

VII. CONCLUSIONES

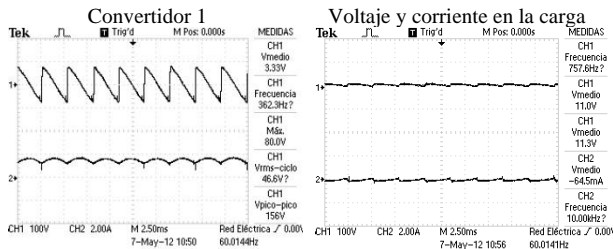


Fig.26. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=90^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

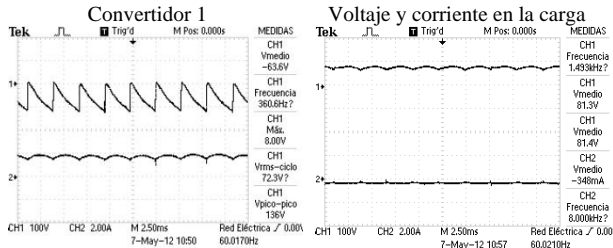


Fig.27. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=120^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

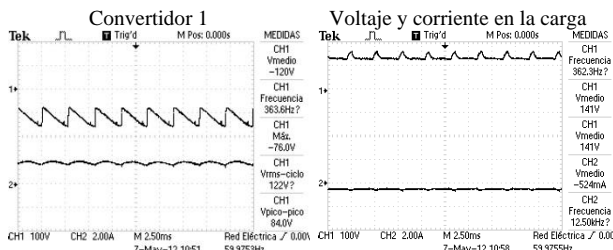


Fig.28. Formas de onda de voltaje y corriente para $\alpha=150^\circ$ con carga RLE (Motor de corriente continua)

Se observa como el controlador mantiene la corriente constante en el convertidor1 mientras el voltaje y la corriente en la carga van cambiando a lo largo de los cuatro cuadrantes de operación.

Para la Fig.23, Fig.24 y Fig.25 se puede observar como el voltaje y la corriente en el motor presentan valores positivos que corresponden a un ángulo de disparo entre 0° y 90° . La carga se encuentra funcionando en el primer cuadrante de operación.

En la Fig.26, Fig.27 y Fig.28 el voltaje y la corriente en la carga tienen valores negativos correspondientes a los ángulos de disparo entre 90° y 180° correspondiente al tercer cuadrante de operación.

El funcionamiento en el segundo y cuarto cuadrante de operación se produce al cambiar rápidamente el ángulo de disparo de un valor entre 0° y 90° a un valor entre 90° y 180° o viceversa. Durante un periodo corto de tiempo el motor continúa girando en sentido contrario a la polaridad del voltaje aplicado a los terminales. El motor, bajo esta condición, produce una circulación de corriente contraria a la polaridad de voltaje lo que produce que el motor regenere la energía del frenado hacia el convertidor que se encuentre polarizado de manera adecuada.

Las pruebas realizadas en el conversor dual trifásico diseñado e implementado en el laboratorio de electrónica de potencia permitieron comprobar que dependiendo del ángulo de disparo se puede transferir potencia desde un módulo hacia otro esto se corrobora con las tablas de los datos obtenidas en la medición de la potencia que se presentan como parte de los resultados obtenidos.

El análisis de la planta permitió comprender que el sistema de conversor dual con corriente circulante tiene un comportamiento determinístico, por lo que el sistema de control que se implementó permite el funcionamiento del conversor dual dentro de parámetros preestablecidos para los valores de consigna, que proveerán valores predecibles de voltaje y corriente facilitando determinar las condiciones iniciales necesarias para el correcto funcionamiento del algoritmo de control.

El diagrama fasorial revela que el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente corresponde al ángulo de disparo Alfa. Las formas de onda adquiridas en la entrada reflejan que la forma de onda de corriente al mantener la corriente constante es igual para cualquier ángulo de disparo, pero dependiendo del mismo la forma de onda de corriente se desplaza en el tiempo generando un desfase entre el voltaje y la corriente de hasta 180° lo que ocasiona que la potencia sea negativa a partir de los 90° .

El método de transferencia de energía por un enlace en corriente continua es efectivo únicamente cuando el ángulo de disparo es cercano a 0° , caso contrario el factor de potencia disminuye en relación lineal al ángulo de disparo. Lo que implica que es un método efectivo para cuando la variación del voltaje en la carga se encuentra cerca a los valores máximos de voltaje de salida del convertidor AC/DC [10].

El efecto causado de la conmutación de los interruptores de potencia y el efecto de la resistencia interna de los inductores que componen el reactor de interfaz ocasionan que el sistema tenga pérdidas. Las pérdidas son mucho más significativas en el reactor de interfaz debido a la componente resistiva de los inductores, para mejorar el diseño se debe utilizar un núcleo con una mejor característica de permeabilidad magnética lo que se traduce en una menor cantidad de espiras que reduce las pérdidas I^2R sobre los inductores mejorando el rendimiento del sistema [11].

REFERENCIAS

- [1] N. MOHAN, T. M. UNDELAND and W. P. ROBBINS, POWER ELECTRONICS Converters, Applications, and Desing. Third Edition, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] M. H. RASHID, ELECTRÓNICA DE POTENCIA Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones, Tercera Edición, México: PEARSON Educación, 2004.
- [3] J. A. SHAW, "The PID Control Algorithm, Second Edition," <http://www.picvietnam.com/download/PIDcontrolbook2.pdf>, 2003.
- [4] K. OGATA, Ingeniería de Control Moderna, Cuarta Edición, Madrid: Pearson Education, 2003.
- [5] C. W. T. McLYMAN, TRANSFORMER AND INDUCTOR DESING HANDBOOK. Tercera Edición, New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc., 2006.
- [6] UNIVERSITY OF COLORADO, "INDUCTOR DESIGN," Boulder, CO, USA.
- [7] UNIVERSITY OF CALIFORNIA SANTA BARBARA, "Inductor Design with continous DC current," Santa Barbara, CA, USA.
- [8] K. J. ÅSTRÖM, "PID Control," <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/calt ech/astrom-ch6.pdf>, 2002.
- [9] Warsaw University of Technology - Electrical Engineering - Institute of Control and Industrial Electronics, "Integral Anti-Windup for PI Controllers," <http://www.isep.pw.edu.pl/ZakladNapedu/lab-ane/anti-windup.pdf>, 2010.
- [10] S. ARNALTES GÓMEZ and D. SANTOS MARTÍN, CONTROL DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE CONECTADOS A RED MEDIANTE ENLACE DE CONTINUA, Leganés - http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/9836/1/Tesis_Miguel_Monti lla.pdf: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2010.
- [11] Magnetics Inc., "FERRITE CORECOMPARATIVE GEOMETRY CONSIDERATIONS," Kowloon, Hong Kong, 2011.

BIOGRAFÍAS



Carlos Pavón Vargas, Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Experimental Salesiano Don Bosco obteniendo el título de Bachiller Técnico Industrial con especialidad Electricidad-Electrónica, 2005. Los estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en la especialidad de Electrónica y Control. Se ha desempeñado como ayudante de laboratorio del Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional en los laboratorios de Electrónica de Potencia y de Control de Máquinas. Sus áreas de interés son la Electrónica de Potencia, el Control Electrónico de Maquinas Eléctricas, Energías Renovables y Smart Grids.



Patricio Chico Hidalgo, Ingeniero en Electrónica y Control, Escuela Politécnica Nacional, 1987. Master of Science in Electrical Engineering, University of Texas at Arlington, USA, 1994. Actualmente trabaja como Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son la conversión estática de energía eléctrica, los sistemas microprocesados, y la aplicación de FPGA en sistemas de control.