

Prototipo a escala de un sistema de frenado regenerativo

Daniel VILLEGAS, Andrés E. DÍEZ

*Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.
daniel.villegas.p@gmail.com*

Resumen: Aquí se presentan brevemente los principales puntos en el diseño de un prototipo a escala de un sistema de frenado regenerativo, además, se expondrán algunos de los resultados obtenidos y se realizarán observaciones acerca de la implementación. *Copyright © 2014 UPB*

Palabras clave: Ultracapacitor, convertor de corriente directa, frenado regenerativo.

Abstract: Here we present some highlights on the design of the regenerative braking system's prototype, also, some of the results will be exposed and we will briefly discuss details about the construction of the system.

Keywords: Ultracapacitor, dc-dc converter, regenerative braking.

s2014-05-19, r2014-05-20, a2014-05-20

1. INTRODUCCIÓN

En Killer (2012) se propone de manera teórica la implementación de un sistema estacionario de frenado regenerativo basado en ultracapacitores para el sistema Metro Medellín, el presente proyecto pretende llevar los conceptos y la teoría expuesta a la práctica diseñando e implementando un sistema a escala.

2. DISEÑO DEL CONVERTOR DE CORRIENTE DIRECTA

En ésta sección se presenta el proceso de diseño de un convertor *buck-boost* bidireccional de corriente directa siguiendo el procedimiento planteado por Killer (2012), luego se exponen algunos resultados vistos al implementar el convertor.

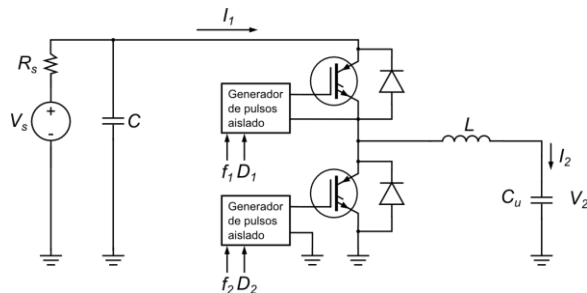


Figura 1. Circuito del convertor de corriente directa

2.1. Cálculos del convertor de corriente directa

En la Tabla 1 se presentan los parámetros iniciales para el diseño del convertor de corriente directa, éstos valores corresponden a valores máximos o mínimos recomendados por los fabricantes de los equipos o fueron propuestos, por ejemplo el voltaje de rizado en modo *boost* se eligió menos al 10% del voltaje nominal del *bus de DC*.

Tabla 1. Parámetros de diseño

Parámetro	Valor
Frecuencia del convertor	25 kHz
S _o C	25%
Voltaje máximo del ultracapacitor	125 V
Voltaje máximo del bus de DC	130 V
Voltaje promedio del bus de DC	120 V
Corriente de carga del ultracapacitor	20 A
Voltaje de rizado en modo boost	10 V
Capacitancia del sistema en <i>bus de DC</i>	100 μF

Tabla 2. Especificaciones del convertor de corriente directa

Especificación	Valor
$D_{\min \text{ buck}}$	0.96
$D_{\max \text{ boost}}$	0.5
$L_{\min \text{ buck}}$	4.8e-03 mH
$L_{\min \text{ boost}}$	1.56e-02 mH

En la Tabla 2 la inductancia que debe elegirse debe ser mayor a la mayor entre $L_{\min \text{ buck}}$ y $L_{\min \text{ boost}}$, se eligió un valor mayor para disminuir la magnitud de las variaciones de la corriente que entra al ultracapacitor, luego de construir la bobina se consiguió un valor de 0.4mH. Los ciclos de trabajo que se presentan son los límites máximos que deben existir para asegurar que el voltaje del ultracapacitor nunca exceda el voltaje máximo recomendado que es 125 V en este caso y para que el voltaje del *bus de DC* nunca supere el valor definido como máximo, con respecto al máximo ciclo de trabajo en modo *boost*, el valor es calculado en condiciones ideales, la ganancia real del convertor *boost* es menor a la ganancia teórica del convertor, por este motivo es posible aumentar el valor máximo.

2.2. Sistema de potencia del convertor de corriente directa

El sistema de potencia está formado por dos módulos semiconductores formados por un IGBT y un diodo (de

conmutación rápida) cada uno, una bobina con una baja resistencia, fusibles de protección y el ultracapacitor.

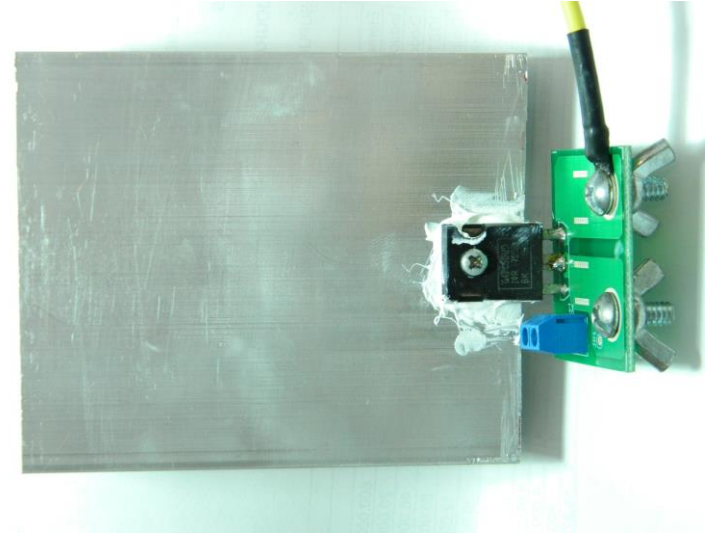


Figura 2. Semiconductor utilizado conectado al circuito impreso y a un disipador térmico

Los semiconductores que fueron elegidos son identificados por la referencia IRG4PC50UD, permiten una corriente máxima de 50 A a 25 °C y 25 A a 100 °C, esta corriente es apropiada según los valores propuestos en la Tabla 1, los fusibles se eligieron a 30 A

pero pueden ser reemplazados por valores diferentes, pueden verse en la Figura 3, la bobina se construyó con un alambre de cobre de calibre 10 AWG sobre un núcleo de ferrita de geometría toroidal, la bobina puede verse en la Figura 4. Para conectar los semiconductores se diseñaron circuitos impresos de dos capas, las capas fueron diseñadas casi iguales para aumentar lo máximo posible la capacidad de corriente y reducir la resistencia, el semiconductor, conectado al circuito impreso y a un disipador térmico pueden verse en la Figura 2.

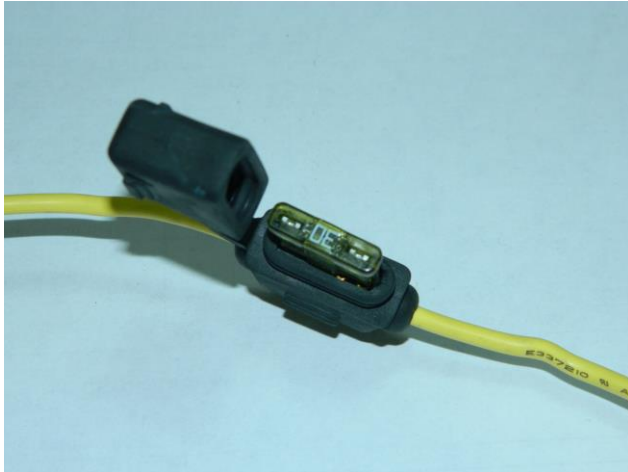


Figura 3. Fusible y porta-fusible utilizados

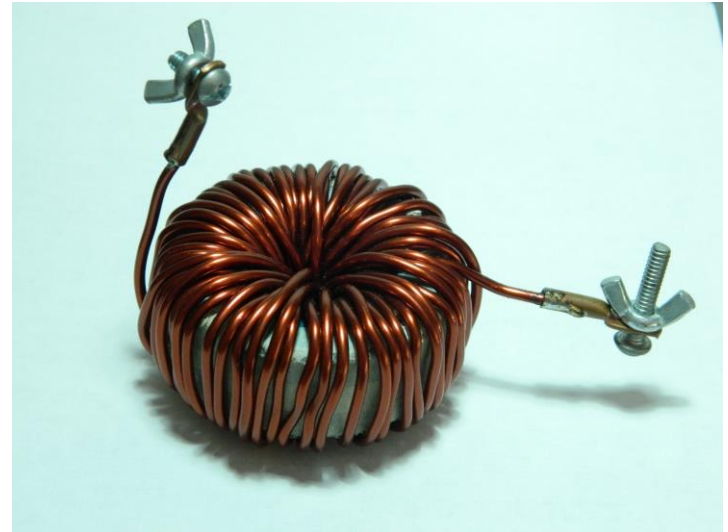


Figura 4. Bobina de núcleo toroidal construida

2.3. Interfaz electrónica entre circuito de control y de potencia

Los circuitos de control y potencia deben ser acoplados por un medio óptico que permita aislar eléctricamente ambos circuitos, en el mercado se puede encontrar el circuito TLP250 que es un driver óptico para IGBT y MOSFET, el circuito TLP250 admite una frecuencia máxima de conmutación de 25 kHz, ésta frecuencia se eligió como la frecuencia del convertidor. Para

utilizar los circuitos TLP250, especialmente con la topología del convertor de corriente directa que se eligió es necesario utilizar dos fuentes de corriente directa aisladas galvánicamente, esto puede verse en la Figura 1 y en la Figura 5.

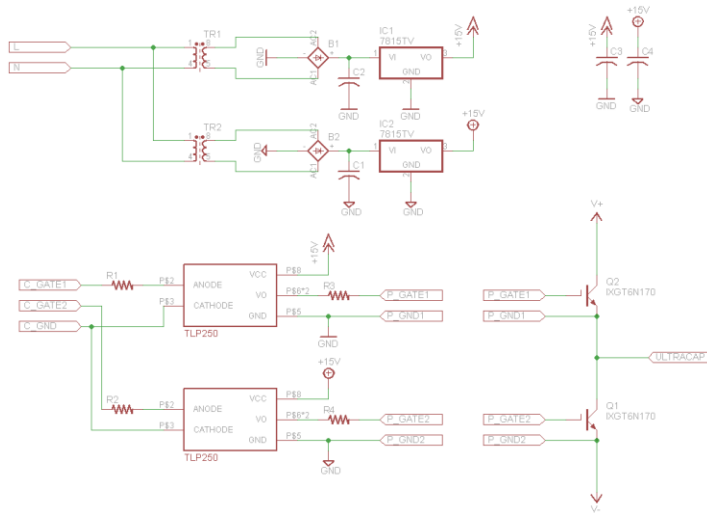


Figura 5. Interfaz entre Sistema de control y Sistema de potencia

2.4. Circuito de control

El circuito de control está compuesto de tres partes fundamentales, un bloque analógico, un bloque de control y un bloque de comunicación.

El bloque analógico está compuesto por un divisor de voltaje que permite medir hasta 150 V, un limitador con un diodo Zener y un filtro de 500 Hz para una frecuencia de muestreo de 1 kHz.

El bloque de comunicaciones utiliza un convertor USB a serial y un acople para lograr aislar las tierras de ambos circuitos.

El bloque de control es principalmente un microcontrolador Freescale™ de 32 bits.

3. SOFTWARE DE CONTROL

Se implementaron dos versiones de software, una permite un manejo remoto por medio del puerto serial, el otro es una implementación de un sistema de control PI.

Una característica que comparten ambas versiones del software es el método de transición entre modos *buck* y *boost*, cuando se pide al software realizar la transición ambas señales de conmutación son desactivadas por un tiempo que puede ser definido por el usuario, en la Figura 6 puede apreciarse el comportamiento de las señales de conmutación cuando se pasa de un modo a otro.

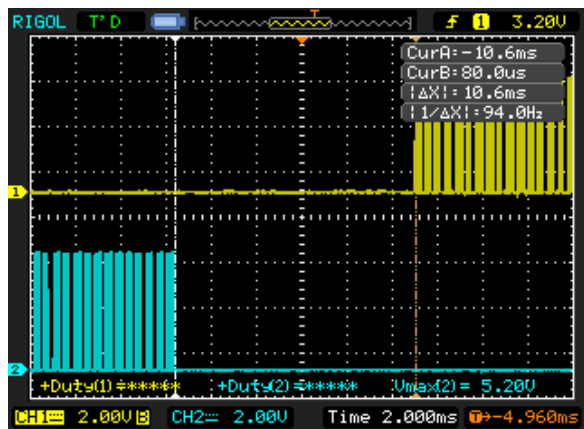


Figura 6. Transición entre estados *buck* y *boost*

Tabla 3. Comandos de la comunicación serial

Comando	Descripción
buck ###\r	Establece ciclo de trabajo modo <i>buck</i> .
boost ###\r	Establece ciclo de trabajo modo <i>boost</i> .
stop \r	Apaga señales de conmutación.
sensor #\r	Devuelve valor medido en sensor.
state\r	Devuelve estado actual del sistema.

En la Tabla 3 se presentan los comandos utilizados en la comunicación serial, los símbolos # representan cualquier numero de 0 a 9, los comandos *buck*, *boost* y *stop* realizan transiciones entre modo *buck*, modo *boost* y apagado, los comandos *sensor* y *state* devuelven información del sistema, *sensor* lee una entrada análoga del microcontrolado y *state* dice el estado actual del sistema y el ciclo de trabajo.

4. RESULTADOS

El convertor de corriente directa fue implementado satisfactoriamente, se logró una ganancia máxima en modo *boost* de 3, con el convertor *buck* se logró realizar una carga gradual del ultracapacitor.

Al iniciar el proyecto no existía claridad acerca del comportamiento del circuito cuando se conectara el convertor *boost* al *bus de DC* energizado, experimentalmente se pudo comprobar que cuando no hay cargas conectadas al *bus* o cuando las cargas son pequeñas quien aporte el mayor voltaje entre la fuente y el convertor *boost* toma el control del voltaje del *bus*, este comportamiento también puede apreciarse en la Figura 8 donde acaba la línea punteada y cuando hay una carga lo suficientemente grande, tanto la fuente como el convertor aportan corriente a la carga.

Cuando se probó el control PI, el módulo semiconductor que controla la conmutación del convertor *boost* sufrió una falla y fue necesario interrumpir el experimento. Se encontró que la falla fue

una sobrecarga térmica causada porque el control entró en una zona de operación inestable la cual se caracteriza por que se disipa potencia en exceso sobre el semiconductor, en la Figura 7 se evidencia el resultado de la falla sobre el módulo semiconductor y en la Figura 8 pueden verse las regiones estable e inestable del convertor *boost* conectado a un control realimentado de voltaje.

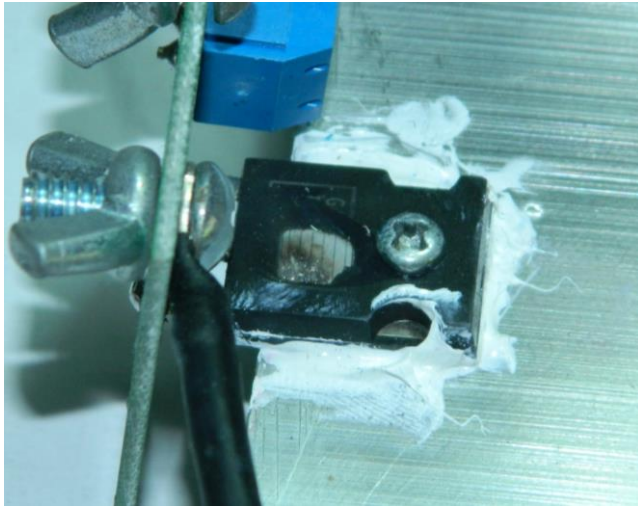


Figura 7. Módulo semiconductor luego de falla por sobrecarga térmica

En la implementación del control PI se encontró una dificultad para que el control mantenga un estado estable ya que en esa región el modo de operación cambia entre *buck* y *boost*, éste comportamiento también pudo apreciarse en simulaciones y aparece como un pico de voltaje.

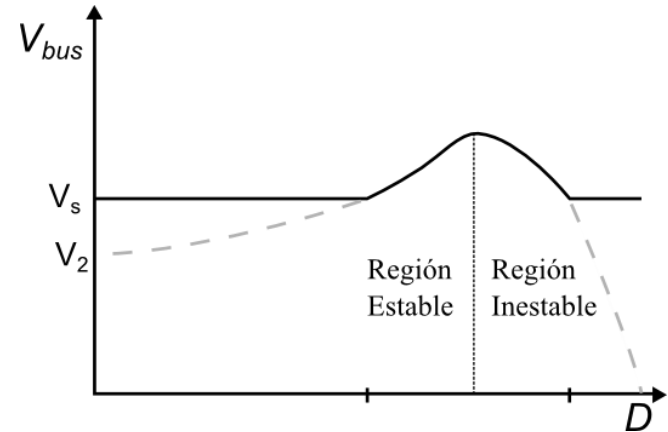


Figura 8. Estabilidad del convertor *boost* realimentado

5. POTENCIAL

En general los sistemas de frenado regenerativo permiten optimizar el consumo de energía en vehículos eléctricos, además, pueden ofrecer otras ventajas secundarias como estabilización de

voltaje en el *bus* principal del sistema o la posibilidad de carga rápida para cierto tipo de vehículos que no se conectan a unas líneas de transmisión *e.g.* los trenes eléctricos sino que usan baterías.

Los sistemas como el que aquí se propone son poco invasivos debido que se conectan en paralelo al sistema de potencia. En un caso hipotético, si ocurriera una falla en el sistema de frenado regenerativo, un vehículo eléctrico podría seguir funcionando utilizando frenos mecánicos o eléctricos.

En otros países se han probado sistemas de esta naturaleza y han producido resultados favorables, en *Portland, Oregon*, el sistema *TriMet* según pruebas preliminares puede ofrecer un ahorro anual de energía de hasta un 2.8% (U.S. Department of Transportation, F. T, 2012). Además, sistemas con tecnologías similares, basados en ultracapacitores y baterías de litio están siendo utilizados en la industria ferroviaria de manera comercial (Thomas, 2009).

6. CONCLUSIONES

Se detectó una clara necesidad de realizar un monitoreo de la temperatura de los semiconductores, en especial en un sistema a mayor escala donde los semiconductores son más costosos, también, además del monitoreo de la temperatura, una estrategia para detectar cuando el sistema de control entra en la región inestable que se muestra en Figura 8, teniendo en cuenta que la frontera entre las dos regiones varía con la carga que se encuentra conectada al convertidor.

Considerando los resultados que se obtuvieron al implementar el control PI se hace evidente que debe utilizarse una estrategia de control más especializada.

Se apreció una dificultad para mantener el voltaje en el estado estable ya que a este nivel de voltaje cambia el modo de operación entre *buck* y *boost*, para superar este problema se propone utilizar un sistema de control con dos voltajes *setpoint*, uno que sea un poco mayor al voltaje promedio del *bus* y que sería utilizado cuando opera el convertidor *buck*, lo contrario podría hacerse para el convertidor *boost* con un *setpoint* ligeramente menor al voltaje promedio del *bus*.

AGRADECIMIENTO

Al director de éste proyecto Andrés E. Díez y a todos los que participaron y aportaron al proyecto durante las diferentes revisiones y presentaciones que se hicieron.

Para este proyecto se utilizó software libre o versiones especiales para estudiantes, a continuación se enuncian las herramientas de software utilizadas.

- PSCAD™ Standard Free.
- Python™
- NumPy™
- Matplotlib™

- INKSCAPE™
- CadSoft EAGLE PCB Design Software™
- CodeWarrior Development Tools

REFERENCIAS

- Killer, A. (2012). Ultracapacitor Assisted Regenerative Braking. En A. Killer, *Ultracapacitor Assisted Regenerative Braking* (págs. 9-10). Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Thomas, G. (2009). *CAF USA*. Recuperado el Mayo de 2013, de http://www.cafusa.com/img/prensa/notprensa/20090701100224tecnirail_june2009.pdf
- U.S. Department of Transportation, F. T. (2012). *Federal Transit Administration*. Recuperado el Mayo de 2013, de http://www.fta.dot.gov/documents/TIGGER_OR-88-0001_TriMet_Portland.pdf

AUTORES



Andrés E. DÍEZ RESTREPO, Ingeniero Electricista de la Universidad Pontificia Bolivariana – UPB-

Máster en ingeniería de la UPB en 2005.

Doctor en Ingeniería de la UPB en 2010 con tesis Estrategia para la electrificación del transporte en Colombia, en convenio con la Universidad de Ciencias Aplicadas de Kempten, Alemania, y dirigida por el

Profesor-Doctor Helmuth Biechl.

Docente ocasional Universidad Nacional de Colombia 2006-2009

Docente-Investigador de pregrado y posgrado de la UPB desde 2002



Daniel VILLEGAS POSADA, nacido en Medellín, Colombia en 1990. Estudiante de ingeniería electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana.