



Convertidor buck-boost controlado digitalmente con histéresis cero mediante un dsp

Fredy E. Hoyos

Recibido: Octubre del 2008

Aprobado: Diciembre del 2008

Resumen/ Abstract

En este trabajo se estudia el comportamiento de un convertidor electrónico en configuración buck-boost. El objetivo del controlador es hacer el rastreo de señales sinusoidales usando un controlador con histéresis cero, es decir que el usuario pueda tener a la salida cualquier señal a un nivel más alto de potencia y con la característica que esta señal deseada es regulada variable en frecuencia, en amplitud y forma de onda. El controlador es rápido pues se comprobó en el laboratorio que ante perturbaciones en la carga y en la señal de referencia, se comporta adecuadamente. Se implementó el convertidor usando un inversor monofásico en configuración de medio puente y se controla el sistema con un prototipo rápido de control (RCP) DS1104 en tiempo real.

Palabras claves: control digital, convertidor DC-(DC-AC), desarrollo experimental, prototipo rápido de control (RCP).

In this work, we analysed the behaviour of a buck-boost electronic converter. The objective of the zero hysteresis controller is to track user defined sinusoidal signals, usually featuring high power level and variable frequency, amplitude and wave form. The controller was implemented in the laboratory, where load and reference signal disturbances were introduced. The controller achieved a fast and adequate behaviour. The converter was implemented using a half bridge monophasic inverter, and a rapid control prototyping (RCP) DS1104 in real time for the control task.

Keywords: digital controller, DC-(DC-AC) converter, experimental development, rapid control prototyping (RCP)

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se hace necesario digitalizar casi todo, ya que es posible realizar mediante procesamiento digital acciones imposibles de obtener mediante el procesamiento analógico. Por ejemplo, filtros con respuesta de frecuencia arbitraria, acciones de

control que implican gran cantidad de procesos y variables. Además una señal digital es más fácil de procesar, de almacenar, de analizar y con ello tomar cualquier decisión al instante [1].

El procesamiento se hace en formato digital porque éste es usualmente más cómodo de realizar y más barato de implementar que el procesamiento analógico [2]. Además las señales digitales requieren usualmente menos ancho de banda y pueden ser comprimidas [3]. Sin embargo, hay pérdida inherente de información (ruido de cuantificación) al convertir la información continua en discreta; y puede haberla si las muestras se toman demasiado espaciadas [4].

En la referencia 5, se realiza un análisis de la dinámica del convertidor buck-boost controlado digitalmente con histéresis cero. Al realizar pruebas se observa que la técnica de control es robusta ante perturbaciones en la carga para regulación de señales en modo DC-DC. Y que cuando el sistema se configura para alimentar cargas considerables entre 3Ω y 10Ω y con valores de tensión cercanos a la alimentación, se presentan comportamientos caóticos con elevadas frecuencias de conmutación.

Algunos aportes al estudio del conversor son hechos en trabajos como: estudio de viabilidad sobre un ciclo de control PWM con conmutación de convertidores [6], Control Avanzado del convertidor buck [7], Convertidor con PWM DC-DC con referencia de tensión atrás-adelante y modulación de control [8], Aproximación al tiempo mínimo de control de un convertidor buck por medio de lógica difusa [9], Señal PWM cuadrática de conmutación suave para un convertidor buck que utiliza un solo switch activo [10].

En el presente trabajo se implementa un prototipo experimental de 200W usando una topología buck-boost. Donde se observa que por medio del control digital con histéresis cero, se pueden generar tensiones de salida tales como (sinusoidal, triangular, cuadrada, rampa) con la característica que son reguladas en amplitud y frecuencia.

MODELADO

Para realizar el modelado de este trabajo se utiliza un conversor tipo buck-boost, el cual es alimentado con un

voltaje DC, $+E$ y $-E$ dependiendo de la señal dada por la estrategia de control con histéresis cero, la cual es la encargada de calcular el tiempo en que cada una de las fuentes van a estar conectadas, de tal manera que a la salida se entregue un voltaje regulado. Para el control es necesario censar el voltaje en el capacitor (v), el valor de la resistencia de carga y se ingresa la tensión deseada por el usuario (v_{ref}), que la llamaremos señal de referencia.

Estos datos son procesados digitalmente en un DSP con los cuales se calcula el ciclo de trabajo (d) este va a ser la señal de control que realizara la conmutación de los transistores de potencia para activar $+E$ o $-E$ a la entrada del filtro y con esto se completa el lazo de control.

Modelado Matemático

En la figura 1 haciendo sumatoria de corrientes en el nodo 1 en el que se iguala la corriente que pasa por la inductancia (i), con la corriente que fluye por el condensador y la corriente de carga se obtiene:

$$i = C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R}$$

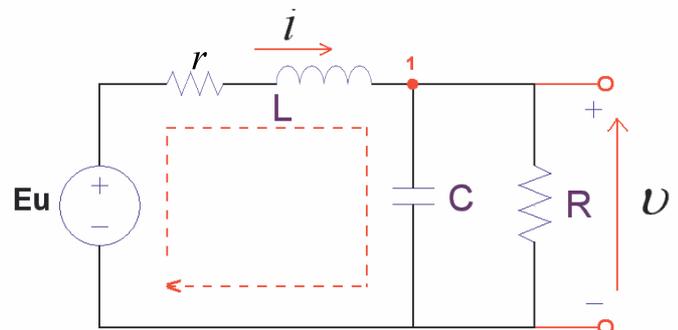


Fig. 1. Modelo en estudio.

Luego, haciendo sumatoria de tensiones en la malla se equilibran la tensión entregada por la fuente con la tensión en la inductancia, la inductancia interna y la capacitancia.

$$Eu = L \frac{di}{dt} + v + ri$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene un modelo no lineal en variables de estado del sistema así:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{L} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$v = [1 \quad 0]v$$

En el que las variables de estado son la tensión en el condensador (v) y la corriente en la inductancia (i) la variable de control (u) toma valores discretos -1 y 1 a alta frecuencia, para nuestro caso hasta 20 kHz con lo que se consigue hacer el encendido de los transistores de potencia para inyectarle +E y -E al filtro.

Desarrollo del hardware y software

Este sistema consta de dos partes principales que son: hardware y software, la primera que consta de las partes físicas las cuales son implementadas con electrónica análoga ellas son: sensado de señales, adecuación, conversión análoga/digital, drivers, puente de conmutación y el filtro, y la segunda que es la parte digital es ejecutada en un DSP DS1104 que cumple la tarea de adquisición de señales, ejecución de las técnicas de control, cálculo del ciclo de trabajo y generación de señales PWM, las cuales son enviadas al mundo exterior a nivel TTL para cerrar el lazo de control.

En la figura 2 se muestran, los bloques llevados a cabo en simulink de Matlab para ser descargados en el DS1104 los cuales son en formato digital.

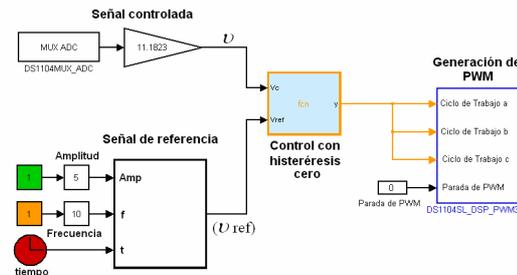


Fig. 2. Controlador con histéresis cero para descargar en la DSP.

En esta figura se muestra con el bloque ADC la señal censada (v) y se genera la señal de referencia. Luego se ejecuta el control donde se calcula el ciclo de trabajo (d) y es llevado al bloque PWM para generar las señales de control PWM.

El bloque del control con histéresis cero genera la señal de control, la cual se calcula con la tensión sensada (v) y la señal de referencia (v_{ref}). En este bloque se ingresa el algoritmo de control correspondiente a:

```
if ((vref) > (v) )
d = 1;
elseif if ((vref) < (v) )
d = 0;
else
y = 0;
end;
```

El bloque PWM activa a nivel real +E y -E para alimentar el filtro y se muestra (v) para compararlo con (v_{ref}), si la señal de control v es menor que la de

referencia (v_{ref}) el valor de $d=1$ en otro caso $d=0$.

DISEÑO DEL CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

Puente medio

Este bloque es usado para alimentar al filtro LC con señales de tensión $+E$ y $-E$ a gran potencia y con la característica que son señales PWM donde el ciclo de trabajo es variable y se trabaja a frecuencia constante de 20 kHz.

Para el montaje del puente medio se necesita tener dos fuentes de tensión de valor E como se muestra en la figura (3), dado que las señales de control $+U$ y $-U$ son complementarias con esto se logra que nunca los transistores entren a conmutar al mismo tiempo evitándose que se presente un cortocircuito y se logra el objetivo de alimentar al filtro LC con señales PWM $+E$ y $-E$ a alta frecuencia.

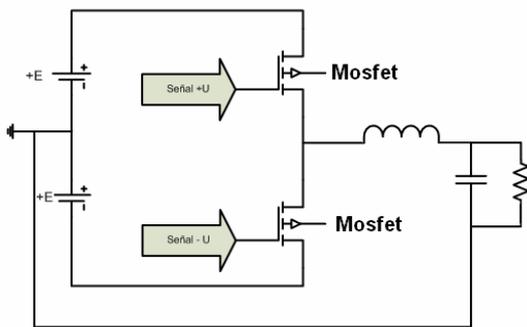


Fig. 3. Puente medio.

El puente medio es controlado con las salidas digitales PWM de nivel de tensión TTL provenientes del DS1104 por lo tanto es necesario desacoplar la parte digital de la parte de potencia usando optoacopladores rápidos. El funcionamiento de este circuito es como sigue: La tarjeta DS1104 brinda por sus salidas digitales dos señales TTL PWM

las cuales son complementarias (esto significa que mientras la una esta en alto la otra esta en bajo) esto es necesario para alimentar con $+E$ y $-E$ al filtro sin que ocurran cortocircuitos.

En la figura 3 a estas señales complementarias se les da el nombre de $+U$ y $-U$ ellas son señales PWM de ciclo de trabajo variable y con un periodo constante y que para esta aplicación es un PWM también llamado simétrico.

En general lo que se consigue con los optoacopladores es desacoplar la tierra digital de la de potencia para evitar daños en los equipos y además se elevan las señales PWM y PWMInv de 5V a 13.6V las cuales serán útiles para el manejo del driver IR2110.

Por medio del censado de tensión y corriente se cierra el lazo (ver figura 4).

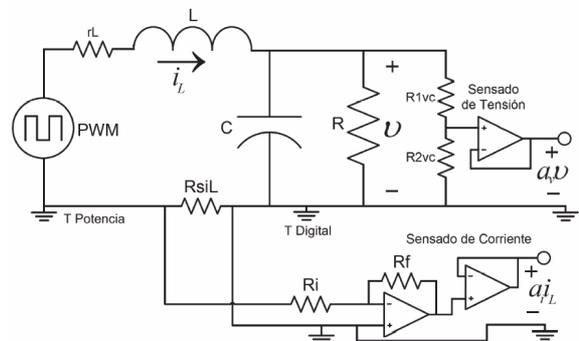


Fig. 4. Censado de tensión y corriente.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados presentados a continuación son tomados del prototipo experimental el cual consiste en un inversor monofásico, alimentado con una fuente dual diseñada en nuestro laboratorio configurada para entregar ± 40 voltios DC. Los parámetros del

convertidor y de los controladores son mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. tabla de parámetros del convertidor		
Parámetro	Descripción	Valor
R	Resistencia	150 Ohms
L	Inductancia	15.28 mH
C	Capacitancia	648 Microfaradios
E	Alimentación	+/- 41 VDC
Fc	Frecuencia Conmutación	Variable hasta 20 kHz
Fm	Frecuencia de Muestreo	20 khz

En la figura 5 con el canal H1 se muestra la salida de tensión regulada (v), en el canal H2 la señal de corriente (i_L) y en el canal H4 la entrada de alimentación de potencia en forma PWM. Se puede apreciar que la salida de corriente en la bobina (i_L) presenta un desfase respecto a la señal de tensión en el condensador, la conmutación PWM es a frecuencia variable, la con una frecuencia máxima de conmutación de 20kHz. En la figura 6 se muestra el espectro de frecuencia presente en la salida de tensión en el condensador de esta gráfica se puede concluir que la frecuencia fundamental es la de 20 Hz.

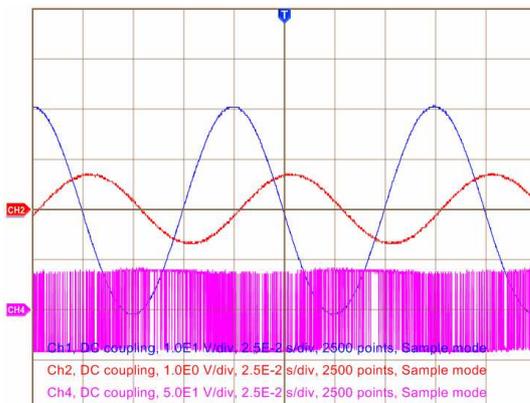


Fig. 5: v , i_L y PWMpot con $v_{ref} = 21 \text{sen}(2\pi \cdot 20t)$.

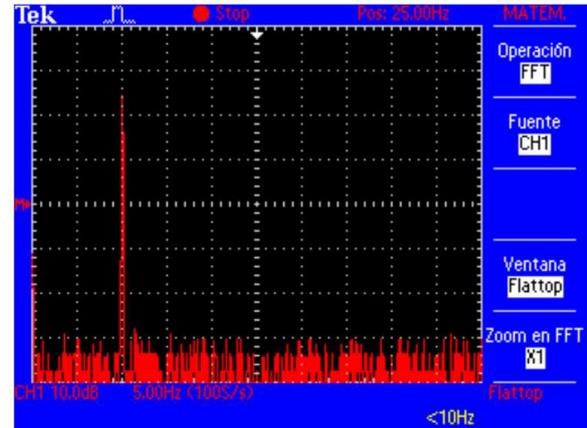


Fig. 6. Espectro de frecuencia cuando $v_{ref} = 21 \text{sen}(2\pi \cdot 20t)$

En la figura 7 se presentan los resultados obtenidos cuando la señal a seguir es una señal sinusoidal $v_{ref} = 40 \text{sen}(2\pi \cdot 10t)$. En esta figura se presenta con el canal H1 la señal de control en formato PWM (PWMcontrol), en el canal H4 la señal de potencia PWM de alimentación del filtro LC (PWMpot), en el canal H3 se muestra la señal de control PWM invertida (PWMInvcontrol). Las señales de control mostradas en esta figura son complementarias pues ellas son las encargadas de controlar los transistores de potencia para activar +E o -E a la entrada del filtro.

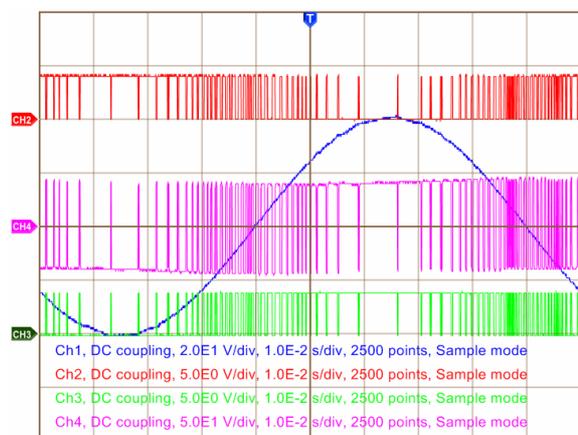
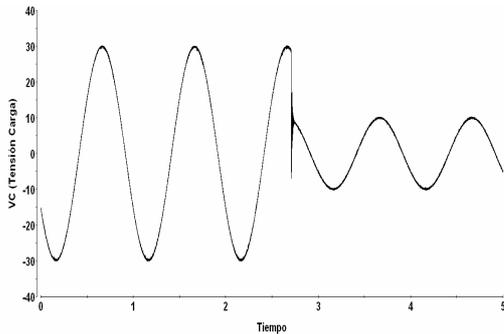


Fig. 7. PWMcontrol, PWMpot, PWMInvcontrol, v con $v_{ref} = 40\text{sen}(2\pi \cdot 10t)$.

En la figura 8 se realiza un cambio instantáneo en la señal de referencia pasando de tener una señal $v_{ref} = 30\text{sen}(2\pi \cdot 1t)$ a una $v_{ref} = 20\text{sen}(2\pi \cdot 1t)$. En esta figura se muestra que el controlador con histéresis cero regula bien y es capaz de seguir regulando ante cambios en la señal de referencia



**Fig. 8. Señal controlada (v) ante cambio de amplitud .
 $v_{ref} = 30\text{sen}(2\pi \cdot 1t)$ a $v_{ref} = 20\text{sen}(2\pi \cdot 1t)$**

En la figura 9 se realiza un cambio instantáneo en la frecuencia de la señal a seguir pasando de tener una señal de 1Hz a una de 5 Hz y como se puede apreciar en la imagen esta señal sigue siendo regulada y el controlador responde rápido.

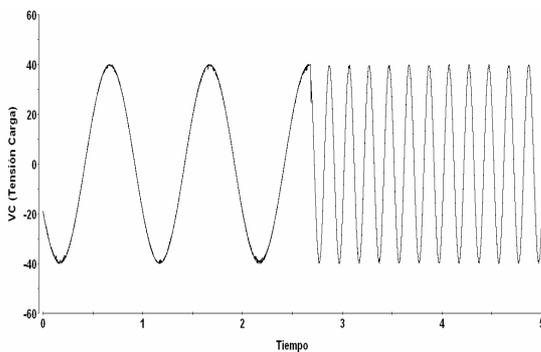


Fig. 9. Señal controlada (v) ante cambio de frecuencia.

$$v_{ref} = 40\text{sen}(2\pi \cdot 1t) \text{ a } v_{ref} = 40\text{sen}(2\pi \cdot 5t)$$

En la figura 10 se presenta el retrato de fase de tensión en la carga (v) contra la corriente en la inductancia (i_L) para el caso donde se realiza un apagado de la fuente de inyección de potencia. De esta gráfica se puede concluir que el convertidor trata de seguir regulando incluso cuando la alimentación esta cayendo a cero, se observa al final que tanto la tensión (v) como la corriente (i_L) se hacen cero para el caso donde no hay energía a la entrada, nota tomar esta gráfica se realizó una amplificación en la señal de corriente por 10 con el fin de poder visualizar mejor los resultados.

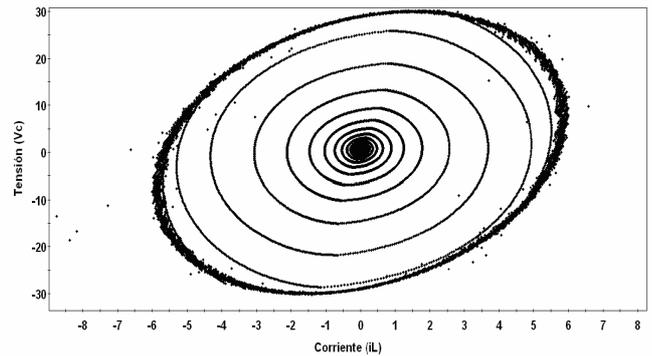


Fig. 10. Retrato de fase (v contra i_L) para un corte de energía en la alimentación.

CONCLUSIONES

1. Se pudo comparar con resultados anteriores [3] que el control con histéresis digital realizado en el DSP "DS1104" trabaja a mayor frecuencia que con histéresis analógica así se pudo regular mejor las señales a la salida.
2. El funcionamiento de este controlador montado digitalmente es adecuado para seguimiento de señales (alternas) y para señales continuas debido a que el sensado es rápido, se trabajo a un muestreo

de 20KHz con lo cual se logro un control lo suficientemente veloz, incluso para perturbaciones en la carga y en las señales de referencia entre otras.

3. Debido a que se trabajo con alta tecnología, el usuario tiene amplia facilidad para manipulación, visualización, control y accionamiento en tiempo real del convertidor para diferentes tareas que desee desarrollar con el mismo.
4. En cuanto al sensado de las señales, implementación de la técnica de control digital y generación de las señales de control PWM, se facilitó mucho y el usuario tiene acceso visual en tiempo real de las señales que le llegan a la planta así es más didáctico para estudios posteriores.

Con el hardware desarrollado se tiene la posibilidad de aumentar el valor de tensión y corriente a la salida por lo cual se pueden hacer estudios posteriores que incluyan mayor potencia a la salida y alimentar otras cargas.

REFERENCIAS

- [1] Hoyos, F. y otros.: "Diseño de un convertidor DC-DC y DC-AC usando control con ZAD y FPIC". Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Manizales Colombia. 2008.
- [2] Proakis J.G. y D.G. Manolakis: Digital Signal Processing: "Principles, algorithms and applications". Prentice-Hall, Inc. 1996.
- [3] H. Muhammad and Rashid: Electrónica de Potencia. Mexico: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones.
- [4] Hoyos, C. : "Análisis de la dinámica no lineal de un convertidor buck controlado en tensión por banda de histeresis" *Master's* thesis, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Mayo 2007.
- [5] Hu, Zhang Deng: "Estudio de viabilidad sobre un ciclo de control PWM con conmutación de convertidores" *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 2004.

[6] Uran Milanovic 2000. : "Control Avanzado del convertidor Buck" University of Maribor Faculty of Electrical Engineering and Computer Science Smetanova 17, SI-2000 Maribor, Slovenia.

[7] Reatti Kazimierczuk and. Edstrom "Convertidor BUCK PWM DC-DC con referencia de tensión atrás-adelante y modulación de control" 2000

[8] Gomhriz E. Alarcón y otros: "Aproximación al tiempo mínimo de Control de un convertidor Buck por medio de Lógica Difusa" Universitat Politecnica de Catalunya 1998.

[9] R. Barbosa, L.. y otros: "Señal PWM cuadrática de conmutación suave para un convertidor Buck que utiliza un solo switch activo" Universidad Federal de Uberlandia Brasil ,1996.

[10] Angulo. Fabiola : "Análisis de la dinámica de convertidores electrónico de potencia usando PWM basado en promediado cero de la dinámica del error (ZAD)". PhD thesis, Universidad Politécnica de Calalúña, Mayo 2004.

AUTORES

Fredy Edimer Hoyos Velasco

Ingeniero Electricista ,Máster en Ingeniería Línea Automatización Industrial. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Línea Automática, Universidad Nacional de Colombia. Docente de Catedra en la Universidad Nacional de Colombia y Universidad Autónoma de Manizales.
e-mail: fehoyosv@unal.edu.co.

Diana Marcela Huertas Lucena

Estudiante de Ingeniería Eléctrica Universidad Nacional de Colombia
e-mail: dmhuertasl@unal.edu.co

Laureano Alberto Hoyos Velasco

Estudiante de Medicina Universidad de Caldas, Manizales.
e-mail: alberthove@yahoo.es