

Implementación de un Convertidor CA-CD y PID Digital para un Motor CD

D.U. Campos-Delgado ⁽¹⁾, G. Gallegos Garrido ⁽¹⁾, S. Martínez Martínez ⁽²⁾
e I. Campos Cantón ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Facultad de Ciencias, UASLP, Av. Salvador Nava s/n, Zona Universitaria, S.L.P.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, CIEP, UASLP, Av. Dr. Manuel Nava 8, S.L.P.

Resumen

En este artículo se describe la implementación de un sistema de control de velocidad para un motor cd. El actuador de potencia propuesto es un convertidor CA-CD (puente rectificador controlado monofásico). Su diseño se basa en el disparo sincronizado de 4 tiristores para producir un voltaje cd variable. La estrategia de control utiliza la medición de velocidad angular proveniente de un taco-generador para regular el voltaje entregado a la armadura del motor. Un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) fue implementado de manera digital a través de un tarjeta de control de propósito general para el control de velocidad. Se muestran gráficas experimentales del sistema de control retroalimentado en la cuales se ven las características de seguimiento del sistema.

Palabras clave: convertidor ca-cd, control PID, control digital, motor cd.

1. Introducción

La electrónica de potencia ha evolucionado dramáticamente en los últimos 20 años. El desarrollo en los elementos semiconductores ha propiciado que se puedan realizar conversiones de energía de manera eficiente y a niveles altos de potencia. Todo esto ha ayudado a satisfacer las necesidades crecientes de las aplicaciones industriales. Por todo esto, la electrónica de potencia es una tema básico en las carreras con enfoque en la electrónica, en donde los diferentes tipos de conversión de energía CA/CD, CD/CD, CA/CA, CD/CA son analizadas y estudiadas [1], [2].

Una de las muchas aplicaciones de la electrónica de potencia se encuentra en la variación de la velocidad de los motores de CD. Los motores de CD presentan varias ventajas respecto a los motores de CA como son entre otras:

- La velocidad puede ajustarse a través del voltaje que se le aplica al motor
- El sentido de rotación es reversible si se invierte la polaridad del voltaje que recibe el motor.
- El torque puede controlarse variando la corriente que se aplica al motor.
- Tienen respuesta rápida.

El trabajo presentado en este artículo nace del desarrollo de una tesis de licenciatura [3]. En esta tesis el objetivo era diseñar un sistema de control autónomo para regular la velocidad de rotación en un motor cd. Este objetivo presentaba varios retos de diseño: (1) un actuador de potencia que pudiera proporcionar un voltaje de cd variable de acuerdo a una señal de control u entre 0 y 5V, (2) un sistema digital que pudiera implementar el algoritmo de control capaz de procesar datos de medición y generar la señal de control. Estos objetivos se cumplieron en el diseño final que se presenta a lo largo del artículo.

La distribución del artículo se explica a continuación. En la Sección 2, se presenta el diseño del actuador de potencia para el motor cd (convertidor ca-cd). La estructura y elementos del sistema de control retroalimentado se detallan en la Sección 3. La Sección 4 muestra la implementación experimental del sistema de control y finalmente en la Sección 5 se presentan algunas observaciones y comentarios finales.

2. Diseño del Convertidor CA-CD

La metodología para el diseño del convertidor ca-cd (puente recificador controlado) se presenta a continuación. Uno de los objetivos principales al diseñar el convertidor fue buscar un aislamiento completo entre las etapas de disparo para los tiristores y potencia. Más allá, se buscaba que el convertidor pudiera ser controlado de manera externa con una

señal de voltaje que variara entre 0 y 5V. El diseño completo del puente rectificador controlado puede seccionarse en 5 etapas:

- (1) Detector de cruce por cero
- (2) Generador de rampa
- (3) Comparación de disparo
- (4) Acoplamiento Control-Potencia
- (5) Etapa de potencia

Cada una de estas etapas se muestran brevemente a continuación. Consultar [3] para una explicación más detallada.

2.1 Detector de cruce por cero

El puente rectificador controlado monofásico se basa en el principio de operación de un puente rectificador de diodos. Sin embargo, con el propósito de poder controlar el flujo de potencia hacia la carga se utilizan tiristores (SCR's) como elementos de conmutación [1],[2]. Para un correcto funcionamiento del puente es necesario que el disparo de los tiristores este en sincronía con la alimentación ca. Con este propósito se utiliza un transformador, y así entonces poder precisar el cruce por cero de la alimentación y también proveer aislamiento a la etapa de control. Dentro del diseño es necesario determinar cuando la alimentación se encuentra en su semiciclo positivo o negativo, y para esto se utilizan comparadores LM311 [4] que generan estas señales.

2.2 Generador de rampa

A partir de las señales obtenidas en la etapa de detección de cruce por cero se generan dos señales de tipo rampa. Una estará activa en la parte activa del semiciclo positivo y la otra en la parte negativa. Estas señales tienen el objetivo de proveer una señal de referencia para la etapa de generación del pulso de disparo. Esto se debe a que los tiristores en el puente se disparan por pares, así se necesitan dos señales independientes de disparo.

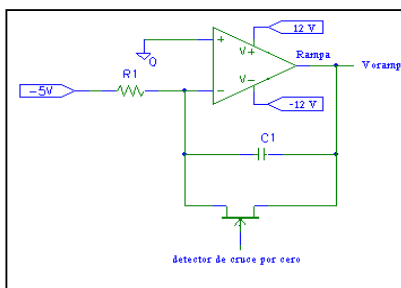


Figura 1. Circuito Generador de Rampa

La implementación del generador de rampa se llevo a cabo a través de un circuito integrador con reset [4]; el cual se muestra a continuación en la Figura 1. Los valores de los elementos del circuito se seleccionaron de manera que la rampa tuviera un voltaje máximo de 5V.

2.3 Comparación de disparo

La señal proveniente del circuito generador de rampa se compara ahora con el voltaje de control. Este voltaje de control estará limitado a un rango de 0 a 5V. Después de la comparación, se diseño un circuito RC con el objetivo de obtener un pulso angosto de disparo. La etapa completa se muestra en la Figura 2.

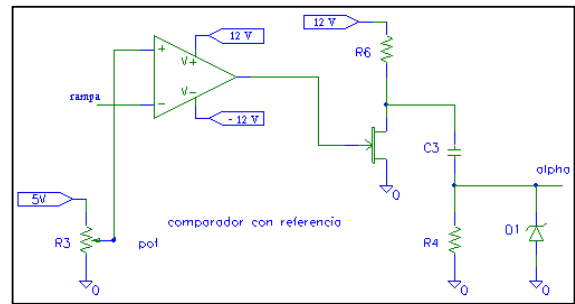


Figura 2. Circuito de Comparación para el pulso de disparo

2.4 Acoplamiento Control-Potencia

Con el fin de acoplar la etapa de potencia con la etapa de control se utilizó el opto-acoplador MOC3011, ver Figura 3. Así, el disparo de control antes generado se acopla con la compuerta del tiristor a través de este dispositivo.

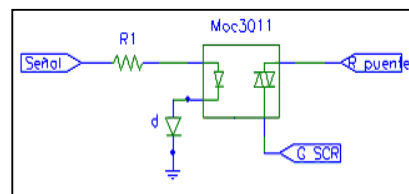


Figura 3. Optoacoplador MOC3011

2.5 Etapa de potencia

Finalmente, para la etapa de potencia se utilizaron los SCR's S4025L, los cuales pueden soportar una corriente máxima de 25 A RMS y un voltaje inverso de 400 V RMS. Se hizo un arreglo RC para acoplar el MOC3011 con la compuerta del SCR

tal como se muestra en la Figura 4. Además se adicionó una red snubber para proteger a los SCR's.

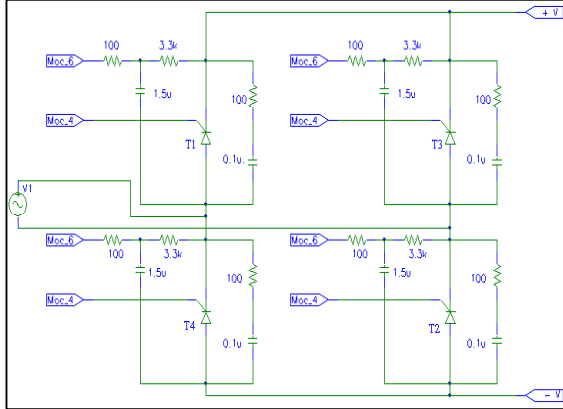


Figura 4. Etapa de Potencia del Convertidor CA-CD.

Para concluir esta sección se puede ver que de acuerdo al diseño y construcción del convertidor ca-cd [1], este tiene una característica de respuesta para carga RL dada por la ecuación:

$$v_{armadura} = \frac{2V_m}{\pi} \cos\left(\frac{180^\circ}{5V} \alpha\right) \quad (1)$$

donde para el caso monofásico $V_m=169.7V$, $v_{armadura}$ representa el voltaje que entrega el convertidor al motor y α la señal de control al convertidor [0,5V]. Así, se aprecia que el voltaje máximo $v_{armadura}=2V_m/\pi$ ocurre cuando $\alpha=0V$.

3. Sistema Digital de Control

El sistema de control retroalimentado busca que el motor cd siga una referencia de velocidad angular ω_{ref} la cual se da de manera externa a través de una señal de voltaje. El actuador de control estaría dado por el convertidor ca-cd, y la señal de medición por un taco-generador que se encuentra acoplado a la flecha del motor. El taco-generador provee una señal de voltaje con sensibilidad de 50V /1000 RPM. Ahora el sistema a controlar es un motor cd tipo shunt que tiene las siguientes características:

- 1 HP
- 1750 RPM's nominales
- 90 V armadura
- 50/100 V campo

El motor cd se configuró con excitación independiente entre campo y armadura [5]. Así, el

voltaje de campo se mantuvo fijo a un valor de 75V durante los experimentos, y solo se reguló el voltaje armadura $v_{armadura}$ con el objeto de modificar la velocidad del motor. Para implementar el sistema de control a lazo cerrado se utilizó la tarjeta BL2000 WildCat, donde se desarrolló un controlador PID para regular la velocidad del motor. La BL2000 es una tarjeta de control de alto rendimiento programable en C por medio del puerto serial de la PC [6]. Esta tarjeta cuenta con memoria flash, RAM, puertos digitales de entrada y salida, entradas de convertidor ADC y DAC, un SPDT salida de relay, y puerto Ethernet. Además cuenta con un microprocesador Rabbit2000TM que opera a 22.1 MHz lo que proporciona un procesamiento rápido de datos. Para este proyecto se utilizaron las entradas del convertidor ADC, las cuales tienen un rango de entrada de +/- 10.24V, y la salida del convertidor DAC, que genera una referencia de voltaje entre 0-4.096V. Por lo tanto, la tarjeta BL2000 solo despliega un voltaje máximo de 4.096V en la salida del DAC, pero se necesita que alcance 5V, que es el valor máximo que se tiene en la referencia del actuador de control α (convertidor ca-cd). Por lo que se construyó un pequeño circuito interfaz para corregir este problema, el cual se muestra en la Figura 5. Entonces, la salida del amplificador operacional de la Figura 5 va directamente a la referencia α del circuito de disparo del convertidor ca-cd.

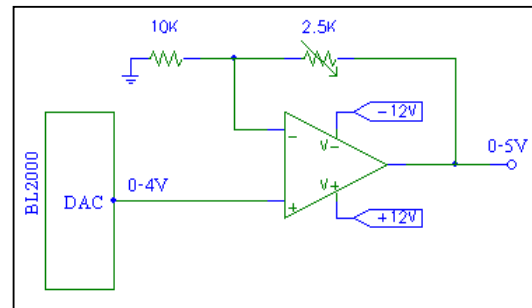
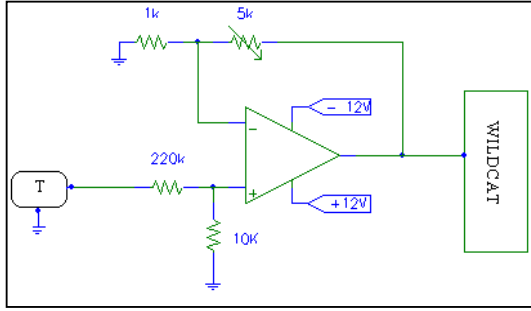


Figura 5. Circuito Interfaz para la Señal de Control.

De la misma manera, se adaptó una interfaz a la señal proveniente del taco-generador para reducir la sensibilidad del mismo y poder procesar la señal por la tarjeta BL2000. Así, se busca obtener una sensibilidad de 5V/1000RPM mediante el circuito de la Figura 6. Ya que la velocidad nominal del motor es 1750 RPM's entonces se garantiza que la señal procesada nunca tendrá un valor mayor al voltaje máximo del convertidor ADC (10.24V).



**Figura 6. Circuito Interfaz para la Señal del Taco-
generador.**

El controlador PID ha sido utilizado satisfactoriamente en múltiples aplicaciones de sistemas de control industrial. El principio básico del controlador PID es que actúa en la variable a ser manipulada a través de una combinación apropiada de tres acciones de mando: acción proporcional de control, acción integral y derivativa [7]. Una de las ventajas de esta estrategia de control es su simplicidad, y característica de seguimiento y rechazo a perturbaciones debido a la acción integral. Por lo tanto, la señal de control esta dado por:

$$u(t) = T_p e(t) + T_i \int e(t) dt + T_d \dot{e}(t) \quad (2)$$

donde $e(t) = r(t) - y(t)$ (señal de error), T_p = ganancia proporcional, T_i = ganancia integral, T_d = ganancia derivativa, u = señal de control, y = salida y r = referencia. La ecuación (2) puede discretizarse para implementarse de manera digital

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \quad (3)$$

donde $U(z)$ y $E(z)$ son la transformada Z de la señales discretizadas $u[k]$ y $e[k]$, y K_p , K_I y K_D representan las ganancias proporcional, integral y derivativas digitales respectivamente [7]. La ecuación (3) puede entonces implementarse como ecuación de diferencias

$$u[k] = (K_p + K_I + K_D)e[k] + (-2K_D - K_p)e[k - 1] + K_D e[k - 2] + u[k - 1] \quad (4)$$

Esta última ecuación fue la que se implementó en la tarjeta BL2000. Las ganancias de control K_p , K_I y K_D fueron sintonizadas de manera manual hasta encontrar un valor apropiado que resultara en una respuesta rápida y sin sobretiro. Nótese que la señal $u[k]$ en (4) no puede tomar valores fuera del intervalo

[0, 4.096V], que es el rango dinámico del DAC. Ahora, el convertidor ca-cd que servirá como actuador presenta una no linealidad estática en su respuesta (1). Por lo tanto, se buscó corregir este factor a través de la señal de control $u[k]$ calculada en (4). Así, se propuso que la señal de control que entrega el DAC $u_c[k]$ se obtenga a partir de

$$u_c[k] = 4.096 - sat(u[k]) \quad (5)$$

donde

$$sat(u[k]) = \begin{cases} u[k] & 0 \leq u[k] \leq 4.096 \\ 0 & u[k] < 0 \\ 4.096 & u[k] > 4.096 \end{cases} \quad (6)$$

La saturación entonces en (6) tiene el propósito de limitar la señal de control al voltaje máximo y mínimo que puede entregar el DAC de la tarjeta BL2000. En consecuencia $u[k]=0 \rightarrow u_c[k]=4.096$ y $u[k]=4.096 \rightarrow u_c[k]=0$. La señal u_c va más adelante a ser procesada a través de la interfaz descrita anteriormente, ver Figuras 5 y 7, para obtener la señal de control del actuador α . El factor de corrección propuesto en (5) y (6) fue capaz de corregir la no linealidad del actuador como se verá en las gráficas experimentales del sistema de control.

4. Implementación

En esta sección se presenta la implementación del sistema de control anteriormente descrito. El esquemático del sistema total se muestra en la Figura 7.

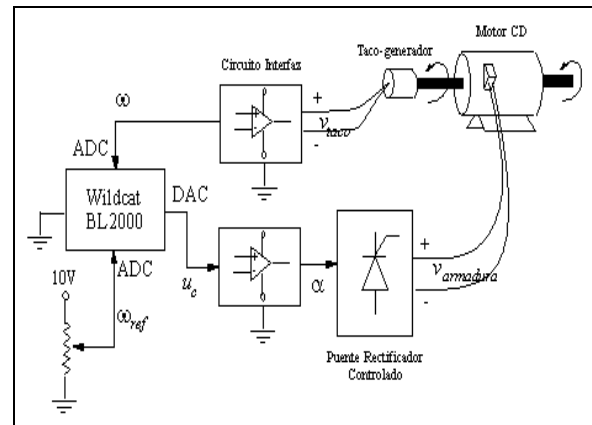


Figura 7. Esquemático del Sistema de Control

La señal de referencia de velocidad ω_{ref} está dada a través de un potenciómetro, donde 10V equivalen a la velocidad nominal del motor 1750 RPM's. Los

valores finales para las ganancias obtenidas (sintonización experimental) del controlador PID se muestran en la Tabla 1.

Cte	Valor
K_P	0.02
K_I	0.003
K_D	0.001

Tabla 1. Ganancias del Controlador PID

Con el objeto de juzgar el desempeño del sistema de control se utilizó el equipo dSpace 1103 para capturar datos en tiempo real provenientes del sistema. Dos experimentos fueron analizados. Primero se le dio al sistema un escalón de referencia ($5\text{ V} \rightarrow 875\text{ RPM}$) y se midió la respuesta del motor, ver Figura 8. Finalmente, se analizó un cambio en la referencia de velocidad, ver Figura 9. El cambio de referencia en la Figura 9 fue hecho de $5\text{ V} \rightarrow 875\text{ RPM}$'s a $8.19\text{ V} \rightarrow 1430\text{ RPM}$'s.

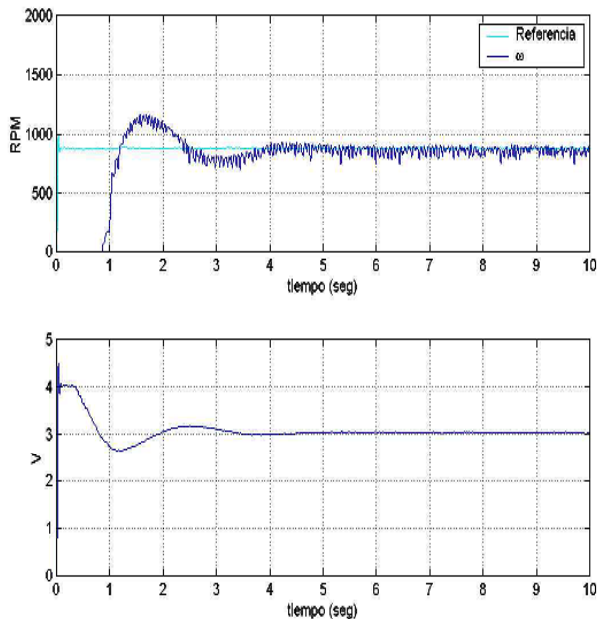


Figura 8. Respuesta a un Escalón de Referencia. (Superior) Velocidad Angular ω (Inferior) Señal de Control al Actuator α .

Es importante mencionar que el taco-generador tiene un error en la velocidad actual del motor de $\pm 10\%$. Esto puede ser representado como ruido en la medición de velocidad, tal como se puede apreciar en las Figuras 8 y 9. Nótese que la ganancia derivativa K_D , ver Tabla 1, tuvo que ser pequeña en este caso con el objeto de no amplificar este ruido en la señal de control. Además, se observa en la Figuras 8 y 9

que en ningún momento la señal de control al actuator α entra en saturación, es decir $>5\text{V}$. Más allá, el esquema de compensación de la no linealidad del actuator (5) y (6), se observa que es efectivo ya que la señal de control es suave y no presenta cambios repentinos. Así, de acuerdo a la respuesta del sistema se puede concluir que se tiene buen seguimiento del sistema retroalimentado. En la Figura 10 se muestra una fotografía del experimento implementado en el laboratorio.

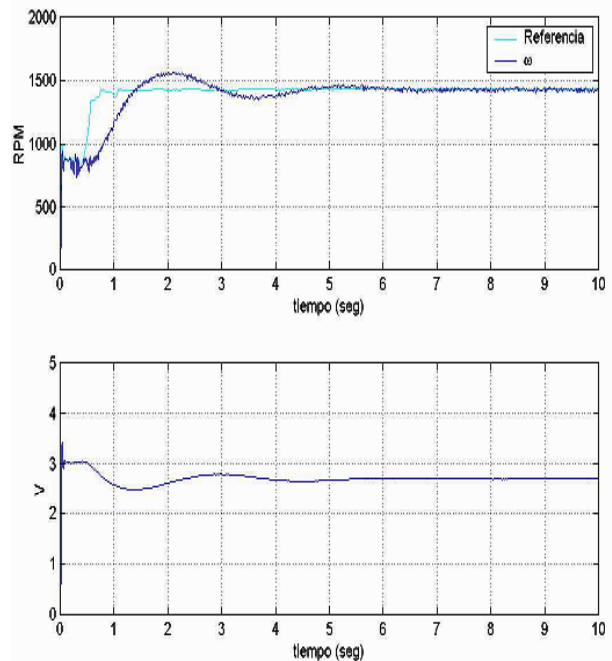


Figura 9. Respuesta a Cambio de Referencia. (Superior) Velocidad Angular ω (Inferior) Señal de Control al Actuator α .

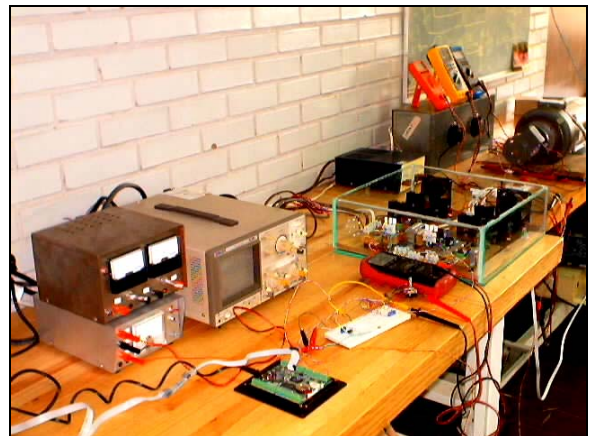


Figura 10. Implementación Experimental del Sistema de Control de Velocidad

5. Conclusiones

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de control de velocidad para un motor cd de 1 HP. Se detalla la fase de diseño del actuador de potencia para el motor: puente rectificador controlado. El algoritmo de control se implementó utilizando la tarjeta WildCat BL2000. Así, la tarjeta lee la señal de referencia y la medición proveniente del taco-generator para definir la señal de control apropiada para el actuador. Un controlador PID fue desarrollado para este propósito. Se propuso también un esquema para corregir la no linealidad proveniente del convertidor ca-cd. Datos experimentales muestran que se tiene una buena característica de seguimiento en el sistema total.

Agradecimientos

Se agradece a CONACYT (C01-FRC-12.22) y FAI (C01-FAI-11-8.91) por el apoyo brindado para el desarrollo de este artículo.

Referencias

- [1] H. Rashid, Muhammad. "Electrónica de Potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones", 2ª ed., 1995, Prentice Hall.. pp. 37-187.
- [2] J.M. Benavent García, A. Abellán G., E. Figueres A. "Electrónica de Potencia, teoría y aplicaciones", 1ª ed. 2000, Alfaomega.
- [3] G. Gallegos Garrido. "Diseño de un Convertidor CA/CD para el control de velocidad de un motor CD", Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UASLP, Septiembre 2002.
- [4] R.F. Coughlin, F.F. Driscoll, "Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales", 4ª ed., 1993, Prentice Hall.
- [5] Stephen J. Chapman, *Maquinas Eléctricas*, 3a Ed., Mc. Graw Hill, 1990.
- [6] WildCat BL2000: User's Manual, 2001 Z-World Inc.
- [7] K. Ogata, "Discrete-Time Control Systems", 2nd ed., Pearson, Prentice Hall, 1995.