

Sistema de Control de Velocidad de un motor de Corriente Directa Serie

M.C. Mario Salvador Esparza González, Ing. Bernardo Franco Alba, Ing. Juan Alejandro Soto de la Trinidad,
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica.
Av. López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Balcones de Ojocaliente. Aguascalientes, Ags.
Tel (449) 910-5002, Fax (449) 970-0423 msepa@hotmail.com

Resumen – El control de velocidad del motor de CD serie, es un sistema de control electrónico de lazo cerrado. Con la ayuda de un microcontrolador se esta monitoreando la velocidad del motor a través de una máquina de CA, al pasar el voltaje generado por un circuito rectificador hasta llegar a un convertidor análogo digital. La finalidad del controlador es mantener la velocidad constante del motor a cambios bruscos de carga en la flecha del mismo, desplegar la velocidad de manera digital y de igual manera poder programar la velocidad deseada externamente aún cuando la máquina este en funcionamiento, además de ser un control proporcional-integral digital.

Palabras clave- Sistema de lazo cerrado, regulador reductor, modulación de ancho de pulso, proporcional-integral.

I. Introducción.

El presente trabajo se desarrollo en el laboratorio de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Aguascalientes durante el año de 1999 a raíz de que la necesidad de mantener la velocidad constante en un motor de corriente directa (CD) conexión serie. Típicamente el control de la velocidad de los motores de CD se realiza mediante un reóstato, resistencia en serie con el devanado del motor. Este método resulta deficiente debido a que su uso repercute en el ahorro de energía eléctrica debido a las pérdidas por calentamiento que se tienen en esta resistencia, además, de ser del tipo manual por medio de palancas o perillas, siendo éstos, algunos de los problemas en grandes empresas de transformación y manufactura, ya que se tiene que estar monitoreando en algunas ocasiones de manera personal; como ya se había dicho, la velocidad de las bandas transportadoras y de las grúas de carga. Otro de los problemas a resolver es que los motores serie de corriente directa, tienden a desbocarse al no tener carga en su flecha y de manera recíproca, llegar a disminuir la velocidad o hacerlo mas lento al aplicarle carga; con el controlador se pretende tener un control preciso en la velocidad del motor. Se desarrolla

un control electrónico basado en microcontrolador en un sistema de lazo cerrado.

Para monitorear la velocidad del motor de CD serie se acopla un generador de CA mediante una banda dentada, en el cual el voltaje generado por el mismo, servirá como señal de entrada al sistema de control para monitorear la velocidad real y además para aplicar carga al motor aplicando carga eléctrica al generador. El voltaje generado es de C.A. proporcional a la velocidad del motor.

La interfaz para regular el voltaje aplicado al motor de CD en un regulador reductor tipo Buck, diseñado a una frecuencia de 10KHz, por los dispositivos de aislamiento óptico con los que se cuenta. El programa manipula el ancho de pulso en base a un control (PI), con el fin de obtener una mejor respuesta del sistema.

II- Fundamento teórico.

Descripción general. El cerebro del regulador de velocidad es un microcontrolador ATMEL 89S8253, el cual está sensando la velocidad en

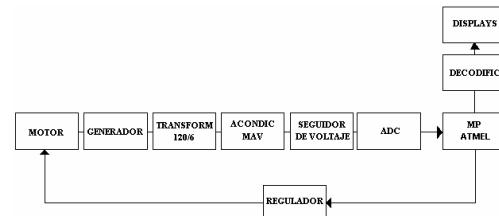


Figura 1 Diagrama a bloques del control de velocidad del motor de CD

proporción a un voltaje generado previo acondicionamiento por un circuito rectificador llamado MAV (Valor Medio Absoluto), esta es convertida a un valor discreto utilizando ADC (Convertidor analógico digital). El circuito MAV se compone de amplificadores operacionales, un capacitor de tantalio varias resistencias y diodos. Con esta señal el microcontrolador calcula el ancho de pulso necesario para mantener el motor operando a la velocidad deseada; simultáneamente

despliega el valor de velocidad deseada o real. (ver fig. 1).

La figura 2 muestra la conexión de los display de 7 segmentos y la asignación de terminales del microcontrolador, el ADC se conectó al puerto 1, en el puerto 2 se tienen las salidas para los display utilizando un sistema de multiplexado para controlarlos a través de un solo decodificador. En el puerto 3 se tienen la salida de pulsos hacia la fuente buck, la entrada para seleccionar la velocidad a desplegar (real o deseada), los botones de interrupción para incrementar o decrementar la velocidad real o deseada.

Cálculo del circuito MAV. Para una onda senoidal tenemos que su valor máximo está determinado por:

$$V_{\text{máx}} = 2 V_{\text{ef}} = 0.707 V_{\text{max}}$$

La función de transferencia del circuito MAV es la siguiente en términos de V_{max} .

$$V_{\text{mav}} / 3.1416 = 0.636 V_{\text{max}}$$

El circuito convertidor MAV nos entrega a la salida un voltaje de valor medio absoluto, que en este caso será proporcional a las revoluciones del motor de corriente directa. Este valor entra en un convertidor análogo digital (ADC) el cual nos da un valor discreto proporcional a la velocidad con una resolución de: 7 rpm/bit. El voltaje del generador es reducido de 127Vrms a 6Vrms mediante un transformador convencional. Este valor es considerando una velocidad de 1800rpm, mediante un divisor de tensión se ajusto el voltaje de tal forma que se tuvieran 5.55Vrms, dando un V_{max} de 7.8539 para tener a la salida %V en 1785rpm. (valor máximo considerado). Esta señal pasa a un seguidor de voltaje para no consumir corriente del MAV y alterar su valor, de tal forma que el seguidor de voltaje suministra la corriente necesaria en el ADC0804 el cual esta conectado en su forma típica.

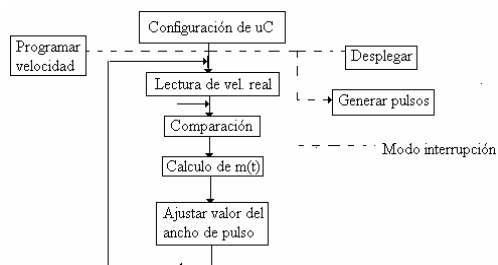


Figura 3. Algoritmo de control simplificado

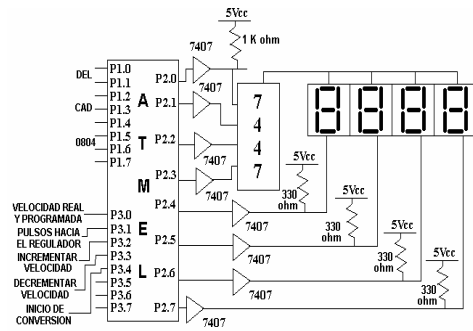


Figura 2. Despliegado de velocidad y conexión de entradas de programación.

Algoritmo de control. Un diagrama a bloques simplificado muestra el algoritmo de control de velocidad para motores de CD. A continuación se hace una breve descripción. (ver figura 3).

En la primera parte se configuran las interrupciones y se inicializan los registros así como las salidas a valores convenientes. Las líneas punteadas indican que estas subrutinas operan en el modo de interrupción de tal forma que pueden ocurrir en cualquier momento. En la primera parte el algoritmo lee la velocidad real y establece una comparación con la velocidad real, el error puede ser 0, positivo o negativo dependiendo de esto utiliza una subrutina para calcular el valor de $m(t)$ (Ancho de pulso del controlador), El sistema de control es por lo tanto de lazo cerrado utilizándose un algoritmo que aplica un control del tipo PI basada la siguiente ecuación de diferencias:

$$m(t) = e(t)_n * (k_p + k_i/T) - e(t)_{n-1} * k_p + m(t)_{n-1}$$

Donde: K_p = constante proporcional, K_i = constante integral y T = es el periodo de muestreo.

En este caso las constantes se programaron como números enteros sin signo, creando 4 rutas de solución dependiendo del signo del error actual (e_n) y del error anterior (e_{n-1}). Debido a las multiplicaciones se tienen variables temporales de 16bits; el resultado final de salida es limitado al valor máximo (100) o mínimo (0) posible del control el cual es de 100uS ya que se conmutará el transistor a 10KHz. Este valor es depositado en un registro que utiliza la interrupción de un temporizador para generar la señal de salida.

Las interrupciones externas son conectadas a través de botones, para programar la velocidad del motor a voluntad del usuario, una de las interrupciones incrementa la variable interna vel. deseada y otro la decremента, estas modificaciones son de 7rpm ya que es la resolución que se tiene con el ADC utilizado.

Para visualizar las revoluciones programadas ó las reales con solo presionar un botón (normalmente presenta las reales). Se desarrollo un algoritmo para convertir a decimal números de 16bits, el valor leído del ADC es multiplicado por la constante de resolución $7rpm * bit$, generando un número de 16 bits. Como valor inicial la máquina de CD se lleva a una velocidad de 1075 RPM; para el despliegado se utiliza un sistema de multiplexado con un tiempo de 1ms entre el envío de un dígito o y el siguiente.

Los pulsos son generados por el controlador utilizando un temporizador en el modo de interrupción con prioridad alta para no alterar la frecuencia de la fuente buck ya que al principio se tenían ciclos repentinos de otra frecuencia o de muy larga duración, afectando esto a la estabilidad del sistema.

Diseño del regulador de salida: La regulación de velocidad de los motores de CD se lleva a cabo controlando el voltaje de alimentación, por lo cual se diseña un regulador reductor (fig. 4) como elemento actuador en nuestro sistema de control. Este circuito será capaz de variar el voltaje de CD de entrada a diferentes valores de salida siendo controlado por un solo transistor, es sencillo y tiene una alta eficiencia, mayor del 90%. El di/dt de la corriente de carga está limitado por la corriente del inductor L. El regulador se alimenta con una fuente de corriente directa de 80 volts, para el diseño del regulador se toma un punto intermedio, cuando el voltaje de salida sea de 33 volts. La corriente de la carga es de 1.15 amperes y tendrá como máximo un rizo de corriente del 5%. Lo anterior para tener un margen de regulación al momento en los cambios

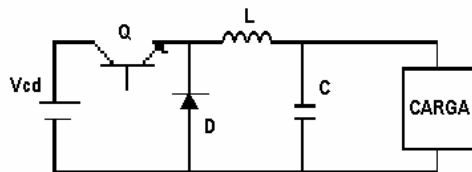


Figura 4. El regulador reductor

de velocidad del motor, ya que si se toman los valores nominales se tendría una mala calidad del voltaje de salida en bajas velocidades.

Considerando los datos mencionados con anterioridad y de acuerdo a las formulas de un regulador tipo Buck, aplicando una frecuencia de conmutación de 10 KHz y un máximo rizo de 1% en el voltaje.

$$V_c = K * V_{cd}$$

$$K = V_c / V_{cd} = 33 / 80 = 0.4125$$

Donde: V_c = Voltaje de salida, K = índice de modulación y V_{cd} = Voltaje de la fuente de alimentación.

La variación de corriente máxima deseada es:

$\Delta I = (0.05)(1.15) = 0.0575$ amp y la variación de voltaje de salida:

$$\Delta V_c = (33)(0.01) = 0.33 \text{ V}$$

El inductor lo calculamos mediante:

$$L = [K * V_{cd} (1-K)] / (f) (\Delta I)$$

$$= [(0.4125 * 80)(1 - 0.4125)] / (10 \text{ KHz})(0.0575) = 33.717391 \text{ mH}$$

para el cálculo del capacitor

$$C = K * V_{cd} (1 - K) / 8 f^2 L \Delta V_c$$

$$C = [(0.4125 * 80 \text{ V})(1 - 0.4125)] / [(8)(10 \text{ KHz})^2 (33.717391 \text{ mH})(0.33 \text{ V})] = 2.1780304 \text{ uf}$$

Circuito de acoplamiento. En la figura 5 se muestra el circuito de aislamiento utilizado entre el control digital y el sistema de potencia, el aislamiento es del tipo óptico y se realiza mediante un opto transistor 4N26, la salida es amplificada en corriente mediante un transistor 2N2222 para controlar finalmente el transistor de potencia; esto implica como puede observarse en la figura 5, que se requieran 2 fuentes aisladas eléctricamente, una para el control con salidas de +5, +12 y -12Volts y otra para el control en +5V, esto ayuda a referenciar correctamente la polarización del transistor ya la tierra de esta

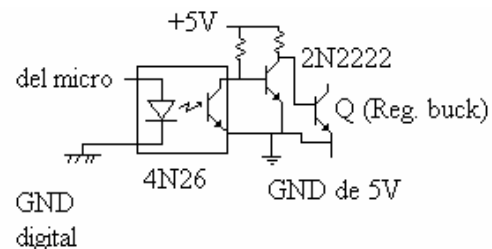


Figura5. Circuito de acoplamiento control digital y etapa de potencia.

fuentes es independiente de la de 180V y por lo

tanto puede conectarse en el emisor del transistor que no esta directamente a tierra.

IV Resultados y discusión.

Cuando se realizaron los cálculos por primera vez para los dispositivos del regulador reductor, se observó que el sistema no respondía de manera óptima, ya que tardaba mucho tiempo en regular la velocidad a un valor deseado e incluso presentaba oscilaciones, esto es, que el motor oscilaba al momento de llegar a un punto crítico de operación después de un tiempo relativamente grande. El voltaje de salida aplicado al motor se puede observar en la figura 6. El voltaje oscila entre las dos líneas mostradas, esta prueba fue realizada sin carga en la flecha del motor.

La figura 7 muestra el comportamiento del motor de CD ante variaciones de carga, inicialmente se encuentra en vacío, a los 31 segundos se aplica carga bajando la velocidad al valor programado, se observa un comportamiento muy estable del sistema. Al eliminar la carga a los 90s se tiene que el motor tiende a acelerarse alcanzando un pico de vel. De 1616 rpm;

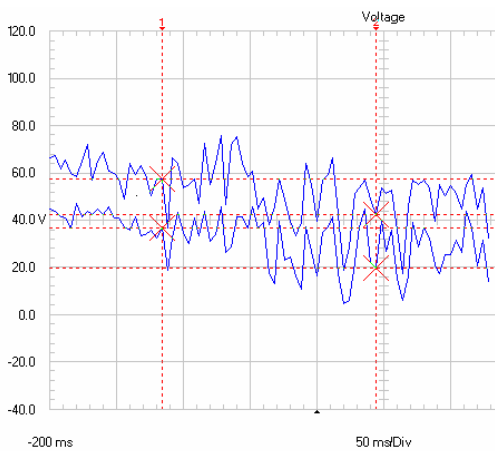


Figura 6. Voltaje de salida del regulador reductor con velocidad 1045 rpm.

actuando el control rápidamente para mantener la velocidad del motor cercana a las 1337 rpm, para estas constantes de PI se tiene una brecha diferencial entre la velocidad real y la velocidad programada la cual se mantiene eficientemente con carga, sin embargo el motor no se desboca como sucedería habitualmente en esta conexión.

La figura 8 muestra el comportamiento del motor en vacío al modificar la velocidad programada. A los 90 segundos del muestreo se arrancó la máquina alcanzando la velocidad programada en forma predefinida, manteniéndose; a un tiempo de 140s se incremento la velocidad programada a 1112 rpm, después de un pequeño transitorio la máquina se estabiliza, oscilando en una velocidad muy cercana a la deseada; al programar a los 210s una velocidad de 830 rpm se observa que la máquina se mantiene en promedio



Figura 7. Respuesta del sistema ante variaciones de carga.

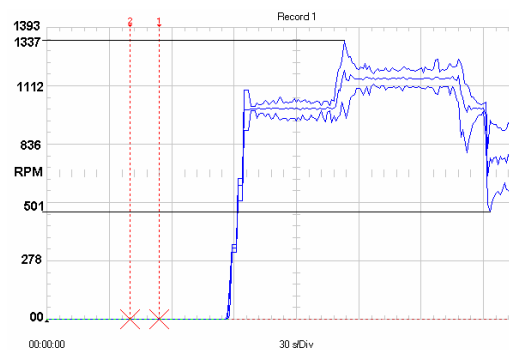


Figura 8. Comportamiento de la vel. del motor ante variación de la vel. Programada en vacío.

a esta velocidad pero presentando oscilaciones desde las 590 rpm hasta las 852 rpm.

La figura 9 muestra este mismo comportamiento pero teniendo una carga conectada a la flecha del motor. Se comenzó con una velocidad inicial programada de 836 rpm, al igual que en el caso anterior pero con menor magnitud se tienen oscilaciones en la velocidad, al programar una velocidad de 950rpm el motor se comporta de una manera más estable observándose una oscilación inicial en la que el motor incrementa su velocidad a más de lo programado y posteriormente estabilizándose. A una velocidad de 1212 rpm el motor se comporta estable, esto es debido a que el diseño del regulador esta cerca de estos parámetros. Se observa que modificar la velocidad a una inferior se tiene una oscilación fuerte en la que el motor se desacelera hasta las 550 rpm repitiéndose el efecto cada que se disminuye la velocidad pero siendo este de una duración corta (máximo 2 s).

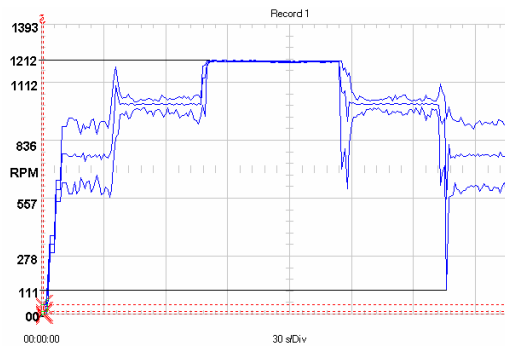


Figura 9. Comportamiento de la velocidad del motor de CD con variaciones de la vel. Programada con carga.

V Conclusiones.

El control electrónico es mucho más eficaz que el control reostático, además de ser automático consume poca energía y es de menor peso y tamaño.

Este control está diseñado especialmente para motores de corriente directa conectados en serie, finalmente se obtiene una velocidad estable en el motor aún cuando esta se estabiliza a un valor más sin carga. Tiene la ventaja de que puede responder de manera más precisa debido al programa de control y operación del microprocesador.

Resultó complejo encontrar experimentalmente las constantes K_p , K_i y el tiempo de muestreo apropiado, dado que no se desarrolló un modelado previo como habitualmente se acostumbra.

VI Referencias.

- [1] ATMEL. Manual del microcontrolador 89S8253.
- [2] Cohuglin Richard, Amplificadores operacionales y circuitos lineales, 5ª Edición. Pearson, 1999.
- [3] I. L. Kosow, Control de motores eléctricos, 1985.
- [4] Motorola, Optoelectronic Devices. 1989
- [5] Muhamed H. Rashid. Electrónica de potencia, Prentice Hall 1990.
- [6] Ogata, Control digital, Prentice Hall, 1997.



M.C. Mario Salvador Esparza González, Profesor Investigador del Instituto Tecnológico de Aguascalientes desde 1997, Graduado de la carrera de Ingeniería Industrial en Eléctrica del IT Aguascalientes y como M.C. en el IT de la Laguna, Imparte las materias de Sistemas Digitales I, II, Electrónica de potencia, Ingeniería de control entre otras, Actualmente director de tesis de licenciatura y maestría principalmente en las áreas de electrónica de potencia y control.



Ing. Alejandro Soto de la Trinidad, Graduado del Instituto Tecnológico de Aguascalientes en junio de 2001, por titularse mediante la opción I Tesis profesional, actualmente estudia la maestría en eléctrica en la especialidad de sistemas eléctricos de potencia.



Ing. Bernardo Franco Alba, Graduado del Instituto Tecnológico de Aguascalientes en junio de 2001, por titularse mediante la opción I Tesis profesional, actualmente trabaja en el ramo de la construcción de instalaciones eléctricas.