

Control basado en lógica borrosa en dsPIC33 para un Motor Brushless

Rodríguez Flores José Daniel
Instituto Universitario de Tecnología de Valencia – República Bolivariana de Venezuela
jdrffuzzy@yahoo.es

El diseño aquí presentado es un controlador borroso para un Motor DC Brushless (BLDC) con fines didácticos, que puede ser utilizado en las prácticas del Laboratorio de Electrónica de Potencia, y del Laboratorio de Control de Procesos del Instituto Universitario de Tecnología Valencia. Este diseño consta de dos partes, la primera es el circuito de potencia el cual está compuesto por seis transistores Mosfet (IRF840) conectados como un puente de seis pasos para conectar las tres bobinas de motor BLDC.

La segunda parte es el circuito de control manejado por un dsPIC33FJ12MC202, el cual es un procesador digital de señal incorporado en un microcontrolador, donde se pueden diseñar algoritmos superiores aprovechando la capacidad de cálculo para realizar funciones relativamente complejas, lo que simplifica el proceso de diseño y abre la posibilidad de estudiar diversas estrategias de control. Ahora bien, el dsPIC33FJ12MC202 es el encargado de regular la velocidad del motor BLDC mediante la lectura de tres sensores de efecto Hall situados en el motor los cuales le suministran la posición aproximada del rotor al dsPIC para determinar el próximo par de terminales a excitar.

Por otra parte, en el dsPIC33FJ12MC202 se ha implementado un controlador Proporcional Integral borroso encargado de determinar el valor de tensión necesario en los terminales del puente de seis pasos para obtener la velocidad deseada en el motor BLDC. Finalmente es necesario destacar que el valor de tensión en los terminales de la bobina se consigue aplicando diferentes ciclos de una señal PWM al motor BLDC.

INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, con las grandes expectativas de la creciente industria moderna y con el aumento del tamaño y complejidad de sus procesos llega a ser necesario un óptimo control para conseguir una marcha perfecta de los

procesos industriales y lograr los beneficios adicionales que esto reporta. Es por ello, que en el ámbito industrial se emplean sistemas de control que permiten la regulación de forma automática de las distintas variables que intervienen en la elaboración o fabricación de un producto.

Ahora bien, la evidencia a nivel industrial indica que para muchos problemas de control, en particular los de las industrias de proceso, el algoritmo de control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) es el algoritmo de control más empleado. No obstante, aunque los Controladores convencionales se utilizan ampliamente en la industria debido a su simplicidad en el diseño, afinación, bajo costo y eficacia en los sistemas lineales, la afinación de las ganancias en el controlador PID es siempre un reto. Además, aunque los controladores PID son aplicables a la mayoría de los problemas de control, puede ser pobres en otras aplicaciones. Por ejemplo Los controladores PID, cuando se usan solos, pueden dar un desempeño pobre cuando la ganancia del lazo del PID debe ser reducida para que no se dispare u oscile sobre el valor del setpoint.

Por ello, el avance de la tecnología ha llevado a los académicos a desarrollar diversas estrategias para el desarrollo y aplicación de los controladores en sistemas donde la complejidad del proceso en cuestión es muy alta. Entre las estrategias de control desarrolladas tenemos los controladores basados en la lógica difusa la cual ha cobrado una alta popularidad por la variedad de sus aplicaciones, que van desde la regulación de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico.

Motor Brushless

El motor que nos ocupa es un motor Brushless similar al de corriente continua con escobillas, con las siguientes salvedades: la conmutación se realiza de forma electrónica en lugar de mecánica, los imanes permanentes van alojados en

el rotor en lugar de en el estator y las bobinas van alojadas en el estator, constituyendo un devanado monofásico o polifásico [1]. Los devanados de un motor Brushless están distribuidos a lo largo del estator en múltiples fases. Dichos motores constan normalmente de tres fases con una separación de 120° entre ellas. Su funcionamiento se basa en la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator del motor de forma sincronizada con el movimiento del rotor. De esta forma, los imanes permanentes alcanzan el movimiento del campo magnético donde el desplazamiento depende a su vez del giro del rotor [1].

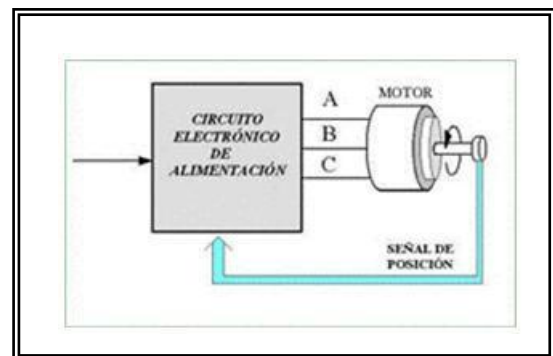


Fig. N° 1 Esquema de funcionamiento de un motor Brushless.

La figura N° 2 muestra la configuración más empleada del circuito de potencia en el control del motor Brushless. Este circuito está compuesto por seis transistores de potencia Mosfet o IGBT, dependiendo del voltaje de alimentación. Para la regulación de velocidad se emplea la técnica PWM con portadora de alta frecuencia.

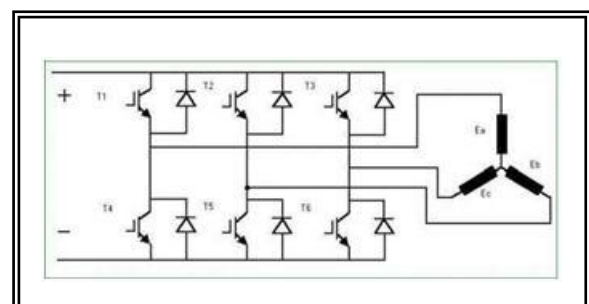


Fig N° 2 Inversor trifásico con IGBTs

Las técnicas de control para motores Brushless se pueden clasificar según el algoritmo de conmutación implementado. La utilizada para el desarrollo del presente proyecto fue la técnica de Conmutación trapezoidal (también llamada 6-steps mode o basada en sensores hall). La figura N° 3 muestra las ondas de tensión y de intensidad correspondiente a una fase para un motor de este tipo. Hay que destacar que la conducción se realiza siempre a través de dos transistores; uno de los del grupo superior (T1, T2 o T3) y otro de los del inferior (T4, T5 o T6), de forma que siempre hay una bobina desactivada.

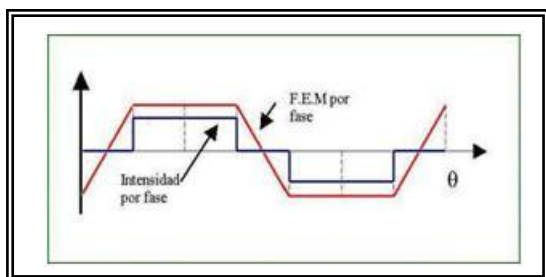


Fig. N° 3 Formas básicas de tensión de un Motor Brushless

Fundamentos de Lógica Borrosa

La Lógica Borrosa (LB) surgió como consecuencia natural de la observación de que ciertas personas tienen suficiente habilidad para tomar decisiones correctas a partir de un conjunto de datos que están expresados lingüísticamente de forma vaga o imprecisa (borrosos), casi siempre utilizando adjetivos o adverbios como mucho, alto, normal, muy, entre otros. Tales personas pueden controlar eficientemente un proceso tecnológico¹ (un buen ejemplo cubano es el tradicional puntista en un central azucarero que controla el proceso de cristalización del azúcar), diagnosticar una enfermedad a partir de síndromes y síntomas (el médico clínico) o tomar una decisión acertada en el mercado de valores [2].

La Lógica Borrosa es un cuerpo teórico que pretende emular tales capacidades mediante su formalización y forma parte

con las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los sistemas expertos. De los muchos esfuerzos que se hacen para crear la llamada "inteligencia artificial". Mediante la utilización de la LB se pueden desarrollar sistemas de control de procesos o de ayuda para tomar decisiones, con las siguientes ventajas:

- Eficiencia, rapidez en implementación, porque brinda una metodología para aprovechar la experiencia de un experto.
- Tiene éxito en aquellos casos en que los datos de entrada por su propia naturaleza son escasos, imprecisos o ruidosos.
- No se necesita modelar detalladamente el sistema que se pretende controlar o predecir, porque se utiliza un método heurístico.
- Permite controlar sistemas con una no-linealidad muy marcada, donde las estrategias tradicionales, casi siempre controladores del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) ofrecen pobres resultados.

Controlador Borroso

El diagrama de bloque del controlador diseñado en este proyecto se muestra en la figura N° 4. Recordemos en términos generales que cuando hablamos de control borroso, hablamos de control basado en reglas [2]. A continuación se explica el diagrama de bloque por bloque del controlador borroso para el motor Brushless.

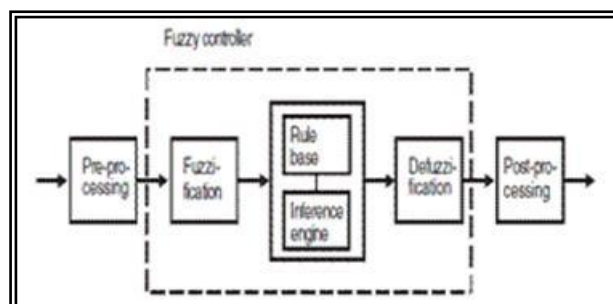


Fig. N° 4 Diagrama interno de controlador borroso

Al observar el diagrama de bloques de la figura N° 4 del controlador borroso se puede notar una etapa de pre-procesamiento de la señal de entrada al controlador, un ejemplo de esta etapa es el filtrado de la señal que proviene de los sensores al controlador, otro ejemplo es la conversión analógica a digital ó la cuantificación en relación con la toma de muestra de la señal de entrada al controlador.

En este proyecto la etapa de pre-procesamiento está conformada por las entradas de los sensores de efecto hall la cual llegan al dsPIC33FJ12MC202 y están conectadas a los pines RB5, RB6, RB7. Estos pines están configurados para que cuando se produzca un cambio en cualquiera de estos, se genere una interrupción donde el dsPIC leerá el estado de los sensores de efecto hall situados en el motor conociendo así la posición aproximada del rotor para determinar las salidas adecuadas del PWM del dsPIC que van hacia los transistores del puente de 6 pasos para excitar las bobinas correspondientes del motor BLCD.

La medición de la velocidad del motor se realiza a través del temporizador TMR3 del dsPIC donde se mide el tiempo en que se completa un ciclo de la señal del sensor de efecto hall, obteniendo la siguiente ecuación para obtener la velocidad $S = 60/(P/2 * T)$ rpm, donde P es el numero de polos del motor.

Una vez calculada la velocidad del motor BLDC es comparada con la señal de referencia que proviene de un potenciómetro (S1) y es introducida al microcontrolador por el Pin RA0 el cual es configurado como entrada analógica. La ecuación utilizada para determinar el error será $E = S_p - V_A$ donde E es el error, S_p es la señal de referencia y V_A es la velocidad del motor. Este error

calculado es borricado mediante la funciones de pertenencias. En el caso del diseño del controlador borroso del presente proyecto se han diseñado cinco funciones de pertenencia para la etapa de borricación que permitirán llevar el valor de entrada no borroso a valores borrosos que están comprendidos entre (0,1). Las cinco funciones de pertenencia se muestran en la figura N° 7, en cuanto a las ecuaciones con las que se formaron las funciones de pertenencia son:

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad \text{triangular}$$

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ 1, & \text{for } b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{for } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{for } x > d \end{cases} \quad \text{trapezoidal}$$

Fig. N° 5 ecuaciones para la funciones de pertenencia triangular y trapezoidal

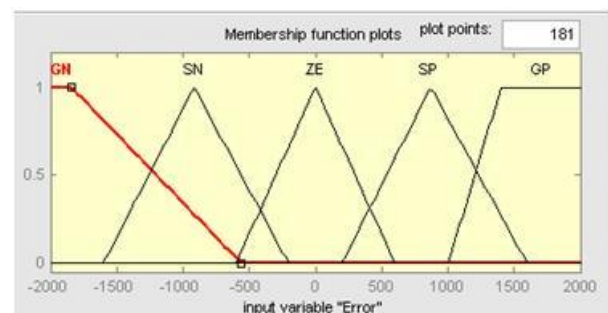


Fig. N° 6 Funciones de pertenencia de la entrada al controlador

Para la implementación en el dsPIC se realizaron algunas funciones en lenguaje C donde x es el error calculado e introducido en las funciones para obtener los grados de pertenencia de los conjuntos borrosos para el error. Una muestra del código empleado para las funciones de pertenencia de la entrada de acuerdo a las ecuaciones mostrada anteriormente es:

```

void trian(int x)
{
  if (x<a) y=0;
  if (x<b&&x>=a) y= (x-a)/(b-a);
  if (x<=c&&x>=b)y =(c-x)/(c-b);
  if (x>c) y=0;
}
void trapmfiz(int x)
{
  if (x<a) y=1;
  if (x<=b&&x>=a) y= (b-x)/(b-a);
  if (x>b) y=0;
}
void trapmfder(int x)
{
  if (x<a) y=0;
  if (x<=b&&x>=a) y= (x-a)/(b-a);
  if (x>b) y=1;
}

```

Fig. N° 7 Código en lenguaje C

El bloque de reglas es la segunda etapa interna del controlador diseñado y es el que contiene las reglas del controlador borroso que encierran el conocimiento necesario para el control del motor Brushless. Para el objeto de estudio de este proyecto se han diseñado cinco reglas de control con la siguiente configuración:

- Regla 1 si E es GN Entonces Y es GN
- Regla 2 si E es SN Entonces Y es SN
- Regla 3 si E es ZE Entonces Y es ZE
- Regla 4 si E es SP Entonces Y es SP
- Regla 5 si E es GP Entonces Y es GP

La máquina de inferencia realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida. En el presente trabajo se implemento el método de inferencia de Madani [2].

La desborroficación consiste en traducir el resultado de la inferencia borrosa de un concepto lingüístico a una salida física, para este proceso se crearon las funciones de pertenencia de salida siguiendo las ecuaciones mostradas para la construcción de las funciones de pertenencia de la entrada al controlador. Las funciones de

pertenencia para la salida se muestran en la figura N° 8.

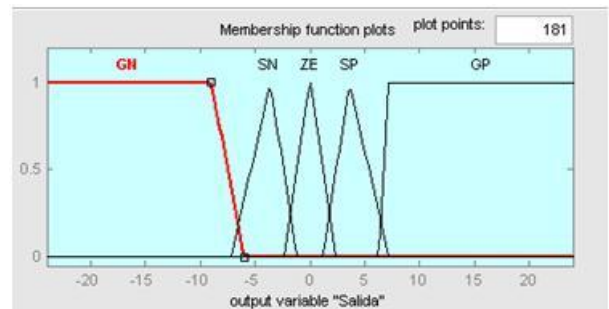


Fig. N° 8 Funciones de pertenencia de la salida del controlador

Para adquirir un algoritmo preciso se realizó una simulación con el programa Matlab R2008a utilizando el toolbox de lógica borrosa y simulink creando así el circuito de control mostrado en la figura N° 9 obteniendo los resultados mostrados en la figura N° 10.

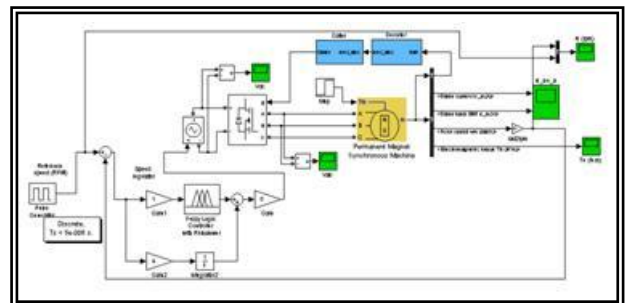


Fig. N° 9 Simulación en Simulink de Matlab R2008a

Al realizar la simulación de control borroso con una velocidad de referencia de 1000 RPM sin par de carga, como se observa en la figura N° 10, a los 0.0276 segundos la velocidad es regulada, por lo tanto el resultado es satisfactorio.

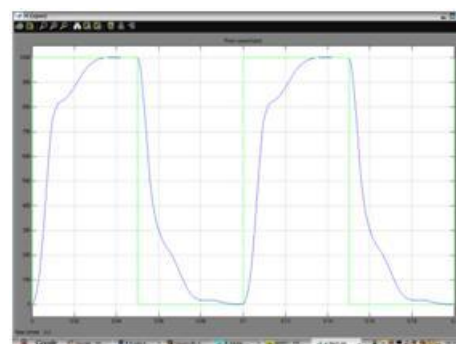


Fig. N° 10 Resultados de simulación en Simulink

En la figura N° 11 se muestra el circuito para simulación realizada en Proteus v7.5 SP3. Este circuito fue realizado basándose en el ejemplo de las notas de aplicación AN957 de Microchip contenidas en la carpeta de ejemplo de la versión de Proteus v7.5 SP3 para comprobar el funcionamiento del código que se realizó para implementación del controlador borroso.

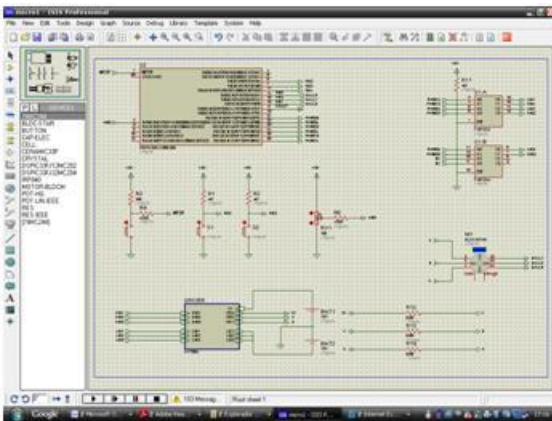


Fig. N° 11 Simulación en Proteus v7.5 SP3

Finalmente en la figura N° 12, se puede observar el circuito de control basado en lógica borrosa para controlar la velocidad del motor Brushless.



Fig. N° 12 Circuito impreso del controlador Borroso

Conclusiones

El controlador difuso propuesto en este artículo, fue diseñado a través del toolbox de Matlab R2008a para lógica borrosa. Donde una vez diseñada las funciones de pertenencia para el error y la salida del controlador y la base de regla, se realizó mediante el Simulink de

Matlab una simulación donde se pudo observar que la regulación de la velocidad muy rápida en tan solo 0.0276 segundos por lo tanto está demostrado que su desempeño es satisfactorio.

Una vez comprobado el desempeño del sistema diseñado en Matlab R2008a se procedió a realizar los códigos en MPLAB v8.30 usando los datos obtenidos en Matlab. La programación del dsPIC fue realizada en lenguaje C y el compilador usado fue el C30 de Microchip, después se realizó una simulación en Proteus v 7.5 SP3 utilizando como base las notas de Microchip AN957 y el ejemplo de Proteus para el control de un Motor Brushless.

Finalmente se logra mediante este artículo ilustrar el diseño de los controladores borrosos de manera sencilla y eficaz en dsPIC los cuales pueden trabajar con operaciones de punto flotante logrando un alto desempeño en la aplicación de estos sistemas.

Referencias

- [1] Técnicas de control para motores Brushless Roger Juanpere Tolrà Barcelona – Spain.
- [2] Foundations of Fuzzy Control Jan Jantzen Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- [3] AN957 Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010 Microchip Technology Inc.
- [4] dsPIC 33FJ12MC202 Data Sheet, High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers Microchip Technology Inc.