

CONTROL DE UN MOTOR UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA CON REGLAS SINTONIZADAS POR ALGORITMOS GENÉTICOS

Control of a motor used fuzzy logic with rules tuned to genetic algorithms

RESUMEN

En este documento se describe la implementación de un controlador PI difuso incremental con una base de reglas para un motor de corriente continua controlado por campo. La matriz de reglas es sintonizada a través de algoritmos genéticos. El controlador está diseñado para llevar el motor desde una condición inicial de 0 a 100rpm (revoluciones por minuto). Las simulaciones y los resultados obtenidos muestran un comportamiento óptimo del sistema.

PALABRAS CLAVES: Control Difuso, Motor de corriente continua, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

In this paper we describe the implementation of an incremental fuzzy PI controller with a basis of rules to a direct current motor controlled by field. The matrix of rules is tuned through genetic algorithms. The controller, by its own, has been designed to conduct the motor from an initial condition of 0 to 100rpm (revolutions per minute). Consequently, the simulations and the results obtained show an optimal behavior of the system.

KEYWORDS: Fuzzy control, DC motor, genetic algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos actuales han generado una variedad de aplicaciones no lineales tales como sistemas de comando de vuelo, manipuladores de robot, sistemas de inyección de combustible, motores a reacción, y motores eléctricos de inducción, entre otros, los cuales presenta características como puntos de equilibrios múltiples, ciclos límite, bifurcaciones, corrimiento de frecuencias y caos[1]. Debido a esto, las técnicas de control lineal sólo son válidas en un rango de operación de pequeña señal o alrededor de un punto de equilibrio específico.

Una de las alternativas para controlar este tipo de sistemas son los controladores difusos, ya que por sus características no depende del punto de operación, están compuestos de reglas lingüísticas, se pueden construir a partir de la experiencia de algún experto y el diseño no depende del modelo matemático (a menos que se deseen realizar simulaciones para escoger las reglas y funciones miembro del sistema difuso)[2].

En este documento se describe la implementación de un controlador PI difuso incremental con una base de reglas para un motor de corriente continua controlado por campo. La sección 2, describe el modelo matemático del motor, junto con los parámetros y rangos de operación adecuados. La sección 3 describe las características del controlador difuso escogido. En la Sección 4 se hace una

JAIME A. LÓPEZ

Estudiante Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
jaimealopez@hotmail.com

PABLO A. MUÑOZ

Ingeniero Electrónico, M. Sc.
Profesor De Planta
Universidad del Quindío
pabloandresm@yahoo.com
pamunoz@uniquindio.edu.co

JAIBER E. CARDONA

Ingeniero Electrónico, M. Sc.
Profesor De Planta
Universidad del Quindío
jaibercardona@uniquindio.edu.co

introducción a los algoritmos genéticos y la configuración utilizada para encontrar la matriz de reglas del controlador. La sección 5 y 6 muestra los resultados obtenidos y las conclusiones del presente trabajo, respectivamente.

2. MODELO DEL MOTOR

Un motor de corriente continua controlado por campo, está dado matemáticamente por[3]:

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{d}{dt} i_f \quad (1)$$

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + c_1 i_f w \quad (2)$$

$$J \frac{d}{dt} w = c_2 i_a i_f - c_3 w \quad (3)$$

La ecuación (1) corresponde al circuito de campo, siendo v_f , i_f , R_f y L_f voltaje, corriente, resistencia e inductancia de campo. Las variables v_a , i_a , R_a , y L_a , corresponden al voltaje, corriente, resistencia e inductancia de armadura. En (3), J corresponde a la inercia del rotor y c_3 al coeficiente de amortiguamiento (ecuación del torque para el eje). El término $c_1 i_f w$ es la fuerza electromagnética contraelectromotriz inducida en el circuito de armadura, y $c_2 i_a i_f$ es el torque producido por la interacción entre la corriente de armadura con el flujo del circuito de campo. El voltaje v_a se mantiene constante y la corriente i_f es la entrada de control [3].

Cuando el circuito de campo es controlado por una fuente de corriente, el sistema está descrito por el siguiente modelo de estados de segundo orden:

$$\dot{x}_1 = -\theta_1 x_1 - \theta_2 x_2 U + \theta_3 \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = -\theta_4 x_2 + \theta_5 x_1 U \quad (5)$$

$$y = x_2 \quad (6)$$

En donde x_1 es la corriente de armadura, x_2 es la velocidad, U es la corriente de campo, y $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ y θ_5 son constantes positivas. El sistema tiene como restricción que:

$$x_1 > \frac{\theta_3}{2\theta_1} \quad (7)$$

Tomando los valores de las constantes como $\theta_1=60$, $\theta_2=0.5$, $\theta_3=40$, $\theta_4=6$ y $\theta_5=40000$, y reemplazando en (4), (5), (6) y (7) se tiene:

$$\dot{x}_1 = -60x_1 - 0.5x_2U + 40$$

$$\dot{x}_2 = -6x_2 + 40000x_1U$$

$$y = x_2$$

$$x_1 > 0.3333$$

Los puntos de equilibrios del sistema están dados por:

$$x_1 = \frac{0.012}{U^2 + 0.018} \text{ con } x_1 > 0.3333$$

$$x_2 = \frac{80U}{U^2 + 0.018}$$

Como $x_1 > 0.333$, la señal de corriente U debe ser menor a 0.13416 [3].

3. CONTROLADOR DIFUSO

La lógica difusa es una de las disciplinas matemáticas que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas[4]. Esta permite tratar con conceptos o información imprecisa, como *estatura media*, *temperatura baja*, *presión alta*, *poca velocidad*, entre otros, en términos de conjuntos difusos que se combinan en reglas para definir acciones, como *si la velocidad es alta disminuir la corriente*.

La figura 1 muestra el esquema general de un sistema basado en lógica difusa. El bloque de fuzzificación le

asigna a cada variable de entrada un grado de pertenencia en cada uno de los conjuntos difusos, mediante funciones características asociadas a estos conjuntos. Utilizando estos grados de pertenencia, la etapa de inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y de salida de acuerdo a las reglas que rigen el sistema. Finalmente, la defuzzificación toma el conjunto difuso obtenido en la inferencia y a través de métodos matemáticos obtienen un valor concreto de la variable de salida.

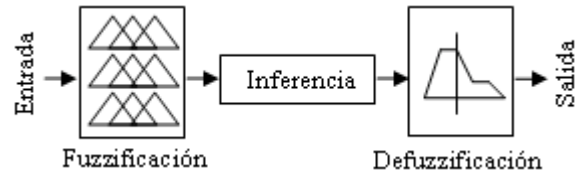


Figura 1. Esquema general de un sistema basado en lógica difusa.

El control difuso es entonces aplicar la lógica difusa al control de algún sistema o proceso. Este tipo de controladores que se construyen a partir de un conjunto de reglas, se han utilizado en procesos industriales, procesos químicos, robótica, sector automotor[5], control de elevadores, producción de ethanol, reactores nucleares y el metro de Sendai[7], entre otros.

La figura 2 muestra el diagrama de bloques de un controlador PI difuso incremental con una base de reglas que tiene como entradas la señal de error (e) y la derivada del error (Δe). La salida corresponde a un incremento o decremento en la señal de control (Δu), y a través de una integración se obtiene la señal de control (u).

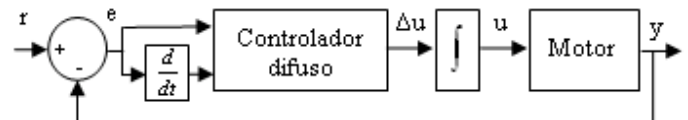


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado.

La señal de error (e) le brinda información al sistema difuso sobre la diferencia que existe entre la señal deseada de referencia (r) y la salida real del planta (y). Cuando $e < 0$, la planta se encuentra por debajo de la referencia, mientras que para $e > 0$, sucede lo contrario. La derivada del error (Δe) indica la razón de cambio de la planta. Cuando $\Delta e < 0$, la planta está creciendo (aumentando de amplitud), mientras que para $\Delta e > 0$, la planta se encuentra decreciendo. A partir de los valores de estas dos señales, el controlador difuso debe decidir el valor apropiado del incremento en u .

El objetivo del controlador es llevar el motor desde una velocidad inicial de 0 a 100 rpm, con el menor sobre impulso y tiempo de establecimiento posible. Como el error puede estar entre -20 y 100, las funciones de pertenencia deben cubrir todo este rango, tal y como se observa en la figura 3. Dichas funciones son de tipo trapezoidal y triangular y han sido definidas como *Muy*

Grande (MG), Grande (G), Pequeño (P), Muy Pequeño (MP) y Negativo (N).

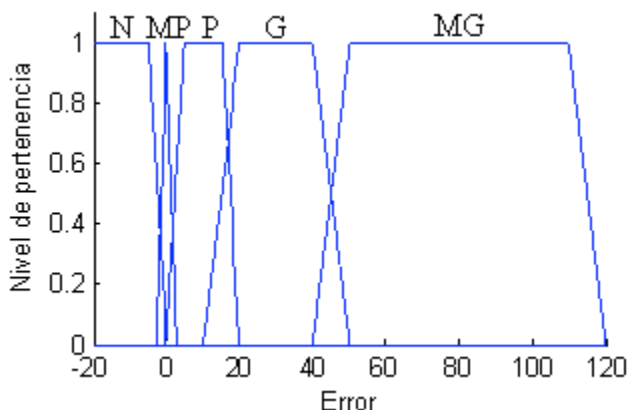


Figura 3. Funciones de pertenencia para el error.

El rango que deben cubrir las funciones de pertenencia para la derivada del error (Δe) están entre -25 y 10, tal y como se muestra en la figura 4. Estas funciones son de tipo trapezoidal y triangular y han sido definidas como Positivo (P), Muy Pequeño (MP) y Negativo (N).

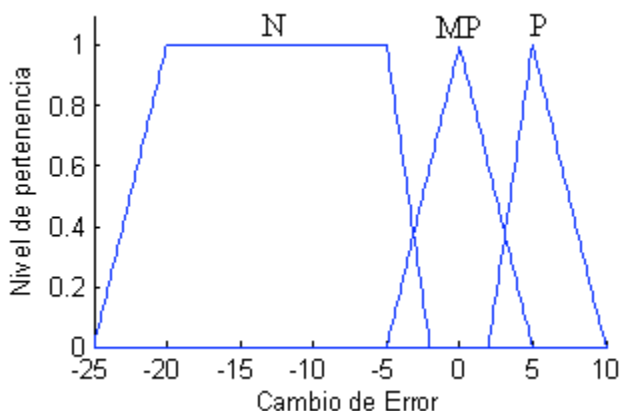


Figura 4. Funciones de pertenencia para el cambio de error.

Para cada combinación en las dos señales de entrada, el controlador difuso debe generar una señal de salida Δu . Si por ejemplo es grande y Δe positivo, significa que la planta está por debajo de la referencia alejándose de esta, entonces el controlador debe generar un incremento positivo en la señal de control. Si se organiza en una tabla para cada combinación de entrada una señal de salida se obtienen la matriz de reglas. Para el controlador PI que se va a implementar se tiene una matriz de reglas de dimensiones 3x5, como se observa en la figura 5, la cual será sintonizada por el algoritmo genético, procedimiento que se explica en la siguiente sección. En muchas ocasiones esta matriz se construye a partir de la experiencia de una persona que haya controlado el sistema.

La salida final del sistema difuso está dada por:

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Delta u_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \tag{8}$$

donde w_i es el resultado de aplicar las funciones de pertenencia y el operador difuso *and* a cada combinación de entrada y N el número de reglas del sistema, que para este caso es de 15. Este tipo de defuzzificación es la utilizada en los sistemas Takagi-Sugeno, los cuales son similares a los sistemas Mamdani. La principal diferencia es que las salidas de las funciones de pertenencia de los sistemas Sugeno son lineales o constantes, lo que los hace más eficientes computacionalmente, lo cual es indispensable en la implementación de controladores [6].

		E				
		N	MP	P	G	MG
Δe	N	Δu_1	Δu_2	Δu_3	Δu_4	Δu_5
	MP	Δu_6	Δu_7	Δu_8	Δu_9	Δu_{10}
	P	Δu_{11}	Δu_{12}	Δu_{13}	Δu_{14}	Δu_{15}

Figura 5. Matriz de reglas del controlador difuso.

4. ALGORITMO GENÉTICO

Los algoritmos genéticos que pertenecen al área de la computación evolutiva, representan una aproximación para la solución de problemas de optimización, donde la búsqueda es hecha sobre un espacio de soluciones y de manera evolutiva se retienen las soluciones más adecuadas, en un proceso análogo a la evolución biológica, a través de la selección natural, el cruce y la mutación[8].

En la naturaleza los individuos se disputan el derecho a la reproducción, a través de un proceso de competencia de habilidades. Los individuos más aptos se reproducen generando una prole que tiene su material genético y por ende sus características de desempeño. Eventualmente ocurre una mutación en los descendientes, esto no se entiende en términos evolutivos como un error sino como un ensayo brusco dentro del proceso, a fin de evitar estancamiento en la generación de genes deseables[9].

Los algoritmos genéticos trabajan con una población de individuos generados aleatoriamente y donde cada uno de ellos representa una posible solución al problema. A través de una calificación que se asigna a cada uno llamada *fitness*, se determina qué tan apropiado es el individuo en la solución del problema. De acuerdo a esta calificación, los mejores individuos son preservados para la siguiente generación, los cuales reciben el nombre de *Hijos Elite*. Otros individuos seleccionados de manera aleatoria de la población son cruzados entre sí a través de

alguna operación matemática, dando origen a los *Hijos Cruzados*, mientras que cada *Hijo Mutado* es el resultado de alterar su material genético aleatoriamente. Este procedimiento se muestra de manera gráfica en la Fig. 6.

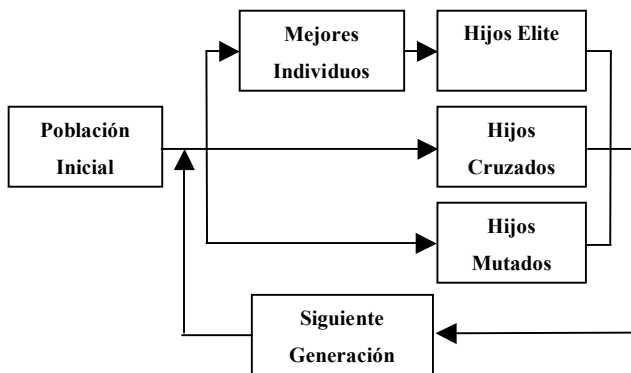


Figura 6. Diagrama de bloques del algoritmo genético.

Por sus características, los algoritmos genéticos se diferencian de los algoritmos clásicos en que trabajan con un conjunto de soluciones por cada iteración realizada, y las soluciones que van a conformar el conjunto en la siguiente iteración son seleccionadas a través de cómputos los cuales incluyen valores aleatorios y no funciones determinísticas como en el enfoque clásico[10].

En la implementación realizada cada individuo de la población representa la matriz de reglas de dimensiones 3x5. Los 15 valores de la matriz son números aleatorios entre -0,2 y 0,2. Para cada individuo se simula el sistema en lazo cerrado como se indica en la figura 2 durante 1s con un tiempo de muestreo de 5ms. A partir de esta simulación se obtiene el tiempo de establecimiento (t_s), el sobre impulso (M_p) y error de estado estable (ess) de dicho controlador. Con estos valores se calcula el *fitness*, el cual está dado por:

$$fitness = 80t_s + 40M_p + 40ess \quad (9)$$

La simulación se realiza con una población de 30 individuos durante 100 generaciones. De acuerdo el *fitness*, se seleccionan los 4 hijos con mejor desempeño (*Hijos Elites*). 12 de los individuos de la población son cruzados (*Hijos Cruzados*) los cuales son el resultado de promediar componente a componente dos hijos diferentes. Los 12 *Hijos Mutados* son el resultado de sumar un número aleatorio entre -0.005 y 0.005 a cada elemento de un hijo escogido aleatoriamente, de tal forma que un individuo no se modifique dos veces.

5. RESULTADOS

Después de realizar varias simulaciones del algoritmo genético, el individuo con el mejor desempeño encontrado se indica en la figura 7. Este corresponde a la matriz de reglas del controlador incremental difuso.

		E				
		N	MP	P	G	MG
Δe	N	-0.0092	-0.0549	-0.0214	-0.0527	-0.0193
	MP	0.0206	-0.0017	0.0294	0.0693	0.0932
	P	-0.0557	0.0171	-0.0295	-0.0419	0.0593

Figura 7. Matriz de reglas del controlador difuso hallada por el algoritmo genético.

Para esta configuración el sistema en lazo cerrado presenta un tiempo de establecimiento de 90 ms contra un tiempo de establecimiento en lazo abierto del motor de aproximadamente 1 s, un error de estado estable del 0.27% y no presenta sobre impulso. En la figura 8 se puede observar en línea continua la señal de referencia, en línea discontinua la respuesta del motor en lazo abierto y en línea punteada la respuesta del motor en lazo cerrado controlado por lógica difusa después de sintonizarlo con algoritmos genéticos.

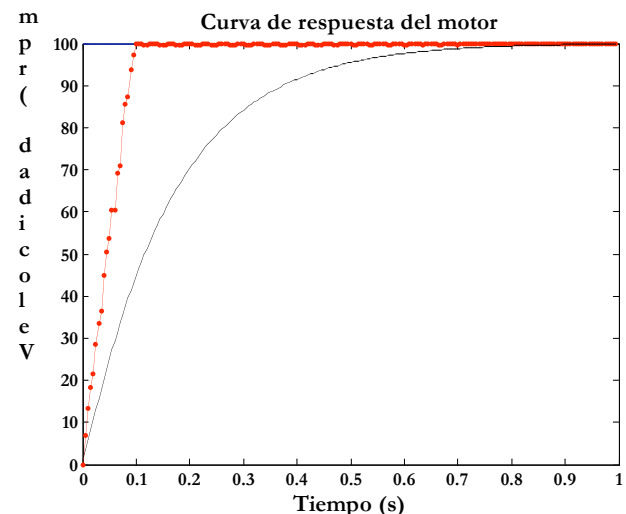


Figura 8. Respuesta del motor para una referencia de 100rpm.

6. CONCLUSIONES

En este documento se ha presentado la implementación de un controlador difuso para un motor de corriente continua controlado por campo. A diferencia de los convencionales, este tipo de controlador puede implementar estrategias no lineales usando reglas lingüísticas, y en muchas ocasiones puede ser construido a partir de la experiencia de un experto. Para su diseño no se requiere del modelo matemático del sistema a controlar, lo cual evita cálculos tediosos.

La sintonización de la matriz de reglas a través del

algoritmo genético, es una herramienta muy útil para encontrar una solución óptima al problema, ya que permite optimizar el conjunto de reglas y evitar un proceso heurístico de ensayo y error para encontrar este conjunto de reglas.

Como trabajo futuro está el sintonizar la matriz de reglas para diferentes condiciones iniciales y señales de referencia en la velocidad del motor, de tal forma que se tengan múltiples puntos de operación. Esto implicaría ampliar el rango de las funciones de pertenencia del sistema difuso y modificar el algoritmo genético.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Seron, J. Braslavsky. “Sistemas No Lineales”. Notas de clase. Universidad Nacional de Quilmes. 2001.
- [2] K. Passino, S. Yurkovich. “Fuzzy Control”. Addison Wesley Longman, Inc. 1998.
- [3] Sistemas No Lineales (Septiembre, 2000). “Control No Lineal de un MCC”. Disponible en www.eie.fceia.unr.edu.ar/~marimar/teach.htm.
- [4] R. Pérez. “Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales Pictóricos”. Universidad Politécnica de Cataluña. 2005.
- [5] V. A. Constantin. “Fuzzy Logic & NeuroFuzzy Application Explained”. New York: Prentice Hall. 1995.
- [6] Fuzzy Logic Toolbox User’s Guide. The Math Works, Inc. 2006.
- [7] Fundamentos de Lógica Difusa. Universidad de las Américas-Puebla.
- [8] A. Filippidis, L.C. Jain and C.W. de Silva, “Intelligent Control Techniques”. Intelligent Adaptive Control, Industrial Applications. CRC Press. 1999.
- [9] J. C. Angarita. O. Ferrero. “Reducción de Pérdidas Técnicas de Energía Empleando Compensación GAMS y Algoritmos Genéticos”. Energía y Computación, Vol. XIII, pp. 38-44, Diciembre 2005.
- [10] Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. The Math Works, Inc. 2006.