

CONTROL FUZZY VS. CONTROL CLÁSICO DE VELOCIDAD EN UN MOTOR DE CD

Ms.C. Jorge Luis Díaz Rodríguez*

Ph.D. Aldo Pardo García.***

*Universidad de Camagüey

Carretera Circunvalación Norte Km. 5, Camagüey, CP 74650. Cuba

Tel: 53-32-261456, Fax: 53-32-261126

e-mail: acc@reduc.cmw.edu.cu

***Universidad de Pamplona

Grupo de Investigación: Automatización y Control A&C.

Ciudadela Universitaria El Buque. Km. 1 Vía Bucaramanga

e-mail: apardo13@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se modelan y simulan a lazo abierto y cerrado, un sistema de accionamiento eléctrico del motor de corriente directa de excitación independiente controlado por voltaje de armadura, en este caso un Sistema Rectificador Controlado Motor de Corriente Directa con subordinación y límite de corriente.

En una primera parte se sintetizan los reguladores clásicos de corriente y velocidad por métodos óptimos teniendo en cuenta inclusive la acción antiwindup en dichos reguladores, y luego se sustituye el regulador de velocidad por un controlador por lógica fuzzy. En este último caso, el regulador fuzzy, se muestra el procedimiento de diseño empleando la Toolbox Fuzzy Logic del Matlab®

Finalmente se compara y analiza la respuesta por ambos métodos. La simulación se hizo con ayuda de una microcomputadora IBM PC empleando el Matlab® y el Simulink® como lenguaje de simulación. Los resultados de este trabajo puede emplearse para el diseño y análisis de reguladores de los sistemas de accionamientos eléctricos, y también para la enseñanza de estas temáticas.

Keywords: Lógica Fuzzy, Motor, Control, MATLAB®, SIMULINK®

1. INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente directa, todavía hoy en día son la opción común si se necesita de accionamientos eléctricos que operen en un rango amplio de velocidad. Esto es debido a sus propiedades operacionales y sus características de control, siendo la única desventaja esencial el conmutador mecánico, el cual restringe

la potencia y velocidad del motor, aumenta la inercia, la longitud axial y necesita mantenimiento periódico. Con los motores de alterna, alimentados con convertidores estáticos de frecuencia, el conmutador es eliminado, sin embargo a un considerable costo y complejidad.

Existen muchos esquemas de control de motores de corriente directa. Una

alternativa posible, descrita en el presente trabajo, es el control por armadura con el Sistema Rectificador Controlado Motor de Corriente Directa con excitación independiente, con control de velocidad con subordinación y límite de corriente [1] pese a su relativa complejidad, posee un gran diapazón de velocidad del sistema controlado.

2. MODELO DEL MOTOR DE CD

Un circuito esquemático de la máquina de corriente directa se muestra en la figura 1, donde se puede observar sus dos partes principales, el estator, con el circuito del campo encargado de suministrar el flujo principal o de excitación (que en el control por armadura es constante e igual a su valor nominal) y otra, el rotor, con el circuito de armadura encargado de generar el par que mueve la carga.

Las relaciones eléctricas y mecánicas se pueden obtener de las ecuaciones que rigen su comportamiento dinámico, las cuales son las siguientes [3]:

$$R_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{d i_a}{dt} + E_a = U_a \quad (1)$$

$$E_a = k_1 \cdot \Phi_e \cdot w_r \quad (2)$$

$$J \cdot \frac{d w_r}{dt} = M_e - M_c \quad (3)$$

$$M_e = k \cdot \Phi_e \cdot i_a \quad (4)$$

$$R_e \cdot i_e + N_e \cdot \frac{d \Phi_e}{dt} = u_e \quad (5)$$

$$\Phi_e = f(i_e) \quad (6)$$

$$M_c = k \cdot \Phi_e \cdot i_c \quad (7)$$

Donde:

- R_a, R_e Resistencias de la armadura y del campo.
- L_a Inductancia de armadura.
- U_a, U_e Voltajes de armadura y campo.
- Φ_e Fuerza electromotriz.
- i_a, i_c, i_e Flujo de campo.
- w, ε Corrientes de armadura, carga y campo.
- M_e, M_c Velocidad y posición angular del eje.
- N_e Par del motor y de la carga.
- k Par de la carga.
- J Momento de inercia de la carga y el motor.

Un diagrama en bloques del motor de CD generado con estas ecuaciones, se muestra en la figura 2.

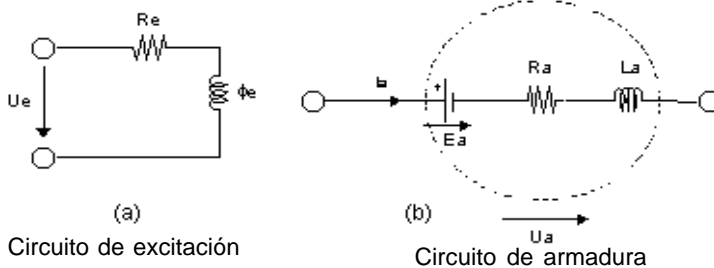


Fig. 1. Diagramas equivalentes del motor de CD

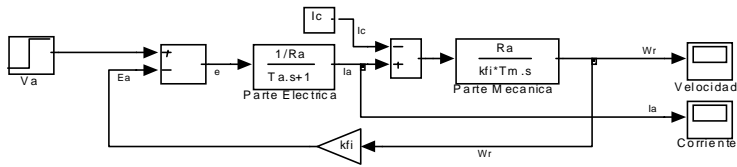


Fig. 2 Modelo Matemático del Motor de CD.

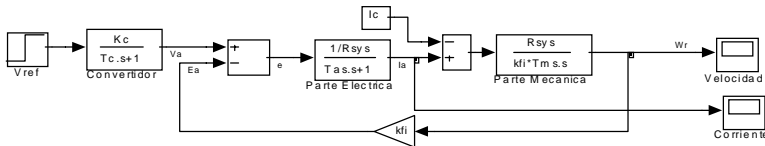


Fig. 3. Modelo del motor de CD y Convertidor en lazo abierto.

Donde: $T_a = \frac{L_a}{R_a}$, $T_m = J \frac{R_a}{(k \cdot \Phi_e)^2}$

son las constantes de tiempo eléctrica y mecánica, respectivamente.

3. CONTROL EN LAZO ABIERTO

Con el fin de observar la respuesta del motor, se implementa un control de voltaje de armadura en lazo abierto, que es el resultado de colocar un convertidor de voltaje (rectificador controlado) en cascada con el motor.

Donde:

T_c, K_c Constante de tiempo y ganancia del convertidor.
 R_c, L_c Resistencia e inductancia equiv. del convertidor.

$R_{sys} = R_a + R_c$, $L_{sys} = L_a + L_c$
Resistencia y Inductancia del sistema convertidor - motor.

$T_{as} = \frac{L_{sys}}{R_{sys}}$, $T_{ms} = J_T \frac{R_{sys}}{(k \cdot \Phi_e)^2}$
Constantes de tiempo.

Como entrada se aplicó un paso de voltaje nominal dividido la ganancia del

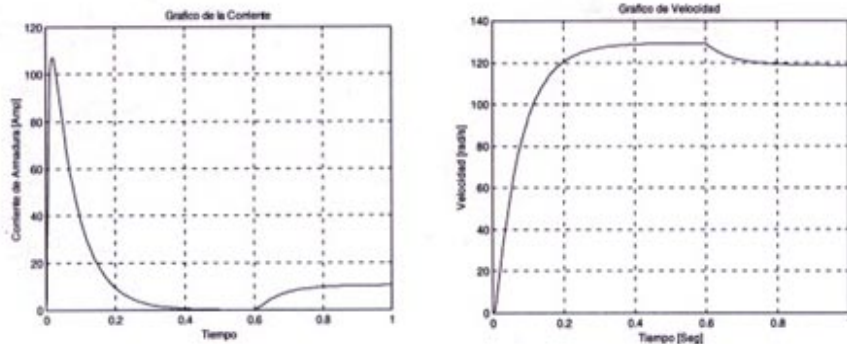


Fig. 4. Gráficas de corriente y velocidad en lazo abierto.

convertidor, con corriente de carga igual a cero, incrementándose a la nominal en 0.6 seg.

4 CONTROL EN LAZO CERRADO

El control de armadura se implementa con la ayuda de convertidores estáticos de voltaje (rectificadores controlados). Estos convertidores pueden ser reversibles, o sea pueden invertir el sentido del voltaje en sus terminales de salida, permitiendo el control en los cuatro cuadrantes de la característica mecánica (M vs w).

En el esquema de control conjunto, el lazo de control de armadura se realiza de la manera convencional mediante el control en cascada de corriente y velocidad. Por debajo de la velocidad base, el campo trabaja a flujo máximo y constante.

Por lo tanto, el diseño de los reguladores se realiza en el circuito de armadura. Serán dos reguladores PI clásicos, que

se ajustan de la manera óptima, es decir, utilizando en el lazo de corriente un regulador por módulo óptimo y el lazo de velocidad uno por óptimo simétrico, dicho ajuste no se detallan por estar fuera del objetivo de nuestro trabajo. [1,3]

Donde:

- El bloque de alizamiento es un prefiltro para garantizar que los cambios en la referencia sean suaves, disminuyendo el sobreimpulso máximo de 43.4 % a 8.1 %, y disminuyendo el tiempo de establecimiento.
- El regulador de corriente fue ajustado a Módulo Óptimo.
- El regulador de velocidad fue ajustado a Óptimo Simétrico.
- K_{cc} y K_{sv} son ganancias de los sensores de retroalimentación de corriente y velocidad.

Obteniendo los resultados de esta simulación obtenemos:

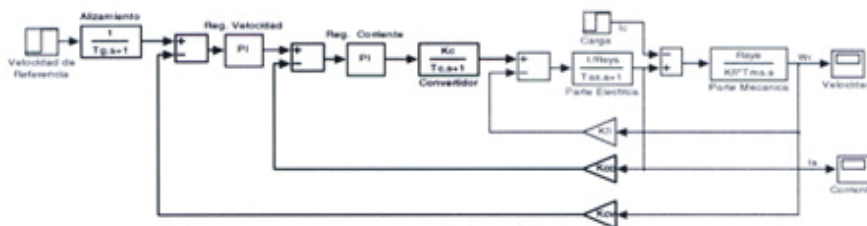


Fig. 5. Control en lazo cerrado

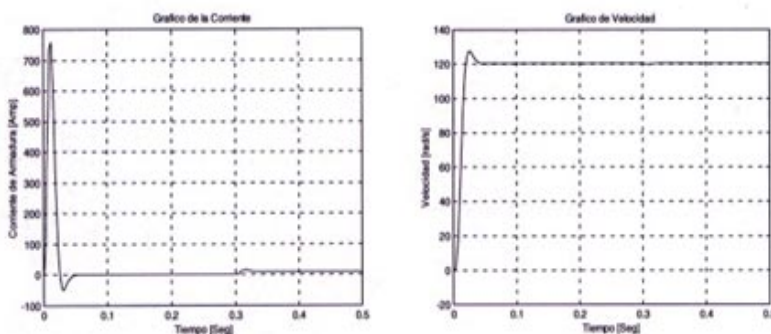


Fig. 6. Gráficas de corriente y velocidad en lazo cerrado

Como entrada se aplicó un paso escalón de voltaje nominal con corriente de carga igual a cero, incrementándose a la nominal en 0.3 seg.

Se puede observar que la respuesta buena y la regulación a las variaciones de la carga es también buena, pero sin embargo, no tiene mucha aplicación práctica pues la demanda de corriente en el arranque es muy grande (aproximadamente 750 A), dañando esto al motor. Surgiendo por tanto la necesidad de limitarla, esto se consigue limitando la salida del regulador de velocidad a un valor establecido (en este caso el doble de la corriente nominal). Esto es lo que se conoce como subordinación y límite de corriente, no haciendo falta el bloque de alizamiento y tomando en cuenta la saturación y el efecto anti windup.

4.1 Efecto de la Saturación y anti windup

Un método utilizado para no permitir que la corriente de armadura sobrepase el límite máximo permitido en las especificaciones del motor, consiste en saturar el regulador de

velocidad. Esto, sin embargo, trae como consecuencia efectos indeseables debido a la componente integral del regulador PI.

Cuando el regulador se satura, prácticamente no hay realimentación porque aunque la salida del proceso cambie, el actuador (convertidor) permanece saturado. Entre tanto, el regulador continúa integrando el error. Sin embargo, si el regulador está bien sintonizado, produce una salida, aunque constante, en la polaridad correcta. Cuando se reduce el error, el valor de la integral puede ser alto y se requiere suficiente tiempo para que el integrador reasuma un valor normal.

Este proceso aumenta considerablemente el tiempo de establecimiento y puede llegar a producir oscilaciones antes de alcanzar el estado estable. Esta situación es conocida con el término de "windup". Una solución consiste en dejar de integrar cuando el regulador esté saturado. Al regulador de velocidad se le ha agregado el efecto anti windup, con resultados satisfactorios.

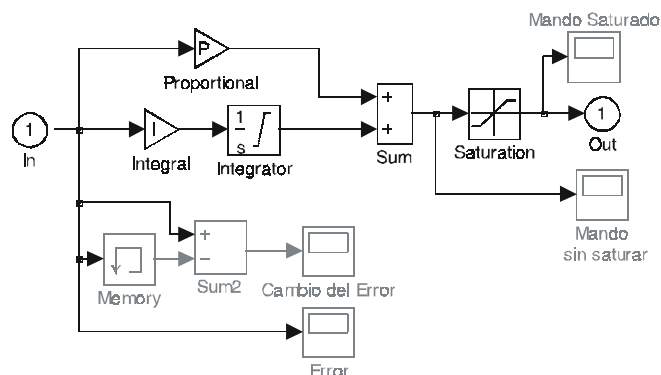


Fig. 7. Implementación del reg. con limitación y anti windup.

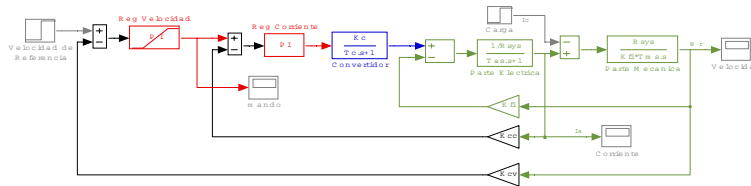


Fig. 8. Control en lazo cerrado con limitación y acción anti windup

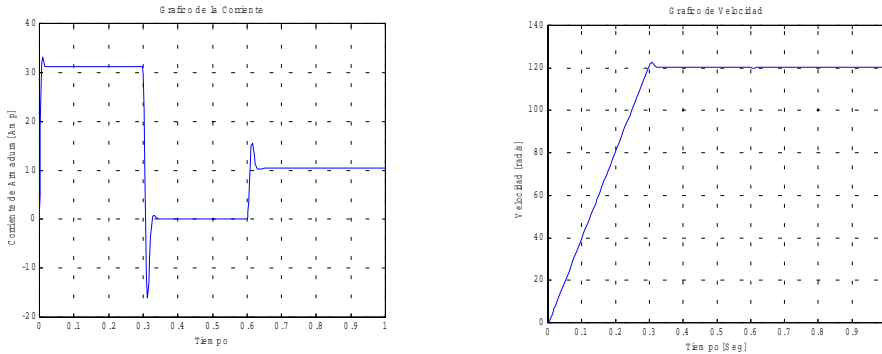


Fig. 9. Gráficas en lazo cerrado con limitación y anti windup

Como entrada se aplicó un paso escalón de voltaje nominal con corriente de carga igual a cero, incrementándose a la nominal en 0.6 seg.

5 REGULADOR FUZZY

Se diseñó un regulador fuzzy para la velocidad, el tipo escogido fue Mandani, de dos entradas, el error y la derivada del error de velocidad, y

una salida, el mando. Las membresías escogidas fueron trapezoidales.

Donde los conjuntos difusos fueron:

- gn Negativo Grande.
- mn Negativo Mediano.
- pn Negativo Pequeño.
- 0 Cero
- pp Positivo Pequeño.
- mp Positivo Mediano.
- gp Positivo Grande.

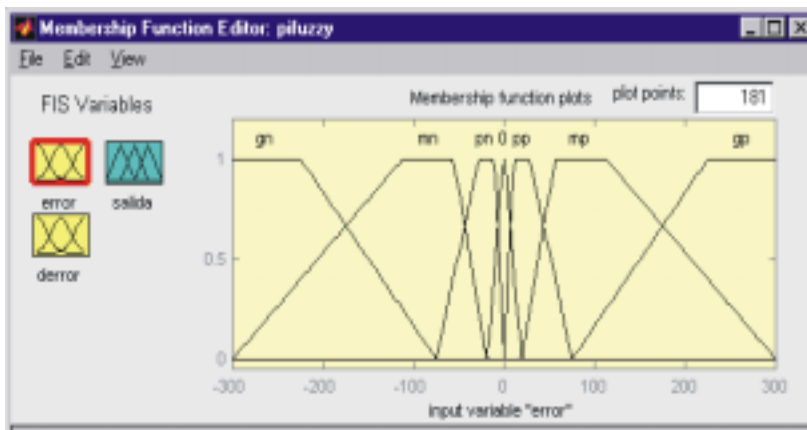


Fig. 10. Membresía utilizada.

Y los Universos de Discurso:
Entradas: Error[-300,300], Derivada del Error[-300, 300]
Salida: Mando[-175,175]
Las reglas fueron obtenidas de la simulación anterior con el regulador clásico. Observándose la relación entre el error, su razón de cambio (derivada) y el mando, garantizándose además con estas reglas que la respuesta sea lo más rápida posible y sin sobreimpulso.
Se generó para este caso un total de 49 reglas (7x7) que puesto de forma tabular sería:

		error						
		gn	mn	pn	0	pp	mp	gp
derror	gn	gn	gn	gn	gn	0	0	0
	mn	gn	gn	mn	mn	0	0	0
	pn	gn	gn	pn	pn	pp	pp	mp
	0	gn	mn	pn	0	pp	mp	gp
	pp	mn	pn	pn	pp	pp	gp	gp
	mp	0	0	0	mp	mp	gp	gp
	gp	0	0	0	gp	gp	gp	gp

Tabla 1: Base de reglas utilizadas

La superficie de control resultante fue:

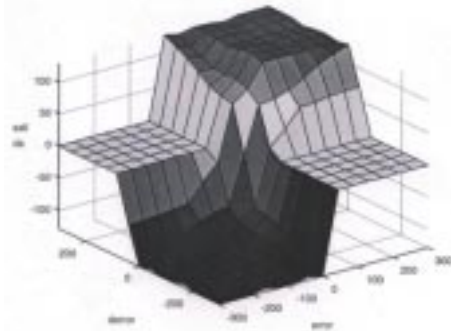


Fig. 11. Superficie de Control.

En la simulación se sustituyó el regulador PI de velocidad, por el regulador fuzzy obtenido, elaborado con la ayuda de la Fuzzy Logic Toolbox, Matlab®

Finalmente se le agregaron ganancias a las entradas y salida para un ajuste fino [4], además de mantener la saturación para limitar la corriente a valores permisibles en el motor, quedando finalmente el regulador fuzzy como:

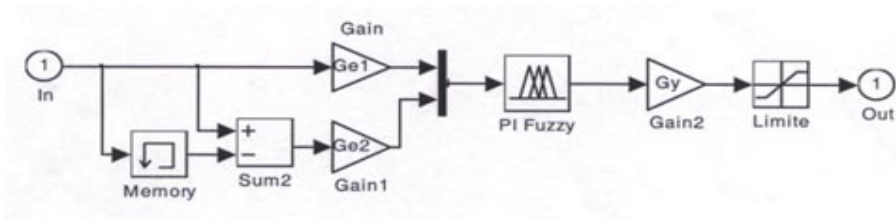


Fig. 12. Implementación del regulador de velocidad fuzzy.

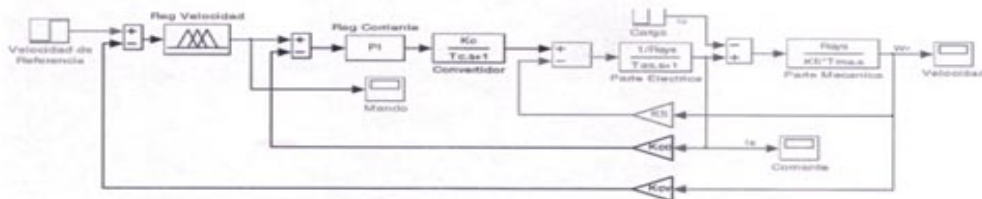


Fig. 13. Control en lazo cerrado con regulador fuzzy.

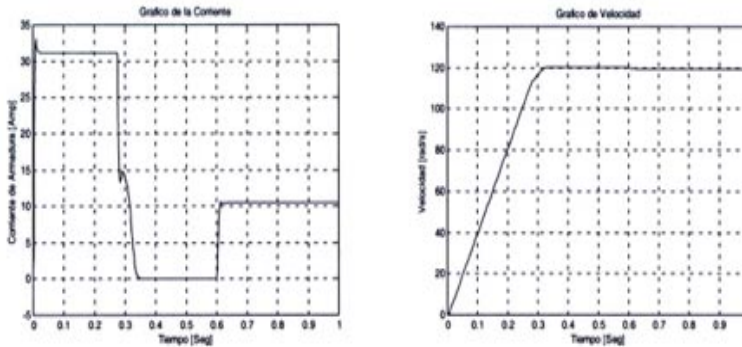


Fig. 14. Gráficas en lazo cerrado con regulador fuzzy.

Como entrada se aplicó un paso escalón de voltaje nominal con corriente de carga igual a cero, incrementándose a la nominal en 0.6 seg. (Igual que en primer caso con el objetivo de comparar los resultados).

6. CONCLUSIONES

Después de haber desarrollado y simulado los esquemas de control podemos concluir que los métodos óptimos de ajuste (módulo óptimo y óptimo simétrico) poseen un comportamiento dinámico en lazo cerrado muy bueno.

Sin embargo, se puede diseñar un controlador fuzzy relativamente

sencillo que posea los mismos e incluso mejores indicadores dinámicos, que los métodos anteriores (observando los resultados de la figuras 9 y la figura 14). Además, se observan mejoras en la respuesta de corriente y velocidad, pues en el caso del regulador fuzzy, la corriente no toma valores negativo, que producirían pares de frenado en el motor, y la respuesta ante el escalón de carga es mucho mejor, sin sobreimpulso.

Finalmente, la simulación es una herramienta necesaria para el diseño y análisis de los reguladores fuzzy.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. A. Costa, F. Bonne, Principios fundamentales de accionamiento eléctrico, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, Cuba, 1989.
2. COX, E., The Fuzzy System Handbook, AP, 1994.
3. LEONHARD, W, Control of electrical drives, Springer - Verlag, Berlin, 1985.
4. M. Passino, K. y Yurkovich, S., Fuzzy Control, Addison - Wesley, 1998.
5. S. B. Dewan, G. R. Slemon, A. Straughen, Power Semiconductor Drives, 1984.
6. Using MATLAB, (online version), The MathWorks, 2000.
7. Using Simulink, (online version), The MathWorks, 2000.