

APLICACIÓN DE LA ACCIÓN ANTI-WINDUP EN UN SISTEMA DE ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO

MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez, PhD. Aldo Pardo García

Universidad de Pamplona
Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia
Tel: 57-975-5685303, Fax: 57-975-5685303 ext 156
e-mail: *jdiaz@unipamplona.edu.co, apardo13@unipamplona.edu.co*

Abstract: En este trabajo se modelan y simulan en lazo abierto y lazo cerrado, un sistema de accionamiento eléctrico controlado del motor de corriente directa. En este caso el sistema rectificador controlado - motor de CD de excitación independiente, con subordinación y límite de corriente. En una primera parte se modela y simula el sistema en lazo abierto y luego en lazo cerrado con reguladores PI convencionales de corriente y velocidad ajustados por métodos óptimos, para el sistema en cascada. Seguidamente, se sitúa el límite de corriente a la salida del regulador de velocidad y se analiza el comportamiento del sistema con regulador PI ante dicha limitación. Finalmente, se corrige la acción del windup compensándola con una acción antiwindup en el término integral del regulador. En todo el análisis desarrollado se usa la simulación como herramienta de validación que nos sirve para comparar y analizar los resultados obtenidos.

Keywords: Motor Control, PID Control, Windup, Antiwindup, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

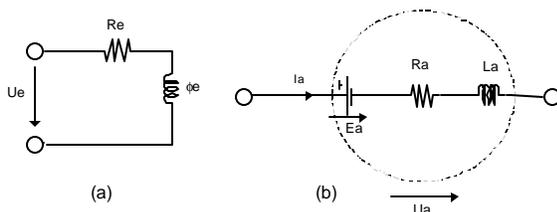
Los motores de corriente directa, todavía hoy en día son la opción común si se necesita de accionamientos eléctricos que operen en un rango amplio de velocidad. Esto es debido a sus propiedades operacionales y sus características de control, siendo la única desventaja esencial el conmutador o colector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

Existen muchos esquemas de control de motores de corriente directa. Una alternativa posible, descrita a continuación, es el control por armadura con el sistema rectificador controlado motor de corriente directa de excitación independiente, con control de velocidad con subordinación y límite de corriente pese a su relativa complejidad, posee un gran diapasón de velocidad del sistema controlado.

En este control como su nombre indica la magnitud de la corriente se subordina como lazo intermedio a la velocidad. Con esto se logra que las variaciones de par, como perturbación, afecten poco a la velocidad, pues se compensan en el lazo interno de corriente sin que repercutan en oscilaciones de la velocidad. Otra acción importante a desarrollar con la corriente es el límite de su magnitud, llegando a ser permisible sólo hasta el doble de la corriente nominal, en un período corto de trabajo sin que el motor se llegue a sobrecargar. Valores de corriente mayores pueden dañar al motor y al sistema de accionamiento en general, por lo que el límite de magnitud se torna imprescindible. Por lo que el esquema de control pierde su linealidad al estar sometido a una limitación de magnitud de la corriente de armadura. Esto trae consigo que el regulador de velocidad este sometido a una acción windup y se tenga la necesidad de implementar una acción anti-windup para contrarrestar dicho efecto.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA

Un circuito esquemático de la máquina de corriente directa se muestra en la fig. 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.



Circuito de excitación Circuito de armadura
Fig. 1. Diagramas equivalentes del motor de CD.

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

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

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

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

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

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

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

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

Donde:

R_a, R_e Resistencias de armadura y campo.

L_a Inductancia de armadura.

u_a, u_e Voltajes de armadura y campo.

e Fuerza electromotriz.

Φ_e Flujo de campo.

i_a, i_c, i_e Corrientes de armadura, carga y campo.

w, θ Velocidad y posición angular del eje.

M_e, M_c Par del motor y de la carga.

N_e Número de vueltas del dev. de campo.

k Constante de la fem y el par.

J Momento de inercia de carga y el motor.

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

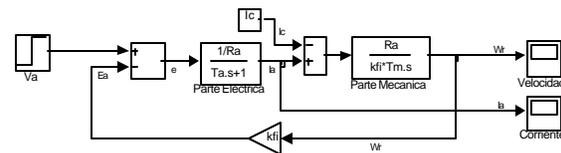


Fig. 2. Modelo Matemático del Motor de CD.

Donde:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}, \quad T_m = J \frac{R_a}{(k \cdot \Phi_e)^2} \quad \text{son las constantes de tiempo eléctrica y mecánica, respectivamente.}$$

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.

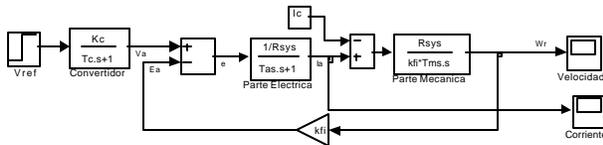


Fig. 3. Modelo del motor de CD y convertidor en lazo abierto.

Donde:

T_c, K_c Cte. de tiempo y ganancia del convertidor.

R_c, L_c Resistencia e inductancia del convertidor.

$R_{sys} = R_a + R_c, L_{sys} = L_a + L_c$ Resistencia y

Inductancia del sistema convertidor - motor.

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

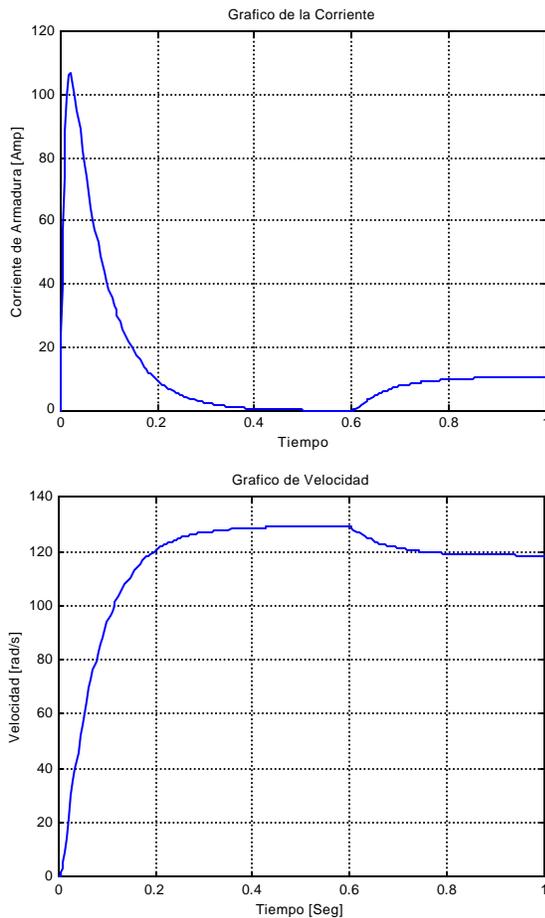


Fig. 4. Gráficas de corriente y velocidad en lazo abierto.

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

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.

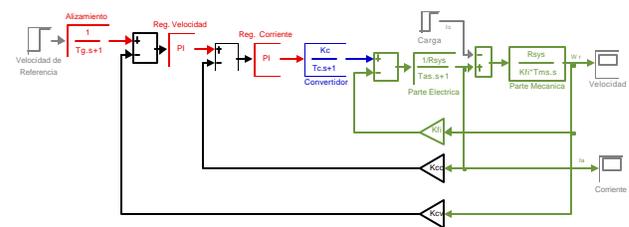


Fig. 5. Control en lazo cerrado.

Donde:

- El bloque de alisamiento 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 respectivamente.

Resultados de esta simulación obtenemos:

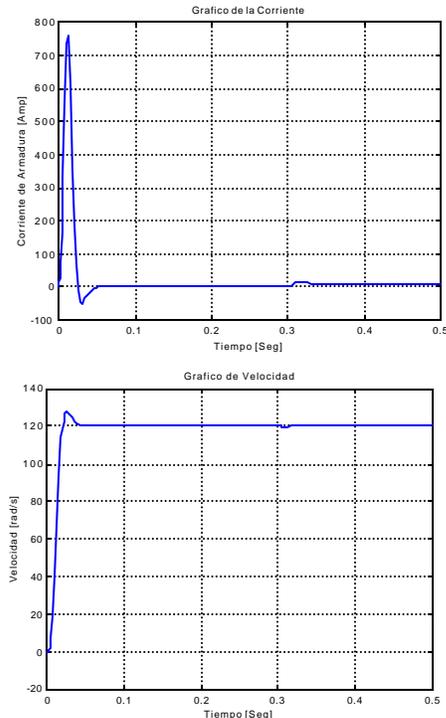


Fig. 6. Gráficas de corriente y velocidad en lazo cerrado

Como señal de 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 windup.

5. EFECTO 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”.

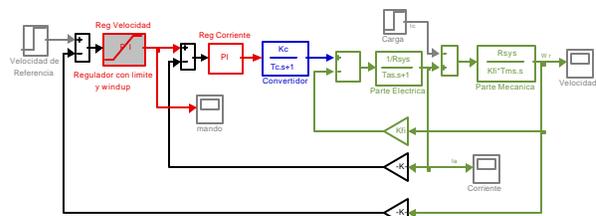


Fig. 7. Control en lazo cerrado con limitación y windup

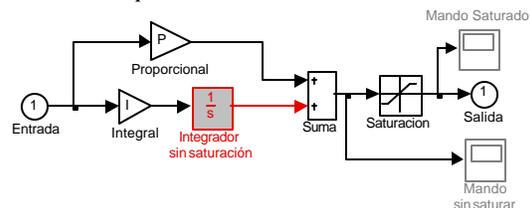
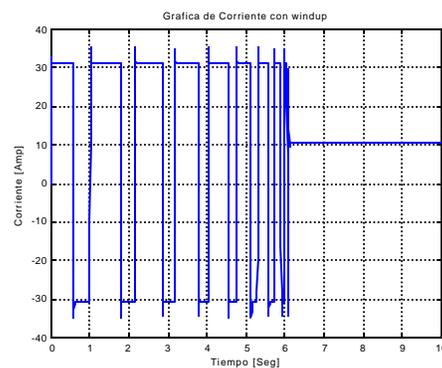


Fig. 8. Implementación del regulador PI con limitación y windup.



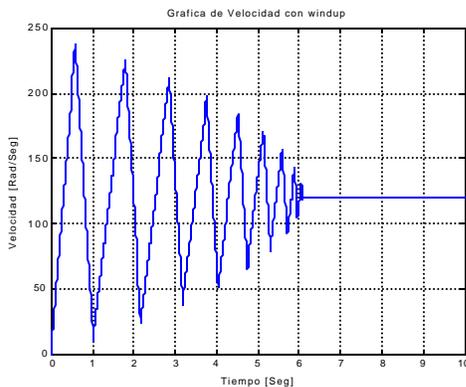


Fig. 9. Gráficas en lazo cerrado con limitación y windup

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

6. ANTI-WINDUP

Como se puede observar de la figura anterior el windup aumenta considerablemente el tiempo de establecimiento y puede llegar a producir oscilaciones antes de alcanzar el estado estable. Existen varios métodos lineales y no lineales para corregir este problema.

Una solución sencilla consiste en dejar de integrar cuando el regulador esté saturado. Al regulador de velocidad se le ha agregado el efecto de corrección “anti-windup”, con resultados satisfactorios. Como se ilustra a continuación.

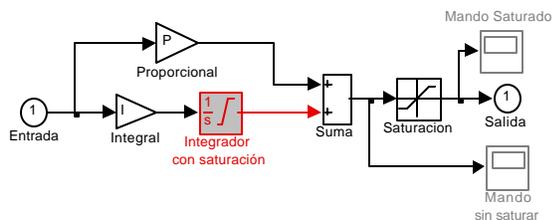


Fig. 10. Implementación del Reg. de velocidad con limitación y anti-windup

Los resultados de esta simulación con la acción anti-windup:

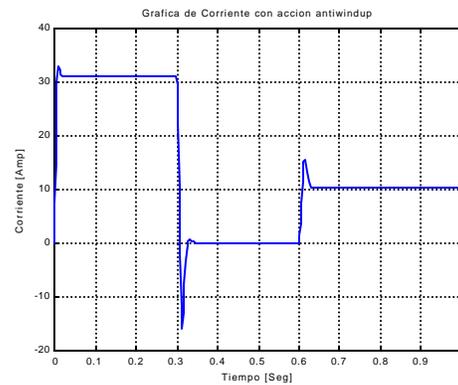


Fig. 11. Gráficas en lazo cerrado con limitación y anti-windup

Se aplicó un paso de voltaje nominal con corriente de carga igual a cero, incrementándose a la nominal en 0.6 seg.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis realizado anteriormente se puede observar que la respuesta del sistema de control mejora considerablemente, si se corrige el efecto negativo del windup, provocado por la acción integral del regulador en presencia de saturación. En el caso analizado se optó por un método no lineal de antiwindup en el cual consiste en dejar de integrar cuando la salida del regulador sobrepasa los límites de la saturación. La mejora en la respuesta se puede observar en la siguiente figura:

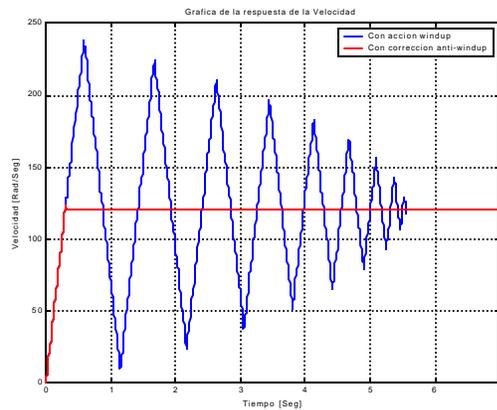


Fig. 12. Comparación de los resultados con windup y anti-windup

8. CONCLUSIONES

En el trabajo se muestra el modelaje y simulación del sistema rectificador controlado – motor de CD, en lazo abierto y cerrado con subordinación y limitación de corriente. Se manejan los conceptos de windup, anti-windup.

Fueron obtenidos las respuestas del sistema en ambos casos donde se comprueban los efectos negativos que tiene la acción windup sobre la salida del sistema de control.

Con el uso de la simulación en la aplicación desarrollada detalladamente se comprobó las mejoras obtenidas teniendo en cuenta la corrección anti-windup en el término integral del regulador.

REFERENCIAS

- [1]. Åström, K. J. “Integrator windup and how to avoid it”. Proceedings of the 1989 American control conference. 2:1693-1698, 1989.
- [2]. Campo, P. J.; Morari, M. and Nett, C. N. “Multivariable anti-windup and bumpless transfer: A general theory”. Proceedings of the 1989 American Control Conference. 2: 1706-1711, 1989.
- [3]. Fertik, H. A. and Ross, C. W. “Direct digital control algorithms with anti-windup feature”. Chicago, I.S.A, Trans., 22nd annual conf. and exhibit. (4):317-328 1967.
- [4]. Hanus, R. “A new technique for preventing control windup”. Journal A.21 (1):15-20, 1980.
- [5]. Hanus, R. “Anti-windup and bumpless transfer: a survey, Computing and Computers for Control Systems”. IMACS. 4: 3-9, 1989.
- [6]. Kothare, M. V. et al. “A Unified Framework for the Study of Anti-windup Designs”. Automática.30 (12):1869-1883, 1994.
- [7]. Larsson, J. E. “ A simple antiwindup method”. International Journal of Control.60 (5):1025-1033, 1994.
- [8]. Rundquwist, L. “Anti-reset Windup for PID Controllers”. Preprints of the 11th IFAC World Congress.8:146-151, 1990.
- [9]. Vranèiæ, D and Peng, Y. “Tutorial: anti-windup, bumpless and conditioned transfer Techniques for PID controller”. Ljubljana, J. Stefan Institute. Report DP-6947, 1994.
- [10]. Walgama, K. S.; Ronnback, S. and Sternby, J. “Generalisation of conditioning Technique for anti-windup compensators”. IEE Proceedings. Part D, 139:109-118, 1992.