

Control de Seguimiento de dos Niveles para el Sistema Convertidor de Potencia Cd/Cd Buck-Motor de Cd

José Rafael García Sánchez¹, Ramón Silva Ortigoza¹, Celso Márquez Sánchez¹,

Mayra Antonio Cruz¹, Eduardo Márquez Sánchez¹ y Víctor Hugo García Rodríguez¹.

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC. Área de Mecatrónica. Unidad Profesional

Adolfo López Mateos. C.P. 07700, México D. F., México.

Resumen

Este trabajo presenta un controlador de dos niveles (alto y bajo) que permite resolver la tarea de seguimiento de trayectorias en el sistema convertidor de potencia de CD/CD Buck-motor de CD. En el nivel alto, es un control basado en planitud diferencial para el motor de CD. Mientras que en el nivel bajo, es un control promedio también basado en planitud diferencial para el convertidor de potencia CD/CD Buck. La realización conmutada del controlador se realiza utilizando un modulador sigma-delta. Asimismo, el desempeño del controlador, en lazo cerrado, se muestra a través de simulaciones numéricas realizadas en Matlab-Simulink.

1. Introducción

En los motores de CD, usualmente, su voltaje de alimentación es suministrado vía un modulador por ancho de pulso (PWM). Sin embargo, esta forma de arrancar un motor ocasiona que su vida útil disminuya debido a la fuerte conmutación inherente del modulador. Una alternativa para lograr un arranque suave en el motor, es mediante la conexión en cascada con un convertidor de potencia CD/CD Buck. Así, en este trabajo se presenta el diseño de un control de dos niveles para solucionar la tarea de seguimiento de trayectoria en el sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera. El modelo matemático de un motor de CD y de un convertidor de potencia CD/CD Buck son presentados en la Sección 2. Mientras que en la Sección 3 y 4 se presentan, respectivamente, el diseño del controlador de dos niveles y su desempeño en lazo cerrado vía simulaciones numéricas. Finalmente, las conclusiones se dan en la sección 5.

2. Modelo matemático del sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD

Con la finalidad de diseñar el controlador de dos niveles para el sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD (ver Figura 1), en esta sección se presentan, por separado, los modelos matemáticos asociados con un motor de CD y con un convertidor de potencia CD/CD Buck.

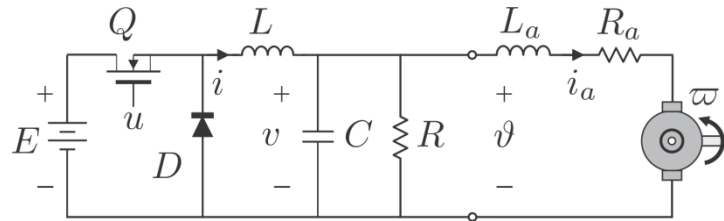


Figura 1. Sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD.

2.1. Motor de CD

El modelo matemático de un motor de CD, expresado en términos de la velocidad angular ω , está dado por:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = \vartheta - R_a i_a - k_e \omega, \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega + k_m i_a, \quad (2)$$

donde ϑ es el voltaje de entrada del motor, i_a es la corriente de armadura; k_e y k_m son la constante de fuerza contra-electromotriz y la constante de par, respectivamente; L_a y R_a son la inductancia y la resistencia de armadura, respectivamente; mientras que J es el momento de inercia del rotor y la carga y b el coeficiente de fricción viscosa del rotor. Estos parámetros, generalmente, no son proporcionados por el fabricante. Así, desde que el diseño del control de alto nivel requiere de tales parámetros, se realizó la caracterización experimental del motor de CD. Para lograrlo, se utilizó la siguiente aproximación de primer orden del modelo (1)-(2):

$$\frac{d\omega}{dt} = -\mu\omega + \gamma\vartheta, \quad (3)$$

donde

$$\mu = \frac{1}{\tau}, \quad \gamma = \frac{K}{\tau}, \quad (4)$$

y

$$\tau = \frac{JR_a}{bR_a + k_e k_m}, \quad K = \frac{k_m}{bR_a + k_e k_m}. \quad (5)$$

Después de llevar a cabo la caracterización del motor de CD, se encontraron los siguientes valores para τ y K :

$$\tau = 98 \times 10^{-3}, \quad K = 540 \times 10^{-3}. \quad (6)$$

Así, utilizando (3), (4) y (6), el modelo dinámico de primer orden asociado con el motor de CD quedó determinado por:

$$\frac{d\omega}{dt} = -10.2\omega + 5.5\vartheta. \quad (7)$$

2.2. Convertidor de potencia CD/CD Buck

El modelo promedio de un convertidor Buck está dado por:

$$L \frac{di}{dt} = -v + E u_{av}, \quad (8)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}, \quad (9)$$

donde i es la corriente del inductor L , v es el voltaje de salida del convertidor asociado con el capacitor C , R es la resistencia de carga y E es la fuente de alimentación. Mientras que u_{av} es la entrada promedio la cual satisface $u_{av} \in [0,1]$.

3. Diseño del controlador de dos niveles

En esta sección se presenta el diseño de un controlador de dos niveles que resuelve la tarea de seguimiento de trayectoria en el sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD. El controlador tiene las siguientes características:

- 1) En el nivel alto, es un control basado en planitud diferencial, ϑ , para el motor de CD y resuelve la tarea de seguimiento de velocidad angular, i.e., $\omega \rightarrow \omega^*$. A su vez, corresponde al perfil de voltaje deseado que debe seguir la salida del convertidor de potencia Buck.
- 2) En el nivel bajo, se propone un control promedio basado en planitud diferencial, u_{av} , para el convertidor Buck. Tal control asegura que el voltaje de salida del convertidor Buck siga un perfil de voltaje deseado, i.e., $v \rightarrow \vartheta$.

Con la finalidad de ejecutar la tarea de seguimiento de trayectoria en el motor de CD, los controles diseñados en los incisos 1) y 2) son interconectados entre sí. Asimismo, la implementación conmutada del controlador de dos niveles resultante se realiza vía un modulador sigma-delta.

3.1. Control de alto nivel: motor de CD

Para lograr que $\omega \rightarrow \omega^*$, en esta subsección se propone un control basado en planitud diferencial para el modelo de primer orden (7) asociado con el motor de CD. Así, reescribiendo la dinámica (7) en términos de su salida plana, $F_1 = \omega$, se obtiene:

$$\vartheta = \frac{\dot{F}_1 + \mu F_1}{\gamma}. \quad (10)$$

Si la entrada de control ϑ se escoge como:

$$\vartheta = \frac{\delta + \mu F_1}{\gamma} \quad (11)$$

y se introduce en (10), entonces el problema de seguimiento de trayectoria de velocidad angular del motor de CD se reduce a controlar el siguiente sistema:

$$\dot{F}_1 = \delta, \quad (12)$$

siendo δ una entrada de control auxiliar. Para asegurar que $F_1 \rightarrow F_1^*$ cuando $t \rightarrow \infty$, una selección apropiada para δ es la siguiente:

$$\delta = \dot{F}_1^* - k_p(F_1 - F_1^*) - k_i \int_0^t (F_1 - F_1^*) d\rho, \quad (13)$$

donde F_1^* es la velocidad angular deseada y (k_p, k_i) son constantes positivas. Tras reemplazar (13) en (12), definir el error de seguimiento como $e_m = F_1 - F_1^*$ y calcular la derivada con respecto al tiempo la expresión resultante. Se obtiene la siguiente dinámica del error de seguimiento:

$$\ddot{e}_m + k_p \dot{e}_m + k_i e_m = 0, \quad (14)$$

cuyo polinomio característico es:

$$p_{c2}(s) = s^2 + k_p s + k_i. \quad (15)$$

Igualando (15) con el siguiente polinomio estable Hurwitz:

$$p_{d2}(s) = s^2 + 2\xi_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2, \quad (16)$$

donde $(\xi_1, \omega_{n1}) > 0$, no solo se logra que $F_1 \rightarrow F_1^*$, sino también se encuentra que las ganancias k_p y k_i están dadas por:

$$k_p = 2\xi_1\omega_{n1}, \quad k_i = \omega_{n1}^2. \quad (17)$$

3.2. Control de bajo nivel: convertidor de potencia CD/CD Buck

El propósito de esta subsección es proponer un control promedio basado en planitud diferencial que permita a la salida del voltaje del convertidor Buck seguir un perfil de voltaje deseado, este último impuesto por el control de alto nivel, i.e., $v \rightarrow \vartheta$. En esa dirección, la dinámica del convertidor Buck, dada por (8)-(9), expresada en términos de su salida plana, $F_2 = v$, es la siguiente:

$$u_{av} = \frac{LC}{E}\ddot{F}_2 + \frac{L}{RE}\dot{F}_2 + \frac{1}{E}F_2, \quad (18)$$

y una propuesta de control es:

$$u_{av} = \frac{LC}{E}\eta + \frac{L}{RE}\dot{F}_2 + \frac{1}{E}F_2. \quad (19)$$

Al reemplazar (19) en (18), el problema de seguimiento de voltaje asociado con la salida del convertidor Buck se reduce a controlar el sistema dado por:

$$\ddot{F}_2 = \eta. \quad (20)$$

Para lograr que $F_2 \rightarrow F_2^*$ cuando $t \rightarrow \infty$, siendo F_2^* el perfil de voltaje deseado de la salida del convertidor, una propuesta conveniente para η es:

$$\eta = \ddot{F}_2^* - \beta_2(\dot{F}_2 - \dot{F}_2^*) - \beta_1(F_2 - F_2^*) - \beta_0 \int_0^t (F_2 - F_2^*)d\rho. \quad (21)$$

Al reemplazar (21) en (20), definir el error de seguimiento como $e_c = F_2 - F_2^*$ y calcular la derivada con respecto al tiempo la expresión resultante. Se obtiene la siguiente dinámica del error de seguimiento:

$$\ddot{e}_c + \beta_2 \dot{e}_c + \beta_1 \dot{e}_c + \beta_0 e_c = 0, \quad (22)$$

cuyo polinomio característico es:

$$p_{c2}(s) = s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0. \quad (23)$$

Tras igualar (23) con el siguiente polinomio estable Hurwitz:

$$p_{d2}(s) = (s + a)(s^2 + 2\xi_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2), \quad (24)$$

donde $(a, \xi_2, \omega_{n2}) > 0$, no solo se logra que $F_2 \rightarrow F_2^*$, sino también se encuentra que las ganancias β_0, β_1 y β_2 están dadas por:

$$\beta_0 = a\omega_{n2}^2, \quad \beta_1 = 2\xi_2 \omega_{n2} a + \omega_{n2}^2, \quad \beta_2 = a + 2\xi_2 \omega_{n2}. \quad (25)$$

3.3. Controlador de dos niveles

El objetivo de esta subsección es llevar a cabo la interconexión de los controles (presentados en las subsecciones 3.1 y 3.2) para resolver la tarea de seguimiento de trayectoria de velocidad angular en el sistema convertidor de potencia CD/CD Buck-motor de CD.

Se encontró que el control de alto nivel, asociado con un motor de CD, que logra $\varpi \rightarrow \varpi^*$ está determinado por (11) y (13). Mientras que el control de bajo nivel, asociado con un convertidor de potencia CD/CD Buck, que permite $v \rightarrow v^*$ está dado por (19) y (21). Así, la interconexión de los controles se logra al reemplazar en el control de bajo nivel (21) el control de alto nivel (11), es decir,

$$v^* = \vartheta. \quad (26)$$

Esto es, el perfil de voltaje deseado del convertidor Buck resulta ser el control del motor de CD.

Debido a que el control de bajo nivel está basado en el modelo promedio del convertidor Buck, la implementación conmutada del controlador de dos niveles se realiza utilizando un modulador. En este trabajo, tal realización conmutada se llevó a cabo con un modulador sigma-delta como sigue:

$$u = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(e)], \quad (27)$$

$$e = u_{av} - u,$$

donde se cumple que $u \in \{0,1\}$.

4. Resultados de simulación

Para mostrar el desempeño en lazo cerrado del controlador propuesto, el cual está dado por (11), (13) y (27); en esta sección se presentan resultados de simulación numérica efectuados con Matlab-Simulink.

Los parámetros del control de alto nivel son $\mu = 10.2$ y $\gamma = 5.5$. Asimismo, los parámetros del convertidor de potencia Buck, utilizados en el control de bajo nivel, están dados por $L = 10.6 \times 10^{-3}$ H, $C = 220 \times 10^{-6}$ F, $R = 100 \Omega$ y $E = 28$ V.

Por otro lado, las ganancias del control (11) y (13) se encontraron a partir de la siguiente selección de sus parámetros: $\xi_1 = 1.5$ y $\omega_{n1} = 12.25$. Mientras que para las ganancias del control (27) se eligieron los siguientes parámetros: $a = 220$, $\xi_2 = 180$ y $\omega_{n2} = 200$.

En este trabajo, la trayectoria deseada de velocidad angular es la siguiente:

$$\omega^* = 1.5 + 1.5\pi[(1 - e^{-2t})(1 + \sin(2.5t))]. \quad (28)$$

En la Figura 2 se observa que cuando $v \rightarrow \vartheta$ se logra el objetivo de control, esto es que $\omega \rightarrow \omega^*$.

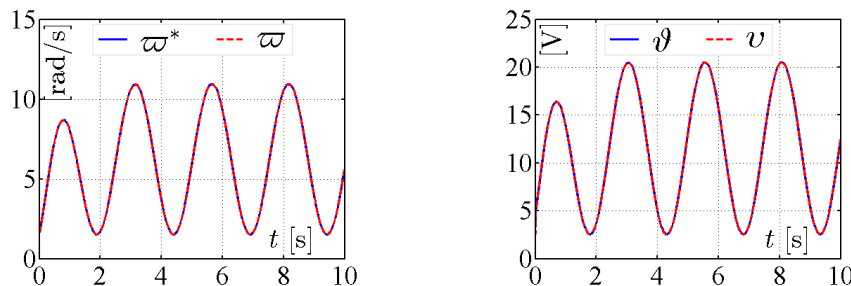


Figura 2. Resultados de simulación.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un controlador de dos niveles que resuelve la tarea de seguimiento de trayectoria en el sistema convertidor de potencia Buck-motor de CD. Los resultados de simulación, en lazo cerrado, muestran el buen desempeño del sistema.

Referencias

1. R. Silva-Ortigoza, V. M. Hernández-Guzmán, M. Antonio-Cruz y D. Muñoz-Carrillo, (2015) "DC/DC Buck power converter as a smooth starter for a DC motor based on a hierarchical control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 1076-1084 [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2014.2311821>
2. V. M. Hernández-Guzmán, R. Silva-Ortigoza y R. V. Carrillo-Serrano (2013) Control Automático: Teoría de Diseño, Construcción de Prototipos, Modelado, Identificación y Pruebas Experimentales. Ciudad de México, México. Colección CIDETEC-IPN, . [En línea]. Disponible en: <http://www.controlautomatico.com.mx>
3. H. Sira-Ramírez y R. Silva Ortigoza (2006) Control Design Techniques in Power Electronics Devices. London, U.K.: Springer-Verlag.
4. H. Sira-Ramírez y S. K. Agrawal, (2004) Differentially Flat Systems. New York, NY, USA: Marcel Dekker.