

CONTROL ROBUSTO PARA LA VELOCIDAD BIDIRECCIONAL DEL SISTEMA CONVERTIDOR BOOST-INVERSOR-MOTOR DE CD ALIMENTADO POR UN PANEL SOLAR

Alfredo Roldán Caballero
Eduardo Hernández Márquez
Cristofer Mateo Rodríguez López

Ramón Silva Ortigoza
Salvador Tavera Mosqueda
Jesús Ramírez Morales

Instituto Politécnico Nacional
CIDETEC
Área de Mecatrónica

Resumen

En el presente trabajo se diseña un control para la velocidad angular del sistema convertidor de CD/CD Boost-inversor-motor de CD alimentado por un panel solar. La estrategia de control se compone de dos etapas: Primero, se utiliza un control por modos deslizantes para regular el voltaje de salida del convertidor Boost. Segundo, a través de un PID se resuelve el seguimiento de trayectoria de la velocidad angular. La verificación del sistema en lazo cerrado es realizada con la ayuda de Matlab-Simulink en el Toolbox SimPowerSystem.

1. Introducción

Los motores de corriente directa pueden ser utilizados en diversas aplicaciones de sistemas mecatrónicos. Esto se debe, en parte, a que solo se necesita variar el voltaje de armadura para tener manejo sobre la velocidad angular. Por otro lado, el avance tecnológico para la implementación de energías renovables ha permitido que puedan ser aplicados en sistemas mecatrónicos. En particular, el control de motores alimentados por paneles solares [1] – [3]. Sin embargo, debido a la naturaleza de los convertidores electrónicos utilizados, solo se puede controlar la velocidad angular en un solo sentido. Tal limitante de movimiento puede ser superado con la integración de un inversor. Motivado por lo anterior, aquí se presenta el control de velocidad angular bidireccional para el sistema convertidor de CD/CD Boost-inversor-motor de CD alimentado por un panel solar.

El resto del trabajo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 muestra las generalidades del sistema. La Sección 3 corresponde a la estrategia de control a utilizar. En la Sección 4 se presentan los resultados de simulación del sistema en lazo cerrado. Por último, las conclusiones son dadas en la Sección 5.

2. Descripción del sistema convertidor Boost-inversor-motor de CD alimentado por un panel solar.

El panel solar entrega un máximo de voltaje de 24 V con algunas variaciones que se atenuarán con el convertidor. Se propone un motor de 24 V por lo que se utiliza un convertidor Boost, el cual podrá elevar la salida de voltaje del panel solar. Para lograr el giro bidireccional se coloca un inversor de voltaje entre la salida del convertidor Boost y el motor de CD.

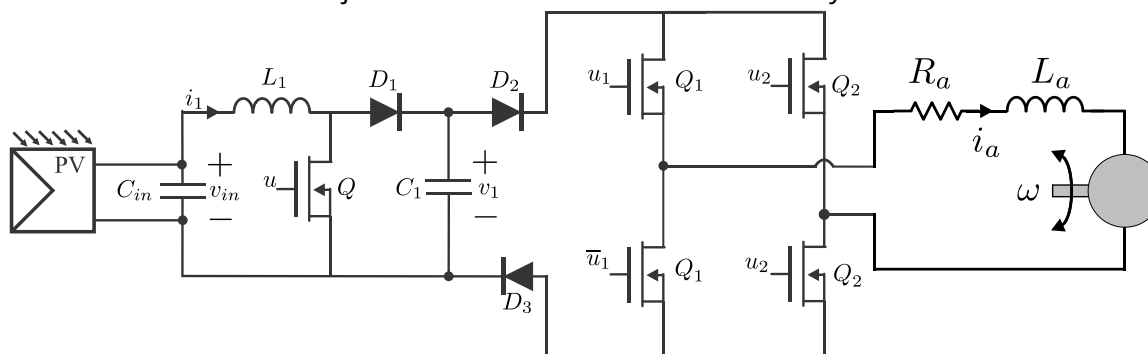


Figura 1. Sistema convertidor de CD/CD Boost–inversor–motor de CD alimentado por un panel solar.

El diagrama del sistema se muestra en la Fig. 1. De izquierda a derecha se muestra primero el panel solar que se encarga de proveer energía al sistema completo, a su salida $v_{in}(t)$ se conecta un capacitor de acoplamiento denotado por C_{in} . En segundo lugar, se muestra el convertidor electrónico de potencia Boost compuesto por un transistor Q con una entrada de conmutación u , un inductor L_1 , un diodo D_1 y el capacitor C_1 . A este último se agregan los diodos D_2 y D_3 para evitar corriente inversa del motor, la corriente que circula por el convertidor se denota como i_1 . A continuación, se conecta el puente H también llamado inversor, este se compone de por cuatro transistores Q_1 , $\bar{Q}_1$, Q_2 y $\bar{Q}_2$, accionados por las señales u_1 , $\bar{u}_1$, u_2 y $\bar{u}_2$ respectivamente. Por último, se encuentra el motor en su parte eléctrica consta de la resistencia R_a y el inductor L_a por los que circula la corriente de armadura i_a , la velocidad del motor es ω . Otros parámetros importantes del motor son: k_e , k_m , J y b , que representan la constante de voltaje contra electromotriz, la constante de torque, la inercia y el coeficiente de fricción viscosa respectivamente.

El modelo matemático promedio del sistema convertidor de CD Boost–inversor–motor de CD alimentado por un panel solar se obtiene basado en el modelo del sistema con una alimentación constante propuesto por García-Rodríguez en [4].

$$L_1 \frac{di}{dt} = -(1 - u_{av})v_1 + v_{in}, \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = (1 - u_{av})i_1 - R_a u_{iva}, \quad (2)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = v_1 u_{iav} - R_a i_a - k_e \omega, \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega, \quad (4)$$

donde $u_{av} \in [0,1]$ es la entrada promedio correspondiente a la entrada conmutada $u \in \{0,1\}$ del transistor Q. Mientras $u_{iav} \in [-1,1]$ es la entrada promedio del inversor de voltaje, esto mediante una selección adecuada de la conmutación de $Q_1, \bar{Q}_1, Q_2$ y $\bar{Q}_2$.

3. Diseño del control robusto

Como se observa en el modelo del sistema descrito en (1)–(4), es un modelo de cuarto orden. Con el objetivo de hacer más fácil el control, se ataca el diseño del control en dos etapas. Primero, se propone un control por modos deslizantes para el convertidor Boost que asegure el valor de v_1 sea suficiente para la alimentación del motor. Segundo, se realiza un control PID para el seguimiento de trayectoria de la velocidad angular asociado al subsistema inversor–motor de CD.

Control por modos deslizantes

La regulación de voltaje v_1 se realiza mediante modos deslizantes, el voltaje de referencia es $v_1 = 30$ V. Debido que el voltaje de salida del convertidor Boost es una variable de fase no mínima, la superficie deslizante que se propone está en términos de la corriente del inductor [5]:

$$s = i_1 - \bar{i}, \quad (5)$$

dónde $\bar{i}$ es la corriente en estado permanente. Como se desea controlar el voltaje de salida del convertidor la corriente debe expresarse en términos del voltaje y de acuerdo a [5] el control que resuelve la regulación de la salida de voltaje del convertidor Boost es:

$$u = \frac{1}{2}(1 - \text{sign}(s)). \quad (6)$$

Control PID

Considerando que el voltaje de alimentación del inversor v_1 es regulado a 30 V. La trayectoria deseada para la velocidad angular se propone como $\omega^*(t) = 10 \sin 0.8\pi t$. El error de seguimiento se define como $e(t) = \omega^* - \omega$. De esta manera, el control PID para el seguimiento de velocidad es,

$$u_{av} = K_P e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt}, \quad (7)$$

donde las ganancias del control se obtienen utilizando la sintonización disponible en Matlab-Simulink, obteniendo las ganancias $K_p = 26.24$, $K_i = 4788.54$ y $K_D = 0.0302$.

4. Simulación

La simulación de los controles diseñados en la sección anterior se realiza mediante el toolbox “SimPowerSystem” de Matlab-Simulink, el cual permite realizar la simulación circuital mostrada en la Fig. 2.

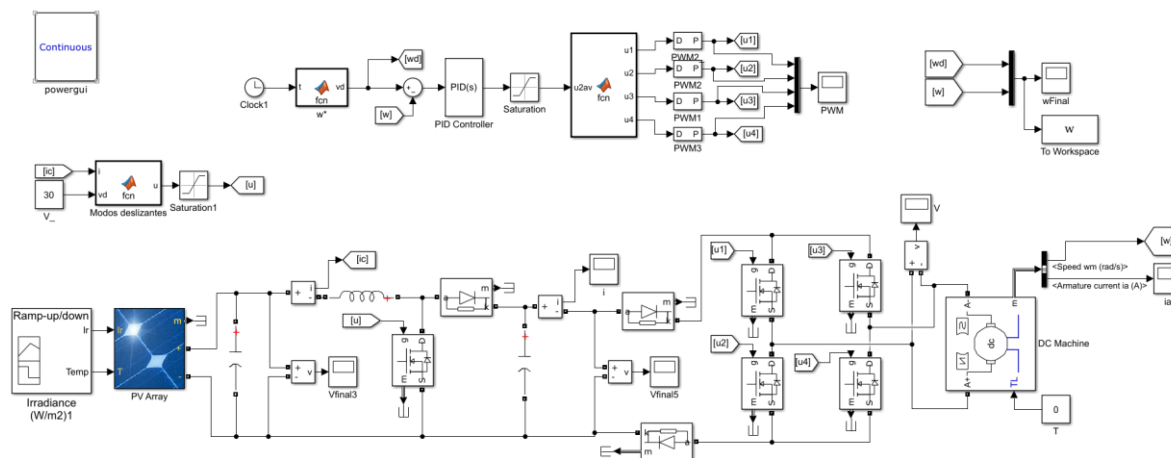


Figura 2. Diagrama circuital del sistema en lazo cerrado.

De la Fig. 2 se puede resaltar lo siguiente; en la parte superior izquierda, debajo del bloque powergui se encuentra el control por modos deslizantes, el cual tiene objetivo regular el voltaje de salida del convertidor Boost. En la parte superior central está el control PID, este se encarga del seguimiento de trayectoria de la velocidad del motor. La celda se configura como en [6], con variaciones de temperatura e irradiación dadas por las ecuaciones (9) y (10).

$$T = \begin{cases} 40\text{ }^{\circ}\text{C} & \text{para } t \leq 2\text{ s,} \\ -20t + 80\text{ }^{\circ}\text{C} & \text{para } t \in (2,3]\text{ s,} \\ 20\text{ }^{\circ}\text{C} & \text{para } t \in (3,5]\text{ s,} \\ 7.5t - 17.5\text{ }^{\circ}\text{C} & \text{para } t \in (5,7]\text{ s,} \\ 35\text{ }^{\circ}\text{C} & \text{para } t > 7\text{ s.} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_r = \begin{cases} 1000\text{ W/m}^2 & \text{para } t \leq 2\text{ s,} \\ -800t + 2600\text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (2,3]\text{ s,} \\ 200\text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (3,5]\text{ s,} \\ 300t - 1300\text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (5,7]\text{ s,} \\ 800\text{ W/m}^2 & \text{para } t > 7\text{ s.} \end{cases} \quad (9)$$

La simulación se llevó a cabo por medio del método numérico de Euler (ode1) con paso fijo de $T = 1 \times 10^{-7}$ s. Relativo a los valores de los componentes del sistema, se consideraron los siguiente: $C_{in} = 560\mu\text{f}$, $C_1 = 560\mu\text{f}$, $C_2 = 120\mu\text{f}$, $L_1 = 4.94\text{mH}$, $L_2 = 4.94\text{mH}$ y $R = 64\Omega$. Es importante mencionar que tales componentes se consideraron ideales, es decir, no se tomaron en cuenta las resistencias internas. Respecto a la frecuencia de los PWM, estos operan a una frecuencia de 50 kHz.

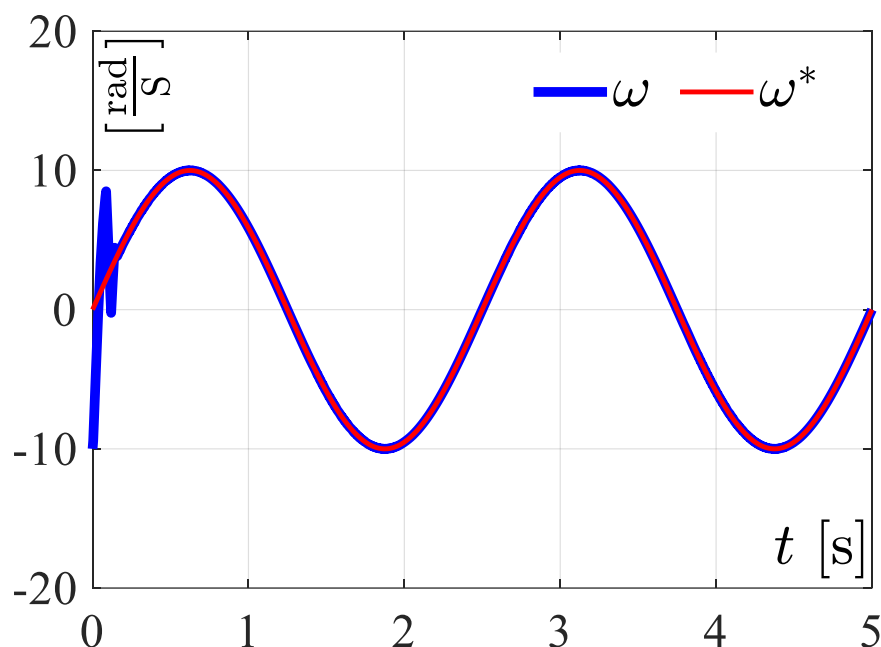


Figura 3. Respuesta de la salida $\omega(t)$ al seguimiento de trayectoria.

Como se observa en la Fig. 3, la velocidad angular ω tiende a la trayectoria deseada ω^* . Además, aunque un motor se encuentra en reposo cuando $t = 0$, para demostrar que el control es robusto, se selecciona $\omega(0) \neq \omega^*(0)$, i.e., $\omega(0) = -10 \text{ rad/s}$ y $\omega^*(0) = 0 \text{ rad/s}$.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó el control de velocidad para el sistema convertidor de CD/CD Boost-inversor-motor de CD alimentado por un panel solar. La estrategia de control se dividió en dos partes. Primero, un control por modos deslizantes para el subsistema convertidor de CD/CD Boost. Segundo, un control PID para el inversor-motor de CD. El desempeño de los controles se realizó a nivel simulación circuital vía Matlab-Simulink. Los resultados de simulación muestran que el sistema en lazo cerrado sigue inmediatamente la trayectoria deseada ω^* , validando la estrategia de control propuesto.

6. Referencias

- [1] E. Hernández-Márquez, R. Silva-Ortigoza, J. R. García-Sánchez, V. H. García-Rodríguez y C. A. Avila-Rea, "Control robusto para el sistema convertidor de CD/CD Buck–Motor de CD alimentado por un panel solar," Boletín Upiita, n° 66, 2017.
- [2] C. K. Kumar y A. N. Kumar, "Analysis of conducted EMI with a standalone solar powered," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 21, n° 5, pp. 1260-1271, 2013.
- [3] E. E. Jiménez-Toribio, A. A. Labour-Castro y F. Mu, "Sensorless control of Sepic and Cuk converters for DC motors using solar panels," de Proc. IEEE Int. Elec. Machines Drives Conf., Miami, FL, USA, May 2009.
- [4] V. H. García-Rodríguez, R. Silva-Ortigoza, E. Hernández-Márquez, J. R. García-Sánchez y H. Taud, "DC/DC Boost Converter–Inverter as Driver for a DC Motor: Modeling and Experimental Verification," energies, vol. 11, n° 8, pp. 1-15, 2018.
- [5] H. Sira-Ramírez, "Flatness and trajectory tracking in sliding mode based regulation of dc-to-ac conversion schemes," Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 5, pp. 4268-4273, 1999.
- [6] A. Roldán-Caballero, R. Silva-Ortigoza, E. Hernández-Márquez, J. R. García-Sánchez, C. A. Avila-Rea y C. N. Pérez-Catalán, "Control para un sistema convertidor de CD/CA alimentado por un panel solar," Boletín Upiita, vol. 69, pp. 1-6, 2018.