

DISEÑO DE UN CONTROL PARA LA REGULACIÓN DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR DE CD/CD BUCK MEDIANTE LYAPUNOV

Eduardo Hernández Márquez¹, Juan José de Jesús Herber Ramírez¹, Rodolfo Enrique Godínez Vite¹, Sofía Alejandra Rodríguez de la Cruz¹, Salvador Tavera Mosqueda^{2,3}, Erik Reyes Reyes⁴

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica

²Universidad Politécnica del Valle de México

³Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica del Estado de México

⁴Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC

eduardo.hernandez@itspozarica.edu.mx, juan.herber@itspozarica.edu.mx, rodolfo.godinez@itspozarica.edu.mx, sofia.rodriguez@itspozarica.edu.mx, salvador.tavera@upvm.edu.mx, ereyesr2200@alumno.ipn.mx

Boletín No. 102, 1o. de mayo de 2024

Resumen

El diseño de un control para el seguimiento de voltaje, a través de la estabilidad por Lyapunov, del convertidor electrónico de potencia de CD/CD tipo Buck es desarrollado en este trabajo. El modelo matemático del convertidor Buck se representa en espacio de estados y a través de una función candidata de Lyapunov, con una derivada ideal de esta, se fuerza a la derivada de la función de Lyapunov para que sea definida negativa y así lograr la estabilidad asintótica, obteniéndose en el proceso a la señal de control. De esta manera, se logra llevar el voltaje de salida del convertidor a un valor deseado. Simulaciones numéricas del control implementado en el modelo matemático a través de Matlab-Simulink validan lo desarrollado en este trabajo.

Palabras Clave: Control, Lyapunov, Convertidor Buck, CD/CD, Regulación de voltaje.

1. Introducción

El convertidor electrónico de potencia de CD/CD tipo Buck se destaca como uno de los convertidores más ampliamente utilizados en la industria. Esta preferencia puede atribuirse a diversas características, como su eficiencia para reducir el voltaje de entrada a niveles más bajos, su relativa facilidad de construcción, el eficaz control del voltaje de salida, su modelo matemático lineal, entre otros. Sus aplicaciones abarcan diversos campos, incluyendo sistemas de alimentación para dispositivos electrónicos, controladores de motores, sistemas de energía renovable, fuentes de alimentación conmutadas y otras situaciones donde la conversión eficiente de voltaje es fundamental.

Este trabajo está dirigido principalmente a estudiantes universitarios que cursan la materia de control automático. Se pretende llevarlos de la mano en el diseño de un control para la regulación del voltaje en el convertidor Buck.

El trabajo está organizado como sigue: en la sección 2 se describe el convertidor electrónico de potencia de CD/CD Buck. Mientras que en la sección 3 se realiza el diseño del control para el manejo del voltaje. En la sección 4, se presentan las simulaciones en Matlab-Simulink del convertidor en lazo cerrado. Finalmente, las conclusiones se dan en la sección 5.

2. Convertidor electrónico de potencia de CD/CD tipo Buck

La Figura 1, muestra el circuito del convertidor de CD/CD Buck. Cuando el transistor Q es activado por la señal de entrada u , la fuente E se conecta al resto del circuito, permitiendo que la corriente i fluya a través del inductor L , almacenando energía magnética en él. Al desactivar el transistor, el diodo D permite que la energía almacenada en el inductor se libere hacia la carga R . Además, un capacitor C se utiliza para suavizar

y mantener el voltaje de salida.

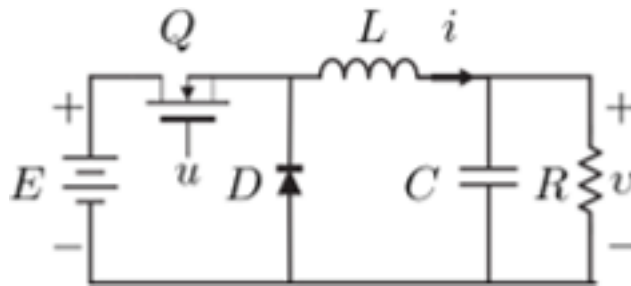


Figura 1 Convertidor electrónico de potencia de CD/CD tipo Buck.

El modelo matemático promedio con respecto a v , en espacio de estados, para el convertidor de CD/CD Buck está dado por:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{LC} \end{bmatrix} u_{av}, \quad y = [1 \quad 0]x \quad (1)$$

Siendo: $x = \begin{bmatrix} v \\ \dot{v} \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{E}{LC} \end{bmatrix}$, $C = [1 \quad 0]$ y u_{av} la señal de entrada promedio con $u_{av} \in [0,1]$.

3. Diseño del control para la regulación del voltaje

Como primer paso para el diseño del control para el manejo del voltaje del convertidor, se usará el teorema de estabilidad asintótica de Lyapunov [1].

Teorema 1. Dado un sistema dinámico representado por la ecuación diferencial ordinaria $\dot{x} = f(x)$, donde x es el vector de estado y $f(x)$ es una función vectorial continua, si existe una función de Lyapunov $V(x)$ que cumple con las siguientes condiciones:

1. $V(x)$ es continua y definida positiva.
2. La derivada de $V(x)$ a lo largo de las trayectorias del sistema es negativa definida, es decir, $\dot{V}(x) = \frac{dV(x)}{dt} \leq 0 \forall x$, y $\dot{V}(x) < 0$.

Entonces, se puede concluir que el sistema es asintóticamente estable en el sentido de Lyapunov.

El objetivo de control es que el voltaje de salida v alcance a un valor de referencia deseado v_d . La forma que se tiene para manipular v y lograr la tarea de control es a través de u en el circuito de la Fig. 1, o en este caso u_{av} del espacio de estados (1). Para determinar si la tarea de control ha sido resuelta, es necesario medir v y compararlo con v_d . De esta manera se tiene una medida del error del voltaje de salida, i.e., $e_v = v_d - v$.

Una función candidata de Lyapunov, por lo general son funciones cuadráticas como abajo se propone:

$$V(x) = \frac{1}{2} e_x^T e_x \quad (2)$$

Es fácil ver que es una función definida positiva y nótese que está dada en términos del error del vector de estado; esto, como se verá más adelante, llevará al uso de (1). La derivada de (2) con respecto al tiempo resulta en:

$$\dot{V}(x) = e_x^T \dot{e}_x \quad (3)$$

Sin embargo, no se puede asegurar que se cumple con la condición 2 del teorema 1. Lo ideal sería que la derivada de (2) tenga la siguiente forma:

$$\dot{V}(x) = -e_x^T K e_x \quad (4)$$

Donde es fácil identificar qué (4) es definida negativa. Entonces, para forzar que la derivada de (2) sea definida negativa se iguala (3) con (4) y reagrupando se obtiene:

$$-e_x^T (Ke_x + \dot{e}_x) = 0 \tag{5}$$

De (5) se tiene que $Ke_x + \dot{e}_x = 0$, i.e., $\dot{e}_x = -Ke_x$. debido a que e_x es el error del vector de estado se tiene:

$$\dot{e}_x = \dot{x}_d - \dot{x} = \dot{x}_d - Ax - Bu_{av} = -Ke_x \tag{6}$$

Como se quiere regular a v_d , la derivada en estado permanente del vector de estado es cero, y despejando a u_{dav} de (6) se tiene la ley de control:

$$u_{av} = B^{-1}(-Ax + Ke_x) \tag{7}$$

Es importante notar que B^{-1} es la inversa de B por la izquierda. Aplicando (7) a (1) resulta:

$$u_{av} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{LC}{E} \end{bmatrix} \left(- \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_v \\ \dot{e}_v \end{bmatrix} \right) \tag{8}$$

Realizando las operaciones de (8):

$$u_{av} = \frac{v}{E} + \frac{L\dot{v}}{ER} + \frac{LC}{E} (k_{21}e_v + k_{22}\dot{e}_v) \tag{9}$$

Donde k_{21} es la ganancia de la parte proporcional, k_{22} la ganancia derivativa y los otros términos eliminan dinámicas del sistema. De esta forma, la ley de control (9) es un control proporcional derivativo con pre alimentación.

4. Simulación en Matlab

Los valores que se consideran en la simulación son los siguientes: $E = 12 \text{ V}$, $L = 400 \text{ } \mu\text{H}$, $C = 1 \text{ } \mu\text{F}$, $R = 50 \text{ } \Omega$. I. Las ganancias de control son $k_{21} = k_p = 1000$, $k_{22} = k_d = 100$. La Fig. 2, muestra cómo se llevó a cabo la implementación del control (7) en el convertidor (1).

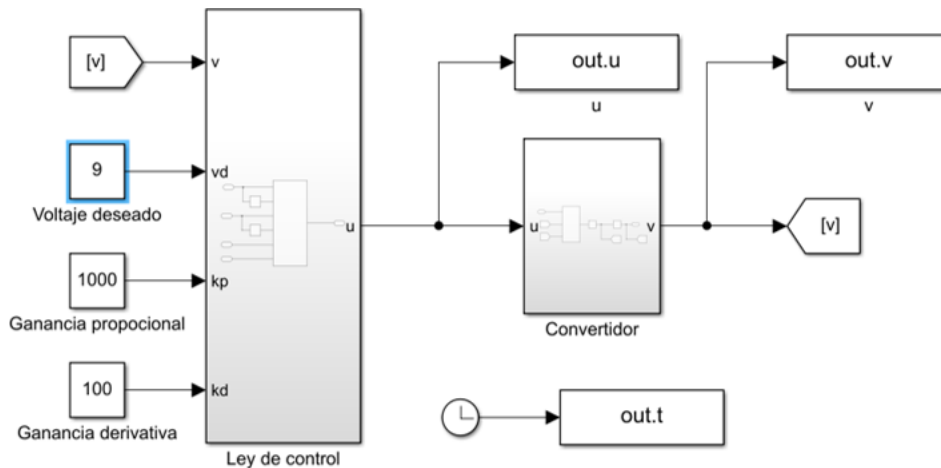


Figura 2 Convertidor de CD/CD Buck en lazo cerrado en Matlab-Simulink.

Las figuras 3 y 4 muestran los resultados de simulación para los voltajes deseados 9 y 6 volts, respectivamente.

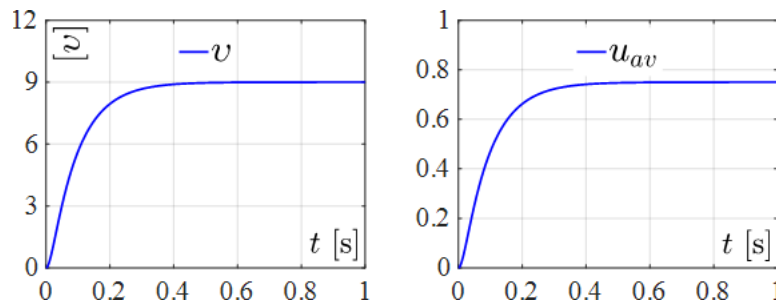


Figura 3 Voltaje de salida y acción de control del convertidor en lazo cerrado para un voltaje deseado de 9 Volts.

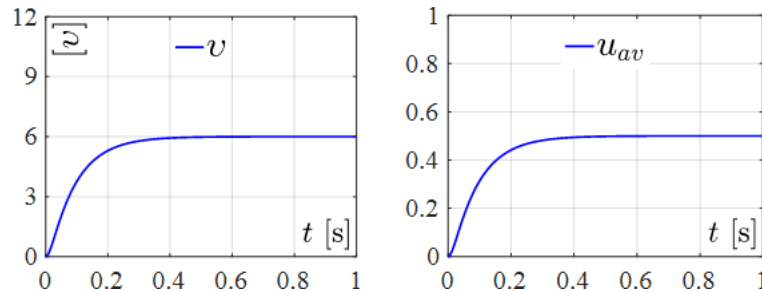


Figura 4 Voltaje de salida y acción de control del convertidor en lazo cerrado para un voltaje deseado de 6 Volts.

Como puede observarse, se logra la regulación del voltaje de salida al voltaje deseado en un tiempo moderado. La acción de control u_{av} se mantiene dentro del intervalo $[0, 1]$, respetando la dinámica del sistema. Si se requiere llegar más rápido al voltaje deseado se puede aumentar la ganancia proporcional.

5. Conclusiones

Aquí se presentó el diseño de un control a través de la teoría de Lyapunov para la regulación en el voltaje de salida del convertidor de CD/CD Buck. A través de una función candidata en Lyapunov, dada en términos del error del vector de estado, y una derivada ideal que sea definida negativa. Al forzar que la derivada de la función candidata de Lyapunov cumpla con la segunda condición del teorema de estabilidad asintótica, se obtiene la ley de control que resuelve la tarea de regulación del sistema. El control obtenido se valida en Matlab-Simulink para diferentes voltajes de referencia.

Referencias

[1] Ogata, K. (1980). *Ingeniería de control moderna* (1a. ed.). México: Prentice-Hall Hispanoamericana.

Hernández Márquez, E., Herber Ramírez, J. J. de J., Godínez Vite, R. E., Rodríguez de la Cruz, S. A., Tavera Mosqueda, S., Reyes Reyes, E. (2026). DISEÑO DE UN CONTROL PARA LA REGULACIÓN DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL CONVERTIDOR DE CD/CD BUCK MEDIANTE LYAPUNOV. *Boletín UPIITA*. año XX, (NÚM) 2026.