

Diseño Convertidor Buck-Boost DC-DC invertido con Identificación Adaptativa y Control por Localización de Polos

Resumen—En el presente documento se realiza el análisis de un convertidor Buck Boost invertido, aplicando un controlador adaptativo autoajutable para el control de su variable de salida.

Su operación consiste en realizar la identificación del sistema mediante la adquisición de datos tanto de la variable de entrada como de la variable de salida, el método a usar en la identificación es Mínimos Cuadrados Recursivos, con los parámetros identificados, se realiza el cálculo de los parámetros del controlador mediante el método de Localización de polos.

Index Terms—Convertidor Buck-Boost, Identificación Adaptativa, ubicación de polos.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores conmutados en alta frecuencia son muy usados hoy en día debido a las ventajas que ellos presentan, gracias a sus altos rendimientos y grandes potencias, sus aplicaciones se han ido incrementando en los últimos años siendo las más comunes para el control de motores eléctricos, generadores de calentamiento, etc.

El circuito de potencia Buck-Boost es un convertidor conmutado de potencia, que reúne las características tanto del conversor Buck como del conversor Boost, pudiendo elevar o reducir el voltaje en la salida con respecto al voltaje de entrada. Por tal motivo también es conocido como circuito “reductor-elevador” de tensión con polaridad opuesta, cabe recalcar que esto depende de la topología del circuito.

El valor de la tensión de salida del convertidor Buck-Boost, dependerá del ciclo de trabajo con el cual se está trabajando, como se podrá comprobar en el análisis del circuito, en el caso de que el valor del ciclo de trabajo sea del 50 % se obtendrá el mismo valor de la tensión de entrada y de acuerdo a la variación del mismo se irá reduciendo o elevando la tensión de salida.

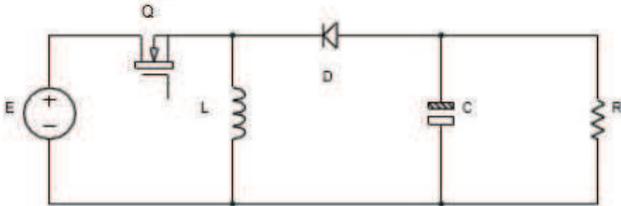


Figura 1. Convertidor Buck Boost DC DC

Para el diseño del convertidor se debe tener en cuenta la frecuencia, la corriente y el voltaje al que va a trabajar el circuito, esto conlleva a tener un criterio de selección de elementos que se emplearán en el circuito, tomando en

consideración los parámetros antes mencionados y el rango de frecuencia en que trabajan de una manera eficiente, para tener un comportamiento óptimo de acuerdo al diseño que se ha realizado.

La identificación adaptativa es una herramienta de gran ayuda para el análisis de circuitos donde los elementos son desconocidos, adquiriendo de una manera directa la función de transferencia que describa su comportamiento, a través de la obtención de datos experimentales, tanto de la entrada como de la salida del sistema. A este tipo de identificación se lo conoce como Identificación en línea a través de un algoritmo.

II. EL CONVERTIDOR BUCK-BOOST DC-DC

El comportamiento del Buck Boost debido a la activación y desactivación del transistor Q (Figura 1.), se divide en dos modos de operación. Durante la activación del transistor Q, la fuente E se encuentra conectada directamente a la bobina L permitiendo energizarla, el flujo de la corriente pasa a través de la misma y así de esta manera almacenará energía, como se puede observar en la Figura 1, el diodo D restringe el paso de la corriente hacia el capacitor C y la carga R. Durante la desactivación del transistor la fuente de entrada queda desconectada del circuito y la energía anteriormente almacenada en la bobina L es entregada directamente hacia el capacitor C y la carga R. En la conmutación del transistor se debe tener muy presente el dimensionamiento adecuado de los elementos del circuito, especialmente la bobina y el capacitor.

II-A. Análisis del comportamiento del Circuito Buck-Boost

El flujo permanente de la corriente a través del inductor permitirá el funcionamiento del circuito en **modo continuo**, si en algún momento, la corriente que circula a través la bobina llegara a anularse entraría a trabajar en **modo discontinuo**. En un tiempo T_{on} se dará la activación del transistor Q (Figura 2), la corriente de la entrada circula directamente a través de la bobina como se puede observar en la Figura 2. el diodo D da un corte de flujo de corriente, por tal motivo la bobina almacena la energía entregada por la fuente de entrada E.

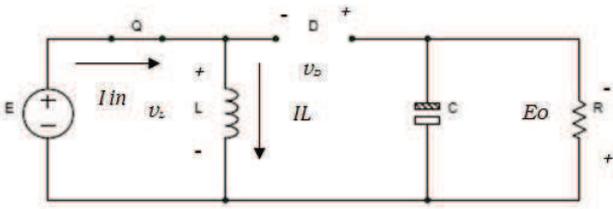


Figura 2. Activación del Transistor Q

La desactivación del transistor Q (Figura 3) se dará en un tiempo determinado T_{off} , donde la bobina queda directamente conectada al capacitor C y a la carga R, debido a la polarización directa del diodo D, en este ciclo, la energía anteriormente almacenada en la bobina L, pasa a descargarse a través de estos dos elementos como se puede observar en la Figura 3.

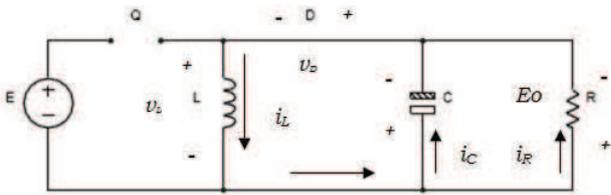


Figura 3. Desactivación del Transistor Q

De acuerdo al análisis de los dos circuitos se puede observar en la Figura 4 como se comporta la corriente tanto en el transistor Q, en el diodo D y principalmente en la bobina L, el cual permite trabajar en modo continuo durante el ciclo de activación y desactivación del transistor Q.

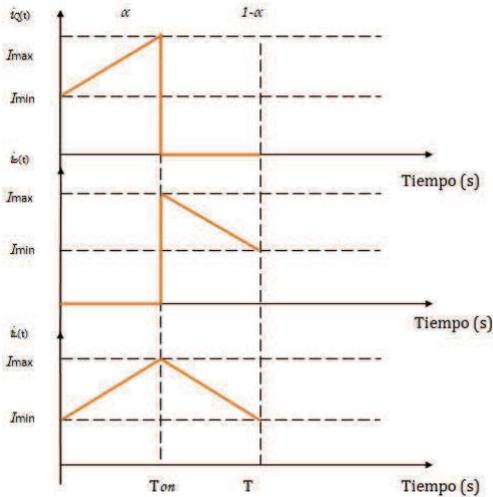


Figura 4. Corriente en Q,D,L

De acuerdo a la Figura 2 y Figura 3 se obtiene:

$$I_{IN} = I_Q \quad (1)$$

$$I_D = I_O \quad (2)$$

Con respecto al comportamiento de la corriente en la Figura 4 las ecuaciones 1 y 2 se obtiene:

$$I_Q = \alpha I \quad (3)$$

$$I_D = (1 - \alpha) \cdot I_L \quad (4)$$

Reemplazando las ecuaciones 3 y 4 en las ecuaciones 1 y 2 se obtiene:

$$I_{IN} = \alpha I_L \quad (5)$$

$$I_D = (1 - \alpha) \cdot I_L \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación 2 en la ecuación 6 y despejando I_L en la ecuación 5 y reemplazando en la ecuación 6 se obtiene:

$$I_O = \frac{(1 - \alpha) \cdot I_{IN}}{\alpha} \quad (7)$$

Donde:

α es el ciclo de trabajo.

I_O es la corriente de salida.

I_{IN} es la corriente de entrada.

Asumiendo que la misma potencia de entrada se deberá entregar a la salida del circuito se tendrá las siguientes ecuaciones:

$$V_{IN} \cdot I_{IN} = V_O \cdot I_O \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación 7 en la ecuación 8 y despejando el voltaje de salida V_O :

$$V_O = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \cdot V_{IN} \quad (9)$$

Donde:

α es el ciclo de trabajo.

V_O es el voltaje de salida.

V_{IN} es el voltaje de entrada.

III. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Para el sistema de estructura variable que se está analizando en el caso del circuito del Buck Boost, como se han mencionado anteriormente se tienen dos estados, el primer estado es cuando el valor de conmutación (u) toma el valor de 1, se obtiene el circuito de la Figura 2. De donde de acuerdo a las leyes de Kirchoff se obtienen las siguientes ecuaciones

$$E = V_L \quad (10)$$

$$\frac{E}{L} = \frac{dI_L}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{C \cdot dv_c}{dt} = -\frac{v_C}{R} \quad (12)$$

El segundo estado se lo observa en la Figura 3 cuando el valor de conmutación (u) toma el valor de 0, obteniendo:

$$L \frac{di_L}{dt} = v_c \quad (13)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -I_L - \frac{v_C}{R} \quad (14)$$

El comportamiento del sistema estará representado por:

$$\frac{di_L}{dt} = (1 - u) \frac{v_c}{L} + u \cdot v_{IN} \quad (15)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -(1 - u) \cdot \frac{I_L}{C} - \frac{v_C}{R} \quad (16)$$

IV. IDENTIFICACIÓN ADAPTATIVA

Para la identificación del sistema se ha realizado un algoritmo de MÍNIMOS CUADRADOS RECURSIVOS, donde el vector θ , se calcula a partir de los resultados obtenidos en el instante N-1 y de los datos actuales obtenidos en las entradas y salidas, es decir en el instante N. Para la identificación del sistema se debe seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar

$$\theta(k) = [0]^T y P(k) = \alpha I \text{ donde } 1000 \leq \alpha \leq 10000 \quad (17)$$

2. Conformar el vector:

$$\varphi^T(k+1) \quad (18)$$

3. Calcular $L(k+1)$ mediante la ecuación:

$$L(k+1) = \frac{P(k)\varphi(k+1)}{\lambda + \varphi^T(k+1)P(k)\varphi(k+1)} \quad (19)$$

4. Obtener los nuevos valores de $y(k+1)$ y de $u(k+1)$
5. Calcular el error en la estimación:

$$e(k+1) = y(k+1) - \varphi(k+1)\theta(k) \quad (20)$$

6. Calcular los nuevos parámetros estimados:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + L(k+1)e(k+1) \quad (21)$$

7. Actualizar la matriz de covarianza:

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} [I - L(k+1)\varphi^T(k+1)]P(k) \quad (22)$$

8. Actualizar el vector de medidas: $\varphi(k+2)$
9. Hacer $k = k+1$ y regresar al paso 3.

Donde:

λ : Es el factor de olvido $0,95 \leq \lambda \leq 1$

$P(k+1)$: Es la matriz de covarianza

$L(k+1)$: Es el factor de correlación del error en la estimación.

I : Es la matriz identidad.

V. CONTROL POR ASIGNACIÓN DE POLOS

Se diseña el control por asignación de polos en lazo cerrado para obtener los polos en el lugar deseado dependiendo del funcionamiento, se toma la ecuación característica de la función de transferencia y se compara con los polos del sistema, de esta manera se obtendrán los valores de los polos deseados. La Figura 5 muestra el bloque del controlador ($\frac{S(z)}{R(z)}$) y al bloque del sistema ($\frac{B(z)}{A(z)}$) en lazo cerrado.

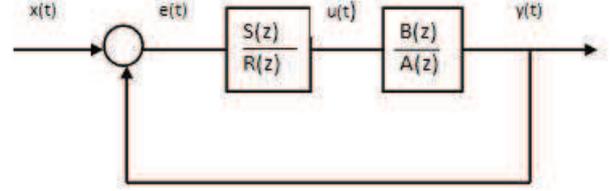


Figura 5. Estructura del control

Por ser una planta de segundo orden la función de transferencia del controlador es:

$$G_r(z) = \frac{S(z)}{R(z)} = \frac{S_0 z^2 + S_1 z + S_2}{(z-1)(z+r)} \quad (23)$$

Cabe mencionar que el término $\frac{1}{z-1}$, es un integrador, el cual permite tener el seguimiento a una señal de referencia (setpoint), buscando que el error en estado estacionario sea cero, a pesar de las incertidumbres en los parámetros que presente la planta.

Al operar el diagrama de bloques para tener la función de transferencia en lazo abierto:

$$y(s) = \frac{\frac{S(z)B(z)}{R(z)A(z)}}{1 + \frac{S(z)B(z)}{R(z)A(z)}} \quad (24)$$

Donde la ecuación característica de $y(s)$ es:

$$\Delta_r(z) = A(z)R(z) + S(z)B(z) \quad (25)$$

La ecuación característica para la localización de polos para el control en lazo cerrado toma la forma:

$$\Delta(z) = z^2(z^2 + p_1 z + p_2) \quad (26)$$

La planta al ser de segundo orden, su función de transferencia es:

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (27)$$

Para la obtención de los parámetros de control de acuerdo a la ecuación 25 se realiza el siguiente procedimiento:

$$(z^2 + (r-1)z - r)(z^2 + a_1 z + a_2) + (S_0 z^2 + S_1 z + S_2)(b_1 z + b_2) = 0 \quad (28)$$

Donde desarrollando la ecuación 28 para cada valor de z se obtiene:

$$z^4 \Rightarrow 1 = 1 \quad (29)$$

$$z^3 \Rightarrow a_1 + (r - 1) + S_0 b_1 = p_1 \quad (30)$$

$$z^2 \Rightarrow a_1(r - 1) + a_2 - r + S_0 b_2 + S_1 b_1 = p_2 \quad (31)$$

$$z \Rightarrow a_2(r - 1) - a_1 r + S_1 b_2 + S_2 b_1 = 0 \quad (32)$$

$$z^0 \Rightarrow -r a_2 + S_2 b_2 = 0 \quad (33)$$

Pasando a matriz se obtiene:

$$\begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b_2 & b_1 & 0 & a_1 - 1 \\ 0 & b_2 & b_1 & a_2 - a_1 \\ 0 & 0 & b_2 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 - a_1 + 1 \\ p_2 + a_1 - a_2 \\ a_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Para el cálculo de polos deseados con el polinomio discreto es:

$$p_1 = -2e^{-\xi\omega T} \cos(\omega T \sqrt{1 - \xi^2}) \quad (35)$$

$$p_2 = e^{-2\xi\omega T} \quad (36)$$

Donde

ξ : Coeficiente de amortiguamiento

ω : Frecuencia natural

T: tiempo de muestreo

Por lo tanto la ecuación característica para la localización de polos es:

$$\Delta(z) = 1z^2 - p_1 z - p_2 \quad (37)$$

Para el control del Buck Boost se tiene:

$$\xi = \sqrt{\frac{\log(Mp/100)^2}{\log^2(Mp/100) + \pi^2}} \quad (38)$$

$$\omega = \frac{4}{\xi * T} \quad (39)$$

Donde

Mp: Representa el máximo pico

VI. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación del Buck Boost se han tomado los siguientes valores de diseño, el capacitor será de $68\mu\text{F}$, la bobina de 4.4mH y la carga de 150Ω , un voltaje de entrada de 16v y un ciclo de trabajo del 50% .

Sin tomar en cuenta los elementos del circuito se ha realizado la adquisición de datos de la corriente de entrada, así como de la salida, se procesó a través del AVR ATMEGA328P y mediante un algoritmo se ha realizado la identificación adaptativa, siguiendo los pasos descritos en la sección IV, obteniendo los siguientes resultados:

$$G(z) = \frac{0,0007278z + 0,0000624}{z^2 - 0,9502z + 0,1913} \quad (40)$$

Aplicando una entrada escalón a la función discreta de la ecuación 40 se obtiene:

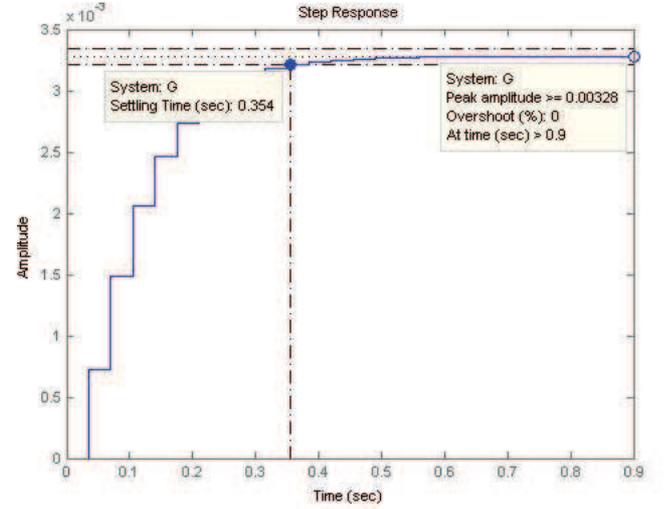


Figura 6. Respuesta a una entrada Paso

Con la función de transferencia obtenida a través de la identificación adaptativa, se procede a realizar el controlador.

Conociendo que el sistema tiene un máximo pico del 0% y un tiempo de estabilización de 0.354s , como se observa en la Figura 6. Los polos dominantes se diseñaron de tal manera, que la planta en lazo cerrado tenga un máximo pico de 10% y un tiempo de estabilización menor a 0.4s .

Reemplazando los valores de diseño del máximo pico y del tiempo de estabilización en las ecuaciones 38 y 39 respectivamente se obtiene:

$$\xi = 0,516 \quad (41)$$

$$\omega = 19,345 \quad (42)$$

La ecuación de la planta se puede escribir como:

$$G(z^{-1}) = \frac{0,0007279z^{-1} + 0,0000624z^{-2}}{1 - 0,9502z^{-1} + 0,1913z^{-2}} \quad (43)$$

De acuerdo a las ecuaciones 35 y 36 los valores de p_1 y p_2 son:

$$p_1 = -1,426 \quad (44)$$

$$p_2 = 0,6065 \quad (45)$$

$$\Delta z = z^2(z^2 - 1,426z + 0,6065) \quad (46)$$

Para obtener los parámetros del controlador se obtiene mediante la siguiente matriz:

VII. CONCLUSIONES

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7e^{-3} & 0 & 0 & 1 \\ 0,6e^{-4} & 0,7e^{-3} & 0 & -0,8 \\ 0 & 0,6e^{-4} & 0,7e^{-3} & 1,1 \\ 0 & 0 & 0,6e^{-4} & -0,1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,52 \\ -0,53 \\ 0,19 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Por lo tanto los valores obtenidos son:

$$S_0 = 624,24 \quad S_1 = -711 \quad S_2 = 214,25$$

$$r = 0,0698$$

[1], [2], [3]

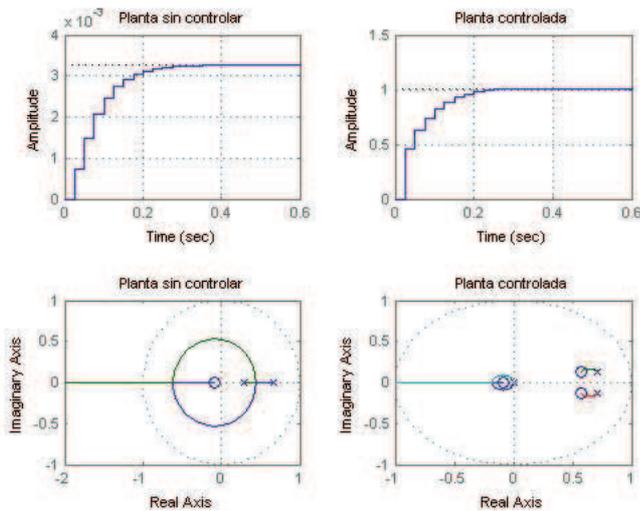


Figura 7. Respuesta del controlador

La implementación del prototipo del circuito del Buck Boost, se encuentra en la Figura 8.

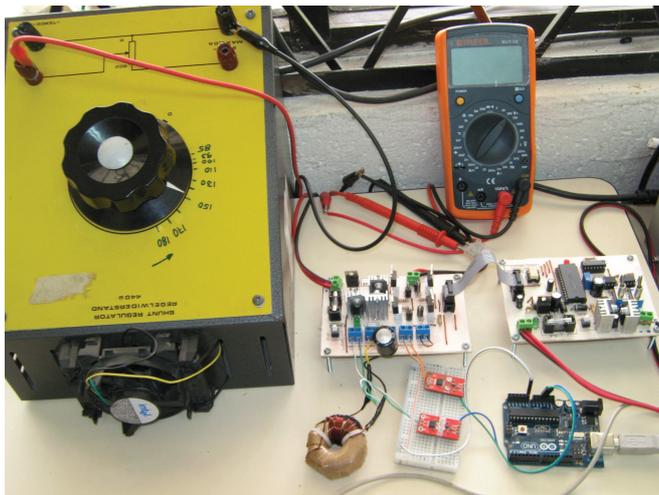


Figura 8. Circuito Implementado

La identificación adaptativa se realizará cada vez que la carga va variando mediante el algoritmo de Mínimos Cuadrados Recursivos, y el control se realizó manteniendo el valor de los polos dominantes.

- El valor del voltaje de la salida esta claramente expresado en relación al ciclo de trabajo, al obtener un ciclo de trabajo de 50 % el valor será similar al voltaje de entrada, para obtener una disminución en la salida del convertor se deberá tomar un valor menor al 50 % y así mismo para obtener un valor mayor se deberá tomar un valor mayor al 50 %
- Los sobrepicos generados en la bobina pueden afectar mucho a los demás elementos del circuito, es por tal motivo que se debe tener en consideración un elemento de supresión de picos para protección de los elementos, ya que estos pueden ser demasiado elevados y generar varios problemas.
- La principal ventaja de la identificación adaptativa es la obtención de los parámetros de la función de transferencia, al cambiar el valor de voltaje de entrada o la carga, cambiará el valor de la función de transferencia, el algoritmo permitirá obtener directamente el modelo matemático sin necesidad de conocer los elementos que lo conforman.
- El control con la localización de polos, permite obtener el comportamiento de una planta, ajustando los valores de los parámetros de la función de transferencia de la misma sin controlar, con los valores obtenidos en el controlador.

REFERENCIAS

- [1] C. C. Naira Hovakimyan, *Adaptive Control Theory*.
- [2] M. Otúzar, "Diseño y construcción de convertidores dc-dc para control de ultracapacitores en vehículo eléctrico," 2002.
- [3] A. Peña, "Control de sistemas dinámicos."
- [4] C. Castro, "Control en tiempo real de convertidores electrónicos," 2009.
- [5] L. García, "Sistema de control avanzado," 2010.
- [6] E. F. G. Garcerá, *Convertidores Conmutados: Circuitos de Potencia y Control*.
- [7] J. C. J. Blanes, A. Garrigos, "Convertidores dc-dc."
- [8] H. López, *Control por Computador, Diseño y Realización Práctica*, U. de Oviedo, Ed.
- [9] —, "Análisis e implementación de un sistema de control adaptativo en tiempo real basado en microcomputador," 1989.
- [10] R. Burns, *Advanced Control Engineering*, 2001.
- [11] M. J. L. S. Francisco Rodriguez Rubio, *Control Adaptativo y Robusto*, 1996.