

Implementación de un control deslizante y su efecto en la dinámica y la robustez del convertidor buck

Jaime P. Ayala Taco
Jorge L. Hernández Bravo
Susset Guerra Jiménez
Alexander Fernández Correa

Recibido: Mayo 2011

Aprobado: Junio 2011

RESUMEN / ABSTRACT

En este trabajo se presenta la implementación de un control por modo deslizante (CMD) para un convertidor DC-DC Buck. Un breve análisis de la estructura de control es explicado. El modelo de simulación del convertidor con su circuito de control fue construido en Matlab®/Simulink. Se realiza una implementación práctica a partir de la construcción de un prototipo de convertidor Buck, controlado desde una PC con Matlab®/Simulink/Real-Time Windows Target, utilizando la tarjeta NI-PCI-6221. Se acomete un estudio de la respuesta dinámica del convertidor, mostrándose la robustez en el desempeño de dicho sistema.

Palabras claves: control deslizante, convertidores DC-DC, respuesta dinámica, robustez.

The focus of this paper is on the implementation of sliding mode control (SMC) for Buck converter. A brief analysis of the control structure is explained followed by a block diagram, showing the internal structure of the control loop. The simulation model with its control was wild-up in Matlab®/Simulink. Once the circuit was wild-up, the study of the dynamic response controlled by SMC is done. Disturbances and robustness are analyzed.

Keywords: sliding control, DC-DC converters, dynamic response and robustness.

Effect of Implementing Sliding Mode Control on the Dynamic Behaviour and Robustness of Buck Converter

INTRODUCCION

La tecnología de convertidores CD-CD se ha desarrollado a un ritmo vertiginoso y son ampliamente empleados en aplicaciones industriales tales como drivers para motores CD, alimentación de sistemas computacionales y equipamiento de comunicaciones, generación de energía eléctrica de potencia por métodos no convencionales como la obtenida a partir de células de combustibles o fotovoltaicas, balastos electrónicos para sistemas de iluminación con lámparas HID y leds, etc. Los convertidores CD-CD son de naturaleza no lineal. El diseño de controles de alto desempeño, para ellos, es un reto que involucra tanto a los ingenieros de control como a los de electrónica de potencia. En general, un buen control para un convertidor CD-CD siempre asegura la

estabilidad en condiciones de operación arbitrarias, así como una buena respuesta en término a rechazo a variaciones en la carga, cambios en la tensión de entrada e incertidumbre en los parámetros.

Un gran número de esfuerzos se han realizado en cuanto a técnicas de modelado y control de varios convertidores CD-CD. [1],[2].

Aplicaciones lineales clásicas se basan en obtener ecuaciones promediadas de espacio de estado. Desde este modelo promedio, se introducen posibles perturbaciones en las variables de estado alrededor del punto de operación y se obtienen ecuaciones de estado de pequeña señal. Sobre la base de estas ecuaciones, se pueden obtener funciones transferenciales lineales de la planta en lazo abierto. Los procedimientos de diseño de controladores lineales para estos modelos son bien conocidos [3], [4]. Sin embargo, estos métodos no garantizan estabilidad para grandes variaciones de la carga y la tensión de entrada.

El control por modos deslizantes [2] para sistemas de estructura variable es una aplicación no lineal efectiva para los convertidores CD-CD por presentar dicha naturaleza. Varios estudios en la aplicación de control por modos deslizantes en convertidores CD-CD se han reportado en las décadas pasadas utilizando diferentes superficies. Todos esos métodos tienen en común varias ventajas, las cuales incluyen estabilidad ante variaciones de la carga y la tensión de alimentación, buena respuesta dinámica e implementación simple [5], [6], [7]. El principal problema existente en estos métodos es que la frecuencia de conmutación es variable, reportándose en la literatura estudios sobre la atenuación del mismo [8].

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se introduce el modelo del convertidor y se resume la metodología de control deslizante para el proceso en cuestión. En la sección 3 se describe la planta experimental donde se prueban los resultados y finalmente se analizan los resultados de las pruebas, para realizar las conclusiones en la sección 4

2. CONTROL POR MODO DESLIZANTE

2.1 Particularidades del método.

Un sistema de control con estructura variable, puede ser representado por:

$$\dot{x} = f(X, t, u) \quad (1)$$

Donde X es un vector columna, f es un vector de funciones, ambos de dimensión N y u es el control escalar del sistema. El vector función f es discontinuo en la superficie $s(X, t) = 0$. Por ende se puede considerar que:

$$f(X, t, u) = \begin{cases} f^+(X, t, u^+) & \text{para } s \rightarrow 0^+ \\ f^-(X, t, u^-) & \text{para } s \rightarrow 0^- \end{cases} \quad (2)$$

Donde la entrada escalar discontinua u está dada por:

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{para } s(X) > 0 \\ u^- & \text{para } s(X) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Se considera el sistema en modo deslizante si su punto representativo se mueve en la superficie $s(X, t) = 0$, la cual es llamada superficie de deslizamiento.

2.1.1 Condición de existencia

Para garantizar la existencia del régimen deslizante, las trayectorias de fase de las dos subestructuras correspondientes del vector función f deben estar dirigidas hacia la superficie de deslizamiento $s(X, t) = 0$ en una pequeña región cercana a la superficie.

En otras palabras, acercándose a la superficie de deslizamiento desde puntos donde $s < 0$, el correspondiente vector de estado de velocidad f debe estar dirigido hacia la superficie de deslizamiento, y debe pasar lo mismo cuando se consideran puntos por encima de la superficie para el vector de estado de velocidad f^+ . Es decir:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} f^+ < 0 & \quad \lim_{s \rightarrow 0^+} \nabla_s f^+ < 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^-} f^- > 0 & \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \nabla_s f^- > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Donde ∇s es el gradiente de la superficie s .
 Dado que:

$$\nabla s f = \sum_{i=1}^N \frac{\partial s}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{ds}{dt} \quad (5)$$

La condición de existencia del régimen deslizante bajo las ecuaciones (4) y (5) se transforma en:

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0^+} \frac{ds}{dt} < 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0^-} \frac{ds}{dt} > 0 \end{aligned} \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{ds}{dt} < 0 \quad (6)$$

Siendo la inecuación (6) válida dentro de la totalidad del espacio de estado y no sólo en una región infinitesimal alrededor de la superficie de deslizamiento. Por lo que el cumplimiento de la condición anterior es suficiente para que el sistema alcance la superficie de deslizamiento.

2.1.2 Condición de alcance

Siendo $[X^+]$ y $[X^-]$ los puntos representativos en estado estacionario correspondientes a las entradas u^+ y u^- respectivamente. Una condición simple y suficiente para verificar el alcance de la superficie deslizante está dada por:

$$[[X^+] \in s(X) < 0, [[X^-] \in s(X) > 0 \quad (7)$$

En otras palabras, si el punto de estado estacionario para una subestructura pertenece a la región del plano de fase reservada a la otra subestructura, entonces tarde o temprano el punto representativo del sistema alcanzará la superficie de deslizamiento.

2.1.3 Análisis de estabilidad

El análisis de la estabilidad para sistemas de segundo orden se garantiza si la trayectoria del mismo, bajo el régimen deslizante, se dirige hacia un punto de equilibrio estable. La inspección simple del plano de fase para el sistema en cuestión y la descripción de la superficie de deslizamiento posibilitan dar un criterio correcto sobre el análisis.

En sistemas de órdenes mayores que dos, el plano de fase no es de utilidad valorando la estabilidad. Para los mismos se hace uso de una ley de control equivalente, la cual describe el comportamiento de los mismos en el régimen deslizante, y junto a su modelo se analiza su estabilidad [2], [9], [10], [11].

2.2 Control deslizante para el convertidor Buck

Un modelo matemático para el convertidor Buck está dado por el sistema de ecuaciones (8), cuyos parámetros se referencian en la Tabla 1.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_1}{LC} - \frac{x_2}{RC} + \frac{V_s}{LC}u - \frac{V_o}{LC} \end{cases} \quad (8)$$

Siendo V_s la componente promedio de la tensión de alimentación al circuito y V_o el punto de operación deseado en la tensión de salida.

Las variables de estado que se han seleccionado son:

$$\begin{cases} x_1 = v_o - V_o \\ \dot{x}_2 = \frac{dx_1}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

La superficie de deslizamiento propuesta está dada por la siguiente expresión:

$$s(X, t) = c_1 x_1 + x_2 = 0 \quad (10)$$

El plano de fase resultante de las dos subestructuras y las dos regiones en las cuales la superficie de desplazamiento divide al plano, se muestran en la Fig. 1.

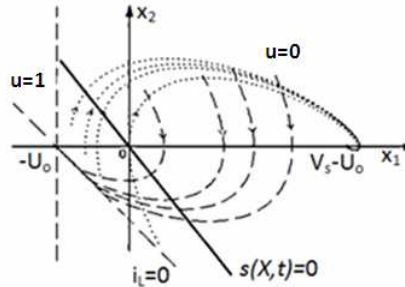


Fig. 1: Subistema de trayectorias y línea de deslizamiento para el convertidor Buck.

Haciendo uso del plano de fase, para las subestructuras de la topología considerada, se encuentra intuitivamente una ley de control que garantiza la existencia y el alcance del régimen deslizante.

$$u = \begin{cases} 0 & \text{para } s(X) > 0 \\ 1 & \text{para } s(X) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

De hecho, se observa fácilmente como, bajo la acción de la mencionada ley de control, el punto de equilibrio de la subestructura correspondiente a $u = 1$ se localiza en la región correspondiente a $u = 0$, por lo que la trayectoria de estado del sistema cruza la línea de deslizamiento y viceversa.

2.2.1 Condición de Existencia

Analizando con precisión la existencia del régimen deslizante para el convertidor Buck, acorde a la teoría del control de modo deslizante se obtiene la condición de existencia del régimen deslizante como:

$$s(X) = \begin{cases} \mathbf{V_s A X} + \mathbf{V_s B u^+} + \mathbf{V_s D} < 0 & \text{para } 0 < s(X) < \varepsilon \\ \mathbf{V_s A X} + \mathbf{V_s B u^-} + \mathbf{V_s D} > 0 & \text{para } -\varepsilon < s(X) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Donde ε es un número arbitrario positivo en la vecindad de cero.

Combinando las ecuaciones anteriores con la descripción en espacio de estado del modelo se llega a dos ecuaciones (λ_1 y λ_2) que definen, en base a los parámetros del convertidor, la región en el plano de fase donde se mantiene el régimen deslizante.

Una inspección de las ecuaciones muestra la relación de ε_1 con las dimensiones de la región de existencia del régimen deslizante, y a sabiendas de su vínculo con la velocidad de respuesta en dicho régimen, resalta la necesidad de balancear ambos efectos en la selección adecuada de ε_1 .

$$\begin{cases} \lambda_1 = \left(c_1 - \frac{1}{RC}\right)x_2 - \frac{1}{LC}x_1 - \frac{V_o}{LC} < 0 \\ \lambda_2 = \left(c_1 - \frac{1}{RC}\right)x_2 - \frac{1}{LC}x_1 + \frac{V_s - V_o}{LC} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Gráficamente se resalta para dos selecciones arbitrarias del parámetro en la Fig. 2.

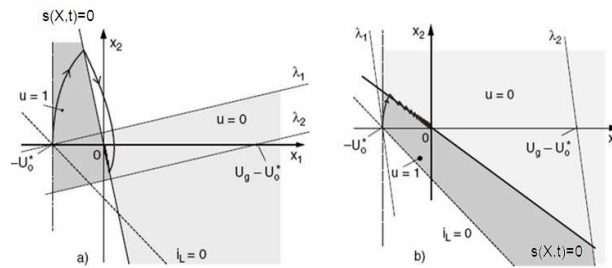


Fig. 2: Regiones de existencia del régimen deslizando en el plano de fase: (a) $c_1 > 1/(RC)$ y (b) $c_1 < 1/(RC)$.

2.2.2 Análisis de Estabilidad

El análisis de la estabilidad, bajo el régimen deslizando, para el convertidor Buck, dadas la existencia y el alcance del régimen deslizando, está sujeto a la dinámica impuesta y deseada por la superficie de deslizando, con la cual se garantiza una respuesta temporal equivalente a la de un sistema de primer orden con una constante de tiempo igual a $1/c_1$

3. TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de la instalación experimental

En la Fig. 3 se muestra el esquema utilizado para la validación experimental de los ensayos descritos en la sección 3.2. A través de la placa NIPCI-6221 se envían los pulsos de control al convertidor BUCK, utilizando la línea digital D0, a través de un opto acoplador que acciona el transistor MOSFET con un nivel de referencia flotante respecto a la tierra de la placa NIPCI-6221. La tensión de salida del convertidor Buck es sensada mediante un divisor resistivo que es ajustado para minimizar la corriente drenada al convertidor y aprovechar al máximo el rango dinámico del conversor analógico-digital (canal A0). La computadora actúa como controlador mediante la utilización del MATLAB®- Simulink- Real Time Windows Target. Adicionalmente es empleado un osciloscopio digital Tektronix TDS 210 para capturar las formas de onda para cada experimento realizado.

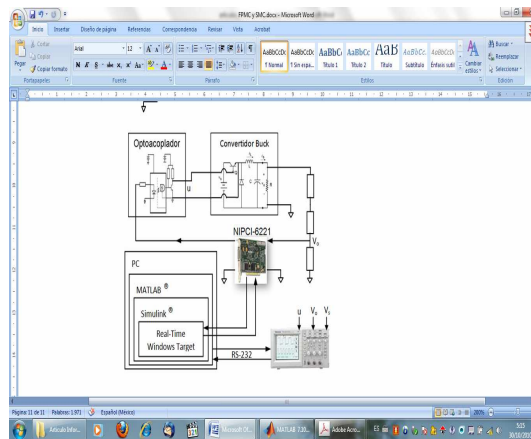


Fig. 3: Esquema de la instalación experimental.

Tabla 1 Parámetros de construcción del convertidor.

Elemento	Detalle
Resistencia	100 Ω
Inductor	200 mH
Capacitor	1000 μ F
Diodo de Conmutación Rápida	15D60K
MOSFET de Potencia	IRF 840

3.2 Diseño del experimento

El control por modos deslizantes descrito en la sección Control deslizante para el convertidor Buck 2.2 es implementado en Simulink y su diagrama en bloques se muestra en la Fig. 4.

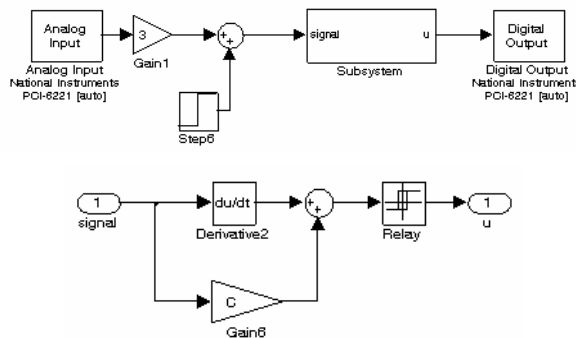


Fig. 4: Diagrama en bloques del controlador en Simulink.

A partir de la instalación experimental construida y el controlador diseñado se realizan los siguientes experimentos:

- A) Comprobar el funcionamiento del convertidor controlado para trabajar en el punto de operación normal con su carga nominal y la tensión nominal de entrada, los parámetros del convertidor se muestran en la Tabla 1.
- B) Evaluar el desempeño del sistema para variaciones severas de la carga, en este caso se varió el valor de la carga entre su valor nominal de 100 Ω a 25 Ω .
- C) Evaluar el desempeño del sistema para variaciones severas en la tensión de alimentación, 12 V a 10 V y 12 V a 7 V.
- D) Evaluar el desempeño del sistema ante incertidumbre en los parámetros. Para evaluar esta opción se considera el hecho real del envejecimiento de los componentes que pueden producirse durante la vida útil del convertidor, por ejemplo se varió el capacitor de 1000 μ F a 450 μ F, y el valor del inductor se varió de 200 mH a 60 mH. Este experimento se realiza con el control por modo deslizante diseñado para el sistema nominal, para evaluar su robustez ante incertidumbre en el modelo de la planta.

3.3 Análisis de los resultados

En esta sección los efectos del CMD en la tensión de salida son planteados.

- A- Bajo variaciones de la carga.
- B- Bajo variaciones en la tensión de entrada.
- C- Ante incertidumbres en el modelo de la planta.

En los 3 casos la estabilidad del comportamiento del convertidor se examina en la respuesta dinámica.

La figura 5 muestra el comportamiento de la tensión de salida (V_o) cuando se realizan cambios en la resistencia de carga de 100 a 25 Ohm.

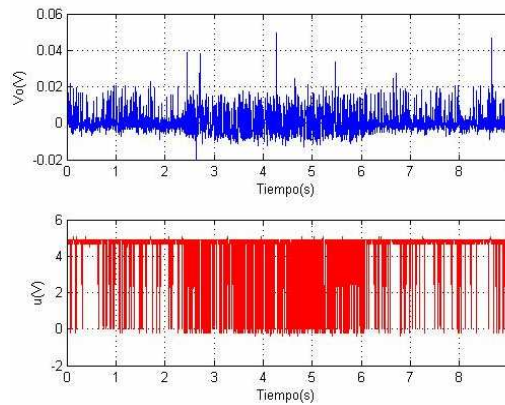


Fig. 5: Variaciones de la tensión de salida ante cambios en la resistencia de carga

Cuando la carga se incrementa, el convertidor transfiere su operación de conducción continua a conducción discontinua. Para este modelo el controlador comienza a partir del valor de 23%. En el modo de deslizamiento el valor de la ondulación de la tensión de salida se incrementa pero se mantiene en un rango aceptable, también la frecuencia de muestreo instantánea cambia. En general se puede decir que el CMD mantiene el sistema estable mientras la carga cambia en un amplio rango. Posteriormente se varía la tensión de entrada de 12 a 8 V. El resultado se muestra en la figura 6.

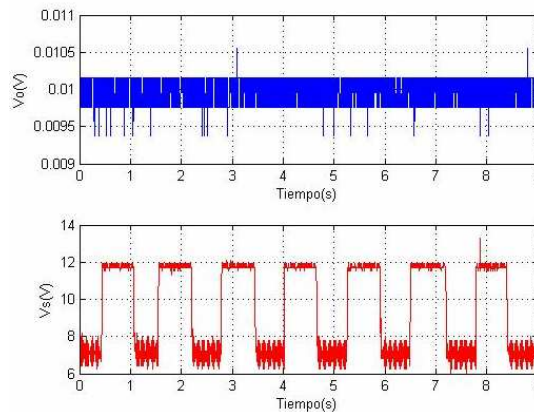


Fig. 6: Variaciones de la tensión de salida ante cambios en la tensión de alimentación.

La robustez del sistema ante variaciones de los parámetros se muestra con la Fig. 8. donde se aprecia el efecto de los cambios mencionados en el inductor.

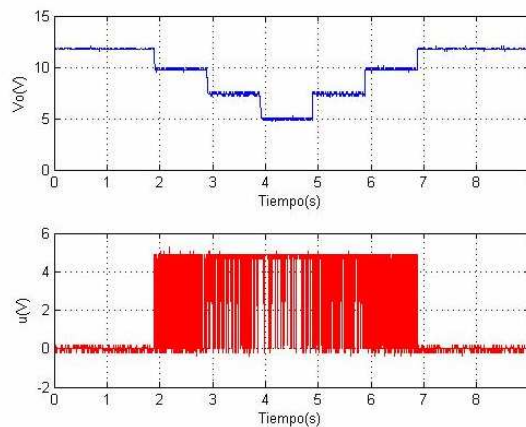


Fig. 7: Variaciones de la tensión de salida ante cambios en la tensión de alimentación en forma escalón.

Jaime P. Ayala Taco, Jorge L. Hernández Bravo, Susset Guerra Jiménez, Alexander Fernández Correa

4. CONCLUSIONES

El CMD tiene una gran importancia como herramienta de diseño para el control robusto de sistemas de estructura variable, y particularmente en el control de convertidores conmutados.

El CMD para el control del convertidor buck es simple de implementar, tanto para simulación como para implementación práctica definitiva.

Partiendo de un modelo simulado se realiza la construcción del circuito eléctrico correspondiente y se controla desde el Matlab a través de una tarjeta de adquisición de datos. Los resultados obtenidos de forma práctica coinciden con los obtenidos por vía de simulación en Matlab.

El CMD para el convertidor Buck tiene inmunidad contra variaciones en los componentes, variaciones severas en la carga y en la tensión de entrada.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Middlebrook, R.D., and Cuk, S.**: 'Advances in switched-mode power conversion: Volumes I and II' (TESLAcO, Pasadena, California, 1983)
- [2] **Skvarenina, Timothy L.**, *The Power Electronics Handbook*. EEUU: CRC Press. 2002.
- [3] **Luo, F.L., and Ye, H.**: 'Advanced DC/DC converters' (CRC Press, Boca Raton, USA, 2004)
- [4] **Sira-Ramírez, Hebertt, et al.**, *Control de Sistemas no lineales. Linealización aproximada, extendida, exacta*. España: Pearson Prentice Hall. 2005
- [5] **Bandyopadhyay, B., Janardhanan, S.**, *Discrete Time Sliding Mode Control*. London: Springer Verlag, 2006.
- [6] **Sira-Ramírez, Hebertt., Solva-Ortigoza, Ramón.**, *Control Design Techniques in Power Electronic Devices*. London: Springer Verlag, 2006.
- [7] **He, Y., Luo, F.L.**, *Sliding-mode control for dc-dc converters with constant switching frequency*. IEE Proc. Control Theory Appl., January 2006, Vol. 153, No.1.
- [8] **Y. He and F.L. Luo**, *Sliding-mode control for dc-dc converters with constant switching frequency*, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 153, No. 1, January 2006
- [9] **Calvente Calvo, F. J.**, "Control en modo deslizante aplicado a sistemas de acondicionamiento de potencia de satélites". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2001.
- [10] **Middlebrook, R.D., and Cuk, S.**: 'Advances in switched-mode power conversion: Volumes I and II' (TESLAcO, Pasadena, California, 1983).
- [11] **M. Ahmed, M. Kuisma, K. Tolsa, P. Silventoincii**, "Implementing Sliding Mode Control for Buck Converter", Power Electronic specialist conference (PESC) Proc. México June, 2003, pp 614-637, Vol.2.

AUTORES

Jaime Paúl Ayala Taco

Ing. Electrónico, Automatización y Control, MSc, ESPE, Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Eléctrica y Electrónica, DEEE

e-mail: payala@deee.espe.edu.ec

Jorge Luis Hernández Bravo,

Ingeniero en Automática, Departamento de Automática y Computación, Cujae, Ciudad de la Habana, Cuba,

e-mail: jl.hernan@yahoo.es

Susset Guerra Jiménez

Ingeniera en Controles Automáticos, Dra., Departamento de Automática y Computación, Cujae, La Habana, Cuba

e-mail: susset@electronica.cujae.edu.cu

Alexander Fernández Correa

Ingeniero en Electrónica, Dr., Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, Cujae, La Habana, Cuba

e-mail: alexande@electronica.cujae.edu.cu