



## DINÁMICA DE CONVERTIDORES CC-CC EN APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

F. Garelli<sup>1</sup>, H. De Battista<sup>1,2</sup>, R. Mantz<sup>1,3</sup>

Laboratorio de Electrónica Industrial Control e Instrumentación.  
Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata.  
CC91 (1900). La Plata. Argentina. Tel.(0221)425-9306. e-mail: deba@ing.unlp.edu.ar

**RESUMEN:** El presente trabajo aborda el estudio de los sistemas de conversión fotovoltaica que emplean convertidores cc-cc conmutados. En particular, se estudia el comportamiento dinámico de los convertidores reductor, elevador y reductor - elevador en aplicaciones fotovoltaicas. Este comportamiento difiere notablemente del obtenido en aplicaciones convencionales de los convertidores. A partir del análisis realizado, quedan en evidencia las propiedades y limitaciones de los convertidores para la regulación de la corriente de carga de batería empleando paneles solares.

**Palabras claves:** Dinámica, conversión fotovoltaica, estabilidad, convertidores cc-cc.

### INTRODUCCIÓN

Los convertidores conmutados son frecuentemente utilizados como parte de los sistemas de conversión de energía fotovoltaica. Ellos permiten modificar el punto de operación de las celdas, ajustando de esta manera la potencia extraída. En muchos sistemas de conversión el principal objetivo de control es regular la corriente de carga de la batería, satisfaciendo a su vez la corriente requerida por la carga. En cambio, en condiciones de baja irradiación solar durante las cuales no puede satisfacerse la demanda, el objetivo de control pasa a ser extraer la máxima potencia posible de las celdas. (Hussein et. al., 1995; Chian et. al., 1998; Hua et. al., 1998; Kuo et. al., 2001; Koutroulis et. al., 2001; Huyng y Cho, 1996).

En el presente trabajo se exploran las propiedades dinámicas que presentan distintos convertidores para la regulación de la corriente de carga. En este contexto, se plantean los modelos dinámicos de los convertidores reductor, elevador y reductor - elevador alimentados por paneles fotovoltaicos. Luego de definir la salida asociada al objetivo de control, se determina la dinámica inversa (llamada también dinámica cero) de los mencionados convertidores. Así quedan en evidencia algunas limitaciones de los convertidores, como ser multiplicidad de puntos de equilibrio y dinámicas inestables, que restringen el desempeño del sistema a lazo cerrado. Un análisis similar fue presentado por Bianchi et. al. (2001) cuando el objetivo de control es el seguimiento del punto de operación de máxima potencia (ver también Siri, 2000). Si bien escapa al objetivo del presente trabajo, surgen de manera natural las condiciones para que puedan establecerse estrategias de control de estructura variable para la regulación de la corriente de carga. Estas estrategias son particularmente atractivas debido a la simplicidad de implementación, robustez, y velocidad de respuesta. (De Battista y Mantz, 2002).

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los paneles fotovoltaicos tienen una característica tensión-corriente ( $v_C - I_S$ ) altamente no lineal, tal como lo muestra la Fig. 1a. Asimismo, esta característica eléctrica es altamente dependiente de la temperatura y la radiación solar. La Fig. 1b, en tanto, muestra la característica tensión-potencia ( $v_C - P_S$ ). Se observa que las curvas de potencia presentan un máximo a la tensión  $V_p$ , dependiente de la temperatura y la radiación solar. La pendiente de la curva  $v_C - P_S$  viene dada por

$$\frac{\partial P_S(v_C)}{\partial v_C} = (G + g)v_C \quad (1)$$

donde  $G = I_S(v_C)/v_C > 0$  es la conductancia estática del panel solar y  $g = \partial I_S(v_C)/\partial v_C$  es la conductancia dinámica. Nótese que  $G > 0$  y  $g < 0$  en toda la región de operación; mientras que  $G + g > 0$  a la izquierda del máximo de potencia y  $G + g < 0$  a la derecha (Duffie y Beckman, 1991).

<sup>1</sup> UNLP

<sup>2</sup> Investigador Asistente CONICET

<sup>3</sup> Investigador CICpBA

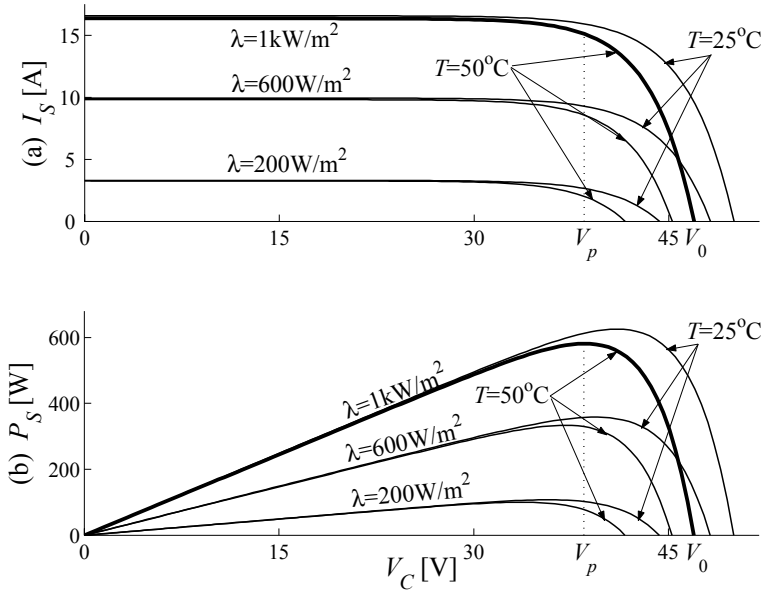


Figura 1: Características (a)  $I_s - V_c$  y (b)  $P_s - V_c$

Los paneles solares son usualmente conectados a una batería y la carga a través de convertidores conmutados. En la Fig. 2 se observan los circuitos eléctricos equivalentes de las tres configuraciones más habituales: reductor, elevador y reductor - elevador. La llave representa un dispositivo electrónico que conmuta entre dos estados de conducción. Los modelos matemáticos del comportamiento dinámico de los circuitos responden a la ecuación de la forma

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

donde  $x = [i_L; v_C]$  es el vector de variables de estado y la variable  $u$  adopta el valor 0 (posición 0) o 1 (posición 1). La operación normal de estos convertidores hace que la llave conmute a una frecuencia sumamente elevada. Gracias a ello, es habitual emplear un modelo promedio (es decir despreciando las oscilaciones de alta frecuencia asociadas al llaveado) a los fines del control de los convertidores. Este modelo se obtiene a partir de reemplazar la señal discontinua  $u$  por una señal continua equivalente  $u_s$ , llamada ciclo de trabajo de la llave, que está dado por la relación entre los tiempos en que la llave está en las posiciones "1" y "0", y que toma valores en el intervalo real  $[0,1]$ . Se toma como salida del sistema dinámico al error de regulación de la corriente:

$$y = h_B = i_B - I_{ref} \quad (3)$$

donde  $I_{ref}$  es la corriente de referencia. A continuación se analiza el comportamiento dinámico de las tres configuraciones, lo que permite determinar sus ventajas y desventajas comparativas para la regulación de corriente de carga de la batería.

## DINÁMICA DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES

### Sistema fotovoltaico con convertidor reductor

Para esta configuración los vectores  $f(x)$  y  $g(x)$  vienen dados por

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} \frac{v_C - E}{L} & \frac{-i_L + i_S(v_C)}{C} \end{bmatrix}^T \\ g(x) &= \begin{bmatrix} \frac{-v_C}{L} & \frac{i_L}{C} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4)$$

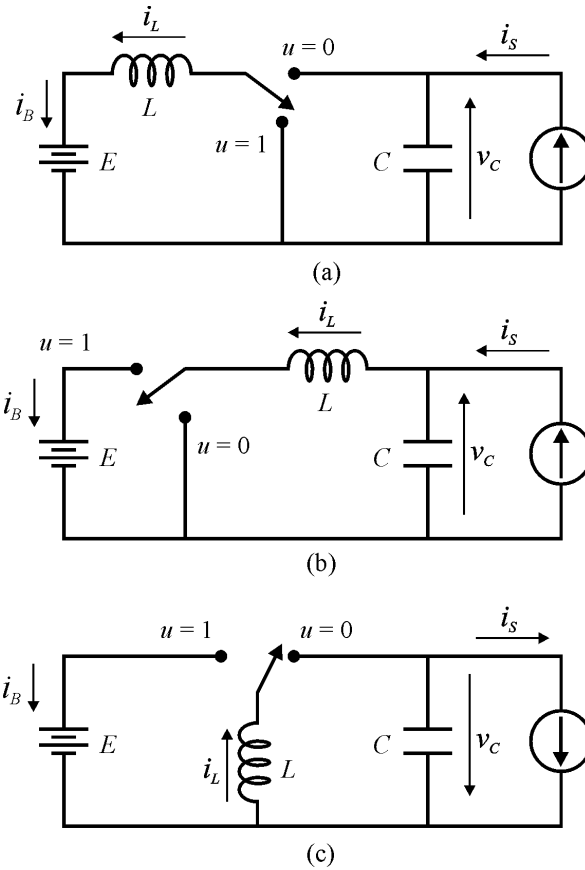


Figura 2: Sistemas fotovoltaicos empleando convertidores (a) buck (b) boost (c) buck-boost.

Puede observarse que para esta configuración, la corriente de batería es directamente la corriente en el inductor, que es variable de estado. La salida puede expresarse entonces como el error de corriente:  $y = i_L - I_{ref}$ . Se verifica que el sistema

presenta grado relativo 1, es decir  $\frac{\partial g}{\partial x} h_B \neq 0$  (en palabras,  $u$  actúa sobre la derivada primera de la función de salida). Puede demostrarse que la realimentación

$$u_{\delta B} = - \frac{\frac{\partial f}{\partial x} h_B}{\frac{\partial g}{\partial x} h_B} \Bigg|_{h_B=0} = 1 - \frac{E}{v_C} \quad (5)$$

satisface la condición de invariancia  $\{h_B = 0 \quad \dot{h}_B = 0\}$ . Es decir, con condiciones iniciales sobre el subespacio  $y = h_B(x) = 0$ , la acción de control (5) restringe la evolución de  $x$  sobre dicho subespacio donde el sistema se comporta tal como es deseado. Esto por supuesto ocurre en la medida que  $0 \leq u_{\delta B}(x) \leq 1$ . Si por el contrario  $u_{\delta B}(x)$  satura, el estado del sistema  $x$  abandonará el subespacio de interés.

A fin de determinar la viabilidad de esta estrategia de control es necesario estudiar la estabilidad de la dinámica del sistema en este modo de operación, llamada dinámica cero o inversa. Imponiendo la restricción  $h_B(x) = 0$  en la ecuación de estado, se obtiene

$$\frac{\partial v_C}{\partial t} = \frac{1}{C v_C} (i_S(v_C) v_C - E I_{ref}) \quad (6)$$

Siempre que la potencia disponible sea mayor a la de carga ( $I_{ref} E < P_{Smx}$ ), la ecuación (6) se anulará para dos valores distintos de  $v_C$ . En ese caso, existen 2 puntos de operación, uno a la izquierda del máximo de potencia  $p_l$  y otro a la derecha

$p_r$ . Linealizando (6) en torno a los mencionados puntos de equilibrio, resulta que  $p_l$  es inestable mientras que  $p_r$  es estable. Puede demostrarse que si el subespacio  $h_B(x) = 0$  es alcanzado a la derecha de  $p_l$ , el sistema sometido a la acción de control  $u_{\delta_B}(x)$  evolucionará sobre el subespacio hasta alcanzar el punto estable  $p_r$ . Si por el contrario, el subespacio es alcanzado a la izquierda de  $p_l$  la dinámica se hará inestable, la acción de control saturará en  $u_\delta = 0$  y  $v_c \rightarrow E$ .

### Sistema fotovoltaico con convertidor elevador

Para esta configuración:

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} & \frac{-i_L + i_S(v_C)}{C} \end{bmatrix}^T \\ g(x) &= \begin{bmatrix} \frac{-E}{L} & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (7)$$

Nótese que la corriente de batería viene dada por  $i_B = i_L u_\delta$ . Es decir, la acción de control interviene directamente sobre la salida. Una vez anulada la salida, la acción de control

$$u_{\delta_B} = I_{ref} / i_L \quad (8)$$

mantiene la salida idénticamente nula. En consecuencia, la dinámica cero (es decir, la dinámica del sistema cuando la salida es mantenida en cero) viene dada por:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f_{LC}(x) = \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} - \frac{E I_{ref}}{L i_L} \\ \frac{-i_L + i_S(v_C)}{C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A partir de igualar (9) a cero, se establece que esta dinámica tiene dos puntos de equilibrio siempre que  $I_{ref} E < P_{Smx}$ , uno a cada lado del máximo de potencia, que satisfacen:

$$\begin{aligned} V_C I_S(V_C) &= E I_{ref} \\ I_L &= I_S(V_C) \end{aligned} \quad (10)$$

El Jacobiano del vector  $f_{LC}$  es:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{LC_1}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{LC_1}}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_{LC_2}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{LC_2}}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L \cdot G} & \frac{1}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{g}{C} \end{bmatrix} \quad (11)$$

La estabilidad de la dinámica cero queda condicionada a que los autovalores de la matriz  $A$  tengan parte real negativa. Para ello, se debe cumplir que

$$G + g > 0 \quad (12)$$

$$\frac{g}{C} + \frac{1}{L G} < 0 \quad (13)$$

La condición (12) establece que el punto de equilibrio  $p_r$  a la derecha del máximo de potencia es siempre inestable, mientras que el de la izquierda  $p_l$  puede ser estable o inestable. Esto depende de que se verifique o no la condición (13), por lo que la estabilidad de la dinámica depende del punto de operación y de los parámetros del convertidor. Se deduce a partir de (12)-(13) que una condición necesaria para la estabilidad de  $p_l$  es:

$$L I_S^2 > C V_C^2 \quad (14)$$

Debido a las restricciones impuestas por (12) y (13), el convertidor presenta habitualmente una dinámica cero inestable, limitando severamente el desempeño del convertidor como regulador de la corriente de carga.

### **Sistema fotovoltaico con convertidor reductor - elevador**

Para esta configuración

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} & \frac{-i_L + i_S(v_C)}{C} \end{bmatrix}^T \\ g(x) &= \begin{bmatrix} \frac{-(v_C + E)}{L} & \frac{i_L}{C} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (15)$$

También en este caso la corriente de batería viene dada por  $i_B = i_L u_\delta$ , es decir la salida depende directamente de la entrada. Una vez anulada la salida, la acción de control (8),  $u_{\delta B} = I_{ref}/i_L$ , mantiene la salida idénticamente nula, al igual que en la configuración elevadora. En este caso, la dinámica cero viene dada por:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f_{LC}(x) = \begin{bmatrix} \frac{v_C}{L} - \frac{v_C + E}{L} \frac{I_{ref}}{i_L} \\ \frac{-i_L + i_S(v_C)}{C} + \frac{I_{ref}}{C} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Esta dinámica tiene dos puntos de equilibrio siempre que  $I_{ref} E < P_{S_{mx}}$ , uno a cada lado del máximo de potencia, que satisfacen:

$$\begin{aligned} V_C I_S(V_C) &= E I_{ref} \\ I_L &= I_{ref} + I_S(V_C) \end{aligned} \quad (17)$$

El Jacobiano del vector  $f_{LC}$  es:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a}{L \cdot G} & \frac{a}{L} \\ \frac{-1}{C} & \frac{g}{C} \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde  $0 < a = I_S(V_C)/(I_S(V_C) + I_{ref}) < 1$ . Las condiciones de estabilidad de la dinámica cero son:

$$G + g > 0 \quad (19)$$

$$\frac{g}{C} + \frac{a}{L G} < 0 \quad (20)$$

De (19), el punto de equilibrio  $p_r$  a la derecha del máximo de potencia es siempre inestable. La estabilidad de  $p_l$  depende, a través de (20), del punto de operación y de los parámetros del convertidor. A partir de ambas desigualdades se desprende que una condición necesaria para la estabilidad de  $p_l$  es:

$$L I_S (I_S + I_{ref}) > C V_C^2 \quad (21)$$

También para esta configuración el sistema suele presentar una dinámica cero inestable, restringiendo la performance del convertidor como regulador de corriente. Dado que la corriente de salida del convertidor es proporcional a la potencia de salida (suponiendo  $E$  constante), puede controlarse indirectamente la corriente de carga mediante el control de la potencia convertida por el panel fotovoltaico ( $P_S$ ).

## CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado del comportamiento dinámico de las tres topologías básicas de convertidores fotovoltaicos operando como reguladores de corriente, se pueden sacar las siguientes conclusiones. La configuración reductora es la única de las tres topologías que asegura una dinámica inversa estable en torno a un punto de equilibrio para cualquier condición atmosférica y cualquier corriente de carga (por supuesto, siempre que la potencia disponible sea suficiente). Esta propiedad permite, mediante estrategias de control adecuadas, mantener la corriente de salida en el valor deseado en todo instante de tiempo, incluso en presencia de variaciones de las condiciones atmosféricas (De Battista y Mantz, 2002). Por el contrario, tanto la topología elevadora como la reductora - elevadora presentan en general dinámica cero inestable. En efecto, sólo para ciertas condiciones atmosféricas y de carga el sistema puede presentar un comportamiento estable cuando la corriente de salida es forzada a mantenerse en su valor de referencia. Consecuentemente, la regulación robusta de la corriente de carga suele ser irrealizable, limitando el desempeño de los convertidores. Una alternativa es la regulación indirecta mediante el control de la potencia de entrada del convertidor.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subsidiado por UNLP, CONICET, CICpBA, y ANPCyT.

## REFERENCIAS

- Bianchi, F., De Battista H., Mantz, R. (2001). On the stability of dc-to-dc converters in photovoltaic systems undergoing sliding motions. LEICI 16-01-01, Technical, Argentina, Mayo 2001. Int. Journal on System Science, en evaluación.
- Chian, S., Chang, K. y Yen, C. (1998). Residential energy storage system. IEEE Trans. Ind. Electron., 45, (3), pp. 385-394.
- De Battista, H. y Mantz, R. (2002). Variable structure control of a photovoltaic energy converter. IEE Proceedings, Control Theory and Application, en prensa.
- Duffie, J. and Beckman, W. (1991) Solar engineering of thermal processes. Wiley Interscience, New York, 2nd edition.
- Hua, C., Lin, J., y Shen, C. (1998). Implementation of a dsp-controlled photovoltaic system with peak power tracking. IEEE Trans. Ind. Electron., 45, (1), pp. 99-107.
- Hussein, K., Muta, I., Hoshino, T., y Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. IEE Proc. C. Gener. Tansm. Distrib., 142, (1), pp.59-64.
- Huyng, P. y Cho, B. (1996). Design and analysis of a microprocessor-controlled peak-power-tracking system. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 32, (1), pp 182-189.
- Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., y Voulgaris, N. (2001). Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system. IEEE Trans. Power Electron., 16, (1), pp.46-54.
- Kuo, Y., Liang, T., y Chen, J. (2001). Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system. IEEE Trans. Ind. Electron., 48, (3), pp. 594-601.
- Siri, K. (2000). Study of system stability in solar-array-based power systems. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sist., 36, (3), pp. 957-963..

**ABSTRACT:** The paper deals with photovoltaic energy conversion systems, comprising dc-dc switching converters. Particularly, the dynamic behaviour of the buck, boost and buck-boost converters in photovoltaic applications is investigated. This behaviour notoriously differ from the obtained in conventional converters applications. The analysis puts in evidence the features and limitations of the converters as photovoltaic load current regulators.

**Keywords:** Dynamics, photovoltaic conversion, stability, dc-dc converters.