

Lyapunov Stability Criterion Applied to a Interconnected Power Converter/Photovoltaic Panel System

Ruiz-Martínez, O. F. * López-Cruz, J. M. **

* Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Josemaría Escrivá de Balaguer, No. 101, 20296. Aguascalientes, Ags. Mexico.
(e-mail: ofruizm@up.edu.mx).

** TECNM Campus Comalcalco, Carretera vecinal, Paraíso - Comalcalco KM 2, RA Occidente 3ra sección, 86650 Comalcalco, Tab.
(e-mail: lcjose0@gmail.com)

Abstract: Power electronic converters have been widely used in conjunction with a control law to maintain a regulated supply in the face of input or output disturbances. Although the control law stabilizes the converter at an operating point, stability conditions when there are supply variable sources to the converter have not yet been sufficiently explored. In this work, stability conditions are analyzed under the Lyapunov criterion of a system made up of a photovoltaic panel and a conventional Boost converter. The state space equations of the converter are coupled to a dynamic equation of the panel that arises considering the charging dynamics of a capacitor on the input bus. The resulting system of equations (averaged state space) is analyzed using Lyapunov stability criteria and the dynamics of each state variable are graphed. The methodology presented in this work can be applied to systems with other converters and another order.

Keywords: Modeling and simulation of power systems, Power systems stability, Application of power electronics & Lyapunov methods.

1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores electrónicos de potencia son altamente utilizados para entregar un voltaje regulado a un Bus donde pueden converger cargas de muy diferente dinámica. En general para lograr entregar un voltaje regulado adecuado se diseña una ley de control. Esta ley de control hace que el convertidor se vuelva controlable a través de la conmutación de los interruptores que lo conforman. Se puede decir que la definición de controlabilidad está ligada a la de estabilizabilidad porque una vez llevado el convertidor a un valor de regulación en su salida, esta se muestra estable. Aunque el planteamiento de leyes de control para estabilizar un convertidor ha sido ampliamente estudiado mediante diversas técnicas, aún no ha sido explorado en suficiencia aspectos teóricos de estabilidad en estos sistemas electrónicos. En general la literatura reporta que el análisis de estabilidad es útil cuando los convertidores están aplicados a una red de CD en la cual convergen fuentes de voltaje renovables [Wang et al. (2021), Gao et al. (2022)]. Lo anterior debido a que se puede conocer la respuesta transitoria que cada sistema aporta al bus principal de CD varían significativamente a través del tiempo.

La naturaleza conmutada de los convertidores dificulta explorar aspectos de convergencia a un punto/valor de referencia. Para poder analizar este tipo de sistemas en forma conmutada se requiere verificar cual es la dinámica de cada modo de operación del convertidor. Para esto se realizan modelos matemáticos que corresponden al es-

tado de conmutación del interruptor o interruptores que conforman al convertidor. Por cada combinación on/off de interruptores surge un modo de operación. Existen consideraciones para definir algún grado de estabilidad mediante la aplicación de teorías de sistemas conmutados [Liberzon (2003)]. Estas consideraciones requieren encontrar funciones matemáticas para cada modo y verificar si en conjunto se aproxima a una vecindad de un punto de equilibrio (valor de referencia). Dado que es posible que para cada modo sea complicado encontrar las funciones matemáticas adecuadas se lleva al sistema de ecuaciones a una descripción promediada (espacio de estados promediado) [Sira-Ramírez and Silva-Ortigoza (2006)]. Utilizando esta aproximación y por medio de la función de promediado (ciclo de trabajo) se simplifica el análisis matemático de estabilidad. En algunos casos es necesario para resolver el sistema ODE y obtener los valores propios u obtener la función de transferencia para analizar sus raíces y trazar el diagrama de Bode o Nyquist. Estos eigenvalores denotan un comportamiento del sistema (amortiguado, subamortiguado o sobreamortiguado) y se puede obtener un grado de estabilidad local [Wang et al. (2021), Guan et al. (2019) y Halder (2020)].

En análisis de estabilidad de sistemas existe una herramienta matemática que define la estabilidad global de un sistema en algún grado encontrando y sometiendo una función (dependiente de las variables de estado) a diversas pruebas. Esta herramienta se denomina criterio de estabilidad de Lyapunov y se lleva a cabo a través

de encontrar una función matemática afín al sistema de ecuaciones del convertidor. Para demostrar estabilidad del sistema se verifica si la función es definida positiva y continuamente diferenciable [Khalil (2014)]. En el caso de sistemas conmutados, es necesario encontrar una función de Lyapunov común para cada modo de operación [Shorten and Narendra (1998) y Vu and Liberzon (2005)] o verificar que existen una función de Lyapunov por cada modo y verificar que sus valores coinciden en el instante de conmutación [Branicky (1998), Lu and Brown (2010) y Long and Zhao (2016)]. Encontrar funciones que cumplan con lo anterior es complicado. En el sistema a analizar en el presente trabajo se considerará una aproximación promediada dada por la variable del ciclo de trabajo (D).

Ahora bien, en general cuando se plantea el sistema de ecuaciones promediado (averaged state space) del convertidor no se incluye la dinámica que puede tener la entrada (fuente de voltaje) [Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza (2006), Tan and Hoo (2015) y Alassi and Massoud (2016)]. Esta dinámica es debido a la naturaleza de operación de las muy diversas fuentes de voltaje de entrada. En lo general, se considera que la fuente de entrada es fija y mediante una ley de control se rechazan perturbaciones en su variación. Para el caso estudiado se considera la inclusión de una fuente variable compuesta por un panel fotovoltaico. La ecuación del panel ha sido ampliamente utilizada en la literatura, pero es una ecuación que define una curva estática para una relación voltaje-corriente. Para incluir esta ecuación en forma dinámica y así interactúe con el modelo matemático del convertidor se requiere expresar su respuesta a través de variaciones en corriente o voltaje en la entrada del convertidor. Para este trabajo se realiza la inclusión de la dinámica de carga de un capacitor en la entrada del convertidor. Lo anterior permite expresar las variaciones en corriente o voltaje del panel a través de la carga o descarga del capacitor de entrada. Debido a que la carga del capacitor puede ser expresada como una derivada, es posible incluir la dinámica del panel como una ecuación diferencial adicional al sistema de ecuaciones del convertidor.

Una vez teniendo un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas se puede proceder a hacer el análisis de estabilidad por medio de los criterios Lyapunov. En este artículo se considera la utilización de un panel Kyocera KC200GT acoplado a un convertidor Boost funcionando en CCM. Se realiza la obtención de parámetros siguiendo un proceso iterativo del modelo convencional del panel (single diode model) [Wu et al. (2016) y Stornelli et al. (2019)] y se simula el sistema completo de ecuaciones en el entorno Matlab/Simulink.

El artículo este compuesto como sigue: la sección 2 esboza la descripción del sistema, parámetros utilizados y la forma de acoplamiento del sistema panel/convertidor; la sección 3 muestra la manipulación matemática para aplicar el criterio de estabilidad de Lyapunov; la sección 4 muestra y discute los resultados de simulación y finalmente en la sección 5 se abordan las conclusiones del presente trabajo.

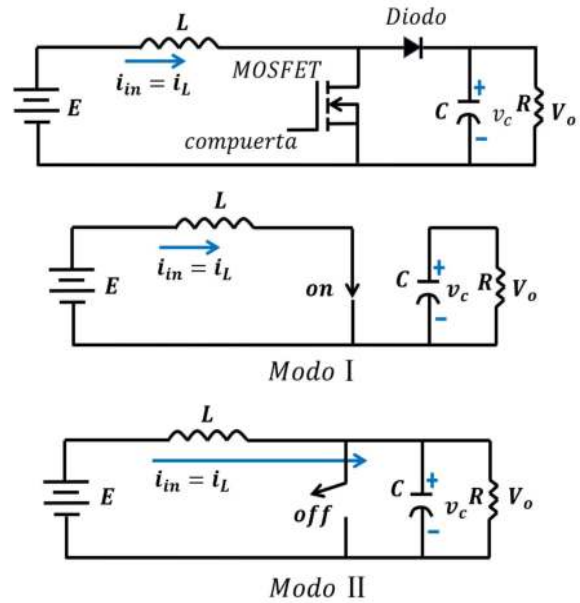


Fig. 1. Convertidor Boost convencional y sus modos de operación

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PANEL-CONVERTIDOR

El caso común de operación es elevar el voltaje provisto por la salida del arreglo fotovoltaico de paneles. El convertidor Boost convencional propuesto para llevar a cabo el análisis provee una corriente de entrada continua (inductor conectado directamente a la entrada) con lo cual se reducen los requerimientos de uso de un capacitor voluminoso en la entrada. Con lo anterior se reducen costos y mejora la confiabilidad del sistema debido a que estos capacitores exhiben una corta vida útil. La continuidad de la corriente de entrada es asegurada operando en el modo de conducción continua (CCM) [Alassi and Massoud (2016)]. En este artículo, será analizada la estabilidad del convertidor Boost (mostrado en la Fig. 1) interconectado a un arreglo de panel fotovoltaico.

Considerando el estado del interruptor cerrado (ON) y abierto (OFF) surgen los modos de operación I y II respectivamente. Utilizando las leyes de Kirchhoff de voltaje y corriente se plantean sistemas de ecuaciones diferenciales.

Las ecuaciones en espacio de estados para cada modo de operación del convertidor operando en CCM son las siguientes.

Modo 1: Interruptor cerrado (ON)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (1)$$

Modo 2: Interruptor abierto (OFF)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (2)$$

Utilizando una función de promediado para relacionar los dos modos en un único sistema en espacio de estados, se obtiene la ecuación 3. Este sistema depende de la función D (Ciclo de trabajo) que toma valores entre 0 y 1. Una vez promediado, el sistema se relacionará con el modelo matemático del panel fotovoltaico.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (3)$$

Ahora bien, como se mencionó brevemente en la introducción, se plantea analizar la interconexión del convertidor Boost con un panel fotovoltaico que actúa como fuente de entrada. La obtención de la ecuación característica de un panel se realiza considerando su aproximación al circuito mostrado en la Fig. 2.

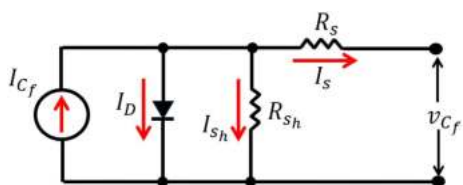


Fig. 2. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

Debido a la unión de materiales N y P para construir cada celda, se considera la inclusión de un diodo en la estructura. El modelado de este diodo y su interacción con los demás elementos se realiza mediante la ecuación de Shockley que se muestra a continuación.

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{\alpha V_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

donde:

I_D es la corriente del diodo.

I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo.

V_D es el voltaje a través del diodo.

α es el factor de idealidad del diodo, también conocido como el factor de calidad o coeficiente de emisión.

V_T es el voltaje térmico. ($V_T = \frac{KT}{q}$)

K es la constante de Boltzmann.

T es la temperatura absoluta de la unión p-n.

q es la carga elemental (la magnitud de la carga del electrón).

Tomando en cuenta la estructura del circuito, se establecen las siguientes ecuaciones para voltaje y corriente.

$$v_{cf} = V_{Sh} - V_s \quad (5)$$

$$I_s = I_{Cf} - I_D - I_{Sh} \quad (6)$$

donde:

$$I_{Sh} = \frac{v_{cf} + R_s I_s}{R_{Sh}} \quad (7)$$

Dado lo anterior, es posible tener un modelo estático $I_s(v_{cf})$ de una celda solar como se muestra continuación.

$$I_s(v_{cf}) = I_{Cf} - I_0 \left(e^{\frac{q(v_{cf} + I_s R_s)}{\alpha K T}} - 1 \right) - \frac{v_{cf} + I_s R_s}{R_{Sh}} \quad (8)$$

Ahora, la ecuación 8 representa una sola celda solar y para representar un arreglo fotovoltaico, se agregan conexiones de celdas en serie y en paralelo. Considerando lo anterior, se incluyen las variables N_S y N_P para representar un número de celdas en serie y paralelo respectivamente.

$$I_s(v_{cf}) = N_P I_{Cf} - N_P I_0 \left(e^{\frac{q \left(\frac{v_{cf}}{N_S} + \frac{I_s R_s}{N_S} \right)}{\alpha K T}} - 1 \right) - \frac{\frac{N_P v_{cf}}{N_S} + I_s R_s}{R_{Sh}} \quad (9)$$

Para acoplar la ecuación de la corriente del modelo de panel solar (9) y las ecuaciones dinámicas del convertidor Boost, se sustituyen las siguientes equivalencias comunes.

En este caso, la corriente de salida del panel se convierte en la corriente de entrada i_{in} del convertidor Boost a analizar y el voltaje de salida del panel v_{cf} ahora se considera como la fuente de voltaje de entrada E . Para transformar la ecuación del panel en una ecuación dinámica, se procede a considerar la inclusión de un capacitor de entrada al convertidor como se muestra en la Fig. 3. Este capacitor permite definir la ecuación nodal $I_s = I_{Ca} + i_{in}$.

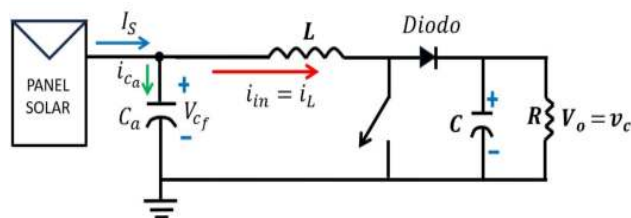


Fig. 3. Sistemas acoplados: panel fotovoltaico y convertidor Boost.

Lo mostrado en la figura se puede dilucidar de forma matemática en el sistema de ecuaciones (10), donde se ha acoplado el modelo de espacio de estados para el convertidor Boost. La corriente de entrada i_{in} al convertidor es la corriente del inductor i_L debido a su posición circuital.

$$\begin{aligned} v_{cf} = & -\frac{N_p I_0}{c_a} \exp \left(\frac{q \left(\frac{v_{cf}}{N_s} + \frac{I_s R_s}{N_p} \right)}{\alpha k T} - 1 \right) \\ & - \frac{N_p v_{cf}}{c_a N_s R_{sh}} + \frac{I_s R_s}{c_a R_{sh}} - \frac{i_L}{c_a} + \frac{N_p I_{Cf}}{c_a} \quad (10) \\ i_L = & -\frac{v_c}{L} (1-D) - \frac{v_{cf}}{L} \\ v_c = & \frac{i_L}{C} (1-D) - \frac{v_c}{CR} \end{aligned}$$

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

En su forma más básica se establece que un sistema es estable si responde con una variación finita a variaciones finitas de sus señales de entrada. En el caso del sistema analizado la señal de entrada es la señal de control D . Aunque es posible inferir que el sistema no tendrá un comportamiento oscilatorio o inestable en régimen permanente, se requieren herramientas matemáticas para demostrarlo. En la presente sección se utilizará el criterio de estabilidad de Lyapunov para demostrar la estabilidad del sistema (10) en algún sentido.

Un punto de equilibrio se dice que es estable si todas las soluciones que inician en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en las cercanías del punto de equilibrio; de otro modo el punto de equilibrio es inestable. Un punto de equilibrio se dice asintóticamente estable si todas las soluciones que inician en las cercanías del punto de equilibrio no sólo permanecen en las cercanías del punto de equilibrio, sino que además tienden hacia el equilibrio a medida que el tiempo se aproxima a infinito. Los teoremas de estabilidad de Lyapunov dan condiciones suficientes para estabilidad de puntos de equilibrio. Son condiciones suficientes debido a que no necesariamente debe existir una función de Lyapunov para demostrar que un sistema es estable.

En general, para determinar una función de Lyapunov apropiada para una ODE dada, la ODE debe tener una estructura que se preste a la construcción de la función Lyapunov. No existe un método general para construir o encontrar una función candidata de Lyapunov que demuestre la estabilidad de un punto de equilibrio, en todo caso, el no encontrar una función de Lyapunov no implica automáticamente la inestabilidad del punto de equilibrio. Para los sistemas dinámicos (como los sistemas físicos) las leyes de conservación proveen frecuentemente a las funciones candidatas de Lyapunov.

La definición de una función candidata de Lyapunov es como sigue:

Sea

$$V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

una función escalar. V y dicha función candidata de Lyapunov si es localmente (en 0) una función definida positiva o, equivalentemente, si existe un entorno \mathcal{U} de 0 tal que

$$V(0) = 0 \text{ and } V(x) > 0 \forall x \in \mathcal{U} \setminus \{0\}$$

3.1 Criterio de estabilidad de Lyapunov

Sea $x^* = 0$ un punto de equilibrio de un sistema autónomo

$$\dot{x} = f(x)$$

y sea

$\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \nabla V \dot{x} = \nabla V f(x)$ la derivada con respecto al tiempo de la función candidata de Lyapunov V .

Si la derivada con respecto al tiempo de V (la función candidata de Lyapunov) es localmente semidefinida pos-

itiva, entonces existe un entorno \mathcal{B} centrado en 0 tal que $\dot{V}(x) \leq 0 \forall x \in \mathcal{B}$

dado lo cual el equilibrio es estable, para algún entorno o vecindad de \mathcal{B} .

3.2 Desarrollo

Para analizar el sistema no lineal resultante (10) se procede de la siguiente manera.

Se define el siguiente cambio de variable para trasladar el punto de equilibrio al origen.

$v_{cf} = \tilde{v}_{cf} + V_{cf}$, $i_L = \tilde{i}_L + I_L$, y $v_c = \tilde{v}_c + V_c$, un sistema definido como sigue es entonces obtenido:

Para el sistema panel solar-boost se tiene.

$$\begin{aligned} \tilde{v}'_{cf} &= \frac{N_p I_0}{c_a} \exp\left(\frac{q\left(\frac{V_{cf}}{N_s} + \frac{I_s R_s}{N_p}\right)}{\alpha k T}\right) \\ &\quad - \frac{N_p I_0}{c_a} \exp\left(\frac{q\left(\frac{(\tilde{v}_{cf} + V_{cf})}{N_s} + \frac{I_s R_s}{N_p}\right)}{\alpha k T}\right) - \frac{N_p \tilde{v}_{cf}}{c_a N_s R_{sh}} - \frac{\tilde{i}_L}{c_a} \\ \tilde{i}' &= \frac{\tilde{v}_{cf}}{L} + \frac{(1-U)\tilde{v}_c}{L} + \frac{V_c}{L} \tilde{u} \\ \tilde{v}'_c &= -\frac{(1-U)\tilde{i}_L}{c} - \frac{\tilde{v}_c}{cR} - \frac{I_L}{c} \tilde{u} \end{aligned} \tag{11}$$

Se propone una función candidata de Lyapunov para el sistema (11) como sigue:

$$V = \frac{c_a \tilde{v}_{cf}^2}{2} + \frac{L \tilde{i}_L^2}{2} + \frac{c \tilde{v}_c^2}{2}$$

Entonces, calculando la derivada de V la siguiente ecuación es obtenida.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= N_p I_0 \tilde{v}_{cf} \exp\left(\frac{q\left(\frac{V_{cf}}{N_s} + \frac{I_s R_s}{N_p}\right)}{\alpha k T}\right) \\ &\quad - N_p I_0 \tilde{v}_{cf} \exp\left(\frac{q\left(\frac{(\tilde{v}_{cf} + V_{cf})}{N_s} + \frac{I_s R_s}{N_p}\right)}{\alpha k T}\right) - \frac{N_p \tilde{v}_{cf}^2}{N_s R_{sh}} \\ &\quad - \frac{\tilde{v}_c^2}{R} \end{aligned} \tag{12}$$

Analizando la ecuación (12) es posible notar que si $\tilde{v}_{cf} < 0$, la diferencia del primer término y el segundo es negativo, y si $\tilde{v}_{cf} > 0$ la diferencia del primer término y el segundo es negativo, de ahí \dot{V} es negativo.

Considerando lo anteriormente explicado se comprueba que el sistema (10) es estable.

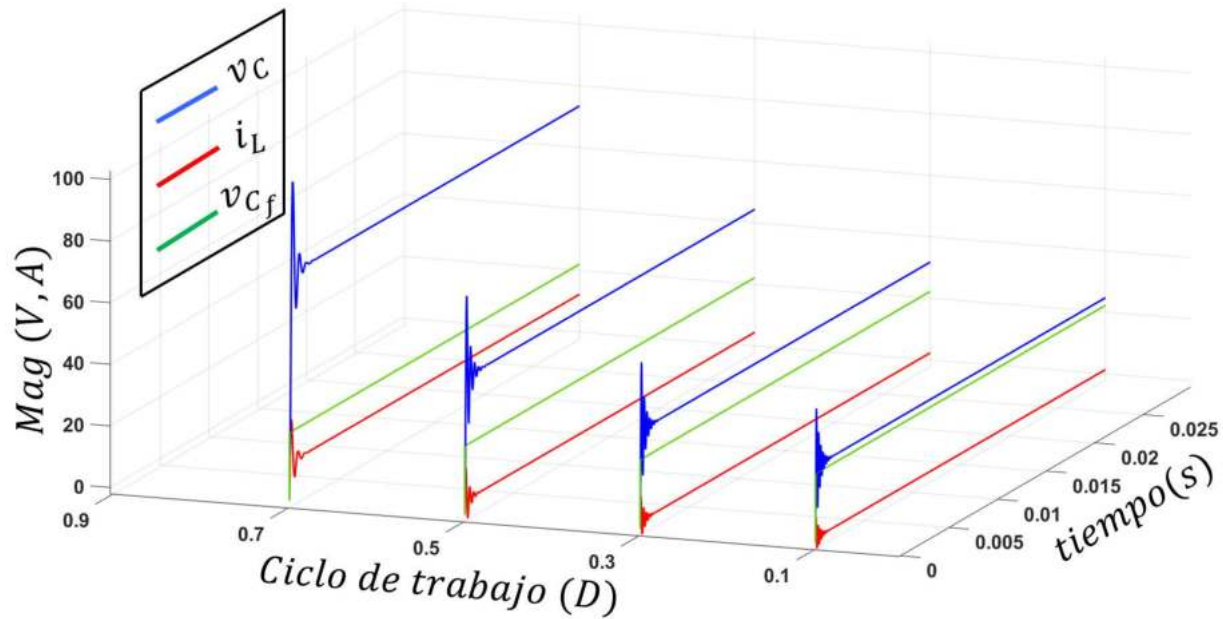


Fig. 4. Evolución transitoria a través del tiempo de las tres variables de estado con respecto al ciclo de trabajo D .

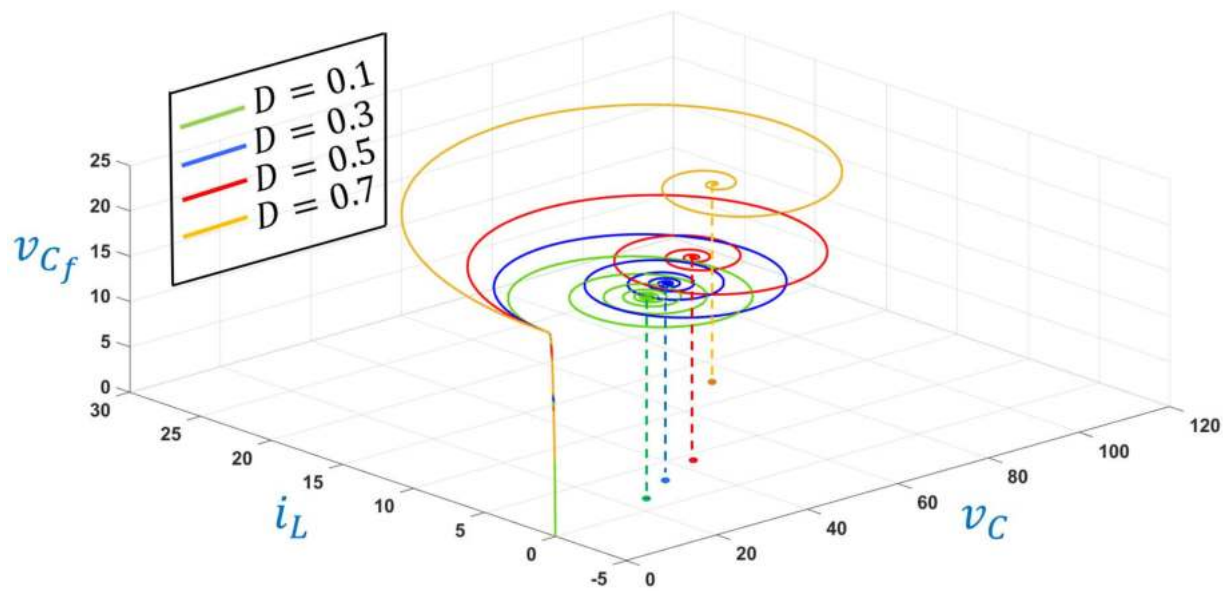


Fig. 5. Convergencia de las tres variables de estado con respecto a variaciones en el ciclo de trabajo.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Como se puede observar en la ecuación (9), la corriente de salida del panel es implícita. Esto dificulta el cálculo del valor apropiado de cada parámetro. Basado en el artículo [Stornelli et al. (2019)], los parámetros se estiman mediante un proceso iterativo.

La Tabla 1 muestra los valores paramétricos utilizados para llevar a cabo la simulación en el entorno Matlab/Simulink.

Table 1. Parámetros del sistema a simular

Parameter	Value	Parameter	Value
R	20 Ω	k	$1.380649 * 10^{-23} \frac{J}{K}$
C	10 μF	T	298°K
L	100 μH	q	$-1.602 * 10^{-19} C$
C_a	10 μF	I_{cf}	8.2285 A
N_s	54	I_s	7.5992 A
N_p	10	I_0	$3.4768 * 10^{-9} A$
R_s	0.2596 Ω	α	1.1
R_{sh}	114.904 Ω		

La Figura 4 muestra la evolución transitoria de las variables de estado (V_{cf} , i_L , v_c) en el tiempo ante una variación

en la entrada de control D . Note que al principio se tiene una respuesta transitoria subamortiguada y se estabiliza algunos instantes de tiempo después.

Finalmente, para visualizar la convergencia a un punto de equilibrio de las variables de estado se muestra la solución del espacio de estados en la Figura 5 para distintos valores de la entrada de control D . La estabilidad del sistema queda entonces demostrada a través de la visualización de las variables de estado consideradas.

5. DISCUSIÓN

En el presente trabajo se analizó la interconexión de sistemas con dinámica diferente. En este caso la ecuación no dinámica de un panel fotovoltaico se acoplo con un sistema conmutado. El análisis de estabilidad presentado verifica de manera sencilla la estabilidad a variaciones dadas por el ciclo de trabajo y posibles fluctuaciones en la dinámica del panel. El análisis de estabilidad del sistema propuesto es complicado de realizar mediante criterios como Bode o Nyquist porque el sistema de ecuaciones 10 es no lineal. Adicionalmente la ecuación del panel es un sistema implícito o trascendente con lo cual la complejidad aumenta. Se utilizó un algoritmo reportado en [Stornelli et al. (2019)] para obtener los parámetros del sistema basados en un panel fotovoltaico comercial. Aunque la aplicación del criterio de Lyapunov luzca bastante explorado se abre la puerta a analizar nuevas estructuras más complejas siguiendo la misma metodología. Ahora bien, el sistema implícito analizado puede transformarse a través de la utilización de la función W . Lambert para obtener un sistema explícito. Un próximo trabajo a explorar es utilizar un convertidor de mayor orden (como el SEPIC que es de 4o. orden) ya acoplado con el sistema simplificado a través de la función W . Lambert.

6. CONCLUSIONES

En este artículo, se plantea un modelo dinámico a un sistema conformado por un convertidor Boost acoplado con un panel fotovoltaico. Tomando en cuenta que el panel fotovoltaico no tiene una ecuación dinámica, se procedió a desacoplar su funcionamiento mediante la inclusión de un capacitor de carga. Considerando las leyes de corriente de Kirchhoff se establecen relaciones entre variables para acoplar la respuesta del panel al modelo en espacio de estados del convertidor Boost. Una vez planteado el sistema completo de orden 3 se analizó su estabilidad. Mediante la teoría basada en el criterio de Lyapunov se plantea una función candidata y se analiza la estabilidad del sistema. Los resultados obtenidos son mostrados a través de simulaciones en el software Matlab/Simulink observando la evolución transitoria y su convergencia a un punto de equilibrio para distintos valores del ciclo de trabajo. Los parámetros utilizados para realizar la simulación consideran un panel fotovoltaico comercial (Kyocera KC200GT) y al convertidor operando en CCM. Los valores de los parámetros del panel son obtenidos a través de un algoritmo iterativo hasta alcanzar un error de convergencia aceptable. El procedimiento mostrado a través del desarrollo del artículo puede ser directamente aplicado a sistemas con otras topologías de convertidores

simplemente considerando su modelo en espacio de estados promediado.

REFERENCES

- Alassi, A. and Massoud, A. (2016). Modelling of dc-dc converters with continuous input current for high power pv applications. 171–176. doi:10.1109/ISCAIE.2016.7575058.
- Branicky, M. (1998). Multiple lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4), 475–482. doi:10.1109/9.664150.
- Gao, X., Zhou, D., Anvari-Moghaddam, A., and Blaabjerg, F. (2022). Stability analysis of grid-following and grid-forming converters based on state-space model. 422–428. doi:10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9806934.
- Guan, C., Li, W., Zhang, X., Lv, Y., and Yu, W. (2019). Stability analysis of bidirectional dc-dc converter for energy storage. 79–83. doi:10.1109/ICPEA.2019.8818515.
- Halder, T. (2020). State space modeling and stability analysis of the flyback converter. 1–6. doi:10.1109/PIICON49524.2020.9113071.
- Khalil, H. (2014). Nonlinear control. Always Learning. Pearson.
- Liberzon, D. (2003). Switching in systems and control. In *Systems & Control: Foundations & Applications*.
- Long, L. and Zhao, J. (2016). An integral-type multiple lyapunov functions approach for switched nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(7), 1979–1986. doi:10.1109/TAC.2015.2484332.
- Lu, J. and Brown, L.J. (2010). A multiple lyapunov functions approach for stability of switched systems. 3253–3256. doi:10.1109/ACC.2010.5530464.
- Shorten, R. and Narendra, K. (1998). On the stability and existence of common lyapunov functions for stable linear switching systems. 4, 3723–3724 vol.4. doi:10.1109/CDC.1998.761788.
- Sira-Ramirez, H. and Silva-Ortigoza, R. (2006). Control design techniques in power electronics devices. Control Design Techniques in Power Electronics Devices. Springer.
- Stornelli, V., Muttillio, M., de Rubeis, T., and Nardi, I. (2019). A new simplified five-parameter estimation method for single-diode model of photovoltaic panels. *Energies*, 12(22). doi:10.3390/en12224271.
- Tan, R.H. and Hoo, L.Y.H. (2015). Dc-dc converter modeling and simulation using state space approach. 42–47. doi:10.1109/CENCON.2015.7409511.
- Vu, L. and Liberzon, D. (2005). Common lyapunov functions for families of commuting nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 54(5), 405–416. doi:https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2004.09.006.
- Wang, H., Sun, H., and Lu, X. (2021). An overview on small-signal modeling and stability analysis methods of voltage-source converter grid-connected system. 320–326. doi:10.1109/AEES51875.2021.9403103.
- Wu, T.H., Liu, W.C., Moo, C.S., Cheng, H.L., and Chang, Y.N. (2016). An electric circuit model of photovoltaic panel with power electronic converter. 1–6. doi:10.1109/COMPEL.2016.7556672.