

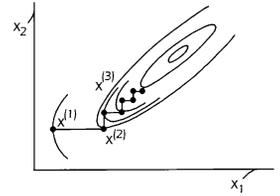


# COMPARACIÓN DEL EFECTO DEL CONTROL EN UN SISTEMA CELDA-CONVERTIDOR

José Rafael Vidal Fuentes

Gamaliel Blé González

UJAT, rafa-1812@hotmail.com



## 1. Introducción

Debido a la contaminación actual, el uso de generadores fotovoltaicos por medio de paneles solares resulta un tema de estudio trascendental, ya que su uso ayuda a reducir el impacto ambiental [3]. Sin embargo, las variaciones de energía debido a lo que se conoce como condiciones no óptimas en las celdas solares, las cuales incluyen sombras parciales, baja incidencia solar y acumulación de polvo, motivan el estudio del efecto de control en un sistema celda-convertidor para obtener un mejor rendimiento del mismo [8]. Una herramienta importante para el estudio del rendimiento del sistema, son las ecuaciones diferenciales; ya que a través de éstas, se pueden realizar modelos matemáticos que brinden información acerca del comportamiento de los elementos del sistema fotovoltaico. Con base en los resultados, se pueden tomar decisiones para diseñar el controlador a utilizar, que permita mejorar el rendimiento del sistema [5, 7].

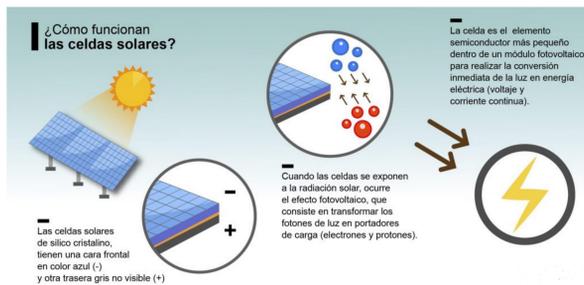


Figura 1: Las variaciones de energía debido a lo que se conoce como condiciones no óptimas en las celdas solares motivan el estudio del efecto de control en un sistema celda-convertidor para obtener un mejor rendimiento del mismo.

## 2. Descripción del modelo

En la figura 2 vemos el modelo de un sistema estándar de un convertidor elevador acoplado a una celda solar que funge como fuente de energía. De este sistema se obtienen las ecuaciones dinámicas que modelan su comportamiento, las cuales se estudiarán posteriormente para determinar las condiciones que nos garantizan la estabilidad del mismo.

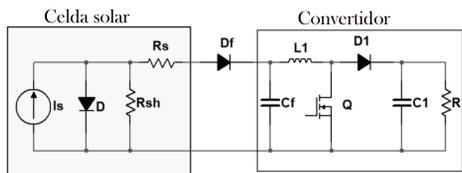


Figura 2: Diagrama esquemático de un convertidor elevador con una celda solar como fuente de energía.

### Convertidor elevador (tipo boost)

En la figura 3 vemos la estructura de un convertidor elevador, y para su estudio se toma la celda solar como una fuente de voltaje, esto ayuda a obtener las ecuaciones de este sistema a través de los análisis de nodos y de mallas del circuito.

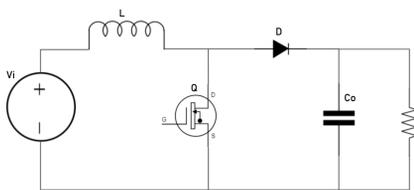


Figura 3: Convertidor elevador.

Estas dos ecuaciones se obtienen del análisis del circuito anterior teniendo en cuenta que el interruptor Q puede estar en estado abierto o cerrado, lo que da paso a considerar el circuito en dos estados distintos.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{v_i}{L} - \frac{v_C \bar{U}}{L} \\ \frac{dv_C}{dt} &= \frac{i_L \bar{U}}{C} - \frac{v_C}{RC} \end{aligned} \quad (1)$$

### Celda solar

Estudiar el modelo de la celda en circuito abierto y en corto circuito ayuda a obtener la ecuación que modela su comportamiento.

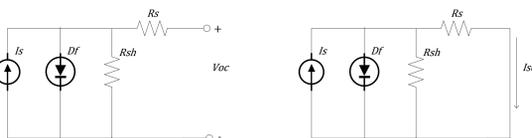


Figura 4: Celda solar en circuito abierto y corto circuito.

$$\frac{dv_{Cf}}{dt} = \frac{I_{SC}}{C_f} - \frac{v_{Cf}}{R_f C_f} - \frac{i_L}{C_f} \quad (2)$$

## 3. Estabilidad del sistema

De la descripción del modelo anterior se tiene que el sistema de ecuaciones diferenciales que modelan el sistema fotovoltaico está dado por 1 y 2.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{Cf} &= \frac{I_{sc}}{C_f} - \frac{I_L}{C_f} - \frac{V_{Cf}}{R_f C_f}, \\ \dot{I}_L &= \frac{V_{Cf}}{L} - \frac{\bar{U} V_C}{L}, \\ \dot{V}_C &= \frac{\bar{U} I_L}{C} - \frac{V_C}{RC}, \end{aligned} \quad (3)$$

con la restricción de que  $\bar{U}$  solo puede tomar valores de 0 y 1.

Del sistema de ecuaciones (3) se calculan los puntos de equilibrio

$$\begin{bmatrix} 1 & R_f & 0 \\ 1 & 0 & -\bar{U} \\ 0 & \bar{U} R & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cf} \\ I_L \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc} R_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

notemos que el determinante de la matriz cuadrada de  $3 \times 3$  de este sistema es  $\bar{U}^2 R + R_f$ , por lo tanto tenemos una matriz no singular, y por ende un único punto de equilibrio el cual se obtiene resolviendo este sistema de ecuaciones, se tiene entonces que

$$\begin{aligned} V_{Cf} &= I_{sc} R_k, \\ I_L &= \frac{I_{sc} R_k}{R \bar{U}^2}, \\ V_C &= \frac{I_{sc} R_k}{\bar{U}}, \end{aligned}$$

donde

$$R_k = \left[ \frac{1}{R_f \bar{U}^2 + 1} \right] \bar{U}^2 R.$$

Ahora se lleva a cabo un cambio de coordenada para estudiar la estabilidad del sistema.

$$\begin{aligned} V_{Cf} &= \tilde{V}_{Cf} + I_{sc} R_k, \\ I_L &= \tilde{I}_L + \frac{I_{sc} R_k}{R \bar{U}^2}, \\ V_C &= \tilde{V}_C + \frac{I_{sc} R_k}{\bar{U}}. \end{aligned}$$

Las nuevas variables que aparecen con una tilde representan los cambios de corriente y voltaje alrededor del punto de equilibrio.

El siguiente sistema de ecuaciones diferenciales el cual se encuentra escrito de forma matricial se obtiene de las ecuaciones anteriores, donde las variables con tilde serán los nuevos estados del sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{V}}_{Cf} \\ \dot{\tilde{I}}_L \\ \dot{\tilde{V}}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_f C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & -\frac{\bar{U}}{L} \\ 0 & \frac{\bar{U}}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{Cf} \\ \tilde{I}_L \\ \tilde{V}_C \end{bmatrix}. \quad (5)$$

El polinomio característico de este sistema está dado por

$$\lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0,$$

donde

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{RC + R_f C_f}{RC R_f C_f} > 0 \\ a_1 &= \frac{L + \bar{U}^2 R R_f C_f + RC R_f}{RLC R_f C_f} > 0 \\ a_0 &= \frac{\bar{U}^2 R + R_f}{RLC R_f C_f} > 0 \\ a_2 a_1 - a_0 &= \frac{CLR + C_f L R_f + C^2 R^2 R_f + C_f^2 R R_f \bar{U}^2}{C^2 C_f^2 L R^2 R_f^2} > 0. \end{aligned}$$

Los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  corresponden a los coeficientes del polinomio característico del sistema, mientras que la expresión  $a_2 a_1 - a_0$  corresponde a la única expresión del arreglo de Routh Hurwitz que sobrevive para este polinomio, por lo tanto, el criterio de Routh Hurwitz dice que si todas estas expresiones son positivas entonces todas las raíces del polinomio tienen parte real negativa. Para este caso se puede ver que todas estas expresiones son positivas ya que los valores de cada uno de los elementos electrónicos son positivos y en las expresiones solo se encuentran sumas por lo que el punto de equilibrio es asintóticamente estable.

## 4. Simulación

### 4.1. Diseño del convertidor

Para entender mejor el comportamiento del convertidor en el sistema fotovoltaico se requiere hacer un análisis de su funcionamiento y el diseño del mismo, es decir, hacer el cálculo correspondiente a cada uno

de los elementos que se ven involucrados en el convertidor de acuerdo a las necesidades del usuario [2]. Los siguientes cálculos se usan para la obtención de los parámetros del convertidor elevador

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{24}{72} \approx 0.667$$

$$L = \frac{DV_{in}}{\Delta i_L(on) f_s} = \frac{DV_{Cf}}{\Delta i_L(on) f_s} = \frac{(0.667)24v}{0.05(1.44A)(100kHz)} \approx 2.22mH$$

$$C = \frac{DP_{out}}{\Delta V_{out} V_{out} f_s} = \frac{(0.667)35w}{0.05(72v)^2(100kHz)} \approx 0.9\mu F$$

Donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $V_{out}$  es el voltaje de salida,  $D$  es el ciclo de trabajo,  $\Delta i_L(on)$  es el rizado de corriente deseado en el inductor,  $f_s$  es la frecuencia de conmutación,  $V_{Cf}$  es el voltaje en el capacitor de acoplamiento y  $P_{out}$  es la potencia de salida.

### 4.2. Simulink

Al usar estos parámetros en el entorno Simulink de Matlab se puede hacer la simulación del comportamiento del convertidor elevador con una fuente constante contra el comportamiento del convertidor usando una celda solar como fuente de energía como se observa en las figuras 5 y 6.

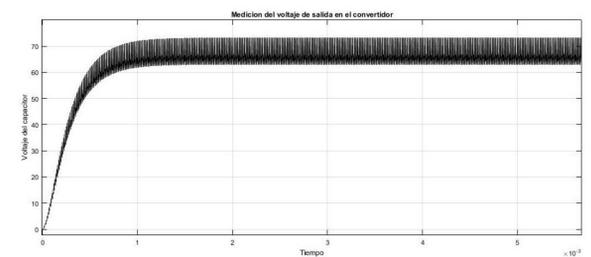


Figura 5: Simulación del convertidor con una fuente constante.

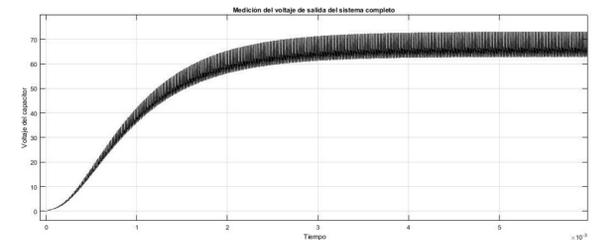


Figura 6: Simulación del convertidor con una celda solar como fuente.

Como se puede observar al comparar ambas gráficas, es claro que cuando se tiene una fuente de energía constante se llega más rápido al voltaje de salida deseado, mientras que cuando se usa la celda solar como fuente de energía al sistema le toma más tiempo llegar al voltaje de salida deseado, esto se debe al tiempo en el que el capacitor de acoplamiento se carga para mantener un voltaje constante. Sin embargo, la diferencia de tiempos es muy pequeña y casi imperceptible en la vida real por lo que el sistema funciona correctamente en ambos casos.

## 5. Trabajo futuro

Comparar la respuesta del sistema ante los métodos de control deslizante y por moldeo de energía, al igual que analizar la respuesta y estabilidad del sistema ante variaciones en la carga y la fuente de entrada, ya que tomar en cuenta estas variaciones acercan más el resultado a la realidad que se percibe en el desempeño de estos sistemas.

## Referencias

- [1] H. Argote, Análisis de estabilidad y control de un sistema celda convertidor. Tesis de Maestría, UJAT 2019.
- [2] R.W. Erickson. Fundamental of Power Electronic. Kluwer Academic Publishers, 2nd edn. 2004.
- [3] L. Fraas y L. Partain (2010); *Solar Cells and Their Applications*. Wiley, New Jersey.
- [4] M. W. Hirsh y S. Smale, (1974); *Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra*. Academic Press, New York.
- [5] A. Krama, L. Zellouma y B. Rabhi. Improved control of shunt active power filter connected to a photovoltaic system using technique of direct power control. International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), pp.880-885, 2016.
- [6] L. Perko, (2006); *Differential Equations and Dynamical Systems*. Springer, New York.
- [7] A. Tobías-González, R. Peña-Gallardo, J. Morales-Saldaña y G. Gutiérrez-Urueta. Modeling of a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for real time simulations. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), pp.1-6, 2015.
- [8] W. Xiao, N. Ozog and W. G. Dunford (2007). Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54(3), 1696-1704.