

Control para un Sistema Convertidor de CD/CA Alimentado por un Panel Solar

Alfredo Roldán Caballero¹

Ramón Silva Ortigoza¹

Eduardo Hernández Márquez¹

José Rafael García Sánchez¹

Carlos Alejandro Avila Rea¹

César Noé Pérez Catalán¹

¹ Instituto Politécnico Nacional

CIDETEC Área de Mecatrónica

Unidad Profesional Adolfo López Mateos

Resumen

Este trabajo presenta la simulación circuital en lazo cerrado de un convertidor electrónico de potencia de CD/CA, alimentado por un panel solar. La estrategia de control se compone de dos etapas: Primero, se utiliza un control por modos deslizantes para regular el voltaje de salida del convertidor Boost. Segundo, a través de un PID se logra resolver el seguimiento de trayectoria del convertidor Buck de puente completo. La verificación del sistema en lazo cerrado es realizada con la ayuda de Matlab-Simulink en el Toolbox SimPowerSystem.

1. Introducción

Actualmente, el desarrollo de la tecnología se ha incrementado con respecto a otros años y se espera que este crecimiento sea en forma exponencial; es decir, cada vez se automatizarán más los sistemas de manufactura, se necesitarán más medios de transporte más eficaces etc. El aumento en la tecnología implica una mayor demanda de energía, la cual en estos días se obtiene en su mayoría de recursos no renovables como el petróleo y carbón. Sin embargo, el proceso de generación de la energía por medio de tales recursos es muy agresivo para el medio ambiente, teniendo como consecuencia la contaminación de la calidad del aire, tierras de cultivo, acuíferos, etc. Por lo anterior, es claro la necesidad de encontrar nuevas formas de producción de energía, en específico de energía eléctrica. Las llamadas energías limpias se han convertido en una posible solución ante tal problema. Algunas diferentes formas de energías limpias son: Energía hidráulica, geotérmica, eólica y solar. Siendo esta última, fuente suministro de energía para el sistema bajo estudio.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 muestra los modelos matemáticos de los convertidores que componen al sistema propuesto. La Sección 3 corresponde a la estrategia de control a utilizar, por otro lado, en la Sección 4 se presentan los resultados de simulación circuital del sistema en lazo cerrado. Por último, las conclusiones son dadas en la Sección 5.

2. Sistema convertidor de CD/CA alimentado por un panel solar.

La Fig. 1, muestra el sistema convertidor de CD/CA alimentado por un panel solar, el cuál por las partes que lo componen logra transformar la corriente directa a corriente alterna. Tal sistema se puede dividir en los siguientes tres subsistemas:

1. *Panel solar.* Es el suministro de energía eléctrica del sistema, el voltaje de salida del panel se denota como $v_{in}(t)$. Adicionalmente, tiene acoplado un capacitor C_{in} para su correcto funcionamiento.
2. *Convertidor de CD/CD tipo Boost.* Es el encargado de elevar el voltaje suministrado por la celda. El convertidor consta de un transistor Q con una entrada de conmutación u , un inductor L_1 , un diodo D_1 y el capacitor C_1 , a este último se agregan los diodos D_2 y D_3 para evitar corriente inversa del convertidor Buck de puente completo.
3. *Convertidor Buck de puente completo.* Permite convertir el voltaje directo a voltaje alterno. Está compuesto por cuatro transistores denotados por Q_1, \bar{Q}_1, Q_2 y \bar{Q}_2 , accionados por las señales u_1, \bar{u}_1, u_2 y \bar{u}_2 respectivamente. Un filtro pasa bajas con L_2 y C_2 como inductor y capacitor; y finalmente una resistencia R que representa la carga.

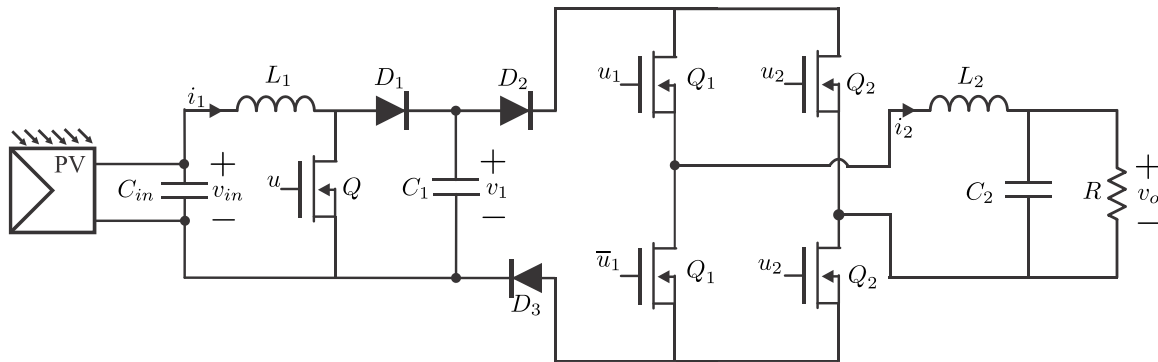


Figura 1. Sistema convertidor de potencia CD/CA alimentado por un panel solar.

De la Fig. 1, se observa que la celda solar proporciona voltaje en las terminales del capacitor C_{in} . Así, $v_{in}(t)$ corresponde el voltaje de alimentación para el convertidor Boost, cuyo modelo matemático es [1]:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} = -(1-u)v_1 + v_{in}, \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_1}{dt} = (1-u)i_1, \quad (2)$$

con $u \in [0,1]$. Mientras que ahora v_1 , voltaje de salida del convertidor Boost, alimenta al convertidor Buck de puente completo, el cual tiene como modelo matemático [2]:

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = -v_o + v_1 u_{av}, \quad (3)$$

$$C_2 \frac{dv_1}{dt} = i_2 - \frac{1}{R} v_o, \quad (4)$$

donde $u_{av} \in [-1,1]$.

3. Control

El control del sistema se divide en dos etapas; primero se controla el convertidor Boost para poder regular v_1 a 130 V y segundo controlar el Buck de puente completo para que entregue un voltaje sinusoidal de 120V a 60Hz.

El primer control se realiza con la técnica de modos deslizantes y debido a que el voltaje de salida del convertidor Boost es una variable de fase no mínima, la superficie deslizante que se propone esta en términos de la corriente del inductor [3]:

$$s = i_1 - \bar{i}, \quad (5)$$

dónde \bar{i} es la corriente en estado permanente, expresado en términos del voltaje deseado, i.e., $\bar{v}_1 = 130$ V. Así, de acuerdo a [3], el control que resuelve la regulación de la salida de voltaje del convertidor Boost es:

$$u = \frac{1}{2}(1 - \text{sign}(s)). \quad (6)$$

El segundo control es por medio de un PID. Por un lado, la trayectoria deseada se propone como $v_o^*(t) = 120 \sin 120\pi t$. Por otro lado, el error de seguimiento se define como $e(t) = v_o^* - v_o$. De esta manera, el control para el seguimiento de voltaje del convertidor Buck de puente completo tiene la siguiente forma:

$$u_{av} = K_p e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt}, \quad (7)$$

donde las ganancias del control (11) son $K_p = 0.049$, $K_I = 24.39$ y $K_D = 2.08$, la cuales fueron las que mostraron mejores resultados en el seguimiento de trayectoria.

4. Simulación

Los resultados de simulación circuital en lazo cerrado son aquí presentados. Para ello se construyó el diagrama de la Fig. 2 en Matlab-Simulink con el toolbox "SimPowerSystem".

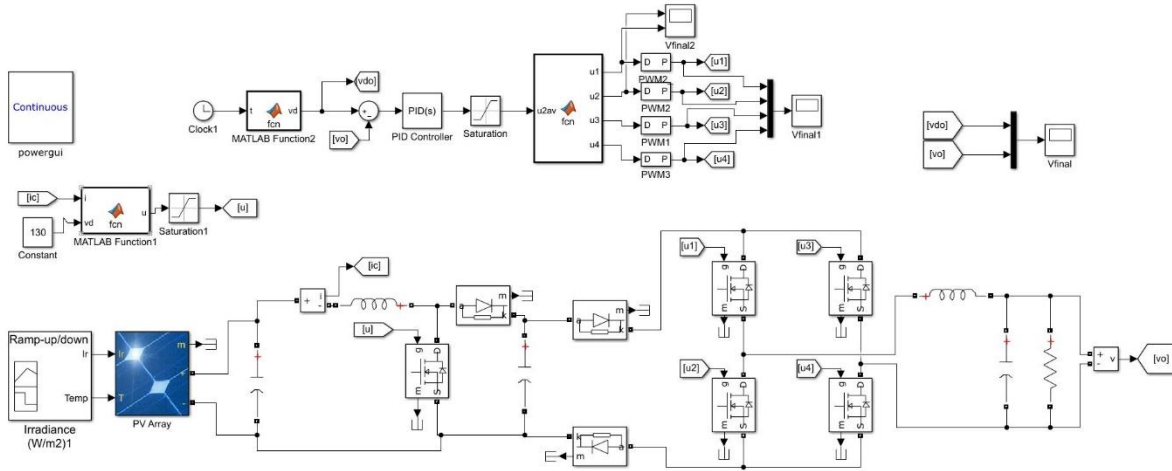


Figura 2. Diagrama circuital del sistema en lazo cerrado.

De la Fig. 2 se puede resaltar lo siguiente; en la parte superior izquierda, debajo del bloque powergui se encuentra el control por modos deslizantes, el cual tiene objetivo regular el voltaje de salida del convertidor Boost. En la parte superior central está el control PID, este se encarga del seguimiento de trayectoria de la salida de voltaje del convertidor Buck de puente completo. La parte inferior de la figura en cuestión, muestra el sistema implementado en Simulink, el suministro de energía del sistema es proporcionado por la celda solar.

La celda se configura como en [4], con variaciones de temperatura e irradiación dadas por las ecuaciones (12) y (13), esto con la finalidad de emular las condiciones atmosféricas:

$$T = \begin{cases} 40 \text{ }^\circ\text{C} & \text{para } t \leq 2 \text{ s,} \\ -20t + 80 \text{ }^\circ\text{C} & \text{para } t \in (2,3]\text{s,} \\ 20 \text{ }^\circ\text{C} & \text{para } t \in (3,5]\text{s,} \\ 7.5t - 17.5 \text{ }^\circ\text{C} & \text{para } t \in (5,7]\text{s,} \\ 35 \text{ }^\circ\text{C} & \text{para } t > 7 \text{ s.} \end{cases} \quad (8)$$

$$I_r = \begin{cases} 1000 \text{ W/m}^2 & \text{para } t \leq 2 \text{ s,} \\ -800t + 2600 \text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (2,3]\text{s,} \\ 200 \text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (3,5]\text{s,} \\ 300t - 1300 \text{ W/m}^2 & \text{para } t \in (5,7]\text{s,} \\ 800 \text{ W/m}^2 & \text{para } t > 7 \text{ s.} \end{cases} \quad (9)$$

La simulación se llevó a cabo por medio del método numérico de Euler (ode1) con paso fijo de $T = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$. Relativo a los valores de los componentes del sistema, se consideraron los siguiente: $C_{in} = 560 \mu\text{f}$, $C_1 = 560 \mu\text{f}$, $C_2 = 120 \mu\text{f}$, $L_1 = 4.94 \text{ mH}$, $L_2 = 4.94 \text{ mH}$ y $R = 64 \Omega$. Es importante mencionar que tales componentes se consideraron ideales, es decir, no se tomaron

en cuenta las resistencias internas. Respecto a la frecuencia de los PWM, estos operan a una frecuencia de 50 kHz.

La Fig. 3 muestra como el voltaje de salida del sistema (color naranja) logra seguir satisfactoriamente al voltaje deseado (color azul) en aproximadamente 30 ms, aún en presencia de variaciones de voltaje en la entrada del sistema. Verificando el buen desempeño de los controles utilizados.

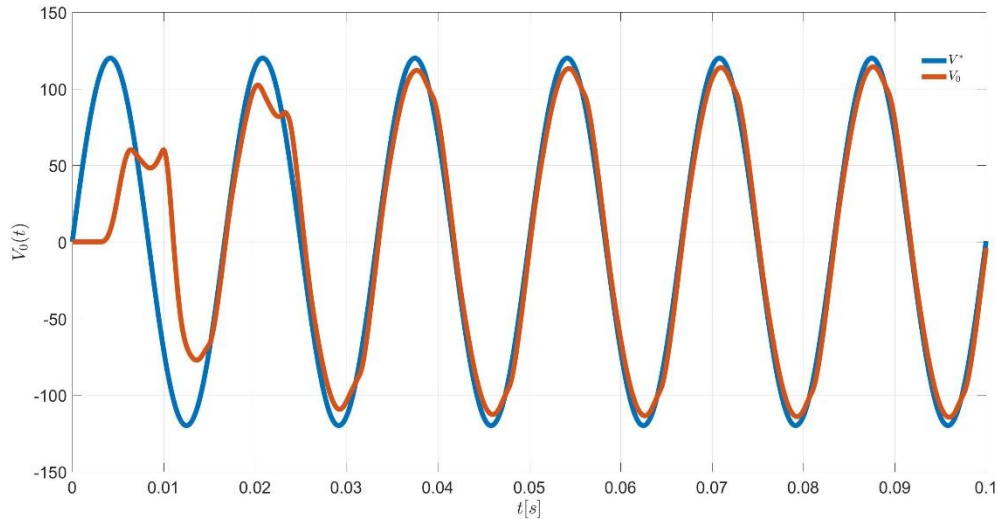


Figura 3. Respuesta de la salida $v_o(t)$ al seguimiento de trayectoria.

5. Conclusiones

El trabajo presentó la conexión en cascada de un panel solar, convertidor Boost y convertidor Buck de puente completo para la obtención de corriente alterna (120 V, 60 Hz.), vía modos deslizantes y PID. El panel solar actuó como fuente de suministro de energía eléctrica. Sin embargo, el voltaje suministrado es de una magnitud baja, razón por la que se utilizó un convertidor Boost para elevar el voltaje y poder regularlo a 130 V, esto con la ayuda de un control por modos deslizantes. Para obtener un voltaje alterno de amplitud de 120 V y frecuencia 60 Hz, se utilizó un control PID en el convertidor Buck de puente completo, de tal forma que el filtro LC de tal convertidor atenuó los abruptos de voltaje y corriente generado por la conmutación del puente, Fig. 3.

Como trabajos futuros se pretende la obtención del modelo matemático del sistema convertidor Boost-convertidor Buck de puente completo para la implementación de estrategias de control que consideren la dinámica completa del sistema.

6. Referencias

- [1] H. Sira-Ramírez y R. Silva-Ortigoza, *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, London, U.K.: Springer-Verlag, 2006.
- [2] D. Biel, E. Fossas, F. Guinjoan, E. Alarcón y A. Poveda, «Application of Sliding-Mode Control to the Design of a Buck-Based Sinusoidal Generator,» *IEEE Transactions on industrial electronics*, pp. 563-571, 2001.
- [3] H. Sira-Ramírez, «Flatness and trajectory tracking in sliding mode based regulation of dc-to-ac conversion schemes,» *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 5, pp. 4268-4273, 1999.
- [4] E. Hernández-Márquez, R. Silva-Ortigoza, J. R. García-Sánchez, V. H. García-Rodríguez y C. A. Avila-Rea, «Control robusto para el sistema convertidor de CD/CD Buck-Motor de CD alimentado por un panel solar,» *Boletín Upiita*, n° 66, 2017.