

El convertidor Sepic: modelado y control usando elementos no ideales

SEPIC converter: modeling and control considering internal energy losses

Luis D. Patarroyo-Gutiérrez¹  Mario E. González-Niño¹  Jorge A. Plazas¹ 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja – Colombia.

Resumen

En este artículo se describe el procedimiento que permite diseñar un controlador para un convertidor Sepic de 2 kilovatios con elementos no ideales que puede ser usado en aplicaciones industriales. Se obtiene el modelo conmutado del convertidor a partir de los modos de operación, con este se construye el modelo en pequeña señal que permite obtener la función de transferencia necesaria para el diseño del controlador análogo, garantizado un tiempo de establecimiento de 25 ms. Se muestran los resultados de simulación usando MATLAB®/SIMULINK® alrededor del punto de operación realizando perturbaciones a la salida del convertidor y variaciones en el voltaje DC de entrada, evaluando el desempeño del sistema en el dominio temporal. Con el controlador diseñado se satisface la especificación de diseño para las resistencias internas de los inductores hasta 0.3 Ohmios.

Abstract

This paper describes a procedure for designing a 2-kilowatt SEPIC converter controller without ideal devices, to be used in industrial applications. A small-signal model can be constructed from a commuted converter in different operation modes. Subsequently, a transfer function is determined to design the analog controller, ensuring a settling time of 25 ms. The results around the operation point are shown using MATLAB®/SIMULINK®, and perturbations are applied to the converter output and the DC input voltage to evaluate performance in the time domain. The designed controller effectively meets the design specifications for disturbances near the operating point.

Palabras clave: convertidor SEPIC, control de voltaje, elementos no ideales, espacio de estados, control PID.

Keywords: SEPIC converter, voltage control, non-ideal elements, state space, PI control.

¿Cómo citar?

Patarroyo-Gutierrez, L.D., Gonzalez-Niño, M.E., Plazas, J.A. SEPIC Converter: Modeling and Control Considering Internal Energy Losses, Ingeniería y Competitividad, 26(1): e-21513016

<https://doi.org/10.25100/iyv.v26i1.13016>

Recibido: 20-06-23

Aceptado: 29-02-24

Correspondencia:

luis.patarroyo@uptc.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses: ninguno declarado



¿Por qué se llevó a cabo?

Este estudio se realizó con el objetivo de comprender el modelado matemático de convertidores electrónicos de potencia y su aplicación al diseño de controladores lineales.

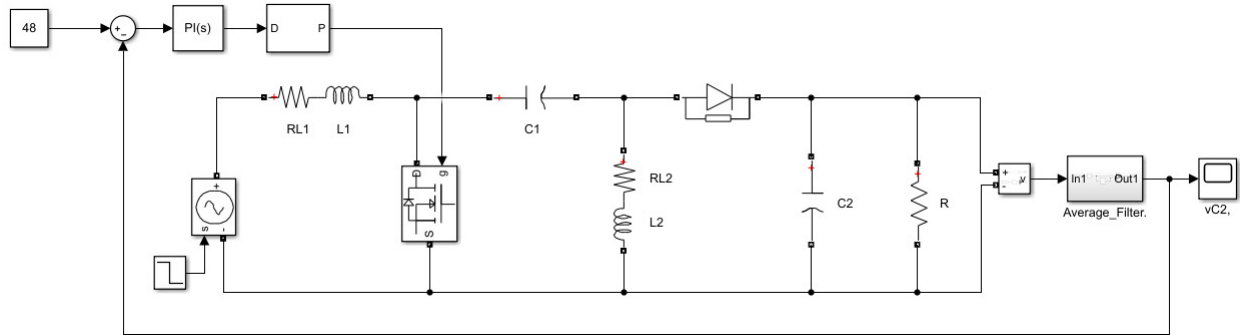
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados de la simulación demostraron que la respuesta temporal del modelo matemático propuesto es cercana a la respuesta del circuito con elementos discretos simulado en MATLAB. En consecuencia, la variación en el voltaje de las señales de tensión del controlador en los casos expuestos es inferior a 3 mV.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados de esta investigación demuestran que el procedimiento matemático utilizado es capaz de obtener el modelo de pequeña señal, incluyendo las pérdidas de energía, de forma estructurada, proporcionando resultados cercanos a la respuesta temporal del circuito convertidor electrónico de potencia.

Graphical Abstract



Introducción

Los convertidores de corriente directa (DC-DC) se utilizan en aplicaciones que requieren elevar o reducir voltaje; esto depende de la topología de cada convertidor. El convertidor SEPIC eleva y reduce niveles de voltaje, permitiendo su uso en aplicaciones de generación de energía renovable, debido a que regula los niveles de voltaje DC de salida (1). Una de las aplicaciones de este convertidor es el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia en sistemas de generación fotovoltaica o eólica, esto se logra mediante el uso de estrategias de control en los sistemas de generación (2). Es fundamental conocer los modelos matemáticos que representan las dinámicas del convertidor para diseñar los controladores que cumplan con las necesidades de las aplicaciones. Un convertidor puede ser representado mediante funciones de transferencia, como en (3,4), donde se presentan las relaciones entre ciclo útil y voltaje de salida, y voltaje de entrada a voltaje de salida. Estas funciones de transferencia permiten identificar la respuesta del convertidor ante alteraciones en cada uno de sus parámetros o características. Otra representación es el modelo conmutado, este aborda por completo el comportamiento de un convertidor y se obtiene a partir de los modos de operación (5–14), con este modelo se establece el modelo en pequeña señal (4,6,11,13,15,16), necesario para el diseño de controladores lineales (17). La revisión documental mencionada hasta este punto evidencia que la mayor parte de los autores obtienen modelos con elementos ideales, en (5,18–20) los autores proponen funciones de transferencia y modelos conmutados con elementos no ideales, presentando modelos más aproximados al circuito implementado; sin embargo, no proporcionan acciones de control al convertidor.

En el control de convertidores se aplica el control de voltaje de salida (3,7,11–13,15,16,21,22), con el propósito de garantizar que el voltaje a la salida del convertidor sea aproximadamente constante ante variaciones en el voltaje de entrada que alimenta al convertidor y variaciones en la carga que se conecta.

Como aporte a la revisión documental, en este artículo se presenta el modelo matemático en pequeña señal del convertidor SEPIC incluyendo las resistencias internas de los inductores y con este modelo no ideal se propone un controlador PI análogo para regular el voltaje DC de salida.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 exponen los modos de operación del convertidor. Luego se muestra el modelo conmutado del convertidor en la sección 3, en la sección 4 se muestra el modelo en pequeña señal, el controlador diseñado para el convertidor se aborda en la sección 5, finalmente en la sección 6 se muestran los resultados de simulación del modelo del convertidor controlado ante perturbaciones y variaciones en el voltaje de entrada y la carga respectivamente. Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas del análisis de resultados y el cumplimiento de las especificaciones definidas para el desempeño del convertidor SEPIC.

Modos de operación

El convertidor SEPIC puede elevar o reducir los niveles de voltaje a la salida. Esta característica permite regular los cambios dados en los niveles DC en campos de generación fotovoltaica (1). En la Figura 1 se muestra el convertidor SEPIC, que consta de cuatro elementos que almacenan energía: dos inductores con resistencias internas, dos condensadores, un MOSFET, un Diodo y una resistencia.

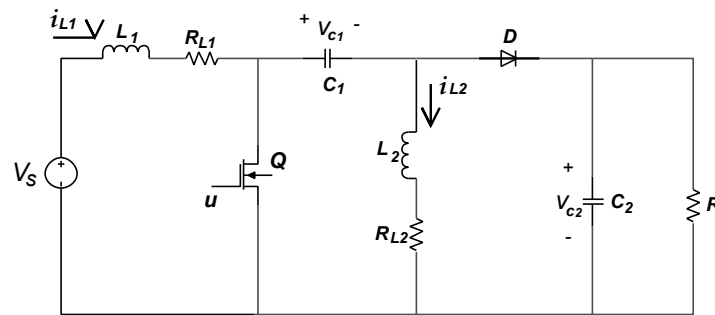


Figura 1. Convertidor SEPIC.

Este convertidor posee dos configuraciones debido a los estados de conmutación del MOSFET. En caso de que este dispositivo se encuentre en estado de activación, se presenta la configuración I, mientras que, en caso de desactivación, se establece la configuración II, tal como se puede observar en la Figura 2.

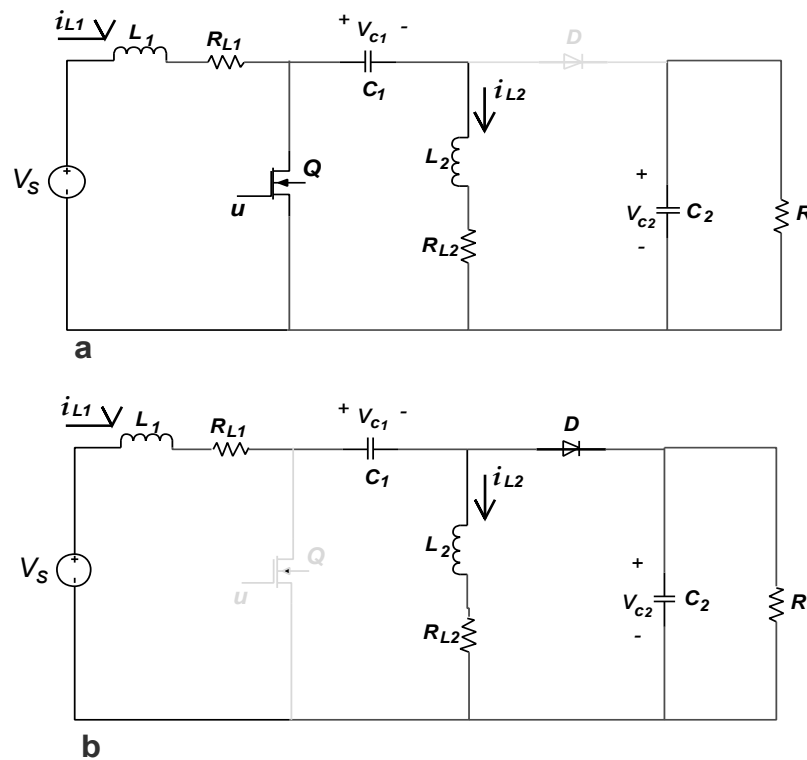


Figura 2. (a) convertidor con señal de control activa. (b) convertidor con señal de control inactiva

En el caso de la configuración I, el MOSFET se enciende y fluye corriente a través de este, la fuente V_s , el inductor L_1 y la resistencia R_{L1} , por lo que la fuente carga el inductor L_1 . Un efecto de esta activación es que el diodo del circuito se apaga; como consecuencia, el condensador C_2 suministra energía a la resistencia de salida. Cuando la señal de control hace que se inactive el MOSFET se presenta la configuración II que se muestra en la

Figura 2b. El diodo se activa ya que, es mayor el voltaje en el terminal del ánodo debido a que se suman los voltajes de la fuente y el inductor cargado. Aplicando las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff en las configuraciones, se construye el modelo conmutado que se expone en la siguiente sección.

Modelo Conmutado

El modelo conmutado se construye con las variables de estado del convertidor SEPIC, estas corresponden a las corrientes en los inductores i_{L1} , i_{L2} y los voltajes en los condensadores v_{C1} y v_{C2} , siendo las señales de corriente del inductor 1, corriente en inductor 2, voltaje en condensador 1 y voltaje en condensador 2 respectivamente. En el caso de la configuración I, se determinan los voltajes y corrientes para formar las ecuaciones de estado que se muestran en la Ec. (1). Para la configuración II, se presentan las ecuaciones de estado en la Ec. (2).

$$\begin{aligned}\frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{1}{L_1} \cdot V_s - \frac{R_{L1}}{L_1} \cdot i_{L1} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} \cdot i_{L2}\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}\frac{di_{L2}}{dt} &= -\frac{R_{L2}}{L_2} \cdot i_{L2} - \frac{1}{L_2} \cdot v_{C1} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} &= -\frac{1}{R \cdot C_2} \cdot v_{C2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{1}{L_1} \cdot V_s - \frac{R_{L1}}{L_1} \cdot i_{L1} - \frac{1}{L_1} \cdot (v_{C1} + v_{C2}) \\ \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} \cdot i_{L1}\end{aligned}\tag{2}$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = -\frac{R_{L2}}{L_2} \cdot i_{L2} + \frac{1}{L_2} \cdot v_{C2}$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} (i_{L1} - i_{L2}) - \frac{1}{R \cdot C_2} \cdot v_{C2}$$

Agrupando las Ec. (1) y (2) se construye el modelo conmutado en espacio de estados del convertidor SEPIC; este se presenta en la Ec. (3). La señal de control $d(t)$ que es igual a 1 cuando se requiere activar el MOSFET y 0 en caso contrario.

$$\begin{aligned}
 L_1 \cdot \frac{di_{L1}}{dt} &= V_s - R_{L1} \cdot i_{L1} - (v_{C1} + v_{C2}) \cdot (1 - d) \\
 C_1 \cdot \frac{dv_{C1}}{dt} &= i_{L2} \cdot d + i_{L1} \cdot (1 - d) \\
 L_2 \cdot \frac{di_{L2}}{dt} &= -R_{L2} \cdot i_{L2} - v_{C1} \cdot d + v_{C2} \cdot (1 - d) \\
 C_2 \cdot \frac{dv_{C2}}{dt} &= (i_{L1} - i_{L2}) \cdot (1 - d) - \frac{1}{R} \cdot v_{C2}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Para obtener el modelo promedio, se debe calcular la media móvil de la Ec. (3), reemplazando la señal de conmutación d por su promedio definido como α , el modelo promedio en espacio de estados del convertidor SEPIC se muestra en la Ec. (4).

$$\begin{aligned}
 L_1 \cdot \frac{di_{L1}}{dt} &= V_s - R_{L1} \cdot i_{L1} - (v_{C1} + v_{C2}) \cdot (1 - \alpha) \\
 C_1 \cdot \frac{dv_{C1}}{dt} &= i_{L2} \cdot \alpha + i_{L1} \cdot (1 - \alpha) \\
 L_2 \cdot \frac{di_{L2}}{dt} &= -R_{L2} \cdot i_{L2} - v_{C1} \cdot \alpha + v_{C2} \cdot (1 - \alpha) \\
 C_2 \cdot \frac{dv_{C2}}{dt} &= (i_{L1} - i_{L2}) \cdot (1 - \alpha) - \frac{1}{R} \cdot v_{C2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Modelo en pequeña señal

El modelo en pequeña señal se define a partir del modelo promedio, los puntos de equilibrio del convertidor y las variaciones alrededor del punto de operación en cada una de las variables de estado. A continuación, se muestran los pasos y las ecuaciones que permiten el cálculo de cada uno de estos y finalmente se presenta el modelo en pequeña señal del convertidor.

Los puntos de equilibrio se obtienen igualando a cero la Ec. (4) y solucionando para cada valor de i_{L1} , i_{L2} , v_{C1} y v_{C2} , se agrega el subíndice e para indicar cada valor de corriente y voltaje en el punto de equilibrio, estos se presentan en la Ec. (5) y permiten obtener la respuesta en estado estable para cada variable de estado del convertidor SEPIC.

$$\begin{aligned}
 i_{L1e} &= \frac{V_s \alpha_e^2}{(R + R_{L2})(1 - \alpha_e)^2 - R_{L1} \alpha_e^2} \\
 i_{L2e} &= \frac{V_s \alpha_e (1 - \alpha_e)}{(R + R_{L2})(1 - \alpha_e)^2 - R_{L1} \alpha_e^2} \\
 v_{C1e} &= \frac{V_s (R + R_{L2})(1 - \alpha_e)^2}{(R + R_{L2})(1 - \alpha_e)^2 - R_{L1} \alpha_e^2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$v_{C2e} = \frac{V_s \alpha_e (1 - \alpha_e) R}{(R + R_{L2})(1 - \alpha_e)^2 - R_{L1} \alpha_e^2}$$

Para indicar las variaciones alrededor del punto de operación se usa la virgulilla $\sim$, en la Ec. (6) se definen las variaciones alrededor del punto de operación para cada una de las variables de estado y la señal de conmutación.

$$\begin{aligned} v_{C1} &= v_{C1e} + \tilde{v}_{C1} \\ v_{C2} &= v_{C2e} + \tilde{v}_{C2} \\ i_{L1} &= i_{L1e} + \tilde{i}_{L1} \\ i_{L2} &= i_{L2e} + \tilde{i}_{L2} \\ \alpha &= \alpha_e + \tilde{\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

El modelo en pequeña señal se obtiene al sustituir la Ec. (6) en la Ec. (4), omitiendo los términos de orden superior a uno (17), este modelo se presenta en la Ec. (7).

$$\begin{aligned} L_1 \frac{d\tilde{i}_{L1}}{dt} &= -R_{L1} \cdot \tilde{i}_{L1} + (v_{C1e} + v_{C2e}) \cdot \tilde{\alpha} - (1 - \alpha_e)(\tilde{v}_{C1} + \tilde{v}_{C2}) + V_s \\ C_1 \frac{d\tilde{v}_{C1}}{dt} &= (i_{L2e} - i_{L1e}) \cdot \tilde{\alpha} + (1 - \alpha_e) \cdot \tilde{i}_{L1} + \alpha_e \cdot \tilde{i}_{L2} \\ L_2 \frac{d\tilde{i}_{L2}}{dt} &= -R_{L2} \cdot \tilde{i}_{L2} - \alpha_e \cdot \tilde{v}_{C1} + (1 - \alpha_e) \cdot \tilde{v}_{C2} - (v_{C1e} + v_{C2e}) \cdot \tilde{\alpha} \\ C_2 \frac{d\tilde{v}_{C2}}{dt} &= (1 - \alpha_e) \cdot \tilde{i}_{L1} - (1 - \alpha_e) \cdot \tilde{i}_{L2} - \frac{1}{R} \cdot \tilde{v}_{C2} - (i_{L1e} - i_{L2e}) \cdot \tilde{\alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

Diseño del controlador

Los parámetros de diseño del convertidor se proponen para una potencia en la carga de 2 kW. El valor de los inductores y condensadores se obtienen aplicando la Ec. (8), estos valores se calculan para evitar exceder un rizado en corriente en los inductores del 40 % y un rizado en voltaje de los condensadores C_1 y C_2 inferiores al 1 % y el 2 % respectivamente.

$$\Delta I_L = I_{out} \cdot \frac{v_{out}}{v_{in(min)}} \cdot I_{ripple} \%$$
$$L_1 = L_2 = \frac{v_{in(min)}}{\Delta I_L \cdot f_s} \cdot D_{max}$$
$$C_1 = \frac{I_{out} \cdot D_{max}}{\Delta v_{c1} \cdot f_s}$$
$$C_2 = \frac{I_{out} \cdot D_{max}}{V_{ripple} \cdot 0.5 \cdot f_s}$$

(8)

Los parámetros establecidos para el convertidor se resumen en la Tabla 1. Estos parámetros se sustituyen en el modelo del convertidor en pequeña señal descrito en la Ec. (7), con este modelo se obtiene la función de transferencia $G(s)$ que se presenta en la Ec. (9), esta función relaciona el voltaje de salida $v_{c2}(s)$ con la señal de conmutación $\alpha(s)$.

Tabla 1. Parámetros del sistema

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia en la carga		2 kW
Voltaje DC de entrada	V_s	90 V
Frecuencia de conmutación	f_s	50 kHz
Relación de trabajo	α_e	0.355
Voltaje DC de salida	v_{c2}	48 V
Corriente de salida	-	41.67 A
Rizado en corriente L_1 y L_2	ΔI_L	10 A
Rizado en voltaie C_1 y C_2	$\Delta v_{c1}, \Delta v_{c2}$	0.95 V, 0.96 V
Inductores L_1 y L_2	L_1, L_2	80 μ H
Resistencia interna inductores L_1 y L_2	R_{L1}, R_{L2}	50 m Ω
Capacitor C_1	C_1	330 μ F
Capacitor C_2	C_2	680 μ F
Carga (Resistor)		1.15 Ω

$$G(s) = \frac{-1.058 \times 10^{21} s^3 + 4.711 \times 10^{25} s^2 + 2.102 \times 10^{28} s + 1.218 \times 10^{33}}{1.11 \times 10^{16} s^4 + 3.27 \times 10^{19} s^3 + 5.618 \times 10^{23} s^2 + 8.405 \times 10^{26} s + 6.042 \times 10^{30}}$$

(9)

El controlador que mejora la respuesta dinámica del convertidor se diseña con la técnica del lugar de las raíces usando RLTOOL de MATLAB®. Las especificaciones de diseño del controlador son: tiempo de establecimiento en el voltaje de salida v_{c2} de 25 ms con sobrepaso del 0 %.

Para satisfacer el objetivo de control, se usa un controlador PI con constantes $K_p = 0.00035$ y $K_I = 0.686$, efectuando la realimentación como se muestra en la Figura 3, se obtiene la respuesta en lazo cerrado del convertidor SEPIC en la representación de espacio de estados cargado en el bloque denominado SEPIC. En este bloque ingresan las señales de control y la señal de voltaje de entrada Vs. Los cambios en la señal de voltaje Vs son efectuados mediante la señal escalón con amplitud de 85 y 90 V. El esquema de

control propuesto permite regular el voltaje a 48 V.

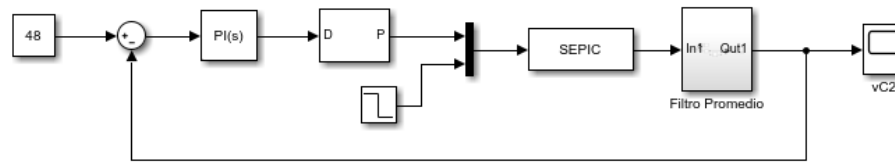


Figura 3. Esquema de control usado en el convertidor SEPIC

En la Figura 4 se muestra el circuito del convertidor SEPIC controlado. La simulación del circuito se realizó en MATLAB SIMULINK usando el TOOLBOX SIMSCAPE. Para cambiar el voltaje de entrada del circuito, se usó una fuente controlada por una señal escalón.

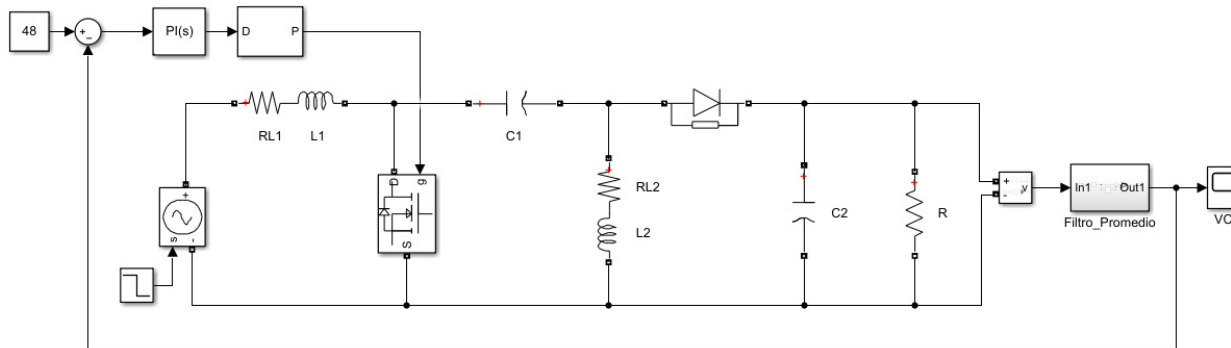


Figura 4. Circuito convertidor SEPIC controlado

A causa de la acción de conmutación de la señal de control, se incorpora en la salida del convertidor SEPIC un filtro que obtiene el valor promedio de la señal de voltaje. Los resultados de simulación se muestran en la siguiente sección.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados de simulación del convertidor SEPIC con una carga de 2 kW usando la herramienta de simulación MATLAB®/ SIMULINK®, empleando los valores de los parámetros del convertidor que se muestran en la Tabla 1. En la Figura 5 se muestra el voltaje de salida en lazo abierto del modelo matemático y del circuito del convertidor SEPIC, en el instante de tiempo 80 ms, el voltaje DC de entrada cambia a 85 V. De acuerdo con la Ec. (5) el voltaje de salida del convertidor en estado estable v_{C2e} , es directamente proporcional al voltaje de entrada; por lo tanto, el voltaje de salida se reduce.

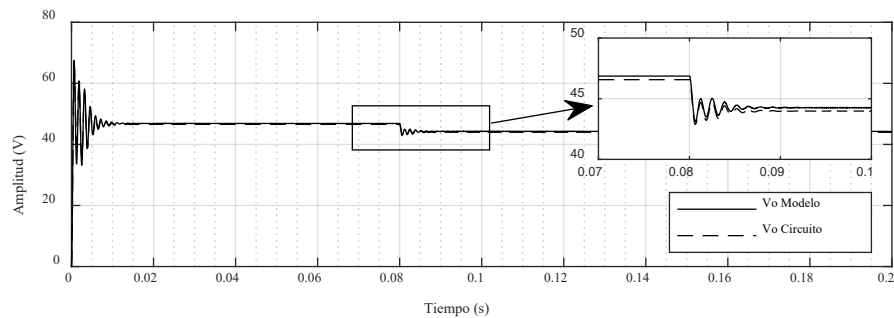


Figura 5. Respuesta en lazo abierto del modelo propuesto y el circuito del convertidor SEPIC

El voltaje de salida del convertidor SEPIC controlado para el modelo y el circuito del convertidor usando elementos discretos se muestra en la Figura 6. La configuración inicial del convertidor se establece con los parámetros de la Tabla 1, en el instante de tiempo **80 ms**, se cambia el voltaje de entrada a 85 V. Los resultados de simulación muestran que el tiempo de establecimiento para el modelo y el circuito es inferior a 25 ms, indicando que el controlador propuesto satisface las especificaciones de diseño alrededor del punto de operación.

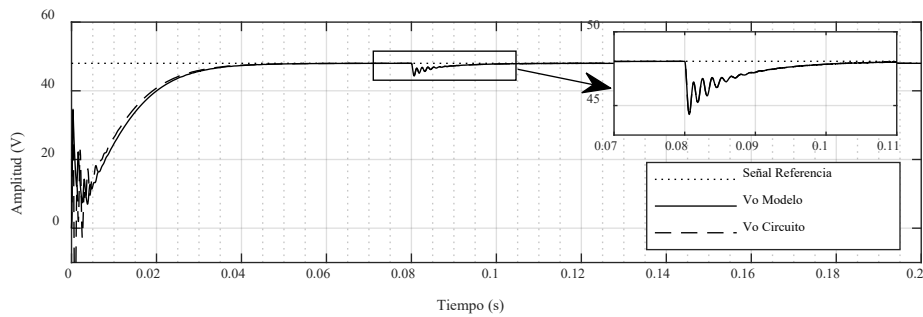


Figura 6. Respuesta del convertidor SEPIC controlado

En la Figura 7 se muestra la señal de salida del controlador. Las magnitudes de las señales de control para el modelo propuesto y el circuito simulado con elementos discretos son inferiores a 0.5 V; por lo tanto, el controlador podría implementarse de manera análoga o digital.

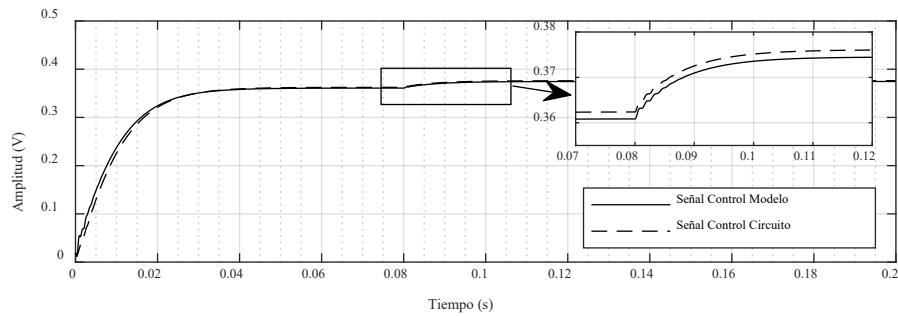


Figura 7. Señal de control ante perturbaciones en controlador SEPIC

A continuación, en la Figura 8, se presenta la respuesta del convertidor controlado ante cambios en la carga. Durante el intervalo 0 a 100 ms, la carga corresponde a 1.15Ω ; sin embargo, a partir del instante de tiempo 80 ms, se incrementa en un 5 %. Los resultados de simulación muestran que el controlador PI propuesto regula el voltaje de salida ante cambios cercanos al punto de operación establecido, específicamente en el voltaje de entrada DC y la carga conectada al convertidor.

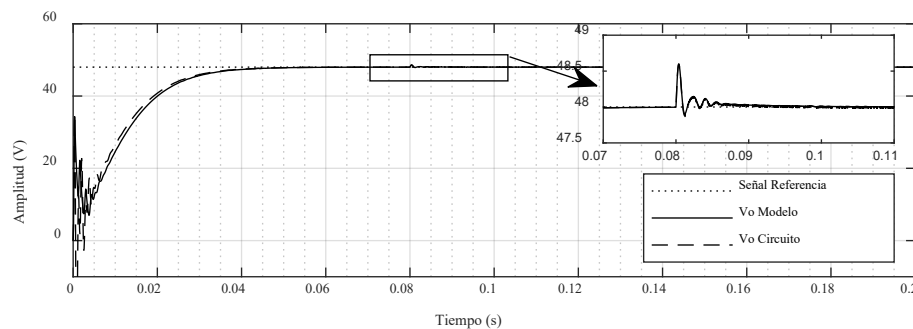


Figura 8. Voltaje de salida del convertidor SEPIC ajustando la magnitud de la carga

Conclusiones

El modelo matemático propuesto en este artículo incluye las resistencias internas de los inductores, permitiendo una aproximación a la implementación física del convertidor, esto hace que el diseño de los controladores sea más preciso para dar cumplimiento a las especificaciones deseadas, debido a que el punto de operación del convertidor SEPIC incluye más variables de las dinámicas asociadas.

El modelo presentado puede ser usado en el tratamiento de sistemas de energías renovables, almacenamiento de energía y sistemas interconectados a la red, que requieran un análisis de la eficiencia y desempeño de sistemas de control en el rechazo de perturbaciones provocadas por la carga o las fuentes de alimentación DC.

Los resultados de simulación evidencian que el controlador propuesto puede implementarse en sistemas analógicos o digitales, debido a que la señal de esfuerzo del controlador es inferior a los 0.4 V en las configuraciones establecidas para las variaciones alrededor del punto de operación.

Referencias

1. Mumtaz F, Zaihar Yahaya N, Tanzim Meraj S, Singh B, Kannan R, Ibrahim O. Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12(4):3747–63.
2. Sivakumar S, Sathik MJ, Manoj PS, Sundararajan G. An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;58:1475–85.

3. Mouslim S, Oubella M, Kourchi M, Ajaamoum M. Simulation and analyses of SEPIC converter using linear PID and fuzzy logic controller. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:3199–208.
4. Ayachit A, Reatti A, Kazimierczuk MK. Small-signal modeling of PWM dual-SEPIC dc-dc converter by circuit averaging technique. In: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016. p. 3606–11.
5. Polsky T, Horen Y, Bronshtein S, Baimel D. Transient and Steady-State Analysis of a SEPIC Converter by an Average State-Space Modelling. In: *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. 2018. p. 211–5.
6. Kanimozhi G, Meenakshi J, Sreedevi VT. Small Signal Modeling of a DC-DC Type Double Boost Converter Integrated With SEPIC Converter Using State Space Averaging Approach. *Energy Procedia*. 2017;117:835–46.
7. Poluthai S, Jirasuwankul N. Simulation of a Miniature SEPIC Converter with PI Controller for Thermoelectric Generator Module. In: *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2018. p. 1–4.
8. Hussain J, Mishra MK. Design of current mode controlled SEPIC DC-DC converter for MPPT control of wind energy conversion systems. In: *2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. 2015. p. 177–82.
9. Geethalakshmi B. Design of a closed loop control scheme for a DC-DC SEPIC converter using loop shaping method. In: *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2015]*. 2015. p. 1–5.
10. Sivamani D, Ramkumar R, Nazar Ali A, Shyam D. Design and implementation of highly efficient UPS charging system with single stage power factor correction using SEPIC converter. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:1809–19.
11. Sel A, Güneş U, Elbir Ö, Kasnakoğlu C. Comparative analysis of performance of the SEPIC converter using LQR and PID controllers. In: *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. 2017. p. 839–44.
12. Chandan B, Dwivedi P, Bose S. Closed Loop Control of SEPIC DC-DC Converter Using Loop Shaping Control Technique. In: *2019 IEEE 10th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. 2019. p. 20–5.
13. Gayen PK, Roy Chowdhury P, Dhara PK. An improved dynamic performance of bidirectional SEPIC-Zeta converter based battery energy storage system using adaptive sliding mode control technique. *Electric Power Systems Research*. 2018;160:348–61.
14. Elsayad N, Moradisizkoohi H, Mohammed O. A New SEPIC-Based Step-Up DC-DC Converter With Wide Conversion Ratio for Fuel Cell Vehicles: Analysis and Design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021;68(8):6390–400.
15. Arany RR, Bratcu AI. Robust control of a single-ended primary-inductor converter (SEPIC). In: *2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*. 2017. p. 1–6.

16. Ullah M, Ulasyar A, Zad HS, Khattak A. Design of Linear Quadratic Regulator Controller for Sepic Converter. In: 2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET). 2019. p. 1–6.
17. Bacha S, Munteanu I, Bratcu AI. "Power Electronic Converters Modeling and Control", Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. London: Springer; 2014.
18. Kircioğlu O, Ünlü M, Çamur S. Modeling and analysis of DC-DC SEPIC converter with coupled inductors. In: 2016 International Symposium on Industrial Electronics (INDEL). 2016. p. 1–5.
19. Verma M, Kumar SS. Hardware Design of SEPIC Converter and its Analysis. In: 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT). 2018. p. 1–4.
20. Nishat MM, Oninda MAM, Faisal F, Hoque MA. Modeling, Simulation and Performance Analysis of SEPIC Converter Using Hysteresis Current Control and PI Control Method. 2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology, ICISSET 2018. 2018;(October):7–12.
21. Goudarzian A, Khosravi A, Raeisi HA. A new approach in design of sliding-mode voltage-controller for a SEPIC. International Journal of Dynamics and Control. 2021;9(3):1197–209.
22. Sree BL, Umamaheswari MG. Modeling and control of solar power fed single ended primary inductor converter using cascade control scheme. In: 2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA). 2017. p. 1–7.