

Dynamical Analysis of a DC-DC Step-down Converter used as Interface with an Electrolyzer to Generate Green Hydrogen

Ma. Guadalupe Ortiz-Lopez* Jesús Leyva-Ramos**
 Luis Humberto Diaz-Saldierna**

*Universidad Politecnica de San Luis Potosi, San Luis Potosi, S.L.P., 78369
 México (Tel: 444 870 2100; e-mail: guadalupe.ortiz@upslp.edu.mx).

**Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosi, S.L.P., 78216, Mexico (e-mail: jleyva@ipicyt.edu.mx, ldiaz@ipicyt.edu.mx)

Abstract: Hydrogen is currently the most proposed element to replace fossil fuels in processes that require high heat power because it does not produce greenhouse gases in its combustion, so its production is based on the electrolysis of water using renewable sources of DC electrical energy. This work uses a quadratic buck converter to interconnect a DC source and electrolyzer, which requires feeding it with a regulated voltage. A combined model of the converter with the equivalent dynamic electrical circuit of the electrolyzer is proposed. Linear switching and linear average state space models are developed. The dynamic behavior of this model is compared with that resulting from using the static representation of the electrolyzer through simulation in Matlab software.

Keywords: Modeling and simulation of power electronics, control of renewable energy resources, electrolyzer, DC-DC converter, quadratic buck converter

1. INTRODUCCION

En la actualidad se padecen drásticos cambios en los sistemas meteorológicos y climáticos del planeta producto del calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero. Estos han aumentado en los últimos dos siglos, en especial el dióxido de carbono (CO₂), por causa de diversas actividades relacionadas con la quema de combustible fósiles tales como el carbón, petróleo o gas natural. Lo anterior ha producido un desequilibrio y el calentamiento en las capas cercanas a la superficie de la tierra.

Dentro de las principales acciones a nivel mundial para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos, está el uso de energía eléctrica proveniente de fuentes de energías renovables, tales como celdas fotovoltaicas o generadores eólicos. Sin embargo, existen equipos o procesos industriales en donde se requieren grandes cantidades de energía en los cuales esta alternativa no es la más adecuada de utilizar, tal como es el caso de equipos de transporte pesado y procesos para el tratamiento térmico de metales a alta temperatura. Como una opción viable surge el uso del hidrógeno como combustible, el cual tiene un índice Wobbe de 48.23 MJ/Nm³ muy similar al del gas natural de 53.71 MJ/Nm³, por lo que puede fácilmente reemplazarlo, pero sin sus efectos contaminantes.

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo; sin embargo, no se encuentra normalmente de forma libre en nuestro planeta. Aquí se encuentra en moléculas, entre las que destacan el agua (H₂O) y metano (CH₄), por lo que se requiere dividirlos mediante el aporte de otros tipos de

energía tales como luz, calor, energía eléctrica y sus combinaciones. Para evitar la contaminación durante la generación del hidrógeno, el único proceso viable es su producción mediante electrolisis del agua, separando el hidrógeno y el oxígeno, al aplicarle electricidad proveniente de fuentes de energía alternativa tales como celdas fotovoltaicas o generadores eólicos, combinadas en microrredes, tal como se muestra en la Fig. 1. Este proceso se lleva a cabo en un electrolizador, entre los que destacan los de tipo de intercambio de membrana de protones, conocidos como PEMEL por sus siglas en inglés.

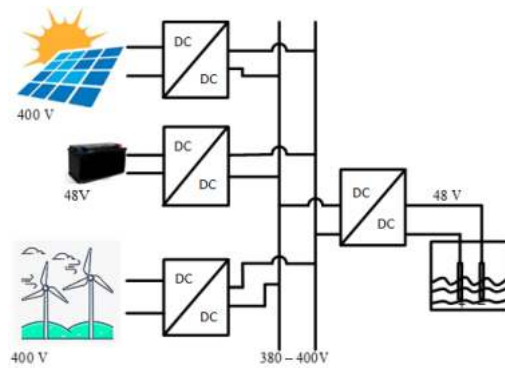


Fig. 1. Microrred de alimentación a electrolizador

Convencionalmente la energía eléctrica aplicada al electrolizador provenía de una fuente de CA rectificada por lo cual presenta buena regulación, sin embargo, al alimentarse de fuentes de energía renovable estas presentan valores variables en el voltaje de salida generado, así como intermitencias en la potencia que se proveen al electrolizador, lo cual se ha documentado en la literatura

técnica impacta en su ciclo de vida útil, Parache, F., et al. (2022), Weiß, A., et al., (2019). Por lo tanto, es necesaria la implementación de un regulador conmutado basado en un convertidor CD-CD con una conversión mínima de 4:1 o 6:1 entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida. En la literatura técnica es posible encontrar diversos esquemas de convertidores que se consideran adecuados para utilizarse con electrolizadores, tales como los cuadráticos reductores. En Gorji, S. A., (2022), adicional a las estructuras de convertidores cuadráticos reductores y semi-cuadráticos reductores-elevadores reconfigurables tolerantes a fallas, se obtiene el modelo en espacio de estados de los convertidores, pero considerando únicamente al electrolizador como una carga resistiva. En Guilbert, D. et al., (2019) se presenta un convertidor reductor CD-CD interconectado en el cual se incorpora como carga de salida un PEMEL representado por su modelo dinámico, pero no se proporciona un modelo integrado del conjunto. Otros convertidores reductores propuestos incluyen a los de tipo interconectado con corriente continua y un rizo bajo de voltaje en la salida, Guo, X., et al., (2022), o los que incorporan esquemas de control tolerante a fallas como los desarrollados por Estekim, M., et al., (2015).

Para que el regulador a desarrollar tenga los parámetros de diseño más adecuados, en el presente trabajo se obtiene un modelo que combina tanto la dinámica del convertidor a utilizar con la dinámica propia del electrolizador que permitirá el desarrollo de un esquema de control adecuado para el conjunto. Las secciones que lo componen se describen a continuación: El funcionamiento y representación mediante un modelo desde el punto de vista eléctrico de un PEMEL, se describe en la Sección 2. El modelo lineal conmutado, y promedio linealizado elaborado de forma conjunta entre un convertidor y el electrolizador para las representaciones eléctrica estática y dinámica del electrolizador se desarrolla en Sección 3, al igual que las características dinámicas que se obtienen en base al modelo anterior. En la Sección 4 se muestran resultados comparativos mediante software Matlab de los modelos obtenidos. Finalmente, el artículo presenta en la Sección 5 las conclusiones generales.

2. FUNCIONAMIENTO Y MODELADO ELECTRICO DE UN ELECTROLIZADOR TIPO PEM

Un electrolizador es una unidad en la cual se utiliza electricidad para separar el agua en hidrogeno y oxígeno. Es muy similar a una celda de combustible, y está formado por un ánodo y un cátodo separados por un electrólito, existiendo al momento cuatro tecnologías diferentes en su funcionamiento: electrolizador alcalino (AEL), electrolizador de membrana polimérica de intercambio de protones (PEMEL), electrolizador de oxido sólido (SOEL) y electrolizador de intercambio de aniones (AEMEL). Las dos primeras se encuentran disponibles comercialmente mientras que las dos última están aún bajo investigación.

Los electrolizadores de tipo alcalino, son una tecnología conocida desde inicio del pasado siglo, siendo utilizados en sistemas de producción de hidrógeno a gran escala. Tienen una expectativa de vida muy amplia y un costo de inversión bajo debido a que utilizan como catalizador materiales basados en níquel. Como inconveniente, al usar un electrolito líquido que tiene gran inercia, presentan una reacción muy lenta ante fluctuaciones por lo que su arranque tarda hasta 20 minutos. Son adecuados para aplicaciones de entre 10 y 20 MW, pero debido a su dinámica no son adecuados para su uso ante condiciones dinámicas cambiantes tales como las que se presentan en sistemas basados en sistemas de energía renovable, debidos a variaciones por irradiación solar o velocidad del viento.

En contraparte, el PEMEL, cuyo principio de funcionamiento se muestra en el esquemático de la Fig. 2, es utilizado para producción de hidrógeno a pequeña escala, pudiendo conectarse en serie para formar un electrolizador de múltiples celdas para un sistema a gran escala. Tienen como ventajas el manejo de una alta densidad de corriente y una respuesta rápida ante cambios dinámicos por su delgada membrana polimérica. En este tipo de electrolizador el agua reacciona en el ánodo formando oxígeno y iones de hidrógeno positivamente cargados (protones). Los electrones fluyen a través de un circuito externo y los iones de hidrógeno se mueven a través de la membrana polimérica hacia el cátodo. Al llegar a este, el hidrógeno se combina con electrones del circuito externo y forma hidrógeno en forma de gas.

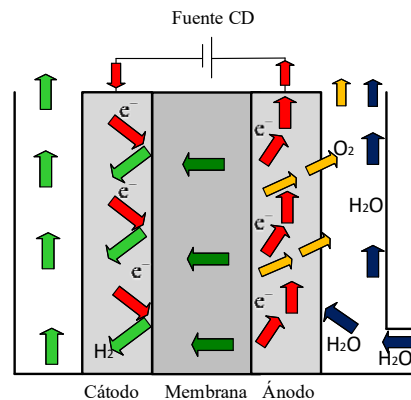


Fig. 2. Esquemático de la reacción en un electrolizador con membrana polimérica.

2.1 Modelo resistivo

El modelo más simple, es el mostrado en la Fig. 3, el cual inicialmente fue utilizado en un electrolizador alcalino y posteriormente su uso se extendió a uno tipo PEM.

En este circuito, V_{el} representa el voltaje de entrada al electrolizador, i_{el} a la corriente del electrolizador y R_{int} a la

resistencia equivalente del electrolizador basada en sus características de voltaje-corriente estáticas.

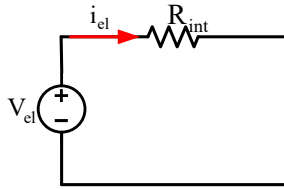


Fig. 3. Circuito eléctrico equivalente estático resistivo de un PEMEL.

2.2 Modelo equivalente estático

Este modelo mostrado en la Fig. 4, incluye una fuerza electromotriz V_{int} que representa al voltaje reversible o potencial termodinámico mínimo o teórico de la reacción química dependiente de la temperatura y la concentración, así como una resistencia conectada en serie, la cual puede calcularse por medio de la relación:

$$R_1 = v_{celda} R_{total} / (v_{celda} - V_{int}) \quad (1)$$

en donde R_{total} considera la suma de las pérdidas por activación tanto en el lado del ánodo como del cátodo, así como las pérdidas óhmicas.

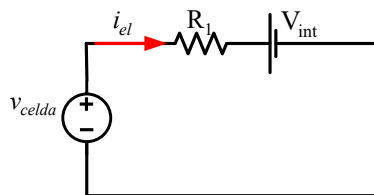


Fig. 4. Circuito eléctrico equivalente estático PEMEL

2.3 Modelo dinámico PEMEL

Los modelos previos se consideran estáticos debido a que no toman en consideración la dinámica del electrolizador PEM en caso de cambios en las condiciones de operación. A partir de pruebas experimentales mostradas en Yodwong, B. et al. (2020) se obtiene el circuito eléctrico equivalente mostrado en la Fig. 5, donde R_{int} modela la membrana, v_{act} al sobrevoltaje de activación del ánodo y $R_a C_a$ a la rama en paralelo que emula las pérdidas en el ánodo y su dinámica. Se ha encontrado que esta última es muy cercana a un sistema de primer orden y muy similar a la que presentan las celdas de combustible.

$$v_{el} = v_{act} + R_{int} i_{el} + V_{int} \quad (2)$$

3. MODELO DINAMICO COMBINADO CONVERTIDOR CD-CD CON ELECTROLIZADOR.

Como ya se mencionó en la introducción, el convertidor a utilizar debe tener un amplio rango de conversión por lo que se propone utilizar como interfaz un convertidor cuadrático reductor con un interruptor activo.

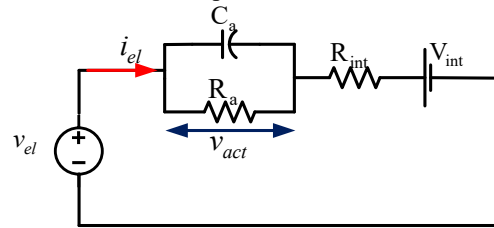


Fig. 5. Circuito equivalente dinámico PEMEL.

Con el propósito de obtener un comparativo se desarrollan dos modelos. En el primero el electrolizador se representa como carga del convertidor mediante su modelo estático, como muestra en la Fig. 6. En este diagrama E representa a la fuente de voltaje de CD, D_1 a D_3 a los diodos utilizados, L_1, L_2 y C_1, C_2 a los inductores y capacitores del convertidor cuadrático reductor. Sw representa al interruptor activo, D al ciclo de trabajo nominal del convertidor y R_{int} a la resistencia equivalente estática del electrolizador respectivamente.

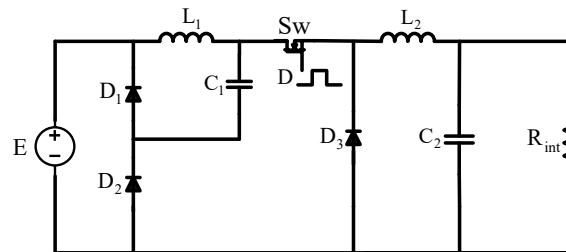


Fig. 6. Circuito eléctrico modelo combinado usando representación estática del electrolizador.

Su modelo en espacio de estados linealizado puede obtenerse directamente a partir de las expresiones dadas en Morales-Saldana, J.A. et al. (2008), el cual queda dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{L1} \\ \dot{\tilde{i}}_{L2} \\ \dot{\tilde{v}}_{C1} \\ \dot{\tilde{v}}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_{int} C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L1} \\ \tilde{i}_{L2} \\ \tilde{v}_{C1} \\ \tilde{v}_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L_1} & \frac{D}{L_1} \\ \frac{DE}{L_1} & 0 \\ -\frac{D^2 E}{R_{int} C_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d} \\ \tilde{e} \end{bmatrix} \quad (3)$$

En la cual los valores promedio se representan con letras mayúsculas y las variaciones alrededor del punto de operación con minúscula y el símbolo “~”.

En la Fig. 7 se muestra el circuito eléctrico resultante al utilizar como carga de salida el equivalente eléctrico

dinámico del electrolizador PEM, a utilizar como segunda opción.

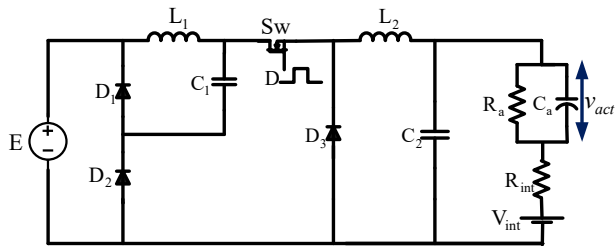


Fig. 7. Circuito eléctrico modelo combinado.

Inicialmente se obtiene el modelo lineal conmutado en espacio de estados del sistema combinado dado por (4) para lo cual se aplica la Ley de voltajes y Ley de corrientes de Kirchoff a las trayectorias eléctricas resultantes al abrir y cerrar el interruptor activo del convertidor, las cuales se muestran en la Fig. 8., definiendo además la función de conmutación $q \in \{1, 0\}$

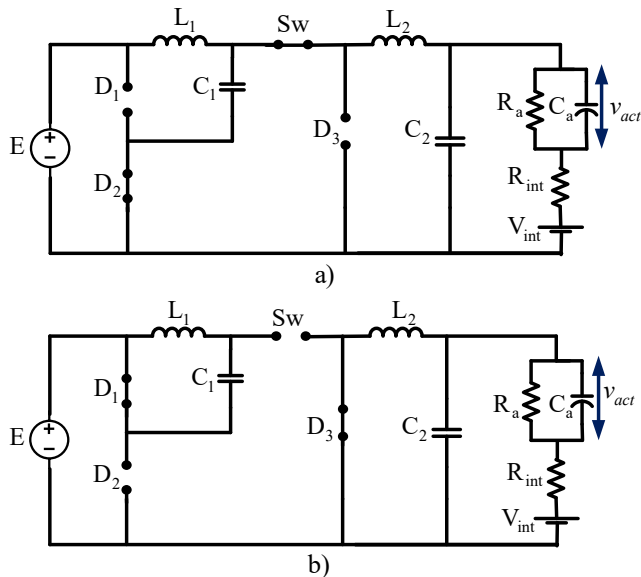


Fig. 8. Trayectorias eléctricas para: a) interruptor activo cerrado, b) interruptor activo abierto.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_{C1} \\ \dot{v}_{C2} \\ \dot{v}_{ACT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{q}{L_2} & \frac{-1}{L_2} & 0 \\ \frac{1}{C_1} & \frac{-q}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{R_{int}C_2} & \frac{1}{R_{int}C_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{int}C_a} & \frac{-k}{R_{int}C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \\ v_{ACT} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{q}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{int}C_2} \\ 0 & \frac{-1}{R_{int}C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ v_{int} \end{bmatrix} \quad (4)$$

en donde $k = \frac{(R_a + R_{int})}{R_a}$

A partir de este modelo, utilizando el valor promedio de la función de conmutación q representada por el ciclo de trabajo d , se obtiene una representación matricial de la forma

$$\dot{x} = \bar{A}(d)x + \bar{B}(d)(e + v_{int}) \quad (5)$$

en el cual las variables de estado están multiplicadas por el ciclo de trabajo, por lo que el sistema resultante es de tipo no lineal.

Este modelo es linealizado alrededor del punto de operación correspondientes a los valores de estado estables dados por:

$$I_{L1} = DI_{L2} \quad (6)$$

$$I_{L2} = \frac{D^2E}{R_a + R_{in}} - \frac{R_a V_{int}}{R_{int}(R_a + R_{in})} \quad (7)$$

$$V_{C1} = DE \quad (8)$$

$$V_{C2} = D^2E = V_{el} \quad (9)$$

$$V_{ACT} = \frac{(D^2E)R_a}{R_a + R_{inr}} - \frac{R_{int}V_{int}}{(R_a + R_{inr})} \quad (10)$$

Para obtenerlo la señal de control y los cinco estados se descomponen en dos partes: los valores promedio nominales que se representan mediante letras mayúsculas, y sus correspondientes variaciones, las cuales se representan por letras minúsculas con el símbolo “~”. El modelo resultante queda dado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{L1} \\ \dot{\tilde{i}}_{L2} \\ \dot{\tilde{v}}_{C1} \\ \dot{\tilde{v}}_{C2} \\ \dot{\tilde{v}}_{ACT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & \frac{-1}{L_2} & 0 \\ \frac{1}{C_1} & \frac{-D}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{-1}{R_{int}C_2} & \frac{1}{R_{int}C_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{int}C_a} & \frac{-k}{R_{int}C_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L1} \\ \tilde{i}_{L2} \\ \tilde{v}_{C1} \\ \tilde{v}_{C2} \\ \tilde{v}_{ACT} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E & D \\ L_1 & L_1 \\ V_{C_1} & 0 \\ L_2 & 0 \\ -\frac{L_2}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d} \\ \tilde{e} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Basándose en los modelos lineales resultantes para los dos modelos propuestos para el convertidor, es posible aplicar Transformadas de Laplace para analizar su comportamiento dinámico, en especial del voltaje aplicado al electrolizador dado por la variable $v_{C_2} = v_{el}$. Para el modelo resultante de la representación estática del electrolizador se encuentra que:

$$\frac{\tilde{v}_{el}}{\tilde{d}} = \frac{V_{C_2}}{DC_2L_2} \times \frac{s^2 + b_1s + b_0}{s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (12)$$

en donde:

$$a_3 = \frac{1}{R_{int}C_2}, \quad a_2 = \frac{D^2}{C_1L_2} + \frac{1}{C_2L_2} + \frac{1}{C_1L_1}$$

$$a_1 = \frac{D^2}{R_{int}C_1L_2C_2} + \frac{1}{R_{int}L_1C_1C_2}, \quad a_0 = \frac{1}{C_1L_1L_2C_2}$$

$$b_1 = -\frac{D^2}{R_{int}C_1}, \quad b_0 = \frac{2}{C_1L_1}$$

El sistema es estable de fase no mínima, ya que tiene ceros de lado derecho del plano-s normalmente con valores complejos debido a los valores típicos de los componentes del convertidor.

En cuanto al modelo basado en la representación dinámica del electrolizador, la función de transferencia tiene la forma:

$$\frac{\tilde{v}_{el}}{\tilde{d}} = \frac{-d_3s^3 + d_2s^2 - d_1s + d_0}{c_5s^5 + c_4s^4 + c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0} \quad (13)$$

en donde los coeficientes del polinomio del denominador y del numerador están representados por d_i y c_i con $i = 0, \dots, 5$ respectivamente. Debido a que cada una de las expresiones de los coeficientes constan de varios términos, se omiten aquí por cuestiones de espacio; sin embargo, se muestran en la sección de resultados de simulación. No obstante, es claro que el sistema tiene características de ser estable y de fase no mínima. Por lo tanto, para propósitos de control es claro que el esquema adecuado para proponer llevar a cabo la regulación del voltaje del electrolizador deberá basarse en un control modo corriente promedio, que consta de un lazo interno de corriente y un lazo externo donde se retroalimenta el voltaje de entrada al electrolizador.

4. VERIFICACION DEL MODELO

El comportamiento dinámico del convertidor propuesto se comparó con el que presenta el convertidor diseñado mediante el modelo estático. Los valores propuestos para su diseño se muestran en la Tabla 1. Los valores de componentes del modelo estático y dinámico del electrolizador están basados en Yodwong, B. et al, (2020). En la Tabla 2, se muestran los valores calculados para los elementos del convertidor elegidos basándose en los modelos desarrollados. Como puede observarse, los valores obtenidos son bastante similares.

Tabla 1. Parámetros convertidor-electrolizador.

Parámetro	Valor
E	48 V
V_{el}	8 V
V_{int}	1.233 V
R_{int}	1.7 Ω
R_a	0.1 Ω
C_a	37 F
D	0.3535
f_s	100 khz.
Rizo L_i	25%
Rizo C_i	1%

Tabla 2. Valores elementos eléctricos del convertidor.

Elemento	M. Estático	M. Dinámico
Inductor L_1	176.3 μ H	167.4 μ H
Inductor L_2	22.0 μ H	24.2 μ H
Capacitor C_1	23.7 μ F	21.5 μ F
Capacitor C_2	51.8 μ F	48.9 μ F

Utilizando los valores de los componentes calculados en el caso del modelo dinámico, se obtiene mediante el software Matlab la función de transferencia $\tilde{v}_{el} / \tilde{d}$ por medio de la cual se verifican los resultados comentados en la sección anterior. Esta función es estable con polos localizados en $\{-286860, -3750 \pm j33310, -1920 \pm j14310\}$ mientras que presenta ceros localizados en $\{1550 \pm j23520, -28617\}$, confirmando su característica de fase no mínima. Por esta razón al implementarse un esquema de control modo voltaje en este convertidor utilizando como única variable de control al voltaje de salida del convertidor, pueden presentarse inestabilidades, por lo que es más conveniente la elección de un esquema en control modo corriente, con dos lazos de retroalimentación. Una posible variable a ser utilizada en este esquema es la corriente del primer inductor. Para verificar su posible uso, se calcularon los polos y ceros de la función de transferencia $\tilde{i}_{L_1} / \tilde{d}$. Los primeros coinciden con los ya indicados para la función $\tilde{v}_{el} / \tilde{d}$ mientras que los ceros están localizados en $\{-286689, -6160, -4140 \pm j35920\}$ concluyendo que es una

variable apropiada para utilizarse en un esquema de control modo corriente.

Para comparar la dinámica en el dominio de la frecuencia del convertidor utilizando el modelo estático y el modelo dinámico, la respuesta de frecuencia de la función de transferencia $\tilde{v}_{cl} / \tilde{d}$, se muestra el Diagrama de Bode de la Fig. 9.

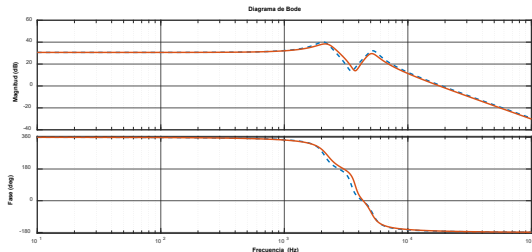


Figura 9. Diagrama de Bode comparativo: modelo estático (línea continua) y modelo dinámico (línea punteada).

Como puede observarse en el diagrama, ambas funciones prácticamente coinciden, teniendo una diferencia de 2 dB de magnitud y 6 grados de fase en las zonas cercanas a los picos de resonancia. Por lo que puede concluirse que al representarse el comportamiento del conjunto convertidor-electrolizador considerando como variable de estudio el voltaje del ánodo, la influencia del comportamiento de los elementos que integran el convertidor es muy dominante en la dinámica del conjunto.

Posteriormente se aplicó a ambas funciones de transferencia un escalón unitario en el voltaje de entrada al convertidor para estudiar la respuesta del conjunto en el dominio del tiempo. En la Fig. 10 se muestra una comparación de respuesta a un escalón unitario.

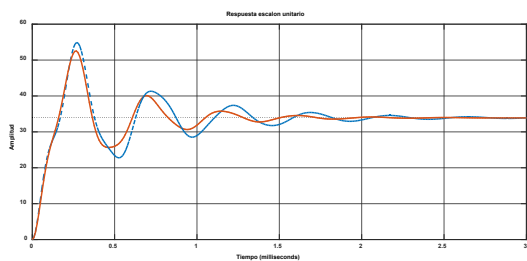


Figura 10. Respuesta a un escalón unitario: modelo estático (línea continua), modelo dinámico (línea punteada).

En este caso igualmente ambos modelos presentan un comportamiento similar, y es interesante observar que a pesar de que el convertidor se calculó para proveer al electrolizador de un voltaje con un rizo del 1%, los cambios en el voltaje de entrada ocasionan transitorios con un sobretiro aproximadamente de 20%, por lo es muy claro que es necesario el uso de un esquema de control para mejorar la dinámica de la respuesta.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se discute el modelo de un convertidor cuadrático con un electrolizador usado para la producción de hidrógeno verde. Este esquema puede ser usado para la generación de energía eléctrica libre de contaminación. Es interesante observar que a pesar de que el convertidor se calculó para proveer al electrolizador de un voltaje con un rizo del 1%, los cambios en el voltaje de entrada ocasionan transitorios con un sobretiro aproximadamente de 20%, por lo que es muy claro que es necesario el uso de un esquema de control para mejorar la dinámica de la respuesta. Un esquema apropiado para controlar esta combinación es usar un control modo corriente utilizando la corriente de la fuente para lograr una correcta operación.

REFERENCES

- Esteki, M., Poorali, B., Adib E., and Farzanehfard H., (2015) Interleaved Buck Converter With Continuous Input Current, Extremely Low Output Current Ripple, Low Switching Losses, and Improved Step-Down Conversion Ratio, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 4769-4776.
- Guo, X., et al. (2022) A new multi-mode fault-tolerant operation control strategy of multiphase stacked interleaved Buck converter for green hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 71, pp. 30359-30370.
- Gorji, S. A. (2022) Reconfigurable Quadratic Converters for Electrolyzers Utilized in DC Microgrids," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 109677-109688.
- Guilbert, D., (2019) Hydrogen Flow Rate Control of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer," *Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, Bangkok, Thailand pp. 1-6.
- Morales-Saldana, J. A., et al. (2008) Average Current-Mode Control Scheme for a Quadratic Buck Converter With a Single Switch, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 485-490.
- Parache, F., et al., (2022) Impact of power converter current ripple on the degradation of pem electrolyzer performances Membranes, vol. 12, no. 2.
- Weiβ, A., et al., (2019) "Impact of intermittent operation on lifetime and performance of a PEM water electrolyzer," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, no. 8, pp. F487-F497.
- Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak M., Kaewmanee W., Hinaje, and M., Vitale, G., (2020) Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control: A Short Review, *C 6*, no. 2, vol. 29.