

An Evaluative Approach to Stability and Quality Effects in Fuel Cell Power Generation Systems under Strong Load Variations

Juan F. Tisza C., MSc.; David E. Ortega S., Ing.

Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtisza@uni.edu.pe, david.ortega@uni.pe

Abstract– This study analyzes an electrical power generation system based on green hydrogen fuel cells. A proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been selected, which enables proton exchange. Furthermore, the generation system is complemented by a hysteresis-controlled three-phase inverter. The main objective is to evaluate the impact of four different types of abrupt variations in the three-phase load. The evaluation is carried out through simulations in MATLAB Simulink, with a focus on active power regulation through direct-axis (d-axis) current control. Finally, the study analyzes the stability and quality indicators of the generator, providing key information on the system's performance under variable operating conditions.

Keywords– PEM Fuel Cell, Stability, Generation Quality, restoration time, green hydrogen.

Un Enfoque Evaluativo de Efectos en Estabilidad y Calidad en Sistema de Generación Eléctrica con Celda Combustible ante Fuertes Variaciones en la Carga

Juan F. Tisza C., MSc.^{ORCID}; David E. Ortega S., Ing.^{ORCID}
Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, jtisza@uni.edu.pe, david.ortega@uni.pe

Resumen— Este estudio analiza un sistema de generación de energía eléctrica basado en celdas de combustible de hidrógeno verde. Se ha seleccionado una celda de combustible con membrana de intercambio protónico (PEMFC), la cual permite el intercambio de protones. Además, el sistema de generación se complementa con un inversor trifásico controlado por histéresis. El objetivo principal es evaluar el impacto de cuatro tipos diferentes de variaciones abruptas en la carga trifásica. La evaluación se realiza mediante simulaciones en Simulink de MATLAB, con un enfoque en la regulación de la potencia activa a través del control de la corriente en el eje directo (d-axis). Finalmente, el estudio analiza los indicadores de estabilidad y calidad del generador, proporcionando información clave sobre el desempeño del sistema ante condiciones de operación variables.

Palabras clave—Celda Combustible PEM, Estabilidad, Calidad de Generación, tiempo restablecimiento, hidrógeno verde.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de fuentes de energía renovables ha cobrado gran relevancia en los últimos años debido a la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y minimizar el impacto ambiental. Entre estas fuentes, el hidrógeno se ha posicionado como un vector energético prometedor, especialmente en la generación de electricidad mediante celdas de combustible. Las celdas de combustible permiten la conversión directa de la energía química del hidrógeno en electricidad con alta eficiencia y bajas emisiones contaminantes [1], lo que las convierte en una alternativa viable para aplicaciones estacionarias y móviles.

En este contexto, la integración de celdas de combustible complementadas con convertidores electrónicos de potencia, como los inversores trifásicos, constituye un sistema fundamental para suministrar energía eléctrica, de gran utilidad en múltiples aplicaciones en diversos sectores de la sociedad y la industria [2]. Si se considera que las celdas de combustible utilizan hidrógeno verde, se obtiene una generación de energía limpia y libre de gases contaminantes, disponible para su uso en sistemas eléctricos convencionales. Los inversores trifásicos se controlan mediante estrategias avanzadas, como la conmutación por histéresis [3], que permite una regulación precisa de la potencia entregada a la carga. La conmutación por histéresis es una técnica de control que mantiene la variable controlada (en este caso, la corriente) dentro de una banda de histéresis alrededor de un valor de

referencia. Cuando la variable alcanza uno de los límites de la banda, el interruptor del inversor cambia de estado, manteniendo así la variable dentro de los límites deseados. En particular, el control de la corriente en el eje directo (d-axis) facilita la gestión de la potencia activa, optimizando el desempeño del sistema en diversas condiciones de operación.

Este estudio presenta un sistema de generación eléctrica a partir de hidrógeno, utilizando celdas de combustible PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), que emplean una membrana como electrolito para el intercambio de protones. Se presentan simulaciones en Simulink de MATLAB del sistema, compuesto por una celda de combustible y un inversor trifásico controlado por conmutación de histéresis. Se evalúa el funcionamiento del sistema en diversas condiciones de carga.

El objetivo de esta investigación es analizar los efectos de variaciones bruscas de carga, evaluando variables eléctricas como tensión, corriente, potencia, distorsión armónica total (THD), y estabilidad (tiempo de establecimiento). Se realizará un análisis cualitativo, analizando los tiempos de recuperación del sistema frente a las perturbaciones, así como la variación del THD y la corriente. Las respuestas se evalúan en el dominio del tiempo, y el análisis permite determinar la robustez y estabilidad del sistema de generación. Los resultados demuestran la respuesta dinámica del sistema y permiten evaluar la eficiencia de cada componente y del sistema completo.

En resumen, esta investigación proporciona información clave sobre la estabilidad y eficiencia del sistema en escenarios dinámicos, contribuyendo al conocimiento de las tecnologías involucradas y promoviendo el cambio hacia una matriz energética basada en hidrógeno verde. Esto impulsa el desarrollo tecnológico y económico de los países.

Los resultados de esta investigación pueden servir de base para el diseño y optimización de sistemas de generación con celdas de combustible, facilitando su integración en microrredes y aplicaciones industriales, como la electromovilidad [4]. Se espera que los resultados mejoren la confiabilidad y eficiencia de estos sistemas en entornos reales.

II. ANTECEDENTES

El estudio presentado en [5], titulado “*Fuel Cells as an Advanced Alternative Energy Source for the Residential Sector Applications in Malaysia*”, constituye un antecedente relevante, ya que analiza el uso de celdas de combustible de hidrógeno en aplicaciones residenciales. El trabajo propone una optimización integral del sistema, considerando no solo la generación eléctrica, sino también el aprovechamiento térmico mediante la recuperación del calor residual generado en el proceso de conversión de energía química a eléctrica. Al tratarse de un artículo de revisión, [5] evalúa distintas tecnologías de generación energética aplicables al contexto malayo y desde una perspectiva de desarrollo nacional, concluye que las celdas de combustible tipo PEM son una opción estratégica para aplicaciones de baja potencia y almacenamiento energético de hidrógeno en sistemas transportables.

TABLA I
DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE CELDA DE COMBUSTIBLE

Tipo de Celda	Eficiencia Real (%)	Temperatura de Operación	Aplicaciones
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	40 - 60%	50 - 100°C	Vehículos eléctricos, portátiles, generación de energía descentralizada
AFC (Alkaline Fuel Cell)	60 - 70%	60 - 90°C	Aplicaciones espaciales y militares
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	40 - 50%	150 - 200°C	Sistemas estacionarios de generación de energía
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	50 - 65%	600 - 700°C	Generación de energía a gran escala
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	55 - 65% (hasta 85% con cogeneración)	800 - 1000°C	Generación de energía industrial y cogeneración

Una revisión sistemática de la literatura permitió encontrar diferentes tipos de celdas combustibles presentados en la Tabla I en forma de un cuadro comparativo de las diferentes tecnologías, con sus niveles de eficiencias [6]. Adicionalmente se encontraron los trabajos [2] y [11] que desarrollan una topología similar a la utilizada en este trabajo, pero lo implementan con otra tecnología de celda combustible y consideran en el estudio la conexión con la red pública.

III. IMPLEMENTACIÓN

A. Descripción del modelo del sistema

El sistema comprende desde la alimentación de la celda de combustible (los flujos de Hidrógeno y Oxígeno), la propia

celda PEMFC, el inversor de red, el transformador trifásico elevador y la carga variable según se muestra en la figura 1.

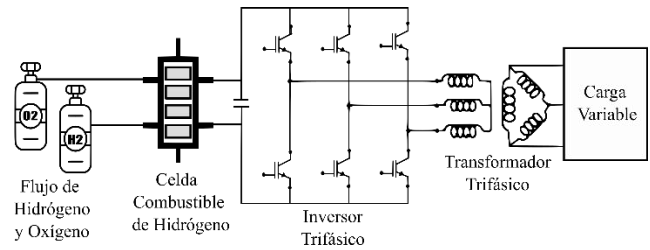


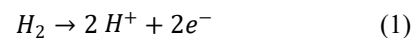
Fig. 1 Diagrama del circuito

El inversor electrónico de potencia utiliza una configuración de puente universal de dispositivos de conmutación forzada de transistores bipolares de puerta aislada (IGBT). El control del sistema inversor, como se ilustra en la figura 3, emplea conmutación por histéresis para regular la potencia activa P . Esto se logra mediante la gestión de la corriente de eje directo con transformación mientras se mantiene la potencia reactiva Q a 0 VAR. El transformador trifásico (dos devanados) está configurado en una conexión de devanado Y-Y y se implementa utilizando tres transformadores monofásicos.

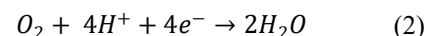
B. Modelo de la celda de combustible PEMFC

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC, por sus siglas en inglés) son una de las tecnologías más prometedoras para la generación de energía a partir del hidrógeno. Estas celdas están compuestas por un ánodo, un cátodo y una membrana electrolítica de intercambio protónico que permite el paso selectivo de protones, pero bloquea el paso de electrones.

En el ánodo, el hidrógeno (H_2) se oxida mediante un catalizador de platino [7], separándose en protones y electrones según la reacción química (1):



Los protones generados atraviesan la membrana electrolítica hasta el cátodo, mientras que los electrones deben recorrer un circuito externo, generando corriente eléctrica útil. Este proceso está representado en la figura 2. En el cátodo, los protones y electrones reaccionan con el oxígeno (O_2) del aire para formar agua como subproducto [8] según la ecuación (2). En términos prácticos, para producir 2 moléculas de agua ($2H_2O$), se necesitan 2 moléculas de hidrógeno y 1 molécula de oxígeno.



Este proceso es altamente eficiente y no emite contaminantes, lo que hace que las PEMFC sean ideales para

aplicaciones en movilidad, generación distribuida y almacenamiento de energía renovable. La ecuación para calcular el voltaje de salida de una celda de combustible PEMFC. Se basa en la ecuación de Nernst (3), que toma en cuenta las condiciones operativas:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3)$$

Donde:

- E es el voltaje de la celda.
- E_0 es el voltaje en condiciones estándar.
- R es la constante de los gases ($8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$).
- T es la temperatura en Kelvin.
- F es la constante de Faraday ($96,485 \text{ C}/(\text{mol})$).
- P_{H_2} , P_{O_2} y P_{H_2O} son las presiones parciales del hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente.

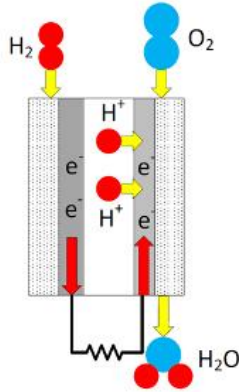


Fig. 2 Principio de funcionamiento de una celda de combustible [9].

C. Sistema de control del Inversor

En el esquema propuesto la potencia de salida del inversor P_{phase} y la corriente en la carga I_{phase} se miden para controlar el filtro activo de potencia en derivación (FAP). El diagrama de bloques específico del sistema de control digital usando la obtención de referencias mediante PLL se muestra en la Figura 3. La potencia P_{phase} se compara con una referencia de potencia establecida para detectar el error de potencia, que pasa por un controlador PID. Luego de dividir la potencia entre el voltaje se obtiene I_{ref} , el error de la corriente es introducido al controlador por histéresis para obtener los pulsos de compuerta.

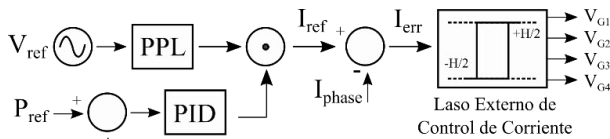


Fig. 3 Esquema del controlador síncrono por histéresis.

Teniendo en cuenta las características mínimas y máximas de conmutación, se plantea el esquema de control por histéresis mostrado en la Tabla II donde los estados de conmutación de los IGBT, la tensión sobre el transformador de acoplamiento (u_f) y la corriente en la celda combustible dependen de la polaridad de la corriente de compensación I_{phase} y del error introducido a la señal de corriente de referencia $I_{phase} = I_{ref}[kTs] - I_{phase}[kTs]$.

TABLA II
SECUENCIA DE CONMUTACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE CORRIENTE POR HISTÉRESIS

$I_{phase}[kT_e]$	$\Delta I_{phase}[kT_e]$	V_{G1}	V_{G2}	V_{G3}	V_{G4}	u_f
$I_{phase} > 0$	$\Delta I_f > 0$	ON	OFF	ON	OFF	V_d
	$\Delta I_f < 0$	OFF	ON	OFF	ON	$-V_d$
$I_{phase} < 0$	$\Delta I_f > 0$	OFF	ON	OFF	ON	$-V_d$
	$\Delta I_f < 0$	ON	OFF	ON	OFF	V_d

Por lo que el esquema de control de la banda de histéresis utilizado para la generación de las señales de disparo quedaría según la figura 4. El sistema de control implementado en forma de bloques se muestra en la figura 5, se puede notar que el controlador PID utilizado solo se considera los componentes proporcional y derivativo.

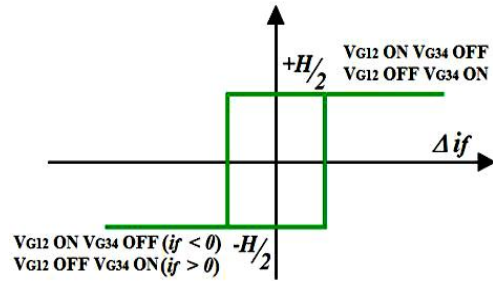


Fig. 4 Esquema de control de la banda de histéresis [10].

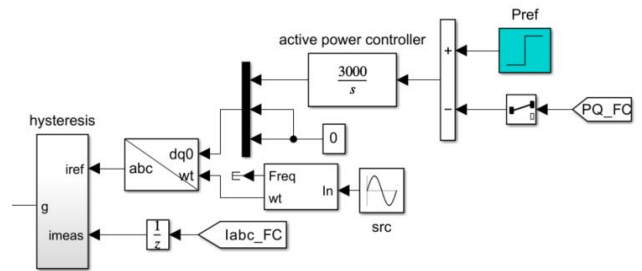


Fig. 5 implementación del controlador síncrono.

D. Variaciones en la carga

Las variaciones de la carga se implementaron según la figura 6 y son las siguientes: Carga Nominal, sobrecarga, carga no Lineal y cortocircuito. Estas cargas fueron

programadas para actuar en paralelo a la carga nominal durante 0.1 segundo.

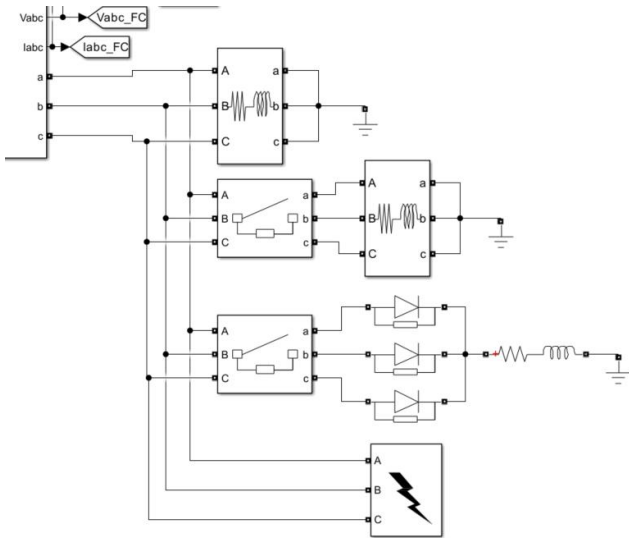


Fig. 6 Implementación de las variaciones de la carga.

IV. RESULTADOS

A. Funcionamiento de la celda de combustible PEMFC

Se analizaron cuatro características del funcionamiento de la celda de combustible, mostradas en la Figura 7: aspectos físicos (porcentaje de utilización de oxígeno e hidrógeno, y consumo de estos gases) y aspectos eléctricos (voltaje y corriente). Se comprobó que los escenarios estudiados afectan de forma diferente el funcionamiento de la celda, siendo las observaciones más relevantes las siguientes:

- Durante las pruebas, el consumo de hidrógeno se mantuvo casi constante, mientras que el consumo de oxígeno varió.
- La prueba de cortocircuito no sometió a la celda a un estrés significativo, ya que el controlador por histéresis no aumentó la potencia demandada. Sin embargo, se observó un tiempo de establecimiento prolongado al finalizar la prueba, con un aumento en la corriente y el consumo de oxígeno.
- La prueba de sobrecarga provocó un aumento en el voltaje y una disminución en la corriente, debido al comportamiento de la curva de potencia de la celda de combustible.
- La carga no lineal ocasionó un comportamiento opuesto a la sobrecarga.

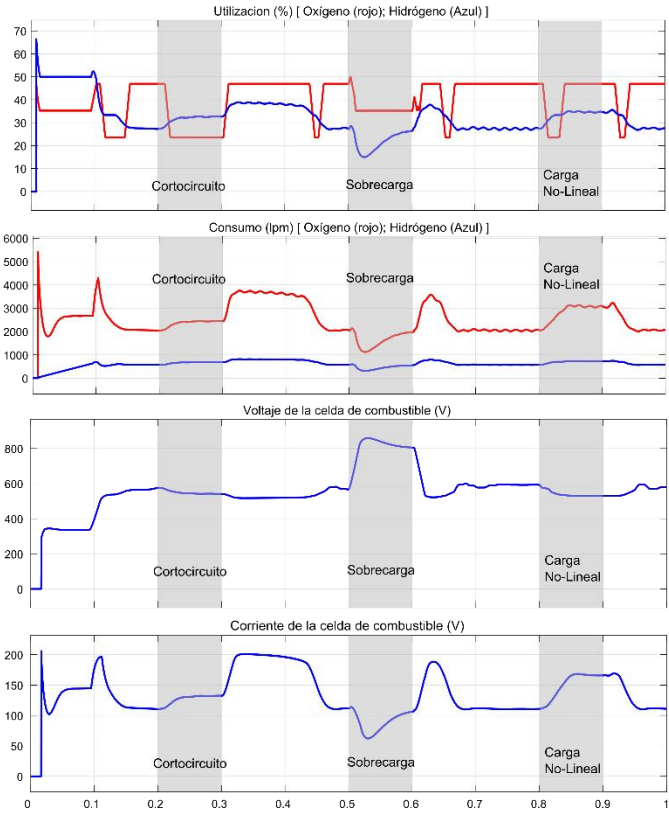


Fig. 7 Parámetros de funcionamiento de la celda de combustible PEMFC.

B. Condiciones nominales

Las características del voltaje y la corriente en la carga, mostradas en la Figura 8, son las esperadas en condiciones normales de operación. El valor RMS se mantuvo constante, y se observó un buen factor de forma de onda para una carga con alto factor de potencia.

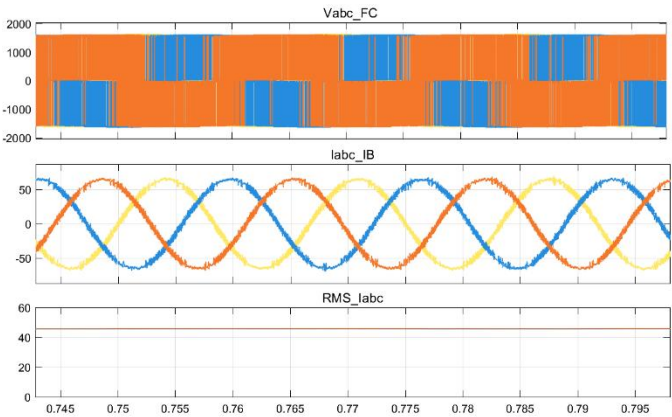


Fig. 8 Voltaje y corriente en condiciones normales.

C. Prueba de cortocircuito

En esta prueba, se conectó una carga cero durante 0.1 segundos para estudiar los efectos en el sistema. El voltaje en la carga cayó a cero, mientras que la corriente se incrementó 6.4 veces su valor nominal, regresando lentamente a su valor original después de la prueba, como se muestra en la Figura 9. La forma de onda de la corriente se distorsionó, pero conservó una forma cíclica.

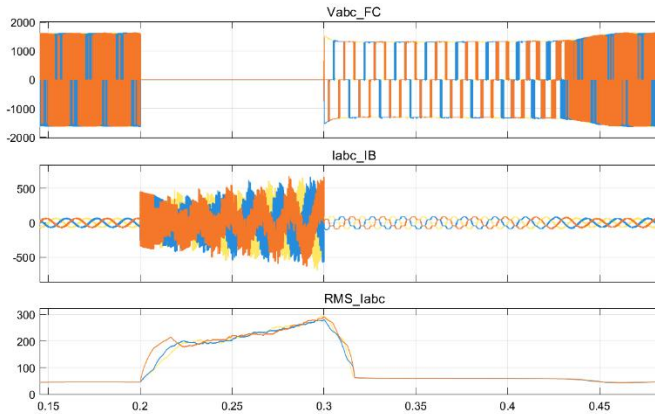


Fig. 9 Voltaje y corriente en la prueba de cortocircuito.

D. Prueba de sobrecarga

En esta prueba, se incrementó la carga hasta su máxima demanda para probar la respuesta del sistema, como se muestra en la Figura 10. Se observó un aumento gradual de la corriente debido a la lenta respuesta de la celda. La forma de onda se conservó efectivamente, aunque el valor RMS de la corriente aumentó 2.4 veces.

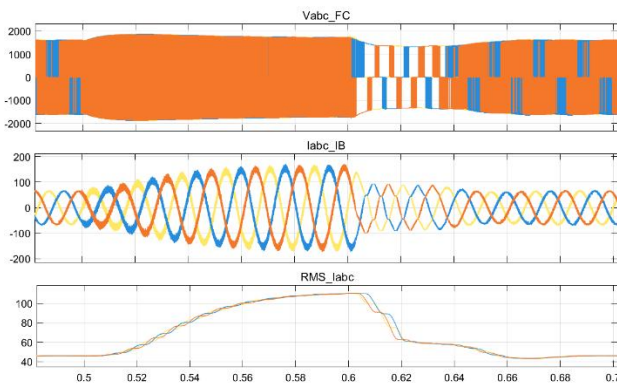


Fig. 10 Voltaje y corriente en la prueba de sobrecarga.

E. Prueba de carga no lineal

En esta prueba, se utilizó un puente de diodos con una carga inductiva como carga no lineal para el sistema. Se observa en la Figura 11 cómo la carga no lineal ocasionó cambios en las formas de onda durante la prueba.

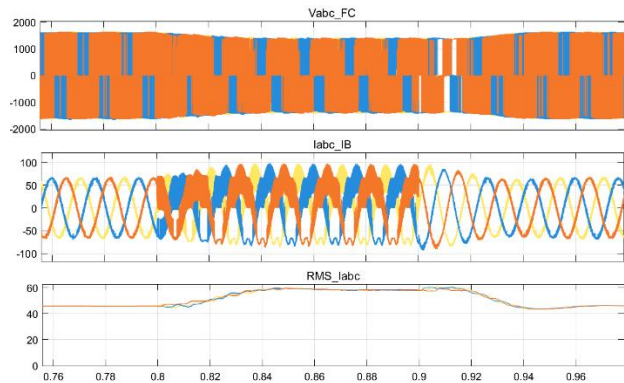


Fig. 11 Voltaje y corriente en la prueba de carga no lineal.

En la Tabla III, se resumen algunas características de las pruebas. Se encontró que el valor de THD se triplicó durante la prueba de sobrecarga y casi se duplicó durante la prueba con la carga no lineal. No se registró THD durante la prueba de cortocircuito, ya que el voltaje en la carga fue cero.

TABLA III
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS PRUEBAS

	THD	Tiempo de establecimiento	Aumento de la corriente
Nominal	1.5	-	-
Cortocircuito	-	160 ms	640%
Sobrecarga	4.5	80 ms	240%
No lineal	2.1	60 ms	128%

V. DISCUSIÓN

En condiciones nominales, el sistema mostró una operación estable, con formas de onda sinusoidales bien definidas y un bajo contenido armónico (THD de 1.5 %), lo cual valida el correcto dimensionamiento del sistema bajo condiciones estándar. En contraste, la prueba de cortocircuito reveló un comportamiento característico del controlador de histéresis: aunque se observó un aumento significativo de la corriente (640 % respecto a la nominal), el sistema no reaccionó con una mayor demanda de potencia desde la celda, lo que evitó un mayor estrés sobre esta. No obstante, el prolongado tiempo de establecimiento (160 ms) sugiere que el sistema podría beneficiarse de estrategias de recuperación más rápidas.

Durante la prueba de sobrecarga, el voltaje se mantuvo estable pero la corriente RMS aumentó 2.4 veces, con un incremento considerable del THD (hasta 4.5 %). Esto indica que, si bien la celda logró responder a la mayor demanda, lo hizo a costa de una mayor distorsión armónica, lo cual podría afectar negativamente a cargas sensibles. Por otro lado, la prueba con carga no lineal evidenció un comportamiento distinto: aunque el aumento de corriente fue menor (128 %), se generó una distorsión armónica relevante (THD de 2.1 %), lo cual confirma que este tipo de carga impacta directamente en la calidad de la señal suministrada.

VI. CONCLUSIONES

Al concluir esta investigación, se pudo apreciar la robustez del sistema de generación de energía eléctrica. Se observó el efecto de variaciones fuertes, como un cortocircuito temporal. Después del evento perturbador, el sistema se recuperó totalmente a sus condiciones nominales de funcionamiento en un tiempo máximo de aproximadamente 160 milisegundos. Para este estudio, la condición nominal se consideró cuando el sistema alimenta una carga lineal balanceada, lo que indica que el sistema es bastante estable.

Por otro lado, se experimentó a nivel de simulación el caso de una carga fuertemente no lineal, utilizando un rectificador trifásico de media onda no controlado. Como resultado, se observó que la calidad de la energía no se vio afectada significativamente, evidenciado por el porcentaje de cambio en el valor del THD. A pesar de las diversas variaciones a las que se sometió la carga, la salida de voltaje del sistema prácticamente no varió en su forma, lo que indica que la calidad de la energía no se vio afectada por las fuertes variaciones en la carga.

Es pertinente tener en cuenta que la curva de respuesta de la celda de combustible, basada en el modelado aceptado, produciría una caída de tensión al aumentar la corriente hacia la carga. Sin embargo, se considera que, para los rangos de magnitud de variación experimentados, no se apreció esta caída en el voltaje. Por lo tanto, se concluye que el efecto de la caída será visible para corrientes mucho mayores.

Otra conclusión destacable es que la estrategia de control basada en la histéresis presentó un buen comportamiento en el caso investigado, minimizando la presencia de potencia reactiva y orientando la potencia activa mediante el control complementario implementado.

REFERENCIAS

- [1] E. A. Mahecha Rodríguez, “Uso del hidrógeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible”, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7136>
- [2] A. N. Sridhar, K. Chenchireddy, G. Sraavanthi, B. Thirupathi, C. Preethi, and M. Pavan, “Solid Oxide Fuel Cell Interfaced with a Three-Phase Power System”, in *Proc. 2023 Int. Conf. Sustainable Communication Networks and Application (ICSCNA)*, Theni, India, 2023, pp. 697–702. doi: 10.1109/ICSCNA58489.2023.10370101.
- [3] Oswaldo López-Santos, Diego S. Dantonio, Freddy Flores-Bahamonde, Carlos A. Torres-Pinzón, “Chapter 2 - Hysteresis control methods-Multilevel Inverters”, Editor : Ersan Kabalcı Academic Press, 2021, Pages 35-60, ISBN 9780323902175, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90217-5.00002-2>.
- [4] E. Garza-Arias, J. E. Valdez-Resendiz, J. C. Rosas-Caro, E. D. Silva-Vera, and D. Guillen-Aparicio, “Interleaved improved super-boost converter for fuel-cell electric vehicle power system,” in *Proc. 2024 Int. Symp. Electromobility (ISEM)*, Guadalajara, Mexico, 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISEM62699.2024.10786599.
- [5] Z. Zakaria, S. K. Kamarudin, and K. A. A. Wahid, “Fuel cells as an advanced alternative energy source for the residential sector applications in Malaysia,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, pp. 5032–5057, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/er.6252>

- [6] J. Alvarado Flores, “Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible,” *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, vol. 52, pp. 105–117, 2013. doi: 10.3989/cyv.142013.
- [7] Y. Zhu and K. Tomsovic, “Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 62, pp. 1–11, 2002. doi: 10.1016/S0378-7796(02)00033-0.
- [8] The MathWorks, Inc., “Fuel cell electrical system,” 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/fuelcell.html>.
- [9] S. Li, K. Tomsovic, and T. Hiyama, “Load following functions using distributed energy resources,” in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, Seattle, WA, USA, 2000, vol. 3, pp. 1756–1761. doi: 10.1109/PESS.2000.868791.
- [10] F. Jiménez López, “Implementación de una técnica de control no lineal en un DSP para un compensador activo monofásico en derivación”, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia, 2011. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7594>.
- [11] I. V. Banu, R. Grigore, G. Culea, S. G. Vernica, and S. E. Popa, “Modeling and Simulation of Three-Phase Grid-Connected Solid-Oxide Fuel Cell Systems,” in *Proc. 2024 9th Int. Conf. Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, Ruse, Bulgaria, 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEAE60309.2024.10600548.
- [12] Jiwook Byun, Jaehyun Go, Chulho Kim, Yeonsook Heo, “Reliability, economic, and environmental analysis of fuel-cell-based hybrid renewable energy networks for residential communities”. *Energy Conversion and Management*, Volume 284, 2023, 116964, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116964>.