

Comportamiento Dinámico de Plantas de Celdas de Combustible: Ambiente Distribuido

F. González-Longatt^{1,2}, C. Peraza³

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica
UNEFA, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional
Núcleo Maracay, 2122 Maracay (Venezuela)
Teléfono/Fax: +0058 243 5546954, e-mail: fglongatt@ieee.org

² Candidato a Doctor, Facultad de Ingeniería, Escuela de Eléctrica
UCV, Universidad Central de Venezuela
Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos, 1010 Caracas (Venezuela)
Teléfono: +0058 414 4572832, e-mail: flongatt@elecrisc.ing.ucv.ve

³ Departamento de Ingeniería Eléctrica
Instituto Universitario de Tecnología Valencia, 2122 Valencia (Venezuela)
Teléfono: +58 0241-8687812, e-mail: cperazam@cantv.net

Abstract. This paper presents a simplified slow dynamic model for a solid oxide fuel cell. The stand alone performance is analyzed and evaluated. A simple distribution feeder is penetrated by two fuel cell plants, and this is used as an example to evaluate the load following performance. The simulation indicates a restricted capacity of locally supply step load changes of the fuel cells.

Resumen. Este artículo presenta un modelo simplificado para dinámica lenta de celdas de combustible de óxido sólido. El desempeño aislado es analizado y evaluado. Un simple alimentador de distribución es penetrado por dos plantas de celdas de combustible, esto es usado como un ejemplo para evaluar el desempeño de seguimiento de la demanda. La simulación indica la capacidad restringida de suministrar un cambio de carga en forma de escalón localmente de manera inmediata.

Palabras Claves

Celda de Combustible, generación distribuida, función de seguimiento de demanda, simulación de dinámica lenta.

1. Introducción

El crecimiento de Mercado eléctrico, el desarrollo de los mercados financieros y el acelerado progreso técnico han hecho posible que el tamaño óptimo de las nuevas inversiones en generación disminuya, en relación con el tamaño del mercado y la capacidad de capital privado [1]. Adicionalmente, el proceso de desregulación que ha estado apareciendo en el mundo entero ha hecho posible que se promueva la competencia en el sector de la generación. Todo esto, ha abierto las oportunidades para la generación de potencia in situ por los usuarios de electricidad usando sistemas de generación de tamaño

reducido y con tecnologías consideradas como emergentes. Las fuentes de energía distribuida (FED)-pequeños típicamente localizados en el sitio del usuario donde la energía (tanto eléctrica como térmica) por ellos generados es usada- han emergido como una promisoriosa opción para cumplir con la necesidad creciente del consumidor por energía eléctrica con énfasis en la confiabilidad y calidad de energía. El portafolio de FGD incluye generadores, almacenamiento de energía, y, para ciertas clases de sistemas, interfaces avanzadas de electrónica de potencia entre generadores y la fuente red comercial de potencia son necesarios [2]. Algunas tecnologías han sido usadas en aplicaciones de generación distribuida (GD) con variado grado de éxito. Algunas de ellas son: turbinas de viento, sistemas fotovoltaicos, plantas mini y micro-hidráulicas, plantas de biomasa, micro turbinas, sistemas fotovoltaicos, y celdas de combustibles (CC). Las micro turbinas y celdas de combustible exhiben una particular promesa como el hecho de que ellas pueden operar con múltiples combustibles con bajas emisiones contaminantes, alta eficiencia y alta confiabilidad [3]. Las celdas de combustible es una tecnología de generación, con rápido desarrollo. Ellas poseen varias características que las hacen favorables como los dispositivos de conversión de energía: alta eficiencia (35-60%), baja hasta ninguna emisión contaminante, operación silenciosa, y alta confiabilidad debido al limitado número de partes móviles [3]-[6]. Las celdas de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía electroquímica de una reacción directamente en energía eléctrica. La estructura física o bloque de construcción de una celda de combustible consiste de una capa de electrolito en contacto con un ánodo y cátodo poroso en ambos lados. [4] (Fig. 1).

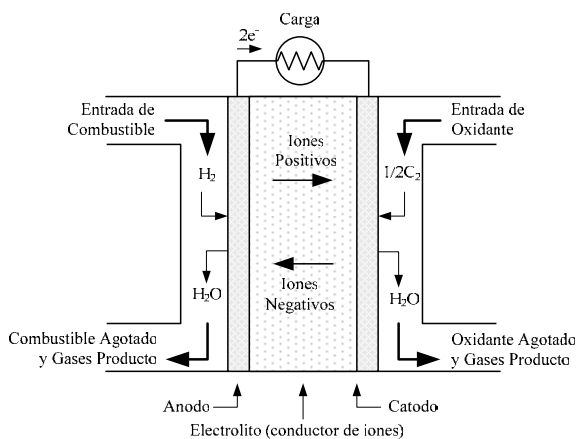


Fig. 1. Esquema General de una Celda de Combustible

En una típica celda de combustible, los combustibles gaseosos son alimentados continuamente al compartimiento del ánodo y un oxidante (por ejemplo, oxígeno desde el aire) es alimentado continuamente a el compartimiento del cátodo; la reacción electroquímica que tiene lugar en los electrodos para producir una energía eléctrica. La efectividad de este proceso es fuertemente dependiente del electrolito para crear la reactividad química necesaria para el transporte de iones [2]. Las celdas de combustible pueden ser clasificadas mediante el uso de varios criterios; dependiendo de la combinación del tipo de combustible y oxidante, donde el combustible es procesado (reforma interna o externa) en la celda, el tipo de electrolito, la temperatura de operación, donde los reactantes son alimentados a la celda, etc. [4]. La más común clasificación de las celdas de combustible es efectuada por el tipo de electrolito empleado en las celdas e incluye: celdas de combustible de polímero electrolito, celdas de combustible alcalinas, celdas de combustible de ácido fosfórico, celdas de combustible de temperatura intermedia de óxido sólido, y celdas de combustible tubulares de óxido sólido. Algunas de estas tecnologías han sido exitosamente comercializadas y otras se mantienen en desarrollo hoy en día, y se esperan que estén a la venta en el futuro próximo. Las plantas de potencia basadas en celdas de combustible puede ser una gran parte de la generación lista en el futuro, pudiendo ser conectadas a la red de distribución y se espera que introduzcan y dominen los modos dinámicos del sistema [10] por lo siguiente:

- La respuesta de los variados lazos de control en la planta.
- Las interacciones de la planta con la inercia y los controles de los otros tipos de plantas (por ejemplo, turbinas a gas natural, etc.).
- La interacción entre la generación distribuida combinada con los sistemas de transmisión [8], [9].

Un hecho importante en la planificación de generación de la generación a partir de celdas de combustible es, entonces, el efecto en la estabilidad del sistema que su incremento en tamaño puede tener [10]. A fin de llevar a cabo estudios de planificación, adecuados modelos dinámicos para plantas de celdas de combustible so requeridos, los cuales se combinen con los otros tipos de fuentes de generación distribuida para poder proveer un modelo dinámico adecuado para acometer estudios de

estabilidad. Los modelos transitorios han sido desarrollado para plantas autónomas de varios tipos de celdas de combustible [3], [5]-[7], [10]-[12]. Este artículo muestra un modelo de dinámica lenta para las plantas de celda de combustible, adecuado para el estudio de funciones de seguimiento de la demanda, la capacidad del modelo es demostrada con simulaciones en un sistema de distribución. Las conclusiones son presentadas en la última sección del artículo.

2. Modelo de un Sistema de Celda de Combustible

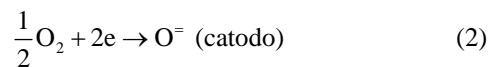
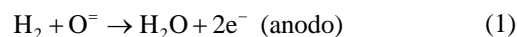
Una planta para generación de potencia empleando celdas de combustible posee las siguientes partes [4]:

- *Procesador de Combustible.* Este toma un combustible tradicional (gas natural, otro hidrocarburo gaseoso, metanol, nafta, o carbón) lo limpia y convierte en un gas que contiene hidrógeno y bases remanentes.
- *Sección de Potencia.* Genera electricidad en corriente continua por medio de celdas individuales contenidas dentro de un conjunto o stack. Un variado número de celdas o stacks pueden ser agrupados para cumplir con una aplicación de potencia.
- *Acondicionador de Potencia.* Este convierte la potencia de corriente directa a una salida corriente alterna e incluye control de la potencia de salida, voltaje y frecuencia.

Aunque una variedad de celdas de combustible están en desarrollo, este artículo está focalizado en el modelo del sistema de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) con la expectativa de que la respuesta de otros tipos sean similar [3].

A. Modelo de Sistema SOFC

El modelo dinámico de la sección de potencia de una SOFC usado para el análisis del desempeño durante la operación normal es claramente conocido [3], [4], [13]. Las reacciones electroquímicas que ocurren en una SOFC empleando H_2 y O_2 son [4]:



La reacción completa en la SOFC es:

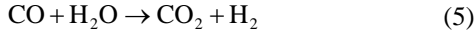


Tal que la relación estequiométrica de hidrógeno a oxígeno es 2 a 1 [3]. El rendimiento ideal de la SOFC es definido por su potencial de Nernst representado como el voltaje de celda, esta ecuación provee una relación entre el potencial ideal estándar (E_0) para la reacción de la celda y el potencial estándar ideal (E), a otras temperaturas y presiones parciales de productos y reactantes [4]. La correspondiente ecuación de Nernst para la SOFC es:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} [P_{O_2}]^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (4)$$

El desempeño de la SOFC depende de las reacciones electroquímicas que ocurren con el combustible y el oxígeno. El monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos

tales como el metano (CH₄) pueden ser empleados como combustible en la SOFC. El diseño de la SOFC para la oxidación directa de CH₄ en SOFC no ha sido investigado a fondo en el pasado [14],[15], ni últimamente (ninguna trabajo significativo ha sido encontrado), por tal motivo, solo se considera H₂ y O₂ como combustibles de la SOFC. Por razones de simplicidad en este artículo, la reacción de CO es considerada como un desdoblamiento del agua más que una oxidación. La reacción del CO es:



Por otra parte, la utilización de reactante y la composición de los gases poseen mayor impacto en la eficiencia de la celda de combustible, y un indicador de esto es la utilización de combustible (U_f). Este se refiere a la fracción del combustible total u oxidante introducido a la celda de combustible que reacciona electroquímicamente.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{\text{in}}} \quad (6)$$

El flujo de hidrogeno reactante y la corriente de salida puede ser relacionadas por [3], [13]:

$$q_{H_2}^r = 2K_r I_{fc}^r \quad (7)$$

La reacción electro-química en la SOFC, restringe la corriente demandada de la celda, esta es dada por el flujo de entrada del hidrogeno, y la utilización máxima y mínima de combustible.

$$U_{\min} q_{H_2}^{\text{in}} \leq 2K_r I_{fc}^r \leq U_{\max} q_{H_2}^{\text{in}} \quad (8)$$

La corriente real de salida en el sistema SOFC puede ser medida, y un control de lazo cerrado puede ser usado para ajustar el flujo de entrada de hidrogeno, a fin de que la utilización de combustible sea un valor optimo.

$$q_{H_2}^{\text{in}} = \frac{2K_r I_{fc}^r}{U_{\text{opt}}} \quad (9)$$

El procesador de combustible en el sistema SOFC exhibe usualmente una lenta respuesta química, esta es asociada con el tiempo de para cambiar los parámetros químicos de la reacción luego de un cambio en los flujos de reactantes. Esta respuesta dinámica es simulada por una función de transferencia de primer orden. En contra parte, la respuesta eléctrica del sistema SOFC es generalmente rápida y asociada principalmente con la velocidad con la cual la reacción química es capaz de reestablecer la carga eléctrica que ha sido drenada a la carga. Una función de transferencia de primer orden es empleada para simular la respuesta dinámica eléctrica de la SOFC. Basado en [3], [4] y [13] y la discusión anterior, el modelo dinámico del sistema de SOFC, es dado en la Fig. 2.

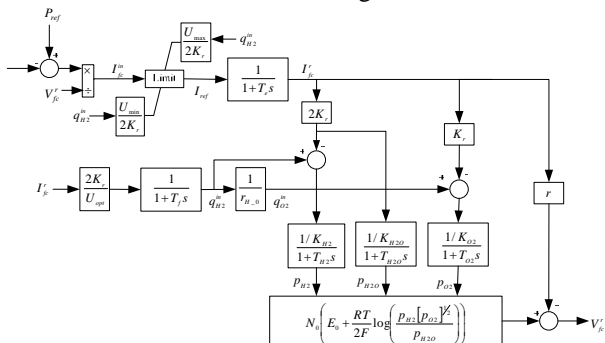


Fig. 2. Modelo dinámico del sistema de SOFC

1) Parametros del Modelo

Para los ejemplos estudiados en este artículo, se asume una SOFC con potencia nominal de 100kW. Los parámetros del modelo son tomados de la referencia [3], y mostrados en la Tabla I.

TABLA I. – Parámetros en el modelo de SOFC

Parámetro	Representación	Valor
P_{nom}	Potencia nominal	100 kW
P_{ref}	Referencia de potencia activa	100kW
T	Temperatura absoluta	1273°K
F	Constante de Faraday	96487 C/mol
R	Constante universal de los gases	8314 J/(kmol-°K)
E_0	Potencial ideal estándar	1.18 V
N_0	Numero de celdas en series en el stack	384
K_r	Constante, $K_r = N_0/4F$	0.996×10^{-6} kmol/(A-s)
U_{max}	Máxima utilización de combustible	0.9
U_{min}	Mínima utilización de combustible	0.8
U_{opt}	Optima utilización de combustible	0.85
K_{H_2}	Constante molar de la Válvula para el Hidrogeno	8.43×10^{-4} kmol/(s-atm)
K_{O_2}	Constante molar de la Válvula para el Oxigeno	2.52×10^{-3} kmol/(s-atm)
K_{H_2O}	Constante molar de la Válvula para el Agua	2.81×10^{-4} kmol/(s-atm)
T_{H_2}	Constante de Tiempo para el flujo de hidrogeno	26.1 seg.
T_{H_2O}	Constante de tiempo para el flujo de agua	78.3 seg.
T_{O_2}	Constante de tiempo para el flujo de oxigeno	2.91 seg.
R	Perdidas Ohmicas	0.126Ω
T_e	Electrical response time	0.8 seg.
T_f	Constante de tiempo del procesador de combustible	5 seg.
r_{H_2O}	Relación de hidrogeno a oxigeno	1.145

2) Desempeño Aislado

El modelo dinámico del sistema de SOFC fue simulado en operación aislada, todos los parámetros son los mismos mostrados en la Tabla I. Inicialmente el sistema de celda de combustible opera con voltaje constante e igual al nominal 333.8 Voltios (1.0 p.u), y demanda de potencia de 70 kW (0.7 p.u), estando en estado estacionario electroquímico, en $t = 0$ seg., un incremento de potencia en forma de escalón, cambia la demanda de 70 kW a 100 kW.

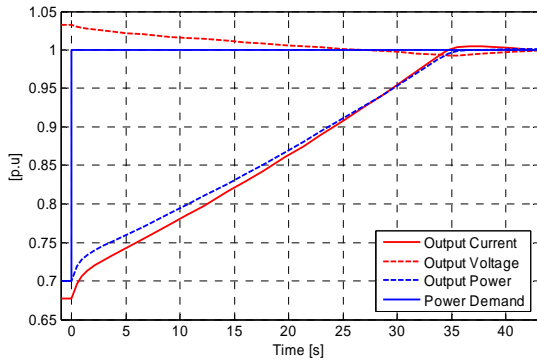


Fig. 3. Respuesta de P_{db} , P_{fc} , V_{fc} , I_{fc} , un escalón de incremento en la potencia

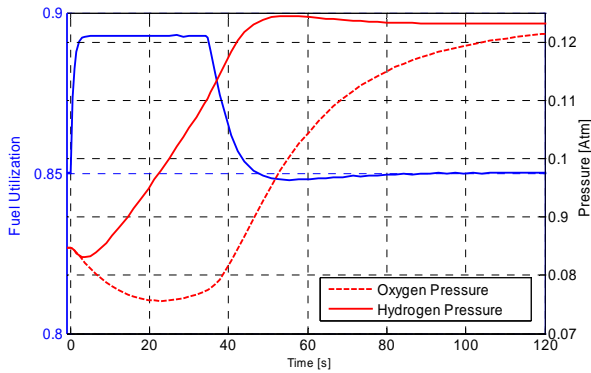


Fig. 4. Respuesta de P_{H_2} , P_{O_2} y utilización de combustible, a un incremento de escalón de potencia

La Fig. 3 y 4, muestra la respuesta dinámica de este sistema a un incremento de potencia en forma de escalón. Inicialmente la respuesta en el tiempo de la SOFC es rápida, los primeros 2 a 3 segundos la salida de potencia posee un rápido incremento debido a la rápida respuesta eléctrica de la celda de combustible. Luego un lento transitorio, en la potencia eléctrica es evidente. La lenta respuesta química produce un incremento lento y continuamente hasta que se alcanza la potencia demandada. La lenta respuesta temporal del procesador de combustible es quien domina este transitorio. En total, la respuesta de la SOFC a un escalón de demanda requiere de 30 segundos, para cambiar la potencia de salida de 70 a 100 kW. La Fig. 4, muestra la utilización de combustible, durante el cambio en la demanda, un evidente máxima utilización del combustible es alcanzado a 5 segundos, manteniéndose en este valor durante 25 segundos, y decrece hasta el valor óptimo en alrededor de 20 segundos.

Ahora asuma, que la celda de combustible en operación aislada y en estado estacionario, al voltaje nominal y a una demanda de potencia igual a la nominal. En $t = 0$ seg, se produce un descenso en la demanda que sigue una rampa, con una pendiente de 5kW/seg., sostenida durante 6 segundos. La respuesta dinámica de este cambio en la demanda es mostrada en Fig. 4 y Fig. 5. La lenta respuesta temporal en el procesador de combustible es evidente. En los primeros 2 a 3 segundos, la salida trata de seguir el descenso en la demanda, debido a la rápida respuesta eléctrica de la celda de combustible, pero subsecuentemente la salida de potencia no puede decrecer a la misma velocidad que la demanda de

potencia, el dinámica es dominada por el procesador de combustible, y la repuesta en la utilización de combustible alcanza su mínimo en alrededor de 3 segundos, y se mantiene ahí por alrededor de 20 segundos, para decrecer hasta el valor óptimo a 55 segundos del comiendo del cambio en la demanda.

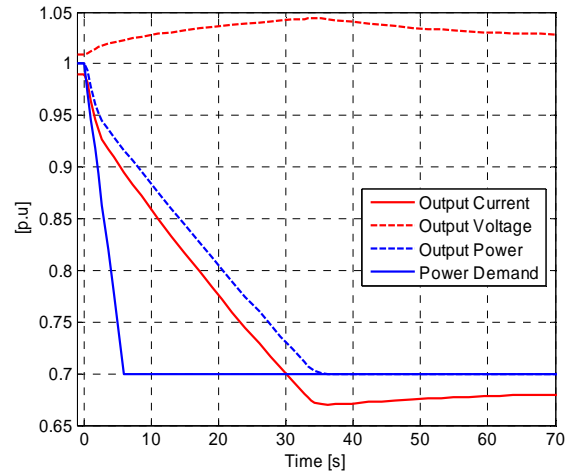


Fig. 5. Respuesta de P_{db} , P_{fc} , V_{fc} , I_{fc} , a una disminución en la demanda en forma de rampa

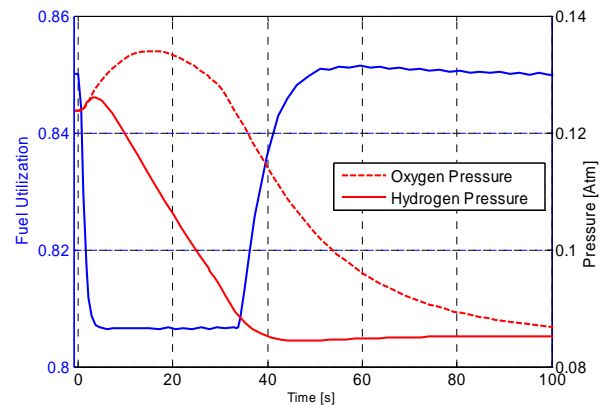


Fig. 6. Respuesta de P_{H_2} , P_{O_2} y utilización de combustible, para una disminución en la demanda en forma de rampa

3. Seguimiento de Carga

Las celda de combustible se perfilan como la principal fuente de generación distribuida en el futuro, una importante uso de la operación para proveer servicios de operación interconectada (*interconnected operation service -IOS*) o servicios auxiliares, bajo un ambiente des-regulado. Las IOS incluyen los siguientes siete servicios [16]: regulación, seguimiento de carga, reserva para contingencia (rodante o suplementaria), suministro de potencia reactiva desde fuentes de generación, respuesta de frecuencia, y capacidad de arranque desde apagón del sistema. La regulación es principalmente usada para mantener la frecuencia de la interconexión, minimizando la diferencia entre el flujo de potencia real en la línea de interconexión y el programado, y ajusta la generación a la carga dentro del área de control en la escala de tiempo de minutos. El seguimiento de carga es la provisión de generación y capacidad de respuesta de carga, incluyendo capacidad, energía y maniobrabilidad, que es despachado dentro del periodo programado por la

autoridad operadora [16]. La principal distinción entre el seguimiento de la carga y la regulación es la escala de tiempo en las cuales las fluctuaciones ocurren (10 minutos o mas). La regulación responde a rápidas fluctuaciones y el seguimiento de carga lo hace ante lentos cambios.

1) Seguimiento de la Demanda

Simulaciones numéricas son efectuadas en un alimentador de distribución de cuatro barras mostrado en la Fig. 7.

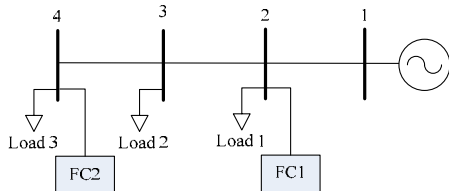


Fig. 7. Diagrama de alimentador de distribución

Por simplicidad, se ha supuesto que las cargas solo consumen potencia activa y cada una ha sido modelada por una impedancia constante. Dos plantas de celdas de combustible son incluidas FC1 y FC2, en las barras 2 y 4 respectivamente. Cada planta consiste de una SOFC con $P_{rate} = 500\text{kW}$ y $V_{rate} = 6.600\text{ V}$. Los parámetros de las unidades no son presentados debido a limitaciones de espacio. Aunque el acondicionador de potencia del sistema de celda de combustible puede entregar no solo potencia activa, por simplicidad se ha considerado solo potencia activa a la salida del inversor, y debido a que la respuesta temporal del acondicionador de potencia es menor a 10ms, no es necesario incluir su modelo detallado en la dinámica lenta del sistema de celda de combustible. Las unidades FC1 y FC2, principalmente proveen cierta capacidad de aplanar la demanda y servicios auxiliares para el alimentador. El principal interés en estas simulaciones dinámica es la función de seguimiento de la carga en las plantas FC1 y FC2. Supóngase, que en cierto momento la carga total en este sistema de distribución es $P_{load} = 1.25\text{MW}$, y en $t = 0$ seg., ocurre un incremento de la demanda de 25% en forma de escalón en Load 3, luego a $t = 200\text{seg.}$, otro incremento en forma de escalón del 25% afecta Load 1. La Fig. 7 muestra la respuesta dinámica del flujo de potencia activa por la línea de interconexión y la potencia de salida de FC1 y FC2. Las plantas de celda de combustible son instaladas para proveer seguimiento de la carga localmente, no existe comunicación entre ellas. Los límites de potencia en las plantas restringen la característica del seguimiento de la demanda. Inicialmente el flujo de potencia por la línea de interconexión es 0.26 p.u., cuando los cambios de carga ocurren, la lenta respuesta de la salida de potencia de las plantas de celda de combustible, hacen que no se puede suministrar en forma instantánea el incremento en la demanda. La Fig. 8 muestra el cambio en el flujo de potencia en la línea de interconexión para compensar la lenta respuesta de la potencia de salida de FC1 y FC2.

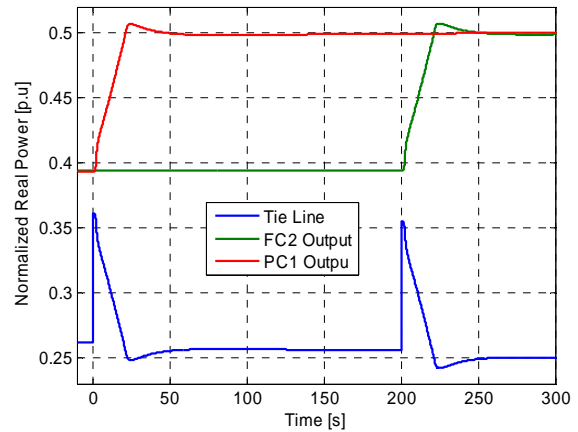


Fig. 8. Potencia de FC1, FC2, para un 25% de incremento en las cargas

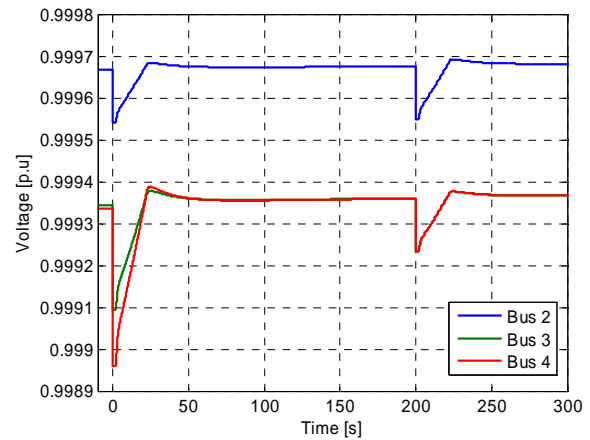


Fig. 9. Voltajes de barra durante el cambio de 25% en las cargas

El seguimiento de la carga involucra cambios electroquímicos en la celda de combustible, durante los cambios de la demanda. El comportamiento del voltaje en las barras, la utilización de combustible y presiones de hidrógeno y oxígeno son presentadas en Fig. 9, 10, 11. Es evidente que los cambios en las cargas, producen una disminución transitoria del voltaje en todas las barras del sistema, hasta que las celdas de combustible logran un equilibrio electroquímico y la salida de potencia alcanza el valor demandado.

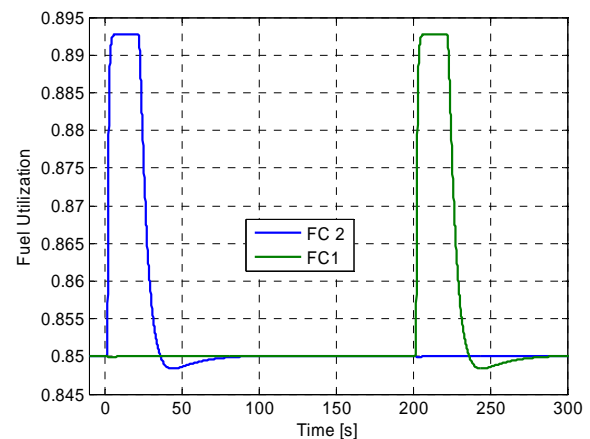


Fig. 10. Respuesta de la utilización de combustible de FC1 y FC2, ante un 25% de incremento en las cargas. El límite en la característica del seguimiento de la carga de las plantas de celdas de combustible, es impuesto por

su potencia máxima. Un incremento del 50% en forma de escalón en forma individual para las Load 3 y 1, requiere un ajuste en la potencia de la salida de las plantas FC1 y FC2 equivalente a su potencia máxima, y el remanente de potencia debe ser importado por la línea de transmisión. Esta situación es evidente en la Fig. 12, donde se muestran las potencias de salidas de FC1 y FC2, además del flujo de potencia activa en la interconexión. De igual modo los voltajes de barra en el sistema se ven afectados por esta condición (Fig. 13).

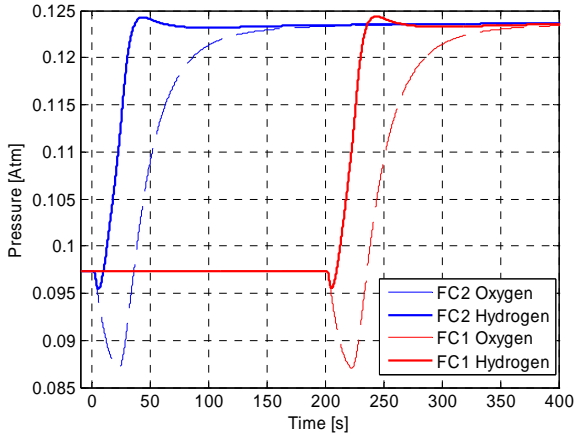


Fig. 11. Respuesta de P_{H_2} , P_{O_2} , para FC1 y FC2, ante un 25% de incremento en las cargas

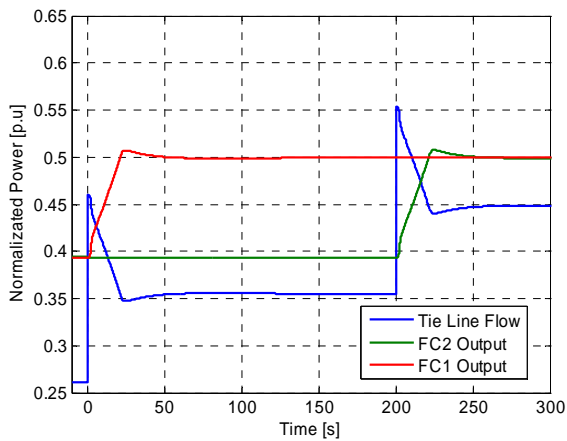


Fig. 12. Desempeño del seguimiento de la demanda de FC1, FC2, ante un incremento de 50% de la carga

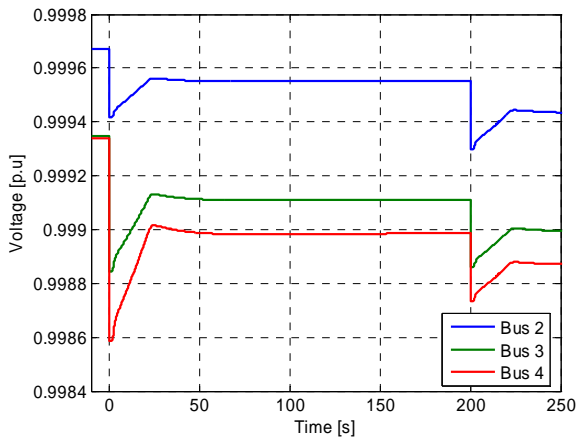


Fig. 13. Voltajes de barra ante un incremento de 50% de la carga

4. Conclusiones

En este artículo se presenta un modelo adecuado para la simulación de la dinámica lenta de SOFC. La evaluación en operación aislada del modelo muestra la capacidad para simular el desempeño dinámico de la SOFC con razonable y adecuados resultados. Un alimentador de distribución fue simulado considerando la integración dos plantas de celdas de combustibles utilizando el modelo presentado, y se evidenció la lenta respuesta dinámica de las celdas de combustible ante cambios en la demanda. Durante, cambios en la carga en forma de escalón, las plantas de celdas de combustible no pueden suministrar del todo el repentino cambio de potencia, debido a los transitorios electroquímicos asociados a la dinámica interna de la planta, y en un ambiente distribuido, el déficit de generación deben ser importado por la línea de interconexión aumento el flujo de potencia activa a través de ella. Las plantas de celda de combustible permite por su capacidad seguimiento de demanda la suscripción a futuro de contratos bilaterales a fin de mantener en un sistema el flujo de potencia activa a través de una línea de interconexión, dentro unos límites programados, y de este modo la empresa de suministro solo vería pequeñas fluctuaciones en el punto común de conexión.

Reconocimiento

Los autores quieren dar las gracias al Prof. Kevin Tomsovic por su invaluable colaboración y aporte de información en el desarrollo de este artículo.

Referencias

- [1] Hunt, Sally and Shuttleworth, Graham. *Competition and Choice in Electricity*. John Wiley & Sons, England (1996).
- [2] Lasseter R., Akhil A., et al. "Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS MicroGrid Concept". LBNL-50829, April 2002.
- [3] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Development of Models for Analyzing the Load Following Performance of Microturbines and Fuel Cells," *Journal of Electric Power Systems Research*, Vol. 62, Issue 1, May 2002, pp. 1-11
- [4] EG & G Services, Parsons, Inc. and Science Applications International Corporation, *Fuel Cell Handbook*, fifth ed., Oct. 2000.
- [5] [R. Anahara, S. Yokokawa, and M. Sakurai, "Present status and future prospects for fuel cell power systems," *Proc. IEEE*, vol. 81, pp. 399-408, Mar. 1993.
- [6] D. J. Hall and R. G. Colclaser, "Transient modeling and simulation of tubular solid oxide fuel cells," *IEEE Trans. Energy Conv.*, to be published.
- [7] M. D. Lukas, K. Y. Lee, and H. Ghezal-Ayagh, "Development of a stack simulation model for control study on direct reforming molten carbonate fuel cell power plant," *IEEE Trans. Energy Conv.*, to be published.
- [8] N. Hadjsaid, J.-F. Canard, and F. Dumas, "Dispersed generation impact on distribution networks," *IEEE Comput. Applicat. Power*, pp. 22-28, Apr. 1999.
- [9] M. K. Donnelly, J. E. Dagle, D. J. Trudnowski, and G. J. Rogers, "Impacts of the distributed utility on transmission system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 741-746, May 1996.
- [10] Hatziaodiniu, C.J.; Lobo, A.A.; Pourboghra, F.; Daneshdoost, M. "Simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 17, Issue 2, pp.467 - 473. April 2002.

- [11] A. J. Appleby and F. R. Foulkes, Eds., *Fuel-Cell Handbook*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1989, pp. 41-3–41-15.
- [12] L. J. Blomen and M. N. Mugerwa, Eds., *Fuel Cell Systems*, New York: Plenum, 1993, pp. 37–69.
- [13] J. Padulles, G.W. Ault, J.R. McDonald, An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation, *J. Power Sources* 86 (2000) 495_ 500.
- [14] T.H. Etsell, S.N. Flengas, *J. Electrochem. Soc.*, p. 118, 1890 (1971).
- [15] A.O. Isenberg, in *Proceedings of the Symposium on Electrode Materials and Processes for Energy Conversion and Storage*, edited by J.D.E. McIntyre, S. Srinivasan and F.G. Will, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ, 1977, p. 682.
- [16] North American Electric Reliability Council, “Policy 10 – Interconnected Operations Services,” NERC Draft 3.2, Oct. 11, 2000.