

Técnicas de Identificación de parámetros para modelos de PEMFC

M. Primucci, M. Serra, J. Riera
Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (UPC-CSIC)
c. Llorens i Artigas 4, 08028 Barcelona

Resumen

La utilización de las técnicas de Interrupción de Corriente y Espectroscopia de Impedancia suministra información relevante para la identificación del comportamiento de la PEMFC frente a perturbaciones en la carga, reflejadas en la corriente. El ajuste de la respuesta del modelo lineal equivalente, de orden reducido, con la del sistema original no lineal, presenta una muy buena concordancia.

Current Interrupt and Impedance Spectroscopy techniques furnish relevant information to characterize the behaviour of the PEMFC due to load perturbations, reflected as current variations. The adjustment of the responses of the identified linear equivalent model and the non-linear original system, shows a very satisfactory agreement.

Control de sistemas de generación basados en pilas de combustible

El diseño de controladores para los sistemas de generación de energía eléctrica basados en pilas de combustible requiere modelos matemáticos que representen de forma adecuada su comportamiento dinámico.

Un sistema de generación de energía eléctrica como el mencionado está sometido a diferentes perturbaciones externas siendo la más destacable la variación que puede tener la carga eléctrica conectada en bornes de la pila. Modificaciones en la carga provocan variaciones en la corriente suministrada por la pila y para soportar esta nueva carga debe producirse un reajuste de las variables que definen el punto de operación: flujos y presiones de los gases, sistema de gestión de la energía (calor, eléctrica).

Un sistema de control para PEMFC, como el que propone Pukrushpan (2002), presenta diversas variables de interés que es necesario gestionar para el correcto funcionamiento de la pila: caudal de hidrógeno y de oxígeno, humedad relativa de estos gases, temperatura de la pila, presiones totales y diferenciales en el ánodo y en el cátodo y gestión del agua producida. Siendo la variable de interés a controlar la tensión en bornes de salida de la pila.

Un esquema usual de sistema de control es el presentado en la figura 1, en el que se

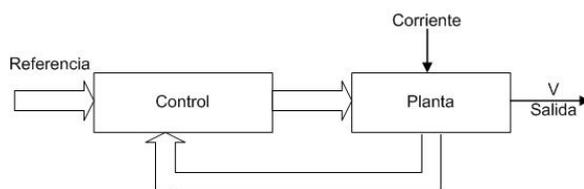


Figura 1. Esquema de sistema de control

representa la planta a controlar como un sistema multivariable en el que la variable de salida es la tensión de la pila, lo que permite considerar al sistema global como una fuente de tensión.

La relación entre el voltaje de salida V de la planta respecto a la corriente I que absorbe la carga se puede suponer como una impedancia equivalente, $Z = \frac{V}{I}$. Su conocimiento permite deducir características tanto dinámicas como estáticas del comportamiento de la pila frente a perturbaciones en la corriente.

Determinación de modelos simplificados

La determinación de la impedancia Z es equivalente a encontrar un modelo matemático que relacione ambas variables. De hecho la relación es no lineal aunque es interesante hallar aproximaciones lineales, lo cual permite escribirlo en forma de función de transferencia $Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)}$, siendo $V(s)$ y $I(s)$ las transformadas de Laplace de las variables temporales voltaje e intensidad.

Para el diseño del sistema de control no son muy relevantes las respuestas rápidas de los procesos electroquímicos ya que, en la mayoría de casos, se podrán representar simplemente como relaciones algebraicas sin dinámica asociada. Sí son importantes aquellas respuestas ligadas a las variaciones de las variables fluidicas que permiten ser modificadas mediante los actuadores existentes para los gases: presiones totales o parciales y caudales, así como las relacionadas con los intercambiadores de calor del sistema. Para que estos modelos sean útiles para el sistema de control se requiere que sean deducidos o validados experimentalmente.

Determinación de modelos a partir de ensayos experimentales

En este trabajo se analiza dos técnicas que permiten la determinación de modelos matemáticos $V(s)/I(s)$ y sus parámetros, basadas en ensayos experimentales. Las dos técnicas, muy extendidas en el análisis de componentes de pilas de combustible, aportan también información complementaria de gran utilidad para el diseño de los controladores.

Método de la interrupción de corriente

Este método, ampliamente difundido (Lee et al. 1998), evalúa la respuesta del potencial de relajación desde la polarización en un punto de trabajo a condiciones de circuito abierto (Yeager, 1970). En la figura 2 puede verse la respuesta a dicho ensayo del

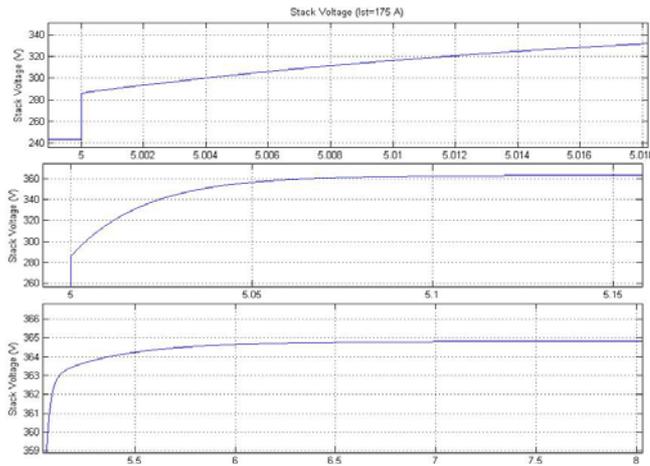


Figura 2. Respuesta a escalón de Corriente ($I_{st}=175$ A)

modelo de simulación propuesto por Pukrushpan, modificado para reflejar las pérdidas por activación.

La respuesta refleja, por tanto, los procesos de relajación de varias caídas de potencial: η_{IR} o caída ohmica, η_{Re} o caída por activación, ΔE_N o caída de Nernst.

Cada uno de ellos presenta una dinámica muy diferente: η_{IR} hasta 20 μs , η_{Re} hasta 200 ms, ΔE_N hasta 10 s. A los efectos del diseño del controlador el primer fenómeno se puede considerar instantáneo y por tanto solo se considera su valor estático. Para cada uno de los otros dos fenómenos se supone una dinámica de primer orden. Es habitual asociar un modelo eléctrico equivalente a estas dinámicas

dado por el esquema de la figura 3 y por la función de transferencia:

$$Z(s) = \left(R_{IR} + \frac{R_{RE}}{1 + R_{RE} \cdot C_{RE} \cdot s} + \frac{R_N}{1 + R_N \cdot C_N \cdot s} \right)$$

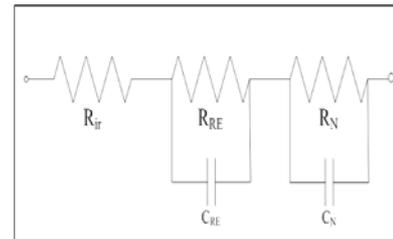


Figura 3. Circuito equivalente

Un método simple para separar las dos dinámicas de la respuesta es el siguiente:

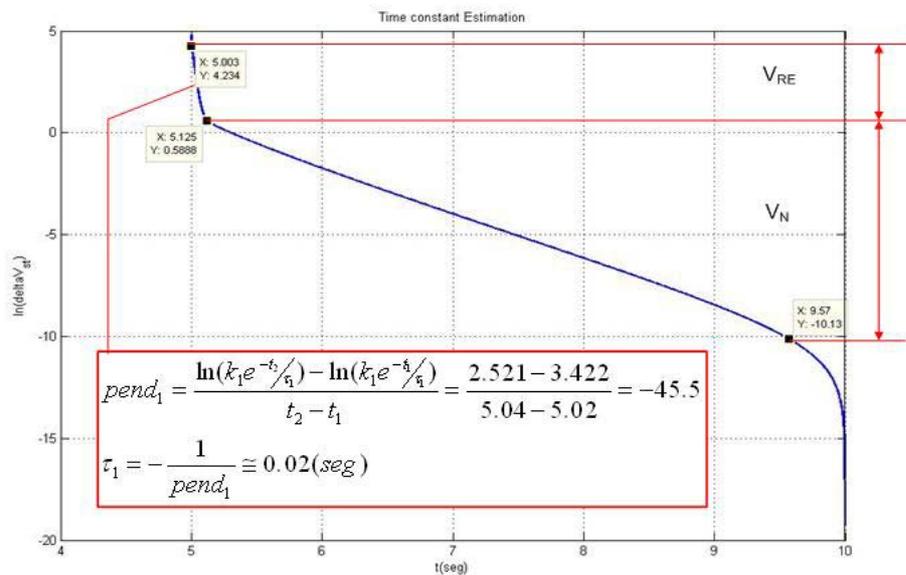


Figura 4. Identificación de parámetros por IC

- Determinar en la tensión, el salto inicial que corresponde a la caída ohmica (η_{IR})
- Restar a la señal total el valor de η_{IR} y aplicarle la función logaritmo neperiano, quedando la función temporal de acuerdo con la figura 4.
- Deducir de la figura los valores y el instante para los cuales se produce el cambio de la pendiente de la curva,
- Los valores de R_{RE} y de R_N se obtienen a partir de los voltajes correspondientes a los puntos de cambio de pendiente y el valor de la corriente nominal.
- El valor de las constantes de tiempo se deduce obteniendo las pendientes de las rectas que aproximan los cambios en el voltaje, véase el recuadro en la figura 4.

En la figura 5 se muestra la respuesta del sistema no lineal completo y la del modelo

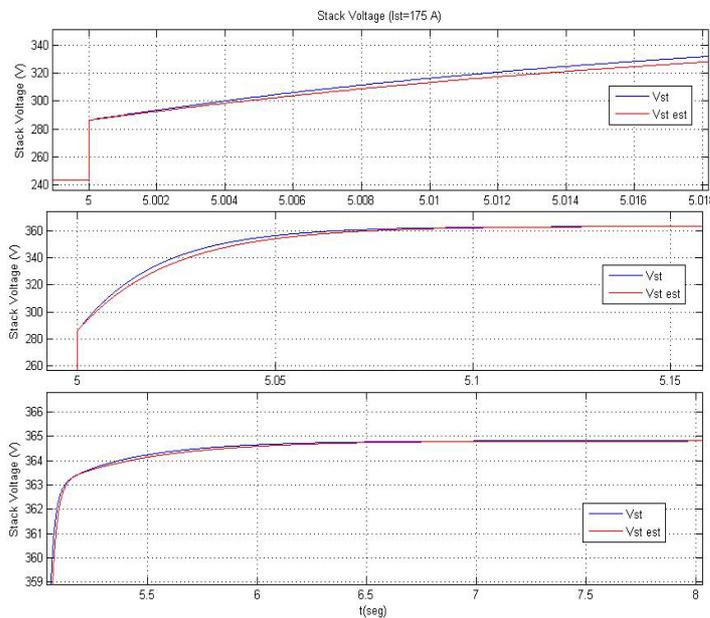


Figura 5. Respuesta del sistema original y el identificado por IC

reducido, presentando una buena concordancia.

Este procedimiento se ha empleado para dos casos más: a) el punto de operación corresponde a $I_{st}=50$ A y b) se ha modificado un 10% el volumen del cátodo manteniendo $I_{st}=175$ A.

Los resultados de los tres ensayos se han resumido en la tabla I.

Tabla 1. Parámetros Identificados del método de Interrupción de Corriente

	$R_{ohm}(\Omega)$	$R_{RE}(\Omega)$	$C_{RE}(F)$	$R_n(\Omega)$	$C_n(F)$	$R_{total}(\Omega)$
Ist=175 A	0.2440	0.4376	0.0528	0.0118	37.6791	0.6935
Ist=50 A	0.4822	0.9685	0.0231	0.0173	27.0569	1.4679
Ist=175 A ($\Delta V_{ca} = 0.9V_{ca,nom}$)	0.2442	0.4508	0.0482	0.0114	37.5906	0.7064

Método de espectroscopia de impedancia

La técnica de espectroscopía de impedancia consiste en realizar un barrido senoidal de pequeña amplitud sobre la corriente de carga en un punto de trabajo determinado (Wagner, 1998). A partir de los datos de amplitud y fase de las variaciones del voltaje

de la pila, se construye un diagrama de Bode que será utilizado para obtener una función de transferencia equivalente, que se ajuste a dicha curva.

En la figura 6 se observa el diagrama de Bode obtenido para $I_{st}=175$ A. Nótese en la curva de fase la existencia de dos frecuencias con desfase máximo, esto indica la posibilidad de aproximar el sistema con una función de transferencia de dos polos y dos ceros. A partir de $\omega_{\Phi_{max}}$ y Φ_{max} , se puede determinar los valores de los polos y los ceros, tal y como se indica en la figura 6.

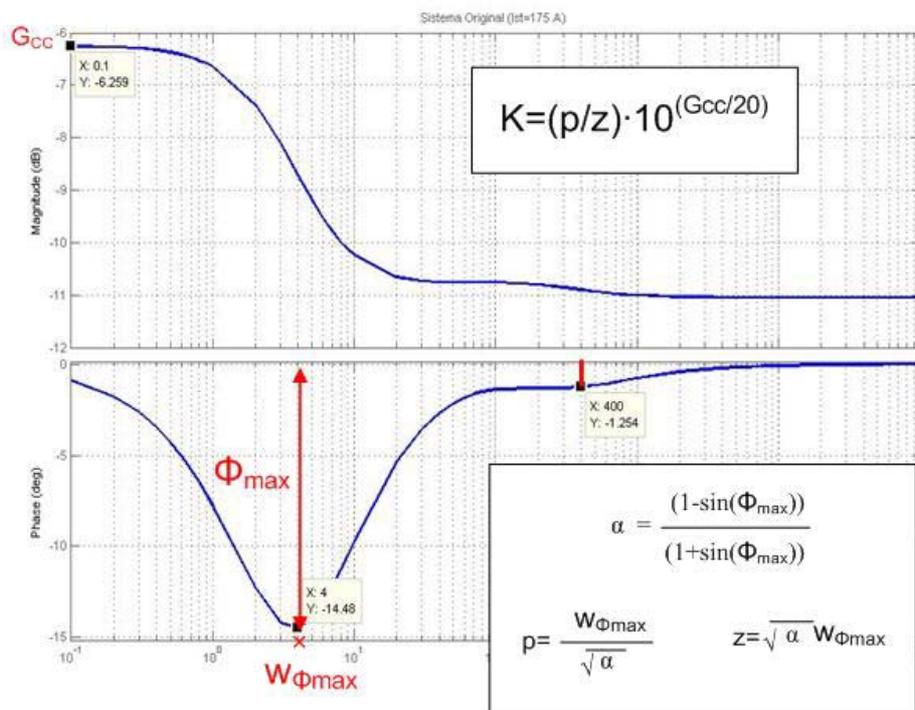


Figura 6. Identificación mediante la EI

En la figura 7 se muestra el diagrama de Bode de la pila con $I_{st}=175$ A, y la respuesta del modelo identificado, obsérvese el buen ajuste obtenido. Dicha técnica de identificación se ha ensayado también para los casos estudiados en el punto anterior, cuyos resultados pueden verse en la tabla 2, dando lugar a resultados igualmente satisfactorios.

Tabla 2. Funciones de transferencia identificadas vía EI

F.T.($I_{st}=175$ A)	F. T.($I_{st}=175$ A + ΔV_{CA})	F. T. ($I_{st}=50$ A)
$Z_1(s)=\frac{0.28141 (s+406.8) (s+4.81)}{(s+393.1) (s+2.88)}$	$Z_2(s)=\frac{0.27343 (s+405.9) (s+7.991)}{(s+394.2) (s+5.567)}$	$Z_3(s)=\frac{0.48496 (s+86.71) (s+1.317)}{(s+51.61) (s+1.663)}$

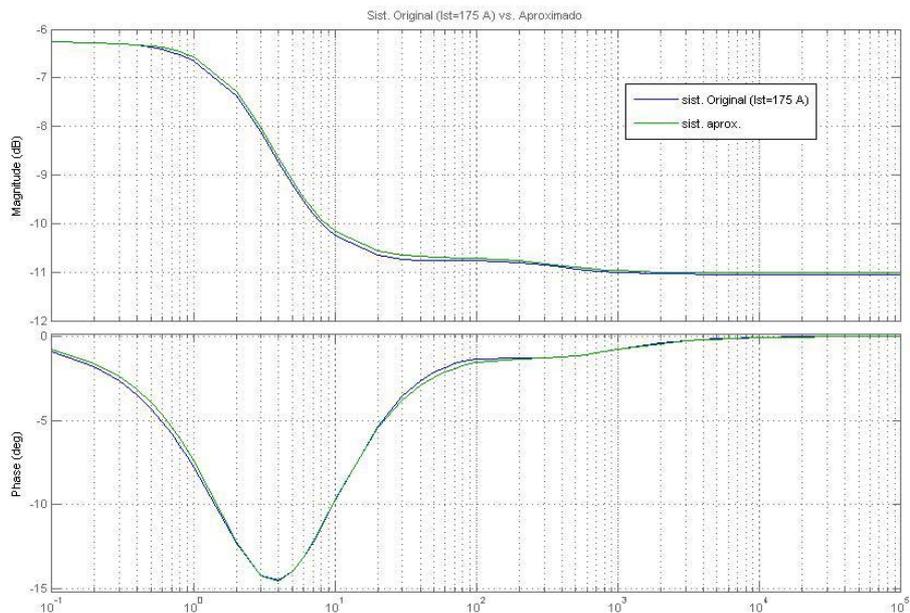


Figura 7. Respuesta del sistema original no lineal y del identificado con EI

Conclusiones

La identificación del comportamiento de una PEMFC correspondiente a la variación de la tensión debida a cambios en la carga, puede realizarse a través de los ensayos usuales en electroquímica, como son la Interrupción de Corriente y la Espectroscopia de Impedancia.

Los modelos así obtenidos son de orden muy reducido, pero presentan una buena concordancia con el sistema original no lineal.

Bibliografía

J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou & H. Peng, "Simulation and Analysis of Transient Fuel Cell System Performance based on a dynamic reactant flow model", Proceedings of IMECE '02, New Orleans, 2002.

G. Lee, H. Nakano, T. Nishina, I. Uchida & S. Kuroe, "Characterization of a 100 cm² class Molten Carbonate Fuel Cell with Current Interruption", Journal of Electrochemical Society, vol. 145, N° 8, August 1998.

E. Yeager and J. Kuta, "Physical Chemistry: An advanced treatise", vol 9., Eyring, Henderson and Jost, Editors, p. 369, Academic Press, 1970

N. Wagner, W. Schnurnberger, B. Müller & M. Lang., "Electrochemical impedance spectra of solid-oxide fuel cells and polymer membrane fuel cells", Electrochimica Acta, vol. 43, N° 44, 1998

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos CICYT DPI2002-03279 y CICYT DPI2004-06781-C02-01