

TÓPICOS DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Kunusch C.⁽¹⁾ *Puleston P.F.*^(1,2) *Mayosky M.A.*^(1,3) *Serra M.*^(4,5) *Riera J.*^(4,5)

(1) LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

(3) Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), provincia de Buenos Aires, Argentina.

(4) Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRII), Parc Tecnològic de Barcelona.

(5) Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) - Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España.

Resumen

Se presentan tópicos de control automático para sistemas autónomos de celdas de combustible. Se destacan ciertos aspectos a tener en cuenta en el proceso de modelado de un sistema de celdas de combustible, las características de los sensores y actuadores presentes en un equipo de prueba y los problemas de control inherentes a los procesos de humidificación, calefacción, refrigeración y oxigenación de las celdas. Finalmente se dan los lineamientos a seguir en un proceso general de automatización, particularmente en el control de lazo cerrado del subsistema de respiración. El mismo, correctamente controlado, brinda un nivel de oxigenación adecuado al cátodo, evitando su inanición y posibilitando maximizar la eficiencia de conversión de energía. Esta es una propuesta previamente desarrollada por los autores que resuelve un problema de importancia presente en sistemas de celdas de combustible PEM alimentadas por hidrógeno presurizado y turbo-compresores de aire.

Palabras Claves: Pilas de combustible PEM, control automático, oxigenación.

1. Introducción

Las pilas de combustible (PdC) son dispositivos que producen energía eléctrica a partir de hidrógeno y pueden ser utilizadas en un variado número de aplicaciones que van desde el transporte y la generación estacionaria hasta la utilización en telefonía celular. Si bien el concepto primario de una celda de combustible data de la mitad del siglo 19, es recién en la última década cuando se ha llevado a cabo una intensa actividad con el objeto de incrementar su flexibilidad y proporcionar sistemas simples y eficientes de generación eléctrica distribuida. Uno de los factores que más ha favorecido el desarrollo de las pilas de combustible ha sido el impacto ambiental que tienen los combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica y la automoción. En vista de que la extracción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua puede ser llevada a cabo utilizando energía de origen renovable (eólica, solar,

etc.), la vinculación de este combustible con la energía eléctrica por medio de pilas de combustible representa un sistema de energía limpio y sostenible.

El progreso en este área requiere inexorablemente del trabajo interdisciplinario y el desarrollo de tecnologías que permitan acercar avances a los diferentes campos de aplicación. Particularmente, el desafío que se debe afrontar desde el área de la automatización es la implementación de soluciones de control de características robustas que permitan abordar en forma sistemática errores de modelado y garanticen un adecuado comportamiento del sistema ante perturbaciones exógenas.

Entre algunas de las ventajas que ofrece la implementación de controles automáticos en PdC, por ejemplo, se puede destacar la solución de uno de los problemas más relevantes existentes en los sistemas de celdas de combustible, que es la coordinación de combustible (hidrógeno) y aire dentro de la pila a la hora de hacer seguimientos de carga variable. Un efectivo sistema de control puede evitar deterioros en el desempeño del sistema y/o posibles daños irreversibles en sus membranas poliméricas.

No obstante, desde el punto de vista del control las PdC presentan una alta complejidad de modelado. Por ejemplo, aún considerando únicamente el subsistema de respiración, el mismo está descrito por un modelo no lineal de noveno orden con una gran cantidad de variables internas inaccesibles para su utilización en el algoritmo de control. Además, existen perturbaciones medibles y no medibles, así como un grado considerable de incertidumbre en los parámetros del modelo. Esto hace que los problemas de control sean muy desafiantes y se necesite de un estudio riguroso para la resolución de los mismos. A continuación se hace un detalle de las consideraciones a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo el desarrollo de controladores para automatizar todo el sistema de generación de energía eléctrica.

2. Descripción del sistema

2.1 Modelado

Uno de los modelos dinámicos más completos disponible en la literatura abierta, es el modelo Pukrushpan [1]. Tal modelo describe el comportamiento de un stack PEM 75 KW utilizado en el prototipo FORD P2000 [2]. El stack se alimenta por medio de hidrógeno presurizado y un turbo compresor de aire.

En la siguiente figura se puede apreciar un diagrama esquemático del sistema y su configuración de trabajo. Una de las entradas de este sistema consiste en la

tensión de armadura del motor CC del compresor, mientras que algunas salidas medibles de interés son la potencia neta entregada por el sistema (diferencia entre la potencia generada por la pila y la potencia consumida por el compresor), la tensión en bornes de la pila y el flujo de masa que libera el compresor. A la corriente drenada de la pila se la considera como una perturbación externa medible.

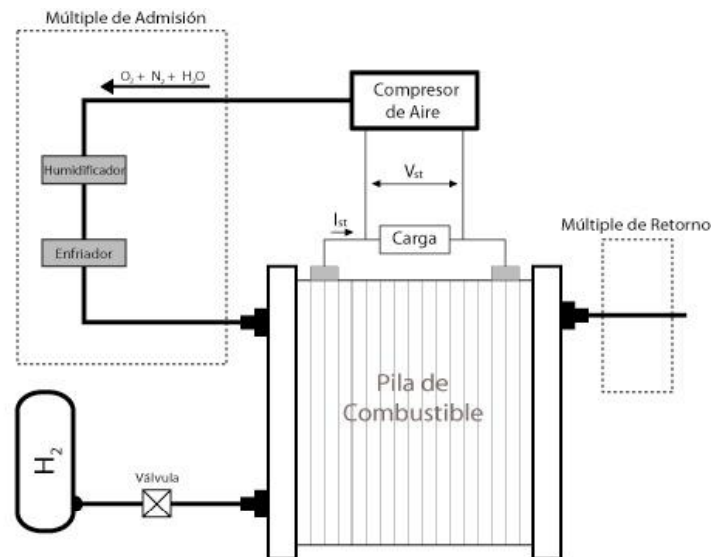


Figura 1: Diagrama esquemático del sistema

En términos generales, el modelo de un sistema completo de generación basado en una pila de combustible PEM puede ser descompuesto en diferentes sub-modelos interactuantes:

- Subsistema térmico (gestión de calor).
- Subsistema de humidificación (gestión de agua).
- Subsistema de alimentación de gases.
 - Tensión de la Pila (modelo estático)
 - Cátodo (modelo dinámico)
 - Ánodo (modelo dinámico)
 - Membrana polimérica (modelo estático)
 - Múltiples (modelo dinámico)
 - Compresor (modelo dinámico)

El modelo completo del sistema se obtiene a través de la aplicación directa de leyes físicas, principios electroquímicos y termodinámicos. Esta descripción permite modelar la planta por medio de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales

de alto orden, donde las relaciones existentes entre los estados se describen a través de diferentes tipos de funciones multivariables. Las características más relevantes del sistema modelado son las siguientes:

- Multivariable
- Alto orden (solo el sistema de respiración es de 9º orden)
- No lineal
- Gran contenido de tablas de información y bloques de decisión
- Diferentes tipos de sistemas físicos y constantes de tiempo asociadas
- Poca disponibilidad de variables medibles
- Restricciones en los actuadores
- Deficiencias en los modelos de generación y distribución de agua

En esta temática, actualmente se está trabajando en el modelado y ajuste de parámetros de un stack de 200 w tipo EFC7-50 de ElectroChem (Fig. 2) que posee el Institut de Robòtica i Informàtica Industrial de Barcelona. El mismo está siendo probado en un equipo de instrumentación y almacenamiento de datos en tiempo real que permite llevar a cabo tareas de modelado, identificación y control de diferentes stacks de celdas de combustible (Fig. 3).

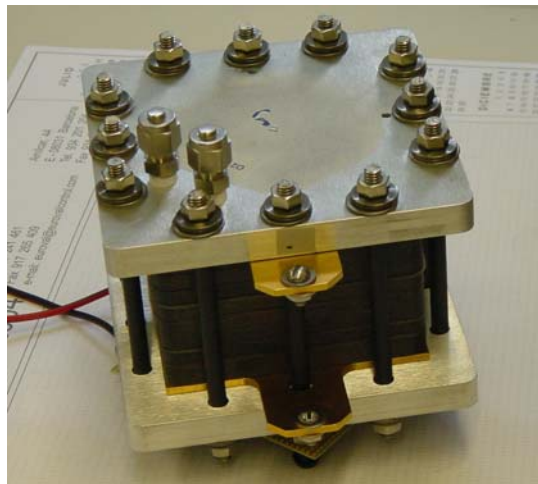


Figura 2: Stack EFC7-50 (ElectroChem)

El banco de pruebas trabaja sobre una plataforma de almacenamiento en tiempo real y un hardware de adquisición de datos que permite visualizar más de treinta variables del sistema (temperaturas, voltajes, presiones, caudales, corriente, etc.) y modificar las consignas de todos los actuadores electrónicos de la planta.

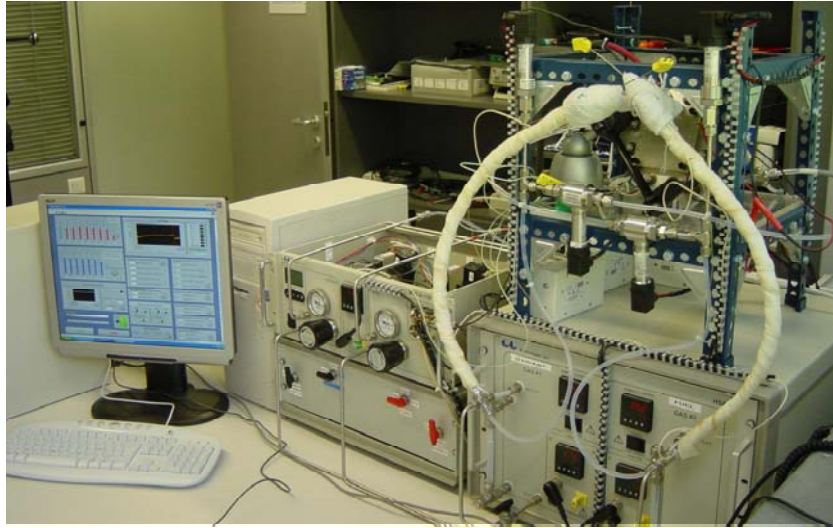


Figura 3: Banco de Pruebas del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial de Barcelona

Como se mencionó anteriormente, el modelo de Pukrushpan, si bien es representativo de un sistema real, presenta una gran complejidad, alto orden y un número importante de bloques de decisión y “*look up tables*”. Esta misma complejidad, que permite una acabada descripción del sistema, representa un real inconveniente al momento de llevar a cabo tareas de síntesis de controladores y pruebas formales de estabilidad. De modo que para hacer un diseño riguroso se hará necesario obtener una representación matemática de la dinámica del sistema a través de campos vectoriales diferenciables.

2.2 Posibles Sensores

Dentro de las posibles variables a medir en un banco de pruebas de laboratorio, se pueden destacar las siguientes:

- Presión absoluta y diferencial de H_2 y aire
- Flujos de H_2 , aire y refrigerante
- Temperaturas de las celdas, *line-heaters* y humidificadores
- Velocidad del motor
- Tensión diferencial entre cada una de las celdas y corriente drenada del stack

2.3 Posibles Actuadores

Por su parte, existen varias formas de actuar sobre el sistema, de entre las cuales se pueden destacar las siguientes:

- Tensión de control del motor del compresor
- Válvulas de salida de H₂ y aire (*back-pressure valves*)
- Controladores de flujo de H₂ y aire de entrada
- Humidificadores (Inyectores o botellas)
- Motor de recirculación de H₂
- Bomba de refrigeración y recirculación de aire

3. Problemas de control asociados

Dentro de un sistema preparado para funcionar en forma autónoma se deben resolver los siguientes problemas de control para garantizar el funcionamiento óptimo y seguro del equipo.

- Control de temperatura (*stack* y *line-heaters*)
 - Ecuaciones de balance térmico del stack
 - Dinámica térmica asociada a los gases
 - Alarmas de alta temperatura
- Control de humidificación
 - Inyectores de vapor
 - Botellas de agua
- Control de presión ánodo-cátodo
 - Tracking $p_{an}-p_{ca}$
 - Purgas periódicas del cátodo
 - Alarmas y detección de fallas
- Control de oxigenación
 - Optimización del rendimiento energético del sistema
 - Evitar la inanición del cátodo (estequiometría de O₂ > 1)

4. Propuesta para el control de oxigenación

Uno de los problemas más relevantes que poseen los sistemas de celdas de combustible es la coordinación de hidrógeno y comburente dentro de la pila cuando se hacen seguimientos de carga variable. Es así que resulta de gran importancia trabajar en el desarrollo de algoritmos de control para evitar deterioros en la calidad de potencia entregada por el sistema maximizando su eficiencia, al tiempo de reducir posibles daños irreversibles en las membranas poliméricas de las celdas.

4.1 Objetivo de Control

En este caso, el objetivo específico del sistema de control consiste en optimizar el rendimiento de conversión del conjunto pila-compresor, lo cual permitirá maximizar la eficiencia de generación para cada condición de carga. Tanto en una aplicación automotriz como en una estacionaria, esto es de gran importancia ya que se podría proporcionar la potencia necesaria a la carga mientras que el resto de la energía generada puede ser almacenada. De esta forma se mejora la autonomía y se reduce el consumo de hidrógeno. Esta optimización del rendimiento de conversión se puede lograr regulando el caudal másico de oxígeno que entra al cátodo de la pila [3]. En este contexto, dicho objetivo de control se puede resumir de esta forma:

- **Objetivo principal:** maximizar la eficiencia energética del sistema autónomo sin descuidar los siguientes objetivos secundarios:
 - Mejorar la calidad de potencia entregada (*performance*).
 - Brindar *robustez* suficiente ante incertidumbres de modelado y perturbaciones externas.
 - Mantener el funcionamiento de la pila de combustible dentro de zonas de trabajo preestablecidas.
 - Evitar la inanición del cátodo (*falta de oxígeno para la oxidación*).
 - Mejorar la vida útil del dispositivo.

4.2 Solución del problema de control

En este sentido, los autores están trabajando en la solución del problema específico de control de respiración. En particular, hasta la fecha los esfuerzos se han centrado en el desarrollo de estrategias de control de estructura variable (CEV) cuyo objetivo es la regulación de estequiometría de oxígeno del cátodo [4][5][6]. Para ello se debe medir el caudal de aire que entrega el compresor como así también la corriente drenada del stack (Fig. 4).

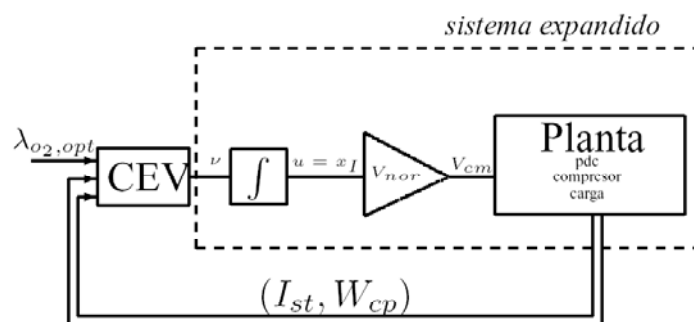


Figura 4: Esquema del sistema de control

Dentro de las características generales de las estrategias propuestas, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Utilización de algoritmos de control por modo deslizante de 2º orden, donde la superficie de control se diseña a partir de la realimentación del flujo de aire liberado por el compresor (w_{cp}), mientras que la referencia se genera a partir de la medición de la corriente de stack (I_{st}). La estrategia se caracteriza por:
 - Cálculo de la señal de control a partir de pocas variables medidas.
 - Suavidad de la señal de control (V_{cm}), evitando *chattering* en las salidas y envejecimiento de los actuadores.
 - Robustez ante perturbaciones e inexactitudes de modelado.

Para más información referirse al trabajo [3][6].

5. Conclusiones

En este trabajo se presentaron aspectos relacionados con el control automático de sistemas de celdas de combustible. Se puso especial énfasis en algunas cuestiones del proceso de modelado de un stack, los problemas típicos de control en un sistema completo de generación de energía eléctrica y se dieron los lineamientos a seguir en un proceso de automatización.

En particular, se estableció un objetivo de control orientado a la solución de uno de los problemas más importantes en sistemas de celdas de combustible, esto es el subsistema de respiración de un stack PEM alimentado por hidrógeno presurizado y un turbo-compresor de aire. El esquema de control propuesto confiere al sistema de lazo cerrado un alto grado de robustez ante incertidumbres y perturbaciones, sus parámetros son fácilmente ajustables y su ley depende de dos señales fácilmente medibles como son la corriente de stack (I_{st}) y el caudal de aire liberado por el compresor (w_{cp}).

Referencias

- [1] Pukrushpan J., Stefanopoulou A. y Peng H., Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, London (2004).
- [2] Adams J., Yang W., Oglesby K. y Osborne K., "The development of Ford's P2000 fuel cell vehicle", *SAE Paper 01-1061* (2001).
- [3] Kusus C., Puleston P.F, Mayosky M.A., "Control por Modo Deslizante de una Pila de Combustible Basado en un Algoritmo Twisting". XI RPIC, publicación en CD (2005).
- [4] Kusus C., Puleston P.F, Mayosky M.A., "Aspectos del Modelado de una Pila de Combustible". Num 5.27, Publicación en CD. I Hyfusen (2005).
- [5] Kusus C., Puleston P.F, Mayosky M.A., "Estudio Comparativo de Algoritmos 2-Deslizantes Aplicados al Control de Pilas de Combustible PEM". XX AADECA (2006).
- [6] Kusus C., "Control por Modo Deslizante de Segundo Orden de una Pila de Combustible PEM Utilizando un Algoritmo *Twisting*". Tesis de Magíster, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP (2006).