

CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA DE LA TENSIÓN GENERADA Y DEL SUMINISTRO DE AIRE EN SISTEMAS BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE PEM

D. Feroldi, M. Serra, J. Riera

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, C. Llorens i Artigas 4-6 planta 2, Barcelona 08028, España

RESUMEN: *El Control Predictivo de Matriz Dinámica (DMC) es utilizado con el objetivo de conseguir un control multivariable de un sistema compuesto por una pila de combustible tipo PEM alimentada por un compresor de aire, actuando la corriente de carga como perturbación al sistema. Las variables controladas son la tensión generada por la pila de combustible y la proporción de oxígeno en exceso en el cátodo. Se propone utilizar como variables de control a la tensión de alimentación del compresor de aire y a la apertura de la válvula que cierra la salida de aire del cátodo. El control DMC resuelve eficazmente el problema de interacción que existe entre las variables controladas y las variables manipuladas. Se muestra la conveniencia de utilizar la medición de la corriente de pila de combustible en el algoritmo de control para mejorar la respuesta dinámica del sistema, especialmente la respuesta de la tensión generada. Esto se traslada en una mejora de la eficiencia del sistema. Los resultados de simulación muestran un control eficiente del sistema con buena respuesta dinámica y un esfuerzo de control reducido.*

ABSTRACT: *The objective of this work is to utilize a multivariable Dynamic Matrix Control (DMC) in a system composed of a fuel cell stack and an air compressor. The DMC controls the transient behavior of the system during abrupt changes in the current demanded by the load which acts as a disturbance to the system. The controlled variables are the generated voltage by the stack and the oxygen excess ratio in the cathode. It is proposed to utilize the air compressor voltage and the aperture of the valve on the exit of the cathode manifold as manipulated variables. The DMC resolves efficiently the interaction problem between manipulated variables and controlled variables. It is proposed to utilize the stack current measurement in the control algorithm in order to improve the dynamic response of the system, especially the generated voltage response, which produces an efficiency improvement. The simulation results show an improved control of the system with good dynamic response and reduced control effort.*

Palabras clave: PEMFC, Control Multivariable, Control Predictivo, DMC

1. INTRODUCCIÓN

La respuesta temporal de una pila de combustible está condicionada por el flujo de aire y de combustible, la regulación de la presión y la gestión del agua y el calor. Cuando se conecta una carga a la pila de combustible el sistema de control debe mantener la temperatura óptima, la hidratación de la membrana y la presión parcial de los gases a ambos lados de la membrana para evitar la degradación del voltaje generado y por lo tanto en la eficiencia, además de asegurar la vida útil de la pila. De esta manera dos de los principales objetivos de control en un sistema de generación eléctrica con pila de combustible son el control del voltaje generado y el suficiente suministro de oxígeno en el cátodo.

En [1] se demuestra la conveniencia de regular la proporción de oxígeno en exceso en el cátodo con el fin de maximizar la potencia neta generada. Se entiende como proporción de oxígeno en exceso al cociente entre el flujo de oxígeno de entrada y el flujo consumido en la reacción electroquímica. En [1], [2] y [3] el control de la proporción de exceso de oxígeno en cátodo se aborda mediante la

manipulación de la tensión del motor del compresor de aire. En [1] y [2] se resuelve el problema mediante control de tipo “*feedforward*” mientras que en [3] y [4] se emplea control predictivo basado en modelo (MPC). Queda demostrado que existe un severo conflicto entre el control de la proporción de oxígeno en exceso en el cátodo y la respuesta temporal de la potencia neta si no se emplea ninguna fuente de potencia secundaria en los momentos de cambio brusco en la potencia demandada. Esta limitación proviene del hecho de que toda la potencia del compresor de aire proviene de la propia pila de combustible. En [3] se agregan supercapacitores al sistema como fuente de potencia auxiliar para afrontar los picos de potencia.

En el presente trabajo se implementa un control multivariable teniendo como objetivos de control la regulación del voltaje generado y el suministro de oxígeno en el cátodo para superar el problema mencionado. Por ello, además de utilizar la tensión del motor del compresor, se utilizó la apertura de la válvula de salida del aire del cátodo. El método de control empleado es el Control Predictivo de Matriz Dinámica (DMC). Este es uno de los métodos más representativos dentro del control predictivo y está

ampliamente introducido en la industria [5]. La elección del método de control está motivada fundamentalmente por el hecho de poder lograr un control multivariable centralizado de la pila de combustible, donde el modelo utilizado, además de ser fácilmente elaborado, permite tener en cuenta las interacciones existentes entre las entradas y salidas del sistema como se explicará a posteriori. Otra ventaja de su utilización es el esfuerzo de cálculo reducido para computar el vector de control.

2. MÉTODO DE CÁLCULO

El método de Control de Matriz Dinámica (DMC) usa la respuesta al escalón para modelar el proceso, considerando solo las p primeras muestras hasta que la respuesta tiende a un valor constante, asumiendo por tanto que el proceso es asintóticamente estable. De esta manera la salida predicha de la planta puede escribirse como:

$$\hat{y} = Gu + f \quad (1)$$

donde:

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

es la matriz dinámica construida a partir de los coeficientes g_i obtenidos de la respuesta al escalón con horizonte de predicción p y horizonte de control m , u es el vector de control futuro y f es la respuesta libre del proceso, es decir, la parte de la respuesta que no depende de las acciones de control futuras

El objetivo del controlador DMC es minimizar la diferencia entre las consignas, $w(t)$, y las salidas de la planta en el sentido de mínimos cuadrados con la posibilidad de incluir una penalización en los movimientos de la señal de control:

$$J = \sum_{j=1}^p R [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m Q [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (3)$$

donde R y Q son matrices de peso diagonales. Con la matriz R pueden compensarse los diferentes rangos de valores de las salidas de la planta, mientras que la matriz Q permite dar distintos pesos a las diferentes señales de control.

Si no existen restricciones en las variables manipuladas, la minimización de la función de coste

J puede realizarse igualando su derivada a cero, resultando:

$$u = (G^T R G + Q)^{-1} G^T R (w - f) \quad (4)$$

Como en todas las estrategias de control predictivo, solo se envía a la planta el primer elemento del vector calculado, calculándose nuevamente la secuencia de control en la siguiente iteración. Las bases teóricas del método pueden verse con mayor detalle en [5].

Como se mencionó anteriormente los dos objetivos de control son regular la tensión generada por la pila de combustible, V_{pc} , y el suministro de oxígeno en el cátodo de la misma, λ_{O_2} . Las variables controladas son entonces: $y_1 = \lambda_{O_2}$, e $y_2 = V_{pc}$. La corriente requerida a la pila de combustible, $w = I_{pc}$, se considera perturbación al sistema.

La tensión del compresor de aire que alimenta el cátodo, V_{cm} , es una buena variable de control, sin embargo no es suficiente para poder lograr ambos objetivos de control. Por ese motivo se propone utilizar la apertura de la válvula de salida de aire del cátodo, A_t , como variable de control adicional. Las variables manipuladas son entonces: $u_1 = V_{cm}$, y $u_2 = A_t$.

Existe gran interacción entre las variables manipuladas y las variables controladas, lo cual dificulta la realización de un control descentralizado del sistema. El controlador multivariable implementado emplea en su algoritmo de control una matriz dinámica ampliada que tiene en cuenta dichas interacciones:

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \quad (5)$$

donde cada matriz G_{ij} contiene los coeficientes de la i -ésima respuesta escalón ante la j -ésima entrada. Las matrices R y Q tienen ahora la siguiente forma:

$$R = \begin{pmatrix} R_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_2 \end{pmatrix}; \quad Q = \begin{pmatrix} Q_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Q_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde las R_i y las Q_i son matrices diagonales de dimensión $p \times p$ y $m \times m$ respectivamente.

De esta manera se ha conseguido un controlador multivariable centralizado que tiene en cuenta las interacciones entre las variables controladas y manipuladas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El controlador DMC fue implementado en el entorno de Matlab y ensayado con el modelo dinámico de pila de combustible propuesto por

Pukrushpan et al. [2], el cual representa un sistema de generación con pila de combustible PEM de 75kW de potencia.

En el controlador se ajustaron tanto el horizonte de control m y el horizonte de predicción p , como las matrices R y Q del controlador para lograr una respuesta temporal adecuada del sistema. Los valores de las matrices R y Q influyen en la respuesta temporal obtenida, especialmente la matriz de pesos Q que reduce el esfuerzo de control. Cuanto más grande sean los valores de Q , menor será el esfuerzo de control pero en contrapartida el tiempo de respuesta será mayor. Los valores de R_1 fueron tomados iguales a 5 y los correspondientes a R_2 iguales a 1. Los pesos de control fueron tomados igual a 1 para la primera variable manipulada e igual a 0.5 para la segunda. Se utilizó un horizonte de predicción igual a 100 y un horizonte de control igual a 15.

Los resultados obtenidos con el sistema controlado alrededor del punto de operación correspondiente a 40kW se muestran en las Fig. 1 a Fig. 5.

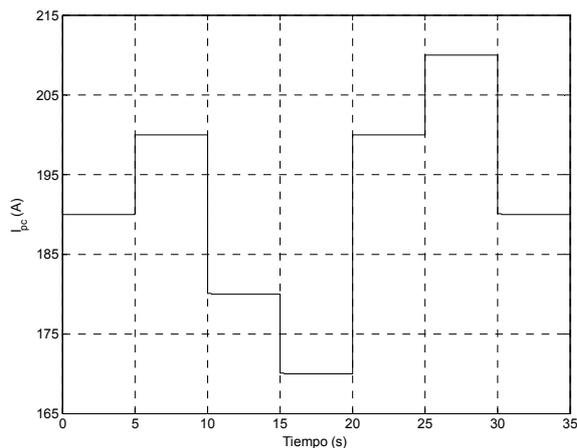


Fig. 1. Variación temporal de la corriente demandada a la pila de combustible

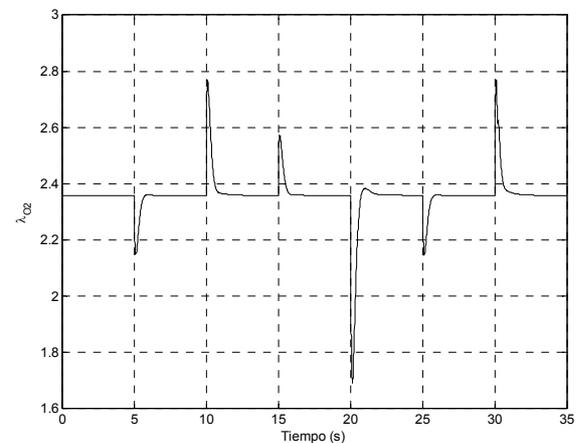


Fig. 2. Proporción de oxígeno en exceso

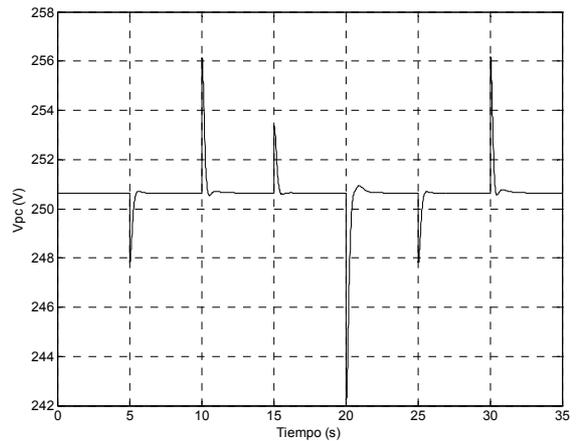


Fig. 3. Tensión generada por la pila de combustible

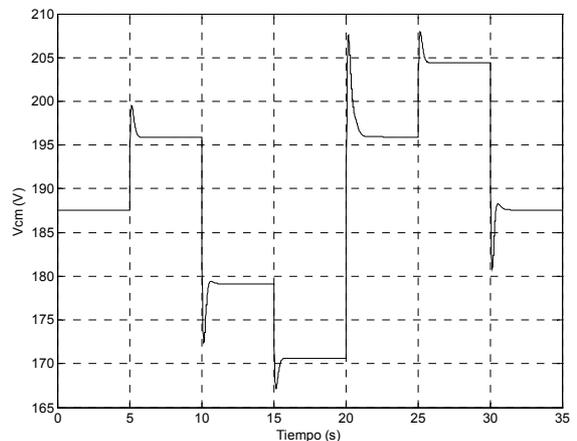


Fig. 4. Acción de control sobre la tensión del compresor de aire

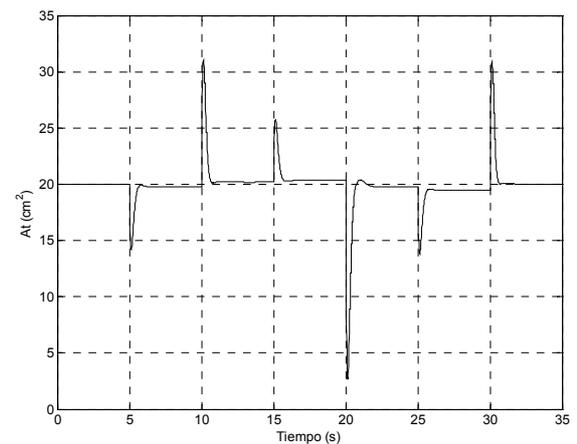


Fig. 5. Acción de control sobre la apertura de la válvula de salida de cátodo

El funcionamiento del controlador implementado tal como se ha descrito tiene un buen rechazo a las perturbaciones, con tiempo de respuesta menor a 0.5 segundos en V_{pc} y menor a 1 segundo en λ_{O_2} .

El funcionamiento del controlador puede ser mejorado si se incluye en la predicción de las salidas de planta información sobre la respuesta de las mismas ante cambios en la perturbación, en el caso que esta pueda ser medida. Los resultados obtenidos muestran una mejora sustancial en la dinámica del sistema si se considera a la corriente de pila como perturbación medida en el cálculo de la predicción. Para este cálculo la perturbación medida se trata como una entrada más al sistema. En las Fig. 6 y Fig. 7 se realiza una comparación entre las respuestas temporales de V_{pc} y λ_{O_2} . Se observa una mejora en la respuesta temporal al utilizar la medición de la perturbación en el controlador, especialmente en la respuesta de la tensión generada, V_{pc} , reduciendo el tiempo de respuesta en aproximadamente un 50%.

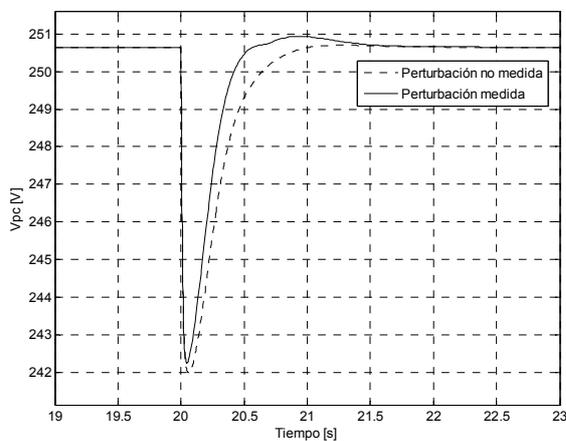


Fig. 6. Comparación entre la respuesta temporal de V_{pc} con control con perturbación medida y no medida

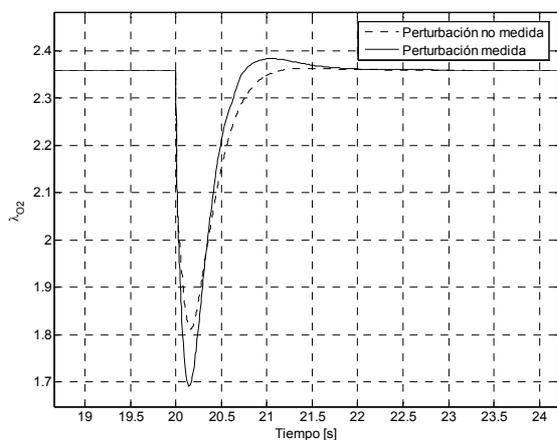


Fig. 7. Comparación entre la respuesta temporal de λ_{O_2} control con perturbación medida y no medida

En el algoritmo de control se implementa un mecanismo de compensación para subsanar los inevitables errores de modelado y poder trabajar

adecuadamente frente a perturbaciones no medidas. Este mecanismo de compensación utiliza información del valor real de las variables controladas y asegura error estacionario nulo. Parte del supuesto que las variables controladas pueden ser medidas, por lo tanto en aquellos casos en que alguna de las mediciones no sea posible será más crítica la etapa de identificación.

A pesar del hecho de que el modelo interno utilizado por el controlador es un modelo lineal del sistema, los resultados muestran un buen comportamiento en un amplio entorno alrededor del punto de operación seleccionado

4. CONCLUSIONES

Se ha logrado un control eficiente de las variables de salidas controladas que soluciona el problema de interacción presente entre las variables controladas y las manipuladas, permitiendo aumentar la cantidad de variables controladas de manera ágil.

Los objetivos de control han sido alcanzados con un esfuerzo de control reducido y acotable mediante la matriz de pesos Q . Esto es particularmente importante debido a la limitación física en la operación de la válvula de salida de cátodo.

Se ha conseguido una mejora sustancial en la respuesta dinámica de la tensión generada mediante la incorporación de la medición de la corriente de la pila combustible en el algoritmo de control.

Los resultados obtenidos mediante simulación se validarán experimentalmente en laboratorio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CICYT DPI2004-06871-C02-01, del MEC español.

Bibliografía

- [1] M. Grujicic, K. Chittajallu, E. Law, J. Pukrushpan, J. of Power and Energy. 218 (2004) 487-499.
- [2] J. Pukrushpan, H. Peng, A. Stefanopoulou. J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control. 126 (2004) 14-25.
- [3] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, H. Peng, en *Proceedings of the American Control Conference, 2004*, 834-839
- [4] J. Golbert, y D. Lewin. J. of Power Sources. 135 (2004) 135-151.
- [5] E. Camacho y C. Bordons, en *Model Predictive Control*, M. Grimbly y M. Johnson (Editores), Springer-Verlag: Londres, 1999, 33-39.