

Control de Sistemas Basados en Pilas de Combustible Tipo PEM

Diego Feroldi, Maria Serra, y Jordi Riera

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España,
e-mail: (dferoldi, maserra, riera)@iri.upc.edu

Resumen—En este artículo se expone de manera global el trabajo de tesis realizado sobre el control de sistemas híbridos con pilas de combustible. Se estudia el sistema híbrido compuesto por una pila de combustible y supercondensadores. Se muestran los aspectos relevantes del control del mismo, en particular el control del suministro de aire en el cátodo. Para ello se emplea un método basado en modelo, el Control Predictivo Funcional. Se muestran las ventajas de los sistemas híbridos, como así también las tareas que constituyen el proceso de diseño del sistema.

Palabras claves — Pilas de Combustible, Sistemas Híbridos, Gestión de la Energía.

I. INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible son dispositivos que permiten transformar la energía química de un combustible (generalmente hidrógeno) directamente en energía eléctrica de forma eficaz y limpia. Esto las convierte en una alternativa interesante de generación de energía eléctrica en diversas aplicaciones. Estas aplicaciones se pueden dividir en tres grandes grupos: generación de potencia estacionaria, transporte y dispositivos electrónicos portátiles [1]. En particular, en los últimos años ha tomado cada vez más importancia el estudio de las pilas de combustible en vehículos propulsados con motor eléctrico. La principal ventaja de los vehículos con pilas de combustible frente a los de combustión interna radica en que la conversión de la energía es directa (sin combustión). Esto permite lograr una alta eficiencia de conversión y emisión de contaminantes prácticamente nula si se usa hidrógeno como combustible [2].

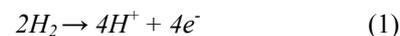
Para tener un sistema de generación eléctrico es necesario integrar la pila de combustible a otros componentes para formar un sistema de generación eléctrico. Para lograr una conversión de energía eficiente y mantener la vida útil de la pila, debe ser tenido en cuenta el sistema de generación completo, el cual está compuesto por cuatro subsistemas principales [3]: (i) suministro de combustible, (ii) suministro de aire, (iii) gestión del agua y (iv) gestión del calor. Otro subsistema importante es el encargado del acondicionamiento de la potencia eléctrica

generada. A estos subsistemas puede sumarse otro capaz de acumular energía dando lugar a sistemas híbridos de generación, los cuales permiten mejorar el funcionamiento global del sistema.

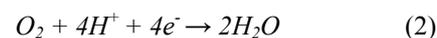
II. FUNCIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE

En las pilas de combustible de tipo PEM el electrolito está constituido por una membrana cuyo material constituyente es un polímero. Este tipo de membrana es un buen conductor de protones bajo determinadas condiciones al mismo tiempo que es aislante de electrones.

En una celda de combustible el hidrógeno fluye a través de los canales de alimentación del ánodo, se difunde a través de la capa de difusión del mismo y alcanza la capa catalizadora donde es oxidado liberando electrones y protones, según:



Los electrones liberados no pueden atravesar la membrana y son conducidos a través de la capa catalizadora del ánodo y arriban al cátodo vía el circuito externo, mientras que los protones son transportados a través de la membrana a la capa catalizadora del cátodo. Al mismo tiempo, oxígeno o aire es inyectado en los canales de alimentación del cátodo y se difunde a través de la capa de difusión del mismo hacia la capa catalizadora, donde reacciona con los protones y los electrones, generando agua según:



La reacción general que gobierna la celda de combustible alimentada con hidrógeno es:



El manejo del agua en la membrana es crítico para un funcionamiento eficiente de la pila. Un requerimiento de las pilas de tipo polimérico es mantener un alto contenido de agua en el electrolito para asegurar alta conductividad iónica [4]. La conductividad iónica del

electrolito es alta cuando la membrana está completamente saturada de agua, y así ofrece resistencia mínima al paso de iones, incrementándose la eficiencia de la celda especialmente con altas densidades de corriente [3].

El potencial estándar E^0 es una medida cuantitativa del máximo potencial producido por la celda como consecuencia de la reacción electroquímica. Para una celda de combustible hidrógeno-oxígeno, en la cual hay una transferencia de dos electrones por cada molécula de agua formada, resulta $E^0=1.229V$ [1]. El voltaje producido por la celda depende de la temperatura de la celda y de la presión parcial de los reactantes. Por lo tanto el voltaje a circuito abierto es menor que E^0 [5]. Además, cuando se conecta una carga a la celda, la eficiencia y el voltaje en los terminales decrecen debido a un número de factores, incluyendo efectos de polarización y caídas de potencial por efecto óhmico. Por lo tanto el voltaje obtenido es bastante menor a E^0 dependiendo del punto de operación de la celda. Este es el voltaje de una celda simple. En la práctica se conectan una sucesión de tales celdas en serie de manera de proveer el voltaje y potencia de salida necesarios, constituyendo una pila de combustible.

III. CONTROL DE PILAS DE COMBUSTIBLE

Distintos problemas de control deben resolverse para lograr una correcta operación del sistema. Los principales son: suministro adecuado de hidrógeno y aire, manejo del calor y del agua, acondicionamiento de la potencia generada y control del flujo de potencia entre subsistemas. Resolviendo de manera eficiente estas cuestiones se podrá realizar una conversión de energía con alta eficiencia, disminuyendo así el consumo de hidrógeno y evitando la disminución de la vida útil de la pila de combustible. Es necesario un estudio del control de los sistemas de generación híbridos basados en pilas de combustible con un enfoque global que tenga en cuenta el sistema completo y la interacción entre los distintos subsistemas que lo componen.

La respuesta temporal de la reacción electroquímica que tiene lugar en la pila de combustible es muy rápida. Sin embargo, la respuesta temporal de la potencia generada por una pila de combustible está limitada por el flujo de aire y de combustible, la regulación de la presión, la gestión del agua y el calor [3]. 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 y por lo tanto una reducción en la eficiencia [6], además de asegurar la vida útil de la pila. Estos parámetros críticos de la pila deben ser controlados para un amplio rango de potencias, con una serie de actuadores tales como válvulas, bombas,

compresores, expansores, ventiladores, humidificadores y condensadores [7].

A. Regulación de la potencia generada

Uno de los principales objetivos de control es regular la potencia de salida de la pila de combustible al nivel requerido. En vehículos, la carga variará fuertemente. Además, también es necesario regular la potencia generada porque hay un grado de incertidumbre en el comportamiento de los componentes de la pila debido a degradación de los materiales, variación de la temperatura externa y composición del combustible [8]. El sistema de control debe ser lo suficientemente robusto para satisfacer la demanda de la carga manipulando las entradas apropiadamente. Las variables de entrada al sistema incluyen: flujo, presión, temperatura y composición del combustible y del oxidante; flujo y temperatura del refrigerante y la corriente de carga.

B. Control del nivel de oxígeno en el cátodo

Uno de los más importantes problemas de control en pilas de combustible es garantizar el suficiente suministro de oxígeno en el cátodo ante cambios abruptos en la corriente demandada por la carga. Esto es difícil de lograr ya que el oxígeno reacciona instantáneamente con la corriente mientras que como se mencionó, el suministro de aire está limitado por la dinámica de los conductos de alimentación de gases y la dinámica propia del compresor de aire. Varias publicaciones abordan este problema [7, 9, 10, 11]. Cuando la corriente demandada a la pila aumenta rápidamente, el nivel de oxígeno presente en el cátodo baja drásticamente como resultado de la reacción electroquímica. Esto puede provocar daños a la membrana y disminución de la eficiencia. Este fenómeno se conoce en la literatura como “*oxygen starvation*”. Se define un parámetro indicador del exceso de oxígeno en el cátodo [9, 11, 12]:

$$\lambda_{O_2} = W_{O_2,in} / W_{O_2,rect} \quad (4)$$

donde $W_{O_2,in}$ es el flujo de oxígeno que ingresa al cátodo y $W_{O_2,rect}$ es el flujo de oxígeno que reacciona en el cátodo. La velocidad de reacción del oxígeno depende de la corriente demandada por la pila, I_{PC} :

$$W_{O_2,rect} = M_{O_2} n I_{PC} / 4F \quad (5)$$

donde n es el número de celdas de la pila de combustible y F es el número de Faraday ($F = 96485$ Coulombs) y M_{O_2} es la masa molar del oxígeno. Por lo tanto cuando la corriente demandada por la pila aumenta, el valor de λ_{O_2} disminuye instantáneamente. Para mantener el nivel de oxígeno, el controlador deberá suministrar más aire a la pila, aumentando el flujo $W_{O_2,in}$ mediante un aumento en el voltaje del compresor que inyecta el aire en el cátodo

de la pila. Es necesario implementar una estrategia de control que permita una rápida recuperación del nivel de oxígeno. En el presente trabajo se ha implementado un Control Predictivo Funcional (PFC) para controlar el suministro de aire en el cátodo.

El Control Predictivo Funcional es un método de control basado en modelo el cual hace uso de un modelo del proceso para obtener la acción de control que minimiza una función objetivo. El PFC fue propuesto por Richalet [13] para procesos rápidos en la ingeniería química y se caracteriza por dos aspectos distintivos: la estructuración de la señal de control como combinación lineal de unas funciones bases predeterminadas, y el concepto de puntos de coincidencia para evaluar la función costo a lo largo del horizonte de predicción.

Es necesario identificar el comportamiento del sistema frente a las entradas y a las perturbaciones. El modelo interno dinámico construido se utilizará como una representación del comportamiento real del sistema. En general se trata que el modelo sea lo más simple posible, de manera de poder simplificar el desarrollo del algoritmo de cálculo y disminuir el esfuerzo computacional. En este trabajo el modelo interno utilizado en el controlador se obtuvo linealizando el modelo dinámico no lineal establecido en [14], en el punto de operación estudiado. Se consideró a la tensión del compresor de aire como variable de control y a la cantidad de oxígeno en exceso, λ_{O_2} , como variable controlada. La corriente requerida a la pila de combustible por la carga fue considerada como una perturbación medible. El valor de consigna para la variable controlada fue elegido: $\lambda_{O_2} = 2$. Esta elección se fundamenta en los resultados expuestos en [9], donde se concluye que el valor óptimo de oxígeno en exceso es función de la corriente de pila. Para el punto de operación en el que se trabaja ($I_{PC} = 190A$)

En el método PFC se determina una trayectoria de referencia que apunta a cómo se desea que la variable controlada alcance el valor de consigna. Una manera de plantear la trayectoria es pensar que el error actual entre la consigna y la variable controlada decaerá exponencialmente. Este proceder resulta en una trayectoria de referencia de tipo exponencial que es caracterizable con un solo parámetro (la constante de tiempo).

Debido a que todo modelo es inexacto, es necesario algún tipo de compensación de la predicción para subsanar errores de identificación. Mediante la medición del error actual y de sus valores anteriores, se puede estimar la magnitud del error en instantes futuros. Algunas posibilidades consisten en hacerlo con una predicción plana (error constante), lineal o polinomial.

En el presente trabajo se optó por una estimación plana del error.

En la Fig. 1 se muestran los resultados obtenidos con Control Predictivo Funcional. El control del nivel de oxígeno en el cátodo fue conseguido satisfactoriamente con un tiempo de respuesta reducido y sin grandes excursiones de la variable controlada, λ_{O_2} , ante cambios abruptos en la corriente. Además, la potencia neta generada por la pila de combustible no sufre degradación y responde con un buen comportamiento transitorio. Esto fue logrado sin el uso de ninguna fuente de potencia auxiliar. En la sección correspondiente a sistemas híbridos se explicará en detalle el uso de acumuladores de energía, los cuales permiten mejorar la respuesta temporal de la potencia entregada por el sistema entre otros beneficios.

En el algoritmo de control se incluyeron restricciones en la variable manipulada. Estas restricciones representan limitaciones físicas en el motor del compresor. Así, el control fue logrado sin demasiado esfuerzo de control. El voltaje de compresor fue limitado entre un valor máximo y mínimo como así también fue limitada su máxima derivada para prevenir daños en el mismo.

A pesar de que el algoritmo PFC parece funcionar bien controlando la cantidad de oxígeno en exceso, los resultados sugieren que usando un modelo interno más preciso se podría mejorar la respuesta de la variable controlada ante cambios mayores en la perturbación.

C. Control del suministro de hidrógeno

El objetivo de control en el sistema de suministro de hidrógeno es mantener la pila de combustible alimentada con hidrógeno a la misma presión que el aire, independientemente del hidrógeno consumido, el cual es proporcional a la corriente eléctrica de la pila [3]. Es muy importante minimizar la diferencia de presión a través de la membrana a fin de evitar daños en la misma. Además, es conveniente un nivel de hidrógeno en exceso para mejorar la respuesta temporal de la demanda de potencia. Es usual recircular el hidrógeno remanente.

Cuando es usado hidrógeno presurizado, el flujo de hidrógeno en el ánodo puede ser regulado por una servoválvula. Dado que la válvula es rápida se asume que el flujo puede ser directamente controlado realimentando la diferencia de presión [6], con un controlador proporcional. Usualmente se instala una válvula de purga a la salida del ánodo para remover el exceso de agua. La válvula de purga puede ser usada también para reducir rápidamente la presión del ánodo si fuese necesario.

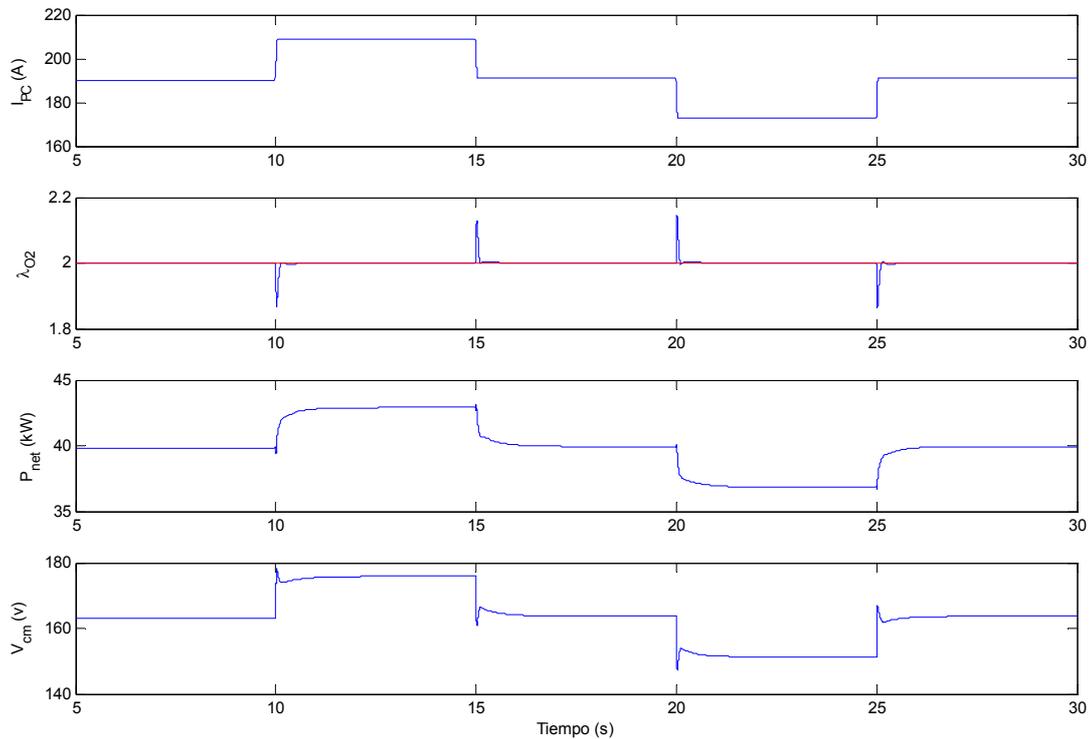


Fig. 1 Respuesta del controlador PFC ante pequeñas perturbaciones alrededor del punto de operación ($I_{PC}=190A$): (a) variable perturbación (corriente de pila), (b) consigna y variable controlada (cantidad de oxígeno en exceso), (c) potencia neta, (d) variable manipulada (tensión del motor del compresor)

D. Mejoramiento de la eficiencia de la pila de combustible

El funcionamiento óptimo en un punto de operación determinado de un sistema con pila de combustible produce importantes beneficios, incrementando la eficiencia del sistema (especialmente a bajas potencias) y permitiendo mayores picos de potencia. La principal vía de optimización de la eficiencia de una pila de combustible con hidrógeno directo involucra la interacción de la pila con el subsistema de suministro de aire [15]. Hay dos variables que tienen gran impacto en la curva de polarización: la presión del aire y la estequiometría del mismo (SRa). Estas dos variables en conjunto controlan la presión parcial del oxígeno en la capa catalizadora del cátodo, lo cual determina la polarización del mismo y por consiguiente su eficiencia de conversión energética. En [3] también se muestra la importancia del control de la presión del aire en el rendimiento de la pila. El proceso de optimización de la eficiencia para una corriente dada se basa en un compromiso entre el incremento de la potencia de la pila y de la eficiencia de la misma variando la presión y la estequiometría del aire y la potencia de pérdida requerida por el compresor de aire. En [15] se muestra

que un sistema de pila de combustible con hidrógeno directo puede ser optimizado para lograr altos picos de potencia y alta eficiencia sobre un amplio rango de potencia. La clave para lograr este objetivo es variar la presión y el flujo del aire suministrado a la pila según la carga. Así, incrementando la presión del aire o el flujo del mismo se incrementará la eficiencia y el pico de la densidad de energía de la pila. De este resultado se podría concluir que una pila alimentada con hidrógeno directo debería ser operada a la mayor presión y mayor SRa posible. Sin embargo el problema es la energía requerida para comprimir el aire. La demanda de potencia del compresor debe ser tenida en cuenta en el proceso de optimización. La potencia consumida aumenta abruptamente incrementado la presión, para un flujo dado. Esto significa que puede haber un punto de optimización a través de una combinación de presión y flujo de aire.

Como se verá en la sección correspondiente a sistemas híbridos, este tipo de configuración es otra vía importante para mejorar la eficiencia del sistema.

E. Controlabilidad del sistema

El aumento de la eficiencia del sistema es muy importante, pero también es importante mantener la

controlabilidad del mismo. En [16] se ha realizado un estudio analizando la eficiencia y la controlabilidad del sistema en dos puntos de operación para una potencia neta determinada: uno correspondiente a la corriente mínima necesaria para lograr la potencia estudiada y el otro punto con una corriente mayor. Se encontró un conflicto entre controlabilidad y eficiencia del sistema. El punto de operación correspondiente a corriente mínima tiene mayor eficiencia mientras que el punto con más corriente tiene mejor controlabilidad. Por lo tanto es posible obtener un balance entre eficiencia y controlabilidad.

IV. SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN CON PILAS DE COMBUSTIBLE

Numerosas publicaciones muestran la conveniencia de emplear configuraciones híbridas [2, 11, 17-26, 28-30, 33]. Tales configuraciones permiten aumentar la eficiencia del sistema disminuyendo el consumo de hidrógeno, como así también mejorar la respuesta transitoria ante cambios bruscos de carga. Un sistema de generación híbrido está compuesto por al menos una fuente de energía y un sistema de almacenamiento de energía. En el caso de sistemas con pilas de combustible, la fuente de energía es la propia pila y el sistema acumulador de energía podrá estar compuesto por baterías o por supercondensadores.

Los supercondensadores son una buena opción debido a diversas ventajas tales como su alta densidad de energía, larga vida útil, buena eficiencia de carga/descarga y alta velocidad de carga y descarga [22]. Los supercondensadores permiten también mayor número de ciclos de carga y descarga durante su vida útil. Al tener una gran velocidad de carga y descarga pueden proveer gran cantidad de potencia transitoria rápidamente, permitiendo así suplir rápidos aumentos de carga, tales como rápidas aceleraciones o pendientes abruptas en una aplicación en vehículos. La densidad de energía de estos dispositivos es de aproximadamente 3-5Wh/kg con una densidad de potencia de 300-500W/Kg para alta eficiencia (90-95%) de carga/descarga. Las proyecciones de futuros desarrollos indican que se podrán alcanzar densidades de energía de 10Wh/Kg o mayores con densidad de potencia de 1-2kW/Kg [31].

A. Ventajas y desventajas

Las ventajas potenciales de un sistema híbrido con pilas de combustible son varias:

- La energía almacenada puede suplir las demandas de energía transitorias, mejorando la respuesta transitoria del sistema y permitiendo disminuir el tamaño de la pila para suministrar

solo la potencia promedio. De esta manera se puede reducir el costo del sistema [24, 30].

- La posibilidad de recuperar energía del frenado en aplicaciones de transporte permite obtener ahorros de energía [24, 30].
- La hibridización crea grados adicionales de libertad en el flujo de potencia y ofrece oportunidades para la optimización de la eficiencia del sistema [30].
- Es necesario disponer de energía almacenada para el arranque.
- Permite reducir el tiempo de calentamiento de la pila de combustible [24].

Las desventajas de la hibridización son: incremento de peso, costo extra de los acumuladores y mayor complejidad del sistema de control [24]. En relación a este último punto, un número de aspectos deberán ser tenidos en cuenta [29]:

- Los acumuladores no deberán estar sobrecargados.
- Los acumuladores no deberán estar descargados por debajo de un valor que implique una disminución significativa de la eficiencia.
- Las corrientes de carga y descarga de los acumuladores no deben exceder ciertos límites para evitar sobrecarga de los circuitos de potencia o deterioro de los acumuladores.
- La corriente extraída de la pila de combustible no debe exceder el límite de operación establecido (aspecto importante durante el arranque y ante cambios rápidos de carga).

B. Estrategias de gestión de la energía en sistemas híbridos

El hecho de contar con energía almacenada adicional disponible permite implementar una estrategia de gestión de la energía [19, 20, 26, 27, 30]. Es decir que, para una determinada potencia de carga, P_{carga} , esta podrá ser suministrada con distintas potencias de pila, P_{pc} , siendo el resto de potencia suministrada por los acumuladores, P_{acum} , de manera que:

$$P_{carga} = P_{PC} + P_{acum} \quad (6)$$

Se define el grado de hibridación como:

$$Hibridización = (P_{max,carga} - P_{max,PC}) / P_{max,carga} \quad (7)$$

En la fig. 2 se muestra el diagrama de flujo de potencia de un sistema híbrido con pilas de combustible [27]. Esta tarea de gestión de la energía refuerza la idea de realizar un control integral del sistema de generación.

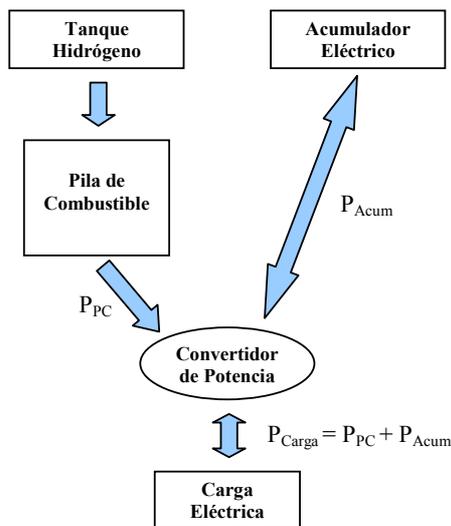


Fig. 2 Diagrama de flujo de potencia de un sistema de generación híbrido con pila de combustible

Un buen comportamiento transitorio del sistema ante variaciones de la carga es crucial para una correcta operación de la pila de combustible.

C. Configuraciones eléctricas híbridas

Otra importante cuestión dentro de la hibridación es la determinación de la configuración eléctrica más adecuada. En [2, 22, 28, 32] se realizan estudios sobre diferentes topologías y sus formas de control, mostrando sus ventajas y desventajas. Diversos métodos para conectar los dispositivos almacenadores de energía han sido considerados en [32]. Los acumuladores de energía pueden estar conectados directamente a la pila de combustible o pueden estar conectados a un bus de DC. Este bus está alimentado por la pila a través de un convertidor de potencia. La topología eléctrica empleada dependerá de varios factores.

El tipo de carga a alimentar influirá primordialmente. Si la carga es de alimentación continua o alterna dependerá si hay un inversor eléctrico antes de la misma. A su vez si es monofásica o trifásica determinará en parte el tipo de inversor a utilizar. El rango de valores de tensión de alimentación que admite la carga y el rango de tensión que provee la pila de combustible determinará si el convertidor que acopla la pila de combustible al bus de continua es elevador o reductor (en general será elevador ya que la tensión entregada es menor que la del bus de continua).

El rango de tensión admisible por los elementos almacenadores de energía determinará el tipo de convertidor de potencia utilizado para acoplar el bus de continua a dichos elementos. Si se recupera energía desde la carga determinará si este último convertidor es

de tipo bidireccional (en general será un convertidor tipo “Buck/Boost” bidireccional).

Con respecto al convertidor de potencia que conecta los almacenadores de energía con el bus de continua, se puede plantear la alternativa de no utilizarlo con el fin de evitar implementar un segundo convertidor. El primer inconveniente de no implementarlo es que la tensión de los almacenadores de energía deberá ser la misma que la del bus de continua, lo cual puede no ser realizable. Pero fundamentalmente este convertidor será útil para implementar la estrategia de gestión de la energía del sistema. Es decir, permitirá regular el flujo de energía desde y hacia los acumuladores de energía de la misma manera que el primer convertidor permitirá regular el flujo de potencia desde la pila de combustible hacia el resto del sistema, como se mostró en fig. 2. Este punto en principio justifica el uso del convertidor.

Con respecto al convertidor que conecta la pila de combustible al bus de continua también se podría pensar en evitar su implementación logrando que la pila entregue directamente la tensión que requiere la carga. Esto debería ser logrado por el controlador de la pila ya que la pila no es una fuente de tensión. Pero la pila puede ser operada de manera más eficiente si se permite variar el punto de operación según la potencia deseada. Es decir, en principio no conviene operar a tensión constante.

Teniendo en cuenta los factores mencionados se ha optado por implementar la siguiente topología eléctrica (Fig. 3). En ella se emplea un convertidor de potencia elevador (tipo Boost) para conectar la pila al bus de DC y un convertidor bidireccional (tipo Buck/Boost) que conecta el banco de supercapacitores al bus. Un inversor de voltaje es empleado para conectar a la carga alterna trifásica. Del bus de DC se conectan los sistemas auxiliares de la pila de combustible (e.g. el compresor de aire que alimenta el cátodo).

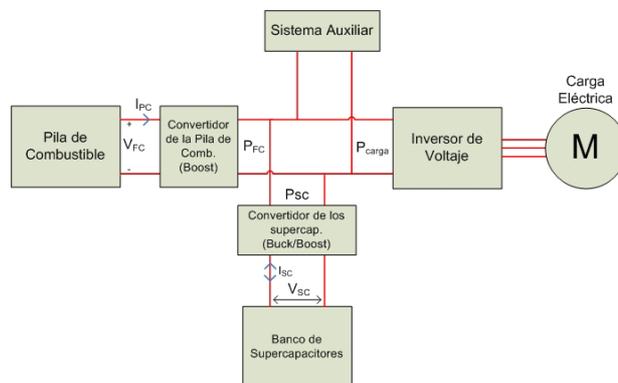


Fig. 3 Topología eléctrica adoptada

V. CONCLUSIONES

Se ha analizado el control de las pilas de combustible tipo PEM con el objetivo de lograr una respuesta dinámica adecuada, obtener un rendimiento óptimo (disminución del consumo de hidrógeno), lograr una vida útil de la pila de combustible aceptable y operar dentro de un entorno seguro. Se ha comenzado por resolver el control del suministro de aire que, como se ha mencionado es una de las tareas más importantes dentro del control de las pilas de combustible. Para ello se ha implementado un Control Predictivo Funcional, el cual ha funcionado bastante bien si bien requiere una mejora en el modelo interno empleado. Se está trabajando en la implementación otro controlador basado en modelo, un Controlador de Matriz Dinámica (DMC), que permita la implementación de un control multivariable de forma viable.

Por otra parte se han estudiado los sistemas híbridos con pilas de combustible. La operación con un sistema híbrido compuesto por pilas de combustible y supercapacitores permite aumentar la eficiencia del sistema global mediante dos mecanismos diferentes.

Por un lado permite recuperar energía regenerada del frenado en determinadas aplicaciones (e.g.: automóviles) y por otro lado permite realizar una gestión de la energía en la cual la pila de combustible es operada en su zona de máxima eficiencia. Además, el hecho de contar con energía acumulada y que pueda ser rápidamente entregada a la carga (como sucede en el caso de que los acumuladores empleados son supercapacitores), ayuda a resolver dos problemas importantes del control de pilas de combustible: (i) Mejorar la dinámica lenta de los sistemas con pilas de combustible, debida principalmente a la dinámica del compresor de aire y (ii) evitar el denominado fenómeno de "Oxygen Starvation" ante incrementos bruscos de la corriente demandada a la pila.

El proceso de diseño de sistemas híbridos (metodología) se puede desglosar en tres tareas fundamentales interrelacionadas entre sí: (i) determinación de la topología eléctrica o la configuración eléctrica empleada, (ii) determinación del grado de hibridización adecuado y (iii) establecimiento de la estrategia de gestión de la energía. Se ha trabajado en el primer punto determinándose una topología eléctrica adecuada.

REFERENCIAS

- [1] M. Laughton, "Fuel Cells", *Power Engineering Journal*, February, 2002, pp. 37-47
- [2] K. Rajashekara, "Propulsion System Strategies for Fuel Cell Vehicles", *Fuel Cell Technology for Vehicles*, 2000, pp. 179-187
- [3] W. Yang, B. Bates, N. Fletcher, R. Pow, "Control Challenges and Methodologies in Fuel Cell Vehicles Development", *Fuel Cell Technology for Vehicles*, 1998, pp. 249-256,
- [4] EG&G Technical Services, "Fuel Cell Handbook", 6th edition, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy & National Energy Technology Laboratory, 2002
- [5] J. Corrêa, F. Farret, L. Canha, M. Simoes, "An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, Vol. 51, No. 5,
- [6] J. Pukrushpan, H. Peng, A. Stefanopoulou, "Control-Oriented Modelling and Analysis for Automotive Fuel Cell systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2004, Vol. 126, pp. 14-25,
- [7] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng, "Control of Fuel Cell Breathing", *IEEE Control Systems Magazine*, April, 2004, pp. 30-46,
- [8] J. Golbert, D. Lewin, "Fuel Efficient Model Predictive Control of PEM Fuel Cells", in *Proceedings of the 16th IFAC World Congress in Prague, 2005*
- [9] M. Grujicic, K. Chittajallu, E. Law, J. Pukrushpan, "Model-based control strategies in the dynamic interaction of air supply and fuel cell", in *Proceedings of the Inst. Mech. Engrs. Vol. 218 Part A: Journal of Power and Energy*, 2004
- [10] M. Grujicic, K. Chittajallu, J. Pukrushpan, "Control of the transient behaviour of polymer electrolyte membrane fuel cell systems", in *Proceedings of the Inst. Mech. Engrs. Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering*, 2004
- [11] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, H. Peng, "Model Predictive Control for Prevention Starvation in a Hybrid Fuel Cell System", in *Proceedings of the American Control Conference. 2004, Vol. 1, pp. 834-839*
- [12] J. Pukrushpan, "Modelling and control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors", *PhD Thesis, University of Michigan*, 2003
- [13] J. Richalet, "Industrial applications of model based predictive control", *Automatica*, 1993, Volume 29, Issue 5, pp. 1251 - 1274
- [14] J. Pukrushpan, A. Stefanopoulou, H. Peng, "Modelling and control for PEM fuel Cell Stack System", in *Proceedings of the Control Conference, Anchorage, May 2002*
- [15] D. Friedman, R. Moore, "PEM Fuel Cell System Optimization", in *Proceedings of the Second International Symposium on Proton Conducting Membranes*, *The Electrochemical Society*, 1998, pp. 98-27
- [16] M. Serra, J. Aguado, X. Ansade, J. Riera, "Controllability analysis of decentralized linear controllers for polymeric fuel cells", *Article in press in the Journal of Power Sources, accepted February 2005*.
- [17] S. Akella, N. Sivashankar and S. Gopalswamy, "Model-Based Systems Analysis of a Hybrid Fuel Cell Vehicle Configuration", in *Proceedings of the American Control Conference, 2001*
- [18] P. Atwood, S. Gurski, and D. Nelson, "Degree of Hybridization Modeling of a Fuel Cell Hybrid Electric Sport Utility Vehicle", 2001, *Society of Automotive Engineers*
- [19] S. Caux, J. Lachaize, M. Fadel, P. Shott, L. Nicod, "Modelling and control of a fuel Cell system and storage elements in Transport applications", *Journal of Process control*, 2004, Vol. 15, pp. 481-491,
- [20] S. Caux, J. Lachaize, M. Fadel, P. Shott, L. Nicod, "Energy Management of Fuel Cell system and Supercaps Elements", *16th IFAC World Congress in Prague, 2005*
- [21] C. Chan, "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicle", in *Proceedings of the IEEE, 2002, Vol. 90, No. 2,*
- [22] A. Drolia, P. Jose, N. Mohan, "An Approach to Connect Ultracapacitor to Fuel Cell Powered Electric Vehicle and Emulating Fuel Cell Electrical Characteristics using Switched Mode Converter", *2003 IEEE*
- [23] D. Friedman, "Maximizing Direct-Hydrogen PEM Fuel Cell Vehicle Efficiency—Is Hybridization Necessary?", *Hydrogen and its future as Transportation Fuel*, 1999, pp. 265-272
- [24] K. Jeong, B. Oh, "Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle", *Journal of Power Sources*, 2002, Vol. 105, pp. 58-65

- [25] J. Jung, Y. Lee, J. Joo, H. Kim, "Power Control Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles", *Fuel Cell for Transportation 2003*, 2003, pp 201-205
- [26] R. Kotz, S. Müller, M. Bärtschi, B. Schnyder, P. Dietrich, F. Büchi, A. Takasuda, G. Scherer, O. Garcia, P. Barrade, V. Hermann, R. Gallay, "Supercapacitors for Peak-Power Demand in Fuel-Cell-Driven Cars", *Electrochemical Society Proceedings*, 2001, Vol. 21, pp. 564-575
- [27] G. Paganelli, Y. Guezennec and G. Rizzoni, "Optimizing Control Strategy for Hybrid Fuel Cell Vehicle", *SAE International Congress and Exposition*, 2002, pp. 71-79
- [28] K. Rajasheara, "Power Conversion and Control Strategies for Fuel Cell Vehicles", *Industrial Electronics Society, IECON'0*, 2003, the 29th annual conference of the IEEE, 2003, Vol. 3, pp. 2865-2870
- [29] P. Rodatz, O. Garcia, Lino Guzzella, F. Büchi, M. Bärtschi, A. Tsukada, P. Dietrich, R. Kötzt, G. Schreder and A. Wokaun, "Performance and Operational Characteristics of a Hybrid Vehicle Powered by Fuel Cells and supercapacitores", *Fuel Cell Power for transportation*, 2003, pp. 77-88
- [30] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitors-powered hybrid vehicle", *Control Engineering Practice*, 2004, Vol. 13, pp. 41-53,
- [31] A. Burke, "Ultracapacitors: Why, How and Where is the Technology", *Journal of Power sources*, 2000, Vol. 91, pp. 37-50
- [32] E. Santi, D. Franzoni, A. Monti, D. Patterson, N. Barry, "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply", in *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2002, Vol. 1, pp. 605-613