

CONVERTIDORES DE POTENCIA CON ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO PARA LA INTEGRACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE REDUCIDA POTENCIA

En este artículo se presenta la problemática de la integración de las Fuentes de Energía Renovable en los Sistemas de Energía Eléctrica, planteándose como solución la introducción de sistemas de almacenamiento de energía con una respuesta dinámica adecuada. De entre las posibilidades de almacenamiento energético expuestas, se opta por la utilización de los condensadores electroquímicos de doble capa, también conocidos como supercondensadores. Estos se eligen debido a que su respuesta dinámica ante la carga y la descarga es elevada. También se escoge una topología de convertidor de potencia para conectar el supercondensador al Sistema de Energía Eléctrica (incluida la fuente de energía renovable). Se expone el método para la determinación de la estrategia de control de los flujos energéticos en el sistema de almacenamiento. Y, finalmente, se muestran los resultados obtenidos a partir del prototipo de laboratorio realizado.

Alejandro Ramos Martín
Ignacio de la Nuez Pestana

This paper presents the problematic issues for making renewable power sources up in the power systems, setting out like a solution the use of energy storage systems with the adequate dynamic response. Among the different energy storage systems, it has been chosen the electrochemical double layer capacitors, also known as supercapacitors, due to their high dynamic response in charge-discharge cycle. It is exposed also the converter topology for connecting the supercapacitor to the power system (included the renewable power source). It is formulated the method in order to determinate the control strategy for the power flows of the energy storage system. Finally, it is displayed the results from a laboratory prototype of the system.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La conservación y el uso racional de los recursos plantean la necesidad de incorporar el factor ambiental en las políticas globales, así como la inmediata aplicación de programas e instrumentos de gestión energética y medioambiental.

La protección del medioambiente es una exigencia de la sociedad, reflejada en los acuerdos internacionales (Protocolo de Kyoto, etc.) para la reducción de emisiones y en las Directivas de la Unión Europea.

La sostenibilidad de los Sistemas de Energía Eléctrica, en el futuro, pasará por el uso a gran escala de las

Fuentes de Energía Renovable para la generación de energía. Algunas de estas fuentes, como por ejemplo la energía eólica y la solar, tienen un comportamiento estocástico. Esto último supone un obstáculo para la predicción de producción de energía, como consecuencia de la alta fluctuación de generación. Se necesitan distintos dispositivos para el almacenamiento de energía en distintas localizaciones en los Sistemas de Energía Eléctrica (SEE), para equilibrar los flujos de potencia entre las fuentes de energía renovable y los consumos. Además, también pueden utilizarse durante periodos de no generación o en periodos de reducida generación de energía.

La conservación y el uso racional de los recursos plantean la necesidad de incorporar el factor ambiental en las políticas globales, así como la inmediata aplicación de programas e instrumentos de gestión energética y medioambiental

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser utilizados por una o varias de las siguientes razones: mejorar la eficiencia de operación de un sistema, reducir la utilización de combustible primario o carecer de suficiente energía disponible, como fuente de energía de seguridad

EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Un sistema de almacenamiento de energía en un Sistema de Energía Eléctrica puede ser definido como cualquier instalación o método, sujeto a un control independiente, en el que se puede almacenar energía generada, y reutilizarla cuando sea necesario (Ter-Garzarian, 1994), (Ribeiro *et al.*, 2001).

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser utilizados por una o varias de las siguientes razones: mejorar la eficiencia de operación de un sistema, reducir la utilización de combustible primario o carecer de suficiente energía disponible, como fuente de energía de seguridad.

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Algunos de los sistemas de almacenamiento de energía, para sistemas de energía eléctrica, analizados ampliamente por varios autores (Ter-Garzarian, 1994), (Ribeiro *et al.*, 2001), (Korpaas *et al.*, 2003) y (Mierlo *et al.*, 2004), se pueden clasificar en:

- **Centrales de bombeo hidroeléctricas:** Este tipo de centrales de almacenamiento de energía es el único que ha tenido un uso bastante extendido en los sistemas de energía eléctrica. Estas plantas utilizan la energía excedente de los periodos valle del día (periodos de poca demanda), para bombear agua hacia depósitos elevados. Cuando la demanda de energía eléctrica es máxima el agua es turbinada para, de esta manera, generar energía eléctrica con un precio superior al del periodo valle de almacenamiento. La idea es sencilla: la energía es almacenada en forma de energía potencial mediante el bombeo del agua hasta el depósito superior desde un nivel inferior. Cuando se requiera la descarga de energía, el agua es devuelta

al depósito inferior a través de turbinas que generan energía eléctrica. Estas centrales de almacenamiento requieren una considerable superficie con la adecuada orografía, para los depósitos superior e inferior. En general, este tipo de centrales tiene una eficiencia de alrededor del 70% al 80%.

- **Centrales de almacenamiento de aire comprimido:** Este tipo de plantas utilizan el excedente de energía de los periodos valle del día, para comprimir aire en cavernas subterráneas o en sistemas superficiales de tuberías. La energía se recupera por medio del calentamiento del aire mediante la combustión de un combustible, produciendo trabajo tras su expansión en turbinas acopladas a generadores eléctricos. Estas plantas consumen una tercera parte de combustible que una convencional, por lo que contaminan un tercera parte también. La eficiencia de este tipo de plantas suele ser del 85% aproximadamente.
- **Baterías:** Los elementos de almacenamiento de energía más conocidos son las baterías. Los sistemas formados por baterías son modulares, silenciosos y pueden ser instalados muy cerca de los centros de consumo. La respuesta dinámica es uno de los puntos fuertes de esta tecnología; pueden responder a cambios en la carga en periodos de tiempo de pocos milisegundos. La eficiencia de las baterías está comprendida entre el 60% y el 80%.
- **Volantes de inercia:** Otro de los sistemas de almacenamiento de energía son los volantes de inercia. La energía es almacenada en forma de energía cinética. Donde la energía almacenada es proporcional a la velocidad de giro al cuadrado. La eficiencia de los volantes de inercia está comprendida entre el 80% y el 85%
- **Bobinas superconductoras:** Una opción para el futuro como medio

Los sistemas de energía eléctrica en los que intervienen fuentes renovables o limpias suelen estar formados por un conjunto de distintas fuentes de energía eléctrica, tales como generadores fotovoltaicos, aerogeneradores, pilas de combustible, etc.

- la capacidad y el coste instalado de los generadores distribuidos.
5. El resultado del almacenamiento de energía a gran escala puede tener un profundo efecto estratégico a escala industrial y permitiría un considerable aumento de sostenibilidad en la generación de energía.
 6. En diversos emplazamientos localizados en áreas rurales, lejos de grandes líneas de transporte de energía eléctrica, se podría aumentar la explotación de las energías renovables mediante el uso de distintos métodos de almacenamiento de energía. Sin tener que realizar un aumento considerable en la capacidad de las líneas existentes, medida no siempre deseada debido a inconvenientes técnicos y de impacto ambiental.

LOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGÍA

Dentro de los distintos tipos de sistemas de energía eléctrica se incluyen los sistemas híbridos de energía, que son aquellos en los que existen diferentes tipos de fuentes de energía como entrada, y un único tipo de energía de salida, la energía eléctrica (Holland *et al.*, 2002), (Gao *et al.*, 2005), (Mierlo *et al.*, 2005), (Furusawa *et al.*, 2004). Estos sistemas generalmente están formados por fuentes de energía de diferente potencia y energía específica. Por ejemplo, un sistema híbrido puede estar compuesto por una fuente con una gran densidad energética y por otra de una elevada densidad de potencia y respuesta dinámica (Catherino *et al.*, 2006), (Jiang *et al.*, 2006), (Lajnef *et al.*, 2007).

Los sistemas de energía eléctrica en los que intervienen fuentes renovables o limpias suelen estar formados por un conjunto de distintas fuentes de energía eléctrica, tales como generadores fotovoltaicos, aerogeneradores, pilas de combustible, etc. (Kaldellis *et al.*, 2007). Por definición estos sistemas son sistemas híbridos

de energía. En los que la fuente primaria de energía es renovable, normalmente es necesaria la utilización de otras fuentes auxiliares para complementar a la fuente primaria en los regímenes de trabajo en los que no puede aportar energía. Esto último puede ser debido al comportamiento estocástico, por cuestiones de insuficiente energía o potencia específica. En estos sistemas híbridos se utilizan sistemas de almacenamiento para mejorar la respuesta ante esos problemas que caracterizan a las fuentes primarias, tales como estaciones de bombeo, baterías, supercondensadores, etc.

Una variación brusca en la potencia demandada puede significar una variación en la tensión, lo que implica una disminución de la calidad de la energía eléctrica o en algunos casos el colapso del sistema.

Para evitar esto se puede realizar un sobredimensionamiento de la fuente primaria, para hacer frente a las fluctuaciones de potencia. El sobredimensionamiento supone un encarecimiento del sistema. Además, normalmente, una fuente de energía es diseñada para que funcione en un rango de funcionamiento nominal pequeño de máximo rendimiento, por lo que, ante bruscas fluctuaciones de potencia, no es una solución adecuada el sobredimensionamiento. Otra posibilidad para satisfacer una demanda variable es utilizar sistemas de almacenamiento auxiliares con la adecuada respuesta dinámica.

Varios autores han propuesto y presentado varios sistemas híbridos de energía en los que se utilizan diversas fuentes de energía y sistemas de almacenamiento. También existen varios trabajos en los que se muestra la utilización de supercondensadores como sistemas de almacenamiento en generación eólica, sistemas fotovoltaicos, gestión de la calidad de la energía eléctrica, sistemas con pilas de combustible, sistemas de aire comprimido, en aplicaciones de automoción y tracción, y otros trabajos.

Una variación brusca en la potencia demandada puede significar una variación en la tensión, lo que implica una disminución de la calidad de la energía eléctrica o en algunos casos el colapso del sistema

EL SUPERCONDENSADOR

Introducción

Los condensadores electroquímicos de doble capa fueron desarrollados y patentados por primera vez en 1961 por SOHIO (Standard oil company of Ohio). Los condensadores electroquímicos de doble capa son denominados supercondensadores, ultracondensadores o condensadores híbridos. Sus aplicaciones potenciales pueden ser fuentes de energía renovable, dispositivos portátiles electrónicos, calidad de la energía eléctrica, generación distribuida, vehículos híbridos de baja emisión, autobuses y camiones, etc.

Los supercondensadores son utilizados en aplicaciones en las que se requieren unas elevadas prestaciones en lo referente a la vida útil y los ciclos de trabajo (Conway, 1999), (Kötz *et al.*, 2002). Para este tipo de aplicaciones han sido diseñados los supercondensadores como alternativa a las baterías.

Los supercondensadores son dispositivos de almacenamiento adecuados para aplicaciones, en las que se requiera una elevada potencia y una elevada variación de esta. Generalmente cuando una batería no se utiliza, se produce una degradación de la misma; por el contrario, las propiedades de los supercondensadores no sufren alteraciones cuando no son utilizados por largos periodos de tiempo.

La principal desventaja de los supercondensadores es su reducida energía específica (Wh/kg) comparado con las baterías, limitando su uso para determinadas aplicaciones (Conway, 1999).

Los condensadores almacenan la energía por separación de la carga eléctrica (Conway, 1999), (Kötz *et al.*, 2002), (Burke, 2001). Los condensadores convencionales almacenan la energía en una capa delgada de ma-

terial dieléctrico, que está dispuesto entre unas placas metálicas que actúan como terminales del componente. La energía almacenada en el condensador se expresa en función de la tensión en los extremos de sus terminales.

La máxima tensión en el condensador depende de la característica del material dieléctrico.

El supercondensador es un componente para el almacenamiento de energía que tiene una estructura semejante a la de una batería. Tiene dos electrodos que están inmersos en un electrolito con un separador entre los electrodos.

Los electrodos son fabricados con una elevada superficie de material poroso con poros del orden de nanómetros. La superficie de los electrodos es mucho mayor que en el caso de los electrodos de las baterías siendo de 200 a 500 m²/g. La carga eléctrica es almacenada en los microporos o cerca del interfase entre el material sólido del electrodo y el electrolito.

Tipos de supercondensadores

Se puede diferenciar principalmente entre tres tipos de supercondensadores: de doble capa, con pseudo-capacidad e híbridos. A continuación se hace una breve descripción de los tres tipos.

Supercondensadores de doble capa

En los supercondensadores de doble capa la energía se almacena en forma de cargas separadas en el interfase entre el electrolito y los microporos de los electrodos. En la figura 1 se puede ver un detalle. Los iones que conforman la doble capa en los poros se transfieren entre los electrodos por difusión a través del electrolito. La capacidad depende principalmente de las características del material del electrodo (superficie, tamaño de poro, distribución...).

Los condensadores electroquímicos de doble capa fueron desarrollados y patentados por primera vez en 1961 por SOHIO

El circuito de potencia está compuesto por: los interruptores de potencia (figura 3), los elementos pasivos, el módulo del supercondensador (figura 4) y el circuito para producir la perturbación.

La tarea de los sensores (figura 5) consiste en tomar los valores de tensión y corriente en el circuito de potencia, y transformarlos en señales aptas para ser convertidas por el sistema de control.

Los circuitos de adaptación son los encargados de transformar el nivel de tensión de las señales de control que proporciona el controlador de señales digitales en un nivel apto para accionar los interruptores de potencia.

El sistema de control está compuesto por un controlador de señales digitales (figura 6) y por el programa de control. El controlador de señales digitales actúa como el director y co-

Los circuitos de adaptación son los encargados de transformar el nivel de tensión de las señales de control que proporciona el controlador de señales digitales en un nivel apto para accionar los interruptores de potencia



Figura 4. Módulo de supercondensadores

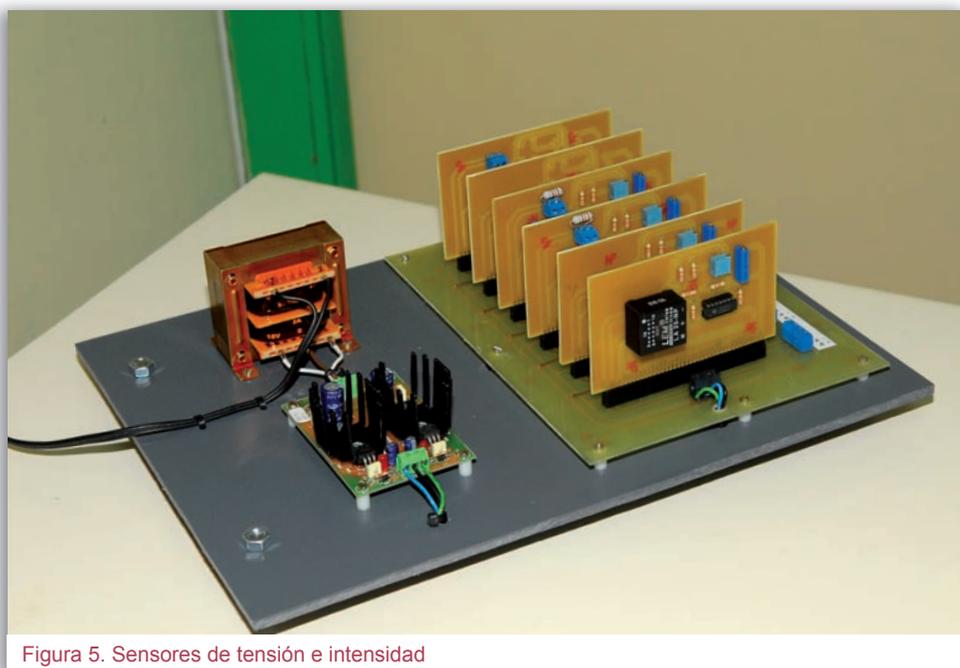


Figura 5. Sensores de tensión e intensidad

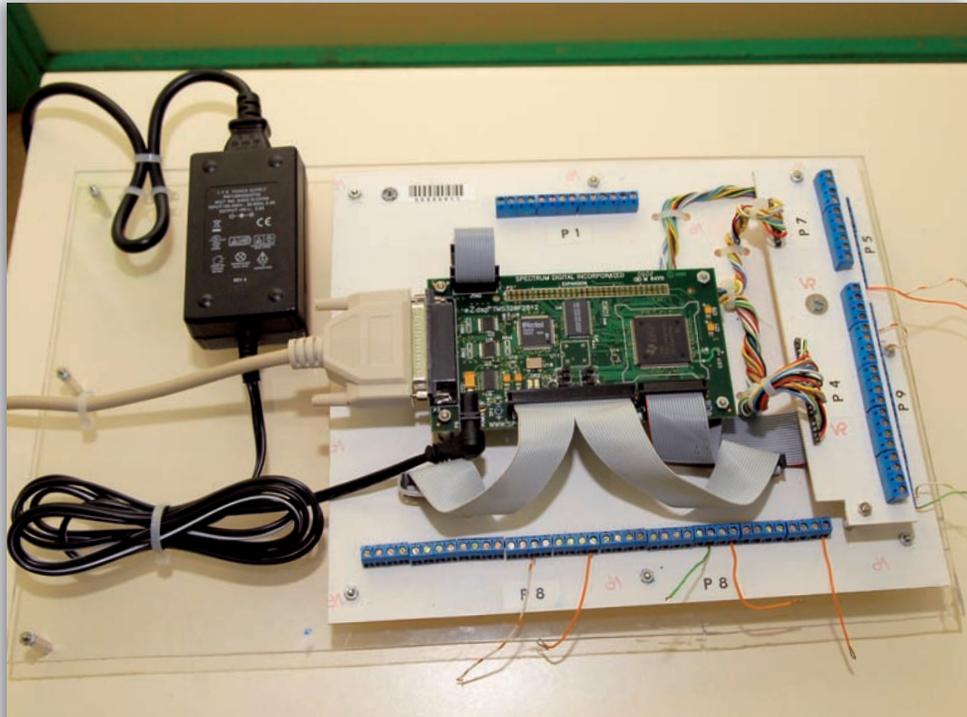


Figura 6. Sistema de control

ordinador de todos los circuitos integrantes del convertidor. Es el encargado de leer los datos, realizar los cálculos, enviar la salida al sistema y comprobar que todo se desarrolla dentro de los cauces previstos.

RESULTADOS

A partir del prototipo expuesto se han realizado distintos tipos de ensayos, de los que se muestran dos en este artículo. El primero de ellos

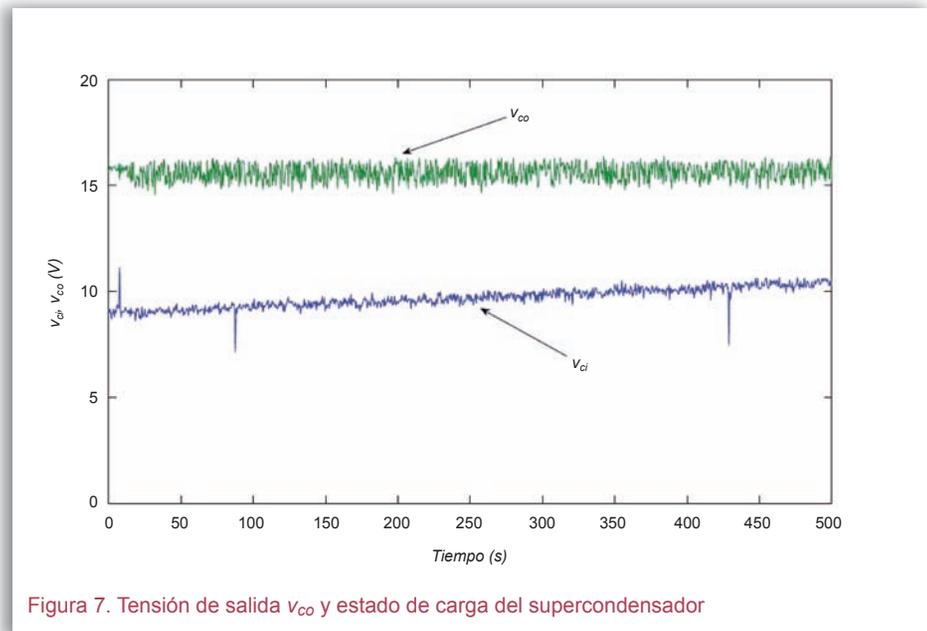


Figura 7. Tensión de salida v_{co} y estado de carga del supercondensador

Hart, D.W. (1997): *Electrónica de potencia*. Prentice-Hall, 1 edición.

Holland, C.E., Weidner, J.W., Dougal, R.A. y White, R.E. (2002): Experimental characterization of hybrid power systems under pulse current loads. *Journal of Power Sources*, 109: 32-37.

Jiang, Z. y Dougal, R.A. (2004): Synergetic control of power converter for pulse current charging of advanced batteries from a fuel cell power source. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4): 1140-1150.

Kaldellis, J.K. y Zafirakis, D. (2007): Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency. *Energy*, 32: 2295-2305.

Korpaas, M., Hildrum, R. y Holen, A.T. (2003): Optimal operation of hydrogen storage for energy sources with stochastic input. *Proceedings of the IEEE*. IEEE.

Kötz, R. y Carlen, M. (2002): Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, 53: 2483-2498.

Lajnef, W., Vinassa, J.M., Briat, O., Azzopardi, S. y Woïrgard, E. (2007): Characterization methods and modeling of ultracapacitors for use as peak power sources. *Journal of Power Sources*, 168: 553-560.

Martínez, S. y Gualda, J.A. (2006): *Electrónica de potencia componentes, topologías y equipos*. Thomson, 1ª edición.

Mierlo, J., Bossche, P., y Maggetto, G. (2004). Models of energy sources for ev and hev: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engi-

nes-generators. *Journal of power sources*, 128:76-89.

Mohan, N., Undeland, T.M. y Robbins, W.P. (2003): *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 3ª edición.

Orecchini, F. (2006): The era of energy vectors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31: 1951-1954.

Rashid, M.H. (2004): *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson. Educación, 3 edition.

Ribeiro, P.F., Johnson, B.K., Crow, M.L., Arsoy, A. y Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, pages 1744-1756. IEEE.

Schainker, R.B. (2004): Executive overview: energy storage options for a sustainable energy future. In *Power Engineering Society General Meeting*, pages 2309-2314. IEEE.

Ter-Gazarian, A. (1994): *Energy storage for power system*. IEE Energy Series 6, 1 edición.

BIOGRAFÍAS

ALEJANDRO RAMOS MARTÍN

Ingeniero Industrial, Profesor Ayudante Doctor adscrito al Área de Máquinas y Motores Térmicos del Departamento de Ingeniería de Procesos de la ULPGC.
Email: aramos@dip.ulpgc.es

IGNACIO DE LA NUEZ PESTANA

Ingeniero Industrial, Titular de Universidad adscrito al Área de Sistemas y Automática del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática de la ULPGC.
Email: inuez@diea.ulpgc.es

Patrocinador de esta investigación:

UNELCO ENDESA S.A.