Supercondensadores: estado del arte, aplicaciones y retos para el futuro

Super capacitors: state of the art, applications and challenges for the future

Marcos Lafoz-Pastor y Gustavo Navarro-Soriano
CIEMAT (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9706

De los condensadores convencionales a los supercondensadores

Desde sus primeros desarrollos en 1957, los supercondensadores (*supercapacitors* en inglés) son una tecnología de almacenamiento de energía que ha acelerado su desarrollo y utilización en los últimos 20 años, sobre todo en los campos del transporte y de la gestión de las redes eléctricas. Son dispositivos especialmente adecuados para aplicaciones de alta potencia, aunque su capacidad energética relativamente baja [1]. Además de un mejor coste en términos de potencia, una eficiencia del ciclo completo en torno al 95%, posibilidad de un alto número de ciclos de carga-descarga (los fabricantes hablan de hasta un millón) y una vida útil de 20-25 años, los supercondensadores presentan un rango de temperatura de operación entre -40ºC y 65ºC, bastante más amplio que el de las baterías.

La energía que es capaz de almacenar un condensador de cualquier tipo es dependiente de su capacidad y de la tensión o voltaje en el mismo. A su vez, la capacidad C es un parámetro constructivo relacionado con la carga eléctrica que es capaz de almacenar el dispositivo y que depende de aspectos constructivos como la permeabilidad del dieléctrico, el área de las placas metálicas y la distancia entre ellas. Por otro lado, la tensión dependerá de las condiciones de aislamiento dieléctrico que se pueda soportar entre los dos electrodos que lo componen. La energía almacenada en cualquier condensador viene dada por la ecuación (1):

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \qquad (1)$$

donde:

U(V): Tensión eléctrica

C (F): Capacidad

Los condensadores se pueden clasificar en: electrostáticos de película, electrolíticos y electroquímicos, conocidos los últimos también como ultracondensadores. Esta clasificación y las características de todos ellos se muestran en la tabla de la Figura.

	Tensión Nominal (V)	Capacidad (F/dm³)	Energía (KJ/dm³)
Condensadores Electrostáticos de Película	880	0.7-0.9	0.27-0.35
Condensadores Electroslíticos	450	5-7.5	0.5-0.75
Condensadores Electrosquímicos/Ultracondensadores	2.8/3.0	5000-7500	19-30

Figura 1. Propiedades de condensadores y ultracondenosadores de alta potencia

Este artículo trata más en concreto los condensadores electroquímicos, conocidos de forma genérica como ultracondensadores, que son los más empleados como sistema de almacenamiento de energía. La particularidad de los ultracondensadores frente a otro tipo de condensadores es su densidad de capacidad (F/dm³) y densidad energética (kJ/dm³), bastante mayor que la de otro tipo de condensadores [2]. El término ultracondensador engloba todos los tipos de condensadores electroquímicos existentes, cuya clasificación [5] se muestra en la Figura 1.

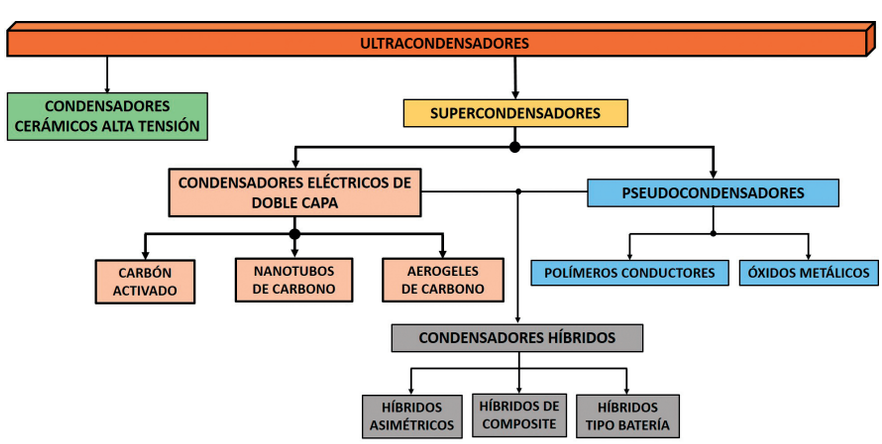


Figura 1. Esquema de la clasificación de los ultracondensadores

Dentro de los ultracondensadores se distinguen dos tipos principales: condensadores cerámicos de alta tensión y supercondensadores [3]. Los condensadores cerámicos de alta tensión son grandes conocidos desde hace tiempo en el mundo de la alta tensión, pero debido a su baja energía específica no han sido muy empleados en aplicaciones industriales de almacenamiento de energía. Los condensadores eléctricos de doble capa (EDLC) [4] son condensadores electroquímicos compuestos de dos electrodos porosos conductores inmersos en un electrolito, entre los que se coloca un separador. Cada electrodo presenta una cierta capacidad con una capa de iones presente en el electrolito, como se ve en la Figura 3. Los pseudocondensadores tienen mayor energía específica que los EDLC pero bastante menor potencia específica. Por último, una combinación entre un EDLC y un pseudocondensador es denominada condensador híbrido. Esta combinación resulta interesante porque permite alcanzar a la vez valores moderados de potencia y energía específica. Sin embargo, aún no están en un nivel de desarrollo suficientemente maduro para que sean competitivos a nivel comercial.

Dentro de los supercondensadores, este artículo se centra en los EDLC que, por sus características de densidad y potencia

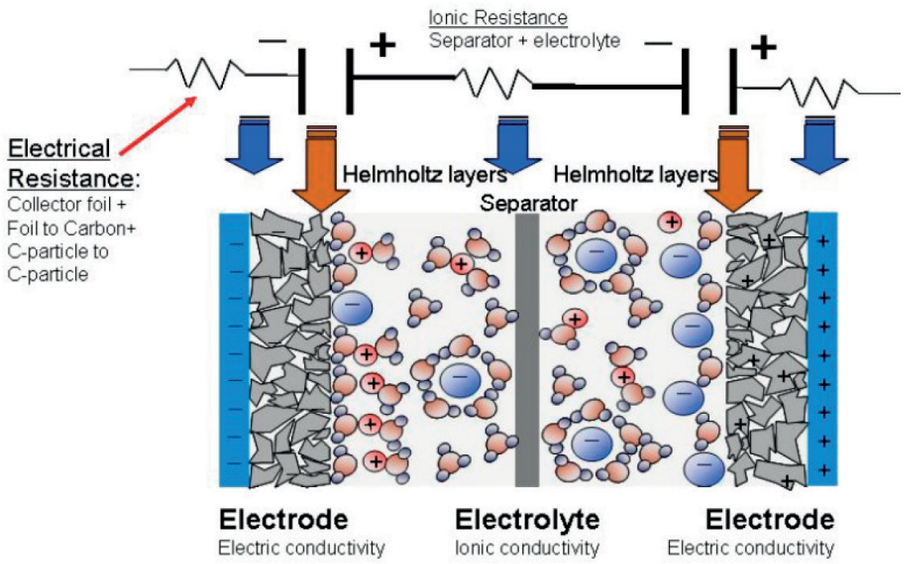


Figura 2. Sección simplificada de una celda de condensador eléctrico de doble capa. Source Maxwell Technologies

específica, son los más empleados como sistemas de almacenamiento de energía en aplicaciones industriales. Aunque el término supercondensador engloba a los pseudocondensadores y a los EDLC, normalmente se emplea para referirse a los segundos.

Los condensadores eléctricos de doble capa (EDLC): Características

Teniendo en cuenta que para incrementar la capacidad es necesario maximizar la superficie del área de los electrodos, los EDLC emplean un material especial de elevada superficie específica. Normalmente se emplea carbono activado, nanotubos de carbono o aerosoles de carbono que tienen una estructura porosa y permiten incrementar la superficie de contacto sin aumentar el volumen del condensador.

Los condensadores eléctricos de doble capa o EDLC están construidos por: dos electrodos, el electrolito y un separador. Los electrodos están basados en una lámina, normalmente de aluminio, cubierta por carbono activo o nanotubos de carbono. El electrolito es el elemento clave para determinar la resistencia interna o ESR. Se suelen utilizar soluciones no acuosas, como acetonitrilo o carbonato de propileno, porque soportan mayor tensión. El separador debe permitir la circulación de iones pero evitar el contacto entre los dos electrodos.

Los EDLC, al igual que los condensadores convencionales, almacenan carga electrostáticamente y no hay transferencia de carga entre el electrodo y el electrolito. Los EDLC utilizan doble capa electroquímica para almacenar energía. Cuando es aplicada una tensión entre los electrodos la carga se acumula en la superficie de los mismos. Siguiendo la repulsión natural de las cargas opuestas, los iones en la solución del electrolito se extienden a través del separador hacia los poros del electrodo de carga opuesta. Estas capas dobles, junto con un incremento del área de superficie y una reducción en la distancia entre electrodos, permiten a los EDLC alcanzar densidades de energía mucho mayores que las de los condensadores convencionales [5].

Debido a que no hay transferencia de carga entre electrolito y electrodo no hay cambios en la composición química. Por esta razón, el almacenamiento de carga en los EDLC es reversible y no lleva asociada una pérdida de capacidad importante con el número de ciclos de carga y descarga, cosa que no ocurre en las baterías electroquímicas.

Para evaluar la respuesta dinámica y eficiencia en un supercondensador se suele emplear un circuito eléctrico equivalente que modela su comportamiento. Este circuito y los elementos que lo forman se muestran en la Figura 3. El condensador (C_0) representa el elemento en el que se almacena la energía. La resistencia en serie, conocida como resistencia en serie equivalente (ESR), modela la potencia de pérdidas del supercondensador y representa el conjunto de las resistencias de los colectores, los electrodos porosos, el separador y el electrolito. Por último, una resistencia en paralelo (R_{SELF}) modela la autodescarga del supercondensador. La autodescarga en cualquier sistema de almacenamiento es la cantidad de energía que se pierde cuando el sistema no está en operación.

A diferencia de las baterías, donde la tensión que presentan suele tener un nivel relativamente constante en función del estado de carga, en los supercondensadores la tensión es prácticamente lineal con el estado de carga. Por esta razón, la integración de supercondensadores en las aplicaciones se suele realizar a través de convertidores electrónicos de potencia continua-continua o DC/DC. Además, esta característica hace que los supercondensadores no se puedan descargar totalmente, ya que supondría trabajar a tensión demasiado baja como para que el convertidor DC/DC funcionara correctamente. Por esta razón, es común definir una descarga de los supercondensadores hasta la mitad de su tensión máxima, lo cual supone utilizar ¾ partes de su energía teórica, según se puede demostrar en la ecuación (2).

$$E_{útil} = \frac{1}{2}\cdot C\cdot\left(U_{max}^2 - U_{min}^2\right) = \frac{1}{2}\cdot C\cdot\left(U_{max}^2 - \left(\frac{U_{max}}{2}\right)^2\right) = \frac{1}{2}\cdot C\cdot U_{max}^2\cdot\frac{3}{4} \qquad (2)$$

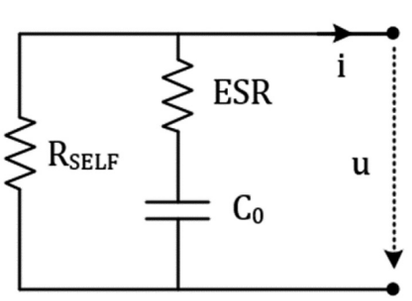


Figura 3. Modelo eléctrico de un supercondensador

Aplicaciones y mercado actual de los supercondensadores

Dadas sus características concretas, los supercondensadores se suelen utilizar en aplicaciones donde las necesidades de potencia son altas, se requiere un gran número de ciclos de carga y descarga y las necesidades de energía no son especialmente relevantes. En concreto, la aplicación por excelencia es el transporte, en concreto autobuses híbridos y tracción ferroviaria. El mayor mercado para los supercondensadores actualmente es

FABRICANTE	TECNOLOGÍA	CAPACIDAD	TENSIÓN
MAXWELL	CARBONO ACTIVADO	3400F	3V
SKELETON	CARBONO ACTIVADO	3200F	2.85V
IOXUS	-	3150F	2.85V
LS MTRON	CARBONO ACTIVADO	3000F	3V
EATON	CARBONO ACTIVADO	3400F	2.85V
KAMCAP	-	3000F	2.7V
VINA TECH	CARBONO ACTIVADO	3000F	2.7V
YUNASKO	CARBONO ACTIVADO	3000F	2.7V
BATSCAP	CARBONO ACTIVADO	3000F	2.7V

Tabla 1. Tabla de fabricantes de supercondensadores

el de los autobuses híbridos. En esta aplicación se utilizan en combinación con baterías, alargando la vida útil de las mismas y reduciendo el tamaño y el peso del sistema de almacenamiento, algo esencial en aplicaciones móviles. También se está utilizando en algunos autobuses en China como fuente de energía única, realizando una recarga durante 1 o 2 minutos en cada parada, aunque esta opción de utilización reduce bastante las prestaciones del autobús. En tracción ferroviaria, tanto en trenes ligeros como en tranvías, se utilizan bien para captura de energía durante el frenado regenerativo y posterior utilización en la aceleración, o bien para permitir la circulación en zonas sin catenaria, simplificando con ello los trazados de alimentación eléctrica.

Recientemente, y dada la transición hacia nuevos modelos de redes eléctricas con mayor penetración de energías renovables, se están aprovechando las interesantes características de los supercondensadores para aplicaciones relacionadas con la gestión de la red eléctrica, tales como: estabilidad en las líneas de transmisión, regulación de frecuencia, compensación de oscilaciones de potencia en generación renovable con intermitencia, e incluso combinando este sistema de almacenamiento rápido y centrado en potencia con otros tipos de almacenamiento con respuesta más lenta y centrado en energía, como pueden ser el hidrobombeo, el almacenamiento térmico o el hidrógeno (células de combustible).

Por último, los supercondensadores se están utilizando en muchas otras aplicaciones industriales como: UPS para aporte de potencia a centros de datos ante fallos de suministro, eficiencia energética en grúas y elevadores, aporte de picos de potencia a maquinaria pesada o suministro de potencia para el control de paso de palas en aerogeneradores.

Existen bastantes fabricantes que comercializan supercondensadores. En la siguiente tabla se muestran los más significativos, así como las características de capacidad y tensión máxima de sus productos [6].

El coste actual estimado para EDLC está en el entorno de 300 €/kW, habiendo una estimación de reducción de coste para 2030 a 200€/kW y 50€/kW para 2050 [7]. En relación con el coste, es importante destacar que al ser una tecnología destinada principalmente a potencia, resulta conveniente, y así se va a encontrar en las referencias, hablar en términos de €/kW. Sin embargo, se habrá podido comprobar que cuando se trata de baterías se suele hablar de coste en términos de energía (€/kWh), ya que resulta más conveniente hacerlo de esta manera desde un punto de vista económico. Es una razón más para demostrar que mientras las baterías suelen utilizarse en aplicaciones de energía, los supercondensadores suelen destinarse a aplicaciones de alta potencia y tiempos de actuación cortos, es decir, baja energía.

Retos tecnológicos para el futuro

Los principales desarrollos de investigación en supercondensadores van encaminados a aumentar la densidad de energía y reducir la resistencia interna, con el objetivo de aumentar la eficiencia, así como en aumentar las tensiones de aislamiento para favorecer su aplicación en alta tensión. Esto está relacionado principalmente con el desarrollo de materiales de altas prestaciones en los electrodos y en el electrolito.

En concreto, los objetivos de esta tecnología establecidos por el European SET-Plan 2030 y 2050 [8] son: encontrar electrolitos rentables capaces de soportar tensiones de aislamiento por encima de 3.0V y con menor nivel de toxicidad; incrementar la capacidad de los electrodos aumentando la superficie y adecuando la forma y tamaño del poro a las condiciones de trabajo; y desarrollar sistemas híbridos basados en el acoplamiento de baterías de Li-ion y supercondensadores.

A modo de conclusión, se ha visto como los supercondensadores presentan una serie de características que resultan muy interesantes para ciertas aplicaciones, ya sea de forma independiente o combinada con otros sistemas de almacenamiento. Esto lleva a la reflexión de que la mejor tecnología de almacenamiento de energía no existe en sí misma, sino que está muy ligada a la aplicación. Incluso a veces no es una única tecnología sino una combinación de varias. Esto exige analizar lo más concretamente posible el problema que se quiere resolver con almacenamiento de energía para encontrar la solución tecnológica óptima.

REFERENCIAS

[1] A. K. Shukla, A. Banerjee, M. K. Ravikumar, and A. Jalajakshi, "Electrochemical capacitors: Technical challenges and prognosis for future markets," Electrochim. Acta, vol. 84, pp. 165–173, Dec. 2012.
[2] B. E. Conway, Electrochemical Supercapacitors : Scientific Fundamentals and Technological Applications. Springer US, 1999.
[3] A. Yu, V. Chabot, and J. Zhang, Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery : Fundamentals and Applications.
[4] K. Kim, S. Sy, A. Yu, and J. Zhang, "Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion," in Handbook of Clean Energy Systems, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 1–25.
[5] Petar Grbović, "Ultra-Capacitor Energy Storage Devices," in Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems, John Wiley & Sons, Ltd, 2013, pp. 22–77.
[6] "Top Capacitor Manufacturers and Suppliers (USA and International)." [Online]. Available: https://www.thomasnet.com/articles/top-suppliers/capacitor-manufacturers-suppliers/. [Accessed: 06-Feb-2020].
[7] Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. July 2019. U.S Department of Energy. PNNL-28866.
[8] European energy storage technology development roadmap. EASE-EERA. 2018. https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE-EERA-Storage-Technology-Development-Roadmap-2017-HR.pdf