

ESTIMACIÓN DE LOS ESTADOS DE CARGA Y DE SALUD EN SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN SUPERCAPACITORES Y BATERÍAS DE LITIO

Fornaro Pedro O., Battaiotto Pedro E., Puleston Paul F.

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales LEICI – UNLP- CONICET. 48 y 116 s/n, La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina. e-mail:

pedro.fornaro@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo, enmarcado en la línea de investigación de módulos de almacenamiento de energía no convencionales (MANC), se presentan avances en el diseño de un estimador para los Estados de Carga (EC) y Salud (ES) en un sistema híbrido de almacenamiento de energía conformado por baterías de Ión-Litio (BL) y Supercapacitores (SC). El mismo está basado en técnicas por modos deslizantes (MD), y en particular el trabajo desarrollado se encuentra enfocado en el campo de aplicación de los vehículos eléctricos.

Hoy en día, numerosos estudios han demostrado la limitación práctica que poseen las energías renovables en cuanto al almacenamiento de energía. Esto último resalta la importancia de los MANC, en un marco de creciente utilización de sistemas híbridos tanto a pequeña como a gran escala, sobre todo debido a su capacidad de manejar grandes niveles de potencia. En particular, la versatilidad de los SC y BL para poder funcionar como módulos de almacenamiento o *buffers* en un mismo sistema y su excelente performance en términos de eficiencia, vida útil y densidad de potencia, los convierte en elementos de sumo interés para la comunidad científico-tecnológica en el desarrollo de vehículos eléctricos y sistemas híbridos de energía renovables [1][2].

Actualmente, los SC son foco de interés principalmente debido a su gran densidad de potencia [3]. Sin embargo, como principal desventaja, estos dispositivos no poseen grandes niveles de densidad de energía. Por esto, es necesario utilizarlos junto con otras fuentes de almacenamiento, como BL [4]. Son múltiples los desafíos que se enfrentan para poder emplear SC o BL en un sistema. Para empezar, debido a las bajas tensiones nominales, tanto de las BL como de los SC, es necesario un agrupamiento en serie o serie-paralelo de celdas elementales, principalmente para elevar la tensión de trabajo a valores prácticos.

Prosiguiendo, para conservar la vida útil de estos arreglos, es necesario incorporar sistemas de balanceo, regulación, medición y protección, que se encarguen de mantener las tensiones, corrientes y temperaturas de los módulos dentro de un rango seguro de operación. En las BL, estos sistemas son conocidos como BMS (Battery management system). En algunos casos, los mismos se encargan además de proveer medidas confiables de los Estados de Carga (EC) y Salud (ES), los cuales cuantifican la energía disponible y el grado de deterioro respectivamente. Estos estados son igualmente empleados en BL como en SC.

Tanto el EC como el ES pueden ser obtenidos indirectamente mediante la estimación de las capacidades y resistencias de modelos eléctricos equivalentes. Es por esto que, tanto el modelado como la identificación de estos sistemas de energía es de suma importancia para lograr una adecuada regulación y control al integrar estos módulos en sistemas de mayor energía. Así es que adquiere una gran relevancia incorporar técnicas de observación y estimación, con el objetivo de extraer información de los parámetros característicos de cada sistema de almacenamiento.

2. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Como ha sido brevemente mencionado, el problema es cómo obtener medidas confiables tanto del EC como del ES de los sistemas de almacenamiento. Esto puede hacerse a partir

de estimaciones de las resistencias y capacidades de modelos de circuitos eléctricos equivalentes (MCE). A su vez, una adecuada caracterización tanto de los SC como de las BL permitiría expandir el área de operación segura de estos sistemas. Normalmente esta región de operación queda definida por los datos de corrientes y tensiones máximas indicadas por los fabricantes. Sin embargo, al contar con una adecuada caracterización de los módulos de almacenamiento es posible modificar las definiciones convencionales utilizadas para aumentar el aprovechamiento energético, preservando al mismo tiempo la vida útil de estos dispositivos. Antes de pasar a la definición formal de las variables deseadas, se hace una breve presentación del sistema bajo estudio.

2.1. sistema híbrido de almacenamiento basado en SC y BL

En la figura 1 puede observarse un esquema de la topología estudiada en este trabajo. Esta posee dos módulos de almacenamiento, conectados de forma independiente y a través de dos convertidores a un bus de tensión continua.

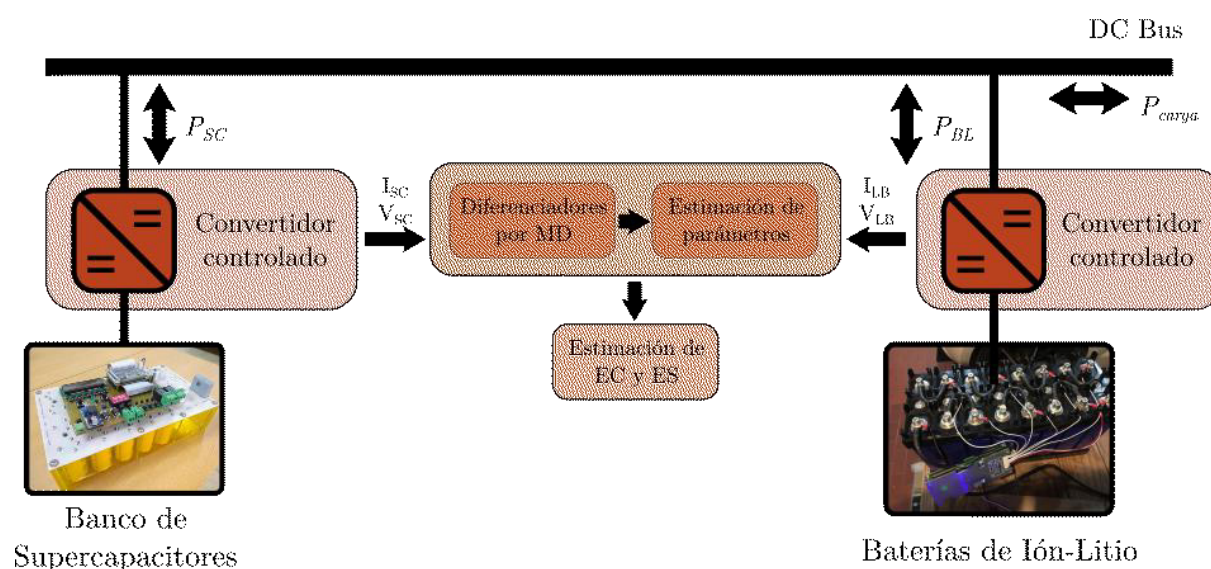


Figura 1. Sistema híbrido para vehículos eléctricos bajo estudio.

El banco de SC fue íntegramente diseñado en el Instituto LEICI de la FI, UNLP-CONICET. Se utilizaron SC de doble capa electrostática y el mismo posee una capacidad nominal de 80 [F] y una tensión nominal de funcionamiento de 27 [V]. Este valor de tensión se consiguió a partir de colocar en serie 10 SC EATON *Powerstore XV Series* de 400 [F] y 2.7 [V] nominales. En cuanto a las BL, se dispone de un banco de 48 [V] construido con 16 celdas de baterías de tipo LiFePO_4 en serie de 50Ah, y reguladas con dos BMS industriales JBD 8S con protección por sobrecarga.

Cada sistema se encuentra regulado de forma independiente y cumpliendo con distintas estrategias de control. El objetivo de las BL es principalmente el de satisfacer la demanda de corriente correspondiente a la potencia media demandada por el bus de continua. Esto se encuentra regulado por un convertidor DC/DC controlado por corriente. No está de más aclarar que este diseño puede aportar versatilidad a la topología en cuestión, dado que el valor de la referencia de corriente podría ser provisto por algún algoritmo supervisor, cumpliendo distintas estrategias de control y/o supervisión.

Complementariamente, los SC son los encargados de lidiar con las variaciones abruptas de corriente en el bus, mediante el empleo de un control que a través de un convertidor DC/DC independiente, mantiene regulada en un valor constante la tensión de continua del bus. Es

importante destacar que, si las corrientes de alta frecuencia fueran entregadas por la BL, esto podría causar serios perjuicios y deterioro en las celdas.

2.2. Parámetros de interés en los sistemas de almacenamiento

Como ya fue brevemente mencionado, el Estado de Carga y el Estado de Salud son parámetros fundamentales para regular el comportamiento de los MANC durante la operación de los mismos. Mediante la técnica de estimación desarrollada en la línea de investigación de este trabajo [5], será posible modificar las definiciones comunmente utilizadas, para lograr ampliar el área de operación segura de las BL y SC.

2.2.1. Estado de salud.

El estado de salud permite cuantificar el grado de deterioro de las BL y/o de los SC. Convencionalmente, este estado toma valores entre 1 (módulos sanos) y 0 (módulos no aptos para la aplicación en concreto). Los estados máximos y mínimos se obtienen de comparar los valores de la impedancia serie y la capacidad de carga, con los valores nominales para estos parámetros y con los valores mínimos plausibles que podrían tomar estos parámetros para cada aplicación en concreto. Por ejemplo para el caso de vehículos eléctricos, se emplea como mínimo valor de referencia, un 80% de la capacidad nominal máxima, y un 100% de aumento en el valor de la impedancia serie. A modo ilustrativo, en este trabajo se obtiene el ES a través de un cálculo en el cual interviene la resistencia serie de los módulos [6]:

$$\widehat{ES} = \frac{\hat{r}_s - r_{eol}}{r_N - r_{eol}} \quad (1)$$

con $r_{eol} = 1.6 r_N$ siendo las resistencias máxima admisible (end-of-life) y nominal de cada módulo. Convencionalmente, las mediciones del estado de salud de las BL o SC, son realizadas con el vehículo fuera de funcionamiento. Sólo de esta forma sería posible someter a la batería a un ciclo completo de carga-descarga para realizar una medición detallada de la capacidad máxima de carga o de la resistencia serie. Sin embargo, esto no es necesario en el esquema propuesto en este trabajo, debido a que se podría contar constantemente con estimaciones de los parámetros de un modelo eléctrico equivalente.

2.2.2. Estado de carga.

El estado de carga permite cuantificar, respecto de la carga nominal máxima de la batería, cuál es la carga disponible. Vale la pena destacar, que métodos sencillos como la medición de la integral de la corriente, o tablas de look-up basadas en la comparación entre las curvas de EC y tensión de circuito abierto brindadas por el fabricante, son aplicables en vehículos eléctricos sólo admitiendo errores muy considerables (>10%). Esto se debe a que para que estos métodos sean válidos, se requieren largos tiempos de espera, tanto para medir adecuadamente la tensión de circuito abierto, como para actualizar correctamente el valor inicial de carga. Por esto último en este trabajo, se plantea el cálculo del estado de carga a través de una integral evaluada con los parámetros de los circuitos eléctricos equivalentes. Estos se verán en detalle en la próxima subsección.

$$\widehat{EC} = \frac{\hat{Q}}{Q_N} = \frac{Q_0 - Q(t)}{Q_N} = EC_0 + \frac{C(t)(\Delta V)}{Q_N} \quad (2)$$

Notar que al igual que en el caso del ES, es factible actualizar correctamente la evolución del EC a través de una actualización no sólo de los parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente, sino también a través de una estimación de la máxima capacidad de carga disponible.

Además de los EC ES, empleando las estimaciones en tiempo real provistas por el estimador de parámetros variantes, es posible obtener otros parámetros que son de interés en la temática. Por ejemplo: el estado de función, el cual permite determinar la máxima

potencia que puede ser entregada o tomada por los MANC, la autonomía de las baterías (aplicable en el caso de vehículos eléctricos), y la vida útil disponible de las baterías, el cual es una medida aproximada de la cantidad de ciclos de carga/descarga disponibles para los sistemas de almacenamiento.

2.3. Modelo de circuito eléctrico variante en el tiempo

Para realizar la estimación de los parámetros característicos de los sistemas de almacenamiento es fundamental contar con un modelo adecuado. Ha sido probado que los modelos de eléctrico (MCE) son aptos para representar la dinámica de las LB y de los SC,

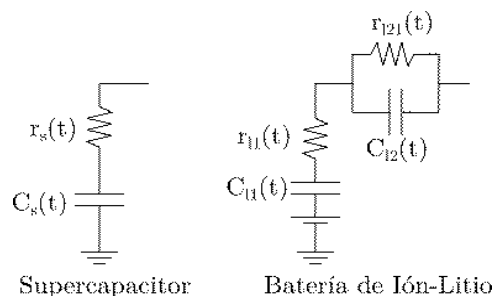


Figura 2. Modelos de circuito eléctrico equivalente con parámetros variantes en el tiempo.

cuando estos se encuentran sujetos a perfiles de demanda variables, como los que se obtienen al utilizar estos módulos en vehículos eléctricos. Por este motivo, se utiliza un MCE con parámetros variantes en el tiempo de orden dos para las BL y de orden uno para el SC como puede observarse en la figuras 2.

Emplear un circuito variante en el tiempo posee múltiples ventajas. Por un lado permite modelar dinámica no lineal, tanto de las BL

como de los SC. Respecto de las BL por ejemplo, es conocida la relación no lineal que existe entre la tensión de circuito abierto y el estado de carga (observar figura 2). Por otro lado, todas las variaciones temporales que puedan ocurrir en los parámetros del modelo podrán ser detectadas. Por ende, también será posible mejorar el seguimiento de los EC y ES.

3. ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA EN TIEMPO REAL BASADA EN DIFERENCIADORES POR MODOS DESLIZANTES.

En esta sección es presentada una descripción generalizada de los fundamentos del algoritmo de estimación basado en modos deslizantes desarrollado [5]. Dado que el sistema se encuentra formado por dos subsistemas desacoplados, se procede a describir brevemente el funcionamiento de cada uno de ellos de forma independiente. Para el lector/a interesada puede encontrarse un esquema detallado de la metodología utilizada en [5].

3.1. Estimador recursivo con factor de olvido y ganancia variable

Para poder realizar la estimación de los parámetros, es necesario contar con ecuaciones lineales en los parámetros desconocidos. Para esto en primer lugar se parte de los modelos lineales de la figura 2, y se realiza una transformación, llevando el sistema a la forma canónica generalizada de Fliess [5]. Al hacer esta transformación puede llevarse a cabo una estimación recursiva de los parámetros de los sistemas de almacenamiento. Sin embargo, es necesario agregar una modificación en el algoritmo convencional: una ganancia variable. Esto se debe a que el algoritmo debe obtener en tiempo real los parámetros de los módulos de almacenamiento satisfaciendo la demanda de potencia de un vehículo eléctrico. Como consecuencia, la llamada persistencia de la señal de excitación (PE) del algoritmo varía conforme demanda la potencia. La PE es indicativa de la cantidad de información disponible en la entrada del algoritmo de estimación, y con ella es posible obtener una cotapara el tiempo de convergencia del mismo. Este último punto es fundamental, en vistas de que se desea validar los parámetros estimados rápidamente.

3.2. Diferenciadores basados en modos deslizantes

Para que el algoritmo de estimación funcione correctamente, es necesario contar con derivadas robustas tanto de las corrientes como de las tensiones de cada módulo. Para esto se diseñó un conjunto de derivadores basados en modos deslizantes. Estos poseen dos

características que los hacen esenciales para esta aplicación en concreto. Por un lado, es posible obtener estimaciones continuas de las derivadas deseadas. Por otro lado, el proceso posee un filtrado por modos deslizantes que permite rechazar distintos tipos de ruido, incluyendo ruidos no acotados de bajo valor medio. Una ventaja fundamental de esta propuesta, a comparación de los esquemas que utilizan observadores de estados adaptables, es que el proceso de diferenciación y el de estimación se encontrarán completamente desacoplados.

4. RESULTADOS

En esta sección son presentados algunos de los resultados más representativos de las simulaciones realizadas para la estimación de los EC y ES del SC y la BL. Para evaluar el algoritmo y la metodología propuesta, se asumió que el módulo SC/LB opera bajo la demanda de un perfil variable de corriente. El mismo fue generado consistentemente con el perfil de conducción vehicular estandarizado Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) [7].

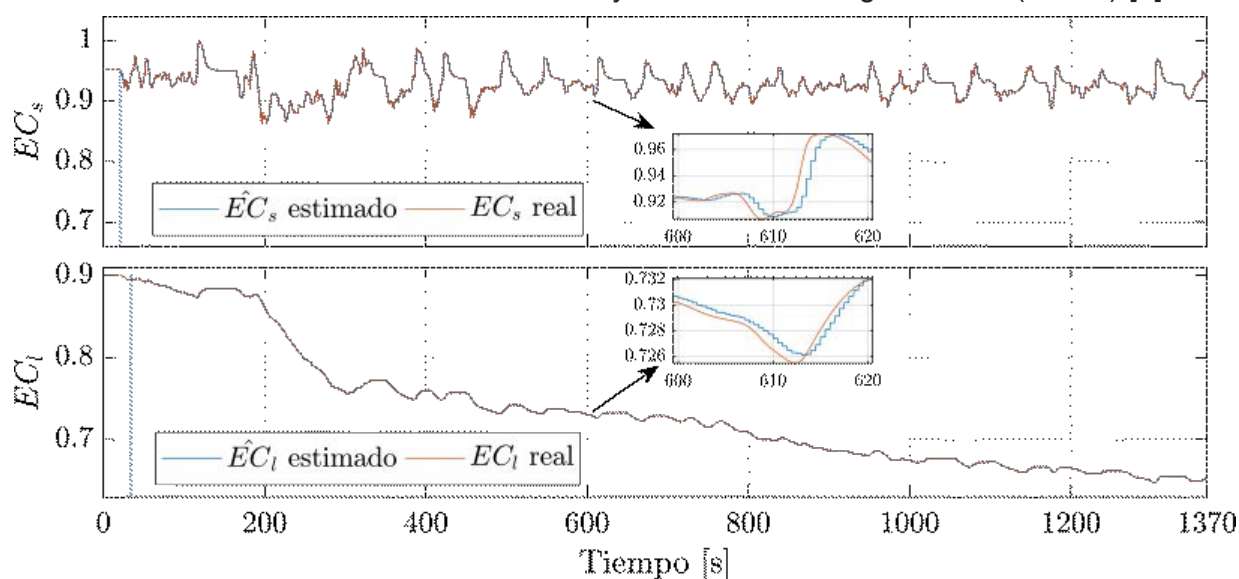


Figura 3. Modelo de circuito eléctrico equivalente de parámetros variantes.

La comparación entre el EC real y el estimado, puede observarse en la Fig. 3. Puede apreciarse en las zonas con zoom, que el error se encuentra muy aproximadamente debajo del 2% para el EC_s y es aún menor para el EC_1 . La estimación de los parámetros no solamente es una herramienta para el cálculo indirecto del EC, sino que también ofrece la posibilidad de inferir el ES de los módulos. Evaluando el ES mediante las resistencias serie de los módulos, como en la ecuación 1, se obtienen los resultados de la Fig. 4. Valores cercanos a 1 indican módulos mas sanos, y valores cercanos a cero manifiestan el deterioro de los mismos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron algunos avances en el desarrollo de una metodología para estimar en tiempo real el EC y ES de un módulo híbrido de almacenamiento de energía basado en SC+BL. La principal contribución es el diseño de una metodología ad-hoc para aplicaciones vehiculares. El modelo de circuito eléctrico para los módulos de almacenamiento de energía fue utilizado con parámetros eléctricos variantes en el tiempo. Esto otorga gran flexibilidad y capacidad de lidiar con las no linealidades intrínsecas a estos módulos de almacenamiento.

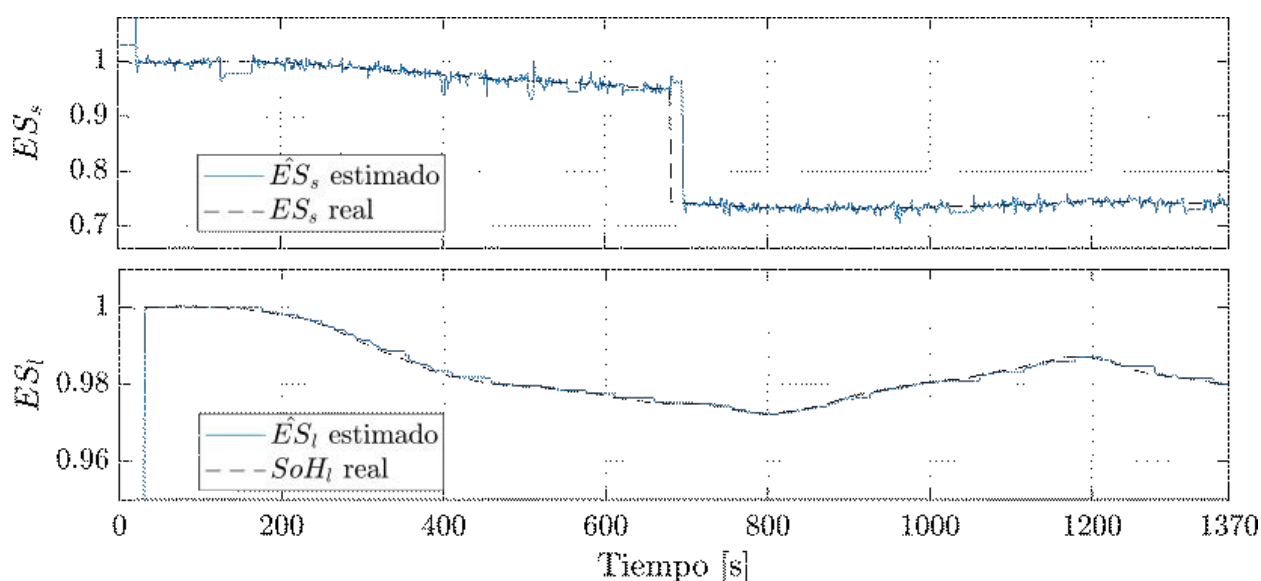


Figura 4. Modelo de circuito eléctrico equivalente de parámetros variantes.

Por último, la metodología propuesta fue evaluada con perfiles de conducción vehicular estandarizados. Los resultados mostraron que el algoritmo es capaz de seguir las variaciones temporales propuestas, lo cual posibilita no sólo inferir el EC, sino también realizar un seguimiento del ES en tiempo real, durante la operación de los módulos bajo un perfil de carga estandarizado para vehículos eléctricos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al soporte de la Universidad Nacional de La Plata, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, y la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación el Desarrollo Tecnológico y la Innovación.

REFERENCIAS

- [1] I. San Martín, A. Ursúa, P. Sanchis, "Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis modelling and experimental validation," International journal of hydrogen energy, Vol 38, 2013.
- [2] S. M. Lukic, S. G. Wirasingha, F. Rodriguez, J. Cao, A. Emadi, "power management of an ultracapacitor/battery hybrid energy storage system on a hybrid electric vehicle," 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.
- [3] A. B. Cultura II, Z. M. Salameh, "Modelling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application," International conference on computer information systems and industrial applications, 2015.
- [4] P. Barrade, A. Rufer, "Current capability and power density of supercapacitors: considerations on energy efficiency," EPE 2003, Toulouse, France 10th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE Journal, Enero de 2003.
- [5] P. Fornaro, P. Puleston, P. Battaiotto, "On-line parameter estimation of a lithium-Ion battery /supercapacitor storage system using sliding mode differentiators", J. of energy Storage, Vol. 32, 2020.
- [6] M. Gholizadeh, F. R. Salmasi, Estimation of state of charge, unknown nonlinearities, and state of health of a lithium-ion battery based on a comprehensive unobservable model, IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 6, 2014.
- [7] EPA profiles, <http://www.epa.gov>, ultimo acceso: 05-01-2019