

# Estrategia Cooperativa de Gestión de Energía entre Prosumidores con Sistemas de Almacenamiento Híbrido

M. Ruiz-Cortés, E. Romero-Cadaval, C. Roncero-Clemente, F. Barrero-González, and E. González-Romera

**Resumen**—En los últimos años, se han producido importantes cambios en la estructura del sistema eléctrico como consecuencia del auge experimentado por la generación distribuida con fuentes de energía renovables, usuarios activos y vehículos eléctricos. En este nuevo escenario, los prosumidores juegan un papel fundamental para suavizar la curva de demanda y contribuir al cumplimiento de los requerimientos de la red. Las instalaciones fotovoltaicas (PV arrays) integradas en edificios residenciales están atrayendo una atención especial, ya que pueden complementarse con sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (Energy Storage Systems, ESSs) tales como baterías o supercondensadores (SCs) e incluso una combinación de ambos en un sistema híbrido de almacenamiento (Hybrid Energy Storage System, HESS), con el propósito de conseguir que los usuarios finales puedan gestionar su energía. En este artículo, se propone una estrategia de gestión de energía que permite el intercambio de la misma entre los HESSs de dos viviendas con instalaciones fotovoltaicas, así como entre las distintas tecnologías que componen cada HESS, con el objetivo de satisfacer sus necesidades energéticas durante el mayor tiempo posible.

**Palabras Clave**—gestión de energía, prosumidores, sistemas de almacenamiento de energía, sistemas fotovoltaicos

## I. INTRODUCCIÓN

ACTUALMENTE, los sistemas eléctricos tienen que afrontar numerosos retos a raíz de la aparición de la generación distribuida [1], en la que las fuentes de energía renovable, los usuarios activos y los vehículos eléctricos juegan un papel fundamental. Esto se debe a que son causantes de problemas técnicos de regulación de tensión y frecuencia, *islanding*, distorsión armónica, interferencia electromagnética e incluso problemas de distribución [2]. Para mitigar estos inconvenientes y garantizar la seguridad y fiabilidad del suministro eléctrico, es necesario un nuevo concepto sobre el papel de los usuarios finales, que están llamados a ser prosumidores.

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por el proyecto (TEC2016-77632-C3-1-R) del Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España) y por la Junta de Extremadura con fondos para grupos de investigación (GR15177).

Los autores pertenecen al Grupo de Investigación, Desarrollo e innovación Sistemas Eléctricos y Electrónicos de Potencia (PE&ES) de la Universidad de Extremadura, Badajoz (España).

Un prosumidor presenta a la vez las características de un productor y de un consumidor, ya que puede tanto extraer como inyectar potencia a la red [3] de acuerdo a decisiones económicas. Los prosumidores equipados con sistemas de control y comunicación pueden interactuar con la red proporcionando diversas ventajas, como el incremento de la penetración de fuentes de energía renovable de carácter intermitente en el sistema eléctrico, el desplazamiento de carga/generación y participando en servicios auxiliares y aplicaciones de red [3], [4]. De este modo, es posible lograr una reducción tanto de la potencia generada como de la potencia demandada, y por tanto del uso de combustibles fósiles [5], mientras que los usuarios finales optimizan la utilización de sus fuentes de energía renovable y consiguen ahorros en sus facturas eléctricas [2], [4].

En los últimos años, la energía fotovoltaica ha experimentado un gran desarrollo [6] y se ha convertido en la fuente de energía renovable más común en instalaciones comerciales y residenciales conectadas a redes de distribución de baja tensión [2], [7]. Su crecimiento ha sido particularmente significativo en áreas urbanas, donde suelen estar integradas en edificios [8]. Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos de aplicaciones residenciales presentan ciertos problemas, debido a que existe un desajuste entre el momento en el que se genera el pico de la potencia fotovoltaica (normalmente al mediodía) y el pico de la potencia consumida por las cargas, que suele producirse por la noche [5]. Además, la producción fotovoltaica presenta un carácter intermitente e impredecible a consecuencia de su dependencia de la irradiancia solar.

Una solución efectiva para combatir los anteriores problemas consiste en incorporar un ESS en los edificios que cuenten con una instalación fotovoltaica. La función de un ESS es almacenar el exceso de energía generada por el sistema fotovoltaico durante el mediodía [1] para alimentar las cargas en aquellos momentos en los que la generación fotovoltaica no sea suficiente, sirviendo de apoyo a la red. Por lo tanto, los ESSs permiten el desplazamiento de la energía consumida por los usuarios, de forma que solo inyectan energía cuando ésta es necesaria y se cargan cuando hay un exceso de generación o

cuando el precio de la energía es más barato que en otros periodos [1]. De este modo, los ESSs contribuyen a suavizar la curva de consumo y mejorar la gestión de la energía [1].

Se han propuesto diversas tecnologías para ser combinadas con sistemas fotovoltaicos, como las baterías (que son las más empleadas), los SCs o incluso las pilas de combustible [9]. En el diseño de un ESS es vital decidir cuál de dichas tecnologías es la más apropiada para la aplicación en que pretende utilizarse [10]. En el caso de la generación fotovoltaica, es importante tener en cuenta que está compuesta por una componente de baja frecuencia y por oscilaciones de alta frecuencia asociadas a la intermitencia de la irradiancia solar. Por tanto, el ESS debería tener alta densidad de energía para encargarse de la componente de baja frecuencia al mismo tiempo que alta densidad de potencia para proporcionar y absorber los picos de potencia transitorios [11].

Entre las diferentes tecnologías de ESSs, las baterías son capaces de almacenar cantidades elevadas de energía, pero su tiempo de respuesta no es suficientemente rápido como para hacer frente a los picos transitorios [12]. Sin embargo, los SCs sí que pueden entregar grandes picos de potencia, además de cargarse y descargarse sin perder eficiencia durante miles de ciclos, pero su capacidad de almacenamiento es baja [12]. Ambas tecnologías pueden combinarse para añadir la alta densidad de energía de las baterías a la elevada densidad de potencia de los SCs [10]-[13]. Además, los SCs pueden contribuir a aumentar la vida útil de las baterías, al hacerse responsables de proporcionar los picos de potencia elevados [13]. Dicha combinación de ESSs conforma un sistema de energía híbrido o HESS [13], que reúne a la vez alta capacidad de almacenamiento y respuesta rápida [14].

Existen distintas topologías de HESSs, de las que se ofrece una revisión bibliográfica en [15] y [16]. Sin embargo, una de las más utilizadas es la configuración en paralelo de HESSs formados por la asociación de baterías y SCs con convertidores bidireccionales, cuyo uso permite gestionar cada ESS de forma independiente e incluso intercambiar energía entre los ESSs que componen el propio HESS [13].

Este artículo se centra en simular mediante el software Simulink/Matlab el comportamiento de dos viviendas de prosumidores con instalaciones fotovoltaicas y HESSs compuestos por baterías y SCs a través de sus curvas de generación y demanda, tal como se describe en la Sección II. Además, en la Sección III se presenta un sistema de gestión de energía (*Energy Management System*, EMS) destinado a mantener la tensión de los SCs en un nivel deseado dentro de cada HESS e intercambiar energía entre los HESSs de ambas viviendas. En la Sección IV, se discuten los resultados de simulación obtenidos para el caso estudiado con el fin de evaluar si la estrategia de control propuesta es válida. Finalmente, en la Sección V se ofrece un breve resumen de las principales aportaciones realizadas en este trabajo.

## II. CASO DE ESTUDIO

La Fig. 1 muestra el caso estudiado mediante simulación en

este artículo. Dicha figura representa dos prosumidores residenciales conectados a una red de distribución de baja tensión que cuentan con sendos HESSs basados en la combinación de baterías de plomo y SCs, junto a instalaciones fotovoltaicas de distinto tamaño. La potencia fotovoltaica pico de cada prosumidor es de 3 kWp y 5 kWp respectivamente, y sus HESSs han sido dimensionados de manera que las baterías ofrezcan tres días de autonomía [17], mientras que los SCs sirven como apoyo a las baterías durante los picos de potencia transitorios.

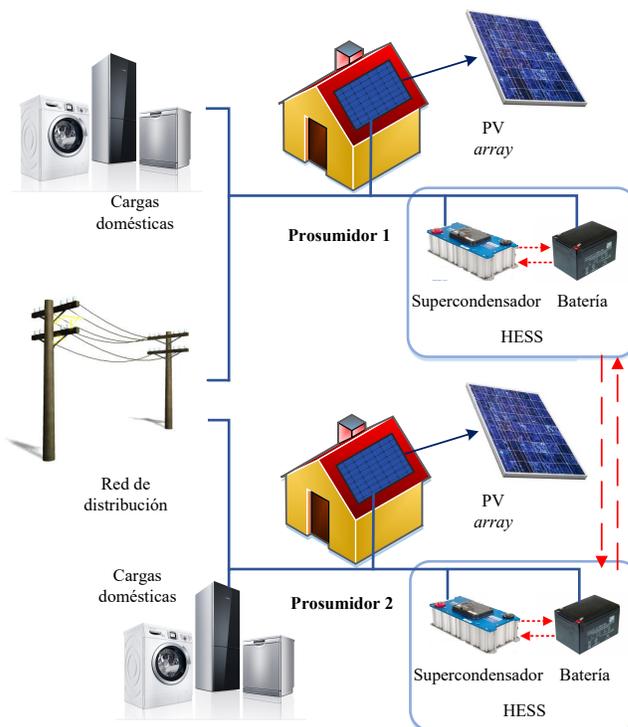


Fig. 1. Esquema del caso de estudio.

Las características de cada instalación fotovoltaica y de cada HESS se encuentran recogidas en la Tabla I. Además, los perfiles diarios típicos de consumo y de generación fotovoltaica del prosumidor 1 y del prosumidor 2 se muestran en la Fig. 2. Estas curvas han sido obtenidas mediante la simulación de los datos suministrados en la herramienta informática Simulink/Matlab.

TABLA I  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Parámetro	Valor	
	Prosumidor 1	Prosumidor 2
Potencia fotovoltaica pico	3 kWp	5 kWp
Capacidad banco de baterías	720 Ah	1100 Ah
Capacidad banco de supercondensadores	600 F	900 F
Tensión de baterías y supercondensadores	48 V	48 V

## III. ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE ENERGÍA PROPUESTA

Para que el HESS funcione correctamente, es necesario que la instalación cuente con un EMS. En primer lugar, es preciso distribuir las componentes de alta y baja frecuencia de la potencia asumida por el HESS, de modo que baterías y SCs se

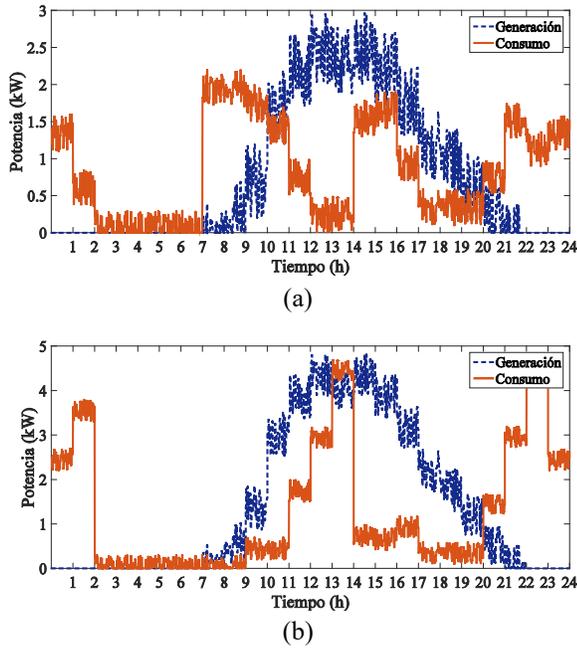


Fig. 2. Curvas de generación fotovoltaica y consumo del prosumidor 1 (a) y del prosumidor 2 (b).

hagan cargo de la parte que les corresponde según sus tiempos de respuesta, como se mencionó la Sección I. Esto puede conseguirse utilizando un filtro paso-bajo convencional [11], que separa la componente de baja frecuencia de la potencia, que es asignada a las baterías, y la componente de alta frecuencia, de la que se hace cargo el banco de SCs.

Este reparto de potencia está representado en (1), (2) y (3), donde la potencia que tiene que ser proporcionada por el HESS ( $P_{ref,sto}$ ) se calcula como la diferencia entre la potencia demandada ( $P_{load}$ ) y la potencia fotovoltaica generada ( $P_{PV}$ ), mientras que  $P_{bat}$  y  $P_{SC}$  son la potencia asumida por el banco de baterías y el banco de SCs respectivamente. La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques utilizado en Simulink para modelar las anteriores ecuaciones siguiendo las directrices de [18].

$$P_{ref,sto} = P_{load} - P_{PV} \quad (1)$$

$$P_{bat} = LPF(P_{ref,sto}) \quad (2)$$

$$P_{SC} = P_{ref,sto} - P_{bat} \quad (3)$$

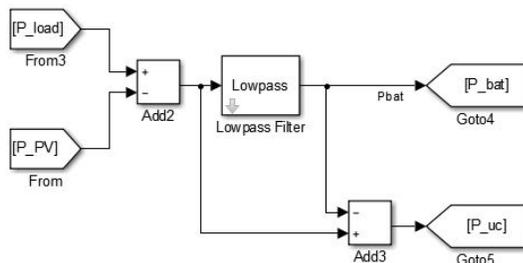


Fig. 3. Diagrama de bloques utilizado para calcular  $P_{bat}$  y  $P_{SC}$ .

Un aspecto importante a tener en cuenta es el estado de carga (*State of Charge*, SOC) de los EESs. Según [19], la capacidad de una batería ( $SOC_{bat}$ ) representa la relación entre la capacidad existente en un momento determinado ( $Q$ ) y en el estado de carga completa ( $Q_{nom}$ ), como se muestra en (4); así, un SOC del 100% implica que la batería está totalmente cargada, mientras que un SOC del 0% indica que la batería está totalmente descargada [19].

$$SOC_{bat} = \frac{Q}{Q_{nom}} \quad (4)$$

Es recomendable que las baterías trabajen dentro de un determinado rango, debido a que su funcionamiento fuera del mismo podría causar una pérdida de vida útil en la batería [20]. Por esta razón, en este artículo se ha considerado una limitación del SOC de las baterías, de modo que pueden operar únicamente dentro de un rango cuyo límite superior se ha establecido en un valor del 100% mientras que el límite inferior es igual a un 20%, de acuerdo a las características de las baterías de plomo [17]. De esta forma, es posible evitar la sobrecarga y la sobredescarga de las baterías.

Por otra parte, la energía almacenada en un SC ( $E_{SC}$ ) puede calcularse usando (5), donde  $V$  es la tensión del SC en un determinado instante y  $C$  es su capacidad [21]. Como se puede deducir de (5), un SC almacena energía proporcionalmente al cuadrado de su tensión [22]. Los SCs suelen estar conectados al resto de la instalación a través de un convertidor de potencia, que necesita una tensión mínima de funcionamiento y, por tanto, una energía mínima [23]. Así, el SOC de un SC ( $SOC_{SC}$ ) puede expresarse según (6), donde  $E$  es la energía almacenada en el SC en un cierto instante, mientras que  $E_{max}$  y  $E_{min}$  son la energía máxima y mínima que el SC es capaz de almacenar.

$$E_{SC} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (5)$$

$$SOC_{SC} = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (6)$$

Según (6), cuando la tensión del SC alcanza el 50% de su valor nominal,  $SOC_{SC}$  es igual al 0%, por lo que puede considerarse que un SC está totalmente descargado cuando su tensión alcanza la mitad de su valor nominal ( $V_{nom}$ ). De este modo, se garantiza que el banco de SCs almacene una energía mínima igual al 25% de la energía máxima que puede contener (7) y el convertidor de potencia dispone de una tensión mínima de funcionamiento.

$$E_{min} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(\frac{V_{nom}}{2}\right)^2 = \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{nom})^2\right] = 0.25E_{max} \quad (7)$$

Con el propósito de asegurar que el banco de SCs esté siempre disponible para suministrar o absorber la potencia

requerida, es necesario mantener  $SOC_{SC}$  en un determinado nivel [11], que ha sido establecido en un 50%. Combinando (5), (6) y (7) puede escribirse (8), que relaciona  $SOC_{SC}$  con  $V$  y  $V_{nom}$  según se muestra en la Fig. 4, y permite calcular la tensión correspondiente a este nivel de SOC ( $V_{ref}$ ). Con los datos del caso analizado,  $V_{ref}$  debe mantenerse aproximadamente igual a 37.95 V.

$$SOC_{SC} = \frac{1}{3} \cdot \left[ 4 \cdot \left( \frac{V}{V_{nom}} \right)^2 - 1 \right] \quad (8)$$

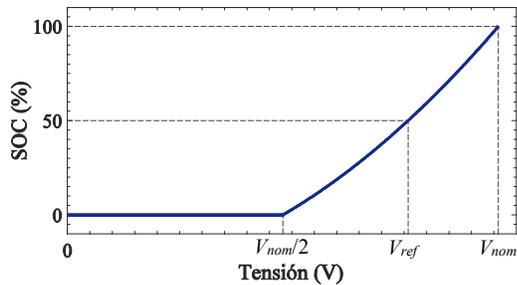


Fig. 4. Relación entre  $SOC_{sc}$  y  $V$ .

Para conseguir este objetivo, la estrategia de gestión de energía implementada en el EMS coordina el funcionamiento de baterías y SCs [13] para que ambos cooperen entre sí, de forma que cuando la tensión de los SCs difiere de  $V_{ref}$ , el EMS genera una corriente de referencia mediante un controlador PI. Esta corriente de referencia se transfiere entre ambos dispositivos de almacenamiento para cargar la batería con la energía almacenada en los SCs hasta que estos alcanzan de nuevo  $V_{ref}$  y viceversa. Esta acción de control permite que el

banco de SCs permanezca en todo momento en disposición de suministrar energía, tanto positiva como negativa, evitando que sufra grandes fluctuaciones de carga.

La Fig. 5 muestra el modelo construido en Simulink para simular el HESS y su estrategia de gestión de energía. Como puede observarse en dicha figura, se han empleado los modelos de batería y SC que Simulink proporciona dentro de SimPowerSystems Blockset, funcionando mediante fuentes de corriente controladas.

Sin embargo, la acción del EMS no se limita únicamente al intercambio de energía entre los dispositivos de almacenamiento de un mismo HESS, sino que es posible utilizarlo para compartir energía entre usuarios distintos. Esta idea se ha añadido al EMS propuesto en este artículo de la siguiente forma: cuando el SOC de una de las baterías es bajo, esta es apoyada por la batería del otro prosumidor para proporcionar energía y, por tanto, incrementar el SOC de la primera batería.

Para garantizar un comportamiento adecuado de los dos HESS simulados, se han considerado unas ciertas restricciones. Dichas restricciones consisten en que una batería sólo puede suministrar energía a la otra batería si su SOC es superior al 60%, mientras que el SOC de una batería debe estar por debajo del 30% para ser cargada por la batería que tiene un SOC elevado. De este modo, se pretende evitar, por un lado, que la batería que comparte energía con la otra sufra una descarga excesiva, y, por otro lado, que la batería que recibe energía no se encuentre disponible debido a que su SOC esté por debajo del 20% mientras la batería de otro usuario está suficientemente cargada. La Fig. 6 muestra el diagrama de bloques construido en Simulink para implementar esta acción de control en el modelo anterior.

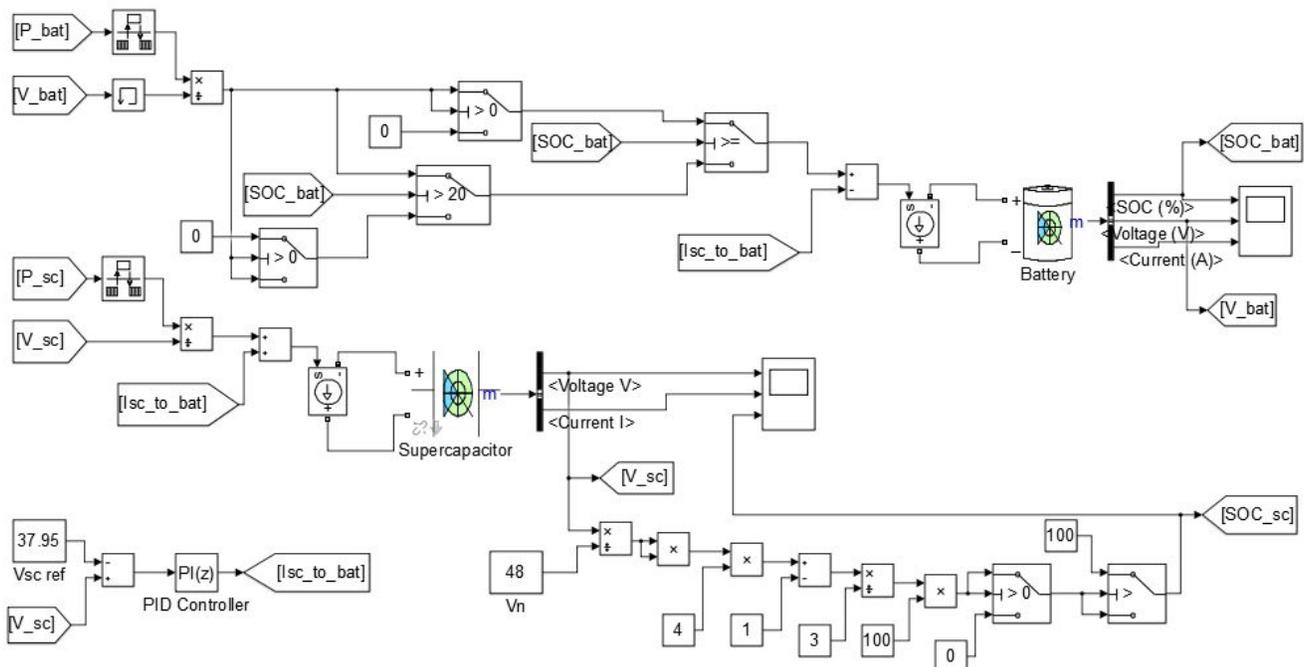


Fig. 5. Modelo Simulink utilizado para simular el funcionamiento del banco de baterías y SCs con el sistema de control propuesto.

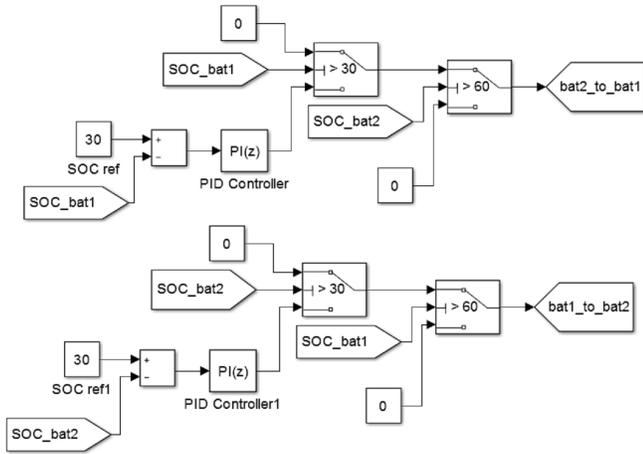


Fig. 6. Diagrama de bloques realizado en Simulink para implementar el intercambio de energía entre baterías de prosumidores.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

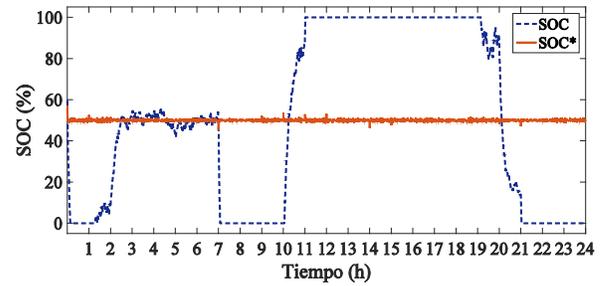
##### A. Intercambio de energía en un HESS individual

La acción de control propuesta ha sido implementada mediante simulación en el HESS de cada una de las viviendas analizadas para gestionar la energía entre los sistemas de baterías y SCs de cada prosumidor. Como se puede ver en la Fig. 7(a), la estrategia de control cumple la condición de evitar que los SCs entren en saturación cuando su SOC alcanza el 100% o una descarga completa, lo que se ha conseguido mediante el intercambio de energía entre los bancos de baterías y el SC. De esta manera, el SOC de la batería se ve afectado de la forma en que se muestra en la Fig. 7(b), que compara el SOC de la batería cuando el EMS propuesto es utilizado con el caso en que no es aplicado. En esta figura, puede observarse cómo la batería suministra y absorbe energía del SC cuando es necesario para que la tensión del SC se mantenga en el valor deseado. Sin embargo, la diferencia entre ambas curvas de SOC es pequeña.

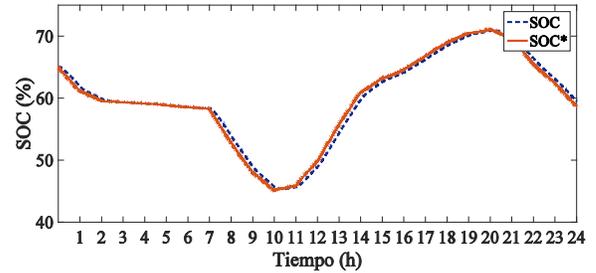
##### B. Cooperación energética entre prosumidores

También se ha integrado el intercambio de energía entre prosumidores en la estrategia de control, y se ha simulado en las siguientes condiciones: el SOC inicial de la batería del prosumidor 1 es igual a un 30%, mientras que el SOC inicial de la batería del prosumidor 2 es de un 85%. Por lo tanto, la batería del prosumidor 2 tiene que cooperar con la batería del prosumidor 1, tal como se muestra en la Fig. 8.

Como puede verse en dicha figura, la estrategia de intercambio de energía entre ambas baterías consigue que el SOC de la batería del prosumidor 1 mejore, aumentando hasta alcanzar el 30%, que es el límite establecido, poco después de las 2:00 a.m. Como consecuencia, durante este intervalo el SOC de la batería del prosumidor 2 disminuye al suministrar energía al prosumidor 1, lo que también ocurre desde las 7:00 a.m. hasta aproximadamente las 12:00 a.m., cuando el SOC de la batería del prosumidor 1 cae por debajo del 30%, y logra elevarlo para evitar que alcance el límite mínimo del 20%,

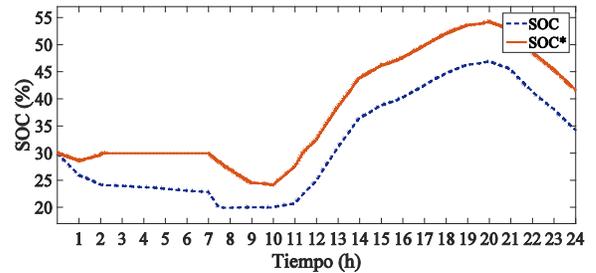


(a)

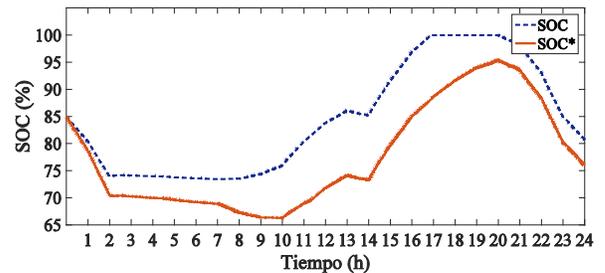


(b)

Fig. 7. Comparación de la evolución del SOC del banco de SCs (a) y del banco de baterías (b) a lo largo de un día con el EMS propuesto (SOC\*) y sin aplicar la acción de control (SOC).



(a)



(b)

Fig. 8. Comparación de la evolución del SOC de las baterías del prosumidor 1 (a) y del prosumidor 2 (b) sin estrategia de cooperación energética (SOC) y con estrategia de cooperación energética (SOC\*).

mientras que al mismo tiempo sigue suministrando la energía requerida por el prosumidor 2. El resto del día las dos baterías no intercambian energía entre sí y ambas se cargan y descargan de acuerdo a su respectiva generación fotovoltaica y consumo doméstico.

## V. CONCLUSIONES

Este artículo expone la relevancia que los prosumidores han alcanzado en los últimos años dentro del nuevo escenario que el desarrollo de la generación distribuida ha causado. Particularmente, se ha estudiado mediante simulación el caso de las instalaciones de dos prosumidores residenciales que cuentan con un pequeño sistema fotovoltaico combinado con un HESS basado en baterías y SCs. Además, se ha propuesto una estrategia de control para optimizar la gestión de energía.

Dicha gestión de energía permite mantener el SOC de los bancos de SCs en un 50% a costa de controlar que su tensión permanezca en un valor adecuado que ha sido calculado para el caso analizado, de manera que es posible asegurar que los SCs permanezcan operativos en todo momento. Además, se ha integrado un sistema de intercambio de energía entre diferentes HESSs con el fin de que los prosumidores puedan cooperar entre sí intercambiando energía entre sus baterías para evitar que una de ellas no se encuentre en condiciones de suministrar energía mientras que la otra está suficientemente cargada como para proporcionar tanto su correspondiente energía de referencia como para dar apoyo a la batería que tiene un SOC bajo.

## REFERENCIAS

- [1] S. M. Souza, M. Gil, J. Sumaili, A. G. Madureira and J. A. P. Lopes, "Operation scheduling of prosumer with renewable energy sources and storage devices," *2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Porto, 2016, pp. 1-5.
- [2] R. Araneo and M. C. Falvo, "Simulation of a ESS in a prosumer powerplant with a PV system and an EV charging station," *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, 2016, pp. 1-5.
- [3] M. C. Falvo, U. Grasselli, M. Manganelli and A. Modesto, "Small scale ESS for LV prosumers: An economic feasibility and sensitivity analysis," *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, 2015, pp. 950-955.
- [4] G. Graditi, M.G. Ippolito, R. Rizzo, E. Telaretti, and G. Zizzo, "Technical-Economical Evaluations for Distributed Storage Applications: An Italian Case Study for a Medium-Scale Public Facility," *3rd Renewable Power Generation Conference - RPG 2014*, Napoli.
- [5] Y. Wang, X. Lin and M. Pedram, "Adaptive Control for Energy Storage Systems in Households With Photovoltaic Modules," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 992-1001, March 2014.
- [6] E. Romero-Cadaval, G. Spagnuolo, L. G. Franquelo, C. A. Ramos-Paja, T. Suntio and W. M. Xiao, "Grid-Connected Photovoltaic Generation Plants: Components and Operation," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 6-20, Sept. 2013.
- [7] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi and D. Sutanto, "Mitigation of Rooftop Solar PV Impacts and Evening Peak Support by Managing Available Capacity of Distributed Energy Storage Systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3874-3884, Nov. 2013.
- [8] M. Sechilariu, B. Wang and F. Locment, "Building Integrated Photovoltaic System With Energy Storage and Smart Grid Communication," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1607-1618, April 2013.
- [9] H. Beltran, E. Bilbao, E. Belenguier, I. Etxeberria-Otadui and P. Rodriguez, "Evaluation of Storage Energy Requirements for Constant Production in PV Power Plants," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1225-1234, March 2013.
- [10] E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski and Q. C. Zhong, "Grid-Connected Photovoltaic Plants: An Alternative Energy Source, Replacing Conventional Sources," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 18-32, March 2015.
- [11] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew and A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 923-930, March 2011.
- [12] H. F. Gharibeh, A. S. Yazdankhah and M. R. Azizian, "Improved energy management for a power-split multi-source fuel cell vehicle based on optimal source sizing and regenerative braking," *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, 2016, pp. 1-6.
- [13] M. Momayyezani, D. B. W. Abeywardana, B. Hredzak and V. G. Agelidis, "Integrated Reconfigurable Configuration for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1583-1590, Dec. 2016.
- [14] C. Abbey, K. Strunz and G. Joos, "A Knowledge-Based Approach for Control of Two-Level Energy Storage for Wind Energy Systems," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 539-547, June 2009.
- [15] J. Cao and A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012.
- [16] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong, J. M. Vinassa and H. Camblong, "Hybrid Energy Storage Systems for renewable Energy Sources Integration in microgrids: A review," *2010 Conference Proceedings IPEC*, Singapore, 2010, pp. 532-537.
- [17] M. E. Glavin, P. K. W. Chan, S. Armstrong and W. G. Hurley, "A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system," *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, 2008, pp. 1688-1695.
- [18] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni and A. Jeunesse, "Energy management and sizing of a hybrid locomotive," *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007, pp. 1-10.
- [19] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Power sharing for distributed energy storage systems in AC microgrid: Based on state-of-charge," *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Brisbane, QLD, 2015, pp. 1-5.
- [20] J. Zou, C. Peng, J. Shi, X. Xin and Z. Zhang, "State-of-charge optimising control approach of battery energy storage system for wind farm," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 6, pp. 647-652, 8 2015.
- [21] M. A. Guerrero-Martínez, E. Romero-Cadaval, F. Barrero-González, M. I. Milanés-Montero and E. González-Romera, "Overview of medium scale energy storage systems," *2009 Compatibility and Power Electronics*, Badajoz, 2009, pp. 93-100.
- [22] H. Yin, W. Zhou, M. Li, C. Ma and C. Zhao, "An Adaptive Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy on Battery/Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 3, pp. 300-311, Sept. 2016.
- [23] M. A. Guerrero-Martínez, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero, V. M. Miñambres-Marcos and F. Barrero-González, "Aplicación de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Supercondensadores en Plantas de Generación Fotovoltaica," *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación 2009. Actas de Congreso*, Leganés, 1-3 July 2009.