

BATERÍAS ELECTROMECAÑICAS: VOLANTES DE INERCIA PARA EL ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE ENERGÍA

ELECTROMECHANICAL BATTERIES: FLYWHEELS FOR TEMPORARY ENERGY STORAGE



Rafael Peña Alzola
Ingeniero Industrial
Universidad Nacional de
Educación a Distancia

Rafael Sebastián Fernández
Doctor Ingeniero Industrial
Universidad Nacional de
Educación a Distancia

Recibido: 27/02/08

Aceptado: 14/04/08

RESUMEN

En las baterías electromecánicas (BEM) un volante de inercia almacena energía mecánica que por medio de una máquina eléctrica y un convertidor bidireccional de potencia intercambia en forma de energía eléctrica. Las BEM son adecuadas cuando se necesitan numerosos ciclos de carga y descarga (cientos de miles) con potencias medias y altas (kW a MW) durante periodos cortos (segundos). Los materiales del volante de inercia, el tipo de máquina eléctrica, el tipo de rodamientos y la atmósfera de confinamiento determinan la eficiencia energética de las BEM. Las BEM son una realidad comercial con más de una docena de fabricantes. Entre las aplicaciones de las BEM se encuentran: fuentes de alimentación ininterrumpida, sistemas de potencia híbridos, catenarias de trenes y metros,

vehículos híbridos y satélites espaciales.

Palabras Clave: Baterías electromecánicas, Volantes de inercia, Almacenamiento de energía.

ABSTRACT

In the Electromechanical batteries (EMB) a flywheel stores mechanical energy that interchanges in form of electrical energy by means of an electrical machine with a bidirectional power converter. EMB are suitable whenever numerous charge and recharge cycles (hundred of thousands) are needed with medium to high power (kW to MW) during short periods (seconds). The materials of the flywheel, the type of the electrical machine, the type of the bearings and the atmosphere inside the housing

determine the energy efficiency of the EMB. EMB are commercially available with more than a dozen of manufacturers. Amongst the applications of BEM are: uninterruptible power supplies, hybrid power systems, power grids feeding trains, hybrid vehicles and space satellites.

Key words: *Electromechanical Batteries, Flywheel, Energy storage.*

1. INTRODUCCIÓN

Las baterías electromecánicas (BEM) almacenan energía mecánica que intercambian en forma de energía eléctrica de manera análoga a las baterías electroquímicas con la energía química. La Fig. 1. a) muestra esquemáticamente los distintos componentes que forman las modernas BEM. El volante de inercia con momento de inercia I gira a una velocidad ω almacenando una energía cinética E_c :

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

La máquina eléctrica conectada al volante de inercia transforma la energía cinética anterior en energía eléctrica y viceversa. El convertidor bidireccional de potencia transforma energía eléctrica a la frecuencia de la máquina en energía eléctrica DC o AC a la frecuencia de red 50/60 Hz. y viceversa.

del material. También se puede aumentar ω lo que resulta en una mayor eficiencia al estar elevada al cuadrado.

En un sentido amplio la velocidad de giro ω del volante de inercia permite dividir a las BEM en dos tipos [3]: de velocidades bajas (< 6000 rpm) y de velocidades altas (10^4 - 10^5 rpm). Para maximizar la eficiencia energética las BEM de velocidades bajas utilizan tecnologías convencionales mientras que las BEM de velocidades altas utilizan tecnologías de

acero no permite alcanzar velocidades altas de giro, obteniéndose una densidad de energía modesta (0,05 kW/kg), pero su precio es 20-30 veces inferior al de los materiales compuestos [5].

2.2. MÁQUINA ELÉCTRICA

La máquina eléctrica actuando como generador frena al volante de inercia transformando su energía mecánica en eléctrica. Actuando como motor acelera al volante de inercia incrementando su energía mecánica y consumiendo energía eléctrica.

Para su utilización en las BEM las máquinas asíncronas son robustas y de bajo coste aunque a altas velocidades las pérdidas del cobre y del hierro en el rotor son elevadas [5]. Las máquinas síncronas de imanes permanentes mejoran la eficiencia al eliminar las pérdidas correspondientes al cobre del rotor. La configuración *Halbach* en la disposición de los imanes permanentes permite eliminar las pérdidas correspondientes al hierro [5]. Aunque son la opción mas habitual en las BEM de velocidades altas los imanes permanentes corren el peligro de desmagnetizarse, tienen reducida resistencia al esfuerzo tensil y precio muy elevado. Para resolver estos inconvenientes se han propuesto máquinas de reluctancia variable [8][9] aunque la densidad de potencia es reducida y existen pérdidas en el rotor debido a las ranuras.

En las BEM de velocidades altas la máquina eléctrica y el volante de inercia están integrados formando un solo elemento compacto. En las BEM de velocidades bajas están separados o parcialmente integrados en un confinamiento común.

2.3. CONVERTIDOR DE POTENCIA

Cuando la BEM se conecta a una red DC el convertidor de potencia consiste en un inversor bidireccional (DC/AC), ver Fig. 1 a), casi siempre un puente trifásico de conmutadores [8] funcionando como fuente de voltaje (VSI) y controlado con modulación del ancho de pulso (PWM). El tipo de conmutadores (MOSFET, IGBT, GTO, etc.) dependerá de los voltajes

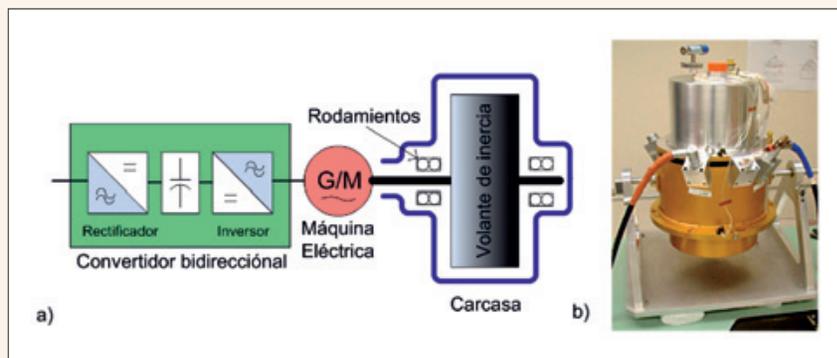


Fig. 1. a) Componentes que forman las BEM b) y detalle de una BEM moderna [2].

Las BEM son adecuadas para el intercambio de potencias medias y altas (kW a MW) durante periodos cortos de tiempo (segundos). En estas situaciones las BEM presentan características favorables frente a las baterías electroquímicas. El número de ciclos de carga y descarga que permiten las BEM es muy elevado (cientos de miles). Este número de ciclos es independiente de la temperatura y de la profundidad de la carga y descarga. Por tanto la vida útil de las BEM es larga (>20 años) y finalizada las BEM no contienen residuos contaminantes. Además la monitorización del estado de carga en las BEM es sencilla y fiable pues basta con saber la velocidad de giro del volante de inercia [1].

2. COMPONENTES DE LAS BEM

Con el objetivo de maximizar E_c según (1) se puede aumentar I aumentando en el volante de inercia el volumen (radio y altura) y la densidad

última generación, ver Fig. 1. b). Por este motivo, el precio de las BEM de bajas velocidades puede ser hasta cinco veces inferior al precio de las BEM de altas velocidades [3] si bien sus prestaciones son siempre inferiores. Las características de ambos tipos de BEM se describen a continuación y se resumen en la tabla 1.

2.1. MATERIAL DEL VOLANTE DE INERCIA

La máxima ω a la que puede girar el volante de inercia está determinada por la capacidad del material del que está hecho para soportar las fuerzas centrífugas a las que está sometido, esto es, por la resistencia al esfuerzo tensil [3].

Por tanto para obtener elevadas densidades de energía (> 0.30 kWh/kg) en el volante de inercia se deben utilizar materiales con elevada resistencia al esfuerzo tensil como los modernos materiales compuestos: fibras de carbono y de vidrio. El

	BEM de velocidades bajas	BEM de velocidades altas
Material del volante de inercia [4] [5]	Acero	Materiales compuestos: fibras de vidrio y de carbono
Tipos de máquinas eléctricas	Asíncrona, de imanes permanentes y de reluctancia variable	De imanes permanentes y de reluctancia variable
Integración [6] del volante y la máquina	Sin integración o con integración parcial	Integración total o parcial
Atmósfera interior a la carcasa [3]	Vacío parcial o gas ligero	Vacío total
Peso de la carcasa [7]	2 × Peso del volante de inercia	½ × Peso del volante de inercia
Tipos de rodamientos [3] [4]	Mecánicos o mixtos (mecánicos y magnéticos)	Magnéticos
Principales aplicaciones	Calidad de la energía [4]	Tracción e industria aeroespacial

Tabla 1. Características de las BEM de velocidades bajas y de velocidades altas.

de bloqueo y las intensidades de conducción necesarios así como de la frecuencia de conmutación. El inversor se controla para que la máquina eléctrica actúe como generador o como motor según se necesite. Una mayor frecuencia de conmutación reduce el rizado en las intensidades y en el par de la máquina eléctrica [5] pero incrementa las pérdidas en los conmutadores.

Cuando la BEM se conecta a una red AC se añade al conjunto anterior un rectificador bidireccional (DC/AC) consistente en otro puente trifásico de conmutadores [8][9] con un condensador como acoplamiento DC [3], ver Fig. 1 a). Este rectificador permite el intercambio de potencia activa y reactiva con la red AC. Una mayor frecuencia de conmutación reduce el rizado en las intensidades facilitando el diseño de los filtros de conexión pero, de nuevo, incrementa las pérdidas en los conmutadores.

2.4. RODAMIENTOS

Los rodamientos mecánicos con-

vencionales son una fuente de pérdidas energéticas, precisan de lubricación y exigen mantenimiento periódico por su desgaste. Para evitar estos inconvenientes las BEM hacen uso, total o parcial, de rodamientos magnéticos en los que el eje levita debido a fuerzas magnéticas repulsivas. Las BEM necesitan de rodamientos mecánicos auxiliares para funcionar cuando los rodamientos magnéticos no están en funcionamiento o cuando se sobrepasa su capacidad de carga [1].

Los rodamientos magnéticos pasivos consisten en imanes permanentes y deben combinarse con otro tipo de rodamientos por ser inherentemente inestables. Los rodamientos magnéticos activos consisten en electroimanes que varían las fuerzas electromagnéticas en función de la posición del eje mediante un sistema retroalimentado. Finalmente los rodamientos magnéticos basados en superconductores aprovechan el comportamiento diamagnético de los superconductores una vez alcanzada la temperatura de superconducción

mediante un sistema de criogenización [10].

2.5. CARCASA

El par de rozamiento aerodinámico es proporcional a la velocidad y a la densidad y presión del gas que rodea al volante de inercia. Para reducir las pérdidas aerodinámicas se confina al volante de inercia en una carcasa con vacío parcial (presión reducida) o con un gas menos denso que el aire [1] en su interior. Para eliminarlas por completo se confina al volante de inercia en una carcasa con vacío absoluto en su interior lo que dificulta la refrigeración de la máquina eléctrica y la lubricación de los rodamientos mecánicos.

La carcasa debe ser capaz de soportar los impactos de los fragmentos del volante de inercia en el caso de su destrucción accidental por exceso de velocidad. Las fibras de los materiales compuestos se desgarran progresivamente en numerosos fragmentos, con movimiento principalmente rotacional, fáciles de retener

La carcasa debe ser capaz de soportar los impactos de los fragmentos del volante de inercia en el caso de su destrucción accidental por exceso de velocidad

por la carcasa ya que su energía se disipa con el rozamiento. El acero estalla violentamente en pocos fragmentos, con movimiento principalmente traslacional, difíciles de retener por la carcasa [7].

3. PRINCIPALES APLICACIONES

Las BEM resultan adecuadas como almacenamiento de energía en aplicaciones relacionadas con la calidad de la energía, la tracción y la industria aeroespacial.

3.1. APLICACIONES RELACIONADAS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Las BEM se utilizan en sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) para cortes de electricidad de los cuales el 97% dura menos de 3 segundos [3] [13]. Las BEM resultan más fiables que las tradicionales baterías de plomo-ácido cuya vida útil depende del número y la profundidad de los ciclos de carga y descarga [1] [3] [4] además de la temperatura.

Las BEM pueden utilizarse para compensar las oscilaciones de potencia provenientes de fuentes de energía renovables solar o eólica [14]. Las BEM almacenan energía durante los periodos de presencia de sol o viento y la devuelven durante los periodos de ausencia [1]. En la Fig. 2 se ilustra un sistema híbrido, combinación de fuentes de energía renovables con grupos diésel. La utilización de BEM disminuye considerablemente el número de ciclos de arranque y parada en el grupo diésel [9] prolongando su vida útil y disminuyendo el consumo y las emisiones.

3.2. APLICACIONES RELACIONADAS CON LA TRACCIÓN

En las máquinas de tracción existe un consumo de energía medio y un consumo de energía fluctuante debido a las aceleraciones y a las frenadas. Habitualmente la fuente de propulsión se sobredimensiona para poder afrontar el máximo consumo de energía en las aceleraciones y la energía del frenado regenerativo suele disiparse.

Más eficiente es dimensionar la fuente de propulsión para el consumo medio de energía y utilizar las BEM para hacer frente al consumo fluctuante de energía. Las BEM almace-

tible, la contaminación y el mantenimiento. Análogos beneficios se obtienen aplicando este esquema a trenes cuya fuente de propulsión es una turbina de gas [1]. En los vehículos eléctricos cuya fuente de propulsión son baterías electroquímicas se prolonga la vida útil de las mismas.

A medio camino entre las aplicaciones relacionadas con la calidad de la energía y la tracción está la utilización de BEM para mejorar la calidad de la energía en las catenarias de metros y trenes eléctricos. Las BEM mitigan las oscilaciones de voltaje en la catenaria y reducen el consumo eléc-

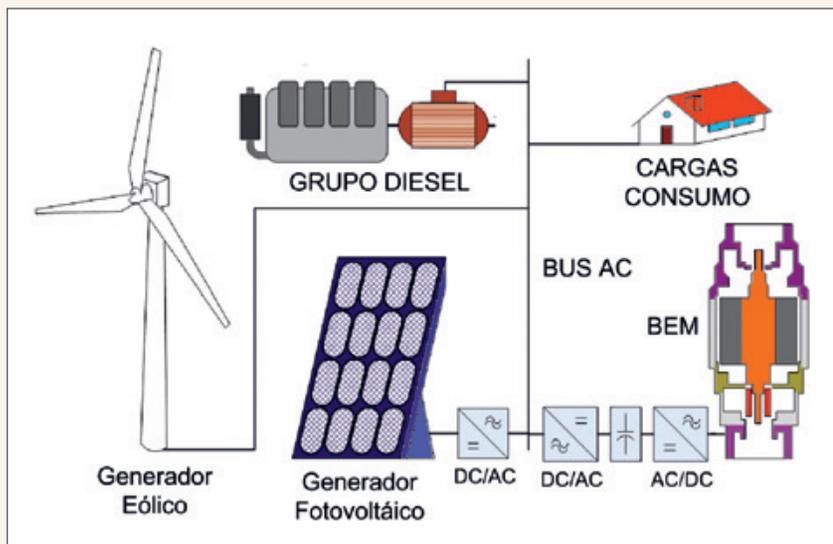


Fig. 2. Sistema de potencia híbrido combinando energías renovables con grupos diésel.

nan energía durante las frenadas y la devuelven durante las aceleraciones. En los vehículos híbridos cuya fuente de propulsión es un motor de combustión interna [1][6], ver Fig. 3 a) y b), se reduce el consumo de combus-

trico total al aprovechar la energía del frenado regenerativo [1]. Además las subestaciones de suministro en estaciones de nueva construcción pueden dimensionarse solamente para el consumo de potencia media encar-

gándose las BEM de la potencia fluctuante de manera análoga a lo anterior [6].

3.3. APLICACIONES RELACIONADAS CON LA INDUSTRIA AEROSPACIAL

Los satélites utilizan baterías electroquímicas durante los periodos de oscuridad que se cargan mediante paneles solares durante los periodos de luz. Al reemplazar las baterías

con la calidad de la energía, la tracción y la industria aeroespacial.

Las BEM son una realidad comercial con más de una docena de fabricantes en el mercado. En [12], disponible en Internet, pueden encontrarse las direcciones web de los principales fabricantes así como un estudio comparativo entre sus productos.

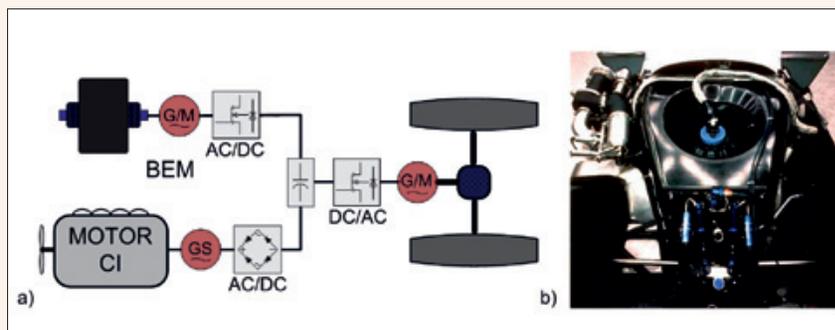


Fig. 3. a) Componentes de un vehículo híbrido utilizando BEM y b) detalle de la BEM en un vehículo híbrido [11]

electroquímicas por BEM, ver Fig. 1. b), se obtienen reducciones en la masa y el volumen, mayor fiabilidad en la monitorización del estado de carga y vida útil más prolongada [1]. Mayores ahorros en peso y volumen son posibles si se utilizan las BEM con una doble función: el almacenamiento de energía y el control de la orientación del satélite [1] [15].

Las BEM también se utilizan para proporcionar el pulso de potencia [1] a los nuevos sistemas electromagnéticos de lanzamiento de aeronaves en portaviones sustituyendo a las catapultas a base de acumuladores de vapor más pesados y menos eficientes.

4. CONCLUSIÓN

Las BEM almacenan energía mecánica mediante la rotación de un volante de inercia. Para maximizar la energía almacenada y minimizar las pérdidas emplean tecnologías convencionales y avanzadas. Resultan adecuadas para intercambios de potencias medias y altas (kW a MW) durante periodos cortos (segundos) y se utilizan en aplicaciones relaciona-

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Hebner, R. et al. "Flywheel batteries come around again". IEEE Spectrum, Published: April 2002 Volume: 39-4, Page(s): 46 -51.

[2] Heiney, A. : "Reinventing the Wheel", NASA explores website. May 26, 2004

[3] Emadi, A. et al. "Uninterruptible Power Supplies and Active Filters". 1st edition, CRC Press, October 28, 2004.

[4] Plater, B. et al. "Advances in Flywheel Energy-Storage Systems". PowerPulse.net by Darnell.Com Inc., March 19, 2001.

[5] Bolund, B. et al. "Flywheel energy and power storage systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 11, Issue 2, February 2007, Pages 235-258.

[6] Hayes, R.J. et al. "Design and Testing of a Flywheel Battery for a Transit Bus". SAE International Congress and Exposition, March 1-4, 1999. PR 265.

[7] Sapowith, A.D. et al. "A composite flywheel burst containment study". Lawrence Livermore National

Lab. Technical Report AVSD-0350-81-RR, April 08, 1982.

[8] Hofmann, H. et al. "Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems". Power Electronics in Transportation, 1996. IEEE Volume, Issue, 24-25 Oct. 1996 Page(s): 199 – 206.

[9] Iglesias, I.J. et al. "Design and simulation of a stand-alone wind-diesel generator with a flywheel energy storage system to supply the required active and reactive power". IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2000. Vol.: 3, Page(s) 1381-6.

[10] Siebert, M. et al. "A Passive Magnetic Bearing Flywheel", Glenn Technical Report NASA/TM—2002-211159. February 2002.

[11] Glenn Research Center; Marshall Space Flight Center "Energy Storage System". Spinoff 1996, DocID: 20020079098.

[12] Ruddell, A. "Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and recommended R&D strategy" Investire-network Storage Technology Report ST6: Flywheel". Contract N° ENK5-CT-2000-20336. Date: 2003-06-17.

[13] Villate, J.L. et al "La calidad del suministro eléctrico y su mejora mediante convertidores de potencia". DYNA Abril 2004. Vol. 79-3, p. 30-34.

[14] Kortajarena, A. et al "La generación distribuida: un paradigma emergente para el sector eléctrico". DYNA Septiembre 2002. Vol 77-6, p. 29-32.

[15] Aznar, L. M. "Orientación de satélites". DYNA Noviembre 2006. Vol. 81-8, p. 13-14. ■