

Primer prototipo español de almacenamiento de energía en bobina superconductora

IGNACIO IGLESIAS DIAZ (*)
LUIS GARCIA-TABARES RODRIGUEZ (*)
JAIME TAMARIT RODRIGUEZ (**)

RESUMEN. Este artículo describe las primeras pruebas que se llevaron a cabo en un almacenador superconductor de energía (SMES) de 20 KJ de energía almacenada a 4,2 °K, desarrollado dentro del marco de un convenio de colaboración firmado entre cuatro instituciones: ACICA, CEDEX, ICMA y el programa MIDAS.

Constituye, también, la segunda parte de otro artículo ya publicado en esta revista y titulado: «Solenoid Superconductor de 10 T para almacenamiento de energía eléctrica».

Tras una breve descripción del principio de funcionamiento de un SMES y de cuáles son sus principales elementos, se hace una relación más detallada de los experimentos que se llevaron a cabo en el prototipo.

Estas pruebas han demostrado que se puede conseguir un rendimiento muy alto en el proceso de carga y descarga de la bobina a través de un convertidor de seis pulsos y que se puede definir un proceso de extracción e inyección de energía a la red, muy seguro y eficaz.

Finalmente, se definen las líneas futuras en el campo de los SMES, así como sus principales aplicaciones.

THE FIRST SPANISH PROTOTYPE FOR STORING ENERGY IN A SUPERCONDUCTOR CYLINDER

ABSTRACT. *This paper describes the first test of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) of 20 KJ at 4.2 °K which has been developed within the framework of a common agreement between four Institutions: ACICA, CEDEX, ICMA and MIDAS, being the second part of a report already published in this review entitled «A 10 Tesla Superconducting Solenoid for Energy Storage».*

After a brief description of how SMES works and which are its main components, a more detailed definition of the tests which have been carried out is presented.

These tests demonstrate that a very high efficiency can be achieved in the entire process of charging and discharging the coil throughout a sixpulses converter, establishing a very reliable procedure of injecting and extracting energy to the electrical grid.

Finally, future trends in the field of SMES are briefly described and which will be their main applications.

1. INTRODUCCION

Recientemente se publicaba en esta misma revista un artículo con el nombre de «Solenoid Superconductor de 10 Tesla para Almacenamiento de Energía Eléctrica», en el que se describía el diseño y la fabricación de la parte más característica de uno de estos almacenadores, la bobina superconductora.

En este segundo artículo se describe el funcionamiento del almacenador superconductor, con todos los elementos que lo integran, analizándose con detalle los resultados de los primeros ensayos a los que ha sido sometido, así como las conclusiones que de ellos se extraen.

Este primer prototipo de almacenador es fruto del trabajo que durante un año ha realizado el Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del CEDEX, encargado del diseño del almacenador, el grupo de empresas ACICA y concretamente de las industrias AME y ABENGOA, encargadas de su fabricación, y el Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón, responsable de las pruebas y asesor en temas criogénicos. Finalmente, gran parte de la financiación y coordinación del proyec-

(*) Dr. Ingeniero Naval. Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX (MOPT).

(**) Dr. en Ciencias Físicas. Sector de Técnicas Físicas y Electrónicas del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX (MOPT).

to ha sido llevada a cabo por el programa de Movilización de la Investigación, el Desarrollo y las Aplicaciones de los Superconductores (programa MIDAS).

El prototipo, capaz de almacenar una energía máxima de 20 KJ a 4,2 °K, ha sido probado con éxito, obteniendo elevados rendimientos, al tiempo que se han puesto a punto los mecanismos de inyección y extracción de la corriente y se ha demostrado la operatividad del sistema.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un almacenador de energía en bobina superconductora se basa en la inyección de corriente en la bobina, almacenando la energía eléctrica en el campo magnético creado por la misma. Los almacenadores de energía o SMES (Superconducting Magnets Energy Storage) encuentran su aplicación principal en la compensación de redes eléctricas, absorbiendo o inyectando energía en la red (refs. 1, 2 y 3).

Por consiguiente, un SMES debe ser capaz tanto de inyectar como de extraer corriente de la bobina. Esto da lugar a que el dispositivo que alimente a la bobina deba ser bidireccional, de forma que la potencia pueda circular en ambos sentidos.

El elemento de electrónica de potencia tradicionalmente utilizado en los SMES es un convertidor de corriente con tiristores, que puede funcionar tanto en modo rectificador (inyección de energía), como en modo ondulatorio (extracción de energía). De cara a eliminar rizado en la parte de continua, los convertidores usados son de doce pulsos constituidos por dos convertidores hexafásicos conectados en serie. En la figura 1 se puede observar el esquema básico de un SMES de este tipo.

A partir de dicha figura podemos analizar el principio de funcionamiento de un almacenador. El elemento 1 es el transformador triángulo-triángulo, estrella-

triángulo, que debe ser utilizado para alimentar al convertidor de corriente de doce pulsos (2 y 3) antes citado.

La carga de la bobina superconductora (7) se producirá aplicando una tensión continua positiva a la misma. Como dicha bobina se puede considerar prácticamente como una carga inductiva ideal, la ecuación que gobierna la carga será:

$$V_d = L \frac{dI_d}{dt} \quad [1]$$

La carga de la bobina se efectúa imponiendo una tensión positiva a la salida del convertidor. Esto se consigue con un ángulo de disparo $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, con el que el puente funciona en modo rectificador; de esta forma al ser positivas la tensión y la intensidad la potencia es positiva, transfiriéndose de la parte de alterna a la de continua. Si la tensión es constante, el incremento de la corriente en la bobina es lineal de acuerdo a la ecuación 1, y la pendiente de dicha subida será proporcional por tanto a la tensión continua. Regulando dicha tensión se puede variar la velocidad de carga de la bobina.

La descarga se conseguirá cambiando la tensión del convertidor y haciéndola negativa con $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. De esta forma la tensión es negativa y la corriente positiva (no puede cambiar de signo, pues lo impiden los tiristores), por lo que la potencia es negativa transfiriéndose de la parte de continua a la de alterna y descargando la bobina. La pendiente de la descarga dependerá igualmente del valor de la tensión negativa que se imponga.

Si se produce algún fallo en el convertidor o en la alimentación, la energía almacenada en la bobina no puede ser devuelta a la red. Para prevenir esta eventualidad se colocan los tiristores de libre circulación de la

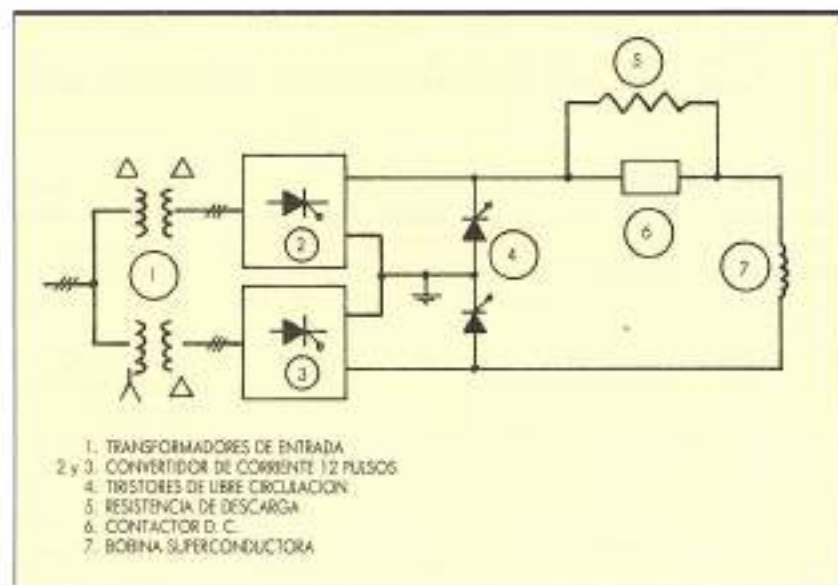


FIGURA 1. Disposición clásica de un SMES.

figura 1, de forma que la corriente de la bobina circulará a través de ellos ante este fallo. Incluso si falla alguno de los convertidores se podrá mantener el otro en servicio disparando el tiristor de libre circulación del puente fuera de servicio.

En el caso de un doble fallo en la alimentación y en el sistema criogénico, la descarga de la bobina se producirá a través de los tiristores de libre circulación y de la resistencia de descarga (elemento 5 de la figura 1), de forma que la energía se disipe mucho más rápidamente que en el caso anterior.

Controlando adecuadamente el ángulo de disparo de los dos convertidores en serie, se puede controlar la potencia activa y reactiva que absorbe o suministra el almacenador. En el caso de convertidores clásicos con tiristores, el ángulo de disparo de éstos puede variar entre 0° y 180° , con lo que la potencia reactiva que suministra el almacenador es siempre inductiva. Además, al tratarse de convertidores conmutados por la red de forma natural, la conmutación adecuada de los tiristores establece un límite de funcionamiento como ondulator en torno a los 150° ; este hecho limita aún más el margen de trabajo del mismo.

Por la razón anterior, la tendencia en los almacenadores de energía es a utilizar convertidores con tiristores apagables por puerta GTO (Gate Turn Off). Esto permite variar el ángulo de disparo entre 0° y 360° , pudiendo suministrar potencia reactiva tanto en retardo (inductiva), como en adelanto (capacitiva). Además, el hecho de no ser conmutados por la red implica que no exista ninguna restricción en el límite del ángulo de disparo (ref. 2).

Otro de los problemas inherentes a los SMES es la generación de armónicos por el convertidor de corriente.

Como la amplitud y el orden de los mismos varían con el control de potencia activa y reactiva, resulta muy difícil la compensación de los mismos mediante filtros pasivos convencionales con bobinas y condensadores. Por ello se tiende a la utilización de filtros activos constituidos por convertidores de transistores que inyectan en la red de potencia corrientes que compensen los armónicos del SMES.

3. DESCRIPCION DEL BANCO DE ENSAYOS DEL PROTOTIPO

Los ensayos a los que ha sido sometido el primer prototipo de almacenador de energía superconductor se han llevado a cabo en las instalaciones que el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA) posee en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad de Zaragoza.

En la figura 2 se muestra el esquema del prototipo.

En dicha figura se observa que el convertidor utilizado es un convertidor trifásico, alimentado a través de un transformador de la red (elementos 1 y 2); por tanto, el rizado de la parte de continua es elevado, para ello se implantó la bobina de alisado (7).

El imán superconductor (3) utilizado en estos primeros ensayos es un solenoide superconductor de 10 Tesla diseñado por el CEDEX y construido por la empresa AME del grupo ACICA, cuyas características y comportamiento se pueden ver con detalle en el artículo publicado en el número anterior de esta revista (ref. 4).

La bobina va acompañada por una protección al «quench» (pérdida del estado superconductor) (4), formada por un grupo de diodos en antiparalelo y una resistencia de descarga. Este elemento no es usual en un almacenador de energía, pero se mantuvo en estos pri-

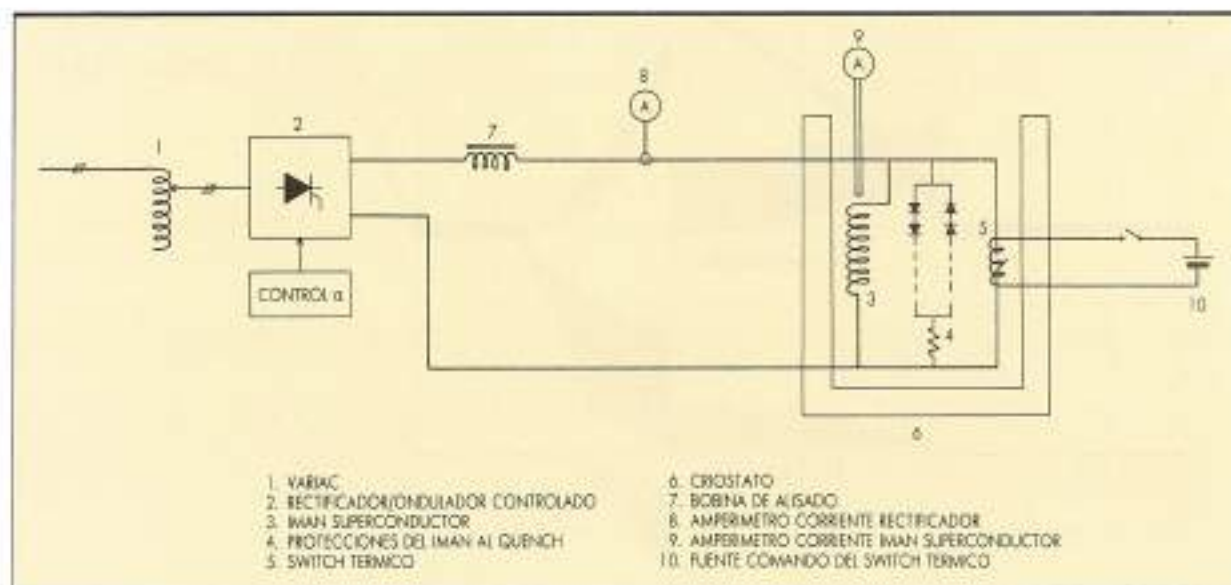


FIGURA 2. Esquema del prototipo de SMES ensayado.

meros ensayos del prototipo como seguridad ante la aparición de «quenche». Como se explicará más adelante en los resultados de los ensayos, hubo que añadir más diodos en serie para aumentar la tensión directa del conjunto de cara a evitar la conducción de los mismos con la consiguiente disipación de Helio. Esto es debido a que el alto rizado de la continua da lugar a la aparición de una componente alterna, que si supera la tensión directa de los diodos circulará por ellos, pues el imán superconductor supone una impedancia cuasi infinita a dicha componente.

El último componente que se puede ver en la figura 2 es el switch térmico (5). Este está constituido por un hilo superconductor con un devanado de calentamiento alimentado por una fuente externa (10), de forma que al ser calentado pierde sus características superconductoras y ofrece una resistencia muy superior a la de la bobina, que equivale a una apertura del circuito. Este switch va colocado en paralelo con la bobina de forma que al cerrarlo la corriente de la bobina se queda atrapada en ella y en el switch, pudiéndose apagar en ese instante el convertidor y quedando la energía almacenada en el campo magnético del imán superconductor.

El esquema del prototipo de la figura 2, aunque no reproduce exactamente el esquema de un SMES real, sirvió para efectuar las primeras pruebas de almacenamiento. Los resultados, como se verá en el siguiente

apartado, han sido muy satisfactorios y han servido para dominar la técnica de almacenamiento, analizar rendimientos etc.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS. RESULTADOS DEL PROTOTIPO

Los primeros ensayos fueron realizados en los días 16 y 17 de junio de 1992. En estos primeros ensayos algunos elementos de la figura 2 no estaban incluidos en el banco. Estos elementos eran el filtro de alisado (7) y el switch térmico (5). Los diodos de protección de «quenche» estaban constituidos por tan sólo dos grupos en serie con lo que la tensión directa era de tan sólo 3 V.

En la figura 3 se puede observar el oscilograma de un proceso de carga y descarga de la bobina. Hay que señalar que ante la ausencia de «switch» térmico la energía no podía quedar atrapada. En dicha figura aparecen la corriente que suministra el rectificador, la tensión en bornes y la potencia (producto de las anteriores). En la transición entre la carga y la descarga se puede apreciar un salto brusco en la corriente. Este salto de la corriente del rectificador es debida a que en ese instante entran en conducción los diodos de protección de «quenche», absorbiendo parte de la corriente de la bobina. Este fenómeno fue minimizado en los siguientes ensayos.

En la figura 4 se puede observar el balance energético

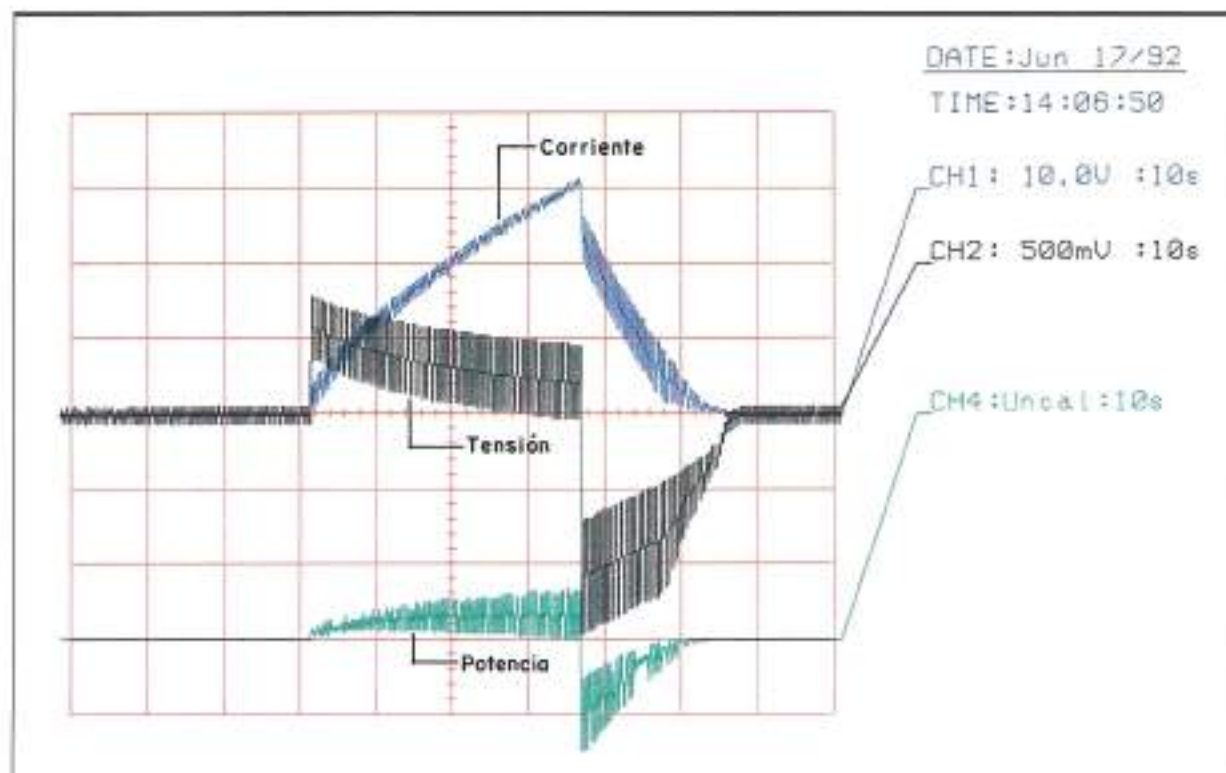


FIGURA 3. Corriente, tensión y potencia en una carga y descarga de la bobina.

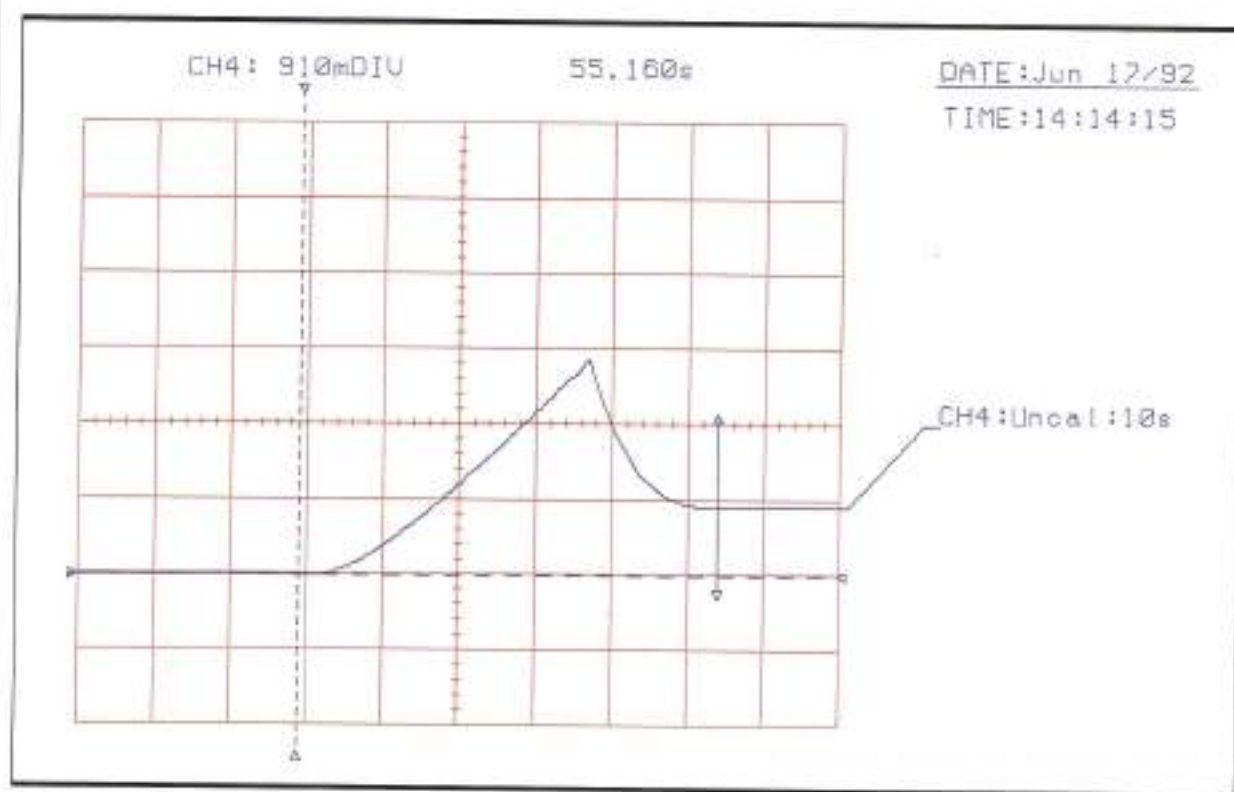


FIGURA 4. Balance energético en el proceso de carga y descarga.

co del ensayo anterior, integrando en el osciloscopio digital la potencia a lo largo del tiempo (energía). En dicho balance energético se observa que se recupera el 70 % de la energía, porcentaje bajo debido a la conducción de los diodos antes reseñada y que fue mejorado ampliamente en los ensayos definitivos.

Los siguientes ensayos se llevaron a cabo en las mismas instalaciones el día 22 de julio de 1992. En ellos se aumentó el número de diodos en antiparalelo hasta conseguir una tensión directa de 9 V. Asimismo se colocó el «switch» térmico que permitía dejar almacenada la corriente en la bobina.

En estos ensayos se procedió ya a almacenar energía en la bobina durante un tiempo considerable. Durante cuatro horas de almacenamiento la medida del campo magnético en el interior del imán dio como resultado una disminución del mismo de un 0,1 %. Esta disminución puede tener su origen en las soldaduras superconductoras que se llevaron a cabo para la implantación del «switch» térmico.

El objetivo más importante de los ensayos era familiarizarse con los procedimientos de carga y descarga de la bobina, así como hacer medidas más reales del rendimiento del almacenador superconductor. Ambos aspectos fueron realizados con éxito como puede observarse a continuación.

En el oscilograma de la figura 5 se puede observar

un proceso completo de carga y descarga. En el canal 1 (negro) se representa la tensión en bornes de la bobina, en el canal 2 (azul) la medida del campo en el interior del imán mediante una sonda de efecto Hall insertada en el criostato y en el canal 3 (verde) la corriente continua suministrada por el puente rectificador.

La zona 1 corresponde al proceso de carga de la bobina, llegando en este caso hasta 46,3 A que corresponden a un campo de 3,22 T, el ángulo de disparo del rectificador es de $\alpha_1 = 35^\circ$. La carga no se produce de forma lineal al no mantenerse constante la tensión en bornes del imán, debido a la caída de tensión del convertidor que aumenta proporcionalmente a la corriente (resistencia interna del convertidor).

En la zona 2 se activa el «switch» térmico, quedando atrapada la corriente en la bobina. Durante este período se puede observar que la corriente del rectificador es igual a la del imán, con lo cual la corriente en el «switch» es nula.

En la zona 3 se produce el apagado de la corriente del rectificador. Para conseguir esto no se puede apagar el rectificador sin más, ya que la bobina de alisado a la salida del mismo no permitiría la anulación instantánea de la corriente. Por tanto, lo que se hace es aumentar el ángulo de disparo por encima de 90° ($\alpha_2 = 92^\circ$) de forma que el puente funcione como ondulator y se recupere la energía almacenada en la bobina de alisado. Una

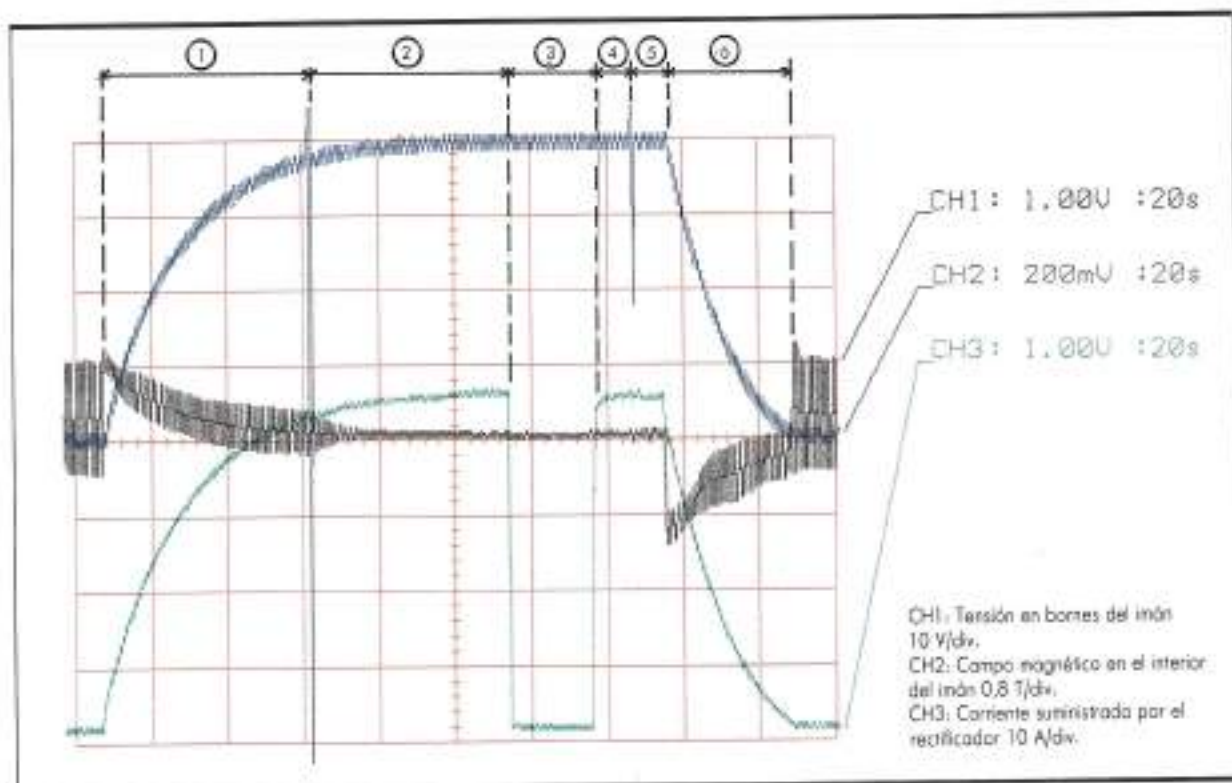


FIGURA 5. Carga y descarga del inductor superconductor.

vez anulada la corriente, la fuente puede ser apagada y la energía queda completamente almacenada en la bobina superconductora.

En la región 4 se vuelve a encender el rectificador, llevándolo al mismo ángulo de disparo inicial y circulando por él una corriente igual a la almacenada en la bobina.

En la región 5 se abre el «switch» térmico y por último en la región 6 se varía el ángulo del rectificador ($\alpha_2 = 92^\circ$), que al pasar a funcionar como ondulator recupera en este período la energía almacenada.

La velocidad de esta recuperación se puede variar con el ángulo de disparo (a mayor ángulo, recuperación más rápida), de igual manera que el tiempo de carga en el período se puede aumentar con un ángulo más bajo de disparo.

La maniobra de carga y descarga anteriormente descrita ha sido realizada de forma manual, por lo que algunos períodos son excesivamente largos. En un proceso automatizado los períodos 2, 4 y 5 serían reducidos a tiempos mínimos, quedando únicamente los períodos 1 (carga), 3 (almacenamiento) y 6 (descarga).

En las figuras 6 y 7 se ha realizado el balance energético del proceso. En ambas se representa la potencia suministrada a la bobina, producto de la tensión e intensidad de la misma (CH1 y CH2 de la figura 5). La inte-

gral de la potencia es la energía, dicha integral se ha realizado digitalmente en ambas figuras. En la figura 6 se obtiene la energía almacenada y en la figura 7 la energía devuelta a la red. El rendimiento del proceso es del 91 %. Automatizando el proceso y disminuyendo al mínimo los períodos 2, 4 y 5 se podría realizar un balance más exacto del rendimiento mediante una integración continua como la efectuada en la figura 4.

Finalmente en la figura 8 se muestra una fotografía de la instalación con la que se llevaron a cabo los experimentos anteriores. En primer plano, a la derecha, puede verse el rectificador y su sistema de control y en un segundo plano el transformador de entrada y el criostato que contiene la bobina superconductora y las protecciones de «quench».

5. CONCLUSIONES. LINEAS FUTURAS DE TRABAJO

Las pruebas descritas suponen un primer paso en el desarrollo de un almacenador superconductor industrial.

Las conclusiones más importantes que se pueden extraer de dicho desarrollo se podrían resumir en las siguientes:

— Diseño y construcción de la bobina superconductora.

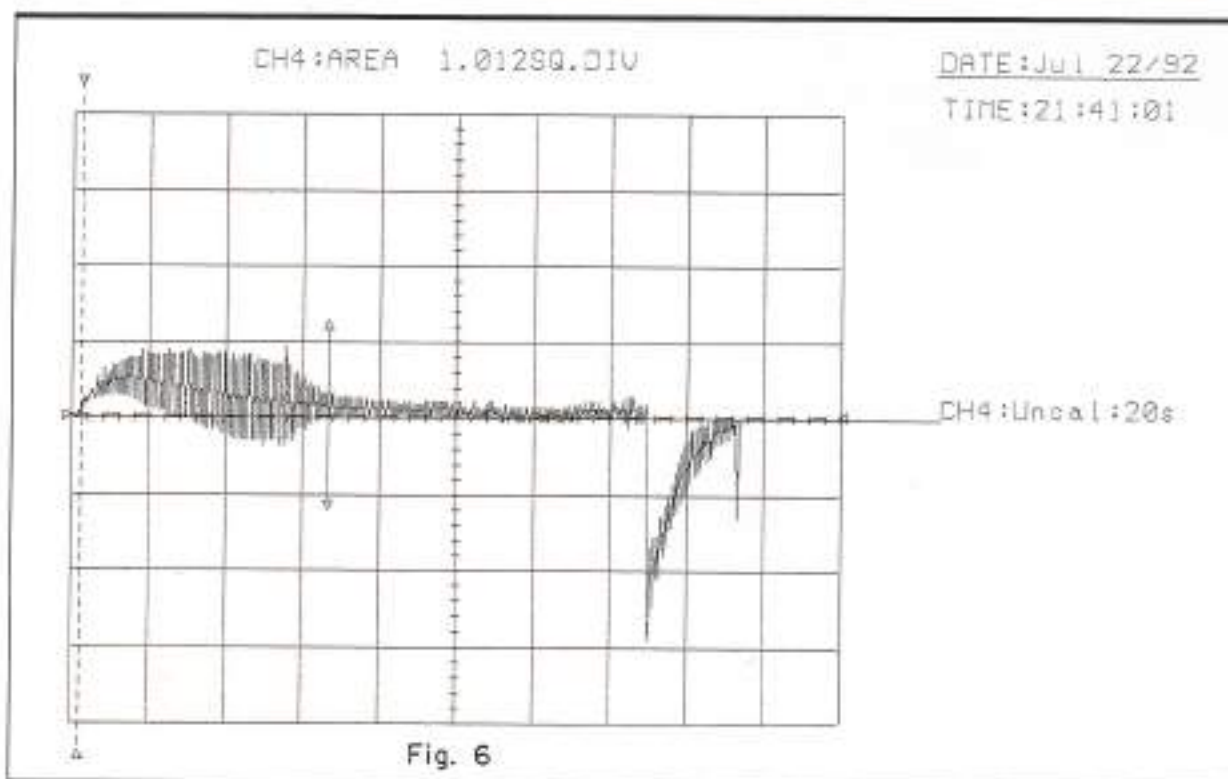


FIGURA 6. Potencia en carga y descarga. Medida de la energía almacenada.

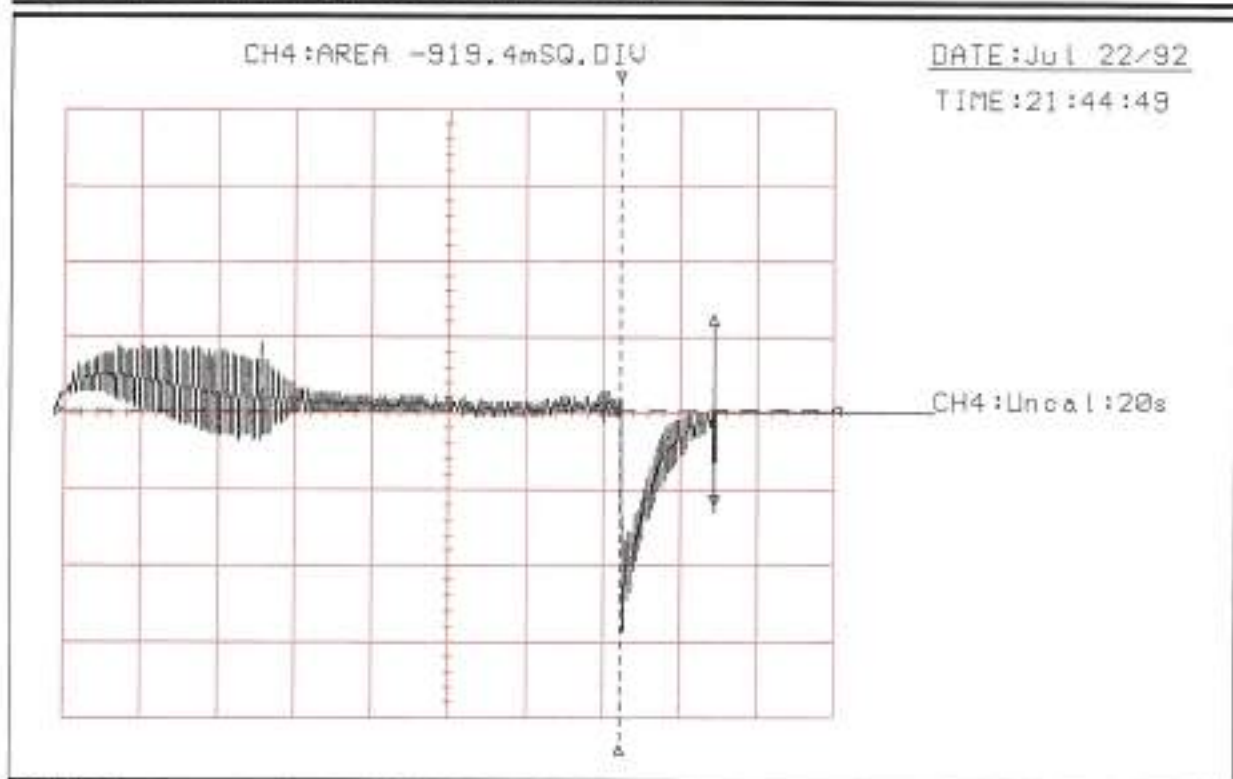


FIGURA 7. Potencia en carga y descarga. Medida de la energía devuelta a la red.



FIGURA 9. Banco de ensayos del almacenador superconductor.

- Diseño y construcción de un convertidor trifásico apto para el almacenamiento de energía.
- Realización de las primeras pruebas de almacenamiento superconductor de energía.
- Comprobación de la viabilidad del almacenador y de su alto rendimiento.

- Análisis de los distintos periodos en el proceso de carga y descarga de la bobina.

Las líneas futuras de trabajo estarían encaminadas al desarrollo de un almacenador superconductor industrial de 1 MJ. Para ello los pasos a seguir se podrían resumir en los siguientes puntos:

- Diseño y construcción de un imán superconductor de mayor corriente nominal.
- Diseño y construcción de un convertidor de doce pulsos de cara a reducir el rizado. Este convertidor sería con tiristores en una primera fase y con GTO's en una segunda de cara a controlar completamente la energía reactiva.
- Estudio de la implantación de filtros activos de red para disminuir el contenido de armónicos que se introducen en la misma.
- Estudio y desarrollo del control por microprocesador del almacenador. Control de la energía activa y reactiva en compensación de redes. Optimización del proceso de carga y descarga del imán superconductor.

REFERENCIAS

1. BOENING, H. J., y HAUER, J. F. «Commissioning Tests of the Bonneville Power Administration 30 JM Superconducting Magnetic Energy Storage Units», *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, núm. 2, febrero, 1985.
2. ISE, T.; MURAKAMI, Y., y TSUJI, K. «Charging and Discharging Characteristics of SMES With Active Filter in Transmission System», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-23, núm. 2, pp. 545-557, marzo, 1987.
3. MITANI, Y.; MURAKAMI, Y., y TSUJI, K. «Experimental Study on Stabilization of Model Power Transmission System by Using four Quadrant Active and Reactive Power Control by SMES», *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-23, núm. 2, pp. 541-544, marzo, 1987.
4. GARCIA-TABARES, L., y TAMARIT, J. «Solenoid superconductor de 10 Tesla para almacenamiento de energía eléctrica», *Revista Ingeniería Civil*, núm. 85, 1992.



Pico GOKYO (Himalaya) 5.493 m.

Barcelona '92

Las cotas más altas

han sido cubiertas



Torre Aeropuerto

Torre de Montjuic

Torre Mapfre

Torre de Colserola



CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES

TODO EN SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL

• Equipos reflectantes para Policía Municipal.



• Señales de Tráfico pintadas y reflexivas.



• Nueva señalización urbana.



• Barreras de Seguridad.

• Señalización para obras.



señalizaciones **VILLAR**

Avda. Valladolid, 58 apdo. 61 42004 SORIA

Telf. (975) 22 05 04

Fax (975) 22 06 45