

La superconductividad y sus aplicaciones

2ª parte

Gustavo Sarmiento ¹, Santiago Sanz ¹, Ainhoa Pujana ¹, José María Merino ¹, Aitor Kortajarena ²,

Raúl Rodríguez ³, Susana Apiñániz³

¹ Área de Energía Marina, Energía y Medio Ambiente. TECNALIA

² Servicios. TECNALIA

³ Redes Eléctricas Inteligentes, Energía y Medio Ambiente. TECNALIA

5. APLICACIONES INDUSTRIALES Y ENERGÉTICAS

5.1. ELECTRÓNICA

Las aplicaciones para electrónica están basadas principalmente en las propiedades únicas de las uniones Josephson. Por sí misma, una unión Josephson es un perfecto convertidor voltaje-frecuencia (efecto Josephson AC). Un ejemplo es la aplicación en amplificadores de radiofrecuencia donde una señal RF (radiofrecuencia) genera un flujo magnético en un circuito acoplado con un DC-SQUID. El efecto Josephson permite convertir el flujo dentro del SQUID en una señal de tensión, proporcional al número de φ_0 . Esta es la base de las aplicaciones de microondas; la inductancia SQUID junto con la capacidad de la unión permite, también, utilizar el dispositivo como resonador.

Inicialmente, las uniones Josephson fueron la base de la lógica de conmutación superconductora (lógica basada en cambios de tensión durante transiciones superconductoras). Fue ampliamente estudiada desde los años 60, hasta los 90, principalmente en proyectos americanos en IBM y japoneses en MITI. Las limitaciones de esta aproximación condujeron a la lógica basada en el almacenamiento y transmisión del cuanto de flujo, es decir, al uso del *fluxón* como bit de información. Así la tecnología RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) desbancó a la anterior¹⁹. La posibilidad de miniaturización de estas uniones y su integración en microcircuitos abrió la posibilidad de construir circuitos digitales ultrarrápidos como por ejemplo

convertidores analógicos-digitales o incluso desarrollar ordenadores con tecnologías basadas en la lógica RSFQ, capaz de trabajar a frecuencias de reloj de 100 GHz²⁰. Finalmente, el comportamiento no lineal de los SQUID junto con la posibilidad de la realización de medidas directas de efectos cuánticos, abren la posibilidad de la computación cuántica usando “qubits” de la carga, energía o fase de los fluxones²¹.

5.2. TRANSPORTE

Otra área de interés es la del transporte. Los trenes de levitación magnética (*maglev*) son una alternativa a la tecnología convencional de la rueda y rail. Existen, básicamente, dos tipos diferentes de *maglevs*: el superconductor o electrodinámico y el no superconductor o electromagnético. La única línea comercial existente (llamada Transrapid) conecta Shanghai con su aeropuerto y es un recorrido de 30 km en el que se alcanza una velocidad máxima de 430 km/h. La tecnología usada no es superconductora. La implementación superconductora se denomina SCMA-GLLEV. El récord absoluto de velocidad en vehículos tripulados es de 581 km/h y fue obtenido en el circuito experimental de Yamanashi de 42,8 km de longitud en el 2003, por la compañía Central Japan Railway. Los imanes superconductores se colocan en el tren y se enfrían mediante recirculación de helio líquido. El sistema trabaja en modo persistente y tanto la levitación como el guiado y la propulsión se consiguen a través de las fuerzas entre las bobinas superconductoras en el tren y las bobinas resistivas colocadas en la

pista. Las corrientes en las bobinas resistivas son inducidas por los arrollamientos superconductores. La compañía japonesa, en su informe anual del 2011²², asegura estar preparada para una eventual transferencia industrial de este producto.

5.3. SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Existe un uso industrial del magnetismo en el que la superconductividad ha encontrado también su hueco: se trata del *separador magnético*. La necesidad de campos magnéticos relativamente elevados (>2 T) en esta aplicación permite, además de la eliminación de los contaminantes ferromagnéticos, la separación de componentes diamagnéticos y paramagnéticos. Por ejemplo, en la industria del caolín (elemento base de la porcelana fina y en la fabricación del papel de alta calidad), la separación magnética elimina las pequeñas impurezas paramagnéticas de Ti y las ferromagnéticas de Fe que oscurecen la pasta. El beneficio está relacionado con la blancura y brillantez del producto. Otros campos de aplicación, por ejemplo, son la purificación de aguas residuales o la descontaminación de suelos. La superconductividad ofrece máquinas de menor tamaño, con mayores campos magnéticos, disminuyendo críticamente el consumo energético. El primer separador magnético superconductor (LTS) fue puesto en operación en Georgia (EE. UU.) en 1986; Outotec, una compañía dedicada al procesamiento de mineral ofrece un separador magnético basado en tecnología LTS. El producto ha sido instalado en Reino Unido, EEUU, Brasil, Alemania, Australia, China, y la República Checa²³.

5.4. CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN

Esta aplicación industrial también ha comenzado a ser invadida por la

tecnología superconductor. Un desarrollo comercial reciente es el sistema de calentamiento de lingotes de aluminio, desarrollado por Bültmann GmbH en 2009 en cooperación con Zenergy Power GmbH. El sistema está basado en el principio de calentamiento superconductor en DC²⁴, en el que un lingote de aluminio gira sobre su eje largo bajo un gradiente de campo magnético constante, generado por imanes HTS refrigerados con nitrógeno líquido. Cabe destacar el beneficio añadido que tiene en ahorro de tiempo y energía además de una mejor homogeneidad en el calentamiento frente a los sistemas convencionales basados en corriente alterna.

5.5. APLICACIONES ENERGÉTICAS

Los beneficios de la superconductividad en el caso de las aplicaciones ligadas a la red eléctrica están relacionados con su capacidad para desarrollar sistemas más eficientes, ligeros y compactos que los basados en tecnologías convencionales o con el hecho de ser la única tecnología capaz de desarrollar los tremendos campos magnéticos necesarios para confinar los plasmas, en el caso de la fusión.

Respecto a la conexión a red, las aplicaciones más inmediatas son los cables, motores/generadores y transformadores (capaces ya de remplazar a sus contrapartidas resistivas) y los SMES, limitadores de corrientes superconductores y sistemas integrados de potencia, que presentan nuevos avances sobre los dispositivos convencionales. Este hecho merece una reflexión sobre los dispositivos convencionales: estos son estándares, más baratos y muy optimizados a través de su uso casi centenario. Así, entre las razones que pueden estar evitando el despegue definitivo de las aplicaciones superconductoras en la red, podrían encontrarse una tecnología no suficientemente conocida, un cierto talante conservador de la industria eléctrica o la barrera, fundamentalmente psicológica, de la necesidad de criogenizar los sistemas.

5.5.1. Fusión

Una de las tecnologías emergentes más prometedoras para obtener energía en el futuro es la fusión de núcleos ligeros. Sin embargo, para vencer las fuerzas de repulsión electrostáticas entre los núcleos se necesitan temperaturas del orden de 100 a 150 millones de grados: materia en estado de plasma. Obviamente, no hay material capaz de trabajar a estas temperaturas y una de las posibles alternativas es la de confinar los plasmas mediante altos campos magnéticos, generados por bobinas superconductoras. La tecnología seleccionada en el ITER (*International Thermonuclear Energy Reactor*) está basada en bobinados LTS de Nb₃Sn, para crear campos magnéticos de hasta 11.8T, aunque en el próximo paso de desarrollo de la fusión, que será DEMO (*DEMONstration Power Plant*), se sustituirán previsiblemente por HTS.

El sistema de fusión intenta crear una especie de botella magnética. Para ello existen diferentes configuraciones de bobinas. La más común (adoptada en ITER) es la TOKAMAK. En la configuración tipo STELLARATOR, el plasma se suele calentar usando microondas generadas en fuentes llamadas girotrones. El haz de electrones en el girotrón se comprime mediante altos campos magnéticos y la radiación sincrotrón generada se recoge en una cavidad resonante en la zona de mayor campo magnético. La máxima densidad de flujo depende del diseño particular de cada girotrón, pero normalmente está entre 1 y 4 T. Estos campos no se pueden generar de manera práctica con imanes resistivos y por lo que es obligado el uso de la superconductividad. Para esta aplicación los superconductores tipo HTS tienen mayor eficiencia pero los LTS son normalmente más baratos.

5.5.2. Cables superconductores

Los cables superconductores pretenden dar una solución al continuo incremento de la demanda de energía en ciudades densamente pobladas, que sobrecargan las líneas eléctricas existentes y que normalmente se encuentran

enterradas. Los cables superconductores, especialmente los basados en HTS, presentan beneficios clave frente a los convencionales, como su capacidad para transportar corrientes hasta cinco veces superiores, su menor impedancia y la reducción dramática de las emisiones de campo electromagnético al exterior. Además, usan LN₂ para enfriamiento (que es barato e inócuo para el medioambiente), necesitan menos espacio disponible para ser instalados en los conductos existentes, tienen una gran capacidad a baja tensión -lo que permitiría la eliminación de algunos niveles de tensión de la red- y pueden usarse simultáneamente y sin costo adicional como limitadores de corriente de falta.

Los cables HTS diseñados para transmisión AC son de tres tipos: cables monofásicos con dieléctrico a temperatura criogénica, cables monofásicos con dieléctrico a temperatura ambiente y cable TriaxTM, con las tres fases agrupadas en la misma envolvente²⁵. Se pueden encontrar algunos ejemplos de prototipos en EEUU. AMSC y Nexans han desarrollado y entregado en 2008 un cable de 1G HTS con capacidad para 2500 A, 138 kV para la LIPA (Long Island Power Authority) de New York. Fue el primer cable superconductor conectado a la red de transporte. Así mismo, Superpower Inc y Sumitomo construyeron y pusieron en servicio un cable de 34,5 kV y 800 A en la National Grid de Albany (New York). Inicialmente, fue fabricado con 350 m de cinta 1G HTS (2006), si bien posteriormente una sección de 30 m fue sustituida por conductor HTS de 2G (2008). Otro ejemplo interesante es el cable TriaxTM de ULTERA, de 200 m y con capacidad para 3000 A y 13,2 kV, instalado en la red de American Electric Power en Columbus, Ohio (2006), con la mayor parte de su longitud soterrada. Por otro lado, China también posee su propio cable conectado a red en la subestación Puji Substation of China Southern Power desde 2004, con un cable de 33,5 m y 35 kV. En Corea del Sur se instaló en 2011, cerca de la ciudad de Seúl, un cable de

2G HTS con capacidad para 50 MW y 22,9 kV; se empleó el superconductor tipo *Amperium* de AMSC y se instaló en la red de KEPCO (Korea Electric Power Company).

Recientemente se ha estado hablando de los sistemas de evacuación basados en la tecnología HVDC (*High Voltage Direct Current*), para extraer energía de parques eólicos²⁶. Para esta aplicación, los cables superconductores se convertirían en una opción más competitiva que la resistiva.

5.5.3. Máquinas rotativas superconductoras

Los mayores beneficios del uso de la superconductividad en máquinas rotativas son la capacidad de generar altos campos magnéticos, y con la consecuente reducción en tamaño y peso. También la eficiencia puede mejorarse, aun incluyendo la potencia usada en la criogenización de la máquina. El interés comenzó en los años 60, con materiales LTS y el LHe como refrigerante. Después de algunos proyectos de demostración, los diseños más efectivos resultaron ser los homopolares y las máquinas síncronas. En los años 80, la misma motivación de conseguir máquinas más compactas y ligeras, encontró un nuevo nicho: las máquinas navales. La armada estadounidense instaló un generador homopolar de 300 kW y un motor, también homopolar, de 400 hp en el navío Jupiter II, el primero propulsado completamente con tecnología superconductora²⁷. El programa japonés “*Super-GM project*”,

llevado a cabo por NEDO, financió el diseño y ensayo en red de rotores LTS: un generador de 70 MW estuvo trabajando en una central de Osaka más de 1500 horas²⁸.

El descubrimiento de los HTS reforzó el interés en las máquinas rotativas superconductoras ya que permitían el uso de temperaturas de refrigeración mayores que las del LHe, sobre 30-50K²⁵. Algunos ejemplos destacados, desarrollados y construidos para aplicaciones navales, son el generador de Siemens²⁹, de 4 MVA a 60 Hz y 3600 rpm. También AMSC y Alstom (hoy Converteam) desarrollaron un motor naval³⁰ de 5 MW y 230 rpm. La ONR (*Office of Naval Research*) financió la construcción de un motor síncrono de 120 rpm y 3 MN m de par, construido por AMSC³¹.

Estos proyectos han demostrado el potencial de la superconductividad en grandes aplicaciones de potencia, obteniendo máquinas más pequeñas y ligeras (consiguiendo reducciones del 30% en máquinas navales) con mayor par y mejores prestaciones que las convencionales.

Otra aplicación es el *condensador síncrono*, desarrollado por AMSC. La empresa ha construido e instalado un máquina de 8 MVAR y 13,8 kV, para compensar la potencia reactiva de un horno de arco en la planta de acero de Hoeganes en Gallatin- Tennessee³².

Una aplicación diferente es el proyecto *Hydrogenie*, en el que Converteam y Zenergy han desarrollado un

generador HTS de 1,25 MW, refrigerado por helio gas para ser ensayado en la planta hidroeléctrica de Hirschaid, Alemania. El proyecto fue financiado por la Comisión Europea en el marco del FP6³³.

Los *generadores para turbinas eólicas*, especialmente los de accionamiento directo, aparecen como una aplicación prometedora de las máquinas superconductoras ya que cumplen los requisitos de gran potencia a reducido tamaño demandados por la industria. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) en su hoja de ruta tecnológico de 2009 (*Technology Roadmap Wind Energy*⁴¹) señala las aplicaciones superconductoras como una prioridad en su plan estratégico para 2009-2014 y como un medio para reducir el tamaño, el peso y evitar el uso de multiplicadoras en turbinas eólicas.

En la actualidad, la aplicación de la superconductividad en turbinas eólicas es un actividad de I+D muy activa, seguida por varios grupos y compañías en el mundo (alguna de las cuales con gran competencia técnica y presencia en el mercado como *General Electric*). Un resumen de los proyectos actuales conocidos se presenta en la tabla 2. Hasta el momento, ninguno de estos proyectos ha obtenido resultados que sean directamente aplicables a la industria eólica, si bien su mayor potencial se encuentra en localizaciones marinas “offshore”. En todos los proyectos mostrados, se utilizan fluidos criogénicos para refrigerar el rotor, donde la compatibilidad de su manejo

Año	Institución	País	Potencia (MVA)	Velocidad (rpm)	Polos de Fe	Inducción	Armadura	Criogénia	Estado	Ref. #
2011	GE	EEUU	15	10?	?	HTS	?	Refrigerantes	?	34
2010	AMSC/ Teco Westinghouse	EEUU	10	10	No	2G HTS	Cobre / bobinado airgap	Refrigerantes	??	35
2009	AML Energy	EEUU	10	10	No	MgB ₂ (double-helix winding)	MgB ₂ (bobinado de doble hélice)	Refrigerantes	Fase de estudio de diseño	36
2009	Converteam / Zenergy Power	UK/ Alemania	8	12	No	2G HTS	Cobre / bobinado airgap	Refrigerantes	??	37
2008	RISO-DTU	Dinamarca	10	?	No	1G HTS	Cobre / bobinado airgap	Refrigerantes	Fase de estudio de diseño	38 39 40

Tabla 2: Resumen de proyectos dedicados al uso de la superconductividad en turbinas eólicas.

en ambientes marinos no ha sido convenientemente sopesada. La fiabilidad del sistema tiene que considerarse cuidadosamente, así como el manejo y la disponibilidad del fluido criogénico. La instalación de un generador en el medio del océano y en lo alto de una torre también requiere de un procedimiento de ensamblaje robusto y asegurable. El enorme par desarrollado y que debe transmitirse desde temperatura ambiente hasta el entorno criogénico presenta también serios problemas mecánicos. Y, además, la mayoría de los proyectos emplean materiales superconductores extremadamente caros y no comercialmente disponibles, como los 2G HTS, o materiales con poca perspectiva de reducción de costes en el futuro como los 1G HTS, como se muestra también en la Tabla 2.

Reconociendo esta situación, TECNALIA ha completado una fase inicial de desarrollo, que ha llevado a la generación de una patente consistente en un novedoso concepto de generador eólico superconductor basado en una tecnología específicamente adaptada para turbinas “offshore”. Algunos avances se muestran en el apartado sobre la descripción del proyecto SUPERTURBINES.

Por otro lado, otro interesante campo de aplicación, también relacionado con el transporte, es la aviación⁴². En este caso las motivaciones son la disminución de emisiones de efecto invernadero y de contaminantes, mediante la reducción del consumo de combustible, así como la reducción del ruido en los aeropuertos. La superconductividad parece ser la única tecnología capaz de proporcionar motores eléctricos en aviones, con la futura densidad de potencia, ligereza y compacidad requeridas por la industria aeronáutica. Como cualquier otra máquina superconductora, el enfriamiento es una dificultad y los materiales HTS parecen ser la solución en detrimento de los tradicionales LTS. General Electric ha presentado recientemente su desarrollo de un generador de alta velocidad específico para aviación⁴³. Se trata de un motor homopolar con bobinas fabri-

cadadas con cintas BISCCO y polos de hierro que operan a ~ 30 K, con 150 A de corriente y ~ 1 T de campo de pico. Desarrolla 1 MW de potencia a 15000 rpm.

5.5.4. Otras máquinas eléctricas Transformadores

Los transformadores son el equipamiento más utilizado en la red eléctrica ya que se usan en la generación, transmisión y distribución de energía para elevar y reducir el nivel de tensión. Hasta la llegada de los materiales HTS, los transformadores basados en LTS no eran capaces de competir con los convencionales, que presentan una eficiencia superior al 99,5%.

Los transformadores HTS ofrecen algunos beneficios que pueden convencer a una compañía eléctrica: eficiencia mejorada trabajando entre 50 y 70 K, capacidad de trabajo en sobrecarga y un potencial uso como limitador de corriente. También permiten eliminar el aceite, y su ligereza y compacidad permiten su uso dentro de ciudades con un reducido impacto ecológico. Atendiendo a sus aspectos técnicos, surgen algunas dificultades debidas a las pérdidas AC inducidas en el superconductor o las debidas a la transferencia de calor desde las proximidades, principalmente debido a la histéresis en el hierro (lo que hace irrealizable configuraciones de hierro frío). Mientras que la refrigeración y el aislamiento a temperaturas criogénicas son la auténtica dificultad técnica, los precios de las cintas HTS (tanto 1G como 2G) no permiten el desarrollo de un dispositivo competitivo. Aun así, Siemens⁴⁴ y Railway Technical Research Institute⁴⁵ han ensayado respectivamente, transformadores de 1 MVA y 4 MVA en trenes – en los que la reducción de peso es importante-. En España se han llevado a cabo algunos estudios básicos en el grupo de A. Álvarez de la Universidad de Extremadura⁴⁶.

SMES

SMES es el acrónimo de “*Superconducting Magnetic Energy Storage*”. Dicho sistema de almacenamiento fue

propuesto en 1969⁴⁷ en Francia, como una alternativa para almacenar energía eléctrica que pudiese entregarse a red en un pico de demanda. De hecho, el SMES es el sistema de almacenamiento más eficiente (sobre 95%), con mayor tiempo de vida útil y rápida respuesta comparado con baterías, “flywheel”, bombeo de agua o condensadores. Además, las SMES pueden ayudar a controlar las oscilaciones de frecuencia en la red, merced de su rápida dinámica de respuesta que evitaría la aparición de inestabilidades en la misma. La Figura 3 muestra tal sistema en una conexión simplificada a la red. A pesar de su potencial de mejora con el remplazo por cintas HTS y con el ahorro en espacio y potencia de refrigeración; el nicho de mercado parece estar limitado a escasos ejemplos cercanos a las industrias que generan grandes fluctuaciones de potencia en la red. Por ejemplo una SMES de 5 MVA ha sido instalada en una fábrica de paneles LED por la compañía Chubu Electric Power in 2003⁴⁸. También se ha propuesto el uso de SMES para lanzadores electromagnéticos⁴⁹; tal aplicación podría, por ejemplo, ahorrar costes de lanzamiento de cargas al espacio. En España, de 1994 a 1998, se llevó a cabo el proyecto AMAS500, con la participación de ANTEC S.A, ASINEL S.A, ENERTRÓN S.A, CEDEX e ICMA. El proyecto consistió en el desarrollo de un sistema SMES, su

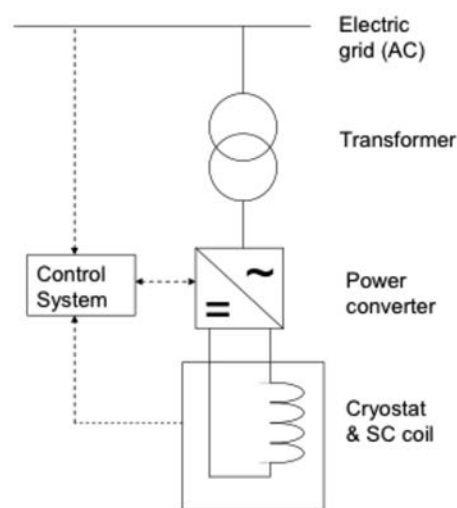


Figura 3: Diagrama de conexión a red de un SMES

criostato y de un convertidor electrónico para gestionar la transferencia de energía a la red⁵⁰. La figura 4 muestra los demostradores de SMES de 25 kJ como paso inicial para el desarrollo de los definitivos de 0.5 MW y 1 MJ.

Limitadores de corriente superconductores (SCFCL)

Las líneas de transmisión y distribución pueden sufrir accidentes de diversa naturaleza como faltas entre fase y tierra, entre fases, o el impacto de un rayo. La duración también puede variar entre pocos milisegundos, varios ciclos o tiempos mucho mayores. Además, el mallado de las redes eléctricas ha ido creciendo a lo largo del tiempo con la demanda energética. Como consecuencia, la impedancia equivalente de cortocircuito se ha ido rebajando, incrementando dramáticamente la potencia de cortocircuito. Una forma de proteger la red es mediante limitadores de corriente de falta (FCLs), que pueden localizarse en todos los niveles de tensión⁵¹. Los FCLs basados en la superconductividad (SCFCLs) presentan ventajas relacionadas con su capacidad de transporte de corriente sin apenas impedancia, una limitación inmediata y una operación repetitiva con rápida

recuperación. Tradicionalmente, los SCFCLs se han clasificado como resistivos e inductivos. Los primeros están basados en las transiciones intrínsecas de los superconductores a su estado normal por encima de la corriente crítica. El dispositivo se conecta en serie y se ajusta para un máximo de pico de corriente. Si éste es excedido, el dispositivo transita inmediatamente a su estado normal, derivando la corriente a una resistencia en paralelo y limitando la propagación de la falta en pocos milisegundos. Respecto al tipo inductivo, los más comunes son los de “núcleo apantallado” y “núcleo saturable”; ambos usan núcleos de hierro que incrementan la impedancia en caso de falta, con la ventaja añadida en el segundo, de que no hay una transición del componente superconductor. Varios conceptos y demostradores han sido desarrollados y ensayados^{52,53}. Merece la pena mencionar el recientemente instalado en red y entregado por InnoPower en Shigezhuang, Tianjin (China). Es un SCFCL de tres fases que trabaja a 220kV, 0.75kA y 280 MVA, de núcleo saturado y con cintas 1G HTS refrigeradas con LN₂.

Esta aplicación de potencia, basada en la tecnología superconductora, es

hoy en día un tema candente, atendiendo al número de proyecto de demostración en curso en el mundo, alguno de ellos conectados a la red: China, Alemania, Italia, Corea del Sur, Rusia, Eslovaquia, España, Reino Unido y EEUU⁵³.

Sistemas de potencia integrados

Basada en la economía del hidrógeno, una implementación futurista de los dispositivos de potencia superconductores analizados previamente, es el SuperGrid⁵⁴. La idea es usar el exceso de electricidad generada por las centrales nucleares y los parques eólicos en los valles de demanda, para generar hidrógeno. Así la electricidad se almacenaría en forma de energía química. Esta energía se podría aprovechar más tarde mediante el uso de pilas de combustible. Además, el hidrógeno se podría utilizar para refrigerar los dispositivos superconductores, por ejemplo, cables o máquinas rotatorias, incrementando la eficiencia global del sistema.

Como conclusión, desde un punto de vista económico y de acuerdo con el *Consortium of European Companies Determined to use Superconductivity* (CONECTUS)⁵⁵, el mercado global de todas las aplicaciones en el 2011 fue de en torno a 5.000 M€, en el que la *Imagen por Resonancia Magnética* (MRI) contribuyó el 80% y el resto se repartió entre la investigación y desarrollo tecnológico (18%), electrónica y nuevas aplicaciones de gran escala (ambas con un 1%). Atendiendo al material usado, los LTS copan un 99% frente al 1% de los HTS.

TECNALIA trabaja desde 2004 en proyectos relacionados con la superconductividad, tanto dentro de programas de la Unión Europea como apoyados por los Gobiernos de España y de la Comunidad Autónoma Vasca.

CIENT AÑOS NO ES NADA...

Esta pequeña revisión ha pretendido mostrar el inmenso trabajo existente en torno a la superconductividad, llevado a cabo a lo largo de esta centu-

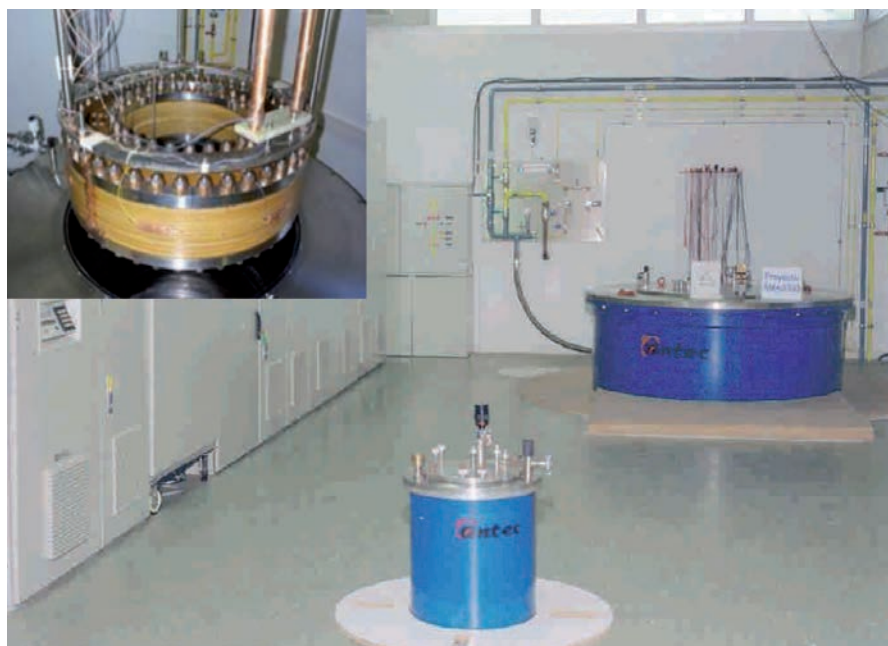


Figura 4: Desarrollos de SMES desarrollados en España dentro de las instalaciones de ASINEL (1998)

ria. Los enormes esfuerzos dedicados al desarrollo de las aplicaciones son también destacados, especialmente a lo largo de los últimos 60 años.

Aplicaciones tales como el MRI, dispositivos de alta sensibilidad para ciencia básica o imanes de alto campo o para aceleradores han impactado profundamente en nuestras vidas y han encontrado un nicho industrial con copiosos beneficios económicos. Aun así, el enorme potencial de la superconductividad no parece estar totalmente aprovechado, pese a los exitosos proyectos de demostración realizados. Parece existir una regla no escrita en virtud de la cual en el caso de que una aplicación pueda ser desarrollada con una solución convencional, la superconductora no tendrá posibilidades de prosperar. En otras palabras: sólo se utiliza la superconductividad cuando no hay otro remedio.

Algunas razones podrían explicar este hecho: una falta de estandarización, el uso de la criogenia, el alto precio de los materiales o la falta de una suficiente formación ingenieril en este campo. Quizá las altas expectativas generadas por los materiales HTS, cuando en realidad los principales retornos económicos siguen llegando por los LTS, hayan llevado a un estado de desilusión, en donde la superconductividad sería sólo una eterna promesa.

Sin embargo, estas razones parecen ser meramente subjetivas. Existen extensos campos en los que la superconductividad ha demostrado sus bondades, siendo una tecnología más que competitiva. Aplicaciones en grandes turbinas eólicas, propulsores navales, cables superconductores y SCFCL están siendo desarrolladas para ser implementados a nivel mundial.

PARA SABER MÁS

Lecturas Recomendadas

100 years of Superconductivity. 2012 CRC PRESS. Editors: Horst Rogalla and Peters H. Kes.

Enlaces recomendados

<http://www.supraconductivite.fr>

<http://www.msm.cam.ac.uk/ascg/lectures>
<http://www.superconductivityiea.org>
<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe>
<http://www.conectus.org/superconductivity.htm>

Las referencias de esta segunda parte pueden consultarse en:
www.revistadyna.com

Los proyectos de TECNALIA pueden verse en:
www.revistadyna.com

REFERENCIAS

- 19) Likharev, K.K., Mukhanov, O.A., and Semenov, V.K. (1985 a) in SQUID'85-W. de Gruyter, Berlin, pp. 1103-1108.
- 20) <http://pavel.physics.sunysb.edu/RSFQ/Research/WhatIs/rsfqre2m.html>
- 21) http://www.physics.umd.edu/sqc/documents/quantum_theory_of_the_rf_squid.pdf
- 22) http://english.jr-central.co.jp/company/ir/annualreport/_pdf/annualreport2011.pdf
- 23) <http://www.outotec.com/37651.epibrw>
- 24) N. Magnusson, Proc. Int. Symp. Heat Electromag, Sourc., Padua, Italy (June 2007) 497
- 25) S. S. Kalsi "Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment" Ed. Willey (2010)
- 26) N. Flourentzou, V.G. Agelidis, G.D. Demetriades, IEEE Trans Power Electron. 24 (2009) 592
- 27) P. Tixador. J. Phys. III France 4 (1994) 581-593.
- 28) D. Larbalestier, R. D. Blaugher, R. E. Schwall, R. S. Sokolowski, M. Suenaga, J. O. Willis, WTEC Panel Report on Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany (1997)
- 29) W. Nick, M. Frank, P. Kummeth, J.J. Rabers, M. Wilke, K. Schleicher. 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 234, 032040
- 30) S.S.Kalsi. *Development Status of Superconducting Rotating Machines*. Presented at IEEE PES Meeting, New York, 27-31 January 2002.
- 31) S.S. Kalsi, B.B.Gamble, G. Snitchler, S.O. Ige, IEEE, Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- 32) S.S. Kalsi, D. Madura, and M. Ingram. IEEE Trans. on App. Supercond. Vol 15, pp: 2146 – 2149 (2005)
- 33) R. Fair, C. Lewis, J. Eugene, M. Ingles. 2010 J. Phys.: Conf. Ser. 234 032008
- 34) White paper. Technology Roadmap. Wind energy. IEA (International Energy Agency). 2009 (Updated 2011).
- 35) C.A. Luongo, P.J. Masson, T. Nam, D. Mavris, H. D. Kim, G. V. Brown, M. Waters and D. Hall. IEEE transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, N3, pp 1055-1068, June 2009.
- 36) K. Sivasubramaniam, T. Zhang, M. Lokhandwalla, E. T. Laskaris, J. W. Bray, B. Gerstler, M.R. Shah, and J.P. Alexander. IEEE Trans. on Appl. Supercond., 19 (2009), 1656.
- 37) R. Scholsser, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 2325
- 38) H. Kamijo; H. Hata; H. Fujimoto; A. Inoue, K. Nagashima, K. Ikeda; M. Iwakuma, K. Funaki, Y. Sanuki, A. Tomioka; H. Yamada; K. Uwamori, and S. Yoshida. IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 1927
- 39) Ph.D. Thesis of Dr. Belén Mª Pérez Caballero. "Una aportación al diseño de transformadores superconductores con cinta de BSCCO y núcleo no ferromagnético"
- 40) M. Ferrier, *Low Temperature and Electric Power* (1970) 425
- 41) S. Nagaya, N. Hirano, M. Kondo, T. Tanaka, H. Nakabayashi, K. Shikimachi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, S. Kawashima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 699.
- 42) P. Tixador. IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No 3, January 2008.
- 43) A. Bautista, P. Esteban, L. García-Tabares, C. Peon, E. Martínez, J. Sese, A. Camon, C. Rillo, R. Iturbe. IEEE Transaction on App. Supercond. Vol 7, Issue 2, June 1997 pp 853-856.
- 44) W.V. Hassenzahl, D.W. Hazelton, B. K. Johnson, P. Komarek, M. Noe, C. T. Reis. Proceedings of the IEEE, VOL. 92, N°. 10, October 2004
- 45) M. Noe and M. Steurer. Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) R15-R29
- 46) A.M. Wolsky. "Fault Current Limiter: some recent development". Document prepared for meeting of the ExCo of the IEA. (2011). <http://www.superconductivityiea.org>

- 47) http://supergrid.uiuc.edu/sg2/PDF/SG2_FinalReport.pdf
- 48) <http://www.conectus.org/market.html>
- 49) P. Tixador. IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, No 3, January 2008.
- 50) A. Bautista, P. Esteban, L. Garcia-Tabares, C. Peon, E. Martinez, J. Sese, A. Camon, C. Rillo, R. Iturbe. IEEE Transaction on App. Supercond. Vol 7, Issue 2, June 1997 pp 853-856.
- 51) W.V Hassenzahl, D.W Hazelton, B. K. Johnson, P. Komarek, M. Noe, C. T. Reis. Proceedings of the IEEE, VOL. 92, N°. 10, October 2004
- 52) M. Noe and M. Steurer. Supercond. Sci. Technol. 20 (2007) R15-R29
- 53) A.M. Wolsky. "Fault Current Limiter: somer recent development". Document prepared for meeting of the ExCo of the IEA. (2011). <http://www.superconductivityiea.org>
- 54) http://supergrid.uiuc.edu/sg2/PDF/SG2_FinalReport.pdf
- 55) <http://www.conectus.org/market.html>

DESARROLLOS SUPERCONDUCTORES DE TECNALIA EN ENERGIA

Desde 2004, TECNALIA trabaja en proyectos relacionados con la superconductividad: SUPER3C, ECCO-FLOW y SUPERTURBINES.

La primera experiencia llegó con la participación en el proyecto europeo SUPER3C, dentro del programa marco FP6. Desde 2004 hasta 2008 un cable de conductor pelicular (CC, siglas en inglés) con cinta HTS de 2G fue desarrollado y ensayado. La operación a 77 K, con LN₂ reduciendo significati-

vamente el coste criogénico, junto con el uso de cintas basadas en YBCO en lugar de BISCCO, más baratas, debería permitir un uso extendido de cables HTS para el transporte de energía eléctrica. TECNALIA (a través del antiguo centro tecnológico Labein), como parte del consorcio, estuvo a cargo de las tareas de ensayo e integración en red. SUPER3C resultó en un cable de una fase de 30 metros, que cumplió el programa de caracterización y ensayo, incluyendo un test dieléctrico de clase 24 kV y ensayo de cortocircuito de hasta 40 kA en un segundo. Debido al diseño mejorado de la arquitectura interna del cable, la potencia transmitida objetivo de 17 MVA se obtuvo con menor número de cintas HTS que en configuraciones alternadas.

A través de varios ejemplos de estudios, el proyecto también orientó sus esfuerzos hacia la integración de cables HTS en la red de potencia así como en su potencial económico y social. El estudio permitió al consorcio identificar los escenarios más prometedores para la integración de los sistemas de cables HTS en las redes de potencia reales. La figura 5 muestra la instalación del cable en las instalaciones de TECNALIA para las pruebas de cortocircuito y ensayos dieléctricos. El proyecto contribuyó a cimentar el futuro desarrollo de las aplicaciones superconductoras en las redes eléctricas europeas.

ECCO-FLOW es otro proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del FP7. Comenzó en 2010 y persigue el diseño, construcción y ensayo, dentro de la red eléctrica europea, de un SCFCL resistivo basado

en cintas HTS de segunda generación. La principal ventaja de este proyecto de limitador de corriente es que aporta un método para tratar el número creciente de incidencias y fallos severos así como nuevas herramientas para la planificación novedosa de las redes eléctricas, dentro del marco de las redes inteligentes o "smart grids". Los principales papeles de TECNALIA en el proyecto son la simulación del SCFCL bajo condiciones de ensayo en campo y el análisis técnico-económico del sistema para determinar sus diferentes posibles aplicaciones dentro de las redes. El limitador desarrollado de 24 kV, 1 kA y 41,6 MVA se integrará en las instalaciones de Endesa en Palma de Mallorca y en las instalaciones de VSE en Kosice (Eslovaquia).

SUPERTURBINES es un proyecto desarrollado internamente a lo largo de los últimos cuatro años; inicialmente por el antiguo centro tecnológico Robotiker, al que se sumó posteriormente la empresa Acciona. El proyecto ha sido financiado por el Gobierno Vasco y el Gobierno de España⁵⁶. El objetivo principal de SUPERTURBINES consiste en la validación del diseño conceptual de una turbina eólica superconductor de accionamiento directo. El marco de utilización de la turbina eólica se sitúa en localizaciones marinas tipo "offshore". El generador es una máquina síncrona de accionamiento directo con una velocidad de 10 rpm, 10 MW de potencia y un par desarrollado de 10 MNm. Gracias al uso de la superconductividad el peso del generador se estima en 200 t, siendo la reducción de peso uno de los mayores beneficios que esta tecnología aporta en grandes máquinas. El incremento del peso con la potencia en máquinas de accionamiento directo podría convertirse en un cuello de botella para los actuales generadores, incluyendo aquellos basados en imanes permanentes. El proyecto en curso ha conseguido varios logros, como la aceptación de la patente PTC/ES2009/070639 (para más detalle ver la figura 6) o la puesta en marcha de un laboratorio de superconductividad aplicada dedicada

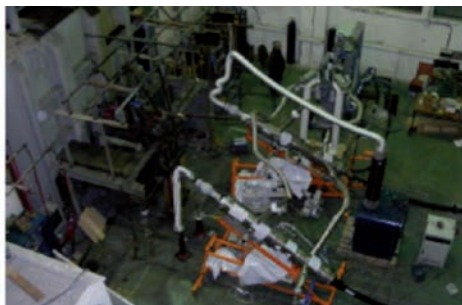


Figura 5: Instalación de un cable HTS en el centro de ensayos de cortocircuito y dieléctricos de TECNALIA. Izquierda: Modelo de cable funcional de 30 m. Derecha: Detalle de las terminaciones del cable y conexiones para los ensayos dieléctricos.

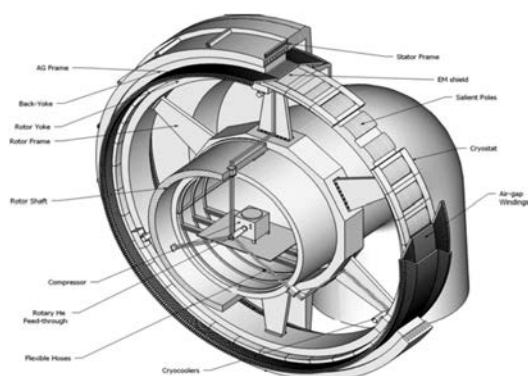


Figura 6: Turbina eólica superconductora de acuerdo al diseño conceptual de TECNALIA (PTC/ES2009/070639)

al ensayo de muestras superconductoras y bobinas SC, mostrado en la Figura 7. También se han desarrollado y ensayado pequeñas bobinas de MgB_2 . Los pasos siguientes están orientados hacia la construcción y ensayo de un demostrador a escala que pruebe las principales características eléctricas del diseño (fuerza de cortadura en el entrehierro, inducción magnética), el comportamiento de las bobinas superconductoras y la solución criogénica elegida para esta aplicación industrial. Este trabajo continuará con el proyecto SUPRAPOWER, recientemente seleccionado por la Comisión Europea dentro del programa específico de cooperación en Energía del 7º PM.



Figura 7: Laboratorio de Superconductividad Aplicada en TECNALIA

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Gobierno de España y el Gobierno Vasco por su apoyo a través de los proyectos *IPT-2011-1664-920000* (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio), *PID 590000 2009 5* (Ministerio de Industria e Innovación) and *IN-2009/0000055* (Gobierno Vasco). G. Sarmiento quiere agradecer las fructíferas conversaciones mantenidas con E. Martínez (ICMA) y el apoyo por parte del Grupo de Superconductividad Aplicada del CIEMAT liderada por L. García-Tabarés y el apoyo de P. Abramian y F. Toral, también del CIEMAT.