

CABLES SUPERCONDUCTORES

FREDERIC TRILLAUD

Los superconductores comerciales son capaces de transmitir grandes cantidades de corriente y, por ende, grandes cantidades de energía eléctrica a los consumidores de la red eléctrica con alta eficiencia, ya que no presentan resistencia en corriente directa y, además, tienen pérdidas despreciables en corriente alterna. Su diseño original se basó sobre la topología de los cables submarinos convencionales, utilizando entonces alambres superconductores de baja temperatura crítica operados a $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4.2 K) en el helio líquido. Hoy en día, se utilizan cintas superconductoras de alta temperatura crítica operadas a la temperatura del nitrógeno líquido de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (77.3 K), y existen una gran variedad de diseños tanto para los cables de corriente continua como los cables de corriente alterna, reemplazando así los conductores convencionales tales como el cobre y el aluminio por superconductores comerciales.

Estas condiciones representan una ventaja importante pues al usar superconductores dentro de un solo cable puede fluir gran cantidad de energía lo que no es posible en los cables convencionales. Típicamente, un cable superconductor puede transmitir entre 3 y 5 veces más corriente que un cable convencional, dependiendo de la aplicación con menos pérdidas, lo que permite ahorrar espacio y reducir la inversión necesaria para su implementación. Es una solución técnico-económica prometedora para responder al crecimiento de la demanda en sitios urbanos congestionados (centros urbanos densos), donde no hay espacio para instalar nuevas subestaciones eléctricas o instalar nuevos equipos. Aunque la tecnología todavía está evolucionando, se estima un retorno de inversión del orden de 3 años ^[1].

El desarrollo de los cables superconductores se inició hace 6 décadas con la comercialización de los superconductores de baja temperatura crítica, el NbTi y el Nb₃Sn. El NbTi sigue siendo el compuesto intermetálico más utilizado en el mundo. Ambos superconductores son operados a la temperatura del

helio líquido, $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que conlleva dificultades técnicas e infraestructurales para almacenar el líquido y mantenerlo a temperatura criogénica. Por eso, el uso de la tecnología en el contexto de la generación, distribución y transmisión de energía eléctrica no fue realmente considerado antes de la década de los 80 cuando se descubrieron los superconductores de alta temperatura crítica (1985). Dentro de esta familia de nuevos superconductores, se encuentran el BSCCO y el REBCO, la primera y segunda generación de superconductores de alta temperatura crítica. Ambos son materiales cerámicos que pueden ser utilizados a la temperatura del nitrógeno líquido ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) con densidades de corriente mayores a las de los superconductores de baja temperatura crítica. A diferencia del helio líquido, el nitrógeno, que representa el 80 % del aire que respiramos, es fácil de producir, económico y conocido por el sector eléctrico; al menos en su forma de gas, por ejemplo, en las centrales térmicas de ciclo combinado. Así, la infraestructura para manejar el nitrógeno líquido es mucho más sencilla y económica que la necesaria para almacenar y operar el helio líquido. Con su gran capacidad para transmitir corriente y una infraestructura conocida y fácil de integrar en la red eléctrica, varios proyectos de cables superconductores de alta temperatura crítica han sido implementados en las redes eléctricas nacionales en diferentes países, incluyendo a México.

En México, el Centro de Investigación y Desarrollo CARSO (CIDE) del grupo Condumex, en colaboración con la Comisión Federal de Electricidad en 2010 instalaron, tres fases de cable superconductores en la subestación Satélite de la ciudad de Querétaro ^[2,3]. Estos cables demostraron a nivel nacional la factibilidad de la tecnología. En el mundo, los proyectos más recientes de gran escala incluyen el proyecto Ampacity en Essen, Alemania (2014) ^[4], el proyecto de cable del distrito Xuhui, en Shanghai, China (2021) ^[5] y el proyecto SuperRail, en París, Francia (2023) ^[6]. La figura 1 muestra el recorrido de los cables superconductores para el proyecto chino y alemán.

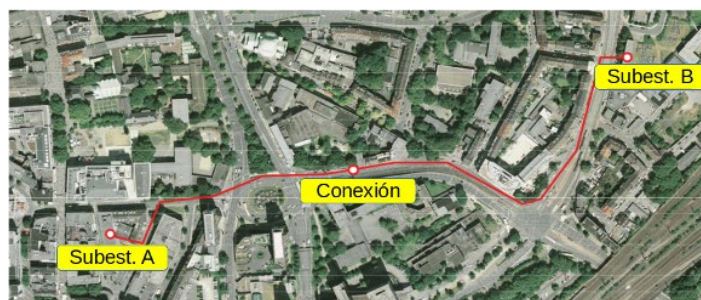


Figura 1. A la izquierda, recorrido del cable superconductor en Essen, Alemania mostrando una conexión eléctrica intermedia ^[4].

A la derecha, recorrido previsto del cable superconductor para el distrito Xuhui, en Shanghai, China ^[5] donde las flechas blancas indican las conexiones eléctricas intermedias. En ambos casos, los cables conectan dos subestaciones, subestaciones A y B

Un dato importante, el proyecto SuperRail corresponde a la instalación de un cable superconductor en la estación de tren Montparnasse, en París, operado en nitrógeno líquido a 1.5 kV/3.5 kA para una longitud de 60 m; la idea consiste en brindar más potencia a la red para garantizar su estabilidad bajo una carga creciente de 200,000 pasajeros con 750 trenes diarios aprovechando las pocas vías de cables existentes [7].

Durante dos décadas, el BSCCO, superconductor de alta temperatura crítica de primera generación, fue el material preferido para construir cables superconductores. Su costo depende en gran medida del costo de la plata, lo que impone un precio mínimo para la tecnología independientemente del escalamiento de su fabricación. Siendo un costo del orden de US\$100-200/kA-m [8], muchas empresas han preferido invertir en el REBCO, superconductor de alta temperatura crítica de segunda generación. Efectivamente, podría ser competitivo en contra de los materiales convencionales con el potencial de alcanzar un precio del orden de US\$25/kA-m o menos (de 4 a 8 veces menos costo que el BSCCO). Además de las proyecciones económicas, el REBCO presenta menos pérdidas en corriente alterna que el BSCCO permitiendo teóricamente diseñar componentes eléctricos aún más eficientes. La figura 2 muestra la ilustración del área transversal de las cintas comerciales BSCCO (arriba) y REBCO (abajo).

Esas cintas se enrollan sobre un soporte metálico como se observa en la figura 3. Esta misma figura muestra un dibujo de un cable superconductor con las tres fases hechas de capas de cintas superconductoras. En este caso, esas tres fases se encuentran en un solo ducto con un aislamiento eléctrico frío (tri-axial™). Aquí, la estructura del cable es de tipo coaxial con las cintas superconductoras trenzadas con un ángulo de trenzado de algunos grados.

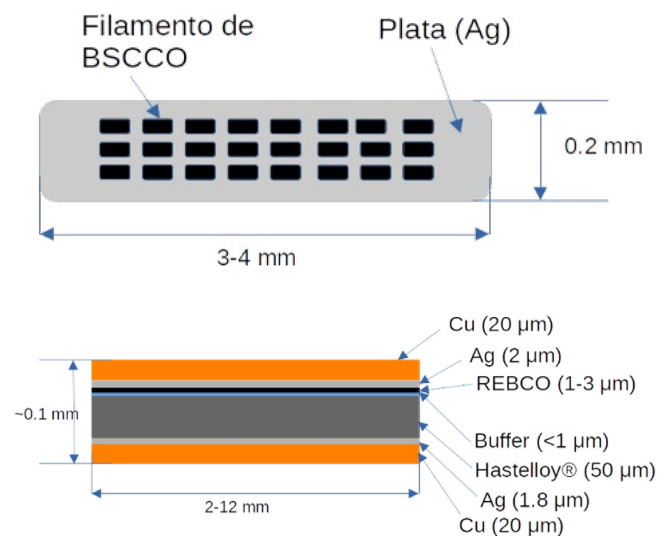


Figura 2. Arriba (a), ilustración de una cinta comercial de primera generación o BSCCO, los filamentos de BSCCO se encuentran enrollados por plata (del orden de 60 % de plata). Abajo (b), una cinta estabilizada de segunda generación o REBCO formando una estructura multicapa. Ambas ilustraciones no son a escala

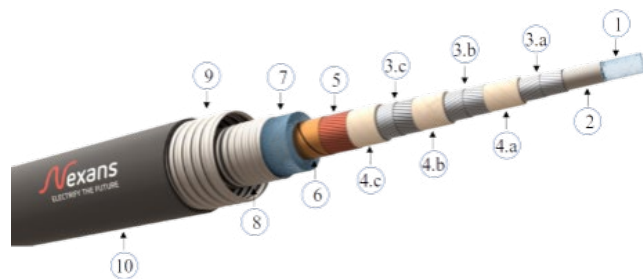


Figura 3. ejemplo del diseño de un cable superconductor de tipo coaxial con las tres fases en un solo ducto de la empresa Nexans S.A. [10]. 1) nitrógeno líquido caliente, 2) ducto interno, 3.a) fase a superconductor, 4.a) aislamiento eléctrico, 3.b) fase b superconductor, 4.b) aislamiento eléctrico, 3.c) fase c superconductor, 4.c) aislamiento eléctrico, 5) escudo de Cu, 6) aislamiento externo, 7) nitrógeno líquido frío, 8) ducto corrugado para guiar el fluido criogénico permitiendo una cierta flexibilidad mecánica, 9) criostato corrugado permitiendo el vacío entre 8), 9) y 10) aislamiento térmico

Varias capas de cintas conectadas en paralelo permiten transmitir corrientes hasta $5 \text{ kA}_{\text{rms}}$ a la tensión de la red eléctrica de hasta 275 kV cubriendo aplicaciones en la distribución y transmisión de energía [9]. Sin embargo, existen varias configuraciones de cables permitiendo aplicaciones en corriente alterna o en corriente continua [11]. La aplicación más común de los cables superconductores hasta el día de hoy ha sido en las redes eléctricas de distribución, aunque algunos proyectos han considerado su uso para transmisión [12].

No son productos comerciales estandarizados. No existen aún normas relacionadas con esta tecnología, pero el grupo técnico TC 90 superconductividad de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) formado por académicos y empresas, trabajan en favor de la normalización de las tecnologías superconductoras [13, 14], desde las cintas comerciales hasta el producto final lo que es un paso importante para proporcionar productos robustos para el sector eléctrico y una condición necesaria para la instalación de equipos en las redes nacionales. Sin embargo, como se mostró en los proyectos mencionados anteriormente, se han instalado cables superconductores en redes para responder a un reto tecnológico específico con una solución ad hoc, que tecnologías más convencionales no nos pueden proporcionar.

En este contexto, el grupo de trabajo en las aplicaciones de la superconductividad del Instituto de Ingeniería de la UNAM, liderado por el Dr. Frederic Trillaud, busca desarrollar nuevos cables superconductores basados en la segunda generación de superconductores de alta temperatura crítica, el REBCO. Así, se han desarrollado cables superconductores de potencia, con superconductores de alta temperatura crítica de segunda generación, para su aplicación en la red eléctrica [15]. Esos cables tienen menores pérdidas que los superconductores de primera generación incrementando la eficiencia y por ende permitiendo disminuir la generación de CO_2 . Un primer prototipo ya fue evaluado en México, y representa un primer avance para el desarrollo de esta tecnología de vanguardia en el país

capitalizando sobre el conocimiento adquirido por Servicio Condumex S.A. desde los años 2000 con cables superconductores de primera generación.

El objetivo no es competir en contra del sector industrial, sino proporcionar herramientas de diseño y un servicio de caracterización eléctrica en corriente continua y corriente alterna de cintas superconductoras comerciales utilizadas para construir los componentes superconductores, como son los cables, los limitadores de corriente de falla y los transformadores, entre otros y adicionalmente proporcionar modelos fieles del comportamiento de esos equipos en la red. La idea detrás de las caracterizaciones es obtener los parámetros eléctricos esenciales para poder definir el comportamiento eléctrico básico de los equipos superconductores. Estos parámetros indican la máxima corriente que puede transmitir el equipo a la temperatura del nitrógeno líquido de 77.3 K y el índice de transición definiendo la velocidad a la cual el equipo puede transitar de su estado superconductor a su estado resistivo. Un superconductor ideal está definido por un índice de transición infinito a la corriente crítica. Esos datos pueden ser utilizados en un modelo teórico a fin de estudiar el comportamiento del mismo equipo superconductor en la red eléctrica, en particular su comportamiento transitorio bajo fallas.

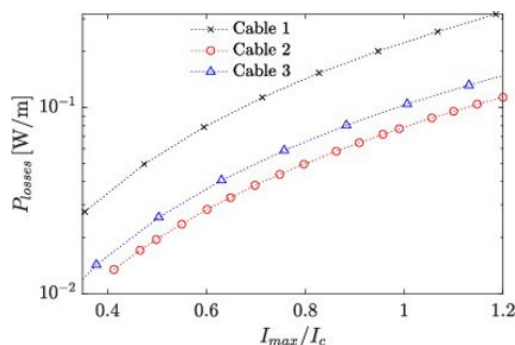


Figura 4. Arriba, tres modelos de cable superconductor hecho de REBCO (2 mm de ancho) construidos en el laboratorio de superconductividad y criogenia del Instituto de Ingeniería. Abajo, resultados de las mediciones en corriente alterna a 60 Hz de los tres modelos de cable llevadas a cabo en el laboratorio GeePs de la escuela Centrale-Supélec, Universidad Paris-Saclay, Francia

Un proyecto vigente, financiado en parte por el fondo PAPIIT de la UNAM y por el CONAHCYT permitirá construir y probar un banco de pruebas en el Instituto de Ingeniería para caracterizar tanto en corriente continua como en corriente alterna cintas y conjuntos de cintas superconductoras. Es particularmente difícil medir pérdidas en corriente alterna a la frecuencia de la red eléctrica debido a la pequeña razón de la señal sobre el ruido. En este contexto, las colaboraciones con otras universidades extranjeras son esenciales. En México, se pueden medir pérdidas con gran precisión a la frecuencia de 50 Hz, evitando la frecuencia de la red de 60 Hz, mientras que en otros países pueden medir a la frecuencia de 60 Hz, donde la frecuencia de su red es de 50 Hz. Por esta razón, se están duplicando en el Instituto de Ingeniería los experimentos de caracterización en corriente alterna que se encuentran en los laboratorios franceses GeePs de la escuela de CentraleSupélec y el GREEN de la Universidad de Lorena. Además de permitir el intercambio de datos relevantes para la operación de las cintas superconductoras, es una oportunidad para validar los sistemas experimentales tanto en los laboratorios extranjeros como en el del Instituto de Ingeniería. Estas validaciones son necesarias para lograr la normalización en la corriente directa y en la alterna de tecnologías superconductoras.

En el Instituto de Ingeniería, no se tiene aún la infraestructura eléctrica para poder caracterizar cables debido a la alta potencia requerida ($I > 1 \text{ kA}$, $V > 1 \text{ kV}$), pero se podría probar prototipos de cables como se muestra en la figura 4 ($I < 500 \text{ A}$, $V < 10 \text{ V}$). En este contexto, se realizaron tres modelos de cables idénticos que se midieron en el laboratorio GeePs de la escuela de ingeniería francesa CentraleSupélec haciendo uso de la instalación criogénica y de potencia eléctrica del Prof. Loïc Quéval en 2023 [16,17]. El siguiente paso es el estudio experimental del comportamiento en régimen transitorio basado en una prueba de “hardware-in-the-loop” para acercarse a una condición de operación real en colaboración con el laboratorio GeePs. La idea es validar el modelo de cable superconductor realizado en el Instituto de Ingeniería. Este modelo validado podrá ser utilizado en simuladores de redes eléctricas para poder elegir la mejor topología de cable superconductor a través de estudios tanto técnicos y económicos beneficiando al país. |

Referencias



Consúltalas escaneando el código Qr