

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

EAP. DE FÍSICA

Formas de producir cables superconductores

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Oscar Saldívar Flores

Lima - Perú

2015

Índice General	pág.
Lista de Cuadros	II
Lista de Figuras	III
Resumen	IV
Abstract	V
Introducción	VI
Marco teórico	1
1. Superconductividad	1
2. Cables superconductores	3
2.1 Envoltura Criogénica	3
2.2 Alambres superconductores	4
3. Técnicas de fabricación de conductores recubiertos	8
4. Diseños de los cables superconductores	10
4.1 Cables HTS tipo “warm dielectric”	10
4.2 Cables HTS tipo “cold dielectric”	11
5. Principales proyectos de cables superconductores	13
6. Empresas que fabrican cables superconductores	18
7. Beneficios de los cables superconductores	18
7.1 Beneficios económicos	19
7.2 Beneficios ambientales	19
Conclusiones	21
Bibliografía	22

LISTA DE CUADROS

- 1) Cuadro 1: Proyectos de Cables superconductores en china, Rusia y Europa
- 2) Cuadro 2: Detalles de los diseños de los cables Superconductores
- 3) Cuadro 3: Proyectos de cables superconductores dentro de Estados Unidos
- 4) Cuadro 4: Detalles de los diseños de los cables HTS en los Proyectos de Estados Unidos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Incremento de la Temperatura Crítica

Figura 2: Cable Superconductor HTS

Figura 3: Envoltura Criogénica

Figura 4: Diseño de un alambre Superconductor de Baja Temperatura

Figura 5: Primera Generación de Alambres Superconductores de Alta Temperatura

Figura 6: Fabricación de una Alambre de Primera Generación: Mono

Figura 7: Alambre de Primera Generación

Figura 8: Fabricación de un Alambre de Primera Generación: multifilamentario

Figura 9: Alambres Superconductores HTS de Segunda Generación

Figura 10: Cable Superconductor HTS de dieléctrico caliente

Figura 11: Cable de dieléctrico frío de una sola fase

Figura 12: Geometrías de los cables superconductores de dieléctrico frío

RESUMEN

El cable superconductor es un dispositivo de transporte de energía que actualmente se viene implementando en muchos países del mundo. Una de las ventajas que se ven con la implementación de este nuevo sistema de transporte es el aumento en la capacidad de transportar energía sin la necesidad de aumentar el número de cables en la red eléctrica ello conlleva a la descongestión del sistema eléctrico.

El propósito de esta monografía es darles una visión general de los cables superconductores, como está formado un cable superconductor además de sus diseños, los proyectos que se están dando en el mundo y los beneficios que tiene la implementación de estos cables en la red eléctrica.

Se presenta una introducción al fenómeno de la superconductividad, en que consiste este fenómeno y las diversas aplicaciones que se dan. Nos centraremos en una propiedad importante de la superconductividad que es el transporte de energía a bajas temperaturas.

Se define lo que es un cable superconductor y se detalla cuál es su estructura, además de los diversos diseños que hay en los cables superconductores, sus ventajas y desventajas. Las formas de producir cables superconductores, se van a diferenciar los cables de baja temperatura y los de alta temperatura, además de cómo se producen los alambres superconductores.

Se presenta un cuadro con los diversos proyectos llevados a cabo en el mundo, el lugar donde se llevaron a cabo la duración del proyecto entre otros también se verán las especificaciones del tipo de cable superconductor utilizado en cada proyecto.

Por último se mencionan las empresas que fabrican e instalan los cables a la red eléctrica y los beneficios que tienen la aplicación de los cables superconductores a la red eléctrica.

ABSTRACT

The superconducting cable is a power transmission device that is currently being implemented in many countries around the world. One of the advantages that come with the implementation of this new transport system is the increase in the ability to transport energy without the need to increase the number of wires in the mains it leads to a congestion zero of the electrical system.

The purpose of this paper is to give an overview of superconducting cables, such as for example how a superconducting cable is formed, in addition to their designs, the projects that are occurring in the world and the benefits that have the implementation of these cables into the mains.

It presents an introduction to the phenomenon of superconductivity, does it consist of this phenomenon and the various applications which offer. We will focus on an important property of superconductivity which is the transport of energy at low temperatures.

It defines what it is a superconducting cable and it is detailed their structure, also the designs which exist in the superconducting cables, their advantages and disadvantages. The ways of producing superconducting cables, it will differentiate low temperature and high temperature, and how the superconducting wires are produced.

It presents a table showing the various projects carried out in the world, the place where you carried out, the duration of the project including specifications on the type of superconducting wire used in each project will also be presented.

Finally, it mentions the companies that manufacture and install the cables to the mains and benefits that have the application of the superconducting cables to the mains.

INTRODUCCIÓN

La superconductividad es un estado de la materia en la cual el material manifiesta la propiedad de resistencia eléctrica nula debajo de cierta temperatura. Desde su descubrimiento los investigadores han ido descubriendo diversos tipos de aplicaciones entre las cuales destaca el transporte de corriente a bajas temperaturas. Una de las desventajas encontradas para la elaboración de cables superconductores para el transporte de corriente fue el alto costo de su refrigeración con helio líquido ya que en una primera instancia se utilizaban materiales como el Nb-Ti los cuales se les conoce como superconductores de baja temperatura debido a que manifestaban esa propiedad superconductor a la temperatura del helio líquido (4K). Todo esto cambio con el descubrimiento de los materiales superconductores de alta temperatura en el año de 1980. A partir de ahí se originó toda una avalancha de investigaciones con la finalidad de poder utilizar estos materiales para el transporte de corriente. Los primeros materiales que se utilizaron para la generación de cintas superconductoras fueron el BSCCO. Las cintas superconductoras generadas a partir de este material se llamaron cintas de primera generación los cuales utilizaban un tubo de plata en su elaboración.

Debido a que presentaron algunas dificultades (costos, comportamiento deficiente bajo campo magnético) sus perspectivas futuras de estas clases de cintas fueron limitadas.

En consecuencia desde algunos años las investigaciones se han centrado en las cintas superconductoras producidas usando materiales del tipo ReBaCuO denominados alambres superconductores de segunda generación o conductores recubiertos.

Los cables superconductores son la tecnología que en la actualidad se vienen investigando y utilizando en algunos países del mundo tales como Japón y Estados Unidos los cuales invierten enormes cantidades de dinero en proyectos. Este trabajo es de cables superconductores, específicamente en las formas de producir cables superconductores, diseños de los cables superconductores, proyectos llevados a cabo en el mundo además de los beneficios que lleva modernizar la red eléctrica.

MARCO TEÓRICO

1. Superconductividad

Los superconductores son materiales en la cual no existe ninguna resistencia eléctrica debajo de cierta temperatura llamada Temperatura crítica (T_c). Este fenómeno fue descubierto en el año de 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes quien fue el primero en licuar helio a 4.2K. En la actualidad existen dos grupos de materiales superconductores, el primero denominado superconductor de baja temperatura (LTS), llamados así porque son enfriados con helio líquido a la temperatura de 4.2 K. Estos materiales son utilizados en aplicaciones médicas como la resonancia magnética.

En el año de 1980 una nueva familia de superconductores fue descubierta, a estos se les llamo superconductores de alta temperatura (HTS). Estos materiales son enfriados con nitrógeno líquido a 77K, el cual es más barato, abundante y no contamina el medio ambiente. Estos materiales son cerámicos derivados del óxido de cobre. [1]

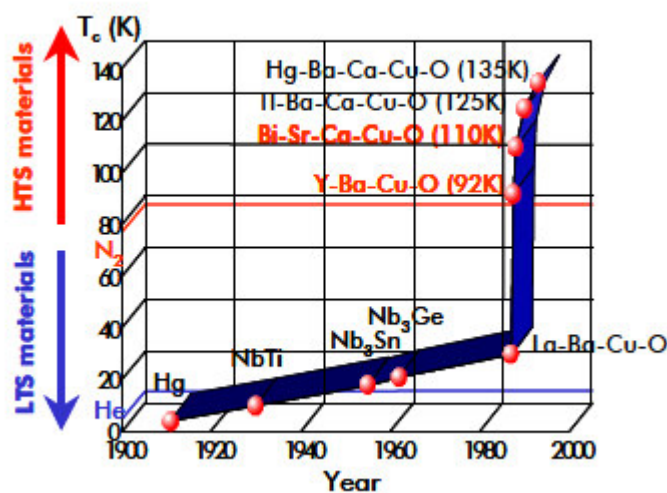


Figura 1: Incremento de la Temperatura Crítica T_c (1)

El rápido desarrollo de superconductores de alta temperatura comenzó en 1987 con compuestos La-Ba-Cu-O, $T_c = 30K$, seguidos de Y-Ba-Cu-O, $T_c = 95K$ y ostentando actualmente el record de aleaciones Tl-Ba-Ca-Cu-O con $T_c = 125K$. Esta sucesión de HTS abre la posibilidad de descubrir superconductores a temperatura ambiente. Como contrapartida, estos HTS son extremadamente

frágiles y con corrientes críticas bajas. Por ejemplo para muestras de La-Ba-Cu-O la corriente crítica se sitúa en $1,5 \text{ kA}\cdot\text{cm}^{-2}$ mientras que para Nb-Sn es de $10\text{kA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Las mayores áreas de aplicación tecnológicas de los superconductores son:

- 1) Generación de campos magnéticos altos mediante solenoides superconductores, por ejemplo para resonancia magnética en aplicaciones médicas.
- 2) Detección de alta resolución de flujo magnético usando magnetómetros de dispositivos interferenciales cuánticos superconductores (SQUID'S)
- 3) Dispositivos electrónicos basados en uniones Josephson, computador criogénico
- 4) Levitación magnética: cojinetes, ejes, trenes
- 5) Líneas de transmisión
- 6) Cables de alta potencia

En este trabajo nos vamos a centrar en la fabricación de cables superconductores (Figura 2) pues considero que es de gran importancia.

Estructura Típica de un Cable HTS

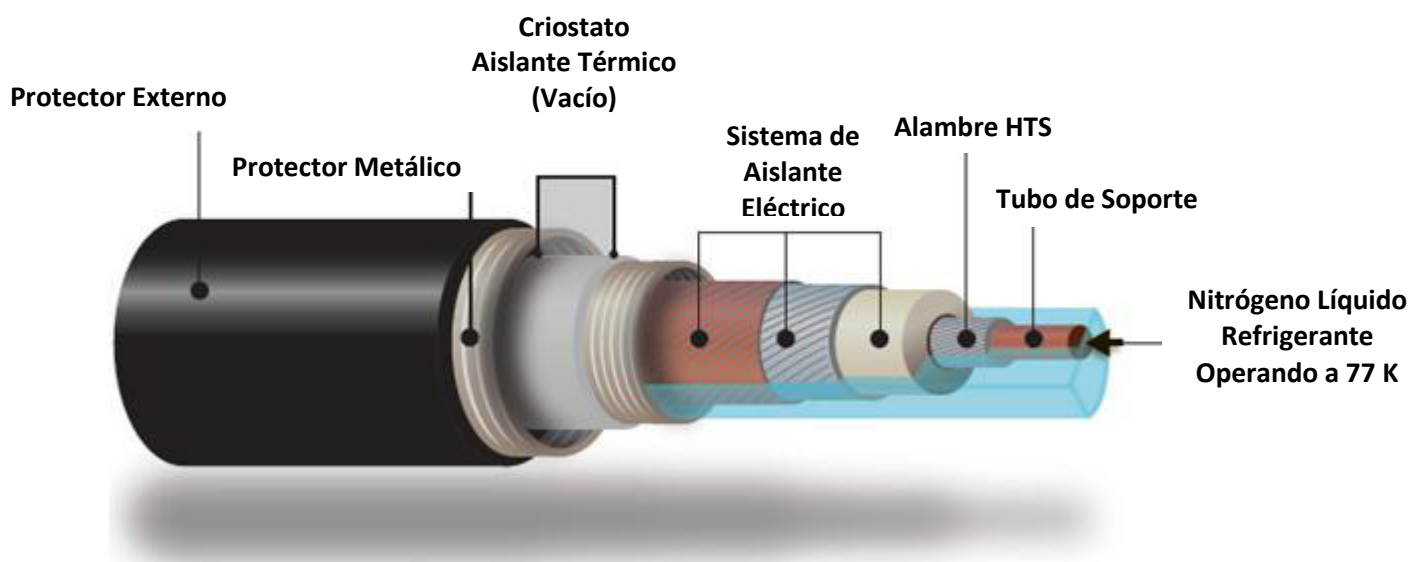


Figura 2: Cable superconductor HTS

2. Cables superconductores

El cable superconductor está formado por múltiples cintas superconductoras que son enrollados en espiral alrededor de un núcleo central llamado forme. Estas cintas son cubiertas por un aislante eléctrico y luego por una capa superconductora. Todo esto constituye el centro del cable superconductor. Este arreglo es colocado dentro de un tubo aislante térmico (Envoltura Criogénica) por el cual fluye el nitrógeno líquido [2].

Los cables superconductores están formados de dos componentes específicos: la envoltura criogénica y los alambres superconductores.

2.1 Envoltura Criogénica

La envoltura criogénica proporciona el aislante térmico la cual mantiene el material superconductor debajo de su temperatura crítica mientras minimiza el consumo de energía por el sistema de enfriamiento de nitrógeno líquido.

El flexible CRYOFLEX Nexans, envoltura criogénica aislante vacía consiste en dos tubos corrugados flexibles de acero inoxidable. La parte exterior del tubo interno está cubierta con capas supe aislante. 1. Tubo corrugado interno, 2. Espaciador, 3. Espacio vacío, 4. Súper aislante multicapas, 5.tubo corrugado exterior, 6. Envoltura de polietileno. [1]



Figura 3: Envoltura criogénica

2.2 Alambres Superconductores

Los alambres superconductores son hechos de materiales superconductores que cuando son enfriados debajo de su temperatura crítica (T_c) muestran una resistencia eléctrica cero. A menudo el superconductor está en forma de filamento o sobre una superficie plana de metal encapsulado en una matriz de cobre o aluminio que lleva la corriente. [3]

2.2.1 Alambres Superconductores de Baja Temperatura (LTS)

La tecnología LTS el cual funciona a la temperatura del Helio líquido (4 Kelvin) fue descubierta en 1911. Esta tecnología se convirtió en un éxito comercial en el año de 1960 cuando los alambres fueron fabricados a partir de los superconductores de baja temperatura (LTS) para su uso en electroimanes superconductores.

Estos electroimanes generan campos magnéticos mucho más intensos que los electroimanes comunes. Los alambres LTS son fabricados con niobio-titanio (Nb-Ti) mediante un proceso de polvo en tubo incrustado en una matriz no superconductora tales como una aleación de plata, algo similar a la manera tradicional del alambre de cobre o de aluminio.

Aunque los alambres LTS pueden ser fabricados a costos similares como los del alambre de cobre, los dispositivos LTS son muy caros debido al alto costo del enfriamiento criogénico. Como resultado la tecnología LTS permanece completamente limitado a algunas aplicaciones específicas. [4]

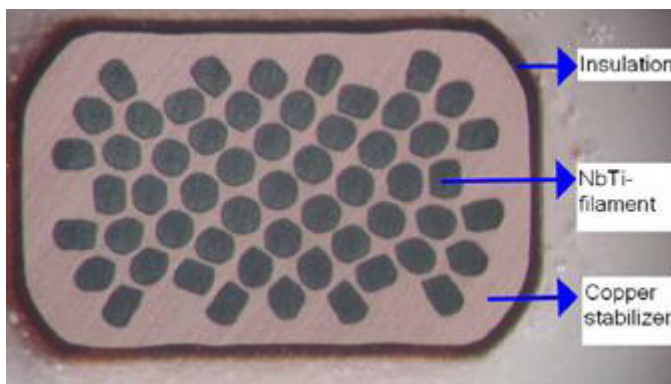


Fig. 4: Diseño de un alambre superconductor de baja temperatura

2.2.2 Alambres superconductores de alta temperatura (HTS)

Existen dos tipos bien reconocidos de alambres superconductores de alta temperatura, los compuestos por BSCCO conocidos como alambres de primera generación y los compuestos por ReBaCuO, conocidos como alambres de segunda generación. ReBCO es sinónimo de tierras raras de óxido de Bario y cobre, y BSCCO es sinónimo de bismuto, estroncio, calcio, cobre y oxígeno [3]

2.3 Alambres de Primera Generación (1G)

Los alambres de 1G han sido comercialmente disponibles desde 1990. Durante la fabricación de los alambres, el material superconductor en polvo se llena en tubos de aleación de plata. Estos se procesan posteriormente en un alambre HTS multifilamento por medio de una tecnología de laminación especial.

Los materiales más utilizados en las primeras HTS estaban basados en bismuto (bismuto-estroncio-calcio-cobre-oxígeno), estos materiales han sido usados para construir una variedad de dispositivos de energía, incluyendo cables de transmisión. [4]

Cables de primera generación (1G): cintas a base de Bismuto (BSCCO) obtenidas por extrusión y laminado de plata con polvo superconductor.[1]

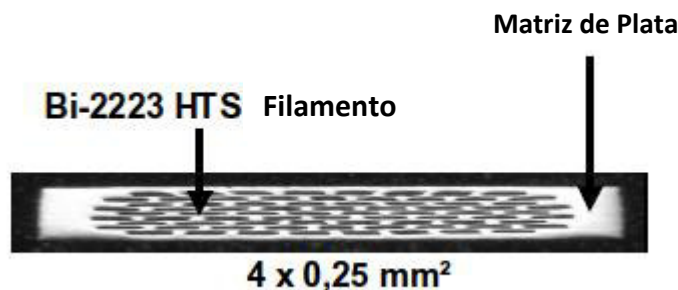


Figura 5. Primera Generación de alambres superconductores de alta temperatura

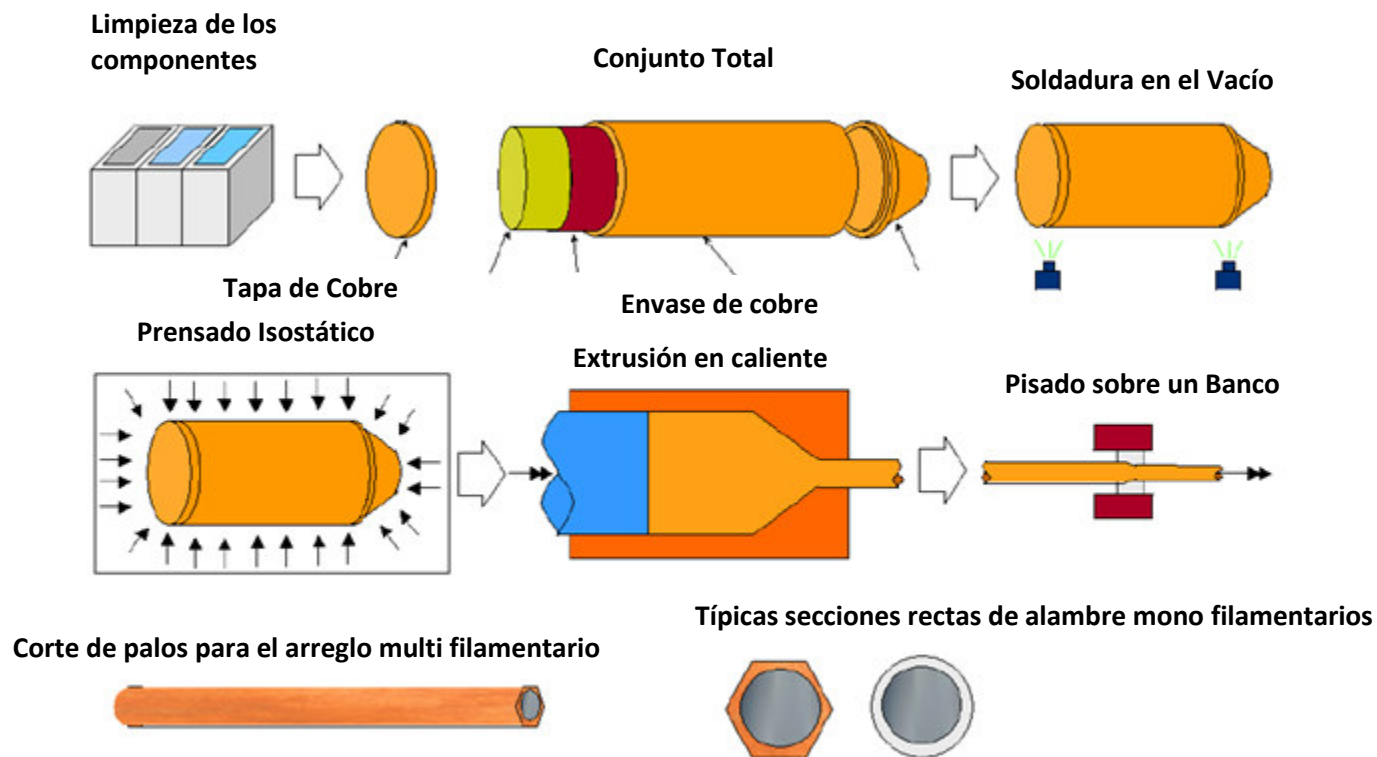
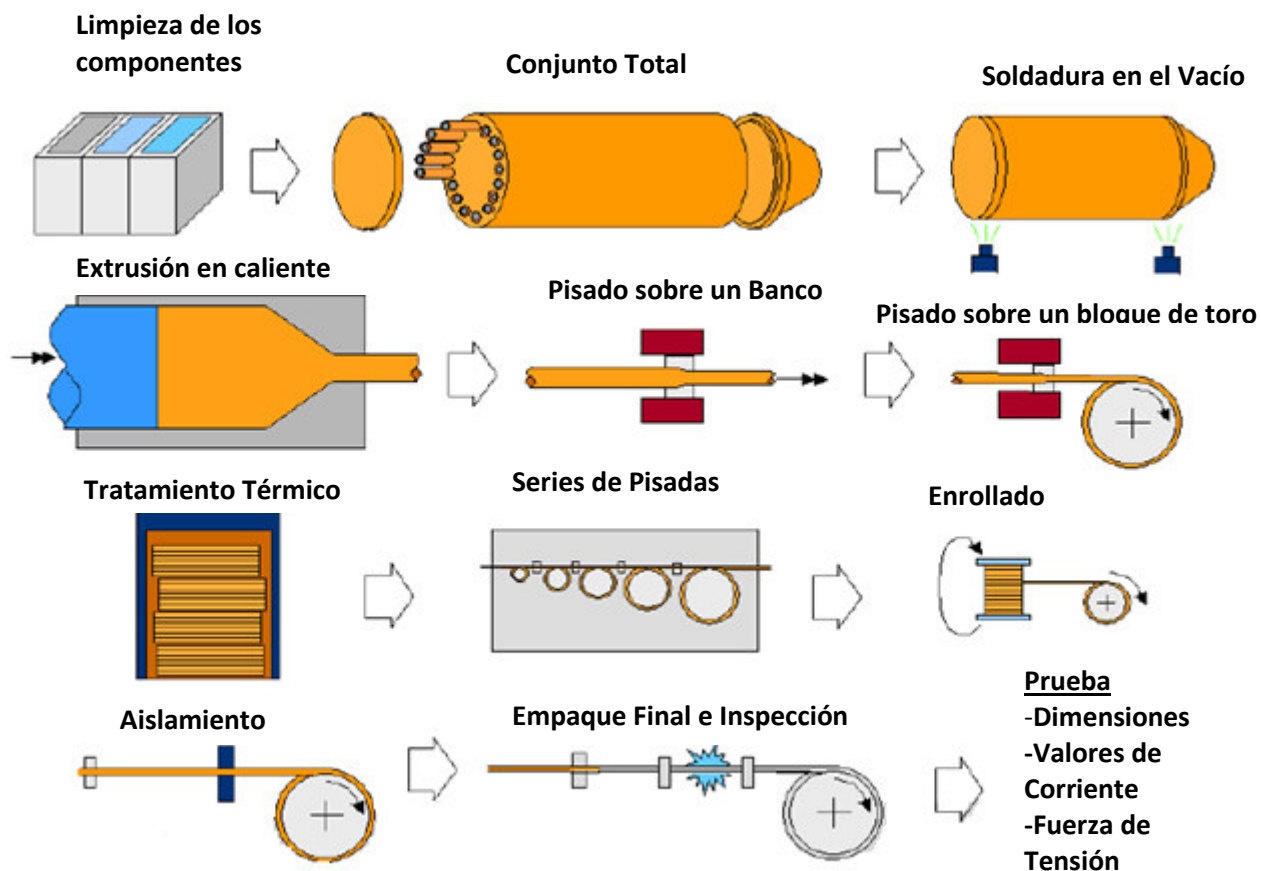


Fig. 7: alambre de primera generación. [4]



La mayoría de los fabricantes de cables superconductores están migrando a los nuevos materiales HTS de segunda generación que utilizan compuestos de tierras raras, bario y óxido de cobre (ReBCO). [3]

Los alambres superconductores de segunda generación (2G) también conocidos como conductores recubiertos ofrecen beneficios adicionales con sus propiedades únicas:

- Aumento en el rendimiento de campo
- Importantes ventajas en costos.
- En presencia de campo magnético muestra una pequeña reducción en la densidad de corriente crítica.
- Alta densidad de transportar corriente a la temperatura del nitrógeno líquido (77K)

- e) Bajo factor de perdidas AC
- f) Su producción puede ser escalada a largas longitudes a bajo costo

Entre los diversos métodos que se utilizan para la producción de conductores recubiertos existen los métodos físicos y químicos cada uno con sus ventajas y desventajas. [5]

Entre los métodos físicos tenemos a:

- a) Ablasion laser
- b) Spputering
- c) Evaporación

Todas estas técnicas utilizan el vacío por eso es muy difícil su producción a grandes longitudes.

Entre los métodos químicos tenemos a:

- a) Deposicion de vapor quimico
- b) Metal Organic Deposition (MOD)
- c) Spray Pirolisis
- d) Sol- gel

Estas técnicas permiten fabricar conductores recubiertos con alta capacidad de transportar corriente, además no utilizan vacío para su producción por lo que sus costos de fabricación se minimizan.

3. Técnicas de fabricación de conductores recubiertos

La arquitectura básica de un superconductor recubierto puede ser descrita como compuesta por un sustrato flexible con espesores menores a 0.1nm cubiertos por una regulador delgada de 10 a 100nm y una capa de material superconductor de unas pocas micras. Futuras aplicaciones tecnológicas requieren entre otras de una capa protectora final y de sustratos resistentes a diversos ciclos térmicos. Adicionalmente deben tenerse en cuenta las características de estas multicapas en lo concerniente a la capacidad de transportar corriente, la cual incrementara notablemente en la

medida en que la fracción de material no superconductor presente en la capa superconductora sea lo más bajo posible.[5]

Es de conocimiento común que la buena orientación de las películas, la minimización de fronteras de grano y la prevención de interdifusión son algunos de los más importantes parámetros que influyen en una alta densidad de corriente crítica. Figura 9

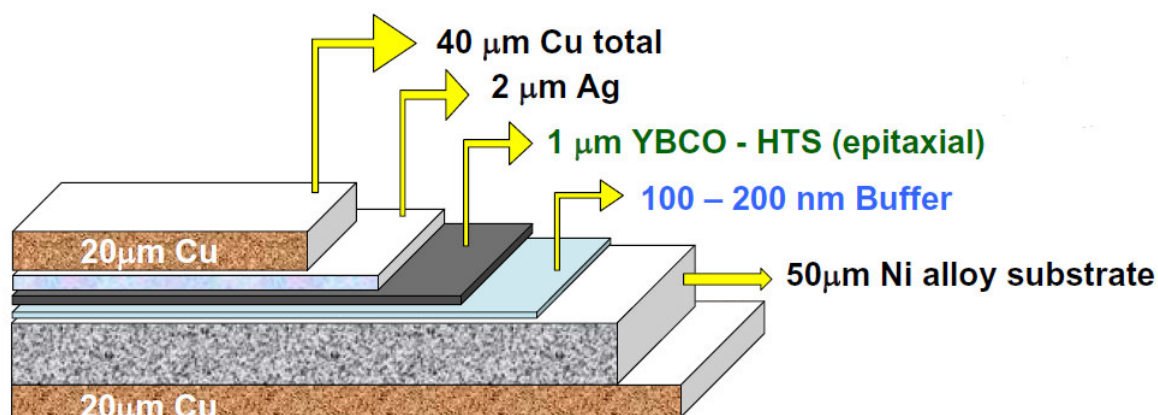


Figura 9. Alambres superconductoras HTS de segunda generación

Independientemente de los superconductores existe una gran variedad de diseños de cables, la arquitectura de los cuales tiene efectos importantes sobre la eficiencia, la radiación de campos magnéticos indeseados además del capital invertido y los costos de operación.

Diferentes diseños de cables superconductores han sido desarrollados, actualmente hay en principio 2 principales tipos de cables, los cuales se distinguen por el tipo de dieléctrico usado. [6]

- 1) El primer diseño de cable HTS tipo “Warm dieléctric” (WD) se llama diseño de dieléctrico caliente
- 2) Los cables HTS tipo “Cold dieléctric” (CD) se llaman diseño de dieléctrico frío.

En este tipo de diseño existen tres tipos de cables:

- a) Los cables HTS tipo “Cold dielectric” (CD) de una sola fase.

- b) Los cables HTS tipo “Cold dielectric” (CD) con tres fases trenzadas en un solo criostato.
- c) Los cables HTS tipo “Cold dielectric” (CD) con tres fases coaxiales (TRIAX).

DISEÑOS DE LOS CABLES SUPERCONDUCTORES

1. Cables HTS tipo “Dieléctrico Caliente”

Son cintas superconductoras atados en una o varias capas sobre un soporte flexible formando el cable conductor. Este conductor, que es enfriado por el flujo de nitrógeno líquido, está rodeado por una envoltura criogénica empleando dos tubos corrugados flexibles de acero inoxidable con un súper aislante entre ellos (Figura 3). El aislante dieléctrico, la pantalla del cable y la funda exterior del cable están a temperatura ambiente. Este diseño ofrece una alta densidad de energía usando la menor cantidad de alambres HTS. Los inconvenientes de este diseño de cable comparado a otros diseños incluyen la alta pérdida eléctrica, en consecuencia la necesidad de colocar estaciones de refrigeración más cercanas. La elevada inductancia y la necesidad de separar las fases a fin de limitar los efectos magnéticos.

Este diseño es más deseable para instalaciones de voltaje medio. [1]-[7]-[6]-[8]

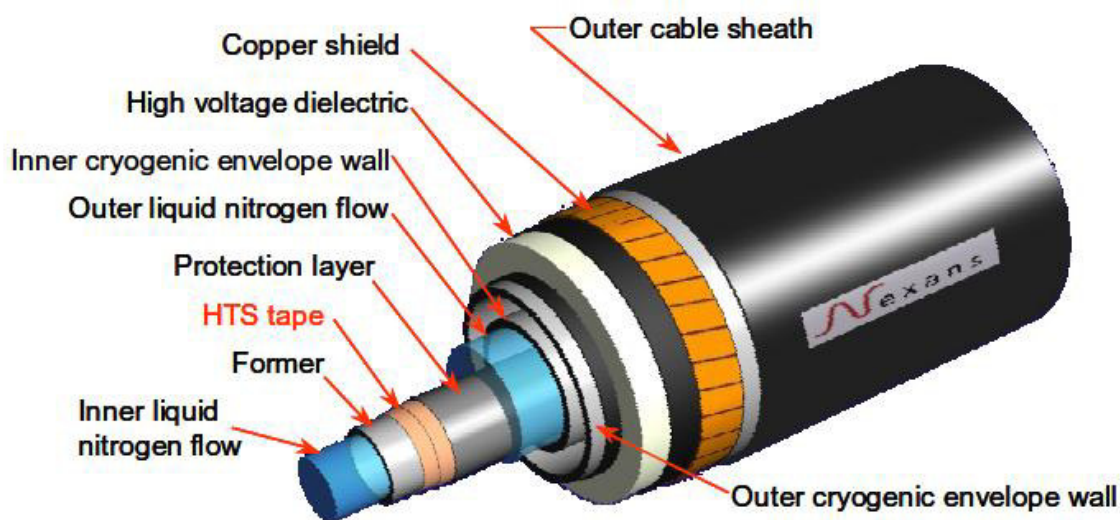


Figura 10. Cable superconductor HTS de dieléctrico caliente

2. Cables HTS tipo “Dieléctrico Frio”

El Segundo tipo de cable superconductor es el de dieléctrico frío. Este emplea una capa concéntrica de cinta superconductora y un material dieléctrico, proporcionando un aislante eléctrico compatible con las temperaturas criogénicas. El nitrógeno líquido fluye sobre y entre las cintas superconductoras proporcionando enfriamiento y contribuyendo a el aislamiento eléctrico entre las capas superconductoras y la capa de apantallamiento exterior. Como el material dieléctrico permanece a una temperatura de -200°C , este diseño de cable es comúnmente referido como “cold dielectric” (dieléctrico frío). Estos cables ofrecen varias ventajas importantes, incluyendo una alta capacidad de transporte de corriente eléctrica, una baja pérdida de corriente, una baja inductancia y la supresión total de los campos electromagnéticos fuera del cable. La reducción de la pérdida eléctrica permite espaciar las estaciones de refrigeración y el equipamiento auxiliar necesitado para asegurar las operaciones de fiabilidad. [1]-[7]-[6]-[8]

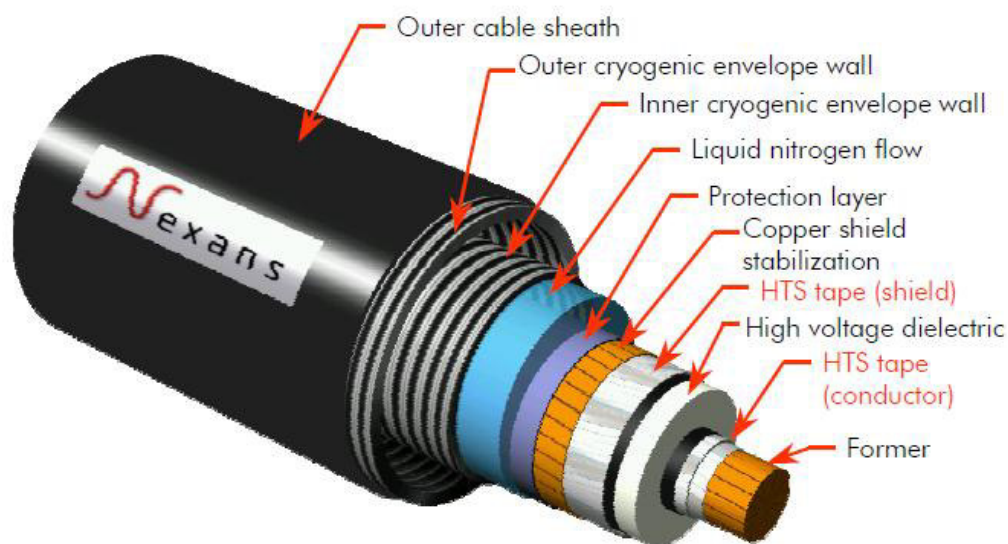


Figura 11: Cable de dieléctrico frío (“cold dielectric”) de una sola fase

Este diseño de cable superconductor puede ser ordenado en tres geometrías distintas, la cual da beneficios adicionales:

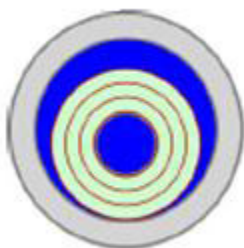
La geometría de **fases concéntricas** no ofrece campo magnético exterior y está disponible en un diseño compacto la cual optimiza las cintas superconductoras. Es apropiado para las medias tensiones.

La Geometría de **tres fases en una envoltura criogénica** no produce campos electromagnéticos, por la propia cancelación de corrientes y por la pantalla que impide además el acoplamiento de campos entre las tres fases. Es un diseño compacto y sus pérdidas son menos debido a la menor superficie exterior. La contracción y expansión se compensan dentro de la envoltura criogénica ya que a diferencia de las 3 fases separadas, las 3 fases están aquí trenzadas, lo que permite compensar naturalmente el fenómeno de contracción térmica.

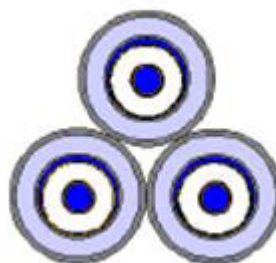
La geometría de **tres fases separadas** no emite campos electromagnéticos gracias a su pantalla superconductor. El apantallamiento realizado por el superconductor también es eficaz a baja

Frecuencia e incluso con campos magnéticos estacionarios lo que repercute en una disminución de su inductancia. Esta geometría es especialmente adecuada para altas tensiones. [1]-[7]-[6]-[8]

FASES CONCENTRICAS



TRES FASES SEPARADAS



TRES FASES EN UNA SOLA ENVOLTURA CRIOGENICA



Figura 12: Geometrías de los cables superconductores de dieléctrico frío

PRINCIPALES PROYECTOS DE CABLES SUPERCONDUCTORES

Se han realizado muchos proyectos relacionados con cables superconductores pero solo algunos de ellos han sido instalados y probados en redes eléctricas. De entre ellos, el primer sistema que se instaló en una subestación lo realizó NKT cables en Dinamarca, conectado en marzo del 2001, y suministro energía a zonas residenciales y comerciales de Copenhague. El sistema formado por tres cables monofásicos de dieléctrico caliente de 30 metros, suministraba 2kV a 36 kV y estuvo funcionando durante 2 años hasta que se decidió desmantelar a causa de problemas con el sistema de frío refrigeración.

Otro proyecto importante lo realizó SuperPower, con la participación de BOC(miembro de Linde Group), Sumitomo Electric Industries, Ltd. Y National Grid, en Albany (Estados Unidos) y se energizó en julio 2006. El cable HTS 1G de diseño CD, que conectaba dos subestaciones de National Grid a una tensión de 34,5kV, suministraba 0,8kA (48MVA) y tenía una longitud de 350 metros. Dispone de una interconexión intermedia, un tramo de cable 1G, de 30 metros, fue reemplazado el año 2008 por un cable 2G, lo que acabó el proyecto el 13 de junio 2008.

El proyecto Columbus, realizado en Ohio por South Wire NKT cables. AMSC (American Superconductor), Praxair, American Electric Power y Oak Ridge Nacional Laboratory, se inició en abril de 2002 y se energizó en agosto del 2006. Consta de un cable de 200 metros triaxial CD de 13,2kA y alimenta el equivalente de 36,000 hogares.

El proyecto LIPA, realizado en Long Island por AMSC, Nexans, Air Liquide y Long Island Power Authority, se inició en marzo 2003 y es el primer cable que funciona a tensión de transporte de 138 kV y suministra 2,4 kA, una potencia de 574 MVA equivalente a alimentar 300,000 hogares.

Tiene una longitud de 600m y consta de tres cables monofásicos de diseño de dieléctrico caliente. Dicho proyecto tiene una segunda fase que consiste en reemplazar el actual 1G por un cable de 2G.

Varios proyectos de cables superconductores han empezado en el pasado. Un resumen de los diferentes proyectos hechos en varios países es dado en tablas. Aunque estos cuadros nos dan una visión general, no representa los objetivos y especificaciones de cada proyecto individual.

A continuación se muestran unos cuadros con los diferentes proyectos que se dan en el mundo [9]:

Cuadro 1: Proyectos de cables superconductores en china Rusia y Europa [9]

PROYECTO	AMSTERDAM	INNOPOWER	CHANGTONG	MOSCOW
Localización	Amsterdan, Holland	Kunming, China	Lanzou, China	Moscow, Rusia
Lugar	Noord-Hogte Kadijk	Puji Subestación	Changtong Cable Factory	Moscow Subestación
Estado	En desarrollo	Instalado y Operando	Operando	En desarrollo
Compañía	Ultera	Innopower	Institute of EE	VNIKP
Fecha de Inicio	TBD	04/09/2004	Diciembre del 2004	2010
Fecha de Terminó	TBD	Operando hasta el 2008	Termino de Operación en 2007	No disponible
Tipo	AC	AC	AC	AC
Fases	3	3	3	3
Geometría	Tri axial (Tres fases concéntricas)	3 Fases (3 Fases en criogénicos Individuales)	3 Fases (3 Fases en criogénicos Individuales)	3 Fases Coaxial

Cuadro 2: Detalles de los diseños de los cables superconductores [9]

PROYECTO	AMSTERDAM	INNOPOWER	CHANGTONG	MOSCOW
Voltaje	50 kV	35 kV	6,6 kV	20 kV
Intensidad de Corriente	2900 A (250 MVA)	2000 A (120MVA)	1500 A (17 MVA)	2000 A (70MVA)
Longitud	6 km	33,5 km	75 m	200 m
Diseño Dieléctrico	Dieléctrico Frio	Dieléctrico Caliente	Dieléctrico Caliente	Dieléctrico Frio
Material HTS	TBD	BSCCO	BSCCO	BSCCO
Fabricador del Conductor HTS	TBD	Innova Superconductor Technology. Co, ltd	AMS	Sumitomo

Cuadro 3: Proyectos de cables superconductores dentro de los Estados Unidos [9]

Proyectos	Columbus	Albany	Long Island	Long Inland 2	New Orleans	Hydra
Localización	Columbus, OH. USA	Albany, NY. USA	Long Island, NY. USA	Long Island, NY. USA	New Orleans, Louisiana	Manhattan, NY. USA
Lugar	Bixby Subestación	Riverside and Menands	Holbrook Subestacion	Holbrook Subestacion	Labarre- Metairie Subestacion	No Disponible
Estado	Instalado y Operando	Instalado y Operando	Instalado y Operando	Fabricación	On Hold	On Hold
Promotor	Ultera	Super Power	AMSC	AMSC	Ultera	AMSC
Utility / host	American Electric Power	National Grid	LIPA	LIPA	Entergy	ConEd
Fecha de Inicio	Setiembre 2006	jul-06	abr-08	2010	2011	2010
Tipo (AC o DC)	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Fases	3	3	3	3	3	3
Geometría	Tri-axial (3 fases concéntricas)	Tri-axial (3 fases concéntricas)	3 fases coaxiales	3 fases coaxiales	Tri-axial (3 fases concéntricas)	Tri-axial (3 fases concéntricas)

Cuadro 4: Detalles de los diseños de los cables HTS en los proyectos de estados unidos [9]

Proyectos	Columbus	Albany	Long Island	Long Island 2	New Orleans	Hydra
Voltaje	13,2 kV	34,5 kV	138 kV	138 kV	13,8 kV	13,8 kV
Longitud	200 m	350 m	600 m	600 m	1,1 millas	200 m a 300 m
Diseño Dieléctrico	Cold Dielectric	Cold Dielectric	Cold Dielectric	Cold Dielectric	Cold Dielectric	Cold Dielectric
Material Dieléctrico	Cryoflex	Laminated paper Polypropylene (LPP)	Laminated paper Polypropylene (LPP)	Laminated paper Polypropylene (LPP)	Cryoflex	Cryoflex
Material HTS	BSCCO	Fase 1: BSCCO Fase 2: YBCO	BSCCO	YBCO	BSCCO	YBCO
Fabricante del Conductor HTS	AMSC	Sumitomo (BSCCO) Super Power (YBCO)	AMSC	AMSC	AMSC	AMSC
Fabricante del Cable Conductor	Ultera	Sumitomo	Nexans	Nexans	Ultera	Ultera

EMPRESAS QUE FABRICAN CABLES SUPERCONDUCTORES

La construcción de cables superconductores son realizados por muchas empresas en el mundo entre las cuales se encuentra:

EMPRESAS	PAIS
American Superconductor Corporation	Alemania
Beijing Innopower Superconductor Cable	Japón
Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc.	Alemania
Furukawa Electric	Japón
Super Power	
Hyper Tech Research	Estados Unidos
Japan Superconductor Technology	Japón
Ls Cable Ltd	Corea del Sur
Oxford Instruments	Inglaterra
Southwire Company	Estados Unidos
Sumitomo Electric Industries	Japón
Superconductor Technologies	
Nexans	Francia

BENEFICIOS DE LOS CABLES SUPERCONDUCTORES

1. Beneficios económicos

1.1 Utilización de tensiones más bajas

Los cables HTS serán capaces de transportar capacidades de 4 hasta 5 KA, lo que representa mucho más de la capacidad de los cables convencionales. De hecho, se podrá utilizar un equipo adaptado a más baja tensión, impidiendo a la vez las pérdidas del efecto joule típicas de las aplicaciones de alta corriente y también los costes de los transformadores para elevar y disminuir la tensión.

1.2 Ampliación de los sitios de localización de los generadores

Al reducir las caídas de tensión, los cables HTS Dieléctrico Frio permiten colocar nuevos generadores más lejos de los centros urbanos o de incluir generación dentro de la red urbana mediante sistemas de almacenamiento, generación fotovoltaica u otras fuentes de energía renovable. Esto permite mejorar la calidad del aire y la salud pública en las zonas donde la población es muy concentrada.

1.3 Utilización de las estructuras ya existentes

Los cables HTS Dieléctrico Frio requieren un menor derecho de paso con respecto a los circuitos convencionales. De hecho, pueden ser tendidos a través de los corredores existentes y en el mejor de los casos a través de las canalizaciones existentes, reduciendo el tiempo para obtener nuevas autorizaciones y por consecuencia resolviendo rápidamente los problemas de congestión.

1.4 Mejor control y seguridad de la red

El flujo de potencia en un cable es inversamente proporcional a su impedancia. Al ser de muy baja impedancia, el cable HTS Dieléctrico Frio facilita el flujo de corriente. De hecho se disminuye de manera importante las pérdidas eléctricas al favorecer la vía de transmisión con pérdidas minimizadas.

Gracias a su impedancia bajísima los cables HTS permiten controlar el flujo de potencia en la red al utilizar reguladores convencionales de ángulos de fases.

2. Beneficios ambientales

El cable HTS Dieléctrico Frio proporciona varias ventajas para el medio ambiente:

- a) Instalaciones subterráneas que permiten eliminar el impacto visual de una línea aérea.
- b) Pérdidas reducidas en los cables HTS pero también en los circuitos convencionales adyacentes que son descargados gracias a la muy baja impedancia de los cables HTS.
- c) Utilización de nitrógeno líquido como dieléctrico y refrigerador que es barato, abundante y compatible con el medio ambiente

Otras ventajas menos directas y más difíciles de cuantificar para el medio ambiente y asociados al VLI son:

- a) Eliminación de las radiaciones electromagnéticas: el diseño coaxial del cable VLI acoplado con el escudo HTS, elimina completamente los campos electromagnéticos. La protección de las corrientes de fase del diseño VLI proporciona la neutralización y mutual anulación de los campos. En consecuencia y como fue verificado en el laboratorio, los cables VLI generan un campo casi nulo al exterior del ensamblaje. Además, la eliminación de este campo permite suprimir las corrientes de Foucault de los conductores metálicos cercanos o de otras estructuras metálicas, eliminando de hecho las interferencias con los cables eléctricos cercanos, sea los cables de potencia o de telecomunicación, y haciendo la inductancia del circuito del cable completamente independiente de la configuración de las 3 fases.

CONCLUSIONES

- 1) Los cables superconductores son una excelente alternativa para la creciente demanda de energía eléctrica pues ellos pueden transportar más energía sin ocupar mucho espacio.
- 2) Los cables superconductores son relativamente baratos comparados con los costos de los cables convencionales de cobre pues se necesita menos cantidad de cable para poder transportar mayor energía eléctrica.
- 3) Los cables superconductores de segunda generación son mucho más barato que los cables formados con alambres de primera generación debido a que su costo de producción es menor además de que el sistema de enfriamiento está constituido por nitrógeno líquido el cual es muy abundante en la naturaleza y de bajo costo.
- 4) Existen dos diseños de cables superconductores bien diferenciados, la utilización de cualquiera de las dos va depender mucho de las características del sistema eléctrico. Estos diseños se diferencian debido al tipo de dieléctrico utilizado y la posición en la que encuentra el dieléctrico a la hora de enfriar el cable.
- 5) Existen numerosos proyectos que se están llevando a cabo en la actualidad concerniente a la producción y puesta en marcha de cables superconductores en la red eléctrica. En Estados Unidos se está invirtiendo una gran cantidad de dinero en investigar la producción de cables a gran escala.
- 6) Los cables superconductores han demostrado ser un excelente medio de transporte de energía, además de ser un cable amigable con el medio ambiente pues el líquido que se utiliza para su enfriamiento es el nitrógeno líquido el cual no es contaminante y de bajo costo.
- 7) En el Perú todavía se sigue utilizando los cables convencionales en el transporte de energía ello conlleva a enormes pérdidas de dinero en el mantenimiento y reparación de las diversas fallas que se presentan debido al calentamiento del cable (efecto Joule).

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Jean-Maxime Saugrain, Frank Schmidt, Pierre Mirebeau. "Superconducting Cables- Status and Applications". Jicable, 07.
- [2]. Shinichi, M. Masachi, Y. Hirao, H. Mitsuo, S. Shigeo, N. Naoji, K. Yuh, S. Development of YBCO- T_c Superconducting Power Cables. Furukawa Review, No.35, 18-22. http://www.suptech.com/about_superconducting_wire_n.php
- [3]. Superconductor Technologies Inc. (2015). Conductus. About Superconducting wire. http://www.suptech.com/about_superconducting_wire_n.php
- [4]. Mikael, H. Luvata, P. Industrial Manufacturing of low temperature superconducting (LTS) wires. European Summer School on superconductivity 2011, Harjattula Mansion, Turku, Finland. <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID686.pdf>
- [5]. P. Garces. (2008). Conductores Recubiertos. Revista de Física, No37, Diciembre 2008, 35-49.
- [6]. Romedenne, L.O. (2008). Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica. Universidad politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería eléctrica. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/6397>

[7]. F.Shmidt, A. Allais. Superconducting cables for power transmission applications – A review. Nexans – Superconducting Cable System (Hanover - Germany)

[8]. Nexans, Superconducting White Paper (Noviembre 2006). A cost-effective way to upgrade urban power networks while protecting the environment.

[9]. Electric Power Research Institute, Superconducting Power Cables, Technical Update, December 2009.

[10]. American Superconductor Corporation. <http://www.amsc.com/>