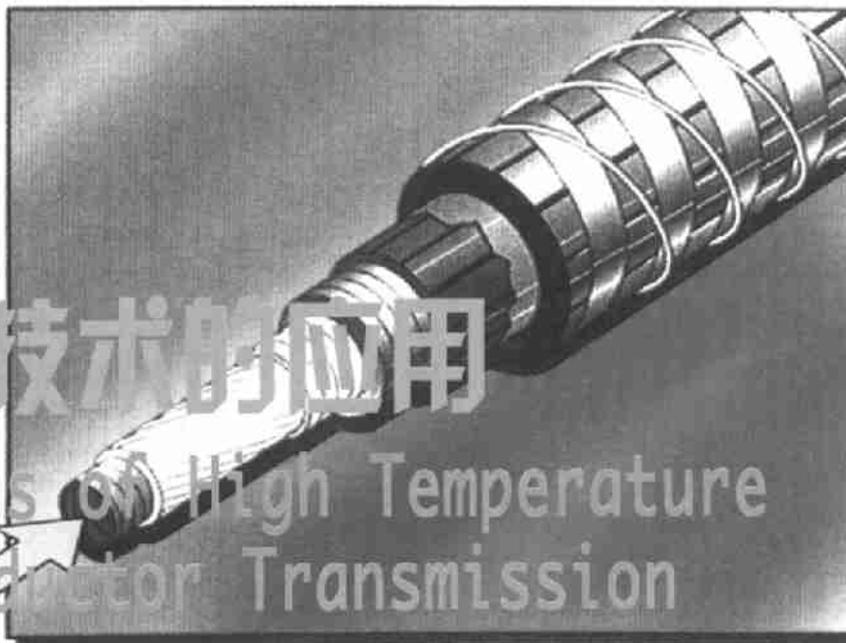


高温超导

输电技术的应用

Applications of High Temperature Superconductor Transmission



摘要: 介绍高温超导(HTS)输电技术的基本原理、主要优势及其冷介质同轴设计和热介质设计的特征与比较。重点介绍Pirelli公司50 m长、400 MVA HTS原型电缆的研制过程和美国南方导线公司为大型制造厂安装的30 m长、12.5 kV的HTS电缆供电系统。

关键词: 高温超导输电; 冷介质同轴设计; 热介质设计; 安装

Abstract: The principle and advantages of high temperature super conducting (HTS) cables are introduced. The features of the warm dielectric design and the cold dielectric coaxial design and their comparison are highlighted. This paper also describes a 50 m long 400 MVA HTS prototype system made by Pirelli and three 30 m long 12.5 kV HTS cables made by Southwire Company of America.

Key words: High temperature superconducting transmission; Cold dielectric coaxial design; Warm dielectric design; Installation

中图分类号: TM725 文献标识码: B 文章编号: 1006-9186(2001)01-0020-04

0 概述

超导概念最早由荷兰物理学家Heike Kamerlingh Onnes提出,他在测量汞的电阻温度特性时发现,如果将汞冷却到 -268.8°C 时,就出现超导现象。超导有表明其基本特性的3个临界值:

- (1) 临界温度,高于此温度则超导体不具备超导电性;
- (2) 临界磁场强度,当超导体承受的磁场达到此强度时超导电性也会消失;
- (3) 临界电流,超过此数值时也会使其失去超导电性。

早期的低温超导(LTS)材料是铌-钛(Niobiumtitanium)合金,

冷却剂是温度为 -237°C 的液态氮。低温超导材料具有较好的柔韧性,但价格昂贵,其实际应用价值受到相当程度的限制。

1986年发现在液态氮温度,即 $-180\sim-150^{\circ}\text{C}$,就具有超导特性的陶瓷氧化物材料,称高温超导(HTS)。液态氮的成本比液态氦

的低很多,前者是12.5美分/L,而后者是5美元/L。液态氮维持低温所需的电功率也仅为使用液态氦时的 $1/20\sim 1/50$ 。这使超导技术的推广应用有了很大的突破。

然而,高温超导体电线的最大问题是它的易碎性。氧化铜钙钛矿(Perovskite)材料象玻璃一样

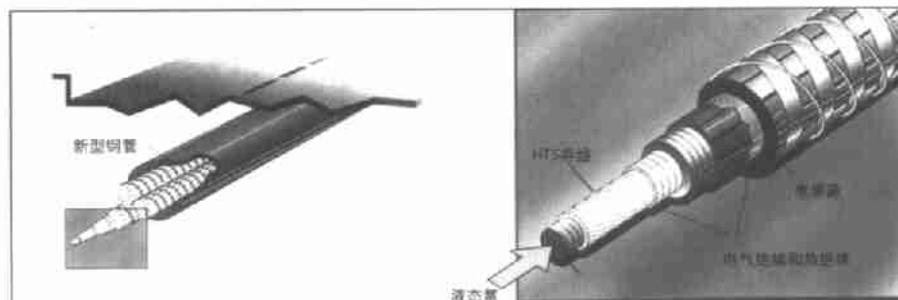


图1 高温超导电缆(HTS)结构

脆弱,使导线很难具有韧性。经改进后的材料称铋系材料(BSCCO),是一种由铋(bismuth)、锶(strontium)、钙、铜和氧组成的钙钛矿,呈粉末状。可将其注入很薄很细的银管内,密封后再制成所需的形状。

超导电缆是将超导体绕在一个空心管上,管内注入液态氮冷却剂。超导体内的粉状钙钛矿提供HTS特性,银薄管提供柔韧性(见图1)。

第2代HTS材料称钇系材料(YBCO),由钇(Yttrium)、钡(Barium)、铜和氧组成。它的处理过程与铋系不同,而是在柔性带状金属介质上覆盖一层超导涂料,形成镀膜带状HTS。这种新一代导体,更具柔韧性,效率更高,而且预计批量生产的成本较低。

HTS电缆的主要优点是:

(1) 它的输电能力是常规电缆的3~5倍,这意味着可以用较低的发电机端电压直接输送同样大小功率的电能,而无需变换成高电压,减少了输电环节,可改善电网结构,优化潮流分布;

(2) 损耗低,HTS本身没有电阻损耗,其介质损耗也由于电压低而减小,使用超导磁屏蔽层还可降低屏蔽层和铠装层的损耗,所以包括维持低温和补充冷却介质所需能耗在内,HTS电缆的总功率损耗仅是传统电缆的1/3。



图2 3种1 GVA三相电缆比较(断面形状图)

(3) 结构紧凑,图2示出3种不同电缆输送1 000 MVA 电力所需的电缆截面积,显然HTS电缆所需的送电通道远小于传统电缆,因而可将其置于现有的电缆通道内,减小新装电缆的压力,可避免额外申请架线权;

(4) 液态氮对环境无害。

因此,有专家认为,HTS电缆是解决未来大城市高密度配电的唯一出路。

近年来,美国能源部(DOE)组织和资助了一系列超导体实际应用示范项目。以下重点介绍Pirelli公司50 m长、400 MVA HTS原型电缆的研制过程和南方导线公司(Southwire)为大型制造厂安装的30 m长、12.5 kV HTS电缆供电系统。

1 Pirelli公司HTS原型电缆的研制

意大利的Pirelli公司在进行了一系列技术和经济研究之后决定与美国EPRI合作开发50 m长、

400 MVA 的HTS原型电缆,由美国DOE提供部分资助。其电流为2 000 A,电压115 kV,包括电缆接头在内均符合AIEC-CS2/90和IEEE48/96标准。研制计划包括4大部分:理论研究及模型制作,材料试验,电缆设计和制造以及系统安装。

1.1 电缆设计

HTS电缆有2种基本设计:热介质设计和冷介质同轴设计。热介质(WD)设计中,HTS导线封闭在低温环境中(见图3)。低温层提供电气绝缘,将超导体和冷却剂密封在里面。

冷介质同轴(CDC)设计中,每相有2个同轴HTS导线—馈线和回流线,由电气绝缘分开。导线全部置于低温环境中。CDC可设计成2种不同的结构:三相共用一个低温层(见图4),或每相有独立的低温层(见图5)。

表1示出各种电缆的输电能力比较。

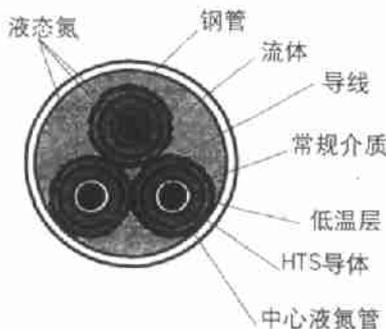


图3 热介质电缆截面图

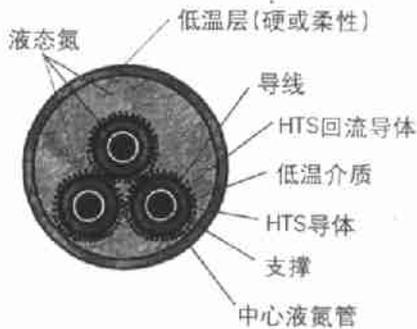


图4 带共用低温层的CDC电缆截面图



图5 带分立低温层的CDC电缆截面图

表1 采用不同介质电缆的容量比较

项目	常规介质	HTS WD	HTS CDC
直径/cm	20.32	20.32	20.32
电压/kV	115	115	115
功率/MVA	220	500	1 000

1.1.1 热介质设计

采用热介质(WD)设计的电缆适合安装在现有的电缆管道内。WD单导线设计虽比CDC用材少,但缺少回流通路,导致馈线及其周围金属件中的电损耗增加,因而运行成本比CDC高。但其优点是可采用常规电介质和附件,按与常规电缆相似的方法进行处理和安装。

图3是典型的WD HTS电缆,中间是空心管充有液态氮。超导带绕在管外,选材取决于具体的电缆参数。低温层提供热绝缘。这是一个真空绝缘区,递阶式绝缘可使热泄漏降到最小。低温层外是常规介质、屏蔽和机械保护。这种设计的介质可在常温下运行,与导体的低温环境绝缘。因此可利用成熟的技术,增加设计裕度,延长运行寿命。

WD HTS电缆系统的附件也是常规设计。在电缆实际安装时,电气绝缘和热绝缘是分开的。与电场控制有关的终端设备也是常规设计。但超导体与常规导体的连接部分是实际工程中的难点,需要采用新技术使液态氮冷却剂从高压侧进入接地端,为此需要一种特殊制造的套管。

1.1.2 冷介质同轴设计(CDC)

CDC HTS电缆可使输电容量和效率达到更高的水平,因超导电缆的同轴回流导体屏蔽了由馈电导线电流产生的磁场,可防止电阻材料因感应耦合消耗能量。回流与馈电电流大小相等、正负相反。由于三相馈线均与回

流导体相连,则三相电流总和为零,这种几何特性可使送电电流达10 kA。

CDC HTS电缆的结构为:馈电导线绕在管材上,与WD相同。低温介质覆在导体周围,然后是回流超导带材,最外层的低温层覆在回流导体外,低温层可以是刚体的,也可以是柔性的(见图4、5)。

1.2 原型电缆

1996年Pirelli公司决定在其光纤设备厂进行WD HTS原型电缆的制造和试验,临界电流设计值为3 000 A DC, -196 °C(1 mV/cm)。1997年在Pirelli的米兰电缆厂注入介质。根据AEIC-CS2/97和IEEE 48/96对介质特性进行厂内试验,雷电冲击试验(700 kV B.J.L水平)也很成功。除超导体用铝制品代替外,其它部件的全尺寸模型试验以及低温冷却系统试验都符合要求。

采用多层绞合结构缠绕热塑管材解决了导线的机械和热限制。全面的优化设计使超导带材变形程度最小,极限电流维持均匀一致,且不因变形而降低。

低温层是超导电缆的主要特征之一,其效率直接影响其它许多设计和成本因素:包括最大冷却长度、冷却系统的冷却功率、机械特性、真空密封度、低热损耗和可靠性等。

WD HTS的低温层有以下典型部件:内管(冷管)、超绝缘(superinsulation)、无源注入元件(吸收剂)和外管(热管)。低温层必须很有韧性,使电缆能够缠

绕在安装卷筒上。同时又要有一定的机械强度,承受内部2 MPa和外部1.5 MPa的压力,安装或短路时的层压以及从室温到液态氮温度的热疲劳。满足上述要求的解决方案是采用波纹不锈钢管。波纹管的厚度、波纹坡度和深度都是影响管的韧性、内外压力及低温层空间的重要因素。间隔层和绝缘结构影响低温层的热耗,采用高真空(低于0.01 Pa)可消除热渗漏,优化多层绝缘(MLI)可屏蔽能量扩散。

WD设计中,低温层的外管采用外绝缘。为获得最佳的电气特性,用PPL(聚丙烯层纸)绝缘,为解决PPL的油隆起,在管内注入聚丁烯油(润滑油)。

电缆的户外终端设备采用常规组件与低温组件结合的方式。常规部分的陶瓷绝缘子要与高压液态氮管连接,这是设计制造的重点,需要一种特殊的馈线套管。

要保持超导电缆在临界温度以下,需注入次冷高压液态氮(见图3)。冷却剂将热量带到一个液态氮蒸发器内。用真空泵控制蒸发器的压力在101.3 kPa,温度在-209 °C以下。系统自动运行,只需定期补充冷却剂。

2 南方导线公司的HTS电缆工程

1999年底南方导线公司完成了3条30 m长的HTS电缆工程,12.5 kV, 1 250 A。为2个大制造厂和1个机器车间供电,负荷量相当于1个小城市。

项目的主要工作包括研究制造程序和加工机械、设计电缆、开发低温冷却系统和电/热终端设备、仪表配置及考察安装场地。

2.1 电缆结构

电缆长50 m,为完全密封的

防护式设计。包括中心超导材料、介质及密封层等几部分。超导材料由电介质材料保持在低温状态(见图6)。

2.2. 材料和加工机械

由于HTS仍处于开发阶段,所以南方导线公司决定从专门研究制作高温超导和低温超导材料的Intermagetics总公司购买HTS材料BSCCO2223。

对公司原有的纸带机进行改造,用以加工超导体和聚合物介质带(见图7),介质在液态氮温度运行。

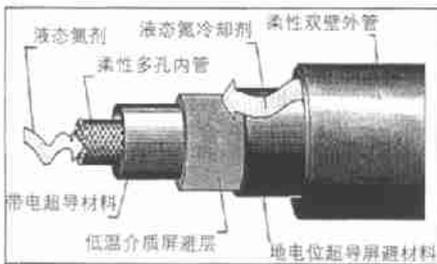


图6 低温介质电缆结构

2.3 电缆试验

电缆成型后在Oak Ridge国家实验室(ORNL)进行试验。试验内容包括检测超导体的载流能力和电介质的整体性。

2.4 终端设备

终端设备要将电流从-160℃、1MPa的氮压力下的超导电缆中转换到大气状态的常规电缆中,控制热泄漏是设计中要考虑的主要问题。2个终端设备均在ORNL进行加工和试验(见图8)。

2.5 氮的注入

氮注入系统由ORNL、南方导线公司和航空产品公司共同设计,由航空产品公司制造,在ORNL试验运行,试验数据用于制造现在的3条30m长的电缆。

2.6 安装

为示范起见,南方导线公司

将HTS电缆置于现有的架空线路设施上,而不是安装在地下,工程于1999年底完工。

3 HTS输电的最新动态

进入90年代以来,各种长度、类型、等级的HTS电缆相继问世,有些已经开始联网试验。近期的研究开发中,以美、德、日和丹麦的工作较有代表性。美国底特律Edison变电站将安装一条130m长、24kV、2400A的HTS电缆,该工程预计2001年完工。

日本东京电力公司研制的3kA、5m长柔性超导线材,可弯曲成直径2.6m的环形圈,而临界电流基本上没有降低。东京电力还与住友公司合作对HTS线材断面构造和轧制工艺进行改进,使交流损耗降到原来的1/10,临界电流密度达到 10^4 A/cm²。

降低交流损耗的方法还包括采用端串电阻、调节各超导带绕距、绕向以及线材换位、合股等手段。

4 结论

自首次发现HTS材料以来,12年的研究与实践表明:HTS技术在解决诸如地下线路升级改造、架空线路转入地下、减少城市高压电力系统输电环节、提高输电效率和大功率回路稳定性等方面有着独特的优势。因而,各国电力公司正联手努力推广HTS



图7 用原有纸带机加工超导体和聚合物介质带

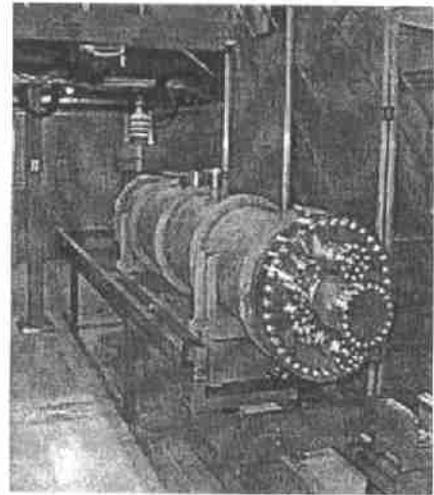


图8 在ORNL实验室进行试验

在电网中的应用,为使超导电缆更适于现有的网络以及未来的电力系统,对采用HTS电缆的电力系统进行更进一步的仿真研究,评估其故障电流和稳定性。

WD和CDC HTS电缆技术,为多层结构的设计提供了常规电缆所不具备的更大的灵活性。随着超导技术的进步、超导材料价格的下降,以及低温制冷剂和冷却设备制造工艺的进步,HTS的应用将会更加普及。 ■

参考文献:

- [1] Rubin L. 2001: Year of the superconductor[J]. Electrical World, 2000, (2): 19-20.
- [2] 程时杰. 超导技术在电力系统中的应用[A]. 面向21世纪电力科学技术讲座[R]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] Kelley N, Cinquemani P, Belcher P, et al. A demonstration high temperature superconductor cable to power a manufacturing operation [A]. 1999 IEEE Transmission & Distribution Conference [C].
- [4] Hughey Jr. RL. Applications of HTS cables to power transmission; state-of-the-art and opportunities[A]. 1999 IEEE Transmission & Distribution Conference [C].

* * *

作者:

余然(编辑)

收稿日期: 2001-01-20