

# 高温超导变压器

◆ 戴少涛 肖立业 王银顺 张东 林良真

(中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190)

超导电力技术是利用超导体的高密度无阻载流能力发展起来的新型电力技术。超导电力技术的应用,可以降低电网损耗和电气设备的占地、提高电力质量和供电可靠性,是21世纪具有经济战略意义的高新技术。

高温超导变压器是超导电力技术的一个重要研究和发展方向。高温超导变压器体积小、效率高、寿命长、单机容量大、过载能力强,有助于提高电力系统的效率和稳定性,是未来电网技术革新的一个重要方向。我国是电力需求大国,未来20年电力工业的发展速度仍将保持快速增长,电网互联和直流输电日益受到重视;城市化趋势加剧,城网改造工程需要大幅度扩充变电站容量。可以预见,高温超导变压器将首先应用于城市大负荷中心的电网改造和直流输电,并随着耐压等级的提高,向着大容量、高等级的变电站应用发展。高温超导变压器在电力系统中有广泛的应用前景,必将带来巨大的经济和社会效益。

## 1 超导材料以及超导电力技术

1911年,荷兰物理学家卡末林·昂尼斯将汞冷却至液氮温度(4.2K)时,发现汞的电阻突然消失了,因而卡末林·昂尼斯成为第一个发现超导电性的物理学家。除零电阻效应外,超导体还具有完全抗磁性(迈斯纳效应),即当超导体成为超导态后,只要周围外加磁场没有强到破坏超导电性的程度,超导体就会把穿透到体内的磁力线完全排斥出体外,在超导体内永远保持磁感应强度为零。迈斯纳效应的发现使人们认识到超导体的行为并不是不可逆的。在此之后人们才开始比较全面地认识超导体的基本性质。

目前,超导电力技术应用的超导材料主要有Bi系和Y系高温超导材料。Bi系高温超导带材的制备采用先驱体粉末银包套法(Ag/PIT),利用常规拉伸压延工艺和控制气氛热处理技术。目前已经可以制备出长度达数km、临界电流密度 $J_c$ 大于

$1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  (自场@77K)的实用化超导带材,并且其产业化已具有相当大的规模。然而,由于Bi系高温超导带材的不可逆场低,临界电流在较小磁场下衰减很快;而且采用银包套等成本很高的原料,生产成本始终成为其大规模应用的一大障碍。目前,国际上已经停止了Bi系高温超导带材的后续研究开发。

Y系超导材料的制备工艺采用化学沉积法,各向异性较弱,且比Bi系超导材料具有更高的不可逆场,在温度77K下的载流能力远优于Bi系,而且具备更广的实用性和更低的成本,因而是高温超导材料的主导发展方向。Y系高温超导带材的研究及其制备技术近些年来取得了突飞猛进的进展。目前单根长度超过1300m、77K下载流能力达到160A(带宽1cm)的钇系高温超导带材已经可以制备出来。商业化批量生产的钇系高温超导带材已经有产品销售。

超导电力技术是利用超导体的无阻高密度载流能力及超导-正常态转变的物理特性,并与超导材料技术、电力电子技术、智能控制技术、电力系统、低温工程、高电压绝缘技术等相结合而发展起来的一门电力新技术。超导电力技术的核心是采用超导材料作为通电导体,实现电流传输、磁场产生、电磁场交换等功能,或是利用超导材料的相变特性改变设备阻抗。

因此,超导电力技术的应用将是电力工业变革的重要推动力,不仅可以大大降低网络损耗、减少电气设备的体积和占地,而且还可以明显改善电能的质量,提高电力系统运行的稳定性、可靠性和安全性,降低电网的造价及电网的改造成本。所以,超导电力技术在实现电力装置的轻量化、小型化、低能耗和提高电力系统的安全性、稳定性及电力质量等方面具有重要的意义与广阔的应用前景。

近些年来,超导电力技术的发展已取得重大的进展。美国、日本、韩国和欧洲等都制订了发展超导电力技术的相关计划。国际上的主要电力公司

和电力设备生产企业在超导电力技术方面都相继投入了大量的研究开发费用,用于推动其实用化。研究开发的重点是高温超导限流器、超导储能系统、高温超导电缆和高温超导变压器、高温超导体电机等。目前,这些超导电力装置已经进入示范运行阶段,而小型低温超导储能系统已开始出现产品。

## 2 高温超导变压器的研究开发现状及发展趋势

高温超导变压器的结构与常规变压器基本相同,其设计一般采用与常规变压器一样的铁芯结构,仅是高、低压绕组采用高温超导材料,并将超导绕组置于低温容器中,而变压器铁芯一般仍处在室温环境下。由于变压器绕组采用了超导材料,高温超导变压器具有低损耗、高效率、体积小、质量轻、无污染及无火灾隐患的优点,受到各国电力部门的极大关注,并取得了一些重要的研究成果。

在欧洲,1997年,瑞士ABB公司率先研制成功了三相容量为630kVA、电压为18.72kV/0.42kV、电流为11.2A/866A的配电用高温超导变压器,并已在日内瓦电网并网运行1年。德国西门子公司在研制成功1台100kVA、5.5kV/1.1kV单相高温变压器后,继续开发了电力机车用高温超导变压器,并于2001年研制成功1台1MVA、25kV/1.4kV单相高温超导变压器(包括冷却系统)。该超导变压器与常规机车用变压器相比,质量降低了45%,体积减小了40%,效率从92%~95%提高到99%,所有驱动系统能量节约30%左右。英国牛津超导仪器有限公司与法国格勒诺布尔电气工程实验室根据欧共体READY计划共同设计了1台41kVA、2.1kV/0.4kV单相高温超导变压器。该变压器磁路采用冷铁芯结构,原边绕组采用Bi2223带材,而副边绕组采用长60m的YBCO带材。

在美国,1998年5月美国电力公司、IGC和橡树岭国家实验室共同研制成功1MVA、变比为13.8kV/6.9kV单相高温超导变压器。美国Waukesha公司在1994~2000年完成了1台1MVA、13.8kV/6.9kV单相高温超导变压器样机的研制后,于2000~2005年研制成功1台5/10MVA、24.9kV/4.16kV三相高温超导变压器,目前正在设计及其后续开发工作。

在亚洲,1996年日本九州大学、富士通电气公司和住友公司成功地研制了1台单相高温超导

变压器,在77K下容量为500kVA,运行电压为6.6kV/3.3kV,电流为76A/152A,该超导变压器在66K下运行时的容量可达800kVA。韩国DAPAS计划正进行100MVA、154kV/22.9kV三相高温超导变压器的设计,将于2011年投入运行。中国科学院电工研究所与特变电工股份有限公司合作,于2005年11月研制成功一台630kVA、10.5kV/0.4kV三相高温超导变压器,并在新疆昌吉市投入配电网运行。此外,我国株洲电力机车厂2005年也完成了1台315kVA、25kV/860V高温超导变压器的研制工作。

纵观国内外超导变压器的研究与开发,整体的发展趋势主要表现出两个鲜明的特征:①大容量化。当超导变压器容量大于其经济运行容量时,总投资费用将会低于传统变压器,超导变压器节能等特点成为显著的优势。②功能化。针对超导变压器的独有特点,重点在于充分发挥和利用其辅助功能对电力系统的影响,例如采用空心超导变压器充当并联电抗器补偿流经输电系统的容性电流,将变压器与限流器的功能进行集成等。图1为超导变压器。



(a)瑞士ABB公司研制的630kVA超导变压器 (b)日本九州大学研制的1MVA超导变压器



(c)德国SIEMENS公司研制的1MVA超导变压器



(d)美国Waukesha公司研制的5/10MVA超导变压器

图1 超导变压器

### 3 630kVA高温超导变压器的研制

在开展630kVA高温超导变压器的研制工作之前,中国科学院电工研究所与特变电工股份有限公司合作,研制成功1台26kVA、400V/16V小型三相高温超导变压器样机(如图2所示),并进行了



图2 26kVA三相超导变压器样机

相关测试。为了研究在冲击作用以及极端条件下的超导变压器工作稳定性,又研制了1台45kVA、2400V/160V单相高温超导变压器样机(如图3所示),并对其进行了各种冲击和极端条件下的试



图3 45kVA单相高温超导变压器样机

验。试验结果表明:超导变压器可以承受按电力变

压器标准规定的短路电流冲击和电压冲击。

在此基础上,中国科学院电工研究所与特变电工股份有限公司,研制了630kVA、10.5kV/0.4kV配用电三相高温超导变压器(如图4、图5所示)。该超导变压器通过了国家变压器质量监督检验中心进行的变压器行业标准测试,并于2005年11月15日并入特变电工股份有限公司10.5kV配电网系统运行,为公司电缆生产车间供电,运行1400h,运行期间一切正常,没有发生任何异常情况,运行



图4 630kVA三相高温超导变压器用超导绕组

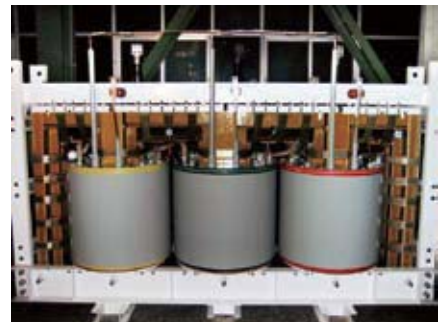


图5 630kVA三相高温超导变压器

效率达到98.3%。这是我国首台、国际上第2台并入实际电网试验运行的高温超导变压器。表1列出了该超导变压器的主要参数。

表1 630kVA三相高温超导变压器参数

型号: SGLNHTSH-630/10.5/0.4	容量: 630kVA
相数: 3	频率: 50Hz
电压: 10.5/0.4kV	电流: 34.64/909.32A
空载损耗: 1090W	空载电流: 1.15%
负载损耗: 740.5W	阻抗电压: 2.70%

对于以往研究开发的超导变压器,仅仅采用超导线圈替代铜线圈,从而可以有效降低铜损,但却不能降低铁损。近些年来随着非晶合金铁芯技术的发展并且已经应用于电力变压器,在630kVA三相高温超导变压器的研制过程中,首次提出非晶合金铁芯和超导线圈相结合的方法,采用三相五柱式结构变压器结构(如图6所示),以期同时降低变压器铜损和铁损,从而进一步提高变压器效率。超导变压器由于需要维持运行的低温环境,在铁芯和绕组之间需要留出足够空间给低温容器,从而对非晶合金铁芯的设计和制造带来了新的挑

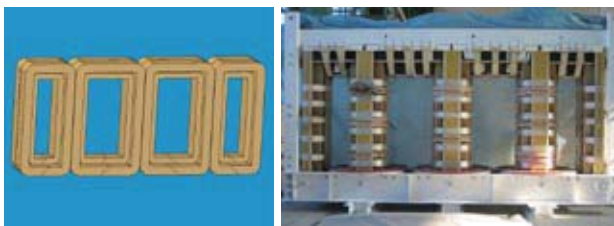


图6 三相五柱式结构非晶合金铁芯

战。不仅如此，由于超导绕组工作在交变磁场环境中，为了避免产生涡流，所使用的低温容器将不能使用任何金属材料，而应选用绝缘性能和机械性能好的玻璃钢材料。同时，作为防辐射屏的光滑金属箔也不能连续成环，否则也将出现短路现象。这就对低温容器的合理设计以及真空夹层结构的优化提出了更高的要求。

通过630kVA三相高温超导变压器的研制及其在10.5kV配电网上的试运行，获得了超导变压器基本性能、过流过压、故障限流、系统噪声等第一手数据和资料，从而为后续开发更大容量、更高电压等级的超导变压器奠定了良好的基础。

#### 4 电工所在超导电力技术方面的其它重要工作

中国科学院电工研究所在国家“十·五”和“十一·五”规划期间，走自主创新道路，在国家科技部、中国科学院、地方政府的大力支持下，与相关企业以及电力部门密切合作，除高温超导变压器成功并网运行外，在高温超导电缆、高温超导限流器和超导储能系统的研究开发及其并网试验运行方面也都取得了重大突破，推进了我国超导电力技术的实用化进程。

(1) 2004年12月，研制成功长75m、10.5kV/1.5kA三相交流高温超导电缆系统，并将该电缆投入甘肃长通电缆科技股份有限公司的配电网试运行。该电缆的关键技术全部自主开发，累计运行约7000h，系统没有出现任何故障。如图7所示。



图7 75m/10.5kV/1.5kA三相交流高温超导电缆

(2) 2005年8月，将10.5kV/1.5kA高温超导限流器样机(如图8所示)投入湖南省电力公司所属的娄底市高溪变电站试验运行，累计运行超过



图8 10.5kV/1.5kA三相高温超导限流器

11000h，没有出现任何故障，并将短路电流限制80%以上，响应时间小于2ms，恢复时间为12ms，使我国成为继瑞士、德国、美国之后第4个将高温超导限流器投入实际电网运行的国家。

(3) 2008年6月，完成了1套1.0MJ/0.5MVA超导储能系统(如图9所示)的研制工作，解决了一系



图9 1MJ/0.5MVA高温超导储能系统

列关键科学技术问题，取得了多项自主知识产权，并即将投入实际配电网试运行，其技术成果的应用将为提高电能质量进而改善电网动态稳定性发挥重要作用。■

#### 作者简介:



戴少涛，现任中国科学院应用超导重点实验室副主任、中国科学院电工研究所超导电力科学技术研究发展中心主任、中国电工技术学会超导应用技术专业委员会秘书长。主要研究方向为超导电力技术和高温超导磁体技术。在超导体的电磁机械特性和交流

损耗、高温超导磁体的稳定性和失超保护、高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导变压器等方面进行了多年的研究。