

超导技术在舰船电力系统中应用的发展研究

冀路明¹, 陈新刚¹, 王硕丰²

(1. 海军装备研究院 舰船所, 北京 100073; 2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031)

摘要: 介绍了超导材料的特点, 分析了目前国内外针对舰船电力系统开展的超导技术研究及取得的进展, 总结了超导技术应用于舰船电力系统的前景。

关键词: 舰船; 超导; 电力系统; 应用技术

中图分类号: U665.1; TM26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2006) 01-0054-04

Research on the application of super-conduction technology in warship electric power systems

Ji Lu-ming¹, CHEN Xin-gang¹, WANG Shuo-Feng²

(1. Institute of Navy Vessels, Navy Academy of Armament, Beijing 100073, China; 2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of super-conduction material are introduced and the development of research work on the application of super-conduction material in warship electric power systems is analyzed. In the end, the foreground of the application of super-conduction technology in warship electric power systems is summarized.

Key words: warship; super-conduction; electric power system; application technology

0 概述

自从 1911 年荷兰科学家 K. Onnes 发展了金属汞在 4.2K 的液氮温度下电阻率变为零之后, 人们开始研究超导现象, 发现了新的超导材料。超导材料的研究史是不断提高超导体的临界温度和临界电流密度的历史。通常超导材料是指在温度、磁场强度和电流密度都小于它们的临界值的条件下, 电阻为零的材料, 它具有两个最基本的特性—零电阻效应和完全抗磁性, 这些特性对于提高舰船电力系统的功率密度和效率具有变革性的意义: 超导线的输电能力比相同截面的铜导线高两个数量级; 用超导材料制造的设备具有磁场强、电流大、体积小、重量轻、效率高的优点。

目前世界发达国家正在研究的超导装置包括超导储能系统、高温超导发电和推进电机、高温超导电缆、高温超导变压器、高温超导限流器, 以及电力电子相结合组成的全超导电力系统。

1 超导材料特点及发展现状

超导技术是 21 世纪具有战略意义的高新技术。自从 1911 超导现象被发现到 1986 年高温超导体的出现, 人们从未停止过对超导应用的研究。90 年代末, 在高温超导薄膜和高温超导导线方面相继得到突破并实现了产业化。最近, 美国、欧洲、日本、韩国等国家都相继启动了基于铋系高温超导导线和基于钇系薄膜的超导应用产品开发计划。

超导材料可以简单地分为低温超导材料和高温超导材料。低温超导材料一般在液氮温度 (4.2K) 下使用, 实用化的低温超导材料主要有 NbTi 和 Nb₃Sn; 高温超导材料可在液氮温度 (77K) 下使用, 而液氮温度很容易达到, 因此高温超导材料具有很好用的应用前景。1986 年之后超导体的临界温度有了大幅度的提高。超导线材技术的发展经历了两个重要的里程碑: 1964 年 NbTi 超导体的发现和 1988 年 Bi-2223 超导体的发现。它们开创了应用超导技术的新纪元。

目前, 高温超导导线工业生产的关键技术掌握在世界上少数几家公司手中, 主要高温超导导线生产公

收稿日期: 2005-06-09; 修回日期: 2005-10-25

作者简介: 冀路明 (1965-), 男, 高级工程师。研究方向: 船舶电气工程。

司如下:

(1) 美国超导公司(ASC)

ASC 持有 BSCCO 短导线实验室临界电流密度的世界纪录, 标准生产长度为 200m~300m, 年产量约 500km~1000km. 此外, ASC 还参与了美国能源部超导计划中部分高温超导产品研发, 包括高温超导电缆、高温超导电动机等.

(2) 日本住友电气公司 (SEI)

SEI 是首先在世界上主导 BSCCO 导线发展的公司之一. 该公司除提供高温超导导线之外, 也参与了日本主要的高温超导产品研发工作, 包括高温超导电缆、

高温超导变压器、高温超导磁储能装置和高温超导单晶生长磁体等. 日本全国高温超导应用开发使用的导线基本由 SEI 提供.

(3) 德国真空冶炼公司 (VAC)

VAC 的超导产品及技术包括 Bi-2223 高温超导导线、NMR、MRI、高场磁体、聚变和粒子加速器等.

(4) 北京英纳超导技术有限公司

这是我国第一家有能力大规模生产高温超导导线的公司, 其产品性能与国外公司同类产品的性能比参见表 1.

表 1 几家公司所产超导导线性能比较

公 司	分类	临界电流/ A(77K,sf)	截面尺寸/ mm×mm	工程电流密 度/A·cm ⁻²	弯曲半径/mm	拉应力 /MPa	拉伸应 力形变
美国超导(ASC)	大电流型	115	4.1×0.208	13500	100(5%)	75(5%)	0.15(5%)
德国真空冶炼(VAC)	高强度型	70	3.1×0.250	9000	70(5%)	265(5%)	0.4(5%)
	Ag	66	0.23×3.7	7000	-	45(10%)	0.18(10%)
日本住友电气(SEI)	Ag/Mg	61.9	0.23×3.7	6750	-	120(10%)	0.26(10%)
	Ag/Mg	45.5	3.8×0.25	4800	-	-	-
英纳超导	Ag	90	4.2×0.22	9740	50(5%)	120(5%)	0.2%(3%)

由表 1 的性能指标看, 北京英纳超导公司产品的综合性能仅仅低于 ASC, 但比 SEI 和 VAC 的高. 这为我国发展高温超导应用技术奠定了良好的基础.

超导线材的市场发展趋势表明, 在未来的五到十年时间内第一代高温超导带材将很快被更为有使用价值的第二代线材取代. 图 1 显示了高温超导材料的价格预测, 其价格近年来随着技术的突破迅速降低.

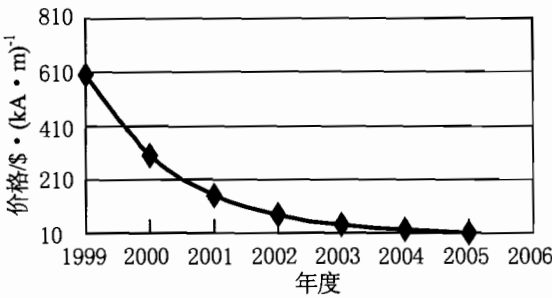


图 1 高温超导材料的价格预测

2 超导技术应用在舰船电力系统中的发展前景

(1) 高温超导电机

高温超导推进电机是舰船电力推进设备未来发展方向之一. 舰船电力推进应用传统电机受到效率、体积和重量方面的限制, 而安静、大功率、低速大扭矩的高温超导推进电机将是未来舰船电力推进的关键设备之一, 由高温超导发电机—高温超导推进电机—螺旋

桨构成的舰船电力推进系统将以其显著的优点在水面舰船和潜艇上得到广泛的应用. 高温超导交流同步电机的励磁绕组是用高温超导导线制造的, 和常规电机一样, 都是转子旋转型机器, 但是采用高温超导线圈的电机效率高, 尺寸大大缩小, 重量大大降低. 例如, 美国研制成功的 3.7MW 高温超导同步电动机与普通电动机相比, 重量从 12.3 t 降为 6.8 t; 体积从 15.8m³ 降为 7.47m³; 效率从 95.9% 上升到 97.7%. 另外, 高温超导推进电机的同步阻抗低, 噪声小, 谐波含量少, 维护简单, 励磁绕组不易产生热疲劳等都是传统电机无法实现的. 特别是在现代吊舱推进系统中, 由于受到空间的限制, 大功率推进适于通过高温超导推进电机来实现, 这是大功率、低噪声、高航速舰船推进动力的理想方案^[1]. 表 2 给出了 1999 年~2003 年几个国家的高温超导电机研制情况. 图 2 是国外舰船推进超导电机的发展和预测.

表 2 高温超导电机主要研制情况 (1999 年~2003 年)^[2]

年份	美国	俄国	德国	英国	韩国
1999					30 kVA
2000	736 kW				
2001	3730 kW		380 kW	100 kVA	
2002		4 kW			73.6kW
2003	5000 kW				

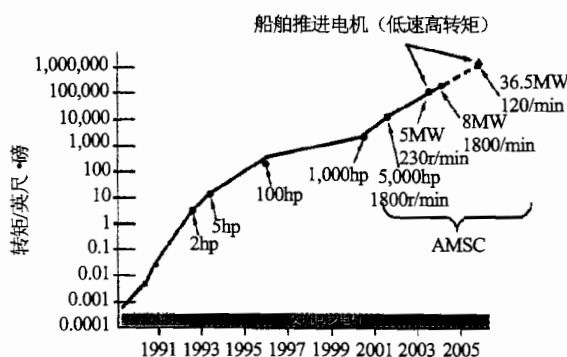


图2 国外舰船推进超导电机的发展与预测

(2) 高温超导限流器

表3 高温超导限流器发展现状

国家	高温超导限流器	现状
瑞士	三相磁屏蔽型, 1.2MVA	试验运行
	三相磁屏蔽型, 10MVA	完成研制
美国	三相桥路型, 2.4kV 100A	试验完毕
	三相桥路型, 15kV 1.2kA	试验运行
日本	三相电抗器型, 6.6kV 2kA	试验运行
法国	触发限法器, 0.72kV 1000A	试制阶段

限流器是电力系统中的一种限流装置, 它在电网正常运行时呈现零阻抗; 在电网出现异常的大电流时可迅速变为高阻抗, 从而限制故障电流, 便于断路器开断故障线路, 保护电网的安全运行. 随着舰船电力需求的日益增长, 舰船电力系统的容量成倍增长, 电力系统发生短路故障时产生的短路电流也越来越大, 然而目前舰船上采用的常规交流低压断路器以及直流断

路器的开断容量已达到了极限, 因此, 断路器的开断能力已成为限制舰船电力系统容量发展的瓶颈, 特别是大容量直流电力系统中, 目前几乎没有合适的断路器可用. 在这种情况下, 开发高温超导限流器将成为发展大容量舰船电力系统的关键. 表3 是高温超导限流器发展现状.

(3) 超导磁储能系统

超导磁储能系统是利用高温超导导线制成的超导电感线圈, 由交流电网经变流器转换电能向超导线圈供电, 从而将能量储存在超导线圈中. 需要时可以将储存的能量经逆变器送回电网或作其它用途. 由于储能线圈由高温超导导线绕制并维持在超导状态, 线圈中的能量几乎可以无损耗地长期储存. 由于超导储能系统储存的是电磁能, 因此, 与其它形式的储能如蓄电池储能、压缩空气储能、抽水储能和飞轮储能等相比, 它具有许多明显的优点. 首先, 由于超导储能可长期无损耗地储存电能, 其转换效率可高达95%; 其次, 由于系统与电网的连接可通过采用电力电子器件的变流器来实现, 因而响应速度快(约几到几十毫秒). 由于高温超导磁储能系统放电快、功率密度十分高, 因此是一种很有潜力的大功率脉冲电源; 采用高温超导磁储能系统可很容易对电网电压、频率、有功和无功功率进行调节; 高温超导磁储能系统中没有转动部件, 因此系统的寿命很长, 且维护方便, 无污染. 与低温超导磁场储能器相比, 高温超导磁储能系统的磁场强, 制冷方便, 动态性能好, 工作可靠. 几种储能方式的性能比较见表4.

表4 几型储能方式的性能比较

	电池	电容储能	飞轮储能	电磁储能	燃料电池
效率/%	70~90	90	90	95	40~55
功率范围	5kW~10MW	5kW~100kW	1kW~10MW	300kW~1000MW	10kW~2MW
能量范围	0.1MJ~600MJ	1kJ~10MJ	1MJ~15MJ	1MJ~500MJ	—
循环寿命/次	2000	100,000	10,000	10,000	—
充电时间	小时	秒	分钟	分钟~小时	—
成本/\$·kW ⁻¹	100~200	500	300	700~1000	1500
能量密度/MJ·m ⁻³	—	1	—	4~40	200
成熟度	成熟	基本成熟	基本成熟	基本成熟	基本成熟

(4) 超导变压器

超导变压器和普通电力变压器的功能相同, 然而, 和普通的电力变压器相比, 超导变压器具有下述优点: 体积小、重量轻; 损耗低、效率高; 极限单机容量大(单机容量越大, 则经济性能越高); 无火灾隐患, 无环境污染. 因此超导变压器将是现代舰船电力推进系

统的重要组成部分, 研究和发展超导变压器适合于海军舰船运动系统的特殊需求. 超导变压器的发展趋势: 以高温超导变压器为主, 短期以配电变压器为主, 5年左右的时间内商品化. 表5 给出了超导变压器的研制情况.

表5 超导变压器研制情况

研究开发单位	主要技术参数	现状
瑞士 ABB 公司	18.7 kV/420V 630kVA	完成试验
日本九州大学	6.6 kV/3.3kV 1MVA	试验运行
德国 Siemens 公司	5.6 kV/1.1kV 1MVA	研制阶段
美国 Waukesha 公司	13.8kV/138V 10MVA	试验阶段
中国中科院	10.5 kV/400V 630kVA	研制阶段

(5) 高温超导电力传输电缆

高温超导电力电缆能够有效地传输大电流,产生的焦耳热损耗较低.表6是高温超导电力传输电缆的研究情况.

表6 高温超导电力传输电缆研究情况

研究开发单位	主要技术参数	现状
丹麦 NKT 公司	三相 30m 36kV 2kA	试验运行
美国 Southwire 公司	三相 30m 12.5kV 1.25kA	试验运行
日本东京电力公司	三相 100m 66kV 1kA	试验运行
美国 AMSC/Pirelli 公司	三相 600m 138kV 2kA	研制阶段
韩国 DPAPS	三相 1000m 154kV	预研阶段
中国中科院	三相 75m 10.5kV 1.5kA	研制阶段

目前,高温超导导线在舰船上的应用主要体现在舰船综合电力推进系统及一些先进的新式武器、装备方面.美国海军于2003年开始了一个全尺寸的超导技术舰船应用项目,目标是在下一代舰船上建立起以下高温超导系统:推进用高温超导电动机 25MW~30MW, 100r/min~200r/min;推进用高温超导发电机 25MW~30MW, 3600 r/min;武器用能源高温超导发电机 3MW~5 MW, 3600 r/min;武器用高温超导磁储能系统 (SMES) 400MJ, 150MW.

3 结语

超导技术是最近30多年发展起来的高技术,它在电工、交通、医疗、工业和科学实验领域都有重要的现实作用和巨大的发展前景.超导技术的综合性很强,它的发展需要与材料科学、低温技术和超导物理等多个学科密切配合.

随着研究工作的进一步深入,超导技术的应用必将日益扩大,并为军事技术的发展做出重要贡献.

参考文献:

- [1] Swarn S.Kalsi. Development status of superconducting rotating machines [Z]. American Superconductor Corporation.
- [2] 冀路明, 陈新刚. 舰用高温超导推进电机发展研究[C]. 未来20年世界海军装备技术发展趋势及启示研讨会, 2004.

《船舶工程》入选《中国科技期刊精品数据库》声明

经《中国知识资源总库》编委会提议,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社实施建立《中国知识资源总库·科技精品期刊库》.通过对《中国期刊全文数据库》中近8000种期刊10年的引文统计分析与综合评价,经《中国知识资源总库》专家委员会审核,遴选500种科技类期刊编辑出版《中国科技期刊精品数据库》.

《船舶工程》于2005年8月正式入选该数据库.数据库收录的作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性支付,如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理.



《船舶工程》编辑部

2006年元月