



超导电力技术基础

■ 王银顺 著



科学出版社

超导电力技术基础

王银顺 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了超导电力技术中的基础理论和实验技术。全书共 10 章, 主要内容包括超导电性基础, 实用超导材料的各向异性、均匀性、机械特性、稳定性、交流损耗, 高温超导带材的临界电流和 n 值的非接触测量原理和技术, 实用超导材料的制备工艺, 低温绝缘材料及其特性, 低温容器设计及低温制冷, 超导电力装置的电流引线、超导开关和超导磁通泵的原理及设计方法等。

本书可作为高等院校超导电力工程、机械设计工程、超导磁体技术、实用超导材料等相关专业的高年级本科生、研究生及教师的参考用书, 也可作为从事超导电力应用研究的专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

超导电力技术基础/王银顺著. —北京: 科学出版社, 2011
ISBN 978-7-03-031563-2

I. ①超… II. ①王… III. ①超导电技术 IV. ①TN101

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 113161 号

责任编辑: 陈 捷 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 22 1/2

印数: 1—2 500 字数: 440 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

自从超导电性被发现以来,超导电性及其应用一直是当代科学技术中最活跃的前沿研究领域之一。经过近半个世纪的探索和研究,20 世纪 60 年代,人们制备出实用化的 NbTi 超导线和 Nb₃Sn 超导线,超导技术特别是超导磁体技术才得到了实际的应用,但是由于需要液氮温度(4.2K)的工作环境,超导技术难以大面积推广。

虽然超导绕组产生的交流损耗比常规铜绕组产生的交流损耗低得多,但是由于超导体工作在液氮温度 4.2K 时,产生的 1W 的功率消耗相当于室温下消耗至少 500W 的制冷功率,因此超导装置运行成本高且不能补偿超导体的交流损耗,在经济上没有明显的优越性。直到 1980 年,低温超导电力应用仍没有取得实质性进展。

1986 年,高温超导电性的发现,使得超导装置工作在液氮温度(77K)成为现实,使人们看到了超导技术广泛应用的曙光。20 世纪 90 年代后期,高温超导材料实用化技术取得了重大的突破,高温超导带材很快进入了商业化阶段,国际上大规模地开展了超导电力技术研究,已开发出超导电缆、超导限流器、超导变压器、超导电机和超导储能等超导电力装置样机,并进行了应用试验,随后超导电缆实现了商业化试验运行。除能源领域外,超导技术在信息、交通、科学仪器、医疗技术、国防及重大科学工程等方面均具有重要的应用价值。

超导电力技术是一门综合性很强的多学科交叉技术,涉及超导技术、电力技术、低温绝缘技术、低温制冷技术以及材料科学技术等,是当前高新科学技术的一个重要研究领域,具有重要的科学意义和应用价值。我国已将超导电力技术作为独立的主题列入国家高新技术研究发展计划(国家 863 计划)。同时,超导电力技术也是未来智能电网的关键技术之一。可以预见,超导电力技术将成为相当规模的实用技术,在节能减排、低碳经济、再生能源等领域发挥重要作用。

本书在简单介绍超导电性基本理论的基础上,对实用超导材料的电磁特性、稳定性、交流损耗、制备工艺、低温绝缘、非接触测量、低温装置及制冷、电流引线等方面进行了介绍,反映了当前国内外高温超导电力应用基础的研究水平。本书的特点是在介绍基本原理的基础上在相关章节加入了实验内容。全书共分 10 章,第 1 章简单介绍超导电力技术应用范畴;第 2 章介绍超导电性基本原理、临界参数;第 3 章介绍实用超导材料临界电流的机械特性和电磁特性;第 4 章详细介绍超导磁体的稳定性、失超特性及其保护技术;第 5 章系统介绍超导体在工频下的各种交流

损耗,包括磁滞损耗、磁通流动损耗、耦合损耗和涡流损耗,并介绍交流损耗的测量方法;第6章简要介绍实用超导材料的制备工艺;第7章介绍高温超导带材临界电流及 n 值的非接触测量原理和技术、临界电流及 n 值不均匀性的评估计算方法;第8章介绍低温气体、低温液体、有机绝缘薄膜材料、无机绝缘材料以及低温黏合剂的绝缘特性;第9章介绍热传导理论、低温装置设计和低温制冷技术;第10章系统介绍各种电流引线包括导冷引线、气冷引线、珀尔帖引线以及混合电流引线的设计原理和方法,并介绍了超导开关和超导磁通泵技术的原理。

在本书的撰写过程中,参考并引用了国内外一些与超导电力技术相关的研究成果和书目,在此谨对这些成果的著作权人表示诚挚的感谢和敬意。同时,也感谢皮伟博士、滕玉平先生给予的帮助。最后,特别感谢我的妻子杨海艳女士,感谢她承担了家庭重担,全力地支持、关怀和理解。

由于学识有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

王银顺

华北电力大学

新能源电力系统国家重点实验室

高电压技术与电磁兼容北京市重点实验室

2011年3月于北京

目 录

前言

第 1 章 超导电力技术简介	1
1.1 引言	1
1.2 超导电力技术	2
1.3 超导电力装置	4
1.4 超导磁体技术	6
1.4.1 超导磁体在科学与工程上的应用	6
1.4.2 超导磁体在科学仪器上的应用	7
1.4.3 超导磁体在电磁感应加热方面的应用	8
参考文献	8
第 2 章 超导电性基础	10
2.1 超导体的基本特性	10
2.1.1 零电阻效应	10
2.1.2 完全抗磁性——迈斯纳效应	15
2.1.3 约瑟夫森效应	18
2.1.4 超导体的临界参量	20
2.2 超导体的分类及其磁化曲线	23
2.2.1 超导体的相干长度	23
2.2.2 超导体的分类	23
2.2.3 第 I 类超导体及其磁化曲线	24
2.2.4 第 II 类超导体及其磁化曲线	24
2.3 超导体的临界特性参数的测量	29
2.3.1 低温实验常用的低温温度计	29
2.3.2 超导体的临界温度的测量	30
2.3.3 超导体临界电流 I_c 的测量	34
2.3.4 临界磁场的测量	40
参考文献	43
第 3 章 超导体的机械特性和各向异性特性	45
3.1 超导材料的机械特性	45
3.1.1 机械特性的一般描述	45

3.1.2	拉伸特性	46
3.1.3	弯曲特性	47
3.2	超导材料的电磁各向异性	48
3.2.1	高温超导材料临界电流的各向异性	49
3.2.2	高温超导材料 n 值的各向异性	53
3.3	低温超导材料的临界电流特性	54
3.3.1	NbTi 超导材料的临界电流随磁场的变化	54
3.3.2	临界电流随归一化磁场和归一化温度变化的模型	55
3.3.3	Nb ₃ Sn 临界电流随磁场变化的模型	55
3.4	超导材料的不可逆场	56
3.5	几种高温超导材料临界电流密度与温度的关系	57
3.6	常用超导材料的热力学特性	58
3.6.1	常用超导材料的热学特性	58
3.6.2	常用超导材料的热收缩特性	61
	参考文献	64
第4章	超导体的稳定性	66
4.1	超导体的临界态	66
4.2	超导体的绝热稳定化	67
4.3	磁通跳跃的绝热稳定性	69
4.4	超导体的自场稳定性	73
4.5	超导体的动态稳定性	75
4.5.1	板状复合导体宽边冷却稳定性	77
4.5.2	板状复合导体侧边冷却稳定性	79
4.5.3	载流板状复合超导体的动态稳定性	81
4.5.4	载流圆截面复合超导体的自场动态稳定性	83
4.6	超导体的低温稳定性	87
4.6.1	Stekly 参数	87
4.6.2	一维正常传播区	91
4.6.3	三维最小传播区和最小失超能	92
4.7	绝热复合超导体中正常区传播速度	95
4.7.1	纵向传播速度	95
4.7.2	横向传播速度	96
4.8	超导磁体的机械稳定性	98
4.9	超导磁体的退化和锻炼效应	99
4.9.1	超导磁体的退化	99

4.9.2 超导磁体的锻炼效应	100
4.10 超导磁体的失超和保护	101
4.10.1 失超过程中电阻的增长和电流的衰减	101
4.10.2 引起超导磁体失超的原因	107
4.10.3 主动保护	109
4.10.4 被动保护	112
4.10.5 超导磁体失超的数值模拟	118
4.11 超导体稳定性试验	118
4.11.1 磁通跳跃试验	119
4.11.2 超导体失超参数测量技术	120
参考文献	122
第5章 超导体的交流损耗	124
5.1 板状超导体的交流损耗	124
5.1.1 平行交变磁场下的超导板的交流损耗	124
5.1.2 垂直交变磁场下的超导板的交流损耗	127
5.1.3 超导薄板的自场损耗	127
5.1.4 处于交直流磁场中并载有交直流电流的超导薄板的交流损耗	128
5.1.5 载有交直流电流的超导薄板的交流损耗	129
5.1.6 载有交流电流并处于垂直交变磁场中的超导薄板的交流损耗	130
5.1.7 处于垂直交直流磁场中的超导薄板的交流损耗	132
5.1.8 处于垂直和平行交直流磁场中并载有交直流电流的超导薄板的磁通 流动损耗	133
5.1.9 处于任何方向交变磁场和交变电流的超导薄板的总交流损耗	136
5.2 圆形截面超导体的交流损耗	137
5.2.1 纵向交变磁场下的圆形截面超导体的交流损耗	137
5.2.2 横向交变磁场下的圆形截面超导体的交流损耗	138
5.2.3 横向交变磁场中有传输直流电流的圆形截面超导体的交流损耗	140
5.2.4 圆形截面超导体的自场交流损耗	141
5.2.5 横向交变磁场中传输交流电流并处于同位相横向交流磁场中的 圆形截面超导体的交流损耗	143
5.2.6 处于交变磁场和载有交直流的圆形截面超导体的磁通流动损耗	144
5.3 横向交变磁场中圆形截面柱状混杂超导体的交流损耗	145
5.4 纵向交变场下圆筒超导体的交流损耗	146
5.5 大旋转磁场中的交流损耗	147
5.6 交变磁场和交变电流不同相位时的交流损耗	148

5.6.1 载流超导薄板在不同相位的平行交变磁场中的交流损耗	148
5.6.2 载流超导薄板一侧具有不同相位的平行交变磁场中的交流损耗	149
5.6.3 载流超导薄板两侧对称处于不同相位的平行交变磁场中的交流损耗	151
5.7 其他波形磁场时超导薄板的交流损耗	153
5.8 其他临界态模型的交流损耗	155
5.8.1 Kim 模型	155
5.8.2 电压电流幂指数定律模型——非线性导体模型	156
5.8.3 Kim-Anderson 临界态模型的交流损耗	158
5.8.4 同时考虑 Kim-Anderson 临界态模型和电压电流幂指数模型的交流损耗	158
5.9 其他形式的交流损耗	159
5.9.1 涡流损耗	159
5.9.2 横向交变磁场中复合多丝超导体的穿透损耗	161
5.9.3 扭矩的确定	162
5.9.4 纵向交变磁场中的复合导体交流损耗	163
5.9.5 耦合损耗	165
5.9.6 其他波形交变场的涡流损耗	168
5.10 交流损耗测量	170
5.10.1 磁测法	170
5.10.2 电测法	172
5.10.3 热测法	175
5.10.4 电测法和热测法的比较	178
5.11 超导电力装置交流损耗简介	179
5.11.1 超导材料价格及年成本	179
5.11.2 制冷机效率	179
5.11.3 超导电力装置的磁场和交流损耗	180
参考文献	182
第 6 章 实用超导材料制备工艺简介	184
6.1 NbTi 超导线的制备	186
6.2 Nb ₃ Sn 超导线的制备	188
6.2.1 内扩散法	188
6.2.2 外扩散法	189
6.3 Nb ₃ Al 超导线材的制备	190
6.4 MgB ₂ 线材的制备	191

6.5 第一代高温超导带材的制备	193
6.6 第二代高温超导带材——YBCO 涂层导体	196
6.6.1 基板及织构化隔离层	197
6.6.2 高临界电流密度超导层的沉积	198
参考文献	199
第7章 高温超导带材临界电流和 n 值的非接触测量原理和技术	202
7.1 临界电流和 n 值简介	202
7.2 高温超导带材临界电流的非接触测量技术	203
7.2.1 剩余磁场法	203
7.2.2 交流磁场感应法	204
7.2.3 力学方法	206
7.3 高温超导带材 n 值的非接触测量技术	208
7.3.1 磁滞损耗分量法——变幅值法	208
7.3.2 基波分量法——变频法	209
7.3.3 三次谐波分量法	210
7.4 实用长度高温超导带材临界电流和 n 值均匀性的分析	211
7.4.1 高斯分布统计法	211
7.4.2 Weibull 统计分布	212
7.5 下一步临界电流和 n 值的非接触测量技术	213
参考文献	213
第8章 低温绝缘材料及其电性能	216
8.1 超导电力装置对低温绝缘材料的要求	216
8.2 低温气体的绝缘特性	216
8.2.1 常用低温气体的绝缘特性	216
8.2.2 其他气体的绝缘特性	220
8.3 低温介质的绝缘特性	220
8.3.1 低温介质的性能比较	220
8.3.2 低温介质的电性能	221
8.4 有机绝缘薄膜材料的绝缘特性	229
8.4.1 薄膜材料的热力学性能	229
8.4.2 薄膜材料的电阻率	232
8.4.3 薄膜材料的介电常数	232
8.4.4 介质损耗	234
8.4.5 击穿电压	236
8.4.6 电老化特性	238

8.5 低温绝缘漆和低温黏合剂	240
8.6 低温绝缘结构材料	242
8.7 无机绝缘材料	244
8.7.1 玻璃的热力学性能	244
8.7.2 陶瓷的电特性	245
8.7.3 云母玻璃的热力学和电学特性	246
参考文献	248
第9章 低温容器与低温制冷	249
9.1 低温冷却介质	249
9.2 低温容器	251
9.2.1 低温绝热基础	252
9.2.2 低温绝热的基本类型和结构	261
9.2.3 低温容器的结构设计	272
9.2.4 低温介质输液管及低温管道	275
9.2.5 极低温容器——双杜瓦结构容器	277
9.3 低温制冷	278
9.3.1 低温制冷原理和制冷机	278
9.3.2 适合于超导电力装置的制冷机的选择	284
9.4 超导电力装置的冷却技术	285
9.4.1 开式浸泡式冷却	285
9.4.2 闭式减压浸泡式冷却	286
9.4.3 闭式浸泡式冷却	286
9.4.4 迫流循环冷却	287
9.4.5 制冷机直接冷却	288
参考文献	289
第10章 超导电力装置供电技术	291
10.1 电流引线的设计	291
10.1.1 传导冷却电流引线	292
10.1.2 传导冷却电流引线近似设计	295
10.1.3 可插拔(拆卸)电流引线	300
10.1.4 气冷电流引线	300
10.1.5 高温超导电流引线	303
10.1.6 珀尔帖热电效应	305
10.1.7 珀尔帖气冷电流引线	308
10.2 超导开关	313

10.2.1 低温超导开关的设计	314
10.2.2 高温超导开关的设计	314
10.2.3 超导开关的制造	315
10.3 超导磁通泵	317
10.3.1 超导磁通泵的工作原理	317
10.3.2 变压器型超导磁通泵	318
10.3.3 超导永磁体磁通泵	319
参考文献	321
附录	323
A1 复合导体热容、热导率和电阻率的计算	323
A2 常用金属、合金及绝缘材料的物理性能特性参数	324
A2.1 一些合金材料的热导率 k [单位: $W/(m \cdot K)$]	324
A2.2 几种聚合物材料的热导率 k [单位: $W/(m \cdot K)$]	325
A2.3 几种陶瓷和玻璃的热导率 k [单位: $W/(m \cdot K)$]	325
A2.4 一些材料低温下的热导积分 $\int_4^T k(T) dT$	326
A2.5 一些材料低温下的比定容热容 c_v [单位: $J/(kg \cdot K)$]	327
A2.6 不锈钢管导热率	328
A2.7 焊料的热力学特性	328
A2.8 几种元素的电热学特性	329
A2.9 金属材料的热收缩率	331
A2.10 合金材料的热收缩率	331
A2.11 聚合物材料的热收缩率	332
A2.12 复合绝缘材料的热收缩率	333
A2.13 陶瓷和非金属材料的热收缩率	333
A2.14 奥氏不锈钢材料的热力学特性	334
A2.15 Nickel 镍钢材料的热力学特性	334
A2.16 铝合金材料的热力学特性	335
A2.17 几种合金及聚合物的力学特性	336
A2.18 常用骨架材料的热收缩	336
A2.19 几种常用金属结构材料的热导率及电阻率	338
A2.20 焊料的电阻率	338
A2.21 几种焊料的超导特性	339
A2.22 几种金属材料与铜在室温下的电阻率的比较	339
A2.23 几种材料的剩余电阻率	339

A2. 24	几种纯金属材料的理想电阻率	340
A2. 25	几种合金材料的理想电阻率	340
A3	贝赛尔函数	341
A4	实用高温超导涂层导体(YBCO CC)的涡流损耗	341
A5	非金属及不锈钢低温容器的性能	343
A5. 1	几种非金属材料的气体渗透特性	343
A5. 2	JB/T 5905—92 规定的真空多层绝热液氮和液氧低温容器的基本参数	344
A5. 3	几种小型不锈钢低温容器的技术性能	344
A5. 4	几种非金属低温杜瓦容器的性能	345

第 1 章 超导电力技术简介

1.1 引 言

1911 年,荷兰莱登实验室的昂尼斯(Onnes)在测量金属在低温下的电导率时发现:当温度下降到液氮 4.2K 时,水银的电阻完全消失,他把这种现象称为超导电性。1933 年,迈斯纳(Meissner)和奥森菲尔德(Ochsenfeld)两位科学家发现,如果把超导体放在磁场中冷却,那么当材料电阻消失的同时,磁通线将从超导体中排出,这种现象被称为完全抗磁性。后来,人们也把这种现象称为迈斯纳效应(Meissner effect)。1962 年,约瑟夫森(Josephson)从理论角度预言了超导量子隧道效应的存在。随后,安德森(Anderson)和罗威尔(Rowell)等从实验角度证实了约瑟夫森的预言:当两块超导体通过绝缘薄层(厚度为 1nm 左右)连接起来,一块超导体中的电子可穿过绝缘层势垒进入另一块超导体中,这就是超导体的量子隧道效应,也称为约瑟夫森效应(Josephson effect)。

由于具有零电阻、抗磁性和量子隧道效应等奇特的物理特性,超导体自从其被发现以来,超导电性及其应用一直是当代科学技术中最活跃的前沿研究领域之一。超导技术的应用主要包括两个方面:电工学应用和电子学应用。表 1.1 列出了超导电工技术的主要研究方向及其应用领域。

表 1.1 超导电工技术的主要研究方向及其应用领域

	研究方向		应用领域
电 工 应 用	超导电力技术	超导电力电缆	低能耗大容量电力输送
		超导限流器	输电网的安全稳定性
		超导储能系统(SEMS)	电力质量调节和电网稳定性
		超导变压器	节能电力变压器
		超导电动机	船舶电力推进
		超导发电机	大型发电机和同步调相机
	超导磁体技术	强磁场磁体	粒子物理和核物理类的大科学工程、核磁共振成像、核磁共振谱仪、科学仪器、磁分离技术、磁性扫雷技术、高性能的材料制备、作物育种等
		磁悬浮技术	磁悬浮列车和磁悬浮推进、飞轮、轴承和高精度陀螺仪等

由表 1.1 可见,超导技术在能源、信息、交通、科学仪器、医疗技术、国防以及重大科学工程等方面均具有重要的应用价值。自从超导体被发现以来,实现超导技术的广泛应用一直是科技人员的共同追求。经过近半个世纪的探索和研究,20 世纪 60 年代,人们制备出实用化的 NbTi 超导线和 Nb₃Sn 超导线,超导技术特别是超导磁体技术才在实验室得到了实际的应用,但是由于需要液氮温度(4.2K)的工作环境,超导技术难以大面积推广。20 世纪 80 年代以来,超导核磁共振成像系统逐步进入医院,用于临床诊断。1986 年,IBM 苏黎世研究中心研制出铜氧化合物超导体。1987 年,美国华裔科学家朱经武和中国科学家赵忠贤相继研制出钇-钡-铜-氧(YBCO)超导体,他们把超导体的临界温度提高到了 90K 以上,使得超导装置工作在液氮温度(77 K)成为现实,使人们看到了超导技术广泛应用的曙光。20 世纪 90 年代后期,高温超导材料实用化技术取得了重大的突破,高温超导带材很快进入了商业化阶段,发达国家政府和跨国公司大规模地开展超导应用技术研究,大部分应用产品已开发出样机,并进行了应用试验。目前,各国正进一步加大投入,开始以商业化产品为目标的新一轮研究与开发,超导技术不断取得突破。从“七五”计划以来,在国家 863 计划和国家重点基础研究计划的支持下,我国在超导物理理论、超导材料及超导技术等方面取得了长足的进步,目前基本处于与国际同步发展的水平。

超导电工技术主要是利用超导体的高密度无阻载流特性发展起来的相关应用技术,主要包括超导电力技术和超导磁体技术两个方面。

1.2 超导电力技术

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体的超导态-正常态相变的物理特性发展起来的应用技术。表 1.2 列出了超导电力技术的主要研究方向及其对电力工业的作用和影响。

表 1.2 超导电力技术的主要研究方向及其应用领域

应 用	特 点	对电力工业的作用和影响
超导限流器	① 正常时,阻抗为零,故障时,呈现一个大阻抗 ② 集检测、触发和限流于一体 ③ 反应和恢复速度快 ④ 对电网无副作用	① 提高电网的稳定性 ② 改善供电可靠性 ③ 保护电气设备 ④ 降低建设成本和改造费用 ⑤ 增加电网的输送容量

续表

应 用	特 点	对电力工业的作用和影响
超导储能系统	① 反应速度快 ② 转换效率高 ③ 可短时间向电网提供大功率	① 快速进行功率补偿 ② 提高大电网的动态稳定性 ③ 改善电能品质 ④ 改善供电可靠性
超导电缆	① 功率输送密度高 ② 损耗小,体积小,重量轻 ③ 单位长度电抗值小	① 实现低压大电流高密度输电 ② 减少城市用地
超导变压器	① 极限单机容量高 ② 损耗小,体积小,重量轻 ③ 液氮冷却	① 减少占地 ② 符合环保和节能的发展要求
超导电机	① 极限单机容量高 ② 损耗小,体积小,重量轻 ③ 同步电抗小 ④ 过载能力强	① 减少损耗和占地 ② 同步电抗小,有利于提高电网稳定性 ③ 用于无功功率补偿,提高电力质量和电网运行稳定性

从表 1.2 可以看出,采用超导电力技术,不仅可以明显改善电能的质量,提高电力系统运行的稳定性和可靠性,降低电压等级,提高电网的安全性,使超大规模电网的实现成为可能,而且还可以大大提高单机容量和电网的输送容量,并大大降低电网的损耗。不仅如此,通过超导储能还可大大改善可再生能源的电能质量,并使其与大电网有效地联结。

由于超导电力技术具有常规电力技术不可比拟的优势,自从超导体被发现以来,人们就开展了超导电力技术的研究开发工作。20 世纪 60 年代,随着实用化低温超导材料的制备走向成熟,美国、日本和苏联等相继开展了超导电力装置的研制,但是由于液氮温度的冷却成本高、难度大,这些超导电力装置并没有投入实际试验运行。90 年代以来,随着高温超导带材走向商品化,世界各国相继开展了超导电力技术的研究开发。美国、日本、欧洲和韩国等都批准了发展超导电力技术的相关计划:美国批准了 SPI 计划以发展超导电力技术及相关技术,由美国能源部组织国家实验室、大学和相关公司及电力公司联合攻关;日本 NEDO、通产省和各大电力公司(如东京电力、九州电力)以及东芝、日立等公司都投资超导电力技术的研究开发;日本政府批准了 Super-ACE 计划以促进超导电力技术的产业化;韩国政府批准了 DAPAS 计划,并以商业化为目标,投入资金达 1.5 亿美元;欧洲一些大的公司如 ABB、西门子、NEXANS 等也积极投资于该方面的研究,以争取未来的市场,在超导电磁感应加热器研发方面,Zenergy 公司已有产品销售。

近年来,国际上超导电力装置研发的重点是高温超导限流器、超导储能系统、高温超导电缆、高温超导变压器和高温超导电机。这些超导电力装置已研制出样机,并已经进入示范试验运行阶段,其中,超高电缆已实现挂网试运行。

近10年来,我国在超导电力技术方面也取得了重大进展:在超导电缆方面,成功研制出75m长、10.5kV/1.5kA和30m长、35kV/1.5kA三相交流高温超导电缆,并实现了挂网试验运行;在超导限流器方面,研制出10.5kV/1.5kA桥路型和35kV/1.5kA磁饱和型高温超导限流器样机,并投入变电站试验运行;在超导变压器方面,成功研制630kVA/10.5kV三相高温超导变压器样机和单相300kVA机车牵引变压器样机,其中三相高温超导变压器已投入配电网试验运行;在超导储能方面,先后研制出100kJ/25kV、500kJ/150kVA和35kJ/7kW的高温超导储能样机,并在电力系统动态模拟实验室进行了模拟试验运行。

1.3 超导电力装置

随着我国电力需求量的日益增大和电力工业的发展,人们对电力系统的安全可靠性和电能质量提出越来越高的要求,同时,环保、节能和电力设备的小型化、轻量化也成为共同的追求目标。超导电力技术的应用能够克服常规电力技术的固有缺陷,实现电力工业的重大革新,对于满足我国电力工业发展需要具有重大的意义。超导电力装置主要包括下面7种。

1. 超导限流器

超导故障电流限制器,即超导限流器具有以下优点:能在高压下运行;在正常运行时可通过大电流而只呈现很小的阻抗甚至零阻抗,只在短路故障时呈现一个大阻抗,因而其限流效果非常明显;反应速度快(能在毫秒级的时间内作出反应);能自动触发和自动复位,同时集检测、触发和限流功能于一体。由于超导限流器具有这些无可比拟的优点,因而被认为是目前最好的而且也是唯一的行之有效的短路故障电流限制装置。

通过超导限流器限制短路电流后,不仅可以大大提高电网的稳定性、改善供电的可靠性和安全性、增加电网的输送容量,而且可以显著降低断路器的容量、大大降低电网的建设成本和改造费用、延长电气设备的寿命。因此,超导限流器的研究符合我国电力工业持续发展的需求,具有重大的现实意义。

超导限流器从开发适用于配电网的示范样机开始,逐步向适用于高压输电网(电压等级110kV及以上)的限流器方向发展,同时,其种类也将呈现多样化的趋势。