

超导磁储能系统(SMES)

中的应用

唐跃进 石晶 任丽 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

超导磁储能系统(SMES) 及其在电力系统中的应用

唐跃进 石晶 任丽 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

超导技术的应用前景非常广阔,涉及到电工电力、交通、通信等众多领域。就超导电力技术而言,虽然她还是一个前瞻性的技术,但她是一个具有战略性意义的高新技术。

本书的内容主要是作者及其所在的团队在超导技术上所做的研究工作的总结,并就超导技术的发展战略提出了一些自己的看法。书中也广泛综合了国内外的研究资料。全书共分8章,内容包括:绪论、超导应用基础知识、SMES用变流器及其控制策略研究、SMES提高电力系统稳定性、SMES改善电力系统的电能质量、SMES在电力系统的新应用模式研究、35kJ/7.5kW直接冷却高温超导SMES、SMES的发展战略研究等。

期望本书能对超导技术工作者、电气工程学科的学生以及电力相关的管理人员、技术人员理解SMES有所裨益,对促进我国超导电力技术的进步起到抛砖引玉的效果。

图书在版编目(CIP)数据

超导磁储能系统(SMES)及其在电力系统中的应用/
唐跃进,石晶,任丽著. —北京:中国电力出版社,2009
ISBN 978-7-5083-8771-0

I. 超… II. ①唐…②石…③任… III. 超导储能-应用-
电力系统-自动控制 IV. TM762

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第063544号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年5月第一版 2009年5月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 19.5印张 336千字

印数0001—3000册 定价58.00元

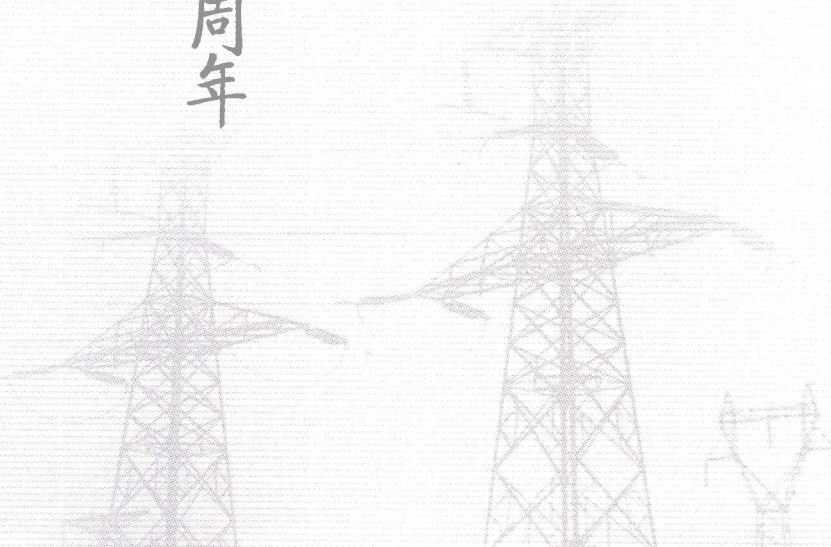
敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

谨以此书庆祝华中科技大学

超导电力研究中心成立十周年



序

超导磁储能系统 (SMES) 及其在电力系统中的应用

超导技术是具有战略意义的高新技术。美国、日本等国家均把超导技术列为未来国家间技术竞争的关键技术之一。虽然目前超导电力技术尚未达到广泛应用于电力系统的程度,但是,随着超导技术和低温技术的发展以及电力需求的不断增大,超导技术终将逐步进入电力系统。美国在其未来电力系统的发展规划“GRID2030计划”中,就将超导技术列为其中的一项骨干技术。在美国新任总统奥巴马的能源新政中,再次明确将超导电网与智能电网作为未来美国电网的发展方向。美国、日本、韩国以及欧盟均设置了相应的超导电力技术的发展项目,成功研制了包括超导发电机、超导变压器、超导输电电缆、超导电动机、超导限流器、超导磁储能系统等在内的多种超导电力装置。

在各种超导电力装置中,SMES以其高储能密度、高储能效率、快速的四象限功率调节能力而具有独特的魅力。由于SMES具有利用常规技术难以达到的技术性能,在提高电力系统的安全稳定性,改善供电品质,提高供电可靠性,以及新能源发电中可以发挥重要的作用。

华中科技大学于1999年在全国高校中率先成立了超导电力研究中心。该书作者及其所在的团队以提高电力安全为基本目标,在国家863计划、973计划的支持下,对SMES进行了探索性的实验研究,成功研制出我国第一套直接冷却高温超导磁储能系统动模实验样机,并进行了将其用于提高电力系统稳定性的实验研究,取得可喜的成果。在此基础上,该书作者还提出了几种新的SMES应用途径,为超导电力技术在电力系统中的推广应用做出了贡献。

《超导磁储能系统(SMES)及其在电力系统中的应用》一书是华中科技大学超导电力研究中心成立后出版的第一部超导电力专著,该书的主要内容就是这些探索性研究成果的总结,是一部理论性和实用性都很强的学术专著。虽然该书的内容只是超导电力技术的一小部分,也不能说该书已经全面解决了SMES的所有关键问题,但是在关于SMES的基本理论与应用方面仍然具有相当高的学术参考价值。

我相信该专著的出版将在推动超导电力科学技术的深入研究和促进该项技术的实际应用中发挥重要的作用。

华中科技大学

Handwritten signature in black ink, consisting of the characters '程时柱' in a cursive style.

2009年5月

前 言

超导磁储能系统 (SMES) 及其在电力系统中的应用

今年是华中科技大学超导电力研究中心成立十周年。回首十年，其感觉是光阴荏苒还是日月如梭？十年来，虽然一直存在着不少困难，但是我们坚持走过来了！如今，超导电力研究中心已经具备开展超导技术应用研究的基本条件。

超导技术的应用前景非常广阔，涉及到电工电力、交通、通信等众多领域。就超导电力技术而言，虽然她还是一个前瞻性的技术，但她是一个具有战略性意义的高新技术。美国、日本等已将超导电力技术列为未来的重要发展方向。美国在“GRID2030 计划”中将超导技术列为一项骨干技术，美国新一届政府已将超导电网列为未来美国电网的发展方向之一；日本除国家的投入外，东京电力、中部电力、关西电力、九州电力等主要电力公司、东芝、日立、三菱、藤仓、昭和、横河等大型电气设备厂家均在超导电力技术上开展了大量的研究工作。我国也在十五期间在 863 计划中设立了超导技术专项，支持了一批超导电力技术的研究工作。我们相信随着我国经济实力的增加，我国的超导应用技术必将取得长足的进步；而随着电力工业的发展，包括超导磁储能系统 (SMES) 在内的超导电力技术将会逐步进入电力行业的视野，在我国未来的电力系统中发挥重要的作用。基于这一信念，作者撰写了这本小书。

本书的内容主要是作者及其所在的团队在 SMES 上所做的研究工作的总结，并就 SMES 的发展战略提出了一些自己的看法。书中也广泛综合了国内外的研究资料，介绍了超导电力应用所必须的超导基础知识、SMES 的工作原理，综述了国内外 SMES 的发展概况、研究成果。期望本书能对超导技术工作者、电气工程学科的学生以及电力相关的管理人员、技术人员理解 SMES 有所裨益，对促进我国超导电力技术的进步起到抛砖引玉的效果。

全书共分 8 章。唐跃进撰写第 1、7 章，并负责全书的构成和定稿。石晶撰写第 3、4、5、6 章，任丽撰写第 2、8 章，陈媛绘制了书中大部分插图。由于作者的水平有限，SMES 又涉及超导材料、电机与电器、电力系统、电力电子、低温技术等多个学科方向，书中难免有不完善、不妥当乃至错误的地方，敬请读者指正。

本书的主要研究工作得到了国家高新技术发展计划(863)项目“高温超导磁储能系统”、“高温超导磁储能系统试验研究”、“基于电压补偿的高温超导电流控制器的动模试验研究”、国家重大基础研究发展计划(973)项目中的“提高超高压交流输电线路输运能力的研究”课题和“分布式储能对微网安全稳定运行的作用机理研究”课题、国家自然科学基金项目“高温超导脉冲功率应用基础特性研究”、中国船舶集团预研项目“超导磁储能系统在舰船电力系统中的应用基础研究”、教育部重点科研项目“现代混合电网安全保障体系中的多元复合储能系统研究”、教育部留学回国人员启动基金等的支持。

超导磁储能系统的研究工作也得到国内同行以及兄弟单位的大力支持和协作。“十五”期间,从国家863计划超导技术专项专家组的同行韩征和教授、张平祥研究员、肖立业研究员、闻海虎研究员、古宏伟研究员、王福仁教授处得到了若干技术上的建议,获益良多。在863计划项目“超导磁储能系统”的工作中,得到了浙江大学徐德鸿教授、倪光正教授、西北有色金属研究院冯勇研究员、汪京荣研究院、李成山研究员、中国科学院合肥等离子体物理研究所陈敬林研究员等的鼎力协作;华中科技大学王惠龄教授、文劲宇教授、毛承雄教授、李敬东副教授、海军工程大学的吴刚教授、长沙理工大学的周羽生教授、山东科技大学的戴陶珍副教授等都在863计划项目中付出了辛勤的努力。借此书出版之际,谨向所有的支持者、合作者表示真诚的感谢。

华中科技大学的潘垣院士,程时杰院士以及姚宗干教授、梁毓锦教授、招誉颐教授、李劲教授等许多老师对作者给予了极大的鼓励、鞭策和若干具体的帮助、指导。潘垣院士和程时杰院士是我校成立超导电力研究中心的倡导人,也是超导电力技术研究工作的指导者。程时杰院士在百忙之中为本书撰写了序言。中国电力出版社的王晶女士和岳璐女士对本书提出了若干有益的修改意见,也为本书的出版编辑做了大量的工作。谨在此一并表示衷心的感谢。

感谢曾经或正在华中科技大学超导电力研究中心学习和工作的硕士研究生、博士研究生以及其他工作人员,书中的若干内容都浸透着你们的汗水!



2008年5月7日

目 录

超导磁储能系统 (SMES) 及其在电力系统中的应用

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 电力系统发展所面临的重大课题	1
1.2 超导电力技术	3
1.2.1 超导电机	4
1.2.2 超导电缆	5
1.2.3 超导变压器	5
1.2.4 超导限流器	6
1.2.5 超导磁储能	6
1.3 超导磁储能系统 (SMES) 的构成及其工作原理	6
1.4 SMES 在电力系统中的应用途径	9
1.5 本书内容概述	11
参考文献	12
第2章 超导应用基础知识	17
2.1 超导基础知识	17
2.1.1 超导体的分类及发展历程	17
2.1.2 超导体的基本特性	18
2.1.3 超导体的三个临界值	19
2.1.4 第Ⅰ类超导体和第Ⅱ类超导体	22
2.1.5 超导体内的磁通运动	23
2.2 超导导线	24
2.2.1 超导导线的基本形式	24
2.2.2 低温超导导线	24
2.2.3 高温超导导线	26
2.3 超导磁体	28
2.3.1 超导磁体的种类	28

2.3.2	超导磁体的电磁特性	29
2.3.3	超导磁体的应用领域	31
2.3.4	超导磁体的电磁设计要点	33
2.3.5	超导磁体的失超保护	35
2.4	低温技术	37
2.4.1	低温液体	38
2.4.2	制冷机	40
2.4.3	低温容器	41
2.4.4	真空技术	44
2.4.5	超导磁体的低温系统	46
2.5	超导装置的电流引线	49
2.5.1	电流引线的分类	49
2.5.2	电流引线的设计要点	51
2.5.3	电流引线的发展现状及水平	53
	参考文献	54
第3章	SMES 用变流器及其控制策略研究	56
3.1	SMES 用变流器的基本原理和拓扑结构	56
3.1.1	SMES 用电流源型变流器的基本原理	57
3.1.2	SMES 用电流源型变流器大容量拓扑结构	60
3.1.3	SMES 用电压源型变流器的基本原理	62
3.1.4	SMES 用电压源型变流器大容量拓扑结构	65
3.1.5	SMES 用电流型变流器与电压型变流器的比较	68
3.2	离散化状态反馈解耦控制策略	69
3.2.1	离散化状态反馈解耦控制	69
3.2.2	离散化状态反馈解耦控制的数字实现	71
3.3	SMES 用电流源型变流器的控制	73
3.3.1	电流源型变流器的数学模型	73
3.3.2	电流源型变流器的控制器设计	76
3.3.3	仿真分析	81
3.4	SMES 用电压源型变流器的控制	84
3.4.1	电压源型变流器的数学模型	84
3.4.2	斩波器的数学模型	86
3.4.3	电压源型变流器控制器设计	88
3.4.4	仿真分析	91

参考文献	94
第4章 SMES 提高电力系统稳定性	98
4.1 SMES 抑制电力系统功率振荡的机理	98
4.1.1 暂态稳定分析计算的基本假设	99
4.1.2 含 SMES 的电力系统功角特性	101
4.1.3 基于能量函数的 SMES 控制理论分析	104
4.2 基于频率和电压调节的 SMES 控制器设计	107
4.3 SMES 相量模型	111
4.3.1 相量仿真法及其应用于 SMES 的可行性	111
4.3.2 电压源型 SMES 相量模型的建立	112
4.3.3 SMES 相量模型的仿真分析	116
4.4 SMES 抑制电力系统功率振荡的仿真分析	118
4.5 SMES 改善电压稳定性的基本分析	123
4.5.1 单负荷无穷大母线系统	124
4.5.2 负荷静态特性	127
4.5.3 SMES 改善系统电压稳定性的分析	129
4.6 SMES 提高系统稳定性的研究实例	130
4.6.1 30MJ SMES 抑制美国西部电网低频振荡	130
4.6.2 30kJ SMES 提高水轮发电机稳定性	133
4.6.3 1kWh/1MW SMES 用于系统稳定控制	137
4.6.4 D-SMES 改善系统电压稳定性	139
参考文献	143
第5章 SMES 改善电力系统的电能质量	145
5.1 电能质量问题	145
5.2 动态电压恢复器 (DVR) 及其控制	148
5.2.1 工作原理	148
5.2.2 DVR 的基本组成部分	149
5.2.3 DVR 的控制策略	155
5.3 电压暂降的检测方法	159
5.3.1 检测方法的基本分类	160
5.3.2 基于瞬时无功功率理论的 dq0 变换方法	164
5.3.3 虚拟三相 d-q 变换方法	166
5.4 基于 SMES 的动态电压恢复器的仿真分析	168
5.4.1 系统仿真参数	169

5.4.2	检测方法的仿真分析	170
5.4.3	系统仿真结果	173
5.5	SMES 用作不间断电源	175
5.5.1	后备式 SMES - UPS	175
5.5.2	在线互动式 SMES - UPS	176
5.5.3	双变换在线式 SMES - UPS	177
5.6	研究实例	178
5.6.1	ASC SMES 改善电能质量问题的安装运行实例	178
5.6.2	日本中部电力公司 5MJ/5MVA SMES	181
5.6.3	韩国 3MJ/750kVA SMES	184
	参考文献	187
第 6 章	SMES 在电力系统的新应用模式研究	190
6.1	基于 SMES 的电流控制器	190
6.1.1	电流控制器的作用原理	190
6.1.2	限制短路电流的特性分析	193
6.1.3	动态潮流控制特性分析	195
6.1.4	电流控制器技术可行性分析	202
6.2	基于 SMES 的双馈风力发电励磁系统	208
6.2.1	系统工作原理	208
6.2.2	系统控制方案	211
6.2.3	仿真分析	218
6.3	在独立电力系统中 SMES 的一机多职应用	223
6.3.1	独立电力系统特性	223
6.3.2	SMES 一机多职概念	224
6.3.3	SMES 磁体两种不同功能的实现方式	225
6.3.4	多模块超导储能脉冲电流输出实验	227
6.4	其他应用方式	230
6.4.1	电力系统状态诊断	230
6.4.2	超导限流—储能系统	232
6.4.3	在微网中的综合应用	236
6.5	本章小结	237
	参考文献	237
第 7 章	35kJ/7.5kW 直接冷却高温超导 SMES	241
7.1	SMES 的系统组成	241

7.1.1	高温超导磁体	242
7.1.2	低温系统和电流引线	242
7.1.3	功率调节系统	243
7.1.4	监控系统	246
7.2	SMES 磁体的设计制作	248
7.2.1	高温超导线材	248
7.2.2	高温超导磁体设计	248
7.2.3	高温超导磁体的杂散磁场分析	250
7.2.4	高温超导磁体热稳定性分析	254
7.2.5	高温超导磁体的制作	258
7.3	SMES 的基本特性实验	259
7.3.1	实验用数据采集系统	259
7.3.2	系统冷却	261
7.3.3	超导磁体通流特性	262
7.3.4	SMES 功率调节特性	262
7.4	SMES 抑制电力系统功率振荡的动模实验	265
7.5	超导磁体动态温度特性	267
7.5.1	直流充磁试验中磁体的温度特性	267
7.5.2	开环功率调节试验中磁体的温度特性	268
7.5.3	动模试验中磁体的温度特性	273
	参考文献	274
第 8 章	SMES 的发展战略研究	276
8.1	SMES 的发展历程及发展趋势	276
8.2	SMES 的关键技术	279
8.2.1	广泛应用超导电力的基本条件	279
8.2.2	超导电力的关键技术课题	280
8.2.3	SMES 的技术课题	282
8.3	SMES 的实验项目与方法	284
8.3.1	SMES 试验前的准备工作	284
8.3.2	SMES 磁体试验	285
8.3.3	SMES 变流器试验	289
8.3.4	SMES 功率调节试验	291
8.3.5	SMES 的系统响应特性试验	293
	参考文献	294



绪 论

我国经济的高速发展使得我国的电力系统已成为世界上最庞大最复杂的系统之一。电力安全已经成为国家安全的一个重要方面。同时,信息化、精密制造以及生产生活对电力的依赖程度已经对电力供给的可靠性和供电品质提出了更高的要求。石油、煤炭等能源资源将不能满足未来电力供给的需求,开发新能源,特别是可再生能源已成为一项保证国家可持续发展的战略性国策。作为一种具备快速功率响应能力的电能存储技术,超导磁储能系统(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)可以在提高电力安全、改善供电品质、增强新能源发电的可控性中发挥重要作用。本章从分析电力系统面临的重大课题入手,介绍 SMES 在未来电力系统中的基本需求,以及 SMES 的工作原理和主要部件的功能作用。

1.1 电力系统发展所面临的重大课题

电力工业是国家的基础产业,电气化是现代文明的标志。在现代工业化、信息化的社会,无论是在社会生产对电力供给的依赖性上,还是在人们日常生活对电力供给的期待值上,现代社会从电力供给容量和质量两个方面都对电力系统提出了更高的要求。

随着我国经济的高速发展,电力需求越来越大,随之而来的是电力系统的规模和复杂性的增加。为实现“保证电力安全”、“节能减排”、“节约资源”、“提高供电品质”、“保护环境”等重大目标,“西电东送”、“南北互供”、“全国联网”、“可再生能源发电”等战略性发展方针将使我国电网成为世界上最庞大、最复杂的电网。然而,充分的、高品质的、可靠的电力供给已经开始受到若干负面因素的制约,电力系统已经面临和必将面对许多重大技术课题^[1]。

(1) 电力安全。

现代社会对电力供应的可靠性要求越来越高,电力安全已成为世界性的问

题。近年来电网瓦解和大面积停电事故在世界各国时有发生，大规模电力系统的安全高效运行已成为各国电力系统发展的主要问题。仅2003年，美国、加拿大、英国、意大利等国就相继发生了大面积停电事故，这些事故的发生不仅造成巨大的经济损失，严重影响了人民的正常生活，还危及到公共安全和社会稳定^[2]。我国虽然还没有出现过大规模灾难性停电事故，但区域性的停电和解列事故时有发生，在我国东北、华北、华中和川渝电网的联网实验中，就观察到了一些国际上从未报道过的电网异常动态行为。我国国家电力监管委员会认为，电力系统的安全是关系到国家安全、关系到改革发展的重大问题。

(2) 电能质量。

由于电子技术的飞速发展，以计算机为主体的信息网络已在我国逐步形成，并在我国的社会生活中起到越来越重要的作用。这些以微处理器或计算机为核心的先进设备对供电质量和供电可靠性提出了更高的要求；另外，一些特殊行业，如半导体制造、精密机械加工以及银行、电信、医疗、军事等对电网中的谐波、过电压、短时断电、电压骤降、电压骤升等干扰十分敏感，任何电能质量问题都可能引起生产作业过程的中断或设备故障，造成巨大的经济损失。与此同时，随着电力负荷的迅速加大，现代电网的负荷结构发生了很大改变，尤其是一些冲击性、非线性负荷和电力电子设备不断增多，如工业生产中的大型轧钢机、大型吊车、电力机车、晶闸管整流电源、变频调速装置等。这些装置的起动、停止、运行都可能会导致电力系统功率因数降低、电压波动、电压闪变及电压波形畸变等各种电能质量问题，使得电网电能质量受到了严重威胁。因此，如何改善供电质量以满足这些新型负荷的需求问题也变得日益突出。

(3) 短路电流水平。

随着系统结构复杂化，系统短路容量和短路电流也越来越大。当短路电流超过断路器的开断能力后，断路器无法有效切除短路故障，这会严重威胁到电力设备乃至整个电力系统的安全运行；过大的短路电流又对电力装置提出了更高的电磁、电动以及热的技术指标，使这些设备的制作更加困难。目前，我国电网中部分节点的短路电流水平已经超过100kA，这已经严重超过了现有断路器的开断能力^[3]。为了提高电网运行的安全可靠，减小短路电流对电力设备的冲击，控制线路电流、限制过大短路电流的技术已成为现代大型电力系统的一种迫切需求。

(4) 可再生能源并网发电。

中国经济持续发展，对能源的需求增长很快，常规能源的供应及其带来的环境问题日益突出，综合考虑资源、环境、技术、经济等因素，发展可再生能

源以缓解我国的能源短缺已成为国策。可再生能源的一个普遍特点是不连续和不稳定。以风力发电为例，风力发电机的原动力是风，风的随机波动性和间歇性决定了风力发电机的输出特性也是波动和间歇的。随着大规模风电场的接入，风电容量在系统中所占比例的增加，风电场对电力系统的影响将不能被忽视^[4]。在这类可再生能源发电系统中，储能技术将成为有效提高系统稳定性、改善电能质量的手段之一。

1.2 超导电力技术

超导技术是解决现代电力系统一系列重大问题的新途径，表 1-1 给出了现代电力系统中的主要问题以及与之相对应的超导电力装置^[1]。可以看出，针对每一个问题，跟现有的采用常规导体技术的解决方案相对应，都有一种甚至多种超导电力装置能为问题的解决提供新的技术手段。由于超导体的电阻为零，因此其载流密度很高，比铜导线高出两个以上的数量级。这是在电力系统中应用超导技术后可获得若干技术优势的根本原因。由于电阻为零，不会因电阻的存在而产生损耗，因此，使用超导可以节能、可以提高传输线的电能输送能力。虽然维持低温环境、消除交流损耗等也需要消耗部分附加电力，但随着超导技术和低温技术的进步，这些附加的电力损耗可以低于常导导体电阻上的损耗。由于电阻为零，导体载流密度高，因此可以使超导电力装置普遍具有体积小、重量轻等特点，制成常规技术难以达到的大容量电力装置，还可以制成能运行于强磁场的装置，实现高密度高效率储能。

表 1-1 与 21 世纪电力工业所面临的主要问题相对应的超导电力装置

	关键课题	主要对应策略及常规技术	主要对应的超导装置
电 源	应用分散电力系统	新能源、热电联供、系统运行管理技术	超导磁储能系统
	提高发电效率	高温高效燃烧技术、新发电方式	超导发电机
	提高设备利用率	调节负荷峰值、改善负荷曲线特性	超导磁储能系统
输 配 电 系 统	远距离大容量输电	稳定性控制、直流输电、FACTS 技术	超导磁储能系统、超导限流器
	各大电网间联网	直流输电、稳定性控制、短路电流的抑制	超导磁储能系统、超导限流器

续表

关键课题		主要对应策略及常规技术	主要对应的超导装置
输配电力系统	电网投资的合理化	保证可靠性的电网合理化、评估机制	超导电缆
	高密度送电	绝缘技术、紧凑的结构、小型化	超导电缆、超导限流器
	高质量供电	补偿滤波技术、储能技术、电力变换技术	超导磁储能系统
	提高电网效率	高电压输电、电网结构优化	超导电缆、超导变压器
其他	改善负荷特性	DSM 技术、储能技术	超导磁储能系统
	节省资源、保护环境	节能、利用新能源、可再生能源	各类超导电力装置

早在 20 世纪 60、70 年代,人们就开始了超导电力装置的研究工作。早期的研究基本集中在应用低温超导体。20 世纪 90 年代后期,特别是进入本世纪以来,除 SMES 外,一般超导电力装置的研制工作都集中在使用高温超导体上。第二代高温超导材料—YBCO 涂层导体的成功必将使高温超导应用技术再上一个台阶。

1.2.1 超导电机

超导绕组可以实现高磁场、紧凑结构。应用于电机,则可以提高气隙磁通密度,甚至省略铁芯。在产生相同的感应电势的条件下,气隙磁通密度的提高减少了切割磁通的导体长度,这使得电机的绕组安匝数下降,电感减小。上述因素使超导电机体积小、重量轻、同步感抗小、出力范围大。目前,超导电机的研究大多集中于电动机,而且多有军方背景,主要是军方针对超导电机体积小、重量轻的特点,对舰船推进电机的超导化寄予了较高的期望。美国在能源部以及军方的支持下,对高温超导推进电机进行了大量的研究工作^[5~8],从 1996 年的 140kW 开始,容量逐步增大,500 马力量级的舰船推进电机已经研制成功,并交付海军在模拟舰船上进行了实验。美国还配合全电飞机计划进行了 1000 马力的高温超导飞机推进电机的研究工作^[9]。日本住友公司研制了定子、转子均为超导的 400kW 高温超导推进电机,并计划进行容量为 5MW 超导电机的研究工作。法国、俄罗斯也开展了超导电机的研究工作。在利用高温超导块材制作超导电机方面也有不少研究成果问世^[10~12],如磁滞电机、磁阻电机等。此外,美国超导公司(AMSCA)还在 2003 年研制了超导调相机用于电力系统的无功补偿^[13]。