

超导技术在未来电网中的应用

肖立业^{①②}

① 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院电工研究所, 北京 100190

E-mail: xiao@mail.iee.ac.cn

2015-06-04 收稿, 2015-06-26 接受, 2015-07-15 网络版发表



摘要 首先简要介绍了可再生能源大量接入对未来电网带来的一系列挑战, 进而介绍了超导电力技术的特点和优势, 以及在应对上述挑战方面可能发挥的作用. 超导电力技术的发展以超导材料为基础, 主要应用包括超导输电电缆、超导限流器、超导储能系统、超导变压器、超导电机和超导电力集成技术等. 本文比较系统地介绍了高温超导材料近年来的发展状况、超导电力应用各个方面的主要研究进展和国内外典型的示范工程. 在此基础上, 说明了超导电力技术规模化发展所面临的运行温度较低, 低温制冷设备长期运行可靠性有待提高, 高温超导材料价格过高等方面的障碍, 并指出今后努力的方向, 提出了我国未来发展超导电力技术的建设性建议.

关键词

可再生能源
未来电网
超导电力技术

超导体具有零电阻、高密度载流能力、超导态/正常态转变(也称为S/N转变)、低场下的完全抗磁性等电学特性, 这些特性使得它完全区别于传统导体. 如果利用这些特性实现超导体在电网方面的应用, 那将对电网的发展产生革命性的影响. 因此, 自从1911年荷兰莱登实验室的卡莫林·昂尼斯发现超导体以来, 人们便一直梦想超导技术在电网中得到应用.

近年来, 可再生能源取得了飞速的发展并孕育着一场新的能源革命, 从而对未来电网的发展提出了一系列重大挑战. 与此同时, 科学家们在新超导体的发现、超导物理机制的认识、超导材料的制备和超导技术的发展等方面取得了长足的进步, 从而使得超导技术在未来电网中的应用变得更加可期, 也为人类应对新能源革命对电网带来的重大挑战提供了一条可能的技术途径. 正是基于上述背景, 本文将讨论超导技术在未来电网中的应用.

1 可再生能源发展对未来电网带来的挑战

国际能源署提供的数据表明^[1], 不同国家或地区的人均用电量与人均GDP大致呈正相关关系. 因而,

随着我国经济和社会的发展, 我国电力需求量仍将有很大的发展空间. 与此同时, 人类已经认识到必须大力发展可再生能源, 并逐步实现可再生能源替代化石能源的新能源变革. 从目前发展现实来看, 可再生能源的最主要利用方式是发电. 因此, 新能源变革不仅意味着未来电力中可再生能源电力将占很高的比例, 而且也意味着部分化石能源将由电能所取代(例如燃油车将变成电动车), 未来电力在终端能源中所占比重仍将有较大的上升空间. 由此可见, 不仅未来电网中的发电装机容量将在现有规模上有很大的增长潜力, 而且发电资源将由目前以可灵活调度的化石能源为主转向以难以调度的波动性可再生能源为主. 正是这一重大变化, 将对未来电网带来一系列重大挑战. 主要体现在以下几个方面^[2-4].

第一, 可再生能源资源丰富地区往往远离负荷中心, 且其无法通过交通运输工具进行输送, 而将主要通过发电方式以电网来完成其输配. 这就决定了大容量远距离电力输送的需求将比当今更为迫切. 根据周孝信在第505次香山科学会议“超导技术在未来电网中的应用”(以下简称“本次会议”)中的“未来电

引用格式: 肖立业. 超导技术在未来电网中的应用. 科学通报, 2015, 60: 2367-2375

Xiao L Y. The R&D of superconducting technology for future power grid (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2367-2375, doi: 10.1360/N972015-00428

网所面临的挑战及其对超导技术的需求分析”报告的预测,我国 2050 年将会有大约 5 亿千瓦的电力需要从西部地区送往中东部地区,年输送电能将达到 2.3~2.5 万亿千瓦时.如果没有新的电力输送技术,仅仅依靠现有技术手段来完成上述电力的输送,将占用大量的输电走廊,这将加剧用地紧张问题.特别是西部地区多山、输电通道有限的情况下,更是如此.

第二,在满足可再生能源规模化接入的约束条件下,如何保障超大规模电网的安全稳定运行将成为未来电网面临的另一重大挑战.一方面建立一个全国性(乃至跨国)的互联大电网对于可再生能源规模利用是必要的,因为这样有助于充分整合各种可再生能源资源的时空互补性,从而缓解波动性对电力调度带来的影响,并实现跨区资源优化综合利用.另一方面,随着电网规模的不断扩大,电网运行条件变得更为苛刻,不可预知性和安全稳定性问题更加突出,事故引发大面积停电的威胁和负面影响将大幅度增加.同时,可再生能源特别是风能具有波动性和不稳定性的特征,且光伏发电系统不具有传统水轮机组或汽轮机组的机械惯性,风力发电机组的单机容量及惯性与传统发电机组相比也有很大的差别且发电方式也不相同,这将进一步加剧互联大电网安全稳定运行的难度.

第三,随着电能消费的比重不断提高,进一步提高电网的能效将变得日益重要.当前,我国电力网络的损耗约占总发电量的 7%,大致相当于 3 座三峡电站的总发电量.因此,如果不提高电网的整体效率,我国未来电网的绝对总损耗将达到相当惊人的程度.根据周孝信在本次会议上的报告,以 2050 年我国总发电量约为 15 万亿千瓦时来计算,如以当前的电网效率计算,则电网总损耗将达到 1.05 万亿千瓦时,几乎相当于 1994 年全国的总发电量.同时,由于常规远距离输电损耗很大,例如 ± 800 kV/7200 MW 的直流输电线路,当输电距离达到 2500 km 时,其输电损失高达 9.5%,因而大量可再生能源电力的远距离输送将进一步增加传输损耗.由此可见,大幅提高电网的输配电效率将成为未来电网必须面对的问题.

第四,常规电气设备占地大,随着用电量和电网规模不断扩大,电网建设占地将变得十分可观,这对于像我国这样的高人口密度国家来说,将构成重大挑战.

简而言之,可再生能源变革将对电网在大幅提

高远距离输送容量、安全稳定性、运行效率和电网建设占地等方面提出了一系列重大课题,迫切需要一系列关键技术创新来应对这些重大挑战.

2 超导技术对电网的作用和影响

由于超导线的载流能力可以达到 $100\sim 1000$ A/mm² (大约是普通铜导线或铝导线载流能力的 50~500 倍),且其直流状态下的传输损耗为零,工频下有一定的交流损耗(为 $0.1\sim 0.3$ W/(kA·m)),大致为铜导线或铝导线的 0.5%~1.5%).因此,利用超导线制备的电力设备,具有损耗低、效率高、占地小的优势.由于超导线在电流超过其临界电流时,会失去超导性而呈现较大的电阻率,因而用超导线制成的限流设备(超导限流器, FCL)可以在电网发生短路故障时自动限制短路电流的上升,从而有效保护电网安全稳定运行.此外,利用超导线研制的超导储能系统(SMES)是一种高效的储能系统(效率可达 95%以上),且具有快速高功率响应和灵活可控的特点,对于解决电网的安全稳定性和瞬态功率平衡问题也具有潜在应用价值.

正是基于上述原因,超导技术可以广泛应用于超导输电电缆、超导变压器、超导发电机、超导电动机、超导限流器、超导储能系统等.表 1 列出了各种超导电力设备对电网的作用和影响.由此可见,超导输电电缆将可以为未来电网提供一种低损耗、大容量的电力输送方案,有助于解决现有输电损耗高和输电走廊紧张问题;超导限流器可以有效降低电网的短路电流从而保障大电网的安全稳定性;超导储能系统可以对波动的可再生能源电力进行有效的正补偿和负补偿,从而提高电网吸纳可再生能源的能力;超导变压器、超导发电机和超导电动机在提高电气设备效率、减少占地方面也具有不可替代的优势.因此,如果超导技术能够实现在电网中的广泛应用,则可以有效应对可再生能源变革对电网带来的一系列重大挑战,对未来电网的发展将产生重大意义,因而被美国能源部认为是 21 世纪电力工业唯一的高技术储备.

3 超导电力应用研究发展现状

3.1 高温超导材料研究开发现状

超导材料是发展超导电力技术的根本物质基础

表1 各种超导电力设备对电网的作用和影响^[5]Table 1 The impacts of superconducting power equipments on the power grid^[5]

应用	特点	对未来电网的作用和影响
超导限流器	正常时阻抗很小,故障时呈现一个大阻抗 集检测、触发和限流于一体 反应和恢复速度快 对电网无副作用	大幅度降低短路电流 提高电网稳定性 改善供电可靠性 保护电气设备 降低建设成本和改造费用
超导电缆	功率输送密度高 损耗小、体积小、重量轻 单位长度电抗值小 液氮冷却	实现大容量高密度输电 符合环保和节能发展要求 减少城市用地 缩短电气距离 有助于改善电网结构
超导变压器	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻 液氮冷却	减少占地 符合环保和节能发展要求
超导储能系统	反应速度快 转换效率高 可短时向电网提供大功率支撑	快速进行功率补偿 改善大电网稳定性 改善电能品质 改善供电可靠性
超导电动机	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻	减少损耗 减少占地
超导发电机	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻 大型超导超导发电机的同步电抗小 过载能力强	减少损耗 减少占地 提高电网稳定性 超导同步调相机可用于无功功率补偿 超导风力发电机在大容量海上风力发电中具有比较优势

和技术基础,1987年以来,超导电力技术的研究主要围绕高温超导材料开展.高温超导材料主要包括铋(Bi)系高温超导带材(包括 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 即Bi-2223、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_8$ 即Bi-2212,也称为第I代高温超导带材)和YBCO($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 即Y-123)高温超导带材(也称第II代高温超导带材).经过20多年的发展^[5~12],第I代和第II代高温超导带材在临界电流密度、长度、机械性能等方面已经基本上能满足超导电力技术的应用需求,但高温超导带材的价格仍然处于高位,大致相当于200~500 \$(/kA m),为铜的20~50倍.表2和3分别列出了目前国际上主要的Bi系超导带材和Y系超导带材供应商的高温超导材料的长度与临界电流指标.

与此同时,2001年,日本科学家发现了二硼化镁(MgB_2)超导体,其转变温度达39 K. MgB_2 超导材料具有结构简单、易于制造、成本低廉等优点;目前,意大利Columbus公司和美国HyperTech公司均可商业化制备并批量生产千米级 MgB_2 长线,但这类超导线的运行温度较低.2008年初,日本科学家发现了另一

种新型的超导体——铁基超导体,突破了人们以往对超导电性的认识.人类对超导电性的认识还远没有达到完善的地步,超导电性的研究仍有取得新的重大突破的可能性,超导技术仍将是一片有待于开发的前沿阵地.

3.2 超导电力技术研发现状

超导电力应用研究始于20世纪50~60年代NbTi

表2 目前国际上主要生产厂商提供的典型Bi系超导带材的性能
Table 2 The performances of typical BSCCO tapes supplied by main manufacturers of the world

研究开发或生产单位	超导带材所达到的技术水平 (J_e 为工程电流密度)
美国AMSC公司	100~800 m, $J_e > 120 \text{ A/mm}^2$
德国布鲁克公司(Bruker)	100~2500 m, $J_e > 100 \text{ A/mm}^2$
日本住友电气(SEC)	100~1500 m, $J_e > 150 \text{ A/mm}^2$
澳大利亚金属制造公司(MM)	100~500 m, $J_e > 80 \text{ A/mm}^2$
中国西北有色金属研究院(NIN)	100~200 m, $J_e > 80 \text{ A/mm}^2$
北京英纳超导技术公司(INNOST)	100~400 m, $J_e > 100 \text{ A/mm}^2$

表 3 目前国际上主要研究开发机构或公司所研制的Y系超导带材的性能
Table 3 The performances YBCO tapes fabricated by the main institutions of the world

研究开发或生产单位(制备方法)	超导带材所达到的技术水平(长度及每厘米宽带材的载流能力)
美国IGC SuperPower(IBAD/MOCVD)	1311 m, 300 A/cm-width(2010 年)
美国超导公司(RABiTS/MOD)	600 m, 460 A/cm-width(2013 年)
日本ISTEC/Fujikura(IBAD/PLD)	1050 m, 594 A/cm-width(2014 年, GaBCO)
德国Bruker EST公司(IBAD/PLD)	100 m, 337.5 A/cm-width(2010 年)
韩国SuNAM 公司(RCE-DR)	978 m, 579 A /cm-width(2014 年)

和Nb₃Sn被发现以后. 但是, 由于这类超导材料研制的超导电力设备需要运行的极低的温度——液氮温度(4.2 K), 因而其研发和应用均受到限制. 这个时期的超导电力技术的发展, 基本上仅限于原理研究, 仅有少量的原理样机进行过实验. 1986 年, 铜氧化物高温超导体的发现, 引起了世界范围内的高温超导研究热潮. 由于高温超导设备可以在液氮温度(77 K)运行, 使超导电力应用具备了一定的现实性. 自从 20 世纪 90 年代高温超导材料逐渐形成小批量生产能力以来, 超导电力技术研究开发得以全面开展, 目前在各个应用方面均取得了较大的进展, 已经进入到示范运行阶段.

(i) 超导限流器. 由于常规限流技术还缺少成熟定型的产品, 而超导限流器具有特殊的性能优势,

因此超导限流器被认为是很有潜力得到实际应用的故障电流限制技术. 表 4 列出了近年来国际上主要的超导限流器研发和示范项目. ABB瑞士公司是首个将超导限流器投入电网进行示范的企业, 美国SuperPower公司、AMSC公司和Zenergy公司等分别研制基于第Ⅱ代高温超导材料的 138 kV/1.2 kA三相矩阵型、115/1.2 kA三相电阻型、138 kV/(2~4) kA三相饱和铁心型高温超导限流器, 原计划于 2012~2013 年投入电网示范运行. 中国科学院电工研究所和北京云电英纳超导公司先后研制成 10 kV桥路型超导限流器、35 和 220 kV饱和铁芯型超导限流器, 分别在湖南娄底高溪变电站、云南普吉变电站和天津石各庄变电站投入示范试验运行, 取得了较好的示范效果.

(ii) 超导电缆. 超导输电电缆是解决大容量、

表 4 国际高温超导限流器研究开发和示范项目主要案例^[11,13~16]
Table 4 The main cases of R&D on superconducting fault current limiter in the world^[11,13~16]

研究开发单位	主要技术参数	状况
瑞士ABB公司	三相磁屏蔽型, 10.5 kV/70 A	1996 年完成试验
美国LM公司	三相桥路型, 2.4 kV/100 A	2000 年试验完毕
瑞士ABB公司	三相电阻型, 8 kV/800 A	2001 年完成研制
美国GA公司	三相桥路型, 15 kV/1.2 kA	2003 年完成单相测试
美国LANL实验室	三相可控桥型, 15 kV/1 kA	2003 年完成测试
德国NEXANS公司	三相电阻型, 10 kV/600 A	2004 年完成测试
日本东京电力公司	三相电抗器型, 66 kV/750 A	2004 年完成研制
中国科学院电工研究所	三相改进桥路型, 10.5 kV/1.5 kA	2005 年投入试验运行
中国科学院电工研究所	三相电阻型, 220 kV/1.5 kA	计划 2017 年投入运行
日本Super-ACE计划	单相电阻型, 6.6 kV/100 A	2005 年完成研制
韩国DAPAS计划	三相电阻型, 22.9 kV/630 A	2007 年研制成功
中国云电英纳超导公司	三相饱和铁心型, 35 kV/1.5 kA	2008 年投入试验运行
中国云电英纳超导公司	三相饱和铁心型, 220 kV/0.8 kA	2013 年投入运行
美国SuperPower公司	三相矩阵型, 138 kV/1.2 kA	原计划 2012 年投入运行
美国Zenergy公司	三相饱和铁心型, 138 kV/(2~4) kA	原计划 2012 年投入运行
美国AMSC公司	三相电阻型, 115 kV/1.2 kA	原计划 2013 年投入运行

低损耗、少占地的输电问题的重要选项,因而受到了国际上的广泛关注.表5列出了近年来国际上主要超导电缆的研发与示范项目.其中,2006年投运的纽约长岛电力局的高温超导电缆示范项目,计划作为一个永久性的电力设施投入运行.韩国正在推动现有电力传输网采用高温超导电缆的进程,预计在未来5年内将实现50 km高温超导电缆在实际商业电网中的使用和服务.俄罗斯计划在彼得堡建设一条长2.5 km、 ± 20 kV/2 kA的超导直流电缆,以连接两个变电站,这也是世界首个用超导直流电缆连接变电站的尝试.中国科学院电工研究所研制的360 m, 10 kA高温超导输电电缆于2013年在河南中孚铝业有限公司投入运行,为电解铝厂供电.这是世界上首条投入实际系统运行的高温超导直流电缆,也是传输电流最大的高温超导电缆.

(iii) 超导储能系统. 20世纪90年代以前,国际上在低温超导储能系统方面开展了大量的研究.2000年前后,美国AMSC公司已经推出了小型低温超导储能系统的产品,容量为MJ/MW级.例如,1998年,美国AMSC公司就有6台3 MJ/8 MVA小型低温超导储能系统成功地安装在威斯康星州电力公司的

北方环型输电网,实现了对电网电能质量的实时快速调节,不仅大大地改善了该地区的供电可靠性和电能质量,而且将送电能力提高了15%.近年来,随着高温超导材料的研究开发不断取得进展,高温超导储能系统的研究开发也取得了良好的进展.在我国,中国科学院电工研究所、清华大学、华中科技大学等均开展了超导储能系统的研究,取得了良好的示范或试验效果.表6列出了国际上近年来在超导储能系统方面的研究开发与示范项目案例.

(iv) 超导电机. 超导电机主要包括超导电动机、超导发电机,其中超导发电机又可以包括大型超导发电机、超导风力发电机和超导同步调相机.最近10多年来,国际上在船用超导推进电动机、电力系统用超导同步调相机、超导风电发电机方面的研究开发占据主导地位.2007年,美国超导公司开发的超导同步调相机(10 Mvar, 13.8 kV, 60 Hz)就有8套安装在美国田纳西州TVA电管局电网,解决轧钢机和电弧炉冲击问题.2010年以来,美国和英国先后启动了8~10 MW级直驱型超导风力发电机的研究开发.表7列出了国际上主要的超导电机研发与示范项目及其进展.

(v) 超导变压器. 超导变压器在降低变压器运

表5 国际高温超导电缆研究开发与示范主要案例^[11,17~21]
Table 5 The main cases of R&D on superconducting power cable in the world^[11,17~21]

研究开发单位	主要技术参数	状况
美国Southwire公司	三相 30 m, 12.5 kV/1.25 kA	1999年投入试验运行
美国Pirelli公司	三相 130 m, 24 kV/2.4 kA	2000年投入试验运行 (二相低温容器损坏)
美国IGC公司	三相 350 m, 34.5 kV/0.8 kA	2006年完成一期试验 2008年完成二期投运
美国AMSC/Pirelli公司	三相 200 m, 13.2 kV/3.0 kA	2006年投入试验运行
美国AMSC/LIPA公司	三相 600 m, 138 kV/2.4 kA	2008年投入运行
美国Southwire公司	三相 1760 m, 13.8 kV/2 kA	2011年3月投入运行
丹麦NKT公司	三相 30 m, 36 kV/2 kA	2001年投入试验运行
荷兰NKT公司	三相 6000 m, 50 kV/3 kA	原计划2007年实施
日本东京电力公司	三相 100 m, 66 kV/1 kA	2001年完成试验
日本古河电工公司	单相 500 m, 77 kV/1 kA	2004年完成试验
日本中部大学	直流 200 m, ± 10 kV/40 MW	2011年完成试验
韩国DAPAS计划	三相 100 m, 22.9 kV/1.25 kA	2006年交付使用
韩国LS电缆公司(首尔)	三相 500 m, 22.9 kV/1.25 kA	2010年投入运行
韩国电力公司(KEPCO)	直流 500 m, ± 80 kV/50 MW	2014年投入运行
中国科学院电工研究所	三相 75 m, 10.5 kV/1.5 kA	2004年投入试验运行
中国科学院电工研究所	直流 360 m, 10 kA	2013年投入工程示范
中国云电英纳超导电缆公司	三相 30 m, 35 kV/2 kA	2004年投入试验运行

表 6 国际超导储能系统研究开发与示范的主要案例^[11,13,22-24]

Table 6 The main cases of R&D on superconducting magnetic energy storage in the world^[11,13,22-24]

研究开发单位	主要技术参数	状况
德国ACCEL公司	400 V/2 MJ/200 W, 低温超导	2002 年投入运行
意大利ENEL公司	1.8 kV/4 MJ/1.2 MW, 低温超导	2002 年并网运行
法国EC公司	4.5 kV/22 MJ/10 MW, 高温超导	1996 年开始研制
美国AMSC	1~10 MJ/1~4 MW, 低温超导	少量商品化供应
韩国KERI	2 MJ/1 MW, 低温超导	2003 年完成样机
日本九州电力公司	3.6 MJ/1 MW, 低温超导	2001 年投入运行
日本九州大学	2.5 kV/1 MJ/1 MW, 高温超导	2005 年完成测试
中国科学院电工研究所	10.5 kV/1 MJ/0.5 MVA, 高温超导	2011 年并网试运行
中国科学院电工研究所	380 V/100 kJ/25 kVA, 世界首套超导限流-储能功能集成系统	2005 年完成研制和测试
清华大学	220 V/300 kJ/150 kVA, 低温超导	2005 年完成研制
华中科技大学	250 V/35 kJ/7 kVA, 高温超导	2005 年完成示范

表 7 国际上在超导电机研究开发和示范项目的主要案例^[11,25-28]

Table 7 The main cases of R&D on superconducting machine in the world^[11,25-28]

研究开发单位	主要技术参数	状况
日本Super G-M计划	10 kV/79 MW发电机、低温超导	2000 年完成研制和实验
日本Super G-M计划	19 kV/200 MW发电机	2006 年启动概念设计
美国超导公司	8 MW超导同步调相机(订货)	2004 年投入电网运行
美国GE公司	100 MVA同步发电机	2004 年开始概念设计
美国超导公司	2.4 kV/5 MW电动机	2005 年完成载荷调试
美国超导公司	6.6 kV/36.5 MW电动机	2009 年 2 月载荷调试
美国超导公司	10 MVA风力发电机	计划 2015 年投入试验
美国Zenergy公司	8~10 MW风力发电机	2010 年启动
英国Converteam	8 MW风力发电机	2010 年启动
德国西门子公司	6.6 kV/4 MW电动机	2005 年试验运行
韩国DAPAS计划	3.3 kV/1 MW电动机	2008 年完成测试
中国 712 研究所	1 MW超导船舶电机	2010 年试验运行

行损耗的同时,可以减少变压器的重量和体积,同时,由于高温超导变压器采用液氮作为冷却介质,因此高温超导变压器还是一种阻燃型变压器,具有很高的安全性和环保性. ABB瑞士公司(1999 年)和日本九州电力公司(2001 年)研制的两台高温超导变压器投入实际配电网试验运行. 以美国Waukesha公司为代表的研究开发机构和生产厂商进行过容量达 28 MVA超导变压器的研究. 但是,考虑制冷需求,超导变压器在大型电力变压器中才可能具有一定的优势,而常规大型电力变压器的效率已经相当高(达到 99.95%以上),因此液氮温度的高温超导变压器的优势并不十分明显,其研究开发已经基本停止. 表 8 列

出了近年来高温超导变压器的研究开发案例.

(vi) 超导电力装置的系统集成与功能集成研究与示范. 系统集成是指将多种超导电力装置集成为一个系统,从而充分展现超导电力技术的综合优势. 2011 年,德国启动了一项超导电力技术集成项目(Ampacity)^[11],计划由Nexan公司在Essen建设一个 10 kV、1 km高温超导交流电缆和一台 10 kV高温超导限流器,以替代市中心一个正在老化的常规 110 kV/10 kV配电系统(一条 110 kV地下输电线和一台 110 kV/10 kV变压器),在保持原有地下电缆沟道不变的情况下,实现以 10 kV超导电缆与原有 110 kV常规电缆相同的输电容量,并将两个变电站联系起来.

表 8 国际上高温超导变压器研究开发和示范项目的主要案例^[11,13,24,28-30]Table 8 The main cases of R&D on high T_c superconducting power transformer in the world^[11,13,24,28-30]

研究开发单位	主要技术参数	进展状况
瑞士ABB	18.7 kV/420 V, 630 kVA@77 K	1996 年完成试验
日本九州大学	6.6 kV/3.3 kV, 1 MVA@ 77 K	2001 年试验运行
德国西门子	5.6 kV/1.1 kV, 1MVA@77 K	2006 年研制阶段
美国Waukesha	28 MVA, 69 kV/12.5 kV@20~30 K	概念设计
韩国DAPAS	100 MVA, 154 kV	试制阶段
中国科学院电工研究所	10.5 kV/400 V/630 kVA@77 K	2006 年完成并网示范
中国科学院电工研究所	10.5 kV/400 V/1250 kVA@77 K	2015 年完成并网示范
株洲电力机车厂(南车)	20 kV/10 kV/300 kVA@77 K, 单相	2006 年完成试验

目前, 超导电缆和超导限流器均已投入运行。

中国科学院电工研究所完成了世界首座 10 kV 级超导变电站的研制和建设^[24]。该超导变电站包括高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导变压器、超导储能系统等多种超导电力装置, 并且于 2011 年 2 月初在甘肃省白银市投入工程示范运行, 为下游多家企业提供高质量的电力供应。

功能集成的新型超导电力装置基于超导体的无阻高密度载流特性以及超导态/正常态转变特性, 可以在一种超导电力装置上实现两种或以上超导电力装置的功能, 从而可以优化系统结构、降低超导电力装置成本。中国科学院电工研究所在多功能集成的新型超导电力装置上取得了积极进展, 在世界上首次提出集成限流和电能质量综合调节功能于一体的超导限流-储能系统的原理, 并于 2005 年完成了世界首套 100 kJ/25 kVA 超导限流-储能系统样机的研制成本和实验室测试。目前, 将限流和电压变换功能集成的超导限流-变压器已经完成了概念设计; 美国正在进行将大容量电能传输功能与限流功能的超导限流-电缆的研制工作, 其容量为 13.8 kV/4 kA、长度将达 200 m, 计划将在纽约曼哈顿投入运行, 连接两座变电站。

4 问题与建议

虽然超导电力技术在过去 20 年取得了长足的发展, 但要真正实现规模应用, 还存在多方面的问题亟待解决, 主要包括:

第一, 需要提高超导材料的临界温度(T_c)。虽然液氮温度的运行环境比较容易实现, 且在此运行温度下, 超导电力设备的综合效率优势也能得到体现,

但较低的运行温度意味着更大的运行维持成本。例如, 热损耗所带来的制冷成本特别是制冷设备需人值守等, 均是造成运行维护成本上升的关键要素。若能大幅提高超导材料的临界温度, 就能从根本上降低运行维护成本。

第二, 需要大幅提高辅助设备(主要是低温和制冷设备)的长期运行可靠性。这是因为这些辅助设备的安全性和可靠性直接决定了超导电力设备的安全性, 而电网的安全可靠性又与设备电力设备的安全性密切相关。传统电力设备的安全性已经达到相当高的程度, 其所需冷却系统也具有很高的长期运行可靠性, 例如风冷系统等。目前, 液氮温度制冷系统还无法达到长期连续免维护运行的目标, 故障停机概率较高, 仍难以完全满足电网对电力设备安全可靠性的要求, 需要大幅度提高。当然, 如果超导材料的临界温度能够大幅度提高, 则可使得低温和制冷系统更为简单可靠。

第三, 需要进一步大幅降低高温超导材料的价格。如前所述, 高温超导材料的价格约为同等传输容量的铜导体的 20~50 倍, 如果还考虑其辅助的低温和制冷设备的价格, 超导电力设备的造价会较常规电力设备高出几十倍到上百倍, 难以得到有效推广。即使像液氮温度的超导限流器这样的电力设备, 虽然还没有成熟成型的常规产品, 但低温运行所带来的可靠性问题、运行维护问题及价格问题的综合因素也会限制其应用推广。

虽然实现上述 3 方面的突破是一项长期的任务, 特别是能否以及何时能够探索出适合于电力应用的更高临界温度(如 T_c 达到 200~300 K)的超导体还存在很大的不确定性, 但是超导电性的研究发展历史告

诉我们,超导电性研究总是会给人们带来惊奇的新发现和新认识,人类对超导电性的认识还相当肤浅,超导电性及其应用研究仍然是一片有待于大力开发的科研前沿阵地。

超导技术一旦取得重大突破,将同时对电力、能源、交通、通讯、医疗、科学研究等带来重大的影响。因此建议国家科技部门以实现超导电力技术的现实应用为目标牵引,加强总体设计和制订近、中、远期发展战略路线图,突出目标驱动导向,通过国家重点研发计划予以长期稳定支持。国家也只有通过对类

似基础性、前瞻性的高风险项目的长期稳定支持,才可能实现重大原创突破和科技创新能力的全面提升。

作为重要切入点,建议在我国现有超导研究基础上,启动更高运行温度(例如液化天然气温度及以上)的超导输电示范工程项目,通过15~20年的努力,建成百公里级超导输电示范系统。围绕该项目,重点突破示范目标所涉及的超导物理基础、高温超导材料制备关键技术、长寿命高可靠性低温与制冷关键技术、超导输电电缆制造关键技术,以点带面,全面促进我国超导技术在各领域的应用发展。

参考文献

- 1 International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2011. 2011
- 2 Xiao L Y, Lin L Z. Construction of unified new energy power grid and promotion of smart grid of China (in Chinese). *Adv Technol Electr Eng Energy*, 2009, 28: 54–59 [肖立业, 林良真. 构建统一的新能源电网、推进我国智能电网建设. *电工电能新技术*, 2009, 28: 54–59]
- 3 Xiao L Y, Lin L Z. Investigation of future power grid (in Chinese). *Adv Technol Electr Eng Energy*, 2011, 30: 56–63 [肖立业, 林良真. 未来电网初探. *电工电能新技术*, 2011, 30: 56–63]
- 4 Xiao L Y, Lin L Z, Xu M M. Multiple level DC power grid and “Cloud Powering” (in Chinese). *Adv Technol Electr Eng Energy*, 2011, 30: 64–69 [肖立业, 林良真, 徐铭铭. 多层次直流环网与“云电力”. *电工电能新技术*, 2011, 30: 64–69]
- 5 Xiao L Y. R&D of China's New Strategy Industry—Smart Grid (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 2013. 490–525 [肖立业. 中国战略性新兴产业研究与发展—智能电网. 北京: 机械工业出版社, 2013. 490–525]
- 6 Xiao L Y, Lin L Z. The present status and future trends of superconducting power transmission technology (in Chinese). *Trans China Electrotech Soc*, 2015, 30: 1–9 [肖立业, 林良真. 超导输电技术发展现状与趋势. *电工技术学报*, 2015, 30: 1–9]
- 7 Izumi T, Shiohara Y. R&D of coated conductors for applications in Japan. *Physica C*, 2010, 470: 967–970
- 8 Kutami H, Hayashida T, Hanyu S, et al. Progress in research and development on long length coated conductors in Fujikura. *Physica C*, 2009, 469: 1290–1293
- 9 Shiohara Y, Yoshizumia M, Izumi T, et al. Current status and future prospects of Japanese national project on coated conductor development and its applications. *Physica C*, 2008, 468: 1498–1503
- 10 Prusseit W, Hoffmann C, Nemetschek R, et al. Reel to reel coated conductor fabrication by evaporation. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2006, 16: 996–999
- 11 Rey C. *Superconductors in the Power Grid—Materials and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015
- 12 Gu H W, Dong Z B, Han Z H, et al. Research and development of high T_c superconducting tapes (in Chinese). *Adv Technol Electr Eng Energy*, 2015, 34: 1–15 [古宏伟, 董泽斌, 韩征和, 等. 高温超导材料的研发、产业化与经济性能提高. *电工电能新技术*, 2015, 34: 1–15]
- 13 Xiao L Y, Lin L Z, Dai S T. The Prospects of superconducting power technology under the background of new energy revolution (in Chinese). *Physics*, 2011, 40: 500–504 [肖立业, 林良真, 戴少涛. 新能源变革背景下的超导电力技术发展前景. *物理*, 2011, 40: 500–504]
- 14 Noe M, Steurer M. High Temperature superconductor fault current limiters: Concepts, applications, and development status. *Supercond Sci Technol*, 2007, 20: R15–R29
- 15 Tixador P. Development of superconducting power devices in Europe. *Physica C*, 2010, 470: 971–979
- 16 Xin Y, Gong W Z, Cui J B, et al. Factory and field tests of a 220 kV/300 MVA statured iron-core superconducting fault current limiter. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2013, 23: 5602305
- 17 Xiao L Y, Dai S T, Lin Y B, et al. Research and development of HTS superconducting power cable. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2007, 17: 1652–1655
- 18 Xin Y, Hou B, Bi Y, et al. China's 30 m, 35 kV/2 kA ac HTS power cable project. *Superconduct Sci Technol*, 2004, 17: 332–335
- 19 Xiao L Y, Dai S T, Lin L Z, et al. Development of a 10 kA HTS DC power cable. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2012, 22: 5800404
- 20 Yamaguchi S, Ivanov Y, Sun J, et al. Experiment of the 200-meter superconducting DC transmission power cable in Chubu University. *Phys Proced*, 2012, 36: 1131–1135

- 21 Sytnikov V E, Bermert S E, Kopylov S I, et al. Status of HTS cable link project for St. Petersburg grid. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2014, 24: 2373814
- 22 Tixador P. Superconducting magnetic energy storage: Status and prospective. *IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum*, 2008
- 23 Ali M H, Fellow B W, Dougal R A. An overview of SMES applications in power and energy system. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2010, 1: 38–47
- 24 Xiao L Y, Dai S T, Lin L Z, et al. Development of the world's first HTS power substation. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2012, 22: 5000104
- 25 Gamble B, Snitchler G, MacDonald T. Full power test of a 36.5 MW HTS propulsion motor. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2011, 21: 1083–1088
- 26 Gieras J F. Superconducting electrical machines-state of the art. *Przegląd Elektrotechn*, 2009, 85: 1–19
- 27 Bray J W. Superconductors in applications: Some practical aspects. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2009, 19: 2533–2539
- 28 Kalsi S S. *High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*. Hoboken: Wiley and Sons, 2011
- 29 Zueger H. 630 kVA high temperature superconducting transformer. *Cryogenics*, 1998, 38: 1169–1172
- 30 Schwenlerly S W, McConnell B W, Demko J A, et al. Performance of a 1-MVA HTS demonstration transformer. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 1999, 9: 680–684

The R&D of superconducting technology for future power grid

XIAO LiYe^{1,2}

¹*Applied Superconductivity Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

²*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

In this paper, the challenges for the future power grid faced by the development of renewable energies were briefly presented, and then the potential application of superconductor for the solution of these challenges was discussed. In detail, this paper presented the recent progresses of the high T_c superconducting materials and the application of superconductors in power cable, fault current limiter, power transformer, superconducting magnetic energy storage, generator, motor and the integration of superconducting power equipments. Finally, the challenges of application for superconductor in future power grid were discussed, and the proposals for promotion the R&D of superconductor for future power grid were also suggested.

renewable energies, future power grid, superconducting technology for power

doi: 10.1360/N972015-00428