

# 新能源变革背景下的超导电力技术发展前景

肖立业<sup>†</sup> 林良真 戴少涛

(中国科学院电工研究所 中国科学院应用超导重点实验室 北京 100190)

**摘要** 自从 1911 年超导体发现以来,人们一直梦想超导体能够在电力技术中得到大规模应用. 20 世纪 60 年代以来,随着 NbTi 超导线材,特别是氧化物高温超导带材达到商业化水平,世界范围内广泛地开展了超导电力技术的研究与应用示范. 单从技术上讲,超导电力技术已经接近实用化水平. 当今,人类社会正在经历一次新的能源变革,超导电力技术在应对能源变革带来的挑战方面将会发挥重要的作用. 文章介绍了近年来超导电力技术的发展趋势,并就其在新能源变革背景下的发展前景进行了探讨.

**关键词** 超导电力技术,可再生能源

## The prospects of superconducting power technology at the coming age of new energy

XIAO Li-Ye<sup>†</sup> LIN Liang-Zhen DAI Shao-Tao

(Applied Superconductivity Laboratory, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Since the discovery of superconductivity in 1911, the mankind dreamed the application of superconductor in power technology. Since 1960's, the NbTi wires and then the high  $T_c$  superconducting (HTS) tapes in 1990's became commercially available, the demonstrations for superconducting power technology (SPT) have been achieved worldwide. Technically, the SPT has been near to the practical use in real grid. In the coming age of new energy, the future power grid will be faced with many challenges, and the SPT would be a promising solution for the future power grid. In this paper, the progress of the SPT is presented, and the prospects of the SPT at the age of new energy are discussed.

**Keywords** superconducting power technology, renewable energy

## 1 引言

超导体具有零电阻高密度载流能力,因而在电力应用方面具有不可替代的优势. 上世纪 60 年代以来,随着低温超导体开始走向实用化,人们就开始研制用于电力和能源的各种超导装备. 直到上世纪 90 年代,基于低温超导材料的超导输电电缆、超导限流器、超导储能系统和超导电机均研制成功,并进行了试验. 例如文献[1, 2]指出,1975—1985 年,美国 Brookhaven 国家实验室 (BNL) 在美国能源部

(DOE) 和费城电力公司的支持下,成功地研制出一根长 115m、额定电压 135kV、额定容量 1000MVA 的同轴 Nb<sub>3</sub>Sn 交流电缆,而同时 Los Alamos 国家实验室 (LANL) 则研制出长 300m、额定电压 100kV、额定容量 5000MVA 的直流 Nb<sub>3</sub>Sn 电缆,其能量损耗小于输送容量的 0.1%; 1982 年,LANL 成功地研制出储能量为 30MJ 的超导储能系统 (SMES),并自 1983 年 11 月 1 日起至 1984 年 3 月 8 日止,在美国波尼维尔管理局 (BPA) 所属的西北

2011-06-02 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: xiao@mail. iee. ac. cn

电力系统进行了示范应用,该 SMES 连续地调制了一个低频干扰信号,有效地消除了电网的低频振荡,表明了其对电网的稳定作用;1994 年,东芝公司采用极细丝 NbTi 交流复合导体成功地研制出额定电压为 6.6kV、额定电流为 2.0kA 的超导限流器(FCL),其反应时间为 0.1ms,它能将短路电流从 25.8kA 限制到 4.0kA;1988 年,日本通产省启动了超导发电机研究计划(即 Super G-M 计划),并于 1998 年(利用 NbTi 超导线)成功地研制出额定功率为 70MW 的超导发电机,它能输出 79MW 的功率,1000 小时的连续试验运行表明,它已经完全达到甚至超过了设计指标。

上世纪 90 年代末期以来,氧化物高温超导带材不断达到商业化水平,引起了高温超导电力技术的应用研究热潮,世界范围内已经广泛地开展了各种应用技术的示范。例如文献[3—5]指出,2006 年,由美国超导公司等合作研制的长 600m、额定电压为 138kV 的高温超导电缆已经在纽约长岛投入实际运行,纽约电力公司还计划将该超导电缆作为一个永久性的电力设施用于居民的供电;多种形式的超导限流器(FCL)已经分别在美国、德国、韩国等国家投入了配电网示范运行;美国超导公司还成功地研制出额定功率为 36.5MW 的高温超导电动机,并在船舶推进应用方面进行了综合试验。与此同时,其研制成功的超导同步调相机(额定容量为 10MVA、额定电压为 13.8kV、工作频率为 60Hz)已在美国田纳西州 TVA 电管局电网安装了 8 套,成功地解决了轧钢机和电弧炉冲击引起的电压质量问题。自我国“十五”计划实施以来,中国科学院电工研究所全面系统地开展了超导电力技术的研究,已经先后研制出额定电压为 10kV 的高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导储能系统和高温超导变压器,并在实际电网中进行了示范运行<sup>[6]</sup>;同时,北京云电英纳超导电缆公司、中国船舶 712 研究所、华中科技大学、清华大学、中国电力科学研究院等单位也在超导输电、超导限流器、超导电机和超导储能等方面开展了技术研究与应用示范。

经过几十年的发展,超导电力技术已经取得了长足的进步,并在加速向实用化阶段发展。那么,超导电力技术今后的发展趋势和前景到底如何? 本文结合新能源变革的背景和态势,对这一问题进行了探讨,供读者参考和商榷。

## 2 超导电力技术近年来的发展趋势

近年来,超导电力技术研究开发的重点是超导电缆、超导限流器、超导储能系统、超导风力发电机、多功能集成的超导电力装置等。从当前的发展现状及现实需求来看,超导电力技术的发展主要呈现以下态势:

### (1) 从配电系统向输电系统方向发展

超导电力技术的应用示范均从配电系统开始,为了发展更有替代优势的应用技术,目前超导电力技术的研究应用示范均向输电系统方向发展。例如,荷兰于 2007 年底启动了长度达 6000m、额定电压为 50kV、额定电流为 3kA 的三相交流高温超导电缆的前期工作<sup>[7]</sup>;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 50km 高温超导电缆在实际商业电网中的使用和服务<sup>[8]</sup>。在超导限流器的研究开发方面,美国 Super-Power 公司、AMSC 公司和 Zenergy 公司等正在分别研制基于第 II 代高温超导材料的高温超导限流器,分别为三相电阻型(额定电压为 138kV 及额定电流为 1.2kA)、三相电阻型(额定电压为 115kV 及额定电流为 1.2kA)、三相饱和铁心型(额定电压为 138kV 及额定电流为 2—4kA)三种类型,并计划于 2012—2013 年投入输电示范运行<sup>[9—11]</sup>。

### (2) 向原理多样化和功能集成化方向发展

超导电力技术的原理特别是超导限流器的原理一直在不断发展,并在近年来出现了多功能集成化的趋势。在一种超导电力装置上实现两种或两种以上超导电力装置的功能,可以优化系统结构,降低超导电力装置成本。目前,将限流功能和变压器功能集成一体的超导限流变压器已经完成了概念设计,正在进行可行性研究<sup>[12]</sup>;美国正在进行具有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:额定电压 13.8kV,额定电流 4kA,长度将达 200m,短路故障电流 40kA,原计划于 2010 年部署在纽约曼哈顿运行,用以连接两座变电站<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。中国科学院电工研究所于 2006 年成功地研制了一台超导限流储能系统,有效地集成了超导限流器和超导储能系统的功能,在电网正常运行时,该系统可以作为 SMES 使用,而在发生短路故障时,可以起到限制短路电流的作用。

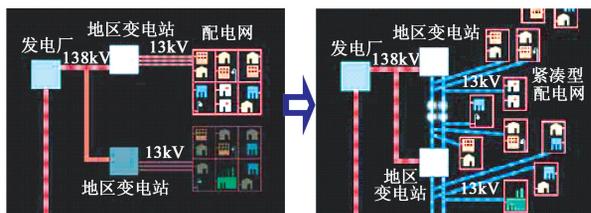


图1 即将安装在纽约的超导限流电缆的示意图

(3) 为可再生能源的发展服务

随着以风能和太阳能等为主的间歇性、不稳定性可再生能源的发展,近年来,围绕解决新能源利用中的问题而发展相适应的超导电力技术已经成为研究热点.例如,美国已经正式启动了将三大电网实现完全互联和可再生能源发电并网的“Tres Amigas 超级变电站”项目,采用高压直流输电技术(HVDC)实现电网互联,将建成一个占地 22.5 平方英里、呈三角形互联的可再生能源市场枢纽<sup>[14]</sup>,如图 2 所示.此外,美国超导公司还启动了额定容量达 10MVA 的直驱型超导风力发电机的研究开发项目,有望将风力发电机的重量由常规机组的 300 吨降低到超导机组的 120 吨<sup>[15]</sup>.

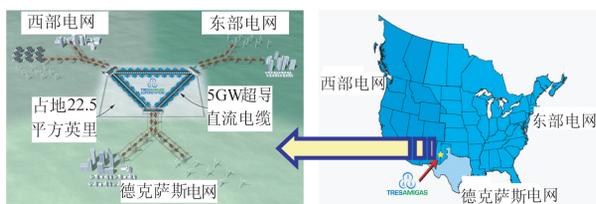


图2 美国 Tres Amigas 超级变电站采用大容量高温超导直流电缆实现三大电网的互联

(4) 超导输电技术向直流方向发展

超导直流输电具有比超导交流输电更为明显的优势.一方面,超导直流输电没有交流损耗,因而输电效率比交流高得多;另一方面,在输送相同容量时,直流输电本身比交流输电具有更高的性价比.因此,近年来超导直流输电成为一个重要的发展趋势.除了上述 Tres Amigas 项目外,中国科学院电工研究所正在建造长 380m、额定电流 10kA 的超导直流输电示范系统,即将用于电解铝厂的供电;日本中部大学于 2010 年建成了长 200m、额定电流 2kA 的超导直流输电电缆试验线.

### 3 超导电力技术的发展前景

随着化石能源的日益枯竭以及日益增长的环境压力等因素的驱动,人类已经认识到必须大力发展

清洁能源技术,不断提高能源系统的效率,大力提高可再生能源的比重<sup>[16]</sup>,并逐步实现可再生能源替代化石能源的重大变革.可再生能源的主要利用方式是发电,近年来得到了飞速发展.例如,我国 2009 年新增风电装机容量已经达到了 13.8GW<sup>[17]</sup>,生产的光伏电池达到 4GW 的容量(占全球的约 40%);2009 年,欧盟国家新增的电力装机中,可再生能源发电装机已经达到了 62%以上,超过了传统能源发电的新增装机.欧盟联合研究中心估计<sup>[18]</sup>,到 2020 年,欧盟可再生能源的份额将达到能源需求量的 20%以上,也就是说,届时成员国总发电量的 35%—40%将来自可再生能源;2011 年 1 月,德国环境咨询委员会(SRU)提交了一份名为《建立一个 100%的可再生能源电力系统》的报告,该报告得出结论,到 2050 年,德国电力 100%由可再生能源供应是可能的<sup>[19]</sup>.世界观察研究所的报告认为<sup>[17]</sup>,到 2050 年,中国可再生能源将达到总能源需求的 40—45%.

因此可以预见,在不远的将来,一次能源以可再生能源为主、终端能源以电力为主的清洁高效能源体系格局将变成现实.能源体系的这一重大变革,将对未来电网带来革命性的影响和重大的挑战,主要体现在以下几个方面<sup>[20]</sup>:

(1) 由于未来终端能源将以电力为主,因此促使未来发电量增长的原因不仅仅限于经济增长因素,更主要的是能源结构的重大变化.可以预见,未来的发电量将比当前有数量级上的增长.同时,由于可再生能源资源和负荷资源分布不匹配的格局仍然存在(例如,人烟稀少的地区往往有更多的太阳能和风能),能源的输送将主要靠电网来完成.这就决定一方面远距离输送和大电网互联在相当长时间内仍将存在;另一方面,超大容量电力输送的需求将比当今更为迫切.这将对未来电网提出重大挑战.

(2) 随着现代电网规模的不断扩大,电力系统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<sup>[21]</sup>,事故引发大面积停电的威胁增加<sup>[22]</sup>,大的扰动导致的大电网崩溃解列和大规模停电对生活、生产和服务会造成很大的损失,因此稳定性问题已经成为制约现代电力系统发展的瓶颈.未来电网的容量和规模将大幅度提升,但是电源以可再生能源为主,而可再生能源特别是风能具有间歇性、不稳定性特征,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.因此,在满足可再生能源规模化接入的约束条件下,如何保障电网的安全稳定性并实现电力的高效调度和实时动态功率平衡,将成为未来电网面临的另一重大挑战.

(3)随着信息技术和微电子技术的广泛应用,人们对电力质量将提出越来越高的要求.然而,太阳能、风能、海洋能等可再生能源具有不稳定性、间歇性的特点,这将对电力质量造成很大影响.与此同时,随着能源结构的调整,电网中的直流负载(如电网中广泛分布的电动汽车充电站等)将大大增加,并将产生大量的谐波,如果处理不当,将进一步影响电力质量.因此,如何保障高质量的电力供应也将是未来电网面临的新的挑战.

(4)随着电力在终端能源中的比重不断提高,进一步提高电网和用电系统的能效将变得日益重要.当前,我国电力网络的损耗占总发电量的约 7%,相当于三座三峡电站的总发电量.因此,如果不提高电网的整体效率,我国未来电网的总损耗将达到相当惊人的程度.例如,以 2030 年我国总发电功率为 25 亿千瓦为例,以当前的电网效率计算,总损耗将达到 1.75 亿千瓦,几乎相当于 1993 年全国的总发电量.由此可见,大幅度提高电网的输配电效率已经成为未来电网必须面对的问题.

简而言之,能源体系的重大变革对电网在大幅度提高输送容量、安全稳定性、电力质量和运行效率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.

超导电力技术是利用超导体的零电阻特性发展起来的电力应用新技术,在应对上述重大挑战方面具有常规电力技术不可比拟的优势,是一项革命性的前沿技术,被美国能源部誉为 21 世纪电力工业唯一的高技术储备,是当今电力技术最活跃的前沿研究领域之一,具有广阔的应用前景,主要体现在以下几个方面:

(1)超导输电电缆将为未来电网提供一种全新的低损耗和大容量的远距离电力传输解决方案.我国是资源禀赋条件和负荷分布极度不平衡的国家,资源条件主要集中在我国西部,而负荷中心主要集中在我国东部,从而远距离的西电东送成为我国电网发展的必然要求.在将来,可能需要将包括可再生能源发电在内的数亿乃至数十亿千瓦的电力由西部向东部输送,尽管特高压输电技术在大容量、远距离输送方面与传统高压输电方式相比有较大优势,但如果全部采用特高压输电,则可能需要上百条输电

线路,从而占用大量的输电走廊.高温超导电缆(交流或直流),利用超导体的零电阻和高载流密度的特性,可以实现比特高压更大的传输容量(例如电压为  $\pm 500\text{kV}$  的高温超导直流电缆可以实现功率为 20—50GW 的输送容量),并可降低 50% 左右的传输损耗,还可以大大节省传输走廊,因此是实现大容量输电和打造未来电力传输网的重要技术选择.

(2)超导限流器和超导储能系统将大大提高未来电网的安全性和稳定性.随着电网容量增加和规模不断扩大,电力系统的短路容量越来越大,不加限制的短路电流对电气设备和正常工业生产带来了很大危害,并可能导致电网的崩溃.目前,电网尚缺乏成熟的故障电流限制技术,短路电流限制问题已经日益成为电网发展的重大瓶颈问题.目前主要是使用六氟化硫( $\text{SF}_6$ )断路器开断短路线路,其缺陷是响应时间和开断容量有限,难以满足电网发展的需求.例如,我国三峡电站可能的最大短路电流周期分量达到了惊人的 300kA;而上海电网发展规划中的 2020 年的 500kV 网架,其短路电流将大大超过开关的开断能力<sup>[23]</sup>.超导限流器利用了超导体在超导态和正常态之间的转变特性,具有响应速度快、自动触发和复位等显著优势,能有效限制短路电流,从而可以在扩大电网输送容量与规模的同时,提高电网的安全性和可靠性,因此是实现未来电网的坚强和安全可靠性的重要技术保障.

同时,由于现有电网在“快速电能存取”这一环节还非常薄弱,使得电力系统在运行和管理过程中的灵活性和有效性受到极大限制;另一方面,电能“发、输、供、用”运行过程中必须在时空两方面都达到“瞬态平衡”,如果出现失衡就可能引起电力系统的稳定性问题,甚至造成重大停电事故.超导储能系统利用超导线圈作为储能单元和电力电子变换装置实现控制,具有响应速度快、响应功率高、输出功率可根据需要进行灵活控制的优点,其应用有望大幅度提高大电网的安全稳定性.

(3)超导储能系统可以为保障高质量的电力供应提供重要的技术手段.可再生能源的间歇性和不稳定的特点,决定了电能储存系统将成为未来电网不可或缺的关键环节.从长远看,解决未来电网的储能问题可能需要一种综合性的互补解决方案,即多种储能方式联合发挥作用.如前所述,超导储能系统具有响应速度快、响应功率高、输出功率可灵活控制的优点,结合日益发展的电力电子技术,有望衍生出一系列的应用(基于超导储能线圈的灵活输电装置),也有希望

用于解决未来电网的暂态电能质量问题,成为提高供电品质综合解决方案的重要组成部分之一。

(4)超导风力发电机在大型风力发电中将具有重要的应用前景。近几年,风力发电机的功率容量正由 1.5MW 机组逐步向 3MW 乃至 5—10MW 以上发展。由于风力发电机的功率越来越大,其尺寸和重量已经成为进一步提高风电发电效率,特别是提高其初期建设投资效率的瓶颈。根据技术分析和实际测试结果,带变速箱的传统风力发电机的经济极限容量约 5MW,采用永磁体的低速、无变速箱直驱式风力发电机在综合考虑其体积、重量和磁性材料成本等条件下的经济极限容量也很难突破 6MW。因此,采用更大单机容量的常规风力发电机一方面将导致风力发电的建设总成本急剧增加,使风电产业的投资效率不能满足产业化和规模化的需求;而另一方面,即使风力发电机的单机容量发展到 10MW 以上,相对于水力和火力发电的单机容量依然十分有限,发电成本仍然相对较高。因此,风力发电机大型化已经成为提高风电场建设和设备投入产出比的必要途径,是风电产业发展的必然要求,而采用常规风力发电技术显然将难以实现大型化的发展目标。超导风力发电机具有重量轻、单机容量大、效率高、能量密度高(可以比相同容量的常规发电机的尺寸和重量减少 2/3 以上)、耐受负载变动能力强等独特优势,是实现未来电网中的风力发电大型化和提高投入产业比的重要选择。

(5)超导电力技术的广泛应用,对于降低未来电网的输电电损耗具有不可替代的作用。如前所述,现有电网的损耗较大,如不采用有效的技术创新,未来电网的损耗将达到惊人的程度。由于超导体具有零电阻特性,因此超导电力技术在降低电网损耗方面将具有不可替代的作用。除了超导输电电缆以外,超导变压器、超导发电机、超导电动机等均具有比常规设备更为明显的运行效率和节能优势。

此外,高温超导电力设备无需油冷,是一种理想的环保阻燃型电力设备,具有良好的安全可靠性能。

总之,以可再生能源发展为主导的能源结构变革,以及全球气候变暖趋势的加剧,无疑对未来电网的输送容量、安全稳定性、电力质量、综合效率等提出了更高的和更迫切的需求,而基于超导体的独有特性而发展起来的超导电力技术,在面对这些重大

挑战时将发挥巨大作用,因而具有广阔的发展前景。

### 参考文献

- [1] 肖立业,林良真.物理,2000,29:131[Xiao L. Y.,Lin L. Z. Wuli (Physics),2000,29:131(in Chinese)]
- [2] Shelton Duane *et al.* <http://www.wtec.org/loyola/scpa/>
- [3] [http://events.energetics.com/wire07/pdf/Maguire\(American\\_Superconductor\)\\_LIPA.pdf](http://events.energetics.com/wire07/pdf/Maguire(American_Superconductor)_LIPA.pdf)
- [4] Neumann A. Application of Fault Current Limiter. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.berr.gov.uk/files/file42656.pdf>
- [5] <http://www.amsc.com/products/index.html>
- [6] 肖立业.2006 年高技术发展报告.北京:科学出版社,2006 年 3 月.第 88 页
- [7] [http://www.cired.be/CIRED07/pdfs/CIRED2007\\_0196\\_paper.pdf](http://www.cired.be/CIRED07/pdfs/CIRED2007_0196_paper.pdf)
- [8] [http://www.businesswire.com/portal/site/home/permalink/?ndmViewId=news\\_view&newsId=20090923005042&newsLang=en](http://www.businesswire.com/portal/site/home/permalink/?ndmViewId=news_view&newsId=20090923005042&newsLang=en)
- [9] Yuan X, Tekletsadik K, Kovalsky L *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond.,2005,15:1982
- [10] Development and In-Grid Demonstration of a Transmission Voltage SuperLimiter Fault Current Limiter, Superconductivity for Electric Systems Peer Review, July 29—31, 2008
- [11] Weber Chuck. Status of HTS Projects in the US. In: Engineering & Operations Technical Conference, Indianapolis, Indiana, 2008
- [12] Hayakawa N, Kagawa H, Okubo H. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11: 1936
- [13] <http://www.amsc.com/newsroom/pr.html?id=298>
- [14] <http://www.amsc.com/amigasannouncement.html>
- [15] Superconductor Week, March 23, 2009, 23: 3
- [16] 严陆光等.中国科学院学部咨询报告:21 世纪上半叶我国能源可持续发展体系战略报告,2007
- [17] 中国科学院国家科学图书馆,科学研究动态监测快报:先进能源科技专辑,2010 年第 22 期(总第 132 期)
- [18] 中国科学院国家科学图书馆,科学研究动态监测快报:先进能源科技专辑,2009 年第 13 期(总第 100 期)
- [19] 中国科学院国家科学图书馆,科学研究动态监测快报:先进能源科技专辑,2011 年第 4 期(总第 138 期)
- [20] 肖立业,林良真.电工电能新技术,2009,28:54[Xiao L. Y.,Lin L. Z. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2009,28:54(in Chinese)]
- [21] 高严.面向 21 世纪电力科学技术讲座.北京:中国电力出版社,2001.33
- [22] 王大中.21 世纪中国能源科技发展展望.北京:清华大学出版社,2007.259
- [23] 祝达康,华东电力,2007,35(1):41[Zhu D K. East China Electric Power,2007,35(1):41(in Chinese)]