

超导技术在未来电网中的应用*

张京业^{1,2} 唐文冰^{1,2,3} 肖立业^{1,2,3,†}

(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)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

2021-01-05收到

† email: xiao@mail.iee.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210204

Application of superconducting technology in future power grids

ZHANG Jing-Ye^{1,2} TANG Wen-Bing^{1,2,3} XIAO Li-Ye^{1,2,3,†}

(1 Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 大力发展可再生能源并实现清洁能源变革,是当今能源领域的大趋势。

随着可再生能源越来越多地接入电网,将对直流输电和大规模储能技术提出愈加迫切的需求。在此背景下,超导直流输电技术、超导直流限流器以及基于超导电性的电力储能技术等具有潜在的应用前景。文章较为系统地介绍上述直流超导电力装置的原理、优势以及近些年国内外的进展等。

关键词 可再生能源, 超导电力技术, 超导输电技术, 超导限流器, 超导储能

Abstract The development of renewable energy and clean energy sources is a major trend today. As more and more renewable energy sources are being integrated into the electrical power grid, there is an ever increasing demand for direct current (DC) power transmission and large-scale energy storage. Consequently, superconducting DC power transmission, DC superconducting fault current limiters and power storage technology based on superconductivity have potential application prospects. This paper presents an overview of the principle, advantages, and recent development of these DC superconducting power devices.

Keywords renewable energy, superconducting electrical power technology, superconducting power transmission technology, superconducting fault current limiter, superconducting magnetic energy storage

1 引言

化石能源资源有限,且在利用过程中产生大量污染物和排放温室气体,对环境造成重大影响,因而是不可持续的能源。为此,人们已经逐

渐认识到必须大力发展可再生能源,不断提高可再生能源的比重,并逐步实现可再生能源对化石能源的替代。

由于可再生能源受天气影响大且具有间歇性、波动性、分散性、地理上不可平移性等特点,把大量的可再生能源接入电网,将给未来电网带来一系列重大挑战^[1]。一方面,需要进一步

* 国家自然科学基金(批准号:51721005)资助项目

发展跨区大电网,以实现广域范围内的各种可再生能源资源的时空互补利用。这对远距离大规模可再生能源的电力输送提出了重要挑战,大力发展柔性直流输电正是应对这个挑战的有效途径之一^[2-5]。在柔性直流输电系统中,短路电流的快速限制和开断是重要的技术难题。另一方面,随着大量波动性电源的接入,规模化的电力储能技术将成为迫切需求。

超导体具有零电阻、高密度载流能力和完全抗磁性等奇特的电磁特性,在电力输送和储能方面的应用中,可望为应对上述挑战提供潜在的技术支撑。本文将着重介绍超导直流输电和基于超导电性的电力储能技术的原理和研究进展。

2 超导能源管道

超导直流输电是利用超导体的零电阻和高密度载流能力发展起来的新型输电技术,通常需要采用液态介质冷却以维持电缆导体的超导态,但介质循环冷却系统给超导直流输电增加了运维成本。基于可再生能源制备的液态清洁燃料(如液氢、液化天然气(LNG)等),其输送也需要专用保温绝热管道和低温制冷系统。因此,将超导直流输电与低温液体燃料输送管道相结合,两者共用制冷系统和传输绝热管道,在液体燃料输送的同时冷却超导电缆,进而形成一体化输送的“超导能源管道”,可望成为未来能源输送的技术选择之一。

液化天然气的沸点为110 K,液氢的沸点为21 K,目前已有的高温超导材料BSCCO的临界温度达到了110 K,而TlBaCuO($T_c \sim 125$ K)和HgBaCuO($T_c \sim 150$ K)的临界温度已超过了液化天然气的沸点温度。因此,从已有超导体的临界温度来看,目前已具备研制超导能源管道的基本条件。发展超导能源管道也成为超导直流输电技术的重要方向,为未来能源互联网建设提供了新的

思路。

自从上世纪末首次提出“氢电混输超导能源管道”概念后^[6],美、日、俄、欧等国家和地区相继开展了输氢/输电能源管道的探索和研究工作^[7-10]。中国科学院电工研究所与中国电力科学院等单位合作,开展了超导直流能源管道的概念设计研究^[11-13],主要包括液氢温区超导电缆设计方法、低温制冷系统设计及沿程温度分布等。在此基础上,完成了1 km、10 kV/2 kA 氢电混输超导直流能源管道的技术方案设计,并采用MgB₂带材研制了6 m长、10 kV/2 kA的超导直流电缆样机,在实验室内进行了18 kV直流耐压试验和直流稳态载流测试,为氢电混输超导能源管道的研制和安全性评估奠定了基础,样机的测试现场如图1所示。

考虑到液化天然气(LNG)管道输送的现实性,肖立业等提出了电力/LNG混输的超导能源管道设想^[14],并带领团队与中国电力科学院等单位合作,开展LNG超导直流能源管道的系列研究工



图1 氢电混输超导直流能源管道测试现场

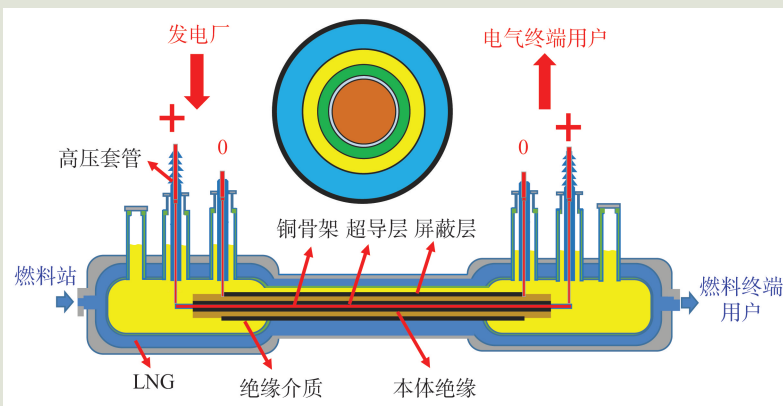


图2 直流能源管道原理验证样机结构

作,完成了不同工况下能源管道的动态稳定性分析、超导直流能源管道的故障演化及安全防御策略研究,并提出了低温燃料冷却、绝缘介质保护的直流能源管道原理结构,如图2所示。该能源管



图3 10 m长10 kV/1 kA超导直流能源管道测试现场

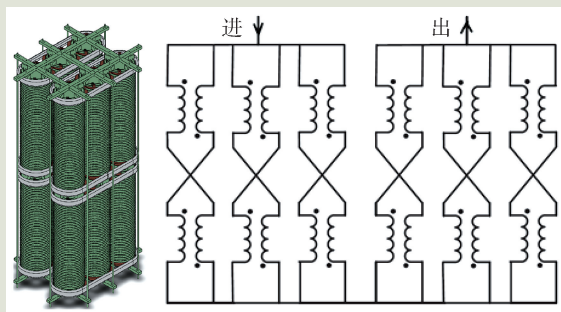


图4 高温超导无感绕组的结构设计效果图及接线示意图



图5 (左)高温超导限流单元;(右)40 kV/2 kA超导直流限流器考核现场

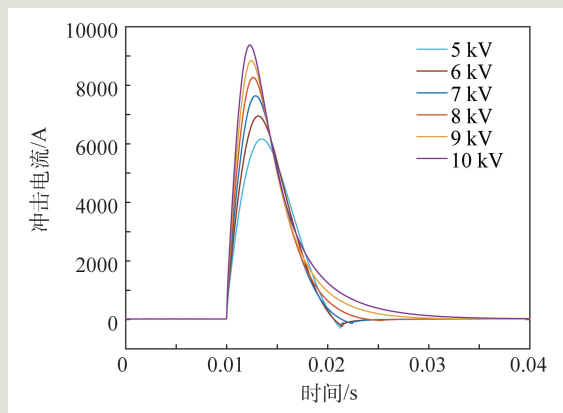


图6 不同电压下限流器冲击电流测试结果

道采用超导电缆在内、LNG在外的嵌套结构,实现电力和LNG共输。

2019年7月,项目团队研制出10 m长、10 kV/1 kA超导直流能源管道样机,并通过了多种测试,测试现场如图3所示。该样机在100 K温度下的临界电流为885 A,在90 K时的额定电流高于1 kA,液体燃料输送的速率超过15 L/min,并在92—100 K温度下通过了18.5 kV、2小时直流耐压试验^[14]。

通过10 m长10 kV/1 kA超导直流能源管道样机的研制和性能测试,项目团队进一步优化和改进超导直流能源管道的结构和技术方案,目前正在开展30 m长、 ± 100 kV/1 kA超导直流能源管道的研制,预计2021年完成系统集成和实验运行^[15]。

3 超导直流限流器

柔性直流输电技术在可再生能源并网和电力输送中的应用日益增加,基于这项技术的多端直流输电和直流电网将成为重要的发展方向。其中,直流系统短路电流的快速开断问题长期以来是一个难题。进一步提高直流断路器的开断容量的难度和代价较大;串联电抗器虽可限制短路电流的上升速度,但对潮流控制的灵活性造成不利影响且损耗大。为此,肖立业等提出发展高压超导直流限流器来解决这个问题,并发表了概念设计方案^[16]。

超导直流限流器利用超导体特有的零电阻和超导态—正常态转变特性,由大量无感绕组串并联组成,可以等效为一个串接在电网中、浸泡在液氮内的可变电阻。当线路处于正常状态时,无感绕组处于超导态,电流可以无阻通过超导限流器;当短路故障发生后,短路电流瞬间超过无感绕组临界电流而失超,超导限流器很快呈现出一个合适的电阻,并有效地限制短路电流的大小和上升速度。

随着可再生能源和直流电网的发展,超导直流限流器已经引起了国内外越来越广泛的关注^[17—19]。2019年12月,中国科学院电工研究所

研制成功 40 kV/2 kA 超导直流限流器样机。该样机采用 12 组螺线管绕组, 每组内外同芯嵌套、电流反向, 组间上下交叉串的无感组合结构; 其内部接线示意图如图 4 所示。

样机在 65 K 下通过了额定 2 kA 的长时间载流考核、直流 74 kV 下持续 2 小时以及叠加 100 kV 雷电冲击等系列耐压性能考核, 高温超导限流单元及系统考核现场如图 5 所示。随后进行了故障限流、失超恢复等性能试验, 典型测试结果如图 6 所示, 样机在 9 kA、10 ms 冲击下的失超恢复时间小于 300 ms, 最大耐受电流超过 10.5 kA, 最大限流电阻超过 $2.5\ \Omega$ ^[20]。

试验证明, 本团队研制的超导直流限流器样机具备快速限流和快速恢复能力。因此, 以该超导直流限流器为模块, 采用串并联方式可以合理组合成各种更高电压等级和更大容量的超导直流限流器, 从而为解决高压直流短路电流限制和开断问题提供一种新的技术途径。

4 基于超导电性的电力储能技术

4.1 超导储能系统

超导储能系统(SMES)利用超导线圈产生的磁场来进行能量的储存, 需要时可将电磁能返回给电网或其他负载。SMES 具有响应速度快、响应功率高等优点, 用于电网中可以改善电压稳定性、电能品质, 并提高功率因数。

近 10 多年来, 随着高温超导材料的发展和高温超导带材商业化产品的出现, 韩国、日本、美国、中国等国家的高温超导储能系统的研究开发取得了很大进展。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高温超导储能系统的研究, 取得了良好的示范或试验效果。中国科学院电工研究所研发成功的 1 MJ/0.5 MVA 高温超导储能系统, 于 2011 年在 10 kV 超导变电站并网示范运行^[21], 这是国际首台并入实际电网示范运行的高温超导储能系统。

在此基础上, 结合超导储能和超导限流器的特点, 中国科学院电工研究所与西电集团公司合

作, 联合研发成功 1 MJ / 0.5 MVA 高温超导储能—限流系统, 在一套装置上实现了两种功能。其中, 高温超导储能线圈的电感 13.3 H, 额定储能 1 MJ, 线圈照片及内部接线如图 7 所示^[22]。该装置利用超导线圈大电感的特性, 同时将超导线圈作为储能和限流的环节。在正常状态下, 利用超导线圈的储能特性, 对风力发电输出波动的有功功率进行补偿; 而在故障状态下, 将超导线圈串入风力发电机的定子回路, 抑制风力发电机的定转子过电流(装置故障限流测试结果如图 8 所示), 并减小转子反感应生电动势, 从而大大提高了风力发电机的低电压穿越能力。2016 年, 项目

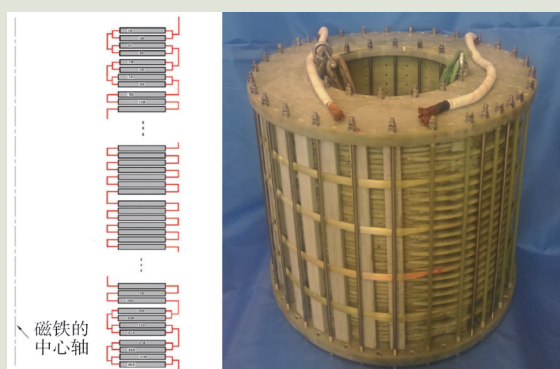


图 7 超导储能—限流系统采用的混合型高温超导线圈(右)及内部自绕组接线图(左)

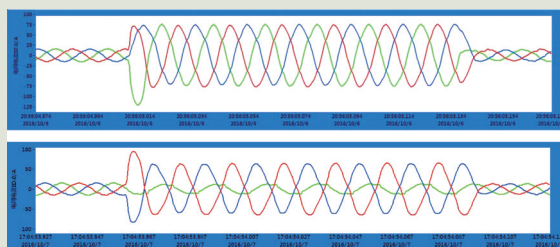


图 8 超导储能—限流系统三相短路故障限流(上)和相间短路故障限流(下)测试结果



图 9 1 MJ / 0.5 MVA 超导储能—限流系统在玉门风电场并网试验现场

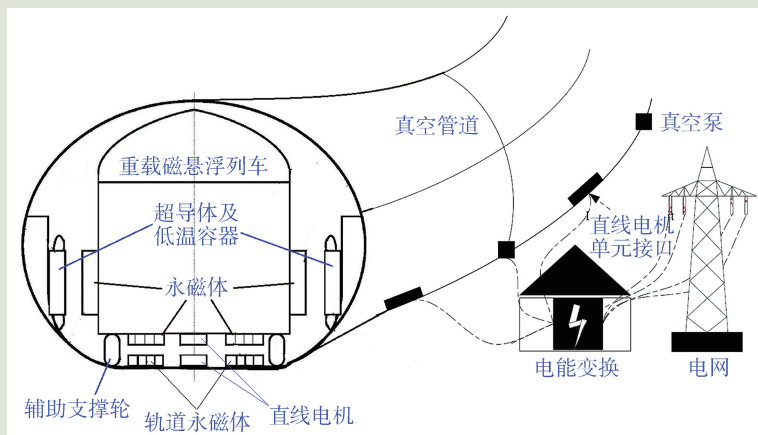


图10 真空管道超导磁悬浮储能系统结构图

团队完成系统集成并在玉门风电场并网试验，试验现场如图9所示。

在弱风和强风条件下的现场测试结果表明，高温超导储能—限流系统对风力发电机的有功补偿和有功平滑效果明显^[23]。

4.2 真空管道永磁—超导磁悬浮储能

现有储能技术中除抽水储能外都难以实现大容量储能，而抽水储能受地域限制大且响应速度慢。为此，结合超导磁悬浮技术的优点，肖立业等提出了一种新型的规模化机械储能技术——真空管道超导磁悬浮列车储能，其系统原理结构如图10所示^[24]。其中，永磁体安装在环形轨道、车体底面和侧面上，高温超导块材安装在轨道侧面的低温容器内。列车的悬浮利用永磁悬浮方式，轨道侧面的超导体与列车侧面的永磁体相互作用，由于超导体的磁通钉扎效应，超导体与永磁体的相互作用将能够维持列车的相对稳定性。

采用重载磁悬浮列车首尾相连组成环形，并采用直线电机驱动。通过将电能转化为重载列车的动能，能量便以动能的形式储存在真空管道内，需要的时候把动能转换为电能回馈电网。由

于是物理储能，环保无二次污染，还具有功率调节灵活、调节范围大、选址方便等优势。

与抽水蓄能、压缩空气储能等大规模储能技术相比，真空管道永磁—超导磁悬浮储能系统具有响应快、无任何环境污染、功率调节灵活等多方面优势，且无选址问题，除了可以用于电网大规模电力存储外，还可以用于脉冲高功率电源等，应用前景广阔^[24]。目前，肖立业团队正在进行实验室原理样机的研制，将通过

原理样机验证该项储能技术的可行性、可靠性以及经济性等。

5 总结

化石能源不仅资源有限且其使用会导致环境污染，是不可持续的能源，大力发展可再生能源是当今能源发展的大趋势。高比例可再生能源接入电网后，电网将对直流输电、直流故障限流和大规模储能技术提出愈加迫切的需求。由于超导体所具有的独特物理特性，在满足上述需求方面具有潜在的应用价值。我们对直流能源管道、超导直流限流器以及基于超导电性的电力储能技术等的基本原理进行研究并在结构上做出创新，研制了相应的装置，通过实验或并网试验运行验证了原理的可行性。希望对从事该领域的科研人员和研究生有所借鉴作用。

致谢 感谢邱清泉研究员、郭文勇研究员以及张国民研究员等对本文的贡献以及在本文写作过程中的热心帮助。

参考文献

- [1] 肖立业. 科学通报, 2015, 60(25):2367
- [2] 刘振亚. 中国电力企业管理, 2019, (4):11
- [3] 张宁, 邢璐, 鲁刚. 中国能源, 2018, 40(3):5
- [4] 刘增训, 游沛羽, 周勤勇. 电力工程技术, 2020, 39(5):59
- [5] 王煜奇. 直流配电网若干关键问题研究. 东南大学博士论文, 2019
- [6] Ishigohka T. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2):949

- [7] Grant P M. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2):1810
- [8] Nakayama T *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3):2062
- [9] Vysotsky V S *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23:5400906
- [10] Trevisani L *et al.* Cryogenics, 2007, 47:113
- [11] 邱清泉, 靖立伟 等. 低温燃料冷却阻燃气体保护的超导能源管道. 发明专利, 2017, CN107300129A
- [12] 邱清泉, 肖立业 等. 液化天然气冷却CF4保护的超导能源管道. 发明专利, 2017, CN107610835B
- [13] 邱清泉 等. 一种耐冲击耐烧蚀的超导能源管道. 发明专利, 2019, CN110021460A
- [14] Qiu Q Q, Xiao L Y *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2020, 33(9):095007
- [15] Qiu Q Q, Xiao L Y *et al.* Cryogenics, 2020, 109:103120
- [16] Xiao L Y *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23:5401506
- [17] Leon W *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27:5602009
- [18] Yehia D M *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28:5603105
- [19] Chen L *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29:5600607
- [20] Qiu Q Q, Xiao L Y *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(6):5602305
- [21] Xiao L Y *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22:5000104
- [22] Zhang J Y, Xiao L Y *et al.* J. Supercond. Nov. Magn., 2019, 32:521
- [23] Guo W Y *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28:5700505
- [24] Tang W B, Xiao L Y *et al.* IEEE on Power & Energy Society Section, 2020, 8:89351

业界领先的量子计算模拟器+云平台

Huawei Quantum Computing



HUAWEI



助力量子前沿技术开发



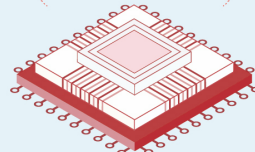
量子电路模拟
HiQ Circuit



量子化学模拟
HiQ Fermion



量子脉冲模拟
HiQ Pulse



更多模块将会
持续上线和开源发布

构建万物互联的智能世界



华为HiQ官网
<https://hiq.huaweicloud.com>