

超导体在电力输送与储能领域的应用

伍 岳¹ 肖立业^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所 100190;2. 中国科学院大学 100049)

随着化石能源的日益枯竭、环境污染以及气候变化等问题的日益突出,世界各国对可再生能源的发展和高效利用给予了高度重视。由于风能、太阳能等可再生能源存在间歇性、波动性、分散性、地理上不可平移性等特点,其大规模并网将会对电网的安全稳定运行带来严重挑战。因此,在面向可再生能源为主体的新型电力系统的建设中,一方面需要针对可再生能源的时空互补性,进一步发展跨区域大型互联电网,并大力发展远距离直流输电技术特别是电压源型直流输电技术;另一方面需要针对可再生能源存在的间歇性、波动性特点,大力发展储能技术。

超导体作为近一个世纪以来在物理学和材料科学领域最重要的发现之一,具有零电阻效应、高密度载流能力,以及完全抗磁性等奇异电磁特性,上述特性使得超导体有望在大容量电力输送和储能方面具有大规模应用的潜力。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及其近年来的研究进展。

1. 超导输电技术

1.1 超导输电

超导直流输电技术是利用超导体的高载流能力特性发展起来的新型输电技术。由于高温超导材料在液氮温区的载流能力可达到 $100 \sim 1\,000\text{ A/mm}^2$ (约是普通铜或铝的载流能力的 $50 \sim 500$ 倍),且其传输损耗在直流下几乎为零。因此,超导直流输电技术具有容量大、损耗低、体积小、重量轻、系统运行灵活等优势,可为未来电网提供一种全新的低损

耗、大容量、远距离电力传输方式。随着更高临界温度超导材料的发现以及制备技术的不断发展和超导线材价格的不断降低,未来可望在超导直流输电中得到潜在的应用。

超导直流输电系统的主要组成部分有超导电缆本体、超导电缆终端、循环低温制冷装置和配套的监控保护设施等,如图1所示。超导电缆本体是超导直流输电的核心,其结构包括内支撑、电缆导体、低温恒温器、电气绝缘层,以及电缆屏蔽层和外护套(图2所示)。超导电缆终端是电缆本体和外部电气设备之间、冷却介质和制冷设备之间的连接通道,担负着温度和电场的过渡。循环低温制冷装置由制冷单元、液氮泵、冷箱、循环管路和储罐等部分组成,负责维持超导电缆的正常运行温度。超导电缆及线路监控保护设施实时监测硬件和系统状态,对超导电缆和线路提供必要的保护。

中国科学院电工研究所于1998年研制出我国第一根 $1\text{ m}/1\text{ kA}$ 原型高温超导电缆开始,经过二十多年的发展,超导输电应用已进入试验示范运行阶段。例如,由中国科学院电工研究所和河南中孚铝业联合研制的长度 360 m 、载流能力超过 10 kA

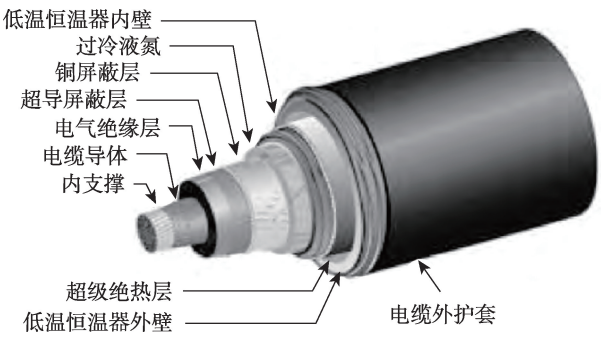


图1 超导电缆结构图



图2 深圳平安中心高温超导电缆

的高温超导直流输电电缆在河南中孚铝业股份有限公司进行了工程示范运行,其输电损耗较常规电缆降低了65%以上。这也是目前世界上传输电流最大、首次面向工业应用的高温超导电缆。

近年来,超导电缆技术在我国取得了重要进展,其中深圳平安金融中心和上海徐汇区的成功应用标志着我国在高温超导电缆设计、制造和应用方面达到国际领先水平。深圳平安金融中心的10千伏三相同轴高温超导交流电缆项目于2021年投入运行,400米长的电缆设计载流量为2000安培,输电容量达到43兆伏安,相当于同时满足4列高铁用电需求。截至2023年,该电缆已稳定运行超过一年,并在高负荷测试中表现优异,将供电覆盖面积扩大了31倍。上海徐汇区的35千伏公里级高温超导电缆示范项目于2021年底投运,1.2公里长的电缆设计载流量为2200安培,可替代4回共12根传统电缆,节省约70%的地下管廊空间,已累计输送电量1.74亿度,运行期间经受住极端高温考验。未来,我国计划进一步推广超导电缆技术,在城市核心区域、数据中心、高铁供电及工业园区等场景应用,同时通过改进高温超导材料和制造工艺降低成本,完善产业链并制定相关标准,以推动超导电缆技术的规模化应用,为电力系统的高效、可靠和绿

色发展提供支持。

1.2 超导能源管道

由于现有的超导体需要低温环境才能保持超导性,其作为电力输送的载体就不可避免需要加入制冷设备。而无论是低温制冷液体(液氮、液氢等),还是低温制冷机,都需要额外的能量用来制冷,这会在很大程度上牺牲超导输电零电阻带来的低损耗优势。因此,随着超导电力技术的不断发展,人们也开始探索超导电力的新型输送形式。其中,利用低温液体燃料作为制冷剂冷却超导电缆,实现电力、燃料一体化输送就成为潜在的应用方案。这种方案不仅可以提高能源输送整体效率、降低综合成本,还可以有效节约土地资源。该方案可望成为未来能源输送的技术选择之一。

基于目前超导材料的临界温度,可以用作冷却介质的液体燃料主要包括液化天然气(LNG)以及液氢,前者的沸点为110 K,后者的沸点达到21 K。可以看出,对于液氢而言,可以满足大多数超导材料的制冷需求;而对于LNG,目前已有的高温超导材料 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ 的临界温度刚好达到了110 K,而 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 、 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ 的临界温度已超过了120~130 K。因此,目前已有的超导体可满足

能源管道方案的实施需求。在国外,美国、日本、俄罗斯等国家相继开展了输氢/输电能源管道的探索和研究工作。在国内,中国科学院电工研究所与中国电力科学院等单位合作,率先开展了超导直流能源管道的研究,并完成了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;同时采用 MgB_2 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。

相比于液氢输送,LNG输送更具有现实意义。中国科学院电工研究所肖立业提出了高温超导/LNG混合输送的能源管道设想,并带领团队与中国科学院理化技术研究所等单位合作,开展LNG超导直流能源管道的系列研究工作。项目团队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,该能源管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(图3所示)。在此基础上研制出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。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。在这之后,研究团队进一步优化和改进了超导直流能源管道的结构和技术方案,与中国电力科学院等合作研制了30 m长、 ± 100 kV/1 kA的超导直流能源管道,液体燃料输送的速率超过100 L/min,并完成了24小时满负荷运行试验,测试现场如图4所示。

1.3 超导直流限流器

灵活高效的电压源型直流输电技术(即VSC-HVDC,也称为柔性直流输电技术),被认为是实现未来“碳中和”与新能源变革的重要技术方向之

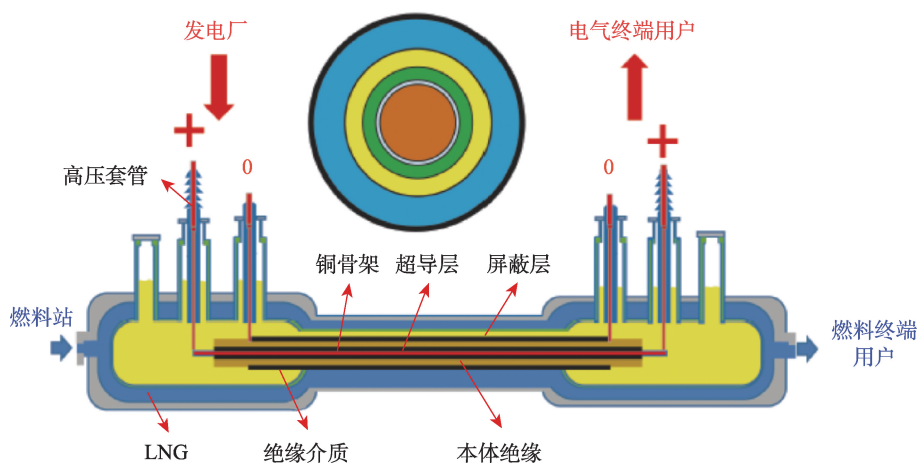


图3 10 kV/1kA 超导直流能源管道原理图



图4 30 m长, ± 100 kV/1kA 超导直流能源管道测试现场

一。然而,该种直流输电系统的阻尼小,在发生故障时,直流短路电流会在几毫秒内达到额定电流十倍以上,已经成为影响直流输电系统安全性稳定性的重要因素。为了提高电网运行的安全可靠,减少短路电流以及对电力设备的冲击,配置可靠的限流装置是一个重要的技术手段。

由于超导体在超导/非超导态转变过程中,其阻抗会发生巨大变化,是理想的限流材料。目前,已有一系列利用超导材料设计的限流器在性能上表现出了明显优势。其中,电阻型超导限流器因其具备结构简单、响应迅速、限流效果好、能自动触发且自动恢复、正常态对电网无影响等优势,是用于直流系统的超导限流器的优选方案。电阻型超导限流器的原理如图5所示,当电网传输电流在超导限流器临界电流以下时,超导限流器处于无阻超导态;当电网出现短路故障时,短路电流会急剧增加并超过超导限流器的临界电流,此时超导限流器阻

值由零转变为高阻值的正常态,从而起到抑制短路电流的作用。在实际应用中,为了防止超导体因短路电流过大而烧毁,通常还会并联一个旁路电阻,这样在超导体失超时,旁路电阻会分担大部分短路电流,从而起到保护超导体的作用。

目前,电阻型超导限流器的研发均朝着更高电压、更优限流性能、更快恢复速度等目标奋勇前进。2019年,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(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 Ω 。

2. 基于超导电性的储能技术

电能可以通过一定的方式向动能、势能、热能、磁能以及化学能等多种形式转换,因此电能的储存形式多样。目前已有的储能类型基本可以概括为物理储能(包括抽水储能、重力储能、压缩空气储能、飞轮储能等)、电磁储能(线圈储能、电容器储能等)、化学储能(化学电池等)以及相变储能(相变储热等)等4种类型。基于超导电性储能技术主要包括两类,一类是利用超导体的零电阻效应的超导磁

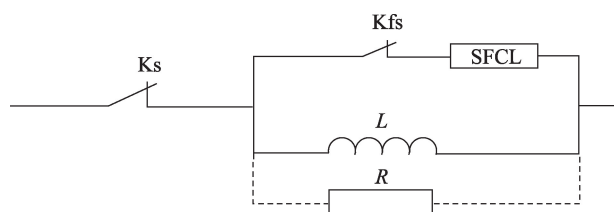


图5 电阻型超导限流器原理结构



图6 40 kV/2kA 超导直流限流器试验现场

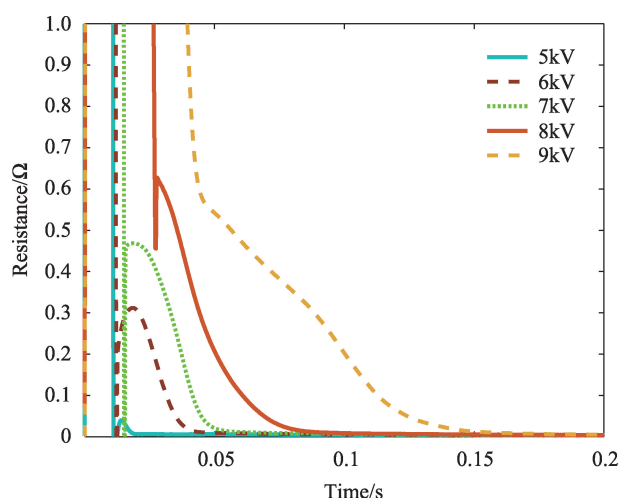


图7 大电流冲击下40 kV/2 kA超导直流限流器的限流电阻-时间变化曲线

储能,而另一类是利用超导体的完全抗磁性的超导飞轮储能以及由此进一步演化的真空管道超导磁悬浮储能。相比于其他类型的储能,基于超导电性的储能技术具有快速响应、储能系统功率高及灵活可控等优势。

2.1 超导磁储能

超导磁储能的原理是利用超导带材绕制成超导磁场线圈。当电流通过超导线圈时,会在内部产生强度很高的磁场。由于超导体具有零电阻效应,线圈内的电流可以长期保持而不发生明显衰减。由于超导磁储能储存的能量正比于磁场强度的平方,因此通过提高磁场强度可以显著提高其能量密度(可达到 10^8 J/m^3)。

虽然超导磁储能原理简单,但是由于实用超导材料的临界温度低,导致制冷成本昂贵而未能迅速发展。近年来,随着高温超导材料的发展及商业化,国内外在高温超导磁储能技术领域有了很大进展。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。其中,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,并在10 kV超导变电站并网示范运行,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,中国科学院电工研究所联合西电集团,合作开发了1 MJ/0.5 MVA高温超导储能—限流系统,这一系统既有储能的功能,又具备限流的能力。在正常状态下,利用超导线圈的大载流能力储存电能,并对风力发电机的输出功率进行补偿。当遇到短路故障时,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。整个系统在玉门风电场实现了并网集成,同时在弱风和强风条件下进行了试验验证,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。

2.2 超导飞轮储能

飞轮储能的储能原理如下:在储能阶段,利用高速电机将飞轮转子加速到很高的转速,从而将电能转化为飞轮转子的动能;在需要释放能量的



图8 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

阶段,高速旋转的飞轮带动发电机转动并将动能转化为电能。飞轮储能相比于其他储能形式,具有功率密度高,能量转换效率高、充电时间短等优势,目前全球有至少3000套基于飞轮原理的储能系统投入运行。

飞轮储能技术根据支撑轴承的方式分为机械轴承以及磁悬浮轴承两种方式。相比于机械轴承,磁悬浮轴承可以有效避免机械摩擦,从而能有效增加轴承寿命及储能时间。由于超导体具有完全抗磁性及磁通锁定能力,是目前自然界唯一能实现稳定悬浮的材料,因此超导飞轮储能成为飞轮储能技术的一个重要研究方向。

超导飞轮储能系统主要由超导磁悬浮轴承、飞轮转子、电动机、功率转换装置以及保护系统等部分组成。其中,超导磁悬浮轴承是超导飞轮储能的核心部件,由高温超导块材(例如 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$)作为定子和永磁体作为转子组成,利用液氮温度下,超导体的完全抗磁性和磁通锁定,使永磁体转子稳定悬浮,加上飞轮系统内部处于真空环境,从而可以实现近乎无阻旋转(原理图见图9)。

目前,美国、日本、德国等多个国家已经相继开展了高温超导飞轮储能系统的研制。我国于2001年便研制出混合轴承的高温超导飞轮储能系统,更于2015年研制出首套30 kJ/2 kW全超导磁悬浮飞轮储能系统(图10),然后又研发出无水冷系统的储能样机,有望实现长期高效储能。

2.3 真空管道超导磁悬浮储能

尽管超导飞轮储能具有极高的能量储存密度,但是难以实现大规模能量储存。为此,结合超导飞

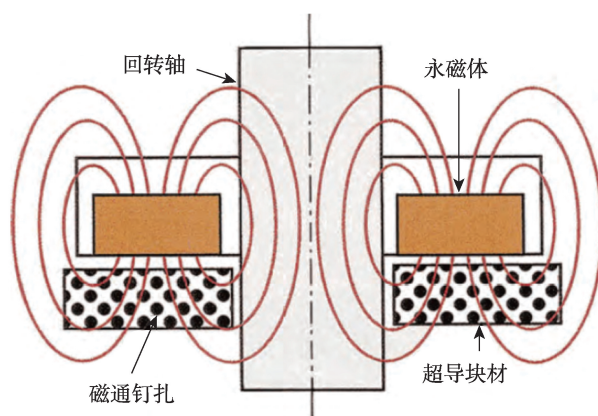


图9 超导磁悬浮轴承原理图

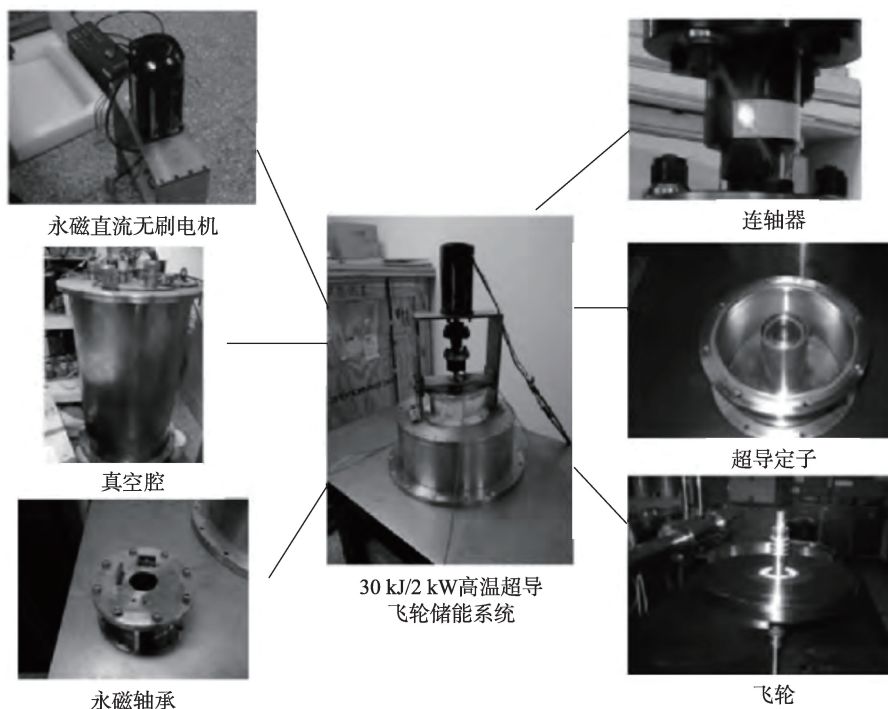


图10 30 kJ/2 kW高温超导飞轮储能系统

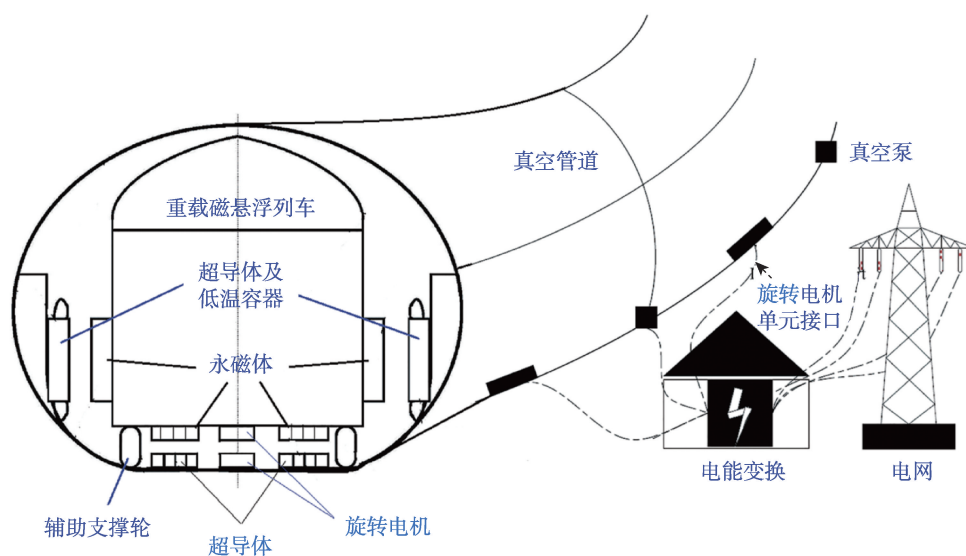


图 11 真空管道超导磁悬浮储能系统结构图

轮储能的技术优点,肖立业团队提出了一种新型的大容量储能技术-真空管道超导磁悬浮储能,图 11 所示为原理示意图。其中,永磁体安装在车体底部和侧面,超导体安装在真空环形轨道两侧及真空环形轨道底部。列车利用永磁悬浮,两侧的超导体可以为列车的稳定悬浮提供可靠支撑。列车采用重载的方式且首尾连接形成闭环,并且采用旋转电机驱动。在储能阶段,驱动电机通电并为重载磁悬浮环形列车加速,使其在真空环形轨道内快速旋转。在需要释放电能时,高速旋转的重载磁悬浮环形列车将其动能转化为电能并回馈电网。由于重载磁悬浮列车的质量要远大于飞轮转子,因此该储能方式可以进行大规模的电能存储。与抽水蓄能、压缩空气储能等大规模储能技术相比,真空管道超导磁悬浮储能系统具有响应快、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,具有重要的潜在应用价值。

3. 结语

超导体技术作为一项具有变革性的前沿科技,近年来在电力传输和储能领域的研究和应用取得了显著成果。它的技术先进性得到了广泛认可。其中:

在电力传输领域,在国外,由美国超导公司(AMSC)和长岛电力公司合作,安装了一条 138 kV、600 米长的高温超导电缆,额定电流 2.4 kA。该项目旨在提高电网的输电能力和可靠性。SuperPower 公司在纽约州阿尔巴尼市部署了一条 350 米长、34.5 kV 的高温超导电缆,额定电流 0.8 kA。该项目验证了超导电缆在城市电网中的可行性。日本东京电力公司与住友电工合作,在横滨市安装了一条 500 米长、66 kV 的高温超导电缆,额定电流 1 kA。该项目于 2013 年开始运行,是当时世界上最长的高温超导电缆。韩国电力公司(KEPCO)在首尔市部署了一条 100 米长、22.9 kV 的高温超导电缆,额定电流 1.2 kA。该项目旨在提升城市中心区域的供电能力。在国内,由上海电力公司牵头,安装了一条 35 kV、30 米长的高温超导电缆,额定电流 2 kA。该项目于 2019 年完成,标志着中国在超导电力传输领域的重要进展。北京市电力公司在城区部署了一条 10.5 kV 的高温超导电缆,额定电流 1.5 kA。该项目于 2020 年启动,旨在验证超导电缆在复杂城市电网中的应用潜力。

在储能领域,在国外,美国在阿拉斯加州部署了一套 1.8 GJ 的超导磁储能系统,用于提高电网的稳定性和电能质量。该项目展示了超导磁储能能

大规模储能领域的应用潜力。德国在柏林市安装了一套 100 kJ 的超导磁储能系统,主要用于电网的瞬态稳定控制。该项目验证了超导储能在快速响应和高效能量存储方面的优势。在国内,中国科学院电工研究所研制了一套 1 MJ 的高温超导储能系统,运行电流 560 A,运行温度 4.2 K。该系统安装在门头沟变电站,用于改善电能质量。在湖南娄底市的高溪变电站,安装了一台 10.5 kV/1.5 kA 的高温超导限流器,并结合储能系统进行试验。该项目旨在提高电网的安全性和稳定性。

关于超导技术的展望方面,在未来 5~10 年,超导电缆有望率先在大城市核心区域试验性部署,特别是在电网拥堵的地区。小型超导储能设备将在新能源场景中试点使用,解决短时功率波动问题;在未来 10~20 年,超导电缆可能在特定地区的中压输电系统中逐步推广。超导储能系统的功率和能量密度提升,广泛应用于可再生能源并网和电网调节。制备成本和运行成本显著下降,超导技术逐步具备与传统技术竞争的能力。

超导技术作为电力与储能领域的重要技术革新方向,尽管目前仍面临材料和经济性上的制约,但随着研究的深入,其应用前景广阔。从电力传输到储能,从城市电网到可再生能源系统,超导技术将成为推动能源革命的核心驱动力。在未来 20 年内,随着技术指标的持续突破和应用规模的扩大,超导技术必将在新能源与新型电力系统的发展中发挥不可替代的作用。

参考文献

- [1] Zhang, Y., et al. (2023). "Development and Application of High-Temperature Superconducting Power Cables in Power Grids." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33(5), 1-5.
- [2] Wang, L., et al. (2022). "Superconducting Magnetic Energy Storage Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111-123.
- [3] Li, J., et al. (2023). "High-Temperature Superconducting Cables: Development and Application." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 33(3), 1-5.
- [4] 张京业,唐文冰,肖立业,超导技术在未来电网中的应用,物理, 2021 年 02 期。
- [5] 邱清泉,张志丰,张国民,肖立业,超导直流输电技术发展现状与趋势,南方电网技术,2015 年 9 卷 12 期。
- [6] 罗朝志,邱清泉,张宏杰,韦德福,郭铁,张京业,靖立伟,张国民,超导限流变压器的研究进展,低温与超导,2020 年 48 卷 10 期。
- [7] Semenov, V. K., & Oh, S. G. (2019). Superconducting transmission systems: Review, classification, and technology readiness assessment. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(8), 1-9.
- [8] Hassenzahl, W. V., et al. (2010). Superconducting magnetic energy storage systems for power system applications: A review. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 470(20), 1589-1595.
- [9] Masson, P. J., et al. (2004). Electric power applications of superconductivity. *Proceedings of the IEEE*, 92(10), 1639-1654.
- [10] Inoue, Y., et al. (2019). Novel power system with superconducting cable with energy storage function. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(5), 1-5.
- [11] Rogers, C., & Shrestha, G. (2011). Superconducting magnetic energy storage (SMES) system for power grid applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3), 1365-1368.
- [12] Ihara, E., et al. (2015). Development and application of high-temperature superconducting power cables in power grids. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 1-5.
- [13] Kim, S. J., & Huh, J. H. (2000). Superconducting magnetic energy storage: An overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(4), 388-394.
- [14] Yamamoto, H., & Kawamura, Y. (2013). High-temperature superconducting cables for power grid applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), 1-5.
- [15] Goyal, A., et al. (2012). Superconducting magnetic energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4507-4519.
- [16] 郭文勇,张京业,张志丰,邱清泉,张国民,林良真,肖立业,超导储能系统的研究现状及应用前景,科技导报,2016 年 34 卷 23 期。
- [17] 曹雨军,夏芳敏,朱红亮,姚震,门建民,超导储能在新能源电力系统中的应用与展望,电工电气,2021 年 10 期。
- [18] 肖立业,刘向宏,王秋良,马衍伟,古宏伟,超导材料及其应用现状与发展前景,公信论坛,2018 年 8 月刊。
- [19] Bonnafoux, J., et al. (2011). High-temperature superconducting power cables: A review. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3), 1035-1039.
- [20] Lee, J. H., et al. (2012). High-temperature superconducting cables for urban power grids. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 22(3), 1-5.