

高温超导电缆在特高压直流输电中的损耗抑制研究

苏德毕力格

宏腾能源（锡林郭勒）有限公司 内蒙古锡盟

【摘要】本文围绕高温超导电缆在特高压直流输电中的应用展开研究，探讨了直流输电损耗的主要来源与输电过程中的能量消耗机理，分析了高温超导电缆在降低线路电阻损耗、减少能量衰减以及提高输电效率方面的作用。通过对比常规电缆与高温超导电缆的技术特性，论证其在远距离、大功率输电场景下的优势，并提出针对性损耗抑制措施，包括优化电缆材料性能、改进冷却系统以及提升系统整体运行稳定性。高温超导电缆能够显著降低能量损耗，为特高压直流输电的高效、安全和绿色发展提供技术支撑。

【关键词】高温超导电缆；特高压直流输电；损耗抑制；输电效率

【收稿日期】2025 年 9 月 20 日

【出刊日期】2025 年 11 月 10 日

【DOI】10.12208/j.jjea.20250202

Research on loss suppression of high-temperature superconducting cables in UHVDC transmission

Bilige Sude

Hongteng energy (Xilingol) Co., Ltd. Ximeng, Inner Mongolia

【Abstract】 This paper focuses on the application of high-temperature superconducting (HTS) cables in ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission, investigating the main sources of DC transmission losses and the mechanism of energy consumption during the transmission process. It analyzes the role of HTS cables in reducing line resistance losses, minimizing energy attenuation, and improving transmission efficiency. By comparing the technical characteristics of conventional cables and HTS cables, the paper demonstrates the advantages of HTS cables in long-distance and high-power transmission scenarios, and proposes targeted loss suppression measures, including optimizing the performance of cable materials, improving cooling systems, and enhancing the overall operational stability of the system. HTS cables can significantly reduce energy losses, providing technical support for the efficient, safe, and green development of UHVDC transmission.

【Keywords】 High-temperature superconducting cable; Ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission; Loss suppression; Transmission efficiency

引言

能源传输效率一直是电力系统发展中的关键问题。特高压直流输电作为解决远距离、大规模电能输送的有效方式，其损耗控制直接关系到电力系统的经济性和可靠性。高温超导电缆凭借近乎零电阻和高电流密度的特性，逐渐成为电力输送技术研究的重要方向。如何在特高压直流输电中有效利用高温超导电缆，抑制线路损耗，已经成为电力工程领域的热点问题。本文将从损耗机理分析入手，探讨高温超导电缆在降低能量损耗中的技术优势，并提出优化措施，为未来输电系统的高效运行提供理论与实践参考。

1 高温超导电缆在特高压直流输电中的应用背景与研究意义

高温超导电缆的研究与应用背景源于电力工业对高效率、低损耗输电需求的不断提升。特高压直流输电技术作为远距离、大容量输电的重要手段，在保障能源跨区域调配和电网稳定运行方面发挥着关键作用^[1]。常规导体在长距离输电过程中存在显著的电阻损耗和能量浪费，不仅降低了传输效率，也增加了线路建设和维护成本。高温超导电缆的出现为解决这一问题提供了全新思路，其低电阻和高电流密度特性能够在理论上实现接近零损耗输电，为特高压直流系统的运行效率带来质的飞跃。这种技术路径不仅满足了能源传输规模不断扩大的客观需求，也契合了能源绿色转型和双碳目标的战略方向。

从能源战略层面看，高温超导电缆的应用具有重

要意义。中国在大规模可再生能源开发与利用过程中,需要依赖特高压直流输电来实现西部能源基地与东部负荷中心之间的跨区域电能传输。如果能够在特高压直流线路中引入高温超导电缆,将有效降低长距离输电中的损耗水平,提升单位电量的传输效率,为风电、光伏和水电等清洁能源的消纳提供有力保障。这不仅有助于缓解电网运行的能量损耗压力,还能减少因损耗带来的二氧化碳排放,为实现能源清洁化提供技术支撑。超导输电的技术突破还将推动电力装备制造业的发展,促进超导材料、低温制冷及系统集成等相关产业的协同创新,具有显著的产业链带动效应。

在工程实践层面,高温超导电缆在特高压直流输电系统中的应用代表了未来电力工程的重要发展方向。通过引入超导技术,可以减少导体横截面积,降低走廊占地,提升输电线路的经济性和空间利用率。超导电缆在运行过程中不会出现传统导体因温升带来的电阻增大问题,系统运行的稳定性和安全性能得到更好保障。随着相关研究的不断深入,其在复杂地形、城市电网和能源基地外送工程中具有广泛应用前景。高温超导电缆在特高压直流输电中的应用背景与研究意义不仅体现在降低损耗的直接效果,还在于推动整个电力系统向高效、绿色和智能化的方向迈进。

2 特高压直流输电损耗机理及现有问题分析

特高压直流输电过程中损耗机理的形成涉及多方面的电气物理现象,其核心在于电阻性损耗、介质损耗以及直流偏磁效应等因素。传统导体在超长距离输电中不可避免地产生欧姆损耗,随着线路长度和传输电流的增加,损耗水平呈现出非线性累积效应。电阻带来的能量消耗在特高压直流系统中尤为突出,其数值往往占据总损耗的主要比例,直接削弱了输电效率。绝缘介质在长期运行过程中存在极化损耗和击穿风险,尤其在潮湿、盐雾或复杂气候条件下,更容易出现介质老化与损耗增大的问题。高压直流电流的单向性还会造成电力设备铁芯磁化偏置,引发额外的能量消耗与设备过热问题,对系统运行的稳定性构成威胁。

在特高压直流输电工程中,现有损耗问题还表现为技术与管理层面的制约。常规线路为降低电阻损耗,通常需要采用大截面导体和复合型材料,这导致建设投资和运行维护成本显著上升。尽管先进的复合导线与特种铝合金导体在一定程度上改善了输电损耗,但与高温超导电缆的理论性能相比,仍存在明显差距^[2]。输电线路长度过长也放大了沿线电能衰减效应,使得电力在到达负荷中心时的可用功率大幅下降。传统导

体受限于热效应,不可避免地出现温升问题,进一步增加了散热负担和能量损耗,制约了输电效率的提升。

针对现有问题的分析表明,特高压直流输电损耗问题不仅是单一电气因素的结果,而是由导体电阻、介质特性、系统运行环境及设备性能等多重因素共同作用形成。现有的技术路径尚不足以全面解决损耗抑制需求,尤其在面对大规模可再生能源并网和跨区域输电的背景下,现有线路的能效水平与未来发展目标存在较大差距。需要借助高温超导电缆等前沿技术,从材料、系统和运行机制等多维度入手,构建更加完善的损耗控制体系,以满足电力系统绿色、高效、安全发展的需要。

3 高温超导电缆损耗抑制的关键技术路径

高温超导电缆在损耗抑制方面的关键技术路径,首先体现在其超导材料的零电阻特性。高温超导材料在液氮温区即可实现超导状态,使输电过程中电阻损耗几乎可以忽略,从而显著提升传输效率。通过对比传统导体与高温超导电缆的性能,可以发现后者在相同截面下可承载更大电流密度,线路长度对损耗的影响被显著削弱。为保证实际运行中这一特性得以稳定发挥,需要在材料制备与工艺控制上实现持续突破,特别是提高临界电流密度、降低交流损耗以及增强抗机械应力能力,这些因素直接决定了超导电缆在特高压直流输电中的可靠性与经济性。

在冷却技术方面,高温超导电缆需要保持在低温环境下运行,以确保其处于超导态。液氮作为冷却介质因其成本低、安全性高而成为主流选择。高效稳定的低温制冷系统是保证超导电缆运行性能的核心环节,通过优化绝热层设计、提升冷却回路效率以及减少冷损耗,可以显著降低运行能耗。针对大规模输电工程,还需解决冷却系统的冗余设计与安全保障问题,确保在极端运行工况下电缆仍能保持稳定超导状态。冷却技术的成熟不仅关系到电缆性能的发挥,还决定了其在特高压直流输电中的工程应用可行性。

在系统集成层面,高温超导电缆的应用需要与现有特高压直流输电系统形成良好兼容。包括电缆结构设计、绝缘配合、故障保护及运行控制在内的多方面技术均需优化。通过建立高温超导电缆与直流换流站、直流断路器及直流控制系统的协调运行机制,可以实现全链条的损耗抑制与效率提升^[3-7]。在工程设计中若能合理布置超导电缆线路,并结合先进的在线监测技术,能够有效降低运行风险,延长设备寿命。未来的技术路径还包括超导电缆与新型电力电子装备的耦合应用,

这将进一步提升直流输电系统的运行效能，为电力系统的智能化和高效化奠定基础。

4 基于高温超导电缆的输电系统优化实践与效果评估

在实践应用方面，高温超导电缆已经在部分城市电网与示范工程中得到了初步验证，其在损耗抑制方面的优势逐步显现。特高压直流输电系统若能引入高温超导电缆，将在整体能效水平上实现显著提升。通过对比实验数据发现，高温超导电缆在长距离传输过程中的能量损耗远低于传统导体，特别是在跨区域大功率输电场景下，其传输效率优势更加突出。工程应用还显示，超导电缆能够有效降低线路温升，避免因温度过高导致的能量浪费与设备失效问题，为特高压直流系统的稳定运行提供有力保障。

在系统优化效果方面，基于高温超导电缆的特高压直流输电能够在降低损耗的同时提升电网运行的灵活性和可靠性。由于电缆具有高电流承载能力，可在更小体积下完成大功率输送，从而减少线路走廊需求，缓解输电工程对土地资源的占用。在城市电网改造与复杂地形输电工程中，超导电缆的应用显著提高了空间利用率，提升了系统布线的灵活性。系统在线监测与智能控制技术的结合，使得超导电缆能够实现对运行状态的实时把控，提前预防潜在故障，保证输电系统在高负荷条件下依然保持高效运行。

在效果评估方面，高温超导电缆在特高压直流输电系统中的应用为电力行业带来深远影响。通过经济性分析，可以看出虽然前期建设成本较高，但在运行过程中因损耗降低而节约的电能及维护成本，能够在较短周期内实现投资回收^[8]。从环境效益角度看，损耗抑制减少了电力浪费，相应降低了碳排放和资源消耗，符合能源绿色发展的战略目标。整体来看，高温超导电缆的应用不仅在技术层面有效解决了损耗问题，还在经济与环境层面展现了综合价值，为未来大规模推广应用提供了坚实的实践依据。

5 结语

高温超导电缆在特高压直流输电中的应用研究表明，其在降低电阻损耗、提升输电效率和保障系统稳定

运行方面具有显著优势。通过对损耗机理的分析与关键技术路径的探索，可以看出该技术能够有效缓解传统导体存在的能量消耗问题，并在跨区域、大容量输电工程中展现出独特价值。尽管仍面临材料性能、冷却系统及经济性等挑战，但其发展潜力巨大。未来，随着技术成熟与工程实践的深入，高温超导电缆必将成为特高压直流输电绿色高效发展的重要支撑。

参考文献

- [1] 马晓芳,周一青,陈瑶.宁夏—湖南±800 千伏特高压直流输电工程投产送电[N].宁夏日报,2025-08-21(001).
- [2] 赵倩,张琪,安祥宇,等. 高压直流输电对辽宁西部地电场观测的影响分析[J].防灾减灾学报,2025,41(03):66-73+94.
- [3] 刘华祥,张朋松,方进. 基于高温超导电缆终端的应力锥设计与分析[J].低温与超导,2025,53(07):12-16+50.
- [4] 周小盟,赖小强,朱运鹏,等. 第二代高温超导带材及堆叠电缆交流损耗的仿真研究[J/OL].核聚变与等离子体物理,1-8[2025-08-25].
- [5] 陈晓清.高温超导电缆地下直埋敷设施工工艺及关键参数控制[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一).杭州中大电器承装有限公司,;2025:135-137.
- [6] 刘亦婷,顾洁,吕忠麟,等. 考虑高温超导电缆接入的配电网变电站及网架协同规划[J].供用电,2025,42(02):12-21.
- [7] 韩云武,黄崇祺,宗曦华. 高温超导电缆应用场景与产业发展[J].中国工程科学,2024,26(04):198-209.
- [8] 李丹.高温超导电缆接入配电网的策略评估与规划研究[D].华南理工大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS