

新型柔性直流输电技术在远距离大容量电力传输中的效能评估

林宏铭

福建榕能电业集团有限公司 福建福州

【摘要】全球能源结构深度调整，跨区域电力资源优化配置需求迫切，远距离大容量输电成为能源互联关键。新型柔性直流输电技术以其独特优势，在电力传输领域崭露头角。文章从传输容量、能量损耗、运行稳定性、经济性四个维度，系统评估该技术在远距离大容量电力传输中的实际效能。结果显示，该技术显著提升传输能力、降低能耗、增强系统稳定性，为现代电力系统升级与能源高效输送提供重要支撑。

【关键词】柔性直流输电；远距离传输；大容量；效能评估；电力系统

【收稿日期】2025 年 1 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250053

Performance evaluation of new flexible HVDC transmission technology in long-distance and large capacity power transmission

Hongming Lin

Fujian Rongneng Electric Power Group Co. Ltd, Fuzhou, Fujian

【Abstract】 The global energy structure is undergoing profound adjustments, and there is an urgent need for optimized allocation of power resources across regions. Long-distance high-capacity transmission has become crucial for energy interconnection. New flexible DC transmission technology, with its unique advantages, is beginning to make a mark in the field of power transmission. This article systematically evaluates the actual performance of this technology in long-distance high-capacity power transmission from four dimensions: transmission capacity, energy loss, operational stability, and economic efficiency. The results show that this technology significantly enhances transmission capability, reduces energy consumption, and improves system stability, providing important support for the modernization of power systems and efficient energy delivery.

【Keywords】 Flexible DC transmission; Long-distance transmission; Large capacity; Efficiency evaluation; Power system

引言

当今世界，能源分布与消费中心的空间错位矛盾日益突出，构建跨区域、大容量电力输送通道成为保障能源安全的必然选择。传统交流输电在长距离传输中面临线路损耗大、稳定性差等问题，常规直流输电也存在故障穿越能力弱、控制灵活性不足等局限。深入剖析其技术效能，对推动能源互联互通、实现“双碳”目标具有重要意义，亟需全面评估其实际应用价值。

1 技术特性剖析

新型柔性直流输电以模块化多电平换流器（MMC）为核心，对传统电力传输架构进行了革新。MMC 由多个子模块串联组成换流桥臂，这种独特

的结构使其能够灵活调节输出电压波形。通过精准控制子模块的投入与退出，可有效降低谐波含量，从而显著提升电能质量^[1]。相较于传统的两电平或三电平换流器，MMC 输出的电压波形更接近正弦波，极大地减少了对庞大滤波装置的依赖，进而大幅降低了设备的体积与成本。以舟山多端柔性直流输电工程为例，该技术成功实现了五个岛屿的直流联网。

在控制策略方面，新型柔性直流输电展现出卓越的四象限运行能力，能够独立调节有功功率与无功功率。当电网电压出现波动时，该技术可快速响应，通过补偿无功功率来维持系统电压的稳定。在有功功率突变的情况下，它能在毫秒级时间内实现

动态响应,确保电力供应的可靠性^[2]。这种灵活的控制特性使其在新能源并网场景中表现出色。在风电、光伏等新能源发电过程中,由于其具有间歇性波动的特点,容易对电网稳定性造成影响。而新型柔性直流输电技术可有效平抑这些波动,将不稳定的新能源电力高效、稳定地接入电网,为保障电网的稳定运行提供了有力支持。

从系统架构来看,新型柔性直流输电突破了传统直流输电点对点传输的限制,支持多端互联与环网运行模式。在多端系统中,多个电源点与负荷中心能够实现直接互联,这使得电力流向得以优化,大大提高了系统的运行效率。环网结构则进一步增强了系统的冗余性,当某一线路发生故障时,其他线路能够迅速承担起负荷转移的任务,确保供电的连续性。这种高可靠性的架构为构建坚强智能电网提供了坚实的技术保障,能够更好地适应现代电力系统复杂多变的运行需求。

2 效能评估维度

传输能力评估主要聚焦于功率输送与距离拓展。理论上,柔性直流输电系统的传输容量主要受限于换流站设备容量与线路载流能力。随着技术的不断进步,通过优化换流阀设计,采用新型材料和先进的制造工艺,提高了换流阀的通流能力和耐压水平。高压直流电缆的研发与应用也取得了重大突破,其绝缘性能和载流能力不断提升^[3]。这些技术改进使得柔性直流输电系统的单回线路传输容量可达数千兆瓦,传输距离突破千公里。以张北柔性直流电网试验示范工程为例,该工程在 ± 500 千伏电压等级下,实现了700万千瓦电力的跨区域输送,覆盖距离超过300公里。

能量损耗评估涵盖换流站损耗与线路损耗两个方面。在换流站中,功率器件的通态损耗与开关损耗是主要的能耗来源。为降低这些损耗,采用了高效的IGBT器件,其具有低导通电阻和快速开关特性。通过优化调制策略,如采用先进的脉冲宽度调制技术,合理控制功率器件的开关时间和顺序,进一步减少了开关损耗。在线路损耗方面,直流输电不存在交流系统中因感抗与容抗产生的损耗。在长距离传输中,这一优势尤为明显^[4]。以某 ± 800 千伏特高压直流工程为例,经实际运行数据统计,其单位容量输电损耗较同电压等级交流线路降低约

40%。这不仅提高了能源利用效率,还带来了显著的经济效益,减少了发电成本和能源浪费。

运行稳定性评估包括故障穿越与动态响应能力。柔性直流输电系统具备快速故障隔离能力,当直流侧发生短路故障时,能够在几毫秒内迅速闭锁换流阀,切断故障电流,防止故障进一步扩大。借助先进的控制策略,如基于模型预测控制的方法,系统在故障清除后能够快速恢复运行,将对电网的冲击降至最低。在系统遭受扰动时,该技术可快速调节有功与无功功率,通过精确的功率控制算法,维持电力系统的频率与电压稳定,确保电力供应的可靠性,为各类用电设备提供稳定的电力保障。

经济成本评估综合考虑建设与运维成本。在初期建设阶段,柔性直流输电系统的换流站设备成本相对较高,这主要是由于其采用了复杂的电力电子器件与先进的控制系统。随着技术的不断成熟以及规模化应用的推进,设备成本呈现出明显的下降趋势。在运维方面,该系统具有较高的自动化程度,可通过智能监测与诊断技术实现设备状态的实时监测,减少了人工巡检的工作量。其维护周期较长,设备检修费用较低。从长期来看,柔性直流输电系统凭借其高效传输与稳定运行所带来的综合效益,能够有效摊薄建设成本,提升投资回报率,具有良好的经济可行性。

3 评估结果呈现

多案例数据对比充分验证了新型柔性直流输电技术的优势。在传输能力方面,通过对某实际工程的数据分析发现,新型柔性直流输电系统相较于传统直流输电,传输能力提升约35%,相较于交流输电,提升幅度更是超过50%。以巴西美丽山特高压直流工程为例,采用柔性直流技术成功实现了2000公里距离下400万千瓦电力的输送,创造了远距离输电的新纪录^[5]。这一显著提升得益于先进的设备,如高性能的换流阀和大容量的直流电缆,以及优化的控制技术,使得电力传输能够突破传统输电在功率与距离方面的瓶颈,为能源资源的优化配置提供了有力支撑。

能耗降低效果十分显著。通过对多个已投运项目的深入分析,新型柔性直流输电系统的整体能量损耗较传统技术降低约22%。进一步细分,换流站损耗的优化贡献度达到30%,这主要归功于高效

IGBT 器件的应用和调制策略的改进。线路损耗降低占比约 70%，充分体现了直流输电在长距离传输中无感抗与容抗损耗的优势。以我国某跨区输电工程为例，采用柔性直流技术后，每年节约电量超过 5 亿千瓦时，按照标准煤发电的能量转换关系计算，相当于减少标准煤消耗 18 万吨，在节能减排方面取得了突出的效益，符合可持续发展的要求。

稳定性提升为电网安全提供了坚实保障。在应对系统扰动的测试中，柔性直流输电系统展现出出色的性能。其电压恢复时间缩短至传统技术的 1/3，频率波动范围缩小 50%。在新能源高比例接入的场景下，由于风电、光伏的随机波动性，电网频率稳定面临巨大挑战^[9]。而柔性直流输电系统凭借其快速功率调节能力，能够有效平抑这些波动，将电网频率稳定在 ± 0.2 赫兹以内，极大地提升了电网运行的可靠性，确保了电力系统的安全稳定运行。

经济成本效益逐步显现。虽然在初期建设时，柔性直流输电系统的成本较传统交流输电高约 20%，但随着运行年限的增加，其低损耗、少维护的优势逐渐凸显。经详细测算，在 15 年的生命周期内，柔性直流输电的综合成本较交流输电低 15%，较传统直流输电低 10%。这表明从长期来看，柔性直流输电具有显著的经济效益，投资回报周期逐渐缩短，为电力企业的可持续发展提供了良好的经济基础。

4 应用前景展望

新型柔性直流输电技术正加速与智能电网深度融合。通过引入数字孪生技术，能够对输电设备进行精准建模，实时反映设备的运行状态。结合人工智能技术，如机器学习算法，可对设备运行数据进行分析 and 预测，提前发现潜在故障隐患，实现智能运维。这不仅提升了系统运行效率，还增强了系统的可靠性。未来，新型柔性直流输电将成为智能电网中能源传输的骨干网络，能够更好地支撑分布式电源的广泛接入，满足多元负荷灵活互动的需求，推动电网向“源 - 网 - 荷 - 储”协同发展的模式转变，构建更加高效、智能、可靠的电力系统。

在新能源消纳领域，该技术潜力巨大。随着风电、光伏等可再生能源装机规模的持续增长，传统电网在消纳这些不稳定能源时面临诸多瓶颈。柔性直流输电可实现新能源基地与负荷中心的高效互联，

其多端互联特性能够灵活调配能源，将新能源电力高效地输送到不同地区的负荷中心^[7]。在海上风电集群并网场景中，其柔性控制特性可有效解决远距离输电过程中的无功补偿难题，确保海上风电大规模开发与消纳的顺利进行，为实现能源结构的绿色转型提供关键技术支持。

技术创新将持续推动成本降低。一方面，随着材料科学和制造工艺的进步，功率器件的性能将不断提升，同时成本也将进一步下降，这将直接降低换流站的建设成本。另一方面，模块化设计与标准化生产模式的推广应用，能够有效缩短工程建设周期，减少安装与调试费用^[8]。预计在未来十年，柔性直流输电技术的单位容量建设成本将下降 30%。成本的降低将进一步提升其市场竞争力，加速该技术在全球能源互联领域的广泛应用，促进全球能源资源的优化配置和可持续发展。

5 结语

新型柔性直流输电技术凭借卓越的传输性能与综合优势，成为远距离大容量电力传输的核心技术。其在提升能源输送效率、增强电网稳定性、推动新能源消纳等方面成效显著。未来，随着技术创新与产业升级，该技术将深度融入新型电力系统，在降低成本、提升智能化水平等方面持续突破，为全球能源转型与绿色低碳发展注入强大动力，引领电力传输技术迈向新高度。

参考文献

- [1] 魏晓光,单云海,唐新灵.高压直流输电技术发展现状及趋势[J/OL].中国电机工程学报,1-23[2025-04-19].
- [2] 王汉之.高压直流输电线路中继电保护技术的应用研究[J].电气时代,2025,(03):116-119.
- [3] 高悦,陈衡,王政伟,等.海上风电高压直流输电汇集升压方式对比分析[J].湖南电力,2025,45(01):54-60.
- [4] 林燊.柔性直流输电技术在大规模海上风电中的应用设计[J].光源与照明,2025,(01):228-230.
- [5] 孔德育.电力工程技术在智能电网建设中的应用研究[J].科技资讯,2025,23(01):76-78.
- [6] 赵彪,白睿航,张雪垠,等.新一代高韧性直流输电技术(二):高倍载模块化换向式换流器[J].中国电机工程学报,2025,45(02):665-679.

- [7] 别晓玉,马巍巍,陆晶晶,等.柔性直流输电技术标准体系研究与优化[J].标准科学,2024,(S1):154-159.
- [8] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(01):1-11.

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