

面向新型电力系统的柔性直流断路器关键技术及经济性优化

杨宏伟

沙电投资（上海）有限公司 上海

【摘要】新型电力系统的发展对直流断路器提出了更高的要求，柔性直流断路器因其快速切断故障电流的能力和灵活性而受到关注。本文旨在探讨面向新型电力系统的柔性直流断路器的关键技术及其经济性优化方法，通过分析现有技术的不足，提出了一种改进的设计方案，以提高其性能并降低成本。首先概述了柔性直流断路器的工作原理及其在新型电力系统中的重要性，然后深入讨论了关键技术挑战与解决方案，并对其经济性进行了详细分析。所提出的优化策略不仅能显著提升柔性直流断路器的性能，还能有效降低整体成本，为新型电力系统的稳定运行提供有力保障。

【关键词】柔性直流断路器；关键技术；经济性优化；新型电力系统

【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.20250064

Key technologies and economic optimization of flexible DC circuit breakers for new power systems

Hongwei Yang

ACWA Power, Shanghai

【Abstract】The development of new power systems has put forward higher requirements for DC circuit breakers. Flexible DC circuit breakers have attracted attention due to their ability to quickly cut off fault currents and their flexibility. This paper aims to explore the key technologies of flexible DC circuit breakers for new power systems and their economic optimization methods. By analyzing the deficiencies of existing technologies, an improved design scheme is proposed to enhance their performance and reduce costs. Firstly, the working principle of flexible DC circuit breakers and their importance in new power systems are outlined. Then, the key technical challenges and solutions are discussed in depth, and a detailed economic analysis is carried out. The proposed optimization strategy can not only significantly improve the performance of flexible DC circuit breakers but also effectively reduce the overall cost, providing a strong guarantee for the stable operation of new power systems.

【Keywords】Flexible DC circuit breaker; Key technologies; Economic optimization; New power system

引言

新型电力系统的快速发展推动了对更加高效、可靠的电力传输设备的需求，其中柔性直流断路器作为关键组件之一，扮演着至关重要的角色。它不仅能够迅速隔离电网中的故障部分，防止故障扩大，而且对于提高整个电力系统的可靠性和稳定性具有不可替代的作用。当前市场上的直流断路器在面对复杂多变的电力需求时，仍存在响应速度慢、成本高等问题。如何设计出既满足高性能又具备经济性的柔性直流断路器成为了学术界和工业界的共同挑战。本文将针对这些问题展开深入探讨，旨在寻找有效的解决方案，以促进新型电力系统的持续健康

发展。

1 柔性直流断路器的技术现状与挑战

在新型电力系统的发展背景下，柔性直流断路器作为保障电网安全稳定运行的关键设备，其重要性日益凸显。随着可再生能源的大规模接入和分布式发电的普及，电力系统的结构和运行模式发生了深刻变革，对电力传输设备提出了更高要求。传统的直流断路器由于其固有的技术限制，在快速切断故障电流、适应复杂多变的电力需求方面面临诸多挑战。传统断路器往往需要较长的动作时间来隔离故障，这在高动态变化的现代电力系统中可能导致更广泛的损害。

针对上述问题,科研人员与工程师们不断探索改进方案,以期提升柔性直流断路器的整体性能。通过引入先进的半导体材料和技术,如碳化硅(SiC)功率器件的应用,可以显著提高断路器的开关速度和效率。这些高性能材料不仅能够承受更高的电压和电流密度,还具有更低的能量损耗,有助于实现更加紧凑且高效的断路器设计^[1]。采用模块化设计理念,使断路器具备更强的灵活性和适应性,可以根据实际应用场景的需求进行定制化配置。这种模块化设计不仅可以简化维护流程,还能有效降低制造成本,推动柔性直流断路器向更广泛的市场渗透。

尽管取得了一定的技术进步,柔性直流断路器在实际应用中仍面临一系列挑战。如何确保设备在极端环境条件下的可靠运行,是设计过程中必须考虑的问题之一。不同国家和地区对于电力设备的安全标准和规范存在差异,这也为柔性直流断路器的设计和推广带来了额外的复杂性。为了克服这些问题,需要进一步加强跨学科研究合作,结合电气工程、材料科学等多领域知识,共同推动技术创新。积极开展国际合作与交流,借鉴全球范围内的先进经验和最佳实践案例,对于促进柔性直流断路器技术的发展同样至关重要。

2 关键技术的创新与应用

在柔性直流断路器的发展过程中,技术创新是提升其性能和可靠性的关键所在。采用新型半导体材料如碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)制造的功率器件,因其优异的电气特性和热稳定性,成为实现快速切断故障电流的重要基础。这些先进材料能够显著降低开关损耗,并允许设备在更高的频率下运行,从而提高整个系统的效率。通过优化电路拓扑结构,例如采用混合式直流断路器设计,可以结合机械开关和固态开关的优点,既实现了快速保护功能,又保持了较低的成本和较高的可靠性。这种创新不仅解决了传统断路器响应速度慢的问题,也为构建更加灵活可靠的电力传输网络提供了可能。

为了进一步增强柔性直流断路器的适应性,研究人员致力于开发智能化控制系统。该系统能够实时监控电网状态,预测潜在故障并自动调整操作策略,以最小化停电范围和时间。智能控制技术的应用,使得直流断路器能够在复杂多变的电网环境中保持高效稳定的工作状态^[2]。借助于先进的传感器

技术和大数据分析手段,可以对断路器的运行状况进行精确评估,及时发现早期故障迹象并采取预防措施。这不仅延长了设备的使用寿命,也大大提升了电力系统的整体安全性。随着物联网技术的发展,未来有望实现远程监控与维护,进一步提高运维效率和服务质量。

在实际应用方面,柔性直流断路器的创新解决方案正在逐步改变传统电力系统的架构。特别是在高压直流输电(HVDC)项目中,柔性直流断路器展现了其不可替代的价值。它不仅能够有效隔离故障区域,防止事故蔓延,还能支持电网之间的灵活互联,促进可再生能源的大规模接入和分布式发电的有效整合。通过与其他智能电网组件的协同工作,如储能系统和需求侧管理平台,柔性直流断路器有助于优化电力资源配置,提高能源利用率。这些进展表明,柔性直流断路器不仅是现代电力系统不可或缺的一部分,更是推动能源转型和技术进步的关键力量。

3 经济性优化策略的探讨与实践

在追求柔性直流断路器高性能的经济性优化成为确保其广泛应用的重要因素。成本控制不仅涉及到制造过程中的材料选择和生产工艺改进,还需要考虑整个生命周期内的维护和运行费用。通过采用模块化设计,可以大幅减少定制化组件的需求,从而降低生产复杂度和成本。利用自动化生产线和智能制造技术,提高生产效率和产品质量,也是实现成本效益的关键路径之一。这种策略不仅有助于降低成本,还能缩短产品上市时间,增强市场竞争力。针对不同应用场景进行精确的成本效益分析,有助于识别最具经济效益的设计方案。

除了制造成本外,运维成本也是影响柔性直流断路器经济性的重要方面。借助于先进的状态监测技术和预测性维护方法,可以在早期阶段发现潜在故障,避免因突发故障导致的高额维修费用和停电损失。这需要集成智能传感器、数据分析工具和远程监控系统,形成一套完整的设备健康管理解决方案。通过实时监控关键参数并应用机器学习算法预测设备健康状况,可以制定出更加科学合理的维护计划,从而延长设备使用寿命,降低全生命周期成本。与供应商建立长期合作关系,共同探索供应链优化途径,如联合采购和技术共享,也能有效降低成本。

从长远角度看,推动柔性直流断路器标准化是

实现经济性优化的重要策略之一。标准的统一不仅可以促进技术创新和质量提升,还能通过规模效应降低单位成本。参与国际标准制定过程,积极推广本国先进技术和实践经验,对于增强国际市场竞争力的重要意义^[3-5]。政府和行业协会的支持也不可或缺,通过政策引导和财政补贴等方式,鼓励企业加大研发投入,推动关键技术突破,进一步促进柔性直流断路器的普及与发展。这些措施将共同作用,为新型电力系统的可持续发展提供坚实保障。

4 基于案例分析的性能验证与评估

在验证柔性直流断路器性能的过程中,实际案例分析提供了宝贵的实证支持。在一个高压直流输电(HVDC)项目中,通过部署新型柔性直流断路器,显著提升了系统的故障隔离能力和恢复速度。该项目地处复杂地形,面临多变的气候条件和电网负荷波动挑战,对设备的稳定性和可靠性提出了极高要求^[6-8]。新型断路器的应用不仅成功应对了这些挑战,还展示了其快速响应特性,能够在毫秒级别内切断故障电流,有效防止了事故扩散。通过对断路器运行数据的深入分析,进一步验证了其在极端环境下的可靠性和耐用性,为类似场景下的应用提供了重要参考。

为了全面评估柔性直流断路器的性能,需采用一系列先进的测试方法和技术手段。在实验室条件下,模拟各种可能遇到的故障情形,如短路、过载等,以检验断路器的实际表现。借助于高精度测量仪器,可以精确记录断路器的动作时间、能量损耗等关键参数,确保其符合设计标准。结合仿真软件进行数字建模,预测不同工况下断路器的行为模式,有助于优化设计方案并提升整体性能。这种理论与实践相结合的方式,不仅能够准确评估现有技术方案的有效性,还能为后续改进提供科学依据。通过对比不同型号和品牌的断路器,识别出最优产品,指导实际工程中的选型决策。

基于长期运行数据的性能评估对于理解柔性直流断路器的实际效能至关重要。通过建立详尽的数据收集和分析机制,持续跟踪设备在真实操作环境中的表现,包括故障发生频率、维护需求以及使用寿命等指标。这些数据不仅能揭示设备的优点和不足,也为未来的技术改进指明方向。值得注意的是,与电网运营商和研究机构合作,共同开展性能监测和评估工作,可以充分利用各方资源,形成合力。这

不仅促进了技术创新和经验交流,也加速了柔性直流断路器技术的发展步伐,为构建更加智能、可靠的电力系统奠定了坚实基础。

5 结语

柔性直流断路器作为现代电力系统中不可或缺的关键组件,其技术创新和经济性优化对于推动能源转型具有重要意义。通过不断探索新型材料的应用、智能控制系统的开发以及模块化设计的实践,显著提升了设备性能与适应性。成本效益分析和运维策略改进为实现经济性优化提供了有效路径。基于实际案例的性能验证不仅证实了技术方案的可行性,也为未来研究指明了方向。随着相关技术的持续进步和广泛应用,柔性直流断路器将为构建更加灵活、高效和可靠的新型电力系统做出更大贡献。国际合作与跨学科研究将进一步加速这一进程,共同迎接能源领域的挑战与机遇。

参考文献

- [1] 徐子韬,王志昊,张宁,等.面向多时间尺度的新型电力系统电力电量平衡方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(02):15-25+36.
- [2] 孙海斌,傅国斌,宋锐,等.面向新型电力系统的静态电压稳定评估方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(02):9-14.
- [3] 付健祥,付蕾,孙文彬.面向新型电力系统的供用电技术现场工程师培养模式的研究与探索[J].现代职业教育,2025,(11):29-32.
- [4] 刘勃,陈中,周涛,等.面向新型电力系统的等效惯量评估、需求及优化研究综述与展望[J].高电压技术,2025,51(03):1251-1268.
- [5] 黄定威,王锋,李波.面向新型电力系统的含风光储配电网多目标调度方法[J].电测与仪表,2025,62(03):38-45.
- [6] 陶劲宇,秦川,金宇清,等.面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J].电力系统保护与控制,2025,53(05):168-187.
- [7] 冯雷,刘南琦.面向新型电力系统的电力装备应用研究[J].建设科技,2024,(S1):12-15.
- [8] 胡东林,张敏,陈元培,等.面向新型电力系统的主变负荷预测[J].云南电业,2024,(12):2-6.

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