

面向可靠性提升的换流站直流输电关键设备运维策略

王长春 熊传广 龚骏
国网上海市电力公司直流分公司
DOI:10.12238/hwr.v9i3.6172

[摘要] 在直流输电系统中,换流站作为核心组成部分,其关键设备的运维策略对于提升系统可靠性至关重要。面向可靠性提升的运维策略,旨在通过一系列科学、高效的方法,确保换流站关键设备的稳定运行,降低故障率,提高系统的整体可靠性。基于此,本文首先分析了换流站的关键设备及其作用,随后,对影响换流站可靠性的因素进行了深入探讨,在此基础上,提出了面向可靠性提升的换流站直流输电关键设备运维策略,具体包括预防性维护、故障快速响应机制以及智能化运维体系构建等多个方面。

[关键词] 面向可靠性提升; 换流站直流输电设备; 运维策略

中图分类号: TM621.5 文献标识码: A

Operation and Maintenance Strategies for Key Equipment of Converter Stations in DC Transmission Systems Focused on Reliability Enhancement

Changchun Wang Chuanguang Xiong Jun Gong

DC Branch of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company

[Abstract] In Direct Current (DC) transmission systems, converter stations serve as pivotal components. The development and implementation of operation and maintenance (O&M) strategies for critical equipment within these stations are essential for enhancing system reliability. This paper aims to ensure the stable operation of key equipment through scientifically rigorous and efficient methods, thereby reducing failure rates and improving overall system reliability. It begins by analyzing the critical equipment of converter stations and their functions, followed by an in-depth examination of factors influencing station reliability. Based on this analysis, it proposes comprehensive O&M strategies focused on reliability enhancement, including preventive maintenance, rapid fault response mechanisms, and the establishment of intelligent O&M systems.

[Key words] Reliability Enhancement; Converter Station; DC Transmission Equipment; Operation and Maintenance Strategies

引言

在直流输电系统中,换流站作为核心组成部分,其关键设备的运维策略对于提升整个系统的可靠性至关重要。随着电力技术的不断进步和电网规模的日益扩大,对换流站设备的安全稳定运行提出了更高要求。因此,本文将从面向可靠性提升的角度出发,深入探讨换流站直流输电关键设备的运维策略,旨在为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

1 直流输电系统中的换流站关键设备及其作用与可靠性影响因素分析

1.1 换流站的关键设备及其作用

换流站作为直流输电系统的核心组成部分,扮演着至关重要的角色。其关键设备主要包括换流变压器、换流阀、平波电抗器以及控制系统等。这些设备共同协作,确保了直流输电系统的高效和稳定运行。换流变压器作为交流与直流之间的能量转

换器,其性能的好坏直接关系到整个系统的电压水平和功率传输能力。它必须能够承受高压并有效地转换能量,以满足系统的需求。换流阀作为换流站的核心组件,其作用是通过精确控制阀的导通和关断,实现直流电流的调节和控制。例如,IGBT(绝缘栅双极型晶体管)作为现代换流阀的主流元件,其耐压能力和开关速度的高低,直接影响到系统效率和故障响应速度。平波电抗器则用于抑制直流电流的快速波动,减少对电网的冲击,从而保障电能质量的稳定性。此外,控制系统是整个换流站的大脑,它负责协调各个设备的工作,确保整个直流输电系统的安全、可靠和高效运行^[1]。

1.2 可靠性影响因素

在直流输电系统中,设备的可靠性受到多种因素的影响,包括设备设计的合理性、制造质量、运行环境条件以及运维管理水平等。设备设计阶段,如换流变压器的绝缘强度、阀厅内换流

阀的热设计,直接决定了设备在长期高压、大电流运行下的稳定性。制造质量是另一个关键因素。任何微小的制造缺陷,如材料纯度不足、焊接不良,都可能在运行中引发故障。例如,某换流站曾因制造过程中导体表面的微小氧化层导致接触电阻增大,最终引发了直流短路事故。运行环境条件,如温度、湿度、尘埃含量,也对设备可靠性产生显著影响。在极端环境下,如高温可能导致绝缘材料老化加速,高湿度可能引起内部腐蚀,降低设备的运行寿命。运维管理水平的高低直接影响到故障的预防和处理效率。缺乏有效的维护计划可能导致设备过早老化,而响应不及时则可能加剧故障影响,如未及时发现并处理的局部过热现象,可能演变成严重的设备损坏。因此,对这些影响因素的深入分析和综合考虑,是构建高效运维策略的基础,旨在通过预防性维护、状态监测和智能化技术的应用,最大限度地提高直流输电系统的可靠性,保障电力供应的安全稳定^[2]。

2 面向可靠性提升的运维策略

2.1 预防性维护策略

2.1.1 定期检测与状态评估

定期检测与状态评估是预防性维护策略的核心组成部分,旨在及时发现换流站直流输电关键设备的潜在问题,以提高系统的可靠性。通过定期的设备巡检,可以监测设备的运行参数,如电压、电流、温度等,确保其在正常范围内工作。例如,根据历史数据,每季度对换流阀的冷却系统进行一次全面检查,可以预防因冷却效果下降导致的设备过热故障。此外,状态评估利用先进的传感器和监测系统,实时收集设备的运行状态信息。这些数据经过数据分析模型(如故障树分析或预测性维护模型)处理,可以预测设备的未来性能趋势。定期检测与状态评估的实施还需要结合维护专家的知识 and 经验,建立故障模式与影响数据库。这有助于识别异常模式,快速定位故障源,减少诊断时间。例如,当监测到换流模块的功率损耗异常增加时,结合数据库信息,可以更准确地判断是模块内部元器件故障,还是外部冷却系统故障,从而缩短修复时间^[3]。

2.1.2 预测性维护技术应用

预测性维护技术在提升换流站直流输电系统的可靠性中发挥着至关重要的作用。通过利用先进的传感器、数据分析和机器学习算法,可以实时监测关键设备的运行状态,预测潜在的故障,从而显著减少非计划停机时间和维修成本。例如,监测设备的温度、振动和电气参数,可以早期发现设备性能的异常变化,如变压器的局部过热或电容器的电荷不平衡。这些数据经过智能分析模型处理,可以预测设备故障的概率和剩余寿命,为维护决策提供科学依据。在实际应用中,例如在某大型换流站,通过部署预测性维护系统,成功预测并避免了数次可能引发大规模停电的故障。系统通过对大量传感器数据的深度学习,准确识别出故障模式,提前48h发出警告,使得运维团队有充足的时间进行故障隔离和修复,大大提高了运维效率和电力供应的稳定性。这一案例表明,预测性维护技术不仅能够提高设备的可靠性,还能增强整个电力系统的抗风险能力。为了更有效地应用预测性

维护技术,需要结合数字孪生和物联网(IoT)技术,构建设备的数字镜像,实时同步物理设备的运行状态。通过数字孪生,可以在虚拟环境中模拟设备的运行,预测不同工况下的性能退化趋势,为优化维护策略提供数据支持。此外,利用人工智能(AI)的持续学习能力,预测模型可以随着运行时间的推移不断自我更新和优化,提高故障预测的精度。

2.2 建立故障快速响应机制

2.2.1 故障诊断与定位

故障诊断与定位是确保换流站直流输电系统高可靠性的关键环节。通过实时监测设备运行状态,可以迅速识别潜在的故障源,从而减少非计划停机时间和维修成本。例如,利用传感器网络收集的大量运行数据,可以应用数据分析模型,如故障特征提取算法(如PCA或SVM),来识别设备性能的异常变化。此外,结合专家系统和知识库,可以进一步辅助运维人员定位问题的具体位置,提高故障排查的效率和准确性。在实际应用中,故障诊断可能涉及复杂的交互效应,如电气与机械系统的耦合问题。因此,需要建立跨学科的故障模式库,并结合物理模型和数据驱动模型,以提高诊断的全面性和准确性。例如,当检测到电压或电流异常时,结合设备的机械应力数据,可以更准确地判断是电气部件故障还是机械部件故障。这种多维度的分析方法有助于避免误诊,确保故障修复的针对性和有效性。在故障定位过程中,实时监控和远程诊断能力也至关重要。通过物联网技术,运维中心可以远程接入现场设备,实时查看设备状态,甚至在某些情况下,可以通过远程控制进行故障隔离和系统恢复操作。例如,国家电网的智能运维平台就实现了对全国范围内换流站的远程监控和故障响应,大大提升了故障处理的时效性^[4]。

2.2.2 应急预案与恢复策略

在构建高可靠性的换流站直流输电系统中,故障快速响应机制是不可或缺的一环。应急预案与恢复策略旨在确保在设备故障或系统异常时,能够迅速降低影响,尽快恢复稳定运行。例如,当换流阀发生故障导致直流电流中断时,应立即启动预设的应急流程,这可能包括隔离故障点、切换备用设备以及调整系统控制参数(如参考电流和电压设定)以维持电网稳定。

在故障诊断与定位阶段,利用先进的传感器和数据分析技术,可以实时监测设备状态,快速识别故障源。例如,通过实时电流波形分析,结合机器学习模型,可以迅速识别出是换流阀内部晶闸管故障还是外部冷却系统异常。一旦故障源被确认,应急预案将指导操作人员或自动化系统执行恢复策略。这可能涉及更换备件、调整控制系统参数,甚至可能需要协调电网其他部分的运行方式来支持故障部分的恢复。例如,南方电网在2019年的一次故障中,通过快速切换至备用换流器并优化控制策略,成功在30分钟内恢复了大部分输送容量。在实施恢复策略的同时,应考虑其对整体系统可靠性和运行成本的影响。可能需要权衡快速恢复与潜在的次生故障风险,以及运维成本与服务中断的经济损失。通过模拟分析和优化工具,可以动态调整恢复顺序和时间表,以实现最佳的恢复效果和成本效益。

2.3 加强智能化运维体系构建

2.3.1 数字化转型与物联网技术

在构建高可靠性的换流站直流输电系统中, 智能化运维体系的构建至关重要, 尤其在数字化转型与物联网技术的推动下。通过部署传感器网络, 可以实时监测设备的运行状态, 收集大量数据, 包括电流、电压、温度等关键参数, 以实现和设备性能的精细化管理(如ABB、Siemens等企业的实践案例所示)。此外, 利用大数据分析模型, 可以预测设备的潜在故障, 提前进行维护, 显著提高系统的无故障运行时间。物联网技术的应用还体现在远程监控和自动化控制上, 允许运维人员在中央控制室或移动设备上实时查看换流站的全局状态, 快速响应异常情况。

2.3.2 人工智能在故障预测中的应用

在构建高可靠性的换流站直流输电系统中, 智能化运维体系的构建至关重要, 尤其体现在人工智能(AI)在故障预测中的应用。AI技术能够处理大量设备运行数据, 通过机器学习算法, 识别出设备性能的异常模式, 从而提前预警潜在的故障风险。例如, 通过实时监测换流阀、平波电抗器等关键设备的温度、电流等参数, AI模型可以学习并理解设备的正常运行状态, 当检测到数据偏离正常范围时, 及时发出警报, 显著提高故障识别的准确性和时效性^[5]。

2.3.3 数据驱动的决策支持系统

在构建高可靠性的换流站直流输电系统中, 数据驱动的决策支持系统扮演着至关重要的角色。该系统整合了来自设备传感器、运维记录、历史故障数据等多源信息, 通过高级分析模型, 如预测模型、故障模式影响与后果分析(FMECA)模型, 为运维决策提供科学依据。例如, 可以利用机器学习算法训练模型, 以识别设备性能的异常模式, 提前预测潜在故障, 从而减少非计划停机时间。在实际应用中, 数据驱动的决策支持系统可以实时监控关键设备的运行状态, 当检测到异常指标时, 系统会自动触发警报, 通知运维团队进行干预。此外, 系统还可以通过模拟和优化

不同维护策略的后果, 帮助决策者选择成本效益最佳的维护方案。例如, 通过对比定期更换部件与根据状态进行维护的成本与可靠性影响, 可以动态调整维护计划, 确保资源的高效利用。

3 结束语

综上所述, 在面向可靠性提升的换流站直流输电关键设备运维策略中, 我们深入探讨了如何通过预防性维护、故障快速响应机制以及智能化运维体系的构建, 来全面保障直流输电系统的稳定运行。这些策略的实施, 不仅能够有效降低设备故障率, 提升系统可靠性, 还能在故障发生时迅速响应, 最大程度减少损失。随着技术的不断进步和运维经验的积累, 我们有理由相信, 未来的直流输电系统将更加智能、高效、可靠。运维人员将借助先进的技术手段, 实现对关键设备的精准管理和维护, 为电力行业的可持续发展贡献更大的力量。总之, 面向可靠性提升的换流站直流输电关键设备运维策略, 是电力行业发展的重要保障, 值得我们持续关注和深入研究。

[参考文献]

- [1]黄莹瑛,朱延闯,陈亮宏.一种柔性直流输电产品的生产设备设计研发[J].机械研究与应用,2023,36(01):117-121.
- [2]董靓靓,王顺亮,马俊鹏.基于LM法的换流站关键设备宽频建模方法研究[J].智慧电力,2022,50(02):9-14+21.
- [3]王军龙,叶磊,程兰芳.兼备直流故障限流及开断功能的新型直流电网关键设备[J].电气传动,2022,52(02):40-44+52.
- [4]史磊,刘钊,徐辉.基于微服务架构的直流输电换流阀监测系统设计[J].电气自动化,2021,43(05):92-94.
- [5]焦石,严治勇,张健成.柔性直流输电功率模块的现场智能化检测[J].电网与清洁能源,2021,37(09):59-69+76.

作者简介:

王长春(1982--),男,汉族,黑龙江人,大学本科,国网上海市电力公司直流分公司,高级工程师,高压直流输电。