

低压电气设备运行故障与维护研究

蒋冬洋 彭聚

重庆机场集团有限公司, 重庆, 401100;

摘要: 低压电气设备广泛应用于工业生产、民用建筑及基础设施领域, 是保障电力系统稳定运行的基础单元。其长期运行易受环境、安装工艺、老化等因素影响, 引发各类故障, 不仅影响生产生活秩序, 还可能导致安全事故。当前, 部分用户对低压电气设备的故障类型认知不足, 维护方式多依赖“事后抢修”, 缺乏系统性的预防与诊断机制。本文结合低压电气设备的运行特性, 分析常见故障类型及成因, 提出“诊断先行、分级维护”的策略, 包括感官与仪器结合的故障诊断方法、预防性与状态性结合的维护模式, 旨在为提升低压电气设备运行可靠性、延长使用寿命、降低运维成本提供实践参考。

关键词: 低压电气设备; 运行故障; 设备维护; 故障诊断

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.064

引言

低压电气设备作为电力系统的重要组成部分, 通常指额定电压 1kV 及以下的电气设备, 涵盖断路器、接触器、继电器、熔断器、配电箱、电缆等多种类型, 广泛分布于工厂生产线、居民小区、商业综合体、交通枢纽、市政基础设施等各类场景中, 承担着电力分配、设备启停控制、过载与短路保护等核心功能, 是保障生产连续性、生活便利性及公共安全的关键基础设施。在工业生产中, 低压电气设备控制着机床、水泵、风机等各类生产机械的运行, 其稳定性直接决定着生产线的产能与产品质量; 在民用建筑中, 从照明系统、空调通风到电梯运行、安防监控, 均依赖低压电气设备实现电力的精准供给与安全控制; 在交通基础设施领域, 道路照明、交通信号灯、轨道交通辅助系统等正常运转, 同样离不开低压电气设备的支撑。

近年来, 随着我国工业化、城镇化进程的加速推进, 低压电气设备的装机总量呈现爆发式增长。据相关行业统计数据显示, 近五年我国低压电气设备市场规模年均增长率超过 8%, 2024 年市场总量已突破 8000 亿元, 广泛应用于新建项目配套与存量设备更新。然而, 在装机量快速增长的同时, 低压电气设备的运行故障问题也日益突出, 成为制约电力系统安全高效运行的主要瓶颈。从故障成因来看, 初期安装阶段的工艺不规范是重要隐患来源, 如导线连接不牢固、设备安装位置不合理、防护措施不到位等, 为设备长期运行埋下安全隐患; 在运行过程中, 工业车间的粉尘堆积、化工场所的腐蚀性气体、潮湿环境的水汽侵蚀、高低温交替等环境因素, 持续加速设备老化; 此外, 电力负荷的频繁波动、设备启停冲击、元件自然寿命衰减等因素, 进一步加剧了故障

发生的概率^[1]。

1 低压电气设备运行常见故障类型及成因

1.1 电气连接故障

在工业生产、建筑楼宇等低压供电系统中, 此类故障是低压电气设备最频发的类型, 核心问题为“接触不良”。表现为: 接头处发热、端子烧蚀, 设备出现启停频繁、运行时异响, 不仅影响生产作业连续性, 还可能造成设备部件额外损耗, 严重时引发跳闸导致供电中断。主要成因包括三点: 一是安装工艺不规范, 如螺栓紧固扭矩不足、导线压接不紧密, 长期运行中受振动、温度变化等因素影响导致松动, 进而加剧接触不良; 二是环境腐蚀, 潮湿、粉尘或腐蚀性气体(如工业车间的酸碱雾)附着于接头表面, 形成氧化层或污垢, 显著增大接触电阻, 导致电流通过时热量积聚加剧; 三是导线选型不当, 如导线截面积偏小, 无法匹配设备额定负载需求, 长期满负荷运行后导线发热, 加速接头老化、氧化, 进一步恶化接触状态。

1.2 绝缘故障

绝缘性能是低压电气设备防短路、防触电的关键, 直接关系到低压供电系统的安全稳定运行, 绝缘故障易引发漏电或相间短路, 不仅威胁操作人员人身安全, 还可能损坏精密电气元件、造成生产中断。表现为: 设备外壳带电、绝缘电阻值下降(低于 $0.5M\Omega$), 严重时出现绝缘层击穿、冒烟, 甚至诱发电气火灾。成因主要有四类: 一是温度过高, 设备长期过载运行导致发热量超出额定范围, 或散热通道堵塞(如配电箱内粉尘堆积、散热风扇故障), 导致绝缘层老化脆化、绝缘性能骤降; 二是湿度影响, 潮湿环境中水分渗入绝缘材料内部, 破

坏绝缘结构并降低绝缘性能，尤其在地下室、室外配电箱及梅雨季、沿海高湿地区更易发生；三是机械损伤，安装或检修时碰撞、摩擦导致绝缘层破损，如电缆敷设时被尖锐物体刮伤，或长期振动导致绝缘层疲劳破损；四是化学腐蚀，工业环境中的油污、酸碱溶剂等附着于绝缘表面，逐步侵蚀绝缘材料，甚至渗透至材料内部破坏绝缘结构。

1.3 机械故障

低压电气设备中的机械部件是实现分合闸、触点切换等核心功能的关键，其可靠性直接影响设备整体运行稳定性，这类部件易因长期使用磨损或卡滞导致功能失效，不仅影响设备正常启停，还可能因触点接触不良引发电弧放电，加剧部件损坏甚至诱发连锁故障。表现为：设备无法正常分合闸、触点接触不良、操作时卡顿，严重时导致设备停机瘫痪。主要成因包括：一是部件磨损，如接触器、继电器触点长期频繁吸合断开，表面逐渐出现烧蚀、氧化或变形，导致接触面积减小，甚至出现触点粘连；二是润滑不足，操作机构的转轴、弹簧、齿轮等部件长期缺乏适配润滑脂，或润滑脂老化干涸，运行时摩擦力增大，引发卡滞、动作迟缓，长期下来还会导致部件锈蚀；三是异物卡阻，粉尘、金属碎屑、纤维杂物等进入设备内部，卡在机械间隙或传动机构中，影响部件活动，如配电箱内的金属线头脱落、维修时遗留的工具碎屑，均可能导致断路器、隔离开关等关键设备的机械机构卡滞失灵^[2]。

1.4 元件老化故障

作为低压电气设备正常运行的核心保障，电容、电阻、继电器等核心元件均存在明确的自然老化周期，超过设计使用寿命后极易发生性能衰减或功能失效，不仅影响设备运行稳定性，还可能引发控制回路失灵、设备非计划停机，甚至诱发连锁故障。表现为：电容鼓包漏液、电阻阻值漂移、继电器线圈烧毁，设备出现功能紊乱，关键控制逻辑失效。成因主要有两点：一是时间老化，元件长期运行中，内部材料逐渐发生不可逆物理化学变化，在高温、高湿等恶劣环境下该过程会进一步加速，如电容电解液干涸、线圈绝缘漆老化龟裂；二是过载冲击，设备频繁启停、负载突变或电网电压波动，导致元件承受的电应力长期超过额定值，加速内部材料损耗与老化进程，如频繁启动的电机控制回路中，继电器线圈易因瞬时冲击电流过大烧毁，接触器触点也会因频繁通断加剧氧化老化^[3]。

2 低压电气设备维护策略

2.1 预防性维护：降低故障发生率

预防性维护以“定期检查、提前干预”为核心，针对设备易损部位与老化规律，制定固定周期的维护计划，重点包括四項工作：

定期巡检：按“月度-季度-年度”分级巡检——月度检查外观、清洁设备表面粉尘；季度检测绝缘电阻、紧固松动接头、润滑机械部件；年度开展全面检测，包括元件性能测试、线路通断检查，更换接近使用寿命的元件；

环境管控：改善设备运行环境，避免潮湿、粉尘、腐蚀影响——配电箱加装防雨罩与通风扇，降低湿度与温度；工业车间的设备定期用干燥压缩空气清理内部粉尘；腐蚀性环境中选用防腐型设备；

规范操作：避免人为操作引发故障，如启停设备时遵循“先断负载后断电”的顺序，防止冲击电流；安装或更换元件时，确保接线正确、螺栓扭矩达标；

记录存档：建立设备维护档案，记录每次巡检、检测的数据、维护内容与更换元件信息，通过历史数据判断设备老化趋势，提前规划更换周期^[4]。

2.2 状态维护：提升维护精准度

状态维护基于在线监测数据与仪器检测结果，“按需维护”而非“按周期维护”，适用于关键设备，避免过度维护或维护不足：

数据驱动判断：结合在线监测平台的温度、电流数据，及定期仪器检测的绝缘电阻、元件性能数据，分析设备状态——如某接触器触点温度持续升高（从50℃升至70℃），虽未达报警阈值，但趋势异常，需提前拆解检查触点磨损情况；

差异化维护：对重要设备，缩短状态检测周期，增加在线监测点位；对普通设备，可结合季度巡检数据判断状态，无需额外增加检测频率；

预警响应：在线监测平台触发预警后，1小时内完成初步排查，24小时内制定维护方案——如温度预警时，先断电检查接头是否松动，若为接触不良则紧固；若为元件老化则立即更换。

2.3 故障后维护：减少故障影响

故障发生后，需遵循“安全第一、快速修复”的原则，规范处理流程，避免故障扩大或二次事故：

安全断电：故障设备立即断电，断开上级电源开关，悬挂“禁止合闸”标识，防止触电或短路加剧；

故障定位：通过感官诊断与仪器检测结合，快速定位故障点，避免盲目拆解；

规范修复：更换元件时选用同型号、同规格产品；修复后进行性能测试，确保设备正常运行；

原因复盘：故障修复后，分析故障成因，更新维护档案，针对成因优化后续预防措施。

2.4 维护注意事项

维护过程中需注重安全与规范性，严格遵循行业操作标准，避免因操作不当引发新的电气故障或安全事故：

安全操作：所有维护工作需在断电后进行（除在线监测与钳形表测量外），断电后必须先通过验电笔确认无电并悬挂“禁止合闸、正在检修”警示标识，操作人员全程佩戴绝缘手套、使用经检验合格的绝缘工具；高空作业需搭建安全防护平台并系好双钩安全带，下方设置安全警示区；

元件适配：更换元件时，需严格匹配元件型号、额定电压、额定电流等核心参数，严禁用低规格元件替代高规格元件，避免因负载不匹配导致过载烧毁，更换前需仔细核对元件标识，确保与原配件完全一致；

测试验证：维护后需进行全面的试运行测试，如电机控制设备修复后，先清理设备周边杂物、检查接线紧固情况，再空载运行 5-10 分钟，除检查运行声音、温度是否正常外，还需用万用表检测关键电气参数，确保无隐患后再投入正式使用。

3 结论与展望

3.1 结论

低压电气设备作为电力系统的基础单元，其运行故障具有“类型多样、成因复杂”的显著特点，常见的电气连接故障、绝缘故障、机械故障及元件老化故障，主要与安装工艺不规范、环境因素影响、维护管理缺失、操作不当等因素相关。这些故障不仅会影响生产生活秩序，还可能引发严重的安全事故，造成巨大的经济损失。

本文提出的“诊断先行、分级维护”策略，通过“感官+仪器+在线监测”的多层级故障诊断方法，能够精准定位故障根源，为维护工作提供科学依据；“预防性+状态性+故障后”的分级维护模式，实现了维护工作的系统化、精准化和高效化。其中，预防性维护通过定期巡检、环境管控、规范操作和档案管理，有效降低了故障发生率；状态维护基于数据驱动的状态判断和差异化维护方案，提升了维护精准度，避免了过度维护和维

护不足；故障后维护通过规范的流程和快速响应机制，最大限度减少了故障造成的损失。同时，加强维护人员专业素养提升和严格遵守维护注意事项，为维护工作的质量和安全提供了保障。

实践证明，科学的故障诊断与维护体系能够有效提升低压电气设备的运行可靠性，延长设备使用寿命，降低运维成本，防范安全事故，对于保障电力系统安全稳定运行具有重要的实用价值。

3.2 展望

随着智能化、数字化技术的不断发展，低压电气设备的维护模式正朝着智能化、信息化方向转型。未来，可进一步加强以下方面的研究与实践：

智能化故障预测与诊断技术应用：结合人工智能、大数据分析等技术，构建低压电气设备故障预测模型，通过对设备运行数据的深度分析，实现故障的提前预测和精准诊断，变“被动维护”为“主动预测”；

数字化维护管理平台建设：整合在线监测数据、维护档案、设备信息等资源，构建一体化的数字化维护管理平台，实现维护计划自动生成、维护过程实时跟踪、维护效果量化评估，提升维护管理智能化水平；

绿色节能维护技术探索：在维护过程中融入绿色节能理念，选用节能型元件和材料，优化设备运行参数，通过科学维护降低设备能耗，实现维护与节能的协同发展；

远程维护技术推广：对于偏远地区或不易到达的设备，采用远程监测、远程诊断、远程控制等技术，实现远程维护，提高维护效率，降低维护成本。

通过不断创新和完善维护技术与管理模式，将进一步提升低压电气设备的运维水平，为电力系统的安全、高效、绿色运行提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] 李顺民. 新时代低压电气供配电设备运行故障及维护策略[J]. 光源与照明, 2024, (12): 77-79.
- [2] 赵聘. 低压电气设备运行故障与维护研究[J]. 中国设备工程, 2024, (23): 72-74.
- [3] 张玉, 梁妍. 低压电气供配电设备运行故障及维护措施的研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(03): 280-282.
- [4] 李承轩. 高低压电气设备安装的质量控制要点分析[J]. 电气技术与经济, 2023, (01): 165-167.