

# 煤矿井下低压配电系统的故障排查与安全防护研究

马泽坤

国能神东煤炭集团大柳塔煤矿 陕西 榆林 719315

**摘要:** 煤矿井下低压配电系统是保障煤矿生产连续与作业安全的核心设施,其运行环境高湿、高尘且易燃易爆,故障频发且危害大。本文旨在提升系统运行可靠性,系统分析常见故障类型、成因,提取故障特征参数,探究传播机理与危害程度。重点研究传统排查方法局限,引入智能化诊断与快速断电隔离技术,构建多元排查体系。从本质安全、接地漏电、过载短路防护及环境监测预警等方面完善防护体系,结合标准化作业、人员培训与管理平台,构建全流程安全管理体系,为煤矿安全生产提供支撑。

**关键词:** 煤矿井下; 低压配电系统; 故障排查; 安全防护

引言: 煤炭是我国能源结构重要部分,其安全生产关乎能源供应与社会经济发展。煤矿井下低压配电系统为采掘、运输等核心设备供电,是煤矿生产的“动力中枢”。但井下环境恶劣,高湿度、高粉尘、强振动及瓦斯、煤尘爆炸风险等,使系统易发短路、漏电、过载等故障,造成生产中断,甚至引发电气火灾、瓦斯爆炸等事故,威胁人员安全。当前部分煤矿排查效率低、防护体系不完善,难满足智能化开采要求。

## 1 煤矿井下低压配电系统故障特征分析

### 1.1 常见故障类型及成因

煤矿井下低压配电系统常见故障主要包括短路、漏电、过载及接触不良四类。短路故障发生率最高,成因多为电缆绝缘层在高湿、磨损、挤压作用下破损,导致相线与相线或相线与地线直接连通,此外接线错误、设备内部元器件老化短路也会引发此类故障。漏电故障分为集中性漏电与分散性漏电,集中性漏电多由电缆接头密封不严受潮、电机绕组绝缘损坏等导致;分散性漏电则与井下高湿环境下电缆绝缘整体老化相关。过载故障主要因采掘设备频繁启停、负载叠加超出系统额定容量,或线路敷设不合理导致阻抗过大引发。接触不良故障多源于电缆接头松动、端子氧化、连接件磨损,井下振动环境会进一步加剧此类故障的发生。上述故障的核心诱因可归结为环境侵蚀、设备质量缺陷、敷设与操作不规范三大类。

### 1.2 故障特征参数提取

故障特征参数的精准提取是故障识别与定位的基础,需结合不同故障类型的电气特性针对性选取。短路故障的核心特征参数包括短路电流峰值、电流上升速率及故障持续时间,短路发生时电流会瞬间激增数倍,电压急剧下降。漏电故障的特征参数为漏电电流幅值、零序电

流、绝缘电阻值,当绝缘电阻低于规定阈值(通常为 $1M\Omega$ ),且出现明显零序电流时,可判定存在漏电隐患。过载故障的特征参数包括过载电流幅值、过载持续时间及线路温度,过载时电流持续超出额定值,线路温度随时间逐步升高<sup>[1]</sup>。接触不良故障的特征参数为接触电阻、电压降及电流波动系数,接触不良部位会出现电压降突变、电流不稳定波动的现象。通过传感器实时采集上述参数,可为故障诊断提供精准数据支撑。

### 1.3 故障传播机理与危害评估

煤矿井下低压配电系统故障传播具有连锁性与扩散性特征,单一故障若未及时处置,易引发系统性故障。短路故障发生时,大电流会快速烧毁故障点设备,高温电弧可能引燃周围可燃物或引爆瓦斯;同时电压骤降会导致周边敏感设备停机,引发生产连锁中断。漏电故障产生的漏电电流会在大地形成电位差,易造成人员触电伤亡;若漏电点产生电火花,会直接触发瓦斯、煤尘爆炸。过载故障会使线路与设备长期过热,加速绝缘老化,进而诱发短路故障,形成“过载-绝缘损坏-短路”的故障链。基于故障发生概率、传播速度及危害范围,采用风险矩阵法评估可知,短路与漏电故障危害等级最高,可能造成重大人员伤亡与巨额经济损失;过载与接触不良故障危害等级相对较低,但会严重影响生产效率,长期发展也可能升级为严重故障。

## 2 煤矿井下低压配电系统故障排查方法研究

### 2.1 传统排查方法与局限性

煤矿井下低压配电系统传统故障排查方法以直观检查法、仪表检测法、分段排除法为主。直观检查法通过目视、听觉、触觉排查设备外观破损、线路松动、异常声响等明显故障;仪表检测法借助万用表、兆欧表、钳形电流表等工具,测量电压、电流、绝缘电阻等参数定

位故障；分段排除法通过断开不同区域开关，逐步缩小故障范围。这些方法依赖操作人员经验，设备简单、成本低，在简单故障排查中仍有应用，但局限性显著。一是排查效率低，井下系统复杂、线路绵长，分段排查耗时费力，易延误故障处置时机；二是精准度不足，对隐性故障（如早期绝缘老化）识别能力差，易出现误判、漏判；三是安全性欠佳，排查过程中需频繁停送电，增加人员触电与瓦斯爆炸风险，难以适配复杂井下环境的故障排查需求。

### 2.2 智能化故障诊断技术

智能化故障诊断技术可有效弥补传统方法的不足，核心包括数据驱动诊断与模型驱动诊断两类技术。数据驱动诊断技术基于物联网构建全链路监测网络，通过部署电流、电压、温度等传感器，实时采集系统运行数据；利用边缘计算节点对数据进行预处理，剔除干扰数据后传输至云端平台；基于机器学习算法构建故障诊断模型，通过海量历史数据训练，实现对短路、漏电等故障的精准识别与故障点定位，识别准确率可达95%以上。模型驱动诊断技术通过建立配电系统等效电路模型，结合故障特征参数，采用故障树分析法与贝叶斯推理，模拟故障传播路径，实现故障的快速诊断。两类技术协同应用，可形成“实时监测-数据分析-精准诊断-定位溯源”的智能化排查闭环，大幅提升故障排查效率与精准度<sup>[2]</sup>。

### 2.3 快速断电与隔离技术

快速断电与隔离技术是故障排查的重要配套技术，核心目标是防止故障扩散，保障排查过程安全。采用选择性漏电保护开关与智能断路器构建分级断电体系，根据故障类型与严重程度，精准定位故障线路，实现“故障点局部断电”，避免越级跳闸导致大面积停电。研发基于光纤通信的快速断电控制系统，利用光纤抗电磁干扰、传输速度快的优势，确保故障信号传输延迟控制在毫秒级，实现故障发生后0.5秒内切断故障线路电源。在关键配电节点设置隔离装置，故障隔离后可通过旁路供电保障核心设备（如通风、排水设备）持续运行，减少生产中断损失。同时，隔离装置配备状态监测功能，实时反馈隔离状态，为故障排查提供安全环境，降低排查过程中的安全风险。

## 3 煤矿井下低压配电系统安全防护技术研究

### 3.1 本质安全设计

本质安全设计是从源头降低故障风险的核心技术，需贯穿设备研发、系统设计全流程。设备选型采用隔爆型、增安型等符合煤矿安全标准的产品，核心元器件选用耐高湿、高尘、抗振动的工业级器件，电缆采用阻燃、

抗静电、耐磨损的矿用专用电缆。系统设计采用冗余设计方案，关键供电回路设置双电源备份，确保单一回路故障时可快速切换供电。优化配电系统拓扑结构，缩短供电距离，减少线路损耗与故障概率；合理划分供电区域，实现故障区域的精准隔离。此外，对配电设备进行密封防潮、防尘设计，设备外壳采用耐腐蚀材料，内部配备除湿、除尘模块，提升设备在极端环境下的适应能力，从本质上降低故障发生风险。

### 3.2 接地与漏电保护技术

接地与漏电保护是保障人员与设备安全的关键技术。采用联合接地系统，将配电设备金属外壳、电缆屏蔽层、接地极等连接形成统一接地网，接地电阻严格控制在4Ω以下，确保漏电流快速导入大地，降低地电位差。配置选择性漏电保护装置，根据不同供电区域特点优化保护参数，实现“近端故障精准跳闸、远端故障不越级跳闸”。研发自适应漏电保护技术，可根据井下环境湿度、温度变化，动态调整保护阈值，提升漏电保护的可靠性。增设漏电故障预警功能，当绝缘电阻降至预警阈值时，及时发出声光报警，提醒工作人员提前处置，避免漏电故障升级为触电或爆炸事故<sup>[3]</sup>。

### 3.3 过载与短路防护技术

针对过载与短路故障，构建多层次防护体系。选用具有反时限特性的过流保护装置，根据过载电流大小自动调整动作时间，轻度过载时发出预警，严重过载时快速跳闸。配置限流型断路器，短路故障发生时，可在毫秒级内限制短路电流峰值，避免大电流烧毁设备、引发电弧事故。在配电线路关键节点安装热脱扣装置，当线路温度超过阈值时，自动切断电源，防止线路过热引发火灾。通过智能化监测系统实时监控线路负载变化，当负载接近额定容量80%时，发出过载预警，引导工作人员合理调配负载，从源头避免过载故障发生，形成“预警-调控-保护”的全流程防护。

### 3.4 环境监测与预警系统

环境监测与预警系统可实时感知井下环境变化，为配电系统安全运行提供保障。在配电硐室、电缆沟等关键区域部署温湿度传感器、粉尘传感器、瓦斯传感器，实时采集环境参数。系统设定多级预警阈值，当环境参数超出预警阈值时，发出声光预警，并自动启动除湿、除尘、通风设备进行调控；当瓦斯浓度接近爆炸下限（1%）时，立即切断周边配电设备电源，防止电火花引发爆炸。环境监测数据与配电系统运行数据联动分析，当环境参数异常时，自动调整配电系统运行状态，如降低非核心设备负载、启动备用设备等，提升系统对环境变

化的适应能力,实现环境与设备的协同防护。

#### 4 煤矿井下低压配电系统安全管理体系构建

##### 4.1 标准化作业流程

构建全流程标准化作业流程,规范配电系统安装、操作、维护、排查等各环节工作。制定《井下低压配电系统安装验收标准》,明确设备安装工艺、线路敷设规范及验收指标,确保施工质量。编制《日常操作安全规程》,规范设备启停、负载调整等操作流程,严禁违规操作。建立“日常巡检-每周排查-月度检修”的三级维护流程,明确各环节检查内容、周期与责任人,重点检查设备运行状态、线路接头、保护装置等关键部位,建立维护档案,实现问题闭环管理。制定故障排查标准化流程,明确排查步骤、安全注意事项及应急处置措施,确保故障排查有序、安全开展。

##### 4.2 人员培训与技能考核

加强人员队伍建设,构建“培训-考核-上岗”的全链条管理机制。定期开展专项培训,内容涵盖配电系统原理、故障排查方法、安全防护技术、应急处置流程等,重点强化智能化诊断设备操作技能培训,提升工作人员专业素养。采用“理论考试+实操考核”的方式进行技能考核,考核不合格者需重新培训,合格后方可上岗。建立技能等级评定制度,将考核结果与薪酬、晋升挂钩,激发工作人员学习积极性。定期组织应急演练,模拟短路、漏电等常见故障场景,提升工作人员故障处置与应急响应能力,确保关键时刻能够快速、规范处置故障<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 智能化管理平台

构建智能化管理平台,旨在达成煤矿井下配电系统全生命周期的智能化高效管理。该平台全面整合故障诊断、环境监测、设备运维、人员管理等多个关键功能模块,形成一体化的管理中枢。平台能够实时采集并展示系统运行参数、设备状态、环境数据等全方位信息,通过数据可视化技术,让管理人员直观了解系统运行状况。同

时,利用智能算法对数据进行深度分析,实现异常预警,提前发现潜在风险。平台可自动派发故障工单,精准分配任务至相关人员,并实时跟踪处置进度,对处理结果进行详细归档,形成完整的故障管理闭环。另外,建立设备全生命周期档案,详细记录设备从采购、安装到维护、检修的每一环节信息,为科学制定设备维护计划提供坚实的数据支撑;平台还支持远程监控与远程指导功能,地面管理人员可随时随地实时监控井下配电系统运行状态,在故障发生时,能及时对井下排查工作进行远程指导,大幅提升管理效率与故障处置能力,构建起“数据驱动、精准管控”的智能化管理模式。

#### 结束语

煤矿井下低压配电系统的安全稳定运行是煤矿安全生产的核心保障,受井下极端环境影响,其故障排查与安全防护工作面临诸多挑战。本文通过系统分析故障类型、特征及传播机理,提出“传统方法+智能化技术+快速隔离”的多元化故障排查体系,有效提升了故障排查的效率与精准度。未来,需进一步加强智能化技术与配电系统的深度融合,研发适应极端环境的新型防护装备,持续优化安全管理体系,为煤矿井下低压配电系统安全运行提供更坚实的保障,助力煤矿行业实现高质量、安全化发展。

#### 参考文献

- [1]孙建浩,张宏伟.煤矿井下低压配电开关远程漏电试验系统研究[J].现代工业经济和信息化,2024,14(7):141-143,146.
- [2]王恩光.煤矿井下低压电网漏电保护技术研究[J].矿业装备,2023(7):114-116.
- [3]王传会.煤矿井下成套智能高压真空配电装置研究与应用[J].煤矿现代化,2024,33(04):96-100.
- [4]杨栋栋.井下低压磁力起动器智能综合保护装置研究[J].能源与节能,2025,(07):133-135.