

井下复杂工况供电系统可靠性优化与故障预警技术研究

王德林

(招远市新东庄金矿有限公司, 山东 烟台 265400)

摘要 在井下复杂工况下, 供电系统作为矿山生产的“能源中枢”, 其稳定运行直接关联矿山生产安全与作业连续性, 可靠性优化与故障预警技术成为保障系统高效运转的核心支撑。本文从技术要义出发, 深度解析可靠性优化的核心导向与故障预警的本质目标, 结合井下高湿度、高粉尘、空间受限、负荷波动剧烈及电磁干扰严重等特殊环境, 深入探讨适配该场景的拓扑结构优化、智能保护配置、多源感知监测、智能算法诊断等关键技术路径。通过融合硬件升级与软件赋能, 整合设备选型、拓扑重构、传感监测、数据传输、算法诊断等多环节技术要素, 构建全方位、多层次的技术保障体系, 旨在为井下复杂工况供电系统提供兼具针对性与实用性的优化方案, 实现故障的提前预判与快速处置, 推动供电系统从被动抢修向主动安全、智能自愈方向发展。

关键词 井下复杂工况; 供电系统; 可靠性优化; 故障预警

中图分类号: TD611

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.009

0 引言

井下采矿作业环境具有很强的复杂性、特殊性, 高湿度容易使设备绝缘性能下降, 高粉尘会加快设备磨损和接触不良, 空间狭小使得设备布局紧凑、散热困难, 采掘设备频繁启停造成负荷波动剧烈, 这些因素都对供电系统稳定性及抗干扰能力提出了比地面场景更加严格的考验。供电系统是矿山生产的主要基础设施, 任何的停电或者故障都会造成采掘、运输、通风等重要系统出现瘫痪状况, 很容易引发一氧化碳积聚、顶板坍塌等次生事故, 危及作业人员的生命安全。可靠性优化和故障预警技术的科学使用, 可以从源头减少系统出现故障的概率, 加快故障排查和处理的速度, 是解决井下供电问题、提高系统运行安全性的重要方法。本文以高湿高尘、强电磁干扰的矿山井下复杂供电工况为背景, 从供电系统可靠性提高和故障精准预警两个方面出发, 对相关技术的主要内容及实践途径进行阐述, 并融合拓扑重构、智能保护、传感监测、算法诊断等技术要素, 形成一套适合于井下复杂环境的高可靠供电保障技术体系, 为矿山智能化建设奠定坚实的能源基础, 同时为同类复杂环境下的供电系统优化提供可借鉴的技术范式。

1 井下复杂工况供电系统可靠性优化与故障预警技术要义

1.1 可靠性优化的核心导向

井下复杂工况供电系统的可靠性优化, 以适应极端环境、保证关键负荷连续供电为根本目标, 其实质就是用系统的技术手段, 从抗干扰、自愈、负荷匹配三个方面来加强系统的能力, 使系统在复杂的井下环境中能够持续、稳定地提供电能^[1]。该导向的核心要义就是立足于井下环境的特殊性, 打破传统的地面供电系统优化思想, 把硬件配置的合理性同运行策略的灵活性结合起来。

从硬件配置上来说, 重视供电拓扑的容错设计, 采用冗余路径规划、关键节点备份等方式来降低单一故障点对整个系统的冲击, 同时选择具有防爆、防潮、抗腐蚀、抗电磁干扰等性能的专用设备, 从物理上提高系统对复杂环境的适应能力。从运行策略上讲, 重视运行过程中负荷的动态调节和能量的有效分配, 对采掘设备、通风设备等主要负荷的运行情况加以监测, 从而动态调节供电优先次序以及功率分摊比例, 防止出现局部超载或者能量浪费的现象。“硬件匹配+软件控制”的双层优化方式, 可以使得系统在复杂的工

作者简介: 王德林 (1987-), 男, 本科, 一级技师, 研究方向: 机电管理。

况下保持稳定输出和连续工作,从根本上减少故障出现的可能性,为之后的故障预警技术精确使用赋予了稳固的硬件基础和良好的运行环境。

1.2 故障预警技术的本质目标

故障预警技术本质目的就是实现井下供电系统故障的早期识别、准确定位和趋势预测,对系统运行状态进行全方位的实时感知,并且对数据进行深层次分析,从而提前发现电压异常波动、设备温度过高、绝缘性能变差等故障的先兆信号,给运维人员及时处理留下足够的时间和准确的决策依据^[2]。故障预警技术的核心思想是“防患于未然”,打破了传统井下供电系统依靠人工巡检和事后抢修的被动状况,把多方面监测数据同智能分析算法以及矿山安全管理体系规范融合,塑造一个全流程、自动化的故障防控体系。监测维度上除了系统电压、电流、功率这些电气参数外,还会包含设备温度、振动、局部放电这些物理状态参数,同时还会包含井下环境湿度、粉尘浓度这些外部影响因素,从而达到对系统运行状态的全面覆盖。采用大数据处理、机器学习等技术,对大量的监测数据进行特征提取、趋势分析、异常识别,可以准确地区分出正常的波动和故障的前兆,不会出现误预警或者漏预警的情况。

依靠技术手段,故障预警技术摆脱了传统的人工巡检效率低、覆盖面小、主观性强的束缚,达成由被动抢修转向主动防控的转变,实现各类故障在萌芽时期就被及时察觉并迅速处理,防止故障扩大造成大面积停电或者重大安全事故,同可靠性改善技术形成功能互补和协同增效,共同构筑起井下供电系统里的双重安全屏障。

1.3 两项技术的协同逻辑

井下复杂工况供电系统可靠性优化和故障预警技术不是彼此独立的技术模块,在功能实现和应用场景中存在着深层次的协同关系,两者互相促进,互相补充,共同组成保障供电系统安全稳定运行的完整技术体系。可靠性优化技术依靠拓扑重构、设备更新、策略改良等手段,从根源上削减故障产生的原因,比如创建双回路冗余架构减少线路故障对供电的干扰,挑选抗环境设备缩减设备本身的故障概率,这些措施既直接加强了系统稳定运行的水平,又给故障预警技术的推行提供了更为稳固、可靠的基础。如果供电系统本身的稳定性不好、波动频繁,就会使监测数据中出现较多的干扰信号,从而影响到故障预警的准确性;而经过可靠性优化后的系统运行更加稳定,故障前兆信号更

容易被捕捉到,大大提高了预警技术的应用效果。相反,故障预警技术依靠对系统的实时监测和准确诊断,可以及时找出系统运行过程中的薄弱环节,比如某条线路绝缘性能一直降低,某台设备负荷长期超出标准等,这些数据给可靠性改进策略的动态调整提供了精确的数据支撑,让改善举措能针对系统实际存在的问题实施有目的的改良^[3]。

两者之间存在一个“优化提稳—预警反馈—精准再优化”的循环过程,互相促进,形成闭环,共同达到供电系统在复杂工况下安全、高效、可持续运行的目的,既保证了当前运行的稳定,又给系统的长期优化和升级指明了方向,实现了短期效益和长期发展的有机结合。

2 井下复杂工况供电系统可靠性优化与故障预警技术

2.1 可靠性优化核心技术路径

井下复杂工况供电系统的可靠性提升要兼顾井下环境特性以及系统运行需求,从拓扑结构、设备布置、运行调节这三方面着手,塑造起全方位、多层次的改良架构。对于井下空间小、线路铺设困难的特点,采用环形供电和双回路冗余相结合的方式设计,在规划线路走向的时候减小供电半径、降低线路损耗和故障传播的风险,采用模块化设计提高拓扑结构的灵活性和扩展性^[4]。该种设计可以保证单一线路或者设备出现故障的时候,备用路径可以在毫秒级之内迅速切换过来,防止重要负荷供电中断,大幅提升系统容错能力和自愈水平。在设备配置上,严格按照井下防爆、防潮、抗腐蚀、抗电磁干扰的技术标准选用经过矿山安全认证的智能型供电设备,即隔爆型变压器、本安型开关设备、耐尘耐湿传感器等。同时将分布式光伏、小型储能装置等新型能源设备集成起来,形成主电网和微电网互相补充的互补供电模式,微电网在主电网发生故障的时候可以迅速独立工作,保证通风、排水等重要安全负荷的持续供电,提高系统对负荷变化的适应能力以及极端情况下供电的韧性。从运行调节的角度出发,根据得到的负荷数据以及井下环境参数,使用智能调度算法以及动态负荷管理策略,使边缘计算节点可以对本地的数据立刻做出反应并做出相应的决策,把供电资源有效地分配给各个区域,改变无功补偿的措施以及设备的启停时间。

2.2 故障预警关键技术实施

故障预警技术的有效开展要依靠多源感知、数据传输、智能诊断这三个主要部分的共同作用,各个环

节都要符合井下复杂环境的技术需求。在多源感知方面,按照全场景覆盖、高精度监测的要求,在各个场景下布置大量的本安型监测传感器,包括电压、电流、功率、频率等电气参数传感器、温度、振动、局部放电、绝缘电阻等设备状态传感器、湿度、粉尘浓度、瓦斯含量等环境参数传感器^[5]。这些传感器被精确地安放在变电所、电缆线路接头、重要用电设备、井下巷道等重要位置,对供电系统从电源端到负荷端全过程、全方位的状态进行监测,及时获取系统运行参数和设备状态信息,建立一个无死角的全方位监测网络。数据传输部分由于井下信号传输衰减大、电磁干扰强,采用光纤环网和 5G 矿用专网相结合的混合通信方式,光纤环网传输大量的高精度监测数据,具有传输速率高、抗干扰能力强的特点,5G 矿用专网传输实时控制指令和紧急预警信息,具有低延迟、广覆盖的特点。在井下关键节点处设置边缘计算节点,对采集到的原始数据进行预处理,即数据清洗、冗余信息过滤、特征参数提取等,既减轻了远程传输的数据压力,又提高了后续诊断分析的效率。智能诊断部分采用深度学习、模糊推理、支持向量机等多种智能算法,建立多模型融合的故障诊断模型,对多维监测数据和历史故障案例数据进行深入挖掘,从中提取出故障特征规律,从而达到对短路、漏电、绝缘老化、设备过热等常见故障的准确识别和类型判断。

2.3 技术融合应用与保障体系

实现井下复杂工况供电系统可靠性优化和故障预警技术有效落地,要创建起完备的技术融合应用机制和全流程保障体系,保证技术由理论设计转变为实际应用效能。

从技术融合应用来说,主要是打通可靠性优化和故障预警系统之间数据壁垒以及功能界限,创建起常态化的数据共享和联动控制体系。故障预警系统依靠及时监测到的设备状态数据和故障前兆信息,可以即时向可靠性改善调控模块发出信息,给优化措施的及时更改赋予支撑。例如:故障预警系统发现某条线路绝缘性能不断下降,优化模块可以自动调节供电拓扑,把这条线路的负荷转移到备用线路上去,并且制定出相应的设备检修计划;而可靠性优化之后的系统运行数据,又可以给故障预警模型的参数校准提供依据,提高预警的准确性。采用这样的方式可以形成一个“监测、预警、优化、反馈”的闭环联动机制,使两者相融合、互相促进。从设备选型、安装调试、日常维修、报废更新等各个生产环节的全过程严格遵照井下安全标准

及技术规范来操作。定期对传感器、通信设备、智能开关、储能装置等关键部件进行适应性检测和维护保养,及时更换老化、性能下降的设备,保证硬件设备一直处在良好的工作状态,给技术应用提供稳定的硬件支持。在软件支持上开发出供电系统管理平台,将数据采集、状态监测、故障预警、优化调控、运维管理等各方面功能整合起来,实现监测数据可视化呈现、故障预警信息分级发送、优化策略自动产生并远程下发,还具有历史数据查阅、故障案例剖析、报表自行生成等附加功能,明显改善操作便利程度和决策准确性。

3 结束语

井下复杂工况供电系统可靠性优化及故障预警技术,是解决井下极端环境问题、保证矿山安全生产的重要支撑技术,二者相互配合使用,为供电系统的稳定运行提供全方位、多层次的保障,对矿山行业安全发展、智能发展起到积极的作用。本文对两项技术核心要义进行了系统的分析,明确可靠性优化的环境适应和稳定保证导向、故障预警的早期识别和准确预判目的、两者互相支持、共同促进的内在联系。在此基础上,对拓扑重构、智能保护、多源感知、算法诊断等关键技术路径进行了详细的分析,将硬件升级、软件赋能、数据联动等各方面的技术要素融合起来,形成了一个既具有理论性又具有实用性的完整技术体系。经过该技术体系的落地实施之后,可以明显提升井下供电系统对于干扰的抵御水平,加强它对自身的自修复以及预知隐患的功能,把供电系统从被“困于”故障的状态转变成“在控制中”风险的主动主体,大幅削减了供电系统故障发生的频次和处理时长。未来,伴随着人工智能、数字孪生、工业互联网等科学技术的不断发展并深入应用,应该继续推进技术创新与实践应用的深度融合。

参考文献:

- [1] 马富国,李志江,陈连虎.煤矿变电所供电系统的可靠性分析及优化研究[J].电气技术与经济,2024(08):219-221.
- [2] 翟观文,李传海,葛云双.煤矿变电所供电系统的可靠性分析及优化路径[J].电气技术与经济,2024(08):235-238.
- [3] 李剑宇.牵引供电系统的可靠性与稳定性分析与优化[J].自动化应用,2024,65(01):179-181,185.
- [4] 伍定泽.基于三阶段可靠性优化的铁路牵引供电系统智能化维护研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [5] 杨定宙.煤矿井下机械供电设备可靠性优化设计[J].机械工程师,2023(01):26-28,32.