

矿山供电线路过载运行对设备寿命的影响及防控措施研究

覃建昌

文山州煤业有限公司普阳煤矿 云南 文山 663000

【摘要】：矿山供电线路在长期高负荷条件下运行，极易导致导线温升过高、绝缘性能下降及设备损耗加剧，从而缩短设备寿命并增加故障风险。过载运行不仅影响供电系统的稳定性，还可能引发安全事故，造成矿山生产的停滞和经济损失。通过分析供电线路过载运行对电气设备的影响机理，指出过载导致设备寿命缩短的主要环节，并结合防控措施提出优化运行管理、提升设备维护水平及加强监测预警的重要性。科学合理的防控策略能够有效延长供电设备寿命，保障矿山安全与提高生产效率。

【关键词】：矿山供电线路；过载运行；设备寿命；运行管理；防控措施

DOI:10.12417/2811-0528.26.01.018

1 矿山供电线路过载运行的典型特征与风险表现

1.1 矿山供电负荷变化带来的线路应力因素

矿山用电负荷通常呈现多点集中和脉冲式增长特征，提升机、通风机、排水泵以及破碎设备在不同阶段频繁启停，导致线路电流波动剧烈。短时间内的峰值负荷会使电流瞬间超过额定容量，加剧导体发热和电压波动。电缆因敷设环境受限，常出现成束排列或通风不畅的情况，进一步降低载流能力。同时，潮湿、粉尘和腐蚀性气体的长期作用，使导体和接头表面氧化，接触电阻增加，热点效应明显。机械应力叠加如弯曲半径不足、线路震动频繁，也会造成导体局部损伤。这些多重因素共同作用，使供电线路承受的电气与机械应力远超设计值，长期运行状态趋于不稳定，潜在风险不断累积。

1.2 过载运行导致电缆及绝缘性能下降机制

在过载运行条件下，电缆绝缘层长时间处于高温状态，分子链结构逐渐断裂，交联度降低，导致介质损耗和电气强度下降。绝缘层一旦形成微裂纹，电场分布畸变会促进局部放电发生，裂纹逐步扩展为电树和水树，进而侵蚀整体绝缘降低性能。潮湿环境下，水分和离子渗透加速电化学反应，使屏蔽层和金属护套腐蚀，削弱均压和散热能力。接头与终端因热胀冷缩产生蠕变，密封性下降，进而使外界污染物侵入，造成介质电阻下降和放电现象频发。随着运行时间延长，绝缘系统退化进入不可逆阶段，其击穿电压显著降低，极易在过电压冲击下发生击穿事故，缩短设备使用周期。

1.3 供电线路过热引发的安全隐患问题

线路长期过热会导致电缆护套软化，护套强度下降后易在机械应力下破裂，进而使金属层外露，增加短路风险。局部热点若持续存在，会促使绝缘层碳化，形成导电通道，电弧进一步扩展并点燃周边粉尘和可燃材料。接头与终端处因受热产生蠕变，紧固力不足，局部产生微弧，反复作用形成炭化斑点，

造成接地电流增大，保护装置选择性动作失灵。高温裂纹还为潮气和粉尘进入创造条件，导致沿面放电和爬电加快，最终引发相间短路。矿山巷道空间有限，通风效果受限，烟雾扩散困难，一旦发生火灾，容易造成连锁设备损坏与停运，扩大事故范围并引发严重的安全隐患。

2 过载运行对供电设备寿命损耗的作用机制分析

2.1 导体温升加速设备金属部件疲劳损伤

导体在长期高电流下温升频繁超过允许值，金属材料反复热胀冷缩，使晶格结构发生位错，机械性能逐渐下降。铜铝接头因接触电阻增加而产生大量焦耳热，接触点处的氧化膜不断加厚，导电能力下降，形成恶性循环。高温条件下，铝绞线出现蠕变，张力下降，易引发断股现象。母排紧固件失去预紧力，微动磨损与电化学腐蚀并存，导致连接处电气与机械性能同时衰退。触头在高温下弹性不足，电弧燃烧时间延长，烧蚀坑和金属迁移加重电阻上升。这些问题叠加，使金属部件进入疲劳损伤阶段，其寿命明显缩短，运行稳定性大幅下降。

2.2 绝缘老化对设备使用周期的缩短作用

设备的绝缘系统在电、热、机械等应力共同作用下发生老化。长期过载使绝缘介质温度超过设计上限，聚合物链断裂率增加，分子结构松散，介电性能下降。油浸绝缘材料因温度升高而加速氧化，酸值和水分含量增加，绝缘油品质恶化。固体绝缘在高温下易形成微裂纹，局部电场集中诱发局部放电，进而向碳化通道扩展。密封部件老化造成水汽侵入，绝缘表面形成湿闪或沿面放电，进一步降低可靠性。绝缘性能退化直接影响保护整定的可靠性，安全裕度缩小，使设备在正常运行条件下也可能提前进入故障状态，导致整体使用周期显著缩短。

2.3 过载导致电气元件故障率上升的过程

断路器在高温下热脱扣器的特性发生漂移，动作灵敏度下

降,可能出现误动作或拒动作,影响保护协调。接触器因触头过热熔焊,分断能力降低,触头间电弧时间延长,导致触头烧蚀加剧。电容器在过载下内部介质损耗增加,电流不平衡易导致单体鼓包甚至炸裂,波及整个补偿组。变频器功率器件在高结温下工作,焊点和键合线因热应力疲劳而开裂,出现器件损坏。保护与测控装置在过热下精度降低,信号漂移可能造成误判,使故障处置延迟。随着时间推移,电气元件在过载作用下的故障率明显升高,成为系统可靠性下降的重要诱因。

3 矿山供电系统过载运行的影响后果与经济损失

3.1 设备寿命缩短引发维护与更换成本增加

供电线路与电气设备在过载状态下运行,寿命缩短的直接后果是检修与更换周期明显提前。电缆、开关、接头、绝缘件等关键部件需频繁替换,造成备件库存压力加大,采购与储备费用同步上升。突发性故障导致的非计划停电,不仅需要额外调配人员、工具和车辆,还增加了检修准备与复电测试环节,显著提高单次维护成本。频繁的设备停机和抢修扰乱原有生产节奏,维修人员与生产人员之间的协调难度加大,组织成本不断抬升。反复性故障还需要技术人员进行溯源分析和复核验证,增加额外的管理和技术支出。长期处于这种高频消耗状态下,年度运维费用呈现刚性增长,资本性更新项目被迫提前实施,资金周转压力持续放大,形成矿山整体运维成本上升的恶性循环。

3.2 运行故障造成的生产停工与经济损失评估

供电线路因过载而产生的故障往往直接导致矿山核心环节停机,选矿、运输、排水与通风系统均会出现连锁停摆。生产中断期间,人工工资、设备折旧、能耗等固定成本仍在持续发生,而产量清零带来的直接损失尤为显著。若合同交付受阻,不仅可能面临违约赔偿,还会削弱企业信誉,增加后续合作风险。设备频繁启停导致能耗显著上升,尤其在需量电价机制下,峰值电流叠加使电费成本陡增。恢复生产往往需要加班补产,人工与管理费用被动增加。停工时间过长还会影响矿石品位和工艺稳定性,导致部分产品返工甚至报废。间接损失包括库存结构变化、物流中断和资金链紧张,经济影响已远超直接停产损失,对企业整体盈利能力和市场竞争力构成长期压力。

3.3 过载运行对矿山安全生产整体稳定性影响

过载运行使供电系统故障概率显著增加,原有的安全冗余和备用能力被逐步侵蚀,整体稳定性下降。矿山排水和通风作为生命线系统,一旦因供电中断失效,将直接威胁作业人员安全,可能引发涌水、缺氧或瓦斯聚集等严重灾害。过载导致保护装置因高温漂移而出现拒动或误动,使局部故障无法被切除,极易演化为跨系统的连锁事故。电力波动还会影响自动化

控制与监测链路,造成信号误差和逻辑失灵,关键设备安全联锁作用受到干扰。若过载引发电气火灾,狭窄巷道和通风不足会加剧烟气滞留,救援和疏散难度大幅提升,事故扩大化风险显著。长此以往,系统运行呈现脆弱化趋势,安全边界被不断压缩,矿山整体生产稳定性与安全保障能力均受到严重挑战。

4 供电线路过载运行的监测预警与管理优化措施

4.1 实时监测系统在供电线路运行管理中的应用

实时监测系统在供电线路运行管理中的应用,依托先进的传感技术与数据通信手段,实现了对线路运行状态的全面感知与动态评估。通过在关键线段部署高精度电缆温度传感器,能够持续采集导体运行温度,结合红外热成像装置对连接点、接头等易发热部位进行非接触式测温,形成空间覆盖完整的温度场数据。分布式光纤测温技术利用拉曼散射原理,将光纤作为传感介质沿线路敷设,实现对整条线路温度分布的连续监测,具备空间分辨率高、响应速度快的特点,可精准定位温度异常区段。局部放电检测设备通过高频电流传感器或特高频天线捕捉绝缘缺陷引发的放电信号,结合信号时频特征分析,评估绝缘劣化程度。电能质量监测单元同步采集电压、电流、谐波含量、三相不平衡度等参数,利用频谱分析与趋势预测算法,识别非线性负荷接入或负荷突增带来的过载风险。所有监测数据通过专用通信网络上传至调度主站,与电网拓扑结构、设备参数及历史运行数据融合,构建基于热路模型的动态载流能力计算模块,实时推演导体温度变化趋势与绝缘材料老化速率。系统自动比对预设阈值,触发多级告警机制,并将异常信息推送至运维管理平台生成工单。监测数据与设备台账、巡视记录、试验报告等静态信息集成关联,形成完整的设备健康档案,为状态评估提供数据支撑,提升线路运维的科学性与预见性。

4.2 运行调度优化在降低过载风险中的作用

运行调度优化在降低过载风险中发挥着关键作用,其核心在于通过系统化的电力潮流管理实现负载的动态平衡。基于对负荷历史数据与实时变化规律的深度分析,调度策略对用电设备的运行时段进行有序规划,控制大功率设备的投入时序,有效抑制因集中启动造成的瞬时电流骤升。在设备驱动环节,采用软启动技术平滑电机启动过程,减少对电网的冲击电流,结合变频调速装置根据实际需求调节设备转速与功率输出,实现能耗与电流的协同控制。在配电网层面,利用环网柜与分段开关的开合状态调整网络拓扑结构,改变电流路径,将重载线路的负荷转移至轻载支路,提升整体供电能力的利用率。无功补偿装置依据母线电压与功率因数的变化规律自动投切,维持系统无功平衡,降低线路无功电流分量,减小视在电流幅值。依托分时电价等经济杠杆,推动用户调整用电行为,将部分非生产性或可间断负荷转移至电网低负荷时段运行,降低高峰期间

的线路负载率。通过实时潮流计算与热稳定极限校核,识别潜在过载节点,提前实施负荷再分配或转移方案,在不增加硬件投入的前提下提升网络运行的安全裕度。

4.3 预防性检修与维护策略的有效性分析

建立基于状态检测的检修模式,可显著提升维护的针对性与有效性。红外成像、局放检测与介损试验等方法,能够量化设备健康状况,形成动态风险评估。对检测出的热点部位,及时采取接头复紧、表面清洁等措施,减少环流和接触电阻。高温区域的电缆可通过改进敷设方式和增加散热措施降低热应力。绝缘等级下降到临界值的部件则应提前更换,避免运行中突发故障。结合 CMMS 系统,检修数据沉淀为历史数据库,可用于分析故障规律,优化资源配置,实现预防性维护的长期效益。

5 提高供电设备寿命的防控措施与实践路径研究

5.1 合理配置供电线路容量与设备选型要求

供电线路在设计阶段若容量配置不足,极易导致后期运行频繁出现过载现象。容量配置需在严格校核载流量的基础上,综合考虑敷设方式、环境温度、土壤热阻系数及成束敷设系数等因素,使导体长期运行保持在允许温升范围内。电缆及母线绝缘等级应与系统电压及现场条件相匹配,选型需兼顾耐热性能与抗潮要求。终端与接头结构设计要满足电场均压、机械强度及防水防潮功能,以避免界面缺陷导致放电。对于关键馈线,应采用 N-1 配置原则,确保在单回路出现故障时能够迅速切换,维持供电连续性。线路敷设材料应选用低烟无卤阻燃型,提高在火灾情况下的安全性能。敷设半径、张力控制、支架固定等均需满足机械强度要求,减少潜在损伤,从而为设备的长寿命运行奠定坚实基础。

5.2 加强运行人员培训与风险防控意识建设

运行人员的技能水平和风险意识直接影响供电系统的安全性和可靠性。定期培训不仅要涵盖理论知识,还应结合现场

实际,包括负荷曲线解读、越限趋势分析及热模型应用,增强对潜在过载风险的识别能力。通过红外热成像、局放信号分析等实操训练,能够提升人员对早期隐患的感知与判断水平。运行操作环节可推行标准化管理,如设置启停时序卡、互锁检查表,减少误操作的可能性。建立典型缺陷案例库,便于班组复盘和经验传承。利用信息化手段公布运行指标和隐患数据,使风险信息透明化,推动问题及时整改。定期开展电缆着火、馈线拒动、局放突升等应急演练,强化隔离措施和应急处置流程,形成可快速执行的预案,全面提升班组风险防控能力。

5.3 构建综合防控体系提升矿山电力运行效能

综合防控体系的建设应贯穿规划、设计、施工、运行和维护的全生命周期。在规划环节,要引入风险分级管控理念,将冗余配置与故障备用能力纳入方案。在建设及验收阶段,应严格执行工艺与设备检测标准,确保安装质量。运行阶段,应依托监测平台与 CMMS 系统,实现数据采集、告警生成与工单流转的自动化闭环,确保隐患能够及时发现并处理。年度技改应聚焦供电薄弱环节,如改善散热条件、增加分段能力及无功补偿装置,提升系统运行弹性。管理层还需将资产健康指数与 KPI 挂钩,推动资源向高风险部位倾斜配置。通过标准化制度、数字化技术与人员能力的协同,形成完整的风险治理链条,使矿山电力系统在高负荷场景下保持稳定,进一步延长设备使用寿命并提升运行效能。

6 结语

本文围绕矿山供电线路过载运行对设备寿命的影响及防控措施展开了系统研究,明确了过载运行导致设备绝缘退化、金属部件疲劳以及故障率上升等问题,并揭示了其对矿山生产成本、安全性和经济效益的不良影响。在分析风险机理的基础上,提出了监测预警、运行调度优化、预防性检修以及综合防控体系等措施,为矿山电力系统的高效、安全运行提供了理论依据与实践路径。通过科学的运行管理和防控措施,可以显著延长设备使用寿命,降低运维成本,保障矿山供电系统稳定运行。

参考文献:

- [1] 周凯,林俊.矿山供电线路运行风险分析及可靠性提升措施[J].煤炭工程,2023,55(4):112-118.
- [2] 陈伟,杜鹏.电力电缆过载运行对绝缘寿命影响研究[J].高电压技术,2022,48(7):2205-2213.
- [3] 韩涛,郭蕾.基于状态评估的矿山电气设备维护优化策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):136-143.
- [4] 许明,周倩.工业供电系统过载故障机理与防控路径探讨[J].电气技术,2023,24(6):45-52.
- [5] 王立,张琴.矿山电力系统运行监测与安全管理对策研究[J].能源技术与管理,2022,39(9):87-94.