

煤矿供配电系统的可靠性和连续性研究

朱瑞新

国网能源哈密煤电有限公司大南湖一矿 新疆 哈密 839000

摘要：煤矿供配电系统是保障矿井安全生产的核心设施。本文聚焦可靠性与连续性研究，系统阐述系统组成、可靠性模型构建及关键设备可靠性分析方法。针对连续性保障，提出故障隔离、快速恢复及微电网技术应用策略，并优化应急供电系统与自动化技术。进一步探讨可靠性与连续性协同优化路径，涵盖韧性设计、全生命周期管理及多目标优化方法。

关键词：煤矿供配电系统；可靠性；连续性；协同优化；应急供电

引言：煤矿生产环境复杂，供配电系统作为核心基础设施，其可靠性与连续性直接关乎矿井安全与生产效率。一旦供电中断，通风、排水等关键设备停运，将引发瓦斯积聚、突水等严重事故，威胁人员生命安全，造成巨大经济损失。然而，煤矿供配电系统面临设备老化、环境恶劣、负荷波动大等诸多挑战，故障难以完全避免。因此，深入研究供配电系统可靠性与连续性，构建科学合理的保障体系，提升系统抗灾能力与运行稳定性，成为煤矿行业亟待解决的关键问题。

1 煤矿供配电系统基础理论

1.1 系统组成与功能

煤矿供配电系统是保障矿井生产安全与高效运行的核心基础设施，其组成涵盖主供电网络、备用电源与应急系统、自动化控制与保护装置三大模块^[1]。主供电网络由高压与低压配电系统、变压器及输电线路构成，承担电能分配与电压转换任务。高压配电系统通过输电线路将外部电源引入矿井，经变压器降压后分配至低压配电系统，为采掘设备、通风系统、排水装置等提供稳定电力支持。备用电源与应急系统作为主供电网络的补充，包含柴油发电机、不间断电源（UPS）及储能装置。柴油发电机在外部电网故障时快速启动，恢复关键负荷供电；UPS通过储能元件维持短暂供电，避免数据丢失或设备停机；储能装置则通过能量储存与释放功能，平抑电网负荷波动，提升供电灵活性。自动化控制与保护装置通过继电保护技术与智能监控系统实现供配电系统的实时监测与故障隔离。继电保护装置通过检测电流、电压等参数异常，快速切断故障线路，防止事故扩大；智能监控系统集成传感器、通信模块与数据分析算法，对设备状态、电能质量进行动态评估，为运维决策提供数据支撑。

1.2 可靠性基本概念

煤矿供配电系统可靠性指系统在规定条件与时间内完成规定功能的能力，其量化指标包括可用率、故障率及平均修复时间。可用率反映系统处于可运行状态的概率，由系统正常运行时间与总时间比值确定；故障率描述单位时间内系统发生故障的频率，是评估设备老化程度的关键参数；平均修复时间衡量故障发生后恢复供电所需时长，直接影响系统连续供电能力。连续性作为可靠性的核心要求，指系统在外部干扰或内部故障下维持供电不中断的能力。保障连续性需满足多重条件：通过双回路供电、分布式发电等技术实现电源冗余；采用快速切换装置缩短备用电源投入时间；部署智能监控系统提前预警潜在故障，将非计划停电转化为计划检修，最终实现供电零中断目标。

2 煤矿供配电系统可靠性分析

2.1 可靠性模型构建

煤矿供配电系统可靠性分析需依托科学模型量化评估系统性能。基于故障树的可靠性分析方法通过构建逻辑树状结构，将系统故障分解为底事件组合，明确各事件间因果关系，进而计算顶事件发生概率^[2]。该方法适用于静态系统分析，可精准定位薄弱环节，为改进设计提供依据。马尔可夫模型则通过状态转移概率描述动态系统行为，适用于包含备用电源、自动切换装置的复杂供配电网络。该模型通过建立状态空间方程，模拟系统在不同故障场景下的运行轨迹，评估长期运行可靠性。冗余设计作为提升可靠性的核心手段，通过增加备用设备或路径，降低单一故障导致系统失效的风险。并联冗余通过多设备共同承担负荷，提高任务成功率；备用冗余则通过热备用或冷备用方式，在主设备故障时快速接管供电，确保连续性。实际应用中需结合两种模型优势，针对静态设备用故障树分析，动态切换系统用马尔可夫模型，再搭配冗余设计方案，形成全方位可靠性评估体

系，提升分析结果准确性。

2.2 关键设备可靠性研究

变压器、开关柜、电缆等关键设备的可靠性直接影响系统整体性能。变压器故障模式包括绝缘老化、绕组变形、油位异常等，可能引发局部过热或短路，需通过油色谱分析、局部放电检测等技术进行状态监测。开关柜故障多源于触头磨损、绝缘击穿或机械卡涩，需定期测试回路电阻、绝缘电阻等参数。电缆故障以绝缘破损、接头氧化为主，受瓦斯、粉尘等环境因素影响显著，需采用分布式光纤测温技术实时监测温度变化。设备老化是可靠性下降的主因，需结合运行年限、负载率等数据建立老化模型，预测剩余寿命。环境因素方面，瓦斯积聚可能引发爆炸，需配置防爆型设备；粉尘侵入会加速机械磨损，需加强密封设计。可靠性分配需根据设备重要性、故障后果及维护成本，将系统可靠性指标分解至各组件，通过优化设计参数实现整体可靠性最大化。同时需建立设备可靠性档案，记录故障类型、维护措施及运行数据，结合井下环境特性优化监测频率，针对性提升关键设备抗劣化能力，夯实系统可靠性基础。

2.3 系统级可靠性提升技术

分布式供电架构通过将电源分散布置于负荷中心，缩短供电半径，降低线路损耗与故障传播风险。该架构采用模块化设计，各单元独立运行且互为备用，显著提升系统抗灾能力。多电源协同供电策略通过整合外部电网、柴油发电机、新能源发电等资源，构建多层次供电体系。通过功率分配算法动态调整各电源出力，实现经济性与可靠性的平衡。智能监测与预测性维护技术依托物联网、大数据分析等手段，对设备运行参数进行实时采集与深度挖掘。通过建立故障预测模型，提前识别潜在故障，制定针对性维护计划，将非计划停机转化为计划检修，最大限度减少停电时间。此外，智能监控系统可集成继电保护功能，在故障发生时快速隔离故障区域，避免事故扩大，保障系统连续运行。其中新能源发电可优先选用光伏、风电互补模式，搭配储能装置平抑出力波动，同时优化功率分配算法适配煤矿负荷特性，实现技术升级与可靠性提升的双重目标。

3 煤矿供电系统连续性保障机制

3.1 连续性设计原则

煤矿供电系统连续性设计需以故障隔离与快速恢复为核心，通过物理分段与逻辑控制相结合的方式，构建多层次防护体系^[1]。故障隔离机制依赖智能分段开关与区域保护装置，在检测到短路、过载等异常时，自动切断故障线路并保持非故障区域供电，避免事故范围扩

大。快速恢复则通过备用电源投入与负荷转移技术实现，当主电源中断时，系统需在毫秒级完成供电切换，确保通风、排水等关键负荷持续运行。备用电源快速切换技术中，ATS自动转换开关通过机械与电气双重互锁，实现主备电源无缝切换，切换时间可控制在0.1秒以内，满足煤矿对供电连续性的严苛要求。微电网技术为煤矿供电提供了新思路，通过整合分布式发电、储能装置与本地负荷，形成独立于主电网的供电单元。在外部故障时，微电网可自动脱离主网并维持内部供电，通过能量优化管理降低对传统电源的依赖，提升系统抗灾能力与运行灵活性。设计时需严格遵循煤矿安全规程，将微电网与主电网切换逻辑融入应急体系，确保关键负荷切换无延时，非关键负荷有序调整，兼顾连续性与安全性。

3.2 应急供电系统优化

柴油发电机组作为煤矿应急电源的核心设备，其配置需兼顾容量冗余与启动可靠性。机组容量应覆盖矿井通风、排水等一级负荷需求，并预留20%以上裕量以应对极端工况。启动策略采用分级投入方式，优先启动关键负荷对应机组，再根据恢复进度逐步扩展供电范围，避免全矿井同时启动导致的电压波动。储能装置凭借快速响应特性成为应急供电体系的重要补充，超级电容可在毫秒级释放能量，弥补发电机启动延迟；电池储能系统通过预充电功能，在主电源失电瞬间提供瞬时支撑，防止设备停机。应急电源与主电源的协同控制需通过能量管理系统实现，该系统实时监测电网状态，在故障发生时自动触发切换逻辑，协调发电机组、储能装置与主电网的功率分配。例如，当主电源电压跌落时，系统优先调用储能装置维持关键负荷供电，同时启动柴油发电机组，待发电机组稳定运行后逐步转移负荷，确保供电过渡平滑无冲击。

3.3 自动化与智能化技术

基于SCADA系统的实时监控与故障定位技术通过部署大量传感器与通信节点，对供电系统运行参数进行全维度采集。系统利用数据融合算法分析电压、电流、温度等信号，结合拓扑分析技术精准定位故障位置，将故障排查时间从传统方法的数小时缩短至分钟级。人工智能技术在故障预测与自愈领域展现巨大潜力，通过机器学习模型分析历史数据，可提前72小时预测设备劣化趋势，指导预防性维护。例如，利用深度学习算法对变压器油色谱数据进行训练，可识别早期故障特征，避免突发性事故。自适应保护装置则突破传统继电保护固定阈值限制，根据系统运行状态动态调整保护参数。在负荷波动时，装置自动提高动作灵敏度；在系统拓扑变化

时,通过通信网络同步更新保护策略,确保保护动作准确无误。该装置还可与SCADA系统联动,在故障发生时自动隔离故障区域,并通过微电网重构恢复非故障区域供电,实现故障自愈。

4 煤矿供配电系统可靠性与连续性的协同优化

4.1 系统韧性设计

煤矿供配电系统韧性设计聚焦于提升抗灾能力与极端工况适应性^[4]。防雷设计通过优化避雷针布局、降低接地电阻等措施,将雷击过电压限制在设备耐受范围内,避免绝缘击穿事故。防爆设计针对瓦斯等易燃易爆环境,采用隔爆型设备外壳与本质安全型电路,阻断电火花引发爆炸的路径。防尘设计通过密封结构与正压通风技术,防止粉尘侵入设备内部,减少机械磨损与绝缘老化。极端工况下的供电保障策略需构建多层次防护体系,针对矿井突水、火灾等灾害场景,预先规划备用供电路径与应急电源接入点,确保通风、排水等关键系统在灾害发生后仍能维持运行。系统还应具备自适应调整能力,通过智能控制器动态优化供电策略,在负荷波动或设备故障时自动切换运行模式,保障供电稳定性。

4.2 全生命周期管理

全生命周期管理贯穿供配电系统从规划到退役的全过程。设计阶段需开展可靠性预评估,利用故障模式影响分析(FMEA)与可靠性框图(RBD)技术,量化各组件故障对系统的影响,指导设备选型与拓扑优化。运行阶段依托健康状态监测技术,通过振动分析、油色谱检测、红外测温等手段,实时评估变压器、开关柜等设备的劣化程度,结合大数据分析预测剩余寿命,为预防性维护提供依据。维护策略采用状态修与定期修相结合的方式,对关键设备实施在线监测与精准维护,对非关键设备按周期开展常规检修,平衡维护成本与可靠性收益。退役阶段需制定设备更新与系统升级计划,根据技术发展与应用需求,逐步替换老旧设备,引入分布式发电、智能保护等新技术,提升系统整体性能。

4.3 多目标优化方法

可靠性与连续性的协同优化需兼顾经济性约束,构建可靠性、连续性与成本的多目标函数。可靠性目标通

过提高设备冗余度、优化保护配置等措施实现;连续性目标依赖快速切换技术、应急电源协同控制等手段达成;经济性目标则需控制设备投资、运维成本与停电损失。多属性决策模型通过引入权重系数与效用函数,将多目标转化为单目标优化问题。该模型综合考虑技术可行性、经济合理性、环境适应性等因素,利用层次分析法(AHP)或熵权法确定各目标权重,通过线性加权或非线性规划求解最优方案^[5]。优化过程中还需考虑不确定性因素,如设备故障率波动、负荷需求变化等,采用鲁棒优化或随机规划方法,提升解决方案的适应性,确保供配电系统在不同工况下均能实现可靠性与连续性的最佳平衡。

结束语

煤矿供配电系统可靠性与连续性研究是保障矿井安全生产的关键所在。构建可靠性模型、强化关键设备维护以及应用先进技术手段,能够从多个维度提升系统应对故障的能力,增强其可靠性根基;遵循连续性设计原则、优化应急供电系统并推进自动化智能化建设,则从故障预防、快速恢复等方面保障了供电的持续稳定。而协同优化策略的实施,促使可靠性与连续性在技术、管理与经济层面深度融合、相互促进。这一系列举措有助于提升煤矿供配电系统整体抗灾能力与运行稳定性,为煤矿行业的安全高效生产筑牢坚实基础,推动行业持续健康发展。

参考文献

- [1]彭前位.高可靠性供配电系统改造技术分析[J].现代工程科技,2025,4(10):13-16.
- [2]杨立鑫,王玉亮.高层建筑电气设计及低压供配电系统可靠性分析[J].光源与照明,2024,(03):207-209.
- [3]杨顺华,杨彤.供配电系统可靠性分析[J].浙江建筑,2023,40(05):76-78.
- [4]王建民,李俊峰.市政供配电系统的可靠性分析与优化对策[J].电力系统自动化,2021,45(12):87-93.
- [5]许磊,陈鹏.基于蒙特卡洛法的市政供配电系统可靠性优化研究[J].电力系统与自动化学报,2022,34(4):23-29.