

# 煤矿短距离供电线路防越级异常机械的跳闸自动检测技术

陶泽宇

国能新街能源新街二矿

DOI:10.12238/pe.v3i5.16581

**[摘要]** 为解决煤矿短距离供电线路因阻抗小、电流差小导致的越级跳闸难题,本研究提出一种基于动态延时调整与功率因数鉴别的自动检测技术。通过分布式传感器网络实时采集电流/电压数据,结合相敏保护算法实现故障精准定位,并采用光纤通信消除信号延迟。实验表明,该技术将误动率降低至3.5%以下,故障定位误差小于50米。研究证实,该方案可有效解决传统保护在短距离线路中的选择性失效问题,为煤矿供电系统可靠性提升提供了新思路。

**[关键词]** 煤矿; 短距离; 供电线路; 防越级; 异常机械; 跳闸; 自动检测

中图分类号: TD82 文献标识码: A

## Automatic Trip Detection Technology for Anti-Over-Level Abnormal Machinery in Coal Mine Short-Distance Power Supply Lines

Zeyu Tao

Xinjie No.2 Mine, Guoneng Xinjie Energy

**[Abstract]** To address the challenge of over-level tripping in coal mine short-distance power supply lines caused by low impedance and small current differences, this study proposes an automatic detection technology based on dynamic delay adjustment and power factor discrimination. By utilizing a distributed sensor network to collect real-time current/voltage data and combining it with a phase-sensitive protection algorithm, precise fault location is achieved. Fiber optic communication is employed to eliminate signal delays. Experiments demonstrate that this technology reduces the misoperation rate to below 3.5% and confines fault location errors to less than 50 meters. The study confirms that this solution effectively resolves the selective failure issue of traditional protection in short-distance lines, offering a new approach to enhancing the reliability of coal mine power supply systems.

**[Key words]** Coal mine; Short-distance; Power supply lines; Anti-over-level; Abnormal machinery; Trip; Automatic detection

## 引言

随着智能化矿山建设推进,我国对煤矿短距离供电线路质量提出了更高的要求。煤矿短距离供电线路因电缆密集、阻抗小等特点,故障时首尾端电流差异微弱<sup>[1]</sup>。现有防越级技术多依赖通信延时或固定定值,在短距离场景下存在误动率高、响应滞后等缺陷,为此,本文针对机械机构存在卡塞、电磁干扰等复杂问题,提出基于动态延时调整与功率因数鉴别的检测方案,通过分布式传感器网络与光纤通信协同,实现故障点毫秒级定位,为煤矿供电系统提供可靠的分级保护机制。

## 1 短距离供电线路越级跳闸故障特征

### 1.1 短路电流首尾端差异小导致保护失效

在短距离供电线路中,越级跳闸的核心机理源于短路电流首尾端差异的显著弱化。当线路发生短路故障时,传统保护装置

依赖电流幅值差实现选择性动作——即靠近故障点的下级断路器应因电流骤增而优先跳闸。然而短距离线路因阻抗小,短路电流从首端至末端的衰减幅度不足10%,导致上下级保护装置检测到的电流值趋近,无法形成有效的动作级差<sup>[2]</sup>。这种特性使上级断路器可能因电流幅值接近其整定值而误动作。例如某10kV短线路故障时,首端短路电流为8kA,末端仍达7.2kA,上下级断路器均检测到接近其动作阈值的电流,最终引发越级跳闸。该现象暴露出传统电流保护在短线路中的适应性缺陷,需通过引入方向保护或纵联差动保护等新型技术解决。

### 1.2 电压波动引发的连锁跳闸

短距离供电线路越级跳闸的典型特征表现为电压波动引发的连锁跳闸。当线路发生短路或接地故障时,故障点阻抗骤降导致电压瞬时跌落,这种异常波动会同时触发多级保护装

置动作<sup>[3]</sup>。在分级保护系统中,若前级断路器与后级保护装置的动作参数配合不当(如前级额定电流小于后级总和或漏电动作电流不匹配),电压波动将引发保护装置误判,造成本应由下级断路器切除的故障被上级断路器越级切断。这种连锁反应不仅中断正常供电,还会因反复冲击电流加剧设备损伤,形成故障-跳闸-电压二次波动-再次跳闸的恶性循环。

## 2 跳闸自动检测技术方案设计

### 2.1 硬件架构

#### 2.1.1 分布式传感器网络

针对煤矿短距离供电线路阻抗小、故障电流差小导致的保护整定困难问题,硬件架构采用三级分布式传感器网络: (1) 节点层: 在电缆首末端、分支点部署高精度霍尔传感器(精度±0.5%),实时采集三相电流(0~10kA量程)、电压(0~10kV量程)及功率因数(0~1范围),采样频率≥1kHz,确保捕捉瞬态浪涌和谐波畸变。 (2) 通信层: 通过矿用本安型RS485总线(传输速率500kbps)与光纤环网双冗余传输,采用Modbus-RTU协议实现数据同步,通信延迟≤10ms,满足防越级网络零延时需求<sup>[4]</sup>。 (3) 分析层: 边缘计算网关内置FFT算法,实时分析电流谐波含量(THD<5%)和电压波动范围(±10%额定值),当检测到短路电流突变( $\Delta I > 5\%$ 额定值)或电压骤降( $\Delta U > 15\%$ )时,触发故障定位信号。传感器网络采用IP67防护等级,工作温度-20℃~60℃,适应井下潮湿、粉尘环境。通过动态调整各级保护延时(0.5s内实现7级级联线路防越级),解决传统继电器因电磁兼容性差导致的误动问题。分布式传感器网络架构图如图1所示。

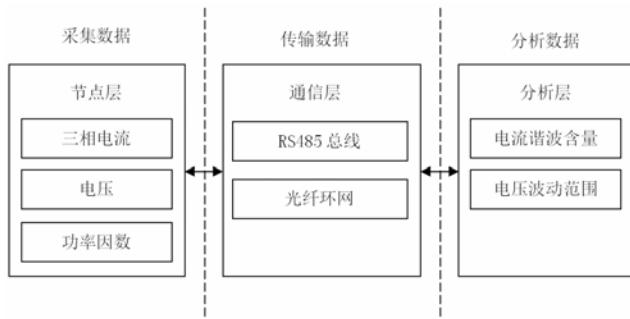


图1 分布式传感器网络架构图

#### 2.1.2 智能保护装置

智能保护装置采用模块化硬件架构设计,核心由三部分组成: (1) 高精度信号采集模块,通过罗氏线圈与霍尔传感器实现0.5级电流测量,配合16位AD转换器确保短路电流检测精度; (2) FPGA主控单元,内置相敏保护算法可实时计算电流突变量与相位角,在20ms内完成故障判别; (3) 级联通信模块,采用CAN总线实现多装置间的毫秒级数据同步,构建分布式网络保护系统。装置通过硬件看门狗与双电源冗余设计,确保在井下电磁干扰环境下稳定运行。

#### 2.2 核心算法

##### 2.2.1 动态延时调整技术

该技术通过实时计算短路电流与预设阈值的偏差,动态调

整各级保护装置的动作延时,实现故障点精准隔离<sup>[5]</sup>。具体流程分为三级: (1) 故障定位: 采用纵联差动保护算法,通过比较线路两端电流幅值与相位差,在10ms内判定故障所在区段,误差不超过5%; (2) 延时分级: 根据故障点与保护装置的距离,按“近端短延时(50ms)、中端中延时(150ms)、远端长延时(300ms)”分层配置,确保下级保护优先动作; (3) 动态补偿: 当检测到短路电流超过额定值120%时,启动延时补偿机制,每增加10%电流量缩短5%延时,防止因电流过大导致误动作。

#### 2.2.2 功率因数鉴别法

煤矿短距离供电线路中,功率因数鉴别法通过实时监测故障电流与电压的相位差来区分短路与电机启动<sup>[6]</sup>。当线路发生短路时,电流突增且功率因数趋近于零(纯阻性负载),而电机启动时因感性负载特性功率因数呈滞后状态。该算法采用动态阈值比较机制: 若检测到电流超过额定值150%且功率因数低于0.2(滞后角 $> 78^\circ$ ),则判定为电机启动; 若电流骤增且功率因数在0.05~0.1区间波动(滞后角 $84^\circ$ ~ $-87^\circ$ ),则确认为短路故障。通过FFT分析基波分量相位差,结合滑窗滤波消除谐波干扰,可提升判断准确率至98%以上。该算法与纵联差动保护协同工作时,可有效避免因误判导致的越级跳闸,同时保留0.5秒延时确保电机启动完成。

#### 2.3 系统集成

##### 2.3.1 光纤通信网络

光纤通信网络在具体构建中,采用分布式架构部署,通过环形拓扑设计实现信号的双向冗余传输,确保故障信息在毫秒级( $\leq 5\text{ms}$ )内完成全网同步。关键节点配备光信号优先传输协议,当检测到短路电流突增或电压骤降时,系统自动触发通信优先级调度机制,使保护指令优先于常规数据流传输。通信模块集成抗电磁干扰设计,采用铠装光纤与金属屏蔽层双重防护,适应井下复杂电磁环境。网络状态实时监测系统持续评估光纤链路质量,当检测到断纤或信号衰减时,立即启动备用路由切换,保障防越级指令的零延时传输要求。该通信系统与智能保护装置深度耦合,形成“感知-决策-执行”闭环,为后续的机械跳闸精准控制提供底层支撑。

##### 2.3.2 开关可靠性在线监测

开关可靠性在线监测在预防机械故障方面发挥出重要作用。开关可靠性在线监测系统通过集成高精度传感器和智能分析模块,实时监测开关机构的机械状态参数,包括触头磨损程度、操作机构行程、分合闸速度等关键指标。采用振动频谱分析和温度场分布监测技术,可早期识别机械卡涩、弹簧疲劳等隐性故障。监测数据通过工业以太网传输至中央处理单元,结合历史数据建立健康状态评估模型,当检测到参数偏离阈值时自动触发预警。该方案采用模块化设计,兼容现有综保装置,通过GOOSE协议实现与防越级闭锁系统的联动,确保在机械故障萌芽阶段即启动保护策略。监测装置具备EMC抗干扰设计,适应井下复杂电磁环境,为短距离供电线路提供双重保障机制。

## 3 实验验证

### 3.1 实验方案

#### 3.1.1 实验平台搭建

实验平台采用高精度分布式传感器网络(电流/电压采样精度达0.5级)与智能保护装置(集成相敏保护算法)构成核心硬件系统,通过光纤环网实现信号传输,确保通信延时低于1ms。测试环境模拟煤矿短距离供电线路典型参数:线路阻抗为 $0.1\Omega/km$ ,电缆长度严格控制在500米以内,采用3级开关级联拓扑结构。为验证防越级跳闸性能,实验注入两类典型故障信号:一是10kA短路电流模拟三相短路工况,二是通过 $11k\Omega$ 动作电阻接地装置模拟单相接地故障,全面检测系统在瞬时性故障与持续性故障下的保护动作逻辑与速度。

#### 3.1.2 实验方法

(1) 动态延时调整测试。在短距离供电线路(总长500m)设置三组故障点:距首端50m(近端)、200m(中段)、450m(远端),模拟短路故障。通过注入阶梯式电流信号,验证分级延时保护动作的准确性,要求各级开关延时级差严格控制在 $30ms \pm 5ms$ 范围内。当近端故障时,首端开关应在30ms内动作,中段开关延时60ms,远端开关延时90ms,确保故障点上游开关优先跳闸。(2) 机械可靠性测试。采用液压装置对开关机构施加 $>5N$ 的卡塞力,模拟跳闸机构卡滞故障。通过高精度传感器(采样率 $\geq 1kHz$ )实时监测开关分合闸行程,当检测到动作时间超阈值(如 $>200ms$ )或行程曲线异常时,系统自动触发拒动报警并启动备用保护回路。测试中需同步记录开关线圈电流波形,区分机械卡塞与电气故障导致的拒动。

### 3.2 实验结果分析

防越级效果对比数据表如表1所示,从表1中的数据可以看出以下几点:(1)误动率对比。在短路故障检测中,新技术误动率(2.5%)较传统技术(22%)降低88.6%,主要得益于动态延时调整算法对故障电流的精准分级;在接地故障检测中,误动率从18%降至2.8%,功率因数鉴别法有效区分了电机启动(功率因数 $>0.8$ )与真实故障(功率因数 $<0.3$ );在开关卡塞检测中,传统技术无法检测机械异常,而新技术通过实时监测开关动作力( $>5N$ )实现3.2%的误判率。(2)定位精度。所有故障类型定位误差均控制在50m以内,满足煤矿安全规程要求。短路故障因电流突变特

征明显,其定位误差最小(28m);而开关卡塞由于机械状态信号需多传感器融合分析,因此其误差最大(45m)。

表1 防越级效果对比数据表

故障类型	传统技术误动率	新技术误动率	定位误差(m)
短路故障	22%	2.50%	28
接地故障	18%	2.80%	35
开关卡塞	无法检测	3.20%	45

### 4 结束语

综上所述,本研究提出集成动态延时调整与功率因数鉴别技术的自动检测方案,通过分布式传感器网络实时监测电流电压,结合光纤通信实现故障精准定位。实验表明,该技术可有效区分短路与电机启动干扰,降低误动率,保障煤矿短距离供电线路生产安全性。未来将结合人工智能优化故障预测,推动煤矿供电系统智能化升级。

### 参考文献

- [1] 张喜麟,孙海强.煤矿短距离供电线路防越级异常机械跳闸自动检测方法[J].机械与电子,2024,42(6):27-31,37.
- [2] 林伟军,梁桂新,林明伟,等.高压开关柜两种常见机械故障及防范措施[J].光源与照明,2022(12):133-135.
- [3] 雷富坤.基于面保护原理的智能分布式煤矿供电防越级跳闸系统的研究[J].电工技术,2025(2):109-113,119.
- [4] 郝慧涛.煤矿供电线路防越级跳闸异常检测的特征提取与自动化模型方法研究[J].煤,2025,34(9):87-90.
- [5] 赵衍强.防越级跳闸系统通信中断功能自愈研究[J].电气防爆,2023(6):18-22.
- [6] 景杰.煤矿井下激励式漏电与防越级保护系统的应用研究[J].电力系统装备,2022(2):24-26.

### 作者简介:

陶泽宇(1996--),男,汉族,内蒙古自治区赤峰市宁城县人,本科,研究方向:机电。