

煤矿井下低压漏电保护装置改进设计与现场试验分析

程亚东 向征辉

山西鲁能河曲电煤开发有限责任公司上榆泉煤矿 山西 忻州 034000

摘 要: 针对传统煤矿井下低压漏电保护高阻检测弱、易误动越级跳闸、智能化不足问题,先剖析漏电故障机理与装置缺陷,提出软硬件一体化改进方案。选用高速DSP搭建硬件平台,融合多判据与时频特征算法,构建分级协同保护策略。经仿真与井下72h现场试验验证,改进装置20k Ω 高阻漏电可可靠动作,平均动作时长58ms,选线正确率91.7%,抗干扰与供电连续性大幅提升,可为智能矿井漏电防护提供技术支撑。

关键词: 煤矿井下; 低压漏电保护装置; 改进设计; 现场试验

引言: 井下低压电网环境恶劣,高阻漏电隐蔽性强,易诱发瓦斯爆炸安全事故。现有漏电保护受对地电容、变频干扰制约,存在检测门槛高、选择性差、无故障溯源功能等短板,难以适配智能化矿山供电管控需求。为解决设备拒动、越级停电难题,本文分析漏电故障演化规律,从硬件采集、智能算法、分级保护开展优化设计,通过仿真与工业现场试验验证改进效果,为矿用漏电保护装置升级提供可行方案。

1 煤矿井下低压漏电故障机理及原有装置缺陷分析

1.1 井下低压电网结构与漏电故障类型

(1) 煤矿井下低压供电系统通常采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式,电压等级主要为660V、1140V及3300V,由采区变电所、移动变电站、馈电开关及电缆线路构成树形放射式网络。该结构分支多、线路长、环境恶劣,系统对地电容电流较大,单相接地时故障点残留电流呈容性特征,给选线与定位带来困难。

(2) 井下低压漏电故障分为三类:单相漏电(一相对地绝缘电阻下降)、相间漏电(两相经电弧或过渡电阻短接)及高阻漏电(过渡电阻达数k Ω 甚至数十k Ω ,由电缆老化、受潮或机械损伤引起)。高阻漏电时故障特征微弱,传统装置难以有效提取与判别^[1]。(3) 故障诱因包括电缆绝缘老化、机械砸伤、潮湿积水及操作过电压等。发展规律呈“潜伏—劣化—击穿”渐进过程,初期为间歇性高阻漏电,后期演变为永久性故障,严重时可能引发相间短路与瓦斯煤尘爆炸事故。

1.2 低压漏电保护基本工作原理

(1) 零序电流原理利用零序电流互感器检测各线路零序电流,故障线路零序电流幅值显著大于非故障线路,通过幅值比较实现选线跳闸。零序电压原理通过检测三相不平衡电压启动保护,两者常配合使用以提高启动可靠性。(2) 功率方向型漏电选线保护基于故障线路

与非故障线路零序功率方向相反的特性,通过判别零序电压与零序电流相位关系实现选线。该原理在中性点不接地系统中效果较好,但受系统对地电容及消弧线圈补偿度影响。(3) 传统漏电闭锁保护在开关合闸前对负荷侧绝缘电阻进行监测,当电阻低于闭锁整定值(如1140V系统一般为40k Ω)时闭锁合闸回路并报警,防止设备带“病”投入运行。

1.3 现有漏电保护装置现存问题分析

(1) 检测精度不足。装置基于工频稳态信号提取故障特征,当过渡电阻超过3~5k Ω 时,零序电流衰减至mA级,远低于装置动作门槛,高阻漏电长期潜伏无法有效识别。(2) 抗干扰能力差。大功率变频设备启动、负荷剧烈波动时,系统中产生大量暂态干扰信号,现有算法时频分辨能力不足,难以区分真实漏电与干扰,易造成误动或拒动。(3) 保护选择性差。多级辐射式网络中各级阻抗差异不显著,故障电流级差特性不明显,常导致上级馈电开关越级跳闸,造成大范围非故障区域停电,影响矿井正常生产。(4) 智能化程度低。装置缺乏故障波形记录、绝缘在线监测及自诊断功能,故障后无法提供故障距离、过渡电阻值等关键信息,运维需人工逐段排查,难以满足智能化矿山建设需求。

2 煤矿井下低压漏电保护装置改进设计

2.1 装置改进总体设计方案

(1) 改进设计目标。针对现有装置检测精度不足、抗干扰能力差、保护选择性不佳及智能化程度低等缺陷,确定改进目标为:高阻漏电检测能力提升至20k Ω 以上,系统单次故障处理时间缩短至100ms以内,全工况下不误动、拒动,实现故障精准选线与智能预警。(2) 整体架构设计。采用“高性能硬件平台+多判据融合算法+智能决策软件”一体化优化思路。硬件层负责高保真信号采集与快速执行输出;算法层融合时频域多特征提取

与自适应阈值判断;软件层集成故障诊断、数据存储与远程通信功能,三层协同提升装置综合性能。(3)分级保护技术方案。干线采用“零序功率方向+暂态特征”综合判据,侧重选择性,确保越级跳闸率降至最低;支路采用“零序电流幅值+绝缘在线监测”判据,侧重灵敏性,确保高阻漏电可靠动作。两级保护通过通信总线交换整定参数与故障信息,形成上下级协同配合的分级差异化保护策略。

2.2 硬件系统改进设计

(1)核心主控模块选型与优化。选用高性能32位浮点DSP(如TMS320F28377D)作为主控芯片,主频200MHz以上,集成硬件浮点运算单元与三角函数加速器,单周期可完成多条乘加指令,数据处理速度较传统单片机提升10倍以上,满足多通道高速同步采样数据的实时解算需求。(2)信号采集模块改进。采用16位高精度同步采样ADC(如ADS8364),对三相电压、三相电流及零序信号进行同步采集,采样率提升至12.8kHz/通道。零序电流互感器选用高磁导率坡莫合金铁芯,配合差分放大与多级有源滤波电路,有效抑制共模干扰,使微弱零序信号检测分辨率提升至0.5mA^[2]。(3)执行与闭锁模块优化。采用“高速光耦隔离+IGBT固态开关+电磁保持继电器”复合驱动方案,软件判断与硬件闭锁双通道冗余设计。动作指令发出至执行机构响应时间控制在3ms以内,较传统电磁式继电器(20~50ms)大幅缩短,显著提升故障切除速度。(4)防爆、防尘、抗干扰硬件适配设计。外壳采用隔爆型设计,满足GB3836防爆标准;各接口与面板缝隙采用硅橡胶密封圈及环氧树脂灌封工艺,防护等级达IP65。模拟与数字电路分区布局,电源及信号线采用屏蔽双绞线并配置磁环滤波器,整机通过电磁兼容性试验验证。

2.3 软件与算法改进设计

(1)多判据融合漏电检测算法。同时提取零序电流幅值、零序电压相位、负序分量及暂态高频能量特征,采用加权投票机制对各判据输出进行融合决策。单一判据受干扰时自动降低权重,多判据协同确认后触发保护动作,兼具高灵敏性与高可靠性。(2)自适应阈值调整算法。实时跟踪系统正常运行状态下的零序不平衡分量与负荷电流变化,采用滑动窗口统计方法动态计算噪声基准与浮动阈值。当负荷大幅波动时,保护门槛自适应跟随调整,有效避免传统固定门槛引发的误动与拒动问题。(3)故障精准定位与选线算法。利用各馈出线零序电流暂态首半波极性及能量比进行选线,结合故障时刻前后各线路的暂态零序电流波形相似度分析,在多级辐射状网络中准确识别

故障支路,定位准确率提升至95%以上^[3]。(4)故障自诊断与远程监测程序设计。装置周期性对内部电源、采样通道、通信链路及存储单元进行自检,异常时自动报警并上传故障代码。配备大容量存储芯片,连续记录绝缘电阻、零序电压等关键参数的日变化曲线,通过RS485或以太网接口上传至地面监控中心。

2.4 改进装置性能仿真分析

(1)仿真模型搭建。基于MATLAB/Simulink搭建典型井下低压辐射状供电系统仿真模型,包含三级馈电网络、各类负荷模型及不同漏电故障模拟模块,设置单相经不同阻值(0~20k Ω)接地、相间短路、弧光漏电等多种故障工况,全面验证改进装置性能。(2)改进前后检测精度与响应速度对比。仿真结果表明,过渡电阻为10k Ω 时,原有装置零序电流检测值偏离实际值达35%,改进装置偏差控制在5%以内。高阻故障(20k Ω)原有装置完全无法启动,改进装置可靠动作,全故障类型平均动作时间由原来的120ms缩短至65ms^[4]。(3)抗干扰性能验证。在系统中接入变频器与大型电机启动等干扰源工况下,改进装置采用自适应阈值与多判据融合策略,误动次数降为零,拒动率由原来的12%降至1%以下,稳态及暂态过程中选线正确率均保持在96%以上,有效验证了改进方案对井下复杂电磁环境的适应能力。

3 煤矿井下低压漏电保护改进装置现场试验与结果分析

3.1 现场试验方案设计

(1)试验矿井与试验巷道供电系统概况。选取某高瓦斯矿井采区变电所为试验地点,系统额定电压1140V,中性点经消弧线圈接地。供电系统包含2台移动变电站、4条干线及12条支路,电缆总长约2.8km,对地电容电流约4.5A,具备典型井下辐射状供电网络特征。(2)试验设备安装、接线及调试方案。改进装置与原馈电开关保护器并联安装,采用“原装置监测、改进装置优先动作”模式。零序电流互感器安装于馈电开关出线侧,零序电压取自三相电压互感器开口三角绕组。安装后逐回路检查绝缘、校验通信,确认采样数据稳定后进入试验。(3)试验项目、测试指标及评判标准。试验包括常规及高阻漏电动作试验、闭锁与选线试验、负荷波动适应性试验、抗干扰及72小时连续运行考核。评判标准:动作误差 $\leq 5\%$,高阻漏电(20k Ω 内)可靠动作,选线正确率 $\geq 95\%$,误动与拒动次数为零。

3.2 现场功能性试验

(1)常规漏电故障保护动作试验。采用电阻箱在支路末端模拟1k Ω 、2k Ω 、5k Ω 单相接地故障。改进装置动

作值与整定值最大偏差3.2%，平均动作时间58ms；原装置平均动作时间116ms，改进装置动作精度与速动性均显著提升。（2）高阻漏电故障检测与保护试验。设置10k Ω 、15k Ω 、20k Ω 三种高阻漏电工况。改进装置在10k Ω 和15k Ω 时全部可靠动作，20k Ω 时成功动作4次（成功率80%）；原装置在10k Ω 以上无法启动，改进装置高阻检测能力明显增强。（3）漏电闭锁功能、故障选线功能试验。开关分闸状态下逐步降低绝缘电阻，改进装置在40k Ω 闭锁整定值时可靠闭锁并报警，响应时间较原装置缩短42%。选线试验中改进装置正确选出11条故障支路，选线正确率91.7%，远高于原装置的66.7%^[5]。（4）不同负荷工况下装置稳定性试验。在30%、60%、100%额定负荷下分别测试，改进装置动作值最大偏差4.1%，原装置满载工况下偏差达18.6%，改进装置负荷适应性明显占优。

3.3 装置抗干扰与可靠性试验

（1）井下电磁干扰环境下运行试验。在采煤机启动、变频调速等强干扰源运行时段注入单相漏电故障20次。改进装置无一误动、无一拒动，选线正确率95%；原装置出现5次误动和3次拒动，改进装置抗干扰能力显著领先。（2）长期连续运行稳定性测试。装置连续运行72小时，采样零漂稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内，内部温升不超过12℃，无死机、复位等异常，长期运行可靠性满足井下要求。（3）误动、拒动率统计分析。全部200次试验中，改进装置误动0次、拒动2次（均为20k Ω 极端工况）；原装置误动12次（误动率12%）、拒动9次（拒动率9%），改进装置可靠性指标全面占优。

3.4 试验结果对比与综合分析

（1）改进装置与传统装置各项性能指标对比。高阻检测能力：改进 $\geq 20\text{k}\Omega$ ，原 $\leq 5\text{k}\Omega$ ；平均动作时间：58ms vs 116ms；选线正确率：91.7% vs 66.7%；误动/拒动

率：0 vs 12%/9%；负荷波动偏差：4.1% vs 18.6%。改进装置各项指标全面优于原装置。（2）装置改进优势与实际应用效果分析。多判据融合算法与自适应阈值策略解决了高阻漏电检测及负荷适应性差的难题；高速DSP与固态执行方案大幅缩短故障切除时间；暂态选线算法显著提升定位精度，有效遏制越级跳闸，提升供电连续性与安全性。

（3）试验过程存在的问题及优化建议。20k Ω 极端高阻工况仍有20%启动失败率，建议进一步优化暂态微弱信号提取算法。井下个别位置通信信号衰减较大，建议增设中继器或改用光纤接口。操作界面菜单层级偏多，建议简化人机交互流程，增加一键式故障报告导出功能。

结束语

本文完成井下低压漏电保护装置全流程改进与现场验证，多判据融合、自适应阈值及分级保护有效弥补传统设备短板，高阻检测、速动性、抗干扰指标显著优化。试验表明极端20k Ω 高阻工况仍存在动作短板，井下通信衰减、人机交互繁琐问题待完善。后续可优化微弱暂态信号提取算法，升级光纤通信与人机界面，进一步提升装置长期运维可靠性与智能化管控水平。

参考文献

- [1] 崔智明.煤矿井下低压供电系统远程集控漏电试验平台设计研究[J].中国煤炭,2024,50(01):101-107.
- [2] 胡宝岭,贾江伟.煤矿井下电网选择性漏电保护器设计[J].电子测试,2024,7(01):37-40.
- [3] 张敏,刘军.煤矿井下供电系统漏电保护配置问题及对策[J].电气技术,2025,26(10):78-83.
- [4] 曾小军.煤矿井下选择性漏电保护系统设计与应用研究[J].矿业装备,2024,21(04):37-39.
- [5] 张强,李明.煤矿井下低压电网漏电保护技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2022,50(03):145-151.