

矿用隔爆型开关保护功能检测技术探讨

连宇东

1.中国煤炭科工集团太原研究院有限公司 山西 太原 030006

2 煤矿采掘机械装备国家工程实验室 山西 太原 030006

【摘要】：针对煤矿井下供电环境复杂，传统矿用隔爆开关保护检测技术存在故障判别精度低、抗干扰能力弱、易发生误动拒动及越级跳闸等问题，本文结合井下电网故障特征，优化保护检测判定逻辑。分别采用 DSP 分布式检测架构与 PLC 智能控制方案，改进漏电、短路、过载及负序保护检测方式，依托相位幅值综合判据、分级时限保护及软硬件抗干扰设计优化检测性能。工程测试表明，优化后的检测系统可精准识别各类电网故障，有效区分设备启动电流与故障电流，具备优异的实时性与抗干扰性，显著提升了井下供电保护系统的运行可靠性与安全性。

【关键词】：矿用隔爆开关；供电保护；故障检测；DSP；PLC

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.069

引言

煤矿井下供电系统是矿山设备运行的核心保障，井下潮湿、高压、强电磁干扰的特殊工况，极易造成供电线路绝缘破损、负荷波动异常，频发的漏电、短路、过载等故障严重威胁煤矿安全生产。随着煤矿智能化开采推进，高压供电逐步深入工作面，对馈电开关保护的故障识别精度、动作选择性与运行稳定性提出了更高标准。传统单一化的电流保护检测模式，无法适配复杂井下电网的故障判别需求，存在明显的技术短板。为此，结合井下电网故障特性，优化软硬件检测方案、升级保护检测技术，对筑牢煤矿供电安全防线、保障矿山连续稳定生产具有重要的工程应用价值。

1 矿用隔爆馈电开关保护功能检测技术探讨

1.1 井下供电系统故障特征与保护需求分析

井下供电系统所处工况具备独有属性，低压馈电电缆布设巷道环境错综复杂，潮湿水汽、顶板挤压形变、外力磕碰磨损都会侵蚀线缆绝缘性能。漏电类故障在井下全部电气故障占比接近七成，极易诱发瓦斯爆燃类恶性安全事件。大功率机电设备启停更迭、负载动态起伏会干扰短路及过载故障甄别工作，依托单一电流阈值搭建的传统保护判定模式很难甄别电机启动涌流与短路冲击电流，保护装置常会出现动作偏差^[1]。采掘工作面高压延伸布设模式推进过程里，采区变电所馈电开关保护动作精准度、分级配合特性、故障响应速度面临更严苛约束，故障检测装置需精准辨识多种非对称故障形态并配置完备后备保护配置，梳理各类故障固有特征能够为保护方案拟定、井下供电运行安全管控筑牢底层支撑。

1.2 现有馈电开关保护检测技术存在的问题

现有馈电开关保护检测技术在井下复杂环境中存在明显不足（见图1）。基于 DSP 的负序保护依赖移相电路提取负序分量，井下温度变化导致元器件参数漂移，移相精度下降，易引发误动或拒动。选择性漏电保护依赖 PROFIBUS 总线传输零

序电压信号，井下电磁干扰严重，通信中断或延时增加将导致分支开关无法准确判断相位关系，纵向选择性失效，非故障支路被误断。基于 PLC 的相敏保护采用固定门槛值的模拟比较器，无法自适应调整，在功率因数角差异较小时分辨能力不足。电流互感器在负荷剧烈波动时铁芯易饱和，采样波形畸变，致使过载保护反时限动作时间计算偏离实际值，影响电缆热积累保护的准确性。

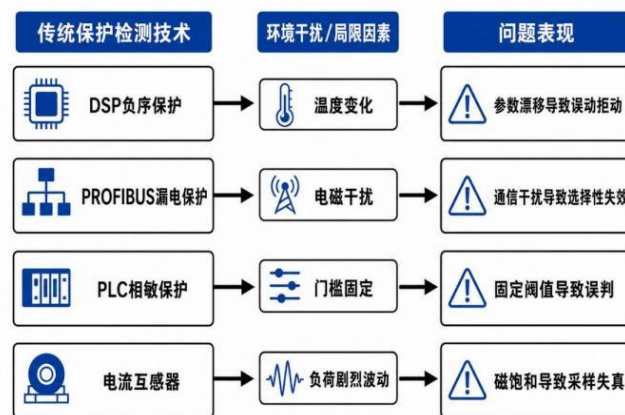


图1 矿用隔爆型馈电开关传统保护检测技术问题对比

1.3 提升保护检测性能的技术改进方向

针对选择性漏电保护检测，采用幅值与相位综合判据，总馈电开关捕获零序电压，分支开关采集零序电流，故障支路零序电流滞后零序电压 90° ，非故障支路超前 90° ，相位分辨精度控制在 $\pm 3^\circ$ 以内，分支开关延时 $30\sim 50\text{ms}$ ，总开关延时 $100\sim 150\text{ms}$ 。相敏保护通过鉴相器测量功率因数角，电流超整定值且功率因数高于 0.7 时判定短路并速断。过载保护按反时限特性将过载倍数分段映射延时，热积累达临界值时跳闸。负序保护经阻容移相提取负序分量，上电自检相序错误则闭锁报警。各板卡光电隔离、差分传输增强抗干扰，PROFIBUS 汇总

数据至主控制器动态调整保护定值。

2 高压防爆组合式馈电开关检测系统设计

2.1 系统总体架构与分布式检测单元配置

系统采用两级分布式架构,由2个主回路和4个分支回路构成,各回路均以DSP芯片TMS320LF2407A作为独立的主控制器。主回路馈电开关为主站,分支回路为从站,从站不主动发送数据,所有命令与数据传输均由主站控制^[2]。每个检测单元配置完整的信号采集模块,包括电压电流互感器、零序电压电流采集电路、功率因数角检测电路和负序分量提取电路,实现对各支路三相电压、三相电流、零序电压、零序电流及功率因数等多参数的同步采集。采集数据经信号调理、光电隔离和A/D转换后送入DSP进行FFT运算,实时计算电参量。各检测单元通过PROFIBUS总线联网通信,最大传输速度达12 Mb/s,确保主站实时获取各分支从站的运行状态与故障信息,并在发生漏电等故障时下达选择性分断指令。

2.2 基于DSP的信号采集与故障判别处理

依托TMS320LF2407A型DSP搭建信号采集与故障判别处理模块,整套检测系统以此作为核心运算载体,电压、电流互感器持续采集三相电信号与零序分量,信号送入调理电路完成前期规整处理后交由片内A/D模块完成模数转换。软件程序搭载快速傅里叶变换算法提取波形内部电压电流幅值、功率因数角、负序分量等关键电气参数,短路判别环节结合电流阈值与功率因数角规避电机启动带来保护误判,过载工况依托反时限模型动态整定跳闸时延,漏电判别调取总线传输零序电压数据,比对本地铁序电流幅值相位锁定故障线路。各类故障判定结论经由I/O端口输出驱动对应执行机构,相关运行数据同步录入本地显示存储模块完成留存归档。

2.3 PROFIBUS总线通信与选择性漏电检测实现

系统采用两级分布式结构,主回路馈电开关作为主站,分支回路馈电开关作为从站,所有通信由主站控制,从站不主动发送数据。各回路控制器通过PROFIBUS总线互联,最大传输速度可达12 Mb/s,满足实时监控对数据传输速率的要求。选择性漏电保护中,总馈电开关采集零序电压 U_0 ,分支开关采集所在支路零序电流 I_0 。故障时总开关将 U_0 经总线发送至各分支控制器,各分支依据零序电流幅值及 U_0 与 I_0 的相位关系独立判别故障支路——非故障支路 I_0 超前 U_0 90° ,故障支路 I_0 滞后 U_0 90° 。总、分支开关间采用时限差原理实现纵向选择性,当分支拒动时总开关延时动作,防止越级跳闸。

3 基于PLC的智能馈电开关保护检测方案

3.1 PLC控制核心与电网参数检测电路设计

智能馈电开关保护检测方案选用台达DVP系列PLC作为控制核心,具体型号为DVP14SS11R,该控制器具备紧凑型结构设计和可靠的逻辑运算能力,适用于煤矿井下空间受限且环

境恶劣的安装条件。电网参数检测电路通过电压互感器和电流互感器分别从三相供电线路中提取电压和电流信号,经降压、整流、滤波及比例变换等预处理后,将高电压和大电流转换为PLC模拟量模块可接收的标准化低电平信号。检测电路涵盖三相相电压、线电压、三相电流以及零序电压和零序电流等多维度参数采集通道。PLC内部A/D转换单元将模拟量转化为数字量,在过压保护中当检测电压超过额定值110%时触发动作,欠压保护在电压低于额定值75%时启动延时判定,过载保护依据电流幅值结合反时限特性确定动作延时。整套检测电路采用光电隔离技术将强电侧与弱电侧分离,保证了控制系统的安全稳定运行。

3.2 相敏保护及欠压过压过载的硬件快速检测

相敏保护电路的设计区分电动机启动电流与线路末端短路电流,其硬件实现依赖于对同一相电压与电流信号相位差的检测。电压互感器与电流互感器分别取出的信号经调理单元整形后送入相位比较电路,输出反映功率因数角的脉冲信号,该脉冲宽度经光电隔离后送至控制器进行判定^[3]。当线路电流幅值超过整定值时,控制器启动对功率因数角的检测,若功率因数角较小则判定为短路故障并执行速断跳闸,反之则闭锁保护以避免电动机启动时的误跳。欠压与过压保护通过电阻分压网络降压后送入电压比较器,当检测电压低于额定值的75%或高于110%时,比较器输出动作信号经RC延时送入PLC执行跳闸逻辑。过载保护采用电流互感器获取线路电流,经整流滤波后与阶梯阈值电路比较,PLC根据输入通道判断过载程度并结合内部计时器实现反时限特性。

3.3 开关自检与故障响应控制流程优化

基于PLC构建的智能馈电开关保护检测方案中,合闸之前预先执行安全自检环节,控制器对井下电网绝缘电阻值进行测定,同时接入瓦斯浓度传感信号进行环境安全判别。绝缘正常且瓦斯浓度处于允许范围内时,系统方可解锁允许合闸操作;若绝缘阻值低于整定阈值或瓦斯超限,馈电开关立即进入自锁保护状态,触摸屏同步显示故障类型代码,阻止合闸动作以避免电火花引发瓦斯事故^[4]。安全自检通过后,系统进入参数整定阶段,接受通过键盘输入模块设定的过载整定电流、短路倍率、欠压及过压阈值等保护动作门限值。合闸投入运行后,PLC执行循环自检监视任务,对各馈电支路的电压、电流及零序分量进行持续采样比对。一旦检测到参数超出整定范围,控制器迅速输出断电指令,驱动继电器断开对应断路器,同时将故障数据存入存储器,触摸屏切换至故障报警界面,明确指示故障支路与故障性质。

4 保护功能检测技术的工程应用与性能验证

4.1 短路与过负荷保护的动作特性检测验证

馈电开关保护功能现场工程验证阶段,短路、过载两类保

护动作特性测试可直观反映整套保护系统运行可靠程度^[5]。短路保护试验主要校验电流速断判定准则与相敏辨识逻辑实际适配效果,向保护装置注入幅值、功率因数角存在差异的模拟故障电流,校验系统区分电机启动涌流和线路末端短路电流的能力,抑制保护误动作问题,试验样本涵盖三相短路、两相短路、单相接地典型故障工况,采集装置实际动作时长校验故障跳闸响应速度。过载保护试验围绕反时限动作规律开展,对照过载倍数 β 和动作时长对应匹配关系施加梯度过载电流,实测动作时延和预设理论曲线契合程度,高过载工况匹配更快跳闸逻辑,轻微过载状态预留耐受时长匹配线缆热量散耗需求。装置故障存档模块搭配触摸屏界面调取比对所有试验数据,校核保护定值整定精度与动作时序匹配合理性。

4.2 选择性漏电保护的相位幅值综合判定检测

选择性漏电保护的相位幅值综合判定检测在工程验证中主要检验分支开关对零序电压与零序电流相位幅值关系的辨识准确性。测试过程中,在各级支路分别设置单相接地漏电故障模拟点,通过故障录波装置同步捕获总馈电开关处零序电压波形与各分支馈电开关处零序电流波形。对比分析录波数据可知,故障支路零序电流与零序电压相位差为滞后 90° ,非故障支路则为超前 90° ,相位分辨精度控制在 $\pm 3^\circ$ 以内。幅值检测方面,故障支路零序电流幅值近似等于其余非故障支路对地电容电流的代数和。设置不同过渡电阻模拟不同程度漏电故障,实测分支开关动作时间分布在 $30\sim 50\text{ms}$,总开关后备保护延时 $100\sim 150\text{ms}$,确保横向与纵向选择性均满足设计要求,非故障支路保持正常供电,见表1。

表1 漏电动作时间试验数据表

零序 电流 整定 值/A	零序 电压 整定 值/V	动作时间 整定值/ms	实测动 作时间 1/ms	实测动 作时间 2/ms	实测动 作时间 3/ms	实测动 作时间 4/ms

参考文献:

[1] 李计军.矿用隔爆兼本质安全型组合开关保护系统的设计[J].矿业装备,2022,(4):269-271.
[2] 李洋,苏大鹏.矿用隔爆型移动变电站用高压真空开关和低压侧保护箱中PLC故障分析和处理[J].现代工业经济和信息化,2021,11(11):275-277.
[3] 朱锐.矿用隔爆型高压开关智能综合保护系统研究[J].机械工程与自动化,2021,(1):156-157+160.
[4] 常国祥,刘岫岭,王鸿伟.矿用隔爆组合开关智能故障诊断系统研究[J].煤炭技术,2024,43(6):265-268.
[5] 杨海鹏,刘明龙,刘强,等.矿用隔爆型移动变电站开关故障原因及解决方法分析[J].能源技术与管理,2021,46(2):116-117.

0.5	5	<100	35	41	62	88
0.5	5	$500\pm 10\%$	482	485	480	490
6	25	$1000\pm 10\%$	925	930	918	920
6	25	$1500\pm 10\%$	1386	1417	1420	1445

(注:续表1)

4.3 系统抗干扰能力与运行可靠性检测评估

高压隔爆组合式馈电开关检测系统长期处于井下复杂电磁环境,自身抗干扰水平与运行稳定性直接决定保护动作判断精准度。硬件设置光电隔离电路隔断开关量收发单元与DSP主控单元电气联系,阻断强电扰动窜入低压控制回路,电压电流采样通路增设低通滤波结构削弱高频杂波对采样数据造成偏差,整体模块化布局对各单元交互信号增设隔离处理,缓解模块内部互相串扰问题。软件依托FFT算法完成电网电气参量实时频谱解析,借助频域滤波滤除工频以外各类干扰谐波,保障故障特征参数提取质量。通信链路选用PROFIBUS总线架构,差分传输模式对共模干扰具备良好抑制效果,总线传输速率最高可达 12Mb/s ,快速完成故障信息交互传递,减少电磁扰动诱发的数据传输差错,整体适配井下复杂作业场景,稳步提升整套设备的长期运行稳定性。

5 结语

井下恶劣作业条件容易催生漏电、短路、过载等多种供电异常,传统开关保护检测方案抗干扰性能不足,故障分辨精度与自适应调节能力存在明显短板,无法匹配矿井供电安全管控实际要求。调整故障判定准则并搭建DSP分布式检测架构,搭配PLC智能控制模式可改善保护误动、拒动现象,提升故障识别速率与判定准确度。依托相位幅值联合甄别、阶梯时限保护及软硬件抗干扰优化手段区分不同电网故障类型,遏制越级跳闸等异常工况,实测结果证明这套检测方案动作表现稳定,可为隔爆开关检测迭代与井下供电平稳运行提供技术支撑。