

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能检测分析

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】：针对煤矿井下恶劣工况下馈电开关漏电闭锁检测存在参数匹配失准、馈电开关保护配合存在试验盲区、传统检测操作安全隐患大且适配性差等问题，开展漏电闭锁功能专项检测技术研究。结合煤矿安全规程及井下电网运行特性，优化设计多电压等级适配测试回路，搭建 DSP 高精度信号采集计时系统，完善电网分布参数模拟切换方案，并改进分级分项检测试验方法。有效解决了传统检测无法复现井下电网参数波动、保护校验不全面、操作安全性低等难题，精准验证各级开关漏电闭锁动作性能与选择性，可为井下馈电开关漏电保护检测标准化、设备安全稳定运行提供技术参考。

【关键词】：矿用隔爆馈电开关；漏电闭锁；检测技术；选择性保护；试验优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.056

引言

井下煤矿供电系统长期处于潮湿、多粉尘、参数动态波动的复杂工况，电缆绝缘老化、电网参数偏移等问题频发，使得馈电开关漏电闭锁保护的稳定运行面临严峻挑战。漏电闭锁装置是遏制井下漏电故障、防范触电事故与电气短路事故的关键装置，其动作精度与可靠性直接决定井下供电系统的安全稳定性。现阶段现场检测工艺老旧，受电网分布电容、电压等级差异、上下级开关配合偏差影响，普遍存在检测精度不足、校验覆盖不全、操作安全性差等问题。为此开展漏电闭锁功能检测技术研究，剖析核心技术难题，优化试验装置与检测方法，对提升井下电气保护校验水平具有重要工程意义。

1 矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能检测的必要性分析

1.1 井下供电环境与漏电闭锁的安全保护效能

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能检测具备现实推行价值，井下供电系统长期处在复杂恶劣运行工况之中，环境内潮气、淋水、堆积煤尘持续侵蚀电缆绝缘结构，绝缘阻值会出现持续性衰减，闭锁功能发生异常后设备外壳持续带电运转，井下现场作业人员触电伤害隐患随之上升。大功率机电设备启停频次偏高催生操作过电压和谐波扰动，干扰保护装置信号采集与工况判别流程，极易出现整定参数偏移或保护拒动问题。各支路敷设长度不一致带来单相接地电容电流动态起伏，漏电闭锁设定参数需要适配这类动态变化，参数匹配失衡会引发误闭锁或保护失灵问题，针对性开展系统性检测能够校核参数整定准确度、运行稳定性与抗干扰水平，整体夯实整套漏电保护体系运行可靠程度。

1.2 规程要求与现场检测执行难点

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能检测具备现实必要性，该类工作依托《煤矿安全规程》针对井下供电网络绝缘监测、漏电保护配置设置的硬性约束条文，规范划定各电压档位适配

的漏电闭锁电阻整定数值与对应动作响应时长。现场落地存在不少技术阻碍，井下供电线路拓扑结构繁杂，总馈电单元、分支馈电设备与末端开关整定参数需要逐层适配，线路固有分布电容、对地绝缘电阻实时波动干扰检测精准程度。远距离人工漏电试验受制于隔爆壳体构造，常规内置电阻试验模式需开启壳体接线，极易诱发电气失爆风险，井下高湿工况持续改变线路绝缘状态。检测配套设备搭载可调模块，可模拟电网对地电容、对地电阻，校核保护器件动作临界区间，厘清各级保护选择性匹配适配状态。

1.3 现有检测手段的适用性局限

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能的检测必要性源于井下供电系统对地绝缘电阻持续下降的特殊运行环境^[1]。该功能作为开关合闸前的前置安全屏障，当负载侧绝缘电阻低于整定阈值时主动闭锁合闸回路，可杜绝带隐性接地故障投运，规避单相接地引发的继发性短路或人身触电风险。现有常规检测手段在适配性层面存在显著局限，实验室条件下采用固定电阻模拟漏电的方法无法复现井下分布电容对漏电流幅值及相位的影响，当线路长度变化导致对地电容波动时，电容电流的补偿效应会改变保护器采样的零序电压幅值，致使实验室整定合格的开关在现场出现拒动或误动。同时常规检测依赖人工开盖接线操作，测试周期长且覆盖率低，难以满足多级馈电开关的周期性检测需求，也缺乏对漏电闭锁与漏电动作两类保护特性的协同验证能力。

2 漏电闭锁功能检测的关键技术问题

2.1 电阻整定值与电压等级的匹配问题

漏电闭锁功能的整定电阻值需严格匹配不同电压等级，127V、660V 及 1140V 系统对应的单相漏电闭锁电阻整定值分别为 4k Ω 、22k Ω 及 40k Ω ，动作值偏差不得超过 $\pm 20\%$ 。该匹配关系直接决定保护的灵敏度与选择性，电阻偏大可能导致保护拒动，偏小则引发误跳闸。试验电阻的功率容量亦需同步匹

配, 660V 系统须选用 $11\text{k}\Omega/10\text{W}$ 电阻, 1140V 系统须采用 $20\text{k}\Omega/10\text{W}$ 规格, 确保热稳定性。实际应用中需配置多档位电阻切换模块并定期校验精度, 同时考虑分布电容对检测回路的干扰, 高电压等级下电缆对地电容增大会使检测电流相位漂移, 干扰整定值判定, 须采用温度补偿特性元件提升长期稳定性。

2.2 总馈与分馈开关选择性配合的试验盲区

在总馈与分馈开关选择性配合的漏电闭锁功能检测中, 存在因动作时间与零序电气量整定差异形成的试验盲区 (见图 1)。总馈电开关采用直流对地绝缘电阻监测, 动作时间整定为 200ms 范围, 分馈电开关则依据负载侧零序电流与零序电压感应实现选择性保护, 动作时间限定在 50ms 以内。检测实践中, 当分布电容处于 $0.22\sim 0.47\mu\text{F}$ 区间且漏电阻接近动作边界时, 分馈零序电压信号处于临界微弱状态, 不足以触发 50ms 内快速跳闸, 而绝缘电阻尚未低至总馈直流闭锁整定值, 两者均不动作。同时, 若线路分布电容达到 $1.0\mu\text{F}$, 漏电流增大导致感应零序电压进一步下降, 分馈保护器获取的动作信号减弱, 拒动风险显著增加, 形成了常规检测难以覆盖的配合可靠性验证盲区。

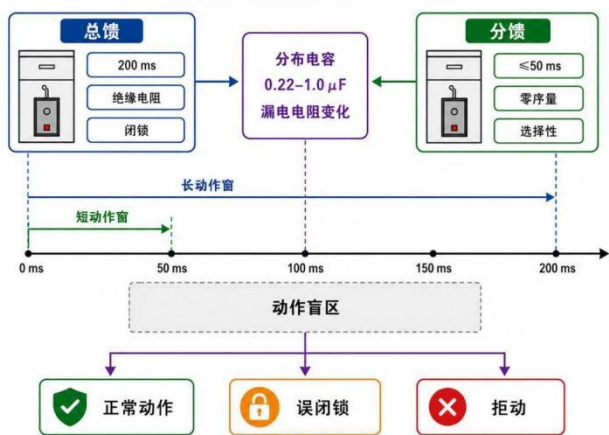


图 1 总馈一分馈漏电保护动作时序与配合盲区示意图

2.3 远方人工漏试中试验电阻接入的安全缺陷

直接内接入试验电阻的远方漏试方式在操作环节存在固有安全风险。试验电阻一端接于负荷侧相线、另一端固定于内壳接地螺栓, 若被测馈电开关因机构卡滞或保护器故障未能正常分闸, 人为构成的单相经电阻接地回路将持续存在, 漏电流长时间流过电阻将导致其急剧发热、绝缘劣化乃至烧毁, 进而引发弧光短路事故。同时, 漏电故障电流沿接地系统扩散, 可能通过杂散电容耦合至相邻回路, 干扰同一母线供电的其他保护装置正常运行^[2]。试验后若未及时拆除内接电阻而直接送电, 该相将长期带电阻接地运行, 操作人员在排查故障时极易误触及带电引出线, 形成经人体对地放电回路, 造成严重触电伤害。频繁拆装防爆外壳接线腔盖板亦加剧密封面损伤与紧固螺栓疲劳失效, 长期累积将直接破坏设备防爆完整性。

3 漏电闭锁功能检测的试验装置设计改进

3.1 多电压等级测试回路设计

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁功能检测需适应井下 660V、1140V 及 127V 等多种电压等级, 不同电压等级对应差异化的漏电动作电阻整定值, 测试回路须具备灵活的电压适配能力。多电压等级测试回路采用独立操作台集中控制, 由三相油浸感应调压器将 380V 电源调节后经变压器分别输出 660V 和 1140V 两档电压, 通过星形与三角形接法的切换实现不同电压输出。各分馈电试验柜内置可调对地电容 0.1 至 $1.0\mu\text{F}$ 及可调对地电阻 0 至 $99.9\text{k}\Omega$, 用以模拟不同长度线路的分布参数对漏电检测的影响。针对高压配电装置测试, 回路集成三相可调 100V 试验电源及零序电压互感器, 可模拟高压开关保护器工作条件。表盘配置调压器输出电压表、二次输出电压表及三相电流表, 实时监视各电压等级试验参数, 保证不同电压等级被试开关漏电闭锁动作值与整定值的一致性验证。

3.2 DSP 控制下的动作值采集与计时电路

漏电闭锁功能检测需同步获取动作电阻值与动作时间, 采用 DSP 构建采集与计时电路。系统通过电压互感器和电流互感器分别接入馈电开关负载侧三相线路及接地回路, 将漏电闭锁电阻值及对地泄漏电流转换为标准模拟信号, 经信号调理电路滤波、放大后送入 DSP 片内 12 位 A/D 转换模块, 采样速率设定为每周波 128 点, 有效捕捉漏电瞬间的电压跌落与电流突变特征。计时电路由 DSP 内部定时级联构成, 以 $1\mu\text{s}$ 时钟基准测量漏电起始与开关动作之间的时间间隔。漏电起始取自试验电阻投入时刻的硬件中断, 动作反馈取自开关辅助触点状态变化产生的中断, 双中断协同确保计时精度。DSP 将采样值与预设漏电闭锁电阻整定阈值逐点比对, 一旦达到动作条件即刻记录计数值并锁存对应时刻的电压电流瞬时值。采集数据经滤波运算后存入 EEPROM, 通过串行通信上传上位机显示波形与参数, 为漏电闭锁保护特性评估提供精确数据支撑。

3.3 分布电容及漏电阻的模拟切换方案

在试验装置内部, 分布电容与漏电阻的模拟切换通过柜体内安装的可切换电容组与可调电阻回路协同实现^[3]。针对不同电压等级的被试开关, 每个分馈立柜内配置了 $0.1\mu\text{F}$ 至 $1.0\mu\text{F}$ 多档位电容, 用于模拟井下不同长度电缆线路对地分布电容特性, 同时串联 $0\sim 99.9\text{k}\Omega$ 连续可调对地电阻, 以模拟绝缘劣化或潮湿工况下的漏电通路。切换操作采用旋转开关与继电器组配合的方式, 由操作台面板上对应档位旋钮发出指令, 驱动柜内中间继电器吸合, 将选定电容与电阻逐级投入被试馈电开关的负载侧对地回路中。为防止多档切换瞬间产生浪涌冲击, 在每路电容支路中串入限流电阻, 并在继电器触点两端并联阻容吸收模块, 以抑制电弧对触点的灼蚀。通过设置在柜体上的零序电流互感器, 能够同步采集各分支回路投入模拟元件

后的零序电流信号，实时反馈至测量系统，用以验证不同分布参数条件下漏电闭锁保护的動作边界。

4 漏电闭锁功能检测的试验方法优化

4.1 总馈电开关动作值与动作时间测定

总馈电开关漏电动作参数测定依托专用试验平台开展，三相油浸感应调压器调整试验电源，再经由100kVA电源变压器输出660V、1140V两种电压供给总馈电试验柜体，受试开关调试至总馈电运行模式，负载端并联三台分馈电开关还原井下配电层级配置^[4]。试验柜体选配0.22 μ F、0.47 μ F、1.0 μ F对地电容匹配各类线路敷设长度，触发漏电试验按键搭建单相1k Ω 电阻接地故障，计时线路对接受试开关常开辅助触点，故障产生瞬间启动计时，开关分闸瞬间终止计时完成动作时间采集。660V机型漏电动作电阻设定11k Ω ，1140V机型设定20k Ω ，绝缘阻值低于设定数值需在200ms完成跳闸，该时限区别于分馈电50ms动作指标，依靠时差构建纵向选择性漏电保护机制，电流同时时间乘积控制在30mAS安全限值范围以内，见表1。

表1 总馈电开关漏电保护动作参数测定结果

测定项目	660V 系统参数	1140V 系统参数
漏电动作电阻整定值(k Ω)	11	20
单相接地故障电阻(k Ω)	1	1
漏电动作时限(ms)	≤ 200	≤ 200
对地电容模拟选择(μ F)	0.22/0.47/1.0	0.22/0.47/1.0
电流-时间安全限值(mA $\cdot$ s)	≤ 30	≤ 30

4.2 分馈电开关选择性漏电闭锁验证

分馈电开关选择性漏电闭锁校验依托模拟分支配电网网络实施，单台设备负载对地电容设置0.22 μ F、0.47 μ F、1.0 μ F三档调节档位复现不同敷设长度井下电缆工况，对地电阻区间设置0~99.9k Ω 连续调节模式。四台受试分馈电设备独立安置于对应柜体，负载端统一并接总馈电输出端子，进线端取自总

馈电出线母线。单条支路串联试验电阻创设单相接地故障，支路零序电流互感器拾取对应电流信号，负载电容电流感应生成零序电压，保护装置依托二者相位特征甄别故障完成跳闸操作，其余无故障支路不存在零序通路，保护元件保持原有运行状态。1140V规格设备经1k Ω 电阻接地动作时长上限50ms，660V规格上限80ms，漏电流与动作时间乘积控制在30mA $\cdot$ S合规区间，以此判定装置仅响应自身支路漏电异常，规避总馈电侧暂态波动引发误动作问题。

4.3 电磁启动器及照明综保检测相与接地端配置

电磁启动器及照明综合保护装置漏电闭锁检测，试验回路搭建重点在于精准选定检测相线并稳固完成接地接线配置^[5]。这类设备依托单相接地故障判别逻辑实现漏电防护，内部回路持续向负载指定相线输送低频探测信号或是实时监测对地绝缘阻值，试验电阻构成漏电通路后保护单元捕捉阻抗变化触发闭锁流程。负载侧接三相电机时绕组对地阻抗趋于均衡，试验电阻接入任意相线均可正常识别，空载工况下各相线对地分布参数存在明显偏差，需对照图纸定位采样相线完成电阻接线。设备主接地螺栓对接井下辅助接地极构建独立低阻泄流路径，抑制漏电电流沿壳体、护套旁支分流，避免采集信号幅值不足造成保护判定偏差。

5 结语

矿用隔爆型馈电开关漏电闭锁构成井下供电关键防护环节，现有检测模式容易出现参数匹配失衡、各级保护配合脱节、现场试验操作潜藏风险等情况，传统检测模式很难契合井下电网复杂运行特征。调整多电压适配测试线路，搭载高精度DSP采集单元，完善分布电容与漏电阻切换模拟结构，能够弥补原有检测技术短板，搭配分层检测方案核验总馈、分馈及配套设备闭锁动作特性，改善保护误动、拒动与选择性失效问题，为井下漏电保护校验、电气运维工作提供技术支撑，稳固井下用电安全基础。

参考文献:

- [1] 马丽茹,童和平,任楠杰.基于PLC的智能型矿用隔爆馈电开关设计研究[J].煤炭技术,2022,41(9):182-184.
- [2] 韩进军.井下供电系统远程智能漏电试验保护研究[J].煤,2023,32(8):36-38.
- [3] 刘晖.煤矿低压馈电开关智能保护系统的研究和设计[J].机械工程与自动化,2020,(2):201-202+205.
- [4] 刘路琴.煤矿电力系统中漏电检测技术研究[J].矿业装备,2023,(7):108-110.
- [5] 王全明.煤矿电气设备与供电系统保护研究[J].能源与节能,2022,(9):123-125.