煤矿供配电系统继电保护研究

郭建

山西锦兴能源有限公司肖家洼煤矿机电管理部（信息中心），中国·山西 吕梁 033600

摘要：煤矿井下供配电网络级联节点多、近区短路电流大，且传统时限配合裕度不足，越级跳闸和误动问题往往频繁出现。基于此，以某年产 500 万 t 高瓦斯矿井供配电改造为例，结合该煤矿 2021—2023 年 142 次故障跳闸记录及原保护整定进行复核，提出了结合光纤环网分布式 GOOSE 逻辑闭锁与自适应暂态能量选线的综合防护方案。改造后，案例煤矿 2024—2025 年运行验证期未记录越级跳闸，并将故障切除时间缩短至 32.5ms。工程应用表明，案例煤矿在改造后的复杂接地条件下故障辨识能力大幅提升，为煤矿井下供电安全提供了高可靠性的技术支撑。

关键词：煤矿供配电；继电保护；越级跳闸；逻辑闭锁；自适应选线

Research on Relay Protection for Coal Mine Power Supply and Distribution Systems

Guo Jian

Electromechanical Management Department (Information Center), Xiaojiawa Coal Mine, Shanxi Jinxing Energy Co., Ltd., China Shanxi Lvliang 033600

Abstract: Underground power supply and distribution networks in coal mines feature numerous cascaded nodes and high short-circuit currents in near zones, while traditional time-delay coordination margins are insufficient, frequently leading to over-tripping and misoperation. Based on this, taking the renovation of a high-gas mine with an annual production capacity of 5 million tons as an example, and reviewing 142 fault trip records from 2021 to 2023 along with original protection settings, a comprehensive protection scheme combining fiber-optic ring network distributed GOOSE logical interlocking and adaptive transient energy-based fault line selection is proposed. After implementation, no over-tripping events were recorded during the operational verification period from 2024 to 2025, and fault clearance time was reduced to 32.5 ms. Engineering application demonstrates that the case mine significantly improved its fault identification capability under complex grounding conditions after renovation, providing highly reliable technical support for underground power supply safety in coal mines.

Keywords: Coal mine power supply and distribution; Relay protection; Over-tripping; Logical interlocking; Adaptive fault line selection

0 引言

以某年产 500 万吨高瓦斯大型矿井为例，井下采用 10kV 和 6kV 两级高压供电，设置双回路电源，主体网络形成“中央变电所—采区变电所—移动变电站”三级级联结构，干线电缆总长度约 28.5km。部分巷道相对湿度长期处于 90%～95%，同时存在高粉尘、机械振动，以及采煤机、刮板输送机、泵类和高压变频器频繁启停等工况。由于短路阻抗小、级差时限无冗余空间，该矿井传统继电保护常因时限配合失效或采样失真引发越级跳闸，导致大面积停电，极易诱发局部通风机停转及瓦斯积聚等重大安全事故。因此，针对该煤矿井下供配电系统的故障特征开展继电保护优化研究，对保障矿井连续生产与安全运行具有较强现实意义。

1 煤矿井下供配电系统故障特性与传统保护工程痛点分析

1.1 井下复杂网络拓扑下的短路电流突变与电磁干扰特性

案例煤矿井下配电网在改造前采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式，同时在巷道侧壁铺设高压电缆，线路长度受空间限制普遍较短，单段电缆长度一般处于 150m～1200m 之间[1]。受此影响，变压器及主干电缆集中了主要阻抗，在三相短路故障出现于采区变电所出线端时，系统短路阻抗极低，短路电流衰减时间常数通常大于 40ms。而在金属性短路发生瞬间，存在急剧攀升至额定电流 25 倍～40 倍的短路电流峰值，如 10kV 母线侧三相短路电流可达 18.5kA。

与此同时，6kV 及 10kV 高压变频器与大功率软启动装置在井下大量应用，受非线性负荷引入的 5 次、7 次及 11 次谐波电流注入电网影响，存在达到 6.8%～12.5% 的电压波形畸变率（THD）。非周期分量与高次谐波在相间短路发生后的前半个周期内叠加，使得微机保护装置每周波采样序列出现严重偏置，在应用快速傅里叶变换（FFT）算法提取基波电流时产生较大计算偏差。进一步分析可以发现，电缆绝缘层劣化往往因井下潮湿环境出现。由于存在达到额定电流 8～15 倍的单相接地故障时产生的暂态涌流幅值，且其持续时间仅为 3～8ms，这一暂态特征难以通过传统稳态电流保护有效识别，保护装置误判与误动问题自然会随之产生[2]。

1.2 多级级联网络时限配合失效与越级跳闸机理

在案例煤矿“中央变电所—采区变电所—移动变电站”构成的多级配电网络中，传统继电保护依赖阶梯型时限配合原则，以此方可实现选择性切除[3]。结合标准工业规范可以发现，其要求上下级开关之间的保护动作级差时间不得低于 0.3s，但在井下三级及以上的级联拓扑中，如设定 0.1s 的移动变电站侧过流保护动作时间，则同时存在设定为 0.4s 的采区变电所段动作时间，中央变电所出线段则在 0.7s 以上，近 20kA 的短路电流的长时间冲击很容易导致高压电缆防爆接线盒爆裂，热击穿火灾发生概率也会大幅提升[4]。

实际运行中，故障电流幅值与整定值的倍数关系直接决定反时限过流保护的动作时限，具体数学模型表示为：

$$t=\frac{(k*S)}{(\frac{I}{I_p})^{\alpha}-1}+\Delta T \quad (1)$$

公式中的 t 为实际动作时间（s）、S 为结构系数、k 为时间常数，I 为实测短路电流（A），I_p 为电流整定值（A）；α 为曲线指数；ΔT 为级差配合时限（s）。

如严重短路出现于远端移动变电站出口，远大于各级保护的整定值 I_p 的短路电流 I 将导致各级保护的反时限动作时间曲线均向极限最小值收敛，趋近于零的 ΔT 将使得上下级时限配合完全失效。同时，10P10 级电流互感器（CT）也会因高倍数短路电流进入深度磁饱和状态，发生严重畸变与削顶的二次侧电流波形会导致上级保护装置计算得到的有效值失真，因开入量采集抖动导致逻辑判定混乱的情况也很容易出现，越级跳闸问题将因此产生。

1.3 案例矿井保护系统历史运行数据诊断与瓶颈分析

对案例矿井改造前 2021 年 1 月至 2023 年 12 月期间井下供配电系统的故障运行记录进行诊断分析，统计数据显示，该矿井三年间共记录各类供电故障跳闸 142 次。在所有故障类型中，相间短路故障共发生 38 次，占比 26.8%；单相接地故障发生 89 次，占比 62.7%；过载及其他故障发生 15 次，占比 10.5%，具体数据如表 1 所示。

表1 案例矿井改造前近三年井下供配电系统故障类型、跳闸次数及越级停电统计表

统计年份	事故总次数	相间短路次数	单相接地次数	越级跳闸次数	越级跳闸占比（%）	事故平均停电时长（h）	影响采掘面数量（个）
2021年	45	11	29	9	20.0	3.2	4
2022年	51	14	31	12	23.5	4.1	5
2023年	46	13	29	10	21.7	3.8	4
合计/均值	142	38	89	31	21.8	3.7	4.33

结合表 1 进行分析可以发现，触发越级跳闸的次数为 31 次，平均越级跳闸发生率达到 21.8%，且每次越级跳闸均导致中央变电所母线失压，全矿井下主通风机、排水泵、采区供电随之中断，具体存在单次事故平均停电时长 3.7h（年均总停电时长约 176h），4-5 个采掘工作面的正常作业因此受到直接影响。而分析 89 次单相接地故障可以发现，接地选线准确率受传统零序电流保护在消弧线圈补偿下灵敏度不足影响仅为 54.2%，非故障线路多次因选线错误而切除，供电可靠性因此受到严重负面影响，案例煤矿现有继电保护体系在时限配合、抗饱和能力、暂态识别方面存在的严重技术瓶颈可见一斑。

2 新型继电保护系统方案设计

2.1 基于光纤环网与分布式 GOOSE 闭锁的防越级保护架构

为解决案例煤矿多级级联配电网络中时限配合失效的工程难题，该煤矿于 2024 年 1 月完成继电保护系统改造，具体引入了基于工业级双光纤环网的分布式 GOOSE（面向通用对象的变电站事件）逻辑闭锁防越级保护体系。该系统将 peer-to-peer（点对点）高速通信链路建立在中央变电所、采区变电所、移动变电站的微机保护装置之间，摒弃了对集中式中央主站决策的依赖。网络物理层采用矿用防爆单模双芯光纤缆线，结合 GOOSE 通信协议与硬件级的网络报文优先队列处理机制，3.5ms 以内的保护单元间逻辑闭锁信号传输时延得以实现，图 1 直观展示了井下光纤环网分布式闭锁防越级继电保护的网络拓扑与信号闭锁传递逻辑。

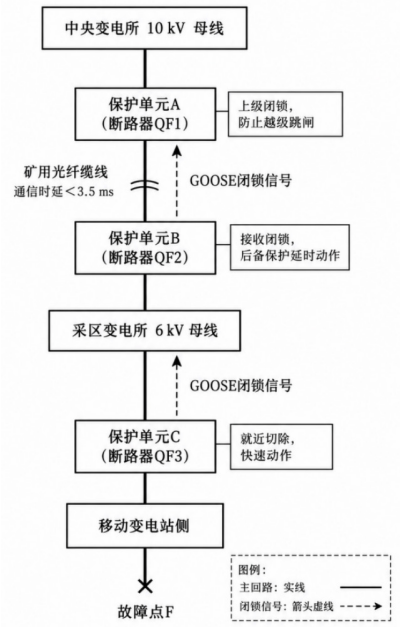


图1 基于光纤环网分布式闭锁的井下防越级继电保护信号传递与动作逻辑

在三相短路出现于移动变电站出线端故障点 F 时，超越启动阈值的短路电流能够由保护单元 A、B、C 的电流互感器采集，基于“就近切除”原则，在检测到故障过流及正向功率流向后，距离故障点最近的保护单元 C 可在 2ms 内通过光纤环网向上一级保护单元 B 广播 GOOSE 闭锁报文，接收到闭锁信号的保护单元 B 将立即闭锁自身的出口跳闸回路，并继续发送闭锁报文至上一级保护单元 A。在确认故障位于本段保护区域且未收到下游闭锁信号后，保护单元 C 会驱动断路器 QF3 跳闸，具体存在控制在 15ms 以内的跳闸出口动作时间。如断路器 QF3 或保护单元 C 发生拒动，等待 30ms 后的保护单元 B 会在故障电流仍未消失且闭锁信号超时（闭锁定时器设为 40ms）情况下解除闭锁并启动后备保护跳闸，将断路器 QF2 切除，传统阶梯时限逐级累加的弊端可由此从根本层面化解，全网故障毫秒级选择性隔离可顺利实现[5]。

2.2 自适应纵联差动保护与暂态能量法接地选线技术

案例煤矿改造中，引入了基于主从式采样同步算法的光纤纵联电流差动保护，具体部署于井下中央变电所至采区变电所的主干高压电缆链路上。考虑到温度与微小机械应变对井下环境光纤传输时延造成的影响，选择使用 Ping-Pong 双向时延测量时钟同步技术的保护装置，每间隔 10ms 线路两侧保护装置会互相发送同步帧，以此对光纤通信链路的双向不对称时延开展实时计算，以此控制两侧电流采样序列的时间同步误差，确保差动电流计算的精度。

对于煤矿中性点经消弧线圈，以及高电阻接地系统，受极低电流幅值和消弧线圈的残流补偿影响，传统稳态零序电流选线方法的失败率较高。为此，案例煤矿针对性选择了基于暂态零序功率流向与暂态能量比对的自适应选线算法，在单相接地故障发生瞬间，故障发生后半个周期内（10ms）的暂态零序电压与暂态零序电流可通过高采样率（10kHz）采集，各线路的暂态零序功率、暂态能量可随之计算，具体公式为：

$$W_0=\int_0^{T_m} u_0(t)\, i_0(t)\, dt \tag{2}$$

公式中的 W_0 为分析窗内暂态零序能量，T_m 为积分时间窗，$u_0(t)$、$i_0(t)$、$P_0(t)$ 分别为暂态零序电压（V）、暂态零序电流（A）、暂态零序功率（W）。

暂态零序电流在非故障线路由本线路对地电容产生，暂态零序功率方向为由母线流向线路，暂态能量计算值为负值。对于故障线路，全网非故障线路对地电容电流与消弧线圈电感电流叠加，即为暂态零序电流，暂态零序功率方向由线路流向母线，且存在为正值的暂态能量计算值，该值显著大于非故障线路。通过比较各分支线路暂态能量的符号与幅值比例，算法可近乎 100% 精准识别高电阻接地及弧光接地故障。

2.3 保护定值动态自适应调整与现场硬件抗干扰冗余设计

随着采掘工作面的推进，煤矿井下供电网络需要频繁变更运行拓扑，系统短路容量的动态变化对传统人工整定的定值区会造成极大挑战。为此，案例煤矿针对性设计了基于全网拓扑感知自适应定值整定策略。这一策略下，隔离开关与断路器的辅助触点状态由保护装置监测，全网电气拓扑矩阵可结合 GOOSE 协议实时构建并更新，在双回路冗余供电向单回路集中供电切换时，保护引擎可基于预先设定的阻抗计算模型完成对电流速断与过流定值区的自动重算并平滑切换，无需装置复位或停运的切换过程耗时在 5ms 内。

对于井下潮湿、高电磁干扰的物理环境，微机保护装置硬件在冗余设计方面投入了一定资源，具体选择使用 316L 不锈钢防爆密封结构的装置外壳，防护等级提升至 IP65，同时选择使用双路 110V/220V 直流输入热备用冗余架构的内部电源模块，交流失电后该电容储能模块可维持装置全功能运行不少于 5s。同时，交流采样通道与开关量开入开出通道设计引入光电隔离与磁隔离双重屏障，这种电磁兼容设计在开入通道设置了 24V 高门槛电压识别与

10ms 硬件滤波电路，电缆感应电压与触点抖动导致的误开入可由此消除。此外，采用双核异构架构的 CPU 核心板，双核分别用于故障计算、逻辑判断与通信，而经硬件“与门”逻辑校验后的双核输出结果可驱动跳闸出口，极强电磁干扰下装置的零误动可顺利实现。

3 应用验证与效益评估

案例矿井于 2024 年 1 月完成上述新型继电保护系统的整体改造升级并投入试运行，在 2024 年 1 月 −2025 年 12 月的两年工程验证期内，新系统共经历 28 次各类井下电气故障，单相接地故障 21 次，相间短路故障 7 次。现场实测数据显示，最近端的保护单元得以在 7 次相间短路故障中通过 GOOSE 闭锁逻辑精准切除，且存在 32.5ms（含断路器机械动作时间）的故障平均切除时间，改造前这一数值为 380ms，同时存在降至 0% 的越级跳闸发生率。同时，基于暂态能量法的自适应选线装置在 21 次单相接地故障中实现了 21 次正确动作，100% 的选线准确率使得因选线误判导致非故障线路切除的问题得以根除。

案例煤矿供配电系统继电保护改造的成功，取得了显著的安全与经济效益。深入分析可以发现，在安全层面，小于 40ms 的故障切除时间的极早期化使得高压电缆爆炸引发火灾的隐患得以杜绝，越级跳闸的消除使得大面积失电导致的局部通风机停运与瓦斯超限风险大幅下降，井下通风与排水系统的连续安全运行目标顺利实现；在经济方面，改造后矿井因供电故障造成的年总停电时长大幅缩短，由改造前的年均 176 小时缩减至 0.5 小时以下，非计划停电带来的采掘设备损坏与生产中断问题因此有效规避，每年直接与间接经济损失减少超过 1800 万元，改造方案的实用性得到直观证明。

4 结语

综上，基于光纤环网分布式 GOOSE 逻辑闭锁与暂态能量法自适应选线的新型继电保护体系，可有效处理煤矿井下复杂供配电环境与越级跳闸的实物痛点。工程实践表明，该体系突破了传统阶梯时限配合在多级级联网络中的物理局限，将井下短路故障隔离时间缩短至毫秒级，彻底消除了越级跳闸现象，消弧线圈接地系统单相接地精准选线难题也得以数量解决，能够为高可靠性智慧矿井无人化供配电防护系统建设奠定一定理论基础，具有较高的推广价值。

参考文献：

[1] 贺立强. 煤矿供电系统防越级跳闸与漏电保护方法研究[J]. 煤炭新视界，2025(2):259−261.

[2] 杨喜涛. 煤矿供电自动化控制系统中继电保护技术研究[J]. 中国新技术新产品，2025(23):38−40.

[3] 周东坡. 煤矿供电自动化控制系统继电保护研究[J]. 电气技术与经济，2025(11):182−185.

[4] 田宇光. 煤矿井下低压供电系统漏电保护研究[J]. 矿业装备，2025(7):98−100.

[5] 张明明，冀锋，李朋朋等. 煤矿 35kV 数字化变电站继电保护系统优化[J]. 电力设备管理，2025(12):213−215.

作者简介：郭建（1987.06−），男，汉族，山西大同，专科，工程师，研究方向：煤矿机电管理。