

电力系统漏电保护分级配置模型应用研究

王健梅, 周渊, 朱茂荣, 杨婷婷, 雷济坤
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025090012

摘 要 : 在电力行业安全生产体系中, 漏电保护装置 (RCD) 是保障人员安全、防范触电事故的关键装备。但传统 RCD 配置存在 “一刀切” 问题, 未考虑不同场景风险差异, 导致高风险场景防护不足、低风险场景资源浪费。为此, 本文提出基于多维风险评估的漏电保护分级配置模型。该模型构建风险因子体系, 通过量化方法与权重机制形成风险评估矩阵, 将作业场景划分为极高、高、中、低、可接受五个风险等级, 并制定差异化配置策略。经八〇三分公司实践验证, 模型实现了漏电保护精准配置, 提升了人身触电防护可靠性, 解决了越级跳闸问题, 为电力作业本质安全设计提供理论支撑与实践指南, 推动安全防护从 “经验驱动” 向 “数据驱动” 转型。

关 键 词 : 人身触电防护; 漏电保护器 (RCD); 风险评估; 分级配置; 风险矩阵

Research on The Application of Hierarchical Configuration Model for Power Leakage Protection in Power Systems

Wang Jianmei, Zhou Yuan, Zhu Maorong, Yang Tingting, Lei Jikun
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract : In the safety production system of the power industry, Residual Current Devices (RCDs) are key equipment to ensure personnel safety and prevent electric shock accidents. However, the traditional RCD configuration has the problem of "one-size-fits-all", which fails to consider the risk differences in different scenarios. This leads to insufficient protection in high-risk scenarios and resource waste in low-risk scenarios. To address this issue, this paper proposes a leakage protection hierarchical configuration model based on multi-dimensional risk assessment. The model constructs a risk factor system, forms a risk assessment matrix through quantitative methods and weight mechanisms, divides operation scenarios into five risk levels (extremely high, high, medium, low, and acceptable), and formulates differentiated configuration strategies. Verified by the practice of the 803 Branch Company, the model realizes the precise configuration of leakage protection, improves the reliability of personal electric shock protection, and reduces the problem of over-level tripping. It provides theoretical support and practical guidance for the intrinsic safety design of power operations, and promotes the transformation of safety protection from "experience-driven" to "data-driven".

Keywords : personal electric shock protection; residual current device (RCD); risk assessment; hierarchical configuration; risk matrix

引言

(一) 研究背景与意义

电力行业是国民经济 “能源动脉”, 安全稳定运行关乎工业生产、民生保障与社会秩序。然而, 人身触电事故仍是电力作业重大隐患, 传统 RCD 配置 “一刀切”, 无论场景风险 (如干燥室内巡检与潮湿污水泵房维护), 均采用统一型号参数 RCD, 导致 “低风险过度防护、高风险防护不足”。

现有 RCD 配置标准多基于宏观行业规范 (如 GB 13955-2017), 未考虑场景复杂性与多样性, 且缺乏对 “人员能力、设备状态、环境因素” 等动态风险因子的考量, 如新手操作失误概率高, 但标准未调整防护等级, 放大安全风险。

在 “双碳” 目标与新型电力系统建设背景下, “精准防护” 与 “本质安全” 成电力安全发展必然要求。新能源电站、新型储能设施带来新风险, 传统防护难适配; 《“十四五” 国家安全生产规划》要求建立 “双重预防机制”。因此, 构建科学、量化、场景化的漏电保护分级配置模型, 可解决 “防护失衡”, 为本质安全设计提供支撑, 助力 “零触电事故” 目标, 具有现实意义与工程价值。

（二）国内外研究现状

国际上，英国 HSE 在《电气安全管理指南》提出“风险矩阵评估法”，将电气风险分为四级，结合环境湿度、电压等级制定防护策略，为量化研究提供框架。美国橡树岭国家实验室用物联网采集数据，建立机器学习风险预测模型，可提前 1-2 小时预警漏电隐患，但仅针对配电线路，未覆盖复杂作业环境。

国内研究以标准完善与工程应用为核心，清华大学电机系 2023 年提出“多维度漏电风险评估指标体系”，将风险因子分为四类 12 项指标，但无具体量化分级标准，未与 RCD 配置直接关联，落地性弱。

1. 现有研究的不足

（1）场景化覆盖不全面：现有标准与模型多聚焦低压、常规环境，对高压设备、新能源场景、特殊环境覆盖不足，如光伏电站直流漏电需 B 型 RCD，却无统一配置标准。

（2）量化程度不足：多数风险评估模型依赖定性描述，缺乏可量化分级指标，如“环境湿度”未明确对应风险等级，评估结果主观性强，同一场景判定差异达 30% ~ 50%，难标准化应用。

（3）动态响应能力缺失：现有模型基于作业前静态评估，未考虑作业中风险因子动态变化，无法实时调整防护措施。

（三）本文主要工作

1. 构建多维度风险矩阵模型

基于“事故可能性 - 后果严重性”双维度，建立含 10 项关键因子的风险评估体系：

（1）事故可能性（L）因子：含“发生危害事件频率（L₁）、安全检查（L₂）、操作规程（L₃）、人员胜任程度（L₄）、控制措施（L₅）”5 项指标，各指标分 5 级量化（如 L₁按“从未发生 - 每次作业发生”划 1-5 级），通过文献调研、事故数据分析验证指标合理性。

（2）事故后果严重性（S）因子：含“法律法规符合性（S₁）、人员伤亡情况（S₂）、财产损失（S₃）、停工影响（S₄）、企业形象影响（S₅）”5 项指标，参照相关法规明确量化分级（如 S₃按“无损失 - > 50 万元”划 1-5 级）。

（3）风险等级计算与验证：用统一权重法（各因子权重 0.2）计算 L、S 加权得分，将风险划“可接受、低、中、高、极高”5 级，形成风险矩阵表，实现“因子评分 - 风险等级 - 配置方案”直接映射。

2. 制定差异化分级配置策略

针对 5 级风险场景，明确 RCD 选型、配套措施与维护要求：

可接受风险（LS ≤ 5.0）用符合标准空气开关，每季度测跳闸；

低风险（6.0 ≤ LS ≤ 12.0）配 30mA 瞬时型 RCD（动作 ≤ 0.1 秒），每月检查；

中风险（13.0 ≤ LS ≤ 16.0）30mA RCD 需抗湿热，每日班前检查；

高风险（17.0 ≤ LS ≤ 20.0）配 15mA B 类 RCD（动作 ≤ 0.05 秒），每月防护测试；

极高风险（21.0 ≤ LS ≤ 25.0）用“15mA RCD + 隔离 / 监护”，保障现场安全。

一、漏电保护分级配置风险矩阵模型构建

（一）风险因子体系建立

风险因子体系是模型核心，从事故可能性（L）和后果严重性（S）维度，建含 10 项关键因子的评估体系，量化分级实现精准度量。

1. 事故可能性（L）因子体系

事故可能性指漏电事故发生概率，经文献调研与事故数据分析，筛选 5 项关键因子，分别为：发生危害事件频率、安全检查、操作规程、人员胜任程度、控制措施。根据 5 项关键因子产生的频率、检查频次、规程覆盖度、人员水平、措施完善程度分别细化为 5 级，其中 1 级为最安全状态，5 级为最高风险。

2. 事故后果严重性（S）因子体系

事故后果严重性指漏电事故对多方面的影响程度，结合相关法规与标准，建含 5 项关键因子的体系，分别为法律法规符合性、人员伤亡情况、财产损失、停工影响、企业形象影响，根据

合规、伤亡、财产损失、停工影响、企业形象受损程度等细化为 5 级，其中 1 级为事故后果最轻，5 级为事故后果最严重。

（二）风险矩阵模型设计

风险矩阵模型是连接风险量化与配置方案的桥梁，借鉴国际 LS 法，结合电力行业特性，经“因子权重校准 - 矩阵阈值验证 - 场景适配调整”，构建适配模型。

1. 模型设计依据与核心原理

LS 法核心逻辑为“风险 = 可能性 × 后果”，针对电力漏电事故特点，优化 L 和 S 计算：

（1）事故可能性（L）加权计算：L 含 5 项因子（L₁-L₅），权重均 0.2，避免单一因子主导。公式： $L=0.2 \times L_1+0.2 \times L_2+0.2 \times L_3+0.2 \times L_4+0.2 \times L_5$ ，结果保留 1 位小数，等级划分：1 级（1.0-1.8）、2 级（1.9-2.7）、3 级（2.8-3.6）、4 级（3.7-4.4）、5 级（4.5-5.0）。

（2）事故后果严重性（S）加权计算：S 含 5 项因子（S₁-S₅），权重均 0.2，均衡多维度后果。公式： $S=0.2 \times S_1+0.2 \times S_2+$

$0.2 \times S_3 + 0.2 \times S_4 + 0.2 \times S_5$ ，结果保留 1 位小数，等级划分同 L。

(3) 风险等级 (LS) 阈值确定与验证：LS 为 L 与 S 乘积 (1.0–25.0)，结合近 5 年事故案例反推：

$LS \leq 5.0$: 90% 无人员伤亡，损失 < 8 万元，“可接受风险”，仅用空开。

$6.0 \leq LS \leq 12.0$: 82% 轻微电击或小型设备损坏，“低风险”，30mA 瞬时型 RCD。

$13.0 \leq LS \leq 16.0$: 73% 人员轻伤或中型设备故障，“中风险”，30mA RCD + 日常检查。

险”，30mA RCD + 日常检查。

$17.0 \leq LS \leq 20.0$: 68% 人员重伤或大型设备停机，“高风险”，15mA RCD。

$21.0 \leq LS \leq 25.0$: 83% 人员死亡、核心设备报废等，“极高风险”，15mA RCD + 隔离 / 监护。

2. 风险矩阵表的优化与使用说明

整合优化风险矩阵表 (表 2-1)，便于现场查询：

表 2-1 电力作业场景漏电风险矩阵与保护配置表

L (事故可能性) \ S (后果严重性)	1 级 (可接受后果)	2 级 (轻微后果)	3 级 (一般后果)	4 级 (严重后果)	5 级 (极端后果)
1 级 (极低可能性)	可接受风险，空开	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD
2 级 (较低可能性)	可接受风险，空开	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD
3 级 (中等可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD
4 级 (较高可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	高风险，15mA RCD	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护
5 级 (极高可能性)	可接受风险，空开	低风险，30mA RCD	中风险，30mA RCD	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护	极高风险，15mA RCD + 隔离 / 监护

使用说明：
因子评分：对照 2.1 节分级标准，打分并按权重算 L、S 得分，定等级。

矩阵查询：在表中找 L、S 等级交叉单元格，获风险等级与配置方案。

动态调整：场景因子变化时，重新评分调整配置，适配风险状态。

(三) 基于风险等级的分级配置策略

1. 可接受风险场景 ($LS \leq 5.0$)：空开为主，简化防护
- (1) 空开选型：符合 GB 50054–2011，额定电流匹配回路，分断能力 $\geq 6kA$ 。
- (2) 适用场景：非直接接触人体且有完善整体保护措施的高压电气设备区域，如高压变电站的部分设备，其本身有严格的绝缘、间距等防护措施，人体接触概率极低，通常依赖系统级的过流、过压保护等，无需专门的高灵敏度漏保，每季度测试跳闸功能。
- (3) 维护要求：每季度检查外观，测试跳闸功能，无锈蚀、松动、过热。
2. 低风险场景 ($6.0 \leq LS \leq 12.0$)：30mA 瞬时型 RCD，基础防护
- (1) RCD 选型：符合 GB 13955–2017， $I_{\Delta n}=30mA$ ，动作时间 ≤ 0.1 秒，A/B 型按需选 (A 型适交流，B 型适交直流)。
- (2) 适用场景：干燥、人员较少接触的普通办公区域的电气设备，如办公楼的照明电路、普通办公电器等；还有一些远离人员活动区域的固定低压电气设备，如部分非关键的电动阀门驱动装置等。
- (3) 配套措施：每月检查外观，测试跳闸；每季度紧固接线端子，防止接触不良。
- (4) 成本控制：单价 45–90 元，比 15mA 型号低 50%+，安装兼容常规空开，批量适用。
3. 中风险场景 ($13.0 \leq LS \leq 16.0$)：30mA RCD + 强化管

- 理，双重防护
- (1) RCD 选型：除低风险参数，需抗湿热 (GB/T 14048.2–2020，40°C / 93% RH)、防误跳闸 (内置浪涌抑制)。
- (2) 适用场景：辅助车间，如检修间、工具间等场所的电气设备，这些地方可能会有人员频繁操作电动工具，且环境相对潮湿一些；另外，一些半封闭的电气设备区域，如电缆夹层内的部分电气设备。
- (3) 配套管理：每日检查测试；每月 1 次全面测试 (15mA 漏电模拟，跳闸 ≤ 0.05 秒)；每季度紧固端子。
4. 高风险场景 ($17.0 \leq LS \leq 20.0$)：15mA 瞬时型 A/B 型 RCD，灵敏防护
- (1) RCD 选型：符合 GB 13955–2017 “高灵敏度型”， $I_{\Delta n}=15mA$ ，动作时间 ≤ 0.05 秒，优先 B 型 (适配变频器等)。
- (2) 适用场景：锅炉本体附近、汽轮发电机组的润滑油系统区域等，这些地方环境潮湿，设备运行时可能会有油水泄漏，人员在进行巡检、维护时可能会接触到带电设备；还有水处理车间，由于存在大量的水和电气设备混合的情况，漏电风险较高。
- (3) 配套措施：每月全面测试；每月清理端子积尘水渍；作业用 II 类双重绝缘工具。
- (4) 技术优势：模拟测试中，漏电至 40mA 时，跳闸 0.03–0.04 秒，远低于致命时间 (0.5 秒+)。
5. 极高风险场景 ($21.0 \leq LS \leq 25.0$)：15mA RCD + 隔离 / 监护
- (1) RCD 选型：同高风险，加隔离 / 监护。
- (2) 适用场景：氢气冷却系统区域，还有一些涉及水下作业的区域，如循环水系统的水下泵等设备。
- (3) 应急准备：作业前定专项预案，配备急救箱、绝缘救援钩；与医院建立 “绿色通道”，15 分钟内可达。

二、模型应用与效果分析

（一）案例验证

八〇三分公司在高风险脱硫区浆液循环泵房验证：

1. 场景信息：作业区为脱硫区浆液循环泵房，作业内容检修电源箱测试，2 名作业人员（持低压电工证，4 年经验），设备运行 12 年（近 1 年 1 次漏电故障）。

2. 匹配方案：15mA 瞬时型 B 类 RCD + 每月防护测试。

实施效果：作业中临时设备绝缘破损漏电（32mA），RCD 0.04 秒跳闸，人员无伤，验证方案必要。

（二）现有模型的局限性

1. 动态风险响应不足：基于作业前静态评估，未考虑作业中因子变化（如突降暴雨湿度升，L_s需提分，无法实时调）。

2. 特殊场景覆盖不全：新能源场景（光伏逆变器维护、风电塔筒电缆检修）未纳入“直流漏电”“高海拔影响”等因子，适用性受限。^[1]

（三）模型优化方向

1. 构建量化评分数据库：收近 3 年事故案例，提因子数据，建“数据 - 评分”映射（如“省级及以上媒体报道≥3 次 → S_s=5 分”），降主观性。^[2]

2. 开发动态风险监测系统：整合物联网设备（温湿度、漏电流传感器），实时采数据，自动计算 LS 值推调整方案（如湿度

> 90%，预警加绝缘）。

3. 拓展特殊场景因子体系：新能源场景新增“直流漏电类型（L₆）”“高海拔影响（L₇）”“新能源设备特性（S₆）”，与新能源单位合作完善。^[3]

三、总结与展望

（一）研究总结

本文构建的基于多维风险评估的漏电保护分级配置模型，解决传统“一刀切”问题。通过建风险因子体系、量化评估、定差异化策略，经工程验证，提升防护可靠性，降成本与误跳闸，为电力作业本质安全提供理论与实践支撑，推动安全防护转型。

（二）未来展望

1. 与智能运维平台融合：嵌入平台，实现“场景识别 - 评分 - 方案匹配 - 效果复盘”自动化，调设备历史数据算分。

2. 推广至泛电力行业：适配建筑电气、轨道交通供电等，调因子分级（如 S₄加“地铁停运”等级）。

3. 助力安全文化建设：为安全培训提供素材，推动“被动防护”转“主动预防”。

模型后续将持续优化动态响应与场景覆盖，为电力安全发展提供更有力量支撑。

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 剩余电流动作保护装置安装和运行：GB/T 13955 - 2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[2] 中华人民共和国建设部. 施工现场临时用电安全技术规范：JGJ 46 - 2005[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 低压配电设计规范：GB 50054-2011[S]. 北京：中国计划出版社，2012.