

电缆柜内部电弧故障抑制防护结构与试验验证

何溪康 邢倩倩

许继德理施尔电气有限公司 河南 许昌 461000

摘要: 针对电缆柜内部电弧故障破坏力强、现有保护响应滞后、专用防护结构缺失等问题,本文分析电弧故障产生机理与危害特征,设计集抑弧、分级泄压与隔热防护于一体的模块化防护结构。通过仿真试验完成结构参数优化,并搭建试验平台开展多工况性能检测。测试表明,该结构可实现毫秒级抑弧,有效控制柜内温压数值,防护可靠性与环境适应性优异,可显著提升电缆柜安全运行水平。

关键词: 电缆柜内部; 电弧故障; 抑制防护; 结构设计; 试验验证

引言: 电缆柜在电力系统中应用广泛,受绝缘老化、粉尘凝露、接线松动等因素影响,极易引发内部电弧故障。电弧瞬时产生的高温高压冲击波易造成柜体变形、设备烧毁,甚至引发电气火灾与大面积停电事故。传统保护方式动作滞后、防护盲区大,难以适配狭小柜内故障防控需求。为此本文开展电弧故障抑制防护结构与验证,为电缆柜被动安全防护提供技术参考。

1 电缆柜电弧故障特性及防护需求分析

1.1 电缆柜内部电弧故障产生机理

(1) 绝缘失效诱发电弧故障。电缆柜内绝缘层受温湿度交变、粉尘、局部放电、机械挤压等影响,出现老化、开裂。绝缘击穿阈值低于运行场强时,发生局部击穿,形成导电通道,工频电压下空气及分解物电离激发持续电弧。凝露、小动物入侵、接线松动等也可诱发相间或相对地短路电弧。(2) 电弧故障发展演化规律。分初始萌生、稳定燃烧、能量扩散三阶段。初始阶段能量小,持续毫秒级;稳定阶段电流持续,温度升至数千摄氏度,空气膨胀产生高压冲击波;扩散阶段高温灼烧柜体、电缆,产生金属蒸汽和可燃气体,易引发二次燃爆、柜体变形及设备烧毁,伴有声光、电磁辐射。

1.2 电弧故障危害特性分析

(1) 高温热危害。电弧温度达 $3000 \sim 6000^{\circ}\text{C}$,远超导体及绝缘材料熔点。高温灼烧电缆、母线、端子,造成短路及设备报废;热气流扩散烧毁二次回路、传感器,扩大故障范围,甚至引发电气火灾。(2) 高压冲击波危害。密闭柜内瞬时能量释放产生 $0.2 \sim 0.8\text{MPa}$ 超压冲击波,可致柜体变形、门锁脱落、板材开裂;高压气流裹挟粉尘及碎屑扩散,损伤元器件,破坏机械与绝缘性能,严重时柜体炸裂,威胁人员及周边设备^[1]。(3)

电磁与次生危害。电弧放电产生高频电磁干扰,影响保护、通信设备,可能致保护误动或拒动,扩大停电。金属蒸汽及碳化粉尘附着绝缘件,降低绝缘电阻,引发漏电、局部放电等隐性隐患。

1.3 现有防护技术缺陷与设计需求

(1) 现有防护技术缺陷。传统过流、差动保护响应时间数十毫秒,而电弧燃爆仅数毫秒,动作滞后。常规柜体无专用泄压、灭火、降温结构,能量无法快速释放。现有结构未针对电缆柜狭小密集特点优化,盲区多、适配性差。(2) 防护结构核心设计需求。一是快速抑弧,萌生阶段阻断电弧、熄灭火焰;二是高效泄压降温,快速释放高压高温气体;三是适配性,结构紧凑,不干扰布线检修;四是长效防护,防尘防凝露耐腐蚀,免频繁维护;五是以被动防护为主,无需外接能源,独立可靠触发。

2 电弧故障抑制防护结构整体设计

2.1 防护结构整体设计方案

(1) 整体布局设计。遵循不改主结构、不占核心电气空间原则,泄压模块置于柜顶低压区,利用热气流上升快速泄压;抑弧模块集成于母线间隔、线缆密集区,针对抑制初始电弧;隔热模块贴合侧板、门板内壁,阻断高温与冲击波。采用模块化拼接,便捷可拆,适配主流电缆柜。(2) 工作原理。当发生电弧故障,抑弧模块优先感知高温高压,快速触发抑弧,切断燃烧通道;若能量持续增大,顶部泄压模块自动开启,释放高压气流与高温烟气,降低柜内压力温度;同时隔热模块隔绝热辐射与冲击波,保护柜体及外部设备。三重防护联动,彻底规避设备损坏、火灾、柜体炸裂等风险。

2.2 核心抑弧模块结构设计

(1) 传感触发单元: 采用机械式热压复合触发结构, 由热敏合金片与压力感应膜片组成, 响应电弧高温 ($\geq 120^{\circ}\text{C}$) 及高压 ($\geq 0.15\text{MPa}$), 瞬间形变解锁, 触发响应 $\leq 2\text{ms}$, 捕捉初始故障信号, 实现毫秒级快速响应。(2) 干粉抑弧单元: 采用超细干粉灭火剂, 绝缘性强、灭火快、无残留。壳体为高强度绝缘阻燃塑料, 内置微型弹射结构, 触发后快速喷射干粉至故障区, 隔绝空气、阻断电离通道, 覆盖母线、线缆接头等高发区域, 无防护盲区。(3) 密封防护单元: 外部设置密封防水防尘胶圈, 防护等级 IP65。封闭式存储结构确保干粉不受潮、不结块, 长期免维护运行, 适应室内外各类环境^[2]。

2.3 自适应泄压模块结构设计

(1) 泄压主体结构设计。泄压模块装于柜顶通风口, 由泄压盖板、弹性复位组件、限位导向结构组成。盖板采用轻质高强铝合金, 设阻燃防尘滤网, 正常闭合, 保证密封防尘。(2) 自适应分级泄压原理。设两级阈值: 低压 0.2MPa 、高压 0.5MPa 。柜内压力 $0.2 \sim 0.5\text{MPa}$ 时, 弹性组件微形变, 盖板小幅开启, 微量泄压稳压; 压力超 0.5MPa 时, 盖板全开, 最大面积释放高压气流, 将压力控于安全值内, 防柜体变形。故障消除后, 组件自动复位, 盖板闭合, 恢复密封。

2.4 隔热防护辅助结构设计

(1) 隔热层结构设计。在柜体门板、侧板内壁贴合双层隔热防护层, 内层采用纳米气凝胶隔热材料, 导热系数低、耐高温, 可有效阻隔 3000°C 以上电弧高温辐射; 外层采用阻燃玻纤缓冲层, 兼具隔热与缓冲吸能作用, 可吸收电弧冲击波能量, 降低柜体振动与形变。双层结构复合设计, 厚度仅 5mm , 不占用柜内有效空间。(2) 边缘密封补强设计。针对柜体板材拼接缝隙、门锁缝隙等薄弱位置, 设置阻燃密封胶条与补强垫块, 避免高温烟气、高压气流从缝隙溢出, 防止局部过热、泄压不均问题, 同时提升柜体整体结构强度, 增强抗冲击能力。

3 防护结构仿真分析与性能优化

3.1 仿真模型搭建与参数设置

(1) 物理模型建立。以常用 10kV 电缆柜为原型, 按照 1:1 比例建立三维仿真模型, 模型包含柜体外壳、母线、电缆、接线端子、防护模块等全部核心结构。简化模型中非关键细小结构, 在保证仿真精度的前提下提升计算效率, 同时严格还原柜内空间布局、防护模块安

装位置与结构尺寸^[3]。(2) 仿真参数与工况设置。仿真介质为空气, 设置电弧故障初始参数: 电弧电流 10kA 、初始温度 5000°C 、故障起始时间 0ms 。设置两组对比工况, 分别为无防护结构的原始柜体、加装一体化防护结构的优化柜体, 监测两组工况下柜内压力、温度、气流速度、柜体应力等关键参数变化规律。仿真时间设置 $0 \sim 50\text{ms}$, 覆盖电弧故障萌生、发展、衰减全周期。

3.2 多工况仿真结果分析

3.2.1 压力场仿真分析

(1) 无防护柜体工况: 电弧故障发生后, 柜内压力快速飙升, 10ms 时达到峰值 0.72MPa , 远超柜体耐受压力阈值 (0.4MPa), 柜体门板、侧板出现明显应力集中, 存在炸裂、变形风险, 高压气流无法有效散逸, 压力衰减速度极慢。(2) 加装防护结构工况: 电弧故障触发后, 泄压模块快速响应, 12ms 时柜内压力达到峰值 0.38MPa , 低于柜体安全耐受阈值, 随后压力快速衰减, 50ms 时柜内压力恢复至正常水平。自适应分级泄压结构有效规避了瞬时高压冲击, 压力控制效果显著。

3.2.2 温度场仿真分析

(1) 无防护柜体工况: 电弧燃烧后高温快速扩散, 20ms 时柜内全域温度超过 1200°C , 电缆绝缘层、母线端子处于高温灼烧状态, 柜体壁面温度超过 600°C , 存在严重热损坏风险。(2) 加装防护结构工况: 抑弧模块在 2ms 内触发动作, 快速熄灭电弧, 阻断高温持续生成; 配合隔热结构防护, 20ms 时柜内最高温度仅 420°C , 且高温区域集中性大幅降低, 50ms 时温度快速降至 100°C 以内, 隔热、降温、抑温效果优异。

3.2.3 结构应力仿真分析

(1) 无防护柜体工况: 电弧冲击波作用下, 柜体门板中心应力峰值达 185MPa , 超过板材屈服强度, 出现不可逆形变, 门锁位置应力集中严重, 存在脱落失效风险。(2) 加装防护结构工况: 缓冲隔热结构吸收大部分冲击能量, 柜体最大应力降至 78MPa , 远低于板材屈服强度, 柜体无明显形变, 结构完整性良好, 防护结构可有效保护柜体机械性能^[4]。

3.3 防护结构参数优化设计

(1) 泄压结构: 经多开度仿真, 确定最优最大开度为 80mm , 兼顾快速泄压与防尘密封; 弹性组件刚度优化后, 触发阈值精准为 0.2MPa , 自适应响应精度提升。(2) 抑弧模块: 干粉最优填充量 80g , 可在 2ms 内完全覆盖电弧区并快速熄弧, 避免不足或浪费; 喷射角度

优化使覆盖率达 98%，消除防护盲区。（3）隔热结构：对比 4、5、6mm 厚度，5mm 层可有效阻隔高温辐射且占用空间最小，综合隔热与空间利用率，确定为最优参数。

4 防护结构样机试验验证与性能评估

4.1 试验方案与试验样机制备

（1）样机制备：按优化结构参数制作一体化抑弧防护样机，适配 10kV 电缆柜，含模块化抑弧、自适应泄压及复合隔热单元，尺寸、材质与仿真一致，装配贴合工程实际。（2）平台搭建：搭建电缆柜电弧故障试验平台，含高压供电、电弧发生、数据采集及环境监测系统，可模拟不同电流等级与时长的故障，实时采集压力、温度、形变、熄弧时间等数据，精度满足标准。（3）试验依据与工况：依据 GB/T11022 和 DL/T1476，设置低（5kA）、中（10kA）、高（15kA）三组能量工况，每组重复 3 次，确保可靠性。

4.2 核心性能试验测试

4.2.1 电弧快速抑制性能试验

（1）试验方法：启动电弧发生装置，分别触发不同等级电弧故障，记录防护结构的触发响应时间、电弧熄灭时间、故障清除效果。（2）试验结果：三组工况下，防护结构触发响应时间均 $\leq 2\text{ms}$ ，低、中、高能量电弧熄灭时间分别为 4.2ms、5.1ms、6.8ms，均可在电弧能量大幅累积前完成故障抑制，无电弧持续燃烧、复燃现象，抑弧性能优异，满足快速防护需求。

4.2.2 泄压抗冲击性能试验

（1）试验方法：监测不同电弧工况下柜内峰值压力、柜体形变情况、泄压模块动作状态，评估泄压防护与抗冲击性能。（2）试验结果：低、中、高能量故障工况下，柜内峰值压力分别为 0.25MPa、0.37MPa、0.41MPa，均低于柜体安全耐受阈值；试验后柜体无变形、开裂，泄压模块动作顺畅、复位可靠，无卡滞、失效问题，可有效抵御电弧高压冲击波破坏。

4.2.3 隔热防护性能试验

（1）试验方法：在柜体壁面、外部周边布置温度传感器，记录电弧故障全过程柜体表面及周边温度变化，评估隔热防护效果。（2）试验结果：电弧故障作用下，柜体表面最高温度仅 380℃，相较于无防护柜体降温 45% 以上，外部周边温度无明显升高，隔热结构可有效阻断高温热传导，避免柜体及周边设备受热损坏^[5]。

4.3 可靠性与环境适应性试验

（1）环境适应性试验。开展-40℃~85℃高低温循环试验、IP65 防尘防水试验，试验后防护结构各模块无变形、老化、失效，触发精度、抑弧、泄压性能无衰减，可适应高低温、潮湿、多粉尘等复杂现场环境。（2）耐久性试验。对防护结构开展 1000 次反复触发、泄压复位耐久性试验，试验后模块动作灵敏、密封性能良好，干粉介质无受潮、损耗，结构无磨损、松动，具备长期免维护稳定运行能力，满足工程长效应用需求。

4.4 试验结果综合评估与优化总结

（1）性能综合评估：多工况试验验证，该电缆柜电弧故障抑制结构可实现毫秒级响应，有效控制压力、温度在安全阈值内，杜绝柜体损坏、设备烧毁及火灾风险；环境适应性强、耐久性好，不影响运行检修，满足工程标准。（2）仿真与试验对比：压力、温度、响应时间等数据偏差 $\leq 8\%$ ，仿真模型可靠，优化参数合理，可有效指导设计；少量偏差源于环境干扰和装配误差，在允许范围内。（3）不足与展望：结构对常规工频电弧防护优异，但对极端超长持续电弧的适配性有待提升。后续将优化抑弧介质配方，增强高能量长时电弧抑制能力，并增加故障状态监测反馈，实现预警、防护、监测一体化。

结束语

本文完成了电缆柜电弧故障抑制防护结构的整体设计、参数优化与全面试验验证，所研发的一体化防护结构可精准阻断电弧、可控泄压降温，大幅提升电缆柜运行安全性。仿真与试验数据一致性良好，证实结构性能稳定、适配性强。研究仍存在极端长时电弧防护短板，后续将优化抑弧介质配方，增设故障监测模块，实现防护与智能预警一体化升级，完善电力设备电弧防护体系。

参考文献

- [1] 王军. 低压电缆柜电弧故障主动抑制与被动防护协同设计 [J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1821-1828.
- [2] 刘凯. 封闭式电缆柜内部燃弧故障防护结构改进与试验研究 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 215-222.
- [3] 赵宇. 开关柜金属网格吸能防护结构对内部电弧故障的抑制效果 [J]. 高压电器, 2023, 59(9): 102-108.
- [4] 林勇. 电缆柜内部电弧故障泄压防护结构设计性能试验 [J]. 电器与能效管理技术, 2025, 25(6): 76-81.
- [5] 黄泽楷. 中低压电缆柜电弧故障被动抑制防护结构优化研究 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 134-139.