

# 变电站消防与防爆设计中的多灾种耦合风险防控逻辑

王伟

国能国华(广西)新能源有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19272

**[摘要]** 变电站面临火灾、爆炸等多灾种耦合风险,破坏性远超单一灾种。需从风险耦合机理出发,构建防控逻辑体系,涵盖源头阻控、分级阻断、协同适配、韧性冗余等核心原则,并通过精准风险辨识、分区结构设计、适配消防技术选型、防爆专项设计及全周期协同管控等实施路径,实现多灾种耦合风险的有效防控,提升变电站抗灾韧性。

**[关键词]** 变电站; 消防防爆; 多灾种耦合; 风险防控; 抗灾韧性

**中图分类号:** TM63 **文献标识码:** A

## Multi-Hazard Coupling Risk Prevention and Control Logic in Substation Fire Protection and Explosion-Proof Design

Wei Wang

CHN Energy Guohua (Guangxi) New Energy Co., Ltd.

**[Abstract]** Substations face multi-hazard coupling risks such as fire and explosion, which are far more destructive than single hazards. Starting from the risk coupling mechanism, it is necessary to construct a prevention and control logic system covering core principles including source blocking, graded interruption, collaborative adaptation, and resilience redundancy. Implementation paths such as accurate risk identification, zoning structure design, appropriate fire protection technology selection, explosion-proof special design, and full-cycle collaborative control can achieve effective prevention and control of multi-hazard coupling risks and enhance the disaster resilience of substations.

**[Key words]** substation; fire protection and explosion-proof; multi-hazard coupling; risk prevention and control; disaster resilience

### 引言

变电站作为电力系统核心枢纽,其安全运行至关重要。然而,站内火灾、爆炸等多灾种耦合风险日益凸显,具有突发性、传导性、放大性等特征,传统单一灾种防控模式难以应对。因此,需突破传统思维,从内在耦合机理出发,搭建系统化防控逻辑,通过多维度技术集成与全周期管理,实现多灾种耦合风险的有效管控,保障变电站安全稳定运行。

### 1 变电站多灾种耦合风险的核心特征与形成机理

变电站多灾种耦合风险,是火灾、爆炸两类核心灾害,与设备故障、环境劣化、结构破损等次生风险,在时空维度相互作用、非线性叠加形成的复合型递进灾变风险,破坏效果远超单一灾种简单累加,具备突发性、传导性、放大性三大核心特征。站内充油变压器、电抗器的可燃绝缘油,易因局部过热、电弧放电引发火灾,持续高温会催生设备内压骤升触发物理爆炸;高压开关柜、GIS设备因绝缘缺陷、过电压击穿产生的电弧,既能引燃周边构件成灾,也会引发气体膨胀爆炸,爆炸冲击波又

会破坏相邻设备绝缘,诱发新一轮短路与火灾,形成闭环式循环耦合路径。

该类风险主要分为同步耦合与链式耦合两类,同步耦合为多灾种同步发生,链式耦合则是单一灾种逐步诱发次生灾害,呈现清晰递进演化规律。高温高湿、低温冻融等外部环境因素,会加速设备绝缘老化、引发密封失效,进一步放大耦合风险。相较于单一灾种,多灾种耦合风险演化路径不可控、波及范围难预判、常规防控手段易失效,必须突破传统单一防控思维,从内在耦合机理出发,搭建适配复杂风险场景的系统化防控逻辑,才能实现有效管控<sup>[1]</sup>。

### 2 多灾种耦合风险防控的核心逻辑与设计原则

#### 2.1 源头阻控: 降低初始风险触发概率

源头阻控是多灾种耦合风险防控的首要核心环节,立足从风险诱因根源发力,最大限度压低火灾、爆炸初始灾种的发生概率,彻底阻断耦合灾变的启动链条。变电站初始耦合风险主要源于设备本质安全缺陷、易燃易爆介质管控疏漏、运行工况异常

三大核心诱因, 源头阻控需围绕这三类问题开展精细化设计。设备选型阶段优先采用阻燃防爆型设备, 优化充油设备密封结构与绝缘材质, 从硬件层面减少可燃介质泄漏隐患; 对高压配电、电容器组等易产生电弧的部位, 强化绝缘冗余设计, 提升设备抗过电压与局部放电能力, 杜绝电弧成为两类灾害的共同触发源。同时优化站内平面布局, 实现高低风险区物理隔离, 核心风险区独立布设, 搭配运行参数常态化监测设计, 提前消解隐性故障, 筑牢初始风险防控第一道防线。

### 2.2 分级阻断: 切断灾种耦合传导路径

分级阻断是破解多灾种耦合风险的核心关键, 针对耦合风险链式演化、空间蔓延的核心特征, 划分三级防控梯度, 逐层切断火灾与爆炸的相互传导通道, 防止单一灾种快速升级为复合型重特大灾害。第一层级为局部阻断, 针对单台设备或小范围区域, 布设专属防火防爆隔离设施, 比如充油设备外围设置防火挡油墙, 同步配套设备壳体防爆泄压通道, 兼顾火情防控与爆炸压力疏导, 避免灾种相互触发; 第二层级为区域阻断, 在不同功能区间搭建高耐火、抗冲击的防火防爆分隔体, 阻断火焰、烟气与冲击波跨区域传播, 严控灾害扩散范围; 第三层级为系统阻断, 优化消防、通风、监控系统布局, 规避单一系统失效引发连锁反应。分级阻断的核心是实现小灾快速管控、大灾有效遏制, 将耦合风险限定在最小可控范围, 为后续处置预留充足时间与操作空间<sup>[2]</sup>。

### 2.3 协同适配: 统筹消防与防爆技术适配性

协同适配是提升整体防控效能、避免措施冲突的核心保障, 核心是统筹消防与防爆双重防控需求, 优化技术选型与设施布局, 实现消防举措不削弱防爆能力、防爆设计不阻碍消防处置, 二者高效协同。灭火介质选型优先适配电气火灾与防爆双重要求, 选用非导电、无次生危害的类型, 规避导电介质引发触电风险、高压介质加剧爆炸冲击, 同时针对充油设备火灾配套油品导流收集设施, 防范二次爆炸。设施布局层面, 防爆泄压口避开消防设施、人员通道与核心设备, 防止泄压高温气流与碎片损毁消防装置; 消防探测与灭火设备均采用防爆型构件, 保障爆炸发生后消防系统仍可正常运作。此外优化防控时序逻辑, 火灾初期优先控温抑爆, 爆炸发生后优先阻断火情蔓延, 通过时序与功能双重协同, 最大化发挥两类防控措施的叠加效能。

### 2.4 韧性冗余: 提升极端灾变下的抗毁能力

韧性冗余设计是应对极端多灾种耦合灾变的兜底防线, 核心是提升变电站在复合型灾害冲击下的抗毁性能与快速恢复能力, 杜绝单一防控环节失效引发系统性灾变。一方面强化核心防护设施冗余配置, 消防供水系统采用双路水源保障, 灭火装置兼顾固定与移动双重模式, 重点区域布设多重探测与灭火设施, 确保单一设备损坏后备用设施可无缝衔接; 防爆结构采用双重防护设计, 设备壳体与区域分隔体同步满足耐火与抗冲击要求, 兼顾抵御高温灼烧与爆炸冲击波。另一方面优化应急处置冗余路径, 针对不同耦合灾变场景制定多套处置方案, 明确差异化操作逻辑, 预留充足应急处置空间与通道, 保障极端场景下运维作业

可行性。通过设施与方案双重冗余设计, 保障变电站在耦合灾害冲击下保留核心防控功能, 最大限度降低事故损失<sup>[3]</sup>。

## 3 基于多灾种耦合逻辑的变电站消防与防爆设计实施路径

### 3.1 多灾种耦合风险精准辨识与分级

风险精准辨识与分级是开展针对性设计的前提, 需全面梳理站内各类风险源, 明确耦合风险的类型、等级与演化路径, 为后续设计提供依据。首先, 全面排查站内风险源, 重点梳理充油设备、高压配电装置、电缆廊道、蓄电池室、电容器室等关键部位的火灾与爆炸风险, 统计可燃介质类型、存储量、设备绝缘等级、运行参数阈值等基础信息, 识别单一灾种的触发条件与破坏特征。其次, 分析灾种间的耦合关联, 结合设备布局与运行工况, 预判可能出现的耦合场景, 比如“变压器火灾+油池爆炸”“电缆火灾+开关柜爆炸”“蓄电池室氢气爆炸+电气火灾”等, 明确各类耦合场景的演化规律与影响范围。最后, 开展风险等级划分, 根据风险发生概率、破坏烈度、影响范围, 将站内区域划分为极高风险区、高风险区、一般风险区, 极高风险区重点强化耦合防控措施, 一般风险区侧重基础防控, 实现防控资源的优化配置, 提升设计的针对性与经济性。

### 3.2 分区差异化消防与防爆结构设计

按照风险分级结果, 对站内不同区域实施分区差异化结构设计, 通过物理分隔、结构强化、空间优化, 切断耦合风险的空间传导路径, 筑牢结构防护屏障。对于充油变压器、电抗器等极高风险区, 采用独立式设备布局, 周边设置高度、强度达标的防火挡油墙, 防止绝缘油泄漏蔓延, 同时设备基础采用耐火、抗冲击结构, 配套事故油池与油品导流设施, 实现泄漏油品的快速收集与隔离; 设备壳体选用高强度防爆材质, 合理设置泄压面积与泄压方向, 确保内部爆炸时压力快速释放, 避免壳体破裂引发碎片飞溅与火灾扩大。对于高压配电室、GIS室等高风险区, 采用耐火极限不低于标准要求的隔墙与楼板进行封闭分隔, 门窗选用防火防爆型, 室内地面采用不燃、防静电材质, 避免静电积聚引发火灾; 电缆廊道与开关柜之间设置防火封堵与防爆隔离件, 阻断电缆火灾向开关柜蔓延, 同时廊道内分段设置防火隔断, 控制火灾蔓延范围。对于主控室、辅助用房等一般风险区, 采用基础防火设计, 与高风险区保持安全间距, 避免耦合风险波及, 保障核心管控区域的安全<sup>[4]</sup>。

### 3.3 适配耦合风险的消防技术选型与配置

消防技术选型需兼顾火灾防控与抑爆需求, 避免选用加剧爆炸风险或损坏电气设备的技术方案, 根据不同区域风险特点, 差异化配置探测、预警、灭火设施。在火灾探测方面, 采用多参数复合探测技术, 针对不同区域的火灾特征, 选用感温、感烟、气体探测相结合的方式, 充油设备区重点配置线型感温探测器, 实时监测设备表面温度; 电缆廊道、配电室选用吸气式感烟探测器与感温探测器联动, 实现早期火情预警; 蓄电池室、电容器室增设可燃气体、氢气浓度探测器, 提前预警气体泄漏, 避免气体积聚达到爆炸极限。在灭火设施配置方面, 极高风险区采用固定

灭火系统与移动灭火装置相结合的模式, 充油设备区适配高效灭火装置, 实现快速降温、窒息灭火, 同时抑制油品飞溅引发二次爆炸; 高风险区采用全淹没或局部应用灭火系统, 选用非导电灭火介质, 避免灭火过程中引发触电或绝缘损坏; 一般风险区配置基础灭火器材, 满足初期火情处置需求。同时, 优化灭火设施的防爆防护设计, 探测器、喷头、管线等部件加装防爆保护外壳, 避免爆炸冲击导致设施失效, 确保火情发生后灭火系统稳定运行。

### 3.4 防爆专项设计与耦合风险抑控措施

防爆专项设计需围绕爆炸触发、压力释放、冲击防护三个核心环节, 同时兼顾与消防措施的协同, 抑制爆炸与火灾的耦合效应。首先, 强化爆炸源头抑控, 针对易发生爆炸的设备与区域, 优化内部结构设计, 降低爆炸触发概率, 比如高压设备内部优化绝缘布局, 减少电弧产生概率; 蓄电池室强化通风设计, 保持室内空气流通, 降低氢气浓度, 避免达到爆炸极限。其次, 规范防爆泄压设计, 根据设备容积、可燃气体量、爆炸压力峰值, 精准计算泄压面积, 合理设置泄压口位置, 确保爆炸发生时压力快速释放, 减少设备结构破损与冲击波破坏力; 泄压口避开消防设施、人员通道与其他关键设备, 防止泄压过程引发火灾。最后, 加强爆炸冲击防护, 高风险区域的消防管线、监控线路、通风管道采用抗冲击防护措施, 避免爆炸冲击波破坏设施, 影响火灾防控; 核心区域设置抗爆屏障, 减弱冲击波传播力度, 防止局部爆炸引发大面积设备损坏, 进而扩大火灾范围。同时, 防爆设计与消防设计同步规划、同步施工, 确保泄压、防护、灭火措施相互配合, 形成防爆抑火、防火减爆的协同效果<sup>[5]</sup>。

### 3.5 全周期协同管控与防控效能优化

多灾种耦合风险防控并非单一设计环节即可完成, 需构建全周期协同管控体系, 贯穿设计、建设、运维全过程, 持续优化防控效能, 保障防控逻辑长期有效。设计阶段, 统筹消防与防爆专业需求, 开展联合设计, 避免专业割裂导致防控措施冲突, 同

时结合变电站电压等级、规模、环境条件, 动态调整设计方案, 确保适配实际场景; 建设阶段, 严格按照设计要求施工, 强化防护结构、消防设施、防爆装置的施工质量管控, 做好隐蔽工程验收, 确保各项设施发挥设计效能。运维阶段, 建立常态化监测与维护机制, 定期检测消防设施的运行状态、防爆结构的完好性、风险监测设备的灵敏度, 及时更换老化部件、修复破损结构, 消除隐性隐患; 同时, 梳理多灾种耦合风险处置流程, 明确不同场景下的操作逻辑, 强化运维人员的专业培训, 提升极端灾变下的应急处置能力, 确保防控措施落地执行。此外, 建立防控效能动态评估机制, 根据设备更新、工况变化、环境调整, 定期评估耦合风险防控效果, 优化设计方案与管控措施, 实现防控体系的持续迭代升级, 始终适配变电站的安全防控需求。

## 4 结束语

变电站消防与防爆设计需以多灾种耦合风险防控为核心, 通过精准辨识风险、分区差异化设计、适配消防与防爆技术、强化防爆专项措施及构建全周期协同管控体系, 实现防控逻辑的系统化与精细化。这不仅有助于提升变电站抗灾韧性, 还能为电力系统安全运行提供坚实保障, 推动变电站设计向更加安全、可靠的方向发展。

### [参考文献]

- [1]周芳菲, 张佳庆, 王晖. 变电站水喷雾消防设计关键技术研究[J]. 变压器, 2021, 58(11): 6-9.
- [2]崔鲁, 王慧, 卢小钟. 城市中心地区全地下变电站消防系统设计研究[J]. 电气应用, 2021, 40(06): 95-98.
- [3]孙岩. 220kV 附建式变电站消防设计常见问题分析[J]. 消防界(电子版), 2023, 9(17): 49-51.
- [4]钱家庆. 地下变电站火灾风险分析与应对措施[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(S1): 52-58.
- [5]毕磊. 变电站运行中的安全隐患识别与控制[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2025, 46(5): 1872-1880.