

光伏发电及储能设施火灾预警机制研究

郑芥非¹ 陈江媛² 邢 飞¹ 王焕然¹ 张梓婕¹

1. 中国石油辽宁储运分公司 辽宁沈阳 110085

2. 西南石油大学 四川成都 610500

摘 要：本研究旨在针对光伏发电系统火灾风险，构建一套高效、可靠的火灾预警机制。文章首先从直流电弧故障、热斑效应及逆变器故障等关键致灾因素入手，深入分析了光伏电站火灾的成因与特性。在此基础上，研究提出了一个涵盖“预案制定-终端感知-云端分析-响应方案”的多层次预警体系框架。本研究为光伏电站的火灾防控提供了从理论分析到工程实践的全套解决方案，对保障电力设施安全、提升电站运营可靠性具有重要的现实意义。

关键词：光伏发电；储能系统；火灾预警；热失控

一、引言

（一）研究背景

随着全球能源结构向低碳化转型，光伏发电及储能技术快速发展，但其火灾风险问题日益突出，亟需建立高效的火灾预警机制。全球应对气候变化的紧迫性促使各国加速能源结构调整，以光伏为代表的可再生能源成为实现碳中和目标的核心路径。根据《中国能源转型展望2024》，中国计划通过技术创新、国际合作及产业升级推动能源转型，而2024年新增装机容量达到277.17GW，同比增长28%，创下历史新高，累计达到886.66GW，中国光伏装机规模已连续10年位居全球第一，新增装机容量连续8年全球领先。然而，光伏发电及储能设施火灾事故频发。2024年海南某70MW光储电站因电池簇短路起火，烧毁整舱电池；2023年浙江某光伏企业火灾因直流高压电弧引燃，损失惨重。然而传统的烟雾探测、温度传感器等方法在光伏发电及储能场景下存在响应延迟、误报率高的问题。

因此，光伏发电及储能设施的火灾预警机制研究，是在新能源快速普及、传统消防技术不足、智能化技术进步的背景下展开的。未来，通过多学科交叉（材料科学、人工智能、消防工程）和系统性防控（早期预警、快速隔离、精准灭火），有望实现从“被动响应”到“主动免疫”的跨越，保障新能源设施的安全稳定运行。

（二）研究意义

（1）安全保障维度

减少人员伤亡。2021年德国户用光伏火灾致3人死亡，2022年美国储能火灾致8名消防员受伤110。避免次生灾害。储能火灾可能引发连锁爆炸，威胁电网稳定。

（2）经济与行业发展

降低直接损失。MW级光伏火灾修复成本超500万元，储能系统全损率60%。缓解保险压力。欧美储能保费从0.3%飙升至1.2%，安全改造可提升投资回报率。

（3）弥补传统消防技术的不足，提高火灾防控效率

传统火灾监测手段（如烟雾探测器、温度传感器）在光伏和储能场景下存在响应滞后、误报率高的问题，难以应对电池热失控等快速发展的火灾。新型预警技术能够实现早期精准预警，并结合智能灭火系统提高灭火效率，减少损失。

二、火灾成因

（一）直流电弧故障

光伏系统长期暴露在户外，受紫外线、温湿度变化、化学腐蚀等环境影响，电缆绝缘层易发生老化、脆化甚至开裂。绝缘性能下降后，直流高压击穿空气间隙，形成持续性电弧。

（二）热斑效应

热斑效应是指光伏组件中部分电池片因电流失配导致局部过热的现象，主要由以下因素引发：电池片遮挡。灰尘、鸟粪、树叶、积雪等覆盖电池片，导致受光不均。结构组件安装角度不当、支架或边框遮挡。电池片缺陷。隐裂、断栅、烧结不良等导致局部电阻升高。长期紫外线照射或机械应力造成电池片微裂纹。

（三）逆变器故障

逆变器作为光伏系统的核心电力转换设备，其故障主要与电气应力、热管理和元器件可靠性相关，具体包括：

（1）过载运行。逆变器在超出其设计工作范围时，

可能因电气应力过大而损坏,主要包括:输入侧过压:光伏串开路电压超过逆变器最大直流输入电压。输出侧过流:电网电压异常升高或短路时,逆变器持续输出超额定电流。MPPT超限:组串电流超出逆变器最大输入电流。

(2) 散热不良。逆变器内部电子元件在运行中会产生大量热量,若散热不足,导致环境温度过高、风扇故障、散热片积灰、导热硅脂老化。

(3) 元器件失效。逆变器由大量电子元件组成,长期运行后可能出现老化或损坏:电解电容失效。PCB板问题。

(四) 外部因素

雷击:雷电直接击中光伏组件、支架或储能柜,瞬间产生10~200kA的高压电流,远超光伏系统设备耐压能力。雷电电磁脉冲(LEMP)在电缆上感应出数千伏浪涌电压,击穿逆变器或BMS(电池管理系统)电子元件。

动物啃咬:啃咬电缆绝缘层直流侧裸露短路,引发电弧火灾。爬入设备柜造成短路柜内电弧放电。

三、预警机制

采用“预-端-云-响”四级架构:首先应用虚拟现实技术制定预案,然后通过感知层的数据传输给云端进行分析,然后响应层快速做出行动。

(一) 预案制定

1. 数字孪生平台

数字孪生技术通过构建光伏发电和储能系统的虚拟镜像,结合实时数据与多物理场仿真模型,为火灾预警提供了动态监测、故障预测和应急推演的全新解决方案。该技术的核心在于实现物理系统与虚拟模型之间的双向数据交互和持续优化,从而提升预警的准确性和时效性。

数字孪生平台的工作流程遵循“数据采集-虚拟映射-分析决策-反馈控制”的闭环机制。物理设备的实时数据首先同步至数字孪生体,通过故障诊断模块判断系统状态。若检测到异常(如温度骤升或电弧信号),平台立即触发预警,并联动灭火系统等应急设备。同时,优化后的控制策略会反馈至物理系统,形成动态调节的完整闭环。

2. 虚拟现实(VR)技术

虚拟现实(VR)技术通过计算机模拟三维环境,结合头戴式显示器和交互设备,为用户创造沉浸式体验。在光伏-储能安全领域,VR技术主要应用于火灾场景模拟、应急演练培训、设备操作训练以及事故调查分析等多个方面。该技术能够突破物理空间限制,为从业人员提供安全、高效的培训环境,同时为事故调查提供全新的可视化分析手段。

(二) 终端感知层

1. 光伏侧

红外热成像仪:红外热像仪是利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统接受被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,在光学系统和红外探测器间,有光学扫描设施对被测物体的红外热像进行扫描,并聚焦在单元或分光探测器上,由探测器将红外辐射能转换成电信号,经放大处理、转换或标准视频信号通过电视屏或监测器显示红外热像图。即光伏组件在使用红外热像仪进行红外检测时,红外热像仪。根据物体发出的红外能量转变为可见热图像,热图像上面的不同颜色代表被测物体的不同温度。红外热像仪,用于检测光伏电池组件表面温度分布情况,发现光伏组件出现的热斑或者温度分布不均匀的情况,是检测光伏电站组件的关键设备之一。

直流电弧故障检测方法:将IHD(积分谐波畸变)作为光伏系统直流电弧故障检测方法的理论基础,是基于其在处理复杂和不规则数据方面的独特优势。在光伏系统中,直流电弧故障通常表现为电流信号的不规则波动,这些波动往往难以通过传统的时频域分析方法进行准确捕捉。而IHD则能通过量化电流信号的“不规则性”,为检测电弧故障提供新的视角。

2. 储能侧

(1) 气态早期预警(极早期)

传感器:其中VOC、CO传感器部署于电池模组间、排气通道及舱体顶部。当电池内部电解液首次泄漏挥发时,VOC浓度会微升。电池隔膜受热分解(~80℃)会产生CO,早于明火数十分钟。H₂传感器部署于舱内最高点(氢气最轻)。锂电池热失控剧烈阶段会产生大量氢气,有爆炸风险。设定低阈值进行预警。

(2) 物理参数预警(早期)

光纤测温(DTS):采用防爆型感温光纤,紧密缠绕或贴附在电池模组表面、主要电缆及铜排上。系统实时监测温度绝对值和温升速率。一旦某点温升速率异常,即便绝对值不高,也立即触发预警,精准定位热源点。

吸气式烟雾探测器(ASD):在电池舱内布置采样管网,主动抽取空气进行分析。其灵敏度比传统点式烟感高数十倍,可在不可见烟阶段即发出报警。

(3) 明火确认(中期)

双波段火焰探测器:安装在舱内对角位置,确保无死角。通过同时分析红外(IR)和紫外(UV)波段光谱,能有效避免电焊、照明等非火灾光源干扰,仅在确

认明火时报警。

3. 外部环境

主要进行前期预警、监控，其中预防动物啃咬，可进行视频AI图像识别、超声波驱赶等，雷击预防可接入国家雷电监测预警网的商用服务或自建大气电场仪。

（三）云端分析层

平台构建：建立统一的消防报警与能源管理平台，所有传感器数据均接入此平台。

制定预警等级与行动指令，偏离预设范围时，系统依据偏差程度自动触发红、橙、黄、蓝、绿五级预警信号，引导运维团队采取相应级别的应急措施。

风险等级	预计信号颜色	偏差范围	应对措施
极高风险	红色	>5%	立即采取紧急措施
高风险	橙色	3%~5%	密切关注，适时干预
中风险	黄色	2%~3%	加强监控，预防问题扩大
低风险	蓝色	1%~2%	常规监测，确保供电质量
较低风险	绿色	<1%	平稳运行，优化管理

一级预警：“蓝绿”（提示）。平台生成预警工单，推送至运维人员APP。内容包含：异常点位、数据、可能原因及检查建议。不触发声光报警。

二级预警：“黄橙”（警示）。平台自动弹出报警窗口，发出柔和音效提醒中控室值班员。系统自动生成应急处置预案（如“建议远程切断PCS”），供值班员参考执行。

三级预警：“红”（行动）。平台界面全红闪烁，并发出尖锐、持续的警报声。系统自动执行预设的联动程序，并自动拨打预设责任人的电话，播放语音报警信息。

（四）响应

1. 预警级联动（自动/手动）

一级预警：平台自动下达指令，启动电池舱内的防爆型强排风系统，降低可燃气体浓度，防止积聚至爆炸极限。自动断开对应的直流熔断器或组串断路器，将故障隔离在最小范围。

2. 警报级联动（高度自动化）

二级警报（确认热失控/火警）：

紧急断电：平台立即向能量管理系统（EMS）和储能变流器（PCS）发出指令，有序切断交流侧并网开关。同时，向电池管理系统（BMS）发出指令，请求其断开各电池簇的直流断路器。

声光报警与疏散：触发全站应急广播（“储能舱发生火灾，全体人员立即撤离”），同时启动警灯。

信息上报：平台自动生成报警报告，通过短信、

APP、邮件等方式，将详细情况（时间、位置、数据、已采取的措施）推送给运维经理、安全总监及消防部门。

3. 三级警报（确认火警）

紧急断电：平台远程断开逆变器交流侧开关和箱变低压侧开关。

应急设备调度：平台可远程唤醒并引导厂区预置的消防灭火机器人行驶至火点附近，运维人员远程操作机器人进行高清视频侦察和精准喷水灭火，保障人员安全。

防止蔓延：如果火点临近储能设施或重要建筑，平台可手动或自动启动周边的消防水炮，对受威胁的设施外墙进行喷水降温，建立防火隔离带。

结论

本研究明确表明，光伏电站火灾主要源于直流电弧故障、热斑效应及逆变器故障等电气原因。其隐蔽性强、传统预警方式响应滞后，因此必须采用针对性的监测手段，实现对不同故障模式的精准感知。

预警机制的有效性依赖于三层架构的协同：本研究成功论证了所提出的三层预警架构的可行性。终端感知层是基础，负责全方位采集温度、电弧、烟雾等关键数据；云端分析层是核心，通过算法模型对海量数据进行融合分析，实现从“数据”到“预警信息”的智能转化；而科学的预案制定则是顶层设计，确保了预警信息能够触发高效、正确的应急响应流程。三者缺一不可，共同构成了一个完整的闭环管理系统。

参考文献

- [1] 李勇, 贺金辉, 乔旭, 等. 基于红外传感的博物馆火灾自动化预警系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33 (14): 161-165. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2025.14.033.
- [2] 李昭君, 张佩, 马莉, 等. 电力电缆火灾早期预警特征气体的优先技术研究[J]. 宁夏电力, 2025, (03): 44-49+82.
- [3] 黄威, 王文, 吴光军, 等. 光伏电站火灾监测预警技术应用[J]. 电力安全技术, 2025, 27 (06): 57-60.
- [4] 许建文, 李润源, 郭傅傲. 基于多种传感器信息的储能电站火灾自动化预警系统设计[J]. 自动化与仪表, 2025, 40 (05): 37-40+49. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2025.05.008.
- [5] 李根, 崔启利, 邢付顺, 等. 基于电化学储能能在油气田分布式光伏发电系统中的安全问题研究[J]. 中国设备工程, 2023, (08): 201-203.