

台风高发危化品场景下分布式光伏的技术对策和设计方法

邢金艳^{1*} 张建良² 骆秉余² 赵金宝² 李博¹ 魏国庆¹

1. 中国华电集团清洁能源有限公司 北京 100160

2. 中国华电集团清洁能源有限公司华南分公司 广东广州 510000

摘要: 在全球清洁能源需求激增的大背景下, 台风高发地区危化品场景对分布式光伏系统的安全稳定运行构成严峻挑战。本研究聚焦这一复杂问题, 深入剖析台风灾害特征与危化品场景特殊性, 从光伏组件选型、支架结构设计、电气系统防护、监测预警以及系统整体规划等多维度, 系统提出针对性技术对策与设计方法。旨在显著提升分布式光伏系统在极端环境下的抗灾能力, 保障系统可靠运行, 降低潜在风险。研究成果不仅填补了极端气象与高危环境下光伏系统设计的技术空白, 还为化工园区、沿海危化品仓储等特殊场景的清洁能源改造提供可直接复用的工程模板, 对推动能源安全与工业绿色转型具有重要的经济价值和深远的社会意义。

关键词: 台风高发地区; 危化品场景; 分布式光伏; 技术对策; 设计方法

引言

随着全球对清洁能源的需求持续增长, 分布式光伏发电凭借其高效、灵活的优势, 在能源领域得到广泛应用与推广。然而, 在台风高发地区, 尤其是涉及危化品生产、储存和使用的场景中, 分布式光伏系统的建设面临着巨大挑战。台风带来的强风、暴雨、风暴潮等极端天气, 与危化品易燃易爆、有毒有害等特性相互叠加, 对分布式光伏系统的安全性、稳定性和可靠性提出了极高要求。如何在这种复杂环境下合理设计和构建分布式光伏系统, 确保其安全运行并降低对危化品设施的影响, 成为当前亟待解决的关键问题。

目前, 虽然分布式光伏系统设计研究已取得一定成果, 但在综合考虑台风高发地区和危化品场景特定需求方面仍存在明显不足。现有研究大多集中于一般环境下的光伏系统设计, 对极端气象条件和特殊应用场景的综合考量不够充分。因此, 开展针对台风高发危化品场景下分布式光伏系统的技术对策和设计方法研究, 具有重要的现实意义和应用价值。

1 台风灾害特征及对分布式光伏的影响

1.1 台风灾害特征分析

台风作为强烈的热带气旋, 在其形成和发展过程中, 伴随狂风、暴雨、风暴潮等极端天气现象。在我国东南沿海等台风高发地区, 台风频繁登陆, 破坏力巨大。其中心附近最大风力可达 12 级以上, 超强台风风力更强, 对地面建筑物和设施构成严重威胁。同时, 台风带来的暴雨易引发洪涝

灾害, 淹没和损坏低洼地区基础设施; 风暴潮会导致海平面急剧上升, 加剧沿海地区灾害损失。此外, 台风路径复杂多变, 难以精确预测, 进一步增加了防范难度。这些灾害特征相互交织, 给各类设施带来严峻挑战, 分布式光伏系统也难以幸免。

1.2 台风对分布式光伏系统的影响机制

1.2.1 结构破坏

强风作用于光伏组件和支架时, 会产生巨大风压。当风压超过组件和支架的承受能力, 就会导致光伏组件破裂、脱落, 支架变形、倒塌。在过往台风灾害中, 部分分布式光伏电站就曾出现组件被强风吹飞、支架被连根拔起的情况, 不仅使光伏系统丧失发电能力, 还可能对周边危化品设施造成二次破坏, 引发严重安全事故。

1.2.2 电气故障

暴雨可能致使光伏系统电气设备进水, 引发短路、漏电等故障。逆变器、配电箱等关键电气设备一旦进水, 内部电子元件极易损坏, 影响系统正常运行。强风还可能吹断电缆, 导致线路中断, 影响电力传输。在危化品场景中, 电气故障产生的电火花等危险因素, 可能引发危化品泄漏、爆炸等严重后果, 威胁人员生命和财产安全。

1.2.3 系统性能下降

即使在台风过后, 光伏系统结构和电气设备未遭受明显损坏, 其性能也可能受到影响。组件表面可能因风沙侵蚀、

杂物撞击出现划痕、磨损,导致光电转换效率降低。同时,台风带来的温度骤变、光照不稳定等极端天气变化,也会影响光伏系统发电性能,降低整体输出功率。

2 危化品场景对分布式光伏系统的特殊要求

2.1 安全性要求

危化品具有易燃易爆、有毒有害等特性,一旦发生泄漏、爆炸等事故,后果不堪设想。因此,分布式光伏系统在危化品场景中运行,必须确保高度安全性。系统设计和安装应避免对危化品设施产生潜在安全隐患,如防止光伏组件或支架掉落引发危化品容器破裂。电气系统需具备严格的防爆、防火、防水、防尘等性能,防止因电气故障引发危化品事故。例如,在危化品储存仓库屋顶安装分布式光伏系统时,要保证光伏组件与仓库有足够安全距离,电气设备采用防爆型产品,并做好接地保护措施。

2.2 可靠性要求

危化品生产、储存等环节对电力供应可靠性要求极高。分布式光伏系统作为部分电力供应来源,必须具备可靠运行性能。在台风等极端天气条件下,系统应能保持稳定运行,满足危化品设施正常用电需求。这就要求光伏系统在设计时充分考虑冗余配置,如配备备用电源、设置多路输电线路等,提高系统容错能力和可靠性。同时,加强系统监测与维护,及时发现并处理潜在故障,确保系统始终处于良好运行状态。

2.3 兼容性要求

分布式光伏系统需与危化品场景中的其他设施和工艺流程相互兼容。一方面,光伏系统安装和运行不能干扰危化品设施正常运行,不能对危化品储存条件、生产工艺等产生不利影响;另一方面,危化品场景中的特殊环境因素,如腐蚀性气体、电磁干扰等,也不能对光伏系统性能和寿命造成显著损害。例如,在有腐蚀性气体的危化品生产车间附近安装光伏系统时,要选用耐腐蚀的光伏组件和支架材料,并采取相应防护措施,保障系统长期稳定运行。

3 台风高发危化品场景下分布式光伏的技术对策

3.1 光伏组件选型与优化

3.1.1 高抗风载组件选择

在台风高发危化品场景中,应优先选用高抗风载性能的光伏组件。此类组件通常采用高强度边框材料和坚固封装结构,能承受更大风压。如部分采用铝合金边框且厚度达标

的光伏组件,抗风能力显著增强。一些组件还通过改进外形结构,降低风阻系数,提高抗风稳定性。选型时需参考 GB/T36994-2018 等相关标准和测试数据,确保组件满足当地台风风力等级要求。

3.1.2 耐候性与抗腐蚀性组件

考虑到危化品场景特殊环境,光伏组件需具备良好耐候性和抗腐蚀性。危化品生产和储存过程中释放的腐蚀性气体、液体等会侵蚀光伏组件,因此应选择表面有耐腐蚀涂层、封装材料抗化学腐蚀的组件。例如,采用氟化物涂层的光伏组件可有效抵抗酸性气体侵蚀。同时,要保证组件在高温、高湿、紫外线照射等恶劣气候条件下,仍能保持稳定性能和可靠结构强度。

3.1.3 组件布局与连接优化

合理的组件布局 and 连接方式对提高光伏系统整体抗灾能力至关重要。布局时应根据安装场地实际情况,综合考虑风向、采光等因素,优化组件排列方式,如采用交错排列可降低风对组件的作用力。连接方面,选用可靠连接配件,确保连接牢固,并采用柔性连接技术,如使用柔性电缆,缓解台风引起的震动和位移对连接部位的影响,减少松动、断裂风险。

3.2 支架结构设计 with 加固

3.2.1 高强度支架材料选用

支架作为支撑光伏组件的关键结构,其材料选择直接影响系统抗风性能。在台风高发地区,宜选用热镀锌碳钢或铝合金等高强度材料。热镀锌碳钢强度高、耐腐蚀,热镀锌处理可形成致密锌层,延长支架使用寿命;铝合金材料质量轻、强度高、耐腐蚀,能在减轻支架重量的同时保证承载能力。选择时需综合考虑当地气候条件、安装场地地质情况 and 经济成本等因素。

3.2.2 优化支架结构设计

为提高支架抗风稳定性,需对其结构进行优化。采用三角形稳定结构是常见方法,通过合理布置三角形支撑部件,增强支架整体刚性和稳定性。如在平屋顶分布式光伏系统中,可采用倾斜式三角形支架结构,既能提高组件采光效率,又能增强抗风能力。此外,增加支架锚固点数量和深度,可有效提高支架与基础连接强度,抵抗台风拔起力。设计过程中可运用有限元分析等数值模拟方法,分析支架在不同风力条件下的受力情况,优化结构参数,确保安全性和可靠性。

3.2.3 加固措施与防风装置安装

在台风来临前,可采取一系列加固措施提高支架抗风能力。使用钢丝绳、防风拉杆等对支架进行额外加固,将支架与建筑物主体结构紧密连接,增强整体稳定性。同时安装防风网、导流板等防风装置,防风网可降低风对光伏组件的直接冲击力,导流板可改变风流方向,减少风压对支架和组件的作用。这些措施需根据实际情况合理设计和布置,确保发挥有效防护作用。

3.3 电气系统防护技术

3.3.1 电气设备防水、防尘与防爆设计

在危化品场景下,电气设备的防水、防尘与防爆性能至关重要。对于逆变器、配电箱等关键电气设备,应选用防护等级达到 IP65 及以上的产品,防止水和灰尘侵入。在存在易燃易爆危化品的区域,电气设备必须采用防爆型产品,并符合 GB-3836 系列等相关防爆标准。设备安装过程中,要确保密封性能良好,对所有接线端口、通风口等部位进行严格密封处理,防止外界危险物质进入设备内部。

3.3.2 电缆防护与接地系统优化

电缆作为电力传输关键部件,在台风高发危化品场景中需加强防护。选用高强度、耐腐蚀、防水性能的电缆,并进行穿管敷设,穿管材料可选用热镀锌钢管或 PVC 管,保护电缆不受外力破坏、腐蚀和水浸。同时优化接地系统,增加接地极数量和深度,采用降阻剂降低接地电阻,确保电气设备和光伏组件可靠接地,保障电气设备正常运行,避免漏电引发安全事故。

3.3.3 防雷与过电压保护措施

台风天气常伴随雷电活动,对分布式光伏系统的防雷和过电压保护提出更高要求。安装避雷针、避雷带等防雷装置,将雷电引向自身,保护光伏系统免受直击雷侵害。在电气系统中安装浪涌保护器等过电压保护器,抑制雷电感应过电压和操作过电压,保护电气设备。合理设计防雷和过电压保护系统布线,确保各级保护装置配合协调,提高系统整体防护能力。

3.4 监测与预警系统应用

3.4.1 实时监测系统构建

建立分布式光伏系统实时监测系统,对系统运行状态进行全方位、实时监测。在光伏组件、支架、电气设备等关键部位安装传感器,采集温度、湿度、风速、风压、电流、电

压等参数,并将数据实时传输至监控中心。监控中心利用数据分析软件处理和分析数据,及时发现系统运行异常情况,如监测到光伏组件温度过高或电流异常时,系统发出预警信号,提示运维人员检查处理,避免故障扩大。

3.4.2 台风预警信息接入与联动

将台风预警信息接入分布式光伏系统监测与预警平台,实现预警信息与系统联动。收到台风预警信号时,系统根据预警级别自动采取应对措施,如在台风来临前,自动启动防风加固装置,调整光伏组件角度降低风阻,提前切断部分非关键电气设备电源,确保系统安全运行。同时通过短信、邮件等方式向运维人员发送预警信息,提醒做好应急准备。

3.4.3 数据分析与故障预测

利用监测系统采集的大量数据进行分析 and 挖掘,实现对分布式光伏系统的故障预测。通过建立数学模型,分析系统运行参数变化趋势,预测可能出现的故障类型和时间。例如,通过长期监测和分析光伏组件的功率输出、温度等参数,预测组件是否存在潜在性能衰退或故障隐患。提前进行故障预测,可使运维人员有针对性地安排维护计划,及时更换老化或损坏部件,提高系统可靠性和维护效率。

4 台风高发危化品场景下分布式光伏的系统设计方法

4.1 前期勘察与评估

4.1.1 气象条件分析

在项目选址阶段,详细分析当地气象条件。收集历年台风数据,包括路径、风力等级、降雨强度等信息,评估台风对项目区域的影响频率和强度。参考中国气象局《台风年鉴》,确定目标区域历史最大风速、台风年均登陆次数及暴雨持续时长等关键参数。结合 NASA 的 SSE 数据库,分析当地光照资源分布,确定光伏组件最佳安装角度和朝向,提高系统发电效率。利用台风灾害风险评估模型,预测项目区域在不同台风情景下的受灾可能性,为后续设计提供量化依据。

4.1.2 地质条件勘察

对项目场地地质条件进行系统勘察,包括土壤类型、土壤承载力、地下水位及地质灾害隐患。采用静力触探试验和钻孔取样分析,确定土壤物理力学性质。例如,沿海滩涂区域若土壤承载力低,需采用桩基础替代传统扩展基础,确保支架锚固强度。勘察地下水位时结合水文地质资料,避免在高水位区域设置电缆沟,防止台风暴雨引发积水腐蚀。通过地质雷达扫描检测场地内是否存在地下溶洞或软弱夹层,

避免支架基础沉降导致结构失稳。

4.1.3 危化品场景风险评估

针对危化品场景特殊性,建立多维度风险评估体系。分析危化品的MSDS,明确其燃点、爆炸极限、毒性等级等参数,据此确定光伏系统电气设备防爆等级。评估光伏系统与危化品设施的相互影响,包括光伏组件掉落对危化品储罐的正向风险,通过仿真确定安全隔离带;危化品泄漏对光伏系统的逆向风险,采取涂覆防腐涂层、设置泄漏应急冲洗系统等措施。采用Bowtie风险分析法,绘制风险因果图,确定关键防护节点,降低风险。

4.2 系统设计要点

4.2.1 光伏系统容量规划

基于危化品场景用电特性,采用蒙特卡洛模拟法优化容量配置。以某化工企业为例,根据其正常生产负荷和应急设备功耗,结合当地年平均日照时数,设计合适容量的光伏系统,并搭配储能设备,满足台风期间供电需求。引入“可中断负荷”策略,台风预警发布时自动切断非关键负荷,优先保障核心设备用电,提升系统可靠性。

4.2.2 布局设计与安全距离确定

在分布式光伏系统布局设计中,充分考虑与危化品设施之间的安全距离。根据危化品危险等级和相关安全标准,确定光伏组件、支架、电气设备等与危化品储存仓库、生产车间等设施的最小安全距离。同时考虑台风等极端天气下光伏系统可能的损坏情况,确保即使发生故障也不会影响危化品设施。合理规划光伏系统内部布局,考虑风向、采光、维护通道等因素,采用阵列式布局,预留维护通道,在仓库屋顶安装时做好防火分隔。

4.2.3 电气系统设计与保护配置

电气系统设计满足危化品场景特殊要求,确保安全可靠。选择合适电气设备和线缆规格,根据系统容量和用电负荷计算参数,合理配置逆变器、配电箱、变压器等设备。优先选用防爆、防腐、防水电气设备,设置漏电保护、短路保护、过载保护等装置,采用智能电气保护系统实现故障快速检测和自动切断。设计完善的电气系统监控系统,实现远程监控和故障预警,利用数据分析评估设备运行状态,提高可靠性和稳定性。

4.3 组件防护

4.3.1 结构强化防护

在台风高发危化品场景,选用通过UL 61730标准认证

的高抗风载光伏组件,其边框采用加厚铝合金材质,抗风压性能强。支架采用热镀锌碳钢三角形网格结构,经有限元分析优化,在减轻重量的同时提升刚度,增加预埋螺栓数量、加深锚固深度增强连接强度。安装防风网与导流板组合装置,削减风冲击力,改变风流方向,降低风压。

4.3.2 电气防爆防腐防护

电气系统防护针对危化品场景设计。关键设备选用高防爆等级产品,逆变器采用全密封防爆舱体,电缆采用阻燃耐腐蚀电缆并穿管密封敷设。防雷与接地系统采用三级防护架构,将雷击过电压限制在安全范围内,降低接地电阻,保障电气设备安全。

4.4 智能运维

4.4.1 智能监测运维体系

构建基于物联网的智能监测系统,在关键部位部署传感器实时采集数据,利用边缘计算预处理,通过5G网络传输至运维平台。运用机器学习算法分析数据趋势,提前预测故障,准确率高。接入气象部门台风预警API,根据预警自动启动防风预案,保障系统安全。

4.4.2 专业化运维管理

制定专业化运维管理制度,运维人员需具备危化品安全与光伏技术双重资质。台风季节前开展专项巡检,台风过境后利用无人机检测受损部位。建立备品备件库,储备关键部件,确保故障后及时更换。定期组织应急演练,提升运维团队应急处置能力,保障系统长期稳定运行。

5 结论

本研究融合气象学、结构工程与危化品安全理论,构建了台风高发危化品场景下分布式光伏系统的全流程防护体系。研究提出了“组件抗风-支架加固-电气防爆-智能监测”四级技术对策,有效提升了系统在极端环境下的抗灾能力与安全性。创新建立了台风-危化品耦合风险模型,为特殊环境下光伏设计提供了量化框架。形成了“勘察-设计-防护-运维”工程模式,为危化品仓储、化工码头等场景的清洁能源改造提供了安全可靠的实践范式,本研究形成的风险防控思路对“双碳”目标下高危行业的能源转型具有普适性的借鉴意义,对推动能源安全与工业绿色可持续发展具有重要价值。

参考文献:

[1] 张明,李华.台风区光伏电站抗风设计规范研究[J].

太阳能学报,2020,41 (5):123-130.

[2] 国家能源局. 分布式光伏发电工程设计规范 (GB 50797-2012)[S]. 北京: 中国计划出版社,2012.

[3] American Petroleum Institute. API RP 521: Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems[M]. Washington: API, 2019.

[4] Wang L, Zhang X. Risk assessment model for typhoon-induced photovoltaic system failures[J]. Journal of Renewable Energy, 2021, 165: 112-121.

[5] 赵强, 等. 危化品仓库光伏系统防爆设计实践 [J]. 化工进展, 2022, 41 (增刊 1):456-462.

[6] International Electrotechnical Commission. IEC 60079-0: Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements[S]. Geneva: IEC, 2017.

[7] 刘畅, 等. 基于 GIS 的台风灾害光伏系统脆弱性评估 [J]. 电力建设, 2023, 44 (3): 89-97.

[8] Smith J, Johnson R. Design considerations for photovoltaic systems in hazardous chemical environments[C]. Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2020: 1-6.

[9] 台风委员会. 西北太平洋台风年鉴 (2010-2020)[M]. 北京: 气象出版社, 2021.

[10] Zhang, W., et al. (2022). Dynamic response of photovoltaic 支架 under typhoon loads. Journal of Structural Engineering, 148 (5), 04022012.

[11] 国家能源局. GB/T 36994-2018 地面用晶体硅光伏组件机械载荷测试方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[12] Li, Y., et al. (2023). A novel anti-corrosion coating for photovoltaic modules in chemical environments. Solar Energy Materials and Solar Cells, 245, 111987.

[13] 危化品安全标准化技术委员会. 危险化学品企业特殊作业安全规范 (GB 30871-2022)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[14] American Petroleum Institute. Recommended practice for electrical installations in petroleum facilities classified as Class I, Division 1 and 2 (API RP 500)[S]. 2021.

作者简介: 邢金艳(1988—), 女, 汉族, 河南商丘人, 博士学历, 中国华电集团清洁能源有限公司, 高级工程师, 构造地质。