

极端天气下新能源发电设备的抗灾防护技术与运行可靠性分析

温凯

国能宁夏供热有限公司，宁夏 银川 750001

DOI:10.61369/EPTSM.2026010012

摘 要： 随着新能源在电力系统中的占比持续提升，由极端天气引发的发电设备故障与停运问题日益凸显，严重威胁电力系统的安全稳定运行。本文旨在系统分析极端天气对新能源发电设备的影响机理，并深入研究相应的抗灾防护技术与运行可靠性。文章详细剖析了强风、暴雨洪涝、极端温度、雷电及沙尘暴五类极端天气对风力发电机组和光伏发电系统的具体影响路径与破坏机制，从“事前预防、事中应对、事后恢复”三个维度，构建了一套完整的新能源发电设备抗灾防护技术体系，涵盖了科学选址、设备选型、监测预警、主动控制、快速巡检与智能修复等关键技术。在此基础上，本文结合可靠性分析理论，建立了考虑极端天气影响的系统可靠性模型，并通过一个西北风光互补电站的案例进行蒙特卡洛模拟分析。

关 键 词： 极端天气；新能源发电；抗灾防护；运行可靠性

Disaster Resistance Protection Technology and Operational Reliability Analysis of New Energy Power Generation Equipment under Extreme Weather Conditions

Wen Kai

Guoneng Ningxia Heating Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750001

Abstract： With the continuous increase in the proportion of new energy sources in the power system, the issues of equipment failures and outages in power generation caused by extreme weather have become increasingly prominent, posing a serious threat to the safe and stable operation of the power system. This paper aims to systematically analyze the impact mechanisms of extreme weather on new energy power generation equipment and conduct in-depth research on corresponding disaster resistance protection technologies and operational reliability. The article provides a detailed analysis of the specific impact pathways and damage mechanisms of five types of extreme weather—strong winds, heavy rainfall and flooding, extreme temperatures, lightning, and sandstorms—on wind turbine generators and photovoltaic power generation systems. From the three dimensions of "pre-event prevention, in-event response, and post-event recovery," a comprehensive disaster resistance protection technology system for new energy power generation equipment is constructed, covering key technologies such as scientific site selection, equipment selection, monitoring and early warning, active control, rapid inspection, and intelligent repair. Building on this foundation, this paper establishes a system reliability model that considers the impact of extreme weather by integrating reliability analysis theory and conducts a Monte Carlo simulation analysis using a case study of a wind-solar complementary power station in northwest China.

Keywords： extreme weather; new energy power generation; disaster resistance protection; operational reliability

引言

在全球能源转型与“双碳”目标驱动下，以风电和光伏为代表的新能源发电正以前所未有的速度发展，已成为我国能源结构中的重要组成部分。然而与传统的火力发电不同，新能源发电具有天然的间歇性与波动性，其发电设备多暴露于复杂的自然环境中，对外部气象条件高度敏感。近年来，全球气候变化导致极端天气事件的频率和强度显著增加，对新能源发电设备的安全稳定运行构成了严峻挑战。这些灾害不仅可能导致设备损坏、电站非计划停运，造成巨大的经济损失，更会引发大规模电力缺口，威胁整个电力系统的安全与

韧性。鉴于此，本文旨在系统性地研究极端天气下新能源发电设备的抗灾防护技术与运行可靠性，构建一套涵盖事前预防、事中应对、事后恢复三个阶段的综合性抗灾防护技术体系；建立考虑极端天气影响的系统可靠性模型，并通过案例进行量化分析；总结研究成果，为提升新能源发电系统抵御极端天气的能力、保障电力供应安全提供理论依据与技术参考。文章的研究对于推动新能源产业高质量、可持续发展具有重要的现实意义。

一、极端天气对新能源发电设备的影响机理分析

（一）极端天气类型及其特征

与传统的火力发电不同，风电和光伏发电作为新能源发电的主要形式，极易受到外界气象因素的影响，发电功率呈现出间歇性与波动性的特点^[1]。极端天气指特定地区和时间内概率极低、强度极大且危害严重的天气现象，对新能源发电设备影响显著的主要包括五类。强风天气（含台风、强阵风）风速超设计阈值，易冲击风电高耸结构；暴雨洪涝（含次生山洪、滑坡）威胁露天光伏组件及场站配电系统；极端温度（高温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、低温 $\leq -30^{\circ}\text{C}$ ）涵盖酷暑与冰冻降雪；雷电（直击雷、感应雷）电压高、突发性强，易损坏电子控制系统；沙尘暴（干旱半干旱地区多发）强风携沙尘，会磨损设备并遮挡光伏受光面。各类极端天气虽特征、频率、影响范围不同，但均可能导致设备故障停运甚至永久性损坏。

（二）对风力发电机组的影响机理

风力发电机组作为高耸旋转机械，结构复杂且暴露在外，易受极端天气直接影响^[2]。强风天气下，风速超切出风速时叶片气动载荷剧增，可能导致叶片变形、断裂及塔架弯曲、倒塌，强湍流还会加速轮毂、主轴等传动部件疲劳损坏；暴雨洪涝会软化风机基础土壤、降低承载力，积水可能引发基础沉降、倾斜，雨水渗入机舱还易造成电气控制柜短路、液压系统故障；极端高温会使机舱内核心设备超温停机，长期高温加速绝缘材料老化、缩短设备寿命；低温冰冻时叶片易结冰，导致气动性能下降、机组振动加剧，还会增大润滑油粘度、冻结液压管路，损坏轴承、齿轮箱等部件；雷电天气中，直击雷会损坏设备结构及电子元件，感应雷产生的过电压可能击穿精密电子设备，造成控制系统瘫痪。

（三）对光伏发电系统的影响机理

光伏发电系统主要由光伏组件、逆变器等设备组成，运行状态易受极端天气干扰^[3]。暴雨洪涝天气中，积水会导致支架倾斜甚至倒塌，雨水渗入还会损坏设备电路与光伏组件，严重时可能引发火灾；极端高温会使光伏组件效率每升高 1°C 下降 $0.3\%\sim 0.5\%$ ，同时加速组件封装材料老化和设备绝缘老化，增加故障概率；低温冰冻天气里，积雪遮挡会影响组件发电，冻融循环会损坏组件防水性能，低温还会造成逆变器启动困难；雷电天气中，直击雷会永久损坏光伏组件，感应雷产生的过电压则会损毁设备内部精密电路；沙尘暴天气下，沙尘颗粒不仅会遮挡组件受光面降低发电效率，还会磨损组件玻璃，甚至进入设备内部影响其散热与运行稳定性。

二、新能源发电设备抗灾防护关键技术

（一）事前预防性防护技术

事前预防性防护技术是新能源发电设备抗灾能力提升的基础，核心通过科学规划设计从源头降低极端天气影响^[4]。选址需结合区域极端天气历史数据与气象预报模型，避开风走廊、洪涝低洼地、雷电高发区等；无法避开时优化场站布局，如风电场合理规划机组间距、光伏场站选择地势高且排水好的区域^[5]。设备选型需适配区域极端天气特征，风力发电机组选用抗强风、抗低温、防雷击机型，叶片采用高强度复合材料，塔架加厚并防腐；光伏组件选用高耐候性、高透光率产品，具备防水、防雹、抗冻融性能，逆变器选用宽温度适应范围机型^[6]。基础工程方面，风电基础采用沉井或桩基础加固，提升抗倾覆、抗沉降能力；光伏支架基础采用混凝土灌注桩或螺旋桩，洪涝高发区采用抬高式设计^[7]。同时完善防雷接地系统，风电机组设避雷针、避雷带等直击雷防护装置，金属部件可靠接地；光伏场站关键设备处装防雷器，确保接地电阻符合规范，降低雷电灾害风险。

（二）事中应对性防护技术

事中应对性防护技术核心是通过实时监测预警与主动控制，降低极端天气对设备的损坏^[8]。关键支撑为极端天气监测预警系统，需整合卫星遥感、地面气象站等多源数据，结合大数据与AI算法实现精准预警，同时通过场站传感器实时掌控风机转速、组件温度等设备参数。针对不同极端天气制定主动控制策略，强风时风电机组调叶片角度或停机，光伏支架调整角度减风载；暴雨时启动排水、关闭低洼区域电源并防护核心设备；高温时启用散热/冷却系统，优化逆变器运行；低温时启动除冰融雪系统；雷电预警时切断非必要电源并启动防雷装置。此外，需建立含应急电源、抢修设备及专业团队的应急保障体系，确保快速响应。

（三）事后恢复性防护技术

事后恢复性防护技术的核心是通过快速巡检、故障诊断与高效修复，缩短设备停运时间，恢复系统运行能力^[9]。灾后快速巡检技术是前提，可采用无人机巡检、红外热成像检测、远程在线监测等技术，对风电场、光伏场站进行全面巡检，快速定位故障设备及损坏部位，如风机叶片断裂、光伏组件破损、支架倾斜、电缆短路等；对于大面积受灾区域，可采用多无人机协同巡检模式，提高巡检效率。故障诊断与定位方面，利用设备状态监测数据、历史故障数据及人工智能诊断算法，对故障类型、故障原因进行精准分析，如通过振动数据诊断风机轴承故障，通过电压电流数据诊断光伏组件短路故障；同时建立故障诊断知识库，实现故障的快速匹配与定位^[10]。设备修复与更换方面，针对不同故障

类型采用相应的修复技术：风机叶片轻微损坏可采用复合材料修补技术进行修复，严重损坏则需更换叶片；光伏组件破损可采用组件更换技术，密封胶老化可进行重新封装；支架倾斜可通过校正加固技术进行处理，基础沉降需采用注浆加固技术；电气设备短路损坏可更换损坏元件，重新调试设备参数。系统重启与性能测试方面，设备修复完成后，需对系统进行分步重启，监测设备运行参数是否正常；同时对修复后的设备进行性能测试，如风机出力测试、光伏组件效率测试，确保设备达到正常运行标准。

三、极端天气下新能源发电系统运行可靠性分析

（一）可靠性分析理论基础

新能源发电系统运行可靠性是指系统在规定的时间内、规定的极端天气条件下，完成规定发电功能的能力。可靠性分析的核心是量化系统的可靠性水平，识别影响系统可靠性的关键因素。常用的可靠性衡量指标包括平均无故障时间（MTBF），指设备或系统在正常运行过程中，两次相邻故障之间的平均时间，反映设备的抗故障能力；平均修复时间（MTTR），指设备或系统发生故障后，从故障发生到修复完成并恢复正常运行所需的平均时间，反映设备的修复效率；可用率（A），指设备或系统在规定时间内正常运行时间与总时间的比值，是衡量系统可靠性的核心指标，可用公式 $A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$ 计算；故障率（ λ ），指设备或系统在单位时间内发生故障的概率，反映设备的故障频发程度。常用的可靠性分析方法包括故障树分析（FTA），通过构建故障树，识别导致系统故障的所有可能原因及组合关系，量化各因素对系统故障的影响程度；失效模式与影响分析（FMEA），通过分析设备各部件的失效模式、失效原因及失效影响，对失效风险进行评估与排序；蒙特卡洛模拟（MCS），通过随机模拟设备的故障与修复过程，计算系统的可靠性指标，适用于复杂系统的可靠性分析。这些理论与方法为极端天气下新能源发电系统运行可靠性分析提供了坚实的基础。

（二）考虑极端天气影响的可靠性建模

考虑极端天气影响的新能源发电系统可靠性建模，需结合极端天气特征与设备故障规律，构建涵盖天气因素的可靠性模型。建立极端天气概率模型，基于区域极端天气历史数据，采用概率分布函数拟合极端天气的发生频率、强度及持续时间，量化极端天气的不确定性。构建设备在极端天气下的失效概率模型，通过

分析极端天气强度与设备失效概率之间的关系，建立失效概率函数；例如强风天气下，风机失效概率随风速增大而显著上升，可采用对数正态分布或指数分布描述两者之间的关系；高温天气下，光伏组件失效概率随温度升高呈线性或非线性增长。然后，建立系统级可靠性模型，根据新能源发电系统的结构特点，结合设备失效概率模型，采用故障树分析、蒙特卡洛模拟等方法，构建系统可靠性模型；例如风电场可视为多个风机的并联系统，光伏电站可视为多个光伏组串的并联系统，系统可用率为所有设备可用率的综合体现。此外，还需考虑抗灾防护技术对可靠性的提升作用，将事前防护、事中应对、事后修复技术的效果量化为设备失效概率的降低量、修复时间的缩短量，融入可靠性模型中，实现对防护技术效果的评估。

（三）案例分析

本文选取我国西北某风电光伏互补电站作为案例研究对象，该地区位于干旱半干旱区域，极端天气以强风、沙尘暴、低温冰冻为主，偶尔发生暴雨天气。场站总装机容量为100MW，其中风电装机60MW（20台3MW风机），光伏装机40MW（160000块250W光伏组件），配备20台逆变器、40个汇流箱等设备。研究收集该地区10年极端天气数据并拟合分布，基于设备故障及运行数据建立极端天气失效概率模型，后通过蒙特卡洛模拟分析系统可靠性。结果显示未采用防护技术时，场站年平均可用率82.3%；叠加事前预防、事中应对、事后恢复防护技术后，可用率逐步提升至95.7%，平均修复时间缩短至15天。结论表明，防护技术体系可显著提升系统可靠性（事前预防为基础，事中应对降低故障概率，事后恢复缩短修复时间），且强风与沙尘暴是主要影响因素，需优化其防护技术。

四、结束语

在全球能源结构深刻变革和气候变化日益严峻的背景下，提升新能源发电系统在极端天气下的生存能力与运行可靠性，已成为保障能源安全、推动能源转型的关键课题。本文围绕极端天气对新能源发电设备的影响机理、抗灾防护技术体系及运行可靠性分析展开了系统性研究。面对日益频发的极端天气挑战，必须从系统工程的视角出发，构建科学、完备、智能的抗灾防护体系。本文的研究成果可为新能源电站的规划设计、建设运维及政策制定提供重要参考，对提升我国新能源电力系统的整体韧性和可靠性，促进能源结构绿色低碳转型具有积极的实践意义。

参考文献

- [1] 鞠冠章,王靖然,崔琛,等.极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J].智慧电力,2022,50(11):77-83.DOI:10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013.
- [2] 荣俊杰.极端天气下新能源电力系统韧性评估及提升方法研究[D].华北电力大学,华北电力大学(北京),2024.
- [3] 李宝聚,齐宏伟,傅吉悦,等.极端气象天气对新能源运行影响分析[J].吉林电力,2022,50(1):10-13.DOI:10.3969/j.issn.1009-5306.2022.01.003.
- [4] 姜兴华.新能源发电设备可靠性影响因素分析[J].建材发展导向(下),2017,15(3):376.
- [5] 汝少利.新能源发电设备可靠性影响因素分析[J].中国高新技术企业,2016(4):86-87. DOI:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.06.043.
- [6] 尹波.影响新能源发电设备可靠性的主要因素分析[J].电力设备管理,2021(6):97-99.
- [7] 曹江春.新能源发电设备可靠性影响因素的分析[J].中国科技纵横,2017(4):179,195.DOI:10.3969/j.issn.1671-2064.2017.04.132.
- [8] 王洪超,张海军.新能源发电设备可靠性影响因素分析[J].中国房地产业,2021(4):251.
- [9] 庞志伟.新能源发电设备可靠性影响因素分析[J].警戒线,2020(10):111-112.
- [10] 缪春琼,胡慧艳,滕开良,等.分布式发电技术及新能源设备发展状况研究[J].红水河,2018,37(4):34-37.DOI:10.3969/j.issn.1001-408X.2018.04.010.