

引用格式: 孟丹, 陈正洪, 许杨, 等. 极端天气对风电开发全过程的影响及应对策略[J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 1-14. MENG Dan, CHEN Zhenghong, XU Yang, et al. The impact of extreme weather on the entire process of wind power development and response strategies [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 1-14. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-334.

极端天气对风电开发全过程的影响及应对策略

孟丹^{1,2}, 陈正洪^{1,2,✉}, 许杨^{1,2,✉}, 曾鹏³, 王明^{1,2}, 崔杨^{1,2}, 许沛华^{1,2}

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205;

2. 湖北省气象能源技术开发中心, 湖北 武汉 430205;

3. 广西壮族自治区防雷中心, 广西 南宁 530022)

摘要: [目的]碳中和、碳达峰系列政策的实施, 推动了风电这一清洁能源的快速发展。近年来, 极端天气气候事件频发, 随着风电大规模投产并网, 极端天气导致的风电场气象灾害问题愈加凸显。极端天气不仅给风电开发带来了严峻挑战, 还可能对电网稳定性和供电可靠性造成影响, 因此, 需要深入了解极端天气对风电开发的影响机理, 采取有效预防和应对措施, 确保风电行业健康安全发展。[方法]通过梳理近期发表的风电气象灾害相关文献, 文章将影响风电开发的高影响天气分成了极端天气和不良天气2大类, 归纳总结了台风、大风、雷电、暴雨、沙尘暴、低温冰冻、高温等极端天气以及小静风、盐雾、海雾等不良天气在风电场规划设计、施工建设、生产运营阶段对风电场规划立项、资源评估、勘察设计、装机建设、基建设施、风电出力和风电功率预测等方面的影响。[结果]规划设计阶段, 需识别并评估极端天气风险, 进行科学的宏观和微观选址选型; 施工建设阶段, 暴雨、低温冰冻等影响运输延误工期, 大风、暴雨等影响吊装引发作业风险, 海雾、雷电等影响海上风电施工安全; 生产运营阶段, 极端天气易导致风电场大规模停机和出力损失, 甚至可能威胁电网安全稳定运行。除了一定强度的热带气旋外, 其他高影响天气均不利于风电出力。频发的极端天气过程导致风电功率预报准确率降低。[结论]最后, 提出了应对高影响天气的措施, 包括加强应急管理和极端天气的监测预警, 考虑极端天气对风电功率预测的影响, 加强储能系统建设等。

关键词: 风电场; 极端天气; 风电出力; 功率预报; 影响

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-334

文章编号: 2095-8676(2025)02-0001-14

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-334

中图分类号: TK89; P49



论文二维码

The Impact of Extreme Weather on the Entire Process of Wind Power Development and Response Strategies

MENG Dan^{1,2}, CHEN Zhenghong^{1,2,✉}, XU Yang^{1,2,✉}, ZENG Peng³, WANG Ming^{1,2}, CUI Yang^{1,2}, XU Peihua^{1,2}

(1. Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Hubei Provincial Meteorological Energy Technology Development Center, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Lightning Protection Center, Nanning 530022, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] The implementation of carbon neutrality and carbon peaking policies has promoted the rapid development of wind power, a clean energy source. In recent years, extreme weather and climate events occur frequently, and with the large-scale production and grid connection of wind power, the issue of meteorological disasters in wind farms caused by extreme weather has become more prominent. Extreme weather not only poses severe challenges to wind power development, but may also affect the grid stability and

收稿日期: 2024-10-02 修回日期: 2024-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于爬坡特征识别和深度学习的复杂地形和气候条件下的风电功率预报方法研究”(42205196); 中国气象局软科学研究项目“‘双碳’背景下能源气象服务供给侧结构性改革与实现路径研究”(2023ZDXM03); 中国气象局科技项目“能源保供气象服务关键技术及产品研发”(CMAJBGS202323); 湖北省自然科学基金项目“基于卫星雷达资料和中小尺度模式的风光资源降尺度方法研究”(2023AFB543); 湖北省气象局科技基金项目“湖北省大气边界层风能资源特性分析及开发潜力评估”(2023Y08)

reliability of power supply. Therefore, it is necessary to deeply understand the mechanism of how extreme weather affects wind power development, and take effective prevention and response measures to ensure the healthy and safe development of the wind power industry. **[Method]** By reviewing the recently published literature on meteorological disasters in wind farms, the paper classified the high-impact weather affecting wind power development into two major categories: extreme weather and adverse weather. It summarized the impacts of extreme weather such as typhoon, strong wind, lightning, rainstorm, sandstorm, cryogenic freezing and high temperature, as well as adverse weather such as calm breeze wind, salt spray and sea fog, on wind farm planning, resource assessment, survey and design, installation construction, infrastructure, wind power output and wind power prediction during the planning and design, construction and operation stage of wind farm. **[Result]** In the planning and design stage, it is necessary to identify and assess the risks of extreme weather, and carry out scientific macro and micro site selection. In the construction stage, rainstorm, cryogenic freezing and so on can affect transportation and delay the construction period; strong winds, heavy rain and so on affect hoisting and cause operational risks; sea fog, lightning and so on may affect the safety of offshore wind power construction. In the production and operation stage, extreme weather can lead to large-scale shutdown of wind farms and loss of output, and even threaten the safe and stable operation of the power grid. Except for tropical cyclones of a certain intensity, other high-impact weather events are not conducive to wind power output. The frequent occurrence of extreme weather leads to a reduction in the accuracy of wind power forecasting. **[Conclusion]** Finally, measures to cope with high-impact weather are proposed, including strengthening emergency management and extreme weather monitoring and early warning, considering the impact of extreme weather on wind power forecasting, and strengthening the construction of energy storage system.

Key words: wind farm; extreme weather; wind power output; wind power forecasting; impact

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

大力发展清洁能源,是全球气候治理和实现碳中和目标的重要举措^[1]。根据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)发布的《2024年全球风能报告》,2023年,全球新增风电装机容量117 GW,较前一年同期增长50%^[2]。在“双碳”宏伟蓝图下,风力发电的地位日益显著^[3]。风电机组已进入大型化发展阶段,超高塔筒和叶轮直径大大突破了自然地理限制,风机选址逐渐扩大至沙漠、戈壁、荒漠、高原等环境更为苛刻的地区^[4]。

风电的大规模开发成就了高比例可再生能源系统,但风电的发电能力高度依赖于天气,风电的不稳定性和天气的不确定性极大影响了新型能源系统的运行安全^[5-7]。风电的不稳定性主要由风的间歇性、波动性、区域性引起,这些特性导致了区域风能资源差异,而突发的极端天气主要威胁风电场的安全运营^[8]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)最新的评估报告,全球气候变化不断加剧,台风、干旱、强降水等极端天气事件频发^[9]。极端天气对风电开发的影响,不仅包括破坏风电场基础设施,影响风力

发电效率,还影响能源安全和电网稳定^[10],引起了业内广泛关注。2020年,湖北武穴某风电项目施工期正逢雨季,暴雨引发的洪涝淹没了工地和施工设备,造成了巨大经济损失。2021年,美国德州极端低温、暴雪天气导致该州一半的风力发电机冻住停机,使得风电供应不足,造成大停电事件。因此,在风电开发全生命周期各个阶段,都需时刻关注天气变化,尤其是影响风电开发的高影响天气。

有不少学者开展了单一灾害对风电的影响研究,陈勇全^[11]构建了海上风电场台风大风的风险评估模型,进行了华南沿海海上风电场的台风大风风险管理。顾建伟等^[12]基于自洽先导起始发展模型,建立叶片下行雷击风电分布计算模型,分析了风机叶片雷击风险的分布特征;杨德旭、陈煌等^[13-14]研究了陆上、海上风电叶片的雨水侵蚀影响,比较了涂层和覆膜对叶片的保护作用;梁恩培^[15-16]进行了叶片涂层风洞冲蚀磨损试验及模型研究,并梳理了风沙对风机关键部件的影响;王之东等^[17]通过仿真软件建立了风机覆冰前后2种模型,讨论了叶片覆冰对风电机组关键结构安全性的影响;郑婷婷等^[18]将寒潮天气分为风机覆冰、大风切机、低温脱网、晴冷无风4种类型,分析了各种寒潮类型对风电运行和功率预

测的影响。

也有学者做了风电场综合灾害的影响研究,杜树成、曾琦等^[19-20]分析了气象灾害对风力发电机组以及其他建筑单元的影响;葛珊珊、Fang-Shii等^[21-22]评估了气象和水文灾害对海上风电的影响;鞠冠章等^[23]基于风电和光伏发电数据,对寒潮、大风、降雪、沙尘天气对新能源发电和电网运行的机理进行了阐述。纵观这些研究,或是距今年份已久,或是针对单一风电场类型,或是分析的极端天气灾害种类较少。风电发展迅速,各种气象灾害慢慢显现,风电受灾案例越来越多,新研究成果层出不穷。因此,文章综合近年的相关文献,将风电开发全生命周期划分为规划设计、施工建设、生产运营3个主要阶段,丰富了高影响天气的类型,并系统分析了高影响天气对风电场选址规划、资源评估、装机建设、基建设施、风电出力和风电功率预测等方面的影响,详见图1。

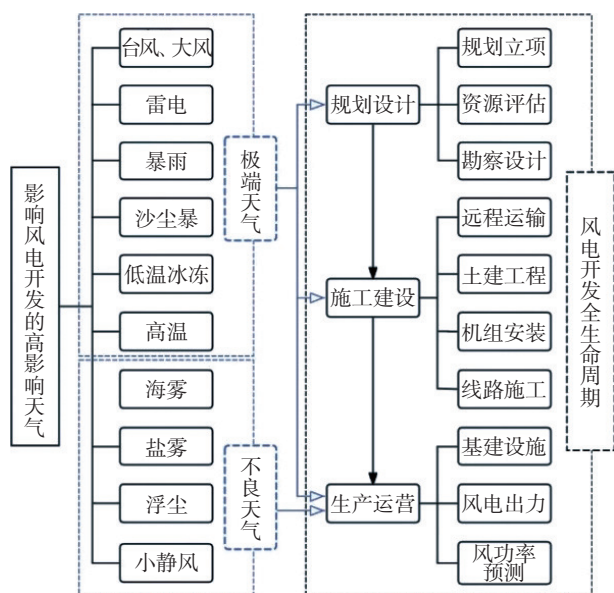


图1 高影响天气影响风电开发全生命周期的主要阶段

Fig. 1 The main stages of entire life cycle of wind power development affected by high-impact weather

1 影响风电开发的高影响天气

1.1 高影响天气的定义

高影响天气是指对社会、经济和环境产生重大影响的天气现象与事件,如对流性和地形降水造成的洪水、暴雨雪、沙尘暴、破坏性地面大风等,也包括高温、冷害、干旱、影响空气质量的气候条件以及具有高度社会和经济影响的非极端天气等^[24]。《气

候可行性论证规范报告编制》(QX/T 423—2018)指出,高影响天气是直接影响论证对象实施的天气现象。这些定义比较宽泛,不同的地域环境以及不同的影响载体,高影响天气包含的主要类型各不相同。

对风电开发产生影响的高影响天气可以分为2大类:(1)主要通过形成气象灾害破坏风力发电机组、基建设施的极端天气,主要包括台风、大风、雷电、暴雨、沙尘暴、低温冰冻、高温等;(2)未直接形成灾害主要影响风电出力运维的不良天气,主要包括小静风天气、浮尘、海雾、盐雾等。

1.2 高影响天气分布差异

我国地域辽阔且地形复杂,具有丰富的气候类型。气候类型的多样性导致不同环境风电场所面临的高影响天气类型及强度存在差异。在这些高影响天气中,有些是在特定地形地貌发生的局地性现象,例如,盐雾和海雾主要影响海上风电场,台风主要威胁海上和沿海地区风电场,沙尘暴主要威胁高原、沙地、盆地风电场;有些具有普遍性,分布范围较广,例如,大风、雷电、高温、小静风等能够影响各种地形风电场的建设、运营;有些具有明显的季节性,例如,台风、暴雨等主要发生在夏季和秋季,寒潮、低温冰冻等主要发生在冬季和春季。高影响天气对各地风电开发的影响程度差异,需要综合考虑风电场的地理位置、地形特征以及气象观测数据,结合生产实际和历史灾情具体分析。

对于海上风电场,台风是威胁最大的自然灾害,其次是雷电^[21,25]。对于陆地风电场,高海拔山地地形起伏大,微气候多样,成风机理复杂,很难预判风的绕流、涡流、分离和回流特性,存在重覆冰、高雷暴、湍流强度大、切变指数多样、入流角超标等异于平原地区的气候条件和风能资源特性^[26],使得山地风电场比平原风电场更易遭受低温冰冻、雷电灾害的威胁。此外,陆上风电静风期时间较长,海上风电静风期时间较短^[27],因此,小静风天气对陆地风电场的影响更大。

不良天气对风电开发的影响不容忽视,但极端天气通过累积性结构损伤、复合型灾害链式反应等机制对风电场的危害更大。鉴于极端天气的重要性和行业关注度,本文聚焦于高影响天气中极端天气对风电开发全过程的影响。

2 高影响天气对风电场规划设计的影响

风电场规划设计可以分为规划立项、资源评估、勘察设计 3 个阶段。规划立项阶段,即风电场的宏观选址,需收集候选开发区域极端天气事件的相关气象要素历史观测数据,进行风险识别,统计极端天气事件的类型、频次、强度,评估灾害风险大小,尽量规避强台风路径、低洼易积水地区、稳定性差的边坡等气象灾害高风险区域选址,并为后期风电场建设运营气象灾害风险应对打下基础^[28]。海上风电与陆上风电相比,具有明显的开发优势,但风险也更高,因此更需要加强海上风电项目气象灾害风险评估与管理。

资源评估阶段,测风塔数据是验证项目区域风能资源情况的重要依据,而在南方山区,覆冰常造成项目测风塔有效数据完整率低于 90%,覆冰严重地区甚至造成倒塔事故。资源评估需要仔细审核确保采集数据的有效性,并搜集适宜的资料进行补充评估,确保资源评估的准确性。此外,雷电、暴雨等高影响天气也会对测风塔自身及记录仪、接线部位等产生影响,需做好相应的防范措施保障数据记录与传输。

勘察设计阶段,主要进行微观选址和机组选型。受台风、大风影响的风电项目,需根据最大风速极限阈值和湍流强度选择风载荷满足安全性要求的机组,充分利用风能资源。处于极限温度环境的风电项目,需要选择适应不同气温条件下的低温型机组和高温型机组,以及相应的塔筒材料^[29]。低风速区域的风电项目,通常选择大叶片和高塔筒提升发电量,这也使风电项目遭受更大的气象灾害风险,需科学进行风机排布设计、塔筒和风机基础设计,把握生产与风险的平衡。

《海上风力发电场设计标准》(GB/T 51308—2019)指出:海上风电场选址应根据海洋水文、灾害性天气等对风电场的不利因素进行分析。如果在规划设计阶段忽视了潜在的气象灾害风险,未来施工建设和生产运营阶段,这些风险可能会累积并放大,最终导致重大事故^[30]。

3 高影响天气对风电场施工建设的影响

《风力发电场安全规程》(DL/T 796—2012)明确了风电场安全作业要求,对雷电、大风、冰冻等可能造成的危险进行识别分析,做好防范措施,遇到雷雨、

大雾等不良天气,不应进行起重工作。在风电场施工建设阶段,叶片、发动机等超长、超重设备的远距离运输,机组设备的超高吊装,电气设备的野外安装,塔筒土方和混凝土浇筑等工程,对天气条件高度敏感。持续的暴雨、低温冰冻、大风等极端天气条件,严重阻碍施工进度,增加施工成本和周期。

平原风电场建设,需防范强对流天气过程带来的暴雨、雷电、大风等影响,暴雨容易引发洪涝造成工期延误和设备损坏。山区风电场建设,尤其需防范雨雪天气车辆事故,加强路基填方边坡的稳定性监控,防止因雨水渗透或边坡过陡导致的坍塌,避免车辆侧翻事故。吊装作业期间,阵风、龙卷风等突发天气可能导致很大的事故风险,因此,主吊车起重大臂应接近主导风向,以减少侧面风荷载;加强测风并留有安全余量,以应对可能的风速变化,避免瞬时侧风超速造成主臂失稳事故;严格监控和评估吊装作业,当自然环境不能保证作业安全时,应立即停止作业。

海上风电项目的建设,由于特殊的暴露环境,需要特别的风电安装船舶和平台^[31],但也因此承受更多的安全风险。2017 年,强雷电导致黄海北部某风电作业平台起火,1 人跳海失联。2022 年,台风“暹芭”造成广东阳江某海上风电场项目施工浮吊船发生锚链断裂,船体失衡,触碰风机塔筒后断裂沉没,造成 25 人死亡。2024 年 9 月,华能文昌风电场“以小改大”改造升级期间,遭受台风“摩羯”重创,多台风电机组被折断。除了雷电、台风、海雾这些高影响天气影响海上风电施工外,风暴潮、海流、海浪、潮流、海水温度等水文因子也常给施工过程带来技术挑战^[25]。当海雾的水平能见度在 1 km 以下,即成为海上重要的灾害性天气,不仅影响海上施工安全,还影响建设周期。

4 高影响天气对风电场生产运营的影响

生产运营是风电开发全生命周期持续时间最长的阶段,一般持续 20~25 a,为了保证风电项目的高收益,更应时刻监测天气变化,关注高影响天气对风电场基础设施、风电出力、风功率预测的影响。

4.1 对风电场基础设施的影响

4.1.1 台风、大风

影响风电场的台风具有 3 大特点,分别是极端风速、突变风向和异常湍流^[32]。海上和沿海地区地

面摩擦力比陆地小,强风出现频率较高,尤其大气边界层底部的强风是由热力和机械因素共同产生,因此随时存在因垂直风切变和强湍流阵风而导致的风险^[33]。极端风速和突变风向可能导致风力发电机组的叶片、齿轮箱、发电机和其他关键部件承受额外的机械应力,异常湍流会增加风电机组的疲劳载荷,这可能增加维护成本甚至影响风电机组的使用寿命。

此外,台风过境伴随的巨浪也会对风电机组和地基造成破坏^[34],热带气旋、冷空气等猛烈的大气扰动,还可能导致海平面异常上升或下降,形成涌浪等海洋灾害,这些由气象现象导致的直接后果也是海上风电场的巨大威胁^[21]。

台风、大风对风电机组的危害主要表现为:极端风速导致风向仪、尾翼、偏航系统等设备被摧毁,增加风机受风载荷的风险,一旦超出风机设计的承载能力导致叶片弯曲、损坏,塔架根部承受巨大弯矩和剪力导致塔筒屈曲甚至折断倒塌。

4.1.2 雷电

雷电对风电场的影响可分为直接影响和间接影响,直接影响通常由热效应和机械效应引起,主要破坏风电机组的机械结构、叶片和轴承等部件;间接影响主要由电磁感应和电涌过电压效应引起,可能导致风电机组内部的电子设备、控制系统、电气系统等受到损害^[35]。

从风电场雷击密度的空间分布来看,风电场内部的雷击密度比整个风电场的平均雷击密度低,处于风电场边缘的风机对内部风机有屏蔽作用,但是这一特征在山地风电场中表现不明显,可能是受地形起伏影响,边缘风机屏蔽效果较弱^[36]。从风机结构来看,叶片是风电机组受雷电威胁最大的部位。叶片尖端的雷击风险最高,随着距叶尖距离的增加,雷击风险逐渐减小;叶片长度也可影响雷击风险,叶片越长,叶尖5 m范围内雷击风险减小;叶片旋角影响临界叶尖保护失效雷电流,随着叶片旋转角度增加,叶尖区域雷击风险逐渐增大,远离尖端的根部区域雷击风险减小^[12]。架空输电线路长期暴露于环境中,使其受雷击风险也较高,直击雷通常造成架空输电线路反击闪络和绕击闪络故障^[37],感应雷主要导致电力设备受损甚至失效,造成电网安全隐患。此外,雷电还可能损坏风电场的升压站和相关建筑,雷

电流还会形成跨步电压,危害风电机组周边一定范围内的人身安全。

4.1.3 暴雨

关于暴雨对风电场建设设施的影响研究较少,现有的研究多集中在雨水对叶片的侵蚀及涂层防护方面。叶片是风电机组的核心部件之一,通常风机运行2 a后叶片就会发生雨水侵蚀^[38]。叶片在高速旋转期间与雨滴发生碰撞,使叶片前缘形状和表面粗糙度发生改变,从而影响叶片结构稳定、动力性能、负载变化^[39]。潜伏期内,叶片表面几乎不受雨水影响,没有可以测量的明显变化;潜伏期之后,叶片相继经历点蚀、开裂、成坑、分层等明显的自然侵蚀过程^[13]。长期运行的叶片前缘通常产生严重的侵蚀破坏,因此,工业上通常用表面涂层或在前缘贴膜来保护叶片。

暴雨可能造成风电场内排水系统堵塞或失效,造成场内积水内涝,可能引发设备腐蚀,甚至淹没变电站、输电线路,造成设备损坏和运行中断。同时,雨水侵入机组电气设备,可能引发短路或系统瘫痪,造成风电场设备的功能性损坏。此外,暴雨易诱发洪水、山体滑坡、泥石流等自然灾害,这些灾害也会造成风电机组基础、塔架、输电线路和周边道路等建设设施的破坏,甚至导致风电场停止运行。

4.1.4 沙尘暴

根据沙尘天气发生时的水平能见度和风速,沙尘天气划分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴5个等级^[40]。沙尘暴的风速和表征沙尘强度的风沙流大小决定了风电场发生故障风险的高低^[41]。

沙尘暴易损害风机的气动性能和结构安全。大风携带的沙粒、碎石等颗粒动能强大,冲击风机表面导致叶片疲劳磨损,破坏叶片的强度和韧性,引发气动特性改变^[42],降低其运行效率。风机转动过程中,细沙尘进入轮毂、机舱后,与各部转动轴润滑油脂混合,易造成轴承损坏、齿轮箱轮齿损伤,甚至发电机短路、控制系统失灵等。高强度的风沙流长期冲击塔筒,磨损塔筒表面防护涂层,易造成塔筒锈蚀、力学性能下降,甚至丧失承载能力。此外,沙尘暴带来的流动沙丘淹没箱式变电站,使得电气设备散热性能下降,绝缘距离不足,易引发接地事故;集电线路被流动沙丘掩埋至一定高度,会使杆塔整体或组件变形或破坏^[43]。

大多数沙尘天气的定量影响研究都围绕风机叶片及其表面涂层磨损率展开。周亚芬采用气固两相流理论结合离散相模型,研究了不同风速、不同沙尘颗粒直径对风机叶片表面的磨损和气动性能变化,结果发现相同风速下,风沙对三维旋转叶片的侵蚀磨损都从叶片前缘开始,并随着颗粒直径增大逐渐向叶片中部和尾缘扩散;风沙颗粒直径与叶片表面磨损率不成正比,但高度影响表面磨损面积,前缘是叶片最大磨损率所在位置^[44]。

4.1.5 低温冰冻

低温环境下,空气密度增大,容易使风机额定出力增加导致过载现象,同时引起风轮叶片产生空气弹性振动,使得叶片后缘失效产生裂纹,甚至导致叶片和整个风机的损坏^[25]。低温可能使风机润滑油黏度增加,风机液压系统无法正常工作,齿轮箱、主轴等承受冲击载荷,加剧设备磨损;部分电子、电气元件无法工作,出现异常反应,传感器异常会影响风电场信号采集。

风机叶片覆冰与风电场所处环境和地形密切相关,叶片覆冰通常具备以下条件:存在逆温层,环境温度在 0 ℃ 以下,叶片表面温度在 -5 ℃ 以下,空气湿度在 85% 以上^[45]。叶片覆冰会增加轮毂和塔筒载荷,导致风电机组关键结构重量增大,使得振动加剧,甚至提前达到极限载荷、缩短风机寿命。叶片覆冰对机组关键结构极限载荷的影响从大到小为叶根、偏航中心、固定轮毂、塔筒底部、旋转轮毂,对机组关键结构疲劳载荷的影响从大到小为叶片、旋转轮毂、固定轮毂、偏航中心、塔筒底部^[17]。

低温冰冻可能引起电线、电缆等电力传输设施的绝缘层破裂或短路,还可能使土壤冻胀,降低地基稳定性,对风电场道路、电缆等造成安全隐患。此外,融冰期叶片表面冰块还可能脱落或甩出,严重威胁周围人员的安全^[18, 45]。

4.1.6 高温

风机叶片在高温环境下可能会发生材料性能变化,影响其承受风力的能力。沙戈荒环境中的风机常常遇到极端高温天气,在 60 ℃ 高温作用 3 h 后,风电叶片蒙皮、梁帽和壳体所用复合材料的拉伸、压缩性能和剪切强度发生不同程度的下降^[46]。

高温会加速润滑油的氧化和分解,导致润滑性能下降,增加设备磨损。轮毂和机舱的高温对机组

内部部件的老化影响程度较大^[47],风机的冷却系统在高温下需更频繁地工作以维持设备的正常运行,这需要更多的能源来驱动冷却系统,增加了运维成本。长期高温环境,会加速电气设备老化,导致设备损坏,增加闪断等故障率^[25],减短风机寿命。高温还会加速海水蒸发,从而加速海上风机及其附属设施的侵蚀。

目前,风电机组发电机、主控和变流器等关键部件已开展了短期验证样品可靠性的高温试验,但是持续性高温老化对机组零部件全生命周期的影响评估研究较少^[47]。

4.1.7 盐雾、海雾

对于海上风电场,盐雾对风电机组的叶片涂层甚至叶片材料本身具有相当大的化学侵蚀作用^[25]。

盐雾对海上风电机组的影响主要是污染叶片,影响其气动性能,产生噪音污染和影响美观。盐雾催化下,一系列的化学反应破坏机组设备原有的强度,降低机组载荷能力,影响设备安全运行;与金属物发生化学反应后减小了载流面积,生成氧化合物使电气接触不良,导致电气设备故障或毁坏。盐雾的腐蚀作用受温度和盐液浓度的影响,当温度在 35 ℃,盐液浓度在 3% 时对物体的腐蚀作用最大。

运行阶段,低能见度海雾的危害主要是妨碍运维船只航行,降低运维效率,影响运维安全。

4.2 对风电出力的影响

极端天气气候事件往往伴随着异常的气象要素变化。影响风电出力的主要气象因素有:风速、风向、降水、气温、气压、相对湿度。刘雅婷等^[48]讨论了大风、覆冰、系统性降水 3 种高影响天气独立发生时的气象-风电出力相关性(表 1),得出如下结论:大风过程,影响风电功率的主要敏感因子是风速、风向;系统性降水过程,影响风电出力的敏感因子主要是风速、降水、气压;覆冰过程,风电功率的敏感因子

表 1 不同场景下气象要素与风电出力之间的相关系数^[48]

Tab. 1 The correlation coefficients between meteorological elements and wind power output in different scenarios^[48]

场景	气象变量					
	风速	风向	气压	湿度	气温	降水
大风	0.743	0.377	-0.159	—	0.110	—
系统性降水	0.607	0.282	-0.528	-0.473	0.198	-0.587
覆冰	0.472	0.025	-0.564	-0.433	0.491	-0.448

排序从大到小为: 气压、气温、风速、降水、湿度。当降水增多, 叶片升力减小阻力增大, 降水成为影响风电出力仅次于风速的敏感因子。叶片发生覆冰, 风机叶片载重增加, 气温升降会导致反复融冰结冰, 降水和湿度达到一定条件容易加剧覆冰程度, 因此覆冰场景下, 风电功率对风速的敏感性有所下降。

热带气旋对风力发电有利有弊, 强度较弱的热带气旋及其外围环流影响的区域带来的大风过程, 可以使风电场较长时间处于“满发”状态, 从而带来良好的发电效益, 但强度较强的热带气旋, 如台风, 会对风电场造成极大破坏。有研究指出, 风暴对西南欧和伊比利亚半岛的风电生产有积极影响^[49-50]。但当风速过大超过风机切出风速时, 风机出现爬坡、高出力、部分切出或全部切出的情况。未受台风影响时, 风电场在轮毂高度附近速度亏损最利害, 垂直方向尾流可影响3倍轮毂高度以下范围; 受台风影响时, 出现尾流偏转效应, 最大偏转角可达33°, 垂直方向尾流可影响3.5倍轮毂高度以下范围的湍动能分布^[51]。极端风速和湍流可能导致风电机组非计划停运, 风向的急剧变化容易损坏风机偏航系统, 风切变可导致风机出力不稳定、偏航、变桨调整时间延长, 他们都是影响风电场发电量和运营效率的重要参数^[52]。

暴雨对风电机组的性能也有影响, 雨水和湿气可能会在风电机组的叶片上形成积垢, 增加叶片的重量和空气阻力, 干扰叶片周围的流场^[52], 从而降低风电机组的发电效率。瞬时测量表明, 强降雨可使电量损失达到30%^[53]。降水发生时, 大多数攻角条件下, 风机叶片升力减小、阻力增大, 升阻比降低^[54]。强降水发生前, 风电出力变化与风速的变化趋势一致; 当降水达到峰值附近, 风电出力不再随风速变化而变化, 甚至出现风速增大风电功率减小的现象; 强降水过程结束后, 风电出力变化恢复到与风速变化趋势基本一致的状态。此外, 叶片前缘是主要的切风部位, 雨水侵蚀是破坏叶片的主要因素之一, 直接影响发电效率。

叶片覆冰与冰块脱落都可直接影响风电机组的输出功率^[45]。叶片覆冰轻重程度对风机出力的影响与风机的功率控制方式有关^[55]。叶片覆冰会改变叶片空气动力学结构, 增加表面粗糙度, 造成叶片升力下降、阻力上升, 降低气动性能和机组运行功率, 严

重的覆冰甚至导致叶片转矩为0, 不产生任何功率。叶片覆冰时, 失速型风机和变速变桨型风机出力均低于正常情况, 且风机出力减少程度与覆冰程度有关; 少量积冰时, 若风速足够大, 变速变桨型风机尚可达到额定功率; 严重积冰时, 变速变桨型风机和失速型风机都无法达到额定功率(图2)。叶片结冰在迎风面的发生率较高^[45], 国内受冰冻天气威胁的风电场普遍位于低风速区域, 风电场受冰冻影响的实际损失电量在前期理论设计值的范围为80%~90%^[56]。

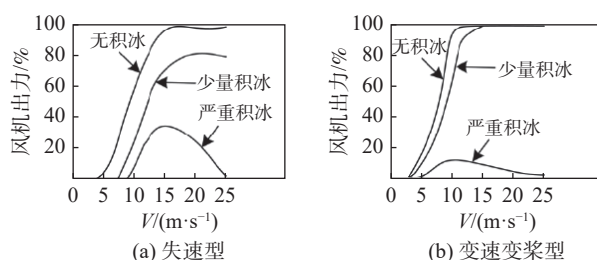


图2 积冰对不同控制方式风机出力的影响^[57]

Fig. 2 The impact of icing on the power output of wind turbines with different control methods^[57]

寒潮天气可以影响风力发电、输电以及负荷需求, 给电网的规划、运行、调度和控制带来严峻挑战。2021年2月, 美国得州因寒潮天气导致间歇性风光电源极寒无风和风机覆冰脱网, 引发电网供需失衡, 造成大规模停电事故^[46]。根据寒潮天气影响风电出力的过程, 可将寒潮危害风电运行的天气特征分为风机覆冰、大风切机、低温脱网和晴冷无风4种类型^[18]。据统计, 80%以上的寒潮天气都伴随有大风、雨雪、雾凇、霜冻等高影响天气^[58], 其中, 影响风电出力的主要因素是大风与低温冰冻^[48]。

极端温度不会直接对风电场造成物理损害, 但是它们通常被认为是风电场气象相关损失的诱因。长期高温环境, 使设备、电机、变频器等发电设备的温度升高, 导致风机效率降低, 进一步减小发电量。孙荣富等^[59]基于1970—2017年全国气象站日最低气温和国网风电场分布数据, 以低温型机组运行温度下限-30℃为阈值, 统计分析低温天气分布以及低温对风力发电的影响, 发现在北方许多省份几乎每年都出现低于-30℃的低温事件, 这类事件通常持续时间仅为数小时, 若无人干预, 短时间的大规模反复脱网而后并网可能给电力平衡带来极

大冲击。

传统的风电技术对于风轮切入风速,一般需要 3 m/s 以上的风速才能用于发电,对于 3 m/s 以下的微风却无能为力,造成能源的极大浪费^[60-61]。小静风天气指风速在 3 m/s 以下。2021 年 1 月 7 日,受极寒天气影响,全国用电负荷当日晚高峰比 2020 年夏季峰值增长了 10% 以上。夜晚光伏出力为零,且当天全国大部分地区无风,导致风力发电装机出力只有正常情况下的 10%,也就是说,当日用电晚高峰时段,全国几亿千瓦的风电和光伏都无能为力^[62]。小静风天气经常出现在寒潮过境后或是在高温热浪和静力稳定大气环境下,大范围的静风造成风力发电机无风驱动,使得风力发电在一定时段出力为零。小静风天气条件下,风电出力降低,但因气温持续偏低或偏高导致用电负荷激增,容易引发电网缺电^[18]。

4.3 对风电功率预测的影响

我国已成为全球风电规模最大的市场,由于风电自身的随机性、间歇性和波动性,大量风电并网后导致电力系统的安全运行与风电高效消纳之间的矛盾日益突出^[63]。高精度的风电功率预测是降低弃风率、提高风电消纳水平的有效途径。准确的风电功率预测,可以指导电力系统制定合理的调度计划、建立高效市场交易机制,获得最佳经济收益^[64]。正常天气条件下,风电功率与风速可以进行很好的拟合,极端天气易导致风机额外的载荷、损坏甚至停机,风电出力更加随机和不稳定,使得风电功率与风速关系散乱,增加了风电功率预测难度。然而台风、暴雨、寒潮等极端天气事件频发,使得电网经常面临转折性天气下的风电功率预测,短时间内风速的快速变化所引发的风电功率爬坡事件,是风电功率预测产生误差的重要原因^[65]。

刘雅婷等^[48]分析吉林某风电场数值天气预报和风电功率实测数据发现,风电功率预测结果出现极端误差的时段几乎都位于转折性天气过程中(图 3)。转折性天气过程,往往伴随着风速的骤升骤降。风电快速爬坡达到高出力状态,触发上爬坡事件,导致预测功率比实际功率偏小,造成负偏差;当气压梯度急速下降或风速达到风机切出风速时,机组停止运行,导致风电出力迅速减少,触发下爬坡事件^[66],若风机切出规模较大且预测系统未能预测到大风切机情况,往往导致预测功率比实际功率偏大,造成正

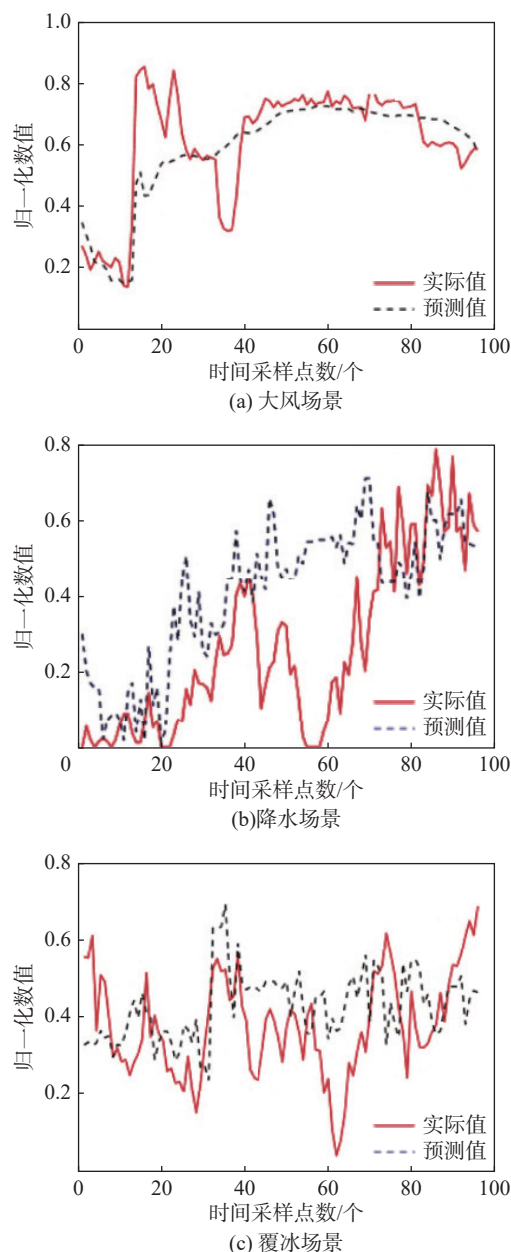


图 3 吉林某风电场转折性天气过程下风电功率预测偏差^[48]

Fig. 3 The prediction bias of wind power output under the process of transitional weather in a wind farm of Jilin^[48]

偏差。

冰冻天气对风电功率预测准确性产生双重影响:

(1) 结冰导致测风塔传感器负荷增加,甚至冻结风速风向传感器,使之无法正常工作;(2) 测风塔依赖太阳能光伏板和蓄电池组成的供电系统,长时间的冰冻天气会削弱供电系统的续航能力,可能发生因电力不足而无法持续记录观测数据^[67],导致输入风电功率预测模型的实测数据失真,必将引起较大

误差。

寒潮天气可引发风电功率剧烈波动。寒潮初期,大风降温,发电量激增,风电爬坡阶段功率预测值往往低于实际值,形成负偏差;伴随降雪的寒潮过程,风电出力呈下降趋势,同样出现负偏差;寒潮期间,若风电场功率预测系统未能将覆冰、大风导致的停机 and 低温脱网等因素纳入预测模型,造成预测开机容量与实际情况的差异,进而导致风电预测出力存在正偏差;寒潮过境后,出现晴冷无风的天气,风电出力减少,功率预测值高于实际值,形成正偏差^[18]。

随着可再生能源在电力供应中所占比例的不断增加,在未来高比例可再生能源电力系统的规划和运行中,需充分考虑低温冰冻等高影响天气的影响,科学进行功率预测、日前调度计划安排等,保障电力系统供应稳定和优化资源配置^[61]。

5 高影响天气应对措施

1)开展区域风电场精细化高影响天气风险评估。在风电场选址规划环节,通过历史气象数据和气候模型,精准识别区域内的高影响天气事件,通过深入的气象风险分析和趋势预测,为风电场选址提供科学参考,从根本上回避风电场极端天气风险;通过分析不同回归期的气象参数阈值,优化设计参数,平衡投入产出,避免造价溢出。

2)加强高影响天气的监测预警工作。山区和平原的高影响天气不同,天气预报的着眼点应该也不同。根据风电场所处地理地形,判定其可能遭受的主要高影响天气类型,开展专业化气象诊断服务,掌握天气状态以及极端天气过程的预警信息,实时跟踪,加强运维管理,根据天气条件和极端天气预警程度科学安排生产维护计划。

3)将高影响天气纳入功率预报系统影响因子,提高风电功率预测系统预测准确率。考虑极端天气导致的风机覆冰、大风切机等因素,修正风电场风电功率预测模型,通过准确识别极端天气周期优化数值天气预报,对风电爬坡事件量化分析及准确预警,提升风电功率预报准确率^[18,68]。跨区电网互联,制定相应的调频调峰支撑方案,实现区域间资源互补,维护极端天气发生时的供电安全^[69]。

4)开展极端天气影响下风电场运行能力提升改造。针对一些早期建设的风电场,其设计参数阈值

较低,不能适应如今极端天气频发的情况,需引导风电企业对已投产设备升级改造,如定期覆膜防范沙尘,开展抗寒抗冻改造等,提高风电机组对极端天气的适应能力。

5)加强研发和技术创新,最大化利用各种天气条件下的风能资源。关玉明等设计了一种高效微风发电装置,依据“文丘里效应”提高来流风速发电原理,万向迎风结构消除传统风力机的对风时间,增加了多变风向环境下的适应性,对于3 m/s以下的微风可有效提高到工作风速,增加发电效率^[70]。

6 结论

高影响天气对风电开发全过程的影响全面且复杂,渗透了风电开发从规划设计、施工建设到生产运营的整个生命周期。不同的极端天气、不良天气类型对风电场运行安全、风电出力和功率预测的影响程度各异,极端天气通常直接造成设备损坏,威胁机组的安全运行,甚至可能造成发电能力的完全丧失;不良天气可能引发设备故障,影响日常运维和发电效率。

已有不少学者对于输电线路的气象灾害影响机理及其风险评估做出研究,但是已有的关于气象灾害对风电场的影响研究,多从定性角度描述气象灾害对机组、升压站等风电场结构造成的危害或损失,或是仅考虑某一种气象灾害对风电场进行影响机理研究和风险评估。全球气候变化背景下,气象灾害往往不会独立发生,需从灾害链角度出发,考虑多种气象灾害的协同作用,开展风电场气象灾害综合风险评估研究。

高比例风电接入电网后,风电的不稳定性给电网安全稳定运行带来了隐患。储能具有电源和负荷双重属性,可以实现能量双向吞吐,有效平抑风电功率波动,已成为新型电力系统的重要组成部分^[71]。风电场宜推广安装储能系统,密切关注转折性天气风电波动情况,安排合理的备用容量,有助于抑制风电功率波动,提升电网对风电的集成和消纳效率,维护电网的安全性和稳定性。因此,虽然高影响天气对风电开发构成挑战,但通过科学规划和技术创新,可以有效避免或减轻这些影响,促进风电行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 常蕊, 肖滢, 王阳, 等. 全球变暖背景下风电开发面临的气候服务挑战 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 28-36. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.005.
CHANG R, XIAO C, WANG Y, et al. Growing challenge of climate service for wind energy deployment under global warming [J]. Journal of global energy interconnection, 2021, 4(1): 28-36. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.005.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024 [R/OL]. (2024-04) [2024-05-29]. <https://gwec.net/global-wind-report-2024>.
- [3] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.003.
LU Z X, LI H, QIAO Y. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance [J]. Journal of global energy interconnection, 2021, 4(1): 12-18. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.003.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案: 国办函〔2022〕39号 [EB/OL]. (2022-05-30) [2023-08-30]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for promoting high-quality development of new energy in the new era: state office letter [2022] No. 39 [EB/OL]. (2022-05-30) [2023-08-30]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/30/content_5693013.htm.
- [5] 赵静波, 张思聪, 廖诗武. 美国加州 2020 年 8 月中旬停电事故分析及思考 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 52-57. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.06.008.
ZHAO J B, ZHANG S C, LIAO S W. Analysis and reflection for the rotating outages in mid-August 2020 in California [J]. Electric power engineering technology, 2020, 39(6): 52-57. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2020.06.008.
- [6] SU K, JIANG L P, LIU J Z. Power source-power grid coordinated typhoon defense strategy based on multiagent dynamic game theory [J]. Global energy interconnection, 2021, 4(3): 285-294. DOI: 10.1016/j.gloi.2021.07.008.
- [7] 景锐, 韩晖, 林剑艺. 计及台风极端天气影响的城市能源规划 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 178-187. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.02.008.
JING R, HAN H, LIN J Y. Urban energy planning considering impacts of typhoon extreme weather [J]. Journal of global energy interconnection, 2021, 4(2): 178-187. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.02.008.
- [8] 高琳, 王敬涛. 风电利用如何迈过气象坎儿 [N]. 中国气象报, 2011-11-15.
GAO L, WANG J T. How can wind power utilization overcome the meteorological challenges [N]. China Meteorological News, 2011-11-15.
- [9] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Switzerland: IPCC, 2021.
- [10] 闫泽辉, 李更丰, 任彦哲. 构建高弹性城市能源系统的关键技术 [J]. 电力建设, 2023, 44(5): 1-12. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.05.001.
YAN Z H, LI G F, REN Y Z. Key technologies for building highly resilient urban energy systems [J]. Electric power construction, 2023, 44(5): 1-12. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.05.001.
- [11] 陈勇全. 华南沿海海上风电的台风大风风险评估研究 [D]. 昆明: 云南财经大学, 2023.
CHEN Y Q. Risk assessment of tropical cyclone-induced strong winds for offshore wind power in coastal areas of the South China [D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2023.
- [12] 顾建伟, 陈维江, 黄胜鑫, 等. 风电机组叶片雷击风险分布特征 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3651-3663. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220354.
GU J W, CHEN W J, HUANG S X, et al. Distribution characteristics of lightning strike risk along wind turbine blades [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3651-3663. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220354.
- [13] 杨德旭, 兰海金, 尹秀云. 风电叶片雨蚀测试技术浅析 [J]. 复合材料科学与工程, 2024(5): 121-128. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20240528.017.
YANG D X, LAN H J, YIN X Y. Analysis of rain erosion testing technology for wind turbine blades [J]. Composites science and engineering, 2024(5): 121-128. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20240528.017.
- [14] 陈煌, 靳交通, 李诚亮, 等. 海上风电叶片前缘雨蚀防护材料研究 [J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊 1): 558-559, 563. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2020.S1.129.
CHEN H, JIN J T, LI C L, et al. Research on rain erosion protection materials for leading edge of offshore wind turbine blades [J]. Ship engineering, 2020, 42(Suppl.1): 558-559, 563. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2020.S1.129.
- [15] 梁恩培. 风力机叶片涂层风洞冲蚀磨损试验及模型研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. DOI: 10.27206/d.cnki.gsgsu.2021.001033.
LIANG E P. Wind tunnel erosion test and model study of wind turbine blade coating [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021. DOI: 10.27206/d.cnki.gsgsu.2021.001033.
- [16] 梁恩培, 马高生, 李晔, 等. 沙尘环境对风力机关键零部件力学特性影响综述 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(3): 234701. DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0143.
LIANG E P, MA G S, LI Y, et al. Summary of the impact of aeolian sand environment on key parts of wind turbine [J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, 53(3): 234701. DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0143.
- [17] 王之东, 袁凌, 王小虎, 等. 叶片覆冰对风电机组关键结构安全性的影响 [J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 184-188.
WANG Z D, YUAN L, WANG X H, et al. Effect of blades icing

- on safety of key structures of wind turbine [J]. *Water resources and power*, 2021, 39(5): 184-188.
- [18] 郑婷婷, 单小雨, 马继涛, 等. 寒潮天气对风电运行和功率预测的影响分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(4): 8-12. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048).
- ZHENG T T, SHAN X Y, MA J T, et al. Impact of cold wave weather on wind power operation and power prediction [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2023, 41(4): 8-12. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2023.0048).
- [19] 杜树成, 何如, 苏志. 灾害性天气对风电场的影响与对策研究 [J]. *气象研究与应用*, 2013, 34(增刊2): 120-122.
- DU S C, HE R, SU Z. Research on the impact of disastrous weather on wind farms and countermeasures [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2013, 34(Suppl.2): 120-122.
- [20] 曾琦, 陈正洪. 近年来气象灾害对风电场影响的研究进展 [J]. *气象科技进展*, 2019, 9(2): 49-55. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010).
- ZENG Q, CHEN Z H. A review of the effect of meteorological disasters on wind farms in recent years [J]. *Advances in meteorological science and technology*, 2019, 9(2): 49-55. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010).
- [21] 葛珊珊, 张韧. 全球气候变化背景下灾害性天气变化及对海上风电的影响 [J]. *中国工程科学*, 2010, 12(11): 71-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013).
- GE S S, ZHANG R. Disastrous weather trend under global climate change and its influence on offshore wind power [J]. *Strategic Study of CAE*, 2010, 12(11): 71-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1742.2010.11.013).
- [22] NING F S, PIEN K C, LIOU W J, et al. Site selection for offshore wind power farms with natural disaster risk assessment: a case study of the waters off Taiwan's west coast [J]. *Energies*, 2024, 17(11): 2711. DOI: [10.3390/en17112711](https://doi.org/10.3390/en17112711).
- [23] 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](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013).
- JU G Z, WANG J R, CUI C, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation [J]. *Smart power*, 2022, 50(11): 77-83. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7598.2022.11.013).
- [24] 丁一汇. 高等天气学(2版) [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- DING Y H. Advanced synoptic meteorology (2nd ed.) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [25] JIAO X, XING H Y, ZHANG Q L, et al. Meteorological risk identification and assessment of offshore wind farms [J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2020, 514(3): 032016. DOI: [10.1088/1755-1315/514/3/032016](https://doi.org/10.1088/1755-1315/514/3/032016).
- [26] 中国能源建设集团云南电力设计院有限公司. 高海拔山地风电场选址技术取得突破 [J]. *云南科技管理*, 2022, 35(4): 87. DOI: [10.19774/j.cnki.53-1085.2022.04.029](https://doi.org/10.19774/j.cnki.53-1085.2022.04.029).
- China Energy Construction Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd. Breakthrough in site selection technology for high-altitude mountain wind farms [J]. *Yunnan science and technology management*, 2022, 35(4): 87. DOI: [10.19774/j.cnki.53-1085.2022.04.029](https://doi.org/10.19774/j.cnki.53-1085.2022.04.029).
- [27] 杨昊. 我国海上风电发展探析与对策建议 [J]. *大众用电*, 2022, 37(9): 13-15.
- YANG H. Analysis and countermeasures for developing offshore wind power in China [J]. *Popular utilization of electricity*, 2022, 37(9): 13-15.
- [28] 胡威, 张天姣, 陈晓军. 风电项目全生命周期气象灾害风险管理 [J]. *水电与新能源*, 2021, 35(2): 1-3. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2021.02.001](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2021.02.001).
- HU W, ZHANG T J, CHEN X J. Life cycle risk management of meteorological disaster for wind power projects [J]. *Hydropower and new energy*, 2021, 35(2): 1-3. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2021.02.001](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2021.02.001).
- [29] 王毅霞. 风电项目风机安装安全管控要点 [J]. *建设监理*, 2021(2): 28-30, 34. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4104.2021.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4104.2021.02.008).
- WANG Y X. Key points of safety control in wind turbine installation for wind power projects [J]. *Project management*, 2021(2): 28-30, 34. DOI: [10.3969/j.issn.1007-4104.2021.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4104.2021.02.008).
- [30] 盛海磊. 我国海上风电项目风险评估研究 [D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2022. DOI: [10.27015/d.cnki.gdwju.2022.000991](https://doi.org/10.27015/d.cnki.gdwju.2022.000991).
- SHENG H L. Risk assessment study of offshore wind power projects in China [D]. Beijing: University of International Business and Economics, 2022. DOI: [10.27015/d.cnki.gdwju.2022.000991](https://doi.org/10.27015/d.cnki.gdwju.2022.000991).
- [31] 钟宏宇, 齐全, 高阳, 等. 中国海上风电技术的挑战与应对策略分析 [J]. *东北电力技术*, 2016, 37(1): 39-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2016.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2016.01.011).
- ZHONG H Y, QI Q, GAO Y, et al. Challenges and strategies analysis of offshore wind power technology in China [J]. *Northeast electric power technology*, 2016, 37(1): 39-43. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2016.01.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2016.01.011).
- [32] LI J W, LI Z N, JIANG Y C, et al. Typhoon resistance analysis of offshore wind turbines: a review [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(3): 451. DOI: [10.3390/atmos13030451](https://doi.org/10.3390/atmos13030451).
- [33] KIM H, MOON C J, KIM Y G, et al. Analysis of atmospheric stability for the prevention of coastal disasters and the development of efficient coastal renewable energy [J]. *Journal of coastal research*, 2021, 114(suppl.1): 241-245. DOI: [10.2112/JCR-S1114-049.1](https://doi.org/10.2112/JCR-S1114-049.1).
- [34] GLIKSMAN D, AVERBECK P, BECKER N, et al. Review article: a European perspective on wind and storm damage- from the meteorological background to index-based approaches to assess impacts [J]. *Natural hazards and earth system sciences*, 2023, 23(6): 2171-2201. DOI: [10.5194/nhess-23-2171-2023](https://doi.org/10.5194/nhess-23-2171-2023).
- [35] 林彬, 余文馨, 陈铭, 等. 沿海风电场雷电危害特点和防护对策 [J]. *农业灾害研究*, 2023, 13(12): 313-316. DOI: [10.3969/j.issn.2095-3305.2023.12.103](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-3305.2023.12.103).
- LIN B, YU W X, CHEN M, et al. Characteristics and protection measures of lightning hazards in coastal wind farms [J]. *Journal of agricultural catastrophology*, 2023, 13(12): 313-316. DOI: [10.3969/j.issn.2095-3305.2023.12.103](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-3305.2023.12.103).

- 3969/j.issn.2095-3305.2023.12.103.
- [36] CHEN H F, CHEN W J, WANG Y, et al. Analysis of the cloud-to-ground lightning characteristics before and after installation of the coastal and inland wind farms in China [J]. *Electric power systems research*, 2021, 190: 106835.
- [37] 马庆丰. 浅谈风电场架空输电线路防雷 [C]// Anon. 2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集 (上册). 南宁: 中国电力技术市场协会, 2023. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.049672.
- MA Q F. A brief discussion on lightning protection for overhead power transmission lines in wind farms [C]// Anon. Proceedings of 2023 Power Industry Technical Supervision Work Exchange Meeting and Professional Technical Forum (Volume 1). Nanning: China Electric Power Technology Market Association, 2023. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.049672.
- [38] BARTOLOMÉ L, TEUWEN J. Prospective challenges in the experimentation of the rain erosion on the leading edge of wind turbine blades [J]. *Wind energy*, 2019, 22(1): 140-151. DOI: 10.1002/we.2272.
- [39] 桂永强. 风机叶片聚氨酯涂层的雨蚀研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2019.000907.
- GUI Y Q. The rain erosion effects on polyurethane coating for wind blade [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlg.2019.000907.
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 沙尘天气等级: GB/T 20480—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of sand and dust weather: GB/T 20480—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [41] 王金岩, 丁坤, 孙亚璐, 等. 强沙尘暴下新能源基地的韧性评估及其提升方法 [J/OL]. *电网技术*, 2024: 1-12. (2024-03-29) [2024-09-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0182>.
- WANG J Y, DING K, SUN Y L, et al. Research on resilience assessment and improvement methods of new energy bases under strong sandstorm [J/OL]. *Power system technology*, 2024: 1-12. (2024-03-29) [2024-09-18]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0182>.
- [42] 胡威, 崔冬林, 张双益. 气象灾害对风电项目的影响及风险应对 [J]. *能源与环境*, 2020 (5): 114-116. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2020.05.043.
- HU W, CUI D L, ZHANG S Y. Impact of meteorological disasters on wind power projects and risk response [J]. *Energy and environment*, 2020 (5): 114-116. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2020.05.043.
- [43] 陈亮亮, 王佳, 杨丽薇, 等. 风力发电机组的风沙危害及防风沙措施探讨 [J]. *西北水电*, 2021(1): 73-75. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2021.01.019.
- CHEN L L, WANG J, YANG L W, et al. Discussion on wind-sand hazard and prevention measures for WTGS [J]. *Northwest hydropower*, 2021(1): 73-75. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2021.01.019.
- [44] 周亚芬. 风沙环境下风力机气动性能及磨损特性研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2021. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000234.
- ZHOU Y F. Study on aerodynamic performance and erosion characteristics of wind turbine under sandy environment [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2021.000234.
- [45] 成和祥, 行九晖, 刘杰, 等. 风电机组叶片覆冰形成原因及覆冰防治概述 [J]. *电力设备管理*, 2021(6): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2711.2021.6.dlsbgl202106042.
- CHENG H X, XING J H, LIU J, et al. An overview of the causes of icing on wind turbine blades and the prevention and control of icing [J]. *Electric power equipment management*, 2021(6): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2711.2021.6.dlsbgl202106042.
- [46] 张仲香, 刘宝锋, 方晨鑫, 等. 沙戈荒环境下风电叶片中复合材料耐高温性能研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2024(3): 103-107. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20240328.015.
- ZHANG Z X, LIU B F, FANG C X, et al. Study on high temperature resistance of composite materials in wind blades under desert environment [J]. *Composites science and engineering*, 2024(3): 103-107. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20240328.015.
- [47] 黎相昊, 厉旭旺, 魏煜峰. 风电机组零部件高温及高加速试验研究 [J]. *风能*, 2024(4): 78-85. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.04.015.
- LI X H, LI X W, WEI Y F. Research on high temperature and high acceleration test of wind turbine components [J]. *Wind energy*, 2024(4): 78-85. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2024.04.015.
- [48] 刘雅婷, 杨明, 于一潇, 等. 基于多场景敏感气象因子优选及小样本学习与扩充的转折性天气日前风电功率预测 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(7): 2972-2982. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221331.
- LIU Y T, YANG M, YU Y X, et al. Transitional-weather-considered day-ahead wind power forecasting based on multi-scene sensitive meteorological factor optimization and few-shot learning [J]. *High voltage engineering*, 2023, 49(7): 2972-2982. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221331.
- [49] GONCALVES A, LIBERATO M L R, NIETO R. Wind energy assessment during high-impact winter storms in the Iberian Peninsula [J]. *Environmental sciences proceedings*, 2021, 4(1): 28. DOI: 10.3390/ecas2020-08132.
- [50] GONCALVES A, LIBERATO M L R, NIETO R. Wind energy assessment during high-impact winter storms in southwestern Europe [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(4): 509. DOI: 10.3390/atmos12040509.
- [51] 郜志腾, 张军, 李岳, 等. 极端天气对风电场局地风环境的影响 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52(7): 106-112. DOI: 10.13245/j.hust.240742.

- GAO Z T, ZHANG J, LI Y, et al. Impact of extreme weather on local wind environment of wind farm [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2024, 52(7): 106-112. DOI: 10.13245/j.hust.240742.
- [52] 叶林, 李奕霖, 裴铭, 等. 寒潮天气小样本条件下的短期风电功率组合预测 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 543-554. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221814.
- YE L, LI Y L, PEI M, et al. Combined approach for short-term wind power forecasting under cold weather with small sample [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 543-554. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221814.
- [53] DOBESCH H, KURY G. Basic meteorological concepts and recommendations for the exploitation of wind energy in the atmospheric boundary layer [R]. Wien: Zentralanst. für Meteorologie u. Geodynamik, 2006.
- [54] CAI M, ABBASI E, ARASTOPOUR H. Analysis of the performance of a wind-turbine airfoil under heavy-rain conditions using a multiphase computational fluid dynamics approach [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2013, 52(9): 3266-3275. DOI: 10.1021/ie300877t.
- [55] IAN B, MICHAEL D, ANDREAS K, et al. Wind energy projects in cold climates [EB/OL]. (2015-07-07) [2024-09-20]. https://www.ieawind.org/index_page_postings/June%207%20posts/task%2019%20cold_climate_%20rp_approved05.12.pdf.
- [56] 张朴, 章帆, 何伟, 等. 冰冻气候对风电场发电量的影响 [J]. *船舶工程*, 2022, 44(增刊2): 144-148. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S2.28.
- ZHANG P, ZHANG F, HE W, et al. Impact of frozen climate on power generation of wind farm [J]. *Ship engineering*, 2022, 44(Suppl.2): 144-148. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S2.28.
- [57] 王浩, 王洪涛, 王春义. 计及冰雪天气影响的风电场短期出力模型 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(8): 107-114. DOI: 10.7667/PSPC150978.
- WANG H, WANG H T, WANG C Y. A short-term output model of wind farm considering rain-snow-ice weather [J]. *Power system protection and control*, 2016, 44(8): 107-114. DOI: 10.7667/PSPC150978.
- [58] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾 [J]. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 55-63, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2012.09.007.
- ZHAI P M, LIU J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background [J]. *Strategic study of Chinese academy of engineering*, 2012, 14(9): 55-63, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2012.09.007.
- [59] 孙荣富, 徐海翔, 吴林林, 等. 中国区域低温天气及其对风力发电影响的统计 [J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(1): 2-10. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.01.002.
- SUN R F, XU H X, WU L L, et al. Statistics of cold weather and its impact on wind power generation in China [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2022, 5(1): 2-10. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.01.002.
- [60] 季丰, 徐伟, 王冬良. 基于 Fluent 的集风罩工作特性分析 [J]. *可再生能源*, 2016, 34(8): 1190-1195. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.08.014.
- JI F, XU W, WANG D L. Operating characteristics analysis of wind capturing hood based on Fluent software [J]. *Renewable energy resources*, 2016, 34(8): 1190-1195. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.08.014.
- [61] 李滨海, 季丰, 秦洪艳. 新型城市微风发电装置 [J]. *风能*, 2015(4): 92-96.
- LI B H, JI F, QIN H Y. New urban breeze power generation device [J]. *Wind energy*, 2015(4): 92-96.
- [62] 步雪琳. 储能, 木桶上的短板 [J]. *环境经济*, 2022(7): 1.
- BU X L. Energy storage, the short board on the barrel [J]. *Environmental economy*, 2022(7): 1.
- [63] YU Y X, HAN X S, YANG M, et al. Probabilistic prediction of regional wind power based on spatiotemporal quantile regression [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2020, 56(6): 6117-6127. DOI: 10.1109/TIA.2020.2992945.
- [64] LI P, WANG C F, WU Q W, et al. Risk-based distributionally robust real-time dispatch considering voltage security [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2021, 12(1): 36-45. DOI: 10.1109/TSTE.2020.2964949.
- [65] 于欣楠. 考虑风电场功率爬坡的超短期组合预测研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2022. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2022.000187.
- YU X N. Study on ultra-short-term combined forecasting considering wind farm power ramp events [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022. DOI: 10.27008/d.cnki.gdbdc.2022.000187.
- [66] 张东英, 代悦, 张旭, 等. 风电爬坡事件研究综述及展望 [J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1783-1792. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.3076.
- ZHANG D Y, DAI Y, ZHANG X, et al. Review and prospect of research on wind power ramp events [J]. *Power system technology*, 2018, 42(6): 1783-1792. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.3076.
- [67] 陈红宝, 赵斌, 李洋. 甘肃冰冻天气特征及其对风电场运行的影响研究 [J]. *甘肃水利水电技术*, 2019, 55(7): 34-39. DOI: 10.19645/j.issn2095-0144.2019.07.010.
- CHEN H B, ZHAO B, LI Y. Gansu water resources and hydropower technology [J]. *Gansu water resources and hydropower technology*, 2019, 55(7): 34-39. DOI: 10.19645/j.issn2095-0144.2019.07.010.
- [68] 孙荣富, 张涛, 和青, 等. 风电功率预测关键技术及应用综述 [J]. *高压电压技术*, 2021, 47(4): 1129-1143. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201780.
- SUN R F, ZHANG T, HE Q, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting [J]. *High voltage engineering*, 2021, 47(4): 1129-1143. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201780.
- [69] 余潇潇, 宋福龙, 李隽, 等. 含高比例新能源电力系统极端天气

条件下供电安全性的提升 [J]. 现代电力, 2023, 40(3): 303-313. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.

YU X X, SONG F L, LI J, et al. Power supply security improvement of power grid with high proportion of renewable energy under extreme weather events [J]. Modern electric power, 2023, 40(3): 303-313. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.

- [70] 关玉明, 李祥利, 苗艺男, 等. 高效微风发电装置的数值模拟与风洞试验 [J]. 机械设计与制造, 2022(4): 126-130. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20211110.017.

GUAN Y M, LI X L, MIAO Y N, et al. The numerical simulation and wind tunnel test of an efficient breeze generator [J]. Machinery design & manufacture, 2022(4): 126-130. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20211110.017.

- [71] 甘乾煜. 储能应用于风电功率波动平抑的控制策略 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000977.

GAN Q Y. Control strategy of energy storage for suppressing wind power fluctuation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000977.

作者简介:



孟丹

孟丹(第一作者)

1989-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事风能太阳能资源开发利用研究工作 (e-mail) mdan11@126.com。



陈正洪

陈正洪(通信作者)

1964-, 男, 正研级高级工程师, 硕士, 主要从事应用气象、气候变化及防灾减灾研究工作 (e-mail) chenzh64@126.com。



许杨

许杨(通信作者)

1981-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事风能太阳能资源开发及重大气候可行性论证研究工作 (e-mail) 702158412@qq.com。

曾鹏

1980-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事新能源专业气象服务工作 (e-mail) 87034510@qq.com。

王明

1990-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事风能太阳能资源预测、气候动力学方面的研究工作 (e-mail) wangming@lasg.iap.ac.cn。

崔杨

1987-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事新能源发电功率预测工作 (e-mail) qhcuifang@126.com。

许沛华

1980-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事新能源发电功率预测工作 (e-mail) xphboxky@126.com。

项目简介:

项目名称 (1)湖北省大气边界层风能资源特性分析及开发潜力评估 2023Y08; (2)中国气象局软科学研究项目“双碳”背景下能源气象服务供给侧结构性改革与实现路径研究 2023ZDXM03; (3)湖北省自然科学基金“基于卫星雷达资料和中小尺度模式的风光资源降尺度方法研究” 2023AFB543; (4)基于爬坡特征识别和深度学习的复杂地形和气候条件下的风电功率预报方法研究 42205196

承担单位 (1)湖北省气象服务中心; (2)中国气象局公共气象服务中心; (3)湖北省气象服务中心; (4)湖北省气象服务中心

项目概述 (1)围绕湖北省“双碳”目标下多元化风能太阳能开发利用的需求, 为充分挖掘利用湖北省各种地形下的风能资源, 深入分析湖北省近地层及大气边界层 300 m 以下高度风能资源特性, 重点开展多种层高的风能资源推算及风切变指数研究。(2)调研能源行业政策形势及国内外能源气象服务业态、发展趋势, 研究新形势下气象服务能源安全发展的新需求, 提出“双碳”背景下能源气象服务供给侧结构性改革方面的对策建议。(3)基于多源观测数据, 对多种数值预报模式开展检验评估, 通过雷达资料同化和卫星资料融合的 LAPS-WRF 模式系统, 得到高分辨的数值预报模式风光资源预报产品, 使用传统和机器学习的方法开展集合预报构建高空间分辨的风光资源集合预报产品。(4)从风电功率爬坡事件的特征出发, 结合动态编程技术, 提出一种能够准确且高效识别风电功率爬坡事件的新方法。通过分析复杂地形和气候条件下的风电功率爬坡特征, 建立气象场与功率爬坡事件的因果模型, 筛选出与爬坡事件高相关的气象变量, 并对多源高分辨率数值天气预报数据开展集合预报订正; 利用气象场特征值和风电爬坡功率作为特征向量, 建立基于深度学习的混合短期风电功率预报模型。

主要创新点 (1)摸清湖北省 150~300 m 高度的风能资源特性, 以支持风能随高度增加带来的收益与轮毂高度提升增加的成本测算, 充分挖掘和合理有效利用区域风能资源。(2)研究新能源行业政策走势, 梳理各机构新能源气象服务能力现状, 进而提出科学、合理、适应新形势的业务体系与服务机制, 为新能源气象服务未来发展提供科学指导与明确方向, 充分利用现有机制和平台开展深入研究, 提出推动实施“气象+能源”赋能行动和推进气象服务供需适配、主体多元的对策建议, 成果具有创新前瞻性、科学量化性可推进落实性。(3)开发湖北省高分辨率的风光资源预报预测产品, 建立风光资源短期、中长期预报预测技术。(4)提出一种高效且精确的风电爬坡事件识别和分类模型; 利用深度学习的特征抽取能力, 构建基于复杂地形和天气条件下考虑爬坡事件分类风电功率短期预报模型。

(责任编辑 孙舒)