

近年来气象灾害对风电场影响的研究进展

曾琦¹ 陈正洪²

(1 中国地质大学(武汉), 武汉 430074; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

摘要: 随着风电场的大量兴建, 气象灾害对于风电场安全的影响问题受到越来越多的关注, 气象灾害会使风电场内设备受损, 发电效益降低。主要论述的气象灾害包括: 台风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温等相关灾害, 简单分析气象灾害对风电场各划分单元(风电机组、集电线路、升压站、建筑、道路)的影响程度和分类。通过近十几年来国内外气象灾害对风电场影响相关文献的综述, 分析发现台风大风对风电场造成较大的机械破坏; 雷电造成风机和电网损坏; 低温冰冻引发设备覆冰、机械故障及发电量损失; 暴雨诱发山洪, 冲毁风电场内建筑和道路, 引发内涝淹没地面设备; 沙尘暴主要影响在于大风破坏和沙尘撞击叶片等敏感设备; 高温引起电器设备温度升高, 引发火灾爆炸; 台风、暴雨引起的滑坡泥石流、高温干旱引发山林草原火灾等次生灾害危害风电场。

关键词: 风电场, 气象灾害, 台风, 雷电, 低温冰冻, 沙尘暴, 暴雨

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.010

A Review of the Effect of Meteorological Disasters on Wind Farms in Recent Years

Zeng Qi¹, Chen Zhenghong²

(1 China University of Geosciences, Wuhan 430074 2 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: With the large-scale construction of wind farms, more and more attention has been paid to the influence of meteorological disasters on the safety of wind farms. Meteorological disasters can damage the equipment in wind farms and reduce the efficiency of power generation. The meteorological disasters discussed in this paper mainly include: typhoon, thunderstorm and lightning, icing, rainstorm, sandstorm, high temperature, and other related disasters. We simply analyze the impact degree and classification of meteorological disasters on various divisions of wind farms (e.g., wind turbines, collectors, boosters, buildings, and roads). Based on the domestic and global literature, this paper comprehensively discusses the research on the influence of meteorological disasters on wind farms in recent decades. It is found that typhoon causes great mechanical damage to wind farm; Lightning could damage wind turbines and power grids; Icing causes equipment icing, mechanical failure and power generation loss; Rainstorm induces mountain torrents, which wash away buildings and roads in the wind farm and cause waterlogging and inundation of ground equipment; The main influence of sandstorm lies in the damage of wind and the impact of sand and dust on the blades and other sensitive equipment. High temperature causes the temperature of electrical equipment to rise, causing fire and explosion. Attention should be paid to secondary disasters such as typhoons, landslides and mudslides caused by rainstorms, fires in forests and grasslands caused by high temperature and drought.

Keywords: wind farm, meteorological disaster, typhoon, thunderstorm, extreme low temperature and icing, sandstorm, heavy rain

0 引言

当今世界各国正在积极开发清洁的可再生能源, 其中风能作为一种清洁高效的能源日益受到各国重视。据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)估计, 到2020年, 全球风电总装

机容量可能会增加到7.92亿 kW, 2030年风力发电量将占全球总发电量的20%以上^[1]。根据《风电发展“十三五”发展规划》, 2020年中国风电累计并网容量将达到2.1亿 kW以上, 其中海上风电并网装机容量达到0.5亿 kW以上, 风电发电量达到4200亿 kW·h, 占全国总发电量的6%^[2]。随着风电场的兴建, 风电机组的安全运行问题受到越来越多的关注, 极端气象灾害对风电场的安全运行会造成不同程度的损害, 致使风电场内设备受损, 发电效益降低。

气象灾害一般包括天气、气候灾害和气象次生、衍生灾害。风电场一般建设在空旷的自然环境中, 各种气象灾害都会或多或少危害风电场和内部人员安

收稿日期: 2018年10月11日; 修回日期: 2019年1月9日

第一作者: 曾琦(1995—); Email: 1816456717@qq.com

通信作者: 陈正洪(1964—); Email: 447183633@qq.com

资助信息: 国家重点研发计划(2018YFB1502801); 中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程2019年建设项目; 华中区域气象中心科技精湛基金(QY-Y4-201403)

全, 本文选择风电场易受到且影响较为严重的台风、大风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温以及气象次生灾害^[3]展开论述。其中涉及台风、雷电、低温冰冻的相关研究较多。例如, Manwell等^[4]分析气象灾害(台风)引起的极端事件对美国近海风电场的影响; 宋丽莉等^[5]分析热带气旋对我国风力发电的影响; Rodrigues等^[6]研究雷电对风机的直接和间接影响; Makkonen等^[7]构建一种风机覆冰模型。而暴雨、沙尘暴、高温以及次生灾害对风电场影响的相关研究较少。

国内外关于风电场受气象灾害影响的系统性研究比较晚, 相关研究自20世纪90年代逐渐增多, 主要集中在美国、日本、欧洲(西班牙、德国、意大利、瑞典、葡萄牙等)以及加拿大, 研究内容主要是从定性的角度分析风电场开发建设过程中遇到的气象灾害风险, 其中部分研究试图对风电场遇到的气象灾害风险进行定量测量。Spencer等^[8]定量分析美国飓风对还防水风电场造成的风险。我国早期主要研究单一气象灾害对风电场的影响, 分析某个风电场受灾情况, 至2010年该领域深入研究增多。郑有飞等^[9]对影响江苏省风电开发的主要气象灾害进行分析及评估。可以看出, 气象灾害对风电场的影响研究是一个新兴的领域, 需要研究人员深入探索。希望通过这篇文献综述, 让更多人了解该领域研究内容, 激发更多相关研究, 科学指导风能发电。

风电场可以划分为风电机组(风电机、箱式变压器)、集电线路(架空、地埋)、升压站、建筑(监控室、生活区)、道路这5个单元。下面结合风电场划分单元从台风、大风、雷电、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温和次生灾害这几个方面分别论述气象灾害对风电场的影响, 总结气象灾害对风电场的影响类型。

1 台风、大风

风机利用风能将其转化为电能, 持续大风天气可以使风机处于较长时间的“满发”状态, 充分利用风力资源。但是, 当风速过大时风机及其附属设施也可能遭到损坏。2006年台风“桑美”袭击浙江苍南风电场造成惨重的损失, 28台风电机组全部受损, 其中5台倒塌^[10]。除了台风影响, 一些内陆风电场还会受到大风灾害的不利影响。2015年8月, 加拿大德芙琳地区发生强烈的龙卷风, 当地配网电线断裂, 造成风电场线路跳闸断电, 大量房屋受损, 当地30多人受伤^[11]。

台风和大风对整个风电场, 即风电机组、集电线路、升压站、道路和房屋所有单元的安全都有威胁。

1.1 台风

热带气旋是发生在热带或副热带洋面上的低压涡旋, 是一种强大而深厚的热带天气系统, 其中最大风力达到12级的称为台风。王帅^[12]认为台风对风力发电机组的破坏机理主要体现在对设备结构施加的静载荷和动载荷叠加效应。风电设备所受风压静载荷与空气密度和风速有关, 与风速的平方成正比。台风风速可高达70 m/s, 空气密度很大, 极易超过设计载荷极限, 破坏风机设备。风压动载荷主要由湍流引起, 湍流强度越大, 对风机的破坏性越强, 湍流对设备结构形成周期性激荡, Han等^[13]认为若湍流产生的周期恰好与风机固有振动周期相同, 设备结构就产生横向的共振, 导致风机被毁。湍流强度突变也会影响风机正常运行。

张礼达等^[14]总结台风对风电机组的主要破坏有: 叶片出现裂纹或被撕裂, 偏航系统受损, 风向仪、尾翼等设备被吹毁等。在高风速的情况下(大于25 m/s), 机械制动器会使涡轮机停止旋转以减少负荷。Hong等^[15]研究发现, 若机械制动失效, 叶片转速达到超速度时, 叶片结构无法承受极端负荷, 最终导致叶片弯曲、损坏或脱落。台风可直接造成偏航系统的机械损害, 也可能破坏风电场电网系统从而使偏航系统故障。偏航系统可以根据风速风向控制轮毂和叶片的角度, 它可以使转子远离突出的风向以减少负荷。台风期间会出现持续几个大风方向作用在风电机组的情况, 当偏航系统失效, 风机将无法调整对风, 台风风速超过设计极限时, 会发生叶片损毁甚至风机倒塌等事故。吴远伟^[16]指出叶片在强风作用下产生极大扭转力矩, 超出高速轴刹车盘与刹车片摩擦承载能力, 刹车盘强行转动, 产生持续高温, 产生火花引燃高速盘侧易燃物引起火灾。

除了风电机组, 台风也会对风电场其他单元造成极大破坏, 可能造成门窗破损、塔架变形、房屋和架空线路倒塌等一系列危害。台风还往往伴随暴雨、风暴潮, 可能会冲毁风电场, 甚至引发内涝淹没风电场, 破坏升压站等地面设备、地下电缆、道路交通, 造成严重的灾害。

Manwell等^[4]研究指出, 风和海浪是影响海上风电场最重要的两个因素, 风主要影响风机和塔, 海浪影响地基。在台风期间, 风和海浪对海上风力发电场的相互作用仍然是一个需要研究的问题, Kumar等^[17]研究发现, 在热带气旋中波高与极端风速之间有良好的相关性。大风带来大浪, 台风带来的狂风、巨浪, 对风力涡轮机、塔和地基造成巨大破坏。

1.2 大风

测站出现瞬时风速达到或超过17 m/s, 或目测风力达到或超过8级的风为大风, 一日出现过大风, 作为一个大风日^[18]。产生大风的天气系统很多, 如冷锋、雷暴、飏线和气旋等, 特殊地形会形成局地大风。下面主要论述飏线大风、龙卷风、寒潮大风、峡谷大风等大风灾害对风电场造成的一定程度的破坏。

飏线是强对流天气的一种, 沿着飏线可出现雷暴、暴雨、大风、冰雹和龙卷等剧烈的天气现象。飏线大风相比龙卷风持续时间更长, 破坏范围更大, 强风冰雹破坏风机组设备, 使线路跳闸停电^[19]。龙卷风风速极高, 对风电场内设备造成巨大冲击, 其内外气压差可能将建筑屋顶直接吸走, 另外龙卷风裹挟的树枝、砖块等风致碎片会撞击下游其他物体造成破坏^[20]。寒潮是大规模强冷空气活动的过程, 造成剧烈降温, 伴随大风、冰雹、降雪等灾害性天气现象^[19]。受地形狭管作用影响, 当气流由开阔地带流入地形构成的峡谷时, 由于空气质量不能大量堆积, 空气加速流过峡谷, 风速增大形成峡谷大风, 大风风力可达到10级以上, 强风会破坏风电场。这些大风灾害会造成风电机组、集电线路、升压站、房屋建筑损毁, 影响道路交通。极端大风事件不仅会影响风机的安全运行, 还会威胁周边的公共安全, 伴随的暴雨冰雹将进一步危害风电场的安全运营。

2 雷电

雷电是一种伴有雷击和闪电的局地对流性天气, 是一种在积雨云中、云间或云地之间产生的放电现象, 雷暴发生时常伴有冰雹、大风、暴雨等多种极端天气现象^[3]。雷暴对风电场的危害十分严重。Victor^[21]研究发现, 风机的有利位置往往与雷暴活动的区域重合。对于建立在空旷地带的风电场, 当它处于雷雨云形成的大气电场中时, 风机相对于周围环境成为突出的目标, 容易发生尖端放电被雷击中^[22]。对于建立在高海拔区(例如1000 m)或在山脊、山顶的风电场, 风机更是直接暴露在了雷电之中^[23]。Rodrigues等^[6]研究调查显示, 每年有4%~8%的欧洲风力发电机被雷电损坏, 其中德国风力发电机的雷击毁坏率高达8%, 日本沿海的风机因雷电导致损害占有总事故的30%左右。2013年3月, 广西多地出现雷电, 其中资源县某风电场受雷电影响, 4台风机的箱式变压器损坏, 直接经济损失91万元^[24]。

雷电主要影响对象是风电场内的风电机组、集电线路、升压站以及建筑设施。危害可以分为直接危害和间接危害。直接危害主要表现为雷电引起的热效应、机械效应和冲击波造成的危害。间接危害主要表

现为电磁感应效应和电涌过电压效应等^[25]。以下从这两个方面论述雷电对风电场的危害。

2.1 雷电对风电场的直接危害

风电机组遭受雷击的过程实际上就是带电雷云与风电机组之间的放电过程。雷电直接击中风电机组时, 电流产生热效应和机械效应。机械效应主要表现为在电动力作用下, 部件直接被击毁, 例如雷击使得塔筒变形甚至折断。热效应主要表现为雷击点周围, 局部金属熔化, 例如使输电线路直接熔断。热效应和机械效应一般同时出现。对于叶片, 被击中时, 雷电释放的巨大能量使叶片温度急剧升高, 物体内部水分迅速蒸发、汽化, 快速膨胀, 压力上升造成叶尖前后粘接部分爆裂破坏。直击雷击中风机叶片后, 电流沿着叶片传至风电机的主轴部分, 电流流动时, 机舱内部金属间隙会产生电火花, 可能引发火灾爆炸。电流经过轴承时, 产生极大热量, 损坏轴承内的滚子和套圈, 影响轴承运行的流畅性和设备的可靠性。雷击往往不会使电机运行立即失效, 但它使运行摩擦加大, 日积月累, 最后使整个轴承内部遭到严重损坏并发生运行故障^[25-27]。

2.2 雷电对风电场的间接危害

风电机组雷击暂态效应会使电位抬高, 使得风机叶片尖端与塔筒底部产生较大电位差, 当不同构件之间电位差达到一定数值时, 风机内部结构之间的空气被击穿, 破坏风机内部设备。雷电击中风机时会在风机塔筒内产生强电磁脉冲^[27], 对塔筒内部的风机控制系统和主电源装置造成直接辐射危害。电磁脉冲会在塔筒内部各种信号、电源导线内部产生感应电流, 形成过电流和过电压波侵入电子设备, 这些过电压会损坏集电线路和升压站设备, 造成风机设备工作失灵或者永久性损坏。雷电流由散流装置入地过程中形成的电位梯度过大, 附近区域人员可能受到接触电压和跨步电压的危害。

3 低温冰冻

根据IEC 61400-1标准^[22]规定, 风电机组的运行温度为-20℃, 生存温度为-30℃, 极端低温环境会影响风电场的正常运行。积冰是一种各种降水或雾滴与地面或空中冷却物体碰撞后冻结在其表面上的现象。Neil等^[28]指出在世界上的许多地方, 大部分利于开发的风能可用点已经被利用, 这迫使风电场开发商去寻找更复杂的地点, 并带来额外的风险或不确定性, 比如近海、山林和寒冷的气候地区。根据欧洲新能源咨询公司(BTM)评估, 到2012年底, 寒冷气候地区的装机容量达到69 GW, 2017年将增加50 GW^[29]。湖北

仙居顶风电场2010—2013年受低温冰冻影响,年平均损失电量600~800 kW·h。

低温冰冻主要影响对象是风电场内的风电机组和集电线路设备,也会影响道路房屋。

Oloufemi等^[30]指出低温冰冻对风电场最直接的危害就是停机所造成的经济损失,若低温天气持续时间较长,叶片长时间覆冰,风电场往往会停机几周甚至数月。2005年德国一项调查研究发现,停机是低温冰冻事件的最大危害,影响占比近90%^[31]。除了停机,低温冰冻还伴随3方面的问题:叶片、输电线等其他构件覆冰问题;低温使润滑油黏稠流动性差引发的机械故障问题;低温使得部分电子元件传感器失灵的问题。下面重点从叶片、导线覆冰、机械故障、周边安全问题这4个方面具体展开论述。

3.1 叶片覆冰

叶片覆冰使得叶片质量分布不均,叶片结构和形状改变,降低风能利用系数;增大叶片粗糙度,降低机翼启动性;叶片负载增大,风电机组机翼的空气动力损失增大^[32]。Hu等^[33]研究得到,叶根到叶尖,冰的质量和厚度近似呈线性增加;叶尖结冰率大于叶根结冰率,在防/除冰时应注意叶尖区域;无论是不对称覆冰(叶片一面覆冰,一面未覆冰)还是对称覆冰都能减小叶片动力,但不对称覆冰会使叶片附加不对称剪力,对风机危害更大。孙鹏等^[34]指出低温会使叶片阻尼等结构特性发生变化,叶片自身频率变化,引发共振,使得寿命缩短,大风低温时的刹车动作可能引起叶片折断。

3.2 导线覆冰

当导线覆冰厚度超过设计的抗冰厚度时,覆冰后质量、风压面积增加会导致输电线路发生机械和电气方面的事故,可能造成金具损坏、导线断股、杆塔折损倒塌、绝缘子串翻转和撞裂等机械损害;也可能使弧垂增大,造成闪络和烧伤、烧断导线等电气问题^[35]。

李兴凯等^[36]研究华北地区导线覆冰问题发现,若相邻的导线覆冰不均匀或一条线路中导线不同期脱冰,导线会产生张力差,从而损坏金具、导线和绝缘子,使得导线电气间隙减小,发生闪络,也有可能破坏杆塔。在风的作用下,质量分布不均的导线会产生自激振荡和低频率的舞动,从而造成金具损坏、导线断股、断线和杆塔倾斜或倒塌等事故。

3.3 其他机械故障

低温条件下,风机中润滑油黏稠度增加,流动性降低,风机液压系统无法正常工作。对于刹车液压系统,它使得刹车时间增长、振动增大,影响风机安全运行。润滑效果减弱,摩擦增大,齿轮箱系统和偏航

系统内部运行阻力增大,旋转、摩擦产生的热量无法正常释放,这会使得齿轮磨损、系统受损^[34]。

低温条件下,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。升压站、监控室以及其他电气设备都会受到影响。

3.4 安全问题

Tammelinen^[37]研究指出风电场自身就有噪声污染的问题,低温冰冻条件下,风机运行受阻,噪声污染增强。温度升高后,风机和输电线路上的覆冰、冰柱会脱落,周围居民应注意安全,避免砸伤。道路结冰会影响风电场内交通安全。

4 暴雨

根据规定,24 h降水量 ≥ 50 mm的强降雨称为“暴雨”。暴雨主要影响对象是风电场内的风电机组和道路房屋。暴雨对风电场的危害主要来自两个方面,一是暴雨引发洪水、滑坡、泥石流等灾害;二是雨水对风机性能的影响。

暴雨引发的洪水、泥石流是危害风电场的主要原因,整个风电场都会受到极大破坏。受地形影响,若风电场建设在地势较低的区域,或是风电场内排水、防洪措施不到位,风电场内易形成内涝,靠近地面的变压器、升压站等设备易被淹没损坏。山区里,暴雨引发山洪,可能会冲毁风电场中风机、房屋、道路等设施,甚至一些风电场在建设过程中遭到山洪破坏,损失惨重。2017年7月14—15日,宜昌市五峰县出现了较大范围的强降雨,导致山洪暴发并诱发多处滑坡泥石流,对当地的房屋、道路、电力和通信等设施产生较为严重的危害,在五峰和湾潭两镇建设的北风垭风电场,受到此次强降雨诱发的山洪地质灾害的影响,使得2017年9月底首台风机并网发电的计划推迟^[38]。

目前,关于雨水对风机叶片动力影响研究还比较少,相关研究集中在航空领域,研究雨水对机翼的影响。这些研究发现:雨水使机翼升力减少,阻力增加;在雨中,层流翼的性能损失比紊流的翼片更严重;当雨滴撞击机翼时,部分雨滴被加速溅回空气中,剩余雨滴在机翼表面形成了一层薄薄的水膜,这层水膜受之后的雨滴影响,表面形成“弹坑”,成为了一张不均匀的薄膜,机翼表面改变,增加了阻力^[39]。与航空研究中得出的结论相似,Cai等^[40]分析了一台在雨天使用的水平涡轮机机翼的性能,发现在大多数AOAs(攻角)引入降雨时,升力会减少,阻力增加,导致升阻比降低。Alessio等^[41]研究指出,如果叶片不受保护,风机叶片将会遭受雨蚀,尤其是酸雨的损坏,将会降低空气动力性能,从而降低动力的产生。Wu等^[39]利用NACA 0015 VAWT翼型研究发现,

降雨条件下风机叶片升力系数和切向系数减小（图1、图2）。

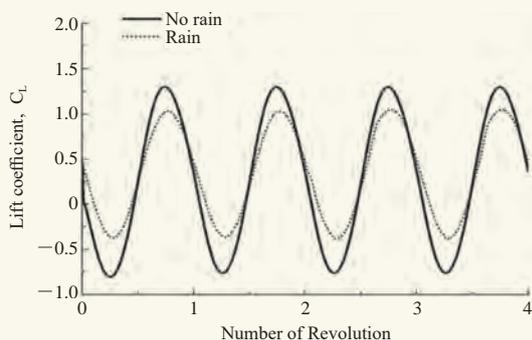


图1 NACA 0015翼型振荡运动状态晴天雨天升力系数比较^[39]
Fig. 1 Lift coefficient comparison between the dry and rain conditions for NACA 0015 airfoil with oscillating motion

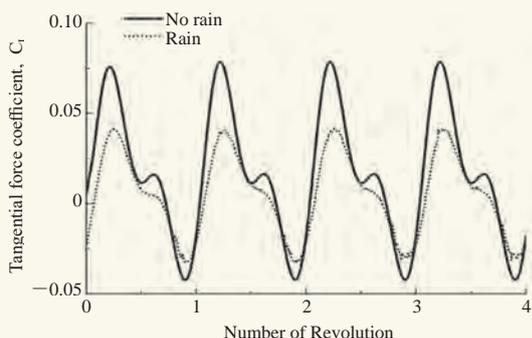


图2 NACA 0015翼型振荡运动状态晴天雨天切向力系数比较^[39]
Fig. 2 Tangential force coefficient comparison between the dry and rain conditions for NACA 0015 airfoil with oscillating motion

5 沙尘暴

沙尘暴是指强风扬起地面沙尘，使空气混浊，水平能见度小于1000 m的风沙天气现象。

沙尘暴破坏范围大，造成的受灾面积广，对风电场内各单元都有影响，其危害主要表现在以下几个方面。

5.1 沙尘暴伴随大风

强沙尘暴发生时风力往往达8级以上，有时甚至可达12级，相当于台风登陆的风力，强风可能会吹倒或拔起大树、电杆，刮断输电线路，或是发生高压线路短路和跳闸事故，毁坏建筑物和地面设施，造成人畜伤亡，破坏力极大。

根据2014年一篇相关报道^[42]，沙尘暴会对土壤造成不同程度的刮蚀，每次的风蚀深度可达1~10 cm；当遇到背风凹洼的地形或障碍物时，随风而至的大量沙尘又会造成沙埋，严重的沙埋深度可达1 m以上。若风电场建在迎风坡或地势较高的地区，沙尘暴来袭对土地的刮蚀，影响塔基稳定，在背风坡或地势低洼的地区，其沙埋作用又可使塔架的高度发生变化，影

响风能吸收和转换。

5.2 沙尘暴扬起沙尘

大风夹带的砂砾不仅会使叶片表面严重磨损，甚至会造成叶面凹凸不平，破坏叶片的强度和韧性，影响风电机组运行^[32]。若砂砾较大，还会直接破坏风机和房屋设备；大量沙尘使能见度降低，不利于交通安全；高尘沙浓度、强风沙流速的沙尘可能引起电力设备外绝缘闪络，应提前做好防护措施。

风机叶片上的沙尘应及时清理，除了沙尘暴侵袭，日常的扬尘积灰对风机叶片正常运行也有影响。研究表明，由于沙尘积累，叶片阻力增大，升力减小，降低风机的功率输出。

G. Khalfallah等^[43]在2007年利用Nordtank 300 kW风力机，研究在1 d、1周、1个月、3个月、6个月、9个月不同工况下粉尘对功率曲线的影响（图3），在不清洗叶片的情况下，随着运行周期的增加，风电机组输出功率的损失也随之增大。扬尘还会危害场内工作人员的健康。

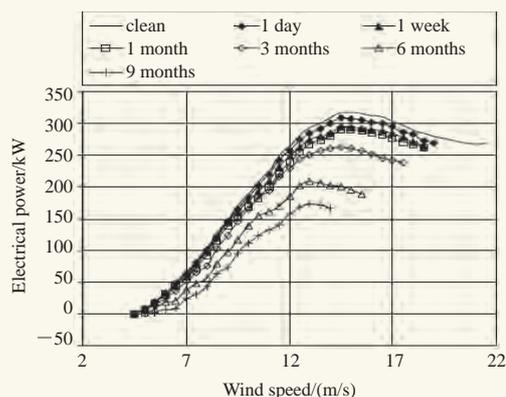


图3 在不同运行周期条件下粉尘对风机输出功率的影响^[43]
Fig. 3 Effect of dust for various operation periods on the power curve of turbine

6 高温

气象上将日最高气温 $>35^{\circ}\text{C}$ 定义为高温日，将日最高气温 $>38^{\circ}\text{C}$ 称为酷热日。中国把连续数天（3 d以上）的高温天气过程称之为高温热浪。高温主要影响风电机组、集电线路、升压站这几个涉及电力系统的单元。

高温会使电力线路超负荷，电力线路过载将威胁到电网的安全平稳运行。线路可能频繁跳闸，甚至造成变压器过热烧坏、损毁，引发主电力设备过载等故障，长时间处于高温环境也会影响风机中各组件寿命。霍林等^[44]研究发现，如果遇到高温天气且电力线路超负荷而线路又老化，而电器设备又长期处于高温运行状态，易引发电力故障，甚至引发火灾。

根据叶杭治^[45]研究, 风电机组保持较高功率运行时, 齿轮箱、发电机、变压器、变频器等机械和电气部件产生较大热量, 而发电机、齿轮箱、IGBT等主要部件又处于相对封闭的狭小的机舱内或塔底平台上, 产生的热量不能顺利排出, 使机舱内温度升高, 加之环境温度较高, 部件过热可能出现故障。高温影响到风电机组部件运行的安全性, 所以风电机组只能限功率运行, 甚至停机, 影响到风电场投资的经济性。目前风电场针对高温灾害设计出一些抗高温型机组, 例如任朝阳等^[46]通过改善风机的通风系统和散热性能, 设计了出了满足外界温度45℃, 机舱内部不超过50℃的抗高温型机组。

7 气象次生灾害

气象次生、衍生灾害, 是指因气象因素引起的山体滑坡、泥石流、风暴潮、火灾、酸雨、空气污染等灾害。下文论述台风、暴雨、高温这些气象灾害引发的滑坡、泥石流、火灾次生灾害。

7.1 滑坡泥石流

风电场所遭受的次生灾害主要是由台风、暴雨天气带来的。风电场内设施受到洪水长时间的冲刷、浸泡, 待台风、洪水退去后, 发生房屋、桥梁坍塌或者诱发山体滑坡、泥石流, 造成破坏, 这是台风带来的次生灾害。在山区, 暴雨天气可能引发滑坡、泥石流等次生灾害。

以泥石流为例。泥石流的发生有主要条件: 物源条件, 物源区土石体的分布、类型、结构等, 它与当地地层岩性相关; 水源条件, 水是泥石流的组成部分, 也是松散固体物质的搬运介质, 雨水往往是主要来源; 地形地貌条件, 它能为泥石流的发生、发展提供位(势)能及汇聚足够的水和土石^[47-48]。台风或是暴雨天气发生后物源变得松散, 提供水源, 有时甚至改变地貌(侵蚀掏空), 从而诱发泥石流这一次生灾害发生。滑坡、泥石流冲毁房屋、破坏交通, 对风电场安全运营带来危害。

7.2 山林草原火灾

长期的高温干旱天气会引发山林或草原火灾。修建在山区、草原的风电场应注意防火。一般风力发电机组安装检修场地均采取了平整措施, 安装检修场地上无植被, 升压站周围有水泥硬化道路, 可起到阻火作用。但若后期运行维护不当, 可能会有灌木、杂草等生长, 周边山林发生山火就可以蔓延到风力发电机组处, 威胁风力发电机组、箱式变压器的安全; 若火势较大可能影响升压站内的设备设施, 威胁运行人员人身安全, 破坏当地生态。

8 气象灾害对风电场各划分单元影响程度和类型

总结上文论述, 分析得到气象灾害在风电场内的重点破坏单元, 各气象灾害对风电场的危害程度, 见表1(打勾说明该单元会受到对应气象灾害破坏)。可以发现, 台风、大风、沙尘暴、低温冰冻、暴雨、次生灾害这些气象灾害破坏范围大, 影响时间长, 对风电场各单元安全都有威胁; 雷电对道路影响较小, 对其他单元, 特别是电力设备危害较大; 高温对风电场的影响相对较小, 主要损害风电机组、集电线路和升压站。不同地区风电场受到的气象灾害不同, 同一气象灾害, 灾害大小亦有不同, 后期将继续调查研究, 提供更加准确的影响分析。

表1 气象灾害对风电场内各划分单元影响情况
Table 1 The influence of meteorological disaster on each partition unit in wind farm

风电场划分单元	台风、大风	雷电	低温冰冻	沙尘暴	暴雨	高温	次生灾害
风电机组	√	√	√	√	√	√	√
集电线路	√	√	√	√	√	√	√
升压站	√	√	√	√	√	√	√
建筑	√	√	√	√	√		√
道路	√		√	√	√		√

气象灾害对风电场的影响可以分成安全类影响、效益类影响、生态类影响这3类。

安全类影响指该气象灾害对风电场人员安全危害和设备故障损毁。例如风机倒塌、输电线路折断、升压站设备故障、建筑道路毁坏、工作人员受伤等, 本文论述的气象灾害对风电场均会产生安全类影响。

效益类影响指设备不会大面积损毁, 但工作效率降低。覆冰、沙尘、雨水会使风机输出功率降低, 高温天气为保证设备安全低功率运行。

生态类影响指气象灾害破坏风电场周围生态环境。台风、雷电、高温可能引发火灾, 暴雨、次生灾害(滑坡、泥石流)会造成水土流失。

9 小结

随着全球对新能源, 特别是风能的需求日益增加, 在风电场的选址、建设、运营各个阶段都需要考虑气象灾害问题。本文主要讨论台风、大风、雷暴、低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温以及诱发的次生灾害对风电场的影响。台风主要考虑叶片出现裂纹或被撕裂, 风向仪、尾翼等设备被吹毁, 偏航系统受损等机械破坏问题, 除了台风, 其他大风灾害(龙卷风、寒潮大风等)也会危害风电场安全; 雷电主要是直击雷引起的热效应、机械效应和冲击波对叶片和内部结构造成的危害, 电磁感应、电磁脉冲造成的间接危害,

电火花可能引发火灾；低温冰冻导致长时间停机造成发电量损失，覆冰对风电场表现在可能对叶片、导线等其他设备造成危害，低温使润滑油黏稠影响设备运行，影响电子元件性能，积冰掉落引发安全问题；暴雨诱发山洪，冲毁风电场内建筑和道路，引发内涝淹没地面设备，雨水会侵蚀叶片、阻碍叶片运行；沙尘暴主要影响在于大风破坏和沙尘撞击叶片等敏感设备，沙尘积累在叶片，使得风机功率输出降低；高温要注意电子设备安全，防止产生火灾、爆炸，注意工作人员安全。一次灾害发生后还要继续关注次生灾害的发生，注意台风、暴雨引起的滑坡、泥石流，以及高温干旱引发山林草原火灾等次生灾害危害风电场。

结合表1可以得到气象灾害对风电场内各划分单元影响情况，雷电和高温灾害对风电场内建筑、道路这两个单元影响较小，其他气象灾害对风电场内各划分单元都有影响，影响程度与风电场自身建设和灾害具体情况有关，需要进一步研究。

气象灾害对风电场均会产生安全类影响；低温冰冻、暴雨、沙尘暴、高温会产生效益类影响；台风、雷电、暴雨、气象次生灾害会产生生态类影响。

参考文献

[1] GMEC. Global Wind Report: 2018. GMEC, 2018.
 [2] 杨光俊. 我国风电绿色发展前景分析和政策建议. 环境保护, 2018, 46(2): 17-19.
 [3] 柳艳香, 袁春红, 朱玲, 等. 近12年来影响风电场安全运行的气象灾害因子分布特征. 风能, 2013(5): 70-74.
 [4] Manwell J F, Elkinton C N, Rogers A L, et al. Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(2): 210-234.
 [5] 宋丽莉, 毛慧琴, 钱光明, 等. 热带气旋对风力发电的影响分析. 太阳能学报, 2006(9): 961-965.
 [6] Rodrigues R B, Mendes V M F, Catalão J P S. Protection of interconnected wind turbines against lightning effects: overvoltages and electromagnetic transients study. *Renewable Energy*, 2012(46): 232-240.
 [7] Makkonen L, Laakso T, Marjaniemi M. Modeling and prevention of ice accretion on wind turbines. *Wind Engineering*, 2001, 25(1): 3-21.
 [8] Spencer H, Andrew T M, Sanjay R A, et al. Hurricane risk assessment of offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 2018, 2.
 [9] 郑有飞, 林子涵, 吴荣军, 等. 江苏省风电场的气象灾害风险评估. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 145-151.
 [10] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探. 风能, 2012(5): 74-79.
 [11] 钱贺. 龙源电力“走出去”纪实: “一带一路”好时机, 风起扬帆正当时. 新华网, 2018-06-29.
 [12] 王帅. 自然环境对风力发电机组安全运行的影响分析. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(6): 214-218.
 [13] Han T, McCann G, Mücke T A, et al. How can a wind turbine survive in tropical cyclone? *Renewable Energy*, 2014(70): 3-10.
 [14] 张礼达, 任腊春. 恶劣气候条件对风电机组的影响分析. 水力发电, 2007, (10): 67-69.
 [15] Hong L X, Møller B. An economic assessment of tropical cyclone risk on offshore wind farms. *Renewable Energy*, 2012, (44): 180-192.
 [16] 吴远伟. 台风对沿海风电机组的危害及对策. 风能, 2015, (2): 88-93.
 [17] Kumar V S, Mandal S, Kumar K A. Estimation of wind speed and wave height during cyclones. *Ocean Engineering*, 2003, 30(17): 2239-2253.
 [18] 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. 中国工程科学, 2010, 12(11): 71-77.

[19] 刘长青, 祁永辉, 曹荣泰, 等. 青海地区输电线路风灾原因分析. 电力勘测设计, 2016, (S2): 146-150.
 [20] 高榕. 中国龙卷风特性统计分析及灾后建筑物调查研究. 北京交通大学, 2018.
 [21] Victor M. Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms. *Electric Power Systems Research*, 2017.
 [22] IEC. IEC 64100-1:2005. Wind turbines part1: Design requirements. IEC, 2005.
 [23] Yokoyama S. Lightning protection of wind turbine generation systems//Lightning (APL), 2011 7th Asia-Pacific International Conference on. IEEE, 2011: 941-947.
 [24] 李兆华, 刘平英. 风电场雷击风险分析及防护措施研究: 以云南某风电场为例. 灾害学, 2015, 30(1): 120-123.
 [25] 李强. 风力发电机雷电损害分析及风险评估方法研究. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
 [26] 付国振. 沿海风电场雷电危害的特点及防护措施. 中国气象学会. S13 第十届防雷减灾论坛: 雷电灾害与风险评估. 中国气象学会: 中国气象学会, 2012: 5.
 [27] 王晓辉. 风力发电机组雷电暂态效应的研究. 北京: 北京交通大学, 2010.
 [28] Neil D, Andre N H, Niels-Erik C. Forecast of icing events at a wind farm in Sweden. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012(53): 262-281.
 [29] BTM. BTM World Market Update 2012. Navigant Research, 2013.
 [30] Oloufemi F, Zoé F, Hussein I. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2016(65): 662-675.
 [31] Durstwitz M. A statistical evaluation of icing failures in Germanys 250 MW Wind-Programme (update 2003). BOREAS VI, Pyhäunturi: 9-11.04; 2003.
 [32] 张礼达, 张彦南. 气象灾害对风电场的影响分析. 电力科学与工程, 2009, 25(11): 28-30.
 [33] Hu L Q, Zhu X C, Hu C X, et al. Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions. *Renewable Energy*, 2017.
 [34] 孙鹏, 王峰, 康智俊. 低温对风力发电机组运行影响分析. 内蒙古电力技术, 2008, 26(5): 8-10.
 [35] 苑吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状. 高压技术2004 (1): 6-9.
 [36] 李兴凯, 曹秋会, 李文林. 华北地区山区风电场导线覆冰特点研究. 电力勘测设计, 2016(S2): 165-167.
 [37] Tammelin B, et al. Icing effect on power production of wind turbines. In Pro-ceeding of the BOREAS IV Conference, 1998.
 [38] 孙朋杰, 陈正洪, 万黎明, 张荣. 湖北五峰2017年“7.15”、2016年“7.19”暴雨特征及对地质灾害影响分析. 湖北农业科学, 2019, 58(10), 待发表.
 [39] Wu Z L, Cao Y H, Nie S, et al. Effects of rain on vertical axis wind turbine performance. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2017(170): 128-140.
 [40] Cai M, Abbasi E, Arastoopour H. Analysis of the performance of a wind-turbine airfoil under heavy-rain conditions using a multiphase computational fluid dynamics approach. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2012, 52 (9): 3266-3275.
 [41] Alessio C, Alessandro C, Franco R. Computational analysis of wind-turbine blade rain erosion. *Computers and Fluids*, 2016.
 [42] 陈女士. 灾难频发气候作怪? 谁“祸害”了我们的风电场. 北极星电力网新闻中心, 2014-08-14.
 [43] Khalfallah M G, Koliub A M. Effect of dust on the performance of wind turbines. *Science Direct*, 2007(209): 209-220
 [44] 霍林, 谭萍, 张婷婷, 等. 电力气象灾害时空分布特征及其影响分析. 南方农业, 2017, 11(20): 83-84.
 [45] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术. 北京: 电子工业出版社, 2006.
 [46] 任朝阳, 陈棋, 崔峰, 等. 风电机组的抗高温设计. 能源工程, 2015(1): 44-47.
 [47] 林国才. 粤北山区风电场工程场地常见地质灾害调查研究. 城市建设理论研究: 电子版, 2018(16): 2.
 [48] 赵彬, 王新贺. 宁夏固原寨科风电场地质灾害危险性调查评估及防治措施建议. 中国水运, 2011, 11(12): 163-164.