

中文引用格式:李存义,张博,范晓旭.风电机组叶片覆冰风险分析及应对措施[J].中国安全科学学报,2024,34(增1):199-204.

英文引用格式:LI Cunyi, ZHANG Bo, FAN Xiaoxu. Risk analysis and countermeasures of wind turbine blade icing[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):199-204.

风电机组叶片覆冰风险分析及应对措施*

李存义¹工程师,张博^{1,2}高级工程师,范晓旭^{**3}高级工程师

(1 龙源(北京)新能源工程技术有限公司,北京 100034; 2 国家能源风电运营技术研发(实验)中心,陕西 西安 710309; 3 龙源电力集团股份有限公司,北京 100034)

中图分类号:X934

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0117

资助项目:国家能源集团科技创新项目(GJNY-21-9)。

【摘要】为促进新形势下冬季覆冰区域风电机组的安全运营和安全管理,分析风电机组落冰安全风险、设备运行风险、电力供应风险是最为严重的叶片覆冰风险。基于这些风险,提出叶片覆冰厚度监测法与机组运行数据监测法相结合的综合覆冰监测方法和风电机组安全运行分级。阐述国内首例大型在役风电机组复合涂层防冰技术方案设计与施工工艺。结果表明:复合涂层防冰技术方案可有效解决风电机组覆冰问题,可为类似工程项目提供参考。

【关键词】风电机组; 叶片; 覆冰; 监测; 防冰技术

Risk analysis and countermeasures of wind turbine blade icing

LI Cunyi¹, ZHANG Bo^{1,2}, FAN Xiaoxu³

(1 Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100034, China;
2 National Energy Wind Power Operation Technology R&D Center, Xi'an Shaanxi 710309, China;
3 China Longyuan Power Group Corporation Limited, Beijing 100034, China)

Abstract: In order to promote the safe operation and safety management of wind turbines in icing areas during winter under the new situation, the safety risk of wind turbine falling ice, equipment operation risk, and power supply risk were analyzed, and they are the most serious risks of blade icing. Based on these risks, a comprehensive ice monitoring method based on the combination of blade ice thickness monitoring method and wind turbine operation data monitoring method was proposed, and the safe operation of the wind turbine was classified. This article elaborated on the design and construction process of the first composite coating anti-icing technology scheme for large-scale in-service wind turbines in China. The results indicate that the composite coating anti-icing technology solution can effectively solve the problem of wind turbine icing and can provide a reference for similar engineering projects.

Keywords: wind turbine; blades; icing; monitoring; anti-icing technology

0 引言

截至2022年底,全国风电装机达到3.65亿kW,占发电总装机量的14.2%,在能源保供方面发

挥着重要作用。风电场通常建在风资源丰富的高海拔山区,这些区域的风电机组叶片在秋冬或冬春季交替时常发生覆冰事件。风电机组叶片覆冰是一个随机性很强、影响因素很多、环境极为恶劣、研究

* 文章编号:1003-3033(2024)S1-0199-06; 收稿日期:2023-10-31; 修稿日期:2023-12-22

** 通信作者:范晓旭(1982—),男,山东泰安人,博士,高级工程师,主要从事风电机组控制和优化技术方面的工作。E-mail:12079306@ceic.com。

非常困难的自然领域仍亟待解决的重大国际难题。因此,研究风电机组叶片覆冰风险,提出覆冰问题解决措施,对风电机组的安全运行和风电行业的健康发展具有重要意义。

叶片上的冰层会影响机组发电性能,导致机组降功率甚至停机^[1-3]。冰层会增加风电机组的载荷,并引起三支叶片表面的质量分布不均匀。冰载荷增加值及振动不平衡量超出机组的安全设计限值时,风电机组持续运行会降低设备的使用寿命,甚至出现叶片折断、塔筒坍塌等情况。在风电机组运行或停机状态下,脱落的冰层会对风电机组设备、箱式变电站、作业人员等产生安全隐患。李程^[4]分析认为,风力发电机组覆冰的不利影响体现在:计量错误、发电量降低、风机的气动特性改变等方面。李建强^[5]分析认为,叶片覆冰对机组运行的影响体现在:改变叶片的质量分布和截面刚度;风轮动平衡失衡,刚度增大,耐疲劳性能显著降低。莫秋云等^[6]研究了叶片覆冰的影响,提出风力机运行过程中甩落或融化掉落的冰块也会对工作人员和附近居民造成威胁。采集叶片表面的图像,识别图像的覆冰特征,实现叶片覆冰的监测。孙凯等^[7]研究了基于图像识别的叶片结冰检测技术,通过改进 Canny 算法与显著物识别算法结合,将图像的边缘像素识别出来,然后计算每一个点的像素梯度,利用灰度值分割法确定最优阈值,再进行显著物的识别,对叶片结冰图像识别。冷冻冰^[8]提出了等价模式的局部二值模式特征向量提取和多类支持向量机分类模型结合的覆冰类型识别方法,建立了覆冰图像库对分类模型进行训练并开展了自然覆冰图像的识别试验,结果表明,当训练样本足够大时,识别结果与环境参数预测的覆冰类型相吻合。成和祥等^[9]通过监测叶片覆冰前后振动参数的变化量,诊断叶片覆冰程度。基于风电机组功率、转速、桨距角等参数,建立覆冰监测模型,实现叶片覆冰监测。刘庆超等^[10]采用适合随机变量建模的高斯过程回归分别建立了功率模型和叶轮转速模型,能在运行参数随风速随机变化的复杂工况下,实时监测风电机组的功率和叶轮转速是否偏离正常运行状态,并结合温度情况进行覆冰预警。段亚穷^[11]研究了数据驱动的风力发电机叶片覆冰检测方法,针对特定覆冰特征通过完全标记数据和无标记数据依托监督学习和无监督学习对覆冰检测技术进行了探索。张好雨^[12]研究了风机叶片覆冰原理与覆冰后机理变化特性,通过 Relife 算法分析出风速、电机功率、电机转速、环境温度、机

舱温度 5 种对风机叶片覆冰状态影响较大特征,并基于 Stacking 模型对覆冰进行检测。常阿飞等^[13]以河南西部山区某风电场为例,分析了热风循环防覆冰技术方案应用可行性。冯晓欢^[14]总结了机械除冰、热能除冰、超声波除冰等技术特点。赵永景^[15]总结了新型磁热材料防覆冰技术、超疏水纳米材料防覆冰技术、碳纤维电热除冰等技术特点。综上,现有研究大多关注叶片覆冰后的经济损失分析、设备寿命分析,未系统和深入分析人员、设备等方面安全风险。普遍采用单一的间接覆冰监测方法和单一防冰技术措施,未能解决影响机组安全运行的中度及以上严重覆冰问题。

鉴于此,笔者拟从安全运行的角度分析覆冰对设备、人员、电力系统产生的影响,提出覆冰监测和防冰技术方案,以期有效降低覆冰损失,提高风电机组运行可靠性和保障人员安全。

1 风电机组叶片覆冰风险分类

1.1 落冰风险

在一定的气候条件下,冰层会在叶片前缘局部或整支叶片呈现包裹式分布,当叶片表面温度回升时,冰层逐渐融化脱落或被抛至一定的距离,可能会损坏机组或周围设施,对周围人员安全构成威胁。落冰距离与风速、风向、温度、机组状态、覆冰形态等因素有关,根据经验进行计算,最大落冰范围内为安全风险较大区域。机组运行时抛冰距离和机组停机运行时落冰距离计算如下式:

$$d_1 = 1.5(D + H) \quad (1)$$

$$d_2 = V(D + 2H)/30 \quad (2)$$

式中: d_1 为停机时最大落冰距离, m; d_2 为运行时最大落冰距离, m; D 为风轮直径, m; H 为轮毂高度, m; V 为轮毂高度处 10 min 内测得的平均风速, m/s。

1.2 设备运行风险

以 3.XMW 风电机组为例,覆冰的叶片质量会增加 3.4%,叶片的一阶挥舞频率降低 7.74%,覆冰机组发生共振的风险增加,同时叶片疲劳载荷增加会降低叶片的使用寿命^[16]。

覆冰是非常复杂的自然现象,叶片表面冰型、覆冰量等存在差异,3 支叶片的重量互差、静矩互差超出限值后,叶片会出现不平衡现象,叶片不平衡会加剧关键结构部件的振动,降低塔筒、机舱、叶片、发电机等的使用寿命。

1.3 电力供应风险

严重覆冰会造成风电机组停机,风电机组规模

性脱网会在一定程度上影响电力供应。近年来随着极端天气频发,风电装机规模的逐步提升,因覆冰影响导致风电机组退备现象日益凸显,对冬季电网的安全运行带来极大的影响。如 2021 年 2 月,美国得克萨斯州发生大规模停电事故,影响了大约 400 万居民生活。2020 年 11 月—2021 年 2 月,我国发生较明显的寒潮共计 3 次,因覆冰原因部分省份风机脱网达 50 万 kW 以上,尤以湖南、重庆、江西等最为严重^[17]。

2 机组覆冰监测方法

过早开启防覆冰系统会影响增加经济费用,过晚开启防覆冰系统将导致防覆冰技术无效,因此,精确地机组覆冰监测对防覆冰系统的控制至关重要。机组覆冰监测方法分为外加传感器法和机组运行数据法。外加传感器法主要采用结冰厚度传感器进行覆冰监测,传感器安装在机舱位置或叶片表面。但传感器监测到的结冰往往和影响机组发电性能的覆冰事件不同步,即传感器处结冰而机组发电性能尚无变化,而且机组每个位置的结冰速率和厚度差异很大,考虑经济性只能在特定位置安装有限的结冰传感器,因此,单一的传感器监测法不能准确反映真正影响生产和安全的机组结冰事件,无法有效指导防覆冰系统的控制。风电机组运行数据法是通过采集机组的转速、发电功率等运行数据,建立机组覆冰模型,实现机组结冰预警,此方法对轻度覆冰预警准确度不高,往往监测到覆冰时已经是严重覆冰,此时开启加热系统已经严重滞后,无法实现防冰和有效脱冰,特别是对生产工作影响最大的雨淞环境,若不及时开启加热将出现防覆冰技术无效的情况。结合外加传感器法监测到的覆冰厚度和机组运行数据法监测到的覆冰状态下机组效能数据,提出机组覆冰程度五级分类法。结合不同风电场覆冰特点和防覆冰系统功率配置,合理设计加热方式,如覆冰等级为 1 级时开启低功率间歇式加热;覆冰等级为 2 级时采用低功率持续加热方式;覆冰等级为 3 级及以上时采用高功率持续加热方式,随覆冰等级增加防覆冰系统中途加热停歇时间可适当缩短。

无线覆冰传感器主要由覆冰厚度检测单元、无线数据传输单元、太阳能供电单元、电量储存单元组成,典型无线覆冰传感器的结构如图 1 所示。其原理是根据冰、雪、水不同物质的介电常数不同,通过监测介电常数变化引起的电容变化来判断覆冰状态和覆冰厚度^[18]。

机组运行数据监测法是利用风电机组风能利用

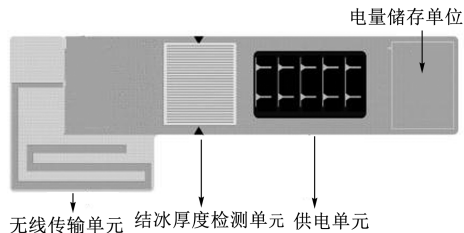


图 1 无线覆冰传感器典型结构

Fig.1 Typical structure of wireless icing sensors

系数偏差率诊断机组覆冰状态。风能利用系数偏差率是覆冰损失电量与应发电量的比值。风电场人员根据表 1 所述的机组覆冰程度分类法,评估机组运行安全状态。

表 1 机组安全运行状态分级

Table 1 Classification of safe operation status of wind turbines

覆冰等级	覆冰厚度/mm	风能利用系数偏差率/%	状态描述
1	0	[0,5)	机组无覆冰或覆冰对机组正常发电影响非常小;覆冰对机组设备几乎没有或非常低的潜在危害
2	[0,1)	[5,10)	机组覆冰程度较低或覆冰对机组正常发电影响较小;覆冰可能对机组设备造成一些潜在危害,但在正常条件下,大概率不会对设备造成明显的损坏
3	[1,5)	[10,40)	机组覆冰程度中等或覆冰对机组正常发电影响较大;长期运行覆冰可能对机组设备造成一定的损坏
4	[5,10)	[40,70)	机组覆冰严重或覆冰对机组正常发电影响很大;长期运行覆冰可能对机组设备造成重大的损坏
5	[10,∞)	[70,100]	机组覆冰非常严重或覆冰对机组正常发电影响非常大;长期运行覆冰可能对机组设备产生特别重大的影响

3 机组覆冰防治措施

目前,主流的防覆冰技术措施包括涂层防冰、电热防冰、气热防冰。单一的防冰技术应用效果排序为电热、气热、涂层,但上述 3 种单一的防冰技术效果有限。最具发展前景的防覆冰技术是电热技术和涂层技术。在叶片 5%~10% 高雷击风险区铺设电热膜存在较高的雷击风险,往往在靠近叶尖位置采

取不铺设加热膜的方案,但叶尖是叶片结冰最严重的区域,也是影响机组发电效能最关键的部位,在实践中常出现加热区域无冰但叶尖覆冰严重导致机组无法运行的情况。近年来,涂层防冰技术取得较快发展,特别是低冰黏附涂层表现出很好的应用效果和发展前景。本文提出将电热防冰和涂层防冰相结合的复合涂层防冰技术方案,利用电热进行叶片主要覆冰部位防冰,其余覆冰部位用涂层进行补充防冰。复合防冰技术方案与电热或涂层单一防覆冰技术相比可最大程度的减少覆冰经济损失和降低覆冰对机组的安全影响,同时,降低防覆冰系统遭受雷击的风险,扩大了防覆冰技术在高雷击风电场的应用场景,设计方案如图2所示。

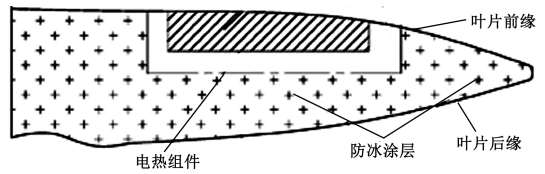


图2 复合防冰技术方案

Fig.2 Composite anti-icing technology

工艺,以解决树脂灌注均一性、电热膜一体化铺层等关键技术难题,并在陕西某风电场完成国内首例大型在役机组电热一体化样机示范工程。复合防冰涂层流程如图3所示。

2022年12月10日—11日,风电场发生一次非常严重的覆冰事件,邻近2号对照风电机组和技改1号机组覆冰期间的风速和功率变化曲线如图4所示,1号机组风速与功率匹配性较好即覆冰期间机组正常发电,而邻近2号对照机组的风速与功率不匹配,出现覆冰停机情况。邻近2号对照风电机组因覆冰停机(图5),技改1号机组仍能正常运行(图6)。

我国现有的风电机组防冰案例主要采用以电加热为核心的主动防冰技术。传统电加热防冰技术在出厂前进行加热系统安装,但行业防冰现阶段面临的巨大挑战是如何开展在役机组的防冰技术改造。故提出在役机组高空长距离电热一体化灌注施工

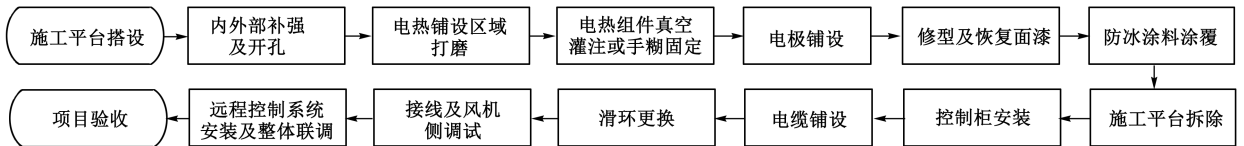


图3 复合防冰技术施工工艺流程

Fig.3 Process flow of composite anti-icing technology construction

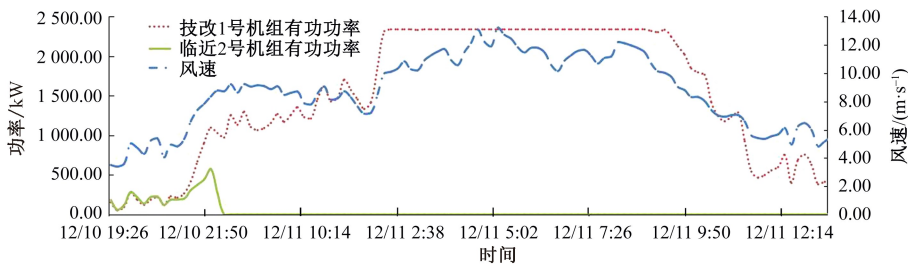


图4 覆冰期间技改机组与邻近对照机组风速和功率时序

Fig.4 Time series of wind speed and power of technical modification unit and adjacent control unit during icing



图5 邻近2号机组叶片覆冰严重

Fig.5 Blades seriously covered with ice near Unit 2

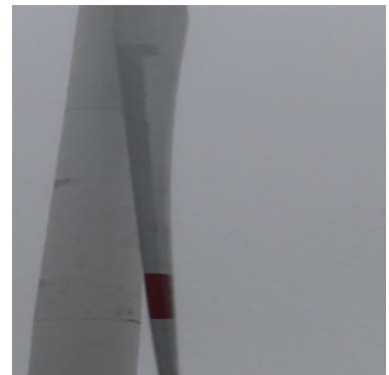


图6 技改1号机组叶片无覆冰

Fig.6 Blades not covered with ice near Unit 1

4 结 论

1) 叶片覆冰风险是多方面的,其中,落冰风险、风电机组设备使用寿命降低、电力供应风险是最严重风险。采用覆冰传感器和机组运行数据监测法相结合的综合覆冰监测方法,能有效评估覆冰机组的安全状态

2) 风电机组安全状态分级可用于覆冰区域防

覆冰系统的启停逻辑制定。气热防冰技术受限于叶片结构和严苛的覆冰环境条件,应用效果偏差。电热和涂层具有较好的发展前景,特别是随着风电机组大型化发展,电热和涂层复合式方案将成为防冰技术重要研究方向。

3) 电热防冰技术的防雷设计和施工工艺优化、防冰涂层的耐久性及防冰性提升等方面有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 胡琴,王欢,邱刚,等. 风力发电机叶片覆冰量化分析及其应用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21):5 607-5 616.
HU Qin, WANG Huan, QIU Gang, et al. Quantitative analysis of wind turbine blade icing and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21):5 607-5 616.
- [2] 梁健,舒立春,胡琴,等. 风力机叶片雨淞覆冰的三维数值模拟及试验研究[J].中国电机工程学报, 2017, 37(15):4 430-4 436.
LIANG Jian, SHU Lichun, HU Qin, et al. 3-D numerical simulations and experiments on glaze ice accretion of wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15):4 430-4 436.
- [3] 孔祥逸,张宝峰,王刚,等. 海上风力机叶片覆冰对其气动性能的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44(增 1):166-171.
KONG Xiangyi, ZHANG Baofeng, WANG Gang, et al. The effect of ice cover on aerodynamic performance of wind turbine blades[J]. Ship Engineering, 2022, 44(S1):166-171.
- [4] 李程. 浅谈风电机组覆冰的影响及应对措施[J]. 科技创新导报, 2019, 16(15):93-94.
- [5] 李建强. 风力发电机组叶片覆冰及防范策略[J]. 河南科技, 2021, 40(14):34-36.
LI Jianqiang. Blade icing and prevention strategy of wind turbine[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(14):34-36.
- [6] 莫秋云,王国强,郭荣滨,等. 风力发电机叶片覆冰状况及防冰除冰措施[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21):9 017-9 024.
MO Qiuyun, WANG Guoqiang, GUO Rongbin, et al. Wind turbine blade icing condition and anti-ice deicing measure[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21):9 017-9 024.
- [7] 孙凯,张新燕,常喜强,等. 基于图像识别的叶片结冰检测方法研究[J]. 四川电力技术, 2019, 42(2):1-5.
SUN Kai, ZHANG Xinyan, CHANG Xiqiang, et al. Research on blade icing detection method based on image recognition[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(2):1-5.
- [8] 冷冻冰. 基于图像处理的风力发电机叶片覆冰监测方法[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
LENG Dongbing. Method for monitoring icing of wind turbine blades based on image processing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [9] 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.
- [10] 刘庆超,郭鹏,张伟,等. 多参数模型风电机组叶片结冰监测与预警研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2):402-407.
LIU Qingchao, GUO Peng, ZHANG Wei, et al. Study on muti-parameter model of wind turbine blade icing detection and warning[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2):402-407.
- [11] 段亚穷. 基于数据驱动的风力发电机叶片覆冰检测方法研究[D]. 恩施:湖北民族大学, 2023.
DUAN Yaqiong. A data-driven method for detecting ice on wind turbine blades[D]. Enshi: Hubei Minzu University,

2023.

- [12] 张好雨. 基于 SCADA 数据的风机叶片覆冰故障检测与预测[D]. 北京:北京交通大学, 2022.
ZHANG Haoyu. Detection and prediction of wind turbine blade icing fault based on SCADA data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [13] 常阿飞, 刘宗奎, 王万印. 河南山区风机叶片覆冰特点及防覆冰技术选择[J]. 河南电力, 2023(增 1):36-38.
- [14] 冯晓欢. 风力发电机组叶片防冰除冰技术研究进展[J]. 电力系统装备, 2021(9):26-27.
FENG Xiaohuan. Research progress on anti-icing and deicing technology of wind turbine blades[J]. Electric Power System Equipment, 2021(9):26-27.
- [15] 赵永景. 风力发电机叶片几种防覆冰和除冰技术研究及展望[J]. 电力系统装备, 2020(20):132-133.
ZHAOYongjing. Research and prospect of several anti-icing and deicing technologies for wind turbine blades[J]. Electric Power System Equipment, 2020(20):132-133.
- [16] 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 Zhidong, YUAN Ling, WANG Xiaohu, et al. Effect of blades icing on safety of key structures of wind turbine[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5):184-188.
- [17] 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.
LI Baoju, QI Hongwei, FU Jiyue, et al. Analysis on the impact of extreme weather on new energy operation[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(1):10-13.
- [18] 李岩, 王绍龙, 冯放. 风力机结冰与防除冰技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2017:126-127.

作者简介: 李存义 (1990—),男,陕西宝鸡人,硕士,工程师,主要从事新能源技术方面的工作。E-mail: 12099959@ceic.com。

