

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222111

风力机叶片气热除冰效率影响因素分析

雷和林, 周 强, 吴江波, 周家兴, 夏侯智能, 蒋 辉, 姜文兵

(国家电网集团江西吉安新能源有限公司, 江西 吉安 330000)

摘要: 为分析风力机叶片气热除冰效率的影响因素, 基于气热法对风力机叶片除冰效果进行试验分析, 重点考虑铺层结构的导热效率和鼓风机速度(或频率)对除冰效率的影响。首先对叶片构造和铺层结构进行介绍, 通过对铺层结构厚度测量估算导热系数, 根据冬季叶片覆冰位置, 验证气热除冰时叶片导热分布合理性。之后通过改变鼓风机速度(或频率)进行现场叶片除冰试验。试验结果揭示了气热除冰系统在对风力机叶片除冰过程中出现的除冰不均衡现象的根本原因, 表明在保证通风管出风口温度稳定的前提下, 鼓风机速度(或频率)越高, 叶片表面除冰均衡性越好, 除冰效果越显著。此外, 在使用更大鼓风机频率的同时增强叶片内部环流, 合理设置叶片内部环流结构可有效提高除冰效率并减小除冰耗时。研究结果可为工程实践提供指导。

关键词: 风机叶片; 覆冰; 导热系数; 鼓风机频率

中图分类号: TK8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0195-05

1 引言

风能作为一种清洁可再生能源, 其开发和利用价值日增, 提高风力发电机发电量成为首要目标。风力发电机组需安装在风力资源较为丰富的地区, 在冬季尤其是湿度较大温度较低时风力机叶片极易结冰, 叶片结冰最先发生在翼型较为敏感的前缘位置, 覆冰运行会降低叶片升力系数, 增加叶片阻力系数, 严重覆冰会导致风力发电机组停运, 给风电场造成巨大经济损失。因此, 风力机叶片除冰技术备受关注, 现有方法主要包括表面镀膜、刷防冰涂层、气热、电热、加膨胀条、叶片抖动等^[1-2]。其中, 气热防除冰技术在安全性、有效性、可维持性和经济性等综合性能方面最优^[3-4]。但气热法除冰技术在实际运行中还存在一些技术问题, 如实际除冰过程反馈除冰效果不佳, 各叶片段除冰不均衡, 系统一直处于全功率运行状态, 不能根据实际覆冰情况降档和低挡运行, 系统功耗过大等。对此, 本文通过介绍气热法除冰结构, 分析风力机叶片铺层结构和铺层厚度, 估算叶片横截面各点导热系数, 分析叶片各段除冰不均匀的主要原因, 并选取一支叶片进行现场试验分析, 通过温度传感器和热成像仪记录叶片加热过程中内

外表面温度变化, 通过改变鼓风机速度, 得出气热法最佳加热时间及加热器鼓风机最佳频率, 并分析了鼓风机速度对叶片结构和除冰效率影响。研究结果可为实际工程提供指导。

2 气热法除冰原理

气热法除冰基本原理属于热能除冰, 通过热传递形式融冰。其主要组成部件包括鼓风机、加热器、导管及挡风板。鼓风机和加热器装配在叶根部, 通过导管连接。鼓风机将空气鼓入加热器, 加热器加热空气, 通过导管将热空气送入叶中部和叶尖部, 加设挡风板增大压强, 使得热空气在叶腔内强制环流, 右腔流入左腔, 叶片内外进行热量传递。叶片外部覆冰层吸热脱落达到除冰的目的。

3 风力机叶片铺层结构导热效率

3.1 风力机叶片的铺层结构

气热除冰主要依靠热量的互相传递, 通过叶片内外温度差, 传热融冰。传热效果与叶片材构成密不可分。叶片材料需满足重量轻, 强度高, 抗腐蚀性, 耐疲劳等要求。目前投入使用的风力机叶片根部和叶片中部绝大部分由玻璃钢结构和

收稿日期: 2022-10-12, 修回日期: 2023-03-03

作者简介: 雷和林(1970-), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源发电运行与控制技术, E-mail: leihelin_4966@163.com

通讯作者: 周强(1974-), 男, 工程师, 研究方向为新能源发电运行与控制技术, E-mail: zhouqiang_1974@163.com

“三明治”夹层复合材料构成(图 1)。隔板材料采用硬质泡沫,靠近叶片尾部则以玻璃钢材料为主,其横截面见图 2。

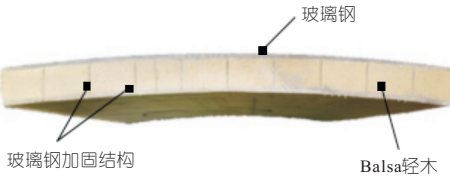


图 1 “三明治”复合材料

Fig. 1 “Sandwich” composite material

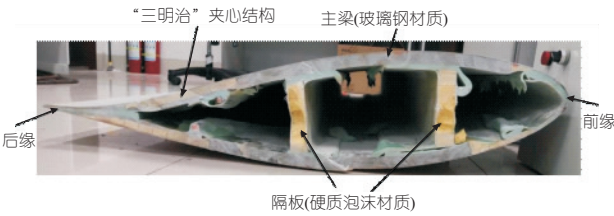


图 2 叶片尾部截面结构分布

Fig. 2 Blade tail cross-sectional structure distribution

3.2 铺层结构的导热系数测定

叶片铺层结构热传导能力决定了气热除冰效率。物质热传导能力又称为导热系数。叶片铺层结构分为玻璃钢和“三明治”复合材料,复合材料导热系数需要通过结构分布推算测定。

根据稳态传热计算导热系数,由傅里叶导热定律^[5]可知:

$$dQ = -\lambda \text{grad}T ds dt \quad (1)$$

式中, Q 为热流量; λ 为材料导热系数; T 为温度; s 为面积; t 为时间。

风力机叶片铺层结构趋近于平板结构,此时傅里叶方程^[6]可写为:

$$\begin{cases} \Delta Q = \lambda s \Delta t (T_1 - T_2) / h \\ \lambda = \frac{h}{s(T_1 - T_2)} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_1 、 T_2 分别为材料上、下表面温度; h 为材料平板厚度; s 为截面积; $\Delta Q/\Delta t$ 为被测物体传热速率。

先推算“三明治”夹心复合材料导热系数。设玻璃钢材料导热系数为 λ_1 , Balasa 轻木的导热系数为 λ_2 , 复合材料的导热系数为 λ 。复合材料结构尺寸见图 3, 玻璃钢结构厚度分别为 γ_1 、 γ_2 , Blasa 轻木厚度为 h , 截面积为 S 。设上层玻璃钢结构上下表面温度分别为 T_1 、 T_2 , 底层玻璃钢结

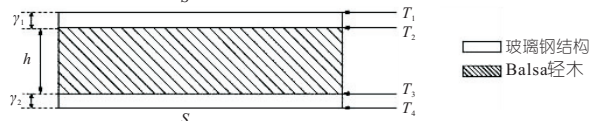


图 3 复合材料结构分布

Fig. 3 Composite structure distribution

构上下表面温度分别为 T_3 、 T_4 。

由传热学可知,在稳态传热过程中,温度变化连续,热传导连续,热流密度 $q = \Delta Q/(S\Delta t)$ 为常量,结合傅里叶方程得:

$$q = \lambda_1(T_4 - T_1)/(h + \gamma_1 + \gamma_2) \quad (3)$$

解得:

$$(\gamma_2 - \gamma_1)/\lambda_1 - h/\lambda_2 = (h + \gamma_1 + \gamma_2)/\lambda \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 (h + \gamma_1 + \gamma_2) / |\lambda_2(\gamma_2 - \gamma_1) - \lambda_1 h| \quad (5)$$

玻璃钢和 Balsa 轻木的热物性参数见表 1^[7]。分别选择 9 个位置 测量复合材料中玻璃钢和 Balsa 轻木厚度,根据式(5)估算其导热系数,估算结果见表 2。

表 1 叶片铺层结构热物性参数

Tab. 1 Thermophysical parameters of blade lay-up structure

热物性参数	玻璃钢	Balsa 轻木
密度/(kg/m ⁻³)	1 906	150
导热系数/(W·(m·℃) ⁻¹)	0.3	0.064
比容/(J·(kg·℃) ⁻¹)	1 100	1 000

表 2 叶片截面各点导热系数测定

Tab. 2 Determination of thermal conductivity at each point of blade cross-section

测点	厚度/mm			导热系数	测点	厚度/mm			导热系数
	上层玻璃钢	下层玻璃钢	Balsa 木			上层玻	下层	Balsa 木	
# 1	3	1.5	8	0.102 5	# 6	3	1.5	15	0.084 0
# 2	3	1.5	3	0.174 3	# 7	3	1.5	12	0.089 0
# 3	3	1.5	2	0.240 0	# 8	3	1.5	13	0.087 3
# 4	3	1.5	4	0.144 0	# 9	3	1.5	14	0.085 6
# 5	3	1.5	7	0.108 0					

注:导热系数单位为 W/(m·℃)。

截面选取距离叶尖部 11.5 m 处,叶片厚度分布从叶根到叶尖部厚度依比例减小,由表 2 截面各点导热系数分布来看,右腔 Balsa 木含量相较左腔体厚度小,左右腔“三明治”复合材料的玻璃钢上下层厚度相同,由表 1 可知玻璃钢导热性能远优于 Balsa 木导热性能,通过计算可知右腔复合材料导热系数高于左腔复合材料导热系数,所以选取右腔作为气热除冰鼓风入口效果更佳。9 个导热系数测算点中 # 3 点导热系数最高,同样 # 3 点亦处于迎风侧,由此可见叶片铺层结构分布对于气热除冰系统设计具有合理性。

4 2 MW 叶片传热试验平台设计

4.1 叶片传热系统搭建

根据冬季叶片覆冰情况可知,叶片覆冰最为严重集中在叶尖与迎风侧。气热除冰系统选择覆冰严重的右腔作为热传递侧,左腔为气流循环侧。

传热系统的鼓风机和加热器通过支架装设固定在叶根部,采用导风管将加热器出口热空气传导到右腔合适位置释放,以保证有足够风速能将热空气传导到叶尖位置。为防止热空气回流,在导管尖端加设环氧树脂挡板。叶片内部传热系统的布设示意图见图 4。

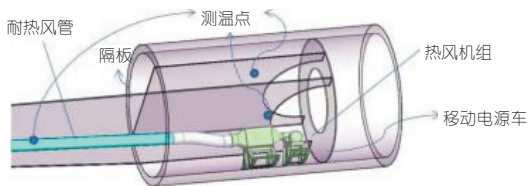


图 4 气热法除冰装设图

Fig. 4 Gas-thermal deicing equipment setup diagram

4.2 叶片温度传感器布设

为了能很好地监测在气热除冰过程中叶片各部分结构温度变化情况,在叶尖开始空腔位置(距离叶尖 2 m)装设温度传感器和风速传感器,外部从叶尖开始,每隔 5 m 进行布置。另外在加热器出口和管道出口装设温度传感器,对通风管出口温度进行闭环控制。传感器布置见图 5。

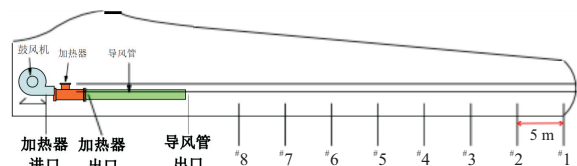


图 5 温度传感器装设图

Fig. 5 Temperature sensor mounting diagram

4.3 现场试验安装与调试

试验地点位于国电投江西电力有限公司叶片堆场,对 2 kW 风力机叶片进行气热除冰试验,选取 60 kW 的加热器、5.5 kW 的鼓风机及长度为 12 m 的导风管,用保温泡沫包裹防止热量流失。外表面温度传感器选取贴片式 PT100,内部温度

传感器选取插入式 PT100,风速仪用于观察风速变化,使用 HIOKI 数据采集仪采集内外表面温度数据。电源由移动融冰车提供。

5 鼓风机速度对除冰效率影响

根据试验布设进行现场试验,试验要求严格控制管道出口温度,使叶片内部温度维持在 75 °C 以下。保持加热器功率稳定,通过改变鼓风机频率,选择 50、60、70 Hz 三种不同频率鼓风机速度,对比分析三种不同频率的鼓风机速度下叶片各点温升变化和热传导能力。

试验分三日进行,分别对应鼓风机频率 50、60、70 Hz。加热时间分别持续 5 h,环境因素见表 3,图 6(a)~(c)为叶片内部各点温度变化波形图,图 7 为插入式内部传感器温度曲线(叶片内部温度),图 6(d)~(f)为贴片式外部传感器温度曲线(叶片外表面温度)。

表 3 环境因素

Tab. 3 Table of environmental factors

鼓风机 频率/Hz	环境温度 /°C	环境湿度 /rh	环境风速 /(m·s ⁻¹)
50	-2	83	4
60	-3	96	3
70	-2	95	5

由图 7 可知,在开始加热到 15 min 时内部温升最为明显,当加热至 40 min 后,内部温度基本保持稳定,各点恒定温度由各点离加热器距离决定,离加热器距离越近温度越高,温度由 # 8 点向 # 2 点呈梯度下降。对比三日数据,不难发现鼓风机频率越高各点稳定温度越高。选取叶片叶尖 # 2 点,叶根 # 8 点两组数据对比见图 8。图 8 显示,三种不同鼓风频率下,# 2、# 8 点温升曲线趋势

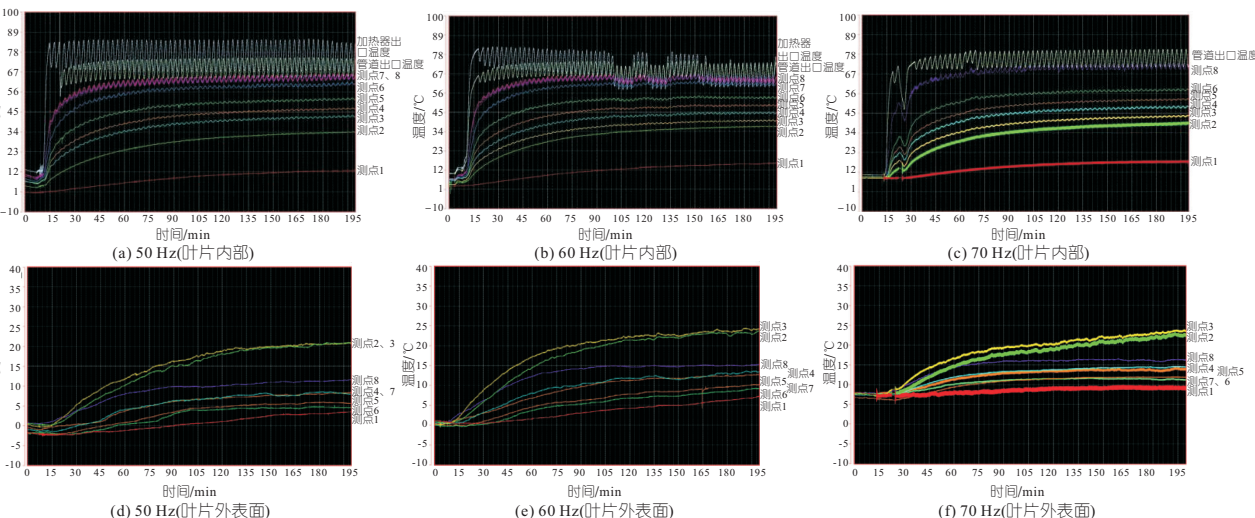


图 6 不同鼓风机运行频率下的叶片内外部各点温度变化波形图

Fig. 6 Waveform diagram of temperature change at various points inside the blade at different operating frequencies of the blower

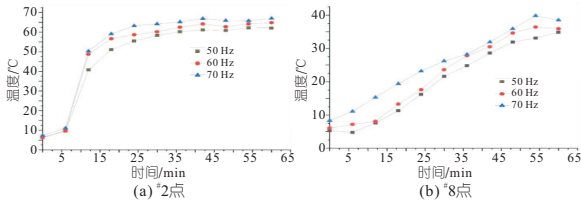


图 7 叶腔内部 # 2、# 8 点温度对比图

Fig. 7 Temperature comparison diagram of point 2 and point 8 inside the blade

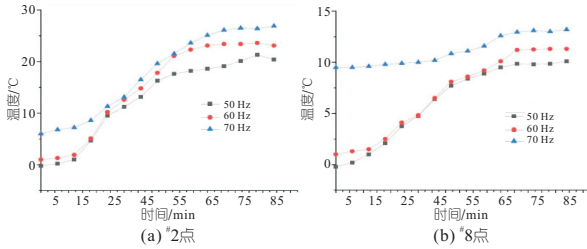


图 8 叶片外部 # 2、# 8 点温度变化对比图

Fig. 8 Comparison chart of temperature changes of point 2 and point 8 on the outside of the blade

相同,鼓风机频率越高该点温度曲线越高。

由图 6(d)~(f)可知,内表面温升曲线相较于外部温度温升较为平缓,前 90 min 温升斜率较大,90 min 后温升平稳,叶片表面稳定后的温升曲线较叶片内部曲线有所差异,叶片表面温升曲线与鼓风机距离无直接关联。# 2、# 3 点稳定温度最高,稳定后温度可达 20~27 °C。同样选取 # 2~# 8 点温度进行外部温度曲线对比,对比图见图 8。图 8 结果与图 7 相同点位的温度变化趋势一致,外部温度高低也随着鼓风机频率变化,鼓风机频率越高温升曲线越高。

鼓风机功率分别为 50、60、70 Hz 时,各点风速见表 4。由于风力机叶片结构,从叶根部到叶

表 4 各测温点对应风速

Tab. 4 Wind speed value corresponds to each temperature measuring port

鼓风机 功率/Hz	风速/(m·s ⁻¹)								
	# 8	# 7	# 6	# 5	# 4	# 3	# 2	# 1	管道
50	1.08	0.92	1.52	4.48	4.27	7.08	11.7	5.54	15.6
60	1.11	1.02	1.64	4.84	4.93	7.95	14.0	6.13	19.5
70	1.12	1.05	1.69	5.07	5.43	8.67	16.0	7.83	24.2

尖部呈锥形结构,通风口越窄,风速风压越大,热量堆积越多,所以外部温度传感器显示 # 2、# 3 点温升最显著。

除冰过程中,通过热成像仪器观察三日相同时间段,叶片表面热成像情况见图 9。由图 9 可知,鼓风机频率越高叶尖部热量积聚越多,热量传导效果越好。但明显可以发现,左腔温度传导性差,并未达到理想环流状态。

试验结果表明,鼓风机频率分别为 50、60、70 Hz 的情况下,叶片除冰效果差异明显。鼓风机频率越高,风力机叶片内部热气循环速度越快,叶片内部各点温度越高,热传导也越迅速,热量流失较小,外部传递温度融冰效果越好。单位时间内除冰效率 70 Hz 最高效,60 Hz 次之,50 Hz 除冰时间最缓慢。由图 9 可知,热气通过叶尖传导到左侧叶片效率并不高,叶片前缘会出现堵塞挤压挡板,隔板左侧热空气回流效果较差。

6 气热除冰系统问题分析与改进措施

本次试验气热除冰系统运行正常,从叶片铺层结构和鼓风机速率两个方面提出改进措施:①叶片铺层结构的导热效率决定了融冰速度和热量传导时间,在保证叶片最佳的疲劳强度和力学性能同时可以选取导热性能较好的材料或选取合理的铺层结构材料比例,可有效提高气热除冰技术除冰效率,减少除冰耗时,节省鼓风机和加热器功率损耗。②鼓风机频率提升虽有效提高热量传导,但自身功率消耗也随之增大。对此,可通过增强左右腔环流的方式来解决,通过增大叶尖处隔板空隙或在叶尖加设排风口,减小右腔风压。但如若环流速度过快会导致热量无法积聚,使得热量流失较大。所以根据叶片内腔体积合理选择鼓风机频率和环流速度,可有效提高气热除冰效率。③叶片结构分布右侧 Balsa 木分布比例相较于左侧较少,右侧热传导性较好,且右侧为迎风侧覆冰较为严重,选取右侧作为气热通道有利于气热除冰系统达到更好效果。④叶片外表面温度上升的

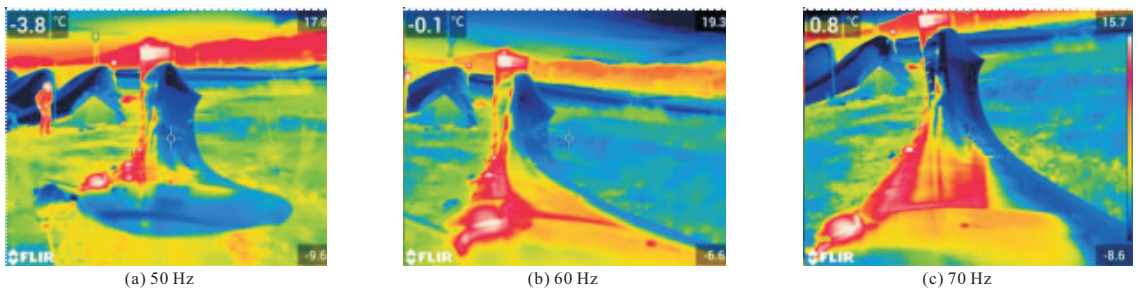


图 9 叶片表面热成像图

Fig. 9 Thermal imaging of the blade surface

速度比内部温度上升的速度要缓慢得多,随着时间的推移上升速度逐渐变慢,当温度上升 3.5 h 后叶片内外表面升温基本达到饱和,后续增长不再明显。这表明只要能够将温度控制在安全温度范围内,气热除冰方式,即使长时间加热,叶片升温也不会失控。⑤叶片表面各测量点的温度高低与该点距离加热器的距离两者无明显关系,而是与叶片内腹板与前缘之间的空腔截面积及叶片材料有强关联,空腔越大、风速越慢,热交换效率越低,反之热交换效率高,从内部传递到表面的速度快,另外靠近叶尖的叶片材料以玻璃钢为主,导热系数相对较大。⑥鼓风机选取高频率,加热器热量传导越好,叶片热传递效率越高。但选取同时需考虑内部风压,风压不宜过大和过小。所以选取鼓风机应考虑除冰效率、功率损耗和是否破坏叶片结构这三个要素。⑦鼓风机的风速和风压对叶片加热效率和叶片各部位温度均衡性影响较大,风速和风压的提升、叶片加热效率能够得到明显提升,叶片各部位升温均衡性也能够得到大大改善。⑧加热器采用接触器有级调功的方式进行温度控制方式会导致叶片传热不均匀、接触器频繁开合,启动关断电流冲击影响加热器使用寿命,另外有级调功方式,很难做到功率和温度匹配,固定型号及档位的加热器效率无法充分发挥出来,很难适应各种风机叶片变化复杂的风阻情况。

7 结论

阐述了风力机叶片除冰气热试验原理、方法

及过程,并对试验结果进行分析,用于评估气热抗冰加热系统对叶片除冰效率的影响。通过设置不同鼓风机和加热器运行参数,分析叶片各测量点温升结果,得知鼓风机的风速和风压对叶片各部位温度均衡性影响较大。而加热器的加热效能提升则与加热器的控制方式有很大关系,采用无极调功的加热器功率线性控制方式有利于保障加热系统的安全性和效率的提升。总的来讲,需要鼓风机的风速及风压和加热器的加热功率良好配合才能总体上提升风力机叶片的除冰效率。

参考文献:

- [1] 舒立春,谭进峰,胡琴,等. 网格尺寸对碳纤维束风力发电机叶片融冰效果的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 4008-4015.
- [2] 蒋兴良,周洪宇,何凯,等. 风机叶片运用超疏水涂层防覆冰的性能衰减[J]. 高压技术, 2019, 45(1): 167-172.
- [3] 杨博, 宁立伟,魏克湘,等. 基于汽热法风力机叶片除冰传热分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(4): 68-73.
- [4] 吕庆, 宁立伟,颜熹,等. 基于气热法对机叶片防冰除冰分析研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2017, 27(2): 28-32.
- [5] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [6] 王教方,岳贤军,宋淑珍,等. 多层复合材料导热系数测定方法的研究[J]. 山东建材学院学报, 2000(14): 258-260.

Analysis of Influencing Factors of Air Thermal Deicing Efficiency of Wind Turbine Blades

LEI He-lin, ZHOU Qiang, WU Jiang-bo, ZHOU Jia-xing,

XIAHOU Zhi-cong, JIANG Hui, JIANG Wen-bing

(Jiangxi Jian New Energy Co., LTD., State Power Investment Group, Jian 330000, China)

Abstract: The deicing effect of wind turbine blades was tested and analyzed based on the air-thermal method. The thermal conductivity efficiency of the paving structure and the influence of blower speed (or frequency) on the deicing efficiency were mainly considered. Firstly, the blade structure and layering structure were introduced, and the thermal conductivity was estimated by measuring the thickness of the layering structure. According to the ice-covered position of the blade in winter, the rationality of the thermal conductivity distribution of the blade during air-thermal deicing was verified. After that, the field blade deicing test was carried out by changing the speed (or frequency) of the blower. The test results reveal the root cause of the unbalanced deicing phenomenon in the process of wind turbine blade deicing by air thermal deicing system. It shows that the higher the speed (or frequency) of the blower is, the better the deicing equilibrium of the blade surface and the more significant the deicing effect are under the premise of ensuring the temperature stability of the outlet of the ventilation pipe. In addition, with the use of larger blower frequency, the internal circulation of the blade was enhanced, and the reasonable setting of the internal circulation structure of the blade can effectively improve the de-icing efficiency and reduce the de-icing consumption time.

Key words: wind turbine blade; icing; thermal conductivity; blower frequency