

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.012

复杂空气流场下垂直轴风力机差异化防冰策略研究

华园园, 罗日成, 唐意斯, 聂颖, 刘振宇, 周圣杰

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410004)

摘要: 叶片覆冰会降低风力机的发电效率, 采用电加热防冰技术可以维护风机的安全稳定运行。由于叶片在电加热防冰时叶表的温升情况存在差异, 会出现叶表不同部位温差过大、局部温度过高等问题。针对上述情况, 以H型垂直轴风机叶片为研究对象, 对风机静止状态下叶表流场分布及叶表散热情况进行分析。建立了基于流体—热力场的叶片电加热防冰二维耦合数值仿真模型, 提出按照迎、背风侧叶表平均风速的比值来分配两侧防冰功率的策略, 并对处于不同攻角下的风机叶片进行了仿真验证。结果表明, 当叶片一直处于 0° 或 180° 攻角下时, 叶表温度分布较均衡。其余攻角下, 叶表不同位置温度相差较大, 相比于不分区防冰, 差异化防冰策略在缩小叶表温差、降低叶表局部最高温度方面取得了较好的效果。

关键词: 垂直轴风力机; 防冰策略; 流热耦合; 差异化防冰

Research on Differential Anti-icing Strategy for Vertical Axis Wind Turbine Under Complex Air Flow Field

HUA Yuanyuan, LUO Richeng, TANG Yisi, NIE Ying, LIU Zhenyu, ZHOU Shengjie

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The ice-coating of the blade can reduce the power generation efficiency of the wind turbine, and the adoption of electric heating anti-icing technology can maintain the safe and stable operation of the wind turbine. Due to the difference in the temperature rise of the blade surface during the electric heating and anti-icing of the blade, such issues as excessive the temperature difference between different parts of the blade surface and high local temperature can occur. In view of above issues, the H-type vertical axis fan blade is taken as the research object, the flow field distribution and heat dissipation of the blade surface under the static state of the fan are analyzed. A two-dimensional coupling numerical simulation model of blade electric heating and anti-icing based on fluid-thermal field is set up. A strategy of distributing anti-icing power on both sides according to the ratio of the average wind speed of the blade surface on the windward and leeward sides is proposed, and the wind turbine blades at different angles of attack are simulated and verified. The results show that when the blade has always been at 0° or 180° angle of attack, the blade surface temperature distribution is more balanced. At the other angles of attack, compared with the non-partition anti-icing, the differential anti-icing strategy has achieved good results in reducing the temperature difference of the blade surface and reducing the local maximum temperature of the blade surface.

Key words: vertical axis wind turbine; anti-icing strategy; flow-heat coupling; differentiated anti-icing

0 引言

全球气候变化问题不断加剧,“双碳”目标的提出给我国清洁能源发展带来重大机遇,作为清洁能

源代表之一的风电,目前已经成为中国第3大电源,风电将成为我国能源结构转型的中流砥柱,有广阔的发展前景^[1-2]。2022年中国可再生能源发电量稳步增长,装机容量新增1.52亿千瓦,其中,风电装机

容量同比增长 11.2%^[3]。然而风力发电也存在亟待解决的问题: 风机覆冰。风机叶片覆冰会导致风机性能迅速下降, 风机和塔架疲劳增加, 对风电的可持续性造成较大影响, 因此风机叶片的防冰极为重要。

防冰方法大致分为主动防冰方法和被动防冰方法, 其中具有代表性的有: 热鼓风技术、电加热技术、主动停机和涂层防冰等^[4-6]。对比不同防除冰技术, 热鼓风技术方式耗能过高, 主动停机将造成风电场较大的经济损失, 涂层防冰目前尚未解决稳定性差和耐候性差等问题。综合考虑, 目前电加热技术是最稳定高效、经济性好的防冰方式。国内外均对风力机的电加热防除冰技术进行了研究, 并取得了一定进展。Pourbagian M、Habashi W^[7-9]对机翼的防除冰系统进行分区加热与控制策略研究, 将机翼前缘划分为 7 个单独控制的加热区域。舒立春等^[10]提出对风机使用等差分区加热融冰方法并进行了实验验证; 邱刚等^[11]建立了风机叶片防冰数值模型并验证了该模型的有效性。胡琴等^[12]对风机叶片加热循环控制除冰进行了数值仿真研究, 并建立了流体—热力场的叶片电加热循环除冰二维数值仿真。目前国内外对垂直轴风力机的研究相较水平轴风机较少, 但垂直轴风机因为便于安装、多向受风且受力稳定、投资成本低、结构简单等诸多特点^[13], 有很大的发展空间。

垂直轴风机和水平轴风机结构存在较大不同, 垂直轴风机来流攻角变化较大, 流场更为复杂^[14], 文中以 H 型垂直轴风机中的对称翼型 NACA0018 为研究对象, 建立了基于流体—热力场的风机叶片电加热防冰二维耦合数值仿真模型, 对于传统不分区防冰所面临的叶表温差过大、局部温度较高的问题, 主要对叶片静止状态下不同攻角时的叶片流场及散热情况进行分析, 提出将叶片分为迎风侧和背风侧进行差异化防冰的策略, 并仿真出差异化防冰前后处于不同来流攻角下的风机叶片的温度场分布, 最后进行防冰效果的验证分析。

1 数学模型

文中建立了垂直轴风力机叶片的电加热防冰数值模型, 以对称翼型 NACA0018 为例, 对处于不同攻角下的 NACA0018 叶片周围的空气流场及热量传递过程进行数值模拟。

1.1 空气流场分布

垂直轴风机叶片在气流中的受力情况见图 1。

如图 1 所示, 来流方向和风机叶片弦线形成的角即为攻角 α , α 随着风机的转动而不断发生变化, 因此垂直轴风机叶片周围流场复杂。

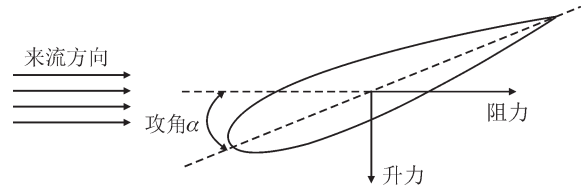


图 1 垂直轴风机叶片在气流中的受力情况图

Fig. 1 Force diagram of blade of vertical axis fan in airflow

为了更好地模拟叶片周围的空气流动分布, 选择在工程应用中最为广泛的雷诺时均数值模拟的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[15-16], 该模型使用壁函数来解析近壁流动, 本质上属于完全的湍流模型, 对上游流动累计效应、叶周的湍流耗散效应也进行了考虑。输送方程^[17]为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \nabla)k = \nabla[(\mu + \mu_T \sigma_k) \nabla k] + P_k - \beta^* \rho \omega k \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho(u \nabla)\omega = \nabla[(\mu + \mu_T \sigma_\omega) \nabla \omega] + P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2} \rho}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (2)$$

式(1)、(2)中: u 为来流速度场; μ 、 ρ 分别为空气的粘性系数、密度; k 为湍流动能; P_k 为 k 的有效生成率; ω 为比耗散率; P_ω 为 ω 的有效生成率; β 、 β^* 、 σ_k 、 σ_ω 、 $\sigma_{\omega 2}$ 为经验系数; F_1 为混合函数。

1.2 温度场分布

热传递的 3 种方式为热传导、热对流、热辐射。在对风机叶片进行电加热防冰的过程中, 加热层的电阻丝在通入电流后会产生焦耳热, 该热量主要有两个去向: ①叶片吸收热量温度升高; ②叶片与周围环境间的对流散热和辐射散热^[18]。

1.2.1 热传导

叶片内部属于固体域传热, 叶片和周围流场之间属于流体域传热。

1) 叶片周围气流属于流体域, 其温度场适用时变传热微分方程

$$\rho C_p \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho C_p v_f \nabla T_f + \nabla(-\lambda \nabla T_f) = 0 \quad (3)$$

式(3)中: C_p 、 λ 分别为空气的比热容和热导系数; T_f 为流体域的温度场; v_f 为流体域的速度场。

2) 叶片内部属于固体域, 其温度场适用时变传热微分方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla(-\lambda \nabla T_s) = q_{in} \quad (4)$$

式(4)中: T_s 为固体域的温度场; q_{in} 为固体域内

的净热源。

1.2.2 对流散热项与辐射散热项

无覆冰状态下,当外界环境过冷时,叶片表面需保持一定的温度 t 以防止结冰。当温度传感器检测到叶片表层的温度低于 t 时,会启动电加热片以使叶表温度升高,此时叶表与外界环境会产生温度差进行热量传递。叶片表面的热量传递过程见图2。

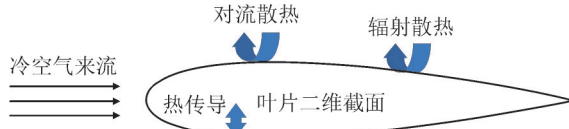


图2 叶表热量流动图

Fig. 2 Heat flow diagram of fan blade surface

环境温度记为 T_A ,叶片表面的温度记为 T_w ,叶片表面的对流散热项 Δq_f 、辐射散热项 Δq_r 分别为:

$$\Delta q_f = h_c(T_w - T_A)S_1 \quad (5)$$

$$\Delta q_r = \varepsilon_i \sigma [(T_w + 273.15)^4 - (T_A + 273.15)^4] S_1 \quad (6)$$

由于风机叶片处于湍流场中,对湍流边界层进行能量传递分析,其热传导系数可以表示为:

$$h_c = \rho c v_{rel} St \quad (7)$$

$$St = \frac{0.0574}{2Re^{0.2}} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho v_{rel} l}{\eta} \quad (9)$$

式(5)-(9)中: h_c 为叶片表面的对流换热系数,其值与局部空气流场有关; S_1 为叶片表面与周围环境的接触面积; ε_i 为叶片表面辐射率; σ 为斯特潘常数量,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ρ 、 c 为空气密度和比热容; St 、 Re 分别为斯坦顿数和雷诺数,都为无量纲数; v_{rel} 为相对风速, m/s; l 为叶片弦距。

2 风力机电加热防冰模型

文中主要对NACA0018翼型叶片进行了电加热防冰研究,建立了基于流体—热力场的叶片电加热防冰二维耦合数值仿真模型。

2.1 几何模型

风机叶片防冰结构见图3。模型中防冰结构选用的各材料的物理参数见表1。

风机叶片的防冰系统是多层结构,由外到内依次为蒙皮、导热层、加热层、隔热层。蒙皮的作用是保护叶片,且可快速传递热量到叶片表层,其材料需具有良好的导热性。导热层的作用是将电阻丝产生的热量快速传递到叶片表层,其材料需要高绝缘性和高导热性;加热层的作用是提供加热源,其材料需要有良好的热稳定性;隔热层的作用是阻碍

热量向内层传递,其材料的热导率要尽可能的小。

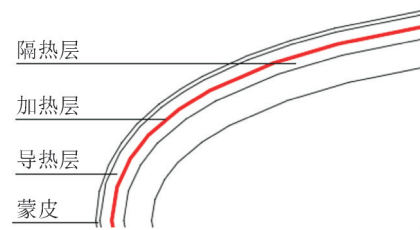


图3 叶片防冰结构图

Fig. 3 Anti-icing structure diagram of fan blades

表1 各材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of different materials

类别	材料	导热率/ [W·(m·°C) ⁻¹]	比热容/ [J·(kg·°C) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)
蒙皮	铝合金	164.00	947	2 820
导热层	硅胶垫	4.5.00	1 456	1 675
加热片	Cr20Ni80	60.30	442	8 402
隔热层	聚氨酯	0.02	1 384	31
叶片	玻璃纤维	0.40	1 267	1 734

2.2 叶片分区测温

李岩等^[19]研究了直叶片垂直轴风力机的结冰特性,并对NACA0018翼型叶片进行了风洞结冰试验,指出风机叶片沿展向的覆冰厚度几乎相同。因此文中选择沿垂直轴风机的叶片展向进行分区,以弦线为轴将叶片对称分为两个区域,其中直面来流的一侧记为A区,背对来流一侧记为B区。为方便观测叶片各部位的温升情况,沿轴线将叶片分为6个测温区,绘制各分区内叶片蒙皮层的平均温度分布曲线,来检验叶片的防冰情况见图4。

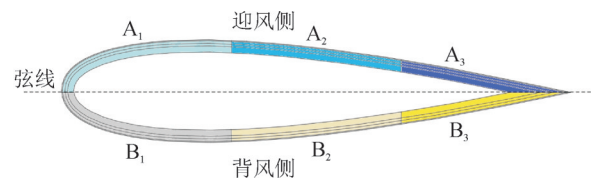


图4 叶片分区图

Fig. 4 Partition diagram of fan blade

2.3 参数设置

研究所用的风机叶片加热时叶片内部与外界环境被分隔开来,建模时将其近似认为是没有能量交换的,并对模型进行理想化处理:

1)叶片电加热层通入电流时,认为叶片内部是理想的、与外界无能量交换的封闭空间。

2)由于加热层用的电阻丝直径与叶片厚度相比差值过大,故将其处理为线性源。

3)空气中液态水质量分数设为 $0 \text{ g}/\text{m}^3$ 。

计算域分布见图5。叶片为二维模型,弦长 l 为 0.5 m ,面外厚度为 0.2 m ,采用NACA0018对称翼

型。环境参数: 来流风速为 5 m/s, 环境温度为 -5°C , 液态水质量分数为 0 g/m^3 , 压力出口为 0 MPa。计算域的上游边界、顶部和底部边界位于距翼型后缘 100 个弦长处, 下游出口边界位于距后缘 200 个弦长处。对单个叶片的热功率设为 30 W, 则其相应的热功率密度为 290 W/m^2 。

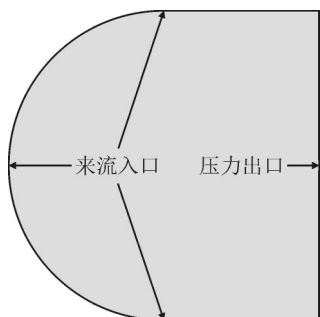


图5 计算域分布图

Fig. 5 Computational domain distribution map

3 仿真结果分析

3.1 空气流场分析

不计远场处气流的波动和散热项可能对叶片周围气流流动产生的影响, 运用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型仿真得到叶片周围的流场分布, 将风机旋转角速度记为 λ , 分别对静止状态 ($\lambda=0$) 和低转速状态 ($\lambda=0.2$) 下的风机叶片流场进行仿真分析。不同攻角下叶片周围的流场分布见图 6, 不同攻角下叶表风速分布见图 7。

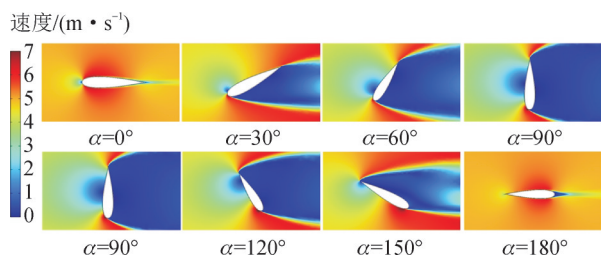


图6 不同攻角下叶片周围的流场分布 ($\lambda=0$)

Fig. 6 The flow field distribution around the fan blades at different angles of attack ($\lambda=0$)

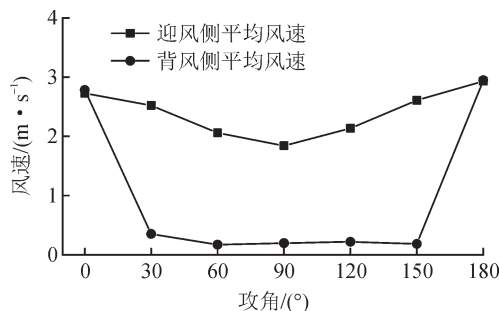


图7 不同攻角下叶表风速分布图 ($\lambda=0$)

Fig. 7 Wind speed distribution on the surface of fan blades at different angles of attack ($\lambda=0$)

3.1.1 静止状态

当叶片面临不同攻角时, 叶片附近的流场存在差异。观察流体在风机叶片周围的流动, 可以看到叶片迎风侧有一个流体局部速度为零的点, 即流体动力学中的驻点^[20]。当来流攻角从 0° 变化到 180° , 可以发现驻点的位置是随着攻角的增加而不断移动的, 沿着迎风侧的叶片前缘向迎风侧的叶片后缘移动。受驻点影响的叶周风速普遍较低, 由图 6 可知, 驻点的影响范围先增加后减小, 在攻角 90° 时影响范围达到最大。这与叶表平均风速图中叶表迎风侧的平均风速呈先降后升, 在 90° 攻角时达到最大值的结果一致。

3.1.2 低转速状态

不同攻角下叶片周围的流场分布见图 8。

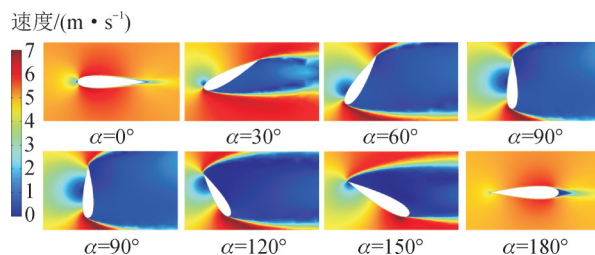


图8 不同攻角下叶片周围的流场分布 ($\lambda=0.2$)

Fig. 8 The flow field distribution around the fan blades at different angles of attack ($\lambda=0.2$)

运用 COMSOL 中的冻结转子求解器, 求得处于低转速情况下风机叶片周围的流场。与静止状态对比, 两种状态下的叶周流场具有相似性, 迎风侧的叶表风速均明显高于背风侧。但当风机处于低速旋转状态时, 随着叶片位置和攻角的不断变化, 叶片表面会交替出现高低风速, 流场情况更加错综复杂, 因此下文主要对处于静止状态下的叶片防冰流热耦合进行了仿真分析。

3.2 差异化防冰及温度场分析

3.2.1 差异化防冰策略

在进行叶片的电加热防冰时, 易出现局部温度较高, 叶表温差较大的情况, 而叶片局温高的部分更易出现破裂或者变形, 这会较大幅度的缩减风力发电机寿命。为改善这种情况, 提出了差异化防冰来改善叶表的温度分布。

风机叶片的覆冰可分为两种情况: 静止状态覆冰和旋转状态覆冰。当风机处于静止状态下时, 其叶片覆冰主要集中在迎风侧^[21]; 当风机处于旋转状态下时, 由于叶表风速呈周期性高低变化, 其叶片覆冰较为均匀的分布在叶片表面^[22]。

对于静止状态下的风机叶片, 从流场角度分析, 叶片处于静止状态下时, 由于叶表风速越高的

地方对流散热越强,叶表温度下降得越快,最终静止状态下的覆冰主要集中在迎风侧。因此进行防冰工作时,可以在保持总防冰功率不变的情况下,通过减小背风侧的防冰功率、增大迎风侧防冰功率的方法,对散热快的迎风侧增大防冰功率提高温升幅度,对散热慢的背风侧减小防冰功率降低温升幅度,最终缩小叶表温差。

对于低速旋转状态下的风机叶片,叶片表面的风速会呈现周期性的高低速交替,这也是出现均匀覆冰层的原因。对于旋转状态下的风机防冰也可以通过对叶片分区控制,依据叶表风速的周期性改变来同步改变加热功率密度,对叶表散热较快的一侧增加其防冰功率,对叶表散热较慢的一侧减少其防冰功率,最终改善叶表的整体温度分布情况。

综上所述,由于垂直轴风机叶片流场较为复杂,攻角不同时,空气来流在叶表不同部位的风速差异较大^[23],这会影响叶表的对流换热,而强制对流散热是决定所需防除冰功率大小最主要的因素^[24],因此提出将垂直轴风机叶片分为迎风侧和背风侧进行差异化防冰,对迎风侧和背风侧的防冰功率进行重新分配,在总防冰功率不变的情况下,优化防冰功率分配方案,改善叶表整体的防冰温度分布。

3.2.2 静止状态下叶片不分区防冰

在已经求解的流场解的基础上,对模型进行流场—热力场耦合,可得到叶片周围的温度场分布情况。

当空气来流在叶表产生的速度较大时,其对壁面的冲击作用会较强,叶表的热边界层因此变薄,而流体必须通过换热边界层进行导热传递,热边界层越薄叶表的热量散失得越快,最终达到热平衡时的温度就越低^[25]。

将叶片的热功率设为 30 W,热功率密度为 290 W/m²对风机叶片各分区施加相同的防冰功率密度时,叶片周围温度场分布情况见图 9、10。

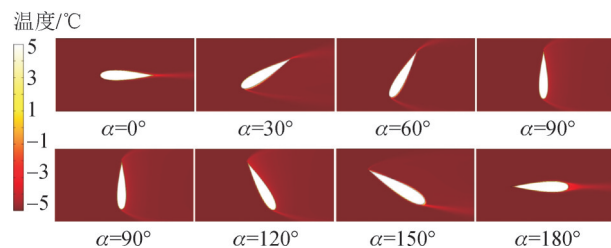


图9 不同攻角下叶片温度场分布图(不分区防冰)

Fig. 9 The temperature field distribution of fan blades at different angles of attack (without partition anti-icing)

由图 7 的叶表风速分布情况可知,在 0°、180°攻角下,叶表风速大小相差很小且呈对称分布;其余

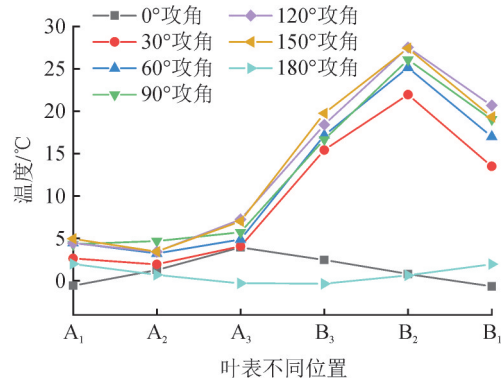


图10 不同攻角下叶表各分区温度图(不分区防冰)

Fig. 10 The temperature map of each partition on the surface of the fan blade at different angles of attack (without partition anti-icing)

攻角下迎风侧风速均高于背风侧。从图 9、10 可以看出:0°、180°攻角下,叶表的温度分布相反且迎风侧与背风侧温差不大;其余攻角下,迎风侧与背风侧散热情况差异较大,叶表的背风侧各分区温度明显高于迎风侧。

3.2.3 静止状态下叶片分区差异化防冰

分区差异化防冰是指按照迎、背风侧叶表平均风速的比值倒数来分配各自的防冰功率,对叶表风速较大的迎风侧增大其防冰功率密度,叶表风速较小的背风侧减小其防冰功率密度,最终在防冰的同时,改善叶表的温度分布情况。

用 v_{aave} 、 v_{bave} 分别为叶片迎、背风侧叶表平均风速; P_A 、 P_B 分别为迎风侧、背风侧施加的功率,按照风速比值分配功率见表 2。

表2 功率分配表

Table 2 Power distribution table

攻角/(°)	0	30	60	90	120	150	180
$v_{aave}/v_{bave} =$	1.00	1.51	2.56	2.60	2.95	3.65	1.00
P_A/P_B							

按照表 2 重新分配功率后,进行流场—热场的二维流热耦合仿真,结果见图 11、12。

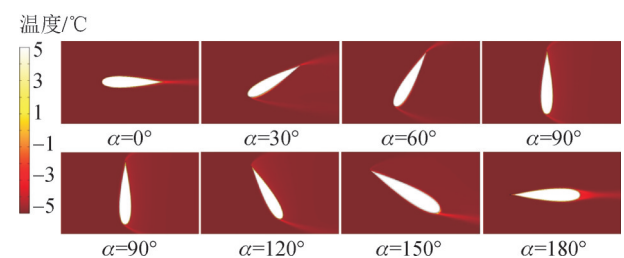


图11 不同攻角下叶片温度场分布图(分区防冰)

Fig. 11 The temperature map of each partition of the blade surface at different angles of attack (under the condition of partition anti-icing)

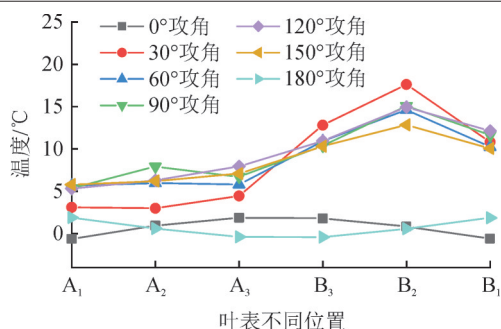


图12 不同攻角下叶表各分区温度图(分区防冰)

Fig. 12 The temperature map of each partition on the surface of the fan blade at different angles of attack (under the condition of partition anti-icing)

重新分配防冰功率后,从图11、12可以看出,与不分区防冰相比,0°攻角、180°攻角来流下,由于迎风侧和背风侧功率是按照1:1分配所以温度曲线与分区前相差不大;其余攻角下,各分区温升情况与不分区时相比,背风侧各分区温度下降,同时迎风侧各分区温度升高,叶片整体温差明显减小。

3.3 结果分析

检验防冰效果主要从两个方面进行:①叶表的最大温差值,温差越小则热量浪费越少;②叶表温度最高值,叶表如果温度过高会加速叶片的老化和磨损,增加后期的维修成本,缩减机器寿命,所以叶表温度最高值越低对叶片造成的损害越小。

分区前后不同攻角下叶表最大温差对比见图13,分区前后不同攻角下叶表最高温度对比见图14。从图13、14的温度分布曲线图可以看出:不分区防冰时,叶片整体的温差在攻角为150°时最高,为24.12℃,在攻角为180°时最低,为2.35℃;叶表温度在来流攻角为120°时最高,为27.54℃,在来流攻角为180°、0°时最小,为2.01℃。因此,不分区防冰时,让叶片停留在攻角180°或者0°时可以让叶表的最大温差和最高温度都达到较低的状态,在防冰的同时尽可能的保护叶片。

分区差异化防冰时,热平衡时叶片整体的最大温差在攻角为30°时达到最大,为14.63℃,在攻角为180°时达到最小,为2.29℃;叶片的最高温度在攻角30°时达到最高,为17.62℃,在攻角180°、0°时最低,为1.88℃。分区防冰时,让叶片停留在攻角180°或者0°时可以让叶表的最大温差和最高温度都达到较低的状态,叶表的整体温度分布较为均衡。

整体来看,在静止状态下,无论是否分区防冰,当叶片处于0°或180°攻角下时,均可以让防冰效果达到最佳;当叶片无法保持在0°或180°攻角位置时,分区防冰效果明显比不分区时得到了改善,叶

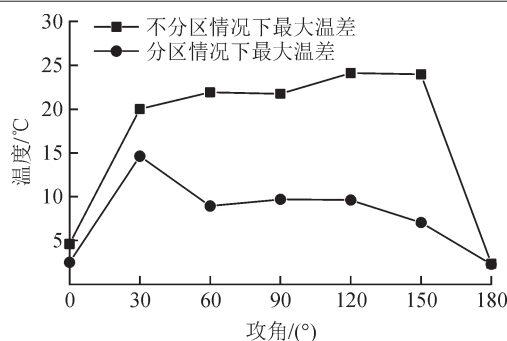


图13 分区前后不同攻角下叶表最大温差对比图

Fig. 13 Comparison of maximum temperature difference on blade surface at different angles of attack before and after partition

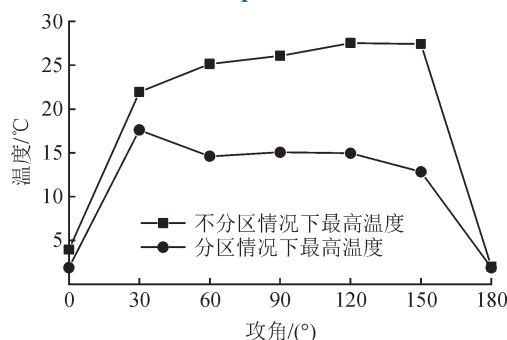


图14 分区前后不同攻角下叶表最高温度对比图

Fig. 14 Comparison of the highest temperature on the blade surface at different angles of attack before and after partition

表不同位置的温差也有较大幅度缩减。与不分区情况相比,分区差异化防冰在热平衡时的温度范围明显收紧,温差过大的区域也在分区后有明显改善。无论是叶表最大温差还是叶表最高温度都大幅降低。这与分区差异化防冰的目的相符,也验证了分区防冰的有效性。

4 结论

文中建立了基于流体—热力场的风机叶片电加热防冰二维耦合数值仿真模型,对于传统不分区防冰所面临的叶表温差过大、局部温度较高的问题,提出了将叶片分为迎风侧和背风侧进行差异化防冰的策略,由于强制对流散热是决定所需防除冰功率大小最主要的因素,因此提出了按照迎、背风侧叶表平均风速的比值来分配各自的防冰功率的方案,并仿真出了差异化防冰前后处于不同来流攻角下的风机叶片的温度场分布情况进行验证^[26-32]。得到了以下结论:

1)静止和低转速状态下,垂直轴风机叶片在不同来流攻角下,迎风侧平均风速明显高于背风侧。风机静止状态下,对风机叶片进行防冰加热达到热

平衡时,迎风侧温度明显低于背风侧,且存在叶表温差较大,局部温度较高问题。使用分区差异化防冰策略后,叶表温差和局部最高温度明显降低。

2)风机静止时,无论是否分区防冰,当叶片一直处于 0° 或 180° 攻角下时,叶片散热较均衡,整体温差在 2.51°C 以内,最高温度为不高于 1.89°C ,叶表温升与其他攻角下相比最均衡。当叶片无法保持在 0° 或 180° 攻角位置时,相较于不分区防冰,分区防冰在相同攻角下可以有效降低叶表最高温度和最大温差,有效保护叶片。

3)建立了垂直轴风机叶片防冰的物理数学模型,提出依据叶片迎、背风侧平均风速比值来分配防冰功率的差异化防冰策略。通过仿真验证了该方法可以明显改善防冰效果,为垂直轴风机叶片的防冰设计提供参考。

参考文献:

- [1] 谢小荣,苏开元,邱银锋,等. 海上风电—柔直送端系统频率控制研究现状及建议[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 136-147.
Xie Xiaorong, Su Kaiyuan, Qiu Yinfeng, et al. Frequency control of VSC-HVDC transmission system for offshore wind farms: research status and suggestions[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 136-147.
- [2] 李成良,杨超,倪爱清,等. 复合材料在大型风电叶片上的应用与发展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1274-1284.
Li Chengliang, Yang Chao, Ni Aiqing, et al. Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1274-1284.
- [3] 佚名. 中国风电行业市场前景及投资研究报告(上)[J]. 电器工业, 2022(1): 66-76.
Anon. Research report on the market prospect and investment of China's wind power industry(I) [J]. China Electrical Equipment Industry, 2022(1): 66-76.
- [4] 于洪明,于良峰,游慧鹏,等. 风电叶片防冰除冰技术的研究进展[J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2016, 30(1): 220-222.
Yu Hongming, Yu Liangfeng, You Huipeng, et al. Research progress of anti-icing and deicing technology for wind turbine blades[J]. Materials Review(Nano and New Materials Album), 2016, 30(1): 220-222.
- [5] 王昭力,刘小春,文飞,等. 2 MW 风机叶片气热法防除冰的传热试验研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(3): 356-361.
Wang Zhaoli, Liu Xiaochun, Wen Fei, et al. Heat transfer test research on air heating antiicing/deicing of 2 MW wind turbine blades[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(3): 356-361.
- [6] 刘明明,侯媛媛,陈唐建,等. 超疏水防/除冰材料的基础理论和制备技术研究进展[J]. 材料保护, 2023, 56(5): 40-62.
Liu Mingming, Hou Yuanyuan, Chen Tangjian, et al. Research progress of basic theory and preparation technology of superhydrophobic anti/de-icing materials[J]. Materials Protection, 2023, 56(5): 40-62.
- [7] Pourbagian M, Habashi W. CFD-based optimization of electro-thermal wing ice protection systems in de-icing mode[C]//51st Aiaa Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2013: 654.
- [8] Pourbagian M, Habashi W. Power and design optimization of electro-thermal anti-icing systems via FENSAP-ICE[C]//4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, 2012: 2677.
- [9] Pourbagian M, Habashi W G. Aero-thermal optimization of in-flight electro-thermal ice protection systems in transient de-icing mode[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015(54): 167-182.
- [10] 舒立春,戚家浩,胡琴,等. 风机叶片电加热防冰模型及分区防冰方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1448-1454.
Shu Lichun, Qi Jiahao, Hu Qin, et al. Anti-icing model and sectionalized anti-icing method by electrical heating for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1448-1454.
- [11] 邱刚,舒立春,胡琴,等. 风力发电机叶片防冰的数值计算模型及现场试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2198-2204.
Qiu Gang, Shu Lichun, Hu Qin, et al. Numerical anti-icing model and field experimental investigation of wind turbine blade[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2198-2204.
- [12] 舒立春,杨晨,胡琴,等. 风力发电机叶片加热循环控制除冰数值仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7149-7155.
Shu Lichun, Yang Chen, Hu Qin, et al. The numerical study of electrothermal de-icing cycle controlled method for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7149-7155.
- [13] Hand B, Cashman A. A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine: from onshore to offshore floating application[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020(38): 100646.
- [14] 蔡国伟,雷宇航,潘超. 不同叶片角度下风机防雷间距的模拟试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 1-8.
Cai Guowei, Lei Yuhang, Pan Chao. Simulation test of lightning protection spacing of wind turbine under different blade angles[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 1-8.
- [15] 和学豪,顾煜炯,余志文,等. 垂直轴风力机气动性能及控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 308-315.
He Xuehao, Gu Yujiong, Yu Zhiwen, et al. Aerodynamic performance and control strategy of vertical axis turbine[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2021, 42(8): 308-315.
- [16] 宋晨光,郑源,姜镐,等. 垂直轴风机CFD模拟的网格划分策略和湍流模型研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2080-2087.
Song Chenguang, Zheng Yuan, Jiang Gao, et al. Investigation of meshing strategy and turbulence model of CFD simulation of vertical axis wind turbine[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(8): 2080-2087.
- [17] 张汉文,罗日成,刘志勇. 垂直轴风力机在不同运动状态下的电加热融冰策略研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1495-1501.
Zhang Hanwen, Luo Richeng, Liu Zhiyong. Study on electric heating ice-melting strategy of vertical axis wind turbine under different motion states[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11): 1495-1501.

- (11): 1495-1501.
- [18] 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): 5607-5616.
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): 5607-5616.
- [19] Li Yan, Wang Shaolong, Liu Qindong, et al. Characteristics of ice accretions on blade of the straight-bladed vertical axis wind turbine rotating at low tip speed ratio[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018(145): 1-13.
- [20] 周东海, 孙晓晶. 叶片前缘偏转对H型垂直轴水轮机性能的影响[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 391-401.
Zhou Donghai, Sun Xiaojing. Effect of variable droop leading edge on hydrodynamic characteristics of H-type vertical axis hydraulic turbine[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(9): 391-401.
- [21] 孔祥逸, 张宝峰, 于东玮, 等. 风力机叶片表面覆冰影响因素分析[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 52-60.
Kong Xiangyi, Zhang Baofeng, Yu Dongwei, et al. Analysis of factors influencing ice cover on blade surface of wind turbines[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(1): 52-60.
- [22] 舒立春, 于 周, 李瀚涛, 等. 洁净与覆冰条件下风力发电机输出功率计算方法及现场试验验证[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3041-3051.
Shu Lichun, Yu Zhou, Li Hantao, et al. Calculation method of wind turbine output power under clean and icing conditions verified by field tests[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 3041-3051.
- [23] 张立军, 赵昕辉, 马东辰, 等. 垂直轴风力机叶片改进动态失速模型[J]. 中国机械工程, 2019, 30(6): 644-649.
Zhang Lijun, Zhao Xinhui, Ma Dongchen, et al. Improved dynamic stall model of vertical axis wind turbine blades[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(6): 644-649.
- [24] Mayer C, Ilincă A, Fortin G, et al. Wind tunnel study of electrothermal de-icing of wind turbine blades[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2007, 17(3): 182-188.
- [25] 李 伟, 王顺燕, 文 飞, 等. 风力机防除冰的复合材料叶片传热分析与试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(9): 76-82.
Li Wei, Wang Shunyan, Wen Fei, et al. Research on heat transfer analysis and test of wind turbine composite blade for anti-icing and deicing[J]. Composites Science and Engineering, 2022(9): 76-82.
- [26] 程启明, 孙英豪, 程尹曼, 等. 电网故障时基于MMC-PET接口风力发电系统的建模与控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 64-77.
Cheng Qiming, Sun Yinghao, Cheng Yinman, et al. Modeling and control of wind power generation system based on MMC-PET interface during grid faults[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 64-77.
- [27] 刘泽健, 杨 苹, 林 旭, 等. 基于海上风力发电机组中虚拟飞轮储能系统的频率支撑协调控制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 101-107.
Liu Zejian, Yang Ping, Lin Xu, et al. Coordination control strategy for frequency support based on virtual flywheel energy storage system in offshore wind turbines[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 101-107.
- [28] 程自然, 阮 琳, 杨 劼, 等. 基于定子全浸式及绕组内冷式的蒸发冷却永磁直驱风力发电机优化设计研究[J]. 大电机技术, 2024(1): 22-28.
Cheng Ziran, Ruan Lin, Yang Jie, et al. Optimization research of evaporative cooling permanent-magnet wind generators based on stator fully immersion and winding internal cooling[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2024(1): 22-28.
- [29] 袁天梦, 宁 亮, 巩彦江, 等. 考虑能量耗散的分布式风力发电并网电网容量扩充研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(12): 135-140.
Yuan Tianmeng, Ning Liang, Gong Yanjiang, et al. Research on capacity expansion of distributed wind power grid-connected grids considering energy dissipation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(12): 135-140.
- [30] 刘秋华, 方正聪, 郑亚先. 风力发电参与调频市场的机制优化及收益研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 69-76.
Liu Qiuhua, Fang Zhengcong, Zheng Yaxian. Mechanism optimization and revenue research on wind power generation participation in frequency regulation market[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 69-76.
- [31] 张元赫, 杨 明, 王 勃, 等. 极端大风天气事件对风力发电的影响[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(5): 95-103.
Zhang Yuanhe, Yang Ming, Wang Bo, et al. A study on the impacts of extreme gale events on wind power generation[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(5): 95-103.
- [32] 茅 婷, 程龙生, 张月义, 等. 基于RLMTS的小样本风力发电机齿轮箱故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 117-129.
Mao Ting, Cheng Longsheng, Zhang Yueyi, et al. Fault detection of small-sample wind turbine gearboxes based on RLMTS[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 117-129.
- 华园园(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: 1433476951@qq.com)。
- 罗日成(1969—), 男, 博士后, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电力设备的在线监测与故障诊断、阵列信号处理的研究(E-mail: luorich@126.com)。