第 50 卷 第 1 期：331-338 高电压技术 Vol.50, No.1: 331-338
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230648 2024 年 1 月 31 日第 50 卷 January

融冰风机叶片的接闪特性试验

蒋凌峰[1]，蒋正龙[2]，谢鹏康[2]，石　鑫[2]，黄肖琪[3]，宁　凯[1]
（1. 长沙理工大学电气与信息工程学院，长沙 410114；2. 国网湖南省电力公司防灾减灾中心电网防灾减灾全国重点实验室，长沙 410129；3. 国网湖南省电力有限公司水电分公司，长沙 410007）

摘　要：风力发电机常遭受雷击、覆冰等灾害，严重影响风机正常运行。在叶片上加装电热融冰装置可有效去除叶片覆冰，但对叶片雷击概率以及原有防雷配置（接闪器加引下线）可靠性的影响尚不清晰。为研究融冰装置对叶片接闪特性的影响机理，设计了 1：30 缩比可旋转的 3 MW 融冰风机叶片开展长间隙雷击放电试验。试验结果表明雷电先导在叶片迎风面发展时，融冰叶片相比普通叶片更易发生接闪器失效、雷击融冰装置及叶身交界处的现象，最严重情况下接闪器保护效率仅为 55%。搭建了融冰叶片电场分布模型，发现融冰装置改变了叶片表面原有电场分布，融冰装置与叶身交界处的电场畸变，更易产生电晕。同时叶片旋转使周围的正电荷以弧形分布，加速了融冰装置上方稳定先导的形成，使其更易遭受雷击，应当加强融冰装置处的雷击防护。所得结果为加强叶片雷击防护与融冰防护的深度结合提供了参考。

关键词：风机叶片；接闪特性；接闪器；融冰；雷击概率；电场分布

Experimental Study on Lightning Attachment Characteristics of the Ice-melting Wind Turbine Blades

JIANG Lingfeng[1], JIANG Zhenglong[2], XIE Pengkang[2], SHI Xin[2], HUANG Xiaoqi[3], NING Kai[1]
(1. School of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid Transmission and Distribution Equipment, Disaster Prevention and Reduction Center of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410129, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Hydropower Company, Changsha 410007, China)

1

Abstract：Wind turbines often suffer from disasters such as lightning strikes and ice coating, significantly impacting the normal operation of the turbines. The installation of electrothermal ice-melting devices on the blades can effectively remove ice from the blades, but the impact on the lightning strike probability on the blades and the reliability of the original lightning protection configuration (receptors and down conductors) is not yet clear. To investigate the mechanism of the effect of ice-melting devices on the lightning attachment characteristics of the blades, a 1:30 reduced-scale rotatable 3 MW ice-melting wind turbine blade was designed for long-gap lightning discharge experiments. The experimental results indicate that when the lightning leader develops on the windward side of the blade, the ice-melting blade is more prone to have the phenomena of lightning receptor failure, and lightning strike at the junction of the ice-melting device and the blade body. In the most severe case, the protection efficiency of the lightning receptor is only 55%. A model of the electric field distribution on the ice-melting blade was established, revealing that the ice-melting device alters the original electric field distribution on the blade surface, causing distortion of the electric field at the junction of the ice-melting device and the blade body, making it more prone to corona discharge. Simultaneously, the rotation of the blade causes the surrounding positive charges to distribute in an arc shape, accelerating the formation of stable leader above the ice-melting device, making it more susceptible to lightning strikes. Therefore, enhanced lightning protection measures are recommended for the ice-melting device location. The obtained results provide reference for the in-depth integration of lightning protection and ice-melting protection for turbine blades.

Key words：wind turbine blade; lightning attachment characteristics; lightning receptor; ice-melting; lightning strike probability; electrical field distribution

基金资助项目：国家自然科学基金面上项目(52177015)；湖南省研究生科研创新项目(CX20230843)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177015), Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province(CX20230843).

0 引言

“双碳”政策下，以风电、光伏为代表的新能源发电系统快速发展[1-2]。截至 2022 年上半年，中国的风力发电机装机容量已达 3.4 亿千瓦，占全口径发电设备容量的 14.0%。随着风电机组发电需求的不断扩大，风机高度和叶片长度也逐步递增[3]，愈发凸显的风机防雷问题得到了人们的广泛关注[4-5]。据统计，因雷击导致风机停运占总事故占比的 60%以上[6]。同时，风力发电机往往处于高海拔、寒冷潮湿的工况下运行，极易导致风机叶片发生覆冰现象。风机叶片覆冰会影响风机气动性能和机械载荷平衡，导致风机发电机出力降低甚至叶身结构损坏[7-8]。

目前风机叶片的雷电防护研究主要集中在如何提高接闪器的拦截效率并通过引下线泄流入地[9-11]，并对此进行大量雷击观测、仿真计算以及试验研究。Vestas[12]对 236 只叶片进行了为期 2 年的雷击观测，发现 88%的雷击发生在距叶尖 1 m 范围内。陈维江等[13]建立了输电线路上行先导起始和发展全过程动态仿真模型。山东大学师伟[14]在先导发展模型基础之上，提出了平均背景电场判据，并建立了多先导作用下先导连接过程仿真模型。模拟试验方面，IEC[15]给出了实验室条件下风机叶片雷电接闪试验的方法及等效性验证。基于此，AMuto[16]发现叶尖接闪器与叶片交界处场强畸变较大，叶身与接闪器相连部位极易遭受雷击。李庆民、郭子炘等[17]对缩比风机叶片进行长间隙放电模拟试验，发现雷电极性不同，风机叶片雷击接闪机制存在显著差异。

为解决叶片结冰问题，叶片除冰技术主要分为机械除冰、涂层除冰和电热除冰。机械除冰通过改变叶片转速产生离心力，但容易损坏叶片[18]。涂层除冰技术指在叶片表面涂有憎水材料，但运行一段时间后，其除冰效果将显著降低[19]。电热除冰指在叶片表面预埋加热导体，通过电阻加热融化结冰[20]。然而，叶片电热融冰装置设计之初，主要考虑的是融冰效率以及对叶片气动性能的影响。电热融冰装置的导电性使叶片更容易遭受雷击，叶片的着雷位置也会发生变化。

因此，为研究融冰装置对叶片接闪特性的影响和原有防雷装置可靠性，本文搭建了缩比风机雷击试验平台，开展长间隙放电试验，搭建了风机叶片电场仿真模型。得到了融冰叶片的雷击接闪特性，结合风机叶片电场分布模型发现了融冰叶片的防雷薄弱点且与试验结果相验证，从而推进风机融冰技术和防雷设计一体化。

1 雷击试验平台

试验在国网湖南省电力有限公司防灾减灾中心进行。平台由可旋转的 1:30 风机叶片及其控制系统、高压电极(不同位置)、冲击电压发生器、单反摄像机等组成，如图 1 所示。

1.1 融冰风机叶片

本文选用的融冰叶片服役于湖南省江口风电场。融冰装置由铜金属延展一体成型，覆盖区域为叶根向叶尖方向，从 34~74 m 共 40 m 长度区域，弦向宽度 650 mm~350 mm，设计加热面积约 40 m^2。加热电源额定电压 690 V，额定电流 63 A，最大电流 75 A。电热融冰有效区域包括叶尖、前缘重点区域以及叶身、叶根次要融冰区域。融冰风机叶片结构如图 2 所示。

基于陆地典型 3 MW 风机设计了 1:30 的缩比风机叶片，叶片长度 1.8 m，金属底座及塔筒高度 4 m，叶身材料为玻璃纤维增强树脂(glass fiber reinforced plastic，GFRP)。风机叶片在叶尖、叶身处共安装了 3 个圆盘接闪器，接闪器与引下线相连经塔筒接地。

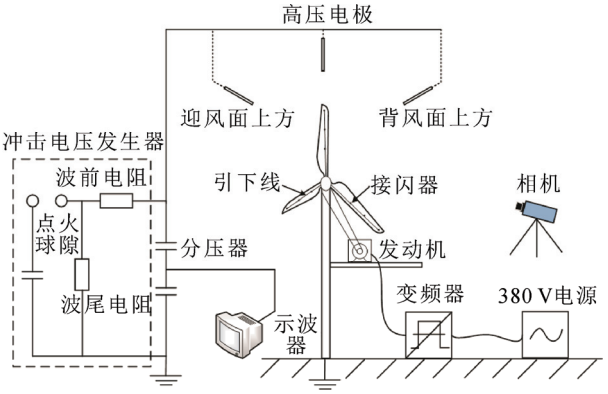


图 1 雷击试验平台

Fig.1 Lightning test platform

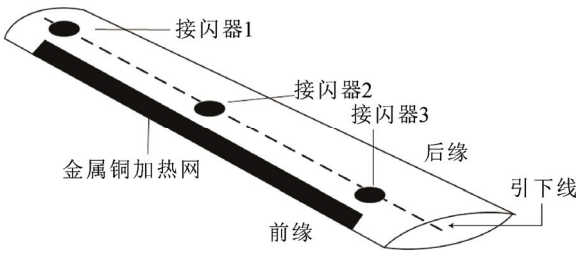


图 2 融冰风机叶片结构

Fig.2 Structure of ice-melting wind turbine blade

为模拟叶片加装的电热融冰装置，在叶片前缘覆盖一层铜箔，铜箔通过引下线接地。变频电机位于叶片后部并包裹绝缘胶，设有避雷针与金属塔筒相连接地，如图 3 所示。

1.2 试验设置

1.2.1 高压电极与波形

为了本文的冲击放电试验方法与真实雷击之间具有等效性，按照 IEC 推荐的试验方法[21]进行平台搭建。为模拟雷击期间的下行先导，使用棒状高压电极，空气间隙设置为 3 m；脉冲电压发生器最大输出电压为 3200 kV，采用波形为 250/2500 μs 的负极性过电压[22-23]，以模拟先导连接期间风机叶片附近的电场;为模拟大多数情况下的雷电发展路径，对不同电极位置、不同叶片角度和不同转速下的风力涡轮机叶片进行了雷电闪络试验。

1.2.2 风机模型转速设置

陆地典型 3 MW 风机的叶片长度为 50 m，额定转速为 8.1~19 r/min，叶尖线速度范围为 42.4~99.4 m/s。由叶尖线速度和风机转速之间的转换关系，如式(1)，可得缩比风机的转速范围 225~527.6 r/min。考虑到风机实际运行中转速为额定速度的一半，将缩比风机等效转速设定为 100 r/min、300 r/min。

$$\begin{cases} v=\dfrac{2\pi R\omega}{60} \\ \omega=\dfrac{60v}{2\pi R} \end{cases} \tag{1}$$

式中：v 为叶尖线速度，m/s；R 为叶片长度，m；ω 为叶片转速，r/min。

1.3 试验方法

本文研究加装电热金属网后风机叶片的接闪特性变化，忽略电热模块的控制电路。分别对标准防雷配置下(接闪器加引下线)的缩比风机叶片和融冰风机叶片进行长间隙雷击试验，观察接闪器的雷击拦截效率以及雷击点分布情况，研究电热融冰装置对风机防雷系统的影响。

2 风机叶片接闪特性试验结果

分别对融冰和普通叶片在静止(不同角度)和旋转(不同转速)状态下进行长间隙雷击放电试验。

2.1 静止风机接闪试验结果

叶片静止时选取与竖直方向呈 0°、30°和 60° 3 种不同角度情况(90°时认为与 30°对称)进行长间隙雷击放电试验，如图 4 所示。

高压电极位置分别选取风机正上方、迎风面上方、背风面上方 3 种情况，间隙长度为 3 m，以模拟风机叶片不同方位下的雷击。每种电极角度各进行 10 次放电试验，试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知：（1）当融冰叶片静止、高压电极在叶片正上方时，第 1 接闪器均能够可靠接闪。（2）先导在融冰叶片迎风面发展时，第 1 接闪器的拦截效率降低，随着叶片角度增大，融冰装置被雷击风险显著提升。（3）由于避雷针的存在，当先导在背



图 3 缩比风机叶片

Fig.3 Scaled-down wind turbine blades

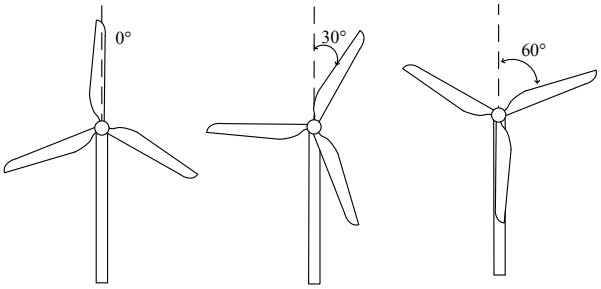


图 4 风机叶片经典角度

Fig.4 Classic angle of blade

表 1 融冰风机叶片接闪特性(静止)

Table 1 Lightning Attachment manner of rest blades

电极位置	叶片角度	接闪概率/%				
		第 1 接闪器	第 2 接闪器	第 3 接闪器	避雷针	融冰装置
正上方	0°	100	-	-	-	--
	30°	100	-	-	-	-
	60°	100	-	-	-	-
迎风面上方	0°	100	-	-	-	-
	30°	70	10	-	-	20
	60°	10	10	20	-	60
背风面上方	0°	-	-	-	100	-
	30°	-	-	-	100	-
	60°	-	-	-	100	-

风面发展时，所有雷击都击中避雷针。接闪情况如图 5 所示。

在相同试验条件下对普通风机进行不同角度的雷击接闪试验。(1) 当高压电极在叶片正上方时，所有雷电均被第 1 接闪器拦截，如图 6 所示。(2) 当高压电极在叶片迎风面时，随着叶片角度的增大，雷击接闪点有从叶尖转移到叶根的趋势，但都被接闪器成功接闪，没有发现雷击叶身的情况。(3) 背风面的雷击均被避雷针接闪。

重复试验时发现了叶片多上行先导的竞争现象，如图 7 所示。图 7 中可以看到第 1 接闪器产生了多条上行先导，但下行先导最终与第 3 接闪器连接。该现象可以说明当雷电下行先导不断靠近叶片时，叶片的 3 个接闪器均有产生上行先导的趋势且接闪存在竞争机制。

2.2 旋转风机接闪试验结果

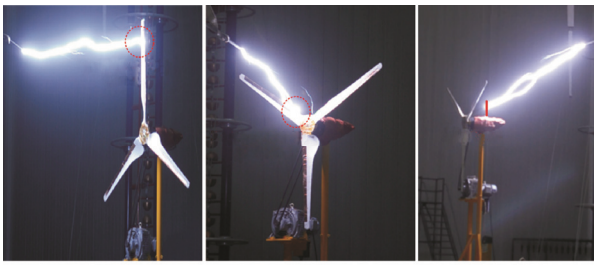
由式(1)以及考虑到实际运行过程中风机转速大多数为额定峰值的一半，因此设定缩比风机转速分别为 100 r/min 和 300 r/min。每种电极位置各进行 40 次放电试验并进行数据记录，旋转风机接闪特性如表 2 所示。背风面时均被避雷针接闪，不特别指出。

由表 2 可知：(1) 当电极位置在风机正上方时，融冰叶片不同转速下均被第 1 接闪器成功接闪，接闪成功率为 100%；(2) 电极位置在融冰叶片迎风面上方时，第 1 接闪器拦截效率降低：由 100 r/min 时的 60%到 300 r/min 时的 50%。可见当融冰叶片转速升高时，接闪器拦截效率降低，第 2 和第 3 接闪器失效，融冰装置及与叶身交界处成为新的雷击重灾区。

相同条件下对普通旋转风机进行长间隙雷击试验。(1) 与融冰叶片一致，第一接闪器对正上方的雷电均可接闪。(2) 当电极位于叶片迎风面上方时，第 1 接闪器在 100 r/min 时的拦截率为 60%，在 300 r/min 时的拦截率为 45%。大多数闪电被 3 号接闪器拦截，其余闪电击中叶轮毂。(3) 当转速增加时，闪电附着点有从顶端转移到根部的趋势，但叶片本体不会被闪电击中。由此可见，接闪器和引下线的防雷配置可以有效保护普通叶片。

2.3 先导竞争现象

由于放电过程具有随机性，融冰叶片 30°状态角下发生了不同的接闪情况，如图 8 所示。图 8(a) 中雷电由第 1 接闪器成功接闪，图 8(b)中第 1 接闪器产生了上行先导但雷电击中了融冰装置并留下了针孔状放电通道如图 8(c)。由于融冰装置具有导电性，为了防止雷电击穿电源，设备不工作时接地，因此可看作一个大型的“前缘接闪器”。当雷电下行先导不断靠近风机叶片时，叶片接闪器与融冰装置



(a) (b) (c)

图 5 融冰叶片迎风面的雷电闪络

Fig.5 Lightning strike of rest ice melting blade

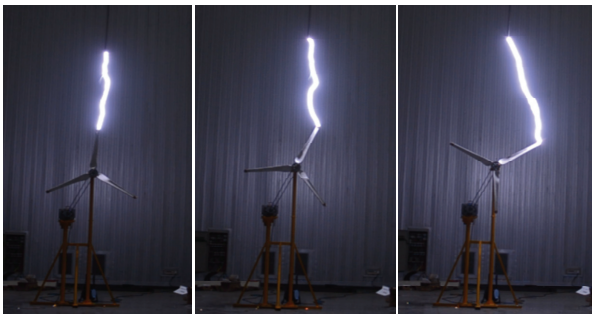


图 6 静止普通风机接闪

Fig. 6 The receptor 1 intercepts lightning



图 7 上行先导的竞争现象

Fig.7 Leading competition phenomenon

表 2 融冰风机叶片接闪特性（旋转）

Table 2 Lightning attachment manner of rotating blades

电极位置	转速 r/min	接闪概率/%				
		第 1 接闪器	第 2 接闪器	第 3 接闪器	融冰装置	融冰装置与叶身交界处
正上方	100	100	-	-	-	-
	300	100	-	-	-	-
迎风面上方	100	60	-	-	25	15
	300	50	-	-	30	20

邻域的电场强度不断增大，若超过起晕场强则会产生局部电晕并逐步发展成上行先导。两者上行先导的发展过程，对最终雷电的接闪结果具有关键作用，即表现出图 7 中接闪器与融冰装置的上行先导之间的竞争机制。

3 分析和讨论

3.1 融冰叶片电场分布模型

本文设计的放电试验不能直接测量融冰叶片各部分的电场强度。为了分析融冰装置对叶片邻域空间电场强度的影响，建立了风机叶片的电场强度分布模型。电场分布模型旨在建立与融冰装置加入后叶片表面电场分布变化情况的映射关系，即反应叶片表面各部位电场强度相对大小的变化情况。不同雷云的带电量和高度不同，所产生的背景电场不同，因此对叶片表面电场绝对值并不过分关注。单只叶片模型如图 9 所示，叶片长度为 70 m，电热系统覆盖区域为叶根向叶尖方向共 40 m，弦向宽度 650 mm~350 mm。叶身、融冰装置以及接闪器材料分别为玻璃纤维增强树脂、铜和不锈钢。

叶片外部设置一个圆柱体以模拟空气域，叶片上方设置雷云，塔基和圆柱体底部设置接地。普通叶片和融冰叶片的场强分布如图 10 所示，两者电场积聚位置发生了显著变化。

叶片的接闪过程可描述为：随着下行先导不断靠近，叶片接闪器周围逐渐产生强烈电离并产生电晕。随着背景电场不断增大，当电离区电荷量达到 1 μC 时[24]，不稳定先导起始、发展，其过程可由式(2)表示。

$$\begin{cases} \exp\left(\int_0^L (\partial(E)-\eta(E))\mathrm{d}x\right) > N_c \\ U_{lt(i)} = x_{l(i)}E_\infty + x_0 E_\infty \ln\left(\dfrac{E_s}{E_\infty} - \dfrac{E_s - E_\infty}{E_\infty}\mathrm{e}^{-x_{l(i)}/x_0}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中：L 为碰撞区域边界；x 为电荷区头部与接闪器之间的距离；N_c 为产生电晕所需要的电荷量；$U_{l(i)}$、$x_{l(i)}$、x_0 分为不稳定先导头部电势、长度以及长度系数；E_∞和 E_s 分别为上行先导的电场强度和流注区电场强度。

电晕的产生离不开邻域电场强度的畸变，流注区电场强度的大小也决定了不稳定先导能否向稳定先导转变。因此最终的接闪位置取决于该区域电晕起始时间以及先导的发展情况共同决定。结合图 10，发现：

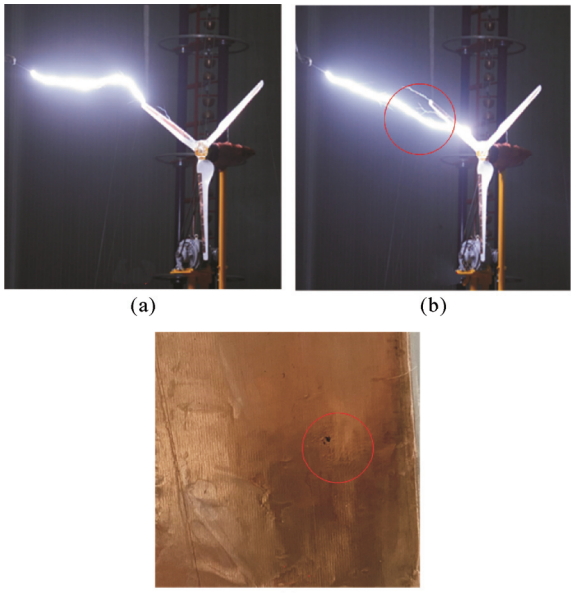


图 8 不同接闪结果

Fig.8 Different lightning attachment results

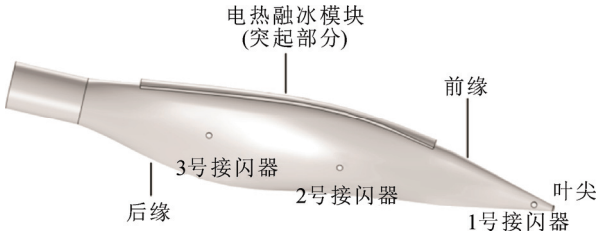
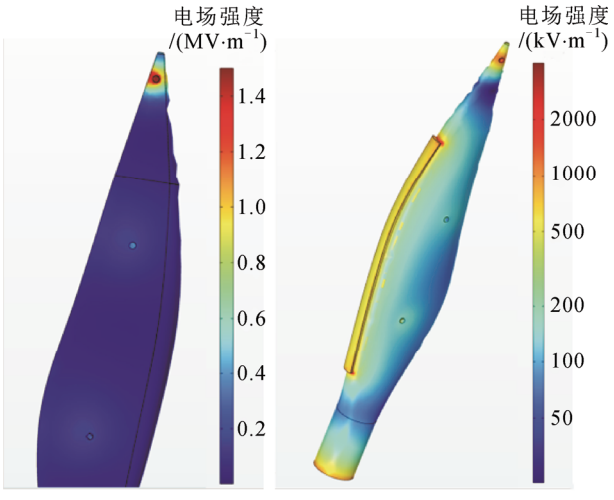


图 9 加装碳纤维布的风机叶片模型

Fig.9 Ice-melting blade model



(a) 叶片邻域电场强度 (b) 融冰叶邻域电电场强度

图 10 叶片电场强度分布

Fig.10 Distribution of electric field in blades

1）普通叶片的雷击概率

风电场运维数据显示 90%的雷击位于叶尖 5 m 范围内[23]。图 10(a)中普通叶片在雷云背景下，接闪

器附近的电场强度为 1.7×10⁶ V/m，高于叶身若个数量级。叶片不同角度下各接闪器邻域的电场强度如图 11 所示，当叶片角度为 0°时，第 1 接闪器的电场强度最大，第 2、第 3 接闪器次之。因此第 1 接闪器随着背景电场的不断增大先于其余潜在接闪点产生电晕，即第 1 接闪器被雷击的概率最大，这与风电场的统计数据一致。随着叶片角度增大，第 2、3 接闪器失去了第 1 接闪器的“屏蔽”，邻域的场强增大。但由于第 1 接闪器位于叶尖位置(尖端)，其电场强度略大于其他接闪器，但仍有接闪失效的概率。

在普通叶片的放电试验中，当叶片角度为 0°时，同样发现所有雷电均被第 1 接闪器接闪，随着叶片角度增大，接闪点有从叶尖转移向叶根的趋势，与仿真结果一致。结合风机叶片雷击接闪试验-电场分布模型-风电场运维统计结果，验证了雷击接闪试验和电场分布模型的可靠性。

2）由图 10(b)，融冰装置改变了叶片表面的电场分布，电场畸变主要集中在接闪器和融冰装置上，尤其是电热融冰装置与叶片本体的连接处。融冰叶片不同角度下电场分布如图 12 所示。当叶片角度较小时，第 1 接闪器对下方的融冰装置具有屏蔽作用，因此第 1 接闪器的电场强度比融冰装置大 44%，此时第 1 接闪器接闪概率最大。随着叶片角度不断增大，融冰装置的电场强度逐渐大于 1 号接闪器，当叶片呈 60°时融冰装置处的电场强度较 1 号接闪器增大 32%。定义图 12 中红色区域为融冰风机危险角度区域范围(30°~60°)，融冰装置有较大雷击风险。

从仿真结果与缩比风机试验结果之间的映射关系可知，融冰装置的加入使得叶片表面的电场分布发生变化，融冰装置有较大雷击风险。随着叶片角度的增大，电场畸变位置从第 1 接闪器转移到融冰装置，融冰装置处更易产生电晕。这是因为融冰装置为保证一定的融冰功率选用导热率较好的铜为材质，而接闪器普遍使用不锈钢。铜的导电性明显优于不锈钢，雷电总是会朝着电阻率小的路径泄流，因此增大了融冰装置的雷击风险。

3.2 融冰叶片接闪失效机制

上节可知融冰装置在雷云背景下易产生电晕，但最终接闪结果与电晕能否发展成稳定的上行先导息息相关。试验结果表明，融冰叶片静止和旋转时都发生了接闪器失效现象。特别是叶片转速从 100 r/min 增加到 300 r/min 时，融冰叶片接闪器的拦截效率将显著降低。文献[25]也指出风机叶片旋转较静止时会增大雷击概率，主要是旋转时对叶片附近的空间电荷分布产生了影响。

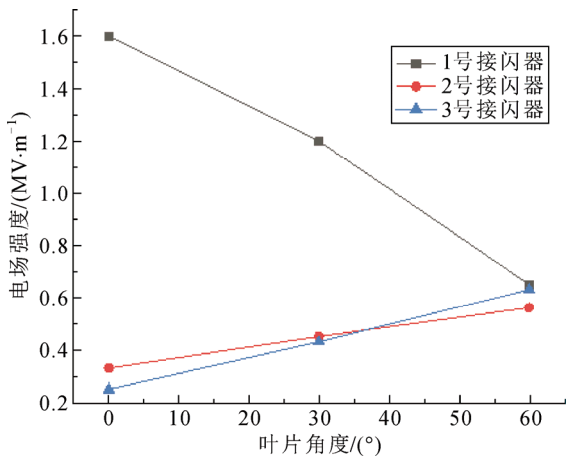


图 11 普通叶片接闪器电场强度

Fig.11 Electric field strength of ordinary blade

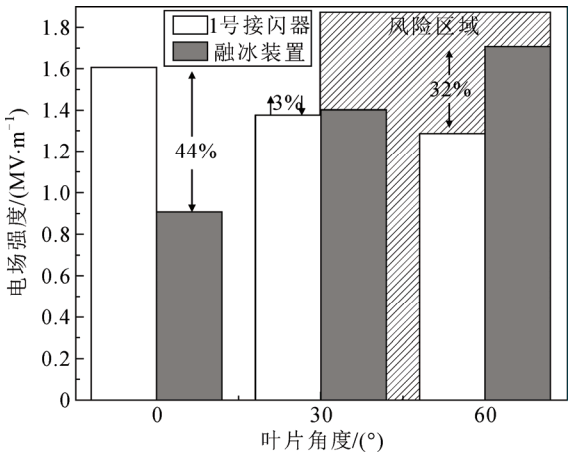


图 12 融冰叶片各部分场强

Fig.12 Field Strength of ice-melting blade

在负极性雷云产生的背景电场 E_{gap} 下，随着下行先导的不断发展，融冰装置附近的电场激增并导致电晕起始。同时叶片旋转时叶尖线速度最高可达 100 m/s，与正离子在电场中的迁移速度在同一数量级，这会对融冰装置邻域带电粒子的分布造成影响[26]，主要过程可描述为：融冰装置由于电场畸变产生电晕，而负电荷移动速率较快，在电场的作用下被融冰装置吸收；随着叶片旋转，电晕区的正离子继续向电场迁移，并最终均匀分布在弧形通道上。这部分正离子激发的电场会与背景电场叠加，如式(3)，这有利于上行先导的发展。

$$E_1 = E_{gap} + E_{in} \tag{3}$$

如图 13 所示。弧形通道中的正电荷会产生自

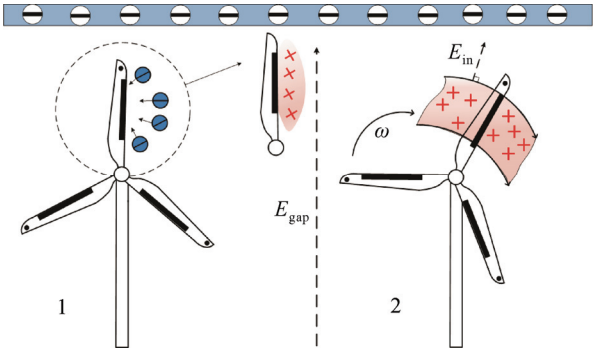


图 13　融冰装置对电荷分布的影响

Fig.13　Electric field of rotating melting ice blades

电场 E_{in}，根据矢量叠加原理，E_{in} 垂直于弧形通道的切线方向。即自电场 E_{in} 和雷云背景电场 E_{gap} 的相互作用增强了融冰装置邻域的电场强度 E_1。结合对旋转融冰叶片邻域离子的运动分析，我们认为融冰装置可能会影响叶片旋转时附近的空间电荷分布，进而影响了电晕区向稳定先导发展的过程。

综上，融冰装置对叶片接闪特性的影响主要为两方面：1）融冰装置的加入使得风机叶片表面电场发生畸变，使其更易产生电晕。2）融冰装置在背景电场的作用下会吸收空气中的负电荷，同时叶片旋转会影响其邻域的正离子分布，进一步加剧电场，促使电晕发展成稳定的上行先导。

结合测试结果，现有的标准防雷配置（接闪器加引下线）不足以满足融冰叶片的防雷要求。融冰叶片的接闪点从叶片的尖端转移到融冰装置，因此有必要重新优化接闪器空间位置的布局策略。已有部分研究表明金属网对风机叶片雷电防护效果较好[25]，未来可考虑将电热融冰装置与防雷金属网一体化：夏季雷云活动频繁时将金属网接地，可用作防雷装置；冬季需要融冰时将金属网连接加热电源进行融冰。下一步将进行融冰-防雷金属网材质、网孔大小以及加热电源的理论研究。

4　结论

1）接闪器拦截效率与雷电先导的方位有较大关联。当雷电先导从叶片正上方发展时，第 1 接闪器均能可靠接闪。迎风面发展的雷电在融冰风机叶片静止和旋转状态下均有发生接闪失效的概率。随着叶片转速增大，接闪器的拦截效率显著降低，最严重情况下接闪器保护效率仅为 55%。

2）通过缩比风机叶片的接闪结果和电场分布模型的映射关系，发现融冰装置会改变叶片表面的电场分布。定义 30~60°为融冰装置雷击风险区域，此时融冰装置与叶身交界处的电场强度大于第 1 接闪器，有利于融冰装置表面电晕的产生。同时叶片旋转下背景电场和空间正电荷激发的自电场增强了融冰装置邻域的电场强度，加速电晕发展成稳定先导。

3）现有防雷配置(接闪器加引下线)不足以满足融冰叶片的防雷要求，需要针对其接闪特性重新优化接闪器的布置策略。未来可将金属网的防雷和融冰功能相结合，将进一步研究其材质、网孔大小及加热电源等参数对防雷、融冰性能的影响。

参考文献　References

[1] 魏东辉，房俊龙. 风电在电力系统恢复规划中的应用[J]. 高电压技术，2022，48(1)：398-407.
WEI Donghui, FANG Junlong. Application of wind power in power system restoration planning[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 398-407.

[2] 靳晶新，叶　林，陆佳政，等. 融合多维气象信息的风能资源评估方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：477-487.
JIN Jingxin, YE Lin, LU Jiazheng, et al. Combined method for wind energy resource assessment considering multi-dimensional meteorological information[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 477-487.

[3] RADIČEVIĆ B M, SAVIC M S. Experimental research on the influence of wind turbine blade rotation on the characteristics of atmospheric discharges[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1181-1190.

[4] 李庆民，郭子炘，张　黎，等. 大型风电场雷击防护研究面临的关键问题[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5296-5306.
LI Qingmin, GUO Zixin, ZHANG Li, et al. Key issues with lightning protection research of the large-scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5296-5306.

[5] 郭子炘，李庆民，闫江燕，等. 海上风电场雷击演化物理机制的研究综述[J]. 电气工程学报，2015，10(5)：10-19.
GUO Zixin, LI Qingmin, YAN Jiangyan, et al. Summary of research on physical evolution mechanism of lightning discharge of offshore wind farms[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 10-19.

[6] 李宏博，李庆民，郭子炘，等. 基于纳秒脉冲反射定位的风机叶片引下线断裂故障检测方法[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1100-1108.
LI Hongbo, LI Qingmin, GUO Zixin, et al. Broken fault detection method of down conductor in wind turbine blade based on nanosecond-pulse reflection and location[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1100-1108.

[7] ZHENG Zhi, SUN Qiuqin, YANG Jianlan, et al. Investigation on overvoltage caused by vacuum circuit breaker switching off shunt reactor in offshore wind farms[J]. High Voltage, 2022, 7(5): 936-949.

[8] 朱永灿，熊浩男，田　毅，等. 基于叉指电容效应的光伏组件覆冰雪监测技术[J]. 高电压技术，2022，48(1)：20-28.
ZHU Yongcan, XIONG Haonan, TIAN Yi, et al. Monitoring technology of ice-snow-covered photovoltaic modules based on interdigital capacitance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 20-28.

[9] MIKI M. Observation of current and leader development characteristics of winter lightning[J]. IEEJ Transactions on Power and Energy,

2007, 127(12): 1247-1252.

[10] TAO S Q, ZHANG X Q, WANG Y W, et al. Transient behavior analysis of offshore wind turbines during lightning strike to multi-bladel[J]. IEEE Access, 2018(6): 22070-22083.

[11] IDENO M, SEKI K. Study on improvement of performance of wind power generation system and lightning damage[C]// Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection. Kanazawa, Japan: ICLP, 2006: 1585-1589.

[12] MADSEN S F, HOLBØLL J, HENRIKSEN M, et al. New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades[C] // Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection. Kanazawa, Japan: ICLP, 2006: 1497-1502.

[13] 陈维江，贺恒鑫，何俊佳，等. 输电线路雷电先导发展三维仿真模型[J]. 中国电机工程学报，2014，34(36)：6601-6612.
CHEN Weijiang, HE Hengxin, HE Junjia, et al. On the 3-dimentional leader progression model for the lightning shielding failure performance estimation of overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6601-6612.

[14] 师　伟，李庆民. 基于先导放电理论的雷击上行先导起始研究[J]. 中国电机工程学报，2014，34(15)：2470-2477.
SHI Wei, LI Qingmin. Research on the lightning upward leader inception based on leader discharge theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2470-2477.

[15] SØRENSEN T S, PLUMER J A, MONTANYÀ J, et al. The update of IEC 61400-24 lightning protection of wind turbines[C]// 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala, Sweden: [s.n.], 2008: 5.

[16] MUTO A, SUZUKI J, UEDA T. Performance comparison of wind turbine blade receptor for lightning protection[C]// Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection. Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 1-6.

[17] 郭子炘，李庆民，于万水，等. 旋转状态下风机叶片雷击接闪特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4951-4959.
GUO Zixin, LI Qingmin, YU Wanshui, et al. Experimental study on lightning attachment manner of the rotating wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4951-4959.

[18] 谭海辉，李录平，靳攀科，等. 风力机叶片超声波除冰理论与方法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(35)：112-117.
TAN Haihui, LI Luping, JIN Panke, et al. Ultrasonic de-icing theory and method for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(35): 112-117.

[19] SHEN Y Z, TAO H J, CHEN S L, et al. Icephobic/anti-icing potential of superhydrophobic Ti6Al4V surfaces with hierarchical textures[J]. RSC Advances, 2015, 5(3): 1666-1672.

[20] 舒立春，戚家浩，胡琴，等. 风机叶片电加热除冰及电阻丝布置方式试验研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(13)：3816-3822.
SHU Lichun, QI Jiahao, HU Qin, et al. Experimental study on de-icing and layout of resistance wire by electrical heating for wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3816-3822.

[21] IEC. Wind turbines-Part 24: Lightning protection: IEC 61400-24[S]. [S.l.]: IEC, 2010.

[22] WANG Haotian, HE Cong, GUO Ruochen, et al. Partial discharge measurement and analysis under lightning impulse superimposed DC voltage in SF6 gas[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 744-752.

[23] GAROLERA A C, MADSEN S F, NISSIM M, et al. Lightning damage to wind turbine blades from wind farms in the U. S.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1043-1049.

[24] 郭子炘，李庆民，任瀚文，等. 基于雷电上行先导起始物理机制的风机叶片雷击概率评估模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(2)：653-662.
GUO Zixin, LI Qingmin, REN Hanwen, et al. Probabilistic risk assessment of lightning strike on wind turbine blades based on the physical mechanism of lightning upward leader inception[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 653-662.

[25] 于万水. 不同极性雷云下旋转风机叶片邻域的空间电荷演化特性与雷击先导发展模型[D]. 北京：华北电力大学，2022.
YU Wanshui. The evolution characteristics of space charge in the neighboring domain of rotating wind turbine blade under positive/negative thundercloud and lightning leaders propagation model[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022.

[26] 文习山，屈　路，王　羽，等. 叶片转动对风机引雷能力影响的模拟试验研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(7)：2151-2158.
WEN Xishan, QU Lu, WANG Yu, et al. Experimental study of the influence of the blade rotation on triggered lightning ability of wind turbine's blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2151-2158.



蒋凌峰(通信作者)
1998—，男，博士生
主要从事风力发电机叶片防雷防冰及配电线路雷电防护方面的工作
E-mail: lingfengcsust@163.com

JIANG Lingfeng
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2023-04-20　修回日期　2023-07-13　　编辑　陈　蔓