**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211083

# 支撑"双碳"目标的风光发电装备安全运行关键技术

李庆民,于万水,赵继尧

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京102206)

**摘** 要:为支撑碳达峰、碳中和目标,在今后较长时间,我国风力和光伏发电为主的新能源发电系统将继续迎来 加速发展。风力和光伏发电在快速发展的进程中,环境因素带来的挑战影响着系统的安全运行,同时带来高额的 运维成本。因此,针对风光发电装备面临的雷击、覆冰、积尘、封装问题和智能运维等几个方面展开评述,对国 内外已有的研究进展进行总结,并梳理了5个尚待解决的关键问题:多气候因素影响下旋转风机的雷击接闪机制, 适应复杂环境的全天候风机叶片研制,钙钛矿太阳电池隔水氧可靠封装技术,基于数字孪生的风光发电装备全天 候智能运维技术和风光发电装备零碳排可循环回收技术。对这些问题的有效解决将提升风光发电装备在复杂环境 的适应性,推动以风光发电为主的新能源发电系统的安全运行,减少对高碳排放化石能源的依赖,助力实现"双 碳"目标。

关键词:碳达峰、碳中和;风电机组;光伏系统;环境因素;安全运行

# Key Technologies for the Safe Operation of Wind and Solar Power Generation Equipment in Support of the "Peak CO<sub>2</sub> Emissions and Carbon Neutrality" Policy

#### LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,

Beijing 102206, China)

**Abstract:** To support the goal of "peak CO<sub>2</sub> emissions and carbon neutrality", China's new energy sources, mainly wind power and photovoltaic power generation, will continue to see accelerated development in the longer term. In the process of rapid development of wind power and solar power generation, environmental factors bring challenges that affect the safe operation of the systems while creating high operation and maintenance costs. This paper reviewed the lightning strike, icing, dust accumulation, encapsulation and intelligent operation and maintenance of power generation systems, summarized the research progress in China and abroad, and clarified five key issues to be solved as follows: lightning strike mechanism of rotating wind turbines under the influence of multiple climate factors, development of all-weather wind turbine blades adapting to complex environments, reliable encapsulation technology of perovskite solar cells with water and oxygen isolation, digital-twin based all-weather intelligent operation, and maintenance technology of wind power and solar generation equipment and zero CO<sub>2</sub> emission recyclable technology of wind power and solar generation system in complex environment, promote the safe operation of the new energy generation system, reduce the dependence on fossil energy with high CO<sub>2</sub> emission, and contribute to achieving the goal of "peak CO<sub>2</sub> emissions and carbon neutrality; wind turbine; photovoltaics; environment factors; safe operation

# 0 引言

新能源替代化石能源对于能源系统转型有着 举足轻重的作用。据国际可再生能源署(international renewable energy agency, IRENA)数据统计(如图 1 所示),近 20 年来全球风电、光伏累计装机容量快 速增长;2020年,虽受新冠疫情影响,风电、光伏 新增装机容量均>100 GW,创历史新高。我国的新 能源装机容量在全球范围增速最快,"十三五"期间, 我国新能源装机年均增长约 60 GW,增速为 32%; 2020年我国风电新增并网装机容量高达 72 GW,新 增光伏发电装机 48 GW,同比增长 60%。

2020年9月,习近平总书记在联合国一般性辩 论时宣布中国 2030年前碳排放达峰,2060年前实 现碳中和。为支撑碳达峰、碳中和这个目标,在今

基金资助项目: 国家自然科学基金(51929701; 51737005); 北京市自然 科学基金(3202031)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51929701,51737005), Beijing Natural Science Foundation(3202031).

后较长时间,我国电力清洁化必须加快速度,以风 力和光伏发电为主的新能源将继续迎来高速发展。 然而,风力和光伏发电在快速发展的进程中,也面 临着环境因素带来的挑战,较为突出的有风电机组 雷击问题、覆冰问题以及光伏面板积尘问题和复杂 环境下的稳定性问题,这些因素给风光发电装备的 安全运行带来了严峻的考验。

随着风电机组朝着大容量方向发展,风机高度和叶片长度逐渐增加,兆瓦级风机的叶片旋转至最高点可达 150 m 以上,雷击事故率成倍增长<sup>[1]</sup>。雷击事故中约 1/3 为直击雷损伤,2/3 为感应雷对机组低压设备造成的间接破坏。由于雷击带来的风机维修、停运等造成高额经济损失,占风机各类事故带来损失总和的 40%,而风机叶片作为风电机组最重要的组成部分之一,其遭受雷击的概率最大,遭受的经济损失更高,平均每支叶片的维修费用都>15 万元<sup>[2]</sup>。

在高寒地区,风电场面临低温覆冰的情况,其 带来的影响是十分广泛的。覆冰会影响叶片的气动 性能,进而降低输出功率,更严重的情况下会导致 风机停机运行,造成严重的经济损失<sup>[3-5]</sup>;其次,覆 冰将增大叶片的机械载荷,增加非正常振动的幅度, 使得重要旋转连接部件的运行寿命大大减小<sup>[6]</sup>;此 外,在覆冰天气下持续运转的风力发电机,也会造 成脱冰、甩冰等次生灾害,对风电场及周边的人员 和设备安全形成威胁。

相较于风电机组,雷击、覆冰问题尚不突出, 对于长期运行的光伏系发电统,面板积灰问题不容 忽视。积灰导致光伏面板接收到的太阳辐射量减少, 影响光伏系统的发电效率;此外,光伏面板的局部 异物或者清洁死角,也会造成局部的热斑效应,造 成光伏面板的局部烧蚀损坏。再者,太阳能电池尤 其是钙钛矿太阳电池的内部材料受到环境中水分、 氧气、温度和湿度等因素的影响,其稳定性和寿命 将大大降低<sup>[7-8]</sup>,想要实现钙钛矿太阳能电池的商业 应用,进一步促进光伏产业的发展,隔绝环境因素 的可靠封装是必不可少的。

为支撑"双碳"目标,亟需发展以风力和光伏 发电为主的新能源发电系统。论文针对风光发电装 备面临的雷击、覆冰、积尘、封装和智能运维等几 个方面展开评述,梳理了国内外已有的研究进展, 并梳理了尚待解决的关键问题,为风光发电装备安 全运行的有关研究提供参考。





### 1 风电机组安全运行关键技术

#### 1.1 风电机组雷击防护技术

1.1.1 风电机组雷击接闪物理机制

随着风电机组容量的不断提升,风机塔筒高度 和叶片长度逐渐增长,因此更容易遭受雷击。在建 筑物或输电线路传统雷电防护领域,发展了规程法 和电气几何模型<sup>[9-11]</sup>,用于计算雷电绕击率和雷电 击距。然而,针对风机而言,由于其更高大的尺寸 和叶轮的旋转特性,需考虑雷电先导的起始和发展 过程,发展针对风电机组的雷电防护理论。

Becerra 等人建立了自洽的先导起始与发展模型(self-consistent upward leader inception and propagation model, SLIM)<sup>[12-14]</sup>; Long Mengni 等人在 SLIM 模型的基础上,建立了雷电先导一次回击后 的箭式先导发展模型,认为箭式先导是造成雷电先 导击中远离叶尖区域的原因之一<sup>[15-16]</sup>;马宇飞等人 建立了适用于风电机组的稳定上行先导起始判据, 简化了先导起始的迭代计算过程,便于工程应 用于风机的雷击跃变击距公式<sup>[18]</sup>;王国政等人结合 先导发展模型,提出了风机叶片动态击距的概念, 建立了风电机组的电气几何模型<sup>[19]</sup>。

另一方面,风电场观测数据发现旋转风机更容 易遭受雷击<sup>[20-21]</sup>,现场观测还发现,旋转更容易诱 发上行雷击,如图2所示。实验室缩比风机雷击模 拟实验<sup>[22-24]</sup>也验证了这一现象。为了深入解释风机 旋转过程的先导物理机制,开展了初步的仿真研究。 M Alonso 等学者建立了风机3 维模型<sup>[25]</sup>,发现旋转 中的叶片,其附近空间电场强度比静止状态下高出 约 75%。Montanyà 对旋转风机叶尖附近的空间电荷 分布进行了定性分析,认为由于叶片的旋转,叶尖 附近的空间电荷被拉成弧形区域<sup>[26]</sup>。Qu 等学者建 立了风机叶片接闪器在雷云电场作用下附近空间电 荷分布的计算模型,并分析了风速和风向对电荷分 布的影响,认为风速越大,则接闪器表面的电晕电 流越大<sup>[27]</sup>。

应当指出的是,现有的雷电先导发展模型多针 对静止风机,耦合风机的旋转过程仍是一大难点, 风机旋转效应对先导发展和雷击接闪的作用机制有 待进一步研究。

1.1.2 风电机组雷击损伤机制和电磁暂态效应

风机叶片遭受直击雷后,不论接闪成功与否, 雷电流泄放的巨大热-磁-气流耦合效应都可能对叶 片造成巨大损伤。一方面,雷电流的热效应会造成 叶片表面材料的烧蚀、分层等损伤;另一方面,当 雷电弧侵入叶腔内部,冲击电流的气流效应会造成 叶片的结构损伤甚至爆裂。Yan等人开展了风机叶 片的雷电弧损伤实验,界定了典型叶片结构的电气 薄弱区域,并且指出雷电弧对叶片的损伤效应分为 沿面电弧和内部电弧两部分<sup>[28]</sup>,复现了雷电弧侵入 后叶片爆裂的损伤过程<sup>[29]</sup>。同时,沿面电弧的热效 应会造成叶片材料的降解和分层<sup>[30]</sup>。Inoue 分析了 内部电弧造成密闭叶腔压力分布的规律<sup>[31]</sup>;Zhang 等建立了内部电弧的热-磁-气流耦合效应的3维模 型,计算了温度和压力在叶片内部的分布情况<sup>[32]</sup>。

雷电流在叶片防雷通路的泄放过程也会引起 电磁暂态效应,危害风电机组内部的二次设备,是 不容忽视的运行安全问题。为分析机组内部的雷击 电磁暂态过程,国内外学者建立了多种不同形式的 风电机组雷电暂态电路模型<sup>[33-36]</sup>。文献[37-39]考虑 了接地电极尺寸、土壤电阻率的影响作用;文献[40] 考虑了风电机组的塔筒、轮毂、三桨叶等结构,建 立了风电机组一体化雷电暂态电路模型。文献[41] 考虑了海洋环境对接地系统的影响,修正了海洋风 机的接地电阻参数,计算了风机叶片在不同旋转角 度下波阻抗模型的影响。风电机组的雷电暂态响应 分析,可为风电机组浪涌保护的设计和布置提供指 导,为机组的雷电二次效应的防护提供理论基础。 1.1.3 风电机组雷击风险评估和防雷系统优化设计

March 基于 IEC 雷电防护标准,纳入地形、海 拔、冬季雷活动等因素,提出了针对风电场的雷击 风险评估方法<sup>[42]</sup>。Chen 等人基于闪电定位系统 (lightning location systems, LLS)获得的云对地闪电 数据,量化并比较了中国风电场建成前后的地闪活 动特征,发现自位于中国东南部的风电场建成后, 在风电场周围约 0.5 km 范围内,闪电活动频率有所 增加<sup>[43]</sup>。同时分析了海上风电的屏蔽效应,发现位 于海上风电场边缘的风机对风电场内部的风机有屏 蔽作用。Becerra 等人提出在进行风电场雷击风险评 估时,也应考虑正极性雷电和上行雷的影响<sup>[44]</sup>。黄 胜鑫等人基于 SLIM 模型<sup>[45]</sup>,提出了一种风电机组 下行雷击风险的计算方法,可计算针对单台风机的 年遭受负极性下行雷击次数。由于风电场雷击事故 多发生在风机叶片上<sup>[46]</sup>,郭子炘等人提出了针对风 机叶片的雷击概率分布计算方法<sup>[47]</sup>,可用于评估风 机叶片表面任意位置的雷击概率(如图 3 所示)。

旋转过程中由于风机叶片总处于较高位置,因此相比风电机组其他部件,更容易遭受雷击,通过为风机叶片优化配置接闪系统,可将雷电流导入大地,从而使风机叶身部位免受雷击。早在 20 世纪90 年代,北欧等国已经展开了风机叶片雷击防护问题的研究,丹麦能源研究与发展部 1999 年发布了一份风力发电机组防雷建议<sup>[48]</sup>,IEC 在此基础上陆续颁布了多个版本的风机防雷技术标准<sup>[2,49]</sup>,推荐了不同风机叶片防雷系统型式,如图 4 所示。

目前,风机叶片接闪系统的通用设计是将叶尖 部分制造成金属,然后在叶身布置若干个接闪器, 通过引下线与叶尖相连并接地。此方法可以使叶尖 得到较为有效的防护,然而,统计数据显示,叶片 其他位置仍频繁遭受雷击事故<sup>[1]</sup>。日本电力中央研



图 2 风电场现场雷电观测<sup>[20]</sup> Fig.2 Lightning observation of wind farm<sup>[20]</sup>



3049

究院开展了叶片长间隙放电实验,发现金属叶尖的 设计增强了接闪能力,但是金属叶尖与叶身绝缘材 料的交界处会被放电电弧烧蚀<sup>[50]</sup>。为降低叶身接闪 器附近的雷电弧烧蚀,仿照飞行器防雷,M Minowa 在叶身接闪器附近加装金属导流条,为雷电弧提供 了放电通道<sup>[51]</sup>。何天宇提出一种在叶片前缘和后缘 外覆条状导体的接闪系统设计方案(如图 5 所示), 可降低叶片内部接地引线表面电场强度,减小接地 引线产生放电并引起叶片外部放电接闪的概率,并 通过实验和仿真验证了防护的有效性<sup>[52]</sup>。A M Abd-Elhady对比了 IEC 风机防雷标准<sup>[2]</sup>中推荐的不 同接闪系统的先导拦截效果,发现金属网与外置引 下线的接闪系统设计更优,并提出在叶片尖端敷设 金属网,叶片其余至叶根的部分外置金属导体的接 闪系统设计<sup>[53]</sup>。

然而,相比于静止物体,风机的旋转对雷电接 闪过程也存在不同。现有的接闪系统的优化设计主 要针对静止叶片,风机的旋转效应需要进一步考虑。

#### 1.2 高寒地区风电机组防冰除冰技术

相对于低海拔地区,山区、高原等高海拔地区 蕴含着更丰富的风资源<sup>[54]</sup>,目前世界范围内有约 30%的风电场分布在北欧、加拿大及中国等地区的 寒冷和(或)高海拔地带<sup>[55]</sup>。然而,运行于高寒地区 的风电机组也面临着冰冻环境的考验,风电机组尤 其是风机叶片可能会频繁遭受覆冰风险(如图 6 所 示)<sup>[56]</sup>,对机组的高效和安全运行带来极大的威胁。 1.2.1 风机叶片覆冰机理和形式

风机叶片的覆冰分为降水覆冰、云中覆冰和霜 冻覆冰。其中,降水覆冰是指在降雪和降雨中叶片 表面结冰的过程,整支叶片都可能受到影响。降水 覆冰主要包括冻雨和湿雪两种降水形式,而其中冻 雨形成的雨淞(如图 7(a)所示),严重时可覆盖整个 叶片表面,密度可达到 900 kg/m<sup>3</sup>且不容易脱落; 而湿雪形式的积冰质地疏松,相对危害较小。

在寒冷环境中,云或大雾中的过冷液滴与温度 叶片表面接触后瞬间结冰的过程,称为云中覆冰, 其主要的覆冰形式为雾凇。雾凇在叶片表面的形成 过程无水滴的流动,常在叶片的迎风面上前缘部位 形成,如图 7(b)所示。

在低温、潮湿的高寒地区,空气中的水蒸气升 华在叶片表面会形成霜冻。相比于雨淞,霜冻覆冰 密度很小,仅为10~80 kg/m<sup>3</sup>,且质地疏松,容易自 行脱落,不足以对叶片产生较大的危害。



图 4 IEC 标准推荐的风机叶片防雷设计<sup>[2]</sup> Fig.4 Attachment system design of wind turbine blade recommended by IEC standard<sup>[2]</sup>



图 5 前后缘外覆导体接闪系统结构设计[52]

Fig.5 Schematic diagram of the lightning attachment system with leading/trailing edge covered by conductor<sup>[52]</sup>



图 6 风机叶片覆冰实例<sup>[56]</sup> Fig.6 Icing cases of wind turbine blade<sup>[56]</sup>



Fig.7 Diagram of icing types on wind turbine blade

# 1.2.2 覆冰对风机安全运行的影响

附着在风机叶片表面的冰层会增大其表面粗 糙度<sup>[57]</sup>,进而影响叶片的整体气动性能<sup>[55]</sup>,进一步 影响风机的实际发电功率<sup>[4]</sup>。W. Jasinski 指出,叶 片在雾凇覆冰时,机组的气动性能将下降至 80%<sup>[3]</sup>。 V. Lehtomäki 等人对现场风机进行覆冰情况的输出 功率研究,发现风电机组在不同运行风速下都有一 定程度上的功率损失,如图 8 所示<sup>[6]</sup>。M. Homola 等人研究了不同类型覆冰情况下风机的输出特性, 认为相比雾凇情况,雨淞对风电机组的气动性能和 输出功率的影响更大<sup>[5]</sup>。

风机叶片覆冰还会给机组和运维人员带来安 全隐患。一方面,在严苛的寒冷天气下,单支叶片 的覆冰量可达数百千克<sup>[6]</sup>,将提升叶片的非正常振 动程度,增加叶片的离心载荷<sup>[58]</sup>,进而加剧主轴和 齿轮箱的磨损,给叶片、轮毂、机舱及塔筒之间的 连接法兰带来严峻考验,Hu指出由于叶片覆冰带来 的不对称载荷,将使塔筒的疲劳损坏率上升至 70.8%<sup>[59]</sup>。另一方面,覆冰的叶片在高速旋转下, 还会带来脱冰、甩冰等覆冰次生灾害<sup>[60]</sup>,给风电场 的其他设施或运维人员带来极大的安全威胁。

1.2.3 风机叶片防冰和除冰技术

由于叶片覆冰会给风电机组的运行带来不利 影响,国内外学者针对风机叶片的防冰和除冰问题 展开了大量研究。

叶片防覆冰方法的思路主要是通过改变风机 叶片表面的物理属性,从而减少或阻止叶片在高湿 度和寒冷条件下结冰,主要包含疏水涂料法和光热 涂料法。

通过使用疏水涂料,可以增大叶片材料表面的 接触角、降低表面能,从而使得水滴难以在叶片表 面附着<sup>[61]</sup>,减少覆冰的可能。然而,受重复覆冰、 风沙、雨水、紫外线等环境因素的影响,长期运行 后的涂料疏水性能将会下降<sup>[62]</sup>;此外,当涂料表面 被水膜完全覆盖后,其防覆冰能力将大大降低。光 热涂料法又叫黑色涂料法,通过加强叶片表面对太 阳光的吸收能力来提升叶片表面温度,防止叶片表 面覆冰;光热涂料法在风电场已有一定的应用<sup>[63]</sup>, 然而由于受到天气条件的限制其效果不甚理想。

鉴于目前尚无有效的适用于风机叶片的防覆 冰涂料,还需结合叶片主动除冰方法,从而防止高 寒地区的风机叶片长时间覆冰。叶片除冰方面主要 有热除冰法(热空气法、加热电阻法),振动除冰法(电 磁脉冲法和超声波振动法)等。

热空气法除冰首先出现在航空领域,后由德国 Enercon 公司引入风电行业<sup>[56]</sup>,原理如图 9 所示。



图 8 叶片覆冰下风机输出功率曲线<sup>[6]</sup>

Fig.8 Output power curve of wind turbine under blade icing<sup>[6]</sup>



Fig.9 Diagram of heated air method for de-icing

由于风机叶片和机舱内部并没有热源,因此需要在 叶根内部增加额外的热源并辅以鼓风装置。当叶片 表面温度>0 ℃时其表面覆冰开始融化脱落,然而, 由于叶片材料热导率较低,且随着风机单机容量的 不断增大,叶片长度逐渐增加,热空气在叶腔内循 环传输的距离过长,因而该方法加热除冰效率较低, 难以在高寒风电场广泛应用。

相比热空气法,采用在叶片表面敷设金属材料 或碳纤维材发热元件的加热电阻除冰法效率更高。 而随着风机容量的逐渐增大,叶片长度也逐渐增加, 其表面积也随之增大;由于电加热的除冰方式将消 耗风机自身的发电量,因此合理地布局电加热元件 和加热功率的确定至关重要。Lamraoui建立了覆冰 条件下风电机组的功率损耗模型,认为风机发电功 率的 85%由近叶尖的 60%长度区域贡献,近叶尖 20%长度区域贡献最高,且更容易遭受覆冰<sup>[64]</sup>。舒 立春等人开展了风力发电机的自然覆冰实验,发现 叶片覆冰主要集中在近叶尖 1/3 的区域,叶片前缘 及迎风面更容易遭受覆冰<sup>[65]</sup>。文献[56]指出风机每 支叶片的加热除冰系统约需要 15 kW 的功率;文献 [66]指出对于 110~220 kW 的风机,加热除冰系统消 耗的功率占机组发电功率的 6%~12%;文献[65]建 立了风机叶片临界除冰功率的计算模型,指出在轻 微雨凇覆冰气象条件下,叶片的临界除冰功率处于 1 kW/m<sup>2</sup>量级。

作为从航空工业借鉴来的除冰技术,电磁脉冲 法的实现依赖于在叶片除冰区域敷设金属蒙皮,而 这也极大地增加了叶片遭受雷击的概率。而风机叶 片的超声波除冰技术也尚处于实验室研究阶段,且 为使冰层从叶片完全脱落,仍需借用低频振动<sup>[67]</sup>等 辅助措施;该方法对叶片机械性能的影响也有待论证。

目前,由于防冰除冰问题的复杂性,尚未形成 大规模商用的防冰除冰解决方案。加热电阻法是更 有效、可靠且具备应用潜力的叶片除冰方法,然而, 对于大容量风电机组的除冰问题,加热电阻法将消 耗更多能量,大面积敷设的金属元件也可能会增加 叶片的雷击风险。因此,应结合防冰、除冰方法的 优势,同时考虑雷电防护的约束,研究更高效、经 济的风机叶片综合防冰除冰方法。

### 2 光伏发电装备安全运行关键技术

作为新能源发电装备的另一重要组成部分,自 1954 年美国贝尔(Bell)实验室制造出第 1 个太阳能 电池以来<sup>[68]</sup>,光伏电池已经历了 3 代发展历程,分 别是第 1 代硅基太阳能电池,第 2 代薄膜太阳能电 池和第 3 代新型太阳能电池,其中第 3 代太阳能电 池主要包括有机太阳能电池(organic photovoltaic,

OPV)<sup>[69]</sup>,染料敏化太阳能电池(dye-sensitized solar cell, DSSC)<sup>[70]</sup>以及钙钛矿太阳能电池(perovskite solar cells, PSCs)<sup>[71]</sup>等。

## 2.1 光伏面板除尘技术

2.1.1 光伏面板灰尘沉积机理 光伏面板积尘是一个广泛而又影响深刻的问 题。大气灰尘包括自然来源和人为来源,土壤、沙 尘和岩石在风化作用下形成的细小颗粒是灰尘主要 的自然来源,进而通过空气动力系统沉降到光伏面 板上。而工业扬尘、建筑扬尘、交通扬尘等是灰尘 主要的人为来源,这对于城市内的光伏发电面板的影 响更大。根据灰尘的沉降方式不同,分为重力作用的 降尘和飘尘形成的降尘<sup>[72]</sup>。大气灰尘在光伏面板上的 沉积、附着和固结的过程受到多种因素的影响,如面 板倾角<sup>[73-75]</sup>、风速风向<sup>[76-77]</sup>、灰尘性质<sup>[78-79]</sup>等。

居发礼建立了光伏面板表面积灰量的统一表 达式,提出光伏积灰系数以评估积尘对发电效率的 影响规律<sup>[80]</sup>。Garga 对不同面板倾角下的积尘特性 进行实验研究,发现在 30 d 的自然积尘后,处于 45° 角度的光伏面板的透射率降为原来的 92%<sup>[81]</sup>。 Kaldellis 等人开展实验研究了不同灰尘种类的积尘 特性,并总结出根据空气污染情况估算对发电性能 影响的理论模型<sup>[79]</sup>。宁会峰等人开展了光伏面板的 积灰实验,积灰密度曲线如图 10 所示,在无降雨条 件下,平均每天增加 0.14 g/m<sup>2</sup>,且随时间近似呈现 线性增长;并模拟了降雨条件下的积灰情况,认为 降雨可对光伏面板进行一定程度上的清洁作用,但 尚不足以彻底除尘<sup>[82]</sup>。

2.1.2 灰尘沉积对光伏发电装备的影响效应

由于生产生活等原因造成的灰尘累积,直接影 响光伏发电的效率:而且长期积灰也会破坏光伏面 板原有的热平衡,导致面板表面的局部温度过高而 形成"热斑"效应,烧毁太阳电池组件[83-84]。孟广 双实地测量了光伏系统发电效率随积尘量的变化关 系,认为随着积尘的增加,发电效率呈现指数衰减 的趋势<sup>[85]</sup>。Sarvera 等人对不同地区光伏系统发电 效率和积尘量的关系进行了长期实地测量,发现不 同地区的光伏发电效率随着时间延长均呈现下降趋 势,出现降雨后,发电效率迅速回升,然后进入下 一循环<sup>[86]</sup>。陈东冰等人对蚌埠市 2 MW 光伏电站的 积尘问题进行研究发现,经过20d的表面积尘实验 后,光伏组件的发电功率共减少约25%[87]。张风等 人对比研究了有无积尘的光伏组件的发电效率,发 现在相同环境条件下,无积尘的光伏组件发电效率 比积尘光伏组件高出 15%以上[88]。陈菊芳等人对太 阳电池封装的透明玻璃进行透光率测试,积尘测试 期间透过率降低 1.3%~4.0%, 月发电损失高达 2.61 kWh/kWp(kWp 是指太阳能光伏电池的峰值总功 率)[74]。



#### 2.1.3 光伏面板除尘技术

为保障光伏发电装备的安全、高效运行,对光 伏面板进行定期除尘和清洗十分重要。光伏面板的 除尘技术主要分为人工除尘、机械除尘、机器人除 尘、自清洁涂层及电除尘法等方法。

人工除尘方法利用人力进行光伏面板清洁除 尘,分为擦拭法、高压喷水/喷气法和清洁车清洗法 等。其优点是灵活性强、除尘干净有效,然而,人 工除尘方法需耗费大量人力且清洁成本高,也不适 用于干旱沙漠和山地丘陵等地区;再者,对于清洁 死角区域,容易因为局部发热形成严重的"热斑" 效应。

为减少人力成本的投入,采用机械除尘或机器 人除尘的方法对光伏面板进行除尘作业,同时可以 增强在沙漠、山地等地区的适用性。机械除尘法利 用主要利用机械装置操纵清洁用具或者基于超声振 动原理来清除灰尘或积污<sup>[89-91]</sup>,达到清洁表面的目 的,然而除尘过程中仍会在面板边缘形成清洁死角。 机器人除尘法中,主要利用移动机器人来控制清洁 刷或者喷水来扫除光伏面板上的微尘<sup>[92-96]</sup>,除尘效 率高,但需考虑在倾斜光伏板上运动稳定性和大面 积除尘机器人的续航问题,除尘机器人的研发成本 高,目前尚缺少广泛的商用案例。

在不改变光伏面板透光特性的前提下,通过在 光伏面板表面涂敷纳米薄膜,改变其表面的物化特 性,使灰尘颗粒能够自然脱落,从而达到自清洁的 目的。常用的有超亲水材料和超疏水材料。超亲水 纳米薄膜表面通过光催化反应减少光伏面板灰尘的 累积<sup>[97]</sup>,然而,超亲水性纳米薄膜的稳定性差,在 复杂的气候环境影响下失效,现有性能尚不足以满 足工业需求,其稳定、均一制备工艺是目前一大难 点。超疏水纳米薄膜基于"荷叶效应"原理<sup>[98-99]</sup>, 要求表面接触角>150°,滚动角<10°,通过滚动液滴 或周围的空气来实现积尘的自清洁。然而,疏水性 材质的表面耐久性不高,长期使用则自清洁能力下 降,与光伏组件的实际应用性质不兼容。

电除尘法分为静电除尘和电帘除尘法。光伏面 板的静电除尘最早是在研究空间探测器的太阳能电 池板除尘方法时提出的<sup>[100-101]</sup>,通过给光伏面板充 电,使得灰尘颗粒带电后被排斥,从而达到除尘的 效果。电帘除尘法中,通过在基底上刻蚀相互平行 的透明导体电极(即电帘),接通单相或多相交流电压 使得电帘之间产驻波或行波,利用行波或驻波电场驱 动灰尘微粒定向运动,达到除尘的目的<sup>[86,102-103]</sup>。

#### 2.2 钙钛矿太阳电池封装技术

将易损坏的太阳电池片采用不同方法封装起 来,隔绝长期运行下恶劣环境的影响,可提高太阳 电池的稳定性和使用寿命。传统太阳电池的封装技 术较为成熟,主要有玻璃压层封装、真空玻璃封装 和紫外固化封装3种方式<sup>[104]</sup>。

2.2.1 钙钛矿电池稳定性的影响因素

在经过多年的发展后,传统硅基太阳电池已经 实现了大规模的商业化应用,然而,材料成本、生 产能耗及环境污染等问题都制约了其进一步发展。 而 PSCs 具有高效率和低成本等优点,自 2009 年问 世以来,就凭借效率高、制备工艺简单、低成本等 优点而成为光伏领域研究的热点; PSCs 将推动太阳 能电池的产业链发展,对双碳目标的实现有着重要 的意义。

PSCs 中晶体结构与 CaTiO<sub>3</sub>一致的材料被称为 钙钛矿材料<sup>[105]</sup>,水分和氧气、紫外辐射、温度都会 影响钙钛矿材料的稳定性<sup>[7-8,106-111]</sup>,进而影响钙钛 矿太阳电池的使用寿命。空气的湿度、温度和氧气 等因素都会对钙钛矿太阳能电池造成损伤,导致其 功能衰减<sup>[112]</sup>,由于可通过调节 PSCs 的吸光材料组 分来减轻光照及温度的影响,因此要通过封装技术 以隔绝空气中水分子和氧分子等的侵入,这对 PSCs 的封装技术和工艺提出了更高的要求。

2.2.2 钙钛矿太阳电池封装技术

钙钛矿太阳能电池的封装方法目前主要有中 空玻璃法、紫外线固化法和薄膜封装法等。

采用玻璃的封装方式是较为常见的一种 PSCs 封装,Tripathi 等使用型腔玻璃密封的 MAPbI3xClx 基 PSCs,并开展大气环境下的稳定性测试, 发现 60 d 后仍能够保持初始效率的 90%<sup>[113]</sup>。紫外 固化环氧树脂的封装方法在 PSCs 上也有一定应用, 通过该种方式封装具备一定的稳定性,Chen 等人使 用该方式封装制备的高效率 PSCs,存放 42 d 后效 率仍为初始的 90%以上<sup>[114]</sup>。Ramos 等采用了一种 新的薄膜封装方法,使用原子层沉积(atomic layer deposition,ALD)工艺,通过沉积氧化铝薄层作为封 装保护层,与未经封装的 PSCs 同时放在大气环境 中进行测试,95 d 后经封装的 PSCs 效率保持在初 始的 75%以上,而未封装的器件仅剩 40%左右<sup>[115]</sup>。

另外,采用严密的封装方法也可以防止 PSCs 中铅元素等有毒物质的泄漏。Michael 等采用两片 玻璃、丁基橡胶边缘密封的方法(如图 11 所示),在 防止空气中水、氧进入器件的同时,也可防止器件 内有害分解产物的逸出<sup>[116]</sup>。Ho-Baillie 等采用简单、 低成本的聚合物–玻璃毯封装法,可以有效地抑制 PSCs 内部材料的分解并防止有毒元素泄漏<sup>[117]</sup>。Xu 等通过在电池前后敷设透明的铅吸收层,可以隔 离>96%的铅元素泄漏<sup>[118]</sup>。

然而,目前尚缺少针对 PSCs 的商用化可靠封装技术,这是限制 PSCs 发展的一大因素。研究针 对 PSCs 隔绝水氧等多环境因素的可靠封装技术, 实现钙钛矿太阳电池的大规模商业应用,将有助于 促进光伏发电的快速发展,这也是能源电力领域助 力实现"双碳"目标的重要部分。

## 3 风光发电装备智能诊断技术

#### 3.1 风光发电装备常见故障类型

风电、光伏发电装备长期工作在恶劣的自然环 境中,受到极端温度、太阳辐射、降雨、积雪、盐 雾、沙尘等因素影响,各部件的绝缘强度、疲劳强



度和运行性能等将随运行环境和运行时间的变化而 逐渐下降,导致故障发生。

就风电机组而言,根据数据统计,叶片、齿轮 箱、发电机3个部件故障率最高,维修费用在总维 修费用中占比>75%<sup>[119]</sup>,造成巨大的经济损失;且 导致的停机时间>87%,造成大量的电能损失。其中, 风机叶片常见损伤类型包括包括开裂、折断、裂纹、 分层等<sup>[120-121]</sup>;再者,在风电机组运行期间,受到 复杂应力和冲击载荷的影响,齿轮箱也极易发生故 障<sup>[122]</sup>,常见故障主要包括齿轮故障和轴承故障;发 电机系统的故障主要包括线圈短路、断路、发电机 过热等电机故障和发电机振动过大、轴承过热、绝 缘损坏、磨损严重等机械故障<sup>[123]</sup>。

根据故障的诱因,光伏阵列的故障可以分为两 大类:一类是由于环境因素引起的,如积尘、树木、 鸟粪等造成的阴影;另一类是光伏阵列自身产生的 故障,长期运行的光伏发电装备可能由于器件老化 而形成器件开路、短路及阻抗不匹配等故障。

#### 3.2 风光发电装备智能诊断技术

风光发电装备故障的智能诊断技术却正处于 起步阶段,主要有定性经验诊断和定量分析诊断两 大类方法。

基于定性经验的故障诊断的特征是,利用不完 备先验知识来描述系统的结构及功能,从而实现故 障诊断,主要包括专家系统(expert system, ES)、符 号有向图(sign directed graph, SDG)和故障树分析 (fault tree analysis, FTA)等方法。然而这一类定性 经验诊断方法存在故障诊断精度低、实时性差等缺 点,造成了应用推广的局限性。

基于定量分析的一类故障诊断方法,主要分为 基于解析模型的方法以及基于数据驱动的方法。其 中基于解析模型的故障诊断适用于观测对象传感器 数量充足且具备精确数学模型的系统,通过与已知模 型进行分析对比从而达到故障识别的目的<sup>[124-125]</sup>,主 要包括参数估计法、状态估计法等。由于风电机组、 光伏系统结构组成复杂,属于典型的非线性动态系 统,难以建立准确的系统机理模型,因此,该方法 仍有一定的局限性。

而另一类基于数据驱动的方法中,人工智能定量法发展迅速,在风光发电装备故障诊断中有着广阔的运用前景,主要包括神经网络(artificial neural network, ANN)<sup>[126-130]</sup>、粗糙集(rough set, RS)<sup>[131-132]</sup>、支持向量机(support vector machines, SVM)<sup>[133-134]</sup>、证据理论(dempster-shafer theory, D-S)<sup>[135-136]</sup>、模糊数学(fuzzy mathematics, FM)<sup>[137-139]</sup>和随机森林(random forest, RF)<sup>[140]</sup>。而故障样本缺乏、难以获取典型故障数据等,是目前采用该方法进行故障诊断的主要"瓶颈"。

由于风光发电装备故障的出现具备隐蔽性、随 机性、多故障并发等多种性质,仅靠单一的故障诊 断方法可能难以准确实现故障类别的识别与判定; 另一方面,单一的故障诊断方法可能也存在局限性。 因此,融合多种故障诊断方法,取长补短实现风光 发电装备的故障判别和诊断将是未来的研究趋势。

### 4 有待解决的关键问题

1)多气候因素影响下旋转风机的雷击接闪机 制。风机叶片的上行先导起始与发展过程与大气环 境密切相关,并最终对雷电接闪过程造成影响;另 一方面,受气候因素影响,叶片表面绝缘性能可能 因反复覆冰或海洋盐雾腐蚀而下降,进而影响接闪 器的拦截效率。高寒地区和海洋环境下的大气环境 与平原陆地地区差异较大,需纳入高寒和海洋地区 不同大气环境参量,耦合风机旋转效应,进一步开 展叶片表面上行先导起始和发展的物理过程等相关 探索,为复杂气候环境下旋转风机的雷电防护提供 理论基础。

2)适应复杂环境的全天候风机叶片研制。目前针对风电机组的防雷、防冰除冰、防盐雾问题的研究相对较为独立,然而,这些问题互有交叉,如采用加热电阻的风机除冰方法,需要在叶片表面敷设导电材料,会给叶片防雷增加新的影响因素;海上风机的叶片防雷问题也要考虑盐雾环境带来的影响。因此,需要促进雷电防护、防冰除冰及盐雾防治技术的综合化商业应用,研发适应多环境因素的全天候叶片,保障风电机组全天候多环境因

素下的安全运行,助力实现双碳目标。

3)钙钛矿太阳电池隔水氧可靠封装技术。钙 钛矿太阳电池问世以来,其效率在10a时间迅速提 升。然而,钙钛矿材料受到空气中水、氧等因素影 响后,会发生分解,进而大大影响了钙钛矿太阳电 池的使用寿命,这也是其目前难以商业化应用的主 要制约因素。研究针对钙钛矿太阳电池隔绝水氧等 多环境因素的可靠封装技术,实现钙钛矿太阳电池 的大规模商业应用,将会进一步深化光伏发电的发展。

4)基于数字孪生的风光发电装备全天候智能运维技术。风光发电系统越来越多地向山地、沙漠、海洋地区发展,给系统运维带来了极大的难度;此外,运维成本和发电效益之间的平衡也在一定程度上制约了风光发电装备运维技术的商业化应用,现阶段的风光发电装备运维技术还存在巨大的改善空间。智能传感、大数据分析、以及人工智能技术在电力系统在线监测和故障诊断的应用推广,也为风光发电装备智能运维方面提供了新思路。基于智能传感、大数据分析、以及人工智能技术,建立融合发电单元物理实体、孪生数据库、发电单元虚拟实体的风光发电装备数字孪生框架,实现系统全天候、全时段的在线状态监测和故障诊断,保障风光发电装备的安全运行。

5)风光发电装备零碳排可循环回收技术。尽 管风电机组和光伏系统投运后,在后续发电过程中 是零碳排放的,但对退役风机(尤其是风机叶片)和 光伏面板的回收过程将产生碳排放,且迅速发展的 钙钛矿太阳电池中存在铅等有害物质,需建立风电 机组和光伏系统清洁回收和循环利用体系,进一步 减少风光发电装备从服役到退役全周期的碳排放。

### 参考文献 References

- 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.
- [2] 2010 wind turbine generator systems—part 24: lightning protection: IEC 61400-24[S], 2010.
- [3] JASINSKI W J, NOE S C, SELIG M S, et al. Wind turbine performance under icing conditions[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120(1): 60-65.
- [4] HOMOLA M C, WALLENIUS T, MAKKONEN L, et al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines[J]. Wind Energy, 2010, 13(7): 627-632.
- [5] HOMOLA M C, VIRK M S, WALLENIUS T, et al. Effect of atmospheric temperature and droplet size variation on ice accretion of wind turbine blades[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 724-729.

- [6] LEHTOMÄKI V, RISSANEN S, WADHAM-GAGNON M, et al. Fatigue loads of iced turbines: two case studies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 158: 37-50.
- [7] BRYANT D, ARISTIDOU N, PONT S, et al. Light and oxygen induced degradation limits the operational stability of methylammonium lead triiodide perovskite solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(5): 1655-1660.
- [8] HAN Y, MEYER S, DKHISSI Y, et al. Degradation observations of encapsulated planar CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite solar cells at high temperatures and humidity[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(15): 8139-8147.
- [9] ERIKSSON A J. The incidence of lightning strikes to power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3): 859-870.
- [10] MOUSA A M, SRIVASTAVA K D. Modelling of power lines in lightning incidence calculations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 303-310.
- [11] TANIGUCHI S, TSUBOI T, OKABE S, et al. Improved method of calculating lightning stroke rate to large-sized transmission lines based on electric geometry model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 53-62.
- [12] BECERRA M, COORAY V. Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(21): 4695-4702.
- [13] BECERRA M, COORAY V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 897-908.
- [14] BECERRA M, COORAY V. A self-consistent upward leader propagation model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): 3708-3715.
- [15] LONG M N, BECERRA M, THOTTAPPILLIL R. On the attachment of dart lightning leaders to wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 151: 432-439.
- [16] LONG M N, BECERRA M, THOTTAPPILLIL R. Modeling the attachment of lightning dart and dart-stepped leaders to grounded objects[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(1): 128-136.
- [17] 马宇飞,张 黎,闫江燕,等.风机叶片雷击上行先导的起始物理 机制与临界长度判据[J].中国电机工程学报,2016,36(21): 5975-5982.

MA Yufei, ZHANG Li, YAN Jiangyan, et al. Inception mechanism of lightning upward leader from the wind turbine blade and a proposed critical length criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5975-5982.

- [18] 任瀚文,郭子炘,马宇飞,等. 雷击风机叶片的跃变击距特性与定量表征[J]. 电工技术学报,2017,32(15):216-224.
  REN Hanwen, GUO Zixin, MA Yufei, et al. Quantitative characterization of the striking saltus distance of wind turbine blade[J].
  Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 216-224.
- [19] 王国政,张 黎,郭子炘,等. 基于雷电物理的风机叶片动态击距 与电气几何模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6427-6436. WANG Guozheng, ZHANG Li, GUO Zixin, et al. Dynamic striking distance and electrical geometry model of wind turbine blades based on lightning physics[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6427-6436.
- [20] ISHII M, SAITO M, NATSUNO D, et al. Lightning incidence on wind turbines in winter[C]//2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China: IEEE, 2014: 1734-1738.
- [21] MIKI M, MIKI T, WADA A, et al. Observation of lightning flashes to wind turbines[C]//2010 30th International Conference on Lightning

Protection (ICLP). Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 1-7.

- [22] 邓治强,王 羽,文习山,等.不同间隙尺度下叶片旋转对风力发电机引雷能力影响的试验研究[J].中国电机工程学报,2020,40(19): 6399-6410.
  DENG Yeqiang, WANG Yu, WEN Xishan, et al. Experiment of blade rotation on lightning strikes of wind turbines at different gap scales[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6399-6410.
- [23] 屈 路, 文习山, 王 羽, 等. 接闪器对旋转风机引雷能力影响的 试验研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1628-1634.
   QU Lu, WEN Xishan, WANG Yu, et al. Experimental study on the influence of the air terminal on triggered lightning ability of rotation wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1628-1634.
- [24] 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.
- [25] ALONSO M A, IRASTORZA D C. Dynamic wind turbine lightning protection behavior under storm conditions[C] // Proceedings of the 2008 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Uppsala, Sweden: IEEE, 2008: 1-6.
- [26] MONTANYÀ J, VAN DER VELDE O, WILLIAMS E R. Lightning discharges produced by wind turbines[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(3): 1455-1462.
- [27] QU L, WANG Y, LIU G, et al. Simulation study on positive corona discharge of receptors on rotating wind turbine blade tips under thundercloud electric fields[J]. Energies, 2019, 12(24): 4696.
- [28] YAN J Y, LI Q M, GUO Z X, et al. Puncture position on wind turbine blades and arc path evolution under lightning strikes[J]. Materials & Design, 2017, 122: 197-205.
- [29] 闫江燕,马宇飞,于万水,等. 大型风机叶片雷击多通道电弧气爆 损伤的实验[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3569-3577. YAN Jiangyan, MA Yufei, YU Wanshui, et al. Experimental study on mechanical gas burst damage characteristics of the wind turbine blades caused by lightning induced multiple arc paths[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3569-3577.
- [30] FERABOLI P, MILLER M. Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(6/7): 954-967.
- [31] ARINAGA S, TSUTSUMI K, MURATA N, et al. Experimental study on lightning protection methods for wind turbine blades[C] // Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Kanazawa, Japan: IEEE, 2006: 1-4.
- [32] ZHANG M H, LI Q M, LI H B, et al. Damage mechanism of wind turbine blade under the impact of lightning induced arcs[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(5): 053306.
- [33] ZHANG X Q, ZHANG Y Z, LIU C H. A complete model of wind turbines for lightning transient analysis[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(1): 013113.
- [34] 张 萍,吴显腾,赵新贺,等. 基于 ATP-EMTP 的海上风机雷电 暂态分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4266-4273.
  ZHANG Ping, WU Xianteng, ZHAO Xinhe, et al. Lightning transient analysis of offshore wind turbine based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4266-4273.
- [35] 陈怀飞,王 宇,孙 通,等.风机回击电磁场波形特征及辐射增强效应研究[J].高电压技术,2020,46(6):2122-2130.
   CHEN Huaifei, WANG Yu, SUN Tong, et al. Study on waveform characteristics and radiation enhancement effect of lightning return

stroke initiated from wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2122-2130.

- [36] AMETANI A, YAMAMOTO K. A study of transient magnetic fields in a wind turbine nacelle[C]//2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing, China: IEEE, 2010: 1201-1204.
- [37] WU X H, ZHANG X Q. Modelling and simulation of lightning transients in wind turbine grounding systems[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 1805-1808.
- [38] MARKOVSKI B, GRCEV L, ARNAUTOVSKI-TOSEVA V. Transient characteristics of wind turbine grounding[C]//2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-6.
- [39] AHMED M R, ISHII M. Effectiveness of interconnection of wind turbine grounding influenced by interconnection wire[C]//2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-6.
- [40] 陶世祺,张小青,王耀武,等. 直接雷击时风电机组的暂态响应分析[J]. 太阳能学报,2017,38(10): 2675-2682.
  TAO Shiqi, ZHANG Xiaoqing, WANG Yaowu, et al. Analysis of transient responses on wind turbines during direct lightning strike[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2675-2682.
- [41] 王国政,张 黎,吴 昊,等. 海上风机一体化电磁暂态模型与雷 电暂态过电压研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 32-38.
  WANG Guozheng, ZHANG Li, WU Hao, et al. Electromagnetic transient integration model and transient overvoltage study of offshore wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 32-38.
- [42] MARCH V. Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 159: 50-57.
- [43] CHEN H F, CHEN W J, WANG Y, et al. Analysis of the cloud-to-ground lightning characteristics before and after installation of the coastal and inland wind farms in China[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 190: 106835.
- [44] BECERRA M, LONG M N, SCHULZ W, et al. On the estimation of the lightning incidence to offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 157: 211-226.
- [45] 黄胜鑫,陈维江,贺恒鑫,等.风力发电机组下行雷击风险计算方法[J].中国电机工程学报,2019,39(12):3541-3550.
  HUANG Shengxin, CHEN Weijiang, HE Hengxin, et al. Downward lightning risk assessment method associated with wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3541-3550.
- [46] YOKOYAMA S. Lightning protection of wind turbine blades[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 94: 3-9.
- [47] 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):653-662,696.
  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, 696.
- [48] CHRISTENSEN P, PAULSEN J L, THØGERSEN M L, et al. Pålidelighedsmodel for havvindmølleparker[M]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2002.
- [49] Wind turbine generator systems—part 24: lightning protection: IEC 61400-24: 2002[S], 2002.
- [50] YOKOYAMA S. Lightning protection of wind turbine generation systems[C] // 2011 7th Asia-Pacific International Conference on

Lightning. Chengdu, China: IEEE, 2011: 941-947.

- [51] MINOWA M, ITO K, SUMI S I, et al. A study of lightning protection for wind turbine blade by using creeping discharge characteristics[C] // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-4.

HE Tianyu, CHEN Weijiang, HE Hengxin, et al. Research on the performance of the lightning protection system with overlying conductors on the tip of the wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5316-5325.

- [53] ABD-ELHADY A M, SABIHA N A, IZZULARAB M A. Experimental evaluation of air-termination systems for wind turbine blades[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 107: 133-143.
- [54] ILINCA A. Analysis and mitigation of icing effects on wind turbines[M]. Rijeka, Croatia: InTech, 2011.
- [55] LAAKSO T, BARING-GOULD I, DURSTEWITZ M, et al. State-of-the-art of wind energy in cold climates[M]. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2010.
- [56] FAKOREDE O, FEGER Z, IBRAHIM H, et al. Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 662-675.
- [57] SAGOL E, REGGIO M, ILINCA A. Issues concerning roughness on wind turbine blades[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23: 514-525.
- [58] SABATIER J, LANUSSE P, FEYTOUT B, et al. CRONE control based anti-icing/deicing system for wind turbine blades[J]. Control Engineering Practice, 2016, 56: 200-209.
- [59] HU L Q, ZHU X C, HU C X, et al. Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions[J]. Renewable Energy, 2017, 113: 608-619.
- [60] BISWAS S, TAYLOR P, SALMON J. A model of ice throw trajectories from wind turbines[J]. Wind Energy, 2012, 15(7): 889-901.
- [61] KARMOUCH R, COUDÉ S, ABEL G, et al. Icephobic PTFE coatings for wind turbines operating in cold climate conditions[C] // 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [62] 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].高电压技术,2019,45(1):167-172.
  JIANG Xingliang, ZHOU Hongyu, HE Kai, et al. Anti-icing performance degradation for wind blades with superhydrophobic coatings[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1):167-172.
- [63] MAISSAN J F. Wind power development in sub-arctic conditions with severe rime icing[J]. Northern Review, 2001(24): 174-183.
- [64] LAMRAOUI F, FORTIN G, BENOIT R, et al. Atmospheric icing impact on wind turbine production[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 100: 36-49.
- [65] 舒立春,邱 刚,胡 琴,等.风力发电机叶片临界除冰功率的数 值计算模型及自然环境实验研究[J].中国电机工程学报,2018, 38(13): 3997-4003,4041.
  SHU Lichun, QIU Gang, HU Qin, et al. Numerical model and field experimental investigation of threshold heat flux of wind turbine de-icing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3997-4003,4041.
- [66] MAYER C, ILINCA A, FORTIN G, et al. Wind tunnel study of electro-thermal de-icing of wind turbine blades[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2007, 17(3): 182-188.
- [67] HABIBI H, EDWARDS G, SANNASSY C, et al. Modelling and em-

pirical development of an anti/de-icing approach for wind turbine blades through superposition of different types of vibration[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 128: 1-12.

- [68] CHAPIN D M, FULLER C S, PEARSON G L. A new silicon *p*-*n* junction photocell for converting solar radiation into electrical power[J]. Journal of Applied Physics, 1954, 25(5): 676-677.
- [69] TANG C W. Two-layer organic photovoltaic cell[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48(2): 183-185.
- [70] O'REGAN B, GRÄTZEL M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films[J]. Nature, 1991, 353(6346): 737-740.
- [71] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [72] 马小龙. 光伏面板积尘特性及高效除尘方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2015.
  MA Xiaolong. Study of photovoltaic panels' dust accumulation characteristics and efficient dust removal method[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University of Technology, 2015.
- [73] ELMINIR H K, GHITAS A E, HAMID R H, et al. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18/19): 3192-3203.
- [74] 陈菊芳, 沈 辉, 李军勇, 等. 广州地区空气洁净度对光伏电站的 影响[J]. 太阳能学报, 2011, 32(4): 481-485.
  CHEN Jufang, SHEN Hui, LI Junyong, et al. The effects of air cleanliness on the PV system in Guangzhou[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(4): 481-485.
- [75] CANO J, JOHN J J, TATAPUDI S, et al. Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules[C] // 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Denver, USA: IEEE, 2014: 3174-3176.
- [76] MANI M, PILLAI R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3124-3131.
- [77] BEATTIE N S, MOIR R S, CHACKO C, et al. Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 448-452.
- [78] SULAIMAN S A, HUSSAIN H H, LEH N S H N, et al. Effects of dust on the performance of PV panels[J]. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2011, 5(10): 2021-2026.
- [79] KALDELLIS J K, KAPSALI M. Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements[J]. Energy, 2011, 36(8): 5154-5161.
- [80] 居发礼. 积灰对光伏发电工程的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

JU Fali. Study on the effect of photovoltaic power generation project by dust[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2010.

- [81] GARG H P. Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors[J]. Solar Energy, 1974, 15(4): 299-302.
- [82] 宁会峰,程荣展,王伟志,等. 积灰对光伏发电的影响及除尘效果 实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 120-125.
  NING Huifeng, CHENG Rongzhan, WANG Weizhi, et al. Experimental study on influence of dust accumulation on photovoltaic power generation and dust removal effect[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(11): 120-125.
- [83] FATHI M, ABDERREZEK M, FRIEDRICH M. Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2017, 19(2): 577-585.
- [84] ABDERREZEK M, FATHI M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield[J]. Solar Energy, 2017, 142:

308-320.

[85] 孟广双. 荒漠光伏太阳能电池板表面灰尘作用机理及其清洁方法研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015. MENG Guangshuang. Research on mechanism of dust particle adhedust particle adhedu

sion and removal from solar panel surface in desert area[D]. Xining, China: Qinghai University, 2015.

- [86] SAYYAH A, HORENSTEIN M N, MAZUMDER M K. A comprehensive analysis of the electric field distribution in an electrodynamic screen[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 76: 115-126.
- [87] 陈东兵,李达新,时 剑,等. 光伏组件表面积尘及立杆阴影对电站发电功率影响的测试分析[J]. 太阳能, 2011(9): 39-41.
  CHEN Dongbing, LI Daxin, SHI Jian, et al. Measurement and analysis for effect of PV module surface dust and pole shadow in the PV field[J]. Solar Energy, 2011(9): 39-41.
- [88] 张 风,白建波,郝玉哲,等. 光伏组件表面积灰对其发电性能的 影响[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 82-86. ZHANG Feng, BAI Jianbo, HAO Yuzhe, et al. Effect of airborne dust deposition on PV module surface on its power generation performance[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(10): 82-86.
- [89] 韩 涛,龚恒翔,周康渠,等.国内光伏组件除尘专利技术比较研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(8):65-69,77.
  HAN Tao, GONG Hengxiang, ZHOU Kangqu, et al. Comparative study on domestic photovoltaic module removal patent technology[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2015,29(8):65-69,77.
- [90] 巫 江,龚恒翔,朱新才,等. 光伏组件自动除尘装置设计与研究
  [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(3): 92-97.
  WU Jiang, GONG Hengxiang, ZHU Xincai, et al. Design and research of photovoltaic module automatic dust removal device[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(3): 92-97.
- [91] 龚恒翔,韩 涛,周康渠,等.一款外置机械式光伏组件除尘装置 除尘性能测试[J].河北师范大学学报(自然科学版),2015,39(6): 504-507.

GONG Hengxiang, HAN Tao, ZHOU Kangqu, et al. Performance testing of an external mechanical solar PV modules dust-removal device[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2015, 39(6): 504-507.

- [92] 沈铖玮,杭鲁滨,卞怀强,等. 面向光伏板清洗的单轨行走式机器 人清洗器位姿研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(24): 3301-3306. SHEN Chengwei, HANG Lubin, BIAN Huaiqiang, et al. Research on position and gesture of cleaner of monorail tracked robot for clean of solar panel[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(24): 3301-3306.
- [93] 王海峰,李凤婷,贾言争,等. 适用于大规模光伏阵列的无水清扫机器人[J]. 可再生能源, 2015, 33(10): 1439-1444.
  WANG Haifeng, LI Fengting, JIA Yanzheng, et al. A waterless cleaning robot for large-scale PV array[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(10): 1439-1444.
- [94] 李 昂. 光伏清洁机器人的设计与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

LI Ang. Design and analysis of sloar-cleaning robot[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

- [95] 顾曙光. 一种太阳能电池板全天候移动清洗装置的研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
   GU Shuguang. The research and manufacture of a solar-panel-cleaning track robot[D]. Suzhou, China: Soochow University, 2015.
- [96] 付 锦. 光伏电池板清洁机器人的设计与实现[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.

FU Jin. Design and realization of a photovoltaic panel cleaning robot[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

- [97] GANESH V A, RAUT H K, NAIR A S, et al. A review on self-cleaning coatings[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(41): 16304-16322.
- [98] 郑建勇,钟明强,冯 杰. 基于超疏水原理的自清洁表面研究进展 及产业化状况[J]. 化工进展, 2010, 29(2): 281-284, 288. ZHENG Jianyong, ZHONG Mingqiang, FENG Jie. Research progress and industrialization status of superhydrophobic self-cleaning surfaces[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(2): 281-284, 288.
- [99] PRATIWI N, ZULHADJRI, ARIEF S, et al. Self-cleaning material based on superhydrophobic coatings through an environmentally friendly sol–gel method[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2020, 96(3): 669-678.
- [100] CLARK P E, CURTIS S A, MINETTO F A, et al. Finding a dust mitigation strategy that works on the lunar surface[C]//38th Lunar and Planetary Science Conference. Texas, USA: Lunar and Planetary Institute, 2007: 1175-1176.
- [101] 袁亚飞,刘 民,杨亦强. 火星太阳电池翼除尘方法综述[J]. 航天 器环境工程,2010,27(5): 604-606.
  YUAN Yafei, LIU Min, YANG Yiqiang. Dust removal techniques for Mars solar arrays[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(5): 604-606.
- [102] HORENSTEIN M N, MAZUMDER M K, SUMNER R C, et al. Modeling of trajectories in an electrodynamic screen for obtaining maximum particle removal efficiency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 707-713.
- [103] SAYYAH A, HORENSTEIN M N, MAZUMDER M K, et al. Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen[J]. Journal of Electrostatics, 2016, 81: 24-36.
- [104] 徐 晨. 太阳电池组件用封装材料的制备研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
   XU Chen. Study on the preparation of cover materials and their application on solar cell modules[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University. 2013
- [105] MA Y Z, WANG S F, ZHENG L L, et al. Recent research developments of perovskite solar cells[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2014, 32(10): 957-963.
- [106] FROST J M, BUTLER K T, BRIVIO F, et al. Atomistic origins of high-performance in hybrid halide perovskite solar cells[J]. Nano Letters, 2014, 14(5): 2584-2590.
- [107] HABISREUTINGER S N, LEIJTENS T, EPERON G E, et al. Carbon nanotube/polymer composites as a highly stable hole collection layer in perovskite solar cells[J]. Nano Letters, 2014, 14(10): 5561-5568.
- [108] KE J C R, WALTON A S, LEWIS D J, et al. In situ investigation of degradation at organometal halide perovskite surfaces by X-ray photoelectron spectroscopy at realistic water vapour pressure[J]. Chemical Communications, 2017, 53(37): 5231-5234.
- [109] JUAREZ-PEREZ E J, ONO L K, MAEDA M, et al. Photodecomposition and thermal decomposition in methylammonium halide lead perovskites and inferred design principles to increase photovoltaic device stability[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(20): 9604-9612.
- [110] MATTEOCCI F, CINÀ L, LAMANNA E, et al. Encapsulation for long-term stability enhancement of perovskite solar cells[J]. Nano Energy, 2016, 30: 162-172.
- [111] WANG S H, JIANG Y, JUAREZ-PEREZ E J, et al. Accelerated deg-

radation of methylammonium lead iodide perovskites induced by exposure to iodine vapour[J]. Nature Energy, 2017, 2(1): 16195.

- [112] NIU G D, GUO X D, WANG L D. Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(17): 8970-8980.
- [113] TRIPATHI N, YANAGIDA M, SHIRAI Y, et al. Hysteresis-free and highly stable perovskite solar cells produced via a chlorine-mediated interdiffusion method[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(22): 12081-12088.
- [114] CHEN W, WU Y Z, YUE Y F, et al. Efficient and stable large-area perovskite solar cells with inorganic charge extraction layers[J]. Science, 2015, 350(6263): 944-948.
- [115] RAMOS F J, MAINDRON T, BÉCHU S, et al. Versatile perovskite solar cell encapsulation by low-temperature ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with long-term stability improvement[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(11): 2468-2479.
- [116] CHEACHAROEN R, BOYD C C, BURKHARD G F, et al. Encapsulating perovskite solar cells to withstand damp heat and thermal cycling[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(11): 2398-2406.
- [117] SHI L, BUCKNALL M P, YOUNG T L, et al. Gas chromatography-mass spectrometry analyses of encapsulated stable perovskite solar cells[J]. Science, 2020, 368(6497): eaba2412.
- [118] LI X, ZHANG F, HE H Y, et al. On-device lead sequestration for perovskite solar cells[J]. Nature, 2020, 578(7796): 555-558.
- [119] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2012 年全国风电设备运行 质量调查概述[J]. 风能, 2013(9): 36-44.
  Wind Energy Association of China Renewable Energy Society. Overview of the national wind power equipment operational quality survey in 2012[J]. Wind Energy, 2013(9): 36-44.
- [120] 陈维江,何天宇,边 凯,等.风机叶片雷击损伤及防护研究进展综述[J].高电压技术,2019,45(9):2782-2796.
  CHEN Weijiang, HE Tianyu, BIAN Kai, et al. Review of research progress in lightning damage and protection of wind turbine blades[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9):2782-2796.
- [121] YASUDA Y, YOKOYAMA S, IDENO M, et al. Classification of lightning damage to wind turbine blades[C]//2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012: 1-6.
- [122] 桂 勇,韩勤锴,李 峥,等.风机行星齿轮系统齿轮裂纹故障诊断[J].振动、测试与诊断,2016,36(1):169-175,205.
  GUI Yong, HAN Qinkai, LI Zheng, et al. The fault diagnosis of cracks in the planetary gear system of wind turbine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(1):169-175, 205.
- [123] YAZIDI A, CAPOLINO G A, FILIPPETTI F, et al. A new monitoring system for wind turbines with doubly-fed induction generators[C]//MELECON 2006 -2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Malaga, Spain: IEEE, 2006: 1142-1145.
- [124] IBARAKI S, SURYANARAYANAN S, TOMIZUKA M. Design of Luenberger state observers using fixed-structure H/sub /spl infin// optimization and its application to fault detection in lane-keeping control of automated vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(1): 34-42.
- [125] 贾庆贤,张迎春,管 宇,等. 基于解析模型的非线性系统故障诊断方法综述[J]. 信息与控制, 2012, 41(3): 356-364.
  JIA Qingxian, ZHANG Yingchun, GUAN Yu, et al. Fault diagnosis of nonlinear systems based on analytical models: a survey[J]. Information and Control, 2012, 41(3): 356-364.
- [126] 王元章,李智华,吴春华,等. 基于 BP 神经网络的光伏组件在线 故障诊断[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2094-2100.

WANG Yuanzhang, LI Zhihua, WU Chunhua, et al. A survey of online fault diagnosis for PV module based on BP neural network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2094-2100.

- [127] 郭东杰,王灵梅,郭红龙,等.改进小波结合 BP 网络的风力发电机故障诊断[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(2):53-58.
  GUO Dongjie, WANG Lingmei, GUO Honglong, et al. Fault diagnosis of wind power generator based on improved wavelet and BP NN[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2):53-58.
- [128] ADOUNI A, CHARIAG D, DIALLO D, et al. FDI based on artificial neural network for low-voltage-ride-through in DFIG-based wind turbine[J]. ISA Transactions, 2016, 64: 353-364.
- [129] WANG X Y. Fault diagnosis on transmission system of wind turbines based on wavelet packet transform and RBF neural networks[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 373/375: 1102-1105.
- [130] CHEN X. Fault diagnosis of high power grid wind turbine based on particle swarm optimization BP neural network during COVID-19 epidemic period[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 39(6): 9027-9035.
- [131] WANG H Z, PENG A Q, WANG X L. A fast fault diagnosis method for wind turbine generator system based on rough set-decision tree[C]//2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC). Deng Feng, China: IEEE, 2011: 3630-3633.
- [132] LI X L, YAO W Y, ZHOU Q J, et al. Fault diagnosis of wind turbine based on rough set and BP network[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation ICMRA. Shenzhen, China: Atlantis Press, 2015: 877-883.
- [133] 沈艳霞,周文晶,纪志成,等. 基于小波包与 SVM 的风电变流器 故障诊断[J]. 太阳能学报, 2015, 36(4): 785-791.
  SHEN Yanxia, ZHOU Wenjing, JI Zhicheng, et al. Fault diagnosis of converter used in wind power generation based on wavelet packet analysis and SVM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(4): 785-791.
- [134] WANG T Z, QI J, XU H, et al. Fault diagnosis method based on FFT-RPCA-SVM for cascaded-multilevel inverter[J]. ISA Transactions, 2016, 60: 156-163.
- [135] 苗 锐,陈国初,李 月,等. 基于随机集含糊证据的风力发电机 故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 22-26.
  MIAO Rui, CHEN Guochu, LI Yue, et al. A wind turbine fault diagnosis method based on vague evidence of random set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 22-26.

- [136] WANG Z J, LIU S M. Study on synthesis fault diagnosis strategy of the brake system of wind turbine based on evidence theory[C]//International Conference on Applied Informatics and Communication. Xi'an, China: Springer, 2011: 18-25.
- [137] BECHKAOUI A, AMEUR A, BOURAS S, et al. Open-circuit and inter-turn short-circuit detection in PMSG for wind turbine applications using fuzzy logic[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 1323-1336.
- [138] SIMANI S, FARSONI S, CASTALDI P. Wind turbine simulator fault diagnosis via fuzzy modelling and identification techniques[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2015, 1: 45-52.
- [139] MERABET H, BAHI T, HALEM N. Condition monitoring and fault detection in wind turbine based on DFIG by the fuzzy logic[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 518-528.
- [140] 叶 进, 卢 泉, 王钰淞, 等. 基于级联随机森林的光伏故障诊断 模型研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 358-362.
  YE Jin, LU Quan, WANG Yusong, et al. Research on PV fault diagnosis model based on cascaded random forest[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(3): 358-362.



**李庆民**(通信作者) 1968一,男,博士,教授,博导 从事高电压与绝缘技术、放电物理等领域的研究 工作

E-mail: lqmeee@ncepu.edu.cn

于万水

LI Qingmin Ph.D., Professor Corresponding author



1995一,男,博士生 从事新能源发电系统雷击防护方面的研究工作 E-mail: yws@ncepu.edu.cn

YU Wanshui Ph.D. candidate

收稿日期 2021-06-30 修回日期 2021-07-03 编辑 程子丰