

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.20071117

积灰对光伏组件输出特性影响建模与分析^{*}

范思远¹, 王煜¹, 曹生现¹, 张艳辉², 刘秉政³

(1. 东北电力大学自动化工程学院 吉林 132012; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055;
3. 中核检修有限公司 上海 201103)

摘要: 灰尘沉积在光伏组件上严重影响光伏系统输出的稳定性, 导致发电量降低的同时缩短了组件的使用寿命。准确地评估光伏现场积灰浓度, 将有助提升光伏发电功率预测模型的精度。本文以光伏电站现场采集的灰尘颗粒为研究对象, 首先分析了灰尘颗粒的元素组成、含量、形貌特征和粒径分布, 根据光伏组件实际的发电效率和环境参数, 建立了积灰浓度软测量模型, 用于快速定量评估光伏电站积灰程度; 其次, 为了准确地获取模型的相关参数, 开展了多组积灰浓度影响发电性能实验, 得到了组件输出功率和辐照度、积灰浓度、组件温度的关系; 最后, 在自然条件下, 验证了模型的准确性和可靠性。对比其他传统方法, 结果表明: 本文提出的模型具有更好的预测性能, 准确率可达 89.6%。

关键词: 光伏组件; 发电特性; 积灰; 能量转换效率; 辐照度

中图分类号: TH7 TM914.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 480.6070

Effect modeling and analysis of dust accumulation on output characteristics of photovoltaic modules

Fan Siyuan¹, Wang Yu¹, Cao Shengxian¹, Zhang Yanhui², Liu Bingzheng³

(1. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;
3. China Nuclear Industry Maintenance Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: Dust deposition on photovoltaic (PV) modules seriously affects the stability of PV system output, resulting in the reduction of generated power and shortening the service life of the PV modules. The accurate assessment of dust accumulation concentration in the PV field will help to improve the accuracy of the power prediction model of PV power generation. In this paper, the dust particles collected in PV power station are taken as the research object. Firstly, the elemental composition, content, morphological characteristic and particle diameter distribution of the dust particles are analyzed. According to the actual power generation efficiency of PV modules and environment parameters, a soft measurement model of dust accumulation concentration is established to rapidly evaluate dust accumulation degree of PV power station. Secondly, in order to accurately obtain the relevant parameters of the model, several experiments on the influence of dust accumulation concentration on power generation performance are carried out to obtain the relationship between the output power of PV modules and irradiance, dust accumulation concentration, as well as module temperature. Finally, the accuracy and reliability of the model are verified in natural conditions. The results show that compared with other traditional methods the proposed model has better prediction performance, and the accuracy can reach 89.6%.

Keywords: photovoltaic module; power generation characteristic; dust accumulation; energy conversion efficiency; irradiance

收稿日期: 2020-11-14 Received Date: 2020-11-14

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1500800)、吉林省科技发展规划 (20190302079GX)、国家电网有限公司科技项目 (SGTJDK00DYJS2000148) 资助

0 引 言

由于传统化石能源储备不足,同时燃烧产生的气体会对生态系统造成巨大的影响。太阳能作为一种新型可再生能源,因其清洁、无污染等优点已被广泛应用^[1]。然而,光伏发电系统往往会受到环境因素的影响,其输出功率的随机性、间歇性和波动性会给电力系统的安全稳定运行带来巨大的威胁,目前主要通过对发电功率预测来减缓这种不良影响。王雨等^[2]结合辐照、湿度、温度提出了一种基于卡尔曼滤波和反向传播(back propagation, BP)神经网络的短期发电功率预测模型;李练兵等^[3]根据青海某光伏电站的历史光伏发电功率数据和当地的气象预报信息,提出了一种基于 Elman 神经网络的光伏阵列短期功率预测模型;杨超颖等^[4]利用小波神经网络建立了不同季节的光伏发电功率短期预测模型。这些预测模型都需要充分考虑影响光伏组件输出功率的主要因素,如辐照度、温度和积灰浓度。相对于其他可直接测量的参数,积灰浓度通常是由运维人员经验判断或直接观测所得,精准性与实时性较差,难以满足功率预测模型的要求。因此,开展灰尘颗粒沉积对光伏组件输出性能影响研究,获得实时积灰浓度信息,对提升光伏功率预测精度和系统输出稳定性具有重要意义。

国内外研究学者针对光伏组件灰尘沉积特性开展了相关研究,主要集中在研究积灰特性(类型、粒径)、积灰时间、积灰浓度与光伏组件输出功率之间的关系^[5-11]。孟伟君等^[12]对某光伏电站开展了三个月数据监测发现,在没有降雨的情况下,由于积灰原因减少的光伏电站发电量约为 22%;王胜捷等^[13]通过实验研究发现,当积灰浓度为 2.75、4.59、5.86 g/m² 时,分别导致光伏组件日平均总透射衰减率减少 1.29%、3.42%、4.71%;官燕玲等^[14]开展了积灰浓度与光伏组件透光率的研究,发现在严重雾霾环境下,自然积灰 8 天能使光伏组件透光率减小约 20%;朴在林等^[15]开展了不同积灰浓度的透光率实验研究,结果表明,光伏组件的透光率、输出功率和光电转换效率随积灰浓度的增加而减少,而在相同积灰浓度条件,随光照幅度的增加,光伏组件的透光率也会略有增加;Jiang 等^[16]利用室内阳光模拟器开展了积灰对光伏组件性能影响实验,当积灰浓度达到 22 g/m² 时,光伏组件的转换效率降低约 26%,在浓度较低时,转换效率会随积灰浓度增加而降低地更快。

在分析积灰对光伏组件发电性能(输出功率、转换效率、透光率等)影响的基础上,一些研究学者尝试建立相应积灰浓度与能量转换效率关系模型^[17-19]。Klugmann^[20]在波兰地区开展了光伏组件自然积灰实验,结果表明光电转换效率与积灰厚度之间存在线性关系,每微米厚度的灰尘可使光伏组件的转换效率减少

25.5%;徐志明等^[21]对新疆 20 MW 光伏电站积灰损耗数据进行分析,得到了光伏电站的积灰损耗和时间呈线性增长关系;赵波等^[22]对吉林某光伏电站的发电数据进行分析,提出了积灰时间与光伏组件转换效率的渐近型时变特性模型;李练兵等^[23]分析了天津地区光伏组件积灰特性影响,结果表明,自然积灰会降低光伏组件年均发电效率约 6%,并建立了积灰浓度与光伏组件输出关系的数学模型;杨亚林等^[24]提出了一种基于遮挡效果相同的等效粒径概念,建立了光伏组件输出功率减少率、积灰浓度和等效粒径的关系模型,验证模型的 R^2 为 0.986。

综上所述,大量学者研究积灰对光伏系统发电量损失影响并建立相关理论模型,而如何构建光伏现场简单实用的积灰预测模型变成了一个值得探讨的问题。本文采用理论分析结合实验测量的方法,建立积灰浓度、环境参数与光伏组件输出功率的非线性耦合模型。首先,利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)和能谱仪(energy dispersive spectroscopy, EDS)对现场灰尘颗粒的元素组成、形貌及粒径分布进行分析;其次,设计积灰浓度发电性能影响实验,研究不同辐照度、积灰浓度、组件温度与输出功率的关系;为了获得不同积灰浓度的光伏组件样本和准确的积灰浓度信息,给出了一套光伏组件覆灰流程和积灰均匀性误差评价方法;最后,在自然积灰条件下,开展模型的性能评价实验,验证模型的准确性。本文所提出的积灰预测模型能够对光伏现场的积灰程度进行量化分析,为建设全信息化感知的光伏电站运维技术提供理论支持。

1 积灰与发电效率模型

光伏组件表面沉积的灰尘颗粒会直接减少组件的实际输出功率,是影响能量转换效率的主要因素。光伏组件的能量转换效率 η 定义为:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{U \cdot I}{G \cdot S} \quad (1)$$

其中, P_{in} 表示理想情况光伏组件接收的阳光能量, W ; P_{out} 表示光伏组件实际输出功率, W ; G 为单位面积辐照度, W/m^2 ; S 为光伏组件面积, m^2 。

而光伏系统的发电量会随能量转换效率减少而降低,光伏组件的发电量取决于输出功率和发电时间,可以表示为:

$$W = P_{\text{out}} \cdot t \quad (2)$$

光伏组件的输出功率常受辐照度、积灰浓度和组件温度等因素影响,发电量会随环境的改变而变化。而由式(2)可知,光伏组件的实际发电量与时间呈线性关系,单位时间内发电量由输出功率所决定。那么,可以定义发电量 W 与时间 t 的夹角为能量输出角 θ ,表示为:

$$\theta = \arctan \frac{W}{10 \cdot \Delta t} \quad (3)$$

其中, Δt 为发电时间段, W 为 Δt 时间内的发电量, 为提升角度之间的差异, 我们将组件的输出能量缩小 10 倍。当组件所处的发电环境不同, 能量输出角就会存在一定差异。因此, 将通过实验方法来探究辐照度、组件温度、积灰浓度与能量输出角 θ 的关系。在此基础上, 我们建立了积灰浓度与能量输出角 θ 的一般指数关系:

$$\theta(c) = \alpha \cdot e^{\beta \cdot c} \quad (4)$$

其中, 定义 c 为积灰浓度, g/m^2 ; 定义 α 为截距系数; 定义 β 为曲率系数。将式(4)代入式(3)中, 能够得到发电量与积灰浓度的关系为:

$$W = 10 \Delta t \cdot \tan(\alpha \cdot e^{\beta \cdot c}) \quad (5)$$

那么, 光伏组件的能量转换效率和积灰浓度关系可以表示为:

$$\eta = \frac{10 \cdot \tan[\alpha \cdot e^{\beta \cdot c}]}{g \cdot S} \quad (6)$$

通过开展多组不同积灰浓度影响性能发电实验, 利用数据拟合方法获得截距系数 α 和曲率系数 β 。

2 实验与方法

为保证实验与实际光伏现场积灰特性一致, 对采集的光伏现场积灰进行分析, 获得元素组成、含量、形貌特征和粒径分布等参数。同时, 给出一种实验积灰浓度软测量方法, 准确地表示覆灰实验完成时光伏组件积灰浓度信息。

2.1 灰尘特性分析

采集的现场积灰来源吉林省西部某光伏电站, 位于火电煤粉灰厂附近, 设计年平均利用数 1 315 h, 太阳能辐射资源充沛, 光伏组件积灰污染物组成相对复杂, 主要是工业排放物、燃烧烟尘和土壤扬尘等。

首先, 利用 EDS 测试灰尘颗粒的组成元素, 结果如图 1 和表 1 所示。由图 1 可知, 灰尘颗粒主要由氧、硅、铝、碳、钙等元素组成, 其中重量百分比超过 10% 的有 3 种元素, 含量最多的是氧, 占 43.89%, 其次是硅, 占 29.41%, 最少的是碳, 占 13.41%; 超过 1% 的元素有铁、铝、钙, 还存在少量的镁和微量的钾。通过对比发现, 光伏现场灰尘颗粒的组成与组件周围的土壤成分相似, 其中还含有少量的碳和钙元素, 说明还存在部分工业排放物。

其次, 利用 SEM 和 XRD 对灰尘颗粒的微观形貌和粒径分布做进一步分析, 结果如图 2 所示。通过观察图像可知, 现场积灰为分散的块状颗粒, 表面粗糙无规则, 具有较差的透光性。而单个颗粒的尺寸较小, 粒径分布范围大, 在 0.389~200 μm 之间, 主要集中在 45 μm 。其中, 粒径大于 30 μm 的超过 50%, 总体呈正太分布。

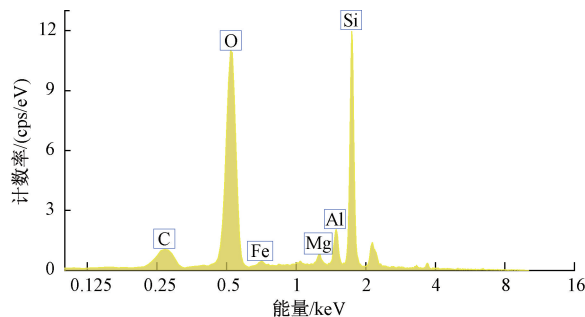


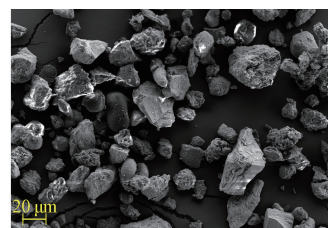
图 1 灰尘颗粒成分与含量

Fig. 1 Composition and content of dust particles

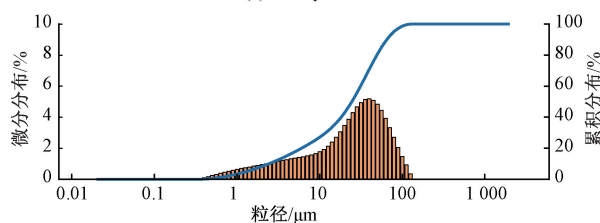
表 1 灰尘颗粒中各元素占比

Table 1 The percentage of each element in dust particles

元素	线类型	重量百分比/%	原子百分比/%
O	K 线系	43.89	52.04
Al	K 线系	4.05	2.85
Si	K 线系	29.41	19.86
Mg	K 线系	1.04	0.81
Ca	K 线系	2.64	1.25
K	K 线系	0.83	0.40
Fe	K 线系	4.72	1.60
C	K 线系	13.42	21.19



(a) 电镜图
(a) SEM photo



(b) 粒径分布
(b) Particle diameter distribution

图 2 灰尘颗粒的形貌与粒径

Fig. 2 Morphology and particle diameter of dust particles

2.2 覆灰流程

在分析现场灰尘特性后, 使用不同质量的灰尘颗粒覆于光伏组件表面, 以获得不同积灰浓度的组件。为保证实验结果的可靠性, 我们设计了一套模拟自然沉降的覆灰流程, 并建立了光伏发电性能测试平台, 分别记录辐照度、积灰浓度、组件温度和输出功率。具体覆灰流程如下:

1) 将光伏板正面朝上平铺在覆灰罩中央, 将 4 块与光伏组件表面玻璃材质相同的参比玻璃片等高放置在光伏组件四周如图 3 所示;

2) 将灰尘颗粒放置于粉尘扩散器上, 使用风机持续送风将灰尘颗粒吹入密闭的覆灰罩内, 直到灰尘颗粒在密闭空间中完全扬起时停止;

3) 静置 6 h, 使用空气加湿器在光伏板面上循环加湿;

4) 使用镊子夹取积灰后的玻璃片, 采用 Sartorius BT 125D 电子天平称重, 对积灰后的光伏组件进行编号并记录重量。

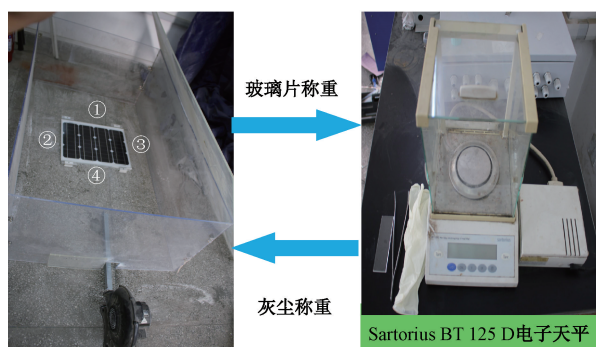


图 3 覆灰流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dust covering process

在覆灰过程中, 分别记录积灰前参比玻璃片重量 M_{qi} 和积灰后参比玻璃片重量 M_{ji} , 每块参比玻璃片的重量差值为实际的积灰重量:

$$\Delta M_i = M_{ji} - M_{qi} \quad (7)$$

已知参比玻璃片的尺寸 150 mm×20 mm×3mm。那么, 4 块参比玻璃片的平均浓度:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta M_i}{4A_g} \quad (8)$$

其中, c_j 为平均浓度, A_g 为玻璃片的面积。

因此, 通过测量光伏组件四周放置的参比玻璃片实验前后重量, 利用式 (8) 计算得出四块玻璃片的平均积灰浓度, 间接表示光伏组件覆灰后实际积灰浓度。

2.3 光伏发电性能评测系统

光伏发电性能评测系统主要由气象仪、单晶组件、I-V 测试仪和实验支架等部分组成, 如图 4 所示。

不同积灰浓度影响光伏发电性能实验, 相关参数如下:

1) 实验环境: 时间 2020 年 9 月, 辐照度分别为 200、400、600、800 W/m²;

2) 组件安装形式: 考虑到吉林地区的光伏组件最佳安装方式, 与水平地面呈 41°;

3) 数据采集设备: 使用 PROVA-1011 型 I-V 曲线测试仪, 记录组件输出电压、电流、辐照度、温度等信息;

4) 实验所用的光伏组件参数, 如表 2 所示。

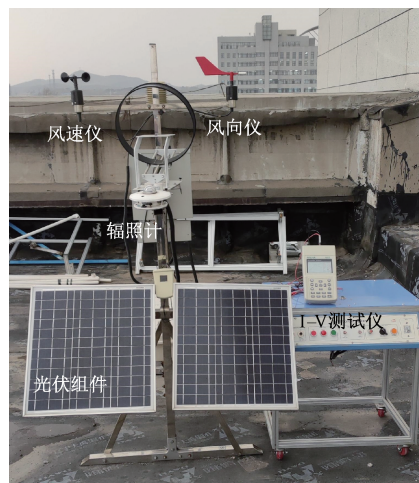


图 4 光伏发电性能评测系统

Fig. 4 PV power generation performance test and evaluation system

表 2 光伏组件的参数

Table 2 Parameters of PV modules

名称	参数
类型	单晶硅
峰值功率 (P_{max})	30 W
最大电压 (V_{mpp})	18 V
最大电流 (I_{mpp})	1.67 A
开路电压 (V_{oc})	21.6 V
短路电流 (I_{sc})	1.84 A
误差	±3%
尺寸	445 mm×540 mm×18 mm
重量	2.5 kg
测试条件	1 000 W/m ² , AM 1.5, T=25℃

3 结果与讨论

通过测量参比玻璃片的积灰浓度的平均值间接表示光伏组件的实际浓度, 本文提出了一种实验误差分析方法, 对覆灰后的光伏组件积灰均匀性进行评价。同时, 讨论了多组积灰浓度影响性能发电实验结果。

3.1 积灰组件误差分析

由于不均匀的灰尘沉积将会造成组件输出功率产生不同的结果, 在研究积灰浓度对发电性能影响之前, 需要对覆灰过程中存在的误差进行分析, 判断积灰均匀的一致性。记录的覆灰前后参比玻璃片重量, 如表 3 所示。每组含有 4 块玻璃片清洁和积灰重量, 根据式 (8) 计算得出覆灰后光伏组件的平均浓度。

为了更好地观察光伏组件积灰分布情况, 我们根据参比玻璃片的浓度构建了积灰分布热力图, 如图 5 所示。热力图与原始光伏组件位置相对应, 每组覆灰后灰尘的

表3 玻璃片质量与每组平均浓度

Table 3 The mass of glass piece and the average concentration of each group

实验 编号	样片 编号	清洁质量 M_q/g	积灰质量 M_f/g	浓度 c_i $/(g \cdot m^{-2})$	平均浓度 $c_j/(g \cdot m^{-2})$
1	1	23.323 04	23.331 75	2.90	2.82
	2	23.038 61	23.047 06	2.82	
	3	23.121 13	23.129 62	2.83	
	4	23.008 62	23.016 84	2.74	
2	1	23.323 30	23.334 12	3.61	3.48
	2	23.039 15	23.049 56	3.47	
	3	23.121 54	23.132 03	3.50	
	4	23.010 69	23.020 75	3.35	
3	1	23.322 96	23.340 12	5.72	5.57
	2	23.121 61	23.138 29	5.56	
	3	23.038 78	23.055 49	5.57	
	4	23.010 69	23.026 91	5.41	
4	1	23.323 03	23.344 96	7.31	7.12
	2	23.038 94	23.060 25	7.10	
	3	23.121 34	23.142 73	7.13	
	4	23.010 27	23.031 06	6.93	
5	1	23.323 20	23.360 55	12.45	12.09
	2	23.038 85	23.075 11	12.09	
	3	23.121 43	23.157 74	12.10	
	4	23.010 39	23.045 55	11.72	

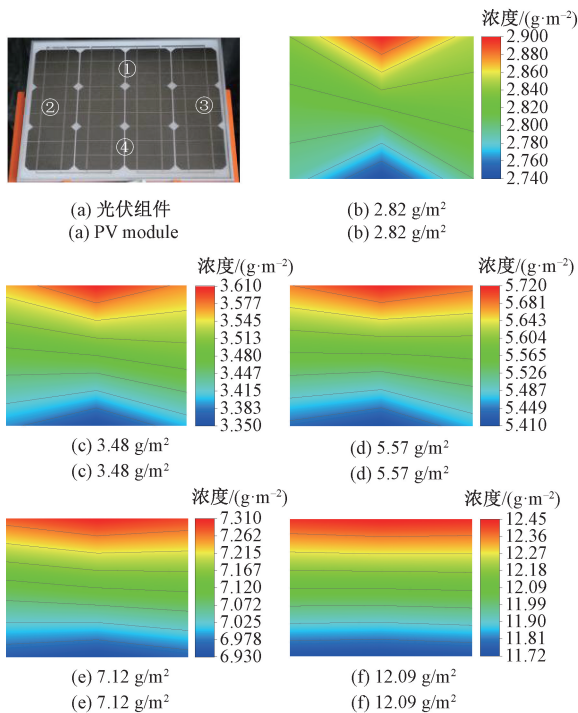


图5 光伏组件灰尘沉积分布情况

Fig. 5 Dust deposition distribution of PV modules

分布都是上多下少,这是由于风机风力惯性造成的。从图5浓度等高线可以看出,在低浓度时,中间区域浓度略大于两侧,而右侧沉积浓度略大于左侧,但随着积灰浓度的增加,光伏组件横向的沉积浓度逐渐相等。

在获得光伏组件灰尘沉积分布状态后,通过计算每组4个玻璃样片与平均浓度的偏差,能够判断组件表面灰尘的均匀性,结果如图6所示。其中,纵坐标分别表示每组4块玻璃样片浓度与平均浓度的偏差,5个区域分别代表5组不同浓度的覆灰实验。参比玻璃片编号1和编号4位置距离入尘口最远和最近,受风力惯性影响,造成这两个位置浓度偏差较高;而中间两侧样片距离入尘口位置相同,偏差较小。由图6可知,随着积灰浓度从2.82 g/m²至12.09 g/m²,参比玻璃片的偏差逐渐增大,说明积灰浓度越高,组件表面灰尘的均匀性越难保持。

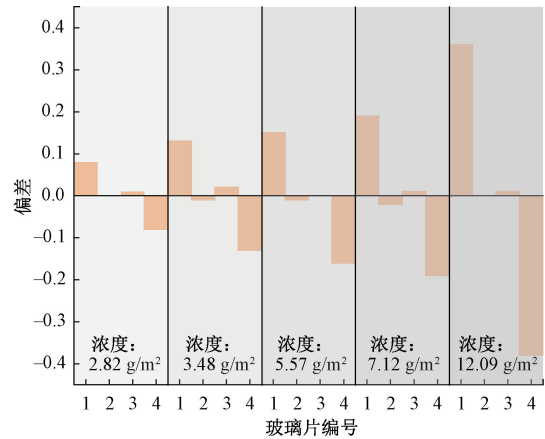


图6 不同积灰浓度的偏差

Fig. 6 Deviation of different dust accumulation concentrations

通过均方根偏差值分析覆灰实验过程中的总偏差,若允许偏差小于0.2,表示光伏组件积灰沉积均匀,则总偏差可表示为:

$$Ra = \sqrt{\frac{1}{i \cdot j} \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^4 \left[\left(\frac{M_{fji} - M_{qji}}{A_g} \right) - c_j \right]^2} \quad (9)$$

其中, j 表示实验组别的编号; i 表示对应组玻璃片的编号; c_j 表示第 j 组实验平均积灰浓度。根据式(9)计算实验总偏差 $Ra = 0.15$,表明光伏组件灰尘沉积相对均匀,能够用于发电性能实验。

3.2 积灰组件发电性能分析

当室外辐照为200、400、600、800 W/m²时,对应的组件平均温度为9、17、21、26℃,分别记录相同辐照度时,6组(5组积灰,1组清洁)光伏组件输出功率、电压、电流和组件温度等参数。绘制不同积灰浓度条件的光伏组件能量输出曲线,如图7所示。

将发电时间100 h分为4种辐照时间段,0~40 h为200 W/m²,40~70 h为400 W/m²,70~90 h为

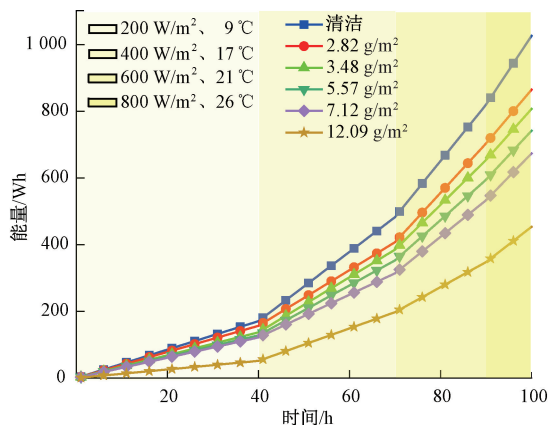


图7 光伏组件能量输出曲线

Fig. 7 Energy output curves of PV modules

600 W/m², 90~100 h 为 800 W/m²。由图 7 可知,随着辐照度增加每种光伏组件能量产出的速率也有不同程度的增加。在相同辐照度时,积灰浓度大的光伏组件产生的能量少于积灰浓度小的组件。在相同时间段内,若辐照度越大,光伏组件积灰浓度相差越大,则产生的能量差越大。

在 200 W/m² 辐照时,发电 40 h,沉积 3.48 g/m² 浓度灰尘的光伏组件比清洁时候少发电 51.6 Wh,而在最大积灰浓度 12.09 g/m² 时,产生的能量比清洁时降低了 119.2 Wh,整体性能降低了 69.8%;在 400 W/m² 辐照时,发电 30 h,沉积 3.48 g/m² 浓度灰尘的光伏组件比清洁时候少发电 63.9 Wh,而在最大浓度样本 12.09 g/m² 时,产生的能量比清洁时降低了 165.9 Wh,整体性能降低了 53.2%;在 600 W/m² 辐照时,发电 20 h,沉积 3.48 g/m² 浓度灰尘的光伏组件比清洁时候少发电 68.4 Wh,而在最大浓度样本 12.09 g/m² 时,产生的能量比清洁时降低了 187.2 Wh,整体性能降低了 55.5%;在 800 W/m² 辐照时,发电 10 h,沉积 3.48 g/m² 浓度灰尘的光伏组件比清洁时候少发电 53.4 Wh,而在最大浓度样本 12.09 g/m² 时,产生的能量比清洁时降低了 100.8 Wh,整体性能降低了 48.8%。实验结果表明,在相同时间内,辐照度越大,产能越快,斜率就越大;积灰浓度越大,产能越慢,斜率就越小。

4 模型建立与验证

根据实验结果和式(3)计算,得到了 200、400、600 和 800 W/m² 辐照时,6 个光伏组件积灰样本对应的能量输出角,如图 8 所示。

从图中可以明显看出,辐照度相同时,不同积灰浓度能量输出角之间的关系。在四种辐照度和对应组件温度的条件下,分别拟合能量输出角与积灰浓度指数关系曲线,如图 9 所示。

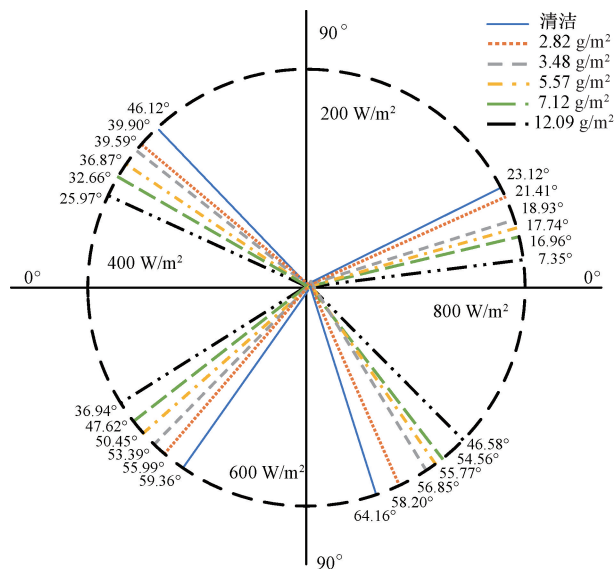


图8 能量输出角

Fig. 8 Energy output angle

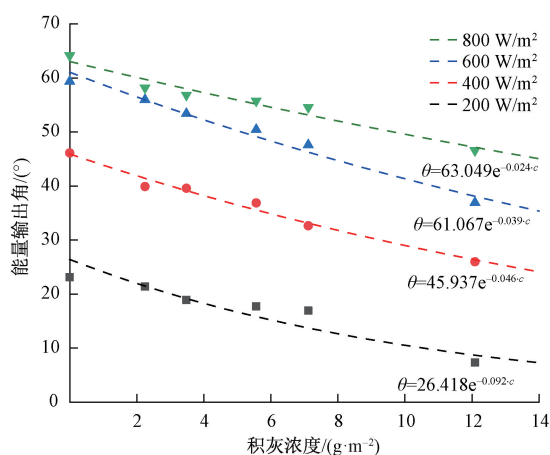


图9 能量输出角与积灰浓度关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of energy output angle vs. dust accumulation concentration

截距系数 α 由辐照强度决定,表示为:

$$\alpha = \frac{63.09}{1 + e^{-0.01(g-264.17)}} \quad (10)$$

其中, g 为实测辐照度。

其他条件不改变,辐照度不影响光伏组件的发电效率。那么,两种辐照下的关系有:

$$\eta = \frac{P_1}{G_1 \cdot S} = \frac{P_2}{G_2 \cdot S} \quad (11)$$

得到常数 Cons 为:

$$\text{Cons} = (G_1 - G_2) \cdot S \cdot \eta = P_1 - P_2 \quad (12)$$

由于积灰浓度增加,发电效率降低,Cons 减小,能量输出角差值也随着积灰浓度的增加而减小,则:

$$\theta_1 - \theta_2 = \arctan \frac{P_1}{10} - \arctan \frac{P_2}{10} \quad (13)$$

所以,在低辐照时的曲率 β_2 大于高辐照曲率 β_1 。但实际曲率系数 β 随着辐照度的减小而减小,说明辐照度减小会引起组件的温度降低,对 θ 的减小起了促进作用,通过数据计算得到曲率系数 β 与组件温度 T 的关系为:

$$\beta = 0.004T - 0.123 \quad (14)$$

可得积灰浓度与能量输出角关系为:

$$\theta(c) = \frac{63.09}{1 + e^{-0.01(g-264.17)}} \cdot e^{(0.004T-0.123) \cdot c} \quad (15)$$

发电量 W 与辐照度 g 、组件温度 T 、积灰浓度 c 和发电时间 Δt 的关系,可以表示为:

$$W = 10\Delta t \cdot \tan \left[\frac{63.09}{1 + e^{-0.01(g-264.17)}} \cdot e^{(0.004T-0.123) \cdot c} \right] \quad (16)$$

因此,光伏组件发电效率与积灰浓度的关系为:

$$\eta = \frac{10 \cdot \tan \left[\frac{63.09}{1 + e^{-0.01(g-264.17)}} \cdot e^{(0.004T-0.123) \cdot c} \right]}{g \cdot S} \quad (17)$$

为了进一步验证模型的准确性和适用性,分别进行了6组自然积灰实验。利用记录的辐照度、组件温度、发电时间和发电量,对比文献[18]和文献[25]两种方法,求得预测积灰浓度 c_p 。根据误差判别方法,并与实际浓度 c_a 进行比较,获得每组的相对误差 e ,公式可以表示为:

$$e = \frac{|c_p - c_a|}{c_a} \quad (18)$$

3种方法的积灰浓度预测结果和相对误差结果对比,如表4所示。

从表4中可以看出,本文的模型在准确性和波动性,

表4 3种方法的积灰浓度预测结果和相对误差结果

Table 4 The prediction results and relative error results of dust accumulation concentration for three methods

编号	实验记录参数					本文模型		Kaldellis ^[18]		Alnaser ^[25]	
	发电量/ Wh	发电时 间/h	辐照度/ (W·m ⁻²)	组件温 度/℃	实际浓度 C _a /(g·m ⁻²)	预测浓度 C _p /(g·m ⁻²)	相对误差 e/%	预测浓度 C _p /(g·m ⁻²)	相对误差 e/%	预测浓度 C _p /(g·m ⁻²)	相对误差 e/%
1	9.77	1	440	18	3.45	3.81	10.4	1.04	69.8	1.55	55.00
2	17.2	1	812	27	3.45	3.26	5.5	3.38	1.9	5.25	52.20
3	6.51	1	421	17	8.83	8.31	8.9	7.84	11.2	12.28	39.10
4	14.15	1	810	27	8.83	9.16	3.7	6.30	28.7	9.86	11.66
5	4.92	1	435	18	13.22	13.97	5.7	12.48	5.6	19.60	48.30
6	10.86	1	784	25	13.22	12.23	7.5	10.71	19.0	18.82	42.40

均优于其他两种方法,相对误差总体较小,最大的相对误差 e 为10.4%,准确率达89.6%, R^2 为0.978。因此,本文提出的模型具有更高地预测精度,在光伏现场能够获得更好地实际应用价值。

5 结 论

积灰是影响光伏系统稳定运行的主要因素之一,本文以光伏现场沉积灰尘颗粒为研究对象,设计了覆灰流程和发电性能测试系统,分析了辐照度、积灰、组件温度对光伏发电量的影响,建立相关理论模型,能够通过光伏组件的实际发电量和气象信息,推导得出组件表面积灰的浓度,为光伏功率预测提供可靠数据支持。本文的主要结论如下:

1) 现场光伏组件表面沉积的灰尘主要呈块状的分散小颗粒,元素组成以为氧、硅元素为主,和土壤中的元素相似,粒径分布主要集中在45 μm。

2) 从建立的模型关系能够得出,光伏系统的发电量

取决于辐照度,并呈S型函数递增趋势;积灰对光伏组件能量输出具有明显抑制作用,发电量与积灰浓度呈指数型衰减。

3) 本文所提出的覆灰流程能够获得均匀的光伏组件样本,积灰浓度软测量的方法能够准确表征实际光伏组件的积灰浓度,通过自然条件积灰验证模型的准确率达89.6%。

本文所建立的模型包含了辐照度、组件温度、积灰浓度等影响因素,但实际现场工况更加复杂,能量输出往往还受到环境温度、天气情况、光伏组件运行状态与线路故障等因素的影响,后续研究工作将加入更多影响因素来完善模型,为电力系统的功率预测和光伏系统安全稳定运行提供理论基础。

参考文献

- [1] 王欢,徐小力.一种新型光伏阵列在线故障检测方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(12):2765-2772.

WANG H, XU X L. Research on an online fault

- detection method for photovoltaic array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (12): 2765-2772.
- [2] 王雨, 苏适, 严玉廷, 等. 基于 Kalman 滤波和 BP 神经网络的光伏超短期功率预测模型[J]. 电气技术, 2014, 15(1): 42-46.
WANG Y, SU SH, YAN Y T, et al. Very short-term PV power forecasting model based on Kalman filter algorithm and BP neural network [J]. Electrical Engineering, 2014, 15(1): 42-46.
- [3] 李练兵, 张佳, 韩靖楠, 等. 基于 Elman 算法的光伏阵列的短期功率预测研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 108-114.
LI L B, ZHANG J, HAN J N, et al. Short-term power forecast research of PV array based on Elman algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(6): 108-114.
- [4] 杨超颖, 王金浩, 王硕, 等. 基于拟牛顿法小波神经网络的光伏发电系统短期功率预测模型[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 117-124.
YANG CH Y, WANG J H, WANG SH, et al. A forecasting method of short-term power output of photovoltaic system based on wavelet neural network trained by quasi-Newton method [J]. Electric Power, 2014, 47(6): 117-124.
- [5] CHANCHANGI Y N, GHOST A, SUNDARAM S, et al. Dust and PV performance in nigeria: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 121(4): 109704.
- [6] CHANCHANGI Y N, GHOST A, SUNDARAM S, et al. An analytical indoor experimental study on the effect of soiling on PV, focusing on dust properties and PV surface material[J]. Solar Energy, 2020, 203(6): 46-68.
- [7] KAZEM H A, CHAICHAN M T. Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in northern oman [J]. Solar Energy, 2016, 139(12): 68-80.
- [8] SAID S A M, WALWIL H M. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance[J]. Solar Energy, 2014, 107(9): 328-337.
- [9] PAUDYAL B R, SHAKYA R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu [J]. Solar Energy, 2016, 135(10): 103-110.
- [10] 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 F, BAI J B, HAO Y ZH, 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.
- [11] 张宇, 白建波, 曹阳. 积灰对屋顶光伏电站性能的影响[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 9-12.
ZHANG Y, BAI J B, CAO Y. Influence of dust deposition on the performance of rooftop solar power stations[J]. Renewable Energy, 2013, 31(11): 9-12.
- [12] 孟伟君, 朴铁军, 司德亮, 等. 灰尘对光伏发电的影响及组件清洗研究[J]. 太阳能, 2015, (2): 22-27.
MENG W J, PIAO T J, SI D L, et al. Effect of dust on photovoltaic power generation and component cleaning[J]. Solar Energy, 2015, (2): 22-27.
- [13] 王胜捷, 田瑞, 郭泉, 等. 光伏组件积灰特性及其透射衰减规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 242-250.
WANG SH J, TIAN R, GUO X, et al. Dust accumulation characteristics and transmission attenuation law of photovoltaic modules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 242-250.
- [14] 官燕玲, 张豪, 闫旭洲, 等. 灰尘覆盖对光伏组件性能影响的原位实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 1944-1950.
GUANG Y L, ZHANG H, YAN X ZH, et al. Experimental study of influence of dust cover on performance of PV module [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(8): 1944-1950.
- [15] 朴在林, 张萌, 丁文龙. 户用型光伏电池板积灰密度对转换效率影响研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(4): 238-241.
PIAO Z L, ZHANG M, DING W L. Study of the dust density impact on conversion efficiency of household type photovoltaic battery [J]. Journal of Chinese Agriculture Mechanization, 2015, 36(4): 238-241.
- [16] JIANG H, LU L, SUN K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(25): 4299-4304.
- [17] HEGAZY A A. Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors[J]. Renewable Energy, 2014, 22 (4): 525-540.
- [18] 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.
- [19] 赵波, 杨善让, 彭伟麒, 等. 基于 SVM 的电站空冷凝

- 汽器积灰特性建模[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(Z1): 123-129.
- ZHAO B, YANG SH R, PENG W Q, et al. Ash fouling characteristics modeling based on support vector machine in air cooled condensers of power plant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (Z1): 123-129.
- [20] KLUGANN-RADZIEMSKA E. Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern poland [J]. Renewable Energy, 2015, 78(6): 418-426.
- [21] 徐志明, 曲宏伟, 王靖雯, 等. 太阳能光伏板积灰的最佳清扫周期[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1738-1742.
- XU ZH M, QU H W, WANG J W, et al. Dusty PV modules optimal cleaning cycle[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2018, 38(6): 1738-1742.
- [22] 赵波, 张姝伟, 曹生现, 等. 基于状态监测的电池板积灰清洗周期确定与费用评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4205-4212.
- ZHAO B, ZHANG SH W, CAO SH X, et al. Cleaning cycle determination and cost estimation for photovoltaic modules based on dust accumulating condition monitoring[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(14): 4205-4212.
- [23] 李练兵, 王增喜, 刘斌, 等. 太阳电池积灰对其发电性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1418-1422.
- LI L B, WANG Z X, LIU B, et al. Influence study of dust on power generation performance of PV module[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1418-1422.
- [24] 杨亚林, 朱德兰, 李丹, 等. 积灰和光照强度对光伏组件输出功率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 203-211.
- YANG Y L, ZHU D L, LI D, et al. Influence of dust accumulation and light intensity on output power of photovoltaic modules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (5):

203-211.

- [25] ALNASER N W, DAKHEL A A, LEE J K, et al. Dust accumulation study on the Bapco 0.5 MW_p PV project at University of Bahrain [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 2 (1): 39-54.

作者简介



范思远, 2014 年于东北电力大学获得学士学位, 2018 年于东北电力大学获得硕士学位, 现为东北电力大学博士研究生, 主要研究方向为新能源发电系统检测及控制。

E-mail: fans@neepu.edu.cn

Fan Siyuan received his B. Sc. degree in 2014 and M. Sc. degree in 2018 both from Northeast Electric Power University. Now, he is a Ph. D. candidate in Northeast Electric Power University. His main research interest covers new energy power generation system detection and control.



王煜, 2019 年于上海电力大学获得学士学位, 现为东北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为光伏系统积灰检测与识别。

E-mail: ysy_wang@163.com

Wang Yu received his B. Sc. degree in 2019 from Shanghai University of Electric Power. Now, he is a M. Sc. candidate in Northeast Electric Power University. His main research interest covers detection and identification of dust accumulation in PV system.



曹生现 (通信作者), 1997 年于东北电力大学获得学士学位, 2002 年于东北电力大学获得硕士学位, 2009 年于华北电力大学获得博士学位。现为东北电力大学教授。主要研究方向为新能源发电测控技术。

E-mail: csxlb_jl@163.com

Cao Shengxian (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1997 and M. Sc. degree in 2002 both from Northeast Electric Power University, and received his Ph. D. degree in 2009 from North China Electric Power University. Now, he is a professor in Northeast Electric Power University. His main research interest covers new energy power generation detection and control technology.