第39卷 第8期 太 阳 能 学 报 Vol. 39, No. 8
2018年8月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Aug., 2018

文章编号:0254-0096(2018)08-2335-06

积灰对光伏板输出特性影响理论和试验研究

曲宏伟[1]，王靖雯[2]

（1. 东北电力大学能源与动力工程学院，吉林 132012；2. 宁波诺丁汉大学建筑环境与能源应用工程专业，宁波 315100）

摘 要：建立太阳能光伏板积灰状态下短路电流随温度变化理论模型，用以分析光伏板输出特性中温度对其影响程度的大小。通过试验的方法拟合出在定积灰密度下，不同辐照强度时积灰与清洁状态光伏板短路电流比值、开路电压比值、输出功率比值变化曲线。将试验曲线与理论分析进行比对，得出积灰对光伏板短路电流影响较小，开路电压和输出功率影响较大的结论。最后分析积灰影响系数 k' 的应用和工程意义。

关键词：光伏板；短路电流；开路电压；积灰影响系数

中图分类号：TK513.5 **文献标识码**：A

0 引 言

影响光伏板发电效率的因素很多，目前研究较多的是光伏板表面层材质、太阳入射角、光伏板所在位置、光伏板表面温度、光遮挡效应及光伏板表面物质积灰等。1991年11月美国国家航空航天局（NASA）发表的对月球表面积灰情况研究报告表明，当月球表面灰尘积聚达到3 mg/cm^{2}时，太阳光的透射率将降低50%[1]。受此报告影响，国内外相关学者开始关注积灰对光伏板效率的影响问题。通过对甘肃省10个地区近运行15 a的光伏发电设备研究，文献[2]得出相对于黄粘土而言，沙漠地带的光伏板更易积灰，且积灰量受季节的影响。文献[3]指出光伏板上积灰颗粒的尺寸与被风力携带的距离有关，并对积灰板上粒径的尺寸进行归类并指出其来源范围，得出附近区域小颗粒灰尘对光伏板发电效率影响较大的结论。有些学者对沙漠地域积灰光伏板发电效率进行试验研究[4]，得出发电效率与灰尘厚度线性关系的曲线，结论对光伏板设计者们在真实情况下预测积灰对发电效率的影响提供了依据。文献[5]指出当光伏板上灰尘密度在0~22 g/m^{2}范围变化时，对应的光伏板发电效率将降低0%~26%，其函数关系式近似于直线关系。臧建彬等[6]建立了光伏板积灰入射角模型，并通过实验方法对该模型进行验证，得到在不同入射角和积灰密度下灰尘的沉积对太阳光透射率影响的关系式，以制定可靠的清灰措施，保持光伏系统发电的高效运行。因探讨积灰将对光伏板的短路电流和开路电压产生何种影响的文献较少，Rao等[7]通过实验方法得出短路电流和开路电压随辐照度的强弱产生而变化的规律，但其结论缺少理论支撑。文献[8]则指出，光伏板温度随辐照度的增强而增加，但积灰光伏板温度变化情况未交待，也未阐述积灰光伏板温度对发电效率的影响。

综上所述可知，光伏板表面灰尘积聚对光伏板发电效率的影响不容忽视；国内外对光伏发电效率影响研究仍处于试验定性阶段，并未深入将理论和试验相结合。本文自行搭建光伏板积灰影响试验台。比较在定积灰密度和不同辐照度条件下，清洁光伏板、积灰光伏板的短路电流、开路电压、输出功率之比，并得出试验曲线。本文的创新点在于引进积灰温度影响系数 k'，在理论上分析积灰对上述3个参数（短路电流、开路电压、输出功率）的影响情况，得出变化函数关系式，建立积灰理论模型。基于p-n结太阳电池发电特点，以理论模型和试验结果为依据，比对短路电流、开路电压及输出功率受积灰影响关系，并得出结论。

收稿日期：2016-05-23

基金项目：吉林省科学技术厅（20150307022GX）

通信作者：曲宏伟（1981—），男，博士、讲师，主要从事节能和新能源方面的研究。quhongwei0928@126.com

对积灰影响系数提出的可行性和在光伏电场工程实际中的指导意义进行分析，以实现最大化的综合效益。

1 理论模型建立

试验所选光伏板（JAM6（K）-60-275/BB）为单晶硅太阳电池，其等效电路如图 1 所示，图中 h_v 为光照强度；I_{sc} 为短路电流；R_L 为负载电阻。

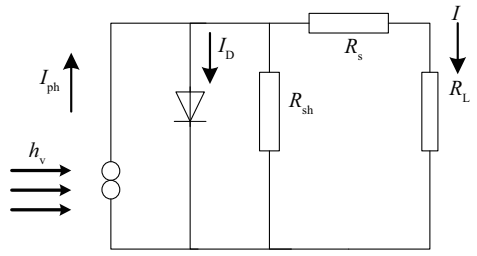

图1 等效电路

Fig.1 Equivalent circuit

设流过负载 R_L 的电流为 I，则：

$$I=I_{ph}-I_D-I_{sh} \tag{1}$$

$$I=I_{ph}-I_o\left[\exp\frac{q(V+R_sI)}{kT}-1\right]-I_{oa}\left[\exp\frac{q(V+R_sI)}{AkT}-1\right]-\frac{V+R_sI}{R_{sh}} \tag{2}$$

式中，I——负载 R_L 电流，A；I_{ph}——光生电流，A；I_D——太阳电池暗电流或漏电流，A；I_o、I_{oa} 理想二极管和非理想二极管的反向饱和电流，A；q——电子电荷常数，q=1.6×10^{-19} C；V——负载 R_L 电压，V；R_s——串联电阻，Ω；k——玻尔兹曼常数，k=1.38×10^{-23} J/K；T——光伏板热力学温度，K；A——常数因子（正偏电压大时，A=1；正偏电压小时，A=2）；R_{sh}——并联电阻，Ω。

当光伏板的串联电阻 R_s 近似为 0 Ω，而并联电阻 R_{sh} 接近∞[9]时，则：

$$I=I_{sc}=I_{ph}-I_o\left(\exp\frac{qV}{kT}-1\right)-I_{oa}\left(\exp\frac{qV}{AkT}-1\right) \tag{3}$$

由式（3）可知，太阳电池短路电流受温度影响，温度升高则短路电流升高。式（3）为清洁状态光伏板短路电流与光伏板表面温度 T 之间关系式，当光伏板表面存在灰尘积聚时，相对于清洁状态光伏板其温度将发生变化，引入 k' 为积灰对板面温度影响系数，则积灰状态下的短路电流关系式为：

$$I_{sc}=I_{ph}-I_o\left(\exp\frac{qV}{k'kT}-1\right)-I_{oa}\left(\exp\frac{qV}{Ak'kT}-1\right) \tag{4}$$

2 试验研究

2.1 试验台搭建

通过理论分析，引入积灰系数 k' 表示积灰相对于清洁状态光伏板温度偏差系数，清洁状态时 $k'=1$，而积灰状态其值未知，纵观国内外现有相关文献，无研究结论可供参考，为验证引入该系数理论可行性，利用试验方法对此进行研究。

图 2 为自行搭建试验台示意图，为防止试验结果受到不可控因素影响，本试验在室内完成，光伏板水平放置，遮挡外窗避免外界光亮进入以影响入射光强密度，采用氙灯作为太阳光模拟光源[10]，固定在可调支架上以完成辐照度的高度和角度调节。在光源下方放置晶奥单晶硅光伏组件（JAM6（K）-60-275/BB），尺寸为 400 mm×300 mm，在太阳能模拟光源正下方贴近光伏板表面采用 TES-132 太阳能辐射仪测量辐照度的强度，热电偶贴片粘贴在光伏板表面，通过安捷伦数字采集器读取光伏板表面温度和在不同辐照下的短路电流和开路电压以及输出功率值。其他试验所用器材及功能如表 1 所示。

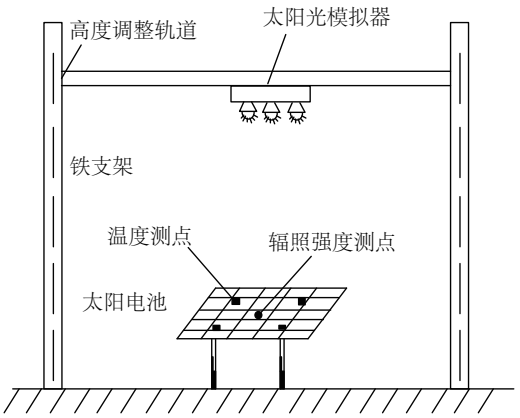

图2 试验台模型

Fig. 2 Test equipment model

2.2 试验步骤

1）清扫光伏板表面，使其干爽并无积灰沉积，通过辐照度的光强度调节器调节入射光强，测量并

表1　试验设备说明

Table 1　Testing equipment illustrate

序号	名称	功能
1	实验室电子天平	测量灰尘质量
2	安捷伦数字采集器	短路电流、开路电压、输出功率、光伏板温度
3	TES-132太阳能辐射仪	测量指定位置太阳的光辐照度
4	镀锌钢管试验台支架	支撑氙灯及调节入射参数
5	灯光强度调节器	调节入射光强度大小
6	热电偶	测量光伏板表面温度
7	沙尘沉降箱	沙尘均匀沉落

读取辐照度的光强 E。光伏板表面温度直接与辐照度的强度有关，由于热惯性，温度随辐照度的强弱变化有一定延迟，故温度值读取在辐照变化 5 s 后进行。热电偶粘贴在光伏板表面，利用安捷伦数字采集仪读取在辐照度变动的情况下光伏板表面温度值 T、光伏板平均输出功率 P_{ow}（清洁）、短路电流 I_{sc}（清洁）和开路电压 V_{oc}（清洁）。

2）在试验开展之前的 3 个月，项目组在自然沉降的光伏板上收集扬尘 8 g，通过沙尘沉落箱使其均匀沉降在 400 mm×300 mm 的光伏板上，计算得灰尘沉积密度为 6.67 mg/cm^2。

3）光伏板表面积灰后，通过调节光强调节器调节辐照度的强弱。重复步骤 1），记录当存在积灰下的温度值 T、光伏板平均输出功率 P_{ow}（积灰）、短路电流 I_{sc}（积灰）和开路电压 V_{oc}（积灰）。

通过上述试验，可得到同一块光伏板有无积灰，在不同辐照度的强度下的表面温度 T 、平均输出功率 P_{ow} 、短路电流 I_{sc} 和开路电压 V_{oc} 的数据。对以上数据进行整理和分析后引入 I_{sc}(积灰)/I_{sc}(清洁) 、V_{oc}(积灰)/V_{oc}(清洁) 、P_{ow}(积灰)/P_{ow}(清洁) 这 3 个无量纲参数，分别表示积灰状态短路电流、开路电压和平均输出功率与无积灰状态比值。分析上述 3 个无量纲参数随辐照度强度的变化关系，通过绘制响应曲线，得出积灰相对于清洁状态对上述 3 个物理量的影响，以此指导工程应用并形成完备的积灰模型理论。

3　试验结果分析

图 3 给出光伏板表面温度随辐照度强度变化的关系，试验辐射度强度增加步长为 50 W/m^2，变化范围从 200~850 W/m^2，结果显示清洁和积灰光伏板温度均随辐照度强度的增强而升高，在相同辐照度的强度下清洁光伏板温度低于积灰值。究其原因，一是清洁光伏板表面以镜面反射为主而积灰板表面以漫反射为主，镜面反射能量较漫反射大，光伏板能量吸收相对减少；其二是因为积灰相当于在光伏板表面增加了一层热阻，模拟光到达光伏板上后，温度升高，积灰热阻阻碍了热量向周围的耗散。

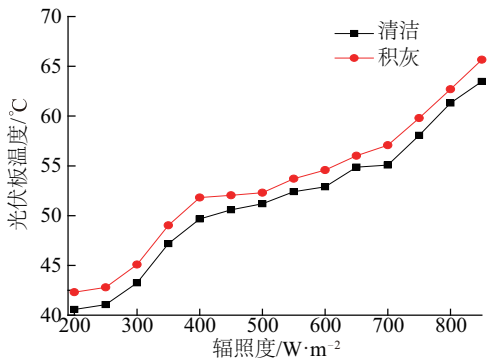

图3　温度随辐照度强度变化的关系

Fig. 3　Relation between temperature and irradiation intensity

图 4 为积灰与清洁状态开路电压之比试验曲线。从图 4 可知，随着辐照度强度的增强 V_{oc}（积灰）/V_{oc}（清洁）呈下降趋势，且变化梯度均匀，下降幅值也较大，说明积灰对开路电压的输出影响较大。

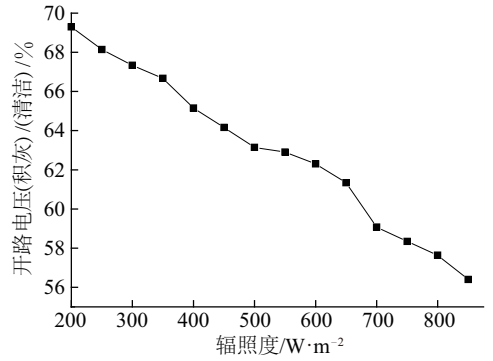

图4　积灰与清洁开路电压之比变化关系

Fig. 4　Ratio of the open circuit voltage with dusty and clean

在相同辐照度条件下,清洁状态光伏板开路电压较积灰状态大,直接原因为积灰引起温度升高,导致开路电压下降。

图5显示在积灰和清洁状态下短路电流之比随辐照度强度变化的关系。试验数据采集与上文温度采集同步进行,试验数据显示当辐照度从200 W/m^{2}增至850 W/m^{2}的过程中,I_{sc}(积灰)/I_{sc}(清洁)值在1.00~1.11之间变化,其值出现一定的摆动,无规律性可依据,主要原因是试验测量14次而试验结果最大值和最小值相差11%,随机误差不可避免。从图5可知,试验均值为1.05,积灰引起温度变化对光伏板短路电流影响较小,接近于清洁状态。式(4)指出短路电流与温度的关系变化,当引入的积灰影响系数k'在有界范围内变化且为正值时,试验结论与理论分析一致,证明积灰影响系数引入的可行性。

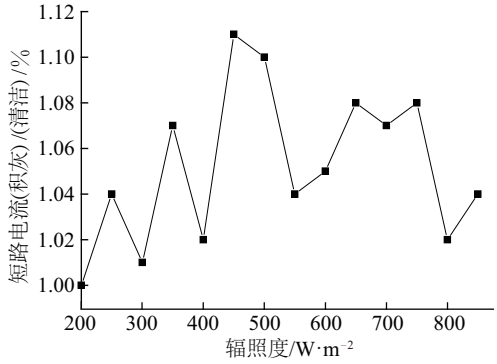

图5 积灰与清洁短路电流之比的变化关系

Fig. 5 Ratio of the short circuit current with dusty and clean

图6为积灰与清洁状态光伏板输出功率之比随辐照度强度变化的试验曲线。P_{ow}(积灰)/P_{ow}(清洁)均值为65%,即由于光伏板上的积灰存在,致使有近35%的电能损耗,说明积灰对光伏板输出功率影响较大,以上结论在定积灰密度下得到,变积灰密度的影响情况还有待研究。

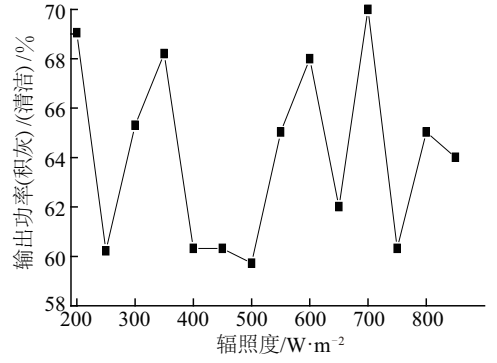

图6 积灰与清洁输出功率之比变化关系

Fig. 6 Ratio of the output power with dusty and clean

4 积灰温度系数应用

积灰温度系数k'的引入使积灰对光伏板输出特性理论模型建立成为可能,在光伏发电领域应用广泛。首先,带积灰温度系数的光伏板输出特性理论模型的建立,对光伏发电场设计初期,设计者可通过分析当地灰尘成分,预测未来光伏板实际输出特性。结合设计要求来配置光伏板总面积,避免因为忽略积灰影响,而导致实际发电量与需求值不符情况发生。其次,在光伏发电场的检修清理管理上,通过分析光伏板输出功率随积灰密度变化关系,预估光伏发电随时间的下降程度,结合电场实际情况制定切实可行的清理周期,通过有效手段最大限度的控制积灰对光伏发电输出功率的下降,减少经济损失。对大型光伏电站,结合当地气候条件经过理论与试验研究得出光伏板积灰密度随季节变化曲线,从而得出功率损耗与季节的变化曲线,当超过允许功率下降幅值时采取清洗作业,预测并制定清洗时间,此结论的成功实施对电场生产运行及检修时间安排具有指导意义。

5 结 论

通过建立理论模型和搭建试验台对积灰对光伏板输出特性影响进行研究,结论如下:

1)光伏板表面温度在清洁和积灰状态下均随辐照强度的增加而增加。在相同试验条件下,积灰状态值比清洁状态高。

2)引入积灰温度系数,该系数为积灰使光伏板表面温度变化系数。建立太阳能光伏板短路电流随温度变化理论模型。理论分析结论为:短路电流随光伏板表面温度的升高而增大。

3)测量了积灰密度为6.67 mg/cm^{2}下改变辐照度强度后的短路电流和开路电压值。通过与清洁状态光伏板相应值做商比较,试验结果表明:积灰

对光伏板开路电压影响较大，对短路电流影响较小，在积灰影响系数有界情况下此结论与理论模型的短路电流随温度变化关系一致。

4)在相同的试验条件下，分别测量并计算光伏板输出功率在积灰和清洁状态比值，结果指出，当辐照度强度变化范围在 200~850 W/m^2 时，比值均值为 65%，说明积灰对光伏板输出功率影响较大。

[参考文献]

[1] Katzan C M, Edwards J L. Lunar dust transport and potential interactions with power system components [R]. NASA Contractor Report, 1991, 4404: 21—26.

[2] Ta Wanquan, Xiao Honglang, Qu Jianjun, et al. Measurements of dust deposition in Gansu Province, China, 1986—2000[J]. Geomorphology, 2004, 57(1-2): 41—51.

[3] McTainsh G H, Nickling W G, Lynch A W. Dust deposition and particle size in Mali, West Africa[J]. Catena, 1997, 29(3-4): 307—322.

[4] Al-Hasan A Y. A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand and dust accumulated on its surface[J]. Solar Energy, 1998, 63(3): 23—33.

[5] Jiang Hai, Lu Lin, Sun Ke. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(4): 299—304.

[6] 臧建彬，王亚伟，王晓东. 灰尘沉积影响光伏发电的理论和试验研究[J]. 太阳能学报，2014，35(4)：624—629.

[6] Zang Jianbin, Wang Yawei, Wang Xiaodong. Computation model and experiment of dust deposition affecting transmittance of photovoltaic module[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(4): 624—629.

[7] Rao A, Pillai R, Mani M, et al. Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance[J]. Energy Procedia, 2014, 54: 690—700.

[8] Jiang Yu , Lu Lin. A study of dust accumulating process on solar photovoltaic modules with different surface temperatures[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 337—342.

[9] 刘鉴民. 太阳能利用原理·技术·工程[M]. 北京：电子工业出版社，2010：170—171.

[9] Liu Jianmin. The principle of solar energy utilization, technology, engineering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 170—171.

[10] 蔺　佳，桑丽霞，张　静，等. 太阳光模拟器的解析、应用及其发展[J]. 太阳能技术产品与工程，2015，1(1)：37—43.

[10] Lin Jia, Sang Lixia, Zhang Jing, et al. Parsing, application and development of the solar simulator[J]. Solar Energy, 2015, 1(1): 37—43.

THEORY AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF EFFECT OF DUST DEPOSITION ON OUTPUT CHARACTERISTICS OF PV MODULE

Qu Hongwei[1], Wang Jingwen[2]

(1. *School of Energy and Power Engineering*, *Northeast Electric Power University*, *Jilin* 132012, *China*;
2. *The Architectural Environment Engineering*, *The University of Nottingham Ningbo China*, *Ningbo* 315100, *China*)

Abstract: The theoretical model of open-circuit voltage and short-circuit current variation with temperature under ash deposition state of solar PV modules is established, which is used to analyze the degree of influence of temperature on the output characteristics of PV modules. The change curves of short-circuit current ratio, open-circuit voltage ratio and output power ratio of the PV modules with dust deposition and cleanliness under different irradiation intensity are fitted by experimental method. The test curves are compared with theoretical analysis. It is concluded that the effect of dust deposition on short circuit current of PV module is small, and open circuit voltage and output power is larger. Finally, the application and engineering significance of the dust deposition coefficient k' are analyzed.

Keywords: PV module; short circuit current; open circuit voltage; dust deposition influence coefficient