

# 表面积灰影响光伏组件泄漏电流与衰减寿命的研究

王 平<sup>1</sup>, 杜 炜<sup>1</sup>, 张海宁<sup>2</sup>, 李春来<sup>2</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网青海省电力公司光伏发电并网技术重点实验室, 西宁 810008)

**摘 要:** 主要研究发生电位诱导衰减的光伏组件在表面积灰作用下,其泄漏电流和输出功率的变化机理,以 Peck 方程为基础,建立覆灰光伏组件模型;利用实验室模拟现场环境,从泄漏电流、活化能指数  $E_a$  和最大功率点功率 3 个角度分析灰尘积累的影响。实验结果表明:表面覆灰与环境湿度的共同作用会大大增加组件泄漏电流、减小使用寿命;利用灰尘密度和泄漏电流的近似线性关系,推导出覆灰与洁净组件的功率衰减相关系数  $\lambda$ , 可用来准确预测覆灰组件的功率衰减;提出的覆灰模型对光伏组件实际泄漏电流和功率衰减特性具有较好的拟合效果。

**关键词:** 灰尘积累; 电位诱导衰减; 泄漏电流; 活化能; Peck 方程

**中图分类号:** TM914.4

**文献标识码:** A

## 0 引 言

国内外研究表明,电位诱导衰减(PID)是导致太阳能电池板在运行过程中功率衰减的主要原因<sup>[1-4]</sup>。欧洲最大的太阳能研究机构德国弗劳恩霍夫太阳能研究所(Fraunhofer CSP)研究表明,PID 效应是由于在 p 型硅电池板中,表面封装玻璃内的 Na 离子在系统对地高电压下,随着对地泄漏电流穿过封装材料累积在 p-n 结内,导致电池板功率的衰减下降<sup>[5]</sup>。在这一过程中,泄漏电流为 Na 离子转移提供了回路和通道,被视为 PID 衰减的重要指标<sup>[6,7]</sup>。因此,国内外学者对泄漏电流受到封装材料和环境变化的影响进行大量研究,试图通过减小泄漏电流来减缓 PID 衰减效应<sup>[7-11]</sup>。

青海地区是中国光伏发电条件最好的地区之一,但该地区常年干旱及风沙较大,导致户外光伏组件常年处于蒙尘覆灰状态。通过对格尔木、共和等光伏电站的实际调研,发现该地区的光伏组件实际平均寿命不足 12 a,功率衰减现象十分严重。通过实际测量,发现该地区光伏组件的平均泄漏电流高出理论值 3~4 倍。因此,研究光伏组件蒙尘对泄漏电流和功率衰减的影响,对于高海拔荒漠地区的光伏发电设备的经济运行尤为重要。但目前,国内外尚无学者对该方面问题进行深入研究。

综上所述,本文研究灰尘积累条件下的光伏组件泄漏电流变化和功率衰减情况,并利用实验室模拟环境实验,建立灰尘与泄漏电流、功率衰减的相关模型,对于完善光伏组件 PID 衰减的理论具有重要的意义。本研究可为西部荒漠地区光伏组件的清洁和更换工作提供理论依据。利用模型对清洁和更换周期进行决策,可有效提高户外光伏组件的使用寿命和输出功率。

## 1 模 型

由于环境温度和湿度已被证明为影响光伏组件衰减的重要因素。因此,NREL 提出基于 Arrhenius 关系的泄漏电流温湿度 Peck 方程,并以此为基础推导出光伏组件衰减预测模型<sup>[3,12,13]</sup>。本研究为更好地表达覆灰与组件性能的关系,以 Peck 方程为基础,建立与积灰质量相关的泄漏电流和功率衰减模型。

### 1.1 泄漏电流模型

洁净太阳能电池板的 Peck 泄漏电流方程为:

$$i_0 = A \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \cdot e^{RH \cdot B} \quad (1)$$

式中,  $i_0$  —— 洁净电池板在 -1000 V 偏压下的泄漏电流大小;  $A$ 、 $B$  —— 经验参数;  $E_a$  —— 光伏组件的活化能参数,与组件本身性质和环境状态相关,与

温度参数无关;  $k$  ——玻尔兹曼常数;  $T$  ——环境开尔文温度;  $RH$  ——环境湿度百分比。

假设在温度与湿度一定的情况下,单位体积灰尘的电导率与质量密度具有一致性,可知灰尘的总电导随着积累灰尘的质量呈线性增加,即:

$$G_d = \sigma \cdot S_{ce} \cdot \frac{d}{\rho \cdot S} \quad (2)$$

式中,  $G_d$  ——组件表面灰尘的等效电导;  $\sigma$  ——组件表面灰尘的体电导率;  $S_{ce}$  ——组件表面导电通道的等效面积;  $d$  ——组件表面灰尘的质量;  $\rho$  ——组件表面灰尘的质量密度;  $S$  ——组件的上表面积;  $\frac{d}{\rho \cdot S}$  ——组件表面灰尘的厚度。

根据导电通道模型可知,洁净电池板的泄漏电流穿过封装材料内部,流经电池板上表面到达金属边框流入大地。因此,洁净太阳能电池板导电通道的总电导  $G_0$  由封装材料体电导  $G_v$  和封装玻璃表面电导  $G_s$  组成。对于覆灰后,光伏组件还要考虑灰尘的等效电导与封装玻璃表面电导  $G_s$  呈并联关系。所以覆灰后光伏组件的总电导  $G_p$  为:

$$G_p = \frac{(G_d + G_s) \cdot G_v}{G_d + G_s + G_v} \quad (3)$$

根据 FSEC 的研究结果可知道,封装材料表面电导大约为体电导的 3 倍<sup>[14]</sup>,即  $G_s \approx 3 \cdot G_v$ 。而红土本身松散的结构和本身材料的性质导致其电导值小于封装材料,约为表面电导的几倍。由此可推导出下列关系:

$$\frac{I_p}{I_0} = \frac{V \cdot G_p}{V \cdot G_0} \approx \alpha \cdot \left(1 + \frac{G_d}{G_s}\right) \quad (4)$$

式中,  $I_0$  ——洁净电池板在负偏压下的泄漏电流大小;  $I_p$  ——相同条件下,覆灰后的太阳能电池板泄漏电流大小;  $V$  ——系统对地偏压大小;  $\alpha$  ——计算调整系数,用来调整  $G_d$ 、 $G_v$ 、 $G_s$  倍数关系之间的误差。

综上所述,可得到覆灰后泄漏电流的表达式:

$$i_p = A_p \cdot e^{-E_a/kT} \cdot e^{RH \cdot B_p} \cdot \alpha \cdot \left(1 + \frac{G_d}{G_s}\right) \quad (5)$$

式中,  $A_p$ 、 $B_p$  ——覆灰组件经验参数。

由式(5)可知,在温度与湿度一定的条件下,泄漏电流的大小与灰尘的质量密度  $d$  近似呈线性关系。

## 1.2 功率衰减模型

对于 PID 功率衰减建模的研究,NREL 根据上

述 Peck 泄漏电流方程计算出不同湿度下电池板活化能  $E_a$  值,并由此推导出组件最大功率点功率衰减模型<sup>[15-17]</sup>,具体形式为:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\max 0}} = 1 - A_p \cdot e^{-E/kT} \cdot RH^{B_p} \cdot t^2 \quad (6)$$

式中,  $t$  ——电池板衰减时间;  $P_{\max}$  ——结净电池板在衰减时间  $t$  后,在标准光照和一定温湿度条件下最大功率点功率;  $P_{\max 0}$  ——在  $t=0$  时,结净电池板的最大功率点功率;  $E$  ——2 倍  $E_a$ ,即  $E=2E_a$ 。

由前一部分推导可知泄漏电流与覆灰密度呈近似的线性关系,而式(6)右半部分是由泄漏电流公式推导而来。因此,用与泄漏电流相关的部分定义一个相关系数  $\lambda$ ,用来表征洁净与覆灰电池板最大功率点功率衰减的关系。同时,该系数由泄漏电流方程推导而来,所以只需要得到不同覆灰状态下的泄漏电流,就可得到覆灰后电池板的功率衰减特性,省去了长时间的覆灰电池板功率衰减实验。相关系数  $\lambda$  为:

$$\begin{aligned} \lambda &= \left(1 - \frac{P_{\max}}{P_{\max 0}}\right)_{\text{polluted}} \bigg/ \left(1 - \frac{P_{\max}}{P_{\max 0}}\right)_{\text{clean}} \\ &= \frac{A_p}{A} \cdot e^{(E_c - E_p)/kT} \cdot RH^{B_p - B} \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $E_c$ 、 $E_p$  ——覆灰组件的等效活化能系数,分别与式(1)与式(6)中的  $E_a$  和  $E$  相同;下标 polluted 和 clean 分别代表覆灰与洁净电池板的功率衰减方程。

## 2 实 验

为研究灰尘对光伏组件泄漏电流的影响,利用荒漠地区常见的灰尘污染源——红土,作为模拟污染物。实验选用颗粒一致性较好的红土,直径大小为 25~50  $\mu\text{m}$ ,成分为  $\text{SiO}_2$ (47.17%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (18.57%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (26.21%)等。本实验将质量密度为 2.15、4.69、9.05、13.69 和 19.93  $\text{g}/\text{m}^2$  的试验用红土分别均匀涂抹在 5 块完全相同的光伏组件表面,用来模拟表面灰尘积累程度不同的光伏组件,并设立一组完全相同的洁净组件作为对照组。本实验中使用的光伏组件为 540 mm×670 mm 小尺寸光伏组件,便于放置在环境箱内进行模拟实验。

为了模拟光伏组件在运行过程中的对地高电压状态,在电池和边框间施加-1000 V 偏压(边框接电源正极,组件输出端正负极短路后接电源负极),并同时测量泄漏电流大小,如图 1 所示。

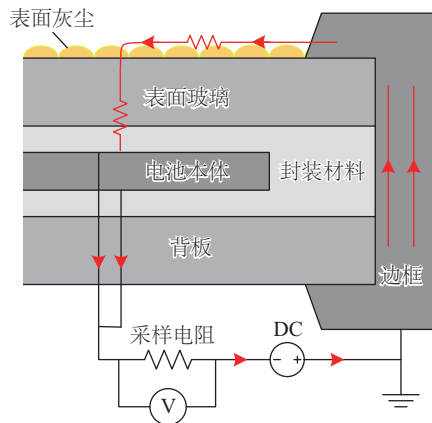


图1 实验装置及泄漏通道等效示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental prototype and the leakage current

由于湿度和温度被证明为影响光伏组件 PID 衰减的重要因素<sup>[18]</sup>。因此,将实验装置放入具有调温调湿功能的环境试验箱内,同时,箱内黑暗环境可避免光电流对结果产生影响。实验温度控制范围为 293.2~363.2 K,精度为 0.1 K,湿度控制范围为 20%~90%,控制精度为 5%,均符合实验要求。

本实验过程分为泄漏电流测试和功率衰减测试 2 部分:

1) 泄漏电流测试:将上述 5 种不同覆灰厚度的电池板和对照组依次放入试验箱内,改变箱内温度和湿度;调节范围为 293.2~363.2 K,20%~90%,步进距离为 5 K 与 10%。每改变一次温湿度,等待 10 min,待温湿度稳定后记录泄漏电流大小。

2) 功率衰减测试:选择双 85 实验环境进行加速功率衰减实验,即 358.2 K (85 °C)、85%。将 13.69 g/m<sup>2</sup> 的电池板和对照组按图 1 电路连接后放入双 85 试验箱内进行加速衰减。每隔 4 h 取出 2 组电池板,在 25 °C 和标准光照平台下对电池板 *I-V* 曲线进行测量,之后放回试验箱内继续实验,加速衰减 96 h 后结束实验。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 灰尘积累对泄漏电流的影响

对于绝大多数类似红土的不可溶、绝缘性能良好的灰尘颗粒来说,导致其电导率上升的主要原因之一是灰尘本身的吸湿性。灰尘颗粒本身的比表面积较大,借由范德华力的作用<sup>[19-21]</sup>,灰尘颗粒可将空气中的水蒸气保留在颗粒表面的孔隙当中,提高

了灰尘整体的导电性。由定性分析可知,灰尘与环境湿度的交互作用是影响覆灰电池板泄漏电流增加的原因。另外,根据 NREL 之前的研究可知,除了环境湿度之外,温度也是影响泄漏电流的主要因素。

考虑到上述 2 种因素可能会对实验结果造成影响。在数据分析过程中,对实验数据进行变量单一化的处理:分别在 333.2 K (60 °C,即光伏组件泄漏电流的阈值温度)的温度条件下,测量全湿度范围内不同灰尘厚度覆盖的电池板泄漏电流;又在 85% 的湿度条件下,测量全温度范围内不同灰尘厚度覆盖的电池板泄漏电流。从而,分别控制温度和湿度 2 个变量,得到灰尘与泄漏电流的关系,并同时判断灰尘累积对泄漏电流的作用大小是否受到温湿度变化的影响。此外,85% 湿度下测量的泄漏电流大小可代入式(5),求得 85% 湿度下的  $E_a$  值,与双 85 下的衰减结果形成参照对比。

图 2 为 333.2 K 时,不同湿度条件下泄漏电流的大小。由图 2 可看出,虽然灰尘与湿度在物理层面上存在交互作用,但灰尘对泄露电流的影响仍保持线性关系。根据实测数据,由式(5)拟合出的结果如图中实线所示。可看出,式(5)可较好地拟合出不同湿度下泄漏电流随灰尘质量的变化情况。

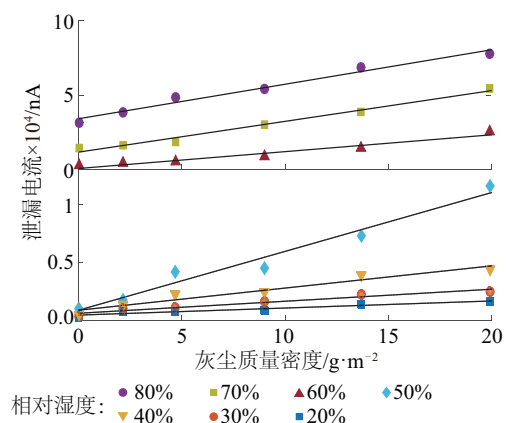


图2 60 °C 时,不同湿度下泄漏电流随覆灰密度变化曲线

Fig. 2 Leakage current variations according to mass density of pollution in different relative humidity at 60 °C

图 3 为 85% 相对湿度时,不同温度条件下泄漏电流的大小。由图 3 可看出,表面覆灰对泄漏电流的作用基本不受温度条件的影响,保持线性关系。根据实测数据,由式(5)拟合出的结果如图中实线所示。可看出,式(5)同时可较好地拟合出不同温



度下泄漏电流随灰尘的变化情况。

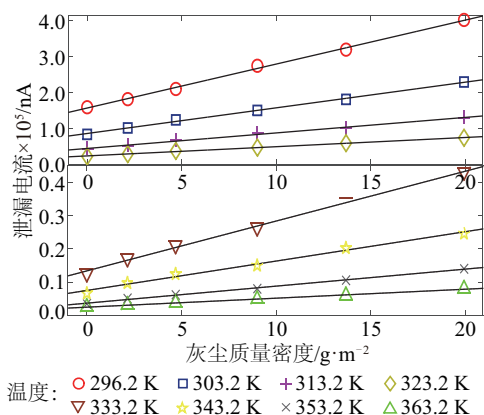


图3 85%RH时,不同温度下泄漏电流随覆灰密度变化曲线  
Fig. 3 Leakage current variations according to mass density of pollution in different temperature in 85%RH

以上分析充分说明式(5)对灰尘厚度和泄漏电流关系的预测能力。但是由于湿度与灰尘存在交互影响,因此需要判断修正后的方程是否还能够准确预测泄漏电流随湿度的变化。因此,在图4中将333.2 K时,不同灰尘厚度的计算结果和实验数据以不同曲线和点来表示。可看出,在不同的覆灰情况下,式(5)仍能较好地预测泄漏电流随湿度的变化关系。

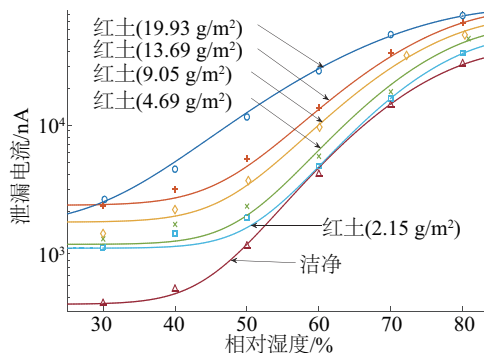


图4 60 °C时,不同覆灰密度下,组件的泄漏电流随相对湿度变化曲线

Fig. 4 Leakage current variations according to humidity of pollutions with different pollution masses at 60 °C

综上所述可知,式(5)对 Peck 方程的修正能较好地预测覆灰对泄漏电流的影响,同时不影响对温湿度作用预测的准确性。

### 3.2 灰尘积累对组件活化能 $E_a$ 的影响

光伏组件活化能  $E_a$  是衡量组件发生衰减概率的重要指标,即电池板的真实活化能大于  $E_a$  时,组

件内部便容易发生物化反应,导致电池板功率衰减。在 Peck 模型中的活化能  $E_a$  与组件材料、组件大小和外部环境(包括环境湿度、表面状况等)有关,但与环境温度相对独立。

由于本次实验选用的光伏组件完全相同。因此,排除组件本身的影响,可用活化能指数来分析湿度、覆灰状况对电池板的影响及湿度和覆灰在影响电池板性状时的相互作用关系;同时,由较为容易测量的泄漏电流推导出的活化能  $E_a$  能够直接用于功率衰减模型,即式(6)、式(7)中,是关联2组公式之间的重要系数。

表1是利用式(5)和实测数据计算出的各种覆灰和湿度条件下的光伏组件活化能大小。将表1按照不同覆灰条件分组,得到图5所示曲线。每条曲线表示在不同覆灰密度下,组件活化能随湿度的变化情况。这一曲线的规律与 NREL 通过测量计算出的结果较为符合<sup>[22]</sup>。

表1 不同相对湿度、不同覆灰密度下光伏组件的活化能  $E_a$ (eV)

Table 1  $E_a$  under different RH and pollution mass (eV)

RH/%	组件表面覆灰密度/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$					
	0	2.15	4.69	9.05	13.69	19.93
30	0.6408	0.7372	0.6331	0.6211	0.5921	0.5638
35	0.6686	0.7360	0.6387	0.6319	0.5929	0.5647
40	0.7144	0.7351	0.6444	0.6836	0.6190	0.5690
45	0.7391	0.7533	0.6912	0.7101	0.6349	0.5502
50	0.7531	0.7707	0.7686	0.7385	0.5286	0.5401
55	0.7837	0.8479	0.8214	0.5648	0.4087	0.5430
60	0.8396	0.8773	0.6720	0.3904	0.4219	0.5513
65	0.8985	0.5923	0.2997	0.4539	0.4674	0.5623
70	0.5063	0.2002	0.3489	0.5393	0.5031	0.5817
75	0.1950	0.2241	0.4521	0.6101	0.5554	0.5902
80	0.2208	0.4086	0.5463	0.6650	0.5732	0.6150
85	0.5877	0.5612	0.6351	0.7064	0.6062	0.6391
90	0.9730	0.7382	0.7699	0.7608	0.6923	0.6661

在图5中,湿度从35%到75%的过程中,活化能会发生较大的波动,先缓慢上升,再急速下降。由于图5曲线变化较为复杂,为了便于进一步分析,计算出图5中每条曲线的中位数和标准差,得到图6所示曲线。

由图5可看出,随着灰尘的增加,曲线的波动

越来越小。体现在图6中就是曲线的方差值随着灰尘密度的增加而减小。说明覆灰密度的增加,会减小电池板性能对环境湿度的灵敏度。除此之外,从图6中的中位数曲线可看出,随着覆灰密度的增加,活化能 $E_a$ 的中位值从0.753 eV减至0.565 eV,更加容易发生功率衰减。从另一方面也可理解为电池板表面等效湿度增加。

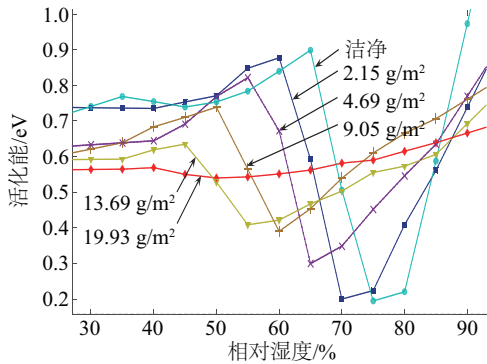


图5 不同覆灰密度条件下,光伏组件活化能 $E_a$ 随相对湿度的变化

Fig. 5 Module thermal activation energy  $E_a$  against RH with different pollution masses

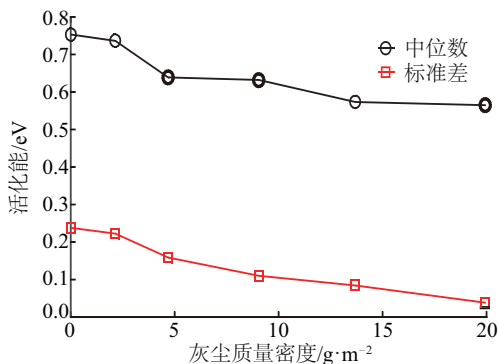


图6 不同覆灰密度条件下,活化能 $E_a$ 的标准差与中位数随相对湿度的变化

Fig. 6 Standard deviation and median of  $E_a$  in each curves with different pollution masses

综上所述,随着覆灰密度的增加,电池板性能对环境湿度的灵敏度逐渐减小;与此同时,电池板表面的等效湿度逐渐增加,致使电池板更容易发生功率衰减。

### 3.3 灰尘积累对最大功率点功率的影响

在衰减实验前,利用标准照度平台和光伏电池板测试仪,测量出正常光伏组件的 $V-I$ 特性曲线。

在经过96 h的加速衰减试验后,在同样的实验条件下测量出覆灰(覆灰组件在测量时已擦拭干净)和洁净光伏组件 $V-I$ 特性曲线,3组曲线如图7所示。

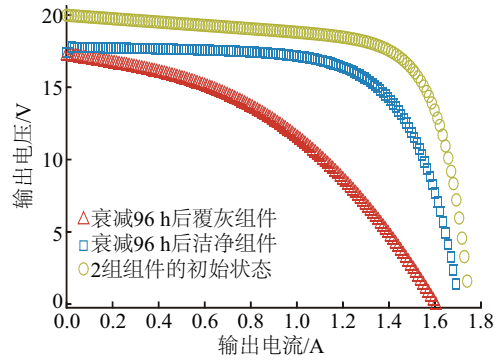


图7 覆灰与洁净组件在相同条件下衰减96 h前后的 $V-I$ 曲线变化情况对比图

Fig. 7  $V-I$  curves of clean and polluted modules after the PID stress test for 96 h

根据图7可知,在96 h的衰减过程后,洁净组件的最大功率电功率衰减为初始值的82.1%,而覆灰后的光伏组件衰减为初始值的46.7%。按照国标规定,前者的大于初始值80%,符合国家对光伏组件PID衰减的要求,而后者则与国标规定相去甚远。由此,我们可得出结论,光伏组件覆灰问题会极大程度上提高光伏组件的衰减速率,严重影响太阳能电池板的使用寿命。

根据模型部分分析,将表1中85%RH时的 $E_0=2 \times 0.5877 \text{ eV}=1.1754 \text{ eV}$ 和 $E_p=2 \times 0.6062=1.2124 \text{ eV}$ 2组 $E_a$ 值分别代入式(6)、式(7),得到洁净和覆灰电池板功率衰减方程,同时求解出相关系数 $\lambda=9.868$ 。

图8是在双85衰减条件下,每4 h对覆灰电池板最大功率点功率进行测试的结果,归一化处理后得到如图两组数据点。同时,将上述方程绘成曲线同时作图8,对比实际测试与理论计算结果。可发现,理论计算结果与实际测试值的吻合性较好,模型部分所推导公式可较好地计算出太阳能电池板在覆灰后的功率衰减情况。

由于活化能 $E_a$ 随灰尘密度的变化关系较为复杂无法用数学方法拟合,因此 $\lambda$ 与覆灰密度并非线性或其他任何关系,所以每种覆灰情况下的 $\lambda$ 大小需根据活化能 $E_a$ 值推算出来。

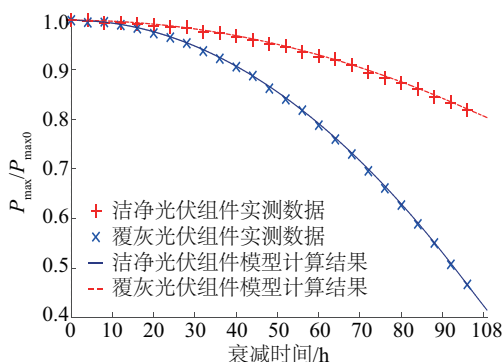


图8 加速衰减过程中,覆灰和洁净光伏组件最大功率衰减情况的实测值与模型计算值对比图

Fig. 8 Normalized power degradation of modules by PID in an environmental chamber as a function of temperature and humidity

综上所述,对 Peck 功率衰减方程的修正可准确预测覆灰太阳能电池板的最大功率点衰减情况;同时,覆灰后太阳能电池板的衰减速率会极大提高,导致使用寿命大幅下降。

## 4 结 论

1)在温度与湿度一定的条件下,泄漏电流的大小与灰尘的质量密度  $d$  近似呈线性关系。将此结论引入对 Peck 泄露电流方程的修正,能够很好地预测覆灰组件的泄漏电流大小,同时不影响对温湿度作用预测的准确性。

2)由于红土等不可溶灰尘颗粒虽然绝缘性良好,但本身具有吸湿和保水性。所以,组件表面覆灰会导致电池板性能对环境湿度的灵敏度逐渐减小,电池板表面等效湿度的增加,从而致使电池板更容易发生功率衰减。

3)根据实验结果,发现覆灰后太阳能电池板的衰减速率会极大提高,导致使用寿命大幅下降;引入覆灰相关系数  $\lambda$ ,可直接利用泄漏电流方程中的活化能  $E_a$  计算出来。这一修正可准确预测覆灰太阳能电池板的最大功率点衰减情况,为风沙扬尘地区光伏组件的清洁和更换工作提供了依据。

### 【参考文献】

[1] Koch S, Seidel C, Grunow P. Polarization effects and test for crystalline silicon cells [A]. Proceedings of the 26th European PV Solar Energy Conference Exhibition [C], Hamburg, Germany, 2011.

[2] 郑海兴, 舒碧芬, 沈 辉, 等. 晶体硅组件长期运行后性能及衰退原因分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33

(4): 614—617.

[2] Zheng Haixing, Shu Bifen, Shen Hui, et al. Analysis of performance and degradation of silicon PV modules after long term operation [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(4): 614—617.

[3] Hacke P, Spataru S, Terwilliger K. Accelerated testing and modeling of potential-induced degradation as a function of temperature and relative humidity [J]. IEEE Journal Photovoltaics, 2015, 5(6): 1549—1553.

[4] Siemer J, Haase C. Stress relief ? High-voltage stress is a widespread cause of PV system performance degradation that has only recently come to light [J]. Photon International, 2011, (1): 136—143.

[5] Naumann V, Lausch D, Graff A, et al. The role of stacking faults for the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells [J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters, 2013, 7(5): 315—318.

[6] Pingel S, Frank O, Winkler M. Potential induced degradation of solar cells and panels [A]. Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Special Conference [C]. Honolulu, HI, USA, 2010.

[7] Koch S, Nieschalk D, Berghold J, et al. Potential induced degradation effects on crystalline silicon cells with various antireflective coatings [A]. Proceedings of the 26th European PV Solar Energy Conference Exhibition [C], Frankfurt, Germany, 2012.

[8] 何宝华, 杜军伟, 王 慧, 等. 晶体硅光伏组件抗PID机理研究 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(11): 2698—2702.

[8] He Baohua, Du Junwei, Wang Hui, et al. The mechanism of anti-potential induced degradation for crystalline silicon photovoltaic module [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(11): 2698—2702.

[9] Dhere N G. High voltage bias testing of specially designed c-Si PV modules [EB/OL]. www.eere.energy.gov/solar/pv\_module\_reliability\_workshop\_2011.html, 2011-11-23.

[10] Hacke P, Kempe M, Terwilliger K. Characterization of multicrystalline silicon modules with system bias voltage applied in damp heat [A]. Proceedings of the 25th European PV Solar Energy Conference Exhibition [C], Valencia, Spain, 2010.

[11] Hacke P, Terwilliger K, Smith R. System voltage potential induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test [A]. Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Special Conference [C], Seattle, Washington, USA, 2011.

- [12] DelCueto J A, McMahon T J. Analysis of leakage currents in photovoltaic modules under high-voltage bias in the field[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2002, 10(15): 15—25.
- [13] Dhere N G, Shiradkar N S, Schneller E. Evolution of leakage current paths in MC-Si PV modules from leading manufacturers undergoing high-voltage bias testing [J]. IEEE Journal Photovoltaics, 2014, 4(2): 654—658.
- [14] Dhere N G, Shiradkar N S, Schneller E. Device for detailed analysis of leakage current paths in photovoltaic modules under high voltage bias[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104: 112103-1—112103-4.
- [15] Hacke P, Smith R, Terwilliger K, et al. Development of an IEC test for crystalline silicon modules to qualify their resistance to system voltage stress[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2014, 22(7): 775—783.
- [16] Spataru S, Hacke P, Sera D. Temperature dependency analysis and correction methods of in-situ power loss estimation for crystalline silicon modules undergoing potential-induced degradation stress testing[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2015, 23: 1536—1549.
- [17] Hacke P, Terwilliger K, Kurtz S. In-situ measurement of crystalline silicon modules undergoing potential-induced degradation in damp heat stress testing for estimation of low-light power performance [A]. The 23rd Workshop Crystalline Silicon Solar Cells Modules: Mater. Processes[C], Breckenridge, CO, USA, 2013.
- [18] Inoue H, Fukke H, Katsumoto M. Effect of polymer adsorbed layer on magnetic particle dispersion[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(1): 75—77.
- [19] Yang C J . Huang S J , Kuo C L . The electronic property of graphene adsorbed on the siloxane and silanol surface structures of SiO<sub>2</sub>: A theoretical prediction[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104: 112103-1—112103-4.
- [20] Wong J, Yadav S, Tam J . A van der Waals density functional theory comparison of metal decorated graphene systems for hydrogen adsorption[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 101: 253107-1—253107-5.
- [21] Koch S, Berghold J, Okoroafor O. Encapsulation influence on the potential induced degradation of crystalline silicon cells with selective emitter structures [A]. The 27th Photovoltaic Congress Exhibit[C], Frankfurt, Germany, 2012.
- [22] Swanson R, Cudzinovic M, De Ceuste. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells [A]. The 15th Photovoltaic Solar Energy Conference [C], Shanghai, China, 2005.

## POLLUTION IMPACT ON THE LEAKAGE CURRENT AND POWER DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Wang Ping<sup>1</sup>, Du Wei<sup>1</sup>, Zhang Haining<sup>2</sup>, Li Chunlai<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Photovoltaic Grid Connected Power Generation Technology, Xining 810008, China)

**Abstract:** The pollution on the surface of photovoltaic panels affects the module life time and power generation efficiency seriously in high-altitude desert region such as Qinghai province. Therefore, the paper mainly studied of the change mechanism of the leakage currents and output power by the coverage of pollution on photovoltaic modules being Potential Induced Degradation. Then, the paper set up by photovoltaic modules on the basis of Peck equation. Using laboratory simulation scene environment, we analyze the effects of dust accumulation on the leakage currents, the power of maximum power point, and activation energy index  $E_a$ . The experimental results showed that the surface of ash and environmental humidity components working together will greatly increase the leakage currents, reduce the service life. At the same time, the use of an approximate linear relationship between dust density and leakage currents can elicit coefficient of correlation  $\lambda$  order to accurately predict the ash components of power attenuation. At last, the photovoltaic pollution modules we set up can verify can accurate predicts the leakage currents and the power attenuation - time performance.

**Keywords:** pollution; potential induced degradation; leakage currents; activation energy; Peck equation