

基于湿热试验的光伏组件功率衰减与使用寿命研究

樊 静, 钱 政, 王婧怡

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 光伏组件功率衰减与使用寿命对于光伏电站安全、经济运行具有重要意义; 针对光伏组件功率衰减和使用寿命问题, 在分析加速湿热条件下光伏组件归一化功率倒 S 形衰减规律基础上, 提出以指数时间尺度变换函数对光伏组件非线性归一化功率进行变换, 并运用 Gamma 过程对加速湿热条件下光伏组件归一化功率衰减数据进行建模, 进而根据光伏组件使用寿命定义估计光伏组件使用寿命; 通过加速湿热试验下光伏组件实测使用寿命与估计的使用寿命, 验证了所提方法的正确性与合理性; 方法表明, 在 50℃、45% 相对湿度条件下光伏组件平均寿命近似为 20~25 年; 与此同时, 还对现有的加速退化试验进行了分析改进, 探讨了运用步降加速退化试验代替传统的恒定应力加速退化试验的可能性。

关键词: 光伏组件; 湿热试验; 加速退化; Gamma 过程; 功率衰减; 使用寿命

Study on Power Degradation and Service Lifetime of Photovoltaic Modules Based on Damp-heat Test

Fan Jing, Qian Zheng, Wang Jingyi

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problem of power degradation and service lifetime of photovoltaic (PV) modules, based on the inverted S-shaped normalized power degradation law of PV modules under accelerated damp-heat conditions, an exponential time scale transformation function is proposed to transform the nonlinear normalized power of PV modules. The Gamma process is applied to model the normalized power degradation data of PV modules under accelerated damp-heat conditions, and service lifetime of PV modules is estimated based on the definition of PV module lifetime. The correctness and rationality of the proposed method are verified by measured service lifetime and estimated service lifetime of PV modules under the damp-heat test. The method shows that the average service lifetime of PV modules is about 20-25 years at 50℃ and 45% relative humidity. At the same time, the existing accelerated degradation test was analyzed and improved, and the possibility of using the step-down accelerated degradation test instead of the traditional constant stress accelerated degradation test was discussed.

Keywords: photovoltaic module; damp-heat test; accelerated degradation; Gamma process; power degradation

0 引言

随着能源消耗的增长和环境污染问题的加剧, 以光伏发电为代表的新能源在全世界范围内得到了迅速发展^[1]。据国际能源署预测, 到 2050 年光伏发电将占到全球电力产出的 25% 以上^[2]。与此同时, 光伏组件质量问题日益突出, 光伏组件耐久性和可靠性问题受到了国内外广泛关注^[3-5]。事实上, 光伏组件可靠性和耐久性不仅影响着光伏电站安全, 还决定了光伏组件的平准化度电成本 (levelized cost of energy, LOCE), 因此光伏组件性能衰减规律与寿命估计成为了研究人员努力攻克的难题^[4,6-7]。

光伏组件长期工作于恶劣的室外环境下, 随着时间推移光伏组件性能会出现不同程度的衰减。业界一般定义光

伏组件功率衰减到初始功率的 80% 所对应的时间点是光伏组件的寿命, 普遍认为光伏组件的寿命为 20~25 年, 然而这一结果目前尚缺乏科学依据^[8], 没有有效的测试手段对光伏组件的使用寿命进行测试。

影响光伏组件性能衰减的因素众多, 总体来看可以分为内因和外因两部分^[9]。内因包括光伏组件结构、组件材料与制造技术等, 内因是光伏组件性能退化的根本原因。外因包括环境因素, 如温度、湿度、紫外辐射、机械载荷等, 外因是光伏组件性能退化的直接原因。文献 [10-11] 研究发现, 温度和湿度是影响光伏组件性能退化的最重要两个因素, 温湿度作用下晶体硅光伏组件会出现腐蚀、分层和褪色等多种失效现象; 文献 [12-13] 对长期运行光伏组件性能及其衰减原因进行了分析; 文献 [14] 基于加速试验技术, 利用深度学习研究了晶体硅光伏组件在温度、湿度和辐照度共同作用下的使用寿命情况。总之, 光伏组件性能衰减影响因素众多、失效机理复杂、失效形式多样, 基于光伏组件性能衰减数据研究其寿命存在波动性 (volatility)、不确定性 (uncertainty)、复杂性 (complexity)、多义性 (ambiguity) 等特点^[15]。室外条件下无法有效的控制各个影响因素, 所以在室内运用加速试验模拟室外环境成

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-11-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573046)。

作者简介: 樊 静(1993-), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事现代电气检测技术方向的研究。

钱 政(1973-), 男, 江苏常州人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事现代电气检测技术、先进传感技术以及大型机电设备的在线检测与故障诊断方向的研究。

为研究光伏组件性能衰减和寿命的有效手段^[16]。本文对加速湿热条件下晶体硅光伏组件功率衰减数据进行分析,在此基础上对功率衰减过程进行建模,建立光伏组件功率输出与环境温度、环境湿度间的映射模型,并根据光伏组件功率衰减与光伏组件寿命的关系估计光伏组件的寿命,最终对当前的加速试验测试方法提出相关改进。

1 加速湿热条件下光伏组件功率衰减规律

光伏组件结构对光伏组件性能衰减具有重要影响,本文研究的晶体硅光伏组件多采用如图 1 所示封装结构,即“玻璃—密封剂—电池片—密封剂—背板”五层结构。玻璃和背板将电池片保护起来以减少环境因素对光伏组件的影响;密封剂多采用 EVA (Ethylene Vinyl Acetate) 共聚物,将其玻璃和电池片、背板和电池片粘结在一起;各个电池片之间通过导线连接,最后四周利用铝材进行封装以最大程度减少环境因素对电池片性能的影响。

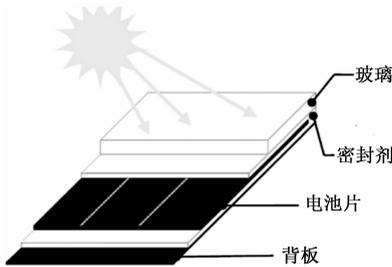


图 1 晶体硅光伏组件常见封装形式

自然暴露法和加速试验法是研究光伏组件性能衰减与使用寿命的两种常用方式^[16]。文献 [15 - 17] 研究了室外长期暴露条件下光伏组件归一化功率衰减过程 (如图 2 (a) 所示), 可以看到室外条件下光伏组件归一化功率呈现倒 S 形衰减。由于室外暴露法试验时间长、试验难以控制等特点, 加速试验法逐步受到了青睐。文献 [18 - 19] 将光伏组件置于多个温湿度水平下进行恒定应力加速退化试验, 测试数千小时后光伏组件归一化功率衰减过程如图 2 (b) 所示。由图 2 可以看到, 无论室外长期暴露下还是室内加速湿热条件下, 晶体硅光伏组件归一化功率曲线均呈倒 S 形衰减。这一过程大致可以分为诱导期、衰减期和饱和期, 诱导期内光伏组件归一化功率衰减缓慢, 随着时间推移归一化功率进入衰减期, 归一化功率迅速衰减直至饱和期, 饱和期内光伏组件功率衰减出现饱和, 即功率衰减不会衰减到 0。需要注意的是, 不同光伏组件饱和水平可能不同。

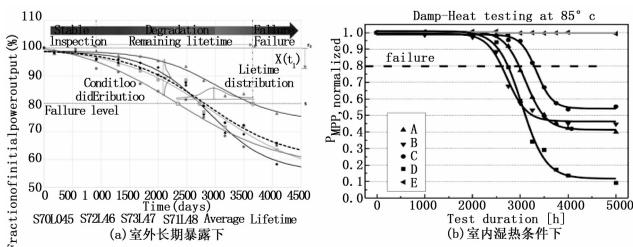


图 2 光伏组件归一化功率衰减曲线

文献 [18 - 19] 对光伏组件功率衰减数据进行了评估并研究了湿度的影响, 但并未给出依据加速退化数据估计光伏组件寿命的方法。文献 [14] 将光伏组件置于温度、湿度和辐照度条件下进行加速退化试验, 试验时长 1000 h, 发现光伏组件功率衰减呈线性形式, 并以此研究了光伏组件的寿命。进一步分析发现作者加速试验时间较短, 获取功率衰减数据不充分, 即功率衰减过程只是图 2 (b) 诱导期结果, 因此寿命估计结果值得进一步商榷。文献 [15] 运用 Gamma 过程对光伏组件功率衰减规律进行了建模, 并基于此对光伏组件功率衰减和寿命进行了分析, 但是作者仍然采用的是线性变换对光伏组件归一化功率衰减进行建模, 因此其寿命估计结果偏差较大。后文将基于光伏组件归一化功率倒 S 形衰减规律, 对光伏组件归一化功率进行建模, 从而估计其使用寿命。

2 光伏组件功率衰减与寿命分布模型

本文基于文献 [18] 加速退化数据, 利用 Gamma 过程对光伏组件功率衰减过程进行建模。假设光伏组件输出功率为 $P(t)$, 由于不同光伏组件出厂时的额定功率不同 (设为 $P(t_0)$), 为了分析光伏组件功率退化情况, 对 $P(t)$ 归一化得:

$$x(t_j) = \frac{P(t_j)}{P(t_0)} \quad (1)$$

式中, t_j 为测量时刻, $j = 1, \dots, J$ 。通过前文分析, $x(t)$ 是“倒 S 形”单调衰减的。由于 Gamma 过程是单调非减的随机过程, 同时改变其分布参数可以将其转化为其他类型分布, 因此可以采用 Gamma 过程对光伏组件功率衰减过程进行建模。由于随机过程本身并不受限于 $[0, 1]$, 因此对 $x(t_j)$ 对数化处理得:

$$g_j = -\log\left(\frac{x(t_j)}{x(t_{j-1})}\right) = \log(x(t_{j-1})) - \log(x(t_j)) \quad (2)$$

式中, $g_j > 0, j = 1, \dots, J$ 。对数变换并不改变归一化功率倒 S 形衰减规律, 只是对衰减过程进行一定程度的缩放。由于光伏组件功率衰减是一个倒 S 形非线性曲线, 为了使得 Gamma 随机过程平稳, 本文选择指数时间尺度变换函数 $\Delta(t) = 1 - \exp(-\alpha t^\gamma)$ 将倒 S 形功率衰减变换为线性衰减, 其具体形式将在后文给出。

假设 g_j 服从形状参数为 $\alpha \cdot \Delta(t_j)$ 、尺度参数为 β^{-1} 的 Gamma 分布, 所以 g_j 有条件概率密度函数:

$$f_{g|\beta}(g | \beta) = \frac{\beta^{\alpha \Delta(t_j)}}{\Gamma(\alpha \cdot \Delta(t_j))} g^{\alpha \Delta(t_j) - 1} \exp(-\beta g) \quad (3)$$

式中, $\Delta(t_j) = \Delta(t_j) - \Delta(t_{j-1})$, $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ 是 Gamma 函数。考虑到不同光伏组件寿命的差异, 假设 β 服从形状参数为 σ 、尺度参数为 ξ^{-1} 的 Gamma 分布, 即 $\beta \sim Ga(\sigma, \xi^{-1})$, 所以 β 有概率密度函数:

$$f_\beta(\beta) = \frac{\xi^\sigma}{\Gamma(\sigma)} \beta^{\sigma-1} \exp(-\xi\beta), \quad \beta > 0 \quad (4)$$

由式 (3)、(4) 得, g_j 有概率密度函数:

$$f_g(g) = \int_0^\infty f_{g|\beta}(g | \beta) \cdot f_\beta(\beta) d\beta =$$

$$\frac{1}{B(\alpha\Delta\Lambda(t_j), \sigma)} \cdot \frac{g_{i,k,j}^{\alpha\Delta\Lambda(t_j)-1} \xi^\sigma}{(g_{i,k,j} + \xi)^{(\alpha\Delta\Lambda(t_j)+\sigma)}} \quad (5)$$

式中, $B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$ 为 beta 函数。

光伏组件寿命 L 定义为功率衰减首次到达初始值 80% 所对应的时间点, 即:

$$L = \inf\{t \mid x(t) \leq \omega\} \quad (6)$$

式中, $\omega = 0.8$ 。已经得到, $x(t) = \exp(-G(t))$, 因此寿命 L 的累积分布函数为:

$$F_L(t) = P(x(t) \leq \omega, L \leq t) = P(G(t) \geq -\log(\omega), L \leq t) = 1 - \frac{B\left(\frac{\log(\omega)}{\log(\omega) - \xi}; \alpha\Lambda(t), \sigma\right)}{B(\alpha\Lambda(t), \sigma)} \quad (7)$$

式中, $B(x; a, b) = \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$ 为不完全 beta 函数。

至此已建立了光伏组件归一化功率衰减过程模型与寿命分布模型, 但是仍然无法将加速温湿度条件下光伏组件使用寿命外推到正常使用条件下, 因此需要建立归一化功率与温湿度间关系。假设 (T_1', RH_1') 和 (T_2', RH_2') 下光伏组件寿命为 t_1 和 t_2 。根据加速退化试验理论, 加速退化试验必须保证失效机理不变^[20], 因此对任意 t_1 和 t_2 有如下等式成立^[21]:

$$F_1(t_1) = F_2(AF_{1,2} \cdot t_1) \quad (8)$$

因此 $\Lambda(t) = 1 - \exp(-\delta t^\eta)$ 中 δ 和 T, RH 满足关系:

$$\delta = \exp(a + bT + eRH) \quad (9)$$

其中, T, RH 是 T', RH' 经归一化后的温度和湿度^[22]。

即参数 $\alpha, \eta, \sigma, \xi$ 与温湿度水平无关, δ 对数和归一化温度、归一化湿度存在线性关系。

3 加速湿热试验下功率衰减与使用寿命分析

在以温湿度为加速应力的恒定应力加速退化试验^[22]中, 假设 $g_{i,k,j}$ 表示第 i 块光伏组件在第 k 个加速温湿度水平 (T_k, RH_k) 下第 j 次测量得到的归一化功率负对数, 所以 $g_{i,k,j}$ 的概率密度函数为:

$$f_g(g_{i,k,j}) = \frac{1}{B(\alpha\Delta\Lambda(t_j), \sigma)} \cdot \frac{g_{i,k,j}^{\alpha\Delta\Lambda(t_j)-1} \xi^\sigma}{(g_{i,k,j} + \xi)^{(\alpha\Delta\Lambda(t_j)+\sigma)}} \quad (10)$$

式中, $\Delta\Lambda(t_j) = \Lambda(t_j) - \Lambda(t_{j-1}), \Lambda(t_j) = 1 - \exp(-\delta_k t_j^\eta), \delta_k = \exp(a + bT_k + eRH_k), k = 1 \dots K, i = 1 \dots N_k, j = 0 \dots J_k$, 未知参数向量为 $\theta = (\alpha, a, b, e, \eta, \sigma, \xi)$ 。因此 $g_{i,k,j}$ 的对数似然函数为:

$$\ln L(\theta) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{J_k} \sigma \log(\xi) + (\alpha\Delta\Lambda(t_{kj}) - 1) \log(g_{i,k,j}) - (\alpha\Delta\Lambda(t_j) + \sigma) \log(g_{i,k,j} + \xi) - \log(B(\alpha\Delta\Lambda(t_j), \sigma)) \quad (11)$$

对于这种复杂模型, 最大期望 (Expectation Maximization, EM) 算法比最大似然算法往往更有效, 因此可以使用 EM 算法对模型参数进行估计^[23]。

根据文献 [18] 中 (65°C/65% RH)、(75°C/65% RH)、(75°C/75% RH)、(85°C/75% RH)、(85°C/85% RH)、(95°C/85% RH)、(95°C/95% RH) 七个温湿度水平下光伏组件功率衰减数据, 利用 EM 算法得到模型参数估计结果如表 1。

表 1 模型相关参数估计值

参数	α	a	b	e	η	σ	ξ
估计值	10.18	-67.25	37.93	32.31	9.03	282.66	20.37

为了验证模型求解参数准确性, (80°C/80% RH)、(80°C/70% RH)、(70°C/70% RH) 下光伏组件归一化功率衰减实测结果如图 3 散点所示, 按照模型参数估计值得到的 3 种温湿度条件下光伏组件归一化功率拟合结果如图 3 曲线所示, 可以看到各个温湿度水平下光伏组件归一化功率实测结果与拟合结果较一致, 说明了本文提出模型和算法的有效性。因此可以采用本文中提出的模型估计光伏组件寿命。

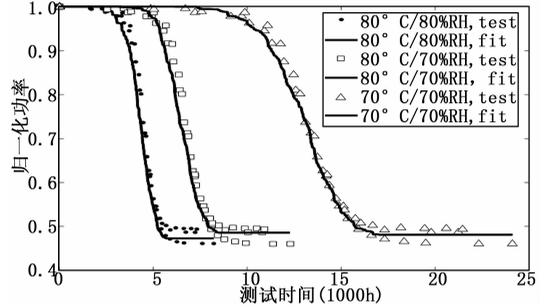


图 3 归一化功率衰减实测结果和拟合结果

对光伏组件寿命分布函数 (7) 式求导得到光伏组件寿命的概率密度函数 $f_L(t)$ 为:

$$f_L(t) = W\left(\frac{\log(\omega)}{\log(\omega) - \xi}; \alpha\Lambda(t), \sigma\right) \cdot \alpha \cdot \delta \eta t^{\eta-1} \exp(-\delta t^\eta) \quad (12)$$

其中, $W(x; a, b)$ 形式如 (13) 式, 并且 F_n 是合流超几何函数, $\psi(x) = d \ln \Gamma(x) / dx$ 为双 Gamma 函数。

$$W(x; a, b) = \frac{x^a}{aB(a, b)} \times \left[\left(\psi(a) - \psi(a+b) - \log(x) + \frac{1}{a} \right) \cdot {}_2F_1(\{a, 1-b\}, \{1+a\}; x) - \frac{x(1-b)}{(1+a)^2} \cdot {}_3F_2(\{2-b, 1+a, 1+a\}, \{2+a, 2+a\}; x) \right] \quad (13)$$

因此, 光伏组件平均寿命 \bar{L} 可以由下式得到:

$$\bar{L} = E[L] = \int_0^\infty t f(t) dt \quad (14)$$

由于 $f_L(t)$ 的复杂性, 因此平均寿命 \bar{L} 可以运用数值求解算法迭代求解。光伏组件可靠度函数为:

$$R(t) = 1 - F_L(t) = \frac{B\left(\frac{\log(\omega)}{\log(\omega) - \xi}; \alpha\Lambda(t), \sigma\right)}{B(\alpha\Lambda(t), \sigma)} \quad (15)$$

根据表 1 估计的模型参数, 结合式 (7)、(12)、(15) 式可以得到 (85°C/85% RH) 下光伏组件的概率密度函数、分布函数以及可靠度函数如图 4、图 5 所示。由图 4 可以得到, 光伏组件在 (85°C/85% RH) 下使用寿命的众数为 2 584 h, 平均寿命和中位寿命分别为 2 652 h 和 2 643.2 h, 这与 (85°C/85% RH) 下直接利用加速试验测得的光伏组

件寿命 2 608 h 很接近^[18]。由图 5 可以得到光伏组件在 (85℃/85% RH) 下置信区间为 95% 的使用寿命区间估计为 (2 332, 2 893) h, 光伏组件的实测使用寿命 2 608 h 较接近估计区间中点处。这些结果进一步证明了所提出模型和算法的正确性和有效性。

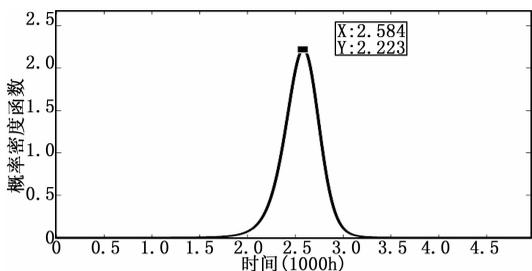


图 4 (85℃/85% RH) 条件下寿命概率密度函数

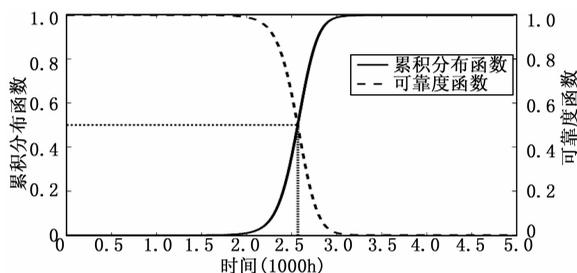


图 5 (85℃/85% RH) 下寿命分布函数与可靠度函数

基于以上方法,可以得到任意温湿度下光伏组件使用寿命估计结果如图 6 所示。可以看出不同温湿度水平对应不同的使用寿命估计,并且随着温度和湿度水平的上升,组件使用寿命迅速下降——在 (40℃/30% RH) 下组件平均使用寿命为 183.5 年,在 (50℃/45% RH) 下组件平均使用寿命为 212.18 千小时 (约为 24.22 年),在 (85℃/85% RH) 下组件平均使用寿命为 2 652 h (约为 0.3027 年)。

研究表明,运行于室外运行条件光伏组件内部温湿度长期处于 (50℃/45% RH) 下,可以发现这一温湿度水平下光伏组件平均使用寿命估计为 24.22 年,95% 置信度下平均使用寿命的区间估计为 (180.3, 235.5) 千小时,约为 (20.58, 26.88) 年,这一结果比较接近当前光伏组件制造商承诺的 25 年平均使用寿命。与此同时,温湿度对光伏组件性能衰减与使用寿命估计具有重要影响,准确的光伏组件工作温湿度对于光伏组件性能衰减与使用寿命估计较为重要。然而当前却没有使用寿命“工作条件”的相关标准或者规定,因此后续研究中应该对光伏组件使用寿命的温湿度工作环境 (如 50℃, 45% 相对湿度) 进行统一,但这已不是本文的研究重点,本文后续工作仍采用 (50℃/45% RH) 作为光伏组件的“正常使用温湿度”。

4 湿热试验改进分析

可以看到,以上模型能够建立光伏组件功率衰减与温湿度水平间关系,进而可以估计光伏组件使用寿命。但是功率退化数据来自恒定应力加速退化试验,该试验方法耗时非常长,完成单个温湿度下光伏组件功率测量至少需要

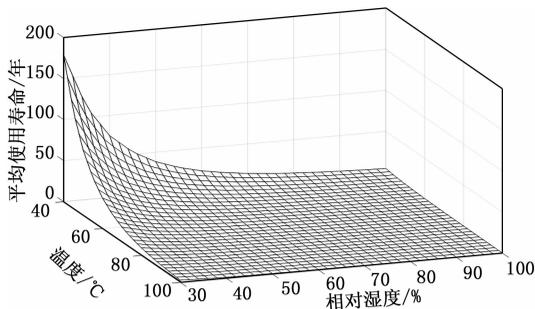


图 6 组件 B 平均寿命与温湿度之间关系

几千小时 (数月),完成多个温湿度下试验至少需要上万小时 (一年至数年),这不仅无法达到快速估计组件寿命的目的,还会产生高额检测成本 (包括组件成本、测试成本和运行成本),因此本节对加速退化试验进行探讨分析,以期在更短时间内获得充分数据来评估光伏组件使用寿命。

根据加速试验理论,加速退化试验可以分为恒定应力加速退化试验、步进应力加速退化试验、步降应力加速退化试验和序贯应力加速退化试验。当前对光伏组件进行加速测试采用的是恒定应力加速试验的方式,而序贯应力加速退化试验对试验设备要求较高,需要温湿度试验箱具有长期温湿度控制能力和短期温湿度稳定能力,由于光伏组件工作的温湿度范围较大,如果采用该方案对设备要求较高,因此不考虑该试验方案;考虑到光伏组件功率在湿热条件下衰减分为 3 个阶段——诱导期衰减较慢,衰减期快速衰减,饱和期衰减达到饱和值——诱导期缓慢的功率衰减需要采用更高的加速应力使得光伏组件在更短时间内完成功率退化,并且只要合理控制最高应力水平则不会导致光伏组件失效形式改变,因此更适合采用步降应力加速退化试验对光伏组件进行加速测试。

步降应力加速退化试验中,将 N 个光伏组件置于 K 个温湿度应力水平 (K 步) 下进行步降应力加速退化试验,光伏组件正常使用温湿度水平 $S'_0 = \begin{pmatrix} T'_0 \\ RH'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50^\circ\text{C} \\ 45\% \end{pmatrix}$ 。每个应力测试周期为 $T_k, k = 1 \dots K, T_0 = t_0 = 0$ 。在应力水平 S'_k 下样品的性能测试次数为 M_k ,累积测试次数为 $M = \sum_{k=1}^K M_k$,在应力水平 S'_k 下测试频率为 $f_{k \circ t_{k,i,j}}$ 为第 i 个光伏组件在第 k 个应力下第 j 次测量时刻, $P_{i,k,j}$ 为测量到的对应的光伏组件功率数据, $k = 1 \dots K, i = 1 \dots N, j = 1 \dots \sum_{k=1}^K M_k$ 。

运用步降应力加速退化试验方式获取 $P_{i,k,j}$ 数据后,可以按照第 2 节方法对 $P_{i,k,j}$ 进行建模、估计功率衰减模型参数。值得注意的是,步降加速退化试验中 $\Delta\Lambda(t_j)$ 和第 2 节中 $\Delta\Lambda(t_j)$ 不同,主要体现在两方面,一是 $\Delta(t)$ 在“应力切换时刻”不可导,由于该处导数值对衰减结果没影响,因此不考虑“应力切换时刻”的 $\Delta\Lambda(t_j)$;二是 $\Delta(t)$ 在“非应力切换时刻”是分段函数,分几段与应力组合数 K 有关。因此 $\Delta\Lambda(t_j)$ 是一个 K 段的分段函数:

$$\Delta\Lambda(t_j) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \exp(-\delta_1 t_{j-1}^\gamma) - \exp(-\delta_1 t_j^\gamma) \quad 2 \leq j \leq M_1 \\ \vdots \\ \exp(-\delta_k t_{j-1}^\gamma) - \exp(-\delta_k t_j^\gamma) \quad \sum_{l=2}^k M_{l-1} + 2 \leq j \leq \sum_{l=1}^k M_l \\ \vdots \\ \exp(-\delta_K t_{j-1}^\gamma) - \exp(-\delta_K t_j^\gamma) \quad \sum_{l=2}^K M_{l-1} + 2 \leq j \leq \sum_{l=1}^K M_l \end{array} \right.$$

步降应力加速退化试验中, 需要确定的试验因素包括: 样本量 N ; 温湿度组合数 K ; 应力水平 $(S'_1, S'_2, \dots, S'_K)$, 其中 $S_k = (T_k, RH_k)$; 观测频率 (f_1, f_2, \dots, f_K) ; 测量次数 (M_1, M_2, \dots, M_K) 。即完整的步降应力加速退化试验方案可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{cccc} N & K & (S_k, f_k, M_k) & = \\ \left(\begin{array}{cccc} T_1 & T_2 & \dots & T_K \\ RH_1 & RH_2 & \dots & RH_K \\ f_1 & f_2 & \dots & f_K \\ M_1 & M_2 & \dots & M_K \end{array} \right) \end{array} \right.$$

以温度和湿度为加速应力, 通过设计步降应力加速退化试验中各个试验因素, 能够大大缩短加速退化试验时间, 进而能够在较短时间内获得充足的数据以评估光伏组件的功率衰减情况和使用寿命。

5 结论

无论室外长期暴露下还是室内加速湿热条件下, 光伏组件归一化功率均以倒 S 形规律衰减。基于此, 本文利用 Gamma 过程建立了加速湿热条件下光伏组件归一化功率衰减过程模型, 与此同时利用指数时间尺度变换函数建立了温湿度与归一化功率的联系, 从而可以将加速湿热试验下光伏组件归一化功率衰减规律外推到任意温湿度条件下, 进而实现了任意温湿度条件下光伏组件使用寿命的估计。方法表明, 在 50°C 、 45% 相对湿度条件下光伏组件平均寿命近似为 20~25 年, 这与业界认为的光伏组件使用寿命为 20~25 年较为一致。但需要注意的是室外暴露下的光伏组件工作环境更加复杂, 因此光伏组件实际使用寿命可能不到 25 年, 另一方面目前尚无关于使用寿命“工作条件”的标准或者规定, 这是后续研究中可以探讨的问题之一。本文还对加速退化试验进行了改进分析, 提出利用步降应力加速退化试验替代当前的恒定应力加速退化试验, 并对步降应力加速退化试验下光伏组件归一化功率衰减建模以及使用寿命估计进行了说明。

参考文献:

[1] 黄 冰. 太阳能光伏发电应用的现状及发展 [J]. 低碳世界, 2017 (32): 77-78.
 [2] 江 华. 国内外光伏产业发展现状与趋势 [J]. 太阳能, 2016, (12): 15-17.
 [3] Meyer E L, Dyk E E V. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53 (1): 83-92.
 [4] Spagnuolo G, Xiao W, Cecati C. Monitoring, Diagnosis, Prognosis, and Techniques for Increasing the Lifetime/Reliability of Photovoltaic Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial E-

lectronics, 2015, 62 (11): 7226-7227.
 [5] Vázquez M, Rey-Stolle I. Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies [J]. Prostate, 2008, 16 (5): 419-433.
 [6] Ndiaye A, Charki A, Kobi A, et al. Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review [J]. Solar Energy, 2013, 96: 140-151.
 [7] Sharma V, Chandel S S. Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 27 (6): 753-767.
 [8] Osterwald C R, McMahon T J. History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2010, 17 (1): 11-33.
 [9] Fouad M M, Shihata L A, Morgan E S I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1499-1511.
 [10] Köntges M, Kurtz S, Packard C, et al. Review of Failures of Photovoltaic Modules [J]. IEA-Photovoltaic Power System Programme, 2014.
 [11] Wohlgemuth J, Kurtz S. Predicting PV module service life [A]. SPIE Solar Energy + Technology [C]. 2013: 882503.
 [12] 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.
 [13] 黄盛娟, 唐 荣, 唐立军. 光伏组件功率衰减分析研究 [J]. 太阳能, 2015 (6): 21-25.
 [14] 余荣斌. 基于性能退化的光伏组件服役可靠性评估方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
 [15] Park S H, Kim J H. Application of gamma process model to estimate the lifetime of photovoltaic modules [J]. Solar Energy, 2017, 147: 390-398.
 [16] 郑海兴, 余荣斌, 舒碧芬, 等. 光伏组件加速试验应用现状及发展趋势 [J]. 太阳能, 2013 (11): 45-49.
 [17] Kuitche J M. A Statistical Approach to Solar Photovoltaic Module Lifetime Prediction [J]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2014.
 [18] Koehl M, Hoffmann S, Wiesmeier S. Evaluation of damp-heat testing of photovoltaic modules [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2017, 25 (2).
 [19] Zhu J, Koehl M, Hoffmann S, et al. Changes of solar cell parameters during damp-heat exposure [J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2016, 24 (10): 1346-1358.
 [20] 邓爱民, 陈 循, 张春华, 等. 加速退化试验技术综述 [J]. 兵工学报. 2007, 28 (8): 1002-1007.
 [21] Wang H, Xu T, Mi Q. Lifetime prediction based on Gamma processes from accelerated degradation data [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28 (1): 172-179.
 [22] 孙 权, 冯 静, 潘正强. 基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
 [23] Tsai C C, Tseng S T, Balakrishnan N. Optimal design for degradation tests based on gamma processes with random effects [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61 (2): 604-613.