

考虑复杂工况的光伏组件功率衰减评估方法

倪佳华¹, 赵智兴¹, 朱殷晓², Aidha Muhammad Ajmal², 杨永恒²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:在光伏发电系统的实际运行中,光伏组件的光电转化效率及老化速率容易受到辐照强度、湿度、温度等多方面因素影响。因此,需要根据光伏组件不同场景下的物理老化规律进行分析评估,以实现光伏发电系统的平准化成本核算以及组件选型和系统设计的综合评估。考虑实际运行场景中的多物理场相互作用,传统基于经验参数或加速老化试验的光伏组件功率衰减评估方法的结果,无法很好满足光伏发电系统运行场景多类差异的设计需求。因此,提出一种考虑复杂工况的光伏组件功率衰减评估方法。通过将基本老化模型与实际运行工况结合起来,实现考虑光伏组件环境因素影响的光伏老化率修正,以实现与光伏电站实际运行场景更匹配的光伏组件功率衰减综合评估。

关键词:光伏组件;功率衰减;复杂工况;综合评估

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25829

Mission-profiles-based Power Degradation Assessment for Photovoltaic Modules

NI Jiahua¹, ZHAO Zhixing¹, ZHU Yinxiao², MUHAMMAD AJMAL Aidha², YANG Yongheng²

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Regarding the practical operation of photovoltaic (PV) systems, the photo-electron conversion efficiency and degradation rate of PV modules are easily affected by several factors, e. g., irradiance, humidity, and temperature. Subsequently, an efficient framework for assessing power degradation became the cornerstone for ensuring the levelized cost of energy (LCoE) and conducting a comprehensive analysis of module selection and system design. However, due to the multi-physical field coupling effect in on-field applications, conventional frameworks relying on empirical coefficients or accelerated ageing tests have shown limitations in degradation assessments under complex environmental conditions. To address these issues, a mission-profiles-based power degradation assessment framework for PV modules was proposed. The proposed framework can effectively bridge the degradation model and mission profiles by utilizing adaptive compensation for the impact of environmental coefficients on the module degradation rate, thereby achieving a more reliable assessment of the power degradation of PV modules.

Key words: photovoltaic (PV) module; power degradation; mission-profiles; assessment framework

随着“双碳”目标的推进,电力系统能源结构逐步从以化石能源为主体的传统发电方式向以可再生能源为主体的发电方式转变。在风力发电、波浪能发电等多类型新能源利用形式中,太阳能发电凭借其广泛性、长久性等优势,逐渐成为了当前年装机容量增长率最快、最具成本效益

的可再生能源发电方式之一^[1]。根据发电原理的差异,太阳能发电方式可主要分为“光—热—电”与“光—电”转换两种形式。其中,“光—热—电”发电方式主要是利用太阳辐射的热能形成蒸汽(电—热转换),并进一步驱动汽轮机产生电能(热—电转换)。该方式主要以集中式发电为主,

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZB20240644)

作者简介: 倪佳华(1991—),男,博士,主要研究方向为光伏发电系统可靠性评估、风光储协调优化等,Email: ni_jh@hdec.com

通讯作者: 朱殷晓(1995—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为光伏发电及友好并网技术、电力电子可靠性等,

Email: yinxiao.zhu@zju.edu.cn

但是电站建设成本较高。“光—电”发电则是当前实现太阳能分布式高效利用的主要形式,其又被称为光伏(photovoltaic, PV)发电,核心是利用光伏组件中的不均匀半导体界面在太阳辐射作用下的光生伏特效应,实现光能到电能的直接转换。

当前,常规的光伏发电系统主要由光伏组件、控制器以及逆变器组成。其中,光伏组件是光伏发电系统中的核心组成部件,其“光—电”转换性能及可靠性会直接影响转换效率、度电成本以及发电系统的生命周期等光伏发电系统关键评价指标。为保障光伏发电系统的经济效益,光伏组件需保障在25 a实际运行工况下,功率衰减率不超过20%^[1]。当前,光伏组件功率衰减评估主要手段为依据国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)等机构的相关标准,在特定的测试条件下对待测光伏组件进行加速老化实验以模拟其实际运行工况对组件性能影响,并根据电学性能测试结果确定其功率衰减情况。

值得注意的是,基于标准化实验的光伏组件性能评估往往需要较长的测试时间。同时,由于实际光伏组件服役场景与实验室标准测试条件场景间的显著差异,传统基于加速老化实验的功率衰退评估结果难以有效反映在不同装机场景中光伏组件的功率衰减变化情况。同时,加速老化实验对测试设备及结果获取时间均有要求,时间成本较高。基于经验参数模型的光伏组件性能衰减评估不依赖特定试验设备,是一种较为高效省时的评估方法。然而,光伏组件所处的服役环境复杂多变,其性能衰减同时受到太阳辐射强度、湿度、温度、风速和灰尘等多方面因素影响,选取固定性能衰减率的评估方案难以反映环境因素作用^[3]。

因此,考虑光伏组件运行中的环境波动及多因素相互作用,本文提出了一种考虑实际工况的光伏组件功率衰减评估方法。该方法基于基本性能衰减评估模型,通过引入考虑环境因素变化的组件衰减率修正环节,实现计及时间环境因素影响的光伏组件性能衰减评估。

1 光伏组件性能衰减模型

在传统组件性能衰减评估方案中,光伏组件性能随时间变化的衰减情况可以通过将目标运

行时间代入到相应的线性模型、指数模型等数学模型中进行分析评估,以获取特定运行时间后组件性能的衰减程度。

1.1 基础线性模型

光伏组件的功率退化是用于组件性能老化的重要指标。线性回归模型是用于评估光伏组件功率退化情况的经典模型,其表达式为

$$\frac{P(t)}{P_0} = 1 - k \cdot t \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻光伏组件的输出功率; P_0 为光伏组件的初始功率; k 为光伏组件的功率年平均衰减率。

然而,在实际光伏系统中,光伏组件的功率退化往往呈现非线性退化特征。因此,光伏组件功率老化评估可以选取其他不同的光伏性能退化模型以提升评估的准确率。

1.2 基础指数模型

指数模型考虑了光伏组件性能退化过程中的部分非线性规律,初始功率与退化后功率间的数学关系可以表示为

$$\frac{P(t)}{P_0} = \exp(1 - k \cdot t) \quad (2)$$

1.3 考虑材料因素影响的改进指数模型

考虑部分材料因素对光伏组件功率退化的影响,基于指数模型的光伏组件性能退化评估模型可以进一步将基础指数模型优化为考虑材料影响的Pan模型^[4],并表示为

$$\frac{P(t)}{P_0} = \exp(1 - k \cdot t^\lambda) \quad (3)$$

式中: λ 为光伏组件材料相关参数。

1.4 考虑材料及形状因素影响的改进指数模型

在实际运行中,光伏组件的形状也会对其性能老化产生影响。因此,进一步考虑形状参数的影响,光伏组件性能退化评估进一步优化为Kaa-ya模型^[5],其数学表示为

$$\frac{P(t)}{P_0} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{k \cdot t}\right)^\mu\right] \quad (4)$$

式中: μ 为光伏组件的形状相关参数。

2 光伏组件性能评估方法

在实际服役场景中,光伏组件的性能与标准测试条件下确定的性能存在不同程度的差异性。同时,由于光伏组件所处的服役环境复杂多变,同时受到太阳辐射、湿度、温度、风和灰尘等因素

的综合影响。考虑实际运行场景,在应用上述基本老化模型的时候,需要考虑到光伏组件老化率的变化而非固定值,因此需要对光伏组件物理老化率演绎规律进行分析。若采用固定性能衰减率而不考虑环境影响作用,基于数学模型的组件性能衰减评估方案将无法实际工况场景下光伏组件功率衰减评估需求。

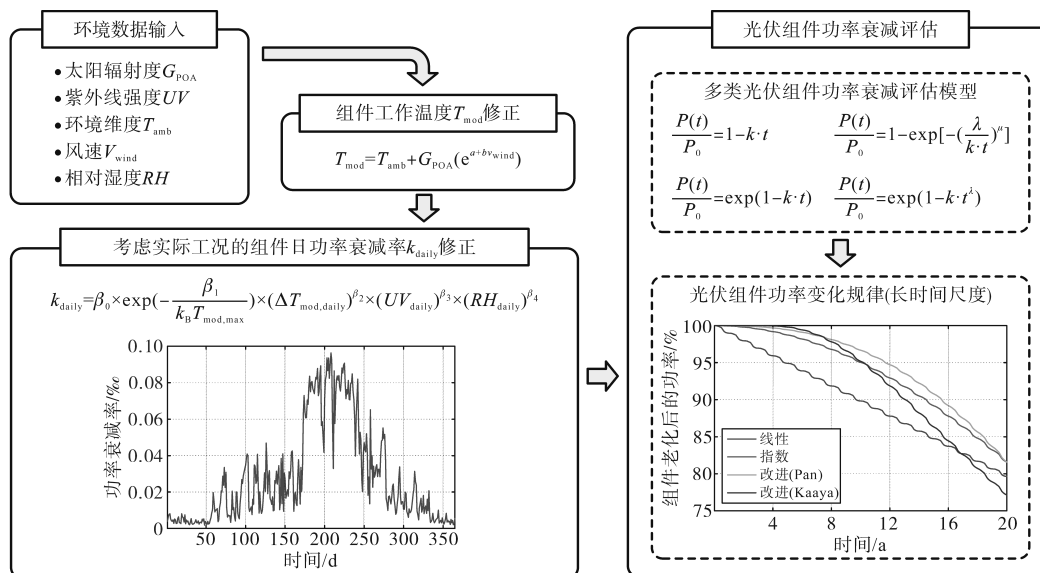


图1 本文提出的基于复杂工况的光伏组件性能老化评估框架

Fig.1 Proposed mission-profiles-based performance degradation assessment framework for PV modules

首先,本文所提方案将基于采集获取的太阳辐照度、环境温度、露点温度、相对湿度、风速等运行环境数据作为组件性能评估的初始数据集输入。经过数据筛选后,综合考虑组件运行温度、紫外线强度、相对湿度等环境参数影响,根据输入的数据集修正组件环境参数。本方案需要获取的参数主要包括太阳辐照度、紫外线强度、环境温度(包括最高气温、最低气温、平均气温)、风速以及相对湿度。

光伏组件物理老化率模型是一种数学函数,主要用于量化各类应力因素对光伏组件性能的影响,可用于对基本模型中的固定老化率根据实际运行场景进行修正,提升评估精度。这些模型是根据导致性能下降的老化机制所依据的物理和化学假设建立的。本文主要通过改进基于数据的线性拟合模型^[6],综合各时刻环境数据变化差异,用于综合评估各种环境条件对光伏组件性能衰减的影响。该模型考虑了最高温度、热循环、紫外线照射和相对湿度等因素变化的问题,以校正对组件性能衰减的影响,其表达式为

考虑实际运行中的多因素相互作用,本文提出了一种考虑实际复杂工况的光伏组件功率衰减评估方案,如图1所示。本文所提方案将基本老化模型与实际运行工况结合起来,并引入考虑光伏组件环境因素影响的光伏性能衰减率修正方案,以实现与光伏电站实际运行场景更匹配的光伏组件性能老化综合评估。

$$k_{\text{daily}} = \beta_0 \times \exp\left(-\frac{\beta_1}{k_B T_{\text{mod,max}}}\right) \times (\Delta T_{\text{mod,daily}})^{\beta_2} \times (UV_{\text{daily}})^{\beta_3} \times (RH_{\text{daily}})^{\beta_4} \quad (5)$$

式中: k_{daily} 为光伏组件日功率衰减率; $T_{\text{mod,max}}$ 为光伏组件的日最高温度,K; $\Delta T_{\text{mod,daily}}$ 为组件的日循环温度,K; UV_{daily} 为日平均紫外线辐照度, W/m^2 ; RH_{daily} 为日平均相对湿度,%; k_B 为波尔兹曼常数, $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$; β_0 为频率因子, s^{-1} ; β_1 为活化能,eV; β_2 为循环温度的影响系数,取值 $2 \sim 5$ ^[7]; β_3 为紫外线辐射的影响,取值 $0.6 \sim 1$ ^[8]; β_4 为相对湿度的影响,取值 $0 \sim 2$ ^[9]。

式(5)所需各项 β 系数取值可通过将估算获得的功率衰减趋势与在类似环境下的光伏电站中观察到的实际性能衰减趋势进一步选取确定。

上述组件性能衰减率修正方案中需要获取光伏组件温度数据,若对组件温度监测需要增加温度传感器数量,将大幅增加系统装机成本,且该项数据获取难度较高。因此,实际运行场景中光伏组件的工作温度可以通过结合光照强度与环境温度间的相互关系进行估算。因此,本文将

采用文献[10]中较为经典的解析模型估算实际运行环境条件下的光伏组件的工作温度,该模型同时考虑太阳辐照强度、风速、组件安装情况等多种因素对光伏组件的运行温度的影响,其数学表达式为

$$T_{mod} = T_{amb} + G_{POA} (e^{a + bv_{wind}}) \quad (6)$$

式中: T_{mod} 为光伏组件温度,℃; T_{amb} 为光伏组件所在运行工况的气温数据集,℃; G_{POA} 为光伏组件平面辐照度数据集, W/m^2 ; a, b 为经验系数; v_{wind} 为风速, m/s 。

本文中 a, b 取值为文献[10]中开放式支架安装配置情况下的系数,即 $a = -3.47, b = -0.0594$ 。

随后,结合各项环境气温,并通过式(6)对组件运行温度进行修正,可以获得组件日最高温度 $T_{mod,max}$ 为

$$T_{mod,max} = \max [T_{amb} + G_{POA} (e^{a + bv_{wind}})] \quad (7)$$

组件日循环温度 $\Delta T_{mod,daily}$ 则可以表示为

$$\Delta T_{mod,daily} = \max [T_{amb} + G_{POA} (e^{a + bv_{wind}})] - \min [T_{amb} + G_{POA} (e^{a + bv_{wind}})] \quad (8)$$

进一步,将通过式(6)~式(8)修正后的各项温度数据代入到式(5)中,结合光照等环境数据,即可获得光伏组件在该运行工况下的实际功率衰减率。

最后,将得到的组件功率衰减率进一步输入到前述的线性模型、指数型模型等光伏组件性能衰减模型中,即可构建完整的光伏组件性能衰减评估模型并获得相应的结果,实现对当前工况下光伏组件长时间运行下性能衰减情况的评估。

3 案例分析

由于美国国家航空航天数据库^[11]的公开气象数据的时间分辨率较高(可达 min 级)且能完整覆盖本文模型所需工况,本文选用该数据库中关于我国东海某地的公开气象数据信息作为本文模型所需工况数据输入,用于分析光伏组件在海上光伏电站长期运行场景下的功率衰减变化规律。如图2所示,本文中所用气象数据为某年分辨率为 1 h 的气象数据,其中包括太阳辐照度、气温(最高、最低及平均气温)、当地风速以及相对湿度情况。

首先,将获取的温度、风速及太阳辐照度数据代入到式(6)~式(8)中,分别获取组件运行温度、日内最高温度及日循环温度,实现对组件当

前运行环境下实际温度的获取。该地运行工况下,通过本方案修正获得的光伏组件的年内温度变化曲线如图3所示。

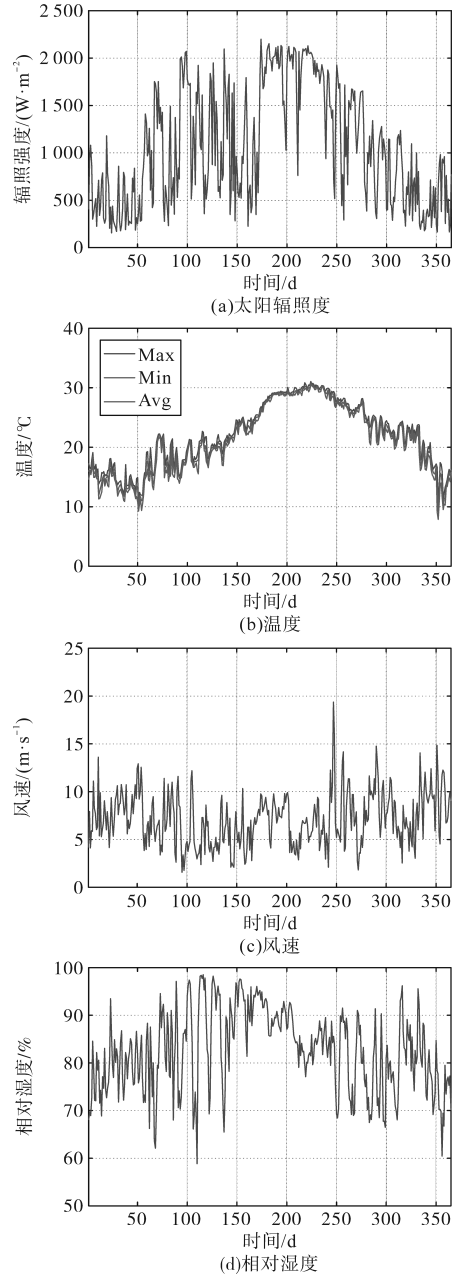


图2 东海某地环境工况数据

Fig.2 Mission profiles of a place in the East China Sea

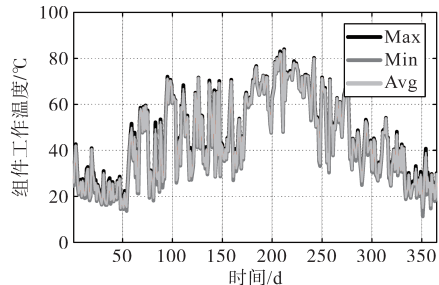


图3 修正得到的组件工作温度变化

Fig.3 Module temperature profile after model-based correction

然后,将获得的修正后的组件工作温度变化数据代入到式(5)中,计算获取在当前工况下组件性能退化率。注意,本案例中式(5)模型计算所涉及的各项 β 参数的取值分别为: $\beta_0 = 0.35$, $\beta_1 = 0.7$, $\beta_2 = 2.41$, $\beta_3 = 0.75$, $\beta_4 = 1.52$ 。基于所在地环境数据及根据组件温度修正模型获得的光伏组件实际运行温度数据,计算得到的当地光伏组件功率衰减率变化如图4所示。由图中可以看出,不同气象组合情况下,光伏组件的功率衰减率变化呈现差异,其中组件工作温度较高(对应图3时刻)且光照强度较强(对应图2时刻)时,光伏组件的功率衰减率会随之上升。进一步,将获取的光伏组件性能衰减率变化,代入到前述任意功率衰减评估模型中,即可获得当前运行场景中光伏组件老化后的功率变化情况。本文中用到的组件功率衰减评估模型中材料参数及形状参数等关键参数的取值如表1所示。

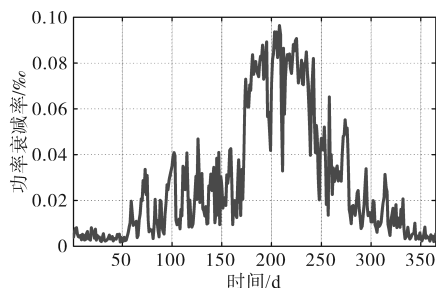


图4 实际工况中光伏组件功率衰减率变化

Fig.4 Degradation rate of PV module with real-world profiles

表1 各组件性能衰减模型参数设定

Tab.1 Parameters for different power degradation models

模型	材料参数 λ	形状参数 μ
线性模型	—	—
指数模型	—	—
Pan模型	1.59	—
Kaaya模型	0.43	0.53

根据本文所提评估框架获得光伏组件5 a和20 a长期运行下的光伏组件功率衰减变化曲线分别如图5和图6所示。值得注意的是,采用不同模型所获得功率衰减曲线均呈现与实际气象环境引起的衰减率变化相关度较高的波动,但功率衰减的趋势与模型相关。

如图5所示,采用线性模型评估得到经过5 a运行后光伏组件功率衰减到约为初始值的95%。采用另外3种模型评估结果则表明在前5 a的运行中,光伏组件的性能衰减均不显著,其功率在初始功率的98%以上。如图6所示,经过20 a运行后,采用不同模型评估得到的光伏组件性能退

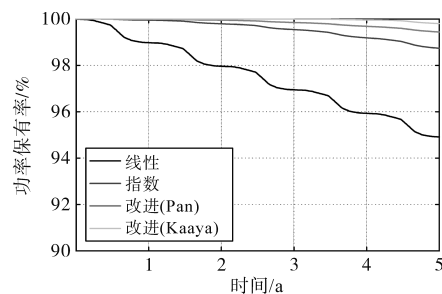


图5 基于不同模型的光伏组件5 a运行场景功率退化情况

Fig.5 5-year degradation assessment with different models

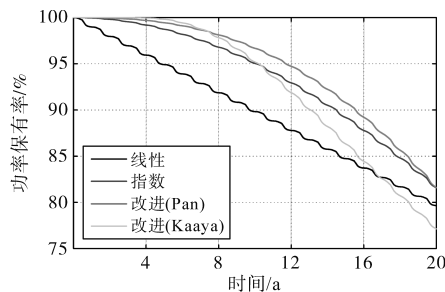


图6 基于不同模型的光伏组件20 a运行场景功率退化情况

Fig.6 20-year degradation assessment with different models

化差距则较为明显。其中,采用指数模型及考虑材料因素影响的Pan模型的评估结果较为接近,约为初始值功率的82%。与5 a结果不同的是,采用考虑形状及材料因素影响的Kaaya模型评估结果获取的20 a光伏组件性能退化情况明显高于其他3种模型的结果,其功率衰减到初始值的77%,为4个模型中最低。根据国内某光伏电站数据^[12],单晶硅光伏组件性能的年平均老化率约为1.092%,预计经20 a运行后组件功率将衰减到21.84%,即为初始值的78.16%。此结果与考虑材料及形状因素影响的改进指数模型(Kaaya模型^[5])的预测结果较为接近。考虑到实际工况的不可预测性以及实际组件的公差、内部制造缺陷等影响,此模型预测结果与实际电站中的长期运行结果必然存在一定误差,但其预测结果可为电站前期设计中组件选型、预测性维护等设计、运维环节提供参考。

由图5、图6可以看出,采用不同模型获得的光伏组件运行场景功率衰减规律存在一定的差异,且不同模型对于退化规律的演绎过程也存在不同的表现特性。整体而言,基于不同模型获取的预测曲线变化趋势不同主要源于其数学表达式的差异。线性模型假设变量间存在线性关系,预测曲线趋势相对平滑且单一;其他3种模型同属指数模型的变体,其假设线性关系,但预测曲线表现为低阶多项式。值得注意的是,对比其他

两种指数模型,考虑材料及形状因素影响的改进模型中引入了光伏组件材料参数,其曲线变化后期受形状参数 μ 的影响,因此,采用该模型预测得到的功率下降趋势更显著。在实际的分析应用中,需要进一步根据不同光伏组件加速老化试验结果,选取适合该组件老化变化规律的模型,并对模型的相关参数进行针对性修正,以实现更准确的光伏组件老化数字化评估。

4 结论

本研究提出了一种综合考虑运行环境中多因素复合作用的光伏组件功率衰减评估方法。该方法主要通过建立光伏组件实际工况与组件老化率主要影响因子间的映射,实现了对光伏组件环境因素影响的功率衰减率修正,从而更准确地评估光伏组件在实际运行场景中的性能衰减情况。同时,本文以东海某地采集的环境数据为样本,进行了案例分析。分析结果表明,所采用的组件老化分析模型主要影响其性能衰减过程的变化轨迹。同时,考虑到实际运行环境中环境因素的随机性和波动性,本文所提方法意在为光伏组件实际工况运行下性能评估提供新思路,所建立的模型均基于理论分析框架,模型中的形状参数、温度系数等关键参数需通过加速老化测试中光伏组件所受应力及其所引起的性能变化数据进行校准和修正,以保证预测结果的准确性。总体而言,考虑新型电力系统中的光伏发电的大规模并网,同时海上光伏系统蓬勃发展,本研究为光伏组件在实际运行环境中的性能评估提供了新的思路和方法,对光伏电站的运维管理和性能优化具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 艾琳,司俊龙,陈喜军. 2024年中国光伏发电行业发展现状与展望[J]. 水力发电, 2025, 51(6): 1-5.
AI Lin, SI Junlong, CHEN Xijun. Status and prospect of China's photovoltaic power development in 2024[J]. Water Power, 2025, 51(6): 1-5.
- [2] OLCZAK P. Evaluation of degradation energy productivity of photovoltaic installations in long-term case study[J]. Applied Energy, 2023, 343: 121109.
- [3] GHOSH A. A comprehensive review of water based PV: floatovoltaics, under water, offshore & canal top[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 115044.
- [4] PAN R, KUITCHE J, TAMIZHMANI G. Degradation analysis of solar photovoltaic modules: Influence of environmental factor [C]//2011 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 2011: 1-5.
- [5] KAYA I, KOEHL M, MEHILLI A P, et al. Modeling outdoor service lifetime prediction of PV modules: effects of combined climatic stressors on PV module power degradation[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(4): 1105-1112.
- [6] SUBRAMANIYAN A B, PAN R, KUITCHE J, et al. Quantification of environmental effects on PV module degradation: a physics-based data-driven modeling method[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2018, 8(5): 1289-1296.
- [7] DAMO U M, OZOEGBU C G, OGBONNAYA C, et al. Effects of light, heat and relative humidity on the accelerated testing of photovoltaic degradation using Arrhenius model[J]. Solar Energy, 2023, 250: 335-346.
- [8] SINHA A, GOPALAKRISHNA H, SUBRAMANIYAN A B, et al. Prediction of climate-specific degradation rate for photovoltaic encapsulant discoloration[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(4): 1093-1101.
- [9] BOSCO N, SILVERMAN T J, KURTZ S. Climate specific thermo-mechanical fatigue of flat plate photovoltaic module solder joints[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 62: 124-129.
- [10] KING D L, BOYSON W E, KRATOCHVIL J A. Photovoltaic array performance model[R]. Sandia Report No.2004-3535; U.S. DOE: Washington, DC, USA, 1-19, (2004).
- [11] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Power I data access viewer[DB]. U.S.: NASA [2025-08-29]. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- [12] 余荣斌,刘桂雄,徐欢. 基于 β 分布统示法的光伏组件性能退化可靠度估算[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2586-2593.
YU Rongbin, LIU Guixiong, XU Huan. β -distribution uniform expression based photovoltaic modules reliability evaluation with degradation data distribution[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2586-2593.

收稿日期:2024-04-11
修改稿日期:2025-07-25