

Design and Evaluation of a Novel Flexible Photovoltaic Power Station in a Medium-to-Low Solar Resource Region: A Case Study of Jinshan District, Shanghai

Bin Zhao

Shanghai Jinkuan Thermal Power Co., Ltd., Jinshan District, Shanghai, 201506, China

Abstract

In recent years, the development of new flexible solar cells has promoted the application of flexible photovoltaic modules. However, research on the design and evaluation of photovoltaic power stations for such modules in outdoor applications in regions with medium to low solar resources is still relatively limited, and systematic testing is particularly lacking. This study takes the rooftop flexible photovoltaic power station project of Jinlian Thermal Power Co., Ltd. in Jinshan District, Shanghai as an example to explore the feasibility of deploying flexible modules in such regions. Using the PVsyst software, a customized photovoltaic system was designed and simulated, and its power generation in the first year and over a 25-year lifecycle was estimated. Combined with actual power generation data during the trial operation period, the power station's performance was evaluated to determine if it met the expected performance. Additionally, the operational performance of the flexible modules under sunny and rainy weather conditions was analyzed. The simulation results show that the grid-connected flexible photovoltaic power station achieved a power generation of 856.2 MWh in the first year, with an average system efficiency of 81.9%; the cumulative power generation over 25 years is expected to reach 19,959.7 MWh. During the trial operation period, the actual power generation in August 2024 was 27.4% higher than the simulated value. On September 9, 2024 (a sunny day), the average deviation between the actual output power and the theoretical value was 5.8%; on September 10, 2024 (a rainy day), the deviation was 6.04%. The above results provide valuable reference for promoting the application of new flexible photovoltaic power stations in regions with medium to low irradiance.

Keywords

Solar energy; New flexible photovoltaic modules; PVsyst; Feasibility; Power generation

以上海市金山区为例的中低太阳能资源地区新型柔性光伏电站的设计与评估

赵斌

上海金联热电有限公司, 中国·上海 201506

摘要

近年来, 新型柔性太阳能电池的发展推动了柔性光伏组件的应用。然而, 针对此类组件在中低太阳能资源地区户外应用的光伏电站设计与评估研究仍较为有限, 系统性测试尤为缺乏。本研究以上海市金山区金联热电有限公司屋顶柔性光伏电站项目为例, 探讨在该类地区部署柔性组件的可行性。利用PVsyst软件, 设计并模拟了一个定制化的光伏系统, 估算了其首年及25年生命周期内的发电量, 并结合试运行期间的实际发电数据, 评估电站是否达到预期性能。同时, 在晴天和阴雨天气条件下对柔性组件的运行表现进行了分析。模拟结果表明, 该并网型柔性光伏电站首年发电量达856.2 MWh, 平均系统效率为81.9%; 25年累计发电量预计可达19,959.7 MWh。试运行期间, 2024年8月的实际发电量比模拟值高出27.4%。在2024年9月9日的晴天, 实际输出功率与理论值的平均偏差为5.8%; 在9月10日的雨天, 偏差为6.04%。上述结果为推广新型柔性光伏电站在中低辐照地区的应用提供了有价值的参考。

关键词

太阳能; 新型柔性光伏组件; PVsyst; 可行性; 发电量

1 引言

随着全球环保意识的不断提升, 光伏发电已成为能源

【作者简介】赵斌(1990—), 男, 中国浙江平湖人, 本科, 工程师, 从事发电厂电气工程及其自动化、设计、运行、实验、管理及开发等研究。

转型的核心组成部分。截至2023年底, 全球累计光伏装机容量已达到约1.6 TW (IEA-PVPS, 2024)。柔性光伏组件因其轻质、高适应性和良好效率而日益受到关注。据QYR Research数据显示, 2023年全球柔性光伏组件市场规模为2.34亿美元, 预计到2030年将增长至23.5亿美元, 年复合增长率(CAGR)达39.6%。基于硅的柔性电池在实验室中已实现高达26.06%的转换效率[1]。尽管钙钛矿[2]和有机

太阳能电池 [3] 等其他类型的柔性光伏器件也展现出良好前景,但目前仍存在稳定性方面的局限 [4,5]。

在中国,山东、河北等中低太阳能资源省份的光伏装机容量位居全国前列,反映出对柔性组件的强劲需求。本研究以上海地区(年总太阳辐射量为 4536.4 MJ/m²)为案例,采用 PVsyst 软件对柔性晶体硅组件的首年及 25 年发电性能进行模拟,并通过晴天与阴天条件下的户外实测数据对模拟结果进行验证,为类似中低辐照区域推广柔性光伏系统提供技术参考与实践依据。

2 设计与方法

2.1 光伏资源概况

项目场址位于东经 121.3378°、北纬 30.8346°。该地区的太阳辐射数据通过 PVsyst 软件获取。该数据集基于 PVsyst 利用 1990 年至 2010 年长期气象观测资料生成的典型气象年(TMY)。当地年总水平面太阳辐射量为 4536.4 MJ/m²,其中 7 月最高,达 541.4 MJ/m²,1 月最低,为 222.2 MJ/m²。

2.2 基于 PVsyst 的光伏电站损耗参数配置

热损耗:在 PVsyst 中,热能模型定义如下:

$$U \times (T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}) = \alpha \times G_{\text{inc}} \times (1 - E_{\text{fic}}) \quad (1)$$

$$U = U_c + U_v \times V \quad (2)$$

其中, U 表示热损耗系数; T_{cell} 和 T_{amb} 分别为电池温度和环境温度; α 为辐射吸收率; G_{inc} 为入射辐照度; E_{fic} 表示光电转换效率。 U_c 为恒定热损耗系数,代表传导和辐射传热,主要由组件材料的导热系数和表面发射率决定,对于特定的光伏组件设计而言,这些参数基本固定; U_v 为可变部分,主要与对流传热相关,并依赖于风速 (V)。在缺乏可靠风速数据的情况下, PVsyst 建议采用默认的平均风速值,该值适用于数据不可靠及半开放式安装场景(例如屋顶系统)。

$$U_c = 20, U_v = 0 \quad (3)$$

线路损耗:电流流经导体时会产生热量并消耗电能。根据 NB/T 10128-2019 标准,直流和交流线路损耗均不应超过 1%。组件功率偏差损耗:现代组件通常保证正向功率偏差为 0-5 W 或 0-3%。初始光致衰减(LID):在晶体硅组件中,初始光照会因硼氧复合体的形成而导致功率快速下降;掺硼单晶硅的效率损失约为 2%-3% [6],而多晶硅由于氧含量较低,LID 效应较弱,其效率损失通常仅为 0-1%。失配损耗:组串内组件之间的电流失配按 PVsyst 默认值计约为 1%,电压失配影响较小,约为 0.1% [7]。污染损耗:即使定期清洁,污渍通常仍会造成 3%-4% 的功率损失 [8];在重度污染场所,损耗可达约 10% [9] 或更高。入射角修正(IAM)损耗:入射角修正因子(IAM)取值范围为 0 至 1,用于反映入射光角度对输出功率的影响;可采用 PVsyst 默认值或制造商提供的数据。老化损耗:在缺乏制造商数据的

情况下, PVsyst 的蒙特卡洛模型默认年衰减率约为 0.4%。故障率:组串式逆变器系统的年故障率通常为 4%-6%;集中式逆变器配置的故障率一般与此相当或略高,同样处于 4%-6% 范围内,具体取决于系统设计与运行条件。

2.3 理论功率计算

理论功率计算是指在不考虑损耗、遮挡或其他不利因素的情况下所计算得到的输出功率。光伏组件的输出受温度影响,随着温度升高,组件输出功率下降。温度对输出的影响可通过以下公式计算:

$$P_a = P_n \times [1 + k \times (T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}})] \quad (4)$$

其中, P_a 表示受温度影响后的功率, P_n 表示组件在标准测试条件(STC)下的标称功率, k 为温度系数(单位: %/°C,通常为负值), T_{cell} 为电池片温度(单位: °C), T_{ref} 为参考温度(STC下为 25°C)。

在计算出受温度影响的功率 P_a 后,实际输出功率还会受到当前辐照度的影响。光伏组件的输出功率与实际辐照度成正比,可通过以下公式计算:

$$P_{\text{out}} = P_a \times \frac{G}{1000} \quad (5)$$

其中, P_{out} 表示实际输出功率, G 表示当前照射在光伏组件受光面上的辐照度(单位: W/m²), 1000 代表标准测试条件下的辐照度(1000 W/m²)。

2.4 组件串联数量与并联串数

在光伏电站设计中,串联组件数量指每条电路中光伏组件串联的数目,而并联串数则表示这些串联组并联连接的数量。合理选择串联和并联的数量对系统的效率、可靠性和经济性至关重要。

$$N \leq \frac{V_{\text{demax}}}{V_{\text{oc}} \times [1 + (t - 25) \times K_v]} \quad (6)$$

$$\frac{V_{\text{mpptmin}}}{V_{\text{pm}} \times [1 + (t' - 25) \times K_v']} \leq N \leq \frac{V_{\text{mpptmax}}}{V_{\text{pm}} \times [1 + (t' - 25) \times K_v']} \quad (7)$$

其中, N 表示串联组件数量,为整数,通常取偶数; V_{demax} 为逆变器允许的最大直流输入电压(V); V_{oc} 为光伏组件的开路电压(V); V_{mpptmin} 和 V_{mpptmax} 分别为逆变器最大功率点跟踪(MPPT)范围的最小和最大电压(V); t 为光伏组件运行条件下的极端低温(°C); t' 为极端高温(°C); K_v 为光伏组件的开路电压温度系数(%/°C 或 V/°C); K_v' 为光伏组件工作电压的温度系数(%/°C 或 V/°C)。

若不满足上述约束条件,可能导致严重运行问题:违反公式(6)可能引发过压风险,在寒冷天气下尤其危险——此时开路电压显著升高,易造成逆变器损坏或触发安全保护停机;违反公式(7)则可能导致系统工作电压超出逆变器 MPPT 范围,从而降低能量获取效率,甚至在极端温度条件下无法正常启动。

$$N' = \frac{P_{\max} \times \eta}{P_s} \quad (8)$$

其中， N' 表示并联串数； P_{\max} 为逆变器的额定输出功率 (kW)； P_s 为单个组串的功率 (kW)； η 为容配比 (即直流侧装机容量与逆变器交流额定功率之比)，该比值通常大于 1，具体要求可参照标准 NB/T 10394-2020 查询。

若不满足该公式，可能导致两种问题：当 N' 过小时，逆变器容量未被充分利用；当 N' 过大时，则可能引发过流风险。这两种情况均会损害系统的性能与可靠性。

3 结果和讨论

通过调整 PVsyst 软件中的参数，构建了一个模拟的光伏发电系统。综合考虑系统需求、可用屋顶面积以及容配比，共在彩钢板屋顶上安装了 1,406 块柔性光伏组件，每块组件额定功率为 520 W，并采用插接式连接器进行电气互联。在标准测试条件下，这些单晶硅组件的光电转换效率为 19.3%，短路电流为 13.56 A，开路电压为 49.5 V。

3.1 光伏组件朝向的影响

光伏组件的朝向由受光面的方位角和倾角共同决定。在 PVsyst 软件中，方位角 0° 对应正南方向。本项目所在区域的建筑正面朝向正南，屋顶被划分为两个部分：一部分朝南，另一部分朝北。

光伏组件的安装倾角是影响光伏系统性能的关键参数之一。在方位角固定的情况下，不同的倾角会导致受光面上接收到的年总太阳辐射量发生变化，从而直接影响系统的发电量。本项目场址主要为彩钢板屋顶，柔性光伏组件直接贴合屋顶安装，其倾角与屋顶一致，约为 5° 。

图 1 是基于 PVsyst 数据库中的典型气象年数据绘制，展示了倾斜面上年太阳辐射量与倾角之间的关系。图 2(a) 为屋顶朝南的情形：当倾角为 22° 时，受光面接收到的年太阳辐射量最大；当倾角为 5° 时，辐射量仅比最大值低 3.0%。图 2(b) 为屋顶朝北的情形：此时受光面在倾角为 0° (即水平) 时接收的辐射量最大；当倾角为 5° 时，辐射量比最大值低 2.5%。

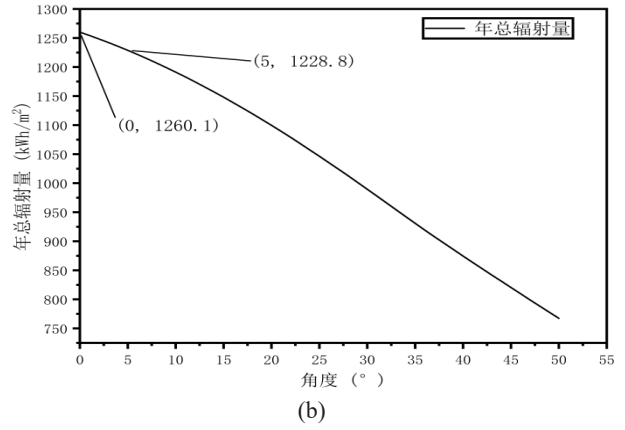
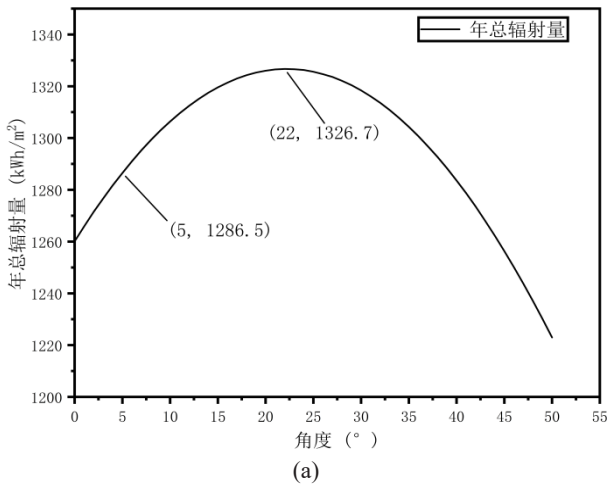


图 1 倾角与年总辐射量的关系：(a) 朝南；(b) 朝北。

3.2 基于 PVsyst 软件的光伏电站模拟结果

该光伏电站采用 PVsyst 软件进行了模拟。如表 1 所示，在运行的第一年，电站 7 月发电量最高，达 96.4 MWh，1 月最低，为 42.2 MWh。这一变化主要源于水平面总太阳辐射的变化——在上海地区，7 月太阳辐射最强，1 月最弱。

系统效率是评估光伏系统实际性能的关键指标，其计算公式为 $PR = Y_f / Y_r$ ，其中 Y_f 为特定时段内实际发电量， Y_r 为基于系统标称功率 (kWp) 和太阳辐射量 (kWh/m²) 计算出的理论最大发电量。如表 1 所示，模拟得到的首年月平均 PR 为 81.9%，在中国范围内属于相对良好的表现。然而，光伏组件的输出功率随温度升高而下降，导致夏季系统效率显著降低。

表 1 系统模拟发电结果

	环境温度 °C	采光面总辐射 kWh/m²	并网电量 MWh	系统效率 %
1 月	3.56	60.4	42.2	79.4
2 月	5.53	69.9	52.6	86.0
3 月	10.92	92.2	67.8	84.6
4 月	16.54	115.4	83.1	83.0
5 月	21.92	131.6	93.2	81.8
6 月	25.34	114.7	80.4	80.8
7 月	30.68	141.2	96.4	79.0
8 月	29.68	133.2	91.7	79.7
9 月	24.40	112.5	78.8	80.8
10 月	19.27	97.4	70.0	82.5
11 月	12.99	70.4	51.7	83.7
12 月	6.32	63.8	48.0	85.4
年	17.33	1202.8	856.2	81.9

PVsyst 模拟估算了该电站 25 年生命周期内的发电量。第一年发电量约为 856.2 MWh。随着时间推移，机械损伤、污染物累积以及复杂气候条件等因素逐渐削弱了系统将太阳光转化为电能的能力，导致发电量逐年下降，至第 25 年降至约 730.8 MWh。25 年累计总发电量预计约为 19,959.7 MWh。此外，电站的系统效率也呈逐年递减趋势，从初始

的81.85%下降至第25年的69.87%。

3.3 试运行期间的实际发电量

通过将光伏电站的实际运行数据与PVsyst的模拟结果进行对比,可对其性能进行评估。如图2所示,2024年8月,该光伏电站的实际发电量显著高于PVsyst的模拟值,表明电站的实际运行表现优于预期。

这种超预期表现主要归因于2024年8月上海地区的太阳辐照度显著高于PVsyst数据库中基于20年长期气象数据的平均水平。如图6所示,辐照度的增加直接带来了发电量的大幅提升,这与太阳辐照度与光伏输出之间公认的正相关关系一致。图6中的模拟值来源于PVsyst,而实际值则基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的气象数据。

尽管环境温度、相对湿度、灰尘累积等因素确实会对光伏性能产生一定影响——尤其是通过降低光电转换效率——但与辐照度的主导作用相比,这些因素的影响通常处于次要地位[10]。一项关于环境温度和辐照度对光伏组件影响的实验研究也表明,温度的影响相对较小,而辐照度对发电性能的影响则显著得多[11]。

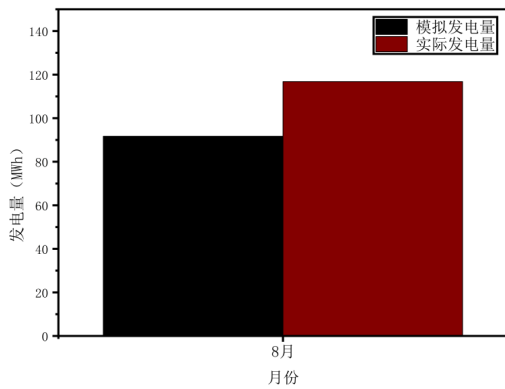


图5 模拟发电量与实际发电量

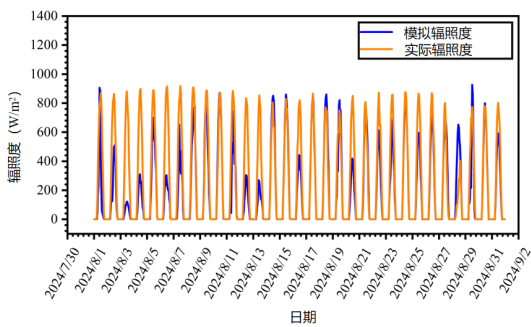


图2 实际辐照度与模拟辐照度

3.4 光伏组件在晴天和雨天的性能表现

在研究期间,每5分钟记录一次辐照度和组件表面温度,共获得36组数据。利用公式(4)和(5)计算理论功率,并与柔性组件的实际输出进行对比,以评估其在晴天和雨天条件下的性能表现。

测试选取了NB01阵列——该阵列包含190块朝南和

57块朝北安装的柔性组件,安装倾角为5°。图3展示了晴天中午时段的辐照度变化及其对应的功率输出。图4对比了无损耗的理想理论功率与实际实时输出功率,结果显示平均误差为5.8%,处于典型可接受范围(5%–10%)内,该偏差主要源于温度效应、组件衰减、天气波动及测量不确定性等因素。

在12:30,突发云层遮挡导致辐照度和输出功率急剧下降,但得益于逆变器的最大功率点跟踪(MPPT)功能和自适应控制策略,系统仍维持了稳定的发电输出。部分高性能组件甚至在低辐照条件下实现了超过理论值的输出。

在雨天,尽管辐照度显著降低,但较低的环境温度有助于缓解效率损失。图5展示了降雨条件下辐照度与功率之间的关系,而图6则表明即使在不利天气下,系统输出依然保持稳定。该时段的平均误差为6.04%,仍在合理范围内。因此,柔性光伏系统在雨天条件下仍能实现可靠、稳定的电力输出。

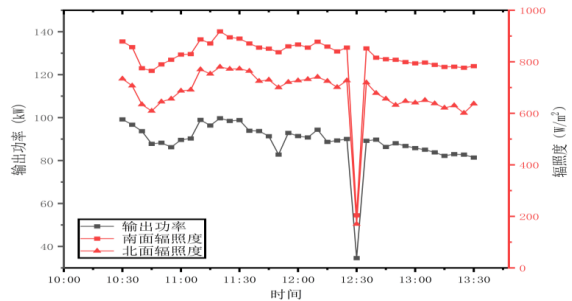


图3 晴天的辐照度与功率

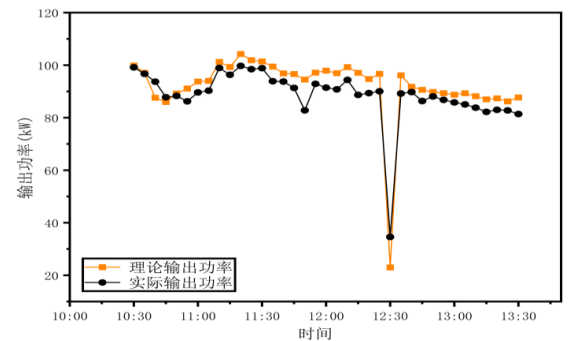


图4. 晴天的理论输出功率与实际输出功率

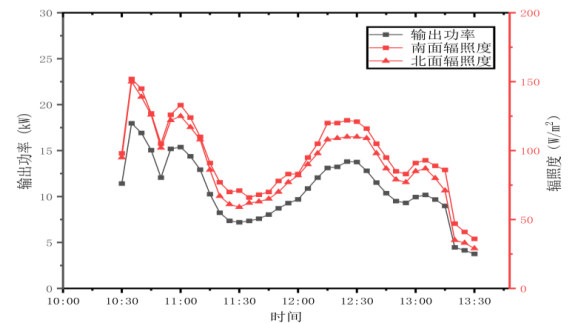


图5. 雨天的辐照度与功率

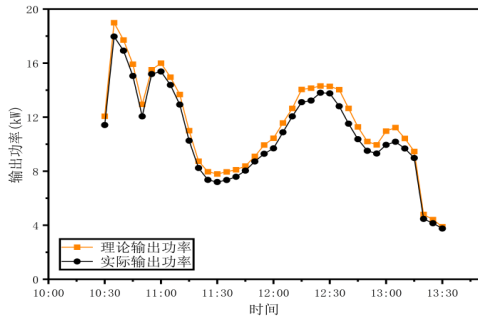


图 6. 雨天的理论输出功率与实际输出功率

3.5 节能减排效益分析

根据 PVsyst 仿真预测, 本项目 25 年累计发电量约为 19,959.7 MWh, 按照上海市电力排放因子 4.2 吨 CO₂/万 kWh 测算, 预计累计减排 CO₂ 约 8,383 吨。模拟结果表明, 此次的上海市金山区金联热电有限公司屋顶柔性光伏电站项目具有良好的长期经济效益与环境效益, 系统设计参数选取合理, 发电性能符合预期。本项目的仿真分析为分布式光伏发电在类似场景下的应用提供了理论依据, 对区域能源结构优化及 "双碳" 目标推进具有参考价值。

4 结语

本文以上海市金山区金联热电有限公司屋顶柔性光伏电站项目为案例, 设计并验证了柔性光伏组件在中低太阳能资源地区的应用可行性。通过采用 PVsyst 软件进行系统设计与仿真, 并结合实际运行数据进行分析, 得出以下结论:

(1) 柔性光伏组件展现出良好的发电性能。首年并网发电量达 856.2 MWh, 平均系统效率为 81.9%, 处于较高水平; 预计 25 年累计发电量可达 19,959.7 MWh。尽管系统效率随运行年限增加而逐渐衰减, 但整体性能依然优良。(2) 实际发电表现: 在试运行期间, 实际发电量普遍高于模拟预测值, 尤其在晴好天气下更为显著, 表明合理的系统设计与当前有利的环境条件对电站性能产生了积极影响。(3) 环境适应性: 柔性组件在晴天和阴雨 (多云) 天气条件下均表现出良好的运行稳定性与环境适应能力, 能够有效应对不同光照和气象条件的变化。

参考文献

[1] Y. Li, X. Ru, M. Yang, Y. Zheng, S. Yin, C. Hong, F. Peng, M. Qu,

C. Xue, J. Lu, L. Fang, C. Su, D. Chen, J. Xu, C. Yan, Z. Li, X. XuandZ. Shao.(2024)Flexible silicon solar cells with high power-to-weight ratios.Nature, 626:105-110.

[2] Y. Hu, T. Niu, Y. Liu, Y. Zhou, Y. Xia, C. Ran, Z. Wu, L. Song, P. Müller-Buschbaum, Y. ChenandW. Huang.(2021)Flexible Perovskite Solar Cells with High Power-Per-Weight: Progress, Application, and Perspectives.ACS Energy Letters, 6:2917-2943.

[3] K. Fukuda, K. YuandT. Someya.(2020)The Future of Flexible Organic Solar Cells.Advanced Energy Materials, 10:2000765.

[4] N. Ali, N. Shehzad, S. Uddin, R. Ahmed, M. Jabeen, A. Kalam, A. G. Al - Sehemi, H. Alrobei, M. B. Kanoun, A. KhesroandS. Goumri - Said.(2021)A review on perovskite materials with solar cell prospective.International Journal of Energy Research, 45:19729-19745.

[5] P. Ding, D. Yang, S. YangandZ. Ge(2024)Stability of organic solar cells: toward commercial applications.Chemical Society Reviews, 53:2350-2387.

[6] M. Xie, C. Ren, L. Fu, X. Qiu, X. YuandD. Yang(2016)An industrial solution to light-induced degradation of crystalline silicon solar cells.Frontiers in Energy, 11:67-71.

[7] J. LindroosandH. Savin(2016)Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells.Solar Energy Materials and Solar Cells, 147:115-126.

[8] K. Ilse, L. Micheli, B. W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi, F. Wolfertstetter, V. Naumann, C. Hagendorf, R. GottschalgandJ. Bagdahn.(2019)Techno-Economic Assessment of Soiling Losses and Mitigation Strategies for Solar Power Generation.Joule, 3:2303-2321.

[9] A. Zeedan, A. Barakeh, K. Al-Fakhroo, F. TouatiandA. S. P. Gonzales.(2021)Quantification of PV Power and Economic Losses Due to Soiling in Qatar.Sustainability, 13:3364.

[10] M. M. Rahman, M. HasanuzzamanandN. A. Rahim(2015)Effects of various parameters on PV-module power and efficiency.Energy Conversion and Management, 103:348-358.

[11] V. PerrakiandP. Kounavis.(2016)Effect of temperature and radiation on the parameters of photovoltaic modules.Journal of Renewable and Sustainable Energy, 8:013102.