

光伏发电中组件衰减与故障诊断方法的实验与分析

张雷

国电投山东生态能源有限公司, 山东 济南 250004

DOI:10.61369/EPTSM.2026040010

摘 要： 随着全球能源结构向清洁能源转型，光伏发电成为可再生能源核心发展方向。光伏组件作为核心能量转换单元，长期服役中受多重因素影响会发生性能衰减并出现各类故障，降低发电效率、增加运维成本，甚至引发安全隐患。本文搭建实验平台，选取典型光伏组件，开展衰减特性测试与故障模拟实验，探究衰减类型、影响因素及演化规律，对比不同诊断方法的性能，提出优化诊断方案。实验表明，组件衰减主要包括光致、热致、封装材料老化及PID衰减，环境因素是关键影响因素；四种诊断方法各有优势，组合使用可实现精准高效诊断，为光伏电站精细化运维提供支撑。

关 键 词： 光伏发电；光伏组件；性能衰减；故障诊断；实验分析

Experiment and Analysis of Module Degradation and Fault Diagnosis Methods in Photovoltaic Power Generation

Zhang Lei

Guodian Investment Shandong Ecological Energy Co., Ltd. Jinan, Shandong 250004

Abstract： As the global energy structure transitions towards clean energy, photovoltaic (PV) power generation has emerged as a core development direction for renewable energy. As the core energy conversion unit, photovoltaic modules experience performance degradation and various failures due to multiple factors during long-term service, reducing power generation efficiency, increasing operation and maintenance (O&M) costs, and even posing safety hazards. This paper establishes an experimental platform, selects typical photovoltaic modules, conducts degradation characteristic tests and failure simulation experiments, explores degradation types, influencing factors, and evolution laws, compares the performance of different diagnostic methods, and proposes optimized diagnostic schemes. The experiments show that module degradation mainly includes light-induced degradation, heat-induced degradation, encapsulation material aging, and PID degradation, with environmental factors being key influencing factors. The four diagnostic methods each have their advantages, and their combined use can achieve accurate and efficient diagnosis, providing support for refined operation and maintenance of photovoltaic power plants.

Keywords： photovoltaic power generation; photovoltaic modules; performance degradation; fault diagnosis; experimental analysis

引言

（一）研究背景

在“双碳”目标引领下，我国光伏发电产业快速发展，截至2024年底，全国光伏发电累计装机容量突破6亿千瓦，占总发电装机容量20%以上。光伏组件设计使用寿命为25-30年，但实际运行中，受外界环境与内部因素共同作用，会出现性能衰减，关键电参数下降，同时可能出现各类故障，若未及时处理，会加速衰减、引发安全事故。据统计，组件衰减与故障导致年均发电效率损失5%-10%，因此开展相关实验研究，建立科学诊断体系，对推动产业高质量发展具有重要意义。

（二）研究现状

国内外学者已开展大量相关研究：组件衰减方面，国外聚焦光致、热致衰减及封装材料老化，国内重点研究不同气候条件下的衰减特性；故障诊断方面，离线方法（红外热成像、EL检测等）精准但效率低，在线方法实时但准确性不足。现有研究仍有不足：未充分模拟多因素耦合衰减、诊断方法对比不系统、精准度与实时性难以兼顾，本文实验旨在弥补这些不足。

（三）研究目的与内容

1.研究目的

1. 探究多因素耦合下组件衰减类型、演化规律及影响因素；2. 模拟常见故障，分析其特征及对组件性能的影响；3. 对比四种诊断方法的性能；4. 提出高效精准的衰减评估与故障诊断方案，为运维提供支撑。

2.研究内容

1. 搭建含光源、环境模拟等系统的综合实验平台；2. 选取单晶硅组件，开展多因素耦合衰减实验，监测参数与外观变化；3. 模拟常见故障，采集故障状态数据与图像；4. 对比不同诊断方法效果；5. 优化诊断流程，提出运维建议。

（四）研究方法与技术路线

1.研究方法

采用实验研究与理论分析结合，包括：实验法（搭建平台、开展衰减与故障模拟实验）、对比分析法（对比环境因素及诊断方法差异）、数据分析法（统计拟合实验数据）、文献研究法（支撑实验设计与理论分析）。

2.技术路线

先通过文献研究明确研究现状与关键技术；再搭建平台、选取样本、设计方案；随后开展实验、采集数据；接着分析数据、对比诊断方法性能；最后提出优化方案，总结结论并展望。

一、实验原理

（一）光伏组件工作原理

光伏组件通过光伏电池片串并联封装而成，基于光生伏特效应实现太阳能向电能转换：光子被半导体吸收，形成自由电子与空穴对，在PN结内建电场作用下分离形成光生电流，外接负载后形成回路。

核心电参数包括开路电压（ V_{oc} ）、短路电流（ I_{sc} ）、最大功率（ P_{max} ）、填充因子（FF），分别反映组件不同性能，受材料特性、光照、内阻等因素影响。

（二）光伏组件衰减原理

组件衰减是电参数下降、发电效率降低的现象，主要分为四类：

1. 光致衰减（LID）：初始运行阶段，硼氧复合体激活导致载流子寿命缩短，N型组件衰减率低于P型；2. 热致衰减（TID）：高温导致串联电阻增大，温度每升高1℃，单晶硅组件功率下降0.4%–0.5%；3. 封装材料老化：EVA胶膜黄变、背板分层等导致透光率与密封性下降；4. PID衰减：高电压高湿下钝化层损坏，功率大幅下降且不可逆。

（三）故障诊断原理

故障诊断基于电参数、外观及温度差异，四种常用方法原理：1. 红外热成像法：检测温度分布，定位温度异常类故障；2. EL检测法：施加正向偏压，通过发光图像识别电池片内部缺陷；3. I–V曲线分析法：通过参数变化判断衰减与故障类型；4. 在线监测法：实时采集运行参数，实现故障实时预警。

二、实验平台搭建与实验方案设计

（一）实验平台搭建

搭建综合实验平台，由五部分组成：

1.光源模拟系统

采用氙灯太阳光模拟器，模拟AM1.5G光谱，光照强度0–1000W/m²可调，均匀度≥90%，输出功率1000W，确保光照

环境稳定。

2.环境模拟系统

环境试验箱可调节温度（–20℃–85℃）、湿度（20%–95%RH）、紫外线强度（0–100mW/cm²），模拟不同气候条件，满足多因素耦合实验需求。

3.数据采集系统

由I–V曲线测试仪、红外热像仪、EL检测仪等组成，可采集组件电参数、温度分布、发光图像及环境参数，数据经计算机存储分析。

4.故障模拟装置

可模拟五种常见故障：机械冲击法模拟电池片隐裂、遮光法模拟热斑、高温高湿老化后剥离模拟封装层脱层、松动端子模拟接线盒故障、短路二极管模拟旁路二极管失效。

5.实验样本

选取3块280W单晶硅组件，规格一致、全新无缺陷，实验前初始化测试合格，分别用于衰减实验、故障模拟实验及对照。

（二）实验方案设计

实验分为衰减实验与故障诊断实验两部分：

1.光伏组件衰减实验

以组件1为实验对象、组件3为对照，模拟多因素耦合环境，实验周期120天。实验条件：光照800W/m²（每天10h）、温度45℃、湿度60%RH、紫外线50mW/cm²（每天4h）。实验步骤：初始化测试→按条件开展实验→每10天测试采集数据→实验结束后对比分析。

2.故障诊断实验

以组件2为对象，先采集正常状态基准数据，再依次模拟五种故障，每种故障后用四种方法检测，从诊断准确率、响应时间等四方面评价效果。

（三）实验注意事项

1. 实验前检查校准设备；2. 严格控制实验条件，确保组件稳定运行；3. 规范故障模拟，避免二次损坏；4. 多次测量取平均值，保证数据可靠；5. 做好安全防护，实验后整理设备与数据。

三、实验结果与分析

（一）光伏组件衰减实验结果与分析

1. 组件电参数变化分析

组件1在120天实验中，关键电参数持续下降，组件3无明显变化。实验120天后，Pmax从280.0W降至236.7W，总衰减率15.46%，年均衰减率4.64%，远超行业标准。其中Isc下降幅度最大（10.23%），Voc下降最平缓（4.08%），FF下降7.06%，均与衰减机制相符。

实验天数 (天)	Voc (V)	Isc (A)	Pmax (W)	FF	功率衰减率 (%)
0 (初始)	36.8	8.8	280.0	0.85	0.00
10	36.6	8.7	274.2	0.84	2.07
30	36.3	8.5	265.5	0.83	5.18
60	35.9	8.3	254.9	0.81	8.96
90	35.6	8.1	245.3	0.80	12.39
120	35.3	7.9	236.7	0.79	15.46

注：功率衰减率 = (初始最大功率 - 当前最大功率) / 初始最大功率 × 100%

2. 组件外观变化分析

组件1外观变化明显：EVA胶膜30天出现轻微黄变，120天黄变严重且边缘轻微脱层；玻璃表面积累灰尘，加剧衰减；120天后部分电池片出现暗斑，存在轻微隐裂与老化。组件3无明显变化，验证环境因素是衰减主要原因。

3. 组件衰减规律与影响因素分析

衰减规律：呈现“前期快、后期缓”，前30天主要为光致衰减，30天后为热致、封装老化及PID衰减共同作用。影响因素：光照与紫外线加速光致衰减和封装老化；高温高湿加速热致衰减、封装脱层及PID衰减；污染物沉积降低透光率，间接加剧衰减。

（二）故障诊断实验结果与分析

1. 不同故障的特征表现

五种故障各有特征：1. 电池片隐裂：EL图像有暗线暗斑，FF下降，无明显温度异常；2. 热斑：红外图像有高温热点，Pmax下降12%，EL图像对应区域发光变暗；3. 封装层脱层：外观有缝隙气泡，透光率下降，Isc下降明显；4. 接线盒故障：接线盒温度升高，输出电流不稳定，Pmax下降10%；5. 旁路二极管失效：I-V曲线有台阶，对应区域温度升高，EL图像发光不均。

2. 不同诊断方法的诊断效果对比

四种方法性能对比如下表所示，各有优劣：EL检测法准确率最高（96.0%），适用于精准识别内部缺陷；红外热成像法响应

快、操作简，适用于户外巡检；I-V曲线分析法适用于衰减评估与辅助诊断；在线监测法实时性强，适用于大规模电站预警。

诊断方法	诊断准确率 (%)	响应时间 (min)	操作复杂度	适用场景
红外热成像法	80.0	1-2	低	户外大规模巡检、温度异常类故障
EL检测法	96.0	5-10	中	实验室检测、内部缺陷类故障
I-V曲线分析法	88.0	3-5	中	衰减评估、故障辅助诊断
在线监测法	76.0	≤1	低	大规模电站、实时预警

3. 故障诊断方案优化

提出“在线监测 + 离线检测”组合方案：1. 在线监测实时预警；2. 红外热成像法快速定位温度异常故障；3. EL检测法与I-V曲线分析法精准诊断其他故障；4. 维修后验证效果。该方案兼顾实时性与精准性，提升运维效率。

四、结论与展望

（一）研究结论

本文通过实验得出以下结论：1. 多因素耦合环境下，组件主要存在四种衰减类型，120天总衰减率15.46%，呈现“前期快、后期缓”规律；2. 环境因素是衰减关键，高温高湿与强紫外线耦合影响最显著；3. 五种常见故障各有特征，均导致电参数下降；4. 四种诊断方法各有优势，组合使用可实现精准高效诊断；5. 优化后的诊断方案为光伏电站精细化运维提供支撑。

（二）研究不足与展望

1. 研究不足

本文存在四点不足：1. 实验周期短，未模拟组件长期衰减；2. 样本数量少、类型单一，实验结果普遍性不足；3. 未模拟多故障耦合场景；4. 在线监测法诊断准确率有待提升，未优化算法模型。

2. 未来展望

未来将从五方面完善研究：1. 延长实验周期，开展长期衰减实验，构建寿命预测模型；2. 增加样本数量与类型，扩大结果普遍性；3. 模拟多故障耦合场景，优化诊断方案；4. 结合大数据、人工智能优化在线监测算法；5. 研究衰减抑制方法，开发新型抗衰减组件。

参考文献

[1] 王斯成, 赵春江. 光伏组件性能衰减与故障诊断技术研究进展 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 1-12.
[2] 李建国, 张兴, 曹仁贤. 光伏组件光致衰减机理与抑制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4123-4134.
[3] 刘敏, 王磊, 李娟. 光伏组件热斑故障诊断方法对比实验研究 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 156-162.
[4] 张宇, 李丽, 王浩. 基于EL检测与I-V曲线分析的光伏组件故障诊断 [J]. 太阳能, 2022, (8): 78-83.
[5] 陈勇, 赵艳雷, 李建强. 光伏组件长期衰减特性实验研究 [J]. 可再生能源, 2023, 41(3): 321-327.
[6] 东莞市赛思检测设备有限公司. 光伏组件在光照 + 高温环境下功率衰减测试的检测结论 [EB/OL]. 仪器信息网, 2025-07-18.
[7] MDPI. A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques[J]. Solar, 2026, 4(1): 43-82.
[8] 王宏立. 光伏发电组件性能衰减机理及维护策略研究 [J]. 安麦工程技术论坛, 2025, 1(6): 64-65.
[9] 佚名. 光伏项目运维专员光伏组件故障诊断指南 [EB/OL]. 人人文库, 2025-12-05.
[10] 实验空间. 太阳能光伏发电实验技术 [EB/OL]. 2025-11-20.