

# 光伏电站设备管理与改造研究

李红超

华电（海西）新能源有限公司，青海 海西 817000

**摘 要：** 本文以某典型光伏电站为案例，针对光伏电站设备问题，研究提出了一套管理改造的综合技术路径。通过实时监测、智能诊断和精准调控，提升设备运行稳定性和系统协同性。实地测试验证表明，改造方案对组件隐裂修复、储能效率提升及并网谐波优化效果显著，为复杂气候条件下光伏电站数字化与智能化运维提供了系统化技术支持。

**关 键 词：** 光伏电站；设备管理；设备改造

## Research on Photovoltaic Power Station Equipment Management and Transformation

Li Hongchao

Huadian (Haixi) New Energy Co., LTD. Haixi, Qinghai 817000

**Abstract：** This paper takes a typical photovoltaic power station as a case, aiming at the problem of photovoltaic power station equipment, research and puts forward a set of comprehensive technical path of management transformation. Through real-time monitoring, intelligent diagnosis and precise regulation, the equipment operation stability and system coordination are improved. The field test and verification show that the transformation scheme has a significant effect on module hidden crack repair, energy storage efficiency improvement and grid connection harmonic optimization, and provides systematic technical support for the digitalization and intelligent operation and maintenance of photovoltaic power stations under complex climate conditions.

**Keywords：** photovoltaic power station; equipment management; equipment transformation

### 引言

全球能源结构的转型和环境保护要求不断提高，光伏电站的高效管理直接关系到能源的利用率和经济效益<sup>[1]</sup>。然而，高沙尘、高温环境导致光伏电站组件衰减、逆变器过载保护频发，并网性能退化，传统运维方式难以解决。本文以某光伏电站为案例，研究组件隐裂修复、储能效率优化、并网调节和智能管理技术路径，提升设备性能和系统稳定性，支撑复杂环境下的高效运行<sup>[2]</sup>。

### 一、案例概况

某典型光伏电站，装机容量52.35MWp，占地85.27公顷，位于年均水平面太阳辐照量1,789.52kWh/m<sup>2</sup>的地区，投运于2020年3月。采用单晶硅组件与组串式逆变器，组件初始转换效率19.45%，逆变器满载效率98.27%。运行多年后，光伏组件功率衰减率平均0.89%/年，发电量从81,245.36MWh下降至75,428.89MWh，降幅7.17%。部分组件隐裂导致衰减率超1.05%/年。逆变器效率下降至96.84%，高温环境中频繁触发过载保护，影响并网性能，功率因数响应延迟超出设计标准15.82ms。储能系统容量5.28MWh，运行效率89.64%，并网系统高峰负载功率损耗达4.18%，灵活性不足。当前管理方式依赖人工巡检与定期维护，缺乏实时监测与智能化分析能力，导致故障排查效率低，运维成本高。

### 二、光伏电站设备管理与改造的方法

光伏电站设备管理与改造以提升运行效率和设备性能为目标，围绕组件检测与修复、储能与并网优化、智能化管理和环境适应性改造展开，形成覆盖全系统的综合方案。在组件管理方面，通过高精度影像技术对隐裂区域进行精准定位，并结合修复与更换措施，成功恢复组件发电能力。同时，逆变器性能优化重点放在改进功率因数控制和散热设计，以此在满载与高温环境下显著提升运行稳定性。针对储能与并网系统，改造方法采用模块化升级和充放电调控策略，不仅优化了能量流转效率，还有效减少了峰值负载的功率损耗。而并网系统通过动态调节技术，进一步优化了功率流与谐波控制，从而提升了负载适应性和并网稳定性。

此外,智能化管理依托实时数据采集和分析技术,能够全面监测设备状态,快速诊断潜在故障,并自动生成优化的维护计划,从而实现运行效率的动态调整。而在环境适应性方面,通过表面防护与清洁技术减少了沙尘对设备的影响,同时改进散热策略,确保设备即使在高温工况下依然能够保持稳定运行。最后,数字化管理通过整合各模块运行数据,建立全系统的闭环控制。借助实时性能分析与调度优化,旨在提升光伏电站的运行协同性与管理效率。

### 三、设备管理与改造的关键技术路径

#### (一) 光伏组件与逆变器的优化技术

光伏组件与逆变器的优化技术以恢复发电能力和提升效率为目标,针对组件功率衰减率0.89%/年、隐裂衰减超1.05%/年及逆变器效率降至96.84%的问题,通过精准检测、硬件升级与算法优化形成闭环技术路径。光伏组件优化依托EL(电致发光)检测技术,采用EC120型便携式EL成像系统,分辨率达0.1mm,精准识别隐裂分布。隐裂导致的功率损失计算公式为:

$$P_{loss} = k \cdot A_{crack} \cdot \eta_{comp} \quad (1)$$

其中, $P_{loss}$ 为功率损失,k为裂隙效应系数, $A_{crack}$ 为裂纹面积, $\eta_{comp}$ 为组件效率。根据裂纹级别,采用导电胶修复轻微裂纹,加装旁路二极管隔离中度裂纹区域,对于严重裂纹组件实施替换,选用23.2%转换效率的PERC单晶硅组件,整体提升发电性能。逆变器优化从硬件与控制算法两方面展开。主功率模块更换为高效IGBT模块,主控电路升级至DSP控制芯片,显著提升功率转换性能与控制响应速度。功率因数控制算法通过引入自适应补偿模块,根据负载实时调整输出参数,将响应延迟优化至10ms以内。逆变器的功率因数调整遵循:

$$Q = P \cdot \tan(\phi) \quad (2)$$

其中,Q为无功功率,P为有功功率, $\phi$ 为功率因数角。通过动态优化算法降低 $\phi$ 值,实现无功功率最小化。同时,散热系统升级为液冷结构,散热效率较传统风冷提升30%以上,所有监测数据上传至数字化管理平台进行实时分析,形成动态反馈与优化闭环。

#### (二) 储能与并网系统改造技术

储能与并网系统改造聚焦提升运行效率和功率调节能力,针对储能系统效率89.64%、并网功率损耗4.18%的问题,实施硬件升级和控制算法优化。该系统采用新型CATL LFP电池模块替换老化单元,提升能量密度与循环寿命。充放电控制引入动态功率调度算法,结合双向DC/DC变换器实现高效能量流转。SOC状态监控通过集成式BMS(电池管理系统),精确跟踪剩余电量并优化充放电路径,提升储能效率,公式如下:

$$\eta_{storage} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, $\eta_{storage}$ 表示储能效率, $P_{out}$ 为储能系统输出功率, $P_{in}$ 为输入功率。通过优化充放电路径,减少能量转换中的损耗,确保输出功率接近输入功率。并网系统升级至三电平IGBT拓扑逆变器,改善谐波抑制性能。功率流管理采用分布式EMS(能量管理系统),动态分配负载,优化功率调节逻辑。电能质量通过引入APF(有源滤波器)显著降低谐波畸变,增强并网稳定性。功率

损耗优化由以下公式量化:

$$P_{loss} = \frac{I^2 R}{P_{total}} \quad (4)$$

其中, $P_{loss}$ 表示总功率损耗,I为逆变器输出电流,R为电网阻抗, $P_{total}$ 为系统总输出功率。通过精确调节逆变器输出电流与负载分配,减少峰值负载引起的功率损耗。

#### (三) 智能化管理与故障诊断技术

智能化管理与故障诊断技术通过高精度硬件与AI算法融合,实现光伏电站设备状态的实时监测与精确诊断<sup>[3]</sup>。项目中部署了基于Keysight N8700系列电压电流传感器和DJI Matrice 300无人机搭载的热成像模块,采集组件与逆变器的电压、电流、温度和功率因数数据,每分钟采集一次,确保数据覆盖的全面性与时效性。所有采集数据均使用TensorFlow 2.0构建的深度学习故障诊断模型进行在线分析。

数据采集从组件和逆变器的关键运行参数开始,包括单体组件电压偏差、功率因数下降幅度以及逆变器热斑分布等异常指标<sup>[4]</sup>。通过Matrice 300无人机搭载的Zenmuse XT2热成像设备快速识别组件

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import classification_report

# 数据加载与预处理
data = pd.read_csv("sensor_data.csv") # 假设传感器数据文件
X = data[['voltage', 'current', 'temperature', 'power_factor']] # 输入特征
y = data['fault_type'] # 故障类型标签

# 数据分割
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 模型训练
model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
model.fit(X_train, y_train)

# 模型评估
y_pred = model.predict(X_test)
print(classification_report(y_test, y_pred))

# 故障识别与预测
new_data = np.array([[230.5, 10.1, 35.5, 0.95]]) # 假设新数据
fault_prediction = model.predict(new_data)
print(f"Predicted fault type: {fault_prediction[0]}")
```

图1: 故障诊断代码

隐裂或热点问题,将定位误差控制在0.1m内。

诊断过程使用基于随机森林和卷积神经网络(CNN)的混合模型。随机森林负责初步筛选明显的故障模式,以下为诊断过程的代码实现:

#### (四) 环境适应性改造技术

环境适应性改造技术针对高沙尘和高温环境对光伏电站设备的影响,重点优化组件抗沙尘能力与散热性能<sup>[5]</sup>。

##### (1) 抗沙能力

抗沙尘改造采用3M Solar Dust-Guard涂层技术,在组件表面形成疏水防沙保护膜,减少沙尘积聚,降低清洁频率,同时保护组件表层玻璃不受沙尘侵蚀。结合KUKA KR Agilus机器人组成的自动化清洁系统,每两周自动完成组件表面清理,提高发电效率和运维效率。清洁系统具备路径优化功能,可精准识别组件表面污染程度,动态调整清洁压力和覆盖范围,确保高效清理。

##### (2) 散热方面

散热改造针对高温引发的逆变器过载问题,采用CoolFlow液冷散热系统替代传统风冷方案,散热效率提升30%以上。液冷系统集成Schneider RTG-20泵组和高效传热材料,实时调控液冷循环速度以适应负载变化,并在高温区域采用增强型散热片设计,确保逆变器在峰值负载时仍保持稳定运行。

环境适应性技术中还引入MeteoShield PRO气象监测站,实时监控环境温度、湿度和风速,将数据上传至数字化管理平台。平台通过算法分析预测沙尘暴或高温事件,提前调整清洁频率与散热策略,减少环境极端变化对设备性能的冲击。

#### (五) 设备管理系统的数字化与集成化

设备管理系统基于AWS IoT Core云平台,整合光伏组件、逆变器、储能与环境监测模块,实现全局监控与智能调度。高精度传感器网络实时采集电压、电流、温度、功率因数等数据,通

过无线通信模块上传云端处理<sup>[6]</sup>。系统采用 Hadoop 大数据框架与 TensorFlow 2.0 AI 模型进行数据预处理与趋势预测，结合分布式 EMS（能量管理系统）优化储能与并网功率分配。

平台通过 API 接口集成组件监测系统、逆变器控制模块和环境适应系统。实时数据经分析生成综合报告，使用 Grafana 展示动态仪表盘。系统效率由以下公式量化：

$$R_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$
 (5)

其中， $R_{sys}$  表示系统效率， $\eta_i$  为模块运行效率， $w_i$  为其权重。平台根据公式分析瓶颈，动态调整运行策略。故障诊断模块融合历史与实时数据，通过 AI 自适应模型识别问题，自动生成维护计划并向调度模块发送优化指令，确保在高负载或极端气候条件下的系统稳定性。

四、改造方案实地测试

(一) 测试步骤

实地测试围绕光伏组件与逆变器优化、储能与并网系统改造、智能化管理与环境适应性提升四个关键点展开，采用精密设备和先进技术对改造方案进行全方位验证，确保改造后的系统性能达到预期目标<sup>[7]</sup>。

(1) 组件与逆变器的性能验证

通过 EC120 型 EL 成像系统检测组件隐裂，按轻微、中度、严重分级处理，分别采用导电胶修复、旁路二极管隔离和 PERC 组件替换。逆变器测试采用三电平 IGBT 拓扑结构结合 CoolFlow 液冷散热系统，在满载条件下测功率因数响应与散热效率，监测运行温升与电流波动。

(2) 储能与并网系统的测试

通过验证充放电效率与电网谐波优化效果展开。储能模块采用 CATL LFP 电池，结合动态功率调度算法测试能量流转效率与 SOC 状态监控。并网系统通过 APF 有源滤波器优化电网谐波，结合分布式 EMS 调控负载动态，记录峰值损耗与谐波含量。

(3) 智能化管理测试

部署 Keysight N8700 传感器与 DJI Matrice 300 无人机，搭载热成像设备采集数据，上传至 AWS IoT Core 云平台。通过 TensorFlow 2.0 AI 模型分析组件热斑与逆变器异常，验证故障分类与调度模块的响应效率。

(4) 环境适应性测试

评估 3M Solar Dust-Guard 涂层抗沙尘性能，结合 KUKA KR Agilus 机器人清洁效率测试积尘速率与光透过率。高温测试采用 CoolFlow 液冷散热系统，记录逆变器温升与循环散热性能。所

有数据通过 LabVIEW 2023 平台和 Grafana 仪表盘整合分析，验证系统集成与协同优化能力<sup>[8]</sup>。

(二) 测试结果

测试结果表明，各模块协同优化显著，组件隐裂检测精度 0.10mm，裂纹面积减少率 68.25%，功率恢复率 95.34%。逆变器功率因数响应延迟降至 9.47ms，满载温升降至 38.56℃。储能系统充放电效率提升至 93.87%，SOC 误差范围缩小至 ± 0.95%。并网系统峰值功率损耗降至 2.67%，谐波畸变率降至 3.82%。智能诊断故障检测时间 2.36s，调度响应时间 1.94s。光透过率降低率降至 2.85%，清洁周期缩短至 14d，散热效率提升 31.28%。数据传输速率 1.82MB/s，实时性能分析时间 1.23s，详细测试数据见下表 1：

表 1：测试结果

| 测试项目      | 测试参数           | 原始数据   | 改造后数据  | 优化提升幅度 (%) |
|-----------|----------------|--------|--------|------------|
| 组件隐裂检测与修复 | 检测精度 (mm)      | 无      | 0.1    | -          |
|           | 裂纹面积减少率 (%)    | 无      | 68.25  | -          |
|           | 功率恢复率 (%)      | 无      | 95.34  | -          |
| 逆变器性能验证   | 功率因数响应延迟 (ms)  | 15.82  | 9.47   | 40.12      |
|           | 满载温升 (℃)       | 65.23  | 38.56  | 40.89      |
| 储能充放电效率   | 充放电效率 (%)      | 89.64  | 93.87  | 4.72       |
|           | SOC 误差范围 (%)   | ± 3.20 | ± 0.95 | 70.31      |
| 并网性能优化    | 峰值功率损耗 (%)     | 4.18   | 2.67   | 36.13      |
|           | 谐波畸变率 (THD, %) | 7.56   | 3.82   | 49.47      |
| 智能诊断与调度   | 故障检测时间 (s)     | 无      | 2.36   | -          |
|           | 调度响应时间 (s)     | 无      | 1.94   | -          |
| 环境适应性测试   | 光透过率降低率 (%)    | 12.47  | 2.85   | 77.15      |
|           | 清洁周期 (d)       | 30     | 14     | 53.33      |
|           | 散热效率提升 (%)     | 无      | 31.28  | -          |
| 系统集成与效率验证 | 数据传输速率 (MB/s)  | 无      | 1.82   | -          |
|           | 实时性能分析时间 (s)   | 无      | 1.23   | -          |

五、结语

本文针对案例中的问题提出组件优化、储能与并网改造、环境适应性和数字化管理方案。组件裂纹检测精度达 0.10mm，储能效率提升至 93.87%，并网谐波畸变率降至 3.82%，光透过率降低率至 2.85%。测试验证改造后设备协同优化和数字化管理的闭环效果，方案具备工程推广价值。

参考文献

[1] 杨朝许, 张琛, 李利丹, 王鑫. 并网光伏电站支架基础对比研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2023.  
[2] 张磊, 叶海瑞, 柏嵩. 能源互联网之智能光伏电站建设及运维分析 [J]. 华东科技, 2023(6): 128-130.  
[3] 席凯, 黄国珍, 冯榆坤, 等. 水面光伏电站环境载荷数值预报方法研究 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 148-158.  
[4] 冯星. 光伏电站建设及运行质量安全问题及对策 [J]. 中国高新科技, 2023, (18): 23-24+27.  
[5] 陈俊宇, 王建华, 蔡福祿. 某光伏电站全站跳闸原因分析及处理对策 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(6): 195-198.  
[6] 尹江红, 卢锦力. 光伏电站 110KV 横山变继电保护整定计算 [J]. 电脑知识与技术: 学术版, 2020, 16(11): 4.  
[7] 杨旭. 光伏电站汇流箱通信无线传输技术的研究及应用 [J]. 电力设备管理, 2023(23): 134-136.  
[8] 杨建卫, 张宝, 曹晟磊. 基于云平台的光伏电站能量流测试系统的设计与应用 [J]. 太阳能, 2023(4): 59-65.