

# 光伏电站设备动态管理与改造探索

李红超

华电（海西）新能源有限公司，青海 海西 817000

**摘要：** 本研究针对光伏电站设备动态管理与改造需求，提出了一套基于实时监测、智能分析与动态优化的综合管理体系。通过光伏组件、逆变器、储能系统和环境适应性优化改造设计，提升设备运行效率和环境适应能力。搭建的仿真平台结合高精度硬件和 MATLAB/Simulink 软件，模拟改造后的设备性能与极端环境适应性，验证了优化设计的科学性与可行性。

**关键词：** 光伏电站；动态管理；实时监测

## Exploration of Dynamic Management and Transformation of Photovoltaic Power Station Equipment

Li Hongchao

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

**Abstract：** This study meets the needs of dynamic management and transformation of photovoltaic power station equipment, and puts forward a comprehensive management system based on real-time monitoring, intelligent analysis and dynamic optimization. Through photovoltaic modules, inverters, energy storage systems and environmental adaptability optimization and transformation design, improve the equipment operation efficiency and environmental adaptability. The simulation platform combines high-precision hardware and MATLAB / Simulink software to simulate the modified equipment performance and extreme environment adaptability, which verifies the scientific and feasibility of the optimization design.

**Keywords：** photovoltaic power station; dynamic management; real-time monitoring

### 引言

光伏发电作为一种绿色能源，正逐渐成为全球能源结构转型的重要方向。其稳定运行对于保障电力供应和推进清洁能源发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。传统光伏电站管理模式实时性差、故障诊断效率低、环境适应性弱，限制了发电效率与设备寿命。本文提出动态管理优化方案，通过实时监测、智能分析和动态优化，提升组件、逆变器和储能系统性能，并通过仿真验证改造设计的可行性，为光伏电站智能化管理提供技术支持。

### 一、光伏电站动态管理的基础理论

光伏电站动态管理是一种基于实时监测、智能分析和动态优化的设备管理模式，其核心在于通过技术手段实现设备运行状态与外部环境的高效协同<sup>[2]</sup>。物联网技术部署传感网络，采集设备电压、电流、温度等参数，结合边缘计算和云计算，实现秒级的数据处理与传输。热成像与无人机技术用于检测组件隐裂和热点问题，提升监测精度和效率。

动态管理的关键在于数据分析与智能决策。大数据技术整合历史与实时运行数据，结合人工智能算法构建故障预测模型，精准识别设备潜在问题<sup>[3]</sup>。基于设备健康状态的预测性维护计划降低停机风险，提高运维效率。动态优化策略通过实时调整设备运行参数，如组件输出功率和逆变器功率因数，实现发电效率提

升。数字孪生技术为电站建立虚拟模型，模拟不同场景下的运行状态，验证优化方案可行性。

### 二、动态监测分析、优化改造与智能决策体系

#### （一）动态监测技术

动态监测技术是光伏电站实现精准设备管理与实时优化的基础<sup>[3]</sup>。传感器网络布置于光伏组件、逆变器及储能系统，通过高精度硬件采集电压、电流、温度等关键参数。数据由边缘计算设备处理后传输至云平台，压缩后的传输数据量  $D_c$  公式表述如下：

$$D_c = \alpha D_r, 0 < \alpha < 1 \quad (1)$$

其中， $D_r$  为原始数据量， $\alpha$  为压缩系数，反映边缘计算在降低传输数据量和提高传输效率中的作用。这种优化减少了冗余

数据对通信带宽的占用，确保数据传输延迟满足动态管理需求。无人机热成像技术用于监测组件表面热分布，识别隐裂与热点区域。组件表面温度分布通过成像设备采集，异常区域  $A_{hot}$  的范围定义为满足以下条件的点集：

$$A_{hot} = \{(x, y) | T(x, y) > T_{threshold}\} \quad (2)$$

其中， $T(x, y)$  表示组件表面温度分布， $T_{threshold}$  为热异常阈值。通过图像分割算法提取  $A_{hot}$ ，结合无人机的 GPS 定位，异常区域的坐标精确反馈至运维系统，提供组件维修决策依据。环境适应性监测技术实时采集光照强度  $E(t)$ 、风速  $W(t)$  和沙尘浓度  $C(t)$  等外部参数。这些参数通过动态优化算法与组件运行状态相关联。例如，实际输出功率  $P(t)$  的计算结合光照强度和有效受光面积  $A_{eff}$ ：

$$P(t) = \eta \cdot E(t) \cdot A_{eff}(W(t), C(t)) \quad (3)$$

其中， $\eta$  为组件转换效率，受光面积  $A_{eff}$  会因风速导致灰尘积累及沙尘浓度变化而减小。环境监测系统根据沙尘浓度调整清洁周期，优化组件清洁计划；在高温条件下调整散热策略，防止设备热失效。动态监测技术通过传感器网络、无人机热成像及环境监测的结合，构建了设备运行状态与外部环境变化的完整感知体系。数据通过多级优化实现高效传输和智能分析，支持动态调控与故障响应，为光伏电站的高效运行和后续设备改造提供技术保障。

### (二) 数据分析与故障诊断

数据分析与故障诊断是光伏电站动态管理的核心环节，通过大数据技术和人工智能算法，实现从设备异常检测到故障定位与预测<sup>[4]</sup>，以下为数据分析与故障诊断的整体流程。

数据分析与故障诊断依托光伏组件传感器、逆变器功率因数模块、储能电池管理系统 (BMS) 和环境监测设备，通过多维数据协同实现精准识别和定位故障。各设备采集电压、电流、温度、SOC (剩余电量) 等参数，并由工业网关预处理以消除噪声、同步时间戳，保证数据一致性。实时数据通过云平台与历史正常值和已记录故障模式比对，捕捉潜在异常。诊断模型分析提取结果，输出具体故障类型、设备位置及严重性等级。诊断完成后生成报告，包括设备编号、故障类别及维护建议。组件隐裂建议局部修复或更换，逆变器功率因数异常则建议升级散热模块或更换 IGBT 模块。

最终诊断结果被用于优化运维策略与设备改造方案。如高沙尘环境建议增加清洁频率并强化组件表面防护，高温区域建议引入液冷散热设计。

### (三) 动态优化改造策略

动态优化策略通过设备改造和技术升级，实现光伏电站运行参数的实时调整与性能提升。本部分从四个关键方面展开论述，针对设备运行中的核心问题和外部环境挑战，提出具体的改造优化方案。

#### (1) 光伏组件的改造与优化

光伏组件采用高效 PERC 单晶硅技术，增强光吸收能力，并通过增加抗反射涂层减少反射损耗。热管理系统集成液冷散热模块，结合组件表面温度传感器与热成像设备，实现热点区域的动态监测与散热优化。组件表面还增加抗沙涂层，减少灰尘堆积对发电效率的影响，同时提升组件在沙尘环境下的耐久性。清洁机器人通过沙尘传感器触发，自动清理组件表面，确保光伏组件的有效受光面积<sup>[5]</sup>。

#### (2) 逆变器的改造与优化

逆变器改造采用高效 IGBT 模块，升级为三电平拓扑结构，提升功率转换效率。液冷散热系统替代传统风冷，结合高导热材料优化热交换效率，特别适用于高温运行环境。功率因数控制模块通过引入自适应算法，动态调整无功功率分配，以应对并网条件的变化。逆变器的电磁干扰 (EMI) 抑制模块同步优化，减少电网连接中的波动与干扰问题，增强设备的并网稳定性。

#### (3) 储能系统的改造与优化

储能系统采用新型锂铁磷酸电池 (LFP)，结合电池管理系统 (BMS)，实现 SOC (剩余电量) 的实时监控与均衡调控。充放电路径通过双向 DC/DC 变换器优化，减少能量损耗，同时确保电池组内电量的均匀分配。电池冷却模块改造为液冷结构，有效控制热累积。分布式能源管理系统 (EMS) 引入动态功率分配技术，结合光伏发电和电网需求实时调整储能输出，提高负载高峰期的响应能力。

#### (4) 环境适应性的改造与优化

环境适应性优化主要围绕沙尘和高温条件。沙尘传感器实时监测组件表面污染程度，结合抗沙涂层和清洁机器人进行自动化清洁。液冷散热系统引入环境温度传感器，根据实时温度动态调整冷却循环速率，确保设备运行温度始终在安全范围内。逆变器和储能模块同步优化散热效率，适应极端环境的运行需求。

### (四) 智能决策支持体系

智能决策支持体系通过引入数字孪生技术、构建动态运维平台和优化反馈机制，为光伏电站的设备改造与动态管理提供系统化决策支持。

首先数字孪生模型是智能决策支持的核心，该模型基于组件、逆变器、储能系统的实时数据和历史运行数据构建虚拟电站模型。能够实时同步实际设备状态，用于模拟不同改造方案对系统性能的影响<sup>[6]</sup>。通过与云平台和边缘计算协同工作，数字孪生实现了多场景性能预测与优化方案验证，以下为数字孪生模型的运行逻辑代码：

其次是智能运维平台的构建，该平台集成诊断、优化和反馈模块，通过分析数据生成运维策略。平台基于实时监测系统，动态调整组件清洁频率、逆变器功率因数及储能系统充放电路径。例如，高沙尘浓度时，平台触发清洁机器人；组件过热时，动态调节液冷散热系统的循环速度。

最后是自动化运维与反馈机制，改造完成后，智能决策平台通过自动化反馈机制持续监控改造效果。平台将实时数据与数字孪生模型预测值对比，动态调整运行参数。如果实际性能与预测

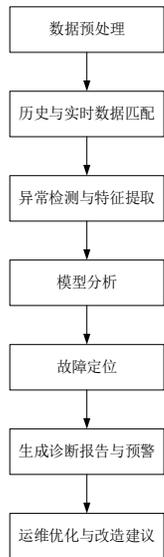


图1 数据分析与故障诊断流程

值偏差较大，系统则会自动触发二次优化，防止意外情况发生。

```
class DigitalTwin:
    def __init__(self, real_time_data, historical_data):
        self.real_time_data = real_time_data
        self.historical_data = historical_data

    def simulate_performance(self, modification_params):
        base_power = self.real_time_data.get('power', 0)
        efficiency = modification_params.get('efficiency', 1.0)
        return base_power * efficiency

    def predict_failure(self):
        current_temp = self.real_time_data.get('temp', 0)
        temp_threshold = max(self.historical_data.get('temp', [75])) * 1.1
        return "Overheating Risk" if current_temp > temp_threshold else "Normal"

# Example usage:
data = {"power": 100, "temp": 80}
history = {"power": [90, 95, 100], "temp": [70, 72, 74]}
twin = DigitalTwin(data, history)

print(twin.simulate_performance({"efficiency": 1.05})) # 输出模拟性能
print(twin.predict_failure()) # 输出故障预测
```

> 图2 数字孪生模型运行代码

### 三、改造效果仿真检测

#### (一) 仿真平台搭建

仿真平台搭建旨在验证光伏电站优化设计的实际效果，通过软硬件协同，模拟真实电站运行环境和改造后的性能表现<sup>[7]</sup>。平台搭建主要包括以下部分：

##### (1) 仿真硬件设计

仿真硬件包括光伏组件模拟器 Chroma 62150H-600S，用于模拟不同光照强度和温度条件下的组件输出特性，逆变器测试模块采用支持三电平拓扑结构的实验型逆变器，结合高效 IGBT 模块，模拟不同负载条件下的功率调节和散热性能。储能系统由锂电池磷酸电池组 (LFP) 和电池管理系统 (BMS) 组成，监测充放电过程中 SOC (剩余电量)、温度及能量流动。环境模拟设备通过气象传感器 (如太阳辐射表、风速计、沙尘浓度传感器) 及加热装置，提供高温、沙尘和强风等极端条件。

##### (2) 软件平台开发

软件平台基于 MATLAB/Simulink 构建数字孪生模型，与硬件设备实时联动。数字孪生整合光伏组件电压、电流，逆变器功率因数，储能系统 SOC 及温度数据，模拟改造方案在多场景下的运行效果。NVIDIA Jetson Xavier NX 处理边缘数据，云服务器负责历史与实时数据的比对与优化策略输出。

### 参考文献

[1] 马广平. 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术研究 [J]. 电力设备管理, 2021(14):3.  
[2] 邓文忠. 光伏电站工程在建筑项目工程中的应用研究 [J]. 中国住宅设施, 2023, (12): 1-3.  
[3] 赵铁林, 乐锋, 王海峰, 等. 光伏电站的智能运维技术应用 [J]. 电子技术, 2023, 52(07): 408-410.  
[4] 潘巧波, 李昂, 何梓瑜, 等. 数字化电厂智慧平台在光伏电站的应用 [J]. 黑龙江电力, 2023, 45(02): 137-142.  
[5] 邓森. 数字化电厂智慧平台在光伏电站中的应用研究 [J]. 智能城市, 2024, 10(09): 51-53.  
[6] 吴璇. 光伏电站智能化运维研究 [J]. 科学与信息化, 2023(6): 117-119.  
[7] 雷国斌, 徐嘉伟, 宋晓童, 等. 光伏电站动态无功补偿装置检测不确定度分析及评定方法研究 [J]. 青海电力, 2022(002): 041.  
[8] 顾超, 宋树平, 方凯. 智能化光伏电站监控系统设计与实现 [J]. 南方农机, 2022(005): 53.

#### (3) 仿真平台测试设计

仿真测试主要验证优化措施在实际运行中的性能表现。光伏组件部分模拟光照和温度变化，验证抗反射涂层和液冷散热模块的优化效果，重点关注组件的热斑分布及 I-V 曲线变化；逆变器部分针对不同负载条件，测试其功率因数调节与散热性能；储能系统部分通过充放电循环测试验证 BMS 对 SOC 均衡的动态调节能力和新型 LFP 电池的热性能优化效果；环境部分模拟高温、沙尘和强风条件下组件清洁机器人、抗沙涂层和液冷系统的适应能力<sup>[8]</sup>。

### (二) 仿真测试结果

仿真测试表明，光伏组件输出功率提升至 305.87W/m<sup>2</sup>，温升降至 3.12° C；逆变器转换效率达 97.32%，高温负载下性能稳定；储能系统 SOC 偏差降至 ± 2.14%，充放电温升降至 1.85° C；沙尘衰减率降至 4.32%，高温异常率降低至 2.43%。设备性能和环境适应能力均有相应提升，以下为仿真测试的具体数据：

表 1: 仿真测试结果

测试项目	优化前参数	优化后参数	提升率 (%)	测试条件
光伏组件输出功率	275.32W/m <sup>2</sup>	305.87W/m <sup>2</sup>	11.11	光照强度 800W/m <sup>2</sup> , 25° C
光伏组件温升	7.54° C	3.12° C	58.62	功率 275W/m <sup>2</sup> , 环境温度 35° C
逆变器转换效率	94.57%	97.32%	2.91	负载功率 50kW, 50° C
储能系统 SOC 偏差	± 6.72%	± 2.14%	68.15	循环 50 次, 负载 10kW
储能系统温升	4.56° C	1.85° C	59.43	充放电周期 2d
沙尘影响功率衰减	13.45%	4.32%	67.87	沙尘浓度 200 μg/m <sup>3</sup>
高温环境异常率	7.84%	2.43%	69.01	环境温度 45° C

### 四、结语

本文通过提出光伏电站设备动态管理与改造方案，实现了设备性能与环境适应能力的显著提升。动态管理体系结合实时监测、数据分析与优化控制，为光伏组件、逆变器和储能系统的运行提供精准调控。搭建的仿真平台验证了改造技术在输出功率、散热性能和极端环境适应性方面的实际效果，为电站的智能化改造提供了可靠数据支持。