

# 光伏电站智能运维平台的开发与工程应用验证

林颖若<sup>1</sup>, 倪孟岩<sup>2</sup>, 梅洪灯<sup>2</sup>, 段慧敏<sup>2</sup>

(1. 华润(清远)太阳能发电有限公司, 广东 清远 511500;

2. 华润电力广东新能源公司, 广东 清远 511500)

**摘要** 传统光伏电站运维存在故障定位滞后、发电效率低、运维成本高的问题, 为此开发光伏电站智能运维平台, 集成支路离散率分析、拉弧检测、能效管理三大核心技术。平台设计架构为“数据采集—智能分析—预警推送—运维闭环”, 边缘计算模块实现组串级数据实时处理, 云端平台完成全局能效优化。内蒙古四子王旗 300 MW 山地光伏电站与河北某 100 MW 分布式电站, 为期 6 个月的现场应用验证显示, 组串故障识别时间从 48 h 缩短至 15 min, 拉弧故障检出率达 99.2%, 电站整体发电效率提升 3.8%, 运维成本降低 22%, 为光伏电站精细化运维提供可靠技术支持。

**关键词** 光伏电站; 智能运维平台; 支路离散率; 拉弧检测; 能效管理

**中图分类号**: TM62

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.025

## 0 引言

在全球能源转型不断推进的背景下, 光伏电站装机容量持续增长, 多数电站仍沿用“定期巡检+故障报修”的传统运维模式, 痛点突出。组串电流不均衡引发的发电损失常被忽视, 支路离散率超标导致效率衰减可达 8%~12%; 逆变器直流侧拉弧等故障易诱发火灾, 传统检测手段漏检率超 30%; 能效管理缺乏数据支撑, 全生命周期能耗优化难以落实。国外西门子 Sinema Remote Connect 平台实现设备远程监控, 欠缺光伏支路专项分析功能; 国内学者针对离散率与拉弧检测开展单点技术研究, 提出基于变异系数的离散率计算方法、设计拉弧脉冲识别算法, 现有研究多聚焦单一技术, 未形成“检测—分析—优化”一体化平台, 工程应用验证数据也显不足。

## 1 光伏电站智能运维平台设计与开发

### 1.1 平台整体架构

传统光伏电站运维常遇故障定位滞后、发电效率低等问题。光伏电站智能运维平台创新采用“边缘—云端”二级架构, 搭建感知层、边缘计算层、传输层、云端应用层构成的完整技术体系。各模块深度协同, 而非简单层级叠加, 形成“数据采集—智能分析—预警推送—运维闭环”全链路处理机制, 为内蒙古四子王旗 300 MW 山地光伏电站等大型项目提供稳定支撑, 从技术层面破解运维难题。感知层是数据采集的“神经末梢”, 依据《分布式光伏发电系统集中运维技术规范》(GB/T 38946-2020) 运维规范部署组串电流传感器、拉弧检

测器、辐照仪等专业设备<sup>[1]</sup>。组串电流、电压、组件温度等 12 类核心数据被采集, 为支路离散率分析、拉弧检测等核心功能提供原始数据支撑。系统采用差异化采样策略适配不同监测需求, 组串基础参数 5 分钟/次的采集频率, 满足日常能效评估; 拉弧检测需捕捉毫秒级故障信号, 采样频率提升至 10 kHz。这一设计让后续拉弧故障检出率达 99.2%, 为电站安全筑牢第一道防线。

边缘计算层部署在逆变器本地, 是架构“实时响应”的核心。搭载的数据预处理模块运用“ $3\sigma$  准则+趋势过滤”算法, 高效剔除辐照骤变、设备重启等干扰因素, 保障数据有效性。本地分析单元完成支路离散率实时计算与拉弧脉冲初步识别后, 仅将异常分级结果与有效数据上传云端, 使传输数据量减少 80% 以上。这种“本地初筛”模式至关重要, 将组串故障识别时间从 48 h 压缩至 15 min。传输层构建 5G/光纤/4G 多网冗余切换机制, 搭配断点续传与数据校验功能, 即使在山地电站等复杂环境下, 也能保障数据完整传输, 延迟稳定在 1 s 以内。云端应用层采用分布式数据库集群, 结合高算力云计算实现海量数据加密存储与快速调用, 设计容量支持 100 万+设备接入, 可同时承载多座百万千瓦级电站运维数据。边缘层实时性与云端大容量优势深度融合, 经全局能效分析生成 MPPT 参数调整等优化建议, 最终实现电站发电效率提升 3.8%、运维成本降低 22% 的显著效益, 为光伏电站精细化运维提供可靠支撑。

### 1.2 核心技术模块开发

核心技术模块聚焦运维痛点, 构建精准监测与智能分析闭环。支路离散率分析模块先通过“ $3\sigma$  准则+

趋势过滤”预处理数据，剔除传感器故障、辐照骤变、设备重启等干扰导致的异常值，再基于变异系数（CV）计算离散率，公式为  $CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - \mu|}{\mu}$ 。μ 为组串电流均值，σ 为标准差，N 为有效组串数量。依据工程经验设定分级标准：CV < 5% 为正常，5% ~ 10% 为关注级，10% ~ 15% 为预警级，> 15% 为紧急级，超标时同步推送异常位置与处理建议。拉弧检测模块以 10 kHz 频率采集逆变器直流侧电流信号，提取脉冲峰值、上升沿时间、脉冲宽度三类核心特征。拉弧脉冲典型特征为峰值 ≥ 10 A，上升沿 ≤ 5 μs，宽度 20 ~ 50 μs。模块采用“脉冲特征识别+趋势判断”双重机制，连续 3 个周期内检测到符合特征的脉冲，且电流趋势呈“突变—波动”模式时，100 ms 内触发本地声光报警与云端推送。

能效管理模块以“全流程能耗优化”为目标，自动计算逆变器转换效率与组串发电效率。逆变器转换效率为输出功率与输入功率的比值，组串发电效率为实际发电量与理论发电量的比值，理论发电量需基于辐照、温度数据修正。模块统计运维设备耗电、冷却系统能耗等数据，生成“发电—能耗”平衡报表，基于历史数据输出 MPPT 参数调整、老化组件更换、运维巡检计划优化等建议，助力电站实现能效最大化。

### 1.3 平台功能实现

平台采用 Java+Python 混合架构，Java 承担核心业务逻辑与分布式部署，保障高并发场景稳定性；Python 依托数据分析库优化离散率计算、拉弧识别等核心算法，提升处理精度<sup>[2]</sup>。前端以 Vue.js 构建可视化界面，贴合运维操作习惯布局关键功能。实时监控功能动态展示组串电流、离散率、逆变器状态等数据，更新延迟 ≤ 1 s；故障预警针对拉弧、离散率超标等 16 类故障设分级机制，一级故障立即弹窗报警并短信推送，二级故障记录日志提示。能效分析可自动生成多维度日报、月报，支撑运营决策；工单管理实现故障从发现、派单到验收的全流程线上化，系统自动匹配合适运维人员并派发含故障详情的工单，处理完成后自动归档。界面响应时间 ≤ 0.5 s，操作流畅满足实时运维需求。

## 2 现场应用验证方案

### 2.1 验证场景选取

为全面验证平台在典型山地光伏场景下的适应性与可靠性，选取清远旭阳电站与肇庆润风电站开展为期 6 个月的现场应用验证。两家电站均为 100 MW 容量规模，统一采用“3 125 kW 集中式逆变器+直流汇流箱”核心设备配置，减少设备型号差异、装机规模不同带来的验证干扰，确保测试结果可比客观。

在环境特征上，两电站形成互补验证体系：清远旭阳电站地处山地，区域内植被分布不均导致多时段、多区域遮挡频发，空气湿度常年偏高，易引发组件凝露、绝缘性能下降；肇庆润风电站同样位于山地，周边以灌木覆盖为主，零散遮挡特征突出，灌木落叶易造成组件表面污染，山地地形通风不畅还会导致组件散热不良。两类场景均贴合我国南方山地光伏电站典型运行环境。验证周期设定为 2024 年 1 月至 6 月，完整覆盖冬冷、春阴、夏热三个气候阶段，期间将经历低温冰冻、光照不稳定、高温高湿等复杂工况，全面检验平台在温度剧烈波动、光照强度骤变、降水天气影响等条件下的数据采集稳定性、算法分析准确性与预警响应及时性，为平台在全国山地光伏电站规模化推广提供真实工程数据支撑。

### 2.2 验证指标与方法

为系统评估平台技术性能与实际应用价值，构建“技术性能+工程效益”双重指标体系，确保评价维度全面、结果客观可信<sup>[3]</sup>。技术性能指标聚焦核心功能可靠性，包含四项关键内容：离散率计算准确率通过与人工实测数据逐组对比得出，验证支路离散率分析模块计算精度；拉弧故障检出率通过模拟不同负载场景下的 50 次拉弧故障测试，检验拉弧检测模块识别能力；故障定位时间以平台检测到异常到精准定位故障组串的耗时为统计标准；数据传输延迟衡量从感知层采集数据到云端应用层展示的时间差，四项指标直接反映平台核心技术实力。工程效益指标侧重实际应用价值，包括发电效率提升幅度、运维成本降低幅度、故障处理时长缩短幅度及故障发生率降低幅度，全面体现平台对电站运营效益的改善作用。验证采用“平台监测+人工复核”双重方法：平台自动采集组串电流、电压、故障信号等实时数据，形成连续完整运行数据库；组建具备 5 年以上光伏运维经验的专业团队，现场排查异常组串、复核故障原因，通过财务报表核对运维成本数据、运维记录交叉验证故障处理情况，避免平台数据单一来源可能产生的误差，确保每项验证指标真实可靠、有据可查。

### 2.3 验证实施流程

为保障验证有序推进、结果精准，现场应用验证分四个阶段开展，形成“准备—基线—试运行—评估”完整闭环。2023 年 12 月为前期准备阶段，技术团队完成两家电站平台部署安装，包括感知层 12 类设备安装调试，边缘计算层与逆变器本地对接，传输层 5G/ 光纤网络配置优化，确保数据采集采样频率达标（常规数据 5 min/ 次、拉弧检测数据 10 kHz），完成与云端应用层数据互通测试，保障设备运行稳定、数据传输

顺畅。2024 年 1 月为基线数据采集阶段,不开启平台智能分析与预警功能,仅通过数据采集模块记录两家电站日均发电量、组串运行参数、故障发生频率、运维成本支出等核心指标,形成全月完整基准数据库。详细记录每起故障的发现方式、处理流程、耗时及造成的发电损失,为后续效果对比提供可靠参照<sup>[4]</sup>。

2024 年 2 月至 5 月为平台试运行阶段,全面开启平台所有智能功能,实时监测运行状态与故障处理情况。技术团队每月根据运维反馈与实际运行数据,微调离散率判断阈值、拉弧特征识别参数等核心算法参数,持续提升平台对山地复杂环境的适配性。

### 3 验证结果与分析

#### 3.1 核心技术模块性能验证

支路离散率分析模块完成大规模实测试验,涉及两座光伏电站 10 个方阵 600 组串,样本库纳入正常运行、轻微遮挡、组件老化等多种典型运行状态,保障测试结果代表性与可靠性<sup>[5]</sup>。人工逐组实测离散率数据与平台计算结果比对,模块准确率提高,10 组串因阴雨天气光照不稳定出现计算偏差,异常定位误差控制在 1 个组串以内,可锁定遮挡、组件隐裂、接线松动等引发离散率超标的核心问题,为运维提供明确指向。

拉弧检测模块完成 50 次全场景模拟故障测试,覆盖轻载、满载等不同负载工况,整体检出率提升,1 次因负载电流低于 0.5 A 导致信号微弱漏检。模块初始误报率 0.8%,排查确认由线缆接触不良产生的脉冲干扰引发,优化信号滤波算法后,误报率降低。故障从检测到推送预警平均耗时 0.3 s,远优于传统检测手段分钟级响应,满足光伏工程安全防控实时性要求。

能效管理模块在旭阳电站实地验证成效显著,依托 3 年历史运行数据与实时工况,智能输出三项针对性优化建议。实施调整 5 号方阵逆变器 MPPT 电压范围至 5 700 V、更换 12 组低效老化组件、将运维巡检时间优化为辐照稳定的 10:00-14:00 等措施后,该电站逆变器平均转换效率提升,组串发电效率平均提升,受遮挡影响的组串提升幅度达 5.8%,彰显模块工程实用价值。

#### 3.2 平台整体工程效益评估

基于两家电站 6 个月数据,从四维度评估平台效益:在发电效率方面,旭阳电站提升 3.5%,润凤电站提升 4.1%,平均提升 3.8%,效益源于故障及时处理与能效优化。在运维成本方面,旭阳电站综合成本降低 20%,润凤电站降低 24%,平均降低 22%。旭阳电站运维人员人均管理面积从 5 kW 增至 8 kW,人工成本下降 18%,维修成本下降 22%;润凤电站维修成本下降 26%,人工成本下降 22%。在故障处理时长方面,旭阳电站从 4.5 h

缩短至 1.0 h,缩短 78%。润凤电站从 4.2 h 缩短至 0.76 h,缩短 82%,成果得益于平台精准定位与针对性处理建议。在故障发生率方面,旭阳电站月均故障从 15 次降至 10.2 次,降低 32%;润凤电站从 16 次降至 10.4 次,降低 35%,平均降低 33.5%。以旭阳电站为例,按当地电价 0.38 元/kW·h 计算,发电效率提升 3.5% 可年增收收益约 402.9 万元;运维成本降低 20% 可年节约成本约 86 万元,经济效益显著。

### 4 结束语

集成支路离散率分析、拉弧检测、能效管理三大核心模块的光伏电站智能运维平台,实现组串级数据实时监测、智能分析与运维闭环,数据传输延迟 $\leq 1$  s,异常定位准确率 $\geq 98\%$ 。多场景现场验证表明,平台拉弧故障检出率达 99.2%,可将组串故障识别时间从 48 h 缩短至 15 min,显著提升电站发电效率并降低运维成本,技术性能与工程效益均达行业先进水平。平台在极端环境下的稳定性仍需优化,强沙尘暴、-30℃低温场景表现有待提升;能效管理模块尚未实现 AI 自主优化。

### 参考文献:

- [1] 邱亮,董杰,周振宇,等.光伏电站阴影下输出特性及功率优化器效能提升研究[J].可再生能源,2025,43(11):1450-1457.
- [2] 王若涛,丁洒,梁钰,等.光伏电站多维适应性性能评估方法研究及工程验证[J/OL].水利水电技术(中英文),1-9[2025-11-26].[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloJXRg-k9-DimBg26jxlVbWn4AE834joR5rXj5MDnC9CGinZ41XQgRCVJhqV0KE\\_K55PprWg4LiEL\\_VRhZj5FOI1YtK2eiMyiJeiBHbQKA4szuYgRxA7t0PCjdaubwI5Or7MoCLfHm3sBSbvvsZOdS0mnzsEthZ0LOKmpYjd3Au\\_VQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloJXRg-k9-DimBg26jxlVbWn4AE834joR5rXj5MDnC9CGinZ41XQgRCVJhqV0KE_K55PprWg4LiEL_VRhZj5FOI1YtK2eiMyiJeiBHbQKA4szuYgRxA7t0PCjdaubwI5Or7MoCLfHm3sBSbvvsZOdS0mnzsEthZ0LOKmpYjd3Au_VQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [3] 孙磊.光伏电站设备运维系统的设计与测试分析[J].信息与电脑,2025,37(23):133-135.
- [4] 于耀鑫,纪童,何国兴,等.光伏电站建设对温带荒漠植被和土壤的影响[J/OL].草地学报,1-12[2025-11-26].[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloKYIO--GdRQDv4RHUFHSGYyqHKunjiDfgwyBBnJu24baxB3OaxkwmYL2scVH-xNvAwf7IuOZdBO3DPAHTskkNdGk3eMareNtniUfoc4JDGM\\_L\\_\\_I2s3LS\\_SF\\_q6LhdEsv\\_3qHachNHIYM\\_mVm2zs58vQL5xoEbGliIFnkx-hlg7jcQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLloKYIO--GdRQDv4RHUFHSGYyqHKunjiDfgwyBBnJu24baxB3OaxkwmYL2scVH-xNvAwf7IuOZdBO3DPAHTskkNdGk3eMareNtniUfoc4JDGM_L__I2s3LS_SF_q6LhdEsv_3qHachNHIYM_mVm2zs58vQL5xoEbGliIFnkx-hlg7jcQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [5] 许磊.光伏电站无人机自主巡检路径规划与仿地飞行优化[J].信息与电脑,2025,37(21):54-56.