

# 分布式光伏规模化并网运行技术探析

毛瑞旭 谷裕

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

**[摘要]** 能源结构低碳化转型驱动电力系统向分布式、智能化方向演进, 分布式光伏规模化并网已成为新型电力系统建设的核心议题。随着光伏组件效率突破 23.5% 与技术成本持续下降, 分布式电源渗透率呈现指数级增长态势, 传统电网运行范式面临根本性挑战。高比例可再生能源接入引发的多物理场耦合效应, 在电能质量、系统稳定、市场机制等维度形成复杂技术瓶颈。现有研究多聚焦单一技术环节优化, 缺乏对设备-控制-市场协同作用机理的系统性解构。文中突破传统技术经济分析框架, 从动态演化视角揭示规模化并网引发的电网生态重构规律, 构建融合电力电子技术、人工智能算法与市场机制设计的综合治理体系。研究重点涵盖多源协调控制策略、标准体系演进路径及系统韧性提升方法, 为破解高渗透率场景下的源网矛盾提供理论支撑与实践指引。

**[关键词]** 分布式光伏; 规模化并网; 电能质量; 光储协同; 电力市场

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16504

中图分类号: TM46

文献标识码: A

## Exploration on Distributed Photovoltaic Scale Grid connected Operation Technology

MAO Ruixu, GU Yu

Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

**Abstract:** The low-carbon transformation of energy structure drives the evolution of power systems towards distributed and intelligent directions, and the large-scale grid connection of distributed photovoltaics has become a core issue in the construction of new power systems. With the efficiency of photovoltaic modules breaking through 23.5% and the continuous decline in technology costs, the penetration rate of distributed power generation is showing an exponential growth trend, and the traditional power grid operation paradigm is facing fundamental challenges. The multi physics coupling effect caused by the high proportion of renewable energy access has formed complex technological bottlenecks in dimensions such as power quality, system stability, and market mechanisms. Existing research mostly focuses on optimizing a single technical link, lacking a systematic deconstruction of the mechanism of equipment control market synergy. The article breaks through the traditional technical and economic analysis framework, revealing the ecological reconstruction law of the power grid caused by large-scale grid connection from a dynamic evolution perspective, and constructing a comprehensive governance system that integrates power electronics technology, artificial intelligence algorithms, and market mechanism design. The research focuses on multi-source coordinated control strategies, standard system evolution paths, and methods to enhance system resilience, providing theoretical support and practical guidance for resolving source network conflicts in high penetration scenarios.

**Keywords:** distributed photovoltaics; large scale grid connection; power quality; light storage synergy; electricity market

### 引言

全球能源互联网发展推动电力供给模式从集中式向分布式转型, 光伏发电凭借模块化特性成为能源革命的关键载体。配电网逐渐从单纯电能输送网络转变为多向能量交互平台, 其物理形态与运行逻辑发生本质改变。光伏逆变器集群并网引发谐波谐振、电压越限等电能质量问题, 功率波动性与电网刚性调节能力的矛盾加剧系统失稳风险。政策层面, 各国加速修订并网标准与市场规则, 但技术规范迭代速度滞后于光伏装机增长需求。国际电工委员会近三年发布的 6 项相关标准中, 仅 2 项涉及高渗透率场景特殊要求。技术经济协同优化成为破题关键, 需建立涵盖设备参数、控制策略、市场机制的全维度解决方案。

### 1 分布式光伏规模化并网概述

#### 1.1 分布式储能技术概述

分布式储能技术是一种将多个独立的储能单元部署在电网的不同位置, 通过协同控制, 实现高效电能管理与调度的技术体系。其核心组成包括储能单元、功率变换系统和能量管理系统。在应对光伏电站输出的随机性和间歇性方面, 分布式储能展现出卓越的灵活性, 能够实时调节功率, 有效平滑输出波动, 显著提升电网运行的稳定性与可靠性。此外, 分布式储能系统具备快速响应和双向功率流调节能力, 适应并网和离网等多种运行模式。通过通信技术与控制策略的协同应用, 多个分布式储能单元能够实现分布式自治控制和全局协调调度, 从而实现系统级能量优化, 提高光伏电站的整体性能和经济性。

## 1.2 分布式光伏发电的技术背景与发展意义

分布式光伏发电技术通过将光伏组件分散部署在用户侧或配电网侧,实现了能源生产与消费的地理协同。其技术内核包含模块化设计、即插即用接口和智能控制单元,使得系统具备快速部署和灵活扩展能力。在能源转型背景下,该技术有效缓解了传统集中式发电存在的输电损耗高、土地资源占用大等问题,同时契合新型电力系统对源荷互动能力的要求<sup>[1]</sup>。国际能源政策趋向于强化分布式能源在电网规划中的法定地位,推动其从补充能源向主力能源转变。随着电力电子器件耐压等级提升和拓扑结构优化,分布式光伏系统已突破早期小容量、低压接入的技术限制,逐步形成覆盖工商业、居民及公共设施的全场景应用生态,为构建低碳弹性电网奠定物理基础。

## 1.3 规模化并网的核心特征与技术要求

规模化并网区别于传统分布式接入的本质特征,在于其引发的电网运行范式变革。系统呈现多时空尺度耦合特性:空间维度上,高密度接入导致配电网潮流方向从单向辐射转变为多向环流;时间维度上,光伏出力与负荷需求的异步波动要求电网具备分钟级调节能力。技术规范体系需同步演进,重点强化逆变器的动态无功支撑能力、快速频率响应特性以及宽电压范围适应能力。并网标准对电压暂降穿越、谐波谐振抑制等关键性能提出量化约束,要求设备在电网异常工况下维持至少10个周波以上的持续供电能力。系统层面需建立源网协同规划机制,通过动态容量评估模型精确量化各节点渗透率上限,确保电网安全运行边界不被突破。

## 2 并网技术挑战与关键设备

### 2.1 电能质量问题及影响

分布式光伏规模化接入引发配电网电能质量多维劣化效应。谐波畸变源于电力电子器件的非线性开关特性,多逆变器并联运行时特定次谐波分量产生叠加共振,造成电流波形严重畸变。电压波动受光照强度瞬变影响,表现为日内电压偏差超出传统配电网设计裕度,特别是在馈线末端可能引发保护装置误动作。三相不平衡问题在单相光伏系统占主导的接入场景中尤为突出,导致中性线电流超限和变压器附加损耗增大。这些质量问题具有时空关联特性,需建立基于阻抗网络分析的全局治理策略,而非传统单点补偿模式。

### 2.2 功率波动性与电网稳定性矛盾

光伏出力受气象因素影响呈现分钟级至小时级波动,与传统同步机组惯性响应特性形成根本冲突。当渗透率超过临界阈值时,系统等效惯性常数下降导致频率调节速率恶化,在云层快速移动场景下可能引发连锁脱网事故。电压稳定性方面,午间光伏大发时段大量无功倒送引发电压越限,而傍晚负荷爬坡期又需应对电压骤降风险<sup>[2]</sup>。解决该矛盾需突破传统源随荷动控制范式,构建基于动态灵敏度分析的协同调节机制,实现有功-无功的时空解耦控制。

## 2.3 孤岛效应保护与调峰消纳瓶颈

非计划孤岛运行对设备安全和人员保护构成严重威胁,现有被动式检测方法在复杂电网拓扑中易出现失效。主动检测技术需平衡注入信号强度与电能质量的关系,发展基于阻抗特性辨识的自适应判据。调峰矛盾体现为光伏出力曲线与负荷需求的相位差异,午间过剩功率导致反向潮流激增,而传统调节手段响应速度难以匹配光伏波动速率。破解该瓶颈需建立多时间尺度储能配置策略,并通过市场机制引导柔性负荷参与功率平衡。

## 2.4 关键设备技术优化

### 2.4.1 光伏逆变器智能控制

最大功率点跟踪算法向多峰搜索与抗扰动方向演进,采用改进型粒子群优化策略提升复杂光照条件下的跟踪精度。低电压穿越功能通过动态无功补偿算法重构,在电网故障期间自动切换控制模式,实现并网点电压的快速支撑。新型拓扑结构如三电平变换器和宽禁带器件应用,使逆变器效率曲线平坦化,拓宽高效运行区间。

### 2.4.2 储能系统协同配置与能量管理

储能配置需遵循时间解耦-空间匹配原则,依据光伏波动频谱特性选择适宜的技术组合。能量管理系统采用双层优化架构,上层基于场景预测制定充放电计划,下层通过模型预测控制实现实时功率校正。混合储能系统通过频域分解技术协调不同响应速度设备的动作时序,有效平抑多尺度功率波动。

## 3 并网运行控制与调度策略

### 3.1 主动配电网调度与多源协调控制

主动配电网调度体系需突破传统被动响应模式,构建基于动态边界条件的优化控制框架。通过分层控制架构实现分布式光伏、储能与柔性负荷的协同互动,其中本地控制器负责毫秒级功率平衡,区域协调器完成分钟级经济调度,主站系统实施小时级网络重构。多源协调的核心在于解决异质能源的异构性矛盾,采用改进型纳什议价模型量化各主体调节成本,建立功率-信息-价值三重耦合的交互机制。动态网络重构技术通过开关组合优化,可将光伏消纳率提升,同时降低线路损耗。边缘计算节点的部署使控制指令传输时延压缩至20ms以内,满足高渗透率场景的实时性需求。为应对多时间尺度耦合问题,需开发具有自适应能力的混合整数规划算法,将拓扑优化计算耗时降低至原有时长的30%。分布式优化技术采用交替方向乘法,实现各节点控制策略的并行求解与全局收敛,迭代次数减少的同时保证收敛精度。

### 3.2 功率预测与通信安全保障机制

光伏功率预测精度受云层运动建模能力制约,新型预测框架融合卫星遥感数据与地面辐照监测网络,采用时空注意力机制提升短时预测分辨率。深度学习模型通过迁移学习策略适应不同气候区特性,使15分钟尺度预测误差稳定在6%以下<sup>[3]</sup>。通信安全方面,需防范虚假数据注入攻

击对调度指令的篡改风险,量子密钥分发技术在配电自动化终端的试点应用,将密钥更新周期缩短至5分钟。时间敏感网络技术的引入,保障了控制指令传输的确定性和时延上限,时钟同步精度达到微秒级。针对预测模型的可解释性缺陷,开发基于Shapley值的特征贡献度量化方法,辨识影响预测精度的关键气象因子。安全防护体系采用零信任架构,通过动态行为分析识别异常访问请求,将网络攻击检测率提升至99.7%。

### 3.3 运维模式优化与故障诊断技术

传统计划检修模式难以适应光伏设备海量接入现状,需向状态检修+主动干预模式转型。基于数字孪生的运维平台通过多物理场耦合仿真,实现设备健康状态的动态评估与剩余寿命预测。故障诊断技术采用多源信息融合策略,结合逆变器运行日志、电气量波形与红外成像数据,构建深度残差网络分类模型,使故障识别准确率突破98%。预防性维护策略通过风险量化模型优化巡检路径,将设备可用率提升至99.9%以上。引入联邦学习框架解决数据孤岛问题,各电站本地模型参数加密上传至云端聚合,全局模型更新周期缩短至24小时。声纹识别技术在组件隐裂检测中的应用,实现非侵入式故障预警,异常声纹特征提取精度达95%。知识图谱技术构建故障因果链,支持跨设备故障的根因追溯,诊断效率提升。自适应阈值算法动态调整告警触发条件,误报率下降至0.3%以下。

## 4 经济性、政策与标准体系

### 4.1 规模化并网成本-收益模型与投融资模式

全生命周期成本分析需突破传统财务评估框架,构建包含技术退化成本的动态模型。光伏组件年衰减率引发的发电量损失需纳入贴现计算,使投资回收期预测误差控制在±6个月内。电网适应性改造成本呈现非线性增长特征,当渗透率超过20%时,线路扩容费用占比从15%陡增至35%。创新金融工具如波动率挂钩债券,可将光伏收益波动系数从0.32降至0.18。区块链技术的应用实现资产确权与收益分配的秒级清算,使分布式光伏资产流动性指数提升40%。

### 4.2 电力市场交易机制与政策补贴协同路径

分布式交易需破解物理网络约束与市场边界的矛盾,构建基于节点边际价格的分区定价机制。实时市场引入15分钟颗粒度的交易时段划分,匹配光伏出力波动特性。辅助服务市场中,光伏电站通过提供快速频率响应服务可获得0.08-0.12元/kWh的额外收益。政策协同的关键在于建立绿电消费认证体系,强制要求高耗能企业采购不低于15%的分布式光伏绿证。跨省区消纳机制通过输电权拍卖实现空间资源优化,将弃光率压制在3%以下。

### 4.3 国际并网标准对比与国内规范完善方向

对比分析揭示技术标准的地域适应性差异:北美体系侧重故障穿越能力,欧洲标准强调谐波兼容性。国内标准升级路径包括:建立光伏集群等值建模规范,统一仿真精

度误差带;制定光储系统并网测试规程,明确20项关键性能检测指标;完善网络安全准入标准,要求通信协议具备量子加密接口。标准实施需配套建设三级检测认证体系,实现设备入网前-中-后全周期质量管控。

### 4.4 电网准入监管与市场化机制设计

技术准入实施分级管理制度,按装机规模划分三类管控区:I类区(>10MW)强制配置动态无功补偿装置,II类区(1~10MW)要求具备双向功率控制功能,III类区(<1MW)设定谐波电流发射限值。容量管控采用基准值+浮动系数模式,基准渗透率设定为20%,根据电网强度系数动态调节±5%。市场化机制创新体现在三个方面:建立容量信用银行,允许光伏开发商交易消纳权配额;引入负电价触发机制,当反向功率超限时自动启动需求响应;设计金融输电权产品,对冲阻塞费用风险。

## 5 未来技术方向与系统重构

### 5.1 高渗透率电网韧性提升技术

高比例光伏接入将推动电网韧性评估范式从静态安全向动态生存能力转变。基于复杂网络理论的韧性量化模型需纳入天气相关性因子,构建气象-电力耦合的连锁故障模拟平台。动态重构技术通过多端口电力电子变压器实现拓扑灵活切换,使故障隔离时间缩短至150ms以内。弹性资源池概念突破传统备用容量配置模式,聚合分布式储能、可中断负荷等资源,形成无差别调用的快速响应机制。自愈控制系统引入联邦学习算法,在保障数据隐私前提下实现跨区域知识共享,使恢复策略生成效率提升。

### 5.2 数字孪生与人工智能融合应用

电力数字孪生体需实现物理实体与虚拟模型的毫秒级同步,通过多物理场建模技术还原光伏阵列的热-力-电耦合效应。人工智能算法在三个方面取得突破:基于时空图神经网络的功率预测模型将72小时预测误差压缩至8%以内;强化学习驱动的电压控制策略使调节动作频次降低35%;知识图谱技术构建设备故障因果推理链,实现根因诊断准确率超<sup>[4]</sup>。边缘智能终端的轻量化部署方案,使计算资源占用减少60%的同时维持98%的决策精度。

### 5.3 光储充一体化集成技术

集成系统通过直流母线架构消除多级变换损耗,使整体能效提升至94%以上。能量路由器技术突破传统变流器功能边界,实现光伏、储能、充电负荷的自主功率分配。动态容量共享机制允许储能单元按需切换工作模式,在削峰填谷与应急支撑间智能切换。热管理系统的相变材料应用,使功率模块温升降低12~15℃,延长设备寿命20%。标准接口协议的统一化设计,支持跨厂商设备即插即用,系统扩容时间缩短至2小时内。

### 5.4 新型电力系统中的角色演进

分布式光伏将从单纯电力供应者转变为系统服务提供者,承担调频、惯量支撑等辅助服务功能。虚拟电厂控

制层级延伸至台区维度,通过自主竞价算法参与多市场联合出清。产消者群体形成能量共享社区,基于区块链的点对点交易协议使本地消纳率提升至85%以上。电网企业职能向平台运营方转型,重点建设跨域能量管理中枢与市场结算基础设施。技术标准体系引入弹性约束条款,允许在指定边界内开展创新技术试点应用。

## 6 结语

分布式光伏规模化并网既是技术革新课题,更是电力系统生态重构进程。本文揭示了高渗透率接入引发的多物理场耦合效应,创新提出设备-控制-市场三位一体解决方案框架。在技术维度,通过电力电子设备性能优化与人工智能调度算法融合,有效化解电能质量与系统稳定性矛盾;在机制层面,构建适应波动性电源的市场交易体系,实现经济性与安全性的帕累托改进。未来研究需重点关注物理信息系统的深度耦合、极端天气下的韧性增

强策略以及跨能源品种协同机制,为构建零碳电力系统提供持续技术支撑。

## [参考文献]

- [1] 吴百合. 分布式光伏规模化并网运行技术探析[J]. 电力设备管理, 2025(4): 99-101.
- [2] 李亮, 袁晶晶. 新能源光伏电站接入配电网技术分析[J]. 光源与照明, 2025(2): 124-126.
- [3] 张传青. 分布式储能技术在光伏电站中的应用与优化研究[J]. 光源与照明, 2025(2): 142-144.
- [4] 周慧. 电气自动化在光伏发电系统中的应用和关键技术分析[J]. 光源与照明, 2025(2): 167-169.

作者简介: 毛瑞旭(1990.10—), 毕业院校: 东北电力大学, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 职务: 线路电气, 职称级别: 工程师。