

人工智能在分布式光伏系统运行优化中的应用研究

牟多铎

马来西亚理工大学 马来西亚 81310

摘要: 分布式光伏在“双碳战略”和电力系统低碳化背景下快速发展,但受天气、光照及局部负荷波动影响,其运行调度和发电功率预测仍存在较大不确定性。人工智能技术凭借数据驱动建模、特征表达和优化决策能力,为分布式光伏系统运行优化提供了新的技术路径。目前 AI 主要应用于功率预测、储能充放电策略优化、故障诊断及逆变器控制等环节,使系统具备更强的自适应性和协同运行能力,加速分布式光伏向智能化、数字化和自治化方向发展。本文总结了人工智能在分布式光伏系统运行优化中的关键技术及应用场景,分析了 AI 在分布式光伏中的优势与限制,并结合虚拟电厂、光储协同及能源互联网的发展趋势探讨未来研究方向。研究表明,人工智能将在提升分布式光伏并网能力、增强系统灵活性及提升能源利用效率方面发挥越来越重要的作用,为能源系统的低碳化和高比例可再生能源接入提供技术支撑。

关键词: 分布式光伏; 人工智能; 功率预测; 储能优化; 虚拟电厂

Artificial Intelligence-Based Operational Optimization of Distributed Photovoltaic Systems

Duoduo Mou

Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, Malaysia, 81310

Abstract: Distributed photovoltaic (PV) systems have grown rapidly under the dual-carbon strategy and the broader transition toward low-carbon power systems. However, due to the variability of weather, solar irradiance, and localized loads, distributed PV operation faces considerable uncertainty in dispatch coordination and power forecasting. Artificial intelligence (AI) offers data-driven modeling, feature representation, and decision optimization capabilities that enable new pathways for operational enhancement. Current applications of AI in distributed PV primarily include power forecasting, energy storage scheduling, fault diagnosis, and inverter control, which collectively enhance system adaptability, coordination, and autonomy. This paper summarizes key AI-enabled technologies and application scenarios in distributed PV operational optimization, analyzes the advantages and limitations of AI integration, and discusses future directions in light of emerging virtual power plants, PV-storage coordination, and energy Internet architectures. The findings indicate that AI is poised to play an increasingly important role in improving grid integration, enhancing system flexibility, and raising energy utilization efficiency, thereby providing technical support for low-carbon power systems and high renewable penetration.

Keywords: Distributed photovoltaic; Artificial intelligence; Power forecasting; Energy storage optimization; Virtual power plant

引言

受政策推动与产业成本下降影响,分布式光伏在近三年呈现爆发式增长,其装机规模逐步向居民端、工业商业园区和公共建筑渗透。伴随平价上网和分布式交易机制的完善,用户侧光伏逐渐具备自发自用、余电上网及参与需求响应等多种运行方式。与集中式光伏相比,分布式光伏并网点更为分散,受环境扰动更为显著,运行模式更具复杂性,因此在功率预测、调度与控制方面具有更高技术要求。其不确定性与间歇性特征会引发逆潮流、电压波动及局部调度困难等问题,对电网运行安全与能源利用效率造成影响^[1]。此外,不同区域负荷结构、气象条件以及用户侧电价机制的差异,使分布式光伏的运行呈现更强的区域性和场景性

特征,进一步增加了运行优化的复杂度。

人工智能技术在可再生能源调度中的应用逐渐成熟,并在功率预测、源荷储协调、运行优化及故障识别等领域展现出良好效果^[2]。相较于传统基于统计建模和经验分析的方法,人工智能能够提取高维数据中潜在的时空特征及非线性关系,同时具备在线学习与自适应优化能力。特别是深度学习、强化学习与图神经网络等技术能够处理不确定性、非平稳性和耦合性问题,为分布式光伏的智能运行提供新的技术手段。在光伏规模化接入电力系统的背景下,引入人工智能进行预测、优化与协同控制,已成为提高分布式光伏利用效率和并网能力的重要路径。

1 分布式光伏系统的运行挑战

分布式光伏系统在实际运行中面临显著的不确定性和复杂性。一方面，光照条件的快速变化导致发电功率呈现强烈的随机波动和间歇性，使并网电压、有功功率和无功调节变得更加困难。此外，由于云影、季节辐照变化和气象扰动等因素的叠加，分布式光伏的短时输出特性呈现明显的不平稳性，给调度层和逆变控制层带来连续扰动。与此同时，用户侧负荷具有随机性、周末与工作日常节律性以及工业峰谷周期等特点，各类工业和商业场景中源荷匹配的偏差容易引发逆潮流、电压越限和局部调度瓶颈，并在高渗透率地区对电网安全运行形成挑战。

此外，分布式光伏接入点呈现多节点、弱耦合和低惯量特征，传统面向集中式电源的调度与控制机制难以直接迁移。由于缺乏统一协调与信息交互，系统运行灵活性和可控性不足，当储能系统接入能力有限或调控策略不合理时，功率波动和弃光风险将进一步放大。同时，用户侧与配电网侧的经济激励、电价机制与时间分段策略也会影响光伏利用模式，从而引入额外的不确定因素。

另一方面，分布式光伏在生命周期内还面临组件衰减、遮挡污染、热斑效应和逆变器软硬件故障等问题，若缺乏实时监测与诊断机制，不仅会造成能源利用效率下降，还会增加运维成本和可靠性压力。由于系统规模碎片化且分布广泛，传统人工巡检和经验式维护方法难以满足快速响应和成本控制需求。因此，在分布式光伏规模持续扩大和渗透率不断提高的趋势下，引入具备预测、诊断、优化与自适应能力的智能化手段具有现实必要性和工程应用价值。在上述背景下，提升系统的感知能力、调控能力和协调能力已成为支撑高比例可再生能源接入和用户侧能源管理的关键路径。

2 人工智能在分布式光伏中的关键应用

分布式光伏的运行数据来源包括辐照信息、气象数据、功率曲线、逆变器遥测、用户侧负荷与电价信息等多类时间序列与状态量，人工智能在应用层需要对不同数据尺度进行融合建模，以支撑运行优化与策略决策。这些数据在采样频率和时空尺度上存在显著差异，例如气象与辐照信息通常表现为区域级特征，而负荷与逆变器遥测则具有更强的局部性和时序特征。此外，用户侧的电价机制、需求响应策略与储能运行状态等经济性与行为性信息也会影响系统决策过程。因此，多源异构数据的融合不仅涉及物理量与状态量的联合建模，也包含经济信号与市场信号的协同考量，为人工智能在功率预测、储能调控与协同控制等环节提供数据基础。

随着数字电网、边缘计算与配电自动化技术的发展，越来越多的运行数据能够在源端、站端与用户侧实现实时采集和本地处理，为人工智能算法在低延时条件下开展预测、控制与决策提供

条件。配电网侧的终端测控装置、智能逆变器与储能管理系统正在形成自下而上的数据感知与执行链条，使用户侧资源能够以更精细的时间尺度参与运行优化。同时，多时间尺度数据的协同可支持由短期预测、日内调度到日前规划等不同阶段的运行需求，从而将功率预测、储能优化与电价响应纳入统一决策框架。与传统单点式优化模式相比，这种多层级调控机制能够实现源端与负荷端、局部节点与区域节点之间的协调，推动分布式光伏从单点优化向多层级协同优化演进。

2.1 功率预测

功率预测是分布式光伏运行优化的基础环节，其预测精度直接影响功率调度、逆变器控制和储能容量配置等决策。分布式光伏在地理位置与气象条件上差异较大，传统基于物理模型和经验公式的方法难以处理非线性、强随机性和位置相关特征。深度学习模型能够通过卷积网络、循环网络或 Transformer 结构捕捉气象数据、遥感图像和光照时序信息中的高维特征关联，从而实现短期与超短期功率预测的精细化建模^[3]。在最新的研究与工业部署中，多源异构数据融合成为提升预测精度的重要手段，包括将卫星云图、气象数值预测、历史功率曲线与用户侧负荷数据进行联合建模。此外，区域级与节点级预测正在形成互补机制：前者用于协助调度机构和虚拟电厂进行总体优化，后者用于用户侧的储能规划与经济优化。功率预测的技术演进已逐步从“提高精度”转向“服务运行”，反映出人工智能在应用层与决策层的渗透趋势。

2.2 储能充放电策略优化

储能系统被视为解决分布式光伏波动性与间歇性的一种关键缓冲机制，其运行策略直接影响发自自用比例、电能质量与弃光水平。人工智能在储能充放电优化方面具备处理多变量、多约束和时变决策问题的优势，可通过强化学习、模型预测控制与数值优化等方式实现多时间尺度的策略生成^[4]。近年来，研究从单一经济性优化向多目标优化扩展，将电价机制、负荷特性、碳排放约束、电网安全及市场信号纳入统一框架进行决策。同时，随着源网荷储一体化与虚拟电厂技术的发展，储能的作用正由单纯的物理缓冲扩展至系统协同与市场交互层面，使人工智能具备更广阔的应用空间。此外，储能逐步参与需求响应、虚拟电厂与现货市场等新型机制，使储能的價值从物理属性延伸至容量属性和交易属性，人工智能成为实现动态策略调整的重要工具。从工程应用角度看，AI 驱动的储能策略为系统提供了更高的柔性及可控性，也为分布式光伏构建“源荷储一体化”运行模式提供支持。

2.3 故障检测与诊断

分布式光伏在运行全生命周期中面临组件衰减、遮挡污染、热斑效应、逆变器异常及线路故障等问题，若缺乏实时监测与诊断机制，不仅会降低发电效率，还会增加维护成本和可靠性风险。人工智能技术已被用于构建从数据采集、特征提取到诊断判断的

智能化链路。基于视觉识别与图像处理的方法可识别组件表面污染和遮挡状况，红外图像分析能够定位热斑效应，无人机巡检和边缘计算设备实现就地数据处理与判别，提升故障识别精度与效率。另一方面，基于信号分析与时序建模的技术可用于逆变器参数漂移、开路与短路等软硬件故障的检测，形成由组件层到逆变层的多级诊断体系。近年来运维场景开始引入设备健康管理理念，利用预测性维护代替传统的周期维护与事后修复机制，使人工智能在运维环节的价值进一步提升。

2.4 并网与逆变器控制

分布式光伏并网后，其低惯量、多节点与时变特征使电压调节、电能质量与无功补偿问题更加突出。传统逆变器控制策略在快速扰动与不确定条件下难以保持稳定响应，而强化学习、深度控制与模型预测控制等技术可用于构建具备在线学习与环境自适应能力的控制策略^[5]。人工智能可通过并网点数据、气象信息与功率状态实现分布式协同控制，在电压越限、无功不平衡及频率偏移等条件下优化逆变器运行模式。此外，随着虚拟电厂与配电侧主动化调度的发展，逆变器逐步从“静态并网设备”向“可调资源”演进，具备一定市场属性与调度属性，使 AI 在逆变器上的部署不仅停留在控制层，也延伸至经济层与系统层。

3 未来趋势与展望

未来人工智能在分布式光伏中的研究和应用将呈现融合化、自治化和市场化趋势。从技术体系看，随着光伏、储能、负荷与电动汽车等多主体的深度耦合，分布式光伏将逐步参与虚拟电厂与综合能源系统的调度，实现本地就地消纳与电网协同运行的统一优化。人工智能的功能将由以往的功率预测与运行优化逐步拓展至协同调控与策略决策，通过实时学习环境状态并适应运行约束，为不同用户侧场景提供灵活的能源管理能力。

与此同时，随着实时电价、碳排放约束和电力市场机制的引入，人工智能有望结合经济性指标与碳强度指标建立自学习、自

调节的运行策略，实现技术路径与市场信号的耦合。分布式光伏未来可能在需求响应、容量补偿、现货交易与碳交易等环节发挥作用，推动系统从单一发电环节向参与市场互动的多功能主体转变。未来能源互联网、分布式交易平台与边缘计算设施的建设，将进一步提升信息采集、数据融合与协同调控能力，为人工智能在能源系统中的嵌入提供基础条件。

在运维层面，无人巡检、故障诊断与健康管理等智能运维方式将提高系统可观测性与可维护性，有助于实现全生命周期的状态感知与性能优化。此外，随着模型可信度、可解释性与安全性的研究推进，人工智能的部署将从辅助决策逐步演进至自治决策，并与数字电网、虚拟电厂和源荷储协同推进等关键技术形成联动。综上，人工智能有望在提升分布式光伏运行效率、增强系统柔性支撑电力系统低碳化转型方面发挥重要作用，也为高比例可再生能源接入提供新的研究空间与应用场景。与此同时，高渗透率场景下的数据共享机制、模型可信度、市场规则适配性及运行安全等问题仍需进一步研究，以支持人工智能在分布式光伏领域的规模化部署与工程化落地。

参考文献：

- [1] 陈晓亮, 周璐, 李晨阳. 分布式光伏并网运行特性与调控策略研究 [J]. 电网技术, 2023, 47(6): 1981 - 1990.
- [2] 刘政, 谷文涛. 人工智能在新能源功率预测中的应用进展 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 923 - 936.
- [3] 张海龙, 王泽凯. 基于深度学习的光伏短期功率预测研究综述 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 281 - 292.
- [4] 孔伟, 曹颖. 储能系统在分布式光伏场景下的充放电策略及优化方法研究 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 156 - 165.
- [5] 李一凡, 胡志军. 人工智能驱动的逆变器智能控制技术与发展趋势 [J]. 新能源电力, 2025, 7(1): 1 - 8.