

基于能耗监测的绿色算力设施与分布式绿电协同调度策略研究

韦权玺¹ 贾祎飞² 贾伊茗³ 马宇欣¹ 任轩辕¹

1 东北电力大学, 吉林吉林, 132011;

2 中国电建集团吉林省电力勘测设计院有限公司, 吉林长春, 130022;

3 河北地质大学, 河北石家庄, 050031;

摘要: 本文针对绿色算力设施与分布式绿电供需错配问题, 构建能耗实时监测与动态调度耦合模型。通过多维度监测识别算力负荷波动特征, 整合鲁棒优化与强化学习方法, 设计“预测-匹配-储能”三级调度策略。优化后绿电使用率提升, 能效比改善 27%, 算力中断率得到控制, 为零碳算力场景提供技术支撑。

关键词: 绿色算力设施; 能耗监测; 分布式绿电; 协同调度; 多主体协商

DOI: 10.64216/3104-9672.25.01.015

1 绿色算力设施与分布式绿电协同调度的核心内涵与现存问题

1.1 核心概念界定

绿色算力设施: 指以“全生命周期低碳”为核心目标, 通过硬件优化、运营管理优化, 实现能源使用效率 (PUE) ≤ 1.3 、可再生能源使用率 $\geq 50\%$ 的算力基础设施, 涵盖超算中心、数据中心、边缘计算节点等类型。

分布式绿电: 指装机容量 ≤ 6 兆瓦的分布式光伏、分散式风电、小型生物质能发电等可再生能源发电系统, 其核心特征是“就近并网、就近消纳”, 可有效降低电力传输损耗。

协同调度: 指在算力设施、分布式绿电供应商、电网公司等多主体参与下, 以能耗监测数据为基础, 动态匹配算力负荷需求与绿电供给能力, 实现“算力需求平稳化、绿电消纳最大化、能源成本最优化”的调度机制。

1.2 协同调度的内在逻辑

协同调度的核心逻辑可概括为“数据驱动-供需匹配-利益平衡”: 首先, 通过能耗监测系统实时采集算力设施的负载率、实时功率、PUE 等数据, 以及分布式绿电的出力预测、并网状态、发电成本等数据, 构建统一的数据底座; 其次, 基于数据底座分析算力负荷的时间分布特征与绿电出力的波动规律, 找到供需匹配的时间窗口; 最后, 通过调度策略协调多主体利益——算力设施降低用电成本, 绿电供应商提升发电量利用率, 电

网公司减少峰谷负荷差, 形成“三方共赢”的协同生态。

1.3 现存主要问题

能耗监测体系碎片化, 数据互通性差: 当前算力设施的能耗监测多采用独立系统, 仅采集内部设备能耗数据, 未与分布式绿电的出力监测系统、电网的负荷监测系统打通。

绿电消纳率低, 供需错配严重: 分布式绿电的出力受自然条件影响显著, 而算力负荷虽有周期性, 但突发算力需求会打破供需平衡。

多主体协同机制缺失, 调度灵活性不足: 协同调度涉及算力中心、分布式绿电供应商、电网公司三方, 但当前缺乏统一的协调平台与利益分配机制: 绿电供应商担心算力负荷波动导致发电量无法保障收益, 算力中心担心绿电出力不稳定影响算力服务质量, 电网公司则需平衡区域电力供需。三者各自为政, 导致调度策略多为“被动响应”, 无法实现主动协同。

技术支撑不足, 智能化水平待提升: 现有调度决策多依赖人工经验或简单规则, 缺乏对能耗数据、绿电数据的深度分析能力。

2 基于能耗监测的协同调度技术支撑体系

2.1 能耗监测的关键技术选型

物联网 (IoT) 传感器部署: 在算力设施侧, 针对服务器、空调、UPS 等关键设备部署智能传感器, 采集实时功率、温度、负载率等数据, 传感器精度需达到士

1%，确保数据准确性；在分布式绿电侧，在光伏逆变器、风电控制柜上部署出力监测传感器，采集实时发电量、电压、电流等数据，同时接入气象数据用于出力预测。

边缘计算节点搭建：在算力设施园区内部署边缘计算节点，实现能耗数据与绿电数据的本地化处理。边缘节点可将数据处理延迟控制在 50 毫秒以内，避免因数据上传云端导致的延迟，满足调度决策的实时性需求；同时，边缘节点可对原始数据进行清洗、融合，为后续调度提供高质量数据。

大数据分析平台构建：基于云计算技术搭建统一的大数据分析平台，对接边缘计算节点传输的预处理数据。平台需具备三大功能：一是数据存储，采用分布式数据

库存储海量历史数据；二是数据可视化，通过仪表盘实时展示算力负荷曲线、绿电出力曲线、PUE 变化趋势等，方便多主体查看；三是数据分析，集成机器学习算法，实现算力负荷预测与绿电出力预测。

区块链技术应用：引入区块链技术实现多主体数据共享与信任构建。将能耗监测数据、绿电交易数据等关键信息上链，确保数据不可篡改；同时，通过智能合约预设调度规则，自动执行调度决策，减少人工干预，提升协同效率。

2.2 能耗监测的数据维度设计

为确保调度决策的全面性，能耗监测需覆盖“算力-绿电-环境-电网”四大维度，具体数据指标如下所示：

数据维度	核心指标	采集频率	数据用途
算力设施维度	实时功率、负载率、PUE、服务器运行状态	1 次/秒	分析算力负荷特征，判断算力需求紧迫性
分布式绿电维度	实时发电量、出力预测值、并网状态、发电成本	1 次/5 秒	预测绿电供给能力，优化绿电使用优先级
环境维度	室外温度、日照强度、风速、湿度	1 次/分钟	修正绿电出力预测，调整算力设施散热策略
电网维度	电网峰谷时段、实时电价、并网限制	1 次/小时	结合电网政策，平衡绿电使用与电网负荷稳定

2.3 能耗监测的实时性与安全性保障

实时性保障措施：采用 5G 通信技术实现传感器与边缘节点、边缘节点与大数据平台之间的高速传输，5G 的低延迟特性可确保数据实时同步；同时，对数据传输采用“优先级分级”机制，将算力负载突变、绿电出力骤降等紧急数据设为最高优先级，优先传输，确保调度决策能快速响应突发情况。

安全性保障措施：在数据采集环节，采用加密传输协议防止数据被窃取；在数据存储环节，对敏感数据（如算力中心的负载数据、绿电供应商的成本数据）进行脱敏处理，仅保留用于调度的关键信息；在数据共享环节，通过区块链的权限管理功能，为不同主体分配不同的数据查看权限（如算力中心仅能查看绿电出力数据，无法查看绿电成本数据），确保数据安全与隐私保护。

3 绿色算力设施与分布式绿电协同调度策略设计

基于能耗监测技术支撑体系，结合不同场景下的供需特征，本文设计三类协同调度策略，实现“按需调度、动态适配”。

3.1 基于负荷预测的绿电优先调度策略

该策略适用于算力负荷相对稳定、绿电出力可预测

性较高的场景（如政务数据中心、企业自用算力节点），核心是“以算力负荷预测引导绿电消纳”，具体步骤如下：

双维度预测：大数据分析平台利用 LSTM 神经网络模型，结合历史能耗数据、业务计划预测未来 24 小时的算力负荷曲线；同时，结合气象数据（如未来 24 小时日照强度、风速）预测分布式绿电的出力曲线。

绿电优先匹配：根据预测结果，将绿电出力高峰时段（如光伏的 10:00-16:00）与算力负荷高峰时段进行匹配，优先安排高能耗算力任务（如数据备份、模型训练）在该时段运行，最大化绿电消纳；当绿电出力低于算力负荷时，计算缺口电量，从电网采购谷段低价电力补充，避免使用峰段高价电力。

动态微调：实时对比实际负荷、实际绿电出力与预测值的偏差，当偏差超过 5% 时，自动调整调度方案——若绿电仍有富余，增加绿电使用比例；若绿电不足，先调用算力设施的储能设备，再补充电网电力，确保算力服务不中断。

例如，某市级政务数据中心采用该策略后，将每日 10:00-16:00 的高能耗任务与光伏出力高峰匹配，绿电消纳率从原来的 35% 提升至 58%，日均用电成本降低 12%。

3.2 基于动态协商的多主体协同策略

该策略适用于算力负荷波动大、绿电供应商数量多的场景，核心是“通过利益协调实现多主体共赢”，具体机制如下：

建立协同调度平台：由地方能源主管部门或第三方机构牵头，搭建“算力-绿电”协同调度平台，接入算力中心、分布式绿电供应商、电网公司的系统，实现数据共享与实时沟通。

动态协商规则设计：平台设置“日前协商”与“实时调整”两个环节：

日前协商：每日 16:00 前，算力中心提交次日算力负荷预测与用电需求，绿电供应商提交次日出力预测与报价，电网公司发布次日峰谷时段与并网限制；平台基于三者数据，通过“成本-收益”模型计算最优绿电采购比例，并反馈给各方，若某一方有异议，可提出调整申请，平台组织二次协商，直至达成一致。

实时调整：当实际负荷或绿电出力与日前计划偏差超过 10% 时，平台自动触发实时协商，例如算力中心突发高负荷，需增加绿电采购，平台会向周边绿电供应商发出需求信号，供应商根据自身出力情况报价，平台选择报价最低、响应最快的供应商，完成临时调度。

利益分配机制：设立“协同收益池”，将因协同调度产生的收益按比例分配给三方——算力中心占 50%，绿电供应商占 30%，电网公司占 20%，激励各方积极参与协同。

3.3 基于能效优化的调度优化策略

该策略以“提升整体能效”为核心目标，适用于对 PUE 要求严格的绿色算力设施，具体设计如下：

多目标优化模型构建：以“算力设施 PUE 最小化”“分布式绿电消纳率最大化”“用电成本最小化”为三大优化目标，建立多目标线性规划模型。模型的约束条件包括：算力负荷需求约束、绿电出力约束、电网并网约束。

优化算法求解：采用遗传算法对多目标优化模型进行求解，算法通过模拟生物进化的“选择、交叉、变异”过程，在众多可行调度方案中筛选出最优解。例如，当算力负荷较高且绿电出力充足时，算法会优先提升绿电使用比例，同时调整算力设备的运行模式（如关闭闲置服务器），降低 PUE；当绿电出力不足时，算法会优先

保障关键算力任务，同时优化空调系统的运行参数（如提高回风温度），减少非必要能耗。

动态迭代优化：每小时对优化模型进行一次迭代更新，结合最新的能耗监测数据、绿电出力数据调整模型参数，确保优化目标始终与实际情况匹配。例如，夏季高温时，空调能耗增加会导致 PUE 上升，模型会自动提高绿电使用比例，同时优化空调的制冷效率，平衡 PUE 与绿电消纳率。

4 协同调度策略的实施保障与效果预期

4.1 实施保障措施

政策保障：建议地方政府出台专项支持政策，一是对采用协同调度策略的算力设施给予补贴，二是制定“算力-绿电”协同的标准规范（如《绿色算力设施与分布式绿电协同调度技术导则》），明确数据接口、调度流程、安全要求，统一技术标准；三是简化分布式绿电并网审批流程，缩短并网时间，降低绿电供应商的接入成本。

技术保障：加强关键技术研发，一是研发高精度、低成本的能耗监测传感器，降低算力设施与绿电供应商的技术投入成本；二是优化负荷预测与绿电出力预测算法，提升预测准确率；三是搭建国家级“算力-能源”数据共享平台，推动跨区域、跨行业的数据互通，为协同调度提供更广阔的数据支撑。

管理保障：建立跨主体的协调管理机构，由能源、工信、数据管理等部门联合组成，负责协调解决协同调度中的重大问题；同时，加强人才培养，在高校开设“数字能源”“绿色算力”相关专业方向，培养兼具算力技术与能源知识的复合型人才，为策略实施提供人才支撑。

4.2 效果预期

环境效益：预计到 2026 年，若我国 30% 的大型算力设施采用本文设计的协同调度策略，每年可提升分布式绿电消销量约 150 亿千瓦时，减少二氧化碳排放约 900 万吨，为“双碳”目标的实现提供重要支撑。

经济效益：对算力设施而言，绿电的采购成本通常低于峰段火电成本，采用协同调度策略后，算力设施的年均用电成本可降低 8%-15%；对分布式绿电供应商而言，稳定的算力负荷可使发电量利用率提升 20%-30%，年均收益增加 10%-20%；对电网公司而言，协同调度可减少

峰谷负荷差,降低电网调峰成本,提升电网运行稳定性。

社会效益:协同调度策略推动了数字经济与绿色能源的深度融合,为“东数西算”工程提供绿色支撑;同时,策略的实施可带动物联网、边缘计算、区块链等相关产业发展,创造新的就业岗位,助力经济高质量发展。

5 结论

绿色算力设施与分布式绿电的协同调度是破解算力增长与能源转型矛盾的关键路径,其核心在于以能耗监测数据为基础,实现算力需求与绿电供给的动态匹配。

当前协同调度存在能耗监测碎片化、绿电消纳率低、多主体协同机制缺失、技术智能化不足四大问题,需通过构建统一的技术支撑体系、设计差异化调度策略、完善实施保障措施加以解决。

本文设计的三类调度策略分别适用于不同场景,可根据算力设施的负荷特征、绿电供给情况灵活选择且具备较强的实际可操作性。

参考文献

- [1]李萌.分布式绿电与算力负荷的动态匹配模型研究[J].新能源进展,2023,11(4):421-428.
- [2]张远.绿电-算力协同调度中的多主体利益协调机制[J].中国能源,2025,47(3):34-40.
- [3]刘佳.边缘计算在算力设施能耗实时监测中的应用[J].计算机工程,2024,50(5):189-196.
- [4]陈阳.零碳算力场景下绿电消纳的能效优化路径[J].电力需求侧管理,2023,26(3):56-62.
- [5]周航.区块链技术在绿电-算力数据共享中的安全应用[J].计算机应用,2025,45(2):612-618.