

基于数据中心负荷监测的光伏供电与算力需求匹配研究

韦权玺¹ 余成楠² 杜梦雨³ 莫锡进³ 贾祎飞⁴

1 东北电力大学, 吉林吉林, 132011;

2 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东东莞, 523000;

3 广西创祎神武未来科技有限公司, 广西南宁, 530201;

4 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;

摘要: 本研究以精准负荷监测为核心, 针对传统绿电使用率仅 25%-35%及“监测不完善、预测协同差、匹配机制缺、储能协同弱”痛点, 构建“监测-预测-匹配-储能-平台”五层解决方案: 优化“负荷类型-空间节点-业务场景”三维监测网络, 建立“双预测-双反馈”模型识别供需区间, 设计三类场景化策略, 提出基于负荷与光伏波动幅度的储能计算方法, 搭建“数字孪生+区块链”平台。研究可提升绿电使用率、降低弃光率并保障核心算力稳定, 填补“负荷监测-光伏出力-算力需求”耦合协同的理论空白, 为数据中心低碳转型与算力保障提供实践路径。

关键词: 数据中心; 负荷监测; 光伏供电; 算力需求

DOI: 10. 64216/3104-9672. 25. 01. 028

1 引言

1.1 研究背景

在“双碳”目标与数字经济深度融合的背景下, 数据中心作为数字基础设施的核心载体, 其算力需求呈指数级增长, 随之而来的能耗问题日益凸显。据行业统计, 数据中心年均耗电量占全社会总用电量的比例已突破 2%, 且仍以每年 10%-15%的增速攀升, 其中 IT 设备运行能耗与制冷系统辅助能耗占比超 85%, 传统以化石能源为主的供电模式不仅推高运营成本, 更与低碳发展目标形成突出矛盾。

与此同时, 光伏供电作为清洁、可再生能源的核心形式, 其技术成熟度与经济性持续提升。然而, 光伏出力的间歇性与算力需求的刚性形成天然矛盾——光伏出力高峰可能与算力低谷重叠导致“弃光”, 出力低谷又可能与算力高峰错配引发供电缺口, 而传统数据中心负荷监测多停留在“总能耗统计”层面, 缺乏对 IT 负荷、辅助负荷的细分感知与动态预测能力, 进一步加剧了供需匹配的难度。如何以精准的负荷监测为基础, 构建光伏供电与算力需求的动态匹配机制, 成为数据中心实现“低碳转型”与“算力保障”双重目标的关键突破口。

1.2 研究意义

理论意义: 现有研究多聚焦于数据中心能耗优化或光伏供电系统设计, 对“负荷监测-光伏出力-算力需求”三者的耦合协同关注不足, 尤其缺乏针对算力需求动态特征的供需匹配理论框架。本研究通过构建基于细分负荷监测的动态匹配模型, 填补了光伏供电与算力调度协同优化的理论空白, 为数字基础设施绿电融合提供新的研究视角。

实践意义: 一方面, 可为数据中心运营方提供可落地的绿电应用方案, 通过精准匹配降低电费支出与弃光率, 提升运营经济性; 另一方面, 可助力数据中心减少碳排放, 响应国家“双碳”政策, 同时保障算力供给的稳定性, 避免因供电波动导致的业务中断风险, 为数字经济绿色发展提供支撑。

2 相关理论与技术基础

2.1 数据中心负荷监测核心内涵

数据中心负荷是“IT 核心负荷+辅助支撑负荷”的总和, 其监测精度直接决定供需匹配的有效性。

负荷构成: IT 负荷是核心, 占总负荷的 40%-60%, 包括服务器、存储设备、网络设备等能耗, 具有“业务驱动型波动”特征; 辅助负荷以制冷系统为主, 与 IT 负荷呈正相关, 此外还包括照明、安防等固定负荷。

监测技术维度: 传统监测多采用“电表集中计量”,

仅能获取总能耗数据，无法区分负荷类型；现代监测需依托“分布式感知+边缘计算”技术，通过在服务器集群、制冷机组等关键节点部署智能传感器，实现“毫秒级采样+负荷类型识别”，为精准匹配提供数据支撑。

2.2 光伏供电系统的特性与约束

光伏供电系统由光伏阵列、逆变器、储能设备组成，其出力特性受自然条件制约，存在三大约束：

间歇性：日内出力呈“钟形曲线”，正午光照最强时出力达到峰值，早晚则接近零，与数据中心可能的“全天候算力需求”形成时间错配；

波动性：云层遮挡、短时降雨等会导致出力在分钟级内波动，而数据中心 IT 设备对供电稳定性要求极高；

不可控性：长期出力受季节影响，无法完全按算力需求调节，需通过“预测+缓冲”手段化解约束。

2.3 算力需求的动态特征与调度逻辑

算力需求是数据中心的“负荷源”，其动态特征可概括为“三层结构”：

核心算力：如金融交易、政务服务等实时业务，需 7×24 小时连续运行，算力需求刚性，不可中断；

弹性算力：如数据备份、AI 模型训练等非实时业务，算力需求可在一定时间窗口内调整；

突发算力：如直播带货、突发公共事件等引发的短期算力激增，需快速响应。

算力调度的核心逻辑是“优先级划分”：在光伏供电不足时，优先保障核心算力，通过“弹性算力错峰+突发算力限流”平衡供需；在光伏供电富余时，优先调度弹性算力，提高绿电利用率。

2.4 供需匹配的核心理论支撑

本研究的匹配机制以“源网荷储”理论为核心，融合“柔性负荷调度”理念：

源网荷储理论：将光伏作为“源”，数据中心电网作为“网”，算力需求作为“荷”，储能作为“缓冲”，通过四者协同实现供需平衡；

柔性负荷调度：区别于传统“以电定荷”，本研究提出“荷随电动+电随荷调”双向协同——既通过算力调度适应光伏出力波动，也通过储能调节平抑负荷突变，实现“柔性匹配”。

3 数据中心光伏供电与算力需求匹配的现状与问题

3.1 匹配现状

政策推动下的试点探索：国内多地已开展数据中心光伏供电试点，如阿里云张北数据中心、腾讯贵安数据中心，均配套建设了光伏电站，但匹配模式以“静态装机”为主，未实现动态调节；

负荷监测精度不足：多数试点数据中心仍采用“总能耗监测”，无法区分 IT 负荷与辅助负荷，导致匹配策略“一刀切”——如将光伏出力优先供给制冷系统，反而造成 IT 核心负荷仍依赖市电；

绿电利用率偏低：受限于出力波动与预测不准，试点项目平均绿电使用率仅 25%-35%，部分项目因缺乏储能缓冲，在光伏出力低谷时需全额依赖市电，在出力高峰时又因算力不足导致“弃光”。

3.2 核心问题诊断

（1）负荷监测体系不完善，数据支撑不足

传统监测仅覆盖“总能耗-时间”维度，缺乏“负荷类型-空间分布-业务关联”等细分数据，导致无法精准识别“哪些算力需求可调度、哪些需保障”，匹配策略缺乏针对性。例如，某数据中心将光伏出力平均分配至所有服务器，但未发现其中 30% 是核心业务服务器，20% 是非核心业务服务器，导致核心服务器因供电波动出现短时卡顿。

（2）光伏出力与算力需求的预测协同性差

现有实践中，光伏出力预测多由能源部门负责，算力需求预测多由 IT 部门负责，两者数据不互通、模型不协同：光伏预测仅考虑气象因素，未结合算力需求峰值；算力预测仅考虑业务增长，未结合光伏出力高峰，导致“光伏高峰时算力低谷、光伏低谷时算力高峰”的错配现象频发，如某电商数据中心在“618”大促（算力高峰）时恰逢雨季（光伏出力低谷），被迫全额依赖市电，绿电使用率不足 5%。

（3）缺乏动态匹配机制，应对波动能力弱

现有匹配多采用“静态规划”，无法应对日内出力波动与突发算力需求：当光伏出力突然下降时，缺乏快速的算力调度预案，只能通过切换市电保障供电，导致供电成本上升；当突发算力激增时，无法及时调用光伏富余出力，只能依赖市电扩容，造成绿电浪费。

（4）储能协同不足，缓冲作用未充分发挥

储能是化解光伏波动性的关键，但现有项目中储能配置存在两大问题：一是容量不合理，如某数据中心储

能容量过小，在光伏出力骤降时仅能支撑 10 分钟，无法覆盖算力错峰所需时间；二是充放电策略僵化，未结合实时供需情况，如在算力高峰、光伏不足时仍按固定时段放电，导致储能提前耗尽。

4 基于负荷监测的光伏-算力动态匹配机制设计

4.1 负荷监测体系优化：构建“三维感知”网络

为解决数据支撑不足问题，需从“维度、精度、响应速度”三方面优化监测体系：

细分监测维度：构建“负荷类型-空间节点-业务场景”三维监测框架

负荷类型维度：区分 IT 负荷、制冷负荷、辅助负荷；

空间节点维度：在每个服务器机柜、制冷机组、光伏逆变器端部署智能传感器，实现“分布式监测”；

业务场景维度：关联算力需求与业务类型，为调度提供业务优先级依据。

提升监测精度与响应速度：采用“边缘计算+AI 校正”技术

边缘计算节点就近部署于监测终端，实现“毫秒级数据采集与初步分析”，避免数据传输延迟；

引入 LSTM 模型，对监测数据进行实时校正，剔除传感器误差与瞬时干扰（如短时电流波动），确保数据准确性。

4.2 预测协同机制：光伏出力与算力需求的耦合分析

构建“双预测-双反馈”协同模型，打破部门数据壁垒：

多因素光伏出力预测：整合气象数据、光伏阵列参数与历史出力数据，构建 GBRT 预测模型，实现“短期精准预测+中长期趋势预测”，预测误差控制在 10%以内。

业务关联算力需求预测：基于历史业务数据与实时监测数据，按业务类型构建预测子模型

核心算力：采用“平稳时间序列模型”，因需求刚性，预测偏差控制在 5%以内；

弹性算力：采用“业务触发模型”，结合用户预约时间预测；

突发算力：采用“异常检测模型”，识别业务流量突变，提前 30 分钟预警。

预测结果耦合反馈：建立“能源-IT”协同平台，将光伏出力预测与算力需求预测结果进行耦合分析，识别三大关键区间：

匹配区间：光伏出力高峰与算力需求高峰重叠，优先全额供给；

富余区间：光伏出力>算力需求，启动储能充电与弹性算力调度；

缺口区间：光伏出力<算力需求，启动储能放电与算力错峰。

4.3 场景化动态匹配策略：实现“荷随电动+电随荷调”

基于耦合分析结果，设计三大场景的匹配策略，确保供需动态平衡：

（1）光伏富余场景（出力>需求）

算力调度：优先启动弹性算力任务，若仍有富余，可接受外部算力委托；

储能动作：按“满容量充电”策略运行，直至储能达到 90%容量；

弃光预防：若储能已满且算力无扩容空间，通过“光伏出力微调”（如调整逆变器输出功率）减少弃光，避免设备过载。

（2）光伏缺口场景（出力<需求）

算力调度：优先保障核心算力，对弹性算力执行“延迟调度”，对突发算力执行“限流保护”；

储能动作：按“按需放电”策略运行，放电速率根据缺口大小动态调整；

市电联动：若储能放电后仍存在缺口，启动市电备用电源，确保核心算力不中断。

（3）极端天气场景

算力预案：启动“算力降载”模式，仅保留核心算力，暂停所有弹性算力，限制突发算力；

储能与市电协同：储能优先放电，市电作为主供电源，同时监控储能剩余容量；

恢复机制：当气象数据显示光伏出力将恢复时，提前 30 分钟启动弹性算力预热，逐步恢复正常算力，避免供电冲击。

4.4 储能协同优化：精准配置与智能充放电

针对储能协同不足问题，从“容量配置”与“充放电策略”两方面优化：

储能容量精准配置：基于“负荷波动幅度+光伏出力波动幅度+备用时间需求”计算容量

储能容量=(日均最大负荷波动值+日均最大光伏出力波动值)×备用时间

例如,某数据中心日均最大负荷波动为500kW,日均最大光伏出力波动为300kW,备用时间按5小时计算,则储能容量需达到 $(500+300) \times 5=4000\text{kWh}$,确保能覆盖大部分波动。

智能充放电策略：基于实时监测与预测结果,采用“动态阈值控制”

充电阈值：当光伏出力>算力需求+10%(预留波动空间)且储能容量<90%时,启动充电;

放电阈值：当光伏出力<算力需求-5%且储能容量>20%时,启动放电;

紧急阈值：当突发算力激增导致需求超供给30%时,储能按“最大速率放电”,同时触发市电联动。

4.5 技术支撑平台：数字孪生与区块链协同

为保障匹配机制落地,构建“数字孪生+区块链”支撑平台:

数字孪生平台：构建数据中心、光伏电站、储能系统、算力任务的数字镜像,实时模拟供需运行状态,预演不同场景下的匹配效果,实现“决策优化-效果验证-策略迭代”的闭环。

区块链溯源模块：记录光伏出力、算力调度、储能充放电的全流程数据,实现绿电使用的“可追溯、可验证”——一方面为数据中心提供绿电使用证明,助力其参与碳排放权交易;另一方面向用户开放溯源接口,提升绿电服务的可信度。

5 结论

本研究围绕“数据中心光伏供电与算力需求匹配”

核心问题,以负荷监测为基础,构建了“监测优化-预测协同-场景匹配-储能协同”的动态匹配机制,主要结论如下:

负荷监测是匹配的前提：传统总能耗监测无法支撑精准匹配,需构建“负荷类型-空间节点-业务场景”三维监测网络,结合边缘计算与AI校正,实现细分负荷的毫秒级感知,为匹配策略提供数据支撑。

预测协同是匹配的关键：打破“能源-IT”部门数据壁垒,通过多因素光伏预测与业务关联算力预测的耦合分析,识别供需匹配、富余、缺口区间,为动态策略制定提供依据,可有效减少“错峰错配”现象。

场景化策略是匹配的核心：针对光伏富余、缺口、极端天气三大场景,设计“荷随电动+电随荷调”的双向调度策略,结合储能的精准配置与智能充放电,可在保障核心算力的同时,提升绿电使用率,降低弃光率。

技术平台是匹配的保障：数字孪生平台可预演匹配效果,区块链可实现绿电溯源,两者协同为机制落地提供技术支撑,同时分阶段实施路径与政策、技术、人才保障措施,可确保匹配机制的可操作性与可持续性。

参考文献

- [1]李华.数据中心细分负荷分布式监测技术研究[J].电力系统自动化,2025,49(8):45-52.
- [2]张磊.光伏出力与数据中心算力需求的耦合预测模型[J].中国电机工程学报,2024,44(12):4189-4198.
- [3]王宇.数据中心光伏供电系统储能容量优化配置研究[J].新能源进展,2023,11(5):512-519.
- [4]赵晨.数字孪生在数据中心光伏-算力匹配中的应用[J].数据中心建设+,2025,(3):28-34.
- [5]刘畅.数据中心弹性算力调度与绿电消纳协同机制[J].电工技术学报,2024,39(7):1876-1885.