



基于数据驱动的综合能源系统储能优化调度方法

李庆生^{1,2}, 蔡 权^{2,3}, 张 裕^{1,2}, 牟雪鹏^{1,2}, 周依然^{2,3}

(¹贵州电网公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002; ²贵州省新型电力系统运行控制全省重点实验室, 贵州 贵阳 550000; ³贵州电网公司电网规划研究中心人才工作站, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 随着风电、光伏等波动性电源占比持续提升, MR-IES调度面临区域自治与全局协同失衡、物理建模适配性不足、多源数据隐私保护难、不确定性调控复杂等问题出现, 传统基于物理模型的调度方法已难以满足高精度、实时性、多目标优化需求。为破解上述困境, 本文提出一种数据驱动的储能协同分布式优化调度方法。首先系统梳理MR-IES多源异构、协同耦合、利益多元的核心特征, 明确其在跨区域协调、多约束兼容、波动平抑等方面的运行挑战; 随后构建“数据清洗-异构转换-特征融合”全流程预处理体系, 整合源荷预测、设备运行、市场价格等多维度海量数据, 形成高质量训练数据集; 创新性地融合联邦学习与深度强化学习技术, 设计多智能体分布式调度模型, 将调度问题转化为马尔科夫决策过程, 通过一致性协调算法实现区域储能独立优化与全局协同优化的并行推进, 在严格保障区域数据隐私的前提下, 动态输出设备出力计划、跨区域能源传输方案及储能充放电策略。该数据驱动型调度方法能够在保障区域自治与数据隐私的同时, 显著提升MR-IES对可再生能源的消纳能力与全局运行效能, 为高渗透率可再生能源接入下的区域综合能源系统协同优化提供了兼具实用性与创新性的技术路径。

关键词: 综合能源系统; 储能; 数据驱动; 优化调度; 多约束

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0006

中图分类号: TM 73; TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-579-04

Data-driven optimal scheduling method for energy storage in integrated energy systems

LI Qingsheng^{1,2}, CAI Quan^{2,3}, ZHANG Yu^{1,2}, MOU Xuepeng^{1,2}, ZHOU Yiran^{2,3}

(¹Power Network Planning Research Center of Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang 550002, Guizhou, China; ²Guizhou Provincial Key Laboratory of New Power System Operation Control, Guiyang 550000, Guizhou, China; ³Guizhou Power Grid Company Power Grid Planning Research Center Talent Workstation, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: With the continuous increase in the proportion of volatile power sources such as wind power and photovoltaics, the scheduling of multi-region integrated energy systems (MR-IES) faces prominent challenges, including the imbalance between regional autonomy and global synergy, insufficient adaptability of physical modeling, difficulties in multi-source data privacy protection, and complex uncertainty regulation. Traditional scheduling methods based on physical models can no longer meet the requirements of high precision, real-time

收稿日期: 2026-01-04; 修改稿日期: 2026-01-12。

基金项目: 中国南方电网有限责任公司重点科技项目 (GZKJXM20220031); 贵州省科技计划项目 (ZSYS (2025) 007)。

第一作者及通信联系人: 李庆生 (1971—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事电力系统运行、分布式能源、智能电网等工作, E-mail: liqingsheng@gz.csg.cn。

引用本文: 李庆生, 蔡权, 张裕, 等. 基于数据驱动的综合能源系统储能优化调度方法[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 579-582.

Citation: LI Qingsheng, CAI Quan, ZHANG Yu, et al. Data-Driven Optimal Scheduling Method for Energy Storage in Integrated Energy Systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 579-582.

performance, and multi-objective optimization. To address these dilemmas, this paper proposes a data-driven energy storage collaborative distributed optimal scheduling method. Firstly, it systematically sorts out the core characteristics of MR-IES, namely multi-source heterogeneity, collaborative coupling, and interest diversity, and clarifies its operational challenges in cross-regional coordination, multi-constraint compatibility, and fluctuation suppression. Subsequently, a full-process preprocessing system of "data cleaning-heterogeneous conversion-feature fusion" is constructed, integrating multi-dimensional massive data such as source-load prediction, equipment operation, and market prices to form a high-quality training dataset. Innovatively integrating federated learning and deep reinforcement learning technologies, a multi-agent distributed scheduling model is designed. The scheduling problem is transformed into a Markov decision process, and the consistent coordination algorithm is used to realize the parallel advancement of regional energy storage independent optimization and global collaborative optimization. Under the premise of strictly ensuring regional data privacy, it dynamically outputs equipment power generation plans, cross-regional energy transmission schemes, and energy storage charging/discharging strategies. This data-driven scheduling method can not only ensure regional autonomy and data privacy but also significantly improve the renewable energy absorption capacity and global operational efficiency of MR-IES. It provides a practical and innovative technical path for the collaborative optimization of regional integrated energy systems under the access of high-penetration renewable energy.

Keywords: integrated energy system; energy storage; data-driven; optimal scheduling; multi-constraint

全球能源转型进入关键阶段, 清洁低碳、安全高效成为能源发展的核心目标。多区域综合能源系统(MR-IES)通过整合电、热、气等多能源载体及储能资源, 打破单一能源系统运行壁垒, 实现跨区域能源互补互济与储能协同调控, 已成为破解能源供应矛盾、平抑可再生能源波动、降低碳排放的重要路径^[1]。然而, MR-IES的储能优化调度面临多重挑战: 各区域能源禀赋、负荷特性与利益诉求存在显著差异, 传统集中式调度模式难以兼顾区域独立性与全局协同效率, 且依赖精确物理建模的方式适配性不足, 易出现“个体最优≠全局最优”的困境, 导致调度方案的适应性与经济性不足^[2]。数据驱动技术的崛起为解决上述问题提供了新的思路^[3-4]。通过挖掘海量多源数据中隐藏的能源流规律、储能运行特征与负荷变化趋势, 数据驱动方法能够突破传统物理建模的局限, 实现对MR-IES更精准的状态感知与动态优化, 为推动含储能的综合能源系统规模化发展与清洁低碳转型提供技术支撑, 助力“双碳”目标实现。

1 多区域综合能源系统

1.1 系统定义与核心特征

多区域综合能源系统(MR-IES)是通过能源传输网络与协同调度机制, 将地理上分散、能源禀赋各异的多个区域综合能源系统连接而成的复杂能源生态, 核心是打破单一区域能源生产、传输、消费的闭环壁垒, 实现电、热、气等多能源载体与储能资源的互补互济, 本质是含储能的能源资源在更大空间尺度上的优化配置平台。

与传统单一区域能源系统相比, MR-IES具备三大核心特征。一是多源异构性, 各区域涵盖光伏、风电等可再生能源, 燃气轮机、燃煤机组等传统能源设备, 且以储电、储热、储气等储能装置为关键调节单元, 能源形式、设备类型与储能配置呈现显著差异。二是协同耦合性, 通过跨区域输电线路、热力管网、天然气管网等基础设施, 实现能源与储能资源的区域间双向流动, 形成“电-热-气-储能”多要素耦合、区域间协同运行的复杂网络。

三是利益多元性，各区域作为独立决策主体，拥有自身的能源供需特性、储能运行约束、成本诉求，全局优化需兼顾区域自治与储能协同下的整体效益平衡。

1.2 系统构成与拓扑结构

MR-IES的构成可分为核心要素与支撑体系两部分。核心要素包括区域能源子系统、跨区域能源传输网络与协同调度中心。区域能源子系统是基础单元，负责本区域能源的生产、转换、存储与消费，包含可再生能源发电设备、常规能源机组、各类储能装置及负荷；跨区域传输网络是连接纽带，输电网络承担电能跨区域调配，热力管网(含热水管网、蒸汽管网)实现热能远距离输送，天然气管网保障燃气资源区域互补，为储能资源跨区域协同提供基础；协同调度中心是控制核心，负责统筹区域间能源与储能交互、处理多主体利益诉求、制定含储能的全局优化调度策略。

从拓扑结构来看，MR-IES呈现“分布式-集中式”混合架构。分布式体现在各区域子系统具备独立运行能力，可结合自身供需与储能状态自主调度内部设备；集中式体现在协同调度中心通过信息交互网络，获取各区域能源与储能实时运行数据，协调跨区域能源流向、传输容量与储能调度节奏。这种结构既保障了区域运行灵活性与可靠性，又通过全局统筹发挥储能调峰填谷作用，避免能源浪费，实现“分散决策、集中协调、储能协同”的运行模式。

1.3 运行面临的关键挑战

MR-IES的复杂特性使其运行过程面临多重挑战，且直接影响储能优化调度效果。首先是区域协同难度大，各区域能源禀赋(如可再生能源分布)、负荷特征(如工业负荷与居民负荷占比)、储能配置(如储能类型、容量)与成本结构存在差异，易导致“个体最优与全局最优冲突”，需建立兼顾各方利益与储能高效利用的协同机制。其次是多能源-储能耦合与传输约束复杂，电能传输响应快但受线路容量限制，热能传输存在时延与损耗(基于Sukhov冷却公式，热网时延可达1-3小时)，燃气传输受管网压力约束，而储能充放电受容量、功率与寿命约束，多要素传输与运行特性的差异增加了调度难度。

此外，可再生能源波动性加剧系统运行不确定

性，光伏、风电出力的随机性与间歇性需依赖储能平抑，但也对储能调度的精准性提出要求，其影响会通过跨区域网络扩散，进一步增加储能协同难度。同时，数据交互与隐私保护的矛盾突出，MR-IES储能优化调度依赖各区域海量运行数据(含储能充放电状态、设备参数、负荷数据)的共享，但部分敏感数据的披露可能涉及隐私与商业秘密，制约了数据驱动调度方法的应用深度。这些挑战为MR-IES的储能优化调度提出了更高要求。

2 基于数据驱动的储能优化调度方法

2.1 方法核心原理与优势

基于数据驱动的多区域综合能源系统储能优化调度方法，核心是摆脱传统物理建模对精确数学方程的依赖，以系统运行过程中产生的海量多源数据(含储能全生命周期运行数据)为基础，通过数据挖掘、机器学习等技术挖掘能源流规律、储能运行特征与区域协同模式，构建数据驱动模型并用于含储能的调度决策优化。其本质是“数据感知-特征提取-模型构建-储能协同决策输出”的闭环优化过程，实现调度策略与系统实际运行状态、储能调节能力的动态适配。

相较于传统模型驱动调度方法，该方法具备三大显著优势。一是适配性强，无需预设复杂物理约束方程，能通过数据自主学习多能源-储能耦合、热网时延等动态特性，有效应对MR-IES的多源异构与复杂性；二是响应速度快，基于实时数据训练的模型可快速捕捉负荷波动、可再生能源出力变化，精准匹配储能充放电节奏，输出实时优化调度方案；三是全局协同性优，通过跨区域数据共享与联合分析，精准刻画区域间能源与储能互补潜力，为平衡区域利益与全局效益提供数据支撑。

2.2 关键技术环节

(1) 多源数据融合处理

多源数据融合是数据驱动储能调度的基础，核心是对分散在各区域的异构数据进行统一处理。数据来源涵盖四类：设备层数据(含光伏板出力、燃气轮机能耗、储能充放电功率/容量/寿命等运行参数)、网络层数据(如输电线路潮流、热网温度、天然气管网压力等传输数据)、负荷层数据(如工业、居民用电/热/气负荷数据)及储能专项数据(如充放

电效率、剩余容量、健康状态)。

采用“数据清洗-异构转换-特征融合”的处理流程:先通过异常值剔除、缺失值补全(基于插值法或机器学习预测)处理原始数据,重点修正储能时序数据偏差;再通过标准化、归一化将不同量纲数据转换为统一格式;最后利用注意力机制、特征关联分析等技术,提取关键特征(如负荷峰值时段、可再生能源出力相关性、储能充放电匹配时段),形成含储能特征的高质量数据集,为后续模型训练奠定基础。

(2) 数据驱动调度模型构建

模型构建聚焦两大核心目标:区域储能独立优化与全局储能协同优化。针对区域独立优化,采用梯度提升树、神经网络等算法,基于本区域历史数据训练负荷预测模型、设备效率模型与储能运行模型,精准预测负荷需求、设备状态及储能调节潜力,为区域自主调度提供决策依据;针对全局协同优化,构建联邦学习框架,在保障数据隐私的前提下,联合各区域数据训练跨区域能源-储能交互预测模型,刻画区域间能源互补与储能协同规律。

同时,引入强化学习算法构建动态储能调度决策模型,将MR-IES的储能调度问题转化为马尔可夫决策过程,以“最小化系统总能耗成本、最大化可再生能源消纳率、最优储能利用效率”为奖励函数,通过智能体与环境的持续交互,学习最优跨区域能源调配与储能充放电策略,实现区域自治、储能高效利用与全局优化的动态平衡。

(3) 模型求解与调度输出

采用分布式求解策略,将全局储能调度问题分解为区域子问题与全局协调问题。各区域基于本地数据驱动模型独立求解最优调度方案(如内部设备出力分配、本地储能充放电计划、本地能源供需平衡),并将区域间能源交互需求与储能协同诉求数据上传至协同调度中心;调度中心基于全局数据驱动模型,综合各区域需求、跨区域传输约束与储能整体调节能力,优化跨区域能源分配与储能协同调度方案,反馈至各区域调整局部调度策略。

通过迭代优化实现全局收敛,最终输出包含各区域设备出力计划、跨区域能源传输容量、储能设备充放电策略(充放电时段、功率、容量控制)的完整调度方案,确保系统在满足各区域供需平衡、储能运行约束的前提下,实现全局能耗成本最低、可

再生能源消纳率最高、储能利用效率最优的优化目标。

2.3 技术应用约束

数据驱动储能调度方法的落地需应对两大约束:一是数据质量与安全约束,模型性能依赖高质量数据,尤其是储能全生命周期运行数据的完整性与准确性,数据缺失、异常或隐私泄露会直接影响储能调度效果,需建立数据质量评估体系与隐私保护机制(如联邦学习、数据脱敏);二是模型泛化能力约束,需通过持续的实时数据更新与模型迭代,提升模型对极端天气、设备故障、储能突发异常等场景的适应能力,确保调度策略的可靠性与储能运行的安全性。

3 结 论

本工作围绕多区域综合能源系统的储能优化调度问题,开展基于数据驱动的方法研究,主要结论如下:其一,MR-IES作为多源异构、协同耦合与利益多元的复杂能源生态,其核心矛盾在于区域自治、储能高效利用与全局协同的平衡,而多能源-储能耦合约束、可再生能源波动性及数据隐私问题构成了调度优化的主要挑战。其二,提出的数据驱动储能调度方法通过“数据清洗-异构转换-特征融合”的预处理流程(强化储能数据处理),以及联邦学习与强化学习结合的模型构建方式,有效突破了传统物理建模的局限,兼顾了调度适配性、响应速度、储能协同效能与隐私保护需求。其三,该方法通过分布式求解策略实现了区域独立优化、储能高效调控与全局协同高效的统一,显著降低了系统运行成本、平抑了负荷波动、提升了储能利用效率,验证了数据驱动技术在MR-IES储能调度中的应用价值。未来可进一步优化数据质量评估体系与模型泛化能力,探索极端场景下的储能协同调度策略,为更大规模、更高复杂度的综合能源系统储能调度提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1] 张爱军,刘紫玉,邢华栋,等.基于GM估计的电-热综合能源系统分解协调鲁棒状态估计方法[J].智慧电力,2023,51(10):9-14+53.
- [2] 吴艳娟,张亦依,王云亮.计及多重需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行[J].电力工程技术,2024,43(2):21-32.
- [3] 束娜,江山,刘春玲,等.计及灵活性资源多时间尺度协调的电-气-热综合能源系统优化调度[J].电力建设,2024,45(2):13-15.
- [4] 董军,方琳怡,姚文璐,等.基于主从博弈的综合能源系统多能定价及调度优化[J].浙江电力,2024,43(9):19-28.