



基于目标鲁棒的基站储能联合参与电力市场的数学决策模型

张 钊

(驻马店职业技术学院, 河南 驻马店 463000)

摘 要: 在新型电力系统建设持续推进背景下, 海量分布式资源参与电力市场成为电力行业发展的重要趋势。基站储能作为数量庞大、分布广泛的分布式灵活调节资源, 兼具通信基站后备供电保障与电网功率调节双重属性, 能够为电网提供调峰、调频等辅助服务, 是提升电网柔性调节能力、挖掘分布式侧资源价值的重要载体。本工作围绕基于目标鲁棒的联合参与数学决策模型展开研究, 构建了储能单体运行与聚合商收益量化的基础模型, 搭建了目标鲁棒优化决策框架与约束体系, 同时明确了模型等价转化方法与求解逻辑, 最后对未来发展方向进行展望, 为我国基站储能规模化参与电力市场的工程化应用提供理论参考。

关键词: 基站储能; 目标鲁棒优化; 联合决策; 数学模型

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0768

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 09-3689-03

Mathematical decision-making model for joint participation of base station energy storage in the electricity market based on objective robustness

ZHANG Zhao

(Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian 463000, Henan, China)

Abstract: Against the backdrop of the continuous advancement of new-type power system construction, the participation of massive distributed resources in the electricity market has become an important development trend in the power industry. As a large-quantity and widely-distributed distributed flexible regulation resource, base-station energy storage possesses the dual attributes of backup power guarantee for communication base stations and grid power regulation. It can deliver auxiliary services such as peak shaving and frequency modulation for power grids, and acts as a critical carrier for improving the flexible regulation capability of power grids and tapping the value of distributed-side resources. This paper conducts research on the joint-participation mathematical decision-making model based on objective robustness. Basic models for the operation of individual energy-storage units and the benefit quantification of aggregators are established. An objective-robust optimization decision-making framework and constraint system are constructed. Meanwhile, the equivalent transformation method and solution logic of the model are clarified. Finally, prospects for future development directions are presented, which provides theoretical reference for the large-scale engineering application

收稿日期: 2026-09-04; 修改稿日期: 2029-09-12。

作者简介: 张钊 (1982—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为数学教育与应用数学, E-mail: zhzhaozhao1010@163.com。

引用本文: 张钊. 基于目标鲁棒的基站储能联合参与电力市场的数学决策模型[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(9): 3689-3691.

Citation: ZHANG Zhao. Mathematical decision-making model for joint participation of base station energy storage in the electricity market based on objective robustness[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(9): 3689-3691.

of base-station energy storage participating in the electricity market in China.

Keywords: base station energy storage; objective robust optimization; joint decision-making; mathematical model

随着电动汽车和第五代移动网络技术基站规模的增长,聚合商作为一种能够将众多EV和5G基站聚合起来的主体,在电力市场进行投标决策时会面临多重不确定因素。为摒弃对不确定性概率分布的强依赖,转而通过设定可接受的目标值并引入“对抗性影响因子”,实现经济性与鲁棒性的动态平衡,从而有效应对市场电价、调频信号及用户行为等多重不确定性带来的风险挑战^[1]。但基站储能运营面临多源不确定性扰动,传统确定性决策模型难以平衡收益性与运行安全性,传统鲁棒模型存在过度保守的问题。基于目标鲁棒的不确定优化方法能够为聚合商提供具备良好风险对冲能力的投标策略,在确保期望收益的同时有效降低不确定因素带来的风险,且实际运行收益与稳定性均优于传统分布鲁棒优化方法。本工作立足电力市场运行规则与基站储能运行特性,构建基于目标鲁棒的联合参与数学决策模型,并分析了模型体系的运行约束与求解逻辑,为基站储能规模化参与电力市场提供理论支撑。

1 目标鲁棒的基站储能联合市场决策模型构建

1.1 储能单体运行模型

基站储能运行建模的核心前提是保障通信设备的不间断供电,需优先满足基站负载的刚性供电需求,在此基础上挖掘闲置容量的市场价值^[2]。以单基站为基本单元,构建储能运行的核心数学模型,首先建立基站实时功率平衡方程,明确电网供电功率、储能充放电功率与基站通信负载功率的实时匹配关系,确保任何工况下通信负载都能得到足额、稳定的供电。在此基础上构建储能荷电状态动态演化模型,刻画储能在充放电过程中的容量变化规律,综合考虑充放电效率、自放电率、环境温度等参数对储能状态的影响,明确充电与放电过程的效率差异,精准量化储能容量的动态变化。模型中明确储能充放电动作的互斥性约束,同一调度时段内储能仅可执行充电或放电单一动作。同时,模型预留足额应急备用容量,确保电网突发停电时,储能可满足基站满载运行的应急供电需求。

1.2 联合市场收益模型

模型以聚合商在日前电力市场的投标决策为核心,构建双层或单阶段优化框架。目标函数不仅追求期望收益最大化,更强调在满足预设目标值条件下的鲁棒性最大化。收益模块分为两部分:一是电能市场峰谷价差套利收益,基于调度周期内各时段分时电价、储能充放电功率量化,核心为低谷低价充电、高峰高价放电形成的价差收益;二是调频辅助服务收益,包含与中标容量、市场容量出清价直接相关的固定容量收益,及综合调频里程价格、实际调节里程、调频性能考核系数核算的变动里程收益。成本模块分为三部分:按充放电深度、电池循环寿命与全生命周期成本折算的储能循环损耗成本,与储能运行时长、充放电循环次数相关的运维成本,以及实际可调能力与中标量不匹配产生的市场违约成本,以此约束聚合商的投标与调度决策。

1.3 目标鲁棒优化决策框架

模型允许具有不同风险偏好的聚合商调整对抗性影响因子,从而制定差异化的投标策略。这种机制使得聚合商既能避免过度保守导致的收益损失,又能防止激进策略带来的巨大波动风险,实现决策方案经济性与抗扰动能力的灵活平衡^[3]。本文以聚合商净收益最大化为核心优化目标,引入目标鲁棒优化理论,构建适配多源不确定性的决策框架。针对电价、调频信号、基站负载三类不确定参数,构建盒式不确定集刻画参数波动边界,大幅降低模型对历史数据的依赖,适配电力市场动态运行环境。引入0-1区间的鲁棒对抗因子量化决策者风险偏好,可切换确定性优化、极端场景鲁棒优化模式,实现鲁棒性与经济性的灵活平衡,适配聚合商差异化运营需求。基于对偶理论将鲁棒优化问题转化为确定性混合整数线性规划问题,以极端场景收益保底为核心约束,最大化期望净收益,形成兼顾盈利与多源不确定性适配的双目标决策体系。

2 决策模型的运行约束与求解逻辑

2.1 供电安全与运行约束

供电安全约束是模型的刚性约束,核心是保障基站通信设备的不间断供电,约束中明确储能必须预留不低于最低备用容量的应急电量,可满足基站

满载运行不低于4小时的应急供电需求,严格符合通信行业的安全管理规范。同时通过实时功率平衡约束,确保任何工况下,电网供电与储能充放电功率的总和可完全覆盖基站通信负载,不得因参与电力市场调节出现供电中断、电压异常等影响通信安全的问题。储能本体运行约束涵盖储能全生命周期的安全运行边界,首先是荷电状态运行区间约束,限定储能荷电状态的上下限,避免过充过放对电池造成不可逆损伤,延长电池的使用寿命。其次是充放电功率约束,限定单个调度时段内储能的最大充电与放电功率,不得超过电池的额定功率,确保储能运行在安全功率区间内。

2.2 鲁棒模型转化与求解逻辑

针对含不确定参数的目标鲁棒优化模型,通过线性对偶理论实现模型的等价转化,将原始的鲁棒优化问题转化为确定性的混合整数线性规划问题,消除模型中的不确定参数,实现模型的高效求解^[4]。模型求解的核心逻辑分为四个核心阶段,形成完整的闭环决策体系。第一阶段为参数初始化与不确定集构建,采集基站、储能基础参数,完成数据预处理校准,基于历史波动规律,划定三类不确定参数的盒式不确定集边界。第二阶段为目标鲁棒模型等价转化,基于强对偶定理,将含不确定参数的内层最大化问题转为对偶问题,消除不确定参数,把两阶段鲁棒优化转为单层确定性混合整数线性规划,降低求解难度。第三阶段为模型求解与决策生成,将转化后的模型与约束体系导入商业线性规划求解器,按风险偏好设置鲁棒对抗因子与收益阈值,求解得到最优投标策略与储能充放电计划。第四阶段为鲁棒性校验与优化调整,将决策方案代入不同扰动场景校验可行性与收益稳定性,不满足要求则调整对抗因子重算,直至得到符合风险与收益要求的最优决策。

3 结 论

基站储能是新型电力系统中性能优异的分布式灵活调节资源,联合参与电能量与辅助服务市场,是实现闲置资产增值、提升电网柔性调节能力、推动新型电力系统建设的重要路径。针对其市场化运营的多源不确定性扰动、传统决策模型难以平衡经

济性与鲁棒性的核心痛点,本文构建了基于目标鲁棒的基站储能联合参与电力市场的决策模型。该模型可通过可调鲁棒对抗因子实现经济性与抗扰动能力的灵活平衡,为行业提供完整的理论与决策支撑。未来随着电力市场化改革深化与跨行业协同机制完善,基站储能将深度融入电力市场,为新型电力系统安全高效运行提供重要支撑,如何应对市场不确定性、平衡经营收益与风险是各类产业决策的共性课题^[9],相关思路可为后续模型迭代提供参考。

参 考 文 献

- [1] 詹泽伟,徐湘楚,纪陵,等.基于目标鲁棒的电动汽车及基站储能联合参与电力市场的决策模型[J].电网技术,2024,48(8):3361-3372. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2232.
ZHAN Z W, XU X C, JI L, et al. A decision model for joint participation of electric vehicle and base station energy storage in electricity market based on robust satisficing[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3361-3372. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2232.
- [2] 吴洋,冷媛,黄修敏,等.考虑多个不确定因素的风储联合参与现货市场鲁棒随机投标策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):272-283. DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.05.026.
WU Y, LENG Y, HUANG X M, et al. Robust stochastic bidding strategy for combined wind farm and energy storage system participating in spot markets with multiple uncertain factors considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 272-283. DOI: 10.19781/j. issn. 1673-9140.2025.05.026.
- [3] 赵海岭,王维庆,李笑竹,等.计及储能参与的电能-调频-备用市场日前联合交易决策模型[J].电网技术,2023,47(11):4575-4584.
ZHAO H L, WANG W Q, LI X Z, et al. Day ahead joint trading decision model for electricity, frequency regulation and reserve market considering energy storage participation[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4575-4584.
- [4] 何翔路,娄素华,吴耀武,等.双结算模式下风储一体化电站两阶段市场投标调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(4):47-55. DOI:10.7500/AEPS20210705005.
HE X L, LOU S H, WU Y W, et al. Two-stage market bidding and scheduling strategy of integrated wind power and energy storage station in dual-settlement mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 47-55. DOI:10.7500/AEPS20210705005.
- [5] 张戈,侯利霞.豆粕、玉米价格波动对畜禽养殖产业链财务风险的传导机制[J].饲料工业,2026,47(12):179-183. DOI:10.13302/j.cnki.fi.2026.12.024.
ZHANG G, HOU L X. Transmission mechanism of soybean meal and corn price fluctuations on financial risks in livestock and poultry industry chain[J]. Feed Industry, 2026, 47(12): 179-183. DOI:10.13302/j.cnki.fi.2026.12.024.