

基于改进 Shapley 值的构网型储能调频容量分配与收益优化

韩俊康,郝思鹏,李舒恒

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:高比例新能源并网加剧电网频率波动,构网型储能凭借快速响应与惯量支撑能力成为提升系统频率稳定性的关键资源。提出一种基于改进 Shapley 值的构网型储能调频容量分配与收益优化方法,旨在解决现有调频辅助服务机制中快速响应资源价值被低估、收益分配公平性不足的问题。通过构建构网型储能主攻调频、跟网型储能配合调峰的协同调度框架,通过双轨补偿机制量化惯量支撑与动态响应特性;建立以电网购电成本最小化和储能收益最大化为目标的双层博弈模型以实现全局优化;通过改进 Shapley 值法,引入技术贡献度、容量可用率及动态响应能力三阶段修正因子,构建多维贡献评价体系。仿真结果表明,所提方法使系统调频需求满足率提升至 98.7%,构网型储能调频容量可用性提升 35%,构网型储能收益占比提升 15.5%,总收益增幅 59.7%,有效提升了资源配置效率与系统经济性。本研究为高比例可再生能源电网的调频资源市场化运营提供了理论范式与实践路径。

关键词:构网型储能;调频辅助服务;改进 Shapley 值法;双层博弈;容量分配;收益优化

中图分类号:TM74 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26600

Frequency Modulation Capacity Allocation and Revenue Optimization for Grid-forming Energy Storage Based on Improved Shapley Value

HAN Junkang, HAO Sipeng, LI Shuheng

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: The high proportion of new energy grid connection increases the frequency fluctuation of the power grid, and grid-forming energy storage is regarded as a key resource to improve frequency stability due to its fast response and inertia support capability. To address the underestimation of fast-response resource value and insufficient fairness in revenue allocation within existing frequency modulation auxiliary service mechanisms, a method for optimizing the capacity allocation and revenue of grid-forming energy storage was proposed based on the improved Shapley value. A cooperative scheduling framework was constructed, in which grid-forming energy storage focuses on frequency modulation while grid-following energy storage cooperates with peaking. The inertia support and dynamic response characteristics were quantified through a dual-track compensation mechanism. A two-level game model was established to minimize grid power purchase costs and maximize energy storage revenue for global optimization. The Shapley value method was improved by introducing a three-phase correction involving technological contribution, capacity availability, and dynamic response capability, thereby constructing a multidimensional contribution evaluation system. Simulation results demonstrated that the proposed method increased the system frequency modulation demand satisfaction rate to 98.7%, enhanced the frequency modulation capacity availability of grid-forming energy storage by 35%, raised the revenue of grid-forming energy storage by 15.5%, and boosted the total revenue by 59.7%. These improvements effectively enhanced resource allocation efficiency and system economy. The study provides a theoretical paradigm and practical pathway for the market-based operation of frequency modulation resources in high-proportion renewable energy grids.

Key words: grid-forming energy storage; frequency modulation ancillary services; improved Shapley value method; two-level game; capacity allocation; revenue optimisation

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金(BA2022105);碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022003-4)

作者简介:韩俊康(2001—),男,硕士在读,主要研究方向为新能源与电力市场,Email:2353185192@qq.com

随着可再生能源渗透率的持续提升,其出力波动性对电网频率稳定性构成严峻挑战。构网型储能凭借其快速响应能力、惯量支撑和电压调节等多重优势,成为提升系统频率稳定性的关键解决方案^[1]。因此,建立适配构网型储能技术特性的市场化运行机制,是优化调频辅助服务资源配置的关键课题^[2]。

调频辅助服务市场的交易机制直接影响资源配置效率,国际成熟市场已形成差异化发展模式。美国PJM采用电能量与调频市场顺次出清机制,整合储能等需求响应资源^[3];英国和北欧则建立独立辅助服务市场,优先调用电池储能提供快速调频服务^[4]。我国市场呈现明显的区域化特征。华北地区采用可用时间补偿机制^[5],山东、山西引入调频里程与性能指标补偿^[6],而江苏等地实施容量加里程两部制补偿^[7],更好体现调频资源的容量价值和实际贡献^[8]。这些差异化的市场机制反映了各地电网特性和资源禀赋的不同需求。

针对储能参与调频辅助服务的优化调度与收益分配等问题,国内外学者展开了广泛的研究。文献[9]针对独立储能参与调峰和一次调频市场的问题,提出了协同优化调度策略,通过模拟市场和实际市场结合的方法生成中标情况,并设计了考虑动态电价的收益计算方法。文献[10]进一步将容量补偿机制引入市场设计,建立了独立储能参与电能量与辅助服务市场的双层决策模型,通过同步型交替方向乘子法求解。文献[11]提出了考虑调频成本和储能SOC恢复的优化调度策略,通过引入时空松弛因子优化出清价格。

上述研究为储能参与调频辅助服务市场提供了理论基础,但目前调频辅助服务市场仍面临诸多挑战。其一,现有机制多聚焦于单类型储能的优化调度,缺乏对构网型储能参与调频市场的容量分配机制的研究;其二,储能参与调频市场收益优化机制尚不完善,影响投资积极性^[12]。本文基于改进Shapley值法,提出一种构网型储能调频辅助服务容量分配与收益优化,旨在实现调频资源的高效配置与市场主体的公平收益分配。

本文的主要贡献如下:

1)提出构网型储能主攻调频、跟网型储能配合调峰的优化配置,使构网型储能保留更多调频裕度,通过“容量+里程”双轨补偿机制,量化构网型储能的惯量支撑与动态响应特性。

2)提出了基于双层博弈的调频容量优化分

配模型。上层以电网购电成本最小化为目标,下层以储能收益最大化为目标,通过KKT条件和对偶理论实现全局优化,以验证模型在提升系统运行可靠性与经济性方面的效果。

3)提出改进Shapley值法进行收益分配。设计三阶段修正因子,从多维角度量化储能实际贡献,有效解决传统分配方式对快速响应资源的价值低估问题。

1 构网型储能调频辅助服务竞价出清流程

为优化构网型储能参与调频辅助服务的市场运行机制,本文提出“构网型储能主攻调频、跟网型储能配合调峰”的差异化调度策略,充分发挥构网型储能快速响应优势。因此本文设计的多阶段竞价出清流程如下:

1)负荷于日前市场开展前,向调度中心申报用电量 S_t 。

2)所有储能于日前申报调峰容量 $P_{Es,i}^{peak}$ 和调峰价格 λ_{peak} ,调度机构以服务成本最小为原则进行排序,以最后一名中标者申报的价格形成出清价格,所有中标者均以出清价格结算。于调峰当日,服务提供方执行调度指令并最终获得补偿。

3)构网型储能 i 向调度中心申报其调频价格 $\lambda_{freq,i}$ 、调频容量 $P_{Es,i}^{cap}$ 、调频里程 $P_{Es,i}^{mil}$ 等信息。调度中心依据市场出清规则,以构网型储能调频费用总和最小为目标进行交易决策,得到调频容量出清价格 λ_{cap} 和调频里程出清价格 λ_{mil} 。调度中心以调峰费用总和最小为目标,得到调峰出清价格 λ_{peak} 。

4)各储能电站依据调度中心下达的交易量与交易价格,对申报量调整,直至市场达到均衡。

2 构网型储能调频辅助服务竞价出清双层博弈模型

本文提出构网型储能调频容量分配与收益优化方法的双层优化模型。上层以最小化电网购电成本为目标,下层以各储能成员个体收益最大化为目标,通过协调上、下层目标实现调频需求的高效满足与多主体收益的合理分配。双层优化模型如图1所示。

2.1 上层模型

上层模型以最小化电网购电成本为目标,目标函数如下:

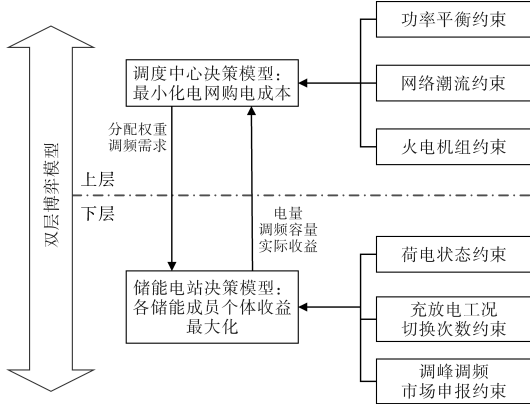


图1 双层优化模型

Fig.1 Two-level optimisation model

$$F_{Es} = \sum_{t=1}^n \sum_{i=1}^{N_{Es}} (\lambda_{cap} P_{Es,i}^{cap} + \lambda_{mil} P_{Es,i}^{mil}) \quad (1)$$

式中: λ_{cap} 为构网型储能申报的容量补偿价格; λ_{mil} 为构网型储能申报的里程补偿价格; $P_{Es,i}^{cap}$ 为构网型储能中标的调频容量; $P_{Es,i}^{mil}$ 为构网型储能中标的调频里程。

上层决策模型约束条件介绍如下。

1) 供需平衡约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{Es}} P_{Es,i}^{cap} + \sum_{j=1}^{N_G} P_{G,j}^{cap} \geq R_t^{cap} \\ \sum_{i=1}^{N_{Es}} x_i^{Es} P_{Es,i}^{cap} + \sum_{j=1}^{N_G} x_j^G P_{G,j}^{cap} \geq R_t^{mil} \\ \sum_{j=1}^{N_G} P_{j,t}^G + \sum_{i=1}^{N_{Es}} (P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch}) = S_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_t^{cap} 为调频容量需求; R_t^{mil} 为调频里程需求; S_t 为 t 时刻的负荷值; $P_{G,j}^{cap}$ 为火电机组 j 的调频容量; x_i^{Es}, x_j^G 分别为构网型储能 i 和火电机组 j 的调频里程因子; $x_i^{Es} P_{Es,i}^{cap}, x_j^G P_{G,j}^{cap}$ 分别为构网型储能 i 和火电机组 j 的调频里程 $P_{Es,i}^{mil}$ 和 $P_{G,j}^{mil}$; $P_{j,t}^G$ 为火电机组 j 在 t 时刻的出力情况; $P_{i,t}^{dis}, P_{i,t}^{ch}$ 分别为储能 i 在 t 时刻的放电功率与充电功率。

2) 网络潮流约束:

$$\begin{cases} P_{ij} = (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) / \chi_{ij} \\ P_{ij} \leq |F_{ij,max}| \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为 i, j 节点间的线路潮流; χ_{ij} 为 i, j 节点间的线路电抗; $\theta_{i,t}, \theta_{j,t}$ 为 t 时刻 i, j 节点的相角; $F_{ij,max}$ 为 i, j 节点间传输功率最大值。

3) 火电机组约束如下。

机组功率约束:

$$P_{j,min}^G \leq P_{j,t}^G \leq P_{j,max}^G \quad (4)$$

调频容量约束:

$$0 \leq P_{G,j}^{cap} \leq P_{G,j,max}^{cap} \quad (5)$$

爬坡约束:

$$\begin{cases} P_{j,t}^G - P_{j,t-1}^G \leq P_j^{RU} \\ P_{j,t-1}^G - P_{j,t}^G \leq P_j^{RD} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_j^{RU}, P_j^{RD} 分别为机组 j 向上、向下的爬坡速率限制。

最小启停时间约束:

$$\begin{cases} T_{on,j} \geq T_{on,min,j} \\ T_{off,j} \geq T_{off,min,j} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{on,j}, T_{off,j}$ 分别为机组 j 的运行和停运时间; $T_{on,min,j}, T_{off,min,j}$ 分别为机组 j 的最小运行和停运时间。

2.2 下层模型

下层模型以最大化各储能成员个体收益为目标, 目标函数如下:

$$\max \sum_{t=1}^T [\lambda_{cap} P_{max,i} w_i K_i + \lambda_{mil} P_{max,i} w_i K_i P_{freq,t} + \lambda_{peak} (P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch}) - f(c)_i] \quad (8)$$

其中 $f(c)_i = \int_{t=1}^T MC s_i^{ES} d(P_{i,t}^{Ecap})$ (9)

式中: w_i 为储能 i 的容量分配权重; K_i 为储能 i 的调频性能系数; $P_{freq,t}$ 为时段 t 的调频需求; $P_{max,i}$ 为储能 i 的功率容量; $f(c)_i$ 为储能调频辅助服务的成本; MC 为储能单位调频边际成本。

下层决策模型约束条件介绍如下。

1) 荷电状态约束:

SOC 动态更新约束:

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} + \frac{\eta_{ch} P_{i,t}^{ch} \Delta t}{Es_i} - \frac{P_{i,t}^{dis} \Delta t}{\eta_{dis} Es_i} \quad (10)$$

式中: $SOC_{i,t}, SOC_{i,t-1}$ 分别为储能在 t 和 $t-1$ 时刻的荷电状态; η_{ch}, η_{dis} 分别为储能的充、放电效率; Es_i 为储能 i 的额定容量。

SOC 上、下限约束:

$$SOC_{i,min} \leq SOC_{i,t} \leq SOC_{i,max} \quad (11)$$

式中: $SOC_{i,max}, SOC_{i,min}$ 分别为储能最大和最小荷电状态。

SOC 初始、终止值约束:

$$\begin{cases} SOC_{i,0} = SOC_{i,initial} \\ SOC_{i,T} = SOC_{i,final} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $SOC_{i,0}, SOC_{i,T}$ 分别为储能 i 在初始时刻 ($t=0$) 和终止时刻 ($t=T$) 的荷电状态; $SOC_{i,initial}, SOC_{i,final}$ 分别为储能 i 在运行周期起始端点与结束端点所设定的目标荷电状态边界值。

2) 充放电切换次数约束:

$$u_{ch,i,t} + u_{dis,i,t} \leq 1 \quad (13)$$

式中: $u_{ch,i,t}, u_{dis,i,t}$ 为两个 0, 1 变量, 分别表示储能 i

在 t 时刻处于充电状态或放电状态。

储能 i 在 t 时刻发生充放电工况切换的条件为

$$\begin{cases} z_{i,t} \geq u_{\text{ch},i,t} - u_{\text{ch},i,t-1} \\ z_{i,t} \geq u_{\text{dis},i,t} - u_{\text{dis},i,t-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $z_{i,t}$ 表示储能 i 在时刻 t 是否发生充放电工况切换, $z_{i,t} = 1$ 为发生切换, $z_{i,t} = 0$ 为未发生切换。

在给定的时间周期 T 内, 储能 i 的充放电工况切换次数不得超过最大允许次数 N_{max} :

$$\sum_{t=1}^T z_{i,t} \leq N_{\text{max}} \quad (15)$$

3) 调峰调频市场申报量约束:

$$C_{\text{peak,min}} \leq \lambda_{\text{peak},i,t} \leq C_{\text{peak,max}} \quad (16)$$

式中: $\lambda_{\text{peak},i,t}$ 为储能 i 在 t 时刻的调峰报价; $C_{\text{peak,max}}$, $C_{\text{peak,min}}$ 分别为调峰价格的上、下限。

构网型储能的调频市场申报量约束如下式所示:

$$C_{\text{freq,min}} \leq \lambda_{\text{freq},i,t} \leq C_{\text{freq,max}} \quad (17)$$

式中: $\lambda_{\text{freq},i,t}$ 为储能 i 在 t 时刻的调频报价; $C_{\text{freq,max}}$, $C_{\text{freq,min}}$ 分别为储能调频价格的上、下限。

储能系统参与调峰调频市场的容量需受到限制, 以避免过度使用。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{Es},i}^{\text{peak}} \leq P_{\text{Es},i}^{\text{peak,max}} \\ 0 \leq P_{\text{Es},i}^{\text{cap}} \leq P_{\text{Es},i}^{\text{cap,max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{Es},i}^{\text{peak}}$, $P_{\text{Es},i}^{\text{cap}}$ 分别为储能调峰、调频的最大容量。

2.3 模型求解

本文在 Matlab 2022a 中调用 CPLEX 12.10 和 YALMIP 工具箱, 对双层优化模型进行求解。基于 KKT 条件和对偶理论, 将下层模型的约束条件及结果转化为上层模型的约束条件, 不存在收敛性问题且无需迭代, 以实现模型的全局最优解。

3 基于改进 Shapley 值法的各储能成员收益分配

传统辅助服务市场主要依据储能调峰调频过程中提供的实际功率、响应速度及持续时间等因素, 计算并分配收益。该分配方式未能充分考量储能资源在多维贡献特性间的协同效应, 利益分配缺乏公平性。

为弥补传统分配方式的不足, 本文引入 Shapley 值法并加以改进作为收益分配的理论基础。Shapley 值法源于合作博弈理论^[13], 计算参与者在所有可能合作组合中的边际贡献期望值^[14], 确定其应得收益^[15]。对包含 n 个储能的联盟 S , 成

员 i 的边际贡献定义为加入联盟后总收益增加量, 其 Shapley 值计算公式为

$$\begin{cases} R_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(n - |S| - 1)!}{n!} \times [v(S \cup \{i\}) - v(S)] \\ v(S) = \sum_{j \in S} [\lambda_{\text{cap}} P_{\text{max},i} w_i K_i + \lambda_{\text{mil}} P_{\text{max},i} w_i K_i P_{\text{freq},i} + \lambda_{\text{peak}} (P_{i,t}^{\text{dis}} - P_{i,t}^{\text{ch}}) - f(c)_i] \end{cases} \quad (19)$$

式中: R_i 为储能成员 i 的 Shapley 值; N 为全体成员的集合; $v(S)$ 为子联盟 S 的收益函数; $v(S \cup \{i\})$ 为每个子联盟加入成员 i 后的收益。

Shapley 值法虽调整了收益分配, 但其未充分考虑构网型储能在调频中的多维贡献特性。为此, 本文引入三阶段修正因子, 对 Shapley 值进行修正, 更精确反映构网型储能在辅助服务中的实际贡献。

1) 技术贡献修正因子 α_i 。根据储能充放电效率和循环寿命调整其权重, 以反映其对调峰调频的技术支持能力。

$$\alpha_i = \frac{K_i P_{\text{cap},i}}{\sum_j K_j P_{\text{cap},j}} \quad (20)$$

式中: K_i , $P_{\text{cap},i}$ 分别为储能 i 的技术性能指标以及储能 i 参与调峰调频的可用功率容量; K_j , $P_{\text{cap},j}$ 分别为除储能 i 外其他储能的技术性能指标和参与调峰调频的可用功率容量。

2) 容量可用率修正因子 β_i 。基于储能可用容量比例和备用容量调整其权重, 以反映其在调频中的容量保障能力。

$$\beta_i = \frac{T_{\text{avail},i}}{\sum_j T_{\text{avail},j}} \quad (21)$$

式中: $T_{\text{avail},i}$, $T_{\text{avail},j}$ 分别为储能 i 和其他储能在调频过程中可提供容量的持续时间。

3) 动态响应能力修正因子 γ_i 。根据储能的动态响应特性调整其权重, 以反映其在调频中的快速响应能力。

$$\gamma_i = \frac{R_{\text{mil},i}}{\sum_j R_{\text{mil},j}} \quad (22)$$

式中: $R_{\text{mil},i}$, $R_{\text{mil},j}$ 分别为储能 i 与除储能 i 外的动态响应能力指标, 反映其在调频过程中快速响应的能力。

通过上述三阶段修正因子, 本文改进了传统的 Shapley 值法, 使其能够更全面地反映储能资源在调峰调频辅助服务中的实际贡献, 从而实现更公平、更合理的利益分配。

4 仿真分析

4.1 仿真参数选取

本文以改进IEEE-30节点系统来验证储能参与调频市场出清模型,包含5台火电机组($G_1 \sim G_5$),3台构网型储能($Es_1 \sim Es_3$)和5台跟网型储能($Es_4 \sim Es_8$)。时间尺度为15 min,模拟一天内的辅助服务市场运行。系统日负荷曲线如图2所示,火电机组和各类型储能的参数如表1~表3所示。系统调频需求为负荷的10%,系统历史调频里程—容量比为10。

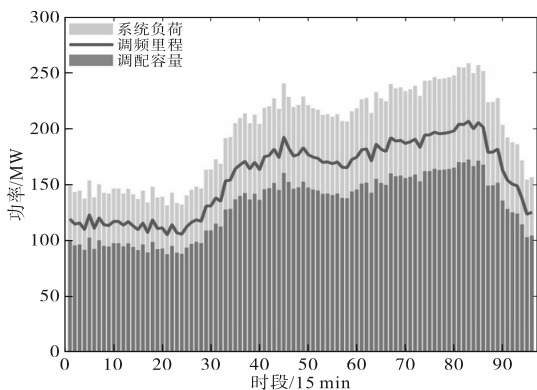


图2 系统负荷与调频需求

Fig.2 System load and frequency modulation requirements

表1 火电机组运行参数

火电机 组编号	最大出 力/MW	最小出 力/MW	爬坡速率/ (MW·h ⁻¹)	启动成 本/元	调频性 能指标	历史里程 调用率
G_1	160	35	30	1 850	0.5	12
G_2	110	30	35	1 700	0.5	10
G_3	100	25	25	1 800	0.45	7
G_4	80	20	30	1 650	0.4	9
G_5	80	20	25	1 700	0.4	8

表2 构网型储能运行参数

机组 编号	充放电 功率/ MW	容量/ (MW·h)	最大 允许 电量/%	最小 允许 电量/%	充放电 效率/%	调频性 能指标	里程 调用 率
Es_1	60	120	90	10	90	1.1	15
Es_2	70	140	90	10	90	1.15	20
Es_3	80	160	90	10	90	1.2	25

表3 跟网型储能运行参数

机组 编号	充放电 功率/MW	容量/ (MW·h)	最大允许 电量/%	最小允许 电量/%	充放电 效率/%
Es_4	30	60	90	10	90
Es_5	35	70	90	10	90
Es_6	40	80	90	10	90
Es_7	45	90	90	10	90
Es_8	50	100	90	10	90

4.2 仿真分析

本仿真通过传统调度模式下火电机组主导调频市场、储能资源独立参与竞价和本文提出的双层优化模型下基于改进Shapley值法进行收益分配进行对比,分析传统模式与优化后场景在调频需求满足率、储能收益占比等关键指标的差异,多维度验证了本策略在提升系统灵活性与经济性方面的显著优势。

图3和图4分别展示了优化前、后火电机组与构网型储能在不同时段的调频容量中标分布情况。结果表明,本文提出的优化模型显著改善了调频资源的分配效率。在传统调度模式下,火电机组凭借其惯性调频能力在高峰时段占据了主导地位,其中标容量占比高达78.5%,中标容量峰值达到20 MW。构网型储能的中标容量占比仅为21.5%,且呈现分散分布状态, $Es_1 \sim Es_3$ 的平均中标容量整体占比有限,这表明其快速响应优势未能得到充分发挥。

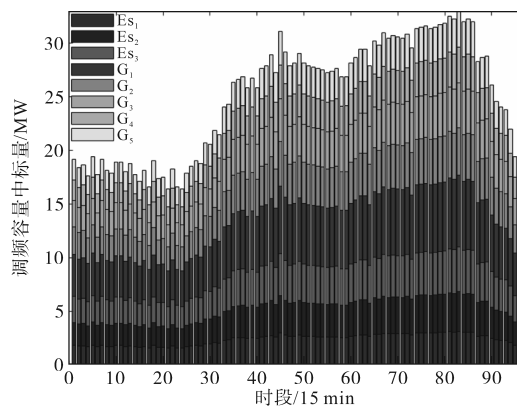


图3 独立模式下调频容量中标量

Fig.3 Frequency modulation capacity winning bid in stand-alone mode

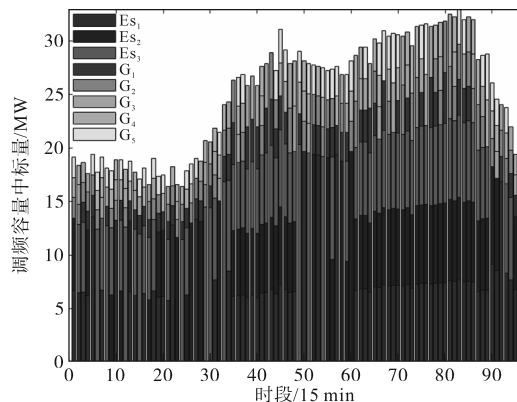


图4 优化后调频容量中标量

Fig.4 Optimised frequency modulation capacity winning bid

优化后,构网型储能的中标容量占比大幅提升至63.7%, Es_3 在高峰时段的中标容量达到22.4

MW,较优化前增长255%。 Es_1 和 Es_2 的中标容量也分别提升9.6 MW和11.2 MW。优化后构网型储能的调频容量可用性从52.1%提升至87.6%,其中 Es_3 的可用性最高达到91.2%。该显著提升主要得益于跟网型储能分担了35.8%的调峰任务,为构网型储能释放了更多的调频裕度。与此同时,火电机组的中标容量被压缩至基荷时段,单机最大中标量降至8 MW,高峰时段占比仅为36.3%。优化后的分配策略提高了调频容量利用率,使系统在高峰时段的响应能力更加稳定。

图5和图6展示了优化前、后火电机组与构网型储能的调频里程中标情况。结果表明,传统调度模式下火电机组优先被调用,其中标量占比达到72.3%,在负荷波动较大的时段, $G_1\sim G_5$ 机组的平均中标里程达到37.5 MW。相比之下,构网型储能的中标量占比仅为27.7%, $Es_1\sim Es_3$ 的平均中标里程分别为8.2 MW,17.5 MW和24.8 MW,未能充分发挥其快速响应优势。

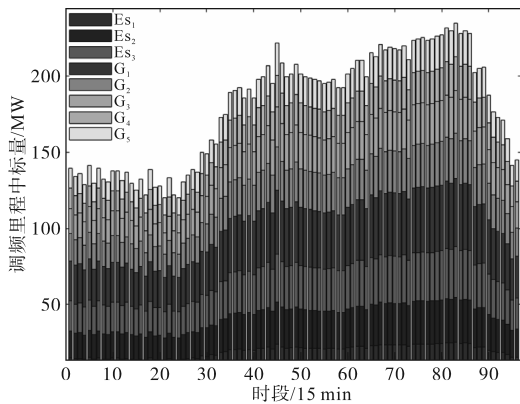


图5 独立模式下调频里程中标量

Fig.5 Frequency modulation mileage winning bid in stand-alone mode

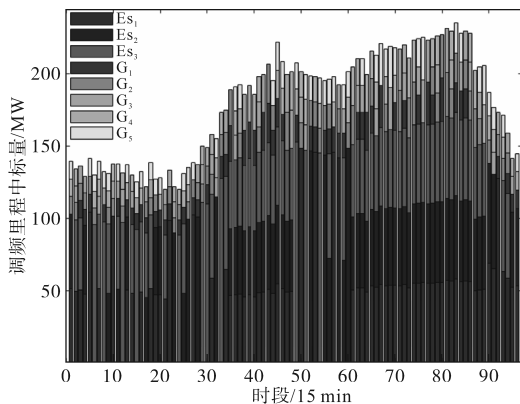


图6 优化后调频里程中标量

Fig.6 Optimised frequency modulation mileage median bid

优化后,由于构网型储能调频性能优于火电机组,对调节信号响应更频繁,被系统优先调用,

中标占比显著提升。构网型储能的中标量占比提升至68.5%,其中 Es_3 在高峰时段的中标里程达到52.4 MW。 Es_1 和 Es_2 的中标里程也分别提升至41.6 MW和42.5 MW。 $Es_1\sim Es_3$ 在负荷高峰时段全额中标,中标量较优化前增长约300%。与此同时,火电机组的中标量被压缩至基荷时段以及高峰时段,占比31.5%,单机的最大中标里程降至35 MW以下。在负荷快速波动时段,构网型储能的中标里程占比75.2%,而火电机组仅占24.8%。构网型储能的动态性能修正因子在投标模型中的权重提升,使其快速调频能力转化为市场竞争力。优化策略通过引入技术贡献度量化机制,重构了调频资源的优先级排序,构网型储能因毫秒级响应特性使其单位容量收益提升22.1%,火电机组则退居为补充性调频资源。

图7展示了构网型储能调频里程报价与市场出清价格的动态关系。通过分析96个时间点的市场运行数据发现,系统出清价格整体维持在申报价格的85%~92%区间波动,在负荷高峰时段,由于调频需求激增,出清价格和里程报价出现显著上涨,里程报价最高达到申报价格的115.3%。低谷时段出清价格相对平稳,波动幅度为3.2%左右,而高峰时段的波动幅度达到12.5%。这种价格波动特征充分反映了“容量+里程”双轨补偿机制的市场敏感性,而构网型储能凭借其快速响应特性,在竞价过程中展现出较低的边际成本优势。因此本文所提模型能够准确刻画政策引导下的市场运行规律。该结果为储能参与者在不同时段制定竞价策略提供了理论依据。

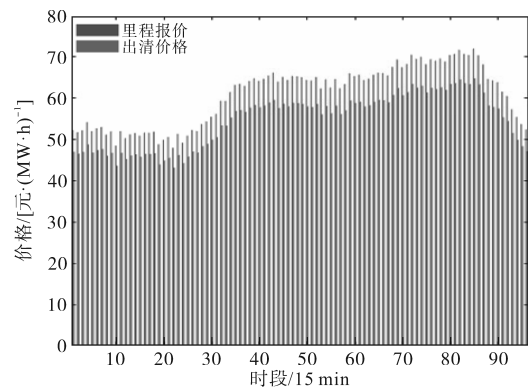


图7 调频市场报价与出清价格对比

Fig.7 Frequency modulation market offer vs clearing price

图8展示了各构网型储能的收益构成。仿真结果表明,调峰收益占比为17.55%,反映出本模型相应地调低了构网型储能在调峰市场中的参与度,留出足够的调频裕度以应对电网频率的波

动,让构网型储能更好地参与调频市场,同时保留了部分的调峰收益。容量补偿与里程补偿分别占总收益的45.6%和36.85%,是构网型储能收益的主要来源。

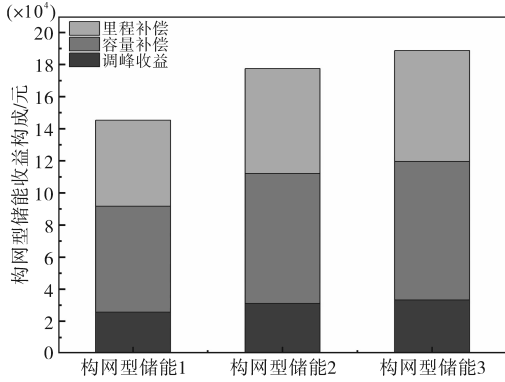


图8 各构网型储能收益构成

Fig.8 Composition of revenue of each grid-forming energy storage plant

表4表明,构网型储能 Es_3 凭借最优调频权重分配和动态响应能力,获得16.61万元的总收益,较 Es_1 和 Es_2 分别高出21.5%和7.2%。差异源于其更高的里程补偿和容量补偿,验证了调频性能与收益的正相关性。表5通过调峰收益分配进一步揭示了资源协同效应。构网型储能 Es_3 的调峰权重分配显著低于其在调频市场的占比,在调峰市场保持最高收益9.94万元,仅为调频收益的59.8%。表明优化模型通过差异化调度策略,优先保障其调频容量。跟网型储能 Es_8 则凭借13.5%的调峰权重获得9.67万元收益,体现出模型对非调频资源的合理利用。这种收益结构验证了“构网主攻调频、跟网配合调峰”协同策略的有效性,实现了系统整体收益的最大化,说明了两类储能在不同服务中存在良好的收益互补性,验证了本文优化策略的有效性。

表4 调频辅助服务收益分配

Tab.4 Frequency regulation ancillary service revenue distribution

储能编号	调频权重分配	里程补偿/万元	容量补偿/万元	调频总收益/万元
Es_1	0.262	6.52	7.15	13.67
Es_2	0.352	6.85	8.65	15.5
Es_3	0.382	7.37	9.24	16.61

表6量化了优化模型的整体提升效果。对比独立模式,优化后系统调频需求满足率提升9.5%,构网型储能收益占比提升15.5%,总收益增幅59.7%。动态响应修正因子贡献了62%的权重调整幅度,这一结果证实了三阶段修正因子在收益分配中的作用。结论表明,本文提出的改进

Shapley 值法有效优化了各储能主体的收益分配,实现了经济效益的帕累托改进。

表5 调峰辅助服务收益分配

Tab.5 Peak shaving ancillary service revenue distribution

储能类型	储能编号	调峰权重分配/%	调峰总收益/万元
构网型储能	Es_1	12.8	7.49
	Es_2	14.1	8.96
	Es_3	15.4	9.94
跟网型储能	Es_4	10.0	8.13
	Es_5	10.7	8.52
	Es_6	11.3	8.84
	Es_7	12.2	9.08
	Es_8	13.5	9.67

表6 各项指标对比

Tab.6 Comparison of indicators

方法	调频需求满足率/%	构网型储能收益占比/%	总收益/万元
独立模式	89.2	46.5	72.19
双层模型优化后	97.6	53.9	94.83
双层模型优化后+改进Shapley 值法	98.7	62	116.41

5 结论

本文针对构网型储能参与调频辅助服务的容量分配与收益优化,提出了基于改进Shapley值的构网型储能调频辅助服务协同优化框架。通过“容量+里程”双轨补偿机制,实现了调频需求的高效满足与多主体收益的合理分配。研究表明:所提模型使构网型储能调频容量可用性提升35%,系统调频需求满足率从89.2%提升至98.7%;引入动态响应修正因子的改进Shapley值法有效量化构网型储能的多维贡献,使其收益占比从46.5%提升至62%;差异化调度策略使构网型储能调频中标量增长300%,同时保持调峰市场17.55%的合理收益占比。研究成果为新型电力系统中构网型储能参与调频辅助服务市场提供了理论依据与实践范式,对促进灵活性资源公平高效配置具有重要参考价值。

参考文献

[1] 王伟,周少泽,黄萌,等. 构网型技术:演进历程、功能定位与应用展望[J]. 电力系统自动化,2025,49(1):1-13.
WANG Wei, ZHOU Shaoze, HUANG Meng, et al. Grid-forming technologies: evolution history, function, and application prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1):

- 1-13.
- [2] 仇进,吴继平,滕贤亮,等. 调频辅助服务市场环境下频率控制技术[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 1-7.
QIU Jin, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Frequency control technology based on frequency regulation auxiliary service market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 1-7.
- [3] 崔楷舜,朱兰,魏琳琳,等. 美国电力市场中需求响应的发展及启示[J]. 电气传动, 2022, 52(16): 3-11, 48.
CUI Kaishun, ZHU Lan, WEI Linlin, et al. Development and enlightenment of demand response in US electricity market[J]. Electric Drive, 2022, 52(16): 3-11, 48.
- [4] ENTSO-E. Survey on ancillary services procurement and electricity balancing market design[EB/OL]. (2016-08-11)[2025-04-28]. <https://www.researchgate.net/publication/258222810>.
- [5] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[EB/OL]. (2019-09-30) [2025-04-28]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgnr/hbjgfl/gfxwj/202311/t20231105_194947.html.
National Energy Administration North China Regulatory Bureau. Notice from the North China energy regulatory bureau on issuing the "two detailed rules" for grid connected power plants in the North China region(revised in 2019)[EB/OL]. (2019-09-30) [2025-04-28]. https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgnr/hbjgfl/gfxwj/202311/t20231105_194947.html.
- [6] 国家能源局山东监管办公室. 关于印发《山东省电力并网运行管理实施细则》、《山东省电力辅助服务管理实施细则》的通知[EB/OL]. (2023-07-24) [2025-04-28]. https://sdb.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202309/t20230919_110474.html.
Shandong Regulatory Office of National Energy Administration. Notice on issuing the implementation rules for Shandong province's grid connected power operation management and Shandong province's implementation rules for power auxiliary service management[EB/OL]. (2023-07-24) [2025-04-28]. https://sdb.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202309/t20230919_110474.html.
- [7] 国家能源局江苏监管办公室. 江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(试行)[EB/OL]. (2020-07-03) [2025-04-28]. <https://hzj.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202310/t20231021165603.html>.
Jiangsu Regulatory Office of National Energy Administration. Trading rules for Jiangsu electric power auxiliary services (frequency modulation) market (trial) [EB/OL]. (2020-07-03) [2025-04-28]. <https://hzj.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202310/t20231021165603.html>.
- [8] 张志,邵尹池,伦涛,等. 电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 71-77, 84.
ZHANG Zhi, SHAO Yinchu, LUN Tao, et al. Review on the policies and compensation mechanism of BESS participation in the auxiliary service of frequency and peak modulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 71-77, 84.
- [9] 李军徽,张靖祥,穆钢,等. 辅助服务市场下独立储能调峰调频协同优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 650-665.
LI Junhui, ZHANG Jingxiang, MU Gang, et al. Collaborative optimal dispatch of peak shaving and frequency modulation with independent energy storage based on auxiliary service market [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 650-665.
- [10] 陈曦,张欢,代春艳,等. 计及容量补偿的独立储能参与电能质量与辅助服务市场运营策略分析[J/OL]. 西安理工大学学报: (2025-03-17) [2025-04-28]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250314.1725.008>.
CHEN Xi, ZHANG Huan, DAI Chunyan, et al. Analysis of operational strategies for independent energy storage participation in the electric energy and ancillary services markets with accounting and capacity compensation[J/OL]. Journal of Xi'an University of Technology: (2025-03-17) [2025-04-28]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250314.1725.008>.
- [11] 陆秋瑜,杨银国,谢平平,等. 适应储能参与的调频辅助服务市场机制设计及调度策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4971-4989.
LU Qiuyu, YANG Yinguo, XIE Pingping, et al. Market mechanism design and scheduling strategy of auxiliary services for frequency control adapting to energy storage participation[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4971-4989.
- [12] 郁海彬,董帅,陆增洁,等. 新型电力系统下储能参与电力调峰调频辅助市场的竞标策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 48-60.
YU Haibin, DONG Shuai, LU Zengjie, et al. Bidding strategy of energy storage participating in the auxiliary market of peak and frequency modulation in new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 48-60.
- [13] 郝俊博,闫晓宏,裴红兰,等. 基于改进Shapley值的台区多共享储能运行效能分配方法[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(4): 1507-1518.
HAO Junbo, YAN Xiaohong, PEI Honglan, et al. Allocation method of operational efficiency of multi-shared energy storages in the distribution network based on improved-Shapley value[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(4): 1507-1518.
- [14] 李金超,肖雅,朱焯. 基于改进Shapley值的源网荷储一体化项目利益分配研究[J]. 价格理论与实践, 2024(4): 95-100, 224.
LI Jinchao, XIAO Ya, ZHU Ye. Research on benefit allocation of source network load storage integration project based on improved Shapley value[J]. Price: Theory & Practice, 2024(4): 95-100, 224.
- [15] 宋铎洋,薛田良,李艺瀑,等. 考虑风光不确定性的虚拟电厂合作博弈调度及收益分配策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 193-206.
SONG Duoyang, XUE Tianliang, LI Yipu, et al. Cooperative game scheduling and revenue sharing strategy for virtual power plants considering scenery uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 193-206.

收稿日期:2025-04-28

修改稿日期:2025-07-01