

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211500

# 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究

李国庆<sup>1</sup>, 闫克非<sup>1</sup>, 范高锋<sup>2</sup>, 边竞<sup>1</sup>, 于国康<sup>3</sup>, 余中平<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;  
3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 随着电力市场化改革的不断推进, 储能资源作为独立市场主体提供调频服务, 是解决系统调频能力不足的有效手段。构建双层交易决策模型对储能在市场中的交易决策行为和市场出清过程进行模拟分析。首先, 提出储能参与现货电能量-调频市场交易的总体架构。其次, 以电网侧储能电站为独立的竞价主体, 构建了双层市场交易决策模型。上层以储能电站收益最大化为目标, 决定储能电站的报价策略; 下层实现电能量市场和调频辅助服务市场的联合出清。然后, 应用 KKT 条件将该双层模型转化为单层模型, 从而将所提模型转化为混合整数线性规划问题。最后, 通过算例分析验证所提出交易决策模型的合理性与有效性。算例结果表明储能通过策略性报价在市场中获得更高的经济效益, 且在调频市场中的收益占总收益的 80% 以上。

**关键词:** 储能; 电能量市场; 调频辅助服务市场; 双层交易决策模型; 混合整数线性规划

## Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market

LI Guoqing<sup>1</sup>, YAN Kefei<sup>1</sup>, FAN Gaofeng<sup>2</sup>, BIAN Jing<sup>1</sup>, YU Guokang<sup>3</sup>, YU Zhongping<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** With the advance of electricity market reform, energy storage resources, as an independent market subject, provide a frequency modulation service, which is an effective measure to solve the shortage of system frequency modulation capacity. This paper builds a bi-level transaction decision-making model to simulate and analyze transaction decision-making behavior and market clearing process of energy storage in the market. First, the overall framework of energy storage participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market is proposed. Secondly, a bi-level market transaction decision-making model is established, in which energy storage stations are regarded as independent bidders. The upper level determines the bidding strategy of energy storage stations with the goal of maximizing the profits of energy storage stations. The lower level realizes the joint clearing of the electric energy and frequency modulation auxiliary service market. Then, the KKT conditions are applied to convert this bi-level model to a single level model, and thus the proposed model can be transformed into a mix-integer linear programming problem. Finally, case studies are conducted to verify the rationality and effectiveness of the proposed model. The numerical results show that energy storage can obtain higher economic benefits in the market through strategic bidding behaviors, and their profits in the frequency modulation market account for more than 80% of the total profits.

This work is supported by the Management Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5419-202155242A-0-0-00).

**Key words:** energy storage; energy market; frequency modulation auxiliary service market; bi-level transaction decision-making model; mixed integer linear programming

## 0 引言

为了应对化石能源枯竭和环境污染问题, 抑制

碳排放和缓解温室效应已然成为世界各国的主要责任<sup>[1-2]</sup>。我国于 2020 年明确提出“碳达峰”和“碳中和”的目标。在“双碳”目标的背景下, 风电等新能源得到迅速发展<sup>[3]</sup>, 但其出力具有间歇性和波动性<sup>[4]</sup>, 对电网的稳定运行带来挑战, 电网的调频需求大幅增加<sup>[5]</sup>, 亟需优质的调频资源。储能具有响应速度快、调节精度高等特点, 随着其规模化发

**基金项目:** 国家电网有限公司总部管理科技项目资助“大规模储能接入电力系统优化配置及支撑能力评价技术研究”(5419-202155242A-0-0-00)

展,在电力系统能源转型的背景下具有较好的应用前景<sup>[6-7]</sup>。

为激励储能参与调频服务,国内外均已推出相应的政策以及市场机制,在一些发达国家,储能已经成为调频辅助服务市场的重要参与者<sup>[8]</sup>。美国、德国、英国等国家相继颁布了储能参与辅助服务市场的相关法案<sup>[9-10]</sup>。我国目前尚处于市场化初期阶段,储能作为新型的市场主体,在电力市场中的应用得到各层面的高度关注<sup>[11]</sup>。2017年,国家发改委等五部委联合印发《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》(发改能源[2017]1701号),提出结合电力体制改革,建立健全储能参与的市场机制,并且在“两个细则”颁布后,多数省区均已经允许储能参与调频辅助服务市场<sup>[12-13]</sup>。

储能参与电网调频在近几年得到了广泛关注与研究,主要集中在储能参与电网调频的容量配置以及优化控制策略等方面。文献[14-16]基于储能电池参与调频时的经济技术性能,综合考虑储能的调频效果和经济效益,提出了储能参与电网调频容量的配置方案。文献[17]提出一种电池储能参与电网一次调频的自适应控制策略,通过虚拟惯性和虚拟下垂两种控制模式的平滑切换,在改善调频效果的同时减小储能容量配置。文献[18]提出了基于模型预测控制的风储联合调频策略,实现了风储联合调频的协同增效优势。面向电网二次调频,文献[19]提出了一种基于灵敏度分析的储能调频控制策略。上述研究为储能参与电网调频提供了相关技术支撑和优化决策参考,而随着电力市场化改革的快速推进,未来储能的运营与发展将主要在市场化的大背景下实现。

针对储能参与电力市场的优化运行策略以及市场出清机制等问题,学术界已经开展了相关研究。文献[20]综述了国外储能参与电力市场的交易机制,对储能参与市场的价值分析、框架体系以及市场交易模型进行梳理,并为中国市场建设提出建议。文献[21]提出了一种新的储能参与日前能量市场机制,在该市场机制下,储能可以根据各时段末的荷电状态向系统运营商提交报价曲线,反映储能的实际价值。文献[22]提出了一种基于市场环境的储能最优控制策略和最优竞价策略,基于PJM市场的分析表明所提策略在满足市场性能要求的同时使市场利润最大化。文献[23]根据独立储能的运行特性,构建了包含独立储能的电能量和调频辅助服务市场顺次出清及联合出清两种机制的数学模型,分析了独立储能参与市场的效益及对市场出清结果的影响。文献[24]建立了基于现货电能量与辅助服务市

场联合出清机制的纳什均衡模型。文献[25]提出了在日前和实时市场价格不确定情况下储能的竞价和运营决策模型,并评估了储能的经济可行性。在现货市场环境下,储能作为独立主体需要通过市场交易来为电网提供调频辅助服务。在参与市场交易过程中,储能电站的竞价策略将成为影响其能否竞价成功从而获得收益的关键。目前鲜有研究独立储能电站参与现货市场的交易策略以及各参与主体之间竞争关系对储能交易决策和市场出清结果的影响。

综上所述,本文以独立储能电站为主体构建了双层市场交易决策模型。首先,分析了储能在现货市场环境下参与电能量和调频辅助服务市场的交易模式,提出储能参与市场交易的总体框架。在此基础上,建立综合考虑储能参与电能量市场和调频辅助服务市场的双层决策模型,上层模型以储能电站收益最大为目标,获得储能的最优竞价策略;下层模型以系统购电成本最小为目标,进行现货市场的联合出清。然后,基于下层模型的KKT条件将所提双层模型转化为可利用商业求解器求解的混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型。最后,以修改的IEEE-30节点电力系统为例进行算例分析,验证所提双层模型的有效性和合理性。

## 1 储能交易模式及市场框架

### 1.1 储能参与现货电能量-调频市场的交易模式

在现货市场环境下,储能电站作为独立主体需要通过参与市场竞争的方式来确定充放电计划并参与电力系统调频服务。目前我国在现货市场的相关机制制定方面尚处于探索阶段,因此本文结合美国加州市场的交易机制,提出储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的联合交易模式,对储能参与现货市场的交易模式和补偿方式等做出规定。

电能量市场采用全电量竞价方式,发电侧单边报价、用户侧报量不报价,允许参与市场的主体包括常规火电机组和独立的储能电站。常规机组根据其相关运行数据和发电成本进行运行日的分时段报价;储能电站需要申报充放电价格和储能运行参数。电力调度机构根据负荷预测曲线,以最小化发电成本为优化目标,实施电能量市场的集中优化出清,得到机组的出力曲线、储能充放电曲线以及各个时段的电量出清价格。在调频辅助服务市场中,符合市场交易准入条件的发电机组和储能电站在日前电能量市场申报环节中需同步申报调频报价和调频容量/里程。根据运行日的系统调频需求,实现调频市场的集中出清,得到常规机组和储能电站在各时段

参与调频的中标容量、中标里程以及调频辅助服务市场的出清价格。

在进行市场出清时, 本文采用电能与调频辅助服务市场联合优化出清的方式。电能市场按照节点边际价格(Locational Marginal Price, LMP)进行结算; 调频辅助服务市场中的调频补偿费用按照“谁受益、谁承担”的原则进行分摊, 参与调频服务的各个主体采取“两部制”进行结算, 即调频容量补偿和调频里程补偿。

## 1.2 储能参与电能-调频市场交易的总体框架

储能电站和常规机组可同时作为市场主体参与电能和调频服务的交易。所有市场成员在申报日进行能量市场中电量和电价的投标, 在调频市场中申报调频容量/里程和相应的调频价格。常规火电机组根据自身发电成本进行报价, 而储能的充放电成本均依赖于实时电价, 因此, 储能电站需采取策略性报价。储能电站参与的电能交易与调频服务交易之间具有关联性, 需要协调储能参与多类型交易, 制定最优报价策略以实现储能电站自身的效益最大。电力交易中心和调度机构根据采集到的报价信息和全系统负荷以及调频需求, 进行电能和调频市场的联合出清。储能参与现货电能-调频辅助服务市场交易的总体框架如图 1 所示。

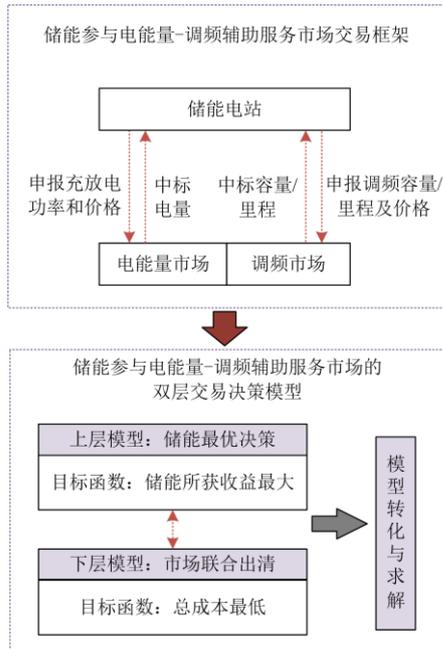


图 1 储能参与电能-调频市场交易的总体框架

Fig. 1 Framework of energy storage participating in electric energy-frequency regulation market

根据储能参与电能市场和调频市场的交易框架, 构建储能参与电能市场和调频市场双层交易

决策模型。上层以储能电站所获收益最大为目标构建储能电站的最优决策模型; 下层以电能成本和调频服务成本之和最小为目标构建电能和调频市场的联合出清模型。通过上下层之间信息的相互迭代模拟市场交易决策过程, 同时得到最优的报价策略, 使储能电站的利益最大化。

## 2 储能电站参与电能-调频辅助服务市场交易决策模型

### 2.1 上层储能电站最优决策模型

上层模型为储能电站交易决策模型, 用于产生各储能电站的最优报价策略。上层模型的目标函数为储能电站在电能市场和调频市场上所获得的两部分收益之和最大。

$$\max F_U = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{ESS}} \lambda_t (p_{k,t}^{\text{dis}} - p_{k,t}^{\text{ch}}) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{ESS}} (\lambda_t^{\text{cap}} \cdot r_{k,t}^{\text{Ecap}} + \lambda_t^{\text{mil}} \cdot r_{k,t}^{\text{Emil}}) \quad (1)$$

式中:  $N_{ESS}$  为储能电站的数量;  $p_{k,t}^{\text{dis}}$ 、 $p_{k,t}^{\text{ch}}$ 、 $r_{k,t}^{\text{Ecap}}$ 、 $r_{k,t}^{\text{Emil}}$  分别为  $t$  时段储能电站  $k$  在电能市场中标的放电、充电功率以及在调频市场中标的调频容量和调频里程;  $\lambda_t$ 、 $\lambda_t^{\text{cap}}$ 、 $\lambda_t^{\text{mil}}$  分别为电价、调频容量出清价格和调频里程出清价格, 由下层电能市场和调频市场的联合出清所得。

储能电站的投标需要考虑申报价格和容量限制以及充放电能力等方面的约束。

#### 1) 储能充放电约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{dis}} \leq \alpha_{k,t}^{\text{dis}} P_{k,\max}^{\text{dis}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{ch}} \leq \alpha_{k,t}^{\text{ch}} P_{k,\max}^{\text{ch}} \\ \alpha_{k,t}^{\text{dis}} + \alpha_{k,t}^{\text{ch}} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{k,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{k,t}^{\text{ch}}$  分别为  $t$  时刻储能电站  $k$  在电能市场中申报的放电功率和充电功率;  $P_{k,\max}^{\text{dis}}$ 、 $P_{k,\max}^{\text{ch}}$  分别为储能电站  $k$  的最大放电功率和最大充电功率;  $\alpha_{k,t}^{\text{dis}}$ 、 $\alpha_{k,t}^{\text{ch}}$  为 0-1 变量, 分别表示储能电站  $k$  在  $t$  时刻的放电、充电状态。

#### 2) 储能荷电状态约束

$$\begin{cases} S_{k,\min}^{\text{ESS}} \leq S_{k,t}^{\text{ESS}} \leq S_{k,\max}^{\text{ESS}} \\ S_{k,t}^{\text{ESS}} = S_{k,t-1}^{\text{ESS}} + \eta_k^{\text{ch}} \cdot P_{k,t}^{\text{ch}} - 1/\eta_k^{\text{dis}} \cdot P_{k,t}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $S_{k,\max}^{\text{ESS}}$ 、 $S_{k,\min}^{\text{ESS}}$ 、 $S_{k,t}^{\text{ESS}}$  分别表示储能电站  $k$  所允许的最大、最小容量以及其在  $t$  时段的剩余容量;  $\eta_k^{\text{dis}}$ 、 $\eta_k^{\text{ch}}$  分别表示储能电站  $k$  的放电和充电效率。

## 3) 储能申报容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{ch}} + R_{k,t}^{\text{Ecap}} \leq P_{k,\text{max}}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{dis}} + R_{k,t}^{\text{Ecap}} \leq P_{k,\text{max}}^{\text{dis}} \\ 0 \leq R_{k,t}^{\text{Ecap}} \leq R_{k,\text{max}}^{\text{Ecap}} \\ 0 \leq R_{k,t}^{\text{Emil}} \leq R_{k,\text{max}}^{\text{Ecap}} \cdot s_{\text{ess},k}^{\text{mc}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $R_{k,t}^{\text{Ecap}}$ 、 $R_{k,t}^{\text{Emil}}$  分别表示  $t$  时段储能电站  $k$  申报的调频容量和调频里程;  $R_{k,\text{max}}^{\text{Ecap}}$  为储能电站  $k$  的最大调频容量;  $s_{\text{ess},k}^{\text{mc}}$  为储能电站  $k$  的调频里程乘子。

## 4) 储能报价约束

$$\begin{cases} 0 \leq b_{k,t}^{\text{dis}} \leq b_{k,\text{max}}^{\text{dis}} \\ 0 \leq b_{k,t}^{\text{ch}} \leq b_{k,\text{max}}^{\text{ch}} \\ 0 \leq b_{k,t}^{\text{Ecap}} \leq b_{k,\text{max}}^{\text{Ecap}} \\ 0 \leq b_{k,t}^{\text{Emil}} \leq b_{k,\text{max}}^{\text{Emil}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $b_{k,t}^{\text{ch}}$ 、 $b_{k,t}^{\text{dis}}$ 、 $b_{k,t}^{\text{Ecap}}$ 、 $b_{k,t}^{\text{Emil}}$  分别为  $t$  时段储能电站  $k$  申报的充放电价格、调频容量价格和调频里程价格;  $b_{k,\text{max}}^{\text{ch}}$ 、 $b_{k,\text{max}}^{\text{dis}}$ 、 $b_{k,\text{max}}^{\text{Ecap}}$ 、 $b_{k,\text{max}}^{\text{Emil}}$  分别为储能电站  $k$  在电能市场以及调频市场中报价的上限。

## 2.2 下层电能-调频辅助服务市场联合出清模型

在现货市场中, 电力交易中心汇集各市场主体的投标情况后, 进行电能和调频市场的联合出清(本文考虑储能和常规机组均可在能量和调频市场中投标), 出清目标是购电成本和辅助服务费用之和最小。下层电能-调频辅助服务市场联合出清模型表示为

$$\min F_L = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_G} [b_{m,t}^G p_{m,t}^G + b_{m,t}^{\text{Gcap}} r_{m,t}^{\text{Gcap}} + b_{m,t}^{\text{Gmil}} r_{m,t}^{\text{Gmil}}] + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{ESS}}} [b_{k,t}^{\text{dis}} p_{k,t}^{\text{dis}} - b_{k,t}^{\text{ch}} p_{k,t}^{\text{ch}} + b_{k,t}^{\text{Ecap}} r_{k,t}^{\text{Ecap}} + b_{k,t}^{\text{Emil}} r_{k,t}^{\text{Emil}}] \quad (6)$$

式中:  $N_G$  为常规机组数量;  $p_{m,t}^G$ 、 $r_{m,t}^{\text{Gcap}}$ 、 $r_{m,t}^{\text{Gmil}}$  分别为  $t$  时刻机组  $m$  在电能市场中标的发电量以及在调频市场中标的调频容量和调频里程;  $b_{m,t}^G$ 、 $b_{m,t}^{\text{Gcap}}$ 、 $b_{m,t}^{\text{Gmil}}$  分别为  $t$  时刻机组  $m$  申报的发电价格、调频容量价格和调频里程价格。

市场出清需要遵循于出清规则以及电网运行等约束, 具体约束如下所述。

## 1) 电网运行约束

节点功率平衡约束、各线路传输容量约束、平衡节点的相角约束如式(7)一式(9)所示。

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathcal{Q}_i^G(n)} p_{m,t}^G + \sum_{k \in \mathcal{Q}_{\text{ess}}(n)} (p_{k,t}^{\text{dis}} - p_{k,t}^{\text{ch}}) - \sum_{d \in \mathcal{Q}_i^L(n)} p_{d,t}^L = \\ \sum_{q \in \Phi(n)} B_{nq} (\theta_{n,t} - \theta_{q,t}), \quad \forall n, \forall t: \lambda_{n,t} \end{aligned} \quad (7)$$

$$-L_l \leq B_{nq} (\theta_{n,t} - \theta_{q,t}) \leq L_l, \quad (8)$$

$$\forall n, \forall q \in \Psi(n): \pi_{l,t}^{\min}, \pi_{l,t}^{\max} \\ \theta_n = 1: \varepsilon_1, n = 1 \quad (9)$$

式中:  $\Phi_g(n)$ 、 $\Phi_{\text{ess}}(n)$ 、 $\Phi_d(n)$  分别表示位于节点  $n$  上的常规机组、储能电站和电力负荷的集合;  $\Phi(n)$  表示与节点  $n$  相连的所有节点集合;  $\Psi(n)$  表示所有与节点  $n$  相连的支路;  $p_{n,t}^L$  表示节点  $n$  在  $t$  时刻的负荷;  $B_{nq}$  为节点  $n$  和  $q$  之间的线路导纳;  $\theta_{n,t}$  和  $\theta_{q,t}$  分别表示  $t$  时刻节点  $n$ 、 $q$  的相角;  $L_l$  表示线路  $l$  的传输容量极限;  $\lambda_{n,t}$ 、 $\pi_{l,t}^{\min}$ 、 $\pi_{l,t}^{\max}$ 、 $\varepsilon_1$  分别为各个约束对应的对偶变量。

## 2) 调频容量、里程需求约束

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{N_G} r_{m,t}^{\text{Gcap}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{ESS}}} r_{k,t}^{\text{Ecap}} = R_t^{\text{SYS}}: \lambda_t^{\text{cap}} \\ \sum_{m=1}^{N_G} r_{m,t}^{\text{Gmil}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{ESS}}} r_{k,t}^{\text{Emil}} = M_t^{\text{SYS}}: \lambda_t^{\text{mil}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $R_t^{\text{SYS}}$ 、 $M_t^{\text{SYS}}$  分别表示系统的调频容量需求和调频里程需求; 对偶变量  $\lambda_t^{\text{cap}}$  和  $\lambda_t^{\text{mil}}$  即为  $t$  时刻的调频容量、里程出清价格。

## 3) 市场出清规则约束

储能电站和常规机组的中标容量约束、中标里程约束、储能电站的充放电功率约束以及常规机组出力约束分别如式(11)一式(14)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq p_{k,t}^{\text{dis}} \leq P_{k,t}^{\text{dis}}: \omega_{k,t}^{\text{dis},\min}, \omega_{k,t}^{\text{dis},\max} \\ 0 \leq p_{k,t}^{\text{ch}} \leq P_{k,t}^{\text{ch}}: \omega_{k,t}^{\text{ch},\min}, \omega_{k,t}^{\text{ch},\max} \\ 0 \leq r_{k,t}^{\text{Ecap}} \leq R_{k,t}^{\text{Ecap}}: \omega_{k,t}^{\text{cap},\min}, \omega_{k,t}^{\text{cap},\max} \\ 0 \leq r_{k,t}^{\text{Emil}} \leq R_{k,t}^{\text{Emil}}: \omega_{k,t}^{\text{mil},\min}, \omega_{k,t}^{\text{mil},\max} \\ 0 \leq r_{m,t}^{\text{Gcap}} \leq R_{m,t}^{\text{Gcap}}: \nu_{m,t}^{\text{cap},\min}, \nu_{m,t}^{\text{cap},\max} \\ 0 \leq r_{m,t}^{\text{Gmil}} \leq R_{m,t}^{\text{Gmil}}: \nu_{m,t}^{\text{mil},\min}, \nu_{m,t}^{\text{mil},\max} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq r_{k,t}^{\text{Emil}} \leq s_{\text{ess},k}^{\text{mc}} r_{k,t}^{\text{Ecap}}: \sigma_{k,t}^{\text{mc},\min}, \sigma_{k,t}^{\text{mc},\max} \\ 0 \leq r_{m,t}^{\text{Gmil}} \leq s_{g,m}^{\text{mc}} r_{m,t}^{\text{Gcap}}: \zeta_{m,t}^{\text{mc},\min}, \zeta_{m,t}^{\text{mc},\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_{k,t}^{\text{dis}} \leq P_{k,\text{max}}^{\text{dis}} - r_{k,t}^{\text{Ecap}}: \mu_{k,t}^{\text{dis},\max} \\ p_{k,t}^{\text{ch}} \leq P_{k,\text{max}}^{\text{ch}} - r_{k,t}^{\text{Ecap}}: \mu_{k,t}^{\text{ch},\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} p_{m,t}^G \geq P_{m,\text{min}}^G + r_{m,t}^{\text{Gcap}}: \beta_{m,t}^{\text{g},\min} \\ p_{m,t}^G \leq P_{m,\text{max}}^G - r_{m,t}^{\text{Gcap}}: \beta_{m,t}^{\text{g},\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{m,\text{max}}^G$ 、 $P_{m,\text{min}}^G$  分别为常规机组  $m$  的有功出力上下限;  $s_{g,m}^{\text{mc}}$  为机组  $m$  的调频里程乘子;  $\omega_{k,t}^{\text{dis},\min}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{dis},\max}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{ch},\min}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{ch},\max}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{cap},\min}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{cap},\max}$ 、

$\omega_{k,t}^{\text{mil,min}}$ 、 $\omega_{k,t}^{\text{mil,max}}$ 、 $\nu_{m,t}^{\text{cap,min}}$ 、 $\nu_{m,t}^{\text{cap,max}}$ 、 $\nu_{m,t}^{\text{mil,min}}$ 、 $\nu_{m,t}^{\text{mil,max}}$ 、 $\sigma_{k,t}^{\text{mc,min}}$ 、 $\sigma_{k,t}^{\text{mc,max}}$ 、 $\zeta_{m,t}^{\text{mc,min}}$ 、 $\zeta_{m,t}^{\text{mc,max}}$ 、 $\mu_{k,t}^{\text{dis,max}}$ 、 $\mu_{k,t}^{\text{ch,max}}$ 、 $\beta_{m,t}^{\text{g,min}}$ 、 $\beta_{m,t}^{\text{g,max}}$  分别表示对应约束条件的对偶变量。

### 3 模型转化与求解

本文建立双层模型旨在分别考虑储能电站收益和现货市场运营的社会效益, 但上下层模型之间存在较强的耦合关系, 且模型中含有非线性项, 难以直接求解。在所构建的双层模型中, 下层模型为市场出清构成的线性规划问题, 可以采用 KKT 条件和对偶理论将其替换成上层问题的约束条件, 并将双层模型等价转化为一个单层的优化模型。

基于 KKT 条件将下层模型转化为上层模型的附加约束, 转化后得到的单层模型如下所述。

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{ESS}}} (\lambda_t (p_{k,t}^{\text{dis}} - p_{k,t}^{\text{ch}}) + \lambda_t^{\text{cap}} r_{k,t}^{\text{Ecap}} + \lambda_t^{\text{mil}} r_{k,t}^{\text{Emil}}) \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad (2)-(5), (7), (9)-(10) \quad (16)$$

$$b_{m,t}^{\text{G}} - \lambda_{n,t} + \beta_{m,t}^{\text{g,max}} - \beta_{m,t}^{\text{g,min}} = 0 \quad (17)$$

$$b_{k,t}^{\text{dis}} - \lambda_{n,t} + \omega_{k,t}^{\text{dis,max}} - \omega_{k,t}^{\text{dis,min}} + \mu_{k,t}^{\text{dis,max}} = 0 \quad (18)$$

$$-b_{k,t}^{\text{ch}} + \lambda_{n,t} + \omega_{k,t}^{\text{ch,max}} - \omega_{k,t}^{\text{ch,min}} + \mu_{k,t}^{\text{ch,max}} = 0 \quad (19)$$

$$b_{k,t}^{\text{Ecap}} - \lambda_t^{\text{cap}} + \omega_{k,t}^{\text{cap,max}} - \omega_{k,t}^{\text{cap,min}} + \mu_{k,t}^{\text{dis,max}} + \mu_{k,t}^{\text{ch,max}} - \sigma_{k,t}^{\text{mc,max}} \cdot s_{\text{ess},k}^{\text{mc}} = 0 \quad (20)$$

$$b_{m,t}^{\text{Gcap}} - \lambda_t^{\text{cap}} + \beta_{m,t}^{\text{g,max}} + \beta_{m,t}^{\text{g,min}} + \nu_{m,t}^{\text{cap,max}} - \nu_{m,t}^{\text{cap,min}} - \zeta_{m,t}^{\text{mc,max}} \cdot s_{g,m}^{\text{mc}} = 0 \quad (21)$$

$$b_{k,t}^{\text{Emil}} - \lambda_t^{\text{mil}} + \omega_{k,t}^{\text{mil,max}} - \omega_{k,t}^{\text{mil,min}} + \sigma_{k,t}^{\text{mc,max}} - \sigma_{k,t}^{\text{mc,min}} = 0 \quad (22)$$

$$b_{m,t}^{\text{Gmil}} - \lambda_t^{\text{mil}} + \nu_{m,t}^{\text{mil,max}} - \nu_{m,t}^{\text{mil,min}} + \zeta_{m,t}^{\text{mc,max}} - \zeta_{m,t}^{\text{mc,min}} = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{q \in \phi(n)} B_{nq} (\lambda_{n,t} - \lambda_{q,t}) + \sum_{n \in \psi_1(n)} B_{nq} (\pi_{l,t}^{\text{max}} - \pi_{l,t}^{\text{min}}) - \sum_{n \in \psi_2(n)} B_{qn} (\pi_{l,t}^{\text{max}} - \pi_{l,t}^{\text{min}}) - (\varepsilon_l)_{n=1} = 0 \quad (24)$$

$$0 \leq \pi_{l,t}^{\text{min}} \perp [B_{nq} (\theta_{n,t} - \theta_{q,t}) + L_l] \geq 0 \quad (25)$$

$$0 \leq \pi_{l,t}^{\text{max}} \perp [L_l - B_{nq} (\theta_{n,t} - \theta_{q,t})] \geq 0 \quad (26)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{dis,min}} \perp p_{k,t}^{\text{dis}} \geq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{dis,max}} \perp (P_{k,t}^{\text{dis}} - p_{k,t}^{\text{dis}}) \geq 0 \quad (28)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{ch,min}} \perp p_{k,t}^{\text{ch}} \geq 0 \quad (29)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{ch,max}} \perp (P_{k,t}^{\text{ch}} - p_{k,t}^{\text{ch}}) \geq 0 \quad (30)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{cap,min}} \perp r_{k,t}^{\text{Ecap}} \geq 0 \quad (31)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{cap,max}} \perp (R_{k,t}^{\text{Ecap}} - r_{k,t}^{\text{Ecap}}) \geq 0 \quad (32)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{mil,min}} \perp r_{k,t}^{\text{Emil}} \geq 0 \quad (33)$$

$$0 \leq \omega_{k,t}^{\text{mil,max}} \perp (R_{k,t}^{\text{Emil}} - r_{k,t}^{\text{Emil}}) \geq 0 \quad (34)$$

$$0 \leq \nu_{m,t}^{\text{cap,min}} \perp r_{m,t}^{\text{Gcap}} \geq 0 \quad (35)$$

$$0 \leq \nu_{m,t}^{\text{cap,max}} \perp (R_{m,t}^{\text{Gcap}} - r_{m,t}^{\text{Gcap}}) \geq 0 \quad (36)$$

$$0 \leq \nu_{m,t}^{\text{mil,min}} \perp r_{m,t}^{\text{Gmil}} \geq 0 \quad (37)$$

$$0 \leq \nu_{m,t}^{\text{mil,max}} \perp (R_{m,t}^{\text{Gmil}} - r_{m,t}^{\text{Gmil}}) \geq 0 \quad (38)$$

$$0 \leq \sigma_{k,t}^{\text{mc,min}} \perp r_{k,t}^{\text{Emil}} \geq 0 \quad (39)$$

$$0 \leq \sigma_{k,t}^{\text{mc,max}} \perp (r_{k,t}^{\text{Ecap}} \cdot s_{\text{ess},k}^{\text{mc}} - r_{k,t}^{\text{Emil}}) \geq 0 \quad (40)$$

$$0 \leq \zeta_{m,t}^{\text{mc,min}} \perp r_{m,t}^{\text{Gmil}} \geq 0 \quad (41)$$

$$0 \leq \zeta_{m,t}^{\text{mc,max}} \perp (r_{m,t}^{\text{Gcap}} \cdot s_{g,m}^{\text{mc}} - r_{m,t}^{\text{Gmil}}) \geq 0 \quad (42)$$

$$0 \leq \mu_{k,t}^{\text{dis,max}} \perp (P_{k,t}^{\text{dis}} - r_{k,t}^{\text{Ecap}} - p_{k,t}^{\text{dis}}) \geq 0 \quad (43)$$

$$0 \leq \mu_{k,t}^{\text{ch,max}} \perp (P_{k,t}^{\text{ch}} - r_{k,t}^{\text{Ecap}} - p_{k,t}^{\text{ch}}) \geq 0 \quad (44)$$

$$0 \leq \beta_{m,t}^{\text{g,min}} \perp (p_{m,t}^{\text{G}} - P_{m,t}^{\text{G}} - r_{m,t}^{\text{Gcap}}) \geq 0 \quad (45)$$

$$0 \leq \beta_{m,t}^{\text{g,max}} \perp (P_{m,t}^{\text{G}} - r_{m,t}^{\text{Gcap}} - p_{m,t}^{\text{G}}) \geq 0 \quad (46)$$

经转化得到的单层模型中, 存在两部分非线性项: 一是互补约束条件式(25)式(46); 二是目标函数式(15)中对偶变量和决策变量相乘所产生的非线性项。上述非线性项的线性化过程如下所述。

#### 1) 互补约束式(25)式(46)线性化

在上述 KKT 最优条件模型中, 约束仍然呈非线性, 可以利用大 M 法对其进行线性化。通过引入 0-1 变量, 可将形如  $0 \leq a - f \perp b \geq 0$  的互补约束条件转化为

$$\begin{cases} a - f \leq M \cdot v \\ b \leq M \cdot (1 - v) \end{cases} \quad (47)$$

式中:  $M$  为足够大的常数;  $v$  为 0-1 变量。

#### 2) 目标函数式(15)线性化

对于原始目标函数中的非线性项, 引入文献 [26] 的方法, 基于强对偶理论和 KKT 最优条件将目标函数线性化。线性化后得到的目标函数表示为

$$\min \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{N_G} (b_{m,t}^{\text{G}} p_{m,t}^{\text{G}} + b_{m,t}^{\text{Gcap}} r_{m,t}^{\text{Gcap}} + b_{m,t}^{\text{Gmil}} r_{m,t}^{\text{Gmil}}) + \\ & \sum_{l=1}^{N_l} [(\pi_{l,t}^{\text{max}} + \pi_{l,t}^{\text{min}}) L_l] + \\ & \sum_{m=1}^{N_G} (\beta_{m,t}^{\text{g,max}} P_{m,t}^{\text{G}} - \beta_{m,t}^{\text{g,min}} P_{m,t}^{\text{G}}) - \\ & \lambda_t^{\text{cap}} R_t^{\text{SYS}} - \lambda_t^{\text{mil}} M_t^{\text{SYS}} + \\ & \sum_{m=1}^{N_G} (\nu_{m,t}^{\text{cap,max}} R_{m,t}^{\text{Gcap}} + \nu_{m,t}^{\text{mil,max}} R_{m,t}^{\text{Gmil}}) - \\ & \sum_{d \in Q_0(n)} \lambda_{n,t} p_{d,t}^{\text{L}} \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

通过对目标函数和约束条件中的非线性项进行

线性化，得到转化后的单层模型属于 MILP 问题，可以调用商业求解器进行有效求解。

### 4 算例分析

本文基于修改的 IEEE-30 节点系统验证上述所提双层模型和求解算法的有效性。IEEE-30 节点系统的拓扑结构如图 2 所示，包含 41 条线路、20 个负荷节点和 6 台常规机组。

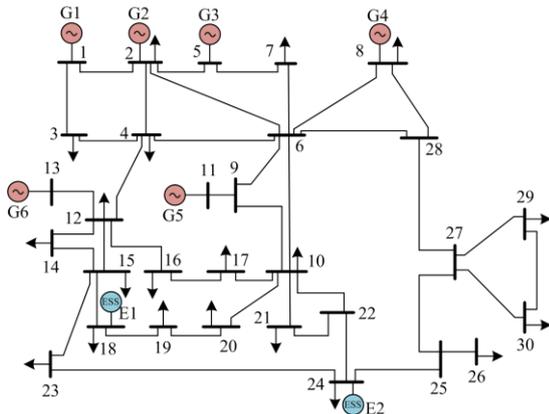


图 2 IEEE-30 节点系统拓扑结构示意图

Fig. 2 Topology diagram of IEEE-30 bus system

系统的日负荷曲线如图 3 所示，所有电力负荷按各节点负荷占比分配到每一个负荷节点上。在 18、24 节点处分别增设一台 20 MW/60 MWh 和 10 MW/40 MWh 的储能，充放电效率均设为 90%，最大、最小允许电量分别为储能容量的 90% 和 10%。表 1 给出了各台机组的报价信息和储能电站的详细参数<sup>[23]</sup>。假设系统总调频需求等于总负荷的 5%。

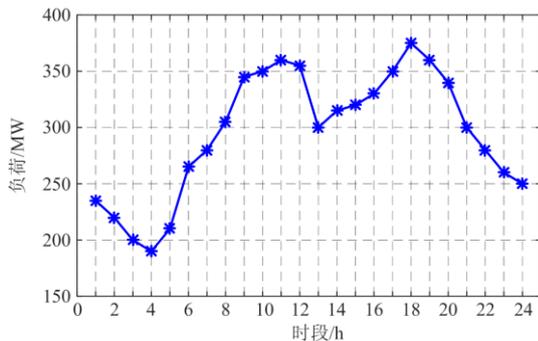


图 3 系统日负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve

#### 4.1 电能量-调频辅助服务市场中标情况

储能电站在同时参与电能量与调频市场交易时，可以获得电能量收益以及调频辅助服务收益。图 4 给出了各台机组和储能电站在电能量市场上的中标情况。

表 1 常规机组申报信息

Table 1 Bidding information of conventional units

机组	G1	G2	G3	G4	G5	G6
额定功率/MW	150	110	60	80	40	40
发电报价/(元/MWh)	191	183	201	190	230	192
调频容量报价/(元/MWh)	14	12	16	14	15	12
调频里程报价/(元/MWh)	12	15	15	18	14	16
里程-容量比	7	12	7	9	8	12

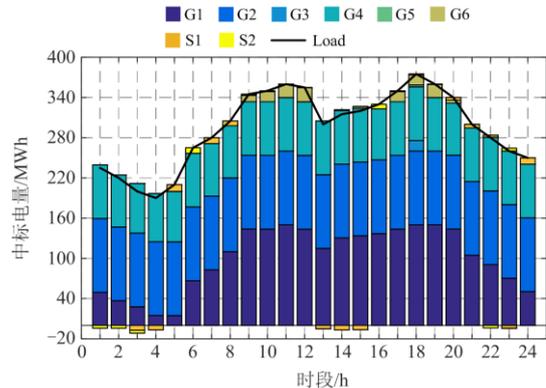


图 4 电能量市场中标情况

Fig. 4 Bidding results in energy market

由图 4 可以看出，电能量需求几乎全部由常规火电机组来承担，常规机组在各个时段的累计出力约占总发电量的 99%，表明了常规机组参与电能量市场的普遍性。此外，从图 4 中还可以看出，机组 G2 和 G4 在所有时段几乎全部满发，这是由于 G2 和 G4 的报价低而优先发电，而当机组出力达到上限时，再由报价相对较低的 G1 补发，以满足负荷需求。储能电站在能量市场上的参与度较低，总发电量仅占能量需求的 1% 左右。在负荷水平较低的 1—4、13—15 和 22—23 时段，储能电站可以进行策略性充电，以补充自身放电所消耗的电能量，使其能够充分地参与调频市场，获得调频收益。

储能在调频辅助服务市场上各个时段的中标情况如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出，与常规机组相比，储能电站承担了相当大一部分调频任务，其中两台储能提供的调频容量占系统总调频容量需求的 81.56%，调频里程占总需求的 95.88%。由于储能电站的调频里程-容量因子更高，与常规机组相比，在提供相同调频容量时，可以提供比常规机组更多的调频里程，因此调频响应能力更强的储能电站在调频辅助服务市场上会被优先调用来提供调频服务。除此之外，储能还可以通过策略性报价来均衡在能量市场和调频市场上的中标情况，以实现利益最大化。

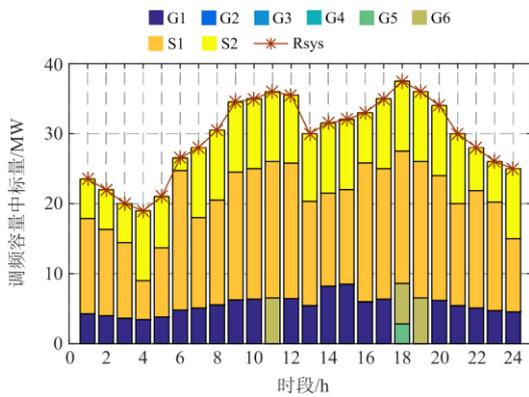


图 5 调频容量中标情况

Fig. 5 Bidding results of frequency modulation capacity

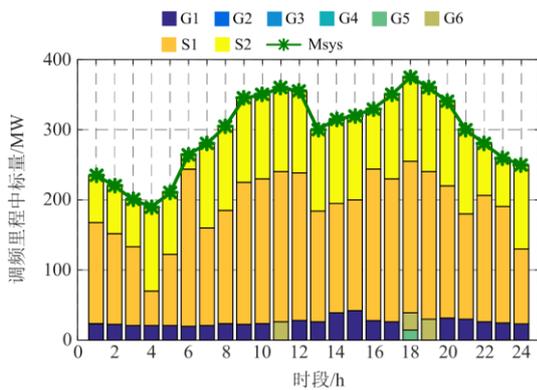


图 6 调频里程中标情况

Fig. 6 Bidding results of frequency modulation mileage

#### 4.2 电能-调频辅助服务市场出清价格

电能市场的出清价格为电网各个时段的 LMP, 如图 7 所示。

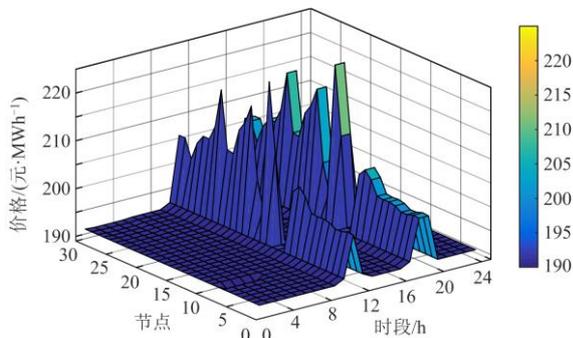


图 7 电能市场出清价格

Fig. 7 Clearing price of energy market

每个节点在各个时段的 LMP 与负荷大小大致呈正相关, 说明 LMP 可以体现出电能的供需关系。在 10、18 和 19 时段, 系统处于电力需求高峰期, LMP 随负荷突增而大幅度提高。与此同时, 在

10、18 和 19 时段电网各个节点的 LMP 出现比较明显的差异。这是由于负荷增大, 机组出力增加, 电网中部分线路传输功率达到上限, 致使电力网络出现阻塞现象。而在其他时段, 由于无网络阻塞, 所有节点的 LMP 基本相同。

图 8 给出了调频辅助服务市场的出清价格。从图中可以看出, 调频容量和调频里程的出清价格基本与电网调频需求的变化趋势相近。由图 5 和图 6 可知, 在本文设置的场景下, 各个时段均有常规机组在调频辅助服务市场内中标, 此时调频辅助服务市场的出清价格等同于提供调频服务的边际机组的报价。需要说明的是, 若在某个特殊场景下常规机组只参与电能量市场, 而均未在调频市场内中标, 则此时辅助服务市场的出清价格将不同于任一机组的报价。

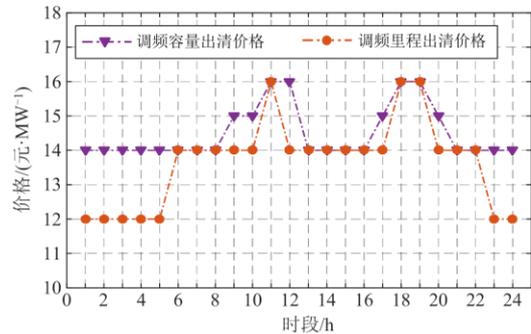


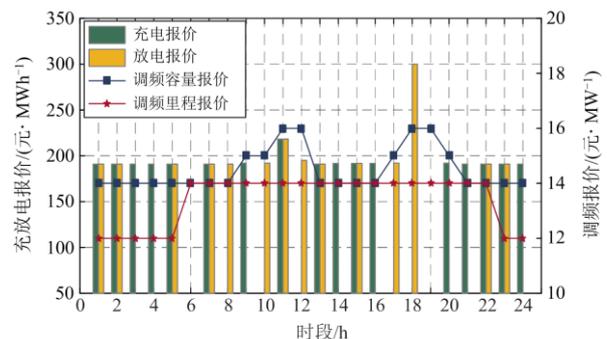
图 8 调频辅助服务市场出清价格

Fig. 8 Clearing price of frequency modulation ancillary service market

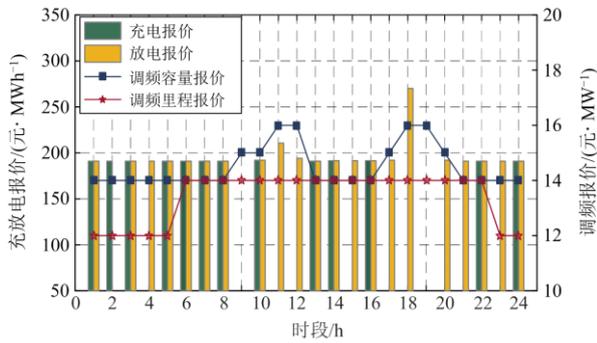
#### 4.3 储能电站报价策略

储能电站在电能量和调频市场上的最优报价如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 储能电站在不同类型市场上的报价策略有所差异, 2 台储能电站在调频辅助服务市场的报价完全相同, 而在能量市场中的报价存在差异。这是由于储能电站综合考虑了其他主体的报价策略以及自身运行特性, 在市场中进行策略性



(a) 储能电站S1报价策略



(b) 储能电站S2报价策略

图9 储能电站最优报价策略

Fig. 9 Optimal bidding strategy of energy storage station

报价, 以实现自身收益的最大化。同时, 可以看出虽然两台储能电站在调频市场中的报价策略相同, 但是由于其相关参数以及调频性能的不同, 导致图5和图6中所示的每台储能电站在调频市场中的中标结果并不相同。

#### 4.4 储能电站效益分析

表2列出了储能电站在只参与电能市场和同时参与电能与调频辅助服务市场两种情况下的整体收益。表2中所示的储能电站各部分收益按照相应的市场出清价格进行结算。可见, 储能电站同时参与电能和调频市场将获得更高的收益, 且2台储能在调频辅助市场中的收益分别占各自总收益的81.7%和82.5%, 均远大于在能量市场中获得的收益。假设每台储能电站的成本为200万元/MWh<sup>[23]</sup>, 则2台储能的总成本为2亿元。根据表2中的储能电站日收益结果可知, 在储能电站同时参与电能和调频辅助服务市场的情况下, 约4~5年可实现成本回收并盈利, 若储能电站只参与电能市场, 则需9年才能回收成本, 说明储能参与调频辅助服务市场可以加快其成本回收。综上所述, 储能主动参与调频辅助服务能够获取更高的经济效益, 调频辅助服务市场的应用对储能电站的发展具有激励作用。

表2 储能参与不同市场时的收益情况

Table 2 Profits of energy storage participating in different markets

收益/元	只参与电能市场		同时参与电能和调频市场	
	S1	S2	S1	S2
电能收益	$4.03 \times 10^4$	$2.03 \times 10^4$	$8.36 \times 10^3$	$3.88 \times 10^3$
调频容量收益	—	—	$5.60 \times 10^3$	$2.84 \times 10^3$
调频里程收益	—	—	$6.27 \times 10^4$	$3.15 \times 10^4$
总收益	$4.03 \times 10^4$	$2.03 \times 10^4$	$7.67 \times 10^4$	$3.82 \times 10^4$

为了分析不同储能接入位置对市场运行结果的影响, 在2台储能电站的运行参数相同的情况下, 对如下两种场景的储能中标量以及收益进行分析,

市场运行结果见表3。

表3 储能接入位置不同时市场运行结果

Table 3 Market operation results with different locations of energy storage

场景	调频容量		调频里程		储能调频	
	中标量/MW		中标量/( $\times 10^3$ MW)		收益/( $\times 10^4$ 元)	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
1	316.19	264.31	3.79	3.17	5.63	4.66
2	295.73	284.77	3.55	3.412	5.27	5.03

场景1: 2台储能电站分别接入18、24节点;

场景2: 2台储能电站分别接入18、15节点。

由表3可知, 当储能电站的接入点发生变化时, 储能在调频市场的中标情况以及收益情况也随之变化。这说明, 储能安装位置影响了电网整体运行状态, 同时对市场运行结果也产生相应的影响。由此可知, 合理规划储能在系统中的安装位置对改善系统调频效果并提高储能的经济效益具有一定意义。

## 5 结论

本文构建了一种储能电站参与现货电能和调频辅助服务市场的双层交易决策模型。首先, 提出了储能电站参与现货电能和调频辅助服务市场的交易模式与市场架构; 其次, 结合电能和调频市场的补偿与结算机制, 从储能电站的角度出发, 提出了储能参与市场交易的双层决策模型, 模拟储能电站在不同市场中的报价行为以及市场出清过程; 最后, 通过算例分析验证了所提模型的有效性, 并分析储能参与市场的经济效益。具体结论如下:

1) 本文所提双层交易决策模型充分考虑了各市场主体的报价信息以及电能和调频市场之间的耦合关系, 实现了储能电站在同时参与电能和调频辅助服务市场时的策略性竞价, 达到自身利益最大化。

2) 储能电站在同时参与电能和调频辅助服务市场时, 将更多的电量用于提供调频服务从而获得相应收益。同时储能由于其较好的调频性能, 在调频市场中优先被调用, 可以承担系统70%以上的调频任务。

3) 与仅参与电能市场相比, 储能同时参与电能和调频辅助服务市场可以获得更高的经济效益, 且其在调频辅助市场中的收益占总收益的80%以上。储能参与调频辅助服务市场可以加快实现其成本回收。

在后续的工作中, 将进一步考虑储能在实时市场中的运行状态, 针对日前和实时市场的强耦合性, 提出储能参与日前-实时市场的交易决策方案; 研究

过程中发现储能参与辅助服务市场可以获得更高收益并加快成本回收, 因此, 应该进一步完善市场交易机制, 提高储能参与辅助服务的积极性, 激励储能的发展。

## 参考文献

- [1] 胡泽春, 罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.  
HU Zechun, LUO Haocheng. Research status and prospect of automatic generation control with integration of large-scale renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 2-15.
- [2] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.  
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [3] 武昭原, 周明, 姚尚润, 等. 基于合作博弈论的风储联合参与现货市场优化运行策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2815-2824.  
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, YAO Shangrun, et al. Optimization operation strategy of wind-storage coalition in spot market based on cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2815-2824.
- [4] 尹琦琳, 秦文萍, 于浩, 等. 计及风电波动性和电动汽车随机性的电力现货市场交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 118-127.  
YIN Qilin, QIN Wenping, YU Hao, et al. Transaction model for electricity spot market considering the volatility of wind power and the randomness of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 118-127.
- [5] 苏烨, 石剑涛, 张江丰, 等. 考虑调频的储能规划与竞价策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 191-198.  
SU Ye, SHI Jiantao, ZHANG Jiangfeng, et al. Review on planning and bidding strategy of energy storage considering frequency regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 191-198.
- [6] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.  
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(23): 15-25.
- [7] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 1-10.  
LI Junhui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10.
- [8] 张鸿宇, 王宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 766-773.  
ZHANG Hongyu, WANG Yu. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 766-773.
- [9] 陈大字, 张粒子, 王澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 9-13.  
CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of united states and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13.
- [10] 朱继忠, 叶秋子, 邹金, 等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 1-9, 86.  
ZHU Jizhong, YE Qiuqi, ZOU Jin, et al. Short-term operation service mechanism of ancillary service in the UK electricity market and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 1-9, 86.
- [11] 国家发展改革委办公厅, 科技部办公厅, 工业和信息化部办公厅, 能源局综合司. 贯彻落实<关于促进储能技术与产业发展的指导意见>2019-2020 年行动计划的通知(发改办能源〔2019〕725 号)[Z]. 2019.
- [12] 陈浩, 贾燕冰, 郑晋, 等. 规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3606-3617.  
CHEN Hao, JIA Yanbing, ZHENG Jin, et al. Research on market mechanism and scheduling strategy of frequency regulation auxiliary service of large-scale energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3606-3617.
- [13] 胡静, 黄碧斌, 蒋莉萍, 等. 适应电力市场环境下的电化学储能应用及关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 100-107.  
HU Jing, HUANG Bibin, JIANG Liping, et al. Application and major issues of electrochemical energy storage under the environment of power market[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 100-107.

- [14] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 963-972.  
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972.
- [15] 黄际元, 李欣然, 常敏, 等. 考虑储能电池参与一次调频技术经济模型的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 112-121.  
HUANG Jiyuan, LI Xinran, CHANG Min, et al. Capacity allocation of BESS in primary frequency regulation considering its technical-economic model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 112-121.
- [16] 赵伟, 袁锡莲, 周宜行, 等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 16-24.  
ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 16-24.
- [17] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3897-3908.  
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [18] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36-43.  
YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43.
- [19] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 基于灵敏度分析的储能电池参与二次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 224-233.  
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Battery energy storage control strategy in secondary frequency regulation considering its action moment and depth[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 224-233.
- [20] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 储能参与电力市场机制: 现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 14-28.  
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Electricity market mechanism for energy storage participation: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.
- [21] CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. An improved market mechanism for energy storage based on flexible state of energy[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 838-848.
- [22] XU Bolun, SHI Yuanyuan, KISCHEN D S, et al. Optimal battery participation in frequency regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6715-6725.
- [23] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 167-180.  
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180.
- [24] ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Evaluating the contribution of energy storages to support large-scale renewable generation in joint energy and ancillary service markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 808-818.
- [25] KRISHNAMURTHY D, UCKUN C, ZHOU Z, et al. Energy storage arbitrage under day-ahead and real-time price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 84-93.
- [26] MOUSA M, JAVADI M, DOM ÍNGUEZ-GARC ÍA L J, et al. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2999-3009.

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2021-12-11

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、新能源发电与储能技术、柔性直流输电技术; E-mail: lgq@neepu.edu.cn

闫克非(1997—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统频率稳定性分析与控制、电力系统优化运行; E-mail: kfYAN@aliyun.com

范高锋(1977—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源、储能调度运行管理。E-mail: fan-gaofeng@sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)