电能量-调频-惯量联合市场下电化学储能构网型改造策略

胡涛[1]，闫志彬[2]，齐屹[3]，靳盘龙[3]，张恒[4]，肖云鹏[1]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安市 710049；2. 国网宁夏电力有限公司，银川市 750001；3. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院，银川市 750001；4. 国网山东省电力公司临沂供电公司，山东省临沂市 276005）

摘　要：【目的】针对在弱电力系统中直接投建构网型储能面临投资成本高和投资回收周期长等问题，考虑多元市场的价值激励，在已有跟网型电化学储能的基础上，提出了一种计及电能量-调频-惯量联合市场下的电化学储能构网型改造策略优化方法。【方法】在包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架基础上，从电化学储能运营商的视角出发，计及电化学储能构网型改造成本，建立了电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场的交易决策双层模型。其中，上层模型以储能收益最大为目标进行市场交易决策以及优化构网型改造策略，下层模型模拟电能量、调频和惯量市场的联合出清过程。针对计及火电机组启停状态导致下层市场出清非凸的问题，通过松弛处理，并基于对偶理论进行原始-对偶重构，将其转化为单层混合整数规划问题求解。【结果】算例分析表明，在计及多元市场价值激励下，构网型改造后电化学储能运营商的净收益增加了 94 772.32 元，增幅高达 73.5%，同时系统运行成本下降约 0.2%；当系统风电装机规模增加 50% 时，电化学储能运营商的最优构网型改造比例由 29% 增加至 64%，净收益增加量提高至 204 746.46 元，系统总运行成本减少量增加至 385 667.39 元。【结论】该方法可有效激励跟网型电化学储能进行构网型改造，并通过减少高边际成本火电机组开机，提升系统整体社会福利水平，同时，随着系统新能源占比的提高，电化学储能构网型改造需求将进一步增大。

关键词：电力市场；惯量；电化学储能；构网型改造；对偶
中图分类号：TM622　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-7229（2026）03-0170-15
DOI：10.12204/j.issn.1000-7229.2026.03.014

Study of Method for Grid-Forming Transformation of Electrochemical Energy Storage in the Electric Energy-Frequency Regulation-Inertia Joint Market

HU Tao[1], YAN Zhibin[2], QI Yi[3], JIN Panlong[3], ZHANG Heng[4], XIAO Yunpeng[1]
（1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 3. Economic and Technical Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 4. Linyi Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Linyi 276005, Shandong Province, China）

ABSTRACT: [**Objective**] In response to the high investment cost and long investment payback period when grid-forming energy storage is directly constructed in weak power systems, and in consideration of the value incentives of multiple markets, a decision-making method for the grid-forming transformation of electrochemical energy storage based on the existing grid-following electrochemical energy storage is proposed in the context of the electric energy-frequency regulation-inertia joint market. [**Methods**] Based on the trading framework of the electric energy-frequency regulation-inertia joint market which includes electrochemical energy storage, and from the perspective of electrochemical energy storage operators, a bilevel model for electrochemical energy storage integration in the joint market is established, taking into account the cost of grid-forming transformation of electrochemical energy storage. The upper-level model aims to maximize the revenue of energy storage for market trading and grid-forming transformation decisions. The lower-level model simulates the joint clearing

基金项目：国家电网公司总部科技项目（1400-202435281A-1-1-ZN）

© Editorial Department of Electric Power Construction. OA under CC BY-NC-ND 4.0.

process of the electric energy, frequency regulation, and inertia markets. To address the non-convexity of the lower-level market clearing caused by the start-up and shutdown states of thermal power units, the problem is relaxed and reconstructed using duality theory to transform it into a single-level mixed-integer programming problem for solution. [**Results**] The case study analysis indicates that, under the incentive of the value of multiple markets, the net revenue of electrochemical energy storage operators increased by 94 772. 32 yuan after the grid-forming transformation, with an increase of as high as 73. 5%, while the system operating cost decreased by about 0. 2%. When the installed capacity of wind power in the system increased by 50%, the optimal proportion of grid-forming transformation of electrochemical energy storage operators increased from 29% to 64%, the increase in net revenue rose to 04,746. 46 yuan, and the reduction in the total system operating cost increased to 85,667. 39 yuan. [**Conclusions**] The method effectively incentivizes grid-following electrochemical energy storage systems to undergo grid-forming transformation, displacing high-marginal-cost thermal power units and thereby raising aggregate social welfare. As the share of renewable generation increases, the economic case for such transformation is further strengthened.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(No. 1400-202435281A-1-1-ZN).

KEYWORDS: electricity market; inertia; electrochemical energy storage; grid-forming transformation; duality

0　引　言

随着我国“双碳”目标的扎实推进，新能源装机规模及发电量占比逐年提升，电力系统呈现出高比例新能源接入、高比例电力电子设备的“双高”特征[1]。与传统同步发电机主导的电力系统不同，高比例新能源的渗透将导致系统惯量显著降低[2]，增加了系统在频率快速变化与大频率偏差下的低频切负荷或高频切机的可能性。

构网型储能不仅可以有效改善高比例新能源电网转动惯量缺失的问题[3]，还可以提供平抑新能源波动、削峰填谷以及频率调节等服务[4-5]。与现有大多数基于跟网型变流器的电化学储能不同，构网型储能采用构网型变流器[6-7]，通过构网型控制策略模拟传统同步发电机的惯量响应能力，使得其具备主动惯量支撑能力[8]。因此，为了提高弱电力系统的惯量支撑能力和稳定性[9-12]，配置构网型电化学储能是一种有效的解决方案。

在构网型储能配置方面，不少学者已开展了广泛研究。为满足高比例新能源电力系统的调节需求，文献[13]提出了一种基于多时间尺度调节的构网型储能优化配置方法，该方法显著提升了系统的惯量水平。文献[14]为满足新能源多场站短路比的需求，提出了一种计及短路比约束的构网型储能与分布式调相机协同优化配置方法。文献[15]提出了一种基于电压脆弱性指标和轨迹灵敏度的构网型储能配置方法，以解决新能源集中接入带来的电压稳定问题。文献[16]提出了计及惯量响应与一次调频参数优化的构网型储能双层优化配置方法，其中上层确定构网型储能的配置方案，下层对该配置方案的频率稳定性进行校验，以充分发挥构网型储能的频率支撑能力并提升偏远新能源基地的频率稳定性。文献[17]为提高配电网的分布式光伏消纳能力和可靠性，同样建立了构网型储能选址定容双层优化模型，上层为提高配电网可靠性的储能选址模型，下层为提升分布式光伏消纳的储能定容模型。文献[18]为解决大规模新能源接入引发的宽频振荡问题，提出了一种计及系统稳定性和经济性的构网型储能选址定容方法。然而，在电网侧直接投建构网型电化学储能面临投资成本高和投资回收周期长等经济性挑战[19]。为此，从利益驱动型电化学储能运营商的视角出发，对现有跟网型电化学储能进行构网型改造不失为一种经济可行的解决方案。其涉及的构网型改造策略是指在保留原有储能电池系统的前提下，将一定比例跟网型变流器替换为构网型变流器，通过跟网型和构网型储能的混合配置，以最小增量成本满足系统对构网型储能的需求，实现投资成本的大幅降低。目前，为实现高比例新能源背景下“柔性构网、主动支撑”的目标，新华发电莎车200 MW储能电站已完成构网型改造并成功并网[20]，成为新疆首个大规模储能系统从“跟网型”向“构网型”转变的典型示范案例。

《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》的发布[21]，标志着我国新一轮电力体制改革正式拉开帷幕，电力市场改革进入新阶段。在电力市场持续深化改革的浪潮下，电化学储能参与电力市场并从中获利[22]，已然成为未来发展的必然趋势。目前，学术界已开展了大量关于电化学储能参与电力市场的研究，其中，在电化学储能参与电力市场的机制设计方面，为突出储能在调频辅助服务市场中的性能优势，文献[23]考虑调节精度、响应时间和调节速度等调频性能指标，设计了适应于独立储能参与的调频辅助服务市场机制。文献[24]进一步探讨了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，包括顺次出清与联合出清2种机制。为充分发挥储能灵活性优势，文献[25]基于储能灵活能量状态，设计了新型日前电能量申报机制，以增加储能市场收益和降低储能参与市场风险。为准确描述储能的机会成本及其依赖荷电状态的运行特性，文献[26]提出了一种基于储能荷电状态分段的投标模型，相较于现有基于功率的投标模型，在提高储能利润和降低价格波动方面有显著优势。考虑电化学储能提供惯量和频率响应，文献[27]建立了考虑频率变化率、最低频率点和准稳态频率安全约束的机组组合模型，并基于边际定价理论推导出了惯量价格。为增强高比例新能源电力系统的稳定性，文献[28]构建了一个计及电化学储能参与的多时间尺度的电能量、惯量和爬坡市场联合出清模型。文献[29]为进一步激励同步机和储能提供惯量，建立了电能量、惯量以及一次调频日前联合优化出清模型，并分别刻画了同步惯量价值和虚拟惯量价值。在电化学储能参与电力市场的运行决策优化方面，文献[30]以电网侧储能为竞价主体，计及竞争对手不确定性带来的收益风险，建立了储能参与现货市场联合竞价的双层Stackelberg主从博弈模型。文献[31]构建了储能参与现货电能量和调频辅助服务市场的双层交易决策模型，用以模拟储能在多类型市场中的报价行为。为缓解新型电力系统电量平衡和调频需求间的矛盾，文献[32]提出了一种考虑循环寿命和电能量-调频市场出清的储能自调度策略。针对储能提供调频和进行电能量价差套利不在一个时间尺度的问题，文献[33]提出了一种双时间尺度决策框架，用于优化储能在电能量市场和调频市场的协调竞标策略。考虑到构网型储能是解决系统调频容量短缺的重要手段，文献[34]通过构建双层博弈模型模拟构网型储能在调频辅助服务市场中的竞价交易行为，并分析了构网型储能申报策略对市场出清结果的影响。文献[35]进一步考虑储能参与惯量市场，提出了储能参与电能量、惯量以及一次调频市场的交易策略，并通过构建双层交易决策模型实现储能的经济效益最优。

电化学储能已在多类电力市场中展现出多元价值，而通过对已有电化学储能进行构网型改造是满足系统构网型储能需求的一种经济方案，然而，目前尚未有在计及多元市场价值激励的情况下开展电化学储能构网型改造策略的研究。为此，本文提出一种计及电能量-调频-惯量联合市场下的电化学储能构网型改造策略优化方法。由于构网型储能提供的惯量、电能量和调频服务存在强耦合关系，且参与任何一个市场都会面临机会成本，为此，采取联合出清的协调机制，建立包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架。在此交易框架基础上，从电化学储能运营商的视角出发，计及电化学储能的构网型改造成本，建立电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场的交易决策双层模型。其中，上层为计及构网型改造成本的电化学储能最优决策模型，储能运营商以自身收益最大为目标，优化其参与各类市场的交易行为和电化学储能构网型改造策略，这里构网型改造策略指电化学储能的最优构网型改造比例，即确定将现有多少比例的跟网型变流器替换为构网型变流器；下层为市场出清模型，以系统社会福利最大为优化目标，模拟电能量、调频和惯量市场的联合出清过程，这里假设仅有一个储能运营商，并且其可预测其他市场主体的市场决策行为。火电机组提供惯量与机组启停状态密切相关，下层市场出清模型需引入表示机组启停的0-1变量，导致下层呈现非凸特性而使得整个问题求解困难。为解决这一难题，本文所提求解方法通过对非凸下层问题进行松弛处理，基于对偶理论实现原始-对偶重构，并将对应对偶间隙以惩罚项的形式加入上层目标函数中，经线性化处理后，得到单层混合整数线性规划模型，可利用商业求解器直接求解。最后，通过算例分析验证了所提双层模型和求解方法的实用性和可行性。

1 包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架

为利用多元市场价值收益激励现有跟网型电化学储能进行构网型改造，建立了包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架，如图1所示。其中，电化学储能运营商和火电发电商均可作为独立主体参与电能量、调频和惯量市场。

在电能量市场中，负荷运营商向系统运营商申报用电量，即系统负荷需求，电化学储能运营商和火电发电商则分别申报充放电量价曲线和电能量价曲线。在调频市场中，电化学储能运营商和火电发电商在确保自身可用容量的前提下，分别向系统运营商申报可用调频容量量价曲线。在惯量市场中，考虑到电化学储能运营商拥有的构网型储能向系统提供的惯量为虚拟惯量，其虚拟惯量时间常数为构网型控制中可调节的参数，这使得其提供的虚拟惯量呈现连续性[35]。因此电化学储能运营商可向系统运营商提交惯量时间常数量价曲线，类似电能量价曲线，即采用分段报价的方式，不同惯量时间常数区间分别申报对应价格，且呈单调非递减。然而，相较于

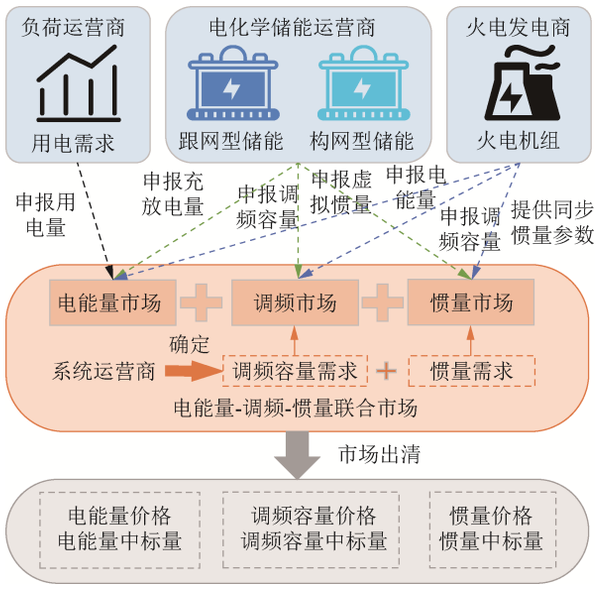


图 1　包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架

Fig. 1　Joint market trading framework for electrical energy-frequency regulation-inertia with electrochemical energy storage

构网型储能，火电机组提供的惯量为固有同步惯量，其惯量时间常数取决于机组自身参数，为固定值，仅在机组运行时提供惯量，与机组启停状态密切相关，故火电发电商只需向系统运营商提交火电机组固有的惯量时间常数。

构网型储能在提供惯量响应时，其惯量支撑输出功率$P_{s,t}^{\mathrm{IN}}$与系统频率变化率有关，如式(1)所示：

$$P_{s,t}^{\mathrm{IN}}=\frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN}}P_{s}^{\mathrm{rate}}}{f_0}\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：$H_{s,t}^{\mathrm{IN}}$为构网型储能s在t时刻提供的惯量时间常数；P_{s}^{rate}为构网型储能的额定功率；f_0为系统的额定频率；$\mathrm{d}\Delta f/\mathrm{d}t$表示系统的频率变化率。

基于系统允许的最大频率变化率限值$f_{\mathrm{Roco}}^{\max}$，可以得到构网型储能提供惯量需预留的功率容量：

$$P_{s,t}^{\mathrm{IN}}=\frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN}}P_{s}^{\mathrm{rate}}f_{\mathrm{Roco}}^{\max}}{f_0} \tag{2}$$

同时，由于构网型储能的容量是有限的，它需要预留一定的电能量来提供惯量响应，因此，对式(1)进行积分可以得到需要预留的电能量为：

$$E_{s,t}^{\mathrm{IN}}=\int_0^{t_{\mathrm{nadir}}}P_{s,t}^{\mathrm{IN}}=\frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN}}P_{s}^{\mathrm{rate}}\Delta f^{\max}}{f_0} \tag{3}$$

式中：t_{nadir}为系统频率达到最低点的时刻；$\Delta f^{\max}$为系统允许的最大频率偏差。

系统运营商在获得各市场主体所提交的各类市场量价信息后，还需进一步确定系统的调频容量需求和惯量需求，即系统发生功率缺额扰动时，为保持系统频率在安全范围内所需的最小调频容量和惯量。其中，调频容量需求一般取决于系统在各时刻可能发生的最大缺额功率，例如因发电机故障导致的负荷缺额。因此，可将系统调频容量需求按系统负荷一定比例设置，如5%~8%。惯量需求则一般需同时考虑功率缺额扰动发生时系统频率变化率限制和频率最低点限制，但由于违反系统频率变化率限制比违反频率最低点限制更为常见且更为严重[36]，可假设在各时刻发生最大功率缺额下，基于系统允许的最大频率变化率限值来确定系统的最小惯量需求，如式(4)所示：

$$H_t^{\min}=\frac{\Delta P_t^{\mathrm{loss}}f_0}{2f_{\mathrm{Roco}}^{\max}P_{\mathrm{sys}}} \tag{4}$$

式中：$H_t^{\min}$为系统在t时刻的最小惯量需求；$\Delta P_t^{\mathrm{loss}}$为系统在$t$时刻的最大缺额功率；$P_{\mathrm{sys}}$为系统总装机容量。

最后，基于物理网络约束和各类机组运行约束，系统运营商对电能量、调频以及惯量市场进行联合出清，并基于边际定价理论，得到电能量价格、调频容量价格和惯量价格，以及各市场主体在电能量、调频和惯量市场的中标量。

2　考虑构网型改造的电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场交易决策模型

基于包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架，从利益驱动型电化学储能运营商的角度出发，考虑多元市场收益激励下跟网型电化学储能进行构网型改造，建立了电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场的交易决策双层模型，上层为计及构网型改造成本的电化学储能最优决策模型，以自身收益最大化为目标，优化市场交易决策和电化学储能构网型改造策略。下层为电能量-调频-惯量市场联合出清模型，计及火电机组启停变量，考虑系统电能量供需平衡、调频容量需求和惯量需求等约束，以系统社会福利最大为优化目标对电能量、调频和惯量市场进行联合出清。上层电化学储能运营商根据自身收益情况决策在各个市场的投标量价以及电化学储能构网型改造比例；下层市场出清模型则在得到储能申报量价后更新市场出清电价和各市场主体中标量，随着上下层交替决策至均衡状态，最终可得到电化学储能运营商的最优市场交易决策和构网型改造策略。

2.1　计及构网型改造成本的上层电化学储能最优决策模型

假设电化学储能运营商拥有的储能均为跟网型

储能，在计及构网型改造成本的基础上，上层电化学储能运营商为实现自身收益最大化，采取策略性报量报价的方式参与电能量-调频-惯量联合市场，并决策出最优的构网型改造比例，其目标函数如式(5)所示：

$$\max P_{\mathrm{r}} = P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}} + P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}} + P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}} - C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{re,GFM}} \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}} = \sum_{s\in S}\sum_{t=1}^{T}\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}\left(p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} - p_{s,t}^{\mathrm{E,c}}\right) - c_{\mathrm{es}}^{\mathrm{om}}\left(p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} + p_{s,t}^{\mathrm{E,c}}\right) \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}} = \sum_{s\in S}\sum_{t=1}^{T}\lambda_{t}^{\mathrm{SFR}} p_{s,t}^{\mathrm{SFR}} \tag{7}$$

$$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}} = \sum_{s\in S^{\mathrm{GFM}}}\sum_{t=1}^{T}\lambda_{t}^{\mathrm{IN}} H_{s,t}^{\mathrm{IN}} \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{re,GFM}} = \sum_{s\in S^{\mathrm{GFM}}}\tilde{C}^{\mathrm{p,GFM}} P_{s}^{\mathrm{rate}} \tag{9}$$

$$\tilde{C}^{\mathrm{p,GFM}} = C^{\mathrm{p,GFM}} \cdot \frac{r(1+r)^{L}}{(1+r)^{L}-1} \cdot \frac{1}{Y_{\mathrm{d}}} \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}}$、$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}}$和$P_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}}$分别为电化学储能运营商参与电能量、调频和惯量市场获得的日收益；$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{re,GFM}}$为电化学储能构网型改造的日化成本；$S$是电化学储能集合，为跟网型电化学储能集合$S^{\mathrm{GFL}}$和构网型电化学储能集合$S^{\mathrm{GFM}}$的并集；$T$为市场运行周期；$\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}$、$\lambda_{t}^{\mathrm{SFR}}$和$\lambda_{t}^{\mathrm{IN}}$分别为下层电能量、调频和惯量市场的出清电价；$p_{s,t}^{\mathrm{E,c}}$和$p_{s,t}^{\mathrm{E,d}}$分别为电化学储能在电能量市场中标的充放电量；$c_{\mathrm{es}}^{\mathrm{om}}$为电化学储能的单位运行成本；$p_{s,t}^{\mathrm{SFR}}$为电化学储能在调频市场的中标量；$\tilde{C}^{\mathrm{p,GFM}}$为电化学储能构网型改造的日化单位功率成本，取决于构网型变流器单位功率成本$C^{\mathrm{p,GFM}}$、构网型变流器的寿命L、折现率r以及年天数Y_{d}。

电化学储能构网型改造约束：

$$P_{s}^{\mathrm{rate}} = \begin{cases} p^{\mathrm{GFM}} P_{s}^{\max}, s\in S^{\mathrm{GFM}} \\ (1-p^{\mathrm{GFM}}) P_{s}^{\max}, s\in S^{\mathrm{GFL}} \end{cases} \tag{11}$$

$$E_{s}^{\mathrm{rate}} = \begin{cases} p^{\mathrm{GFM}} E_{s}^{\max}, s\in S^{\mathrm{GFM}} \\ (1-p^{\mathrm{GFM}}) E_{s}^{\max}, s\in S^{\mathrm{GFL}} \end{cases} \tag{12}$$

$$0 \leqslant p^{\mathrm{GFM}} \leqslant 1 \tag{13}$$

式中：p^{GFM}为电化学储能构网型改造的比例，是构网型改造策略的优化变量，当p^{GFM}=0时表示维持原跟网型配置，当0<p^{GFM}≤1时，表示将对应比例为p^{GFM}的跟网型变流器替换为构网型变流器，跟网型和构网型两部分储能的额定功率和额定容量随之调整，如式(11)和式(12)所示；$P_{s}^{\max}$和$E_{s}^{\max}$分别为构网型改造前的电化学储能额定功率和额定容量；E_{s}^{rate}为考虑构网型改造后的电化学储能额定容量。

电化学储能参与电能量市场的报量报价约束：

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}} z_{s,t}^{\mathrm{E,o}}, \quad s\in S \tag{14}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}} (1 - z_{s,t}^{\mathrm{E,o}}), \quad s\in S \tag{15}$$

$$C_{s}^{\mathrm{E,o,c,min}} \leqslant c_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} \leqslant C_{s}^{\mathrm{E,o,c,max}}, \quad s\in S \tag{16}$$

$$C_{s}^{\mathrm{E,o,d,min}} \leqslant c_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} \leqslant C_{s}^{\mathrm{E,o,d,max}}, \quad s\in S \tag{17}$$

式中：$p_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}}$和$p_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}}$分别为电化学储能在电能量市场申报的充放电功率；$z_{s,t}^{\mathrm{E,o}}$是电化学储能申报的充放电状态，为0-1变量，用以避免储能运营商同时申报充放电；$c_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}}$和$c_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}}$分别为电化学储能在电能量市场申报的充放电价格；$C_{s}^{\mathrm{E,o,c,min}}$和$C_{s}^{\mathrm{E,o,c,max}}$分别为电化学储能申报充电价格的下限和上限；$C_{s}^{\mathrm{E,o,d,min}}$和$C_{s}^{\mathrm{E,o,d,max}}$分别为电化学储能申报放电价格的下限和上限。

电化学储能参与调频市场的报量报价约束：

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} \leqslant \alpha_{s}^{\mathrm{SFR}} P_{s}^{\mathrm{rate}}, \quad s\in S \tag{18}$$

$$C_{s}^{\mathrm{SFR,o,min}} \leqslant c_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} \leqslant C_{s}^{\mathrm{SFR,o,max}}, \quad s\in S \tag{19}$$

式中：$p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}$为电化学储能在调频市场申报的调频容量；$\alpha_{s}^{\mathrm{SFR}}$为电化学储能最大可提供调频容量占额定功率容量的百分比；$c_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}$为电化学储能在调频市场申报的价格；$C_{s}^{\mathrm{SFR,o,min}}$和$C_{s}^{\mathrm{SFR,o,max}}$分别为电化学储能申报调频容量价格的下限和上限。

电化学储能参与惯量市场的报量报价约束：

$$0 \leqslant H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} \leqslant H_{s}^{\max}, \quad s\in S^{\mathrm{GFM}} \tag{20}$$

$$C_{s}^{\mathrm{IN,o,min}} \leqslant c_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} \leqslant C_{s}^{\mathrm{IN,o,max}}, \quad s\in S^{\mathrm{GFM}} \tag{21}$$

式中：$H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}}$和$H_{s}^{\max}$分别为电化学储能在惯量市场申报的惯量时间常数和最大可提供的惯量时间常数；$c_{s,t}^{\mathrm{IN,o}}$为电化学储能在惯量市场申报的价格；$C_{s}^{\mathrm{IN,o,min}}$和$C_{s}^{\mathrm{IN,o,max}}$分别为电化学储能申报惯量价格的下限以及上限。

由于跟网型储能提供电能量和调频服务以及构网型储能提供惯量、电能量和调频服务均呈现强耦合[29]，还需要进一步考虑电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场的功率容量耦合约束：

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} + p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}}, \ s\in S^{\mathrm{GFL}} \tag{22}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} + p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} + \frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} f_{\mathrm{Roco}}^{\max} P_{s}^{\mathrm{rate}}}{f_{0}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}}, \ s\in S^{\mathrm{GFM}} \tag{23}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} + p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}}, \ s\in S^{\mathrm{GFL}} \tag{24}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} + p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} + \frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} f_{\mathrm{Roco}}^{\max} P_{s}^{\mathrm{rate}}}{f_{0}} \leqslant P_{s}^{\mathrm{rate}}, s\in S^{\mathrm{GFM}} \tag{25}$$

$$E_{s,t} = E_{s,t-1} + \eta_{\mathrm{c}} p_{s,t}^{\mathrm{E,c}} - \frac{p_{s,t}^{\mathrm{E,d}}}{\eta_{\mathrm{d}}}, s\in S \tag{26}$$

$$S_{\mathrm{OC}}^{\min} E_{s}^{\mathrm{rate}} + \frac{p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}}{\eta_{\mathrm{d}}} \leqslant E_{s,t} \leqslant S_{\mathrm{OC}}^{\max} E_{s}^{\mathrm{rate}} - \eta_{\mathrm{c}} p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}, s\in S^{\mathrm{GFL}} \tag{27}$$

$$S_{\mathrm{OC}}^{\min} E_{s}^{\mathrm{rate}} + \frac{p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}}{\eta_{\mathrm{d}}} + \frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} \Delta f P_{s}^{\mathrm{rate}}}{f_{0}} \leqslant E_{s,t} \leqslant S_{\mathrm{OC}}^{\max} E_{s}^{\mathrm{rate}} - \eta_{\mathrm{c}} \cdot p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} - \frac{2H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} \Delta f^{\max} P_{s}^{\mathrm{rate}}}{f_{0}}, \ s\in S^{\mathrm{GFM}} \tag{28}$$

$$E_{s,0} = E_{s,T} = S_{\mathrm{OCini}} E_s^{\mathrm{rate}}, s \in S \tag{29}$$

式中：$E_{s,t}$为电化学储能在t时刻的实际容量；η_c和η_d分别为电化学储能的充放电效率；S_{OCini}、$S_{\mathrm{OC}}^{\min}$和$S_{\mathrm{OC}}^{\max}$分别为电化学储能的初始、最小和最大荷电状态。

在电化学储能的功率容量耦合约束中，式(22)和式(23)分别为跟网型储能和构网型储能的放电功率上下限约束，式(24)和式(25)分别为跟网型储能和构网型储能的充电功率上下限约束，其中，跟网型储能仅需预留提供调频的功率容量，而构网型储能还需预留提供惯量的功率容量，该部分预留功率大小如式(2)所示；式(26)为储能容量动态变化约束，该式可以统一反映跟网型储能和构网型储能在相邻时刻的容量变化规律，即充电时储能容量增加，放电时储能容量减少，并通过充放电效率系数计及充放电过程中的电能损失；式(27)和式(28)分别为跟网型储能和构网型储能的容量上下限约束，由于两者可参与的辅助服务种类不同，故所需预留的电能量也有所差异，其中，跟网型储能仅在调频过程中充电和放电，分别预留电能量$\eta_c p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}$和$p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}}/\eta_d$，而构网型储能，还需预留提供惯量的电能量，该部分预留电能量大小如式(3)所示；式(29)为储能始末容量平衡约束，用以确保储能在一个优化周期的初始时刻和末尾时刻容量相等。

2.2　下层电能量-调频-惯量市场联合出清模型

电能量市场、调频市场和惯量市场采取联合出清的协调机制，其目标是为了实现系统社会福利最大化，即系统运行成本最小化，故下层电能量-调频-惯量市场联合出清模型的目标函数如下所示：

$$\begin{aligned}\min C^{\mathrm{primal}} = {} & C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{E}} + C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}} + C_{\mathrm{r}}^{\mathrm{E}} + C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{SFR}} + C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}} + \\ & C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}} + C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{NL}} + C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{U}} + C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{D}}\end{aligned} \tag{30}$$

$$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{E}} = \sum_{g \in G}\sum_{t=1}^{T} c_{g,t}^{\mathrm{E}} p_{g,t}^{\mathrm{E}} \tag{31}$$

$$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}} = \sum_{s \in S}\sum_{t=1}^{T} (c_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} - c_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} p_{s,t}^{\mathrm{E,c}}) \tag{32}$$

$$C_{\mathrm{r}}^{\mathrm{E}} = c^{\mathrm{RC}}\left[\sum_{w \in W}\sum_{t=1}^{T}(P_{w,t}^{\max} - p_{w,t}) + \sum_{p_v \in P_{\mathrm{V}}}\sum_{t=1}^{T}(P_{p_v,t}^{\max} - p_{p_v,t})\right] \tag{33}$$

$$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{SFR}} = \sum_{g \in G}\sum_{t=1}^{T} c_{g,t}^{\mathrm{SFR}} p_{g,t}^{\mathrm{SFR}} \tag{34}$$

$$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}} = \sum_{s \in S}\sum_{t=1}^{T} c_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} p_{s,t}^{\mathrm{SFR}} \tag{35}$$

$$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}} = \sum_{s \in S^{\mathrm{GFM}}}\sum_{t=1}^{T} c_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} H_{s,t}^{\mathrm{IN}} \tag{36}$$

$$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{NL}} = \sum_{g \in G}\sum_{t=1}^{T} c_g^{\mathrm{NL}} u_{g,t}^{\mathrm{E}} \tag{37}$$

$$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{U}} = \sum_{g \in G}\sum_{t=1}^{T} C_{g,t}^{\mathrm{U}} \tag{38}$$

$$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{D}} = \sum_{g \in G}\sum_{t=1}^{T} C_{g,t}^{\mathrm{D}} \tag{39}$$

式中：$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{E}}$和$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{SFR}}$分别是购买火电机组提供电能量和调频容量的成本；$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{E}}$、$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{SFR}}$和$C_{\mathrm{es}}^{\mathrm{IN}}$分别是购买电化学储能提供电能量、调频容量和惯量的成本；$C_{\mathrm{r}}^{\mathrm{E}}$是对新能源机组弃风弃光的惩罚成本；$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{NL}}$、$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{U}}$和$C_{\mathrm{cg}}^{\mathrm{D}}$分别为所有火电机组的空载、启动和停机成本总和；$G$、$W$和$P_{\mathrm{V}}$分别是火电机组、风电机组和光伏机组的集合；$c_{g,t}^{\mathrm{E}}$和$c_{g,t}^{\mathrm{SFR}}$分别为火电机组$g$在电能量和调频市场申报的价格；$p_{g,t}^{\mathrm{E}}$和$p_{g,t}^{\mathrm{SFR}}$分别为火电机组$g$在电能量市场和调频市场的中标量；$c^{\mathrm{RC}}$为弃风弃光单位功率惩罚成本系数；$P_{w,t}^{\max}$和$P_{p_v,t}^{\max}$分别为风电机组和光伏机组在$t$时刻的预测出力；$p_{w,t}$和$p_{p_v,t}$分别为风电机组和光伏机组在$t$时刻的实际出力；$c_g^{\mathrm{NL}}$为火电机组$g$的固有空载成本；$u_{g,t}^{\mathrm{E}}$是火电机组的启停状态变量，为0-1变量；$C_{g,t}^{\mathrm{U}}$和$C_{g,t}^{\mathrm{D}}$分别为火电机组$g$在$t$时刻的启动和停机成本。

系统电能量供需平衡约束：

$$\sum_{g \in G} p_{g,t}^{\mathrm{E}} + \sum_{s \in S} p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} + \sum_{w \in W} p_{w,t} + \sum_{p_v \in P_{\mathrm{V}}} p_{p_v,t} = \sum_{s \in S} p_{s,t}^{\mathrm{E,c}} + \sum_{d \in D} p_{d,t} : \lambda_t^{\mathrm{E}} \tag{40}$$

式中：D为系统负荷的集合；$p_{d,t}$为负荷d在t时刻的负荷功率；λ_t^{E}为该约束的对偶变量。

火电机组市场出清约束：

$$P_g^{\min} u_{g,t}^{\mathrm{E}} \leqslant p_{g,t}^{\mathrm{E}} \leqslant P_g^{\max} u_{g,t}^{\mathrm{E}} : \underline{\eta}_{g,t}, \bar{\eta}_{g,t} \tag{41}$$

$$0 \leqslant p_{g,t}^{\mathrm{SFR}} \leqslant \alpha_g^{\mathrm{SFR}} P_g^{\max} u_{g,t}^{\mathrm{E}} : \underline{\psi}_{g,t}, \bar{\psi}_{g,t} \tag{42}$$

$$P_g^{\min} u_{g,t}^{\mathrm{E}} \leqslant p_{g,t}^{\mathrm{E}} - p_{g,t}^{\mathrm{SFR}} : \underline{\xi}_{g,t} \tag{43}$$

$$p_{g,t}^{\mathrm{E}} + p_{g,t}^{\mathrm{SFR}} \leqslant P_g^{\max} u_{g,t}^{\mathrm{E}} : \bar{\xi}_{g,t} \tag{44}$$

$$C_{g,t}^{\mathrm{U}} \geqslant 0 : \rho_{g,t}^{\mathrm{U}} \tag{45}$$

$$C_{g,t}^{\mathrm{D}} \geqslant 0 : \rho_{g,t}^{\mathrm{D}} \tag{46}$$

$$C_{g,t}^{\mathrm{U}} \geqslant (u_{g,t}^{\mathrm{E}} - u_{g,t-1}^{\mathrm{E}}) K_g^{\mathrm{U}} : \sigma_{g,t}^{\mathrm{U}} \tag{47}$$

$$C_{g,t}^{\mathrm{D}} \geqslant (u_{g,t-1}^{\mathrm{E}} - u_{g,t}^{\mathrm{E}}) K_g^{\mathrm{D}} : \sigma_{g,t}^{\mathrm{D}} \tag{48}$$

式中：$P_g^{\min}$和$P_g^{\max}$分别为火电机组的最小和最大有功出力；α_g^{SFR}为火电机组最大可提供调频容量占最大出力的百分比；K_g^{U}和K_g^{D}分别为火电机组g的固有启动和停机成本；$\underline{\eta}_{g,t}$、$\bar{\eta}_{g,t}$、$\underline{\psi}_{g,t}$、$\bar{\psi}_{g,t}$、$\underline{\xi}_{g,t}$、$\bar{\xi}_{g,t}$、$\rho_{g,t}^{\mathrm{U}}$、$\rho_{g,t}^{\mathrm{D}}$、$\sigma_{g,t}^{\mathrm{U}}$和$\sigma_{g,t}^{\mathrm{D}}$分别为对应约束的对偶变量。

新能源机组市场出清约束：

$$0 \leqslant p_{w,t} \leqslant P_{w,t}^{\max} : \underline{\chi}_{w,t}, \bar{\chi}_{w,t} \tag{49}$$

$$0 \leqslant p_{p_v,t} \leqslant P_{p_v,t}^{\max} : \underline{\chi}_{p_v,t}, \bar{\chi}_{p_v,t} \tag{50}$$

式中：$\underline{\chi}_{w,t}$、$\bar{\chi}_{w,t}$、$\underline{\chi}_{p_v,t}$和$\bar{\chi}_{p_v,t}$分别为对应约束的对偶

变量。

电化学储能市场出清约束：

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,c}} \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,c}} : \underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}}, \bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}} \tag{51}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{E,o,d}} : \underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}}, \bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}} \tag{52}$$

$$0 \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{SFR}} \leqslant p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} : \underline{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}}, \bar{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}} \tag{53}$$

$$0 \leqslant H_{s,t}^{\mathrm{IN}} \leqslant H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} : \underline{\varphi}_{s,t}, \bar{\varphi}_{s,t}, s \in S^{\mathrm{GFM}} \tag{54}$$

式中：$\underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}}$、$\bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}}$、$\underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}}$、$\bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}}$、$\underline{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}}$、$\bar{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}}$、$\underline{\varphi}_{s,t}$ 和 $\bar{\varphi}_{s,t}$ 分别为对应约束的对偶变量。

线路潮流约束：

$$P_{l,t} = \sum_{i \in N} S_{l,i} \left[\sum_{g \in G} A_{i,g} p_{g,t}^{\mathrm{E}} + \sum_{s \in S} A_{i,s} p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} + \sum_{w \in W} A_{i,w} p_{w,t} + \sum_{p_{\mathrm{v}} \in P_{\mathrm{v}}} A_{i,p_{\mathrm{v}}} p_{p_{\mathrm{v}},t} - \sum_{s \in S} A_{i,s} p_{s,t}^{\mathrm{E,c}} - \sum_{d \in D} A_{i,d} p_{d,t} \right] : \gamma_{l,t} \tag{55}$$

$$P_l^{\min} \leqslant P_{l,t} \leqslant P_l^{\max} : \underline{\mu}_{l,t}, \bar{\mu}_{l,t} \tag{56}$$

式中：$P_{l,t}$为线路l在t时刻的有功潮流；$S_{l,i}$为功率转移分布因子，体现为节点功率变化对线路潮流的影响；N为节点集合；$A_{i,x}(x=g,s,w,p_{\mathrm{v}},d)$为节点与各类机组（负荷）的关联矩阵元素，用以描述电力网络节点与各类机组间的连接关系；$P_l^{\min}$和$P_l^{\max}$分别为线路l允许的最小和最大有功潮流限制；$\gamma_{l,t}$、$\underline{\mu}_{l,t}$和$\bar{\mu}_{l,t}$分别为对应约束的对偶变量。

系统调频容量需求约束：

$$\sum_{g \in G} p_{g,t}^{\mathrm{SFR}} + \sum_{s \in S} p_{s,t}^{\mathrm{SFR}} \geqslant \Delta P_t^{\mathrm{loss}} : \lambda_t^{\mathrm{SFR}} \tag{57}$$

式中：λ_t^{SFR}为对应约束的对偶变量，即调频容量价格。

系统惯量需求约束：

$$\sum_{g \in G} u_{g,t}^{\mathrm{E}} H_g^{\mathrm{IN}} P_g^{\max} + \sum_{s \in S^{\mathrm{GFM}}} H_{s,t}^{\mathrm{IN}} P_s^{\mathrm{rate}} \geqslant H_t^{\min} P_{\mathrm{sys}} : \lambda_t^{\mathrm{IN}} \tag{58}$$

式中：H_g^{IN}为火电机组固有的惯量时间常数；λ_t^{IN}为对应约束的对偶变量，即惯量价格。

联合市场出清得到的节点电能量价格包含电能量分量和阻塞分量两部分，如式(59)所示：

$$\lambda_{i,t}^{\mathrm{E}} = \lambda_t^{\mathrm{E}} + \sum_{l \in L} S_{i,l} (\underline{\mu}_{l,t} - \bar{\mu}_{l,t}) \tag{59}$$

式中：L为线路集合；$S_{i,l}$为功率转移分布因子矩阵转置后第i行第l列元素。

3 模型求解方法

在求解双层优化问题时，一般可利用卡罗需-库恩-塔克（Karush-Kuhn-Tucker，KKT）条件将下层凸优化问题转化为互补约束，并嵌入上层问题构成单层混合整数规划问题进行求解。然而，火电机组提供惯量与机组启停状态密切相关，下层市场出清模型需引入表示机组启停的0-1变量，导致下层模型呈现非凸性，无法利用KKT条件进行转化求解。为解决这一求解难题，首先，将下层问题中的0-1变量松弛为连续变量，从而将原非凸问题转化为凸优化问题。然后，基于对偶理论实现下层问题的原始-对偶重构，为最小化对偶间隙，以减小松弛后的下层问题与原问题间的偏差，将对应对偶间隙以惩罚项的形式嵌入上层目标函数中，使得双层模型转化为单层模型[37]。最后，对单层模型目标函数中的非线性项进行线性化处理，得到单层混合整数线性规划模型，从而可利用求解器进行直接求解。

3.1 下层模型松弛及其对偶转化

对火电机组的启停二元决策变量进行松弛化处理：

$$0 \leqslant u_{g,t}^{\mathrm{E}} \leqslant 1 : \underline{\beta}_{g,t}, \bar{\beta}_{g,t} \tag{60}$$

基于对偶理论，可构建松弛后下层模型的对偶问题，如式(61)—(75)所示。

目标函数：

$$\begin{aligned} \max C^{\mathrm{dual}} = & \sum_{d \in D} \sum_{t=1}^{T} \lambda_t^{\mathrm{E}} p_{d,t} + \sum_{l \in L} \sum_{t=1}^{T} \gamma_{l,t} \sum_{d \in D} S_{l,d} p_{d,t} + \\ & \sum_{w \in W} \sum_{t=1}^{T} c^{\mathrm{RC}} P_{w,t}^{\max} + \sum_{p_{\mathrm{v}} \in P_{\mathrm{v}}} \sum_{t=1}^{T} c^{\mathrm{RC}} P_{p_{\mathrm{v}},t}^{\max} - \\ & \sum_{w \in W} \sum_{t=1}^{T} \bar{\chi}_{w,t} P_{w,t}^{\max} - \sum_{p_{\mathrm{v}} \in P_{\mathrm{v}}} \sum_{t=1}^{T} \bar{\chi}_{p_{\mathrm{v}},t} P_{p_{\mathrm{v}},t}^{\max} - \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{T} (\bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}} p_{s,t}^{\mathrm{o,d}} + \bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}} p_{s,t}^{\mathrm{o,c}}) - \sum_{s \in S^{\mathrm{GFM}}} \sum_{t=1}^{T} \bar{\varphi}_{s,t} H_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} - \\ & \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{T} \bar{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}} p_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} + \sum_{t=1}^{T} \lambda_t^{\mathrm{IN}} H_t^{\min} P_{\mathrm{sys}} + \\ & \sum_{t=1}^{T} \lambda_t^{\mathrm{SFR}} \Delta P_t^{\mathrm{loss}} + \sum_{l \in L} \sum_{t=1}^{T} (\underline{\mu}_{l,t} P_l^{\min} - \bar{\mu}_{l,t} P_l^{\max}) - \\ & \sum_{g \in G} \sum_{t=1}^{T} \bar{\beta}_{g,t} \end{aligned} \tag{61}$$

约束条件：

$$c_{g,t}^{\mathrm{E}} - \lambda_t^{\mathrm{E}} + \bar{\eta}_{g,t} - \underline{\eta}_{g,t} + \bar{\xi}_{g,t} - \underline{\xi}_{g,t} - \sum_{l \in L} \gamma_{l,t} \sum_{i \in N} S_{l,i} A_{i,g} = 0 \tag{62}$$

$$-c^{\mathrm{RC}} - \lambda_t^{\mathrm{E}} + \bar{\chi}_{w,t} - \underline{\chi}_{w,t} - \sum_{l \in L} \gamma_{l,t} \sum_{i \in N} S_{l,i} A_{i,w} = 0 \tag{63}$$

$$-c^{\mathrm{RC}} - \lambda_t^{\mathrm{E}} + \bar{\chi}_{p_{\mathrm{v}},t} - \underline{\chi}_{p_{\mathrm{v}},t} - \sum_{l \in L} \gamma_{l,t} \sum_{i \in N} S_{l,i} A_{i,p_{\mathrm{v}}} = 0 \tag{64}$$

$$c_{s,t}^{\mathrm{o,d}} - \lambda_t^{\mathrm{E}} - \sum_{l \in L} \gamma_{l,t} \sum_{i \in N} S_{l,i} A_{i,s} + \bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}} - \underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}} = 0 \tag{65}$$

$$-c_{s,t}^{\mathrm{o,c}} + \lambda_t^{\mathrm{E}} + \sum_{l \in L} \gamma_{l,t} \sum_{i \in N} S_{l,i} A_{i,s} + \bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}} - \underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}} = 0 \tag{66}$$

$$\gamma_{l,t} + \bar{\mu}_{l,t} - \underline{\mu}_{l,t} = 0 \tag{67}$$

$$c_{s,t}^{\mathrm{IN,o}} + \bar{\varphi}_{s,t} - \underline{\varphi}_{s,t} - \lambda_t^{\mathrm{IN}} = 0 \tag{68}$$

$$c_{g,t}^{\mathrm{SFR}} + \bar{\psi}_{g,t} - \underline{\psi}_{g,t} + \bar{\xi}_{g,t} + \underline{\xi}_{g,t} - \lambda_t^{\mathrm{SFR}} = 0 \tag{69}$$

$$c_{s,t}^{\mathrm{SFR,o}} + \bar{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}} - \underline{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}} - \lambda_t^{\mathrm{SFR}} = 0 \tag{70}$$

$$c_g^{\mathrm{NL}} + P_g^{\min}\underline{\eta}_{g,t} - P_g^{\max}\bar{\eta}_{g,t} - \alpha_g^{\mathrm{SFR}}P_g^{\max}\bar{\psi}_{g,t} + P_g^{\min}\underline{\xi}_{g,t} - P_g^{\max}\bar{\xi}_{g,t} + \bar{\beta}_{g,t} - \underline{\beta}_{g,t} - \lambda_t^{\mathrm{IN}}H_g^{\mathrm{IN}}P_g^{\max} + K_g^{\mathrm{U}}(\sigma_{g,t}^{\mathrm{U}} - \sigma_{g,t+1}^{\mathrm{U}}) - K_g^{\mathrm{D}}(\sigma_{g,t}^{\mathrm{D}} - \sigma_{g,t+1}^{\mathrm{D}}) = 0,\ t = 1{:}T-1 \tag{71}$$

$$c_g^{\mathrm{NL}} + P_g^{\min}\underline{\eta}_{g,t} - P_g^{\max}\bar{\eta}_{g,t} - \alpha_g^{\mathrm{SFR}}P_g^{\max}\bar{\psi}_{g,t} + P_g^{\min}\underline{\xi}_{g,t} - P_g^{\max}\bar{\xi}_{g,t} + \bar{\beta}_{g,t} - \underline{\beta}_{g,t} - \lambda_t^{\mathrm{IN}}H_g^{\mathrm{IN}}P_g^{\max} + K_g^{\mathrm{U}}\sigma_{g,t}^{\mathrm{U}} - K_g^{\mathrm{D}}\sigma_{g,t}^{\mathrm{D}} = 0,\ t = T \tag{72}$$

$$1 - \rho_{g,t}^{\mathrm{U}} - \sigma_{g,t}^{\mathrm{U}} = 0 \tag{73}$$

$$1 - \rho_{g,t}^{\mathrm{D}} - \sigma_{g,t}^{\mathrm{D}} = 0 \tag{74}$$

$$\underline{\eta}_{g,t},\bar{\eta}_{g,t},\underline{\psi}_{g,t},\bar{\psi}_{g,t},\underline{\xi}_{g,t},\bar{\xi}_{g,t},\underline{\chi}_{w,t},\bar{\chi}_{w,t},\underline{\chi}_{p_v,t},\bar{\chi}_{p_v,t},\underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}},\bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{d}},\underline{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}},\bar{\alpha}_{s,t}^{\mathrm{c}},\underline{\varphi}_{s,t},\bar{\varphi}_{s,t},\underline{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}},\bar{\sigma}_{s,t}^{\mathrm{SFR}},\underline{\mu}_{l,t},\bar{\mu}_{l,t},\lambda_t^{\mathrm{SFR}},\lambda_t^{\mathrm{IN}},\underline{\beta}_{g,t},\bar{\beta}_{g,t},\rho_{g,t}^{\mathrm{U}},\rho_{g,t}^{\mathrm{D}},\sigma_{g,t}^{\mathrm{U}},\sigma_{g,t}^{\mathrm{D}} \geqslant 0 \tag{75}$$

然而，松弛后的下层问题的最优解一般不是原问题的最优解，存在一个对偶间隙量，为使得松弛后的下层问题的最优解与原问题最优解偏差最小，需最小化对偶间隙，构造如下原始-对偶形式：

$$\begin{cases}\min D_{\mathrm{G}} = C^{\mathrm{primal}} - C^{\mathrm{dual}} \\ \text{s.t.}\quad \text{式(31)—(58), (62)—(75)}, u_{g,t}^{\mathrm{E}} = \{0,1\}\end{cases} \tag{76}$$

3.2　单层模型及其目标函数线性化

利用罚函数法将松弛后的下层模型嵌入上层模型构成单层模型，最终的单层模型如下所示：

$$\begin{cases}\max P_{\mathrm{r}} - PD_{\mathrm{G}} \\ \text{s.t.}\quad \text{式(6)—(29), (31)—(58), (62)—(75)} \\ u_{g,t}^{\mathrm{E}} = \{0,1\}\end{cases} \tag{77}$$

式中：P为惩罚系数。

然而，所得到单层模型的目标函数仍包含非线性项，如$\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}(p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} - p_{s,t}^{\mathrm{E,c}})$、$\lambda_t^{\mathrm{SFR}}p_{s,t}^{\mathrm{SFR}}$、$\lambda_t^{\mathrm{IN}}H_{s,t}^{\mathrm{IN}}$等，需进行线性化处理。为此，可采用二元扩展线性化方法对上述连续变量的乘积进行线性化[38]，以$\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}p_{s,t}^{\mathrm{E,d}}$为例，其具体线性化步骤如下所示：

1）电化学储能放电功率$p_{s,t}^{\mathrm{E,d}}$的取值范围为$[0, P_s^{\max}]$，将该范围划分为M_s个离散区间，区间长度为$\Delta_s = P_s^{\max}/M_s$，通过引入二进制变量$z_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}}$，放电功率可以表示为：

$$p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} = \Delta_s\sum_{b=1}^{B}2^{b-1}z_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}} \tag{78}$$

$$B = \lfloor \log_2(M_s - 1) \rfloor + 1 \tag{79}$$

式中：B为连续变量离散化为M_s个分段所需的二进制位数；$\lfloor\ \rfloor$表示向下取整。

2）分别对式(78)两边乘以$\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}$，得到：

$$\lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}p_{s,t}^{\mathrm{E,d}} = \Delta_s\sum_{b=1}^{B}2^{b-1}v_{s,t,b} \tag{80}$$

$$v_{s,t,b} = \lambda_{s,t}^{\mathrm{E}}z_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}} \tag{81}$$

式中：$v_{s,t,b}$为引入的辅助连续变量。

3）虽然式(80)将原非性项进行了线性化表达，但是式(81)中仍存在由连续变量与0-1变量乘积带来的非线性。可利用大M法对其进行线性化处理，具体过程如下所示：

$$-M(1 - z_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}}) \leqslant \lambda_{s,t}^{\mathrm{E}} - v_{s,t,b} \leqslant M(1 - z_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}}) \tag{82}$$

$$-Mz_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}} \leqslant v_{s,t,b} \leqslant Mz_{s,t,b}^{\mathrm{E,d}} \tag{83}$$

式中：M为一个足够大的正数。

其他非线性项经过上述线性化步骤处理后，最终可以得到一个单层混合整数线性规划问题，可直接利用商业求解器进行高效求解。

4　算例分析

4.1　参数设置

采用基于修改后的IEEE-39节点系统验证所提考虑构网型改造的电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场交易决策模型和求解方法的实用性和有效性。IEEE-39节点系统的拓扑结构和相关参数见文献[39]，包括10台火电机组、21个负荷节点和46条线路。其中，火电机组的有功出力范围、固有惯量时间常数以及在电能量市场和调频市场的报价详见表1，空载成本和启停成本分别设置为6000元/h和150 000元/次，火电机组最大可提供调频容量占最大出力的百分比为10%。在节点5、19和22各增加1台风电机组，装机容量分别为200、300和200 MW，在节点14和17各增加一台600 MW的光伏机组。考虑电化学储能运营商目前拥有1台跟网型电化学储能，位于节点17，储能机组相关参数如表2所示。由于储能机组的容量相对于系统总装机容量较小，假设电化学储能运营商在各类市场中只进行数量博弈，参与各类市场的报价设置为固定值，其中在电能量市场的放电报价为500元/MWh，充电报价为400元/MWh，在惯量市场的惯量时间常数报价为10元/s，在调频市场的调频容量报价为20元/MW，储能最大可提供调频容量占额定功率容量的百分比为50%。在对现有跟网型电化学储能进行构网型改造时，构网型变流器的单位功率成本为10万元/MW，寿命为20年，折现率为5%。

在对偶间隙惩罚系数选取方面，若惩罚系数取值过小，会导致对偶间隙较大，进而使优化结果偏差显著[40]；反之，若惩罚系数取值过大，对偶间隙虽趋于最小，但会降低目标函数中储能收益的权重，从而导致出现低收益决策。因此，将对偶间隙惩罚系数设定为1000，以权衡市场出清的准确性与上层目标函数值。

系统运营商对新能源机组弃风弃光的惩罚成本

表 1 火电机组参数

Table 1 Parameters of thermal power units

机组编号	P_s^{min}/MW	P_s^{max}/MW	惯量/s	电能报价/（元/MWh）	调频容量报价/（元/MW）
1	520.0	1040	6.3	833	18
2	323.0	646	5.1	396	18
3	145.0	725	5.1	544	20
4	130.4	652	5.1	400	12
5	254.0	508	2.1	315	15
6	343.5	687	5.1	621	19
7	290.0	580	2.1	157	14
8	112.8	564	2.1	248	12
9	173.0	865	5.1	528	16
10	550.0	1100	6.3	769	16

表 2 储能机组参数

Table 2 Parameters of energy storage units

储能参数	参数值
额定功率/MW	100
额定容量/MWh	400
虚拟惯量时间常数上限/s	14
充放电效率/%	95
初始荷电状态/%	50
最小荷电状态/%	10
最大荷电状态/%	90
运行维护成本/（元/MW）	20

为600元/MWh，系统频率的额定值为50 Hz，系统允许的最大频率变化率限值和最大频率偏差分别为0.5 Hz/s和1 Hz，系统最大扰动的缺额功率值取为各时段负荷的8%，系统日负荷及风光预测出力如图2所示。

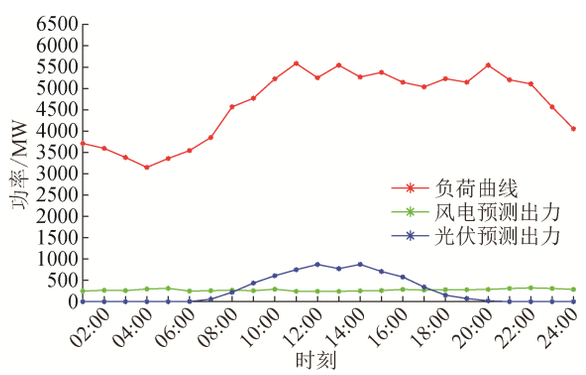


图 2 系统日负荷及风光预测出力

Fig. 2 System daily load and wind and solar forecast output

4.2 电化学储能构网型改造前后经济性对比分析

基于第2章所建立的模型，分别对构网型改造前后电化学储能运营商的收益和系统运行成本进行分析。经过计算求解，可以得到电化学储能的最优构网型改造比例为29%，构网型改造前后电化学储能运营商的收益情况如表3所示，构网型改造后电化学储能运营商的净收益增加94 772.32元，而构网型改造成本仅为637.54元，净收益增幅高达73.5%，使得有足够的市场收益激励跟网型电化学储能进行构网型改造。其中，储能运营商的市场收益增幅主要来自调频市场，惯量市场收益仅增加了10.78元。惯量市场收益不足的原因在于构网型改造后构网型储能可提供的虚拟惯量相较于系统火电机组同步惯量非常小，同时储能容量有限，中标惯量的时间段和中标量均受限，导致储能在惯量市场的收益受到限制。然而，得益于惯量市场的建立，构网型储能的惯量价值被显性定价，其通过惯量市场提供虚拟惯量可以影响火电机组的启停，进而影响火电机组在电能量市场和调频市场的中标情况，从而改变储能运营商在电能量与调频市场中的获利机会。由表3可知，构网型改造后，储能运营商具备参与惯量市场的资格，通过参与惯量市场使其在牺牲少量电能量市场收益的情况下，获得了调频市场收益的大幅增加，虽然在单一惯量市场中的收益很低，但在整个电能量-调频-惯量联合市场中，构网型改造前后，储能运营商的市场收益得到了大幅提升，从总体来看是具备经济性的，因此兼顾惯量市场是有必要的。

表 3 构网型改造前后储能收益情况

Table 3 Revenue situation of energy storage before and after grid-forming transformation 元

参数	数值	
	改造前	改造后
电能量市场收益	11 194.75	6 833.91
调频市场收益	117 826.51	217 586.43
惯量市场收益	0	10.78
构网型改造成本	0	637.54
净收益	129 021.26	223 793.58

构网型改造前后系统运行成本情况如表4所示，构网型改造后系统运行总成本减少82 846.97元，降幅约0.2%，主要源于电能量成本和空载成本的降低。其中，空载成本减少6000元，得益于构网型储能提供虚拟惯量削减了火电机组为保证系统惯量安全而必须开机的时段，因此火电机组的空载成本可视为系统的隐性惯量成本，故系统隐性惯量成本同步减少6000元。表4中的惯量成本为系统显性惯量成本，即构网型储能提供惯量的成本，由电化学储能运营商

申报的惯量时间常数价格和中标惯量时间常数决定。结合构网型改造前后显性惯量成本和隐性惯量成本的变化情况，系统整体惯量成本实际下降了5970元，这一降幅远大于显性惯量成本仅30元的增幅。因此，电化学储能构网型改造通过降低系统电能量成本和惯量成本，可以实现系统整体社会福利水平的提升。

表4　构网型改造前后系统运行成本情况

Table 4　System operating costs before and after grid forming transformation　　元

参数	数值	
	改造前	改造后
电能量成本	38 184 120.25	38 106 053.67
调频成本	149 703.26	150 892.87
惯量成本	0	30
空载成本	1 134 000	1 128 000
启停成本	1 800 000	1 800 000
弃风光惩罚成本	0	0
总成本	41 267 823.51	41 184 976.54

4.3　构网型改造前后电能量-调频-惯量联合市场中标量与出清电价分析

为进一步研究构网型改造后电化学储能运营商净收益增加和系统运行总成本减少的原因，本小节分析了电化学储能构网型改造前后，各市场主体在各类市场的中标情况以及各市场出清电价。

图3—5分别反映了构网型改造前后各市场主体在电能量、调频和惯量市场的中标情况，为方便对比，各时段左侧柱状图为构网型改造前的市场主体中标情况，右侧柱状图为构网型改造后的市场主体中标情况。由图5可知，在构网型改造前，为满足系统在第8时段的惯量需求，高边际成本的火电机组6需比构网型改造后提前1 h启动，由此导致机组空载成本及系统电能量成本上升，而原有跟网型电化学储能在经过构网型改造后，构网型储能可替代火电机组6在时段8提供87 MW·s的虚拟惯量，同时保证系统频率变化率仍在安全范围内，如图6所示。在电能量市场中标方面，由图3可知，第8时段火电机组6在电能量市场的中标量被更低边际成本的火电机组3和9所替代，从而进一步降低了系统的电能量成本。在调频市场方面，如图4所示，考虑电化学储能构网型改造后，火电机组在构网型改造前可中标的调频容量很大程度上被储能所替代，使得储能在调频市场的收益大幅增加，这主要是因为构网型改造后火电机组在电能量市场的中标情况发生变化。考虑到火电机组提供调频与提供电能量呈现强耦合关系，不少火电机组在各时段的可用调频容量下降，如火电机组2在第1时段的可用调频容量由改造前的64.6 MW下降为34.0 MW，火电机组9在第5时段的可用调频容量由改造前的86.50 MW下降为39.57 MW。同时，由于构网型改造后火电机组6在第8时段处于停机状态，无法提供构网型改造前可中标的调频容量，这部分调频容量由更低报价的火电机组5和储能所分摊。最终，储能的调频容量报价略高于所有火电机组的报价，导致系统调频成本略有上升，但远小于系统电能量成本和火电机组空载成本的减少量。

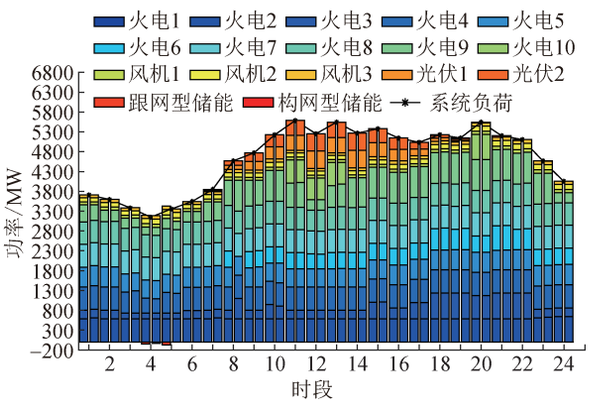


图3　构网型改造前后电能量市场中标情况

Fig. 3　Bidding situation in the electrical energy market before and after grid-forming transformation

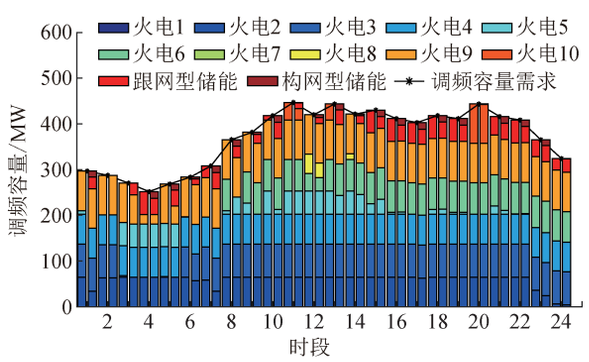


图4　构网型改造前后调频市场中标情况

Fig. 4　Bidding situation in the frequency regulation market before and after grid-forming transformation

图7—9分别给出了电化学储能构网型改造前后电能量、调频和惯量市场的出清价格以及对应储能中标情况。可以看到，由于电化学储能的装机规模远小于系统总装机容量，在电化学储能构网型改造前后，电能量价格、惯量价格以及调频容量价格的变化均不大。由图7可知，在电能量市场中，电化学储能主要通过在电价高时放电、在电价低时充电来实现价差套利。然而，由于改造后得到的构网型储能

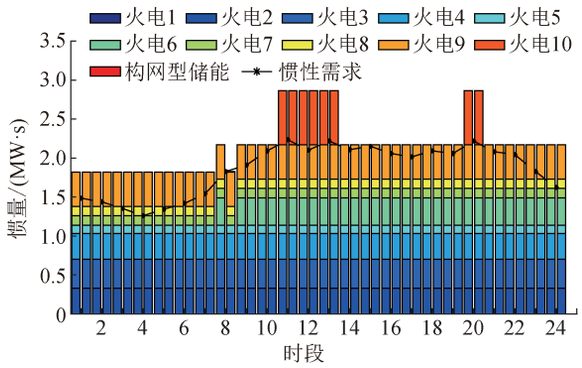


图5 构网型改造前后惯量市场中标情况

Fig. 5 Bidding situation in the inertia market before and after grid-forming transformation

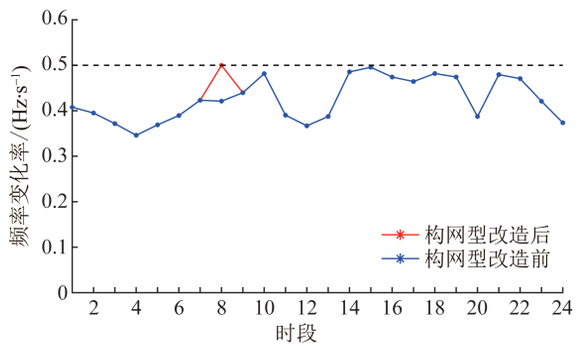


图6 构网型改造前后系统频率变化率

Fig. 6 System rate of change of frequency before and after grid-forming transformation

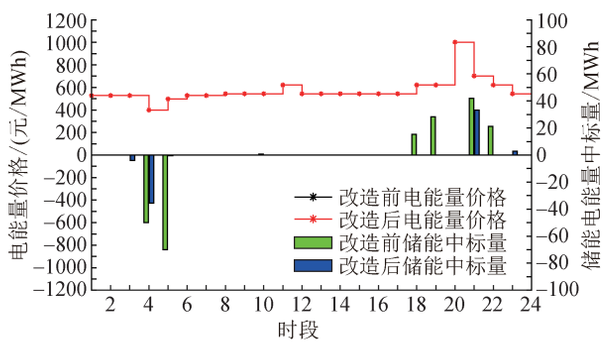


图7 构网型改造前后电能量市场出清价格与储能中标量

Fig. 7 Clearing price and storage dispatched volume in the electrical energy market before and after grid-forming transformation

通过提供虚拟惯量影响了火电机组的启停，储能运营商在各市场的获利机会发生变化。其中，储能在电能量市场的中标量相较于构网型改造前有所减少，导致储能在电能量市场的收益减少，但储能在调频市场相较于构网型改造前中标了更多调频容量，如图8所示。这主要是因为绝大多数时段调频市场出清的调频容量价格高于电能量市场存在的电价差，更具有市场盈利空间，同时火电机组在构网型改造前可中标的调频容量很大程度上被储能所替代。在惯量市场中，如图9所示，构网型储能仅在第8时段中标了87 MW·s的虚拟惯量，基于此，电化学储能运营商需考虑在惯量市场的中标情况，采取最优的构网型改造策略，兼顾电力系统的经济性与安全性。

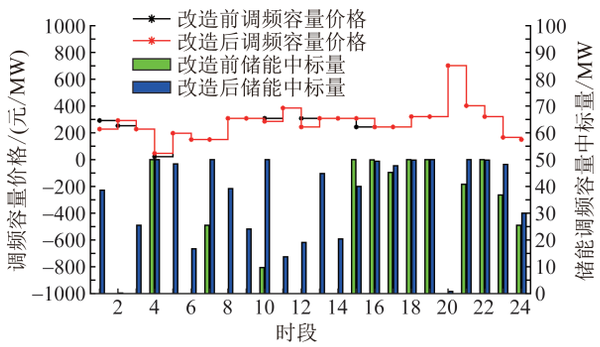


图8 构网型改造前后调频市场出清价格与储能中标量

Fig. 8 Clearing price and storage dispatched volume in the frequency regulation market before and after grid-forming transformation

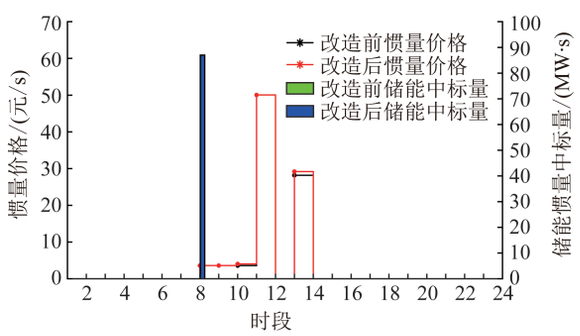


图9 构网型改造前后惯量市场出清价格与储能中标量

Fig. 9 Clearing price and storage dispatched volume in the inertia market before and after grid-forming transformation

4.4 新能源装机规模变化对电化学储能构网型改造策略的影响分析

新能源装机规模对电化学储能运营商的构网型改造策略有一定影响。为了说明这一影响，将原有风电装机规模增加50%进行对比分析，对比结果如表5所示，表中包含不同新能源装机规模下的最优构网型改造比例、电化学储能运营商的净收益增加量以及系统总运行成本减少量。可以看到，当新能源装机规模增加时，电化学储能运营商的最优构网型改造比例由29%增加至64%，净收益增加量提高至204 746.46元，系统总运行成本减少量增加至385 667.39元，说明新能源装机规模的增加将提升系统对构网型储能的需求，同时储能净收益增加量和系统总运行成本减少量也将得到大幅提高。

为进一步说明新能源装机规模增加下系统构网型储能需求增加的原因，图10给出了不同新能源装机

表 5　不同新能源装机规模下的构网型改造策略

Table 5　Grid - forming transformation decisions under various new energy capacity scales

参数	数值	
	原装机规模	装机规模增加 50%
构网型改造比例/%	29	64
储能净收益增加量/元	94 772.32	204 746.46
系统总运行成本减少量/元	82 846.97	385 667.39

规模下的惯量市场中标情况。为方便对比，各时段左侧柱状图为原风电装机规模下各市场主体在惯量市场的中标情况，右侧柱状图为风电装机规模增加 50% 下各市场主体在惯量市场的中标情况。可以看到，在原风电装机规模下，经过电化学储能构网型改造后，为满足系统的惯量需求，仍然需要在第 9 时段启动高边际成本火电机组 6，以及在第 13 时段启动高边际成本火电机组 10。随着风电装机规模的增加，火电机组的电能竞价空间减小，因系统惯量需求使得高边际成本机组保持开机状态，将进一步减少低边际成本火电机组的出清机会，进而增加系统的运行成本。为进一步减小系统的运行成本，系统需增加构网型储能的规模以替代高边际成本的火电机组提供惯量，同时保证系统频率变化率仍处于安全范围内，如图 11 所示。

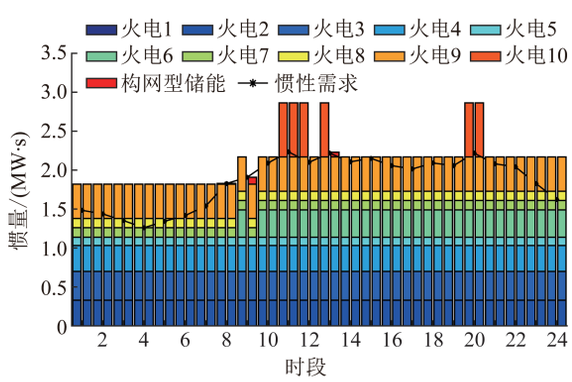


图 10　不同新能源装机规模下的惯量市场中标情况

Fig. 10　Bidding situation in the inertia market under various new energy capacity scales

5　结　论

针对在弱电力系统中直接投建构网型储能面临的投资成本高和投资回收周期长等问题，考虑多元市场的价值激励，在已有跟网型电化学储能的基础上，本文提出了一种计及电能量-调频-惯量联合市场下的电化学储能构网型改造策略优化方法，在兼顾系统经济性与安全性下确定最佳构网型改造比例。首先建立了包含电化学储能的电能量-调频-惯量联合市场交易框架，然后从电化学储能运营商的视角

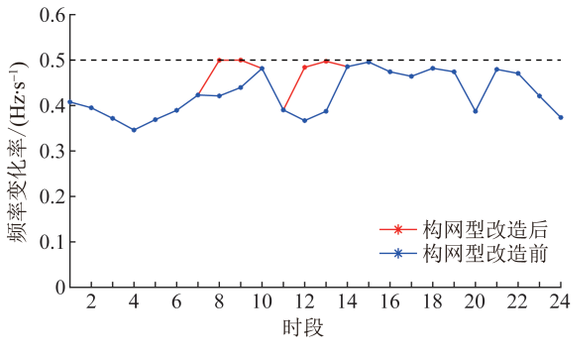


图 11　新能源装机规模增加下构网型改造前后系统频率变化率

Fig. 11　System rate of change of frequency before and after grid - forming transformation under increased new energy capacity

出发，计及电化学储能构网型改造成本，建立了电化学储能参与电能量-调频-惯量联合市场的交易决策双层模型，最后为解决下层市场出清考虑机组启停 0-1 变量而呈现的非凸性所带来的求解难题，提出了一种基于原始-对偶重构和对偶间隙惩罚的求解方法。通过算例分析可以得到以下结论：

1）在计及多元市场价值激励下，构网型改造后电化学储能运营商的净收益增加了 94 772. 32 元，增幅高达 73. 5%，有足够的市场收益激励跟网型电化学储能进行构网型改造。同时，构网型改造后系统运行成本下降约 0. 2%，说明电化学储能的构网型改造可以提升系统整体社会福利水平。

2）跟网型电化学储能经过构网型改造后，可参与电能量-调频-惯量联合市场，并可以通过构网型储能提供虚拟惯量影响火电机组的启停，进而减少了高边际成本火电机组为保证系统惯量安全而处于开机状态的运行需求。

3）当系统风电装机规模增加 50% 时，电化学储能运营商的最优构网型改造比例由 29% 增加至 64%，说明在降低系统运行成本的驱动下，新能源装机规模的扩大将会进一步增加系统对电化学储能进行构网型改造的需求。

未来还可以进一步开展计及多场景、多市场主体博弈均衡下的电化学储能构网型改造策略研究。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明（Authors’ Contributions）：

胡涛负责整体框架设计和理论模型构建，全面协调研究工作，并主导论文的撰写与修改过程；闫志彬参与论文的撰写和修订工作；齐屹负责整理引言

部分的文献综述；靳盘龙承担算例测试数据的整理；张恒进行算例的对比分析；肖云鹏参与论文的审阅，并协助完成最终版本的修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

[1] 韩泽雷，鞠平，秦川，等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备，2023，43(9)：112-124.
HAN Zelei，JU Ping，QIN Chuan，et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system [J]. Electric Power Automation Equipment，2023，43(9)：112-124.

[2] 文云峰，杨伟峰，林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：211-222.
WEN Yunfeng，YANG Weifeng，LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control oflow-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(9)：211-222.

[3] 王新宝，葛景，韩连山，等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(5)：172-179.
WANG Xinbao，GE Jing，HAN Lianshan，et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. Power System Protection and Control，2023，51(5)：172-179.

[4] 魏于凯，贺春，陈卓，等. 基于熵权-TOPSIS模型的构网型储能性能评估系统的开发测试[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(16)：159-168.
WEI Yukai，HE Chun，CHEN Zhuo，et al. Development and testing of grid forming energy storage performance evaluation system based on entropy-weight TOPSIS model [J]. Power System Protection and Control，2025，53(16)：159-168.

[5] 杨振奥，陈俊儒，刘雨姗，等. 基于博弈论和改进TOPSIS的跟网型和构网型场站并网性能对比及评估[J]. 电力科学与技术学报，2025，40(2)：206-216.
YANG Zhen'ao，CHEN Junru，LIU Yushan，et al. Comparison and evaluation of grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations based on game theory and improved TOPSIS [J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2025，40(2)：206-216.

[6] 杨世维，李保宏，江琴，等. 考虑SOC的构网型储能参与风光制氢系统调频策略[J]. 智慧电力，2025，53(5)：8-15.
YANG Shiwei，LI Baohong，JIANG Qin，et al. Frequency regulation strategy considering SOC for grid-forming energy storage participating in wind-photovoltaic hydrogen production systems [J]. Smart Power，2025，53(5)：8-15.

[7] 阮亮，王杨，肖先勇，等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力，2024，52(7)：103-110.
RUAN Liang，WANG Yang，XIAO Xianyong，et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of grid-following and grid-forming inverters[J]. Smart Power，2024，52(7)：103-110.

[8] 刘辉，于思奇，孙大卫，等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：277-296.
LIU Hui，YU Siqi，SUN Dawei，et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(1)：277-296.

[9] 黄炳政，陈俊儒，刘牧阳，等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(12)：57-68.
HUANG Bingzheng，CHEN Junru，LIU Muyang，et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance [J]. Power System Protection and Control，2025，53(12)：57-68.

[10] 熊亮雳，游力，韩刚，等. 基于Lyapunov能量函数的单电压环幅值控制构网型储能虚拟阻抗参数整定方法[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(6)：30-41.
XIONG Liangli，YOU Li，HAN Gang，et al. A Lyapunov energy function-based virtual impedance parameter tuning method for grid-forming energy storage under single loop voltage magnitude control [J]. Power System Protection and Control，2025，53(6)：30-41.

[11] 刘瑞平，袁亮，胡铭欣，等. 含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(6)：152-161.
LIU Ruiping，YUAN Liang，HU Mingxin，et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units [J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(6)：152-161.

[12] 李建林，卢冠铭，游洪灏，等. 基于改进LADRC的构网型储能调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(15)：142-154.
LI Jianlin，LU Guanming，YOU Honghao，et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC [J]. Power System Protection and Control，2024，52(15)：142-154.

[13] 杨天鑫，黄云辉，何珍玉，等. 基于多时间尺度调节的构网型储能电站定容选址优化配置[J]. 电力系统自动化，2024，48(23)：54-64.
YANG Tianxin，HUANG Yunhui，HE Zhenyu，et al. Optimal configuration of siting and sizing for grid-forming battery energy storage station based on multi-timescale regulation[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(23)：54-64.

[14] 马鑫，薛飞，顾文波，等. 考虑多场站短路比约束的构网型储能及分布式调相机优化配置方法[J]. 电力自动化设备，2025，45(5)：40-46，64.
MA Xin，XUE Fei，GU Wenbo，et al. Optimal configuration method of grid-forming energy storage and distributed synchronous condenser considering constraints of MRSCR [J]. Electric Power Automation Equipment，2025，45(5)：40-46，64.

[15] 任冲，任景，程林，等. 基于构网型储能的直流近区新能源暂态过电压抑制方法[J]. 智慧电力，2025，53(9)：1-9.
REN Chong，REN Jing，CHENG Lin，et al. Transient overvoltage suppression method for renewable energy sources near DC

transmission systems based on grid-forming energy storage [J]. Smart Power, 2025, 53(9): 1-9.

[16] 谭玲玲，张文龙，康志豪，等. 计及惯量响应与一次调频参数优化的新能源基地构网型储能规划[J]. 中国电力，2025，58(7)：147-161.
TAN Lingling, ZHANG Wenlong, KANG Zhihao, et al. Grid-forming storage planning for renewable energy bases considering the co-optimization of inertia response and primary frequency regulation parameters[J]. Electric Power, 2025, 58(7): 147-161.

[17] 胥德玉，黄媛，唐志远，等. 面向配电网分布式光伏消纳和可靠性提高的构网型储能优化配置[J]. 电力建设，2026，47(1)：1-14.
XU Deyu, HUANG Yuan, TANG Zhiyuan, et al. Research on grid-forming energy storage configuration for distributed photovoltaic consumption and reliability improvement of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2026, 47(1): 1-14.

[18] 胡朝华，杜新伟，苟竞，等. 提升新型电力系统宽频振荡稳定性的构网型储能设备优化配置方法[J]. 储能科学与技术，2025，14(12)：4583-4593.
HU Zhaohua, DU Xinwei, GOU Jing, et al. Optimal configuration of grid-forming energy storage systems for enhancing broadband oscillation stability in modern power systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4583-4593.

[19] 刘阳，滕卫军，谷青发，等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. 储能科学与技术，2023，12(1)：312-318.
LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12 (1): 312-318.

[20] 新华发电公司. 200 MW/800 MWh,新华莎车构网型共享储能项目并网投运[EB/OL].(2025-04-21)[2025-07-09]. http://www.cnnes.cc/qiye/20250421/10627.html.

[21]《中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》节录[J]. 大众用电，2016，31(2)：6-7.

[22] 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. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (16): 14-28.

[23] 林阿竹，柯清辉，江岳文. 独立储能参与调频辅助服务市场机制设计[J]. 电力自动化设备，2022，42(12)：26-34.
LIN Azhu, KE Qinghui, JIANG Yuewen. Market mechanism design of independent energy storage participating in frequency modulation auxiliary service market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 26-34.

[24] 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(S1)：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.

[25] 禤宗衡，荆朝霞，叶文圣，等. 考虑储能灵活能量状态的新型电能量市场机制[J]. 电网技术，2022，46(10)：3810-3820.
XUAN Zongheng, JING Zhaoxia, YE Wensheng, et al. New energy market mechanism considering flexible state of energy in energy storage [J]. Power System Technology, 2022, 46 (10): 3810-3820.

[26] ZHENG N K, QIN X, WU D, et al. Energy storage state-of-charge market model [J]. IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation, 2023, 1(1): 11-22.

[27] BADESA L, TENG F, STRBAC G. Pricing inertia and frequency response with diverse dynamics in a mixed-integer second-order cone programming formulation [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114334.

[28] DENG J H, LI X, LIU J C. A joint optimal clearing model for energy, inertia and ramping in power systems considering multiple time scales[J]. Applied Energy, 2025, 390: 125892.

[29] 朱兰，董凯旋，唐陇军，等. 计及同步机惯性与储能虚拟惯性价值的电能、惯性及一次调频联合优化出清模型[J]. 中国电机工程学报，2024，44(19)：7543-7554.
ZHU Lan, DONG Kaixuan, TANG Longjun, et al. Joint optimal clearing model for electric energy, inertia and primary frequency response considering synchronous inertia and energy storage virtual inertia values[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7543-7554.

[30] 姜欣，刘萌，王天梁，等. 电网侧储能电站参与现货联合市场的竞价策略[J]. 电网技术，2021，45(9)：3398-3407.
JIANG Xin, LIU Meng, WANG Tianliang, et al. Bidding strategy for grid-side energy storage power stations to participate in the spot joint market[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3398-3407.

[31] 李国庆，闫克非，范高锋，等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(17)：45-54.
LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 45-54.

[32] 陈泽宇，陈艳波. 计及循环寿命和电能量-调频市场出清的储能自调度策略[J]. 电力系统自动化，2024，48(14)：28-41.
CHEN Zeyu, CHEN Yanbo. Self-scheduling strategy of energy storage considering cycle life and clearing of electric power energy-frequency regulation market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 28-41.

[33] MA Q L, WEI W, MEI S W. A two-timescale operation strategy for battery storage in joint frequency and energy markets [J]. IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation, 2024, 2 (2): 200-213.

[34] 张硕，陈媛丽，李英姿，等. 计及电力现货机会成本的构网型储能电站调频辅助服务竞价出清双层博弈模型[J]. 中国电机工程学报，2024，44(增刊1)：146-158.

ZHANG Shuo, CHEN Yuanli, LI Yingzi, et al. A bi-level game model for frequency regulation ancillary service bidding and clearing of grid-forming energy storage stations considering opportunity cost of electricity spot trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 146-158.

[35] 刘继春, 刘可欣, 柯贤波, 等. 新型电力系统下储能参与电能量-惯量-一次调频多市场交易方法[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1018-1031.
LIU Jichun, LIU Kexin, KE Xianbo, et al. Participation of energy storage in electric energy-inertia-primary frequency regulation multi-market trading method under a new power system[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1018-1031.

[36] LIANG Z R, MIETH R, DVORKIN Y. Inertia pricing in stochastic electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2071-2084.

[37] YE Y J, PAPADASKALOPOULOS D, KAZEMPOUR J, et al. Incorporating non-convex operating characteristics into bi-level optimization electricity market models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 163-176.

[38] PEREIRA M V, GRANVILLE S, FAMPA M H C, et al. Strategic bidding under uncertainty: a binary expansion approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 180-188.

[39] IIT. data39. xlsx [EB/OL]. [2025-06-30]. http://motor. ece. iit. edu/data/data39. xlsx.

[40] WANG X, YING L M, WEN K R, et al. Bi-level non-convex joint optimization model of energy storage in energy and primary frequency regulation markets[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107408.

收稿日期: 2025-09-25 **修回日期**: 2025-11-24


胡涛

作者简介:

胡涛(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场、储能系统规划,E-mail: taohu@stu.xjtu.edu.cn;

闫志彬(1972),男,硕士,高级工程师,主要从事电网规划设计、电力系统分析和新能源发展工作,E-mail:yanzhibing@nx.sgcc;

齐屹(1975),男,本科,高级工程师,主要从事电网规划研究、电网规划设计及技术经济工作,E-mail:Qiyi@nx.sgcc.com.cn;

靳盘龙(1988),男,硕士,高级工程师,主要从事电网规划工作,E-mail:jpl6014700@163.com;

张恒(1988),男,硕士,高级工程师,主要从事输电网规划、新型电力系统规划、新能源技术及政策研究工作,E-mail:940444017@qq.com;

肖云鹏(1990),男,博士,副教授,通信作者,主要研究方向为电力市场、新能源电力系统运行与规划,E-mail:ypxiao@xjtu.edu.cn。

(编辑 张小飞)