

火电多市场联合运行策略研究

王淑强¹, 刘世件¹, 黄超¹, 梁家豪²

(1. 五凌电力有限公司, 湖南 长沙 410004;
2. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘 要: 为保证新型电力系统中火电厂商在多个市场的市场竞争力, 基于电能量市场和辅助服务市场的发展情况分析火电厂商的市场竞争力, 考虑最优化火电厂商的市场效益, 构建基于电能量市场和辅助服务市场的火电机组出力曲线优化模型; 结合火电厂商并网博弈、分时段电力电量价值的基本情况, 构建基于 A2C 的火电机组出力优化求解模型。结合仿真算例对所提模型对火电厂商市场效益的提升情况进行验证, 结果证明了该模型的经济性和有效性。

关键词: 深度调峰; 电能量市场; 深度强化学习; 竞争策略; 电力交易

中图分类号: F426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-0198(2022)06-0076-07

Research on Thermal Power Multi-Market Joint Operation Strategy

WANG Shuqiang¹, LIU Shijian¹, HUANG Chao¹, LIANG Jiahao²

(1. Wuling Power Corporation Limited, Changsha 410004, China;
2. School of Economy and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to ensure the market competitiveness of thermal power manufacturers in the new power system in multiple markets, the market competitiveness of thermal power manufacturers based on the development of electricity market and auxiliary service market is analyzed. Considering the market benefit of the optimized thermal power manufacturer, the optimization model of thermal power unit output curve considering the electricity energy market and auxiliary service market is constructed. Combined with the game of multiple thermal power manufacturers connected to the grid and the basic situation of time-segment power quantity value, the output optimization model of thermal power unit based on A2C is constructed. Combined with a simulation example, the model proposed is verified to improve the market benefit of thermal power plant, and the results show that the model is economic and effective.

Key words: deep load changing; main and auxiliary union; deep reinforcement learning; competitive strategy; power transaction

0 引言

随着电力系统向清洁高效方向转型, 发电侧可再生能源发电装机规模大幅增长, 电力系统一方面需要灵活调节资源以提高发电稳定性, 协助解决新能源消纳问题; 另一方面需求侧分布式能源并网增多、短期负荷波动变大、峰谷差变大、电力需求增多等电力系统新变化, 需要火电厂商合理调动资源

以保证电力供需平衡, 使电力系统稳定可靠运行。在该过程中, 火电厂商主要通过电能量市场或者调峰辅助服务市场与供需双侧市场主体产生信息交流和能量互动。因此设计有效的火电厂商市场竞争策略, 并制定合理的机组出力计划, 对提升火电厂商的市场竞争力和促进电力系统的绿色稳定发展具有重要意义。

电力体制向市场化方向改革促使调峰辅助服务

基金项目: 五凌电力辅助服务市场竞争策略研究项目 (19ZDA081)

收稿日期: 2022-08-25 修回日期: 2022-10-10

被推向市场化，辅助服务的价格不再通过行政指令确定而是由市场竞争形成，由于调峰辅助服务需求增长，交易规模不断扩大^[1-3]。而火电利用小时数受可再生能源挤压逐年持续下降，且出力稳定可控，是电力系统优质的灵活调节资源，由此从主要电能提供者转变为主要调节性资源提供者^[4-5]，收入来源相应转变为由主能量市场与调峰辅助服务市场两者共同构成。

为适应市场环境的竞争格局，需要研究火电在多类型电力市场中的主体地位和竞争策略。目前，针对火电参与单一市场的竞争策略研究已有较多成果，如文献[6-8]针对电能量市场的报价策略开展研究，讨论在各种市场机制下电能量市场的火电竞争策略；文献[9]针对辅助服务市场中火电自身调峰的成本收益进行分析和策略研究；文献[10-12]讨论了在考虑新能源情况下的火电调峰策略；文献[13]提出了火电与抽蓄联合调峰策略；文献[14]分析选用不同电价与电力的竞价策略时对调峰辅助服务市场的影响，发现其策略不仅影响自身还会影响到整个市场；文献[15]则分析了省间市场的竞争策略；文献[16]分析了主能量与备用市场联合竞争策略；文献[17]对有功电能与备用电能联合分析，实现了无功与备用等交易品种的联动。但是对应的研究成果中，并未针对火电厂商参与现阶段分时段中长期或现货交易展开分析，也未结合电能量市场和辅助服务市场进行综合研究探讨，所应用的求解算法也无法满足现阶段分时段电力电量交易的要求，无法实现高效求解。

为此，本文根据当前新型电力系统的建设情况，结合多级电力市场的发展情况和竞争要点，对火电厂在电能量市场与深度调峰辅助服务市场的联合竞争策略展开研究。首先，基于电能量市场和电力辅助服务市场的基本情况，分析火电厂商在竞争过程中的能流方向和效益来源；然后构建考虑能量市场和辅助服务市场的火电厂商市场竞争策略优化模型；进一步设计基于深度强化学习的火电厂商出力求解模型；最后结合算例对本文所提模型和算法的有效性进行验证。

1 考虑主辅电力市场特征的火电厂商市场竞争策略

1.1 电能量市场和辅助服务市场框架

电能量市场能够满足供需双侧电能交易的基本

需求，辅助服务市场则保证供需双侧电力平衡稳定的高效电能质量，是电力系统安全可靠运行不可或缺的重要内容^[18]。其中电能量市场具有如图 1 所示的基本市场框架。

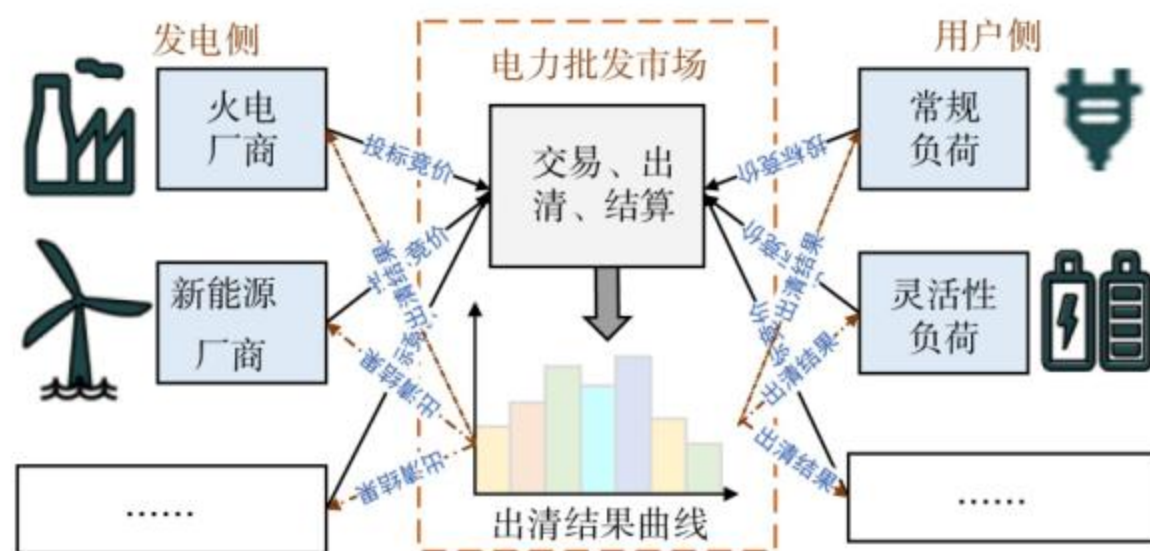


图 1 电能量市场的基本框架

在电能量市场中，火电厂商、新能源厂商等发电侧市场主体与常规负荷、灵活性负荷等用户侧市场主体报价报量，由交易中心组织交易过程并进行出清与结算。出清后，火电厂商与用户侧对应负荷主体签订分时段发用电合约，并以此为依据开展机组调控。

同时，辅助服务市场有如图 2 所示的市场框架。

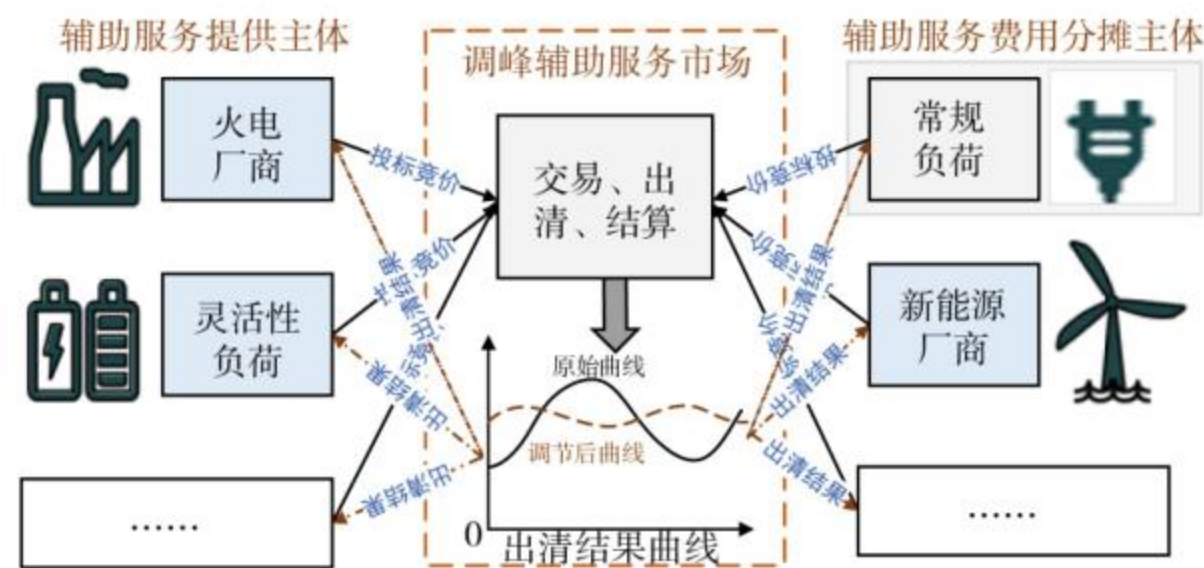


图 2 辅助服务市场的基本框架

在辅助服务市场中具有提供辅助服务的市场主体和支付辅助服务费用的市场主体。目前，电力辅助服务的提供者主要是火电厂商，随着辅助服务市场的发展，部分地区的灵活性负荷、抽水蓄能电站等加入辅助服务市场提供辅助服务；当前电力辅助服务费用的主要分摊对象为发电侧未提供辅助服务的厂商，包括新能源厂商和部分火电厂商，随着辅助服务市场的发展，部分地区的常规负荷资源也将分摊部分辅助服务费用以保证电力交易公平合理。

总的来说，现阶段火电厂商在两个电力市场中都具备主体地位。但是随着高比例新能源接入，火电厂商在电能量市场中的竞价空间受到挤压，地位逐渐降低，在辅助服务市场中的竞争力逐渐增强。火电厂商需综合考虑自身运营成本、市场收益等多方面因素，制定合理的竞争策略以实现高效运行并提升市场效益。

1.2 火电厂商市场竞争策略

火电厂商作为电能量市场和辅助服务市场中的主要市场主体,对电能量稳定供应和辅助服务可靠运行具有重要意义。合理把握市场变化,构建高效经济的火电厂商竞争策略和调控模型,能够保证火电的可持续发展并促进新型电力系统的建设。本文考虑火电厂商在参与电能量市场与深度调峰辅助服务市场的联合竞争过程中,具有如下竞争策略。

1) 多类型市场联动。由于火电厂商参与电能量市场与辅助服务市场并不存在互斥关系,因此,以多个市场的总效益最优为目标提出市场投标策略并构建优化调控模型,以最优化火电厂商的市场效益。

2) 时段细分求解多个火电机组的分时段调控曲线。结合现阶段电能量交易为分时段中长期交易,并将逐步向现货交易过渡的市场现状,本文构建以出力曲线为基础的火电机组优化调控模型,并考虑多个火电之间的关联关系构建优化求解模型。

3) 针对辅助服务交易过程迅速、频繁的特征,构建基于深度强化学习的调控模型求解算法。算法能够拟合火电厂商参与的电能量市场和辅助服务市场特征,继而迅速有效求解火电机组的市场投标策略和机组调控策略。

2 考虑多类型电力市场的火电调控模型

2.1 最优发电效益的火电机组市场竞争模型

考虑火电厂商在电能量市场与深度调峰辅助服务市场的竞争策略,构建考虑最大化火电厂商市场效益的分时段市场投标策略模型,如公式(1)所示。

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (E_{s,i}^t + E_{e,i}^t - C_{s,i}^t - C_{e,i}^t) \quad (1)$$

式中, N 为火电厂商总数; T 为火电厂商参与分时段交易的时段总数; $E_{s,i}^t$ 为第 i 个火电厂商在 t 时段参与深度调峰市场获得的收入,元/(MW·h); $E_{e,i}^t$ 为第 i 个火电厂商在 t 时段参与电能量市场获得的收入,元/(MW·h); $C_{s,i}^t$ 为火电企业在深度调峰市场支出的成本,元/(MW·h); $C_{e,i}^t$ 为火电企业在电能量市场支出的成本,元/(MW·h)。

2.2 电能量市场成本效益函数

在常规的生产运营过程中,火电厂商的运营成本主要与机组出力有关。采用二次函数对 i 个火电厂商

在 t 时段的生产成本进行表示,则有生产成本 $C_{e,i}^t$ 与火电厂出力 P_i^t 的相互关系如公式(2)所示。

$$C_{e,i}^t = \sum_t^T a (P_i^t)^2 + b P_i^t + c \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 分别代表二次项、一次项与常数项的系数; t 为 15 min 连续时段的交易周期。

在常规的生产运营过程中,火电厂商的运营收入主要与机组出力有关。火电厂商 i 在 t 时段在电能量市场的收入 $E_{e,i}^t$ 计算方式如公式(3) — (4)所示。

$$E_{e,i} = \sum_t^T E_{e,i}^t \quad (3)$$

$$E_{e,i}^t = Q_{e,i}^t \times \overline{\pi_e^t} \quad (4)$$

式中, $Q_{e,i}^t$ 为火电企业在 t 时段售出电量, MW·h; $\overline{\pi_e^t}$ 为火电企业在 t 时段的分时段电价。

2.3 辅助服务市场的成本效益函数

火电企业参与深度调峰市场的成本主要由以下两方面构成:参与深度调峰服务时降低出力导致生产效率损失的生产成本;深度调峰辅助服务市场的深度调峰服务费对各市场主体的分摊电费。

当市场上出现深度调峰电量时,说明火电基本调峰义务的容量已被用尽,若不参与深度调峰市场,此时的发电出力刚好处于基本调峰义务容量。

在考虑调峰辅助服务市场的情况下, P_i^t 与发电计划和深度调峰市场的交易规则相关,由市场出清决定,是与 t 时段调峰服务报价 π^t 、调峰需求 Q_s^t 、装机容量 $P_{N,i}$ 相关的函数,如式(5)所示。

$$P_i^t = f(\pi^t, Q_s^t, P_{N,i}) \quad (5)$$

由此建立火电厂商参与辅助服务市场的成本模型,火电机组参与深度调峰的成本 $C_{s,i}^t$ 如式(6)所示。

$$C_{s,i}^t = \begin{cases} \frac{1}{4} \sum_t^T C_{e,i}^t(P_{2,i}^t) - C_{e,i}^t(P_{1,i}^t) + P_{2,i}^t \times \overline{\pi_f^t}, & P_{1,i}^t < 50\%P_{N,i} \\ \frac{1}{4} \sum_t^T C_{e,i}^t(P_{2,i}^t) - C_{e,i}^t(50\%P_{N,i}) + P_{2,i}^t \times \overline{\pi_f^t}, & P_{1,i}^t \geq 50\%P_{N,i} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{1,i}^t$ 代表第 i 个火电厂商在 t 时段发电计划出力, MW; $P_{2,i}^t$ 代表第 i 个火电厂商在 t 时段火电机组实际出力, MW; $P_{N,i}$ 为第 i 个火电机组的装机容量, MW; $\bar{\pi}_t^t$ 为在 t 时段调峰服务费对火电机组上网电量进行分摊的平均单价, 元/(MW·h)。

深度调峰服务的结算方式采用最低负荷率价格中标价结算, 即一次深度调峰服务中, 所有调峰量都按实际调峰过程中火电机组所达到负荷率最低的那一档报价进行结算。据此, 有深度调峰市场收入 $E_{s,i}^t$ 的计算公式如式 (7) — (8) 所示。

$$E_s = \sum_t E_s^t \quad (7)$$

$$E_{s,i}^t = \begin{cases} Q_{s,i}^t \times \pi_{s,1}^t, & 45\%P_{N,i} \leq P_{s,i,\min}^t < 50\%P_{N,i} \\ Q_{s,i}^t \times \pi_{s,2}^t, & 40\%P_{N,i} \leq P_{s,i,\min}^t < 45\%P_{N,i} \\ Q_{s,i}^t \times \pi_{s,3}^t, & 35\%P_{N,i} \leq P_{s,i,\min}^t < 40\%P_{N,i} \\ Q_{s,i}^t \times \pi_{s,4}^t, & 30\%P_{N,i} \leq P_{s,i,\min}^t < 35\%P_{N,i} \\ Q_{s,i}^t \times \pi_{s,5}^t, & P_{s,i,\min}^t < 30\%P_{N,i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Q_{s,i}^t$ 为第 i 个火电厂商在 t 时段提供的深度调峰电量; $\pi_{s,1}^t$ 、 $\pi_{s,2}^t$ 、 $\pi_{s,3}^t$ 、 $\pi_{s,4}^t$ 和 $\pi_{s,5}^t$ 分别为 t 时段火电机组负荷率处于区间 $[45\%, 50\%)$ 、 $[40\%, 45\%)$ 、 $[35\%, 40\%)$ 、 $[30\%, 35\%)$ 和 $(0, 30\%)$ 内时的深度调峰服务中标价, 元/(MW·h); $P_{s,i,\min}^t$ 为 t 时段火电机组在调峰过程中的实际最低出力, MW。

2.4 火电厂商出力约束

火电厂进行优化调控时主要有爬坡约束、机组出力上下限约束、调峰电量约束等。

1) 爬坡约束

火电机组的发电计划安排应考虑火电机组的爬坡约束, 相邻两个时段的发电计划出力不应超过火电机组的爬坡能力, 因此有如公式 (9) 所示约束条件。

$$-V_{D,i} < P_i^t - P_i^{t-1} < V_{U,i} \quad (9)$$

式中, $V_{D,i}$ 和 $V_{U,i}$ 分别为第 i 个火电机组的下爬坡和上爬坡速度, MW/min。

2) 出力上下限约束

火电机组的出力应小于其装机容量, 大于其最低技术出力, 因此有如式 (10) — (11) 所示约

束条件。

$$P_{i,\min}^t \leq P_{1,i}^t \leq P_{N,i} \quad (10)$$

$$P_{i,\min}^t \leq P_{2,i}^t \leq P_{N,i} \quad (11)$$

3) 调峰电量约束

市场总调峰量为所有调峰机组中标调峰量之和, 因此有如式 (12) 所示约束条件。

$$Q_{s,\text{total}}^t = \sum_{i=1}^N Q_{s,i}^t \quad (12)$$

式中, $Q_{s,\text{total}}^t$ 为 t 时段市场总深度调峰电量, $Q_{s,i}^t$ 为第 i 个火电厂商在 t 时段机组中标调峰量。

4) 供需平衡约束

火电厂商实现电能量交易的总电量需与该时段合约电量一致, 因此有如式 (13) 所示的约束条件。

$$Q_{e,i}^w = \sum_{t=w_d}^{t=w_u} Q_{e,i}^t \quad (13)$$

式中, $w = (w_d, w_u]$, 依据电力中长期时段划分结果设置, w_u 和 w_d 分别代表对应时段的上限和下限, 例如 w 为谷时段且 $w = (0, 28]$, 则计算该日该地区 00:00—07:00 总发电量为分时段发电电量, 现货市场中 w 含义与 t 一致; $Q_{e,i}^w$ 为 w 时段的合约电量。

3 基于 Actor-Critic 框架的同步优势强化学习算法

强化学习算法利用智能体与环境交互所得的奖惩信息来指导行为策略^[19-20]。同步优势 Actor-Critic (Synchronous Advantage Actor-Critic, A2C) 是强化学习中基于 Actor-Critic 框架的算法, 它的核心思想是利用 Actor 网络用来生成智能体的行为策略, 利用 Critic 网络来评判动作好坏, 利用并行计算的方法加速动作方向的更新。

如图 3 所示, 全局行动者和全局批判者在 Master 节点进行行为维护。每个 Worker 节点的强化学习智能体通过协调器和全局行动者、全局批判者进行数据传递。在这个设计中, 协调器负责收集各个 Worker 节点上与环境交互的经验, 然后根据收集到的轨迹执行一步更新。更新之后, 全局行动者被同步到各个 Worker 上继续和环境交互。

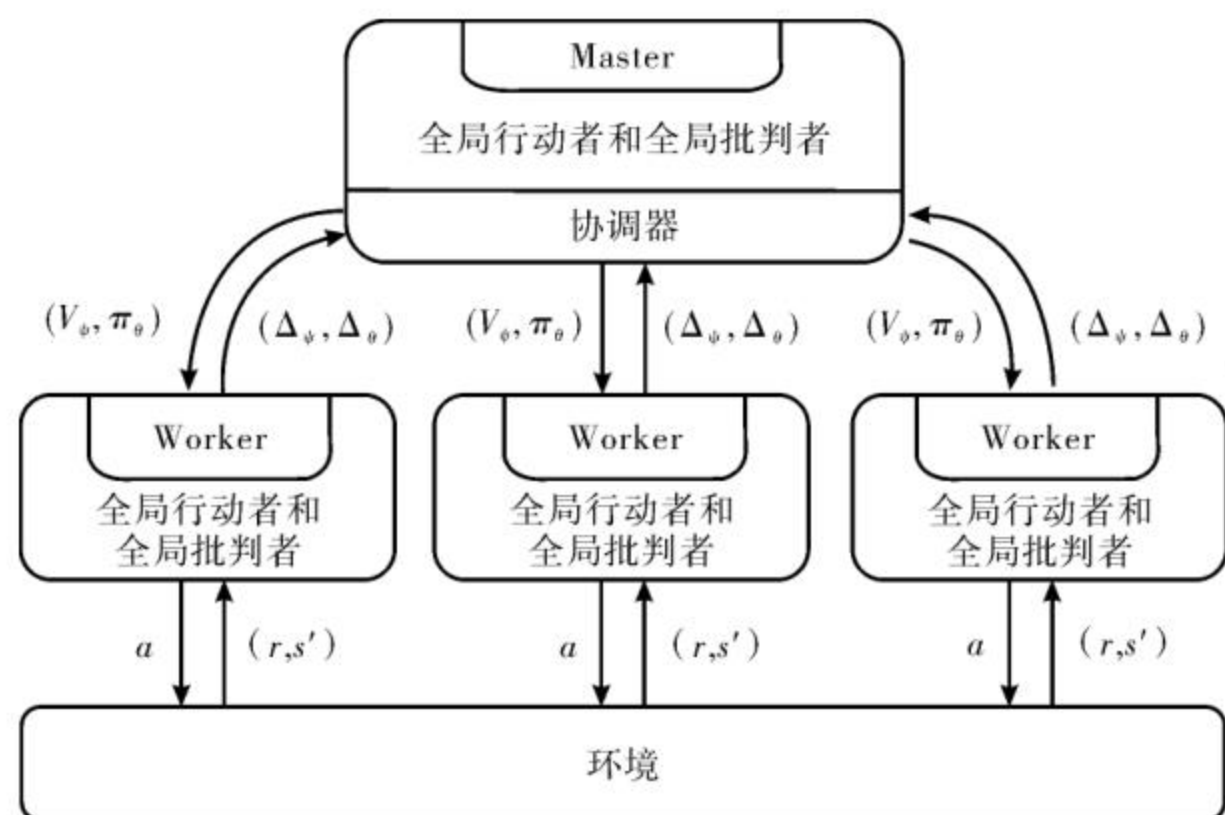


图 3 A2C 算法训练流程基本框架

此外，算法沿用自举法的思想来估计价值函数，其中误差项由 L 步时间查分误差取代，并通过最小化误差来学习批判者函数 $V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}(s)$ ，即：

$$\varphi \leftarrow \varphi - \eta_{\varphi} \nabla J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi) \quad (14)$$

式中， φ 表示学习批判者函数的参数； η_{φ} 是学习步长，且期望奖励值 $J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi)$ 可以表示为：

$$J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi) = \frac{1}{2} \left(\sum_{t=i}^{i+L-1} \gamma^{t-i} R_t + \gamma^L V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}(S') - V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}(S_i) \right)^2 \quad (15)$$

S' 是智能体在策略 π_{θ} 下 L 步之后达到的状态，所以价值梯度 $\nabla J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi)$ 可表示为：

$$\nabla J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi) = \left(\nabla J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi) - \sum_{t=i}^{i+L-1} \gamma^{t-i} R_t - \gamma^L V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}(S') \right) \times \nabla V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}(S_i) \quad (16)$$

类似的，行动者函数 $\pi_{\theta}(\cdot | s)$ 决定每个状态 s 上所采取的动作空间上的概率分布，更新方法如下：

$$\theta = \theta + \eta_{\theta} \nabla J_{\pi_{\theta}}(\theta) \quad (17)$$

式中， θ 表示行动者函数的参数； η_{θ} 是学习步长。并且可以得到策略的更新梯度为：

$$\nabla J(\theta) = E_{\theta} \left[\sum_{i=0}^{\infty} \nabla \log \pi_{\theta}(A_i | S_i) J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}^{1/2}(\varphi) \right] \quad (18)$$

A2C 算法的流程如下：

- 1) 超参数：步长 η_{φ} 和 η_{θ} ，Worker 节点集 ω 。
- 2) 输入：初始策略函数参数 θ_0 、初始价值函数参数 φ_0 。

- 3) 初始化 $\theta = \theta_0$ 和 $\varphi = \varphi_0$ 并迭代。

循环：根据策略网络 $\pi_{\theta}(A_t | S_t)$ 进行一步实验，返回动作 a 和后续状态 s' 。

计算差分误差： $\sigma = R_i + \gamma V_{\pi}(S_{i+1}) - V^{\pi}(S_i)$ 。

更新价值网络参数： $\varphi' \leftarrow \varphi - \eta_{\varphi} \nabla J_{V_{\varphi}^{\pi_{\theta}}}(\varphi)$ 。

更新策略网络参数： $\theta' \leftarrow \theta + \eta_{\theta} \nabla J_{\pi_{\theta}}(\theta)$ ，直到 $|\varphi - \varphi'| < \sigma$ ， $|\theta - \theta'| < \sigma$ 。

- 4) 输出：最优策略 π 。

4 算例分析

4.1 算例设计

本算例按火电机组处于 50% 及以上负荷率时的调峰为基本调峰义务，可被调度管理机构无偿调用。火电机组处于 50% 负荷率以下的调峰被判定为深度调峰服务，属于有偿调峰，深度调峰服务的调用应在市场上基本调峰容量用尽后才可调用。深度调峰服务通过市场竞标决定调用顺序与结算价格，一旦被调用，应根据报价对其支付相应的调峰服务费。在电能量市场中，因提供调峰造成的少发电量不进行偏差考核，且由于电能量市场按月考核，调峰造成的少发电量将由调度机构在月内滚动调整，或通过上下调机制进行补偿，故不考虑由调峰少发电量产生的机会成本。

电能量市场为带曲线交易，发电出力曲线由火电机组与用户签订的中长期用电合同决定，在日前市场中进行申报。市场调峰需求取自某电网在某典型日实际运行产生的深度调峰需求。

在本算例中，深度调峰辅助服务交易规则参考《湖南省电力辅助服务市场交易模拟运行规则》内深度调峰交易品种的相关规定进行计算，主能量市场的交易规则参考《湖南省电力中长期交易实施细则》及相关修改增补条款。

4.2 模型有效性分析

为了验证所提方法的有效性，采用 AC 算法接入对应负荷数据时期的电能量市场和辅助服务市场出清数据进行模拟仿真。仿真环境中，以年为训练周期对 96 点出力策略进行优化，并统计发电机组每个训练周期结束后收入与出力变动情况。实验中的强化学习模型采用 Python Tensorflow 2.0 计算。模型收敛情况如图 4 所示。

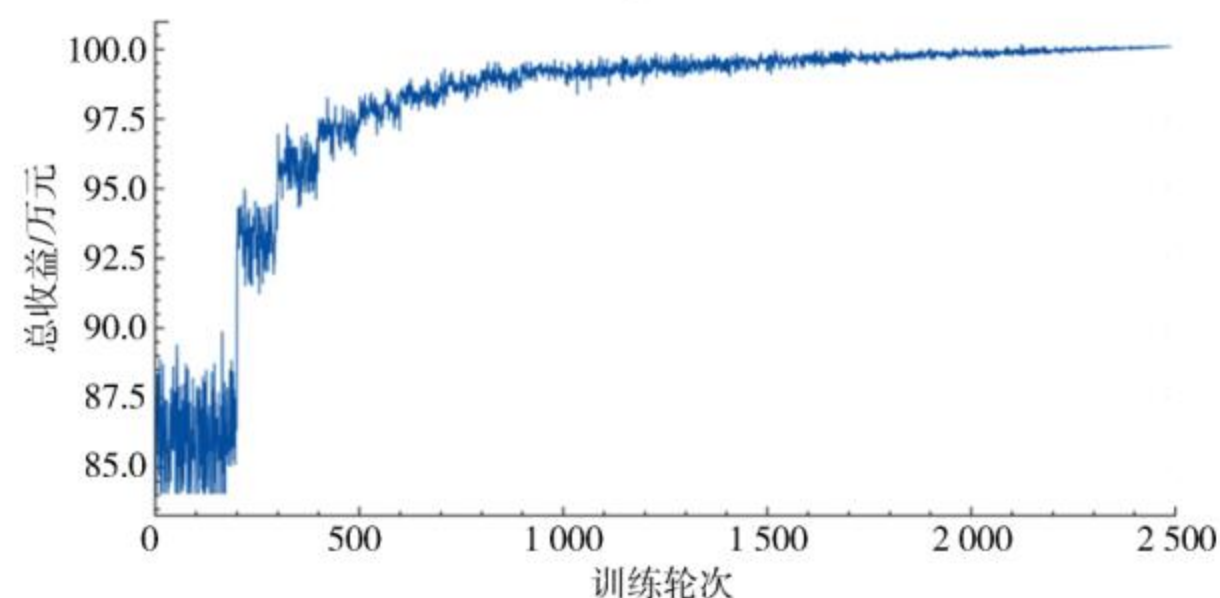


图 4 A2C 算法收敛曲线

在总计 2 500 轮训练中，算法迭代的决策空间较大，算法在收敛的过程中出现了一定的振荡性。但加入了更新策略下的收益不能低于原收益的约束后，算法避免了从负收益开始的无序迭代，策略从初始回合就提升了发电机组的整体收益，并在约 1 500 轮迭代后趋于平稳。收敛后发电机组整体收益提高了 19.15%，证明了算法的稳定性和有效性。

4.3 优化结果分析

假定市场内其他调峰机组的报价策略不变，将除机组 A 以外市场中其他火电调峰机组等值为 1 台发电机组。当日市场中其他参与调峰的火电机组总开机台数为 16 台，总开机容量为 7 505 MW。受最小技术出力限制，竞价仅参与到负荷率为 [30%，35%) 一档，价格申报参考某电网辅助服务市场深度调峰交易实际运行情况，火电机组皆贴近竞价上限进行申报。该等值机组的深度调峰服务报价及最大可调容量见表 1。

表 1 等效机组报价

负荷率区间	报价/(元·(MW·h) ⁻¹)	最大可调容量/MW
[45%，50%)	400	375.25
[40%，45%)	500	375.25
[35%，40%)	600	375.25
[30%，35%)	700	375.25

机组 A 在电能量市场中的平均售电价格 $\overline{\pi_e}$ 取 385 元/(MW·h)， $\overline{\pi_f}$ 取 4.3 元/(MW·h)；为确保中标， $\pi_{s,1}^t$ 、 $\pi_{s,2}^t$ 、 $\pi_{s,3}^t$ 和 $\pi_{s,4}^t$ 分别取 399 元/(MW·h)、499 元/(MW·h)、599 元/(MW·h) 和 699 元/(MW·h)； V_D 和 V_U 取 6 MW/min。对于强化学习环境设计部分，最优化模型采用 Python 编程语言中的 scipy.optimize.minimize 优化工具进行求解。综合求得优化结果如图 5 所示。

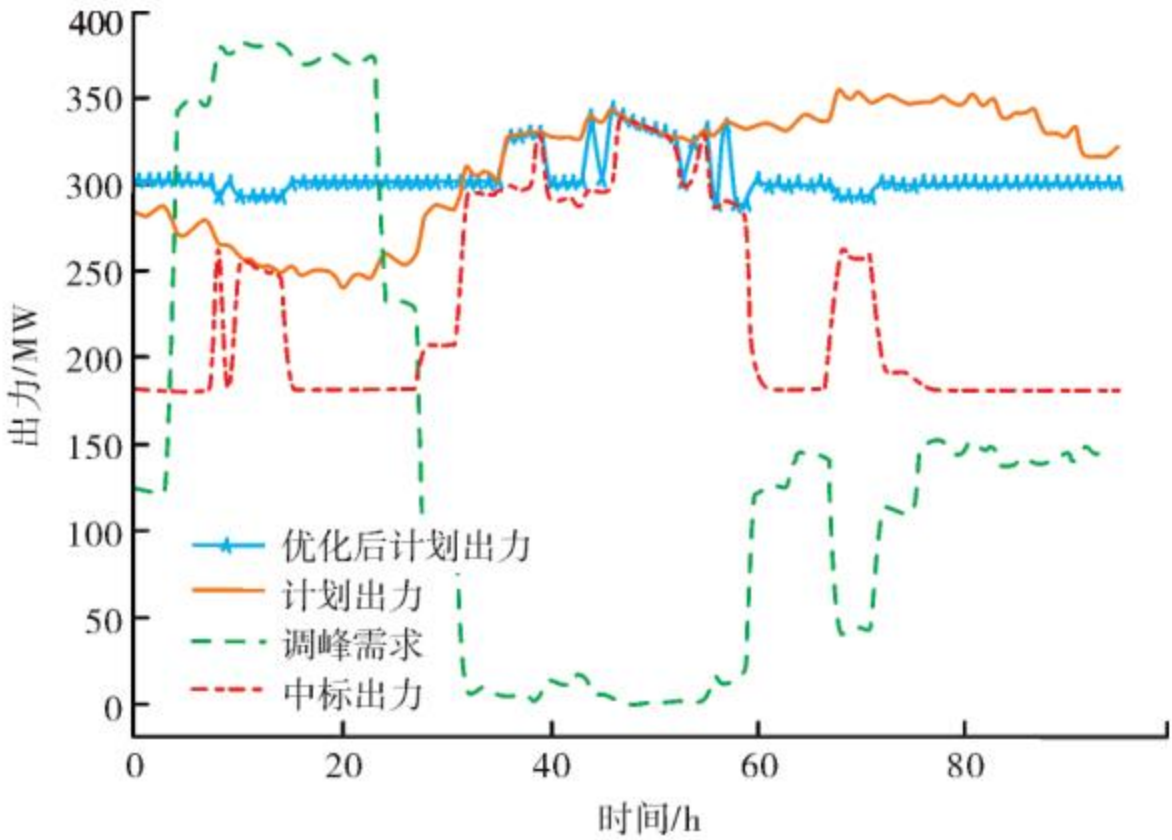
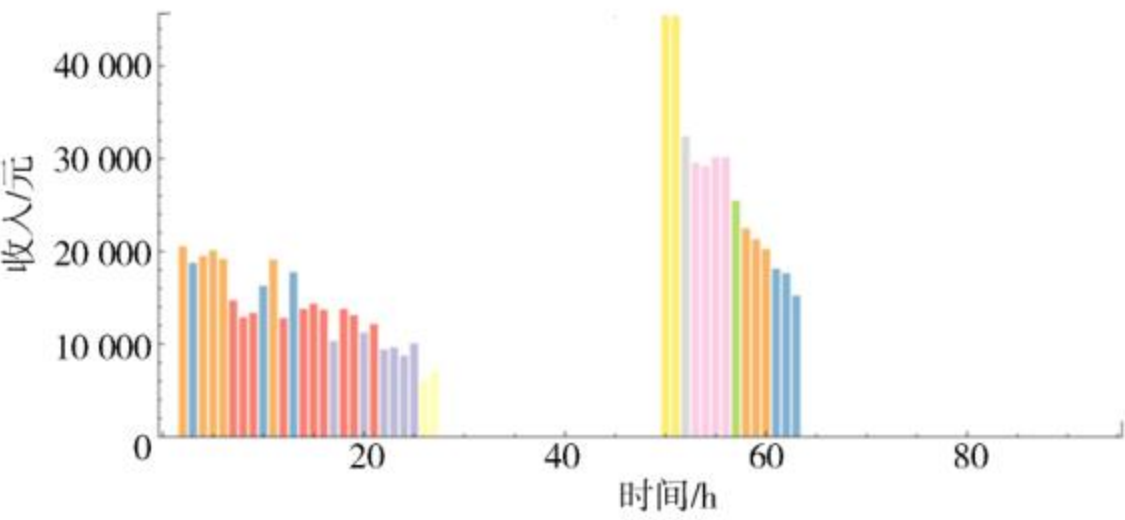
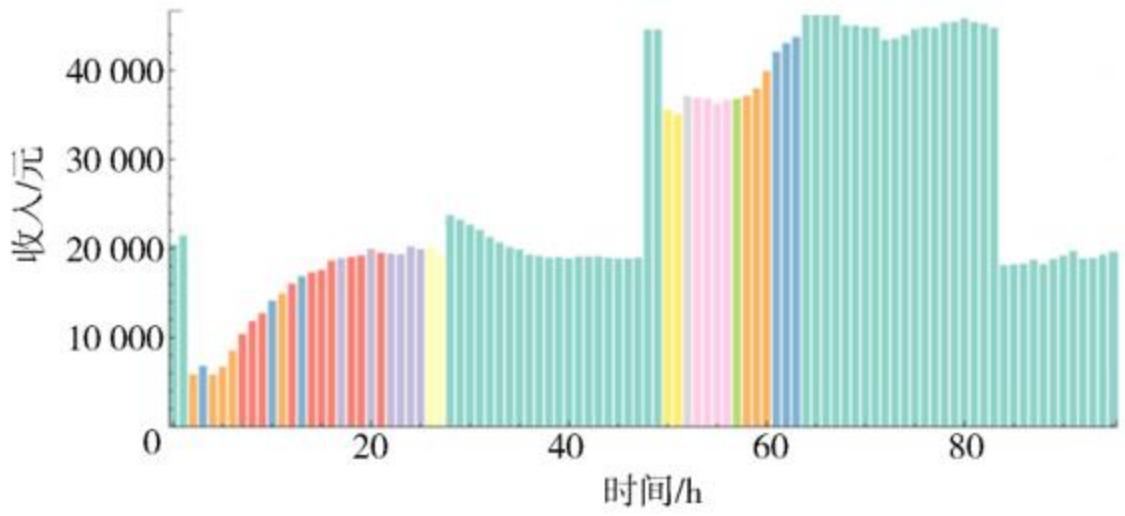


图 5 机组 A 计划出力优化结果

优化前后的收益情况如图 6 和表 2 所示。



(a) 深度调峰辅助服务收入



(b) 电能量市场收入

图 6 不同市场各时点运行收入对比

表 2 不同市场收益分布对比

元

对比项目	优化后	优化前
电能量市场收入	2 081 285.94	2 081 285.94
深度调峰辅助服务市场收入	1 243 589.90	1 064 384.68
电能量市场成本	1 821 493.88	1 821 493.88
深度调峰辅助服务市场成本	501 634.15	483 417.13
收益	1 001 747.81	840 759.61

由优化结果可知，由于电能量市场的最终中标结果未发生变化，电能量市场的成本和收入在优化前后是一致的，电能量市场的收益与计划出力无关，而与实际出力曲线有关。增量收益主要由深度调峰辅助服务市场贡献，峰时段收益高于谷时段，收益之比约为 2 : 1。在深度调峰辅助服务市场中，优化后的策略提升收入并抬升了成本，但总体上仍增加 160 988.2 元利润，增幅为 19.15%。当市场调峰需求旺盛时，计划出力安排在基本调峰义务曲线附近是最优的，而市场调峰需求低迷时，则基本上不对发电计划做出更改。

4.4 主辅联合竞争策略分析

受机会成本的影响，当火电机组的计划出力不同时，其收益曲线将存在较大的差异，根据火电机组负荷率在低中高等不同典型出力水平的运行算法可以得到一个交易周期的收益曲线，如图 7 所示。

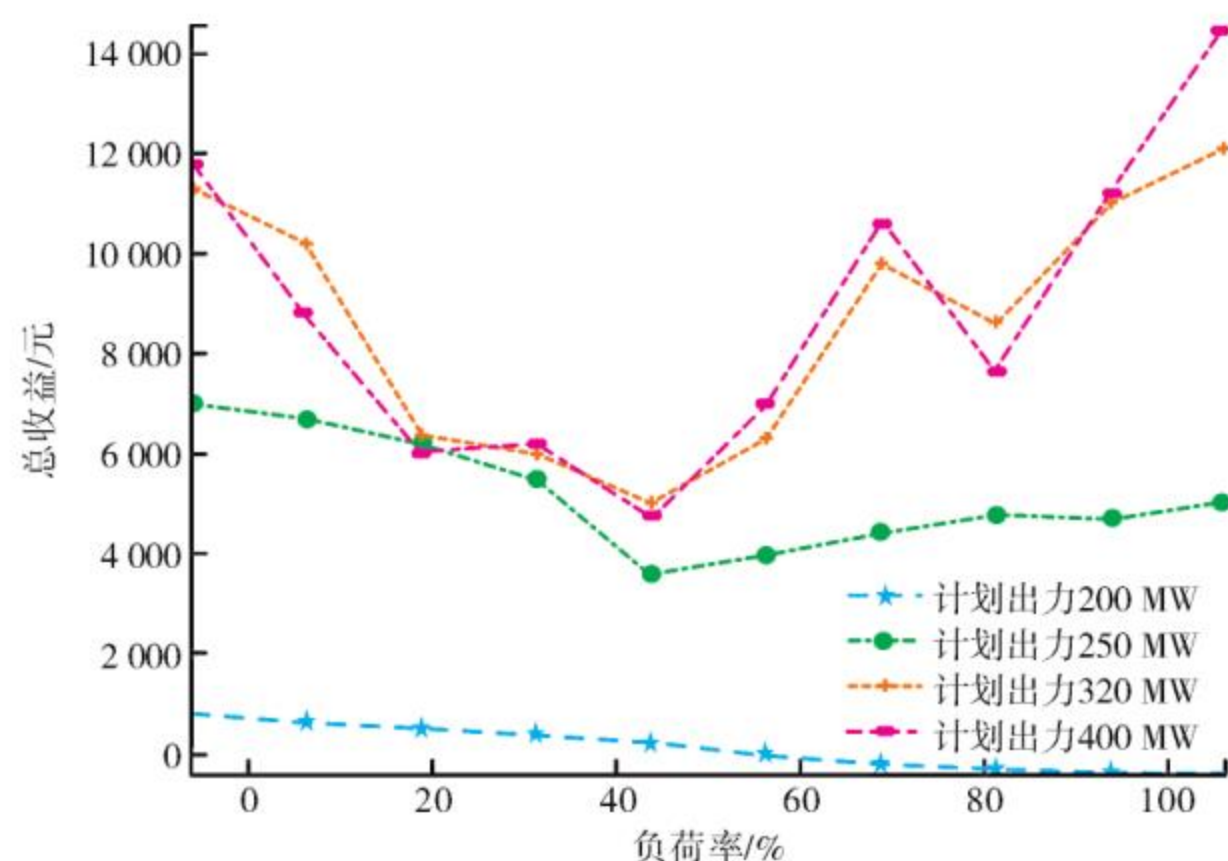


图 7 不同出力下的收益曲线

当计划出力处于较低水平时，由于生产成本较高，可能会亏本生产。此时参与深度调峰市场，负荷率下降导致的生产成本上升较少，而参与深度调峰却可以获得低负荷率区间的高单价调峰收益。因此，在低负荷率水平时应积极参与深度调峰市场，用深度调峰交易的收益覆盖低负荷率运行状态的高生产成本。

当计划出力处于 50% 负荷率基本调峰义务线附近时，若想获得高额收益，必须下降至最低技术出力，提供最低负荷率档的深度调峰服务。若在此时参与调峰市场将带来巨大的风险，一旦市场调峰需求不足，无法降低至最低负荷率提供调峰服务，深度调峰交易的结算单价将不足以覆盖高额的机会成本，从而降低自身收益。在此时保持原计划出力水平反而可以获得较为稳定的高额收益。因此，处于 50% 负荷率附近时，若能准确预测市场的调峰需求，在调峰需求较多时参与市场是较好的选择；无法准确预测市场调峰需求或调峰需求较少时，保持当前负荷率运行则是较为稳妥的选择。

当计划出力处于高负荷率状态时，参与深度调峰交易获得的收益无法完全覆盖下调出力导致的生产成本损失，此时生产电能上网出售，不参与深度调峰辅助服务市场是最好的选择。

由以上分析，在一个交易周期内机组处于不同计划出力水平时，考虑主辅市场联合竞争获得最大收益的最优出力及其相对应的收益如图 8 所示。

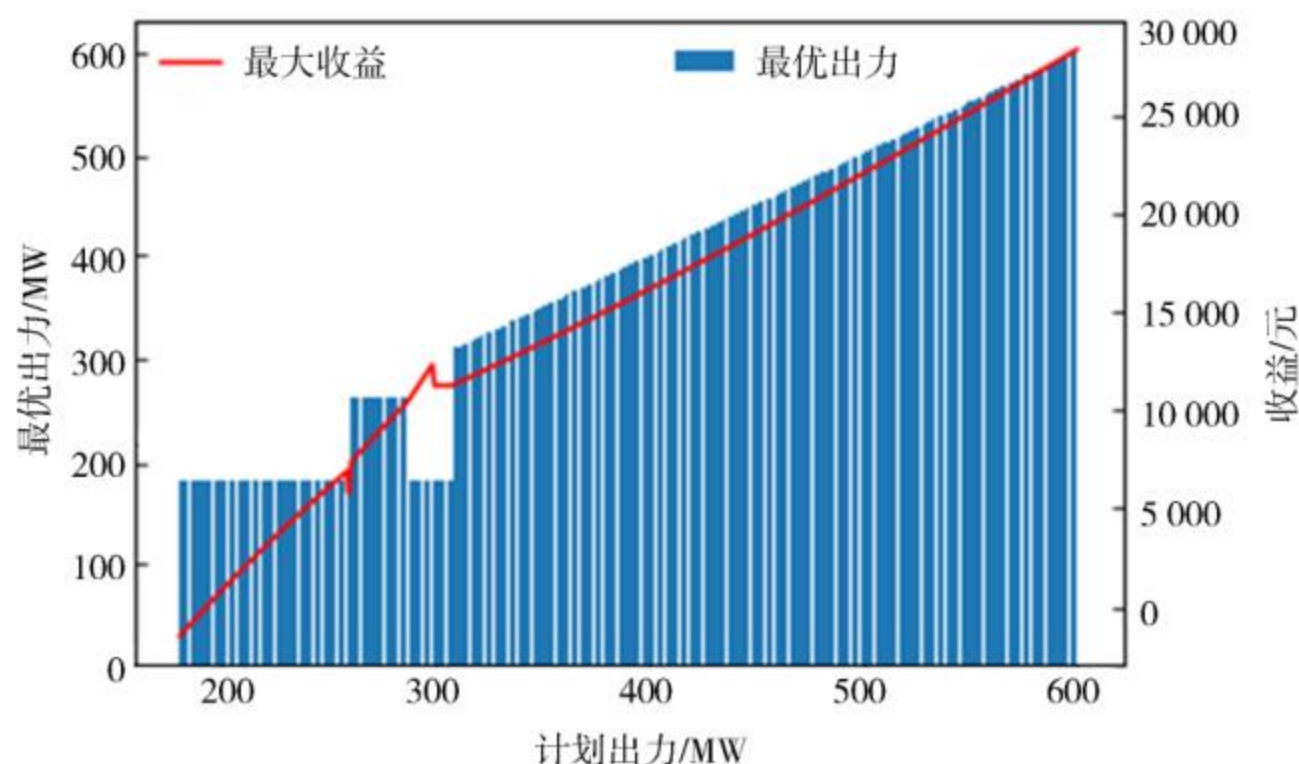


图 8 机组 A 最优出力及收益

5 结论

为了提升火电机组在复杂电力市场环境下的运行经济性，利用 A2C 强化学习算法在线学习机组运行特性及市场运行参数信息，通过对火电机组出力曲线的决策训练研究了参与主能量市场与深度调峰辅助服务市场优化策略。由于火电机组的收益与容量息息相关，主辅联合竞争策略的关键在于火电发电容量在主能量市场与辅助服务市场之间的分配。对主辅市场的竞争策略分析得出结论如下：

1) 火电在基本调峰义务线之上运行时，收益随着计划出力的增加而增加。由于负荷率运行的成本较低，且受基本调峰服务的影响，不宜参与深度调峰。而火电在较低负荷率状态下运行可能产生亏损，此时仅能通过参与深度调峰获得调峰收益从而扭亏为盈。

2) 通过算法对火电机组实际出力曲线的影响，本文在算法训练 2 500 轮后稳定实现了在保证原始电能量市场收益的前提下，大幅提升了火电机组在辅助服务市场的收益，整体收益提升了 19.15%，并有效响应了辅助服务市场需求。

3) 火电在不同出力情况下的最大收益与发电计划出力高度相关。火电机组在不同计划出力水平下参与深度调峰所获得的总收益不同，算法可以有效跟踪不同出力水平下的收益变化，提出最优的运行策略。

参 考 文 献

- [1] 张海卫, 陆陆, 邵程安, 等. 电力市场调频辅助服务中火电机组 AGC 运行及控制策略研究[J]. 仪器仪表用户, 2022, 29 (5): 90-94, 74.
- [2] 刘畅, 孙晋, 陈斌, 等. 基于多资源协同优化的湖南调峰辅助服务市场设计与实践[J]. 湖南电力, 2022, 42 (2): 73-79, 84.
- [3] 张金梦, 杨晓冉. 火储联调蓬勃发展[N]. 中国能源报, 2022-04-18 (11).
- [4] 刘硕, 于松泰, 孙田, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的容量补偿机制研究[J]. 电网技术, 2022, 46 (5): 1780-1789.
- [5] 张瑞. 山西省火电机组现货市场报价策略探索[J]. 中国设备工程, 2022 (6): 203-204.
- [6] 赵洱崇, 王浩, 林弘杨. 现货市场中基于演化博弈的火电企业阶梯报价策略[J]. 电力建设, 2020, 41 (8): 68-77.
- [7] 张璐路. 基于可再生能源配额制的风火联合竞价策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

(下转第 89 页)

- [3] CAI C, LIU H, TAO Y, et al. Microgrid Equivalent Modeling Based on Long Short-Term Memory Neural Network [J]. IEEE Access, 2020, 8: 23120-23133.
- [4] LI Y, WANG Z, YANG J, et al. Dynamic Equivalence Modeling for Microgrid Cluster by Using Physical-Data-Driven Method [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31 (8): 1-4.
- [5] HUA J, QIAN A, YUAN Y. Dynamic equivalent of microgrid considering flexible components [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9 (13): 1688-1696.
- [6] PAPADOPOULOS P N, PAPADOPOULOS T A, CROLLA P, et al. Black-box dynamic equivalent model for microgrids using measurement data [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8 (5): 851-861.
- [7] MITRENTSIS G, LENS H. Data-Driven Dynamic Models of Active Distribution Networks Using Unsupervised Learning Techniques on Field Measurements [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (4): 2952-2965.
- [8] SHUAI Z, PENG Y, LIU X, et al. Dynamic Equivalent Modeling for Multi-Microgrid Based on Structure Preservation Method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (4): 3929-3942.
- [9] 吴忠强, 戚松岐, 尚梦瑶, 等. 基于优化回声状态网络的微电网等效建模[J]. 计量学报, 2021, 42 (7): 923-929.
- [10] 吴忠强, 戚松岐, 尚梦瑶, 等. 基于优化极限学习机的直流微电网并网等效建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (6): 43-49.
- [11] MATEVOSYAN J, VILLANUEVA S M, DJOKIC S Z, et al. Aggregated models of wind-based generation and active distribution network cells for power system studies-literature overview [C] // 2011 IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim, Norway, 2011: 1-8.
- [12] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (21): 82-88.
- [13] 符杨, 王晓旭, 米阳, 等. 基于本地自适应调节的交直流混合微电网全局协调控制[J]. 电测与仪表, 2022, 59 (7): 152-162.
- [14] 胡济洲, 奚江惠, 宋军英. 交直流协控技术在大电网的应用及配置[J]. 湖南电力, 2016, 36 (6): 1-4.
- [15] 王逸超, 陈仲伟, 欧名勇, 等. 利用电动汽车移动储能的微电网经济运行优化策略[J]. 湖南电力, 2018, 38 (3): 38-41, 45.
- [16] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- [17] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用——麻雀搜索算法 [D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [18] 李敦桥. 一种混合麻雀搜索算法[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17 (5): 232-234.
- [19] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于 DIgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (3): 49-55.
- [20] 王维栋, 栗文义, 王蕴敏, 等. 基于 DIgSILENT 的微电网三相不对称交直流潮流仿真研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (6): 195-198.
- [21] 赵睿智, 丁云飞. 基于 MEEMD-KELM 的短期风电功率预测 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (21): 92-98.

作者简介

息梦蕊 (1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网建模与仿真。

蔡昌春 (1981), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第 82 页)

- [8] 陈灏, 梁志远, 王宣定, 等. 一种兼顾风险与收益的发电侧竞价方法[J]. 电气自动化, 2020, 42 (1): 98-101.
- [9] 祁乐, 陈标, 江平, 等. 燃煤火电机组提供调峰辅助服务的成本和效益分析[J]. 电力大数据, 2019, 22 (10): 23-29.
- [10] 张敏, 王建学, 王秀丽, 等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (1): 84-91.
- [11] 李玲, 刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 中国电力, 2020, 53 (1): 155-161.
- [12] 李芳锋. 考虑新能源消纳的火电机组深度调峰策略[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [13] 林俐, 岳晓宇, 许冰倩, 等. 计及抽水蓄能和火电深度调峰效益的抽蓄-火电联合调峰调用顺序及策略[J]. 电网技术, 2021, 45 (1): 20-32.
- [14] 陆建宇, 叶海, 叶林, 等. 发电厂竞价对调峰辅助服务市场的影响分析[J]. 供用电, 2019, 36 (1): 61-67.
- [15] 杨顺元. 华中火电厂省间调峰和备用辅助服务报价策略[J]. 中国电力企业管理, 2019 (36): 84-85.
- [16] 章飞, 王振华, 曹力力. 计及输电约束的发电商主辅市场联合竞价策略[J]. 浙江电力, 2019, 38 (4): 103-108.
- [17] 余钢, 刘俊勇, 刘伟, 等. 基于主辅联合分析的竞价电能分配方法[J]. 现代电力, 2005 (01): 85-91.
- [18] Blum D H, Zakula T, Norford L K. Opportunity Cost Quantification for Ancillary Services Provided by Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (3): 1264-1273.
- [19] 王彦臻, 胡晗, 李文倩, 等. 基于改进 A2C 目标驱动的室内无地图导航方法[J]. 控制工程, 2022, 29 (3): 474-479.
- [20] 黄飞虎, 李沛东. 基于多智能体强化学习的电力市场竞价模型[J]. 现代计算机, 2021, 27 (34): 36-40.

作者简介

王淑强 (1983), 男, 工程师, 研究方向为电力辅助服务。

刘世件 (1981), 男, 工程师, 研究方向为电力辅助服务。

黄超 (1990), 男, 工程师, 研究方向为电力辅助服务。

梁家豪 (1997), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电力市场。