

基于多智能体博弈的电力调频市场建模与仿真

陈欢

华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月12日; 发布日期: 2026年4月7日

摘要

随着新能源渗透率提升, 电力调频辅助服务市场在引导频率服务供给与资源配置中的作用日益凸显。本文将调频市场视为多主体强耦合的复杂自适应系统, 提出一种基于多智能体博弈的建模与仿真方法。依据市场主体特征将其封装为相应智能体, 在MATLAB平台复现“申报-出清-结算-反馈-策略更新”的交互流程并求解市场均衡。以山西与湖北现行调频市场为例(分别对应PAB与MCP结算机制)开展仿真验证。各算例的迭代过程均能收敛并达到稳定的市场均衡状态, 结果表明: 两市场平均结算电价随供需情景变化呈非线性特征, 且PAB机制下的平均结算电价整体高于MCP机制, 反映出不同结算规则对价格形成与竞价激励的影响, 从而验证了所提方法在不同市场规则下的有效性。

关键词

电力调频市场, 辅助服务, 多智能体博弈, 复杂自适应系统, 市场均衡

Modeling and Simulation of the Electricity Frequency Regulation Market Based on Multi-Agent Game

Huan Chen

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: January 27, 2026; accepted: February 12, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

With the increasing penetration of renewable energy, the frequency regulation ancillary service market is playing an increasingly important role in guiding the provision and allocation of frequency support resources. This paper views the frequency regulation market as a strongly coupled, multi-agent complex adaptive system and proposes a modeling and simulation method based on a multi-agent

game framework. Market participants are encapsulated as agents according to their characteristics, and the interactive loop of “bidding-clearing-settlement-feedback-strategy update” is reproduced on the MATLAB platform to solve for market equilibrium. Case studies are conducted using the current frequency regulation markets in Shanxi and Hubei Provinces, which adopt the pay-as-bid (PAB) and market clearing price (MCP) settlement mechanisms, respectively. The iterative process in each case converges to a stable market equilibrium. The results indicate that the average settlement price in both markets exhibits a nonlinear relationship with supply-demand scenarios, and that the average settlement price under PAB is consistently higher than that under MCP, reflecting the impact of different settlement rules on price formation and bidding incentives. These findings verify the effectiveness of the proposed method under different market rules.

Keywords

Electricity Frequency Regulation Market, Ancillary Services, Multi-Agent Game, Complex Adaptive System, Market Equilibrium

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着新能源装机规模持续增长并逐步替代传统同步发电机出力，电力系统的等效转动惯量与一次调频资源占比下降，频率响应能力弱化，系统在大扰动下更易出现频率越限与频率稳定风险[1]-[4]。政策层面，国家能源局自 2017 年起推进电力辅助服务补偿(市场)机制完善工作，发布《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》，并在 2021 年印发《电力辅助服务管理办法》，将惯量与一次调频等纳入电力有功平衡服务范畴。目前，已有 15 个省份结合本省的电网结构和电力市场建设情况，先后出台了各自省份的调频辅助服务市场建设方案，但整体仍处于规则探索阶段。

现有关于电力调频辅助服务市场的研究大体可归纳为两条主线：一类是聚焦调频市场出清模型与定价机制[5]-[10]；另一类聚焦各类主体参与调频市场的竞标/投标策略[11]-[15]。在机制设计方面，文献[5]面向一次调频市场，提出了一种考虑一次调频响应速率约束的出清机制与模型，使服务供给能够更贴合频率动态过程。文献[6]讨论了一次与二次频率备用的联合调度与定价问题，在统一调度框架下实现频率备用的协同配置与价格形成。为增强低惯量系统的频率韧性，文献[7][8]从一次频率响应辅助服务的市场设计出发，给出了机制设计要点与算例验证。针对惯量与频率响应的“多动态特性、非线性约束与离散决策”并存难题，文献[9][10]在统一的频率安全约束优化框架下对惯量与频率响应进行边际/影子定价，为同步惯量与合成惯量等新型服务的价值量化提供方法支撑。该类研究为调频产品设计、约束建模与价格形成奠定了良好基础，但多偏向集中式优化，主体间策略互动刻画相对有限。

在主体策略方面，文献[11]针对储能参与调峰调频辅助服务市场提出竞标建模与机制分析。文献[12]研究储能参与“现货-调频”市场的出清策略，强调多市场耦合对系统运行与收益改善的作用。针对高比例新能源带来的不确定性与偏差风险，文献[13]提出风电与光热电站参与能量-调频联合市场的两阶段联合投标策略，并考虑不确定性与偏差风险。进一步地，为刻画现货机会成本与辅助服务收益之间的权衡，文献[14]构建计及电力现货机会成本的构网型储能调频辅助服务竞价出清双层博弈模型，刻画报价与出清的层级耦合。面向风电参与调频的运行不确定性问题，文献[15]提出多时间尺度调频市场出清与调度策略，引入条件风险价值等方法量化不确定性风险，并将调频性能指标纳入调度决策，实现安全风险、

成本与性能的综合权衡。该类研究在“主体侧投标决策、多市场协同、风险与不确定性处理”等方面取得了进展,但多数仍以单主体或少数主体的优化决策为核心,缺少对多主体在统一市场规则下重复竞价、策略学习与均衡演化过程的系统性建模与仿真验证。

针对上述问题,本文以调频辅助服务市场为对象,构建基于多智能体博弈的市场建模与仿真框架,明确市场主体参与市场的方式与途径;建立多主体决策模型,厘清市场主体间的互动机理及作用关系。在统一的出清规则与频率安全约束下刻画多类型主体的竞价互动与均衡演化,为调频市场机制评估与参数设计提供可解释、可计算的分析工具。并以山西和湖北调频市场政策为例,仿真分析市场主体间的互动过程。

2. 电力调频市场多智能体博弈框架

根据中国目前现有电力调频市场准入规则,市场主体包括发电侧市场主体、第三方辅助服务提供者、市场化电力用户和独立结算机构。其中发电侧市场主体和第三方辅助服务提供者均为市场中的调频服务提供商,独立结算机构对整个市场按既定市场规则进行清算,市场化独立用户在辅助市场中只进行调频服务补偿费用缴纳,并不参与市场竞争。因此,本文只考虑对调频服务提供商和独立结算机构进行智能体建模。

2.1. 调频服务提供商智能体

市场中的调频服务提供商可以分为传统发电企业(传统火电、水电等)、新型经营主体(独立储能电站、虚拟电厂等)、售电企业和电力用户,他们各自拥有不同的技术特性、运营成本(含部分分摊建设成本)和竞争策略。传统火电发电机组具有调节速度快、调节容量大等优点,在调频辅助服务市场中一直占据重要地位。水电机组具有启停迅速、调节灵活等特点,在调频辅助服务中也发挥着重要作用。本文考虑以火电、水电和储能(独立储能电站)作为调频服务提供商进行研究和分析。调频服务提供商需遵循相关规定积极参与电力辅助服务市场,依据交易结果提供相应的辅助服务,同时确保按规定及时完成辅助服务费用的结算,并提供参与该市场所需的生产和交易信息。

2.2. 独立结算机构智能体

独立结算机构是负责调频辅助服务市场运作的非盈利性机构,主要负责市场交易平台的运营管理,在满足市场规则的前提下,以最大化社会福利为原则进行市场出清,并具有信息收集与发布的能力。

2.2.1. 排序方式

对于出清规则,我国各地区不同市场略有异同。主要体现在排序方式方面,排序方式在满足市场需求量的基础上主要以价格和性能指标高低两个指标作为参考指标。国内的市场规则目前大致分为两种,一种为按照报价由低到高排序,以购买调频辅助服务成本最小化为目标;另一种将机组的调节性能纳入考虑,按照报价/性能指标由高到低排序,在满足经济性的同时兼顾调频服务的质量。

2.2.2. 结算机制

国内电力市场定价机制主要包括按边际成本定价(Market Clearing Price, MCP)机制和按报价支付(Pay-as-Bid, PAB)机制,两种市场机制的竞价过程一致,但由于结算价格的确定方式不同,调频服务提供商的策略也将有所不同。

PAB 和 MCP 结算机制的原理如图 1 所示,参与电力市场交易的调频服务提供商需向电力调度机构 ISO 提交其在运行日所能提供的调频容量及相应的调频里程价格。ISO 在接收到所有机组的报价后,会依据报价的优先级进行升序排列。这一排序原则基于两个关键因素:一是经济性,即倾向于选择报价较

低的机组；二是调频性能，确保所选机组的调频能力满足系统需求。随后，ISO 将按照此排序逐一累加各机组的调频容量，直至达到市场所需的调频容量总量。在这一过程中，最后一个被纳入以满足市场需求的调频服务提供商的报价，即被定义为市场边际电价，它反映了在当前市场条件下，新增一单位调频容量的边际成本。

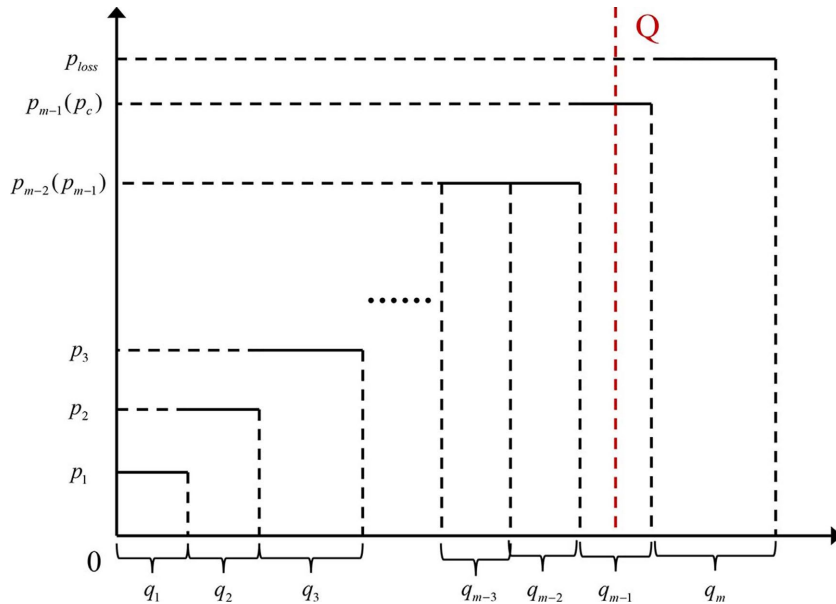


Figure 1. Schematic diagram of PAB and MCP market mechanisms
图 1. PAB、MCP 结算机制原理图

2.2.3. 补偿机制

根据相关政策导向，调频市场在原则上采纳了一种基于调频里程的单一制价格补偿机制。该机制在多个地区得到了广泛应用，例如甘肃、山西等地。然而，不同地区在实施这一机制时，对调频里程的补偿费用采取了多样化的计算方式。

此外，除了上述的单一制价格补偿机制外，许多地区还结合市场实际情况，在里程补偿的基础上增设了容量补偿，典型代表有广东、云南等市场。这些市场在设定容量补偿额度时，也展现出了不同的规定与标准。增设容量补偿的举措旨在弥补因参与调频市场而预留机组容量，进而在日前市场出力时所产生的经济影响及机会成本。这两种补偿方式原理如图 2 所示：

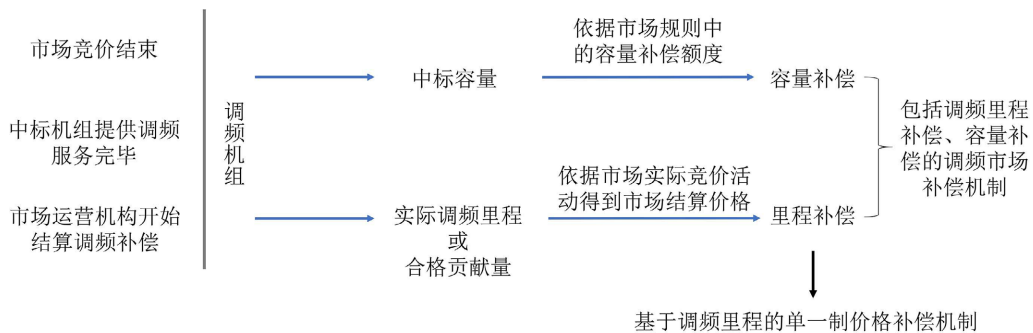


Figure 2. Schematic diagram of the compensation method of the FM market
图 2. 调频市场补偿方式原理图

2.3. 多智能体博弈框架

将调频服务提供商和独立结算机构分别封装为智能体。针对调频服务提供商可根据市场环境调节自身策略的特征，该类型的智能体除具有不同技术特性外，还具有自主决策和学习的能力，能够根据市场环境的变化和自身特性调整策略。独立结算机构智能体的封装注重于排序方式、结算机制和补偿机制功能的实现。为模拟市场环境，还需建立多个智能体之间的信息交互。根据市场规则，每个调频服务提供商仅与独立结算机构智能体存在信息交互，调频服务提供商之间并无信息传递，如图 3 所示。

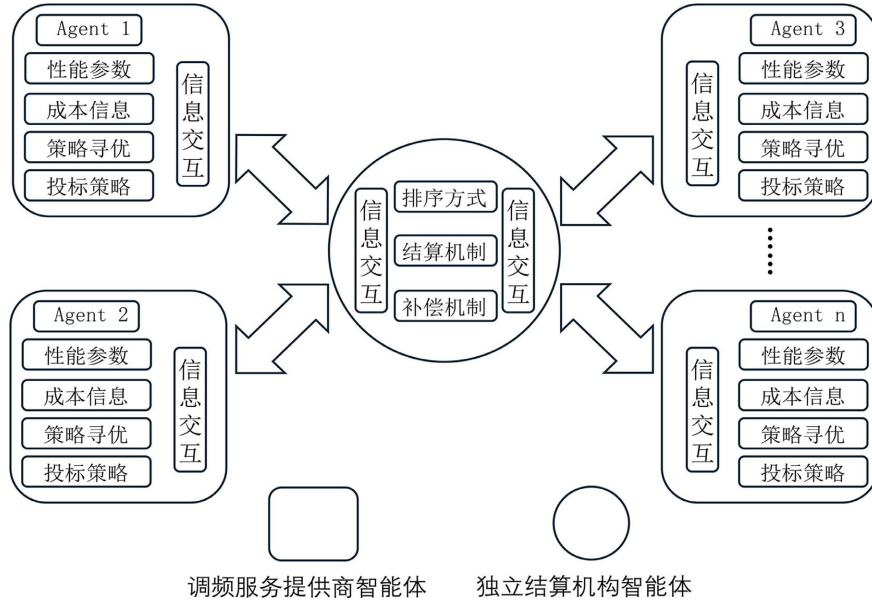


Figure 3. Framework of multi-agent game system in electricity frequency regulation market
图 3. 电力调频市场多智能体博弈系统框架

调频服务提供商和独立结算机构间的信息交互包括调频服务提供商在每次博弈中向独立结算机构提交的投标策略和独立结算机构根据市场排序方式、结算机制和补偿机制进行市场清算后的结果反馈。在博弈过程中，调频服务提供商智能体根据独立结算机构智能体反馈信息评估自身投标策略，并据此动态调整自身策略。这一过程持续进行，直到市场达到均衡状态，即所有调频服务提供商智能体的投标策略不再改变，市场供需达到平衡。该博弈架构的实现将电力调频市场中的博弈行为抽象为一个能够感知市场动态，并根据自身特性参与市场博弈的多智能体系统。

3. 智能体建模

3.1. 调频服务提供商智能体决策模型

调频服务商智能体在市场竞争中的投标策略包括投标价格和投标容量，即表示为：

$$s_i = [p_i, q_i], \forall i \tag{1}$$

式中， s_i 为调频服务提供商 i 的投标策略； p_i 为调频服务提供商 i 的投标价格； q_i 调频服务提供商 i 的投标容量。

3.1.1. 决策目标

调频服务商在电力调频市场中的收益为其提供服务获得收益与生产成本的差值。在复杂的市场博弈

中，调频服务提供商以最大化收益为决策目标，根据市场环境调整自身投标策略，即：

$$\max R_i - C_i^{AGC}, \forall i \quad (2)$$

式中， R_i 为调频服务提供商 i 在市场交易中获得的补偿收益； C_i^{AGC} 为调频服务提供商 i 在调频服务中付出的成本。

3.1.2. 补偿数学模型

调频补偿为调频服务提供商在调频市场中获得收益的形式。基于调频里程的单一制补偿收益仅为里程补偿，而包括调频里程补偿和容量补偿的两部制补偿收益除里程补偿外，还存在容量补偿收益。此外，一些省份针对储能电站参与调频服务还给出额外补偿。综上，调频服务提供商的补偿收益可表示为：

$$R = R^{mil} + \alpha R^{cap} + \beta R^{ext} \quad (3)$$

式中， α, β 为补偿机制判别系数，市场机制为单一制时 α 为 0，否则为 1；市场机制存在储能电站补偿且调频服务提供商为储能电站时 β 为 1，否则为 0。 R^{mil} 为里程补偿， R^{cap} 为容量补偿， R^{ext} 为对储能电站的额外补偿，其具体计算可表示如下：

$$R^{mil} = \begin{cases} Mq^{mp} K \\ Mq^{mp} \sqrt{K} \\ Mq^{mp} [\ln(K) + 1] \end{cases} \quad (4)$$

$$R^{cap} = Cq^{cp} \times (\min(K, 2))^A \quad (5)$$

$$R^{ext} = c^{ext} \times q^{cp} \quad (6)$$

式中， M 为市场的出清价格； q^{mp} 为调频服务提供商在调频服务中的调频里程(或合格贡献量)； K 为该调频服务提供商的性能指标； C 为市场的容量补偿额度； q^{cp} 为调频服务提供商在调频市场中的中标容量，根据不同市场对容量补偿计算方式的不同， A 可以取值 1 或 0； c^{ext} 为储能电站参与调频服务可获得的额外补偿，根据不同市场对容量补偿计算方式的不同，可以取值 5~10 的区间数。

3.1.3. 成本数学模型

调频服务提供商成本是指在 AGC 状态下，提供调频服务的过程中付出的费用总和，包括运行中产生的运行和维护费用、实际出力超过调节范围的机会成本和其他附加成本等，可表示如下：

$$C_i^{AGC} = C_i^{op} + C_i^{oc} + C_i^{eq} + C_i^{loss} \quad (7)$$

式中， C_i^{AGC} 为综合成本； C_i^{op} 为运行成本； C_i^{oc} 为机会成本； C_i^{eq} 为设备相对投资成本； C_i^{loss} 为发电效率损失成本。

1) 运行成本 C_i^{op}

C_i^{op} 为调频机组在投入 AGC 状态时的运行成本，是成本构成中最主要的部分。以火电机组为基础，设定燃料单位成本价格相对稳定，将机组发电功率与燃料数据(包括煤耗、油耗、水耗等)进行拟合，把燃料价格隐含到成本函数中，最后机组发电成本与发电功率的关系即成本函数表示为如下关系式：

$$C_{op}(P) = a + bP + \left(\frac{1}{2}\right)^d cP^2 \quad (8)$$

式中， a 为机组空载时的运行费用； b 为机组的边际成本曲线截距值； c 为机组的边际成本曲线斜率值； d 为发电主体判别标识，水电和储能取值为 1，火电取值为 0； P 为机组的运行功率值，MW。

2) 机会成本

在时段内, 如果调频服务提供商的实际出力在其调节范围内, 机会成本为 0; 如果调频服务提供商实际出力超过机组的调节范围, 则在该时段内就会产生机会成本, 其计算公式如下:

$$C_{oc} = (P - P_{AHL})(\rho_{imp} - \rho_{bid})\Delta t \quad (9)$$

式中, P_{AHL} 为机组的调节上限, ρ_{imp} 为 Δt 时段的主市场边际电能价格, ρ_{bid} 为机组在 Δt 时段的电能投标价格。

3) 附加固定成本

附加固定成本指 AGC 设备的相对投资成本, 按照总投资费用折旧成本的计算方法, 采用年限平均折算法根据 AGC 服务的提供时间对其回收值进行计算, AGC 机组在 Δt 时段内的投资成本计算公式如下:

$$C_{eq} = C_{inv} \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (10)$$

式中, C_{inv} 为 AGC 设备投资成本及设备维护成本; T 为设备的服务年限; r 为加权平均资金回报率。

4) 发电效率损失成本

调频服务提供商 i 在 Δt 服务时段内的发电效率损失成本计算公式如下:

$$C_{Loss} = |C_{op}(P'') - C_{op}(P')| \times T_{\Delta t} / 60 + C_{eLoss} \quad (11)$$

$$P_{ALL} \leq P'' \leq P_{AHL} \quad (12)$$

式中, P'' 为机组提供 AGC 服务后的实际出力, P' 为机组提供 AGC 服务之前原来的出力, $T_{\Delta t}$ 为机组在 Δt 内的 AGC 服务时间(单位: min), P_{ALL} 和 P_{AHL} 为机组的调节下限和上限, C_{eLoss} 为储能额外功率转换成本, 对于火电和水电, $C_{eLoss} = 0$ 。

对于储能电站而言, 参与电力辅助的应用场景和功能要求更为复杂, 故相较于火电其发电效率损失成本更高, 参考相关文献、行业协会及部分上市公司数据, 通过测算检验合理假设得出储能额外功率转换成本 $C_{eLoss} = 0.5$ 。

5) 维护成本

维护成本费用构成涵盖了附加维修成本以及单元寿命周期成本两大组成部分, 其在整体费用中的比重与电厂运维状况、维护周期的历史记录以及相关财务账单有关。总的维护成本可以折合到发电厂的年发电量中, 具体计算公式如下:

$$C_f = (C_R + C_U) / W \quad (13)$$

式中, C_f 为机组维护成本, C_R 和 C_U 是机组年均 AGC 附加维护费用和机组年均 AGC 减寿折合费用, W 为机组在 AGC 状态下的年发电量。

3.1.4. 约束条件

调频服务提供商在调频市场申报的里程报价和申报容量具有上下限约束。约束条件数学模型如下:

$$p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max}, \forall i \quad (14)$$

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max}, \forall i \quad (15)$$

式中, p_{\min} 和 p_{\max} 代表市场里程报价的下限与上限, 其具体数值依照各地区市场已有规则而定; q_{\min} 和 q_{\max} 分别代表机组的申报容量上下限, 目前国内大多数调频市场对市场交易主体调频申报容量设置限值, 本文在仿真设计中借鉴其他调频市场相关规定, 对参与各调频市场的机组设置 3%~20%额定装机容量作

为统一的限制条件。

3.2. 独立结算机构智能体决策模型

独立结算机构智能体扮演信息收集、处理与发布的角色。其根据市场规则，以最大化社会福利，对调频服务提供商智能体的投标策略进行筛选、排序与出清，并将出清结果反馈至调频服务提供商智能体。独立结算机构智能体的决策模型可表示为：

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m R_i \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^m q^{cp} = Q \\ & p_{\min} \leq M_i \leq p_{\max}, \forall i \\ & 0 \leq q_i^{cp} \leq q_i, \forall i \end{aligned} \quad (16)$$

式中， M_i 为调频服务提供商*i*的结算价格。

4. 模型仿真流程

为刻画调频辅助服务市场中“主体申报 - 市场出清 - 结算反馈 - 策略调整 - 均衡收敛”的动态演化过程，在 MATLAB 平台构建基于多智能体博弈的仿真框架。整体流程如图 4 所示：

1) 数据导入与智能体生成。仿真启动后，首先导入独立系统运营机构(ISO)的市场运行信息，包括调频需求水平、出清与结算规则(如 PAB/MCP、补偿结构与考核口径等)；同时导入各调频服务提供商的机组参数与约束信息，包括成本构成、调节速率、响应时间、调节精度及容量约束等。在此基础上，将市场运营机构与各服务提供商分别封装为具有相应功能与决策规则的智能体，并完成仿真参数设置。

2) 重复博弈求解市场均衡状态。在给定市场规则与需求情景下，市场主体通过多智能体博弈进行重复交互：第 *k* 轮博弈中，各调频服务提供商智能体基于市场信息与其他主体策略，对自身策略的收益进行评估，并在可行策略空间内进行策略搜索与更新；市场运营机构智能体依据当轮申报执行市场出清与结算，形成出清价格与结果并向各主体反馈，作为下一轮策略调整的依据。上述过程反复迭代直至各主体策略趋于稳定，市场达到均衡状态。当所有调频服务提供商修改策略的收益该变量小于阈值 ε 时，认为市场达到均衡，其判据可表示为：

$$\left| u(s_i^{new}, s_{-i}) - u(s_i^{last}, s_{-i}) \right| \leq \varepsilon, \forall i \quad (17)$$

式中， ε 为收敛容忍度； s_i^{new} / s_i^{last} 分别为调频服务提供商*i*的决策变量*s*新/上一次迭代中的值。

5. 仿真与分析

5.1. 基础数据

本文选取了四台典型的水电机组(1~4)和六台典型的火电机组(5~10)以及四台典型的储能机组(11~14)作为调频资源，根据装机容量将水电分为 100 MW、200 MW 两个容量级别，将火电分为 300 MW、600 MW、900 MW 三个容量级别，将储能分为 50 MW、150 MW 两个容量级别。各容量级别之间的调节性能和成本 - 出力特性具有差异，同一容量级别的两台机组的参数在成本 - 出力和调节性能上也有优劣之分。通过查询国内火电机组和水电机组及储能机组的相关资料，以及各个市场对调频机组技术参数的规定，为上述十台调频资源的具体参数进行了合理的设定，其具体的参数如表 1 所示。在供需情景方面，本文设定了四种供需情景(920 MW, 850 MW, 750 MW, 600 MW)模拟市场环境下从供需平衡(920 MW)到供过于求(600 MW)的不同场景。

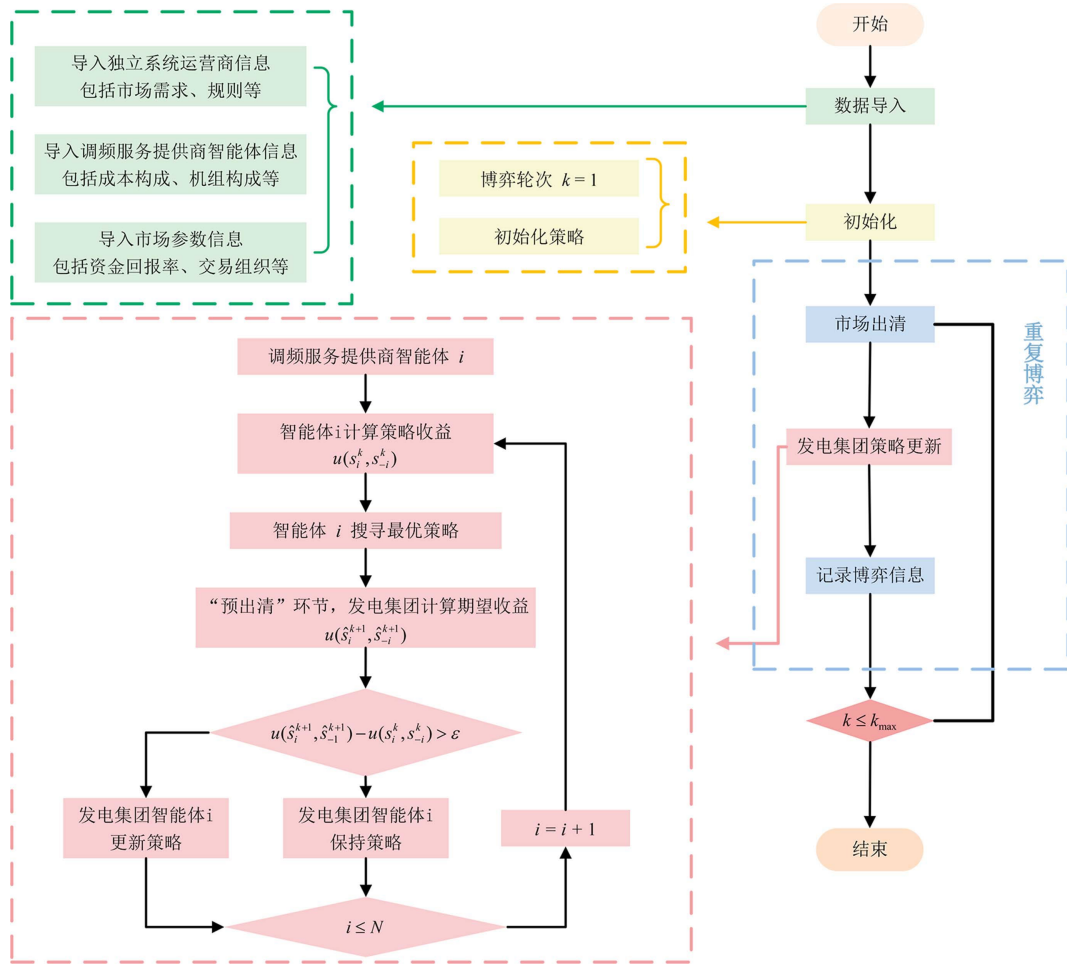


Figure 4. Simulation flowchart of multi-agent game system for frequency regulation ancillary services market
图 4. 调频辅助服务市场多智能体博弈系统仿真流程图

Table 1. Basic information of frequency regulation service providers
表 1. 调频服务提供者基本信息

厂商编号	电源类型	装机容量 (单位: MW)	调节速率 (%额定容量/min)	调节精度 (%额定容量)	响应时间 (s)	可调范围 (单位: MW)
1	水电	100	30	0.32	18	3~20
2	水电	100	32	0.35	18	3~20
3	水电	200	34	0.48	14	6~40
4	水电	200	36	0.5	14	6~40
5	火电	300	1.3	0.23	36	9~60
6	火电	300	1.5	0.25	37	9~60
7	火电	600	1.5	0.34	44	18~120
8	火电	600	1.8	0.35	42	18~120
9	火电	900	1.5	0.48	52	27~180
10	火电	900	1.6	0.50	50	27~180

续表

11	储能	50	50	0.32	8	1.5~10
12	储能	50	52	0.35	9	1.5~10
13	储能	150	54	0.48	11	4.5~30
14	储能	150	56	0.50	12	4.5~30

通过观察不同机组在不同市场机制及供需情景下的竞争表现情况和最终出清结果，来对各个市场规律的规律和影响进行探索和评估。

目前国内市场的综合性能指标计算分别从调节速率 k_1 、响应时间 k_2 、调节精度 k_3 三个方面衡量。

1) 调节速率 k_1

衡量调频资源改变其输出功率响应速度、衡量调频主体在单位时间区间内调整功率幅度的能力的指标。计算公式如下：

$$k_1 = \frac{v_{real}}{v_{ave}} \tag{18}$$

式中， v_{real} 为发电单元实测速率； v_{ave} 为调频资源分布区内 AGC 发电单元的平均标准调节速率。

2) 响应时间 k_2

反应发电单元响应 AGC 指令的时间延迟的指标，计算公式如下：

$$k_2 = 1 - \frac{t_{real}}{t_{ave}} \tag{19}$$

式中， t_{real} 为发电单元响应延迟时间； t_{ave} 为标准响应延迟时间。

3) 调节精度 k_3

反应发电单元响应 AGC 指令的精准度的指标，计算公式如下：

$$k_3 = 1 - \frac{n_{real}}{n_{ave}} \tag{20}$$

式中， n_{real} 为发电单元调节误差； n_{ave} 为发电单元调节允许误差。

不同地区的市场在综合调频性能指标的计算公式上存在差异，山西和湖北市场的综合调频性能指标计算公式见表 2。

Table 2. Comprehensive frequency regulation performance index

表 2. 综合调频性能指标

市场	综合调频性能指标计算
山西	$k_1 \times k_2 \times k_3$
湖北	$k_1 \times k_2 \times k_3, < 3.5$

5.2. 山西市场仿真分析

山西省调频辅助服务市场采用 PAB 结算机制和基于调频里程的单一制价格补偿机制，市场规定调频收益如下式所示：

$$R_i = D^R \times K_{AP,i} \times \lambda \tag{21}$$

$$D^R = \sum_{j=1}^n D_{i,j}^R \quad (22)$$

式中, n 为日调节次数; R_i 为调频机组(包括储能电站) i 的调频收益; D^R 为调频机组(包括储能电站) i 的实际调节深度; $D_{i,j}^R$ 为调频机组(包括储能电站) i 的第 j 次的调节深度; $K_{AP,i}$ 为执行日调频机组(包括储能电站) i 的实际调频性能指标; λ 为调频市场的结算价格。

下图 5 为各调频服务提供商智能体在山西市场需求量为 600 MW、750 MW、850 MW 和 920 MW (市场需求等于供给)下报价的动态变化曲线。

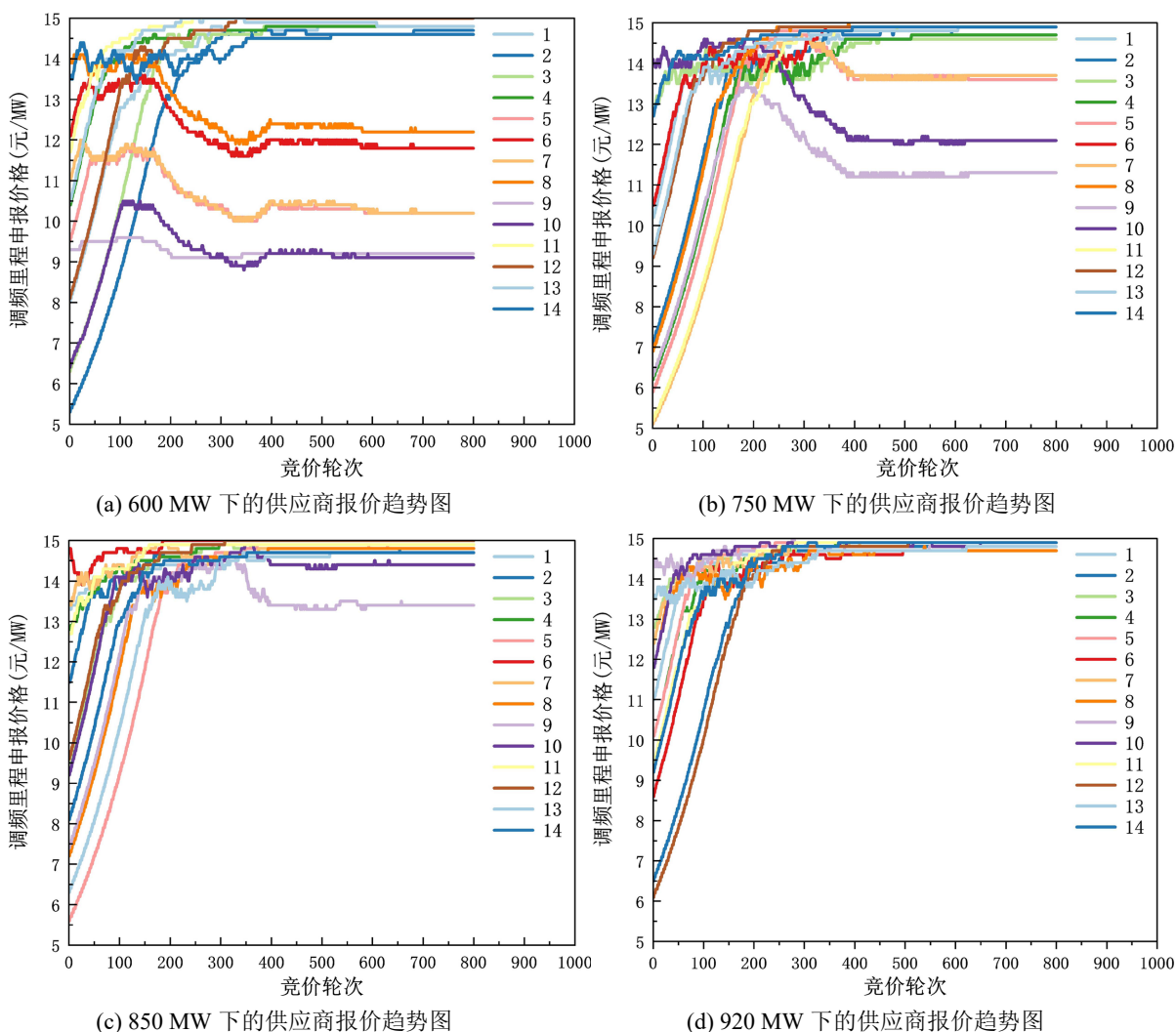


Figure 5. Trend of supplier bidding prices under different market demand

图 5. 不同市场需求下供应商的报价趋势图

水电机组与储能机组由于响应时间短、调节速率高且跟踪精度优, 综合性能指标通常优于常规火电机组; 在 PAB (pay-as-bid) 结算机制下, 收益与自身报价直接挂钩, 使得高性能资源在满足考核约束的前提下具备更强的报价能力与市场竞争优势, 因此仿真结果显示在四种市场需求情景下, 水电与储能类型智能体的报价在迭代博弈过程中整体上移并趋近市场价格上限。相较而言, 火电机组受限于调节性能相

对不占优且边际成本较高,其策略空间更为受限,在不同需求水平下需在“报价提升-中标概率”与“报量调整-运行约束/成本”之间进行权衡:一方面通过调整报价维持竞争力以保障中标并获取合理收益,另一方面通过优化申报容量使机组运行更接近经济工况,从而在满足市场规则与自身约束条件下实现收益目标。

5.3. 湖北市场仿真分析

湖北省调频辅助服务市场采用 MCP 结算机制和包括调频里程补偿、容量补偿的两部制补偿机制。调频单元日调频里程补偿 R_1 和容量补偿 R_2 计算公式如下式所示:

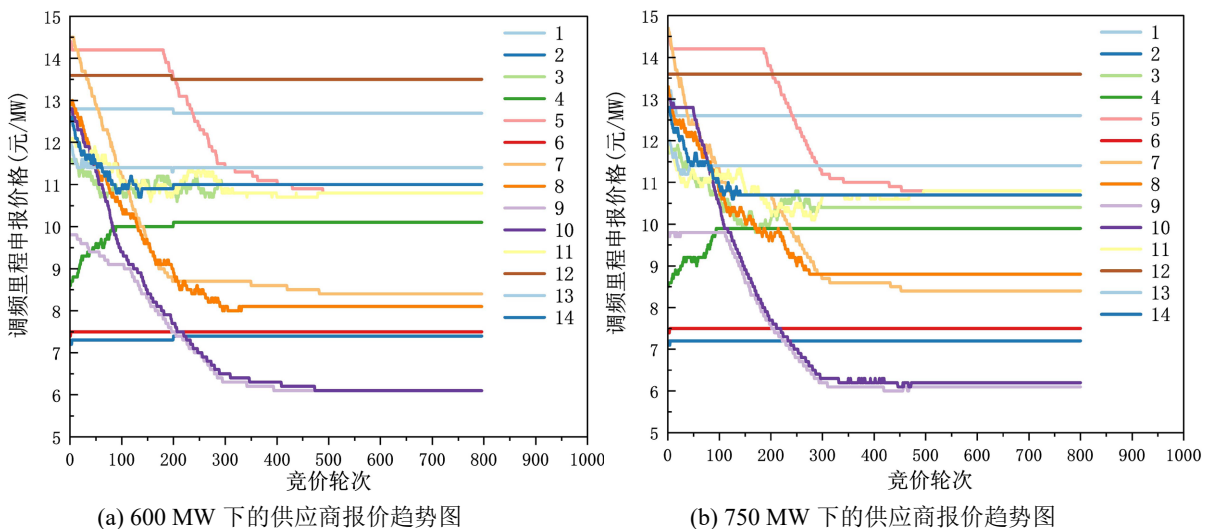
$$R_1 = \sum_{t=1}^N D^{i,t} \times B^t \times K_p^{i,t} \times M_k^i \quad (23)$$

$$R_2 = \sum_{t=1}^N C^{i,t} \times B^{cp} \quad (24)$$

式中, N 为当日总交易时段数; $D^{i,t}$ 为调频机组(包括储能电站) i 在交易时段 t 内的调频里程; $K_p^{i,t}$ 为调频机组(包括储能电站) i 在交易时段 t 内的综合调频性能指标; B^t 为交易时段 t 内的调频里程出清价格; M_k^i 为调频机组(包括储能电站) i 的调节系数,假定火电调节系数为 1,水电调节系数为 0.8,储能调节系数为 0.7,后期根据市场运行情况实施调整; $C^{i,t}$ 为调频机组(包括储能电站) i 在交易时段 t 内的中标调频容量; B^{cp} 为调频容量补偿价格,假定为日前 3 元/MW,日内 10 元/MW。

下图 6 为各调频服务提供商智能体在湖北市场需求量为 600 MW、750 MW、850 MW 和 920 MW (市场需求等于供给)下报价的动态变化曲线。

在 MCP 结算机制下,单个调频服务提供商的结算电价主要由市场边际出清价格决定,个体报价对自身结算价格的边际影响相对减弱,因此其策略调整更侧重于以合适报价确保中标与维持可行申报。仿真结果表明,在不同市场需求情景下,调频服务提供商在满足中标条件后通常不倾向于频繁调整报价,体现出 MCP 机制下“价格接受-以中标为主”的策略特征。与山西市场相同的是,火电机组由于调节性能相对不足且成本较高,其报价对市场需求变化更为敏感,随需求水平波动呈现更明显的调整;而水电机组与储能机组凭借较优的综合性能与调节能力,其报价在各情景下保持相对稳定、波动幅度较小。



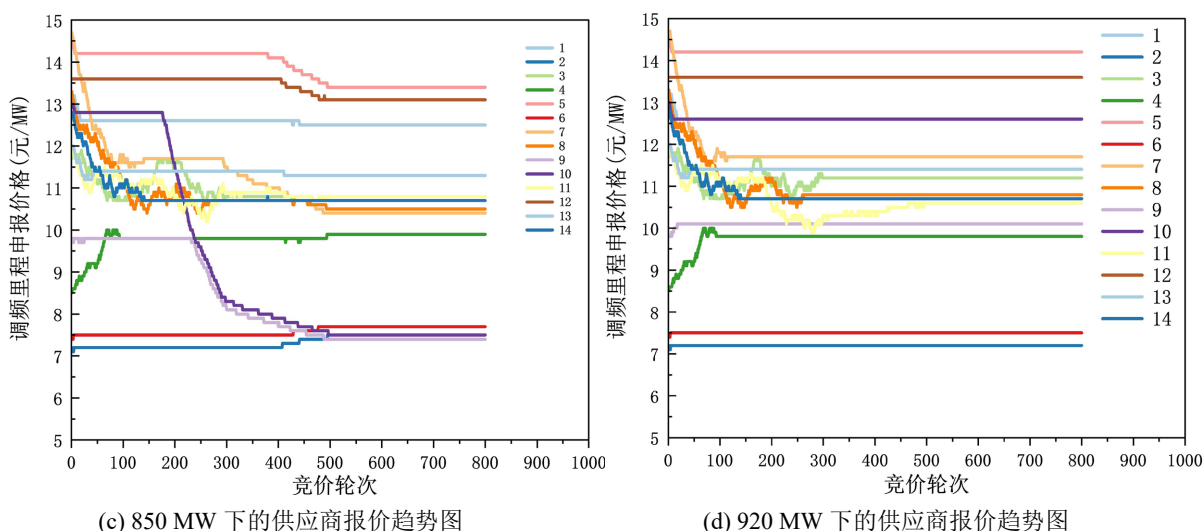


Figure 6. Trend of supplier bidding prices under different market demand

图 6. 不同市场需求下供应商的报价趋势图

5.4. 对比分析

下图 7 为调频服务提供商在山西和湖北的四种市场需求下稳定时的平均结算价格变化。由图 7 可见，在相同市场需求情景下，湖北市场的平均结算电价整体低于山西市场。就价格变化特征而言，湖北市场平均结算电价随需求水平变化的波动幅度更为显著，而山西市场的波动相对平缓，且两市场平均结算电价与需求水平之间均呈现非线性关系。上述差异与两类结算机制的激励特征相一致：在 MCP 机制下，服务提供商的结算电价主要由边际出清价格决定，个体报价对结算价格的边际影响有限，主体更倾向于以保证中标为目标进行相对保守的报价，从而使平均结算电价维持在较低水平；而在 PAB 机制下，结算电价与个体报价直接相关，主体具备更强的策略性抬价动机，导致平均结算电价整体更高并体现出更“激进”的报价行为。

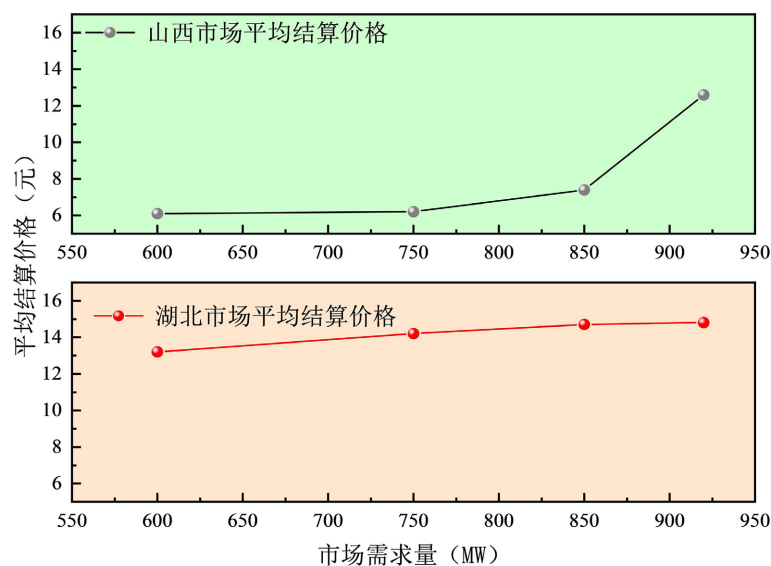


Figure 7. Trend chart of average settlement prices

图 7. 平均结算价格变化趋势图

为检验“均衡演化”结论对随机初始策略的稳健性，在需求水平固定为 650 MW 的条件下，分别在山西市场与湖北市场中开展 5 次独立实验，每次实验仅改变发电集团的初始策略(随机生成)，其余模型参数均保持一致，记录各次实验收敛后的平均结算价格，结果如图 8 所示。

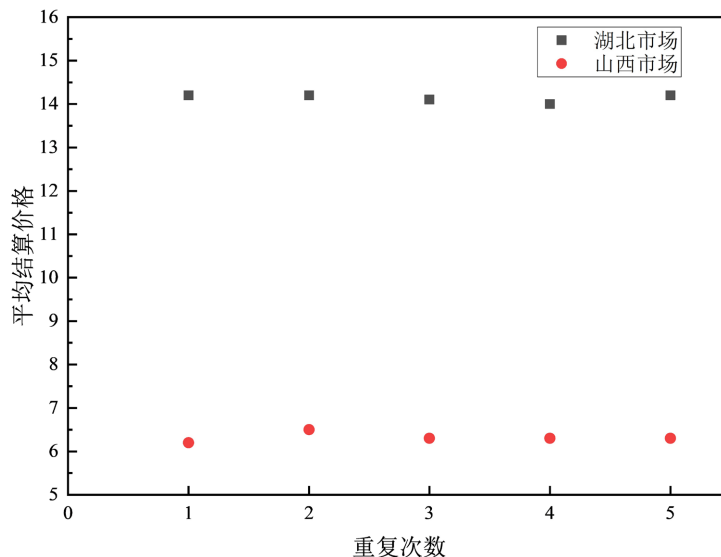


Figure 8. Repeat the experimental results

图 8. 重复实验结果

结果表明，在相同的市场需求场景下，即使初始策略随机扰动，结算价格仍会收敛到高度集中的价格区间，重复实验间的差异有限，体现出所构建的博弈 - 迭代机制对初值具有良好的收敛稳健性与均衡性，也证明了上述实验中的“均衡演化”并非由特定初值偶然触发，而是由市场规则与策略更新共同决定的可重复结果。

6. 结论

本文面向电力调频市场这一复杂自适应系统，提出一种基于多智能体博弈的建模与仿真方法，将市场参与主体抽象为具备明确行为规则与信息响应机制的智能体，复现“报价 - 出清 - 结算 - 反馈 - 策略更新”的交互闭环，实现对市场均衡的可计算刻画。以山西与湖北调频市场为例(分别对应按报价支付 PAB 与统一出清价 MCP)，在供给能力一致、市场需求多情景变化的条件下开展仿真分析。结果表明：市场需求较低时，部分主体倾向于以较低报价参与竞争；随着需求提升，报价与平均结算价格整体向高位聚集，呈现出“需求上升 - 价格抬升”的典型边际定价规律，符合调频市场运行认知。同时，模型能够捕捉不同定价机制的价格形成差异，即 PAB 下平均结算价格整体高于 MCP，反映出两类规则对竞价激励与价格传导路径的不同影响。上述结果表明，所提方法能够在 PAB 与 MCP 两类结算规则下复现市场交互过程并迭代收敛至稳定均衡，且所得价格规律与机制逻辑一致，从而验证了方法的有效性与结果可解释性，可为调频市场机制分析与规则评估提供仿真支撑。

参考文献

- [1] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.

-
- [2] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 陈亦平, 卓映君, 刘映尚, 等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 174-183.
- [4] Hong, Q., Khan, M.A.U., Henderson, C., Egea-Álvarez, A., Tzelepis, D. and Booth, C. (2021) Addressing Frequency Control Challenges in Future Low-Inertia Power Systems: A Great Britain Perspective. *Engineering*, **7**, 1057-1063. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.005>
- [5] Yang, Y., Peng, J.C. and Ye, Z. (2021) A Market Clearing Mechanism Considering Primary Frequency Response Rate. *IEEE Transactions on Power Systems*, **36**, 5952-5955. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3109807>
- [6] Zhang, G., Ela, E. and Wang, Q. (2019) Market Scheduling and Pricing for Primary and Secondary Frequency Reserve. *IEEE Transactions on Power Systems*, **34**, 2914-2924. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2018.2889067>
- [7] Ela, E., Gevorgian, V., Tuohy, A., Kirby, B., Milligan, M. and O'Malley, M. (2014) Market Designs for the Primary Frequency Response Ancillary Service—Part I: Motivation and Design. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 421-431. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2013.2264942>
- [8] Ela, E., Gevorgian, V., Tuohy, A., Kirby, B., Milligan, M. and O'Malley, M. (2014) Market Designs for the Primary Frequency Response Ancillary Service—Part II: Case Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 432-440. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2013.2264951>
- [9] Badesa, L., Teng, F. and Strbac, G. (2020) Pricing Inertia and Frequency Response with Diverse Dynamics in a Mixed-Integer Second-Order Cone Programming Formulation. *Applied Energy*, **260**, Article ID: 114334. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114334>
- [10] Badesa, L., Matamala, C., Zhou, Y. and Strbac, G. (2023) Assigning Shadow Prices to Synthetic Inertia and Frequency Response Reserves from Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **14**, 12-26. <https://doi.org/10.1109/tste.2022.3198324>
- [11] 郁海彬, 董帅, 陆增洁, 等. 新型电力系统下储能参与电力调峰调频辅助市场的竞标策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 48-60.
- [12] 高雪峰, 叶晨曦, 时雨, 等. 提升新能源消纳的储能参与现货-调频市场出清策略[J]. 东北电力大学学报, 2025, 45(5): 74-83.
- [13] 陈伟, 刘文翰, 李万伟, 等. 考虑风电与光热电站参与能量-调频辅助服务市场的联合投标策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 402-411.
- [14] 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(S1): 146-158.
- [15] 陈春宇, 黄宸恺, 王剑晓, 等. 考虑风电不确定性的调频辅助服务市场多时间尺度出清调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21): 6804-6818.