

电力现货市场出清结果影响因素量化表征及市场力评价方法

陈艳波¹, 肖钦泽¹, 张智¹, 马瑞光², 邓扶摇³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 国网四川省电力经济技术研究院, 四川省 成都市 610041;

3. 国网四川省电力公司, 四川省 成都市 610041)

Quantitative Methods for Influencing the Results of Electricity Spot Market and Methods for Evaluating Market Power

CHEN Yanbo¹, XIAO Qinze¹, ZHANG Zhi¹, MA Ruiguang², DENG Fuyao³

(1. State Key Laboratory of Renewable Energy Power Systems (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Economic and Technological Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan Province, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The clearing results of the electricity spot market are influenced by market participants' bids and various coupling constraints. Quantitative analysis of the factors influencing the clearing results is beneficial for market operators to gain a deeper understanding of the causes of market operation results, thereby enhancing the organizational safeguarding capabilities and market risk prevention capabilities of spot trading. To this end, this paper proposes a quantitative characterization of the factors influencing market clearing results and a market power evaluation method. Firstly, a model for the participation of consumers in the electricity spot market clearing is established, and a method for quantitatively characterizing the market clearing results is proposed. The impacts of generator characteristics, line transmission capacity, and load characteristics on nodal marginal prices and unit output are quantified, providing an analytical tool for analyzing the formation causes and influencing factors that influence electricity spot market clearing results. Based on this, a market power evaluation method is proposed to assist market participants in evaluating the effects of generator and load bids on profits. Finally, through case studies, the effectiveness of the proposed quantification method for factors influencing clearing results is validated, and the impact of changes in market members' bids on their own and other market members' profits is analyzed using the market power evaluation method.

KEY WORDS: electricity spot market; analysis of market clearing results; quantitative analysis; market power indicators; locational marginal price

摘要: 电力现货市场出清结果受到市场主体报价以及多重耦合约束的影响,通过对出清结果影响因素的量化分析,有助于市场运营人员深入了解运营结果的成因,从而增强现货交易组织保障能力和市场风险防范能力。为此,文章提出了一种市场出清结果影响因素量化表征及市场力评价方法。首先,基于用户侧参与的电力现货市场出清模型,提出了市场出清结果量化表征方法,量化了机组特性、线路传输容量、负荷特性对节点边际电价及机组出力的影响,为现货市场出清结果的形成原因及影响因素剖析提供了一种解析工具。在此基础上,构建了基于量化表征法的市场力评价指标体系,通过市场力评估帮助市场成员就机组报价和负荷报价对利润的影响做出指导。最后,通过算例分析验证了所提市场出清结果影响因素量化表征的有效性,并通过市场力评价方法分析了市场成员报价改变对自身及其他市场成员利润的影响。

关键词: 现货市场; 出清结果分析; 量化表征方法; 市场力评价; 节点边际电价

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1459

0 引言

2021年11月,中央全面深化改革委员会通过了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,要求加快形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系^[1]。2023年7月,中央全面深化改革委员会进一步提出深化电力体制

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5108-202326039A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (5108-202326039A-1-1-ZN).

改革,以更好地推动能源生产和消费革命,保障国家能源安全^[2]。经过持续探索,我国电力现货市场建设取得突破性进展,省间电力现货试点已连续运行 27 个月。其中,全国首家电力现货试点在山西转入正式运行。

然而,新型电力系统具有规模庞大、负荷分布集中、电网阻塞频繁、运行耦合约束众多等特点,电力现货市场出清涉及大规模、长时序、强耦合优化问题的求解过程,导致出清结果的形成机理复杂。市场运营方需要掌握市场出清结果形成原因,便于更好地分析市场运营细节并支持市场安全稳定运行^[3-5]。市场出清结果影响因素和市场力两者都会对市场出清结果造成影响,一方面是物理因素,一方面是经济因素。在基于发电机组竞价和售电公司(load service entity, LSE)报价的双边电力市场中,发电机组会运用市场力进行策略性报价,进而影响到所有参与者的盈利。监测电力市场的关键是分析市场力的运用及市场成员形成盈利联盟的可能,这些市场行为会改变市场的最优均衡点,影响最终出清结果。市场出清结果同时也受到机组出力上限、线路传输容量约束等物理因素的影响。因此,需要研究完整的市场出清结果分析和市场力评估方法,以辅助交易运营中心掌握各现货市场运行情况,及时发现潜在的市场运行风险和系统运行风险。

目前,针对电力市场出清结果的影响因素分析已有一定研究成果,主要集中在节点边际电价(locational marginal price, LMP)分析。文献[6]基于卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件分析了机组运行约束对节点边际电价的影响,为剖析节点边际电价成因提供了有效的方法。文献[7]提出了一种辅助服务市场和电能量联合运营机制,实现了以价格信号引导火电机组转型。文献[8]考虑不同发电机组的成本特性,总结了现有电力现货市场机制在统筹多市场主体利益上面临的挑战。文献[9]以边际碳减排成本作为碳价格,基于电力市场双边集中竞价模式,建立发电商与用户策略竞价的双层优化模型,通过算例分析了不同碳排放限额下的市场均衡优化结果。文献[10]为满足电力市场定价的多重需求,运用 KKT 条件分析了机组运行爬坡约束和机组出力上限对节点边际电价的影响。文献[11]基于节点边际能价求解方法,通过多场景对比分析,量化了负荷和线路传输容量对节点边际的多重影响。文献[12]提出了考虑阻塞的节点边际电价结构分解方法,将边际机组报价和出力上限作为出清结果的影响因素,但未考虑需求侧市场影响。

以上文献做了很有意义的工作,但在对市场出清结果的分析方面,仅针对节点边际电价进行分析,没有考虑与发电商利润直接相关的机组出力,调度机构无法解释机组出力成因,可能引起市场成员争议,给电网调度的公平性和权威性带来挑战。

电力现货市场力是指发电商能够持续地影响或操纵电力现货市场价格水平,使之偏离正常竞争价格水平的能力。市场力指标包括结构性指标和行为性指标,结构性指标主要衡量发电厂是否具备市场力;行为性指标则是衡量发电厂是否动用市场力、动用市场力对市场价格和效率的影响程度^[13-14]。目前,关于市场力的研究已经开展,主要包括识别和分析方法^[12,15]。文献[16]介绍了欧美国家市场中进行市场力操纵的实证分析结果,并提出抑制和消除滥用市场力的政策措施。文献[17]通过对欧美电力市场监管系统的研究,提出了建立电力现货指标评价体系,并消除了滥用市场力问题。文献[18]选取赫芬达尔-赫希曼指数、Top-m 指数、关键供应商指数 3 项指标反映市场力,充分挖掘了市场主体行为及市场出清结果的规律特点。文献[19]研究了适用于我国省级电力现货市场的市场力辨识方法,为实现高集中度市场的有力监管奠定基础。文献[20]详细阐述了国外成熟电力市场在市场力监测的理论和实践经验,梳理并总结了常见市场力监测指标。文献[21-22]提出了一种定量的方法来研究负荷转移对发电机市场力的影响。但上述文献提出的辨识市场力的指标中综合评价指标较少,仅考虑了供给侧市场成员参与的单边市场,且未能有效评估机组的报价或售电公司报价对市场结果的影响。

电力市场运行中,有时会出现机组报价低,反而中标出力少的情况。调度机构向发电商解释出清结果成因存在困难,这表明审视机组出力受哪些因素影响成为市场环境下的新问题。同时,为保障市场组织的客观性、透明性,市场运营机构需深入了解市场交易的主体行为、运营结果及其成因关系。因此,电力市场出清结果的成因分析存在问题:1)如何针对市场出清结果进行全面、合理分析;2)电力交易中心对市场出清结果的细节把握不足,如何将结果的影响因素进行精细地量化;3)如何向发电商解释市场出清结果成因,建立有效的市场力指标,提高电力现货市场透明性、可靠性是目前亟需解决的问题。

为解决上述问题,本文提出了电力现货市场出清结果影响因素量化表征及市场力评价方法。首先,考虑了用户侧参与市场竞价,建立了双边电力

现货市场出清模型；运用 KKT 条件提出了出清结果影响因素的量化表征方法，将影响因素对出清结果的贡献进行精确量化。本文的另一个贡献是提出一种方法来评估双边电力市场中市场力和形成盈利联盟的可能。然后，使用所提方法分析市场成员报价改变对自身及其他市场成员利润的影响。最后，以改进的 IEEE RTS-24 系统验证所提方法的有效性。

1 用户侧参与的电力现货市场模型

1.1 双边电力现货市场出清模型

目前，我国电力市场化改革正在进行，用户侧将逐步参与电力市场竞争，双边集中竞价的交易方式有益于市场发挥资源配置作用，提高市场效率。通过市场成员与运营商交互协商优化完成市场出清的机制提高了发电商、用户参与市场的交易主动性和积极性，增强了交易机制灵活性。为此，在安全约束经济调度模型的基础上，建立用户侧参与的双边电力市场出清模型。图 1 为双边电力现货市场出清模型流程。市场出清结果受到发电机组报价和售电公司报价的经济因素，以及网络容量和机组出力特性的物理因素共同影响。

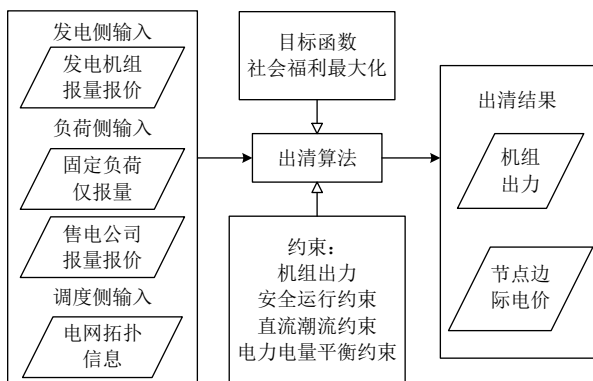


图 1 出清模型流程图

Fig. 1 Flow chart of the clearing model

1) 在双边市场中，发电侧市场成员通过发电机组报量报价参与市场竞争。每个发电侧市场成员的报价函数均为有功出力的二次函数：

$$F(P_g) = a_g P_g + \frac{1}{2} b_g P_g P_g \quad (1)$$

式中： P_g 为发电侧市场成员 g 的中标电量； a_g (>0)、 b_g 分别为市场成员 g 报价函数的一次项系数、二次项系数。

2) 负荷包括可调度弹性负荷和固定负荷。其中，固定负荷不参与市场竞争，其容量不随价格改变，仅报量参与市场出清。

3) 在双边市场中，用户侧售电公司通过可调

度弹性负荷报量报价参与市场竞争。每个售电公司的报价函数均为负荷出力的二次函数：

$$F(P_n^{\text{ej}}) = c_n P_n^{\text{ej}} - \frac{1}{2} d_n P_n^{\text{ej}} P_n^{\text{ej}} \quad (2)$$

式中： P_n^{ej} 为可调度弹性负荷 n 的中标出力； c_n (>0)、 d_n 分别为市场成员 n 报价函数的一次项系数、二次项系数。

4) 约束条件。

机组出力安全运行约束：

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3)$$

负荷约束：

$$P_n = P_n^{\text{ej}} + P_n^{\text{fix}} \quad (4)$$

可调度弹性负荷出力约束：

$$P_n^{\text{ejmin}} \leq P_n^{\text{ej}} \leq P_n^{\text{ejmax}} \quad (5)$$

线路直流潮流约束：

$$-f_l^{\max} \leq \sum_{g=1}^{L_g} a_{l,g} P_g - \sum_{n=1}^{L_n} a_{l,n} (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) \leq f_l^{\max} \quad (6)$$

电力电量平衡约束：

$$\sum_{g=1}^k P_g = P_n \quad (7)$$

式中： $P_g^{\max}$ 、 $P_g^{\min}$ 分别为机组 g 的有功出力上限和有功出力下限； P_n^{ejmax} 、 P_n^{ejmin} 分别为节点 n 的可调度弹性负荷的出力上限和出力下限； P_n 为节点 n 的负荷； P_n^{fix} 为节点 n 的固定负荷； P_n^{ej} 为节点 n 的可调度弹性负荷； k 为节点 n 的发电机数目； L_g 、 L_n 分别表示线路上的发电机数目、负荷数目； $f_l^{\max}$ 为线路最大传输容量； $a_{l,n}$ 、 $a_{l,g}$ 分别为节点 n 、节点 g 对线路 l 的功率转移因子。

综上，双边电力现货市场出清模型可表示为

$$\begin{cases} \max \sum_{n=1}^N (c_n P_n^{\text{ej}} - \frac{1}{2} d_n P_n^{\text{ej}} P_n^{\text{ej}}) - \sum_{g=1}^G (a_g P_g + \frac{1}{2} b_g P_g P_g) \\ \text{st: } \sum_{g=1}^G P_g = \sum_{n=1}^N (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) : (\lambda) \\ -f_l^{\max} \leq \sum_{g=1}^G a_{l,g} P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) \leq f_l^{\max} : (\tau_l^{\min}, \tau_l^{\max}), l=1, \dots, L \\ P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} : (\mu_g^{\min}, \mu_g^{\max}), g=1, \dots, G \\ P_n^{\text{ejmin}} \leq P_n^{\text{ej}} \leq P_n^{\text{ejmax}} : (\omega_j^{\min}, \omega_j^{\max}), n=1, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

式中： L 、 G 、 N 分别为输电线路总数、发电机节点总数、负荷节点总数； λ 、 $\tau_l^{\min}$ 、 $\tau_l^{\max}$ 、 $\mu_g^{\min}$ 、 $\mu_g^{\max}$ 、 $\omega_j^{\min}$ 、 $\omega_j^{\max}$ 分别为相应约束的对偶变量。

1.2 基于双边市场出清模型的拉格朗日松弛函数

电力现货市场出清依靠安全约束经济调度

(security constrained economic dispatch, SCED)进行。SCED 问题在数学本质上为包含线性、非线性、非解析约束条件的大规模规划问题,通过考虑系统平衡、电网安全约束确定的日前机组启停发电计划,进一步以系统、机组运行约束,最终确定经济发电计划。

对于大规模系统优化问题,拉格朗日松弛法是一类有着成熟理论基础的组合优化算法,在电力系统安全约束经济调度中得到了广泛的应用。拉格朗日松弛法的原理是将造成问题难以求解的约束添加到目标函数中,从而使问题容易求解。用户侧参与的电力现货市场出清模型通过拉格朗日松弛优化方法进行求解,得到拉格朗日函数为

$$L = \sum_{g=1}^G (a_g P_g + \frac{1}{2} b_g P_g P_g) - \sum_{n=1}^N (c_n P_n^{\text{ej}} - \frac{1}{2} d_n P_n^{\text{ej}} P_n^{\text{ej}}) + \lambda (\sum_{g=1}^G P_g - \sum_{n=1}^N (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}})) + \sum_{g=1}^G (\mu_g^{\text{min}} (P_g^{\text{min}} - P_g)) + \sum_{g=1}^G (\mu_g^{\text{max}} (P_g - P_g^{\text{max}})) + \sum_{l=1}^L (\tau_l^{\text{min}} (-f_l^{\text{max}} - \sum_{g=1}^G a_{l,g} P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}))) + \sum_{l=1}^L (\tau_l^{\text{max}} (\sum_{g=1}^G a_{l,g} P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) - f_l^{\text{max}})) + \sum_{n=1}^N (\omega_n^{\text{min}} (P_n^{\text{ejmin}} - P_n^{\text{ej}})) + \sum_{n=1}^N (\omega_n^{\text{max}} (P_n^{\text{ejmax}} - P_n^{\text{ej}})) \quad (9)$$

2 现货市场出清结果影响因素量化表征方法

本节在双边电力现货市场出清模型的基础上,运用 KKT 条件,提出了机组出力影响因素和节点边际电价影响因素的量化表征方法。量化表征方法是将影响因素对出清结果的贡献进行精确量化,从而帮助调度机构和发电商分析出清结果形成原因。

2.1 市场出清结果的影响因素分析

文献[23]总结了目前关于节点边际电价影响因素的研究,从电源侧、电网侧以及用户侧 3 个层面梳理了影响因素:1) 电源侧,机组报价和机组出力上限;2) 电网侧,输电线路最大传输容量;3) 用户侧,负荷报价、固定负荷和可调度弹性负荷出力上限。本节的量化表征方法是将以上 6 个影响因素对节点边际电价的贡献进行精确量化,从而反映不同因素对节点边际电价的影响。

机组出力作为市场出清结果的组成部分,对于衡量发电商获得的利润具有重要意义^[24]。向发电企业解释中标出力的成因能够有效减少电力市场中的争议,推动电力市场的公平性、可靠性。本文基于以上 6 个影响因素对机组出力进行研究。

2.2 机组出力影响因素的量化表征方法

对于给定的网络拓扑 T , 如果第 g 台机组是边际机组, 那么第 g 台机组的机组出力的影响因素可以进行量化表征如下:

$$P_g = \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} T^{(1)} f_l^{\text{max}} + \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} T^{(2)} a_j + \sum_{j=1}^{K_{\text{AX}}} T^{(3)} P_j^{\text{max}} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} T^{(4)} c_n + \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} T^{(5)} P_n^{\text{ejmax}} + \sum_{n=1}^N T^{(6)} P_n^{\text{fix}} \quad (10)$$

式中: f_l^{max} 为线路最大传输容量; a_j 为机组报价; P_j^{max} 为机组的出力上限; c_n 为负荷报价; P_n^{ejmax} 为可调度弹性负荷出力上限; P_n^{fix} 为固定负荷; $T^{(1)} \sim T^{(6)}$ 为影响因素量化表征系数。

机组出力影响因素的量化表征方法推导如下所示。

步骤 1. 对拉格朗日函数的变量求偏导, 得到 4 个 KKT 条件。4 个 KKT 条件分别针对机组出力 P_g 、可调度弹性负荷出力 P^{ej} 、电量平衡约束的对偶变量 λ 、直流潮流约束的对偶变量 τ_l^{max} 。

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_g} = 0 & \text{①} \\ \frac{\partial L}{\partial P^{\text{ej}}} = 0 & \text{②} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 & \text{③} \\ \frac{\partial L}{\partial \tau_l^{\text{max}}} = 0 & \text{④} \end{cases} \quad (11)$$

首先根据第①个 KKT 条件得到:

$$\begin{cases} P_g = \frac{\lambda - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \tau_l^{\text{max}} a_{l,g}}{b_g}, & g=1, \dots, K_{\text{AR}} \\ P_k = P_k^{\text{max}}, & k=1, \dots, K_{\text{AX}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_{AX} 为机组出力达到出力上限的机组数; K_{AR} 为机组出力随负荷变化而调节的边际机组数。

利用第②个 KKT 条件, 得到:

$$\begin{cases} P_n^{\text{ej}} = \frac{c_n - \lambda - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \tau_l^{\text{max}} a_{l,n}}{d_n}, & n=1, \dots, N_{\text{AR}} \\ P_m^{\text{ej}} = P_m^{\text{ejmax}}, & m=1, \dots, N_{\text{AX}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_{AX} 为出力达到上限的可调度弹性负荷数; N_{AR} 为出力没有达到上限的可调度弹性负荷数。

利用第③个 KKT 条件, 并将 P 、 P^{ej} 代入得:

$$\sum_{g=1}^G P_g = \sum_{n=1}^N (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) \Rightarrow \lambda = [\sum_{n=1}^N P_n^{\text{fix}} - \sum_{g=1}^{K_{\text{AX}}} P_g^{\text{max}} - \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} P_n^{\text{ejmax}} + \sum_{g=1}^{K_{\text{AR}}} (\frac{a_g}{b_g}) + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} (\frac{c_n}{d_n})] / C_1 +$$

$$\sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} (\tau_l^{\max} (\sum_{g=1}^{K_{\text{AR}}} \frac{a_{l,g}}{b_g} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} \frac{a_{l,n}}{d_n}) / C_1) \quad (14)$$

式中: N 为固定负荷数。

利用第④个 KKT 条件, 并将 P 、 P^{ej} 代入得:

$$\begin{aligned} \sum_{g=1}^G a_{l,g} P_g - \sum_{n=1}^N a_{l,n} (P_n^{\text{fix}} + P_n^{\text{ej}}) &= f_l^{\max} \Rightarrow \\ \sum_{g=1}^G a_{l,g} \frac{(\lambda - a_g - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \tau_k^{\max} a_{k,g})}{b_g} + \sum_{g=1}^{K_{\text{AX}}} a_{l,g} P_g^{\max} &= \\ \sum_{n=1}^N a_{l,n} P_n^{\text{fix}} + f_l^{\max} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} a_{l,n} P_n^{\text{ejmax}} + \\ \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} a_{l,n} \frac{(\lambda - c_n - \sum_{k=1}^{L_{\text{cong}}} \tau_k^{\max} a_{k,n})}{d_n}, \quad l=1, \dots, L_{\text{cong}} \end{aligned} \quad (15)$$

步骤 2。将式(14)中的 λ 代入式(15), 得到附录 A 式(A1)。此时, 已整理得机组报价、机组出力上限、负荷出力之间的关系, 将以上变量重新表达成矩阵形式, 矩阵形式可以表示为

$$\begin{aligned} \alpha_1 a + \beta_1 \tau^{\max} &= f^{\max} + A_1 P^{\max} + \\ B_1 P^{\min} + C_2 P_N &\Rightarrow \tau^{\max} = \beta_1^{-1} f^{\max} - \\ \beta_1^{-1} \alpha_1 a + \beta_1^{-1} A_1 P^{\max} &+ \beta_1^{-1} C_2 P^{\text{fix}} \end{aligned} \quad (16)$$

步骤 3。消去中间变量 $\tau^{\max}$, 消去中间变量 $\tau^{\max}$ 的关键是找到 P_g 与 $\tau^{\max}$ 的关系。将式(14)代入式(12)得到:

$$\begin{aligned} P_g &= (\lambda - a_g - \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} \tau_l^{\max} a_{l,g}) / b_g \Rightarrow \\ P_g &= \sum_{n=1}^N \frac{P_n^{\text{fix}}}{C_1 b_g} - \sum_{g=1}^{K_{\text{AX}}} \frac{P_g^{\max}}{C_1 b_g} - \sum_{j=1}^{N_{\text{AX}}} \frac{P_j^{\text{ejmax}}}{C_1 b_g} + \\ \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} \frac{a_j}{C_1 b_g b_j} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} \frac{c_n}{C_1 b_g d_n} - \frac{a_g}{b_g} + \\ \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} (\sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} \frac{a_{l,n}}{C_1 b_g d_n} - \frac{a_{l,g}}{b_g}) \tau_l^{\max} \end{aligned} \quad (17)$$

将上式表示为矩阵形式:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1 b_g} P^{\text{fix}} - \frac{\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1 b_g} P^{\max} - \\ \frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1 b_g} P^{\text{ejmax}} &+ \alpha_2 a + \gamma_2 c + \beta_2 \tau^{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$\begin{cases} \alpha_2 = [\alpha_{1j}] = \begin{cases} \frac{1}{C_1 b_g b_g} - \frac{1}{b_g}, & j = g \\ \frac{1}{C_1 b_g b_j}, & j \neq g \end{cases} \\ \beta_2(g, l) = \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} - \frac{a_{l,g}}{b_g} \end{cases} \quad (19)$$

由步骤 2 的结果消去中间变量 $\tau^{\max}$, 将机组出力 P_g 表示为

$$\begin{aligned} P &= \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1 b_g} P^{\text{fix}} - \frac{\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1 b_g} P^{\max} - \\ \frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1 b_g} P^{\text{ejmax}} &+ \alpha_2 a + \gamma_2 c + \\ \beta_2 \beta_1^{-1} f^{\max} - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1 a &- \beta_2 \beta_1^{-1} \gamma_1^{-1} c + \\ \beta_2 \beta_1^{-1} A_1 P^{\max} + \beta_2 B_1 P^{\text{ejmax}} &+ \beta_2 \beta_1^{-1} C_2 P^{\text{fix}} \end{aligned} \quad (20)$$

将上式的变量按照线路最大传输容量 $f^{\max}$ 、机组报价 a 、负荷报价 c 、机组出力上限 $P^{\max}$ 、可调度弹性负荷出力上限 P^{ejmax} 、固定负荷 P^{fix} 的顺序进行整理, 可得:

$$\begin{aligned} P &= \beta_2 \beta_1^{-1} f^{\max} + (\alpha_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1) a + \\ (\gamma_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \gamma_1) c &+ \\ (-\frac{\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} A_1) P^{\max} &+ \\ (-\frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} B_1) P^{\text{ejmax}} &+ \\ (\frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} C_2) P^{\text{fix}} \end{aligned} \quad (21)$$

上式可以化简为

$$\begin{aligned} P_g &= \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} T^{(1)} f_l^{\max} + \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} T^{(2)} a_j + \sum_{j=1}^{K_{\text{AX}}} T^{(3)} P_j^{\max} + \\ \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} T^{(4)} c_n &+ \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} T^{(5)} P_n^{\text{ejmax}} + \sum_{n=1}^N T^{(6)} P_n^{\text{fix}} \end{aligned} \quad (22)$$

式中:

$$\begin{aligned} T^{(1)} &= \beta_2 \beta_1^{-1}, \quad T^{(2)} = \alpha_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \alpha_1 \\ T^{(3)} &= \frac{-\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} A_1 \\ T^{(4)} &= \gamma_2 - \beta_2 \beta_1^{-1} \gamma_1 \\ T^{(5)} &= \frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} B_1 \\ T^{(6)} &= \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1 b_g} + \beta_2 \beta_1^{-1} C_2 \end{aligned}$$

综上, 式(11)~(22)给出了机组出力的影响因素量化表征的完整过程。

2.3 节点边际电价影响因素的量化表征方法

节点边际电价具有还原电力商品属性、提供价格信号、引导电力长期投资规划的作用。研究影响节点边际电价的因素, 有利于从时间和空间的角度还原电网的运行状态, 掌握电能供需关系。为此, 提出节点边际电价影响因素的量化表征方法:

对于给定的网络拓扑 T , 第 n 个节点的节点边际电价的影响因素可以进行量化表征如下:

$$X_n^{\text{LMP}} = \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} S^{(1)} f_l^{\text{max}} + \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} S^{(2)} a_j + \sum_{j=1}^{K_{\text{AX}}} S^{(3)} P_j^{\text{max}} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} S^{(4)} c_n + \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} S^{(5)} P_n^{\text{ejmax}} + \sum_{n=1}^N S^{(6)} P_n^{\text{fix}} \quad (23)$$

节点边际电价影响因素的量化表征方法推导过程见附录 A。

3 基于量化表征方法的市场力指标体系

由于市场力滥用现象及条件很难被准确定义, 市场监管机构一般倾向于从市场结构或者特殊事件(例如经济持留或者物理持留)来确定市场力。且市场力评估需要考虑电能无法大规模储存、电力负荷需求弹性以及输电网络约束等特性, 还要顾及发电商之间的竞争性互动, 因此, 单一指标很难全面反映电力市场中的市场力。为此, 本节首先定义了综合市场力指标体系, 并基于市场出清结果影响因素量化表征方法, 给出市场力指标的计算方法。

3.1 市场力评估指标体系定义

为更加全面评估双边电力市场中的市场力, 以市场参与者获得的利润为基础, 本节提出了评估市场力的新指标。提出的市场力指标体系如下:

1) 基于机组利润的市场力指标。

发电机组报价改变引起的利润变化系数(revenue index, RI)。对于单台发电机组, RI 定义为发电机组报价每增加一个单位, 发电机组利润的变化量, 可以用来衡量单台发电机组的市场力。发电公司可包含若干台发电机组。对于发电公司, RI 定义为发电机组报价每增加一个单位, 发电公司(售电公司)利润的变化量。

2) 基于 LMP 变化的市场力指标。

发电机组报价改变引起的节点边际电价变化系数(locational marginal price index, LI)。其定义为发电机组报价每增加一个单位, 节点边际电价的变化量。节点边际电价侧面反映了电力系统不同位置的阻塞程度, 发电机组由于所在位置不同, 即使同一机组, 对不同节点上的节点边际电价的影响也不同。

3) 基于售电公司利润的市场力指标。

负荷报价改变引起的售电公司利润变化系数(flex load revenue index, FI)。对于售电公司, FI 定义为负荷报价每增加一个单位, 售电公司(发电公司)利润的变化量, 可用来衡量售电公司的市场力。

3.2 市场力评估指标计算方法

1) 基于机组利润的市场力指标。

根据式(24)~(27)计算发电机组在市场中获得的净利润:

$$\Delta r_i^{\text{np}} = \Delta r_i^{\text{wp}} - \Delta r_i^{\text{cp}} \quad (24)$$

$$\Delta r_i^{\text{wp}} = P_i \times \Delta X_i^{\text{LMP}} + X_i^{\text{LMP}} \times \Delta P_i \quad (25)$$

$$\Delta r_i^{\text{cp}} = v_i^{\text{MC}} \times \Delta P_i \quad (26)$$

$$v_i^{\text{MC}} = h + w P_i \quad (27)$$

式中: Δr_i^{wp} 表示发电机组出售电能的利润变化量; Δr_i^{cp} 表示发电机组电能成本的变化量; Δr_i^{np} 表示发电机组出售电能获得的净利润变化量; P_i 为机组出力; ΔP_i 表示发电机组中标出力的变化量; v_i^{MC} 表示电能成本价格; h 和 w 分别表示电能成本价格的常数系数和一次系数; ΔX_i^{LMP} 是节点 n 节点边际电价的变化量。

根据第 2 节提出的影响因素量化表征方法, 当机组的报价发生改变, 而市场中其他条件不改变时, 节点边际电价和机组出力的变化量能够表示为

$$\Delta X_n^{\text{LMP}} = S_{i',n}^{(2)} \times \Delta a_{i'} \quad (28)$$

$$\Delta P_i = T_i^{(2)} \times \Delta a_{i'} \quad (29)$$

式中: $\Delta a_{i'}$ 表示发电机组 i' 报价变化量; ΔX_n^{LMP} 为节点边际电价变化量。

将式(28)和式(29)代入到机组净利润的计算公式, 因此, 机组的净利润可以表示为

$$\Delta r_i^{\text{np}} = P_i \times \Delta X_n^{\text{LMP}} + X_n^{\text{LMP}} - v_i^{\text{MC}} \times \Delta P_i = P_i (S_{i',n}^{(2)} \times \Delta a_{i'}) + (X_n^{\text{LMP}} - v_i^{\text{MC}} T_{i',i}^{(2)}) \times \Delta a_{i'} \quad (30)$$

机组净利润随着机组的报价变化, 所提出利润变化系数可以表示为

$$\begin{cases} R_{i,i'}^{\text{RI}} = \frac{\Delta r_i^{\text{np}}}{\Delta a_{i'}} = P_i S_{i',n}^{(2)} + \left(\frac{X_n^{\text{LMP}}}{\varepsilon_i^d} \right) T_{i',i}^{(2)}, \quad \forall i \in N_G \\ \frac{1}{\varepsilon_i^d} = \frac{X_n^{\text{LMP}} - v_i^{\text{MC}}}{X_n^{\text{LMP}}} \end{cases} \quad (31)$$

式中: ε_i^d 是勒纳系数; $R_{i,i'}^{\text{RI}}$ 是随着机组 i' 报价变化引起的机组 i 利润变化系数; Δr_i^{np} 是机组 i 净利润变化量; N_G 表示机组集合。

至此, 得到发电机组报价改变引起的利润变化系数 RI。对于出力达到上限的机组, 其出力值不变, ΔP_i 为 0; 机组的出力可以由机组出力最大值 P_i^{max} 表示, 因此, 式(31)可以化简为

$$R_{i,i'}^{\text{RI}} = \frac{\Delta r_i^{\text{np}}}{\Delta a_{i'}} = \frac{P_i \times \Delta X_n^{\text{LMP}} + X_n^{\text{LMP}} \times \Delta P_i - v_i^{\text{MC}} \times \Delta P_i}{\Delta a_{i'}} = \frac{P_i^{\text{max}} \Delta X_n^{\text{LMP}}}{\Delta a_{i'}} = P_i^{\text{max}} S_{i',n}^{(2)} \quad (32)$$

通过式(31)和式(32)可分别得到机组报价改变

时,对于自身机组及其他机组利润变化的影响;将报价改变对自身利润的影响称为自效应,对其他机组利润的影响称为互效应。通过研究机组间的互效应,就可找到当前市场中报价增加而导致其他机组利润增加的机组。这些机组可能会在市场当进行策略性报价,形成盈利联盟,从而提高市场中所获得的经济性收益。

发电公司的利润受到其包含的所有机组共同影响,利润变化系数可由式(33)计算得到。

$$R_{G_m,i'}^{RI} = \sum_{i \in G_m} R_{i,i'}^{RI} \quad (33)$$

式中: $R_{i,i'}^{RI}$ 为机组 i' 的报价变化引起的机组 i 的利润变化量; G_m 表示第 m 个发电公司; $R_{G_m,i'}^{RI}$ 是随着机组 i' 报价变化引起的发电公司 G_m 利润变化系数。

2) 基于 LMP 变化的市场力指标。

机组报价对节点边际电价的影响,可以根据节点边际电价的影响因素量化表征方法直接获得。当机组的报价发生改变,而市场中其他条件改变时,可得:

$$\Delta X_n^{LMP} = S_{i',n}^{(2)} \times \Delta a_{i'} \Rightarrow R_{n,i'}^{LI} = \frac{\Delta X_n^{LMP}}{\Delta a_{i'}} = S_{i',n}^{(2)} \quad (34)$$

式中: $R_{n,i'}^{LI}$ 为机组 i' 的报价变化引起的节点 n 的节点边际电价变化量。

3) 基于售电公司利润的市场力指标。

为计算负荷报价改变引起的利润变化系数,根据式(35)计算售电公司在市场中获得的净利润,并根据影响因素量化表征方法得到式(36),可得:

$$\begin{cases} \Delta r_i^{nb} = \Delta r_i^{eb} - \Delta r_i^{wb} \\ \Delta r_i^{eb} = v_i^{MB} \times \Delta P_i \\ \Delta r_i^{wb} = P_i \times \Delta X_n^{LMP} + X_n^{LMP} \times \Delta P_i \\ v_i^{MB} = m - q \times P_i \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} \Delta X_n^{LMP} = S_{i',n}^{(4)} \times \Delta c_{i'} \\ \Delta P_i = T_i^{(4)} \times \Delta c_{i'} \end{cases} \quad (36)$$

$$\begin{cases} R_{i,i'}^{FI} = \frac{\Delta r_i^{nb}}{\Delta c_{i'}} = P_i S_{i',n}^{(4)} + \left(\frac{X_n^{LMP}}{\varepsilon_{gi}^d} \right) T_{i,i}^{(4)}, \quad \forall i \in N_D \\ \frac{1}{\varepsilon_i^d} = \frac{X_n^{LMP} - v_i^{MB}}{X_n^{LMP}} \end{cases} \quad (37)$$

式中: Δr_i^{eb} 表示售电公司出售电能利润的变化量; Δr_i^{wb} 表示售电公司购电成本; Δr_i^{nb} 表示售电公司出售电能的净利润变化量; v_i^{MB} 表示电能出售价格; m 和 q 分别表示电能出售价格函数的常数系数和一次系数; ΔX_n^{LMP} 是节点 n 节点边际电价的变化

量; ε_i^d 是勒纳系数; $R_{i,i'}^{FI}$ 是随着售电公司 i' 报价变化引起售电公司 i 的利润变化系数; $\Delta c_{i'}$ 是售电公司 i' 的负荷报价变化量。

4 算例分析

为验证电力现货市场出清结果影响因素量化表征及市场力评价方法的有效性,本节采用改进的 IEEE_RTS-24 节点系统对市场出清结果进行分析。IEEE_RTS-24 包含 32 个发电机组和 17 个负荷节点,负荷峰值为 5700MW。在得到的出清结果中,市场均衡点有 14 台发电机组达到出力上限,13 个机组是边际机组。此外,输电线路 23、10、8 达到输电线路传输容量上限。发电机组和负荷的报价信息分别列在见附录表 A1 和 A2 中。

4.1 电力市场出清结果分解

对机组出力的影响因素进行量化表征,结果如表 1 所示。表 1 的第 2 列为机组有功出力值,第 3—8 列分别为各影响因素的量化值。

表 1 机组出力影响因素量化表征结果
Table 1 Quantification of influencing factors of unit power

机组 编号	机组 出力/ MW	线路传 输容量 量化值	机组 报价 量化值	机组出 力上限 量化值	负荷 报价 量化值	可调度弹性 负荷出力上 限量化值	固定 负荷 量化值
13	117	-109	-25	-102	106	238	9
14	117	-109	-25	-102	106	238	9
16	242	-276	-134	-297	280	642	27
18	242	-276	-134	-297	280	642	27
30	505	933	-22	-1227	169	650	2

由表 1 可以看出,线路传输容量对 13、14、16、18 号机组出力的影响为正,对 30 号机组出力的影响为负。机组报价对 13、14、16、18、30 机组出力的影响为负,这是机组报价增加,其被选择为中标机组的机会变小,机组的中标出力会减少。负荷报价对机组 13、14、16、18、30 的影响为正,这是由于负荷报价增加,机组为增加自身经济效益而自愿提高自身出力。机组出力上限对机组 13、14、16、18、30 出力的影响为负。通过综合分析可以看出,在 6 种市场因素中,固定负荷对机组出力的影响相对较小。不同线路的传输容量对机组出力值的影响是不同的,因此表 1 展示的是不同线路的传输容量对机组出力值的影响之和,即共同作用因素。

同时,不同因素也会对节点边际电价产生影响。结果如图 2 所示。可以直观地看出,对节点边际电价影响最大的市场因素是机组报价,影响最小的市场因素是可调度弹性负荷出力上限。

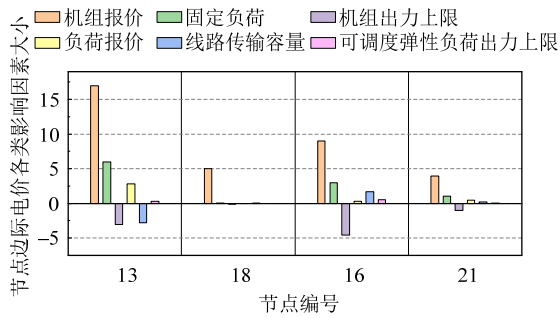


图2 LMP影响因素量化表征结果

Fig. 2 Quantification of influencing factors of LMP

4.2 市场力分析

4.2.1 基于机组利润的市场力指标

发电机组因报价改变而获得的利润如表 2 所示。表 2 中对角线上的单元格给出了机组通过改变报价而使自身获得的利润，即自效应。最大的自效应是 30 号机组对应的 RI，值为 505.10，反映了 30 号机组具有最大的市场力。

表 2 中的其他单元格给出了 RI 的互效应。互效应可以是正，也可是负，反映机组报价改变对其他机组利润的影响，因此，可基于 RI 的互效应监测发电机组之间形成盈利联盟的可能。例如，30 号机组的报价每提高 1\$/(MW·h)，将使 13 号机组、14 号机组利润增加 2.1\$，但同时会使 16 号机组、18 号机组的利润变化-1.8\$，为追求经济利益，30 号机组不会与 18 号机组形成盈利联盟。

表 2 机组因报价改变获得的利润					
Table 2 Profit of the unit due to the change of bid					
报价改变的 机组编号	13 号机组 增加利润/ \$	14 号机组 增加利润/ \$	16 号机组 增加利润/ \$	18 号机组 增加利润/ \$	30 号机组 增加利润/ \$
13 号机组	7.05	10.15	20.4	20.4	0.04
14 号机组	10.15	7.05	20.4	20.4	0.04
16 号机组	26.6	26.6	46.3	55.3	-0.1
18 号机组	26.6	26.6	55.3	46.3	-0.1
30 号机组	2.1	2.1	-1.8	-1.8	505.1

发电公司的利润受到其包含的所有机组共同影响，以 5 个发电公司为例，计算与发电公司相关的市场力指标。发电公司包括若干台发电机组，例如，发电公司 G1 拥有 30 号机组，其他发电公司情况如表 3 所示。

图 3 给出了机组报价改变对自身和其他发电公司利润指标的自效应和互效应。右侧纵轴对应的曲线图表示发电机组报价增加对自身利润的自效应。左侧纵轴对应的条形图给出了提高发电机组的报价对其他发电公司利润指数的互效应。每一列不同颜色分别表示对不同发电公司 G 的互效应。最高市场力出现在 30 号机组的自效应。同时，负的最大

互效应出现在 32 号机组报价增加对发电公司 G4 利润的影响，其值为-22.92。16 号机组的报价每增加 1\$/(MW·h)，其利润和发电公司 G4 的利润将分别增加 46.3\$和 135.8\$。因此，16 号机组具有和发电公司 G4 形成盈利联盟的潜力。而且，16 号机组报价的改变同时将导致发电公司 G5 遭受经济损失，损失值为 6.2\$。发电公司利用自身机组报价改变对其他发电公司利润造成影响。

表 3 发电公司因报价改变获得的利润					
Table 3 Profit of the generation company due to change of bids					
报价改变的 发电公司(机组)	G1 增加 利润/\$	G2 增加 利润/\$	G3 增加 利润/\$	G4 增加 利润/\$	G5 增加 利润/\$
G1 (Unit30)	505.1	4.2	-3.6	266.5	203.4
G2 (Unit13、14)	3.8	14.1	40.8	30.5	7.4
G3 (Unit16、18)	-2.2	53.2	92.6	135.8	8.6
G4 (Unit10、11、12)	22.5	4.6	96.3	104.3	64.5
G5 (Unit27、28、29)	33.5	67.3	55.4	-5.4	132.6

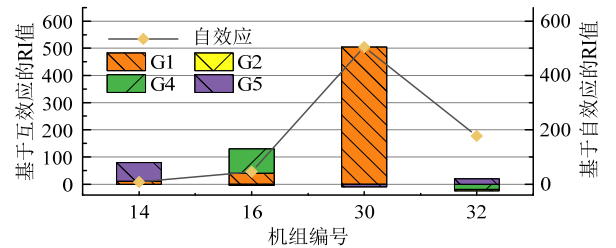


图3 机组报价对发电公司利润 RI 的影响

Fig. 3 RI of generation companies due to unit bid changes

表 3 给出了发电公司报价每增加 1\$/(MW·h)，发电公司的利润变化量。表 3 对角线上的单元格可以评价发电公司的市场力，发电公司 G1 的市场力最高，RI 值为 505.1。

表 3 的其他单元格可以评估发电公司报价对其他发电公司产生的影响。例如，发电公司 G3 的报价增加 1\$/(MW·h)，发电公司 G2 和发电公司 G4 的利润将分别增加 53.2\$和 135.8\$，同时发电公司 G3 可与发电公司 G4 组建盈利联盟，而发电公司 G3 如果与发电公司 G1 组建立联盟，则将会在此联盟中遭受到经济损失。值得注意的是，与其他发电公司不同，G2 在各发电公司报价增加时都能够获得利润，因此可以自由地建立盈利联盟。

发电机组对售电公司 LSE 利润的影响可以通过 LSE 利润指标 RI 评估。如图 4 所示，30 号机组报价增加，第 16 LSE 的利润减少，减少值为 4.78；32 号机组报价增加，第 16 LSE 的利润也会减少；

减少值为 49.7。与之相对, 30 号机组报价增加, 第 15 LSE 的利润会增加, 增加值为 34.5, 32 号机组报价增加, 第 15 LSE 的利润会增加, 增加值为 70.2。由此可见, 30 号机组报价增加和 32 号机组报价增加, 对第 15 LSE 和第 16 LSE 所产生的影响是完全相反的。同时表明第 15 LSE 与 30 号机组和 32 号机组共同组成盈利联盟是合适的, 而第 16 LSE 与 30 号机组和 32 号机组共同组成盈利联盟是不合适的。同时, 图 4 表明第 16 LSE 虽然不能与 30 号机组、32 号机组共同组成盈利联盟, 但是, 第 16 LSE 能够与 13 号机组、14 号机组、15 号机组、16 号机组、17 号机组、18 号机组共同组成盈利联盟。第 15 LSE 虽然不能与 13 号机组和 14 号机组共同组成盈利联盟, 但是能与 16 号机组、17 号机组、18 号机组、30 号机组、32 号机组共同组成盈利联盟。

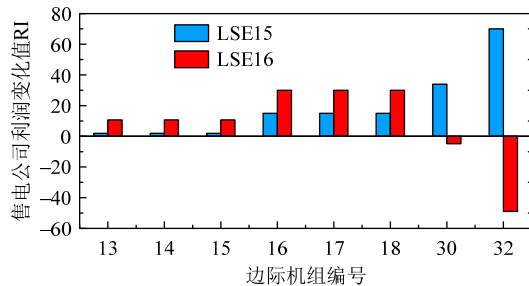


图 4 发电机组报价对售电公司利润 RI 的影响
Fig. 4 RI of the LSE when the unit bid changes

为验证所提市场力指标的有效性, 与其他的市场力指标进行了对比。表 4 反映了本文方法与文献[13]中的勒纳指标(Lerner metric, LM)及高价中标率(winning bidder metric, WM)的对比结果, 本文方法与其他市场力评估方法结果一致。

表 4 与其他市场力评估方法的对比 Table 4 Comparison with other market power assessment methods		
市场力评估方法	市场力最大的发电公司	市场力最小的发电公司
WM 指标	G1	G2
LM 指标	G1	G2
本文方法	G1	G2

4.2.2 基于 LMP 变化的市场力指标

由上述分析节点边际电价 LMP 影响因素的量化表征结果可知, 每个节点边际电价 LMP 与机组报价直接相关, 表 5 比较了机组报价改变对 LMP 的影响。当 30 号机组的报价增加 1\$(/MW·h)时, 第 18 节点的节点边际电价 LMP 变化最大, 变化值为 1.2; 可以看出 13 号机组、16 号机组、32 号机组的报价发生变化时, 不会对第 18 节点的节点边际电价产生影响。当 13 号机组的报价增加 1\$(/MW·h)

时, 第 7 节点的节点边际电价 LMP 会增加, 增加值为 0.09; 不难看出 16 号机组、30 号机组、32 号机组的报价发生变化时, 也会对第 7 节点的节点边际电价产生影响。不同机组对不同节点的节点边际电价的影响不同, 主要与电网的物理特性有关。不同机组离负荷中心的距离不同, 导致输电过程中产生不同的损耗。远离负荷的发电机组的电力在传输过程中会产生更高的损耗, 这会推高其在负荷节点的边际成本, 从而影响节点边际电价。比较第 7 节点和第 18 节点的节点边际电价 LMP 的变化, 13、16、30、32 号机组都影响到第 7 节点; 只有 30 号机组变化会影响到第 18 节点; 可以看出, 第 18 节点的节点边际电价 LMP 相对机组报价的鲁棒性更好。

表 5 机组报价引起的 LMP 的变化 Table 5 Changes in LMP due to unit quotations				
报价改变的机组	LMP7 变化量/ \$(/MW·h)	LMP13 变化量/ \$(/MW·h)	LMP16 变化量/ \$(/MW·h)	LMP18 变化量/ \$(/MW·h)
机组 13	0.09	0.08	-0.02	0
机组 16	0.22	0.21	0.02	0
机组 30	0.03	-0.02	0	1.2
机组 32	-0.05	0.04	0.96	0

4.2.3 基于售电公司利润的市场力指标

售电公司 LSE 的负荷报价变化对发电公司利润 FI 的影响如图 5 所示。第 12 LSE 与发电公司 G5 可以形成最优盈利联盟。根据 FI 值, 发电公司 G5 和发电公司 G4 适合与大部分 LSE 建立盈利联盟。第 7 LSE、第 8 LSE、第 9 LSE 的报价变化时, 发电公司 G1、G3、G4 的利润变化不明显, 相互之间不适合形成盈利联盟。

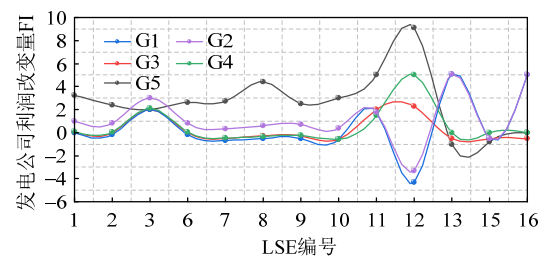


图 5 LSE 报价对发电公司利润 FI 的影响
Fig. 5 FI of generation companies when LSE bids change

对于 17 个 LSE 的利润指数 FI, 图 6 给出了负荷报价改变产生的自效应和互效应。

分析负荷报价改变产生的自效应, 如图右轴线上的红色曲线所示, 负荷报价改变对自身利润的影响均为负, 因此可以得出: LSE 不具备提高自身利润的市场力。其中, 第 6 LSE 存在最大的自效应, 绝对值为 2.848。对于负荷报价产生的互

效应，左侧纵轴上的蓝色列给出了 LSE 报价增加对其他 LSE 的利润指标 FI 总和的影响，反映售电公司报价改变对其他所有售电公司利润的影响。第 6 LSE 报价改变对其他售电公司的利润影响最大，第 15 LSE 报价改变对其他售电公司的利润影响最小。

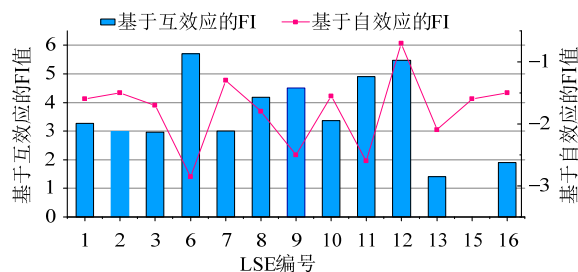


图6 LSE 报价对售电公司的利润 FI 的影响
Fig. 6 FI of sales companies when LSE bids change

5 结论

本文针对电力现货市场出清结果成因分析问题，提出电力现货市场出清结果影响因素量化表征及市场力评价方法，通过算例分析得到如下结论：

1) 随着电力市场的不断发展，未来新型电力系统对于市场出清结果的可靠性和溯源需求必将大幅增加，通过将节点边际电价、机组出力的影响因素进行量化表征，可以更加精细化地定位市场因素对出清结果的贡献值，能够更加真实反映系统物理因素和市场成员报价经济因素对市场出清结果的影响。对出清结果影响因素量化表征可以得出，机组报价相比其他因素对节点边际电价影响较大，可调度弹性负荷相比其他因素对机组出力影响较大。

2) 本文提出了基于量化表征法的市场力指标评价方法，能够有效评估机组的报价或售电公司报价对市场中的其他机组或售电公司利润的影响。基于对不同市场成员利润分析可以得出，LSE 不具备提高自身利润的市场力，监测市场成员报价对其他成员利润的影响可以进一步判断市场成员间形成盈利联盟的可能。

本文工作主要针对电能市场，随着市场改革的进行，辅助服务市场也成为电力市场的重要一环，后续工作中将针对辅助服务市场和电能市场的联合出清结果分析开展进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

[1] 谢开, 刘敦楠, 李竹, 等. 适应新型电力系统的多维协同电力市场体系[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 2-12.

XIE Kai, LIU Dunnan, LI Zhu, et al. Multi-dimensional collaborative electricity market system for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 2-12(in Chinese).

[2] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3186.

SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3186(in Chinese).

[3] 吴洋, 辛茹, 邹文滔, 等. 提升电力现货市场出清结果可解释性的综合分析方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 113-123.

WU Yang, XIN Ru, ZOU Wentao, et al. Comprehensive analysis method for enhancing the explainability of electricity spot market clearing results[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 113-123(in Chinese).

[4] 丁怡, 吕力, 涂孟夫. 电力现货市场技术支持系统关键技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 1-8.

DING Qia, CHANG Li, TU Mengfu. Key technologies of technical support system for electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 1-8(in Chinese).

[5] LAM L H, ILEA V, BOVO C. European day-ahead electricity market coupling: discussion, modeling, and case study[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 155: 80-92.

[6] 史新红, 郑亚先, 薛必克, 等. 机组运行约束对机组节点边际电价的影响分析[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2658-2664.

SHI Xinhong, ZHENG Yaxian, XUE Bike, et al. Effect analysis of unit operation constraints on locational marginal price of unit nodes[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2658-2664(in Chinese).

[7] 郭伟嘉, 刘敦楠, 谢开, 等. 高比例新能源下电能量与平衡调节服务联合运营与出清机制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 55-63.

GUO Weijia, LIU Dunnan, XIE Kai, et al. Joint operation and clearing mechanism of electric power energy and balance regulation service with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 55-63(in Chinese).

[8] 尚静怡, 姜欣, 肖东亮, 等. 基于边际成本比较型竞价模式的电力现货市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 67-74.

SHANG Jingyi, JIANG Xin, XIAO Dongliang, et al. Design of electricity spot market mechanism based on marginal cost comparison bidding mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 67-74(in Chinese).

[9] 陈丽霞, 周云, 方陈, 等. 考虑碳交易的发电商和电力用户竞价博弈[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 66-72.

CHEN Lixia, ZHOU Yun, FANG Chen, et al. Bidding game between power generation companies and consumers considering carbon trade[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(10): 66-72(in Chinese).

[10] 王怡, 杨知方, 余娟, 等. 从优化视角剖析电力市场的定价问题[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4729-4745.

WANG Yi, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Analyzing pricing problem in electricity market from an optimization perspective[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4729-4745(in Chinese).

[11] 陈红坤, 王雪纯, 陈磊. 考虑灵活性供给约束的区域综合能源系统节点边际能价分解分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3576-3589.

CHEN Hongkun, WANG Xuechun, CHEN Lei. Decomposition analysis on locational marginal energy prices in regional integrated energy system considering flexibility provision constraints[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3576-3589(in Chinese).
- [12] HAJIABADI M E, SAMADI M. Locational marginal price share: a new structural market power index[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1709-1720.
- [13] 董礼, 王胜华, 华回春, 等. 中国现货电力市场中发电企业滥用市场力违规识别[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8397-8407. DONG Li, WANG Shenghua, HUA Huichun, et al. Identification of market power abuse in spot market of Chinese electric market[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8397-8407(in Chinese).
- [14] SHANG Nan, DING Yi, CUI Wenqi. Review of market power assessment and mitigation in reshaping of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1067-1084.
- [15] KARTHIKEYAN S P, RAGLEND I J, KOTHARI D P. A review on market power in deregulated electricity market[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48: 139-147.
- [16] 黄晓玲, 郭国川. 电力市场操纵力问题探析[J]. 中国电力, 2003, 36(6): 35-40. HUANG Xiaoling, GUO Guochuan. Analysis of market power in liberalized electricity markets[J]. Electric Power, 2003, 36(6): 35-40(in Chinese).
- [17] 刘敦楠, 李瑞庆, 陈雪青, 等. 电力市场监管指标及市场评价体系[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 16-21. LIU Dunnan, LI Ruiqing, CHEN Xueqing, et al. Surveillance indices and evaluating system of electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 16-21(in Chinese).
- [18] 和识之, 何翔路, 娄素华, 等. 南方(以广东起步)电力现货市场“月结算”试运行关键监测指标及市场力分析[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 175-184. HE Shizhi, HE Xianglu, LOU Suhua, et al. Key monitoring indicators and market power analysis in “monthly settlement” trial operation of southern China electricity spot market (starting with Guangdong province)[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 175-184(in Chinese).
- [19] 张粒子, 王进. 适应我国高集中度电力现货市场的发电侧市场力辨识方法[J]. 电网技术, 2024, 48 (7): 2823-2832. ZHANG Lizi, WANG Jin. A method for identifying market power on the generation side adapting to China's high concentration electricity spot market[J]. Power System Technology, 2024, 48 (7): 2823-2832(in Chinese).
- [20] 陈青, 杨骏伟, 黄远明, 等. 国外电力市场中市场力监测与缓解机制综述[J]. 南方电网技术, 2018, 12(12): 9-15, 63. CHEN Qing, YANG Junwei, HUANG Yuanming, et al. Review on market power monitoring and mitigation mechanisms in foreign electricity markets[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 9-15, 63(in Chinese).
- [21] YE Yujian, PAPADASKALOPOULOS D, STRBAC G. Investigating the ability of demand shifting to mitigate electricity producers' market power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3800-3811.
- [22] KHAKSARI A, STEROTIS K, MAKRI S P, et al. Electricity market equilibria analysis on the value of demand-side flexibility portfolios' mix and the strategic demand aggregators' market power[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101399.
- [23] 赵帅, 王森, 杨晓静, 等. “源-网-荷”因素对电力现货市场节点边际电价影响研究[J]. 价格理论与实践, 2021(2): 83-86, 139. ZHAO Shuai, WANG Sen, YANG Xiaojing, et al. Study on the influence of “source-grid-load” factors on the locational marginal price of electricity spot market[J]. Price: Theory & Practice, 2021(2): 83-86, 139(in Chinese).
- [24] 董福贵, 郝来昊, 孟子航. 考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 79-90. DONG Fugui, HAO Laihao, MENG Zihang. Multi-stage optimization model for electricity spot market clearing considering carbon trading [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 79-90(in Chinese).



陈艳波

在线出版日期: 2025-04-01。

收稿日期: 2024-08-02。

作者简介:

陈艳波(1982), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn;

张智(1994), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源电力系统规划与运行、电力市场等, E-mail: zz_dqgc@163.com。

(责任编辑 王金芝)

附录 A

将式(14)中的 λ 代入式(15)，得到：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{g=1}^{K_{AR}} \left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \left(\frac{a_{l,n}}{C_1 b_g d_n} - \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) a_g + \sum_{g=1}^{N_{AR}} \left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 d_g b_j} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \left(\frac{a_{l,n}}{C_1 d_g d_n} - \frac{a_{l,g}}{d_g} \right) c_g + \right. \\
 & \left. \sum_{k=1}^{L_{cong}} \left(\sum_{g=1}^{K_{AR}} \left(\left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j C_1 b_g} + \sum_{j=1}^{N_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{d_j C_1 b_g} - \frac{a_{k,g} a_{l,g}}{b_g} \right) \right) \tau_k^{\max} + \sum_{g=1}^{L_{cong}} \left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j C_1 d_g} + \sum_{j=1}^{N_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{d_j C_1 d_g} - \frac{a_{k,g} a_{l,g}}{d_g} \right) \right) \tau_k^{\max} - \right. \\
 & \left. \sum_{g=1}^{K_{AR}} a_{l,n} \left(\sum_{j=1}^{K_{AX}} \frac{P_j^{\max}}{C_1 b_g} \right) - \sum_{n=1}^{N_{AR}} a_{l,n} \left(\sum_{j=1}^{K_{AX}} \frac{P_j^{\max}}{C_1 d_n} \right) - \sum_{g=1}^{K_{AR}} a_{l,g} \left(\sum_{j=1}^{N_{AX}} \frac{P_j^{\max}}{C_1 b_g} \right) - \sum_{n=1}^{N_{AR}} a_{l,n} \left(\sum_{j=1}^{N_{AX}} \frac{P_j^{\max}}{C_1 d_n} \right) - \sum_{g=1}^{K_{AR}} a_{l,g} \left(\sum_{j=1}^N \frac{P_j^{\max}}{C_1 b_g} \right) - \\
 & \left. \sum_{n=1}^{N_{AR}} a_{l,n} \left(\sum_{j=1}^N \frac{P_j^{\max}}{C_1 d_n} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AX}} a_{l,n} P_n^{\max} + \sum_{n=1}^N a_{l,n} P_n^{\max} + \sum_{g=1}^{K_{AX}} a_{l,g} P_g^{\max} = f_l^{\max} \right) \quad (A1)
 \end{aligned}$$

重新表示为矩阵形式：

$$\begin{aligned}
 & \alpha_1 a + \beta_1 \tau^{\max} + \gamma_1 c = f^{\max} + A_1 P^{\max} + B_1 P^{\text{ejmax}} + C_2 P^{\text{fix}} \Rightarrow \\
 & \tau^{\max} = \beta_1^{-1} f^{\max} - \beta_1^{-1} \alpha_1 a - \beta_1^{-1} \gamma_1^{-1} c + \beta_1^{-1} A_1 P^{\max} + B_1 P^{\text{ejmax}} + \beta_1^{-1} C_2 P^{\text{fix}} \quad (A2)
 \end{aligned}$$

式中：

$$\begin{cases}
 \alpha_1(l, g) = \sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 b_g b_j} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \left(\frac{a_{l,n}}{C_1 b_g d_n} - \frac{a_{l,g}}{b_g} \right) \\
 \gamma_1(l, g) = \sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,j}}{C_1 d_g b_j} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \left(\frac{a_{l,n}}{C_1 d_g d_n} - \frac{a_{l,g}}{d_g} \right) \\
 \beta_1(l, k) = \sum_{g=1}^{K_{AR}} \left(\left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j C_1 b_g} + \sum_{j=1}^{N_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{d_j C_1 b_g} - \frac{a_{k,g} a_{l,g}}{b_g} \right) + \sum_{g=1}^{N_{AR}} \left(\left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{b_j C_1 d_g} + \sum_{j=1}^{N_{AR}} \frac{a_{k,j} a_{l,g}}{d_j C_1 d_g} - \frac{a_{k,g} a_{l,g}}{d_g} \right) \right) \right) \\
 A_1 = [A_{l,g}] = \left[\sum_{g=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) - a_{l,g} \right], B_1 = [B_{l,g}] = \left[\sum_{g=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \right) - a_{l,g} \right], C_2(l, n) = a_{l,n} - \sum_{g=1}^{K_{AR}} \frac{a_{l,g}}{C_1 b_g} \\
 \tau^{\max} = [\tau_k^{\max}], f^{\max} = [f_l^{\max}], a = [a_g]
 \end{cases} \quad (A3)$$

LMP 影响因素量化表征方法推导如下：

$$\begin{aligned}
 X_n^{\text{LMP}} &= (\lambda - \sum_{l=1}^{L_{cong}} \tau_l^{\max} a_{l,g}) = \\
 & \left(\sum_{n=1}^N P_n / C_1 - \sum_{j=1}^{K_{AX}} P_j^{\max} / C_1 + \sum_{j=1}^{K_{AX}} \left(\frac{a_j}{b_j} \right) / C_1 + \sum_{l=1}^{L_{cong}} (\tau_l^{\max} \left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{l,j}}{b_j} \right) / C_1) - \sum_{l=1}^{L_{cong}} \tau_l^{\max} a_{l,g} \right) \quad (A4)
 \end{aligned}$$

重新整理，进行变量分离，可以得到：

$$X_n^{\text{LMP}} = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\omega_n P_n}{C_1} \right) - \sum_{g=1}^{K_{AX}} \left(\frac{P_g^{\max}}{C_1} \right) - \sum_{j=1}^{N_{AX}} \left(\frac{P_j^{\text{ejmax}}}{C_1} \right) + \sum_{j=1}^{K_{AR}} \left(\frac{a_j}{C_1 b_j} \right) + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \left(\frac{c_n}{C_1 d_n} \right) + \sum_{l=1}^{L_{cong}} \left(\sum_{j=1}^{K_{AR}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_j} + \sum_{n=1}^{N_{AR}} \frac{a_{l,n}}{C_1 d_n} - a_{l,g} \right) \tau_l^{\max} \quad (A5)$$

将上式表示为矩阵形式：

$$X_n^{\text{LMP}} = \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1} P^{\text{fix}} - \frac{\text{Ones}(1, K_{AX})}{C_1} P^{\max} - \frac{\text{Ones}(1, N_{AX})}{C_1} P^{\text{ejmax}} + \alpha_3 a + \gamma_2 c + \beta_3 \times \tau^{\max} \quad (A6)$$

式中：

$$\alpha_3 = [\alpha_{l,j}] = \frac{1}{C_1 b_j}, \quad \beta_3(g, l) = \sum_{j=K_{\min}+1}^{G-K_{\max}} \frac{a_{l,j}}{C_1 b_j} - a_{l,g}$$

消去中间变量 $\tau^{\max}$ ，可以将机组出力 X_n^{LMP} 表示为

$$X_n^{\text{LMP}} = \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1} P^{\text{fix}} - \frac{\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1} P^{\text{max}} - \frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1} P^{\text{ejmax}} + \alpha_3 a + \gamma_2 c + \beta_3 \beta_1^{-1} f^{\text{max}} - \beta_3 \beta_1^{-1} \alpha_1 a - \beta_3 \beta_1^{-1} \gamma_1 c + \beta_3 \beta_1^{-1} A_1 P^{\text{max}} + \beta_3 B_1 P^{\text{ejmax}} + \beta_3 \beta_1^{-1} C_2 P^{\text{fix}} \quad (\text{A7})$$

将上式的变量按照线路最大传输容量 f^{max} 、机组报价 a 、负荷报价 c 、机组的出力上限 P^{max} 、可调度弹性负荷出力上限 P^{ejmax} 、固定负荷 P^{fix} 的顺序进行整理，可以得到：

$$X_n^{\text{LMP}} = \beta_3 \beta_1^{-1} f^{\text{max}} + (\alpha_3 - \beta_3 \beta_1^{-1} \alpha_1) a + (\gamma_2 - \beta_3 \beta_1^{-1} \gamma_1) c + \left(\frac{-\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} A_1 \right) P^{\text{max}} + \left(\frac{-\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} B_1 \right) P^{\text{ejmax}} + \left(\frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} C_2 \right) P^{\text{fix}} \quad (\text{A8})$$

上式可以化简为

$$X_n^{\text{LMP}} = \sum_{l=1}^{L_{\text{cong}}} S^{(1)} \times f_l^{\text{max}} + \sum_{j=1}^{K_{\text{AR}}} S^{(2)} \times a_j + \sum_{j=1}^{K_{\text{AX}}} S^{(3)} \times P_j^{\text{max}} + \sum_{n=1}^{N_{\text{AR}}} S^{(4)} \times c_n + \sum_{n=1}^{N_{\text{AX}}} S^{(5)} \times P_n^{\text{ejmax}} + \sum_{n=1}^N S^{(6)} \times P_n^{\text{fix}} \quad (\text{A9})$$

式中：

$$S^{(1)} = \beta_3 \beta_1^{-1}, \quad S^{(2)} = \alpha_3 - \beta_3 \beta_1^{-1} \alpha_1, \quad S_g^{(3)} = \frac{-\text{Ones}(1, K_{\text{AX}})}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} A_1, \quad S_g^{(4)} = \gamma_2 - \beta_3 \beta_1^{-1} \gamma_1, \\ S_l^{(5)} = \frac{\text{Ones}(1, N_{\text{AX}})}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} B_1, \quad S_l^{(6)} = \frac{\text{Ones}(1, N)}{C_1} + \beta_3 \beta_1^{-1} C_2$$

表 A1 机组报价信息

Table A1 Unit quotation information

机组编号	所在节点	出力上限/MW	a (\$/MW)	b (\$/MW ²)
1—6	22	100	1	0
7—11	15	24	21.227	0.37937
12, 32, 27, 28	15, 16, 23	310	9.537	0.00559
13, 14, 15	7	200	17.974	0.02748
16, 17, 18	13	394	18.47	0.01011
19, 20, 23, 24	1, 2	40	24.842	0.365
21, 22, 25, 26	1, 2	152	10.239	0.0384
29	23	700	9.587	0.00315
30, 31	18, 21	800	5.23	0.00007

表 A2 负荷报价信息

Table A2 Load quote information

负荷编号	节点位置	固定负荷/MW	可调度弹性负荷上限/MW	c (\$/MW)	d (\$/MW ²)
1	1	216	64.8	48	5.0
2	2	194	58.2	52	5.5
3	3	360	108	48	4.5
4	4	148	44.4	54	5.0
5	5	142	42.6	60	5.0
6	6	272	81.6	38	3.0
7	7	280	84	60	5.5
8	8	342	102.6	50	4.0
9	9	350	105	40	4.5
10	10	390	117	60	5.0
11	13	580	174	36	3.5
12	14	388	116.4	52	3.5
13	15	634	190.5	48	3.5
14	16	200	60	38	3.5
15	18	666	199.8	64	6.0
16	19	382	114.6	48	5.0
17	20	256	76.8	80	6.0