

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210869

考虑风电与能源转换和存储设备联营的电力和 天然气市场均衡分析

王 晔, 李丰荣, 张少华

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 风电出力较大的不确定性会导致参与市场竞争时的投标偏差问题, 多能交易市场中的多能互补有助于降低风电投标偏差。首先, 提出了风电商与电转气设备、燃气机组及储气装置分别以合作联营和租用联营模式参与投标竞争的电力和天然气市场交易框架。其中, 两种联营模式均可完全弥补风电商在电力市场中的投标偏差, 而且电转气设备、燃气机组和储气装置除了弥补风电投标偏差, 还能利用不同能源市场价格差异参与套利交易。其次, 为了研究比较不同联营模式对电-气市场均衡结果的影响, 分别建立不同联营模式下的电力-天然气市场多时段古诺随机均衡模型。其中利用 Shapley 值法对合作联营模式下的风电商、电转气设备、燃气机组及储气装置进行利润分配。最后, 通过算例仿真表明, 所提出的两种联营模式有助于提高风电商的市场竞争力, 缓解电力和天然气市场的价格波动, 促进两个市场的高效平稳运行。

关键词: 风电投标偏差; 电转气设备; 燃气机组; 日前电力市场; 天然气市场; 联合均衡模型

Equilibrium analysis of coupled electricity and gas markets considering joint operation of wind power with energy conversion and storage equipment

WANG Xian, LI Fengying, ZHANG Shaohua

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The high uncertainty of wind power output will lead to the problem of bid deviations when wind power producers (WPPs) participate in market competition. Multi-energy complementarity in the multi-energy trading market is helpful in tackling WPP bid deviations. First, multi-energy market trading frameworks are proposed for two joint operational modes (namely cooperative joint operation and lease joint operation) of WPP, power-to-gas (P2G) equipment, natural gas generating unit (NGGU) and gas storage device (GSD). These two modes can fully compensate for the WPP bid deviations in the electricity market. In addition, the P2G equipment, NGGU and GSD can be used not only for compensating WPP bid deviations, but also for arbitrage between the electricity and gas markets. Second, in order to study and compare the influence of different joint operational modes on the equilibrium outcomes of the multi-energy market, multi-period Cournot equilibrium models are established for the electricity and gas markets under different joint operational modes. The Shapley value method is applied to allocate the profits among WPP, P2G, NGGU and GSD for the cooperative joint operation mode. Finally, numerical simulation shows that the two proposed joint operational modes are helpful in improving market competitiveness of WPP, mitigate price fluctuations in both the electricity and gas markets, and promote the efficient and stable operation of the two markets.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61773252).

Key words: wind power bid deviation; power-to-gas equipment; natural gas generating unit; day-ahead electricity market; natural gas market; joint equilibrium model

0 引言

近年来, 风力发电凭借其绿色清洁、低成本的

优势实现了大规模并网, 成为重要的电力供给来源, 并且风电与其他传统发电资源一起参与电力市场交易已成为一个发展趋势^[1]。由于风力发电具有较大的随机波动性, 其在日前电力市场的中标出力与实际出力的偏差(以下称为投标偏差)问题会影响风电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61773252)

消纳和市场的的经济运行^[2]。目前,为风电配置灵活性资源如储能设备以减小其投标偏差正逐渐成为研究热点^[3-5]。此外,在能源互联网的推动下,已有诸多文献研究如何利用多能互补特性提高风电等可再生能源消纳^[6-7]。电转气(Power to Gas, P2G)设备和燃气机组(Natural Gas Generating Unit, NGGU)作为多能源互联系统的重要能源转换枢纽,不仅可以构建能量双向流动的电-气耦合系统,也可以利用不同能源市场价格之间的波动和差异进行套利交易,再结合储气装置则可为风电等可再生能源的消纳提供新途径^[8-10]。为了有效降低风电商投标偏差,风电商可与 P2G 设备、NGGU 及储气装置联营,因此研究风电与 P2G、NGGU 及储气装置联营的不同模式对多能源市场竞争的影响具有实际意义。

目前已有文献研究了风电与储能、P2G 设备、需求响应(DR)等资源联营参与市场竞争的投标策略优化问题^[11-13],但均未考虑市场参与者竞争策略对市场价格的影响,即基于价格接受者假设。由于实际电力市场具有寡头竞争特性,各市场参与者竞争策略会影响市场价格,因此需要应用寡头博弈均衡理论分析市场中各参与者的策略性行为及其对市场均衡结果的影响^[14-15]。文献[16]考虑风电商与 DR 聚合商合作联营参与电力市场竞争,并应用古诺均衡模型研究风电与 DR 联营对市场均衡结果的影响。文献[17]建立了风电与电动汽车以不同联营模式参与电力市场的博弈模型,研究了以电动汽车为储能主体与风电联营对所有博弈者策略以及整个市场的影响。以上研究表明风电与 DR、储能等资源联营有助于减少风电投标偏差并增强风电商市场竞争力,但仅考虑单一的电力市场环境。文献[18]研究风电参与投标的电力-天然气多能源市场博弈问题,考虑风电商通过 P2G 设备和 NGGU 来消除其投标偏差,但未考虑储气装置以及 P2G 设备和 NGGU 的策略性行为。

综上所述,风电参与电力市场竞争已是必然趋势,为了更好地弥补风电投标偏差,基于储能技术和多能源互联系统,风电与能源转换存储设备联营成为有效手段。同时,P2G 设备和 NGGU 作为多能源互联系统的重要枢纽,其参与市场竞争的策略行为也是值得关注的重要问题。从现有文献来看,相关研究仍存在一定的局限性:(1)目前关于 P2G 设备和 NGGU 参与电力市场竞价策略的研究较少,且均未考虑风电商共同参与投标竞争的情况;(2)现有相关文献还未涉及风电商与 P2G 设备、NGGU 和储气装置联营共同参与投标竞争的多能源市场多时段博弈问题。

基于上述背景,本文的主要工作如下:

1) 提出了风电商与 P2G 设备、NGGU 和储气装置以合作联营和租用联营模式参与多能源市场投标竞争的市场交易框架,合作联营模式下风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置构成四方联营体合作参与多能源市场竞争;租用联营模式下风电商需租用 P2G、NGGU 及储气装置来处理其投标偏差,P2G、NGGU 及储气装置优先满足风电商投标偏差,剩余容量独立参与市场竞争。两种联营模式均可完全弥补风电商的投标偏差,而且 P2G 设备、NGGU 和储气装置除了弥补风电投标偏差,还能利用不同能源市场价格差异参与套利交易。

2) 基于两种多能源市场交易框架,分别建立风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置以合作联营和租用联营模式参与电力-天然气市场投标竞争的多时段随机博弈均衡模型,合作联营模式下利用 Shapley 值法对风电商、P2G 设备、NGGU 及储气装置进行利润分配。通过算例仿真研究比较了两种不同模式对电力市场和天然气市场均衡结果的影响,得到了具有实际指导意义的结论。

1 市场交易框架

本文考虑风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置以两种不同的联营模式参与市场竞争:一是合作联营模式,即假设风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置合作组成四方联营体一起参与市场竞争;二是租用联营模式,即假设 P2G 设备、NGGU 及储气装置构成一个三方联营体,且与风电商之间存在租赁关系,风电商需要租用三方联营体处理其投标偏差,三方联营体则收取租赁费用并优先处理风电投标偏差,剩余容量独立参与电力市场投标竞争。

图 1 给出了合作联营模式下的多能源市场交易框架,考虑风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置合作联营,与传统发电商共同参与投标决定日前市场电价。为了弥补风电投标偏差,风电商可以利用储气装置、P2G 设备和 NGGU 处理风电实际出力过剩和不足的情况。同时,考虑 P2G 设备和 NGGU 在电力市场的策略性行为:P2G 设备从日前市场购入电力,通过电转气技术将电力转化成天然气存储在储气装置中或在天然气市场中售出获利;NGGU 则从天然气市场中按气价购入天然气,天然气存储在储气装置中或通过燃气轮机发电在电力市场中投标售出。

图 2 给出了风电商租用 P2G 设备、NGGU 及储气装置参与市场竞争情况下的市场交易框架,考虑 P2G、NGGU 和储气装置组成三方联营体,与风电

商、传统发电商一起参与电力市场投标竞争。风电商与三方联营体签订租用联营合同，风电商的投标偏差需租用 P2G 设备和 NGGU 弥补，其多余出力通过 P2G 转化成气直接卖入天然气市场，不足出力则通过购买天然气租用 NGGU 发电弥补，同时付给三方联营体设备租赁费。三方联营体除了弥补风电投标偏差之外，还可以参与市场套利交易。两个框架中天然气市场的价格均由各天然气商投标竞争决定，且风电商和 P2G 设备、燃气机组的购气和售气也会影响天然气市场的价格和交易量。

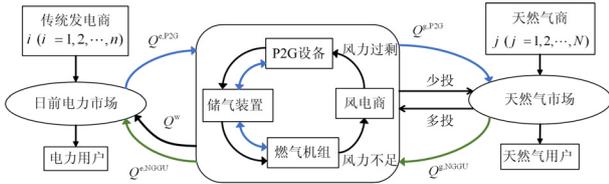


图 1 风电商、P2G、NGGU 和储气装置以合作联营模式参与市场竞争的多能源市场交易框架

Fig. 1 Trading framework of multi-energy markets in which a four-party consortium consisting of WPP, P2G, NGGU and gas storage devices participates in market competition

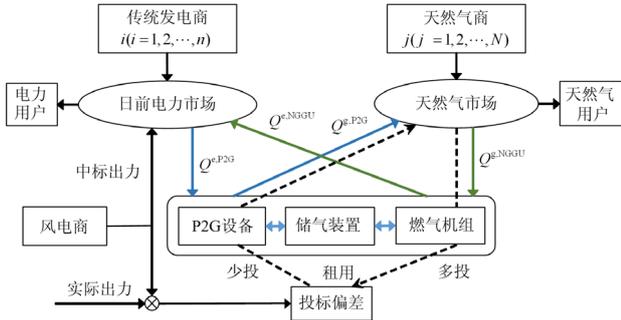


图 2 风电商、P2G、NGGU 及储气装置以租用联营模式参与市场竞争的多能源市场交易框架

Fig. 2 Trading framework of multi-energy markets in which WPP and a tripartite consortium formed by P2G, NGGU and gas storage devices participate in market competition

需要说明的是，本文所提两种联营模式下所有博弈者参与电力市场和天然气市场投标竞争均属于非合作博弈，而合作联营模式下联营体内部各参与者之间为合作博弈，采用 Shapley 值法对合作效益进行分配。

2 多时段联合均衡模型假设

2.1 日前电力市场

考虑某日前电力市场中有 n 个传统发电商和 1 个风电商、P2G 设备、NGGU 及储气装置参与市场

投标竞争，其中考虑风电商与 P2G 设备、NGGU 及储气装置分别以合作联营和租用联营模式参与竞争。

假设所有竞争者均以古诺模式参与投标。古诺模型是寡头产量决策模型，各竞争者的决策变量是产量，而且认为改变自身策略不会影响其他竞争者的策略。古诺模型中所有竞争者面临共同的线性市场需求曲线，设一天分为 T 个时段，第 t 时段的电力市场需求函数 D_t^e 为

$$D_t^e = a_t^e - b_t^e \cdot P_t^e \quad (1)$$

式中， a_t^e 和 b_t^e 为大于零的电力市场需求系数； P_t^e 为第 t 时段电力市场价格。

第 t 时段传统发电商 $i (i=1,2,\dots,n)$ 的发电成本函数 $C_{i,t}^e$ 如式(2)所示。

$$C_{i,t}^e(Q_{i,t}^e) = c_i + a_{i,t} \cdot Q_{i,t}^e + h_{i,t} \cdot (Q_{i,t}^e)^2 \quad (2)$$

式中： $a_{i,t}$ 和 $h_{i,t}$ 为传统发电商 i 大于零的成本系数； c_i 为常数项(不变成本)系数； $Q_{i,t}^e$ 为第 t 时段传统发电商 i 的中标出力。

由于风电出力具有不确定性，风电商在第 t 时段的实际出力 q_t^w 和中标出力 Q_t^w 之间存在投标偏差。当风电商与 P2G 设备、NGGU、储气装置合作构成四方联营体参与市场竞争情况下，风电商可利用 P2G 设备、NGGU 及储气装置处理其投标偏差。假设第 t 时段风电过剩时存储的电力为 Q_t^{in} ，或第 t 时段风电不足时补偿给风电商的电力为 Q_t^{out} ， Q_t^{in} 和 Q_t^{out} 均非负，且至少有一个为零，则第 t 时段风电商的投标偏差 Δ_t 可表示为

$$\Delta_t = q_t^w - Q_t^w + Q_t^{out} - Q_t^{in} \quad (3)$$

$$\Delta_t = \begin{cases} \Delta_t^+, q_t^w + Q_t^{out} - Q_t^{in} \geq Q_t^w \\ -\Delta_t^-, q_t^w + Q_t^{out} - Q_t^{in} \leq Q_t^w \end{cases} \quad (4)$$

式中： Δ_t^+ 为第 t 时段的少投偏差； Δ_t^- 为第 t 时段的多投偏差。

当风电商与由 P2G、NGGU 及储气装置组成的三方联营体以租用联营模式参与市场竞争时，风电商投标偏差 Δ_t 表示为： $\Delta_t = q_t^w - Q_t^w$ 。

此外，NGGU 发电投标、P2G 设备购电投标也会影响电力市场供需，第 t 时段电力市场的供需平衡条件为

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,t}^e + Q_t^w - Q_t^{e,P2G} + Q_t^{e,NGGU} = a_t^e - b_t^e \cdot P_t^e \quad (5)$$

式中： $Q_t^{e,P2G}$ 为第 t 时段 P2G 设备在电力市场的投标购电量； $Q_t^{e,NGGU}$ 为第 t 时段燃气机组在电力市场的投标售电量。

2.2 天然气市场

考虑某天然气市场由 N 个天然气商组成, 假设第 t 时段的市场需求为 D_t^g : $D_t^g = a_t^g - b_t^g \cdot P_t^g$, 其中 a_t^g 和 b_t^g 为天然气市场需求系数。由于风电商在少投或多投情况下, 需要从天然气市场买入或卖出一定量天然气以补偿其投标偏差, 同时, 还需考虑到 P2G 设备和 NGGU 在天然气市场中的套利行为, 即 P2G 设备可利用存储天然气进行售气, NGGU 可从天然气市场购气用于存储或发电。本文假设天然气市场与电力市场同步出清, 并满足每时段天然气市场供需平衡^[14-15], 天然气商 $j(j=1, \dots, N)$ 的出力 $Q_{j,t}^g$ 满足式(6)。

$$\sum_{j=1}^N Q_{j,t}^g + \Delta_t^+ \cdot \eta_{P2G} - \Delta_t^- / \eta_{NGGU} + Q_t^{g,P2G} - Q_t^{g,NGGU} = D_t^g \quad (6)$$

式中: $Q_t^{g,P2G}$ 和 $Q_t^{g,NGGU}$ 分别为第 t 时段天然气市场中 P2G 设备的售气量和燃气机组的购气量; η_{P2G} 和 η_{NGGU} 分别为 P2G 设备和燃气机组的能量转换效率。

假设第 t 时段, 每个天然气商都具有如式(7)的成本函数 $C_{j,t}$ 。

$$C_{j,t}(Q_{j,t}^g) = d_j + a_{2j} Q_{j,t}^g + h_{2j} (Q_{j,t}^g)^2, j=1, \dots, N \quad (7)$$

式中: a_{2j} 和 h_{2j} 为天然气商 j 的成本系数; d_j 为常数项系数。

3 均衡模型建立及求解

本文研究风电商与 P2G 设备、NGGU、储气装置以合作联营模式和租用联营模式参与电力-天然气市场投标竞争, 所建的均衡模型是由日前电力市场博弈问题和天然气市场博弈问题构成的联合博弈均衡模型。为了研究对比这两种联营模式对多能源市场均衡结果产生的影响, 本文对模式 1(合作联营)和模式 2(租用联营), 分别建立相应的博弈均衡模型。另外, 本文聚焦于研究发电商和天然气商在电力市场和天然气市场的策略投标问题, 在均衡模型中没有考虑发电机组的启停运行、电力和天然气的潮流约束以及天然气管道储气能力。

3.1 模式 1 下的博弈均衡模型

根据模型假设, 参与电力市场竞争的传统发电商 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 决策模型可表示为

$$\max_{Q_i^e} \sum_{t=1}^T \Pi_{i,t}^e = \sum_{t=1}^T [P_t^e \cdot Q_{i,t}^e - a_{1i} \cdot Q_{i,t}^e - h_{1i} \cdot (Q_{i,t}^e)^2] \quad (8)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq Q_{i,t}^e \leq Q_i^{e,\max} \quad (9)$$

$$Q_{i,t}^e - Q_{i,t-1}^e - \xi_i^{\text{up}} Q_i^{e,\max} \leq 0 \quad (10)$$

$$Q_{i,t-1}^e - Q_{i,t}^e - \xi_i^{\text{down}} Q_i^{e,\max} \leq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N Q_{i,t}^e + Q_t^w - Q_t^{e,P2G} + Q_t^{e,NGGU} = a_t^e - b_t^e \cdot P_t^e \quad (12)$$

式中: $Q_i^{e,\max}$ 为传统发电商 i 的出力约束上限; ξ_i^{up} 和 ξ_i^{down} 分别为上、下坡约束。式(8)表示传统发电商 i 的利润。式(9)表示传统发电商 i 的出力限制。式(10)、式(11)表示在两个连续时间段内传统发电商 i 的爬坡约束, 参数 ξ_i^{up} 和 ξ_i^{down} 的取值范围为 0~1。式(12)表示电力市场的供需平衡。

考虑到风电出力的不确定性, 本文基于风电场风速历史数据, 首先通过自回归滑动平均模型和 Monte Carlo 方法来模拟风速误差, 采用的风速误差模型为: $\Delta V_t = A \Delta V_{t-1} + Z_t + B Z_{t-1}$, A 和 B 为风速误差参数。将所得风速误差序列与历史风速结合生成某一场景的各时段风速, 不断重复该步骤可得到 N 个 t 时段的风速序列场景。之后利用快速前向消减技术将该 N 个风速场景缩减至 N' 个场景, 最后根据风速-功率曲线将 t 个时段的 N' 个风速场景转化成 N' 个实际风电出力场景, 具体方法参见文献[19]。若需研究太阳能等其他可再生能源发电, 类似方法也适用于模拟其发电出力场景^[20]。

由风电商、P2G 设备、NGGU 及储气装置构成的四方联营体参与日前电力市场投标时, 需要考虑其对天然气市场的影响, 该决策模型可表示为

$$\max_{\substack{Q_t^w \\ t=1, \dots, T}} \sum_{t=1}^T \Pi_t^{\text{ew}} = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & P_t^e (Q_t^w - Q_t^{e,P2G} + Q_t^{e,NGGU}) + \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t} P_{m,t}^g (Q_{m,t}^{g,P2G} - Q_{m,t}^{g,NGGU}) + \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t} P_{m,t}^g (\Delta_{m,t}^+ \cdot \eta_{P2G} - \Delta_{m,t}^- / \eta_{NGGU}) - \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t} (c^{\text{in}} Q_{m,t}^{\text{in,str}} + c^{\text{out}} Q_{m,t}^{\text{out,str}}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq Q_t^w \leq Q_t^{w,\max} \quad (14)$$

$$0 \leq Q_t^{e,P2G} + \Delta_{m,t}^+ + Q_{m,t}^{\text{in,w}} \leq Q^{e,P2G,\max} \quad (15)$$

$$0 \leq Q_t^{e,NGGU} + \Delta_{m,t}^- + Q_{m,t}^{\text{out,w}} \leq Q^{e,NGGU,\max} \quad (16)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{g,P2G} \leq Q^{g,P2G,\max} \quad (17)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{g,NGGU} \leq Q^{g,NGGU,\max} \quad (18)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{in,w}} \leq Q^{\text{in,w},\max} \quad (19)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{out,w}} \leq Q^{\text{out,w},\max} \quad (20)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{in,str}} \leq Q^{\text{in,str},\max} \quad (21)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{out,str}} \leq Q^{\text{out,str},\max} \quad (22)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in,str}} = Q_{m,t}^{\text{in,w}} \cdot \eta_{P2G} + Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}} \quad (23)$$

$$Q_{m,t}^{\text{out,str}} = Q_{m,t}^{\text{out,w}} / \eta_{NGGU} + Q_{m,t}^{\text{out,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} \quad (24)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Q_{m,\tau}^{\text{out,str}} - \sum_{\tau=1}^{t-1} Q_{m,\tau}^{\text{in,str}} \leq 0 \quad (25)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Q_{m,\tau}^{\text{in,str}} - \sum_{\tau=1}^{t-1} Q_{m,\tau}^{\text{out,str}} \leq \bar{s} \quad (26)$$

$$q_{m,t}^w + Q_{m,t}^{\text{out,w}} - Q_{m,t}^{\text{in,w}} - Q_t^w = \Delta_{m,t}^+ - \Delta_{m,t}^- \quad (27)$$

$$Q_t^{\text{e,P2G}} \cdot \eta_{\text{P2G}} = Q_{m,t}^{\text{g,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} - Q_{m,t}^{\text{out,P2G}} \quad (28)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} - Q_t^{\text{e,P2G}} \cdot \eta_{\text{P2G}} \leq 0 \quad (29)$$

$$Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}} = Q_t^{\text{e,NGGU}} / \eta_{\text{NGGU}} + Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}} - Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} \quad (30)$$

$$Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} - Q_t^{\text{e,NGGU}} / \eta_{\text{NGGU}} \leq 0 \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,t}^{\text{e}} + Q_t^w - Q_t^{\text{e,P2G}} + Q_t^{\text{e,NGGU}} = a_t^{\text{e}} - b_t^{\text{e}} \cdot P_t^{\text{e}} \quad (32)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in,P2G}}, Q_{m,t}^{\text{out,P2G}}, Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}}, Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}}, \Delta_{m,t}^+, \Delta_{m,t}^- \geq 0 \quad (33)$$

式(13)为四方联营体的总利润,第一项为四方联营体在日前市场的策略售电和购电总收益;第二项为四方联营体在天然气市场的总收益;第三项即风电商为了处理其投标偏差,出售或购入天然气受到的经济惩罚;最后一项为联营体的储气成本费用。式中: m 为风电出力场景, $s_{m,t}$ 为第 t 时段场景 m

发生概率; $P_{m,t}^{\text{g}}$ 为第 t 时段场景 m 中天然气市场价格。式(14)一式(16)分别为 t 时段电力市场中风电商中标出力约束、P2G设备转换电量约束以及NGGU发电约束。式中: $Q_t^{\text{w,max}}$ 为风电中标出力约束上限, $Q_{m,t}^{\text{in,w}}$ 和 $Q_{m,t}^{\text{out,w}}$ 为风电商与储气装置之间的补偿电量; $Q_{m,t}^{\text{e,P2G,max}}$ 为P2G设备最大转换电量约束上限;

$Q_{m,t}^{\text{e,NGGU,max}}$ 为燃气机组最大出力约束上限。式(17)、式(18)表示 t 时段场景 m 中P2G设备/NGGU的售气/购气量约束不超过其上限 $Q_{m,t}^{\text{g,P2G,max}} / Q_{m,t}^{\text{g,NGGU,max}}$ 。式

(19)、式(20)表示风电商与储气装置之间补偿电量的约束条件, $Q_{m,t}^{\text{in,w,max}}$ 和 $Q_{m,t}^{\text{out,w,max}}$ 为风电商和储气装置之间补偿电量的约束上限。式(21)、式(22)为储气装置的输入、输出约束。式中: $Q_{m,t}^{\text{in,str}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{out,str}}$ 为储气装置的输入、输出气量; $Q_{m,t}^{\text{in,max}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{out,max}}$ 为储气装置进气量、出气量上限。式(23)、式(24)表示储气装置的总输入/输出气量。式中: $Q_{m,t}^{\text{in,P2G}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}}$ 分别为P2G设备、燃气机组存入储气装置的气量;

$Q_{m,t}^{\text{out,P2G}}$ 、 $Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}}$ 分别为储气装置输出给P2G设备、燃气机组的气量。式(25)表示 t 时段内储气装置的总输出气量不超过 $t-1$ 时段内储气装置的总存储气量。式(26)表示储气装置在 t 时段内的总存储气量不能超过装置的有效容量 \bar{s} 。式(27)表示风电商的实际出力、中标出力、储气装置与风电商之间补偿的电力、少投偏差及多投偏差之间的关系。式(28)表示

P2G设备在天然气市场出售的天然气量等于P2G购电转化的天然气减去P2G设备存入储气装置的天然气量,再加上储气装置输出给P2G设备的天然气量。式(29)表示P2G设备在 t 时段存入储气装置的气量不高于其购电转化的气量。式(30)表示NGGU出售电力所消耗的天然气总量等于NGGU购入的天然气减去NGGU存储进储气装置的气量,再加上储气装置提供给NGGU的气量。式(31)表示储气装置提供给NGGU发电的气量不高于NGGU在电力市场售电出力所需的天然气量。式(32)为电力市场出清条件。式(33)保证变量的非负性。

n 个由式(8)一式(12)表示的传统发电商决策问题和1个由式(13)式一式(33)表示的四方联营体决策问题构成了模式1的电力市场博弈均衡模型。

根据天然气市场的模型假设,天然气商 $j(j=1,2,\dots,N)$ 在每个场景 m 中的决策模型如下:

$$\max_{Q_{j,m,t}^{\text{g}}} \sum_{t=1}^T \Pi_{j,m,t}^{\text{g}} = \sum_{t=1}^T \left[P_{m,t}^{\text{g}} \cdot Q_{j,m,t}^{\text{g}} - a_{2j} \cdot Q_{j,m,t}^{\text{g}} - h_{2j} \cdot (Q_{j,m,t}^{\text{g}})^2 \right] \quad (34)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq Q_{j,m,t}^{\text{g}} \leq Q_j^{\text{g,max}} \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^N Q_{j,m,t}^{\text{g}} + \Delta_{m,t}^+ \cdot \eta_{\text{P2G}} - \Delta_{m,t}^- / \eta_{\text{NGGU}} + \quad (36)$$

$$Q_{m,t}^{\text{g,P2G}} - Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}} = a_t^{\text{g}} - b_t^{\text{g}} \cdot P_{m,t}^{\text{g}}$$

式(34)为第 t 时段场景 m 中天然气商 j 的利润。式(35)表示天然气商 j 的出力约束不超过其上限 $Q_j^{\text{g,max}}$ 。式(36)为天然气市场出清条件。

N 个由式(34)一式(36)表示的天然气商决策模型构成了模式1的天然气市场的博弈均衡模型。

从模型中可知日前电力市场和天然气市场之间相互耦合,因此,以上两个市场的均衡模型共同构成了模式1的多时段联合博弈均衡模型。

3.2 模式2下的博弈均衡模型

模式2中传统发电商 $i(i=1,2,\dots,n)$ 的决策模型与模式1中一致。

由于风电商和1个由P2G设备、NGGU、储气装置组成的三方联营体以租用联营模式参与投标竞争,风电商需要租用三方联营体来弥补自身投标偏差,其目标函数则需考虑付给三方联营体的设备服务费。风电商的决策模型可表示为

$$\max_{Q_{i=1,\dots,T}^w} \sum_{t=1}^T \Pi_i^{\text{ew}} = \sum_{t=1}^T \left\{ P_t^{\text{e}} Q_t^w + \sum_{m=1}^{N'} s_{m,t} P_{m,t}^{\text{g}} (\Delta_{m,t}^+ \eta_{\text{P2G}} - \Delta_{m,t}^- / \eta_{\text{NGGU}}) - \sum_{m=1}^{N'} s_{m,t} (\Delta_{m,t}^+ \lambda_{\text{P2G}} + \Delta_{m,t}^- \lambda_{\text{NGGU}}) \right\} \quad (37)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq Q_t^w \leq Q_t^{w,\max} \quad (38)$$

$$Q_{m,t}^w - Q_t^w = \Delta_{m,t}^+ - \Delta_{m,t}^- \quad (39)$$

$$\Delta_{m,t}^+, \Delta_{m,t}^- \geq 0 \quad (40)$$

式中, λ_{P2G} 和 λ_{NGGU} 分别为风电商租用 P2G 设备和燃气机组的价格。

由 P2G 设备、NGGU 和储气装置构成的三方联营体的决策模型为

$$\max_{\substack{Q_t^{\text{e,P2G}}, \\ Q_t^{\text{e,NGGU}}, \\ Q_{m,t}^{\text{g,P2G}}, \\ Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}}, \\ Q_{m,t}^{\text{in, str}}, \\ Q_{m,t}^{\text{out, str}}, \\ t=1, \dots, T, m=1, \dots, N'}} \sum_{t=1}^T \Pi_t^{\text{PNS}} = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & P_t^{\text{e}}(-Q_t^{\text{e,P2G}} + Q_t^{\text{e,NGGU}}) + \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t}(\Delta_{m,t}^+ \lambda_{\text{P2G}} + \Delta_{m,t}^- \lambda_{\text{NGGU}}) + \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t} P_{m,t}^{\text{g}}(Q_{m,t}^{\text{g,P2G}} - Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}}) - \\ & \sum_{m=1}^{N'} S_{m,t}(c^{\text{in}} Q_{m,t}^{\text{in, str}} + c^{\text{out}} Q_{m,t}^{\text{out, str}}) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$0 \leq Q_t^{\text{e,P2G}} + \Delta_{m,t}^+ \leq Q^{\text{P2G,max}} \quad (42)$$

$$0 \leq Q_t^{\text{e,NGGU}} + \Delta_{m,t}^- \leq Q^{\text{NGGU,max}} \quad (43)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{g,P2G}} \leq Q^{\text{g,P2G,max}} \quad (44)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}} \leq Q^{\text{g,NGGU,max}} \quad (45)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{in, str}} \leq Q^{\text{in,max}} \quad (46)$$

$$0 \leq Q_{m,t}^{\text{out, str}} \leq Q^{\text{out,max}} \quad (47)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in, str}} = Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}} \quad (48)$$

$$Q_{m,t}^{\text{out, str}} = Q_{m,t}^{\text{out,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} \quad (49)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Q_{m,\tau}^{\text{out, str}} - \sum_{\tau=1}^{t-1} Q_{m,\tau}^{\text{in, str}} \leq 0 \quad (50)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Q_{m,\tau}^{\text{in, str}} - \sum_{\tau=1}^{t-1} Q_{m,\tau}^{\text{out, str}} \leq \bar{S} \quad (51)$$

$$Q_{m,t}^{\text{g,P2G}} = Q_t^{\text{e,P2G}} \cdot \eta_{\text{P2G}} - Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} + Q_{m,t}^{\text{out,P2G}} \quad (52)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in,P2G}} - Q_t^{\text{e,P2G}} \cdot \eta_{\text{P2G}} \leq 0 \quad (53)$$

$$Q_t^{\text{e,NGGU}} / \eta_{\text{NGGU}} = Q_{m,t}^{\text{g,NGGU}} - Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}} + Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} \quad (54)$$

$$Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} - Q_t^{\text{e,NGGU}} / \eta_{\text{NGGU}} \leq 0 \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{i,t}^{\text{e}} + Q_t^w - Q_t^{\text{e,P2G}} + Q_t^{\text{e,NGGU}} = a_t^{\text{e}} - b_t^{\text{e}} \cdot P_t^{\text{e}} \quad (56)$$

$$Q_{m,t}^{\text{in,P2G}}, Q_{m,t}^{\text{out,P2G}}, Q_{m,t}^{\text{in,NGGU}}, Q_{m,t}^{\text{out,NGGU}} \geq 0 \quad (57)$$

n 个由式(8)一式(12)表示的传统发电商决策问题、式(37)一式(40)表示的风电商决策问题和式(41)一式(57)的三方联营体决策问题, 构成了模式 2 的电力市场博弈均衡模型。

模式 2 中天然气商 j ($j=1,2,\dots,N$) 的决策模型与模式 1 中一致, 式(34)一式(36)构成了其天然气市场的博弈均衡模型。模式 2 的多时段联合均衡模型

则由电力市场和天然气市场的均衡模型共同构成。

3.3 均衡模型的求解方法

本文采用文献[21]中的非线性互补方法对所得多时段联合均衡模型进行求解。具体求解步骤如下。

1) 对每个市场参与者的均衡模型求一阶最优条件(KKT条件)并联立以上所有市场参与者的KKT条件求解。

2) KKT中的非线性互补条件 $a \geq 0, b \geq 0, a \cdot b = 0$

按非线性互补函数 $\varphi(a,b) = a + b - \sqrt{a^2 + b^2}$ 转换成非线性等式方程 $\varphi(a,b) = 0$, 即将Nash均衡模型的求解问题转化为非线性方程组的求解问题。

以日前电力市场的传统发电商 i ($i=1,2,\dots,n$) 决策问题为例, 其KKT条件如下(设 $\beta_{i,t}, \beta_{i,t}^{\text{up}}, \beta_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为式(9)一式(11)的对偶变量):

$$(Q_{i,t}^{\text{e}}, \forall i, t) : \phi \left(Q_{i,t}^{\text{e}}, \begin{aligned} & -P_t^{\text{e}} + a_{i,t} + 2h_{i,t} Q_{i,t}^{\text{e}} + Q_{i,t}^{\text{e}} / b_{i,t} + \beta_{i,t} + \\ & \beta_{i,t}^{\text{up}} - \beta_{i,t+1}^{\text{up}} - \beta_{i,t}^{\text{down}} + \beta_{i,t+1}^{\text{down}} \end{aligned} \right) = 0 \quad (58)$$

$$(\beta_{i,t}, \forall i, t) : \phi(\beta_{i,t}, Q_{i,t}^{\text{e,max}} - Q_{i,t}^{\text{e}}) = 0 \quad (59)$$

$$(\beta_{i,t}^{\text{up}}, \forall i, t) : \phi(\beta_{i,t}^{\text{up}}, Q_{i,t}^{\text{e}} - Q_{i,t}^{\text{e}} + \xi_i^{\text{up}} Q_{i,t}^{\text{e,max}}) = 0 \quad (60)$$

$$(\beta_{i,t}^{\text{down}}, \forall i, t) : \phi(\beta_{i,t}^{\text{down}}, Q_{i,t}^{\text{e}} - Q_{i,t}^{\text{e}} + \xi_i^{\text{down}} Q_{i,t}^{\text{e,max}}) = 0 \quad (61)$$

同理可得出其他市场参与者的 KKT 条件。

3) 利用 Matlab 仿真软件中改进的 Levenberg-Marquardt 算法求取均衡解。

3.4 基于 Shapley 值法的联营体利润分配

在风电商、P2G设备、NGGU及储气装置以合作联营模式组成的四方联营体中, 风电商可利用储气装置, 通过P2G设备和NGGU处理其投标偏差, 减少自身经济惩罚, 增加四方联营体的总收益。如何公平合理地分配联盟收益直接关系到风电商和P2G、NGGU之间合作的达成。本文利用Shapley值法[22]研究合作博弈时联营体中风电商和P2G设备、NGGU的收益分配问题。

设任意非空参与者的集合 $M = \{1,2,\dots,m\}$ 的子集 $S \subseteq M$, 称为联盟。利用 Shapley 值计算参与者 i 在联盟 M 中分配的收益 φ_i , 其计算公式为

$$\varphi_i = \sum_S \frac{(m-|S|)! (|S|-1)!}{m!} [\nu(S) - \nu(S - \{i\})] \quad (62)$$

式中: $|S|$ 为子集 S 中的参与者个数; $\nu(S)$ 为联盟中包含参与者 i 的合作收益; $\nu(S - \{i\})$ 为联盟中除去参与者 i 的合作收益。

4 算例分析

4.1 数据假设

假定某日前批发市场中有 2 个传统发电商(N1、

N2)、1 个风电商 M1、P2G 设备、NGGU 和储气装置, 天然气市场中有 2 个天然气商(G1、G2)。一天分为 T 个时段 ($T=24$), 每个时段的市场线性需求函数为: $D_t = a_t - b_t p_t$, 各时段电力和天然气市场需求参数 a_t^e, a_t^g 如图 3 所示, b_t^e 均取 0.5 MW/美元, b_t^g 均取 1 MW/美元, 常数项系数 c_i, d_j 均取 0。本文为了方便计算, 按照热值转换方式将天然气出力单位折算成统一的功率单位^[23]。表 1 给出了传统发电商和天然气商的相关参数。假设风电商拥有 20 台机组, 每台机组出力满足 $P_i^w = 0.764v_i^3$, 风机的切入、额定、切出风速分别为 3 m/s、14 m/s、20 m/s。以图 3 中西北某地区风速值为参考数据, 采用 Monte Carlo 方法模拟得到 1 000 个 24 h 的风速序列场景, 并通过场景削减法削减至 5 个风速场景。假设 P2G、NGGU 各时段在电力市场交易上限均为 50 MW, 天然气市场交易上限均为 5 MW, 租用价格均为 0.1 美元/MWh。单时段风电商中标出力上限为 100 MW, 储气装置输入、输出上限均为 150 MW。P2G 设备和 NGGU 转换效率均为 70%。

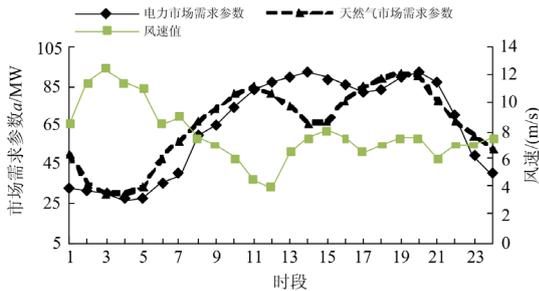


图 3 各时段市场需求函数参数及西北某地区实际风速值
Fig. 3 Market demand parameters and wind speed of 24 h in Northwest China

表 1 发电商和天然气商参数

Table 1 Parameters of generation companies and gas companies

市场参与者		$a/(美元/MWh)$	$b/(美元/MW^2h)$	投标上限/MW	ξ^{up}	ξ^{down}
发电商	N1	10	0.4	100	0.22	0.18
	N2	15	0.2			
天然气商	G1	6	0.2		—	—
	G2	8	0.1	100		

4.2 均衡结果分析

本节对比研究三种联营情况下的多时段联合均衡结果, 其中情况 1 为 3.1 节中的合作联营模式, 情况 2 为 3.2 节中的租用联营模式, 情况 3 考虑风电商与 P2G、NGGU 联营, 主要用于比较有储气装置对结果的影响。情况 1: 2 个传统发电商, 2 个天然气商和 1 个由风电商、P2G、燃气机组及储气

装置构成的四方联营体共同参与投标竞争。情况 2: 2 个传统发电商, 2 个天然气商, 1 个风电商和 1 个由 P2G 设备、燃气机组及储气装置构成的三方联营体共同参与投标竞争。情况 3: 2 个传统发电商, 2 个天然气商和 1 个与 P2G 设备、燃气机组联营的风电商参与投标竞争。

图 4—图 9 和表 2 分别给出了以上三种情况的市场均衡结果对比。图 4 给出了不同情况下四方联营体均衡出力、三方联营体与风电商的均衡出力之和, 以及联营体中 P2G 设备和 NGGU 在电力市场中的交易电量, 交易量为正表示 NGGU 投标售电, 为负表示 P2G 设备购电。从图 4 中可知负荷低谷时期情况 1 中 P2G 设备的购电量高于情况 2, 而负荷高峰时期情况 2 中 NGGU 的投标量高于情况 1。这是由于低谷时期电价较低, 相比于租用联营(情况 2), 合作联营(情况 1)下 P2G 设备将低价购买更多电力转为天然气存储以增大联营体的储气总量, 便于之后高电/气价时有足量天然气供与联营体售电/气。相比于合作联营, 租用联营模式下三方联营体的收益主要来源于 NGGU 的售电收益, 存储天然气大量供与 NGGU 发电以增大其在电力高峰时期的售电投标量, 而合作联营下四方联营体存储的天然气还用于补偿风电商出力以及 P2G 售气, 只少部分供与 NGGU 发电。由图 4 还可以看出, 与无储气装置的情况 3 相比, 情况 1 和情况 2 的风电联营体出力之和在低谷时期均减小而在高峰时期均增大, 且情况 2 的出力曲线普遍高于情况 1。这是由于情况 1 中: 在低谷时期 P2G 设备低价购电且风电商存储多余电力, 导致四方联营体在电力市场的投标量明显减小; 在高峰时期, 联营体则利用部分存储天然气发电以提高其在电力市场的均衡出力。情况 2 中: 在负荷低谷时期, 由于三方联营体在低电价时段购买少量电力, 导致风电与三方联营体在电力市场的投标量之和略低于情况 3, 但高于情况 1; 在负荷高峰时期, 风电商租用 NGGU 完全弥补其不足出力, 且三方联营体将存储天然气大量供与 NGGU 投标发电, 故而情况 2 中风电联营体出力之和明显高于情况 1。

图 5 为传统发电商 N1 的均衡出力。可知与无储气的情况 3 相比, 情况 1 和情况 2 中 N1 在负荷低谷时期均衡出力均增大, 在负荷高峰时期均衡出力均减小。由于情况 1 中四方联营体的出力减小, 与情况 2 相比, 传统发电商 N1 的均衡出力增加, N2 出力变化与 N1 相似。

图 6 给出了不同情况下的电力市场价格。相比于情况 3, 情况 1 和情况 2 的电力市场价格在低谷

时期升高而在高峰时期下降, 表明 P2G、NGGU 及储气设备参与投标能有效缓解日前电力市场价格波动。从图 6 还可知情况 1 的电价曲线高于情况 2, 这是由于四方联营体出力减小, 虽然传统发电商出力增加, 但电力市场总出力减小, 导致电力市场价格上涨。可见风电商与 P2G、NGGU 和储气装置以合作联营模式参与电力市场投标对电价填谷作用明显, 以租用联营模式则对电价削峰作用明显。



图 4 联营体的电能出力和 P2G、NGGU 的电能交易量
Fig. 4 Joint operator's electricity output and P2G, NGGU's trading electricity in electricity market

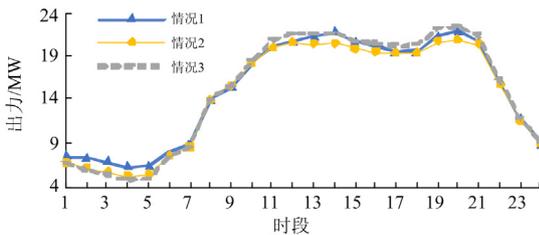


图 5 传统发电商 N1 电能出力
Fig. 5 Generator N1's electricity output

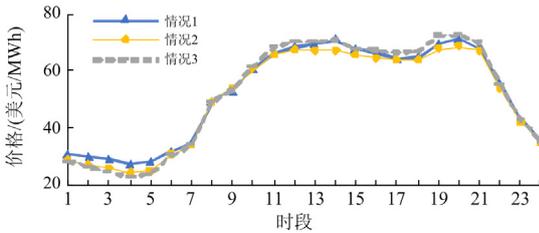


图 6 电力市场价格
Fig. 6 Electricity market price

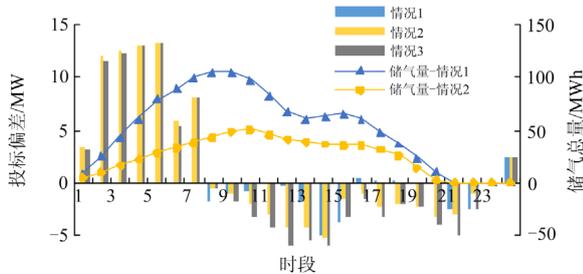


图 7 风电投标偏差和储气装置的存储气量
Fig. 7 WPP's bid deviations and gas storage volume

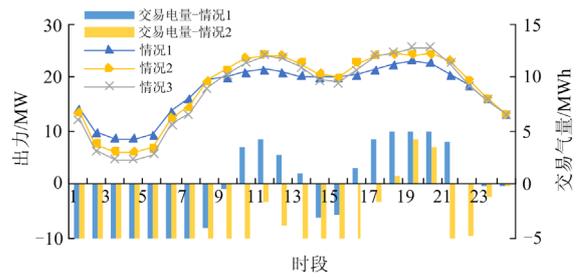


图 8 天然气商 G1 出力和 P2G、NGGU 的购售气量
Fig. 8 G1's gas output and the trading volume of P2G and NGGU in the gas market

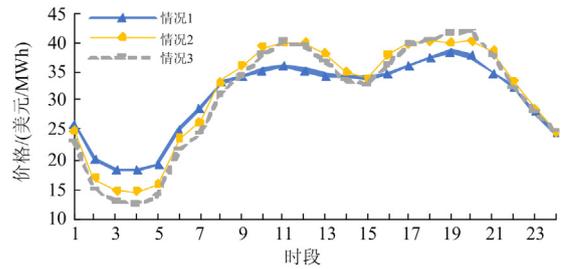


图 9 天然气市场价格
Fig. 9 Gas market price

表 2 各市场参与者的利润
Table 2 Profits of market participants

情况	发电商 N1+N2 利润/美元	风电商 利润/美元	三方联营体 利润/美元	风电商和 联营体总 利润/美元	天然气商 G1+G2 利润/美元
1	30 795.4	7 731.5	1 883.5	9 615.0	19 705.8
2	29 006.4	7 264.3	1 416.2	8 680.5	22 308.3
3	31 495.2	—	—	7 700.6	21 187.1
情况	电力市场 消费者剩 余/美元	天然气市 场消费者 剩余/美元	电力市场社 会福利/美元	天然气市 场社会 福利/美元	整体社会 福利/美元
1	41 135.1	16 587.9	81 545.5	36 293.7	117 839.2
2	42 451.7	15 203.4	80 138.6	37 511.7	117 650.3
3	40 720.7	15 817.8	79 916.5	37 004.9	116 921.4

图 7 为三种情况下风电商通过天然气市场弥补的投标偏差以及储气装置的储气总量曲线, 投标偏差为正表示风电商将多余出力转为天然气卖到天然气市场, 为负表示风电商从天然气市场购气发电弥补出力。可以看出合作联营(情况 1)可大幅度减小风电商需弥补的投标偏差, 情况 1 的储气总量曲线也高于情况 2。这是因为情况 1 中联营体在低谷时期存储风电多余出力以及 P2G 购电, 可灵活支配的储气总量增大, 存储天然气用于高峰时期发电可减小其投标偏差。租用联营(情况 2)中风电商多余出力只是通过租用 P2G 设备转化成天然气直接卖出, 而非

存储在储气装置中, 故而情况 2 的储气总量低于情况 1。且由于 NGGU 在天然气市场的购气行为, 负荷高峰时期天然气市场总出力减小, 风电投标的经济惩罚增大, 故和情况 3 相比, 风电商需弥补的投标偏差减小。

图 8 给出了天然气商 G1 的均衡出力以及联营体在天然气市场中的交易气量, 交易量为正表示联营体售气, 为负表示联营体购气。从图 8 可看出负荷低谷时期情况 1 的四方联营体和情况 2 中的三方联营体均从天然气市场购气, 在负荷高峰时期, 情况 1 中联营体可在天然气市场售气, 情况 2 中联营体则从天然气市场购气发电。这是因为低谷时期气价较低, 联营体均会购入一定量的天然气存储。在高峰时期, 由于情况 1 中四方联营体前期存有足量天然气, 除却部分低气价时段($t = 14 \sim 15$ h)购气套利, 主要利用 P2G 设备售气以改善联营体收益; 情况 2 中由于电价远高于气价, 三方联营体除却部分气价最高时段($t = 18 \sim 20$ h), 将不在天然气市场售气, 且为提高自身利润, NGGU 利用电-气价格差异购买价低的天然气发电继而在电力市场中售出获利。由图 8 还可知, 与情况 3 相比, 情况 1 的天然气商出力在低谷时期增大而在高峰时期减小, 情况 2 的天然气商出力则略高于情况 3。原因是在负荷低谷时期联营体均购气, 故而天然气商的均衡出力均高于情况 3。对比情况 2, 情况 1 中由于风电商将多余电力转化成天然气存储, 不在天然气市场出售, 故为满足市场供需平衡, 天然气商的均衡出力相较情况 2 增大。在负荷高峰时期, 与情况 3 相比, 情况 2 由于三方联营体购气发电, 导致天然气商的出力增大。而情况 1 中四方联营体为弥补风电投标偏差所需购买的天然气量减小, 且当气价较高时可卖气获利, 所以天然气商均衡出力减小。

图 9 给出了不同联营情况下天然气市场价格。与情况 3 相比, 情况 1 的气价在负荷低谷时期上升而在负荷高峰时期下降, 表明合作联营可以缓解气价的波动。这是由于四方联营体在低谷时期购气从而提高气价, 然后在高峰时期卖气从而降低气价。情况 2 中由于风电商需通过天然气市场弥补的投标偏差比情况 1 更大, 且三方联营体只在气价最高时段卖气降低气价, 其他时段均购气从而提高气价, 故而其缓解气价波动的效果不及情况 1。

表 2 给出了不同联营情况下各市场参与者的利润。从表 2 可以看出, 情况 1 和情况 2 与无储气装置的情况 3 相比, 风电商和联营体总利润增大, 而且情况 1 中四方联营体的利润比情况 2 中风电商与三方联营体利润之和更大。这是由于风电商与 P2G、

NGGU 及储气装置组成四方联营体时(情况 1), 有助于消纳风电多余出力并补偿不足出力, 其获得的利润之和比租用联营时(情况 2)更高。若进一步将风电商、P2G 设备、NGGU 及储气装置合作组成的四方联营体的利润利用 Shapley 值法在风电商和 P2G 设备、NGGU 及储气装置构成的三方联营体之间进行分配(分配计算方法参见 3.5 节)并列在表 2 中, 可以看出, 相比合作联营, 租用联营时风电商和三方联营体各自单独的利润更低, 因此风电商和 P2G、NGGU 及储气装置都有动机合作组成联营体参与市场投标竞争。

从表 2 中还可以看出, 情况 1 和情况 2 与无储气装置的情况 3 相比, 传统发电商利润降低, 情况 2 时更低, 说明引入 P2G、NGGU 及储气装置参与市场竞争可以削弱传统发电商的市场力, 而且情况 2 比情况 1 更有利于削弱传统发电商的市场力。同时情况 1 时风电商的利润高于情况 2 时, 因此情况 1 更有助于提高风电商的市场竞争力。

另外, 从表 2 中可看出, 与情况 3 相比, 情况 1 时天然气商利润减小而情况 2 时增大。这是由于合作联营下对气价削峰填谷并平缓天然气商出力, 天然气商利润减小, 而租用联营下增大天然气市场竞争, 气价升高, 天然气商利润增大。此外, 情况 1 和情况 2 与情况 3 相比: 电力市场中消费者剩余均增大, 情况 2 时更高; 天然气市场中消费者剩余在情况 1 时增大而在情况 2 时减小。这说明情况 1 和情况 2 均有利于提高电力市场消费者剩余, 合作联营下(情况 1)可提高天然气市场消费者剩余, 租用联营下(情况 2)则增大天然气商的市场力。同时, 相较情况 3: 情况 1 和情况 2 中电力市场社会福利和整体社会福利均增大, 情况 1 时更高; 天然气市场社会福利在情况 1 时减小而在情况 2 时增大。这表示引入 P2G、NGGU 及储气装置参与市场竞争可以增大联合市场社会福利, 相比租用联营, 合作联营更有利于提高电力市场和整个电-气联合市场的社会福利, 租用联营模式则更有利于提高天然气市场社会福利。

此外, 为了进一步研究租用价格对联营的影响, 图 10 还给出了租用联营模式下风电商和三方联营体利润随租用价格变化曲线, 并与合作联营模式下二者的分配收益进行对比。由图 10 可知, 随着租用价格上涨, 风电商的利润减小, P2G、NGGU 及储气装置的利润增大。这是由于: 租用价格增加, 风电商处理其投标偏差成本过高导致其利润降低; 三方联营体收取的租赁费用增高, 且租用价格过高导致风电投标偏差减小, P2G、NGGU 用于自身套利

的容量增多,使得三方联营体利润增大。从图 10 中还可以看出,风电商利润在合作联营时普遍高于租用联营。当租用价格较低时,三方联营体利润在合作联营时高于租用联营;当租用价格接近 5 美元/MWh 时两种模式的利润曲线相交,则租用价格较高时,三方联营体在租用联营中利润更高,不会再愿意与风电商合作构成四方联营体。由此可知,当租用价格较低时,风电商和 P2G、NGGU 及储气装置都有动机以合作联营模式参与市场投标竞争;当租用价格较高时,风电商和 P2G、NGGU 及储气装置则以租用联营模式参与市场投标竞争。另外,即使租用价格升高,传统发电商在租用联营时价格依旧低于合作联营模式,租用联营仍更有利于削弱传统发电商的市场力,而合作联营则更能提高风电商的市场竞争力和电-气两个市场的总社会福利。

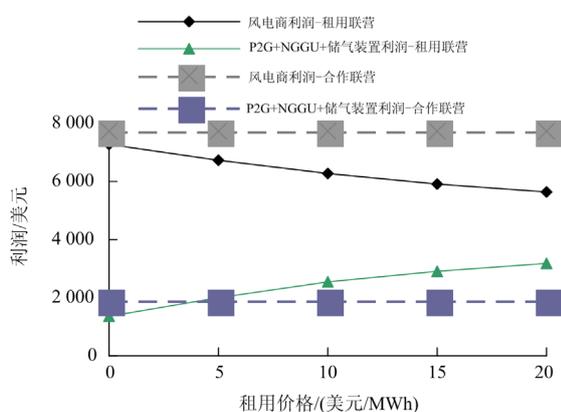


图 10 租用联营模式下风电商和三方联营体利润随租用价格变化曲线

Fig. 10 Variations of profits of WPP and tripartite joint operator with rental price in lease joint operation mode

5 结论

为了弥补风电商在电力市场的投标偏差,本文给出了风电商与 P2G 设备、NGGU 及储气装置以合作联营和租用联营模式参与的电力-天然气多能源市场交易框架,建立了两种不同模式下电力市场和天然气市场的多时段联合随机均衡模型,通过算例研究比较了两种不同模式对电-气市场均衡结果的影响,主要研究结论如下:

1) 本文给出的两种联营模式均可以完全弥补风电商参与电力市场多时段竞争的投标偏差,从而提高风电商的市场竞争力,削弱传统发电商的市场力。同时还有助于缓解电力和天然气市场的价格波动,提高两个市场的社会总福利,促进两个市场的高效平稳运行。

2) 在租用价格较低的情况下,风电商和 P2G、

NGGU 及储气装置以合作联营模式参与市场竞争时,其各自的利润均比租用联营时更高,因此风电商和 P2G、NGGU 及储气装置具有自愿合作组成联营体参与市场投标竞争的动机。而在租用价格较高的情况下,风电商和 P2G、NGGU 及储气装置会选择以租用联营模式各自参与市场投标竞争。

3) 租用联营模式更有利于降低电力市场价格,削弱传统发电商的市场力;而合作联营模式在缓解天然气市场价格波动,提高风电商的市场竞争力和电-气两个市场的总社会福利方面有更好的效果。

参考文献

- [1] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [2] 魏震波, 隋东旭, 王瀚琳, 等. 含双边储备市场及绿证交易的现货市场分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 52-60.
WEI Zhenbo, SUI Dongxu, WANG Hanlin, et al. Spot market analysis including bilateral reserve market and green certificate trading[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 52-60.
- [3] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.
- [4] 程中林, 杨莉, 江全元, 等. 储热消纳弃风的市场竞价策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 31-38.
CHENG Zhonglin, YANG Li, JIANG Quanyuan, et al. Research on bidding algorithm for wind accommodation by thermal storage market[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 31-38.
- [5] 尹琦琳, 秦文萍, 于浩, 等. 计及风电波动性和电动汽车随机性的电力现货市场交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 118-127.
YIN Qilin, QIN Wenping, YU Hao, et al. Transaction model for electricity spot market considering the volatility of wind power and the randomness of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 118-127.
- [6] AN Yuan, ZHAO Zehaoan, WANG Songkai, et al. Coordinative optimization of hydro-photovoltaic-wind-battery complementary power stations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 410-418.
- [7] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.

- FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 92-99.
- [8] TAO Yuechuan, QIU Jing, LAI Shuying, et al. Integrated electricity and hydrogen energy sharing in coupled energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1149-1162.
- [9] ZENG Ziyu, DING Tao, XU Yiting, et al. Reliability evaluation for integrated power-gas systems with power-to-gas and gas storages[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 571-583.
- [10] 马亦耕, 张峰, 丁磊. 弃风参与电网调频的电转气-储气-燃气轮机容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 79-90.
- MA Yigeng, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal capacity configuration of power-to-gas, gas tank and natural gas generation unit with participation of curtailed wind power in frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 79-90.
- [11] ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Fangxing, et al. Coordinated bidding strategy of wind farms and power-to-gas facilities using a cooperative game approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2545-2555.
- [12] 宋艺航, 王秀丽, 匡熠, 等. 含风电和电动汽车的 VPP 现货市场投标鲁棒优化模型[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 120-127.
- SONG Yihang, WANG Xiuli, KUANG Yi, et al. Spot market bidding strategy for virtual power plants with wind power and electric vehicles[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 120-127.
- [13] ASENSIO M, CONTRERAS J. Risk-constrained optimal bidding strategy for pairing of wind and demand response resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 200-208.
- [14] WANG Cheng, WEI Wei, WANG Jianhui, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 290-306.
- [15] CHEN Sheng, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Investment equilibria involving gas-fired power units in electricity and gas markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2736-2747.
- [16] 王晔, 王留晖, 张少华. 风电商与 DR 聚合商联营对电力市场竞争的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 110-116.
- WANG Xian, WANG Lihui, ZHANG Shaohua. Impacts of cooperation between wind power producer and DR aggregator on electricity market equilibrium[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 110-116.
- [17] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-162.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-162.
- [18] 王晔, 张凯, 张少华, 等. 风电参与投标竞争的多能源市场博弈分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 279-285.
- WANG Xian, ZHANG Kai, ZHANG Shaohua, et al. Game analysis of multi-energy markets considering wind power bidding[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 279-285.
- [19] 张文韬, 王秀丽, 吴雄, 等. 大规模风电接入下含大用户直购电的电力系统调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2927-2935.
- ZHANG Wentao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. An analysis model of power system with large-scale wind power and transaction mode of direct power purchase by large consumers involved in system scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2927-2935.
- [20] YUN Yunyun, DONG Haiying, CHEN Zhao, et al. Multi-objective optimization scheduling for new energy power system considering energy storage participation[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(4): 365-372.
- [21] WANG Xian, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [22] 何永秀, 宋栋, 夏天, 等. 基于合作博弈论的常规能源与新能源发电权置换交易模式研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2485-2490.
- HE Yongxiu, SONG Dong, XIA Tian, et al. Mode of generation right trade between renewable energy and conventional energy based on cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2485-2490.
- [23] 李杨, 刘伟佳, 文福拴, 等. 电转气设备与燃气机组的联合竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 9-17.
- LI Yang, LIU Weijia, WEN Fushuan, et al. Combined bidding strategies between power-to-gas facilities and natural gas generating units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 9-17.

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2022-01-11

作者简介:

王 晔(1970—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场均衡分析; E-mail: xianwang@shu.edu.cn

李丰荣(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电参与投标竞争的电力市场和天然气市场联合均衡分析; E-mail: 757948984@qq.com

张少华(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力市场风险管理、博弈分析等。 E-mail: eeshzhang@staff.shu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)