

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190410

新电改背景下大用户直购双边博弈模型

闵子慧, 陈红坤, 林洋佳, 徐冰涵

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 目前, 我国电力市场正积极推进发电商与大用户双边交易。在此背景下, 根据交易过程中各博弈主体所获取的信息情况变化, 在交易初始不完全信息博弈阶段, 基于暗标拍卖理论构建了发电商报价贝叶斯博弈模型, 确定了发电商边际报价增长参数。在后续的多轮博弈中, 考虑到现货市场对大用户直购的影响, 以发电商报价和大用户购电分配作为博弈策略, 构建了以各博弈方收益最大为目标的发电商与大用户主从博弈模型, 并利用粒子群优化算法对模型进行了求解。最后对发电商和大用户的策略行为、大用户直购双边交易的市场影响进行了深入分析。

关键词: 电力市场; 暗标拍卖; 主从博弈; 现货市场; 大用户直购

Bilateral game model of large consumers' direct purchasing under power system reform

MIN Zihui, CHEN Hongkun, LIN Yangjia, XU Binghan

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: At present, the electricity market is actively promoting bilateral transactions between generation companies and large consumers in China. Under this background, according to the change of information acquired by the players in the trading process, this paper constructs a Bayesian game model based on sealed-bid auction theory in the initial stage of incomplete information game, and determines the marginal quotation growth parameters of generation companies. In the subsequent multi-round game, considering the influence of spot market on large power consumer's direct buying, this paper constructs the master-slave game model between generation companies and large consumers from the two decision-making perspectives of the generation companies' quotation and large consumer's purchasing strategy. The aim of the model is to maximize the profit of each player. Based on Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, the model is simulated and calculated. Finally, the strategic behavior of generation companies and large consumers and the market influence of bilateral direct purchase transactions for large consumers are analyzed in depth.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507117).

Key words: electricity market; sealed-bid auction; master-slave game; spot market; large power consumer's direct buying

0 引言

随着电力市场深化改革的进行, 需求侧打破传统的垄断格局, 市场交易主体变得更加多元^[1-3]。电力大用户直接购电作为其中的重要一环, 通过构建大用户与发电企业的直接交易平台, 实现了供需双方的直接互动, 有效降低了大用户用电成本, 使电力资源进一步优化配置, 市场竞争更加充分, 是新电改背景下用户选择权放开的突破口^[4]。

开展大用户直购电的研究对电力市场的发展和完善具有重要意义, 其中, 双边合同交易是大用户直购电的主要交易方式, 也是当前的研究热点。文

献[5-7]研究了新电改背景下我国电力市场现状及相关技术问题, 论证了“现货+中长期”的市场发展路径; 文献[8]以储热和弃风交易市场为背景, 提出一种基于线性供给函数模型的报价决策算法; 文献[9]考虑电源和负荷响应性能, 以系统总运行成本最小化为目标, 构建了有负荷聚合商参与的日前市场出清模型。以上研究只对交易单一主体进行研究, 没有从交易双方的角度同时展开讨论, 博弈论作为研究多个决策主体的利益冲突的理论方法, 可以很好地解决市场各方利益博弈问题^[10-14]。

在双边交易模式下, 文献[15]基于电力市场双边竞价模式, 建立了在完全信息博弈下考虑碳交易的发电商和电力用户策略竞价双层优化模型。文献[16]以直购电价和直购电量作为交易双方博弈策

略, 电价部分构建了考虑误差修正的直购电价与发电成本的关系模型, 直购电量部分则利用相似日法进行了预测。文献[17]构建了完全信息条件下发电商与大用户之间的双边合同交易主从博弈模型, 并对该模型进行了验证分析。文献[18]建立了由电网公司、新增供电实体与用户构成的三方非合作静态博弈模型, 分析了新增供电实体数量对电力市场的影响。文献[19-20]通过建立双层均衡模型来研究储能和风电以不同的方式与传统发电商一起共同参与市场投标竞争时对市场均衡结果的影响。文献[21]通过构建以热电联产机组、电力市场和热力市场为参与者的主从博弈模型, 分析了热电联产机组最优出力 and 最优报价策略问题。以上成果为研究大用户直购最优策略行为问题铺垫了较好的理论基础, 但随着电力市场改革的深入推进, 考虑现货市场以及多主体不完全信息博弈成为进一步深化研究的重点。

在现有的研究成果中, 利用博弈论求解大用户和发电商最优决策时, 研究对象多数为单一大用户和单一发电商, 并且没有考虑现货市场对双边合同交易的影响, 而在实际电力市场交易中, 往往有多个大用户和多个发电商, 发电商可以与多个大用户签订合同, 大用户也可以选择与多个发电商签订合同或从现货市场购买所需电量。此外, 现有研究多数为完全信息博弈下的策略分析, 然而, 在交易初始阶段, 各博弈方不知道其他参与者的利润函数与策略空间, 此时应为不完全信息博弈, 随着合同签订的进行, 发电商多次改变自身报价, 各博弈主体的利益决策空间变为已知, 策略报价才变为完全信息博弈。

因此, 本文根据多个发电商与多个大用户进行双边合同交易时的特点, 在第一轮报价中构建了基于暗标拍卖的发电商最优报价博弈模型, 得到发电商边际报价增长参数, 在之后的多轮博弈中, 构建了考虑在现货市场影响下发电商和大用户主从博弈模型, 其中, 发电商为博弈的领导者, 通过改变自身报价以达到售电收益最大, 大用户为博弈的跟随者, 通过策略性选择与各发电商签订合同或从现货市场直接购买电量, 达到购电成本最小。最后通过粒子群优化算法求解博弈的均衡状态, 并通过算例仿真, 对发电商与大用户的决策行为、现货市场对交易的影响进行了详细分析。

1 发电商与大用户的双边交易博弈模型

本文以发电商与大用户签订双边合同为交易形式, 研究发电商的最优报价及大用户的最优购电策

略。这里需要说明的是, 为了保证模型的普适性和可行性, 本文假设参与交易的主体都不具备足够的市场力以控制电价, 且无默契合谋行为。此外, 假设发电商和大用户都为理性的, 都是以自身利益最大化为策略目标。

在报价的初始阶段, 所有博弈方并不知道市场其余参与者的策略空间与利润函数, 因此, 在第一轮报价中, 各发电商之间为不完全信息博弈。在第一轮报价之后, 各博弈主体的报价及购电信息为已知, 此后的多轮博弈变为完全信息非合作博弈, 直至每个博弈方都认为自己做出了最优策略并不再改变时, 达到博弈均衡点, 交易完成。在博弈过程中, 发电商的博弈策略为报价, 大用户的博弈策略为发电商和现货市场的选择及签订的合同电量。

1.1 基于暗标拍卖的发电商报价博弈模型

在第一轮报价中, 发电商获得的交易数据只有大用户需求电量, 不知道其他竞价者的策略信息, 此时, 最优报价问题为第一价格暗标拍卖, 投标者独立提出报价并以密封的形式递交标书, 出价最高者中标并以其报价进行结算^[22-23]。对发电商来说, 在固定时段内的发电成本是不变的, 决定利润的主要因素为成交电价和销售电量, 下面根据这两个因素对暗标拍卖博弈进行分析。

在第一轮报价中, 发电商 i 对大用户 j 在 t 时段的合同报价为

$$p_{i,j}^t = m_{i,j}^t + n_i q_{i,j}^t \quad (1)$$

式中: $p_{i,j}^t$ 为合同报价; $m_{i,j}^t$ 为基础报价, 取历史基础报价平均值, 在首次进行双边交易的市场中, $m_{i,j}^t$ 由发电商根据自身成本、效益情况进行取值; n_i 为边际报价增长参数; $q_{i,j}^t$ 为 t 时段发电商 i 与大用户 j 签订的合同电量。

当签订的合同电量为 q_0 时, 若发电商 i 的报价比其余发电商的报价低, 则大用户选择与发电商 i 签订合同, 此时发电商 i 的收益为 $p_{i,j}^t q_0$, 反之, 大用户选择不与发电商 i 进行交易, 此时发电商的收益为 0。由于多个发电商之间的博弈较为复杂, 容易造成分析偏差, 为了保证模型的准确性, 简化计算, 此处将市场中除了发电商 i 之外的所有发电商看作一个整体, 记为发电商 i^* 。当发电商提出最优报价时, 获得最大期望收益为

$$w_{i \max} = \max \left[\begin{array}{l} p_{i,j}^t q_0 \Pr ob(p_{i,j}^t < p_{i^*,j}^t) + \\ 0 \times \Pr ob(p_{i,j}^t > p_{i^*,j}^t) \end{array} \right] = \max p_{i,j}^t q_0 \Pr ob(p_{i,j}^t < p_{i^*,j}^t) \quad (2)$$

式中: $\text{Prob}(p_{i,j}^t < p_{i^*,j}^t)$ 为发电商 i 的报价小于发电商 i^* 的概率; $\text{Prob}(p_{i,j}^t > p_{i^*,j}^t)$ 为发电商 i 的报价大于发电商 i^* 的概率。

假设 n_i 服从 $[\underline{N}_i, \bar{N}_i]$ 的均匀分布^[24-25], \bar{N}_i 、 \underline{N}_i 分别为历史边际报价增长参数上下限, 则

$$\text{Prob}(p_{i,j}^t < p_{i^*,j}^t) = \text{Prob}(p_{i,j}^t < m_{i^*,j}^t + n_i q_{i^*,j}^t) = \frac{\bar{N}_i - \frac{p_{i,j}^t - m_{i^*,j}^t}{q_0}}{\bar{N}_i - \underline{N}_i} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 并对该极值问题进行求导:

$$\frac{\partial w_i}{\partial p_{i,j}^t} = \bar{N}_i q_0 + m_{i^*,j}^t - 2p_{i,j}^t \quad (4)$$

则由一阶优化条件可以推出:

$$n_i = \bar{N}_i / 2 \quad (5)$$

在第一轮博弈中, 发电商由基于暗标拍卖的贝叶斯博弈可以得出最优边际报价增长参数, 为后续的多轮博弈提供了报价信息, 也奠定了基本框架, 对最终的交易结果至关重要。

1.2 发电商与大用户的主从博弈模型

在实际交易中, 发电商会有多轮报价, 在进入第二轮报价时, 各参与者的策略空间随着第一轮交易变为已知, 此时, 各发电商之间为不完全信息静态博弈, 发电商与大用户之间为不完全信息动态博弈。在此, 构建发电商与大用户的主从博弈模型, 发电商为主从博弈的领导者, 通过改变售电策略以实现售电收益最大化, 大用户为主从博弈的跟随者, 根据发电商的报价和预测的现货市场电价制定购电策略, 目的为实现购电费用最小。发电商与大用户的博弈信息流动如图 1 所示。

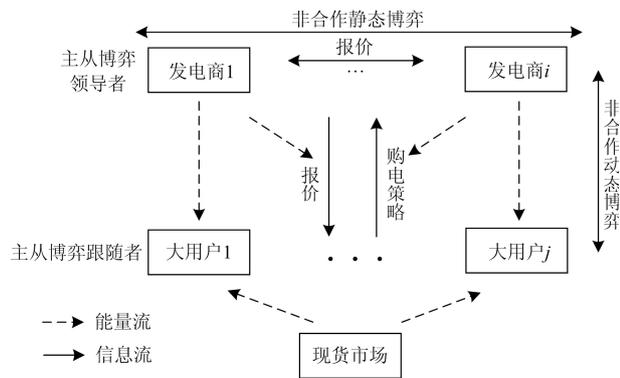


图 1 博弈信息流动

Fig. 1 Game information flow

在图 1 中, 作为领导者的发电商提出报价, 假设在市场交易中一共有 i 个发电商和 j 个大用户, 现货电价为 m_s^t , 此时, 大用户 j 的购电优化模型为

$$\min_t \sum (m_j^t + n^T Q_j^t)^T Q_j^t + m_s^t q_{s,j}^t \quad (6)$$

约束条件为

$$0 < q_{i,j}^t < q_{i,\max}^t \quad (7)$$

$$q_{s,j}^t > 0 \quad (8)$$

$$q_{s,j}^t + \sum_{i=1}^I q_{i,j}^t = Q_j^t \quad (9)$$

式中: $m_j^t = [m_{1,j}^t, m_{2,j}^t, \dots, m_{i,j}^t]$ 为市场中所有的发电商对大用户 j 的报价组合; $n = \text{diag}[n_1, n_2, \dots, n_I]$; $Q_j^t = [q_{1,j}^t, q_{2,j}^t, \dots, q_{i,j}^t]$ 为发电商与大用户 j 签订的合同电量组合; $q_{s,j}^t$ 为大用户 j 在现货市场的购买电量。式(7)表示合同电量约束, $q_{i,\max}^t$ 为可以与发电商 i 签订的最大合同电量。式(9)表示大用户 j 与各发电商签订的合同电量和在现货市场的购买电量总和为自身需求电量, Q_j^t 为大用户 j 在 t 时段的需求电量。

需要说明的一点是, 本文假设现货市场中的电价不受大用户购电策略的影响, 文中现货市场电价是由历史数据的预测得到, 历史数据已经包含了以往交易情况中现货电价受到大用户购电策略因素的影响, 所以假设是合理的。

发电商在得到大用户的购电量反馈后, 重新根据自身收益最大化原则更改报价, 发电商 i 的报价优化模型为

$$\begin{cases} \max_i \sum (m_i^t + n^T Q_i^t)^T Q_i^t \\ \text{s.t.} \quad \underline{M} < m_i^t < \bar{M} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m_i^t = [m_{i,1}^t, m_{i,2}^t, \dots, m_{i,j}^t]$ 为发电商 i 对所有发电商的报价组合; $Q_i^t = [q_{i,1}^t, q_{i,2}^t, \dots, q_{i,j}^t]$ 为发电商 i 与大用户签订的合同电量组合; \bar{M} 、 \underline{M} 分别为报价的上限和下限, 报价限制区间由市场规定, 设定这个区间可以限制交易参与者的市场力, 将报价控制在正常范围。

当博弈达到均衡状态时, 发电商均不再改变报价, 此时各发电商的收益值也固定不变, 均衡条件为发电商利润的变化量为 0, 数学描述为

$$\sum_{i=1}^I |\Delta w_i| = 0 \quad (11)$$

$$\Delta w_i = |w_i(l+1) - w_i(l)| = \left| \frac{m'_{i,j}(l+1)q'_{i,j}(l+1) + n_i q'_{i,j}(l+1)^2 - m'_{i,j}(l)q'_{i,j}(l) + n_i q'_{i,j}(l)^2}{m'_{i,j}(l+1)q'_{i,j}(l+1) + n_i q'_{i,j}(l+1)^2} \right| \quad (12)$$

式中： Δw_i 为发电商*i*收益的变化量； $w_i(l+1)$ 为发电商*i*在第*l+1*次循环时的收益； $w_i(l)$ 为发电商*i*在第*l*次循环时的收益。

1.3 纳什均衡解的存在性

定理 1^[26]，若博弈参与者有*I*个，其策略集为*X*，支付函数为*f(x_i)*，当满足以下条件时，则该博弈纳什均衡解是存在的。

- ①策略集*X*为非空凸集；
- ②集值映射*f: X → R*连续；
- ③*f(x_i)*在集合*X_i*上是拟凹的。

根据本文对博弈模型的描述可知，发电商为博弈的领导者，策略空间为报价，下面根据定理 1 对发电商之间非合作博弈纳什均衡解的存在性进行证明。

对于发电商*i*，其策略集为*X_i=m'_i*=[*m'_i*(1),*m'_i*(2),...,*m'_i*(*T*)]，策略集中每个元素的取值都满足 $\underline{M} < m'_i < \bar{M}$ ，故策略集*X*是凸子集；又因为理性发电商的报价是肯定存在的，故策略集*X*非空；综上，策略集*X*为非空凸集，满足条件 1。

对于条件 2，发电商的支付函数为 $f = (m'_i + n_i q'_i) \times q'_i$ ，其关于报价*m'_i*的连续性是显而易见的，满足条件 2。

对于条件 3，有以下等式存在：

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial m'_i} = q'_i \\ \frac{\partial^2 f}{\partial (m'_i)^2} = 0 \end{cases}$$

发电商支付函数关于策略量的二阶导数为零，则发电商支付函数具有凸函数性质，而凸函数一定是拟凸函数，故*f(x_i)*在集合*X_i*上是拟凹的，满足条件 3。

综上所述，发电商之间非合作博弈模型满足 3 个判定条件，一定存在纳什均衡解。

1.4 交易博弈流程

根据以上分析，发电商与大用户进行双边合同交易时主要有以下几个流程：发电商报价，大用户根据报价提出购电策略，发电商根据大用户的购电策略再次更改报价，如此进行多轮博弈，直至任一发电商和大用户都不再改变自身策略或者达到最大循环次数，若交易电量满足安全校核，交易双方签

订合同。交易流程如图 2 所示。

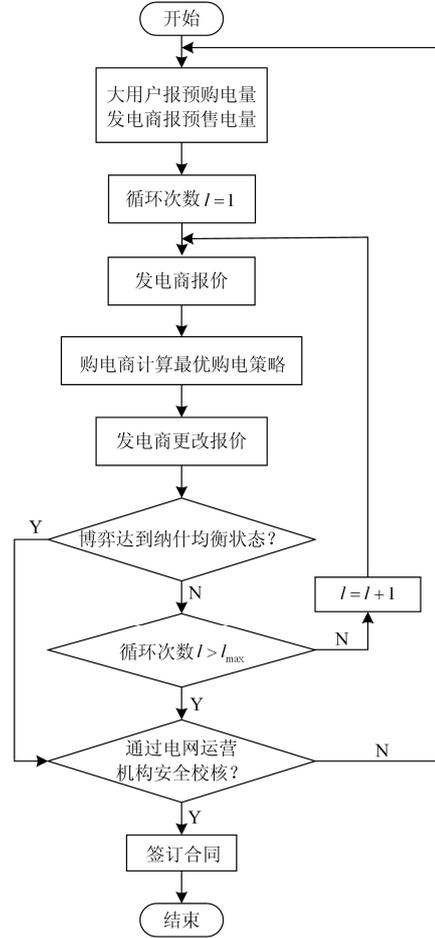


图 2 交易流程

Fig. 2 Transaction flow chart

2 基于粒子群算法的均衡点求解

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO 算法)是一种可用于多次迭代找寻最优解的智能算法^[27-29]。本文将根据发电商与大用户主从博弈的模型特点，利用粒子群优化算法求解博弈模型的均衡解。

在 PSO 算法中，粒子根据优化函数决定的适应度跟踪个体最优解和全局最优解，通过追随这两个最优解来更新自己。在*d*维可行解空间内，第*k*个粒子按式(13)、式(14)更新自身的位置和速度。

$$v_{k,s}(l+1) = wv_{k,s}(l) + c_1 r_1 [p_{k,s} - x_{k,s}(l)] + c_2 r_2 [g_{k,s} - x_{k,s}(l)] \quad (13)$$

$$x_{k,s}(l+1) = x_{k,s}(l) + v_{k,s}(l+1), s = 1, 2, \dots, d \quad (14)$$

式中：*w*为惯性权重；*p_{k,s}*为自身最优解；*g_{k,s}*为全局最优解；*c₁*和*c₂*为正的学习因子；*r₁*和*r₂*为在 0 到 1 之间分布的随机数；*l*为循环次数；*v_{k,s}*为粒子

的速度; $x_{k,s}$ 为粒子的位置。

在本文建立的博弈模型中, 发电商为博弈的主导者, 大用户接受报价并给出最优购电策略, 是一个双层优化模型, 其中, 大用户购电优化模型式(10)是一个关于购电量的二次函数, 且约束条件均为线性函数, 因此可用二次规划求解购电策略, 从而发电商和大用户的主从博弈模型可以转化成为一个单层优化模型。

算法中适应度函数定义为

$$f(m_{i,j}^t) = \sum_{i=1}^I \max \{ |\Delta w_i(m_{i,j}^t)|, 0 \} \quad (15)$$

根据博弈均衡解的条件, 当且仅当报价为均衡解时, $f(m_{i,j}^t) = 0$ 。

算法步骤:

1) 设定 PSO 算法中的粒子数、学习因子、惯性权重等控制参数, 给出初始报价、报价范围和最大迭代次数。

2) 利用二次规划在适应度函数中优化购电量, 得到大用户购电策略。

3) 根据式(15)计算适应度, 得到个体最优解和全局最优解。

4) 根据式(13)、式(14)更新报价并进入下一次的迭代。

5) 当全局最优解的适应度函数为 0 或者达到最大迭代次数时, 循环结束, 得到博弈均衡解。

3 算例分析

在本文所建立的模型中, 交易时段可以为一天、一小时或者一个月。本算例研究一周内发电商与大用户签订双边合同的最优策略。假设在该市场交易中, 存在两家相互竞争的发电商与两家大用户。现货市场固定时段的预测电价及大用户需求电量如表 1 所示。

表 1 现货电价及大用户负荷

Table 1 Spot price and loads for large consumers

时段	现货电价/ (元/MWh)	大用户用电负荷/MWh	
		1	2
1	412	180	130
2	407	171	113
3	423	193	124
4	411	176	118
5	427	184	121
6	423	189	126
7	416	174	116

该市场的报价限制区间为 [360, 420] 元/MWh,

根据式(5)可以得到报价参数 $n_1 = 0.3$, $n_2 = 0.4$ 。根据第 3 节的求解思路, 在 Matlab 环境下基于粒子群优化算法进行编程, 设定 PSO 算法中粒子数为 50, 学习因子 c_1 和 c_2 为 2, 惯性权重为 0.5, 最大迭代次数为 1000。求解博弈均衡解, 并对发电商和大用户的策略行为进行分析。

3.1 发电商报价行为分析

图 3 为博弈均衡时发电商报价结果, 可以发现:

1) 大用户 1 的需求电量多于大用户 2, 发电商对此的决策表现为对大用户 1 的报价会低于对大用户 2 的报价, 这是因为发电商的边际报价随合同电量递增, 当合同电量增多, 发电商会选择降低报价以获得更多的合同电量, 否则, 当发电商的报价高于现货市场电价时, 大用户会选择直接从现货市场购买电量, 此时发电商的收益为 0。

2) 当比较发电商 1 与发电商 2 的报价时, 可以发现在面对大用户 1 和 2 时, 发电商 1 的报价均高于发电商 2 的报价, 这得益于发电商 1 较低的边际报价增长速率, 即使报价较高, 由于签订更多合同时报价增量较低, 仍可以保证自身的合同电量份额。

3) 此外, 还可以发现发电商的合同电价低于现货市场电价。在实际电力市场中, 对于电力大用户而言, 中远期电量合同电价低于现货市场电价, 直购电量是电力大用户降低电力成本的重要举措。对于发电商而言, 直接售电给现货市场的收益会更高, 但实际上, 发电商并不能准确预测现货电价, 并且多种交易方式并存, 可以帮助发电商规避市场风险, 降低发电商对现货市场交易的依赖性。

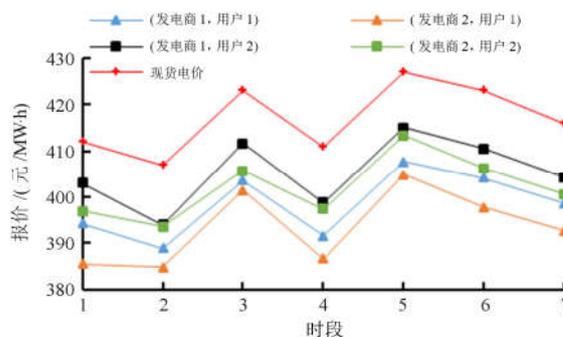


图 3 博弈均衡时的发电商报价

Fig. 3 Bid price of generators under Nash equilibrium

当大用户需求电量一定, $Q = 150$ MWh 时, 发电商报价随现货电价变化如图 4 所示。可以发现, 发电商的报价与现货电价成正相关, 当现货电价较低时, 发电商也会降低报价, 避免报价过高导致大用户直接从现货市场购买, 从而损失合同电量。

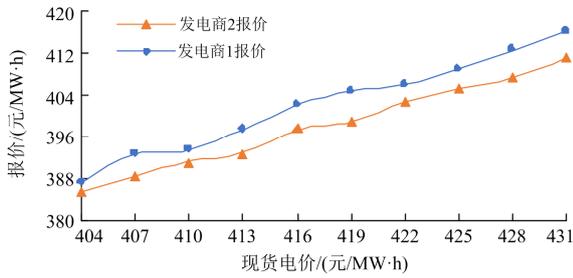


图 4 现货电价改变时的发电商报价

Fig. 4 Bid price of generators under different spot price

3.2 大用户购电策略分析

图 5 为纳什均衡时大用户 1 和大用户 2 的购电策略。可以看出，大用户根据发电商的报价一般会选择在发电商 1、发电商 2、现货市场都购入部分电量。对于购买电量的策略分配，大用户以现货市场电价为基础，当发电商单位合同电价价格低于现货市场时，大用户就会选择签订双边合同来满足用电需求。

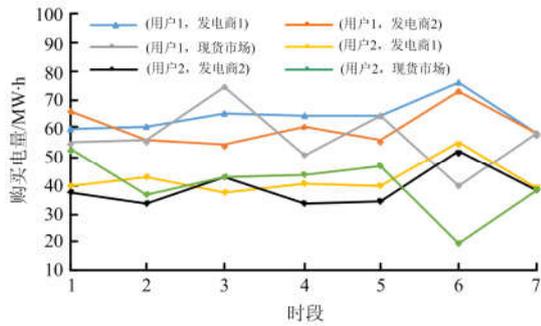


图 5 博弈均衡时的大用户购电策略

Fig. 5 Large consumer's purchasing strategy under Nash equilibrium

当发电商 1 的报价为 393.68 元/MWh，发电商 2 的报价为 391.33 元/MWh，大用户需求电量 $Q=150$ MWh 一定时，大用户的购电策略随现货市场电价变化如图 6 所示。可以发现，随着现货电价增长而发电商报价不变时，考虑签订更多电量带来的报价增量低于从现货市场买电的利润损失，大用户会选择与发电商签订更多合同电量以保证购电费用最小，当大用户所有需求电量全部从与发电商签订双边合同获得，购电费用仍比从现货市场购买小时，大用户可以选择不参与现货市场交易。

大用户在与发电商签订双边合同前后，购电费用的比较如图 7 所示。大用户所有需求电量全部在现货市场购买的费用要高于大用户参与直购电的费用。这说明，大用户参与直购电，有选择性地从发电商和现货市场购买电量可以减少购电成本，并且在在大用户直购双边交易过程中，大用户拥有更多选

择权，可以充分根据自身意愿选择购电策略实现灵活交易，有效降低市场交易风险。所以，开展大用户直购对于发电商、大用户和电力市场都是有益的。

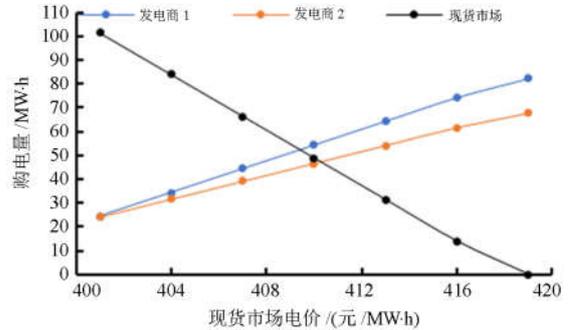
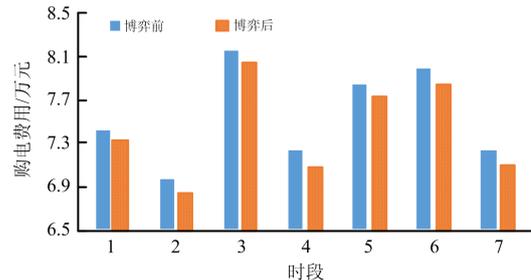
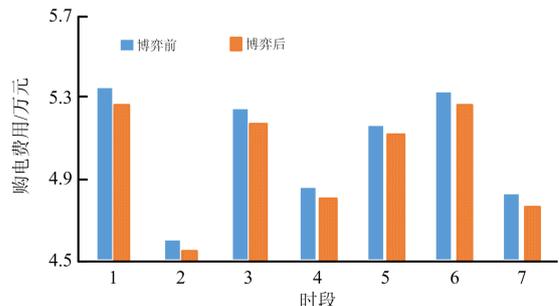


图 6 大用户的购电策略随现货电价变化情况

Fig. 6 Large consumer's purchasing strategy under different spot price



(a) 大用户1交易前后购电成本变化情况



(b) 大用户2交易前后购电成本变化情况

图 7 大用户交易前后购电成本变化情况

Fig. 7 Comparison of cost of purchasing power for large consumers in and out of game

4 结论

发电商与大用户直接进行双边合同交易是实现电力改革的重要环节。本文在交易初始阶段基于暗标拍卖原理构建了发电商报价贝叶斯博弈模型，在后面的多轮博弈中，从发电商报价和大用户购电策略两个决策角度构建了发电商与大用户的主从博弈模型，并基于粒子群优化算法对模型进行了求解，得到如下结论。

1) 在进行大用户直购双边交易时, 发电商可以降低运营风险, 通过自主报价提高收益, 大用户可以减少购电成本, 降低对现货市场依赖性, 电力市场竞争更加充分。

2) 随着博弈的多轮推进, 发电商的报价主要受到现货电价和大用户需求电量的影响, 选择合理报价以确保自身合同电量份额是收益最大化的关键。

3) 大用户的售电成本优化, 主要取决于所购电量在双边合同交易和现货市场的合理分解, 即优化的购电策略为收益决策的关键。

本文所述模型可以为双边合同交易时, 发电商选择最优报价, 大用户选择最优购电组合策略提供有益决策参考。当应用于不同电力市场时, 应根据相关的市场法则进行调整。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发[2015]9号)[Z]. 2015.
- [2] 唐开宇, 刘人境, 刘俊华, 等. 新电改政策对电力市场售电侧竞争格局的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 131-141.
TANG Kaiyu, LIU Renjing, LIU Junhua, et al. Impacts of new electricity reform policy on electricity sale market competition[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 131-141.
- [3] 陈玮, 梁志飞, 张志翔, 等. 欧盟内部电力市场分析及对我国南方区域电力市场建设的启示[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 11-16.
CHEN Wei, LIANG Zhifei, ZHANG Zhixiang, et al. Analysis of European internal electricity market and its enlightenment to china southern region electricity market[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 11-16.
- [4] 林照航, 李华强, 王羽佳, 等. 基于可利用传输能力与保险理论的大用户直购电决策[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1564-1569.
LIN Zhaohang, LI Huaqiang, WANG Jiayu, et al. Research on direct-power-purchasing decision of large consumers based on available transfer capability and insurance theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1564-1569.
- [5] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [6] 葛睿, 陈龙翔, 王轶禹, 等. 中国电力市场建设路径优选及设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 10-15.
GE Rui, CHEN Longxiang, WANG Yiyu, et al. Optimization and design of construction route for electricity market in china[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 10-15.
- [7] 史连军, 邵平, 张显, 等. 新一代电力市场交易平台架构探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 67-76.
SHI Lianjun, SHAO Ping, ZHANG Xian, et al. Discussion on architecture of new-generation electricity trading platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 67-76.
- [8] 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.
- [9] 索瑞鸿, 陈杏, 宋依群, 等. 计及源荷双边性能指标的市场交易模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 173-180.
SUO Ruihong, CHEN Xing, SONG Yiqun, et al. Trading model considering bilateral performance indexes of generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 173-180.
- [10] 刘晓峰, 高丙团, 李扬. 博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2704-2711.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2704-2711.
- [11] 程乐峰, 余涛. 开放电力市场环境下多群体非对称演化博弈的均衡稳定性典型场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5687-5703, 5926.
CHENG Lefeng, YU Tao. Typical scenario analysis of equilibrium stability of multi-group asymmetric evolutionary games in the open and ever-growing electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5687-5703, 5926.
- [12] 刘连光, 潘明明, 田世明, 等. 考虑源网荷多元主体的售电竞争非合作博弈方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1618-1626.
LIU Lianguang, PAN Mingming, TIAN Shiming, et al. A non-cooperative game analysis of a competitive electricity retail considering multiple subjects of source-grid-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1618-1626.
- [13] HAMED K, ASHKAN R, VAHID J. An agent-based system for bilateral contracts of energy[J]. Expert Systems with Applications, 2011(38): 11369-11376.
- [14] 石帮松, 张靖, 李博文, 等. 多类型售电公司共存下竞

价售电的市场均衡研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 62-67.

SHI Bangsong, ZHANG Jing, LI Bowen, et al. Market equilibrium study on multiple types of electric power retailers bidding[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 62-67.

[15] 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, 30(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-EPSC, 2019, 30(10): 66-72.

[16] 蒋玮, 吴杰, 冯伟, 等. 日前电力市场不完全信息条件下的电力供需双边博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 18-27, 75.

JIANG Wei, WU Jie, FENG Wei, et al. Bilateral game model of power supply and demand sides with incomplete information in day-ahead electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 18-27, 75.

[17] 吴诚, 高丙团, 汤奕, 等. 基于主从博弈的发电商与大用户双边合同交易模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 56-62.

WU Cheng, GAO Bingtuan, TANG Yi, et al. Master-slave game based bilateral contract transaction model for generation companies and large consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 56-62.

[18] 张忠会, 赖飞屹, 谢义苗. 基于纳什均衡理论的电力市场三方博弈分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3671-3679.

ZHANG Zhonghui, LAI Feiyi, XIE Yimiao. Analysis of trilateral game in electricity market based on Nash equilibrium theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3671-3679.

[19] 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): 155-164.

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): 155-164.

[20] SHAHMOHAMMADI A, SIOSHANSI R, CONEJO A J, et al. Market equilibria and interactions between strategic generation, wind, and storage[J]. Applied Energy, 2018, 220: 876-892.

[21] 方宇娟, 魏韡, 梅生伟, 等. 考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 682-687.

FANG Yujuan, WEI Wei, WEI Shengwei, et al. Stackelberg game strategy for combined heat power unit considering locational marginal prices[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(5): 682-687.

[22] YUSUKE I. Which equilibrium yields the highest expected revenue in second-price sealed-bid auctions?[J]. Economics Letters, 2018, 167: 97-98.

[23] LIU G, ZHANG J Z, XIE S C. Multiparty sealed-bid auction protocol based on the correlation of four-particle entangled state[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2018, 57(10): 3141-3148.

[24] 陈刚, 王超, 谢松, 等. 基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 75-79.

CHEN Gang, WANG Chao, XIE Song, et al. Study on bargaining of large power consumers direct buying based on game theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 75-79.

[25] 张新华, 叶泽. 基于暗标拍卖理论的最优电力竞价机制分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007(4): 99-106.

ZHANG Xinhua, YE Ze. Analysis on optimal electric power bidding mechanism based on sealed-bid auction[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007(4): 99-106.

[26] 吴诚. 基于博弈论的大用户直购电双边决策研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

WU Cheng. Research on bilateral decision making of large consumers direct power purchasing based on game theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[27] 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 131-132.

[28] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[29] 鲁迪, 王星华, 贺小平. 基于混合粒子群算法和多分位鲁棒极限学习机的短期风速预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 115-122.

LU Di, WANG Xinghua, HE Xiaoping. Hybrid population particle algorithm and multi-quantile robust extreme learning machine based short-term wind speed forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 115-122.

收稿日期: 2019-04-21; 修回日期: 2019-07-11

作者简介:

闵子慧(1996—), 女, 通信作者, 研究生在读, 研究方向为电力市场、新能源. E-mail: 1220255839@qq.com

(编辑 魏小丽)