

DOI: 10.7667/PSPC170695

储热消纳弃风的市场竞价策略算法

程中林¹, 杨莉¹, 江全元¹, 葛延峰²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 在冬季供暖期, 中国东北“以热定电”的供热模式造成大量弃风, 通过储热消纳弃风是提高风电消纳率的一种有效手段。弃风具有随机性且价格弹性小的特点, 储热需求具有大小可控且价格弹性大的特点, 因此储热和弃风的交易市场中, 弃风性质类似一般电力市场中的负荷, 而储热需求类似发电侧。基于对弃风和储热特性的分析, 提出一种基于线性供给函数模型的报价决策算法。该算法充分考虑了弃风随机性和储热需求弹性对市场价格的影响, 以随机变量描述市场参与者的报价策略, 采用场景分类处理模型中的随机变量。采用辽宁省电力公司提供的2013年弃风数据进行算例分析, 验证了所提算法的有效性和实用性。

关键词: 储热; 风电; 报价策略; 电力市场; 场景分类

Research on bidding algorithm for wind accommodation by thermal storage market

CHENG Zhonglin¹, YANG Li¹, JIANG Quanyuan¹, GE Yanfeng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Liaoning Province Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China)

Abstract: In winter heating period, the heating mode of “determining power by heating load” in Northeast China causes tremendous wind curtailment. And wind power accommodation by thermal storage becomes an effective solution. Wind curtailment is random and its price elasticity is small. Thermal storage demand is controllable and its price elasticity is big. Thus in wind accommodation by thermal storage market, curtailment of wind power and load which is in conventional electric power market has similar property and property of thermal storage demand is analogous to conventional electricity generation. After analyzing wind curtailment and thermal storage’s peculiarity, this paper proposes a bidding strategy algorithm which is based on linear supply function model. The algorithm fully considers wind curtailment randomness and thermal storage demand elasticity’s impact on market clearing prices. This method describes bidding strategies by stochastic variable which is handled by scene classification. By using data of Liaoning Province wind curtailment in 2013 for case analysis, this paper has verified effectiveness and practicability of the proposed algorithm.

This work is supported by Key Project of the National Science and Technology Program of China (No. 2015BAA01B02).

Key words: thermal storage; wind power; bidding strategy; electricity market; scene classification

0 引言

近年, 冬季我国“三北”地区为满足居民、工业供暖需求, 热电联产机组一般以“以热定电”模式运行, 系统调峰能力显著降低。在负荷低谷时段, 系统为了保证供热, 不得不大量弃风。

中国风电装机容量不断攀升, 风电消纳问题日益突出^[1]。2016年全国弃风电量约497亿kWh, 弃风率约为17%。2015年辽宁, 风电上网电量129亿kWh,

弃风电量19亿kWh, 其中冬季供暖期弃风占弃风总量的比例超过90%。利用灵活可调节的负荷可以提高风电消纳能力, 其中采用储热消纳弃风已引起各国的关注^[2-6]。文献[4-6]分析了热电厂通过配置电锅炉来解耦“以热定电”的约束, 进而降低强迫出力, 提高风电吸纳率的方案。文献[7]对风电供热的经济性以及风电供热的价格机制进行了研究, 具有一定的实践意义。我国东北尝试用固体相变储热装置消纳弃风, 即电网有大量弃风时, 储热装置利用弃风电存储热量, 用于持续向热用户供热。固体相变储热消纳弃风的方案减排效益明显, 对环境友好,

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目(2015BAA01B02)

但该方案的大规模推广需要解决风电场和储热企业的交易定价问题。

目前风电参与电力市场主要有两种方式: 1) 风电机组主要作为价格的接受者, 不报价, 只是市场出清价格的接受者^[8-9]; 2) 风电机组参与市场决策报价, 把风电机组看作常规机组^[10]。

发电侧的报价策略有基于经验的方法、基于一般性竞争市场理论的方法、基于博弈论的方法等^[11-17]。发电公司的策略行为研究多采用博弈论模型, 根据不同博弈模型主要分为三类: 基于产量竞争的模型、基于价格竞争的模型^[18-19]和供应函数模型^[11-13]。文献[20]研究了采用供应函数模型的电厂最优报价算法, 并给出了基于博弈论和概率论的求解方法。文献[21-22]提出了基于微增响应的猜测供应函数均衡(CSFE)模型, 用于构造电力市场发电公司的竞价行为策略。文献[23]用博弈论构建了交易对手评判模型。文献[24]提出了基于 Q-learning 的发电厂竞价决策算法。文献[25]利用供应函数模型这一博弈论工具分析了电力需求价格弹性对发电市场均衡的影响。文献[26]基于效用函数, 建立了传统发电商、供电商以及具有分布式发电能力用户的博弈模型。

上述发电侧报价的研究大部分基于传统电力市场, 而本文所研究的储热消纳弃风电力市场与传统电力市场有很大区别: 1) 弃风运行成本接近零, 弃风量随机且不可控, 基本无价格弹性; 2) 储热企业需求可控且价格弹性大, 属于在时间轴上可移动的负荷; 3) 传统电力市场的发电出力在一定范围内可调度, 但需求侧弹性小。因此弃风的性质类似传统电力市场中的负荷, 而储热需求类似发电。

本文基于对弃风和储热特性的分析, 提出一种基于线性供给函数模型的竞价决策算法。该算法先根据弃风供给充裕度确定场景并预测该场景下竞争对手的策略和概率, 然后优化风电场和储热企业的竞价策略。算法主要特点是充分考虑了弃风随机性和储热需求弹性对市场价格的影响, 以随机变量描述市场参与者的报价策略, 采用场景分类处理模型中的随机变量。最后, 本文重点分析了预测精度以及储热企业参与报价对市场出清的影响。

1 储热消纳弃风市场报价策略模型

1.1 储热消纳弃风市场概述

储热消纳弃风的电力市场是在常规电力市场之外的一个辅助市场。该市场适用于由于冬季供暖而被迫弃风较多的地区, 例如我国东北地区。该市场参与主体需要储热企业, 储热企业是指依靠消纳弃风电储热, 利用储热向热用户供热的企业。

风电场出力先在常规实时电力市场正常出清, 调度中心根据系统运行情况确定各风电机组计划出力。之后, 风电场随即将未能正常出清电量放入储热消纳弃风市场。该市场是风电场与储热企业的双向交易市场, 风电场和储热企业都参与报价, 报价模型采用线性供给函数模型。

1.2 市场模型

假设储热消纳弃风市场中风电场 M 个, 风电场 i 报价为 B_i , 最大弃风量 \bar{P}_i , 储热企业 N 个, 储热企业 j 报价为 H_j , 最大储热需求 \bar{D}_j , 则双方竞价出清模型为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^N H_j D_j - \sum_{i=1}^M B_i P_i \quad (1) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^M P_i = \sum_{j=1}^N D_j \\ & 0 \leq P_i \leq \bar{P}_i \\ & 0 \leq D_j \leq \bar{D}_j \end{aligned}$$

式中, P_i 和 D_j 分别是风电场和储热企业出清量。

1.3 报价模型

假设风电场 i 的成本和报价分别为

$$C_i = b_i + c_i P_i \quad (2)$$

$$B_i = \alpha_i + \beta_i P_i \quad (3)$$

正常竞价情况下, 风电场报价会高于其成本。

储热企业作为需求方, 其需求具有一定价格弹性, 故需求与价格关系可假设为 $D_j = \bar{D}_j - \lambda_j H_j$ 。把储热企业需求和价格的关系转换一下, 可得储热企业 j 的报价为

$$H_j = (\bar{D}_j - D_j) / \lambda_j \quad (4)$$

式中: C_i 和 B_i 为风电场 i 的运行成本和报价; b_i 和 c_i 为成本系数; α_i 和 β_i 为报价 B_i 的决策变量; λ_j 为储热企业 j 的决策变量。

由式(1)一式(4), 得出市场出清价 p_{mch} 和各参与者出清量 P_i 、 D_j 为

$$p_{\text{mch}} = (D_0 + \sum_{i=1}^M \alpha_i / \beta_i) / (\lambda + \sum_{i=1}^M 1 / \beta_i) \quad (5)$$

$$P_i = p_{\text{mch}} - \alpha_i / \beta_i \quad (6)$$

$$D_j = \bar{D}_j - \lambda_j p_{\text{mch}} \quad (7)$$

式中: $D_0 = \sum_{i=1}^M \bar{D}_j$; $\lambda = \sum_{j=1}^N \lambda_j$; 若 P_i 或者 D_j 超过约束边界时, 则取约束的边界值。

风电场 i 和储热企业 j 的收益分别为

$$U_i = p_{\text{mch}} P_i - C_i P_i \quad (8)$$

$$W_j = (pe_j - p_{mch})D_j \quad (9)$$

式中: pe_j 为储热企业 j 单位电量取得的售热收益, 可用公式 $pe_j = (R_{hj} - C_{hj})\eta_{hj} / Q_{hj}$ 表示, R_{hj} 、 C_{hj} 、 Q_{hj} 分别为储热企业 j 单位面积单位时间供热费用、维护费用、供热量, η_{hj} 为电能转化为热能的效率。

将式(3)一式(7)代入式(8)和式(9), 风电场 i 和储热企业 j 的最优决策问题为

$$\max U_i(S_i, \mathbf{S}_{-i}^*) = \frac{1}{\beta_i^2} (p_{mch} - \alpha_i)(\beta_i - c_i)p_{mch} + \frac{1}{\beta_i^2} (p_{mch} - \alpha_i)(c_i\alpha_i - b_i\beta_i) \quad (10)$$

$$\max W_j(S_j, \mathbf{S}_{-j}^*) = (\bar{D}_j - \lambda_j p_{mch})(pe_j - p_{mch}) \quad (11)$$

式中: S_i 为风电场 i 策略变量; \mathbf{S}_{-i}^* 为对手决策; S_j 为储热企业 j 策略变量; \mathbf{S}_{-j}^* 为对手决策。

2 基于场景分类的简化方法

2.1 等效竞争对手

由式(10)和式(11)可知风电场/储热企业在决策过程中对手策略 \mathbf{S}_{-i}^* 和 \mathbf{S}_{-j}^* 分别包含 $2M+N-2$ 、 $2M+N-1$ 个未知变量。在市场初期或市场参与者众多的情况下, 市场披露信息有限, 因此难以对市场每个厂商的成本和报价进行精确预测, 也就无法直接求解式(10)和式(11)。现采用等效竞争对手的分析方法, 分析预测市场竞争主体整体表现可操作性更强, 因为其需要预测的参数大大减少。

风电场 i 的竞争对手为其他 $M-1$ 个风电场以及 N 个储热企业, 将 $M-1$ 个风电场和 N 个储热企业各自等效为 1 个主体。由此, $M+N$ 者的博弈竞价问题简化为三方博弈问题, 大大减少了需要预估的参数, 策略空间成为 $S = [S_1, S_2, S_3]$ 。储热企业报价策略问题可类似处理, 图 1 为等效竞争对手的示意图。

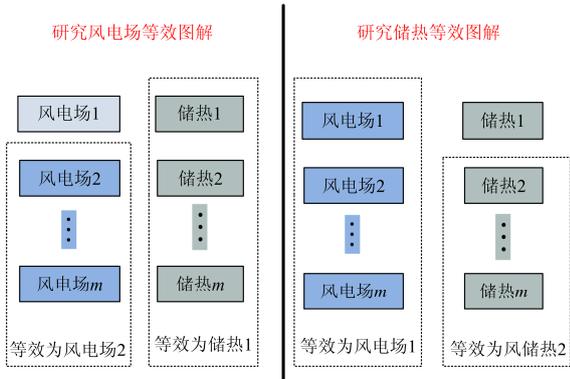


图 1 对手等效方式示意图

Fig. 1 Sketch map of rival equivalent method

2.2 场景分类处理

竞争对手策略的概率难以准确用解析式描述, 本文采用场景归类方法对竞争对手策略的概率进行离散化。根据弃风供给充裕度, 把市场交易情况分为 K 种场景。

考虑到风电的随机性, 在竞价决策时, 预测出现各种不同场景的概率为 $p(k)$ 。假定在第 k 种场景下, 以风电场 1 为例, 假设其两个等效竞争对手分别有 r_1 、 r_2 种策略, 策略集合分别为 $S_2^k = \{S_2^k(i)\}$ 和 $S_3^k = \{S_3^k(j)\}$, 相应概率为 $P_{S_2(i)}^k$ 和 $P_{S_3(j)}^k$, $i=1,2,\dots,r_1$, $j=1,2,\dots,r_2$ 。则其最优策略转化为

$$\max U_1 = (p_{mch}P_1 - C_1(P_1)) = \sum_{k=1}^K (p(k) \sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=1}^{r_2} f_1(\Omega, S_2^k(i), S_3^k(j)) P_{S_2(i)}^k P_{S_3(j)}^k) \quad (12)$$

式中: $f_1(\Omega, S_2(i), S_3(j))$ 为风电场在等效对手决策为 $S_2^k(i)$ 、 $S_3^k(i)$ 时的收益; Ω 为己方待优化策略。

类似地分析储热企业最优决策。以储热企业 1 为例, 等效竞争对手的离散概率分布为 $P_{S_2(i)}^k$ 和 $P_{S_3(j)}^k$, 储热企业的最优报价决策问题(11)转化为如下问题。

$$\max W_1 = (\bar{D}_1 - \lambda_1 p_{mch})(pe_1 - p_{mch}) = \sum_{k=1}^K (p(k) \sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=1}^{r_2} f_2(\Omega, S_2^k(i), S_3^k(j)) P_{S_2(i)}^k P_{S_3(j)}^k) \quad (13)$$

式中: $f_2(\Omega, S_2(i), S_3(j))$ 为储热端在等效对手决策变量确定时的收益; Ω 为己方策略。

2.3 信息空间预测

根据式(5)一式(7)及式(12)和式(13), 考虑竞争对手报价的最优报价策略模型不仅需要预测弃风供给充裕度进行预测, 还需要对等效竞争对手策略集和其对应分布概率进行预测。

2.3.1 弃风供给充裕度预测

供给充裕度决定于弃风量, 弃风量的信息可由市场交易中心汇总或者预测。市场交易中心发布弃风量预测信息, 将有利于引导市场参与者理性报价。事实上, 交易中心难以给出弃风量的准确信息, 只需要给出弃风量一定置信水平下的置信区间即可。

根据预测的弃风功率曲线, 估算在时刻 t 所有储热企业的加权平均储热水平 SOC_h^t , 用式(14)估算。

$$SOC_h^t = SOC_h^0 + \left(\int_0^t (P_{pre}^t - P_h^t) dt \right) / Q_{base} \quad (14)$$

式中: SOC_h^0 为所有储热企业初始加权平均储热水平; P_{pre}^t 为时刻 t 弃风预测功率; P_h^t 为时刻 t 全部储

热企业维持给热用户稳定供热需要消耗的电功率;
 Q_{base} 为所有储热企业容量之和。

最后, 弃风供给充裕度就表现为 SOC'_h 的大小变化, 依据 SOC'_h 的大小变化划分时刻 t 所属场景。

2.3.2 决策变量概率分布预测

在各个场景下都需要对等效竞争对手的策略集和其对应的概率进行预测。上述已经假定场景分为 K 种, 场景 k 需要预测的数据为

$$\begin{aligned}\pi_2 &= (S_2^k(i), P_{S_2(i)}^k) \\ \pi_3 &= (S_3^k(j), P_{S_3(j)}^k)\end{aligned}\quad (15)$$

己方竞争策略 S_1 的优劣, 取决于信息 π_2 和 π_3 预测的准确性。根据历史数据, 每个参与者都可以形成自己的 π_2 和 π_3 , 本文采取如下方法:

1) 收集不同场景的历史数据, 包括出清价格 p_{mch} 、市场总出清量 Q 和预测弃风总量。先根据弃风预测数据, 判断当前市场供给充裕度。根据市场充裕度, 把所有历史数据归类为 K 个场景。

2) 对于风电场的决策变量数值的预测, 本文采用最小二乘法线性拟合求得。先选定场景 k , 然后把场景内的数据按市场总出清量 Q 的大小等分为 r_1 个区间, 对每个区间内的离散样本点进行最小二乘法线性拟合, 区间 i 的决策值可通过求解式(16)优化问题得到。

$$\min \|\alpha_i + \beta_i Q^i - p_{\text{mch}}^i\|_2 \quad (16)$$

式中, Q^i 和 p_{mch}^i 为落在场景 k 区间 i 的样本向量。相应 $S_2^k(i)$ 的对应离散概率为

$$P_{S_2(i)}^k = N_{ki} / N_k \quad (17)$$

式中: N_{ki} 为属于场景 k 分区 i 的样本数; N_k 为属于 $S_2^k(i)$ 于场景 k 的样本数。

3) 对于储热企业决策变量 $S_3^k(j)$ 数值的预测, 因为 $S_3^k(j)$ 是单变量, 故可以直接把样本点代入式(7)求得。先选定场景 k , 代入历史数据求策略值。然后根据 $S_3^k(j)$ 的取值范围把它等分为 r_2 个区间, 保证每个区间都有一定数量的样本点。 $S_3^k(j)$ 数值取落在区域 j 样本点的平均值, 其相应离散概率为

$$P_{S_3(j)}^k = N_{kj} / N_k \quad (18)$$

式中: N_{kj} 为落在区域 j 内的样本数; N_k 为属于场景 k 的样本数。

2.4 场景分类决策流程

基于线性供给函数的场景分类决策算法步骤:

Step1 报价参与者根据当前调度中心给出的风电功率预测确定当前时刻所属场景。

Step2 报价参与者查阅 π_2 和 π_3 的信息, 再根据式(12)和式(13)求解己方的最优报价策略。

Step3 调度中心根据风电场和储热企业提供的报价曲线, 形成合成报价曲线和需求曲线, 用式(1)确定市场出清价格和成交量。

Step4 竞价结束, 报价参与者根据当前的成交数据, 修正 π_2 和 π_3 信息。

以上是单时段单次报价的过程, 图2为决策报价流程图。如果允许单时段多次报价, 只要重复以上流程, 一直到各方收益收敛到一个稳定的平衡点即可。

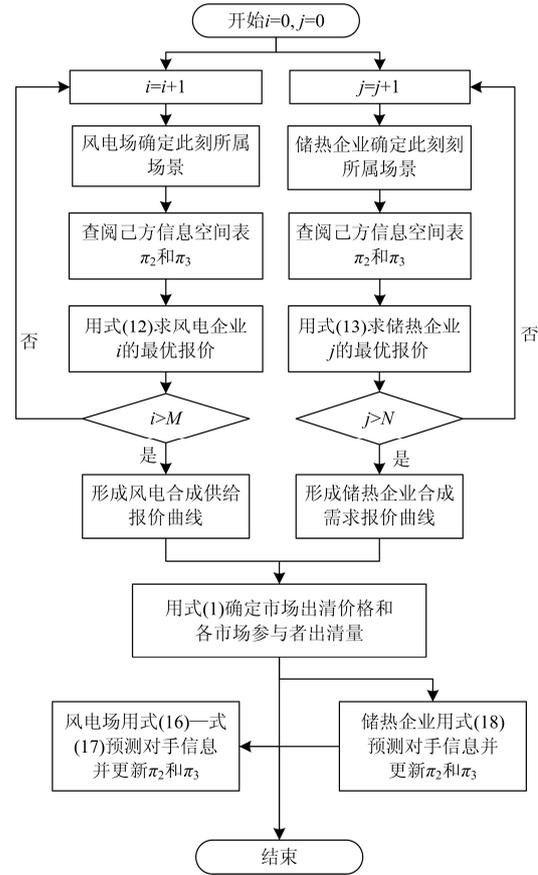


图2 储热消纳弃风的竞价决策流程

Fig. 2 Bidding decision process of wind accommodation by thermal storage market

3 算例分析

3.1 算例说明

本算例假设有10个风电场和5个储热企业参与储热消纳弃风市场。弃风数据来自辽宁省电力公司提供的2013年统计数据, 每个交易时段为15 min。

3.2 等效方法检验

假定市场预测准确且参与方合理竞价, 表1为

该情况下三个风电场和三个储热企业在等效前/后一天(96个时段)的收益情况, 由数据可知等效前后参与者的收益差异较小。该结果说明本文所用等效方法可取得与不等效之前等同的收益, 检验了该方法等效的有效性。

表 1 等效前后收益对比

参与者	等效前/元	等效后/元	差异百分比/%
风电场 1	20 045	19 927	0.59
风电场 2	4 939	4 840	2.05
风电场 3	15 629	15 536	0.60
储热企业 1	38 858	37 777	2.86
储热企业 2	41 350	39 476	4.74
储热企业 3	40 872	40 355	1.28

3.3 预测精度高对市场出清的影响分析

预测数据包括成本、决策变量和弃风功率。在预测精度较高的情况下, 对参与者的报价行为进行多时段模拟, 每个时段进行多次迭代求解, 图 3 和图 4 分别为得到的市场出清量和出清价格。

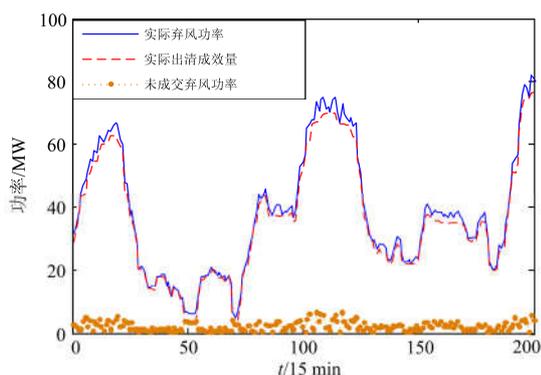


图 3 市场出清结果

Fig. 3 Market clearing results

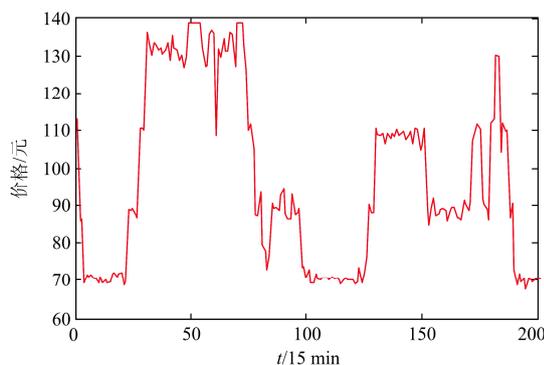


图 4 市场出清价格

Fig. 4 Market clearing price

从图 3 多时段模拟结果看出, 大部分弃风都因

为储热企业的参与而得到消纳, 未成交弃风量只占很少一部分。因此, 在预测精度较高且参与者都理性竞价的情况下, 大部分的弃风量都可以通过竞价上网, 且每个时段市场存在一个均衡点。

对比图 3 和图 4, 可以发现在弃风较多时, 风电场就会报比较低的价格, 保证己方的弃风尽可能多上网。而弃风较多时, 市场出清价格一般较低, 此时储热企业会愿意接受更多的弃风。可见, 储热消纳弃风的市场出清价格随着市场供给充裕度的变化会有较大变化。故本文采用供给函数模型对该种情况进行分析是合理的, 该模型能很好地反映供需变化对市场出清价格的影响。

对比图 3 和图 4, 还可以发现短期内市场出清价格会剧烈变化, 这是风电的随机性造成的。弃风供给会在过剩与短缺中快速切换, 这有别于常规电力市场, 因为常规电力市场供给充裕度不会短时间剧烈波动。面对如此剧烈波动, 本文采用场景分类的方法很好地解决了该种情况下的市场决策问题。该方法充分考虑了供给充裕度对市场价格的影响。而其他基于时间序列预测未来电价的方法就不适合该特殊市场, 因为其没有考虑风电随机性带来的供给充裕度短期剧烈变化的特性。

3.4 预测精度低对市场出清的影响分析

3.4.1 弃风功率预测误差较大

本文研究了假设调度中心给出的弃风功率有较大偏差时, 交易市场会出现的情况。假定调度中心给出的弃风功率 P_{pre} 与实际弃风功率 P_{real} 之差在 $[-0.2P_{real}, 0.2P_{real}]$ 上满足均匀分布, 图 5 为该假定下的市场出清情况。

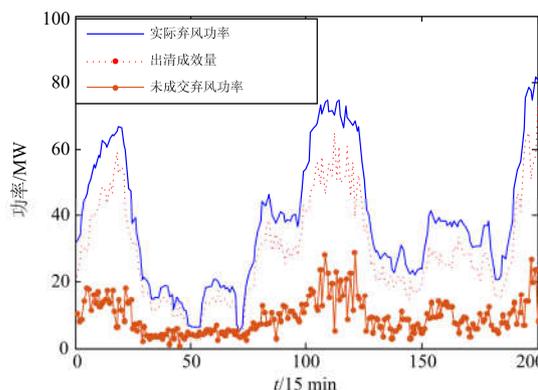


图 5 风电预测偏差下的市场出清量

Fig. 5 Market clearing energy with wind power prediction error

弃风功率预测存在较大误差分为两种情况: 一种是预测功率偏小, 第二种是预测功率偏大。经过分析发现, 第一种情况容易出现较多弃风未能成交

的情况，第二种情况并不一定会出现弃风未成交。但市场预测功率会偏大也会偏小，就整个时段而言，市场会出现较多未成交弃风电量。之所以会有较多弃风未成交是因为调度中心给出的预测风电弃风功率误差较大，会使得市场参与者对当前市场的场景做出错误的判断。场景选择错误会导致选用错误的概率密度，这时市场成交价格会较混乱，未成交弃风量也会增加较多。在风电弃风预测存在较大误差时，市场的竞价行为会偏离资源最优配置较远。为提高清洁能源利用效率，调度决策中心应该给出较准确的风电弃风预测曲线，从而引导市场竞争，实现资源最优配置。

3.4.2 对手决策信息预测误差较大

上述提到对于竞争对手决策信息 π_2 和 π_3 的预测也是影响决策的关键因素。现在以风电场 1 出现较大预测误差为例，对比 π_2 和 π_3 预测误差对决策的影响。对此种情况，本文做了多时段模拟仿真，每个时段进行迭代求解，结果如图 6 所示。从图 6 看出，对竞争对手信息 π_2 和 π_3 的预测准确性直接影响了收益，而且影响较大。

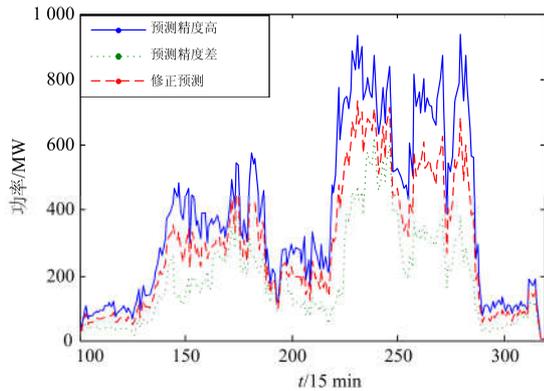


图 6 风电场 1 的收益

Fig. 6 Income of wind farm 1

本文提出一种基于场景分类的市场竞价决策算法。该算法在参与者每次投标完时，会对市场出清数据重新进行分析聚类，不断更新己方的 π_2 和 π_3 信息。参与者采用修正后的 π_2 和 π_3 进行报价决策，其收益明显得到提升，具体收益结果如图 6 所示。故本文所提方法能很好地减少当初始预测信息有误所带来的利益损失。

3.5 储热企业报价对市场的影响

本文设计的弃风消纳市场允许储热企业进行报价，故在此检验储热报价对市场竞价究竟有何影响。考虑一种极端情况，假设弃风消纳市场为单边市场，只有弃风侧报价，储热企业作为市场价格接

受者，不参与报价，只给出需求(需求弹性为 0)。表 2 为三个风电场和三个储热企业在对称市场和不对称市场一天(96 个时段)的收益。

表 2 储热企业报价对市场的影响

Table 2 Influence of thermal storage enterprises' bidding

参与者	对称市场/元	不对称市场/元	差异/%
风电场 1	19 927	37 452	87.94
风电场 2	4 840	11 533	138.28
风电场 3	15 536	38 221	146.02
储热企业 1	37 777	19 219	-49.13
储热企业 2	39 476	15 662	-60.33
储热企业 3	40 355	10 873	-73.06

当储热企业只是市场价格的接受者时，储热企业的市场竞争力就得到削弱，盈利能力也减弱。该种模式下，储热企业进入该市场的意愿也大幅减弱，最终会导致储热企业没有足够的容量去消纳弃风，弃风消纳量也大幅减少。另外，储热需求自身弹性大且大小可控的特性也决定了其参与报价的合理性。

4 结语

储热消纳弃风的市场设计是推广储热消纳弃风的关键。本文采用不确定信息下的博弈均衡决策理念确定储热企业和风电企业在“储热消纳弃风市场”中的竞价策略。在考虑了弃风的随机性以及储热需求弹性较大等特性，本文提出一种基于线性供给函数模型的市场竞价决策算法，在对市场竞争对手进行等效合并的基础上，以随机变量描述市场其他参与者的报价策略，采用场景分类处理模型中的随机变量，提高了模型的实用性和计算效率。

本文采用辽宁省 2013 年弃风数据进行算例分析，得到主要结论如下。

1) 在研究储热消纳弃风的电力市场时，可以采用基于场景分类的方法。该方法能很好地应对风电功率随机波动较大的特性，也能解决原始预测信息存在误差的问题。

2) 储热消纳弃风的电力市场若采用实时竞价模式，则要求调度决策中心给出较准确的弃风功率曲线，否则弃风资源会无法得到很好地消纳。

3) 储热消纳弃风的电力市场，应该允许储热企业进行市场竞价。这能保证储热企业较强的市场竞争力，使其愿意加入弃风消纳市场。另外，储热需求自身特性也决定了其参与市场报价的合理性。

参考文献

[1] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新

- 能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
- ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [2] LUND H, MATHIESEN B V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems—the case of Denmark in years 2030 and 2050[J]. Energy, 2009, 34(5): 524-531.
- [3] 李淑鑫, 刘文颖, 李亚龙, 等. 荷源联合调峰运行方案的电力节能评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 7-14.
- LI Shuxin, LIU Wenyong, LI Yalong, et al. Evaluation of energy-saving on peak load regulation scheme based on source-load coordination[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 7-14.
- [4] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力的分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41.
- LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41.
- [5] 吕泉, 王海霞, 陈天佑, 等. 考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 23-29.
- LÜ Quan, WANG Haixia, CHEN Tianyou, et al. Operation strategies of heat accumulation in combined heat and power plant with uncertain wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 23-29.
- [6] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.
- LÜ Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [7] 王彩霞, 李琼慧, 谢国辉. 电供热价格机制研究及经济性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 156-160.
- WANG Caixia, LI Qionghui, XIE Guohui. Pricing mechanism and economic analysis of heating supply by wind power[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 156-160.
- [8] FABRI A, ROMA X, N T G S, et al. Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1440-1446.
- [9] SINGH S N, ERLICH I. Wind power trading options in competitive electricity market[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, Montreal, Canada: 1-7.
- [10] MORENO M Á, USAOLA J, BUENO M. Assessing the economic benefit of a bidding decision support tool for wind power producers[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(6): 707-716.
- [11] LIU Y F, NI Y, WU F F. Existence, uniqueness, stability of linear supply function equilibrium in electricity markets[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, Denver, USA: 249-254.
- [12] NIU H, BALDICK R, ZHU G D. Supply function equilibrium bidding strategies with fixed forward contracts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1859-1867.
- [13] 张喜铭, 姚建刚, 李立颖, 等. 基于效用分析方法的发电企业最优报价策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 12-16.
- ZHANG Ximing, YAO Jiangan, LI Liying, et al. Utility analysis based optimal bidding strategies for power generating enterprises[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 12-16.
- [14] LIU Y F, WU F F. Generator bidding in oligopolistic electricity markets using optimal control: fundamentals and application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1050-1061.
- [15] LI T, SHAHIDEPOUR M, LI Z Y. Risk-constrained bidding strategy with stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 449-458.
- [16] BAJPAI P, SINGH S N. Fuzzy adaptive particle swarm optimization for bidding strategy in uniform price spot market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2152-2160.
- [17] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [18] 余贻鑫, 陈晓明. 考虑输电约束的古诺均衡求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 68-72.
YU Yixin, CHEN Xiaoming. An algorithm for calculating Cournot equilibrium with transmission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 68-72.
- [19] 张宇波, 罗先觉, 薛钧义. 非完全信息下电力市场中电厂机组出力优化的改进古诺模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 7-12.
ZHANG Yubo, LUO Xianjue, XUE Junyi. Improved Cournot model of generation unit output of generation companies under incomplete information in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 7-12.
- [20] 武智勇, 康重庆, 夏清, 等. 基于博弈论的发电商报价策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 7-11.
WU Zhiyong, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Strategic bidding with application of game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 7-11.
- [21] 宋依群, 倪以信, 侯志俭, 等. 基于猜测供给函数均衡的发电公司策略行为[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 15-18.
SONG Yiqun, NI Yixin, HOU Zhijian, et al. A novel model of gencos strategic behaviors based on conjectured supply function equilibrium[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 15-18.
- [22] 宋依群, 焦连伟, 倪以信, 等. 应用动态学习改进对竞争对手微增响应猜测的发电公司投标策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 23-27.
SONG Yiqun, JIAO Lianwei, NI Yixin, et al. An improvement of generation firms' bidding strategies based on conjectural variation regulation via dynamic learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 23-27.
- [23] 韩正华, 周渝慧, 吴俊勇, 等. 基于博弈论的电力市场双边交易智能体谈判策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 20-26.
HAN Zhenghua, ZHOU Yuhui, WU Junyong, et al. Negotiation strategy based on game theory with agent for bilateral bargaining of power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 20-26.
- [24] 陈皓勇, 杨彦, 张尧, 等. 电力市场智能模拟中代理决策模块的实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 22-26.
CHEN Haoyong, YANG Yan, ZHANG Yao, et al. Realization of decision-making module in agent-based simulation of power markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 22-26.
- [25] 胡军峰, 李春杰, 赵会茹, 等. 基于博弈论的电力需求价格弹性与发电市场均衡关系[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 89-94.
HU Junfeng, LI Chunjie, ZHAO Huiru, et al. The relationship between price elasticity of demand and generation market equilibrium analysis based on game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 89-94.
- [26] 李刚, 刘继春, 魏震波, 等. 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 1-9.
LI Gang, LIU Jichun, WEI Zhenbo, et al. Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 1-9.

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-08-16

作者简介:

程中林(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为大容量储热提高可再生能源接纳能力; E-mail: czl@zju.edu.cn

杨莉(1974—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化调度、分布式发电技术; E-mail: eeyangli@zju.edu.cn

江全元(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统高性能计算、新能源发电与储能技术。E-mail: jqy@zju.edu.cn

(编辑 周金梅)