

DOI: 10.13382/j.jemi.2016.11.011

考虑风电的电力市场发电商竞标博弈模型*

张海峰

(上海工程技术大学 机械工程学院 上海 201620)

摘要:以线性供给函数均衡(linear supply function equilibrium, LSFE)模型为基础,建立了市场出清价格(market clearing price, MCP)机制下考虑风电、机组约束以及系统约束的发电商策略性竞价模型。该市场模型对应完全信息静态博弈问题,是一个典型的两层优化模型。模型下层求解市场出清问题来确定发电商最优出力以及正、负备用容量,上层求解发电商竞价利润最大化问题。模型下层属于凸二次规划问题,根据这一特点设计了粒子群优化算法和序列二次规划相结合的迭代算法来求解纳什均衡点。算例测试表明与按报价支付(pay as bid, PAB)机制相比,在MCP机制下能量市场和备用市场的价格普遍偏低。

关键词: 电力市场;竞标;博弈;均衡;迭代算法;供给函数均衡

中图分类号: TM73; TN-9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054; 510

Bidding gaming model considering wind power for generation companies in electricity market

Zhang Haifeng

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A generation companies' (Genco) bidding model under MCP mechanism based on linear supply function equilibrium model is presented in this paper. The model takes wind power, unit constraints and system constrains into account, and is a typical bi-level program problem, which corresponds to the static game of complete information. In the lower level, a market clearing problem is solved to determine the optimal unit output, positive and negative reserve capacity; while in the upper level, a Genco's bidding problem is solved to obtain the maximal profit. The lower level problem belongs to convex quadratic programming problems, and based on this, a mixed particle swarm optimization and sequential quadratic programming algorithm is proposed to solve the equilibrium problem. The simulation results demonstrate that the prices in energy market and the reserve market under MCP mechanism are much lower than those under PAB mechanism.

Keywords: electricity market; bidding; gaming; equilibrium; iterative algorithm; supply function equilibrium

1 引言

发电商如何制定报价策略来获得最大化利润是其在电力交易中面临的一个重要问题。从数学规划的角度看,发电商的竞标问题是一个典型的两

层优化问题,上层问题求解单个发电商利润最大化;下层考虑市场环境下独立系统运营商(independent system operator, ISO)的市场出清问题。上述观点构成了研究发电商最优竞标策略和多发电商纳什均衡策略的核心框架^[1]。目前,博弈

收稿日期: 2016-07 Received Date: 2016-07

* 基金项目:上海高校青年教师培养计划(ZZgcd14003)、上海市科委地方高校能力建设项目(14110501200)资助

模型如古诺模型^[2]、斯坦伯格模型^[3-4]和供给函数均衡模型^[5-10]已被广泛地应用到发电商竞标策略的求解和市场均衡分析。

文献[2]在考虑机组约束和系统约束的前提下采用古诺模型讨论了现货和期货市场中发电商的策略竞价行为。文献[3]采用斯坦伯格博弈模型,设定发电商为领头者,ISO为跟随者,研究了备用上限价格对市场参与者和市场结果的影响。文献[4]在斯坦伯格博弈模型的基础上提出了微电网电能交易的分布式机制并获得唯一的市场均衡解。研究表明,在考虑机组约束以及系统约束的前提下,供给函数均衡模型更符合电力市场的实际情况。文献[5]采用供给函数均衡(supply function equilibrium, SFE)模型,建立了报价支付机制下考虑能量与备用同时交易的发电商竞标双层优化模型,并将该模型转换为具有均衡约束的数学规划问题(mathematical program with equilibrium constraints, MPEC)进行求解。文献[6]采用供给函数进行报价,提出了求解具有传输约束的时前市场的策略报价双层规划模型,上层求解发电商利润最大化问题,下层求解具有安全约束的经济调度问题。文献[7]采用SFE模型,从需求侧管理角度出发,研究了完全竞争和寡头市场下的均衡模型及求解算法。文献[8]在文献[7]的基础上提出了具有容量约束的用户端供给函数均衡模型,研究了负荷转移问题。文献[9]根据联营模式下电力市场的特点,利用SFE模型来模拟发电商的策略行为,给出了市场均衡解。文献[10]提出了寡头市场环境下求解SFE模型的协同进化算法。

近年来,中国对风电采取全额保障收购的政策,风电作为一种清洁、可再生能源得到了迅猛的发展。随着风电比例的逐渐增大,一方面,风电必然会分担更多的负荷,使得其他发电商在能量市场的交易量下降;另一方面,风电比例的增加也会使得备用的需求量增大,而其他发电商可以通过在备用市场的竞标来获取利润。对于其他发电商,在上述风电全额收购的市场环境下,如何制定其在能量市场和备用市场的最优报价策略显然是应当重视的问题。目前,已有文献已对发电商同时参与能量和备用市场的竞标策略进行了研究^[5,11],但现阶段,对考虑风电并网的发电商竞标策略的研究相对

较少。文献[12]采用随机规划和博弈论,研究了风电与传统发电商的策略报价问题,为本文的研究提供了新的思路。

本文研究了考虑风电的电力市场发电商参与能量和备用市场的竞标博弈模型。首先,采用线性供给函数进行报价,在市场出清价格(market clearing price, MCP)机制下建立了发电商竞标的双层规划模型。上层问题求解发电商同时参与能量市场和备用市场的总利润最大化,下层问题求解含风电的电力市场出清问题。其次,设计了一种迭代算法来寻找市场均衡点。最后通过测试算例研究了有无风电以及不同定价机制对市场均衡的影响。

2 考虑风电的 ISO 出清模型和发电商优化问题

2.1 市场机制

考虑电力库模式下的能量市场和旋转备用市场,ISO购买电能和备用服务。风电不参与竞标,ISO全额收购风电,并根据下一交易时段风电预测出力来组织其他发电商在能量市场和旋转备用联合市场进行竞标,制定发电商的出力和旋转备用容量。为了保证电力系统的安全,旋转备用容量(正、负旋转备用)必须满足整个系统的备用约束^[13]。除风电外,考虑市场中有 I 个发电商提供电能和备用,每个发电商有一台火电机组。设机组 i 的成本函数为:

$$C(p_i) = a_i(p_i)^2 + b_i p_i + c_i \quad (1)$$

式中: a_i 、 b_i 和 c_i 为燃料成本系数, p_i 为机组 i 的出力。假定每个机组以线性供给函数作为其在能量市场的报价曲线,即:

$$\lambda_i^e = k_i^e(2a_i p_i + b_i) \quad (2)$$

式中: λ_i^e 为机组 i 的报价, k_i^e 为报价参数。可以看出, λ_i^e 是机组边际能量成本的 k_i^e 倍。根据统一出清价格的定义,能量市场的统一出清价格 λ_e 为所有中标发电商报价的最大值,即:

$$\lambda_e = \max(\lambda_1^e, \lambda_2^e, \dots, \lambda_I^e) \quad (3)$$

机组 i 提供备用的成本用如下二次曲线表示:

$$C_r(r_i) = a_i^r(r_i)^2 + b_i^r r_i + c_i^r \quad (4)$$

式中: a_i^r 、 b_i^r 和 c_i^r 为备用的成本系数, r_i 为机组 i 的备用容量,可以是正旋转备用 r_i^+ 也可以是负旋转备

用 r_i^d 。假定发电商 i 也采用线性供给函数分别提交正备用和负备用的报价曲线。正备用报价曲线为:

$$\lambda_i^{ru} = k_i^{ru}(2a_i^r r_i^u + b_i^r) \quad (5)$$

式中: λ_i^{ru} 为正备用的报价, 是边际备用成本的 k_i^{ru} 倍; k_i^{ru} 为报价参数; r_i^u 为机组 i 提供的正备用容量。正备用的统一出清价格可定义为

$$\lambda_r^u = \max(\lambda_1^{ru}, \lambda_2^{ru}, \dots, \lambda_l^{ru}) \quad (6)$$

负备用报价曲线为:

$$\lambda_i^{rd} = k_i^{rd}(2a_i^r r_i^d + b_i^r) \quad (7)$$

式中: λ_i^{rd} 为负备用的报价, 是边际备用成本的倍数; k_i^{rd} 为报价参数; r_i^d 为机组 i 提供的负备用容量。负备用的统一出清价格可定义为:

$$\lambda_r^d = \max(\lambda_1^{rd}, \lambda_2^{rd}, \dots, \lambda_l^{rd}) \quad (8)$$

2.2 含风电的市场出清模型

在 MCP 结算机制下, 下层问题可被描述为 ISO 向发电商购买电能和旋转备用的总成本最小化的问题, 在考虑交易时段为 1 h 的情况下目标函数为:

$$\min_{p_i, r_i^u, r_i^d} \sum_i [\lambda_e p_i + \lambda_r^u r_i^u + \lambda_r^d r_i^d] \quad (9)$$

式中: $\lambda_e p_i$ 为 ISO 购买电能支付的成本, $\lambda_r^u r_i^u$ 为 ISO 购买正旋转备用的成本, $\lambda_r^d r_i^d$ 为购买负旋转备用的成本。主要约束条件如下:

1) 能量市场出清条件

发电商出力之和等于负荷需求, 即满足系统功率平衡时, 能量市场出清如下:

$$p_w + \sum_i p_i = D \quad (10)$$

式中: p_w 为 ISO 预测的风电出力, D 为负荷需求。

2) 备用市场出清条件

备用市场中正备用出清条件为发电商提供的正备用容量等于负荷预测误差和风电出力预测误差对正旋转备用的需求, 即:

$$\sum_i r_i^u = D \times L + p_w \times w_u \quad (11)$$

式中: L 为系统的电力需求预测误差对对正旋转备用的需求, 一般设定为电能需求的 5%; w_u 为风电发电量预测误差对正旋转备用的需求。

备用市场的负备用出清条件为发电商提供的负备用等于风电出力预测误差对负旋转备用的需求, 如下所示:

$$\sum_i r_i^d = p_w \times w_d \quad (12)$$

式中: w_d 为风电发电量的预测误差对负旋转备用的需求。

3) 出力和备用容量约束

机组 i 的出力和提供的备用容量之和 (或之差) 必须大于 (小于) 机组 i 的最大出力 (最小出力), 即:

$$p_i + r_i^u \leq p_i^{\max} \quad (13)$$

$$p_i - r_i^d \geq p_i^{\min} \quad (14)$$

式中: p_i^{\max} 和 p_i^{\min} 分别为机组 i 的最大和最小出力。

另外, 备用容量满足以下条件

$$0 \leq r_i^u \leq \Delta_i^u T_{10} \quad (15)$$

$$0 \leq r_i^d \leq \Delta_i^d T_{10} \quad (16)$$

式中: Δ_i^u 为机组 i 的向上爬坡速率, Δ_i^d 为机组 i 的向下爬坡速率, T_{10} 为旋转备用响应时间 10 min。

由上, 得到发电商竞标策略的下层问题, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{p_i, r_i^u, r_i^d} \sum_i [\lambda_e p_i + \lambda_r^u r_i^u + \lambda_r^d r_i^d] \\ \text{s. t.} \\ p_w + \sum_i p_i = D \\ \sum_i r_i^u = D \times L + p_w \times w_u \\ \sum_i r_i^d = p_w \times w_d \\ p_i + r_i^u \leq p_{i, \max} \\ p_i - r_i^d \geq p_{i, \min} \\ 0 \leq r_i^u \leq \Delta_i^u T_{10} \\ 0 \leq r_i^d \leq \Delta_i^d T_{10} \\ \lambda_e = \max(\lambda_1^e, \lambda_2^e, \dots, \lambda_l^e) \\ \lambda_r^u = \max(\lambda_1^{ru}, \lambda_2^{ru}, \dots, \lambda_l^{ru}) \\ \lambda_r^d = \max(\lambda_1^{rd}, \lambda_2^{rd}, \dots, \lambda_l^{rd}) \end{array} \right. \quad (17)$$

结合式(2)、(5)和(7)可以看出, 上述 ISO 出清问题是一个典型的凸二次规划问题, 解的唯一性和存在性可以得到保证。

2.3 发电商优化问题

发电商策略竞标的上层问题是求解其利润 R_i 最大化, 即发电商在能量市场和备用市场的收益减去其发电和提供备用的成本, 即:

$$\begin{cases} \max & R_i \\ & k_i^e, k_i^r, k_i^u, p_i, r_i^u, r_i^d \\ \text{s. t.} & \\ & k_{\min}^e \leq k_i^e \leq k_{\max}^e \\ & k_{\min}^{ru} \leq k_i^{ru} \leq k_{\max}^{ru} \\ & k_{\min}^{rd} \leq k_i^{rd} \leq k_{\max}^{rd} \end{cases} \quad (18)$$

式(17)

R_i 定义如下:

$$R_i = \lambda_e p_i - C(p_i) + \lambda_r^u r_i^u - C_r(r_i^u) + \lambda_r^d r_i^d - C_r(r_i^d) \quad (19)$$

式中:目标函数的决策变量为发电商在能量市场的报价参数 k_i^d 、备用市场里的报价参数 k_i^{ru} 、 k_i^{rd} 以及来自下层问题的 p_i 、 r_i^u 和 r_i^d 。

3 完全信息下的博弈问题

结合上述模型,发电商在能量市场和备用市场的完全信息博弈描述如下: I 个发电商参与博弈过程,各个发电商充分掌握其竞争对手的信息。每个发电商 i 根据自身利润的最大化来选择竞标策略 $\theta_i = \{k_i^e, k_i^{ru}, k_i^{rd}\}$,即报价参数。当发电商没有动机再去变策略时(发电商的利润不再变化),则博弈问题达到了均衡。策略组合 $\theta_i^* = \{\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_I^*\}$ 是一个纳什均衡解,当且仅当对每一个发电商 i 来说, θ_i^* 是给定其他发电商策略 $\theta_{-i}^* = \{\theta_1^*, \dots, \theta_{i-1}^*, \theta_{i+1}^*, \dots, \theta_I^*\}$ 的情况下发电商 i 的最优策略^[5],即:

$$R_i(\theta_i^*, \theta_{-i}^*) \geq R_i(\theta_i, \theta_{-i}^*), \quad \forall \theta_i^* \neq \theta_i, \forall i \quad (20)$$

为了得到上述博弈问题的纳什均衡解,首先要求解第 2 节建立的两层优化问题,该问题是一个复杂非线性、非凸问题,目前求解方法有粒子群优化算法^[1]、MPEC 软件包求解方法^[5]、协同进化算法^[10]、分支定界算法^[14]以及遗传优化算法^[15-16]等多种方法。考虑到粒子群算法具有较强的全局寻优能力^[17-19],且下层问题是一个凸二次规划问题,其最优解可由确定性算法很容易地求得且具有全局性,因此本文采用粒子群优化算法和序列二次规划分别求解上层和下层问题,然后通过迭代来寻找纳什均衡解。每次迭代除当前考虑的发电商外,其余发电商的策略固定为上一次迭代的策略。当所有发电商的利润不再改变时,当前各个发电商的竞

标策略构成了纳什均衡策略。其求解示意图如图 1 所示。

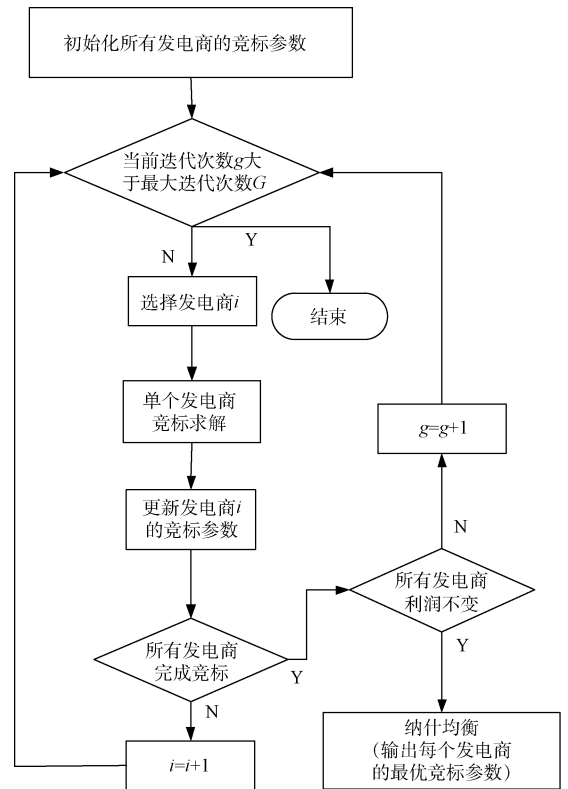


图 1 求解纳什均衡算法

Fig. 1 Algorithm of solving Nash Equilibrium

发电商进行策略竞标,博弈的结果就是得到纳什均衡解。如果上述求解算法收敛,则说明发电商博弈问题的均衡解是存在的。

4 仿真分析

为了验证博弈竞标策略的有效性,本节选取 3 个发电商进行仿真实验。每个发电商拥有一台火电机组,火电机组备用成本及发电参数分别如表 1 和 2 所示。负荷需求为 509.4 MW,风电预测出力为 87.65 MW, L 、 w_u 和 w_d 分别为 0.05、0.3 和 0.3。粒子种群规模选择 20,其最大代数为 200;寻找纳什均衡的最大迭代次数为 50 次。

表 1 备用成本参数

Table 1 Parameters of reserve cost

机组编号	$a_i^r / (\$ \cdot \text{MW}^{-2})$	$b_i^r / (\$ \cdot \text{MW}^{-1})$	$c_i^r / \$$
1	0.2	3	240
2	0.3	3.5	200
3	0.32	4.5	220

表 2 机组参数

Table 2 Unit characteristics

机组编号	1	2	3
p_i^{\min} / MW	0	0	0
p_i^{\max} / MW	400	300	400
$a_i / (\$ \cdot \text{MW}^{-2})$	0.1	0.1	0.15
$b_i / (\$ \cdot \text{MW}^{-1})$	15	10	20
$c_i / \$$	240	200	220
$\Delta_{i,u} / (\text{MW} \cdot \text{h}^{-1})$	200	200	200
$\Delta_{i,d} / (\text{MW} \cdot \text{h}^{-1})$	180	180	180

表 3 MCP 博弈模型下各机组的报价参数

Table 3 Units bidding parameters in MCP

gaming model			
机组编号	报价参数 k_i^d	报价参数 k_i^u	报价参数 k_i^{rd}
1	1.24	1.46	1.19
2	1.23	1.22	1.04
3	1.45	1.58	1.35

1) 有无风电对均衡结果的影响

将本文 MCP 机制下的博弈模型(以下称 MCP 博弈模型)简单变换,即去除或改写与风电相关的目标函数和约束条件,即可得到无风电的发电商博弈模型(以下称无风电博弈模型),值得注意的是,在无风电博弈模型中,没有负备用约束,备用只用来应对负荷的波动。上述两个模型中各发电商在 50 次迭代过程中利润变化的比较如图 2 所示。

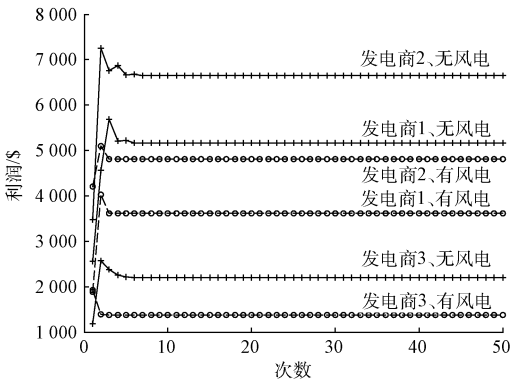


图 2 MCP 博弈模型与无风电博弈模型中各发电商利润变化比较

Fig. 2 Comparison of profit changes between MCP gaming model and gaming model without wind

在无风电博弈模型中,发电商 1、2 和 3 的利润分别为 5 162.34 \$、6 652.22 \$ 和 2 199.08 \$。MCP 博弈模型下,发电商 1、2 和 3 的利润分别为 3 613.09 \$、4 810.16 \$ 和 1 379.50 \$。比较可知,无风电博弈模型下各发电的利润均高于 MCP 博弈模型下各发电商的利润,这是由于风电的加入,分担了负荷需求所致。MCP 博弈模型下各个发电商能量市场、备用市场正备用以及负备用的报价参数如表 3 所示。

将表 3 中的 k_i^d 代入式(2),可得到各个发电商在能量市场的线性供给函数报价曲线,如图 3 所示。发电商 1、2 和 3 的报价分别为 38.86 \$/MW·h、35.70 \$/MW·h 和 44.08 \$/MW·h,所以发电商 3 的报价即为市场出清价格。在无风电博弈模型中,发电商在能量市场的均衡价格为 50.85 \$/MW·h。可以看出,加入风电后,市场均衡价格是下降的。

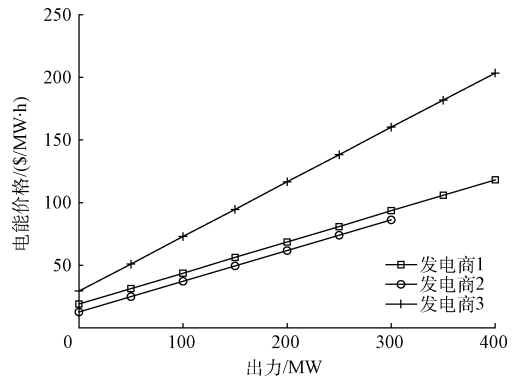


图 3 各发电商在能量市场中的线性供给函数报价曲线

Fig. 3 linear supply function curves of Gencos in energy market

将表 3 中的 k_i^u 代入式(5),可以得到各个发电商在备用市场中正备用的线性供给函数曲线,如图 4 所示。发电商 1、2 和 3 的正备用报价分别为 11.08 \$/MW·h、11.02 \$/MW·h 和 12.42 \$/MW·h,所以发电商 3 的正备用报价即为正备用的市场出清价格。

将表 3 中的 k_i^{rd} 代入式(7),可以得到各个发电商在备用市场中负备用的线性供给函数报价曲线,如图 5 所示。发电商 1、2 和 3 的负备用报价分别为 6.58 \$/MW·h、6.60 \$/MW·h 和 7.82 \$/MW·h,所以发电商 3 的负备用报价即为负备用的市场出清价格。

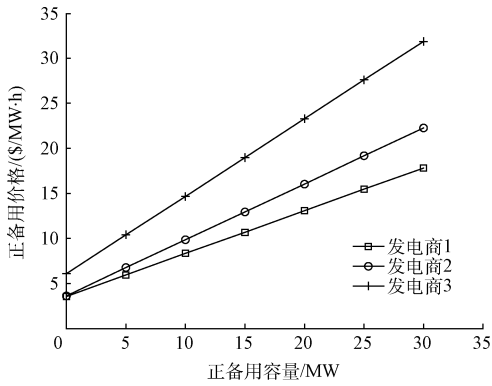


图 4 各发电商正备用线性供给函数报价曲线

Fig. 4 Linear supply curves of positive reserve of Gencos

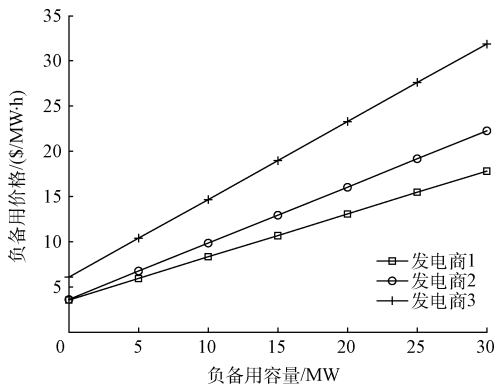


图 5 各发电商负备用线性供给函数报价曲线

Fig. 5 Linear supply curves of negative reserve of Gencos

2) 不同定价机制对均衡结果的影响

在 PAB 结算机制下,ISO 按照报价结算,所以

将本文 MCP 博弈模型中的 MCP 更换为发电商的报价,即可得到 PAB 机制下的发电商博弈模型(以下称 PAB 博弈模型)。上述两种模型中各发电商 50 次迭代过程中利润变化的比较如图 6 所示。

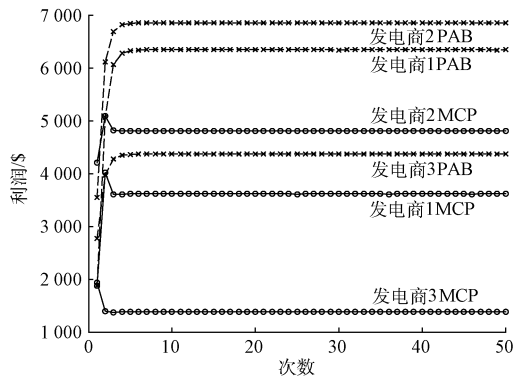


图 6 MCP 博弈模型与 PAB 博弈模型中各发电商利润变化比较

Fig. 6 Comparisons of profit changes between MCP gaming model and PAB gaming model

在 PAB 博弈模型中,发电商 1、2 和 3 的利润分别为 6 345.68 \$、6 853.65 \$ 和 4 369.47 \$。与 MCP 博弈模型比较可知,PAB 博弈模型中各发电商的利润均高于 MCP 博弈模型下各发电商的利润,这是由以报价机制结算决定的,发电商报价越高,所获得的利润也就越多。MCP 博弈模型和 PAB 博弈模型下各发电商的最优出力和备用容量如表 4 所示。

表 4 MCP 博弈模型和 PAB 博弈模型下机组的最优出力及备用容量

Table 4 Optimal output and reserve capacity in MCP gaming model and PAB gaming model

机组编号	MCP 博弈模型			PAB 博弈模型		
	出力/MW	正备用/MW	负备用/MW	出力/MW	正备用/MW	负备用/MW
1	162.80	22.87	12.64	145.28	19.68	10.38
2	190.05	18.32	9.57	162.96	16.86	8.53
3	68.90	10.57	4.08	113.50	15.23	7.38

在 PAB 博弈模型中,各发电商在能量市场、备用市场中正备用以及负备用的报价参数如表 5 所示。

从表 3~5 可以得到,PAB 博弈模型中发电商 1、2 和 3 在能量市场中的报价分别为 63.79 \$/MW·h、

58.76 \$/MW·h 和 65.19 \$/MW·h,高于 MCP 博弈模型下各发电商的报价;正备用的报价分别为 17.14 \$/MW·h、16.89 \$/MW·h 和 17.68 \$/MW·h,高于 MCP 博弈模型下各发电商正备用的报价;负备用的报价分别是 10.85 \$/MW·h、10.74 \$/MW·h 和

表 5 PAB 机制下的博弈模型中各机组的报价参数

Table 5 Units bidding parameters in PAB gaming model

机组编号	报价参数 k_i^d	报价参数 k_i^u	报价参数 k_i^d
1	2.16	2.47	2.13
2	2.23	1.97	1.77
3	1.76	1.89	1.66

11.37 \$/MW·h, 高于 MCP 博弈模型下各发电商负备用的报价。另外, 在 PAB 博弈模型中, 发电商的报价参数是明显高于 MCP 博弈模型的报价, 这也合理解释了 PAB 博弈模型下各发电商的利润高于 MCP 博弈模型下各发电商的利润。

5 结 论

本文基于供给函数均衡模型, 研究了考虑风电的电力市场发电商的策略竞标模型, 得到以下结论。

1) 风电的加入导致其他发电商的利润减少, 但其他发电商通过在备用市场中正、负备用的竞价来增加其利润。

2) 在 MCP 定价机制下, 发电商的报价参数普遍低于 PAB 定价机制下的报价参数, 即 MCP 定价机制下能量市场和备用市场的价格普遍低于 PAB 定价机制下的市场价格。

参考文献

- [1] 马豫超, 候志俭, 蒋传文. 基于粒子群算法求解电力市场发电商最优供给函数模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 45-50.
MA Y CH, HOU ZH J, JIANG CH W. PSO algorithm based optimal supply function model for power producer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 45-50.
- [2] WU J, GUAN X. Risk-averse strategic gaming in forward and spot electricity markets [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(5): 453-462.
- [3] ZHAO J Y, BRERETON B, MONTALVO M. Gaming-based reserve constraint penalty factor analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 616-626.
- [4] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis [J]. IEEE Transactions on

Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3524-3533.

- [5] HAGHIGHAT H, SEIFI H, KIAN A R. Gaming analysis in joint energy and spinning reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2074-2085.
- [6] TAHERI I, RASHIDINEJAD M, BADRI A, et al. Analytical approach in computing nash equilibrium for oligopolistic competition of transmission-constrained GENCOs [J]. IEEE System Journal, 2015, 9(4): 1452-1462.
- [7] LI N, CHEN LJ, DAHLEH A. Demand response using linear supply function bidding [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1827-1838.
- [8] XU Y J, LI N, LOW S H. Demand response with capacity constrained supply function bidding [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1377-1394.
- [9] 胡福年, 吴军基, 邹云. 上网竞价策略的供给函数均衡分析[J]. 继电器, 2006, 34(16): 68-72.
HU F N, WU J J, ZOU Y. Analysis of bidding strategies of suppliers based on supply function equilibrium [J]. Relay, 2006, 34(16): 68-72.
- [10] CHEN H, WONG K P, CHUNG C Y, et al. A coevolutionary approach to analyzing supply function equilibrium model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1019-1028.
- [11] COUCHMAN P, KOUVARITAKIS B, CANNON M, et al. Gaming strategy for electric power with random demand [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1283-1292.
- [12] DAI T, QIAO W. Trading wind power in a competitive electricity market using stochastic programming and game theory [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 805-815.
- [13] 张海峰, 高峰, 吴江, 等. 含风电的电力系统动态经济调度模型 [J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.
ZHANG H F, GAO F, WU J, et al. A dynamic economic dispatch model for power grid containing wind power generation system [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1298-1303.
- [14] 杨建林, 严正. 求解计及输电约束的线性供给函数均衡模型的分支定界方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 94-100.
YANG J L, YAN ZH. Branch and bound approach to the solution of the linear supply function equilibrium model in presence of network constraints [J].

- Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 94-100.
- [15] 杨越, 阮雅瑞, 陈启美. 基于优化遗传算法的负载均衡策略研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 26-29.
YANG Y, RUAN Y D, CHEN Q M. Load balancing strategy based on improved genetic algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6): 26-29.
- [16] 祝加雄. 基于遗传算法的下降阶段飞机油耗分析与研究[J]. 中国测试, 2015, 41(7): 124-128.
ZHU J X. The research and analysis of fuel consumption based on genetic algorithm in aircraft decline phase[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(7): 124-128.
- [17] 王泰华, 陈致富. 基于 PSO 自整定 PID 的塔架式抽油机调速系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 998-1004.
WANG T H, CHEN ZH F. Research on speed control system for tower mounted pumping unit based on PSO self-adjusting PID control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 998-1004.
- [18] 梁旭, 刘才慧. 基于混合粒子群算法的在线检测路径规划[J]. 国外电子测量技术, 2015(12): 30-34.
LIANG X, LIU C H. Path planning for on machine verification system based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(12): 30-34.
- [19] 陈文仁, 朱霞, 徐栋霞. 基于改进型粒子群算法的卡箍直径检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1837-1843.
CHEN W R, ZHU X, XU D X. Spring clamp diameter detection algorithm based on the improved particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1837-1843.

作者简介

张海峰, 2004 年于长安大学获得学士学位, 2007 年于长安大学获得硕士学位, 2013 年于西安交通大学获得博士学位, 现为上海工程技术大学讲师, 主要研究方向为电力系统优化与调度、电力市场竞标策略等。

E-mail: 15901866629@163.com

Zhang haifeng received B. Sc. and M. Sc. from Chang'an University in 2004 and 2007, and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2013, respectively. Now he is a lecturer in Shanghai University of Engineering Science. His research interests include power system optimization and scheduling, and bidding strategies for deregulated electricity markets.