

区域电网竞价策略研究

林女贵¹,蔡冰凌²,刘建³

(1. 国家电网福建省电力有限公司,福州 350003;2. 国网福建省电力有限公司 龙岩供电公司,福建 龙岩 364000;3. 福州大学 电气工程与自动化学院,福州 350108)

Regional power grid electricity trading optimization

LIN Nvgui¹, CAI Bingling², LIU Jian³

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China;

2. Longyan Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Longyan 364000, China;

3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

摘要:根据区域电网的特点,研究售电公司、电网公司和用电客户之间的电量交易。考虑到交易过程中的供需差异等因素,建立了基于输电费用优化的非合作博弈售电策略模型。以区域电网为例,分析各利益主体在非合作博弈模型下的纳什均衡售电策略。算例分析结果表明,非合作博弈售电策略模型不仅可为售电公司提供竞价参考、平衡可再生能源和传统火电之间的利益,同时也可降低区域电能供需不平衡概率,保障电力市场安全运行。

关键词:电力市场;区域电网;售电公司;非合作博弈;纳什均衡;售电策略

Abstract: According to the characteristics of regional power grid, the electricity transaction among electricity distribution company, power grid company and electricity customer is studied. Considering the differences between supply and demand during the transaction process, a non-cooperative game selling strategy model based on transmission cost optimization is established. Taking regional power grid as an example, the Nash equilibrium power sales strategy of various stakeholders is analyzed under the non-cooperative game model. Results show that the model not only provides bidding reference for the sales company and balances the benefits between renewable energy and traditional thermal power, but also reduces the imbalance probability of regional power supply and demand and ensures the safe operation of the electricity market.

Key words: electricity market; regional power grid; power distribution company; non-cooperative game; Nash equilibrium; power sales strategy

中图分类号:TK018;F407.61 文献标志码:A

0 引言

随着电力体制改革逐步深入,我国电力市场规模逐渐扩大,2016年全国交易电量突破1万亿kWh大关。未来,我国电力市场的自主化程度会进一步提高,完成从计划到市场的过渡^[1-2]。但由于我国电力期货等电力金融衍生品市场以及储能市场尚处于发展初期,因此需基于我国国情制定售电策略,避免电价剧烈波动^[3]。

近年来国内外学者对售电策略进行了广泛而深入的研究。文献[4]针对微网中的多运营主体,提出了一种多轮承兑随机匹配市场交易机制。文献[5]基于多代理技术,以各代理自身利益最大化为目标,建立虚拟电厂各代理竞价策略模型以提高分布式能源发电参与电力交易的概率。文献[6]基于进化博弈理论建立了风电企业、火电企业、电网公司三方博

弈模型。文献[7]建立客户参与的动态电力市场框架,并利用博弈论分析该市场的纳什均衡点,结果表明竞争性动态电力市场能够促进可再生能源的消纳。文献[8]基于多场景生成方法,在用电需求、气候条件不确定的情况下,建立固定电价、分时电价、实时电价下电力零售商的双边合同和售电价格优化模型。文献[9]以售电侧完全放开的电力市场为背景,提出一种包含过网费的新型售电策略机制以促进电力市场稳定发展。

博弈论在电力市场竞价机制研究中应用较为广泛,得到各国学者们的认可^[10-11],因此本文提出在电力市场交易中,售电公司采用博弈论模型最大化自身利益,同时考虑电价、发电成本、可交易电量等因素和其他售电公司的售电策略,最终制定自己的售电策略。因此,售电公司之间可视为非合作博弈。本文以售电公司、电网公司和电力用户为利益主体,建立基于过网费的非合作博弈售电策略模型,并采用粒子群算法进行求解。算例分析结果表明,不同类型的售电公司可获得达到纳什均衡的售电策略。

收稿日期:2018-09-27;修回日期:2018-12-28

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0902800)

This work is supported by National Key Research and Development Program of China(No.2017YFB0902800)

1 竞价策略模型及其求解

1.1 竞价策略模型

在我国区域电网中,参与电力交易的主体主要有售电公司、电网公司、购电用户。售电公司期望通过出售电能获取利润,购电用户则期望用较低的价格从电网公司购买电能。在电力市场竞价过程中,售电公司向电力交易市场上报可提供的电量以及能接受的最低价格,购电用户向电力交易市场上报需求的电量和能接受的最高价格,并以拍卖的形式进行交易。此外,售电公司还需根据成交电量等因素向电网公司支付一定比例的过网费。

本文研究区域电网竞价策略问题,基于非合作博弈构建一个包含多类型售电公司的区域电网竞价策略模型,设计保证购电用户和售电公司之间充分互动、最终确定交易电量和价格的竞价机制。

随着电力市场改革的深入,售电侧不断放开,如何设计售电策略成为研究的热点。假设售电公司的决定是相互独立的,出于竞争关系,发电量不会公开,可以通过构建非合作博弈模型来分析售电公司之间的相互影响。

本文假设该区域的电力市场未形成垄断,不同的售电公司背后仅有一种发电类型的发电企业。设有 N 个售电公司参与售电竞价博弈, S_i 为第 i 个售电公司的售电策略集合, s_i 为第 i 个售电公司的出售电量, U_i 为第 i 个售电公司的收益集合,则整个售电策略模型可表示为

$$A = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\} \quad (1)$$

对于区域电网中的售电公司 i 来说,参与电能交易意味着从策略集 A 中挑选一个最大化自身收益 U_i 的策略。

在电能交易机制中,区域电网中的售电公司 i 将根据同区域内其他售电公司的售电策略调整自身的策略,设售电策略调整函数为^[8]

$$f(s_i, x_j) = \frac{\lambda_b \sum_{i \in N-i} s_i}{\sum_{i \in N} s_i} \cdot \frac{x_j}{\sum_{j \in J} x_j} s_i + \varphi_a \frac{x_j}{\sum_{j \in J} x_j} s_i + \varphi_b \frac{\sum_{i \in N-i} s_i}{\sum_{i \in N} s_i} \quad (2)$$

式中: λ_b 为售电收入系数; φ_a 为电价影响系数; φ_b 为需求影响系数^[8]; x_j 为购电用户 j 所需要的电量; $\sum_{i \in N-i} s_i / \sum_{i \in N} s_i$ 为电价影响因子; $s_i x_j / \sum_{j \in J} x_j$ 为需求影响因子。

售电过程中电网公司会向该区域中售电公司收取相应的过网费,而过网费的合理设计能够降低售电公司的运营成本。当由于售电公司参与售电,产生电量不平衡时,电网公司将利用过网费对售电

公司的收益进行调整。用 $Wh(S)$ 表征区域电网中售电公司和电网公司的过网费

$$Wh(S) = [\lambda_c (\sum_{i \in N} s_i - \sum_{j \in J} x_j)^2 + \lambda_d (\sum_{i \in N} s_i - \sum_{j \in J} x_j) + \xi_c] / N \quad (3)$$

式中: λ_c 、 λ_d 为衡量售电公司的售电行为对电网造成损耗的成本折算系数; ξ_c 为售电公司承担的固定费用。在区域电网竞价策略模型中,售电公司通过售电获得的直接收益扣除售电产生的过网费后即最终收益。因此,售电公司 i 在选择策略 s_i 后的最终收益为

$$U_i(s_i, S_{-i}) = \sum_{j \in J} [a_i(TS_i) + p_{ij}(TS_i, TU_j)] \cdot f(s_i, x_j) - c_i(TS_i) \cdot Wh(S) - \xi_b \quad (4)$$

式中: s_i 为售电公司 i 的售电策略; S 为所有售电公司的策略向量; $S_{-i} = [s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, \dots, s_N]^T$ 为区域电网中除售电公司 i 以外所有竞争者的决策向量; $a_i(TS_i)$ 为该区域政府根据售电公司 i 的电源类型 TS_i 确定的每度电补贴; TS_i 为区域电网中售电公司的电源类型集合; TU_j 为区域电网中购电用户的类型集合; $p_{ij}(TS_i, TU_j)$ 为售电公司 i 与购电用户 j 的交易电价; $c_i(TS_i)$ 为售电公司 i 售电过程产生的单位容量过网费; $f(s_i, x_j)$ 为售电公司 i 的竞争者和购电用户对其售电策略的影响函数; $Wh(S)$ 为售电公司 i 在售电过程中向电网公司缴纳的过网费函数; ξ_b 为电力交易固定成本。

成本折算系数作为边界条件,电网公司会针对其调整策略,其影响已反映在售电公司的最终收益中。

1.2 竞价策略模型的求解

为鼓励可再生能源的发展,中国政府对于可再生能源发电商予以一定的补贴,并且对于不同的电力用户,电价有所区别。因此,售电公司的售电收益与其电源类型有关,也与电力用户的类型相关。 $TS_i \in \{TS_1, TS_2, TS_3, TS_4\}$ 代表不同的电源类型,根据能源结构占比,依次为火电、水电、风电、光伏; $TU_j \in \{TU_1, TU_2, TU_3, TU_4\}$ 代表不同的用户类型,根据我国实际情况,用电价格由低到高依次是农业、居民、工业、商业。根据国外成熟的电力市场交易经验,不同类型的售电商对同一类型购电用户的售价相同,不同类型的客户针对同一类型的售电公司的电价固定。每个售电商的目标都是最大化自身收益,售电公司 i 会依据其他竞争对手的策略 S_{-i} 来选定符合自身需求的售电策略。为求解竞价策略模型 A ,需要寻找竞价策略的纳什均衡点。

针对竞价策略模型 $A = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$, 纳什均衡点存在的充分必要条件是对于每个博弈参与者 $i \in N$, 存在策略 s_i^* 使得售电商 i 的收益达到最优,即

$$U_i(s_i^*, S_{-i}^*) \geq U_i(s_i, S_{-i}^*) \quad \forall s_i \in S_i \quad (5)$$

根据纳什均衡理论,纳什均衡点是竞价策略最

优解,所以首先需要对竞价策略模型 A 中纳什均衡点的存在性进行判定。

根据纳什均衡点存在定理,在 N 个对象的博弈问题中,若每个对象的纯粹策略集合 S_i 是欧式空间的非空紧致凸子集,且每一个效用函数 U_i 关于 S 连续,关于 S_i 为凹函数,则该博弈问题存在一个纯粹策略纳什均衡点。售电公司 i 的策略集合 S_i 为

$$S_i = \{s_i | 0 \leq s_i \leq M_i\} \quad (6)$$

式中: M_i 为售电公司 i 的最大售电量,当区域电网中的售电公司 i 参与售电时必然有对应的售电策略 s_i ,故集合 S_i 非空。

$$\frac{\partial^2 U_i(s_i, S_{-i})}{\partial s_i^2} = -2 \left\{ \begin{aligned} & \left[p_{ik}(TS_i, TU_j) + b_i(TS_i) \right] \cdot \\ & \lambda_b \sum_{j \in J} \frac{x_j}{\sum_{j \in J} x_j} \cdot \frac{(\sum_{i \in N} s_i)^2}{(\sum_{i \in N} s_i)^3} (1 + \frac{\varphi_b}{2}) + \\ & \frac{\lambda_c c_i(TS_i)}{N} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由于 $\lambda_b, \varphi_b, \lambda_c, N, x_j, s_i$ 均非负, U_i 对 s_i 的二阶导数不大于零,因此, U_i 是凹函数,即本文所提出的竞价策略模型 $A = \{N, \{S_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}\}$ 存在纳什均衡点。

本文采用改进的粒子群算法求解竞价策略模型,算法步骤如下。

步骤1:初始化粒子群,每个售电公司 i 选择一个售电策略 S_i^0 作为初始策略。确定种群的规模粒子数 H ,学习因子 c_1, c_2 ,惯性权重 w ,迭代终止条件为最大迭代次数 T_{max} 。

步骤2:求解粒子的适应值,计算粒子的最好位置和种群的最好位置。令 $pbest_h^k$ 表示第 h 个粒子进化 k 代的最好位置, $gbest_h^k$ 表示整个种群进化 k 代的最好位置,并更新记忆库。计算公式如下

$$pbest_h^k = \begin{cases} pbest_h^{k-1} & U_i(s_i, S_i)_h^k < U_i(s_i, S_{-i})_h^{k-1} \\ U_i(s_i, S_i)_h^k & U_i(s_i, S_i)_h^k \geq U_i(s_i, S_{-i})_h^{k-1} \end{cases} \quad (8)$$

$$gbest_h^k = \max(pbest_h^k) \quad h = 1, 2, \dots, H \quad (9)$$

步骤3:更新粒子的速度和位置

$$\begin{cases} v_h^{k+1} = wv_h^k + c_1 r_1^k (pbest_h^k - x_h^k) + c_2 r_2^k (gbest_h^k - x_h^k) \\ s_h^{k+1} = s_h^k + v_h^{k+1} \end{cases} \quad (10)$$

步骤4:判断 $\Delta U_i(s_i, S_i) = U_i(s_i, S_i)_h^k - U_i(s_i, S_{-i})_h^{k-1}$ 是否小于0.5%,若小于或者达到最大迭代次数则退出计算,否则返回步骤3。

步骤5:输出全局最优 $gbest_h^k$ 。

2 算例分析

在某一个区域电网内,4家不同类型的售电公司和3家不同的购电用户在某一时段(本文取15 min)内参与交易,相关的电价如表1所示。在该区域内

火电与水电价格相同,风电价格居中,光伏发电相对便宜,其中新能源机组风电和光伏的补贴按照国家标准设置。非合作博弈售电策略模型中,购电用户可表示为 $TU = [TU_1, TU_2, TU_3]^T$,售电公司可表示为 $TS = [TS_1, TS_2, TS_3, TS_4]^T$ 。每家售电公司每一竞价时段内最大可售电量(在批发市场中代表发电厂出力上限)分别为2 MWh、2 MWh、1.5 MWh、2.7 MWh。

表1 交易电价情况

Tab. 1 Transaction trading price

售电公司	用户类型			
	居民	工业	商业	单位补贴电价
火力发电	0.39	0.52	0.85	0
水力发电	0.39	0.52	0.85	0
风力发电	0.32	0.34	0.66	0.38
光伏发电	0.12	0.14	0.56	0.42
惩罚电价	0.15	0.20	0.10	

竞价调整函数参数为 $\lambda_b = 1$, $\varphi_a = \varphi_b = 0.5$,过网费函数参数为 $\lambda_c = 0.001$, $\lambda_d = 0.003$, $\xi_c = 0.002$ 。初始化种群:种群的规模 $H = 40$,学习因子 $c_1 = c_2 = 1.6$,惯性权重 $w = 0.73$,最大迭代次数 $T_{max} = 200$,通过MATLAB仿真平台进行求解。

$\Delta U_i(s_i, S_i)$ 的变化趋势如图1所示。由图1可知本文所采用的PSO算法能够收敛并最终达到纳什均衡点。

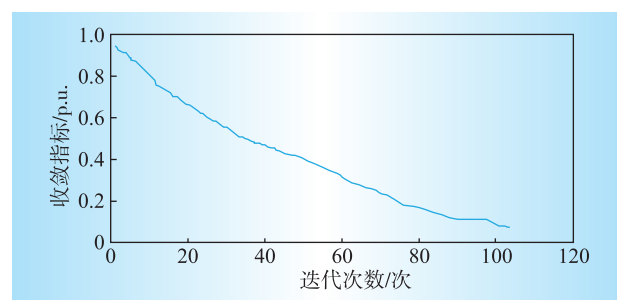


图1 收敛指标变化趋势

Fig. 1 Changing trend of the convergence index

图2比较了2种策略下各售电公司的售电情况。策略1:各售电公司以达到博弈均衡的电量售电;策略2:各售电公司以最大售电量售电。通过图2可以发现,售电公司即使没有以自身背后批发市场中发电厂的出力上限进行电能交易,基于竞价策略模型计算出的售电策略仍然使各售电公司之间达到纳什均衡,且所有售电公司在非合作博弈竞价策略中的售电量均小于各自的最大售电量,意味着4家售电公司保留了一定的电量未参与交易。

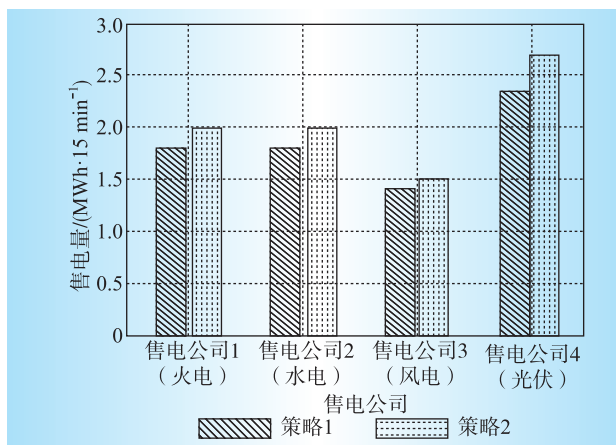


图2 粒子群算法下售电策略售电量与最大售电量对比

Fig. 2 Comparison of sale electricity under PSO and maximum sale electricity

图3比较了2种策略下所有售电公司的收益情况,在一个竞价时段(15 min)内,策略1下售电公司总利润为2 370.00元,而策略2下售电公司总利润为1 462.50元。从图3中可以发现售电公司3(风电)2种策略下的收益偏差较大,策略2下售电公司3(风电)会出现负的收益。

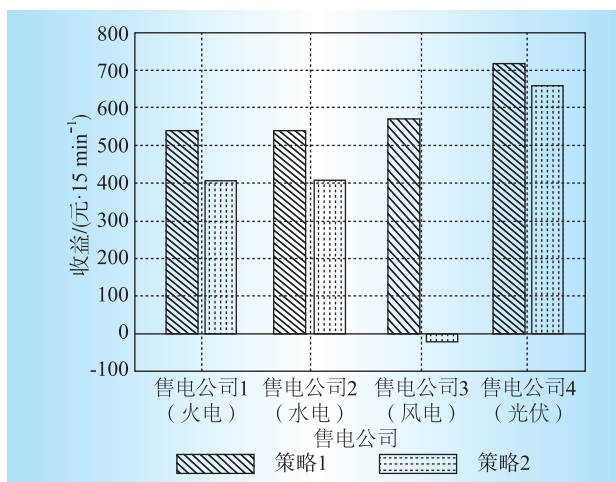


图3 2种策略下售电公司的收益对比

Fig. 3 Benefit comparison of electricity selling companies under two strategies

此外,调整过网费函数系数可以降低区域电能供需不平衡的概率。在算例中,调整成本折算系数 λ_c 效果最明显,调整 λ_d 的效果相对较弱。因此,如需进行强势过网费调整以达到电能供需平衡,可调整成本折算系数 λ_c ;如需微调过网费以达到电能供需平衡,则可调整成本系数 λ_d 。

3 结束语

针对区域电网形成的竞价市场,本文基于非合作博弈理论建立了一种包含了传统火电和可再生能源的售电公司、电网公司和购电用户的非合作博

弈电能竞价模型,允许售电公司根据发电类型、购电用户的重要性等因素制定售电策略。通过算例证明,竞价策略模型可以求解出竞价市场中售电公司的平均收益最大时各售电公司的售电策略。本模型可以为竞价市场中售电公司提供竞价参考,有助于平衡可再生能源和传统火电之间的利益,同时可以利用过网费进行售电干预,从而降低区域电能供需不平衡的概率,保障电力系统稳定运行。D

参考文献:

- [1] 舒畅,钟海旺,夏清. 基于优化理论市场化的日前电力市场机制设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):55-62.
SHU Chang, ZHONG Haiwang, XIA Qing. Day-ahead electricity market design based on market interpretation of optimization theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2):55-62.
- [2] 王拓,杨建萍,谈康. 以市场为导向的电力营销管理探讨[J]. 电力需求侧管理,2018,20(2):54-56.
WANG Tuo, YANG Jianping, TAN Kang. Discussion of market oriented electric marketing management [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(2):54-56.
- [3] 刘敦南,曾鸣,黄仁乐,等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术,2015,39(11):3 057-3 063.
LIU Dunnan, ZENG Ming, HUANG Renle, et al. Business models and market mechanisms of e-net(2) [J]. Power System Technology, 2015, 39(11):3 057-3 063.
- [4] 史开拓,刘念,张建华,等. 多运营主体的微电网随机匹配交易机制[J]. 电网技术,2016,40(2):587-594.
SHI Kaituo, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Random matching trading mechanism in microgrid of multi-operators [J]. Power System Technology, 2016, 40(2):587-594.
- [5] 艾欣,周树鹏,赵阅群. 含虚拟发电厂的电力系统优化运行与竞价策略研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(23):6 351-6 362.
AI Xin, ZHOU Shupeng, ZHAO Yuequn. Research on optimal operation and bidding strategy of power system with virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6 351-6 362.
- [6] 刘连光,刘鸿熹,刘自发,等. 新能源接入下风火网三方非对称进化博弈分析[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(1):1 297-1 303.
LIU Lianguang, LIU Hongxi, LIU Zifa, et al. Analysis of tripartite asymmetric evolutionary game among wind power enterprises, thermal power enterprises and power grid enterprises under new energy resources integrated [J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(1):1 297-1 303.
- [7] SAEED A, EHSAN G. A game equilibrium model of a retail electricity market with high penetration of small and mid-size renewable suppliers [J]. The Electricity Journal, 2017, 30(5):22-29.

(下转第23页)