

电力市场中厂网合作的 CO₂ 减排调度模式研究

任玉珑, 黄守军, 孙睿, 冯天

(重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要: 本文通过分析电力市场中独立发电商与电网公司之间的合作激励, 提出厂网合作的 CO₂ 减排调度模式。基于 CO₂ 减排调度规则及独立发电商报价系数对竞价市场的影响, 确定了厂网合作方式与约束条件, 构建厂网合作模型, 求解出最优合作策略, 并设计了相应的增量收益分配方案。最后, 通过实例检验了所述调度模式的合理性。

关键词: CO₂ 减排; 调度模式; 电力市场; 报价系数; 约束条件

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-980X(2010)02-0089-04

发展低碳经济, 是应对全球气候变暖、实现经济可持续发展的迫切要求。作为 CO₂ 减排的主力军, 电力行业实现低碳化发展具有重要的现实意义与战略意义^[1]。目前, 我国在电力调度中大力推进节能减排, 以期最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。引入低碳技术是实现电力行业低碳化发展的关键所在, 但方兴未艾的低碳技术尚未完全成熟, 存在着风险大、成本高、效果不确定等特点^[2-3]。在节能减排的背景下, 改进 CO₂ 减排技术的独立发电商因为成本的增加而在电力市场处于相对劣势, 其希望通过相应政策扶持保证自己的发电收益, 电网公司需要在保证自身收益的基础上优先调度这些低碳电量, 因此双方具有合作激励。在 CO₂ 减排调度规则下, 本文通过分析独立发电商的报价系数对竞价市场的影响, 提出通过减小与电网公司合作的独立发电商的报价系数进行 CO₂ 减排调度的模式。基于厂网合作的约束条件, 构建模型, 推导最优策略, 并据此提出一种可行的增量收益分配方案。

1 主体收益建模及市场状态分析

1.1 基本描述

电力市场主体包括独立发电商、电网公司和需求侧用户, 其中电网公司作为单一购买者收购发电商的电量, 并兼有市场调度的职能。竞价流程可简要表述为^[4-5]: 首先, 电网公司根据预测负荷公布所

有独立发电商的竞价空间; 其次, 各独立发电商基于最优化策略向电网公司提交竞价数据; 最后, 电网公司以供需平衡为目标出清, 且按统一的边际电价执行结算。

假设竞价时段长度为 $1 h$, 每个独立发电商在竞价时段只提交 1 组竞价数据。设有 n 个独立发电商参与竞价上网, 不失一般性, 我们选择独立发电商 $i (i \in \{1, 2, \dots, n\})$ 作为研究对象, 且 i 的竞价对手用 j 表示。

假设电网公司公布的该时段市场需求负荷预测值为 Q 。用 q_i 表示独立发电商 i 向电网公司提交的电量, 且该时段 i 的竞价空间为 $[\underline{q}_i, \overline{q}_i]$, 即 $\underline{q}_i \leq q_i \leq \overline{q}_i$ 。

假设发电成本 C_i 是发电量 q_i 的二次函数^[6], 且 $C_i = C(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i$ 。 (1)

式(1)中, a_i 、 b_i 是成本函数系数, 由独立发电商类型决定, 且 $a_i > 0$ 、 $b_i > 0$ 。

用 b_i 表示独立发电商 i 向电网公司提交的报价, 文献[7]提出报价为平均发电成本的比例函数, 即

$$b_i = B(C_i) = \alpha_i (a_i q_i + b_i) \quad (2)$$

式(2)中: α_i 表示报价系数, 具有主观性。文献[8]指出独立发电商在竞价市场中有提交高于其成本的报价的动机, 故在此 $\alpha_i > 1$ 。

边际电价为 r , 需求侧用户的消费电价为 R ,

收稿日期: 2009-12-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(70903080)

作者简介: 任玉珑(1944—), 女, 湖南长沙人, 重庆大学经济与工商管理学院教授, 博士生导师, 研究方向: 能源与电力经济、电力市场理论; 黄守军(1984—), 男, 安徽巢湖人, 重庆大学经济与工商管理学院硕士, 研究方向: 电力技术与电力市场; 孙睿(1974—), 男, 山东济宁人, 重庆大学经济与工商管理学院讲师, 博士, 研究方向: 电力技术经济、博弈论与信息经济学; 冯天(1988—), 女, 重庆永川人, 重庆大学经济与工商管理学院硕士, 研究方向: 技术管理与技术创新。

假设 n 个独立发电商现有 CO₂ 减排技术水平相当, 本节分析可对减排相关成本及收益统一不作考虑。

用户的电力需求为消费电价的函数 $D(R)$ 。

1.2 竞价过程分析

在实际竞价中,理性发电商基于发电收益最大化制定报价策略,则独立发电商 i 的收益模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max u_i &= r q_i - C(q_i) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^n q_i = Q, \quad q_i \leq \bar{q}_i \end{aligned} \quad (3)$$

考虑需求侧用户的电力需求受消费电价的影响,假设其电力需求函数为:

$$D(R) = D_0 - \mu R^{[9]}. \quad (4)$$

式中: D_0 表示用户的最大电力需求; μ 表示用户的电力需求变化率大小; R 表示用户的消费电价,且 $R = r + \Delta r$ (Δr 为需求侧电价相对边际电价的差价)。

电网公司根据以往市场信息预测该时段市场需求负荷为 Q ,假设市场出清时 Q 恰好满足用户的电力需求,即 $Q = D(R)$ 。则电网公司的收益模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max U_0 &= D(R) \cdot r \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^n q_i = D(R), \quad q_i \leq \bar{q}_i \end{aligned} \quad (5)$$

若边际电价 r 高于独立发电商 i 的发电成本,那么 i 只要提交稍微低于 r 的报价即可获得上网售电,极限情形是:

$$b_i = r. \quad (6)$$

此时,独立发电商 i 竞价成功且发电收益最大化。由式(2)和式(6)得:

$$q_i = \frac{r}{i} - \frac{c_i}{i}. \quad (7)$$

联立式(4)、式(5)与式(7)求解,得出边际电价和独立发电商 i 的发电量分别为:

$$\begin{cases} r = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{-c_i + D_0 - \mu r}{i} + D_0 - \mu r}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} + \mu} \\ q_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{-c_i + D_0 - \mu r}{i} + D_0 - \mu r}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} + \mu} - \frac{c_i}{i} \end{cases} \quad (8)$$

以上求解基于不考虑独立发电商 i 电量 q_i 越限的情形,而对于独立发电商 i 的发电量 q_i 不满足 $q_i \leq \bar{q}_i$ 时的处理方法参考文献[9]:当 q_i 大于最大发电量 \bar{q}_i 时,发电量取 \bar{q}_i ;当 q_i 小于最小发电量 \underline{q}_i 时,发电量取 0。为了便于讨论独立发电商 i 与电网公司间的合作,本文不考虑其发电量 q_i 越限的情

形。

2 报价系数对竞价市场的影响

现假设仅独立发电商 i 要引入 CO_2 减排新技术。一方面,考虑到技术改进会增大发电成本, i 必然要改变报价策略(涉及报价系数和发电量)以求继续获得上网售电;另一方面,由式(1)~式(3)和式(6)可得独立发电商的发电收益是发电量的递增函数,为了保证发电收益,故 i 会采用改变报价系数。

假设独立发电商 i 改变报价策略时其竞价对手保持报价策略不变,将所求边际电价的表达式变形为:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{-c_j + D_0 - \mu r}{j} + D_0 - \mu r}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j} + \mu}. \quad (9)$$

由式(9)可得:当独立发电商 i 增大报价系数时,边际电价提高;减小报价系数时,边际电价降低。

当只研究独立发电商 i 所有竞价对手 j 参与其竞价空间(即市场需求负荷减去独立发电商 i 处理后的发电量)竞价时,根据相关约束条件可得边际电价与独立发电商 i 发电量的关系式:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{-c_j + D_0 - \mu r}{j} + D_0 - \mu r - q_i}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{j} + \mu}. \quad (10)$$

由式(10)可知:当边际电价提高时,独立发电商 i 的发电量减小。竞价对手有最优报价策略 $b_j = r$ 的约束,所以竞价对手的发电量与边际电价有相同的变化趋势,即竞价对手的发电量增大;当边际电价降低时,独立发电商 i 的发电量增大,所有竞价对手的发电量减小。

因此,当独立发电商 i 增大报价系数时,边际电价上升,从而独立发电商 i 的发电量减小而竞价对手的发电量和收益均增大;当独立发电商 i 减小报价系数时,边际电价降低,从而独立发电商 i 的发电量增大而竞价对手的发电量和收益均减小。

3 厂网合作的 CO_2 减排调度模式

3.1 约束条件

独立发电商 i 由于改进 CO_2 减排技术增加了发电成本,因此如果坚持报价系数不变,那么必然要减小发电量,否则无法取得竞价成功;电网公司为了充分利用独立发电商 i 的低碳电量,可以与之合作,通过减小其竞价系数使其发电量增加,顺应调度政策的导向。考虑厂网合作的结果应该使总收益有所增加(暂且不考虑增量收益的分配)。综合起来,独立

发电商 i 与电网公司之间合作的约束条件为:

$$\begin{cases} u_i + U_0 > u_i + U_0 \\ q_i > q_i \\ D(R) < D(R) \end{cases} \quad (11)$$

其中: u_i 、 q_i 、 U_0 表示厂网合作后独立发电商 i 的收益、发电量及电网公司的收益; R 、 $D(R)$ 表示厂网合作后需求侧用户的消费电价及市场总电力需求。

3.2 模型构建与求解

基于合作前独立发电商和电网公司的收益模型,电网公司与独立发电商 i 进行上述分析的合作后总收益模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max(u_i + U_0) &= r q_i - [C(q_i) + x q_i] + \\ &u q_i + D(R) r \quad (12) \\ \text{s.t.} \quad &q_j + q_i = D(R), q_i \leq q_i \end{aligned}$$

其中: r 、 q_j 表示厂网合作后的边际电价及竞价对手 j 的发电量; x 表示 CO₂ 减排新技术设备的折旧率; u 表示技术改进后独立发电商 i 单位发电量相对减排量折算出的政府补贴。

式(12)中存在发电量 q_i 和报价系数 q_i 两个变化量。为了求解出 q_i , 我们需通过式(10)表示出 r 。再结合式(1)、式(4), 可将 $u_i + U_0$ 表示成 q_i 的二次函数, 令其为 $U(q_i)$ 。虽然满足式(11)约束条件的可行解可能有很多, 但只有使合作后电网公司与独立发电商 i 的总收益最大的最优解才能构成最优合作策略。令 $dU(q_i)/dq_i = 0$, 然后整理得:

$$q_i = \frac{\frac{1}{n-1} + D_0}{\frac{1}{n-1} + \mu} - \frac{\frac{1}{n-1} + D_0}{\frac{1}{n-1} + \mu} \left(\frac{1}{j} + q_j \right) \quad (13)$$

厂网合作的最优策略是通过减小独立发电商 i 的报价系数, 使其发电量达到最优发电量。与之相对应, 边际电价及独立发电商 i 报价系数为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\frac{1}{n-1} + D_0 - \mu r - q_i}{\frac{1}{n-1} + \mu} \\ i &= \frac{\frac{1}{n-1} + D_0 - \mu r - q_i}{\left(\frac{1}{j} + q_j \right)} \end{aligned} \quad (14)$$

因此, 只要独立发电商 i 满足在厂网合作前的报价系数大于 i , 即单独竞价获得的发电量小于

q_i , 就可以采取以上分析的合作模式配合电网公司进行 CO₂ 减排调度; 否则不可。

3.3 增量收益分配方案

在保证合作双方能获得非合作状态下的收益基础上, 增量收益的分配方案须使双方收益均有增加, 且反映独立发电商 i 对增量收益的贡献大小。令独立发电商 i 的增发电量对增量收益的贡献因子为 $\left(\frac{0, 1 \right)^{[3]}$, 那么增量收益分配方案如下:

$$\begin{cases} \frac{u_i}{U} : \frac{U_0}{U} = \frac{q_i}{q_i} : \left(1 - \frac{q_i}{q_i} \right) \\ U = U_0 + u_i \end{cases} \quad (15)$$

其中: U 表示增量收益; u_i 是独立发电商 i 的收益增量; U_0 表示电网公司的收益增量。

可以看出: 在贡献因子一定时, 独立发电商 i 增发电量越大, 其获得的收益增量比例 u_i/U 越大; 反之亦然。

4 实例检验

某时段市场上有 4 个独立发电商(以下简称为 IPP1 ~ IPP4)和 1 个电网公司。用户侧电力需求函数为 $D(R) = 2000 - 0.8R$, 其中电量单位 MW · h, 电价的单位为元/MW · h, 且需求侧电价相对边际电价的差价 $r = 100$ 元/MW · h。各独立发电商成本函数系数及报价系数如表 1 所示。

表 1 独立发电商的竞价系数

发电商	i	i	i
IPP1	0.05	200	0.15
IPP2	0.06	175	1.16
IPP3	0.04	185	1.15
IPP4	0.05	190	1.18

注: i 的单位为元/(MW · h)², i 的单位为元/MW · h。

以 IPP4 为研究对象, 在其改进 CO₂ 减排技术后, 通过减小报价系数与电网公司进行厂网合作。当 IPP4 减小报价系数时, 边际电价及各独立发电商发电量如图 2 所示。

由图 2 可知: 当 IPP4 减小报价系数时, 边际电价和竞价对手的发电量均减小, 而 IPP4 的发电量及市场总发电量均增大。

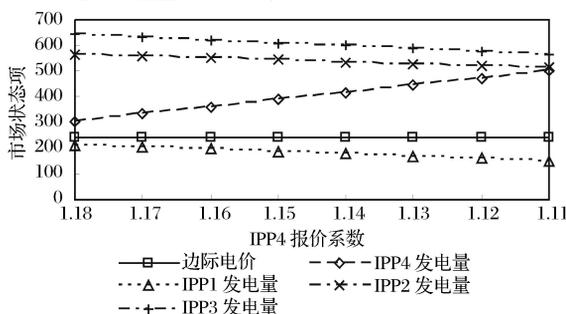


图 2 IPP4 减小报价系数下的边际电价及发电量

假设 $\bar{x} = 1.5 \text{ 元/MW} \cdot \text{h}$ 、 $\bar{u} = 0.5 \text{ 元/MW} \cdot \text{h}$ ，则当 IPP4 减小报价系数时，其自身发电收益及

厂网总收益如图 3 所示。

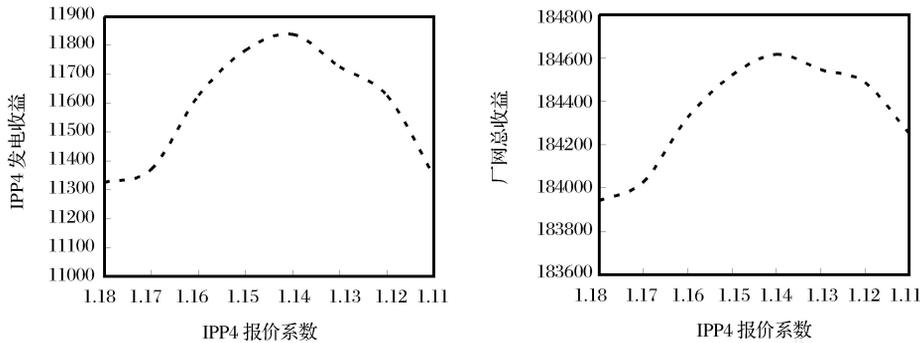


图 3 IPP4 减小报价系数下的自身发电收益及厂网总收益

由图 3 可知：当 IPP4 减小报价系数时，IPP4 获得的收益以及厂网总收益均先增大后减小，且当 IPP4 报价系数为 1.139 时，合作双方的总收益最大。因此，只要 IPP4 在厂网合作前的报价系数大于 1.139，就可以采取最优策略进行厂网合作。

计算得出： $q_1 = 120.35 \text{ MW} \cdot \text{h}$ ， $U = 676.04 \text{ 元}$ 。假定 IPP4 的增发电量对增量收益的贡献因子 $\alpha = 0.8$ ，根据增量收益分配方案，得出增量收益在 IPP4 与电网公司之间的分配为： $u_1 = 152.52 \text{ 元}$ ， $U_0 = 523.52 \text{ 元}$ 。

至此，将 IPP4 单独竞价和所述合作调度模式下的市场状态进行比较，结果如表 4 所示。由表 4 可知：厂网合作后 IPP4 的发电量和收益均变大，而电网公司通过合作不仅达到优先调度低碳电量的目的，而且同时提高自身收益。

表 4 厂网合作前后的市场状态比较

市场状态	单独竞价下	合作调度模式下
IPP4 报价系数	1.18	1.139
边际电价	242.28	240.06
IPP4 发电量	306.40	426.75
市场总发电量	1726.18	1727.95
IPP4 收益	11324.54	11477.06
电网公司收益	172618	173141.52

注：电价单位为元/MW·h，电量单位为 MW·h，收益单位为元。

5 结束语

本文基于分析改进减排技术的独立发电商与电网公司之间的合作激励及报价系数对竞价市场的影响，结合 CO₂ 减排调度规则，探讨厂网合作的 CO₂ 减排调度模式的可行性，确定厂网合作方式、约束条件，推导出最优合作策略，并据此提出一种反映独立

发电商贡献大小的增量收益分配方案。研究主要结论表明在满足所述合作调度模式的前提下，可以通过减小独立发电商报价系数配合电网公司进行 CO₂ 减排调度，使其发电量和收益均变大；而电网公司通过合作不仅优先调度低碳电量，而且同样提高自身收益。这种竞价结果调整既符合减排调度规则又满足相关约束条件，因此是可行的。

参考文献

- [1] 魏一鸣,刘兰翠,范英,等.中国能源报告(2008):碳排放研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 康重庆,陈启鑫,夏清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术,2009,33(2):1-7.
- [3] 陈启鑫,康重庆,夏清,等.电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J].电力系统自动化,2009,32(15):18-23.
- [4] 余尔铿,周京阳,张学松.电力市场竞价模型与原理[J].电力系统自动化,2001,25(1):24-27.
- [5] 陈其安,杨秀芬.基于博弈论的发电厂商竞价策略研究[J].系统工程学报,2004,19(2):121-127.
- [6] 李清清,周建中,莫莉,等.基于节能调度的竞价市场厂网合作策略[J].电力系统自动化,2008,32(14):40-44.
- [7] 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.
- [8] HAO S Y. A study of basic bidding strategy in clearing pricing auctions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(2):975-981.
- [9] WEN F S,DAVID A K. Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2001,16(1):15-21.

(下转第 114 页)

- [10] 司伟. 全球化背景下的中国糖业:价格、成本与技术效率 [D]. 北京:中国农业大学,2005.
- [11] 赵春芬. 我国白糖期货市场价格发现功能实证研究[J]. 全国商情·经济理论研究,2007(9):70-71.
- [12] 李晔. 白糖期货市场价格发现功能的实证分析[J]. 贵州财经学院学报,2007(5):108-110.
- [13] 严莉娟,武大雪. 我国白糖期货市场弱式有效性研究[J]. 经济论坛,2008(6):80-81.
- [14] 杨照东,魏振祥. 国内外白糖期货风险控制实证研究[J]. 湖南财经高等专科学校学报,2008,24(1):113-115.
- [15] 梁权熙. 白糖期货对广西糖业发展的促进作用实证研究[J]. 广西金融研究,2008(4):44-47.
- [16] ENGLE R F, GRANGER C W J. Cointegration and error correction: representation, estimation and testing [J]. *Econometrica*, 1987, 55:251-276.
- [17] 华仁海,仲伟俊. 对我国期货市场价格发现功能的实证分析[J]. 南开管理评论,2002(5):57-61.
- [18] BECK S E. Cointegration and market efficiency in commodities futures markets [J]. *Applied Economics*, 1994, 26(3):249-257.
- [19] BLOCH H, AANG D, SAPSFORD D. Commodity prices and the dynamics of inflation in commodity-exporting nations:evidence from Australia and Canada [J]. *Economic Record*, 2006, 82:97-109.

Comparative Analysis on Price Discovery Function of Sugar Futures Market in China and U S :Based on Time Series Data During 2006-2008

Xu Xin¹, Wang Shennan², Zheng Chuanfang¹

(1. School of Economics & Management, Fujian Agriculture & Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. School of Economics, Beijing Technology & Business University, Beijing 100037, China)

Abstract : With the cointegration analysis, the Granger causality test, error correction model, information sharing model, variance decomposition model and impulse response function, this paper analyzes and compares the relationship between futures price and spot price of sugar in China and U. S. The result shows that the price discovery function of sugar futures market of China has brought into play, and there exists big gap between the guide effects of spot price on futures price in China's sugar futures market and that in U. S.'s, and the price discovery function of sugar futures market of China still remains to improve.

Key words : sugar futures market; price discovery function; comparative analysis

(上接第 92 页)

Research on Dispatching Mode for CO₂ Emission Reduction in Electric Power Market with Cooperation between Independent Power Plant and Grid Company

Ren Yulong, Huang Shoujun, Sun Rui, Feng Tian

(School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : Through analyzing the cooperation incentives between independent power plant and grid company in electric power market, this paper proposes a dispatching mode for CO₂ emission reduction with this cooperation between them. According to the dispatching rules of emission reduction and the impacts of the quotation coefficient of independent power plant on bidding market, it determines the cooperative manner and constraints, and constructs the cooperative model, and solves the optimal cooperative strategies, and designs the corresponding incremental profit allocation scheme. Finally, it verifies the rationality of the above-mentioned dispatching mode through a practical example.

Key words : CO₂ emission reduction; dispatching mode; electric power market; quotation coefficient; constraint