

# 激励性输配分开电力市场竞价机制的建模

谢俊, 陈星莺, 廖迎晨, 刘皓明

(河海大学电气工程学院, 江苏省南京市 210098)

## Research on Modeling the Incentive Bidding Mechanism for Transmission and Distribution Separated Electricity Markets

XIE Jun, CHEN Xing-ying, LIAO Ying-chen, LIU Hao-ming

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** A perfect market should have competition not only seller side but also buyer side. As far as power market is concerned, generation side competition is the preliminary stage of electricity market, transmission and distribution separation is the inevitable course of electric power industry deregulation. Because of the unbalance information in electricity market, to overcome the strategic bidding of market participants, it is essential to design a proper bidding mechanism to realize the efficient dispatch and stable operation of electricity market. Using mechanism design theory, a bidding mechanism for transmission and distribution separated electricity market is proposed, which is of both incentive compatibility and individual rationality, and the transmission capacity constraint is taken into account. The basic characters of the proposed bidding mechanism are demonstrated by the simulation results of a revised IEEE 5-generator 14-bus power system based on Monte-Carlo simulation.

**KEY WORDS:** electricity market; transmission and distribution separation; bidding mechanism; mechanism design theory; locational marginal price; Monte-Carlo simulation

**摘要:** 只有卖方竞争而没有买方竞争的市场不能称之为完善的市场。就电力市场而言,发电竞争只是电力改革的初级阶段,输配分开是电力市场化的必经道路。鉴于电力市场中的信息不对称性,为克服市场成员的策略性报价行为,实现市场的有效调度与稳定运营,合理的竞价机制非常重要。本文应用机制设计理论,给出了一种激励性输配分开电力市场竞价机制,该竞价机制同时满足激励相容特性与个人理性要求,并且考虑了输电容量约束。最后,基于 Monte-Carlo 模拟,采用修改的 IEEE5 机 14 节点电力系统为例说明了该竞价机制的基本特征。

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20060294019)。

**关键词:** 电力市场; 输配分开; 竞价机制; 机制设计理论; 节点边际电价; 蒙特卡罗模拟

## 0 引言

根据《国务院关于印发电力体制改革方案的通知》(国发[2002]5号)及《国家电力监管委员会关于区域电力市场建设的指导意见》(电监市场[2003]21号),我国电力改革要走输电与配电分开的道路:不仅发电公司竞价上网,且配电公司和大用户竞价购电,从而打破单一购买的发电竞争模式,形成多买多卖的局面,使购电主体多元化,激活市场,提升整个电力工业的活力。因此开展输配分开电力市场环境下的理论研究,具有重要的理论和现实意义<sup>[1]</sup>。

电力竞价机制是电力市场理论研究的核内容之一。合理的竞价机制能有效遏制由于电力市场中信息不对称造成的市场成员策略性报价行为,引导市场成员在竞价过程中显露真实信息,保证市场有效调度与稳定运营,实现电力资源合理配置并维护可靠的电力供应。近年来对该课题的研究一直是电力市场理论研究中的一个热点并有大量文献涉及,但是这些工作基本上集中在发电侧电力市场<sup>[2-15]</sup>,鲜有文献涉及输配分开电力市场<sup>[16]</sup>。

目前实际运营的电力市场采用的竞价机制主要有三种:按市场成员报价(pay as bid, PAB)结算的竞价机制、按市场清算电价(market clearing price, MCP)结算的竞价机制及基于节点边际电价(locational marginal price, LMP)的竞价机制。研究表明,这3种竞价机制都不能有效解决不正当竞争引起的市场电价飞升问题<sup>[17-19]</sup>:采用 PAB 结算机制缺乏真实信息披露的激励相容特性;采用 MCP 结算机制存在

发电公司操纵报价、哄抬电价的可能，特别是市场份额较大的市场成员更能够滥用市场力；相比于MCP而言，LMP<sup>[20]</sup>虽然能够有效处理输电网络约束从而考虑电力商品的特殊性，但仍然不能克服市场成员的策略性报价问题。

在电力市场环境下，市场成员各自的真实信息成为私人信息，竞争对手并不确切清楚，造成市场成员之间的信息不对称性，而使市场成员在竞价过程中显露真实信息则涉及到机制设计理论<sup>[21]</sup>的研究内容。机制设计理论是在自由选择、信息不完全及决策分散化的环境下，研究满足激励相容条件(incentive compatibility constraint, IC)和参与者个人理性条件(individual rationality constraint, IR)的机制理论：IC条件要求当代理人选择委托人所希望实现的目标时其期望净效益最大；IR条件要求代理人在委托人设计的机制下得到的期望净效益必须不小于该代理人的机会成本。通过机制设计理论设计具有激励特性的竞价机制来引导市场成员显露真实信息，可以实现市场的有效调度。文献[13]首次应用机制设计理论设计了一种发电竞价机制，该机制能够激励理性的发电公司显露真实发电成本；文献[14]考虑了发电公司发电容量成本的合理回收；文献[15]进一步考虑了发电公司与单一卖方签订的长期合约。但是，上述文献都要求发电公司的报价为一个与发电出力无关的恒定边际发电成本，这样的报价曲线与发电公司实际的边际发电成本特性相去甚远，发电公司的报价曲线应该反映边际发电成本随其出力的变化关系。

在输配分开的市场环境中，不仅发电公司的发电成本信息成为私人信息，而且配电公司的运营收益和大用户的电能效用信息也成为私人信息。这样，在输配分开电力市场竞价机制设计中，市场定价者希望实现的目标是实现社会福利最大化的同时使所有参与该竞价机制的发电公司、配电公司和大用户都能投标各自真实的发电成本、不计购电费用的运营收益及电能效用。另外，鉴于电力商品的特殊性，还要考虑电力网络可行性约束，如输电容量限制。文献[16]讨论了输配分开市场的竞价机制问题，所提出的竞价机制实现了对发电公司、配电公司及大用户的激励相容特性，但是没有考虑市场成员的个人理性条件，也没有考虑输电容量约束，还不完善。

本文以文献[13-16]的工作为基础，应用机制设计理论，给出了一种激励性输配分开电力市场竞价

机制，该机制不仅引入激励相容条件，而且融入市场成员个人理性条件，并计及了输电约束。理论推导和算例仿真结果表明：无论是否存在输电约束，发电公司的最优报价是其边际发电成本、配电公司的最优报价是其不计购电成本的边际运营收益、大用户的最优报价是其电能边际效用，实现了市场的有效调度。

## 1 输配分开电力市场结构

本文研究输配分开电力市场的激励性竞价机制问题，基于以下电力市场结构：①厂网分开，发电竞价上网；②输配分开，输电系统是电力商品的载体，输电系统为所有竞价市场成员（发电公司、配电公司、大用户）提供无歧视的电能输送服务；③配售尚不分开，配电公司拥有配电网及相应的供电专营区，实行配供电一体化经营；④配电公司和大用户竞价购电；⑤作为初步的研究，不考虑配电公司、大用户与发电公司在中长期合约市场的交易，只考虑它们在电力库日前市场的全电量竞争。

## 2 输配分开电力市场竞价机制设计

### 2.1 市场成员的微观经济特性

在输配分开的电力市场运营环境中，发电公司竞价上网，配电公司和大用户竞价购电，它们构成了市场竞争的主体<sup>[16]</sup>。

发电公司竞价上网的目标是发电利润最大化，将发电公司的边际发电成本描述如下：

$$c(P_G) = q_G c_0 + c_1 P_G \quad 0 \leq P_G \leq \bar{P}_G \quad (1)$$

式中： $P_G$ 为发电公司的出力； $q_G$ 为发电公司边际发电成本特性参数，是一个大于零的实数，在相同发电出力条件下， $q_G$ 越大，发电公司的边际发电成本越高，反映了发电公司的边际发电成本特性； $c_0$ 、 $c_1$ 分别为边际发电成本的常数项系数与一次项系数， $c_0 > 0$ ， $c_1 > 0$ ； $\bar{P}_G$ 为发电公司的最大出力。

当发电公司出力为 $P_G$ 时的发电成本为

$$C(P_G) = (q_G c_0 + 0.5 c_1 P_G) P_G \quad 0 \leq P_G \leq \bar{P}_G \quad (2)$$

配电公司竞价购电的目标是运营收益最大化。配电公司的收益由向供电专营区终端用户的售电业务取得，而其运营成本则包括竞价购电成本和配电系统运营成本<sup>[22]</sup>。不计配电公司的竞价购电成本，其边际运营收益描述为

$$s(q_D) = q_D s_0 + s_1 P_D \quad 0 \leq P_D \leq \bar{P}_D \quad (3)$$

式中： $P_D$ 为配电公司的供电功率； $q_D$ 为配电公司

在不计购电成本时边际运营收益的特性参数，是一个大于零的实数，在相同供电功率条件下， $q_D$  越大，配电公司在不计购电成本时的边际运营收益越大，反映了配电公司的边际运营收益特性； $s_0$ 、 $s_1$  分别为在不计购电成本时边际运营收益的常数项系数与一次项系数， $s_0 > 0$ ， $s_1 < 0$ ； $\bar{P}_D$  为配电公司的购买上限。

这样，不计配电公司的竞价购电成本，当配电公司的供电功率为  $P_D$  时，运营收益为

$$S(P_D) = (q_D s_0 + 0.5 s_1 P_D) P_D \quad 0 \leq P_D \leq \bar{P}_D \quad (4)$$

大用户竞价购电的目标是电能效用最大化，将大用户的电能边际效用描述如下：

$$b(P_C) = q_C b_0 + b_1 P_C \quad 0 \leq P_C \leq \bar{P}_C \quad (5)$$

式中： $P_C$  为大用户的需求功率； $q_C$  为大用户的电能边际效用特性参数，是一个大于零的实数，在相同需求功率条件下， $q_C$  越大，则大用户的电能边际效用越大，反映了大用户的电能边际效用特性； $b_0$ 、 $b_1$  分别为电能边际效用的常数项系数与一次项系数， $b_0 > 0$ ， $b_1 < 0$ ； $\bar{P}_C$  为大用户的最大需求功率。

这样，当大用户需求功率为  $P_C$  时，电能效用为

$$B(P_C) = (q_C b_0 + 0.5 b_1 P_C) P_C \quad 0 \leq P_C \leq \bar{P}_C \quad (6)$$

## 2.2 市场调度模型

采用  $D$ 、 $C$ 、 $G$  分别表示参与市场竞争的配电公司集合、大用户集合及发电公司集合，采用  $I$ 、 $J$ 、 $K$  分别表示配电公司总数、大用户总数和发电公司总数。

假设配电公司不计购电成本时，边际运营收益的常数项系数  $s_0$  与一次项系数  $s_1$ 、大用户电能边际效用的常数项系数  $b_0$  与一次项系数  $b_1$  及发电公司边际发电成本的常数项系数  $c_0$  与一次项系数  $c_1$  由市场运营部门公布，均为公共信息；每个配电公司的配电功率限制、大用户的需求功率限制及发电公司的出力限制也都是公共信息；在某一投标时段内，配电公司  $i \in D$  不计购电成本时边际运营收益的特性参数  $q_{D,i}$ 、大用户  $j \in C$  的电能边际效用特性参数  $q_{C,j}$  及发电公司  $k \in G$  的边际发电成本特性参数  $q_{G,k}$  均为私人信息。

与文献[16]类似，假设市场定价者根据有关历史数据认为配电公司不计购电成本时的边际运营收益特性参数  $q_{D,i}$  服从具有下限  $\underline{q}_{D,i}$ 、上限  $\bar{q}_{D,i}$  的概率分布、大用户的边际电能效用特性参数  $q_{C,j}$  服从具有下限  $\underline{q}_{C,j}$ 、上限  $\bar{q}_{C,j}$  的概率分布、发电公司的边

际发电成本特性参数  $q_{G,k}$  服从具有下限  $\underline{q}_{G,k}$ 、上限  $\bar{q}_{G,k}$  的概率分布，并事先向所有竞价市场成员公布这些估计信息。

不仅考虑发电公司投标，而且考虑用电侧的配电公司和大用户投标，同时计及输电容量约束，单时段市场调度模型描述如下。

目标函数为

$$\max_{P_D, P_C, P_G} \sum_D S(P_D) + \sum_C B(P_C) - \sum_G C(P_G) \quad (7)$$

约束条件为

(1) 供需平衡约束。

$$\mathbf{e}^T (\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D - \mathbf{P}_C) = 0: \mathbf{I} \quad (8)$$

式中： $\mathbf{e}$  为向量，其所有元素为 1； $\mathbf{P}_G$  为发电公司出力向量； $\mathbf{P}_D$  为配电公司供电功率向量； $\mathbf{P}_C$  为大用户需求功率向量； $\mathbf{I}$  为该约束对应下的影子电价。

(2) 输电线路容量约束。

$$\mathbf{T}(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D - \mathbf{P}_C) \leq \bar{\mathbf{P}}_l: \mathbf{m}_l \quad (9)$$

式中： $\mathbf{T}$  为发电公司出力与支路潮流灵敏度矩阵<sup>[23]</sup>； $\bar{\mathbf{P}}_l$  为支路有功潮流约束； $\mathbf{m}_l$  为支路有功潮流约束下的影子电价向量。

(3) 配电公司供电功率约束。

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{P}_D \leq \bar{\mathbf{P}}_D: \underline{\mathbf{m}}_D, \bar{\mathbf{m}}_D \quad (10)$$

式中： $\underline{\mathbf{m}}_D$ 、 $\bar{\mathbf{m}}_D$  为配电公司供电功率约束下的影子电价向量。

(4) 大用户需求功率约束。

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{P}_C \leq \bar{\mathbf{P}}_C: \underline{\mathbf{m}}_C, \bar{\mathbf{m}}_C \quad (11)$$

式中： $\underline{\mathbf{m}}_C$ 、 $\bar{\mathbf{m}}_C$  为大用户需求约束下的影子电价向量。

(5) 发电公司出力约束。

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{P}_G \leq \bar{\mathbf{P}}_G: \underline{\mathbf{m}}_G, \bar{\mathbf{m}}_G \quad (12)$$

式中： $\underline{\mathbf{m}}_G$ 、 $\bar{\mathbf{m}}_G$  发电公司出力约束下的影子电价向量。

根据节点边际电价理论<sup>[20]</sup>，节点处边际电价为

$$\mathbf{r}_{\text{node}} = -\mathbf{I} - \sum_{l=1}^L \mathbf{m}_l \mathbf{T}_{l,\text{node}} \quad (13)$$

式中： $\text{node}$  为网络节点； $L$  为网络支路总数； $\mathbf{r}_{\text{node}}$  为节点的边际电价。

发电公司所在节点的边际电价可有如下形式：

$$\mathbf{r}_k = q_{G,k} c_0 + c_1 P_{G,k} - \underline{\mathbf{m}}_{G,k} + \bar{\mathbf{m}}_{G,k} \quad k \in G \quad (14)$$

配电公司所在节点的边际电价可有如下形式：

$$\mathbf{r}_i = q_{D,i} s_0 + s_1 P_{D,i} - \underline{\mathbf{m}}_{D,i} + \bar{\mathbf{m}}_{D,i} \quad i \in D \quad (15)$$

大用户所在节点的边际电价可有如下形式：



$$r_j = q_{C,j} b_0 + b_1 P_{C,j} - \underline{m}_{C,j} + \bar{m}_{C,j} \quad j \in C \quad (16)$$

### 2.3 电力定价公式

考虑到激励相容特性和市场成员个人理性要求, 本文给出的输配分开电力市场竞价机制对竞价市场各方参与者的结算不同于按 PAB、MCP 或 LMP 的结算方式, 而分为电能费用和信息补偿 2 部分。市场定价者制定的每个参与竞价上网的发电公司在该竞标时段内得到的支付为

$$\Gamma_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) = r_k(\hat{q}_{G,k}) P_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) + t_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) \quad (17)$$

式中:  $P_{G,k}(\hat{q}_{G,k})$ 、 $r_k(\hat{q}_{G,k})$  分别为该竞标时段内发电公司  $k \in G$  报价为  $\hat{q}_{G,k}$  时获得的上网电量和该发电公司所在节点的节点边际电价, 按每个市场成员的实际报价由式(7)~(12)的市场调度模型确定;  $t_{G,k}(\hat{q}_{G,k})$  为发电公司  $k \in G$  报价为  $\hat{q}_{G,k}$  时获得的信息补偿, 由式(25)确定。

每个参与竞价购电的配电公司在该竞标时段内得到的支付为

$$\Gamma_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) = -r_i(\hat{q}_{D,i}) P_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) + t_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) \quad (18)$$

式中:  $r_i(\hat{q}_{D,i})$ 、 $P_{D,i}(\hat{q}_{D,i})$  分别为该竞标时段内配电公司  $i \in D$  报价为  $\hat{q}_{D,i}$  时获得的下网电量和该配电公司所在节点的节点边际电价, 按每个市场成员的实际报价由式(7)~(12)的市场调度模型确定;  $t_{D,i}(\hat{q}_{D,i})$  是配电公司  $i \in D$  报价为  $\hat{q}_{D,i}$  时获得的信息补偿, 由式(31)确定。

每个参与竞价购电的大用户在该竞标时段内得到的支付为

$$\Gamma_{C,j}(\hat{q}_{C,j}) = -r_j(\hat{q}_{C,j}) P_{C,j}(\hat{q}_{C,j}) + t_{C,j}(\hat{q}_{C,j}) \quad (19)$$

式中:  $P_{C,j}(\hat{q}_{C,j})$ 、 $r_j(\hat{q}_{C,j})$  分别为该竞标时段内大用户  $j \in C$  报价为  $\hat{q}_{C,j}$  时获得的下网电量和该大用户所在节点的节点边际电价, 按每个市场成员的实际报价由式(7)~(12)的市场调度模型确定;  $t_{C,j}(\hat{q}_{C,j})$  是大用户  $j \in C$  报价为  $\hat{q}_{C,j}$  时获得的信息补偿, 由式(32)确定。

### 2.4 激励相容条件的引入

本节由激励相容条件给出信息补偿项  $t_{G,k}(\hat{q}_{G,k})$ 、 $t_{D,i}(\hat{q}_{D,i})$  和  $t_{C,j}(\hat{q}_{C,j})$  的具体表达式。

(1) 发电公司  $k \in G$  报价为  $\hat{q}_{G,k}$  的目标是在该竞标时段内期望净利润  $p_{G,k}$  最大。

$$\max p_{G,k}(\hat{q}_{G,k}, q_{G,k}) = t_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) + \tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) \cdot \{\tilde{r}_k(\hat{q}_{G,k}) - [q_{G,k} c_0 + 0.5 c_1 \tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k})]\} \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \quad q_{G,k} \leq \hat{q}_{G,k} \leq \bar{q}_{G,k} \quad (21)$$

式中:  $\tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k})$ 、 $\tilde{r}_k(\hat{q}_{G,k})$  分别为在该竞标时段内发电公司  $k \in G$  报价为  $\hat{q}_{G,k}$  而其他市场成员报价取各自成本范围内的每一个可能值时的期望平均上网电量和该发电公司所在节点的期望平均节点边际电价。

激励相容条件要求发电公司  $k \in G$  以真实特性参数  $q_{G,k}$  报价时的期望净利润最大, 即当  $\hat{q}_{G,k} = q_{G,k}$  时,  $\partial p_{G,k}(\hat{q}_{G,k}, q_{G,k}) / \partial \hat{q}_{G,k} = 0$ 。可推得

$$\tilde{P}'_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) \{\tilde{r}_k(\hat{q}_{G,k}) - [q_{G,k} c_0 + c_1 \tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k})]\} + \tilde{r}'_k(\hat{q}_{G,k}) \tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) + t'_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) \Big|_{\hat{q}_{G,k}=q_{G,k}} = 0 \quad (22)$$

不考虑发电公司  $k$  出力约束下的影子电价  $\underline{m}_{G,k}$  和  $\bar{m}_{G,k}$ , 则  $\tilde{r}_k(q_{G,k}) = q_{G,k} c_0 + c_1 \tilde{P}_{G,k}(q_{G,k})$ , 故

$$t'_{G,k}(q_{G,k}) = -\tilde{r}'_k(q_{G,k}) \tilde{P}_{G,k}(q_{G,k}) \quad (23)$$

式(23)两边分别从  $q_{G,k}$  到上限  $\bar{q}_{G,k}$  积分, 有:

$$t_{G,k}(\bar{q}_{G,k}) - t_{G,k}(q_{G,k}) = -\int_{q_{G,k}}^{\bar{q}_{G,k}} \tilde{P}_{G,k}(x) d\tilde{r}_k(x) \quad (24)$$

令  $t_{G,k}(\bar{q}_{G,k}) = K_{G,k}$ , 以  $\hat{q}_{G,k}$  代替  $q_{G,k}$ , 得

$$t_{G,k}(\hat{q}_{G,k}) = \int_{\hat{q}_{G,k}}^{\bar{q}_{G,k}} \tilde{P}_{G,k}(x) d\tilde{r}_k(x) + K_{G,k} \quad (25)$$

(2) 配电公司  $i \in D$  报价为  $\hat{q}_{D,i}$  的目标是在该竞标时段内期望净收益  $p_{D,i}$  最大。

$$\max p_{D,i}(\hat{q}_{D,i}, q_{D,i}) = t_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) + \tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) \cdot \{[q_{D,i} s_0 + 0.5 s_1 \tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i})] - \tilde{r}_i(\hat{q}_{D,i})\} \quad (26)$$

$$\text{s.t.} \quad q_{D,i} \leq \hat{q}_{D,i} \leq \bar{q}_{D,i} \quad (27)$$

式中:  $\tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i})$ 、 $\tilde{r}_i(\hat{q}_{D,i})$  分别表示在该竞标时段内配电公司  $i \in D$  报价为  $\hat{q}_{D,i}$  而其他市场成员报价取各自成本范围内的每一个可能值时的期望平均下网电量和该配电公司所在节点的期望平均节点边际电价。

激励相容条件要求配电公司  $i \in D$  以真实特性参数  $q_{D,i}$  报价时的期望净收益最大, 即当  $\hat{q}_{D,i} = q_{D,i}$  时,  $\partial p_{D,i}(\hat{q}_{D,i}, q_{D,i}) / \partial \hat{q}_{D,i} = 0$ 。可推得

$$\tilde{P}'_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) \cdot \{[q_{D,i} s_0 + s_1 \tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i})] - \tilde{r}_i(\hat{q}_{D,i})\} - \tilde{r}'_i(\hat{q}_{D,i}) \tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) + t'_{D,i}(\hat{q}_{D,i}) \Big|_{\hat{q}_{D,i}=q_{D,i}} = 0 \quad (28)$$

不考虑配电公司  $i$  配电能力约束下的影子电价  $\underline{m}_{D,i}$  和  $\bar{m}_{D,i}$ , 则  $\tilde{r}_i(q_{D,i}) = q_{D,i} s_0 + s_1 \tilde{P}_{D,i}(q_{D,i})$ , 故

$$t'_{D,i}(q_{D,i}) = \tilde{r}'_i(q_{D,i}) \tilde{P}_{D,i}(q_{D,i}) \quad (29)$$

上式两边分别从下限  $q_{D,i}$  到  $q_{D,i}$  积分, 有:

$$t_{D,i}(q_{D,i}) - t_{D,i}(q_{D,i}) = \int_{q_{D,i}}^{q_{D,i}} \tilde{P}_{D,i}(x) d\tilde{r}_i(x) \quad (30)$$

令  $t_{D,i}(\bar{q}_{D,i}) = K_{D,i}$ ，以  $\bar{q}_{D,i}$  代替  $q_{D,i}$ ，得

$$t_{D,i}(\bar{q}_{D,i}) = \int_{q_{D,i}}^{\bar{q}_{D,i}} \tilde{P}_{D,i}(x) d\tilde{r}_i(x) + K_{D,i} \quad (31)$$

(3) 大用户的信息补偿项同配电公司信息补偿项具有相同的形式，大用户的信息补偿项为

$$t_{C,j}(\bar{q}_{C,j}) = \int_{q_{C,j}}^{\bar{q}_{C,j}} \tilde{P}_{C,j}(x) d\tilde{r}_j(x) + K_{C,j} \quad (32)$$

$$K_{C,j} = t_{C,j}(q_{C,j}) \quad (33)$$

式中： $\tilde{P}_{C,j}(\bar{q}_{C,j})$  和  $\tilde{r}_j(\bar{q}_{C,j})$  分别表示在该投标时段内大用户  $j \in C$  报价为  $\bar{q}_{C,j}$  而其他市场成员报价取各自成本范围内的每一个可能值时的期望平均下网电量和该大用户所在节点的期望平均边际电价。

该补偿项的推导过程与对配电公司信息补偿项的推导过程相同，为节约篇幅，本文从略。

## 2.5 个人理性条件的融入

本节由市场成员的个人理性条件给出信息补偿项参数  $K_{G,k}$ 、 $K_{D,i}$  和  $K_{C,j}$  的具体取值。

个人理性条件要求代理人在委托人设计的机制下得到的期望净效益必须不小于该代理人的机会成本。对市场成员而言，其不参与本文竞价机制能获得的最大收益，称作市场成员在该竞价机制下的机会成本<sup>[14-15]</sup>。从而，市场成员的个人理性条件为参与本文竞价机制的收益不少于其机会成本。由微观经济学原理及节点边际电价理论<sup>[20]</sup>可知，完全竞争市场下的节点边际电价能够提供正确的电价信号，反映短期供求状态，并能使市场成员得到正常收益，因而本文取市场成员在本文机制下的机会成本为其在完全竞争市场下的合理收益。

(1) 发电公司。当发电公司报价为  $\bar{q}_{G,k}$  时，发电公司的个人理性条件要求它参与本文竞价机制时获得的上网发电收入不应少于  $r_k(\bar{q}_{G,k})P_{G,k}(\bar{q}_{G,k})$ ，结合电力定价公式可知发电公司的个人理性条件要求其信息补偿项不小于零为

$$\int_{q_{G,k}}^{\bar{q}_{G,k}} \tilde{P}_{G,k}(x) d\tilde{r}_k(x) + K_{G,k} \geq 0 \quad (34)$$

由于发电公司报价越高，其获得的期望下网电量越少，而所在节点的节点边际电价越高，故  $\tilde{P}_{G,k}(\cdot)$  是单调递减函数， $\tilde{r}_k(\cdot)$  是单调递增函数，由微分中值定理，可将式(25)化为

$$\tilde{P}_{G,k}(x)[\tilde{r}_k(\bar{q}_{G,k}) - \tilde{r}_k(q_{G,k})] + K_{G,k} \geq 0 \quad (35)$$

式中： $x$  为  $\bar{q}_{G,k}$  与  $q_{G,k}$  之间的一个数。

式(35)第一项恒不小于零，而  $K_{G,k}$  表示报价为  $\bar{q}_{G,k}$  时的信息补偿不应当为负值<sup>[15]</sup>，故本文将发电

公司信息补偿参数  $K_{G,k}$  取为零。

(2) 配电公司。当配电公司报价为  $\bar{q}_{D,i}$  时，配电公司的个人理性条件要求它参与本文竞价机制时支付的下网购电费用不应多于  $r_i(\bar{q}_{D,i})P_{D,i}(\bar{q}_{D,i})$ ，结合电力定价公式可知配电公司的个人理性条件要求信息补偿项不小于零为

$$\int_{q_{D,i}}^{\bar{q}_{D,i}} \tilde{P}_{D,i}(x) d\tilde{r}_i(x) + K_{D,i} \geq 0 \quad (36)$$

由于配电公司报价越高，其获得的期望下网电量越多，而所在节点的节点边际电价越高，故  $\tilde{P}_{D,i}(\cdot)$  和  $\tilde{r}_i(\cdot)$  均是单调递增函数，由微分中值定理，可将式(31)化为

$$\tilde{P}_{D,i}(z)[\tilde{r}_i(\bar{q}_{D,i}) - \tilde{r}_i(q_{D,i})] + K_{D,i} \geq 0 \quad (37)$$

式中： $z$  为  $\bar{q}_{D,i}$  与  $q_{D,i}$  之间的一个数。

式(37)第 1 项恒不小于零，而  $K_{D,i}$  表示报价为  $q_{D,i}$  时的信息补偿，不应当为负值，故本文将配电公司信息补偿参数  $K_{D,i}$  取为零。

(3) 大用户信息补偿项参数  $K_{C,j}$  也取为零，具体分析过程同上，为节约篇幅，本文从略。

## 3 算例分析

采用修改的 IEEE 5 机 14 节点电力系统验证本文输配分开市场竞价机制的有效性，移去 2、3、6、10、11 等 5 个节点的负荷，修改后的电力系统如图 1 所示。发电机数据和负荷数据被市场竞标数据替代，不计输电线路电阻，不考虑无功功率。

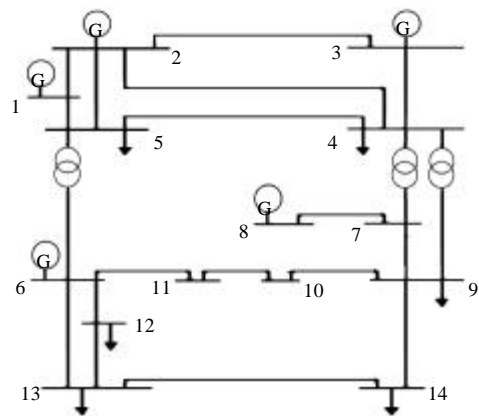


图 1 修改的 IEEE 5 机 14 节点电力系统

Fig. 1 Revised 5-generator 14-bus power system of IEEE

研究的输配分开电力市场中有 5 家发电公司参与竞价上网，3 家配电公司和 3 家大用户参与竞价购电，取  $c_0=17.50$  元/(MW·h)， $c_1=1.05$  元/(MW<sup>2</sup>·h)； $s_0=120.0$  元/(MW·h)， $s_1=-0.30$  元/(MW<sup>2</sup>·h)； $b_0=115.0$

元/(MW·h),  $b_1=-0.40$  元/(MW<sup>2</sup>·h)。

假设市场定价者和所有市场参与者(发电公司、配电公司和大用户)的真实运营特性参数服从均匀分布。各发电公司出力限制、边际发电成本特性参数真实值及估计的上下限列于表 1; 各配电公司配电能力、不计购电成本时的边际运营收益特性参数真实值及估计的上下限列于表 2; 各大用户需求功率上限、电能边际效用特性参数真实值及估计的上下限列于表 3。采用 Monte—Carlo 模拟法获得  $\tilde{P}_{G,k}(\hat{q}_{G,k})$ 、 $\tilde{P}_{D,i}(\hat{q}_{D,i})$  及  $\tilde{P}_{C,j}(\hat{q}_{C,j})$ , 抽样次数均为 5000。

表 1 发电公司出力限制、真实特性参数和估计的特性参数  
Tab. 1 Output limits, true and estimated characteristic parameters of generation companies

发电公司 (所在节点)	真实特性参数	估计的特性参数		最大出力/MW
		下限	上限	
1	0.89	0.83	1.13	105.0
2	0.71	0.66	0.95	60.0
3	0.86	0.81	1.10	90.0
6	0.93	0.85	1.15	85.0
8	0.90	0.86	1.15	90.0

表 2 配电公司购买上限、真实的特性参数和估计的特性参数

Tab. 2 Buying limits, true and estimated characteristic parameters of distribution companies

配电公司 (所在节点)	真实特性参数	估计的特性参数		购买上限/MW
		下限	上限	
12	0.90	0.80	0.93	95.0
13	0.93	0.86	0.97	100.0
14	0.87	0.81	0.92	95.0

表 3 大用户需求功率上限、真实的特性参数和估计的特性参数

Tab. 3 Demand limits, true and estimated characteristic parameters of large consumers

大用户 (所在节点)	真实特性参数	估计的特性参数		最大需求功率/MW
		下限	上限	
4	0.83	0.79	0.91	80.0
5	0.79	0.73	0.89	90.0
9	0.76	0.70	0.83	65.0

图 2 和图 3 分别给出了以下两种情况下发电公司 1(该发电公司位于节点 1)和发电公司 2(该发电公司位于节点 2)的期望发电利润随报价变化的曲线:  
①无输电约束, 系统所有支路的输电容量均不受限制;  
②有输电约束, 支路 5—6 的输电容量为 100MW, 其余支路的输电容量不受限制。在上述两种情况下, 发电公司 1 的出力约束  $\bar{P}_{G,1}$  均没有发生作用而发电公司 2 的出力约束  $\bar{P}_{G,2}$  均发生作用。

由图 2 可见, 无论是否存在输电约束, 发电公

司 1 的最优报价都是真实特性参数 0.89。由图 3 可见, 当无输电约束时, 发电公司 2 的报价在 0.66~0.85 能获得最大利润; 当有输电约束时, 发电公司 2 的报价在 0.66~0.73 能获得最大利润。激励原理表明, 说谎不能带来更多利润时, 参与者会说真话且在暗标拍卖情况下, 发电公司的策略性报价还会带来减少利润的风险, 因而发电公司会报真实成本<sup>[14]</sup>。这说明本文给出的竞价机制对发电公司具有激励性, 能够使理性发电公司显露真实信息。

对配电公司和大用户的仿真计算, 得到了类似的仿真结果, 即本文给出的竞价机制对配电公司和大用户同样具有激励性, 为节约篇幅, 在此从略。

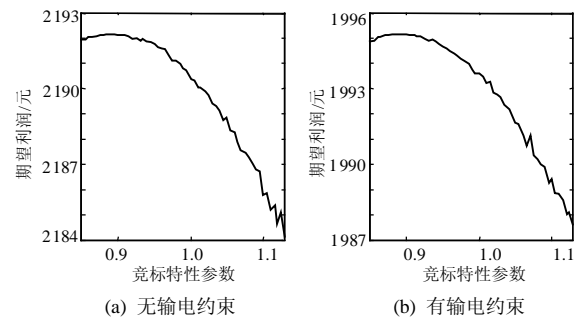


图 2 发电公司 1 的报价及期望利润曲线

Fig. 2 Generation company 1's bid and expected profit

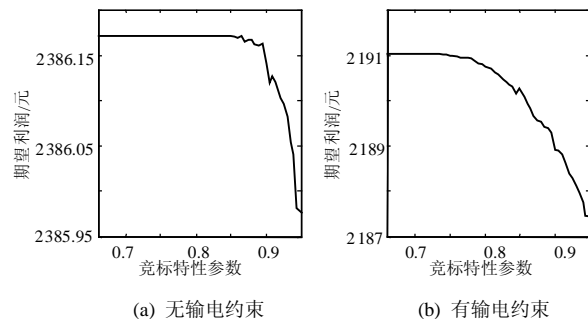


图 3 发电公司 2 的报价及期望利润曲线

Fig. 3 Generation company 2's bid and expected profit

### 4 结论

探讨了输配分开电力市场的激励性竞价机制问题, 应用机制设计理论, 给出了一种输配分开电力市场的激励性竞价机制, 实现了对所有市场成员(发电公司、配电公司和大用户)的激励相容特性, 满足了市场成员的个人理性要求, 同时计及了输电容量约束。理论推导和算例仿真结果表明: 无论是否考虑输电约束, 本文给出的竞价机制对所有竞价市场成员均具有良好的激励性, 能够使理性的市场成员显露真实信息, 从而实现了市场的有效调度。

## 参考文献

- [1] 姚建刚, 秦红三, 王路, 等. 电力市场中输电与配电分离的方略初探[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 70-73.  
Yao Jiangan, Qin Hongsan, Wang Lu, et al. A preliminary study on application of separating power transmission and distribution in electricity market[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 70-73(in Chinese).
- [2] 王锡凡. 分段竞价的电力市场[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 1-6.  
Wang Xifan. Block bidding model based power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 1-6(in Chinese).
- [3] 丁军威, 夏清, 胡咏, 等. 发电侧逐步市场化的竞价新模式[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 10-15.  
Ding Junwei, Xia Qing, Hu Yang, et al. A new model for gradually establishing competitive generation market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 10-15(in Chinese).
- [4] 姚建刚, 唐捷, 李西泉, 等. 发电侧电力市场竞价交易模式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 78-83.  
Yao Jiangan, Tang Jie, Li Xiquan, et al. Research on bidding model in a generation-side power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 78-83(in Chinese).
- [5] 耿建, 王锡凡, 丁晓莺, 等. 分段竞价与分时竞价的比较[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 22-27.  
Geng Jian, Wang Xifan, Ding Xiaoying, et al. Models of block bidding in power market and comparisons with hourly bidding[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 22-27(in Chinese).
- [6] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 边际电价结算和发电商报价结算的经济分析[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 14-17.  
Wang Yanling, Zhang Lizi, Yang Yihan. An economical analysis of competition mechanisms for system-margining-pricing and pay-as-bid[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 14-17(in Chinese).
- [7] 吴杰康, 任震, 汪穗峰, 等. 电力市场中的委托交易及其数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 119-124.  
Wu Jiekang, Ren Zhen, Wang Suifeng, et al. Trust transactions and its models in electricity markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 119-124(in Chinese).
- [8] 黎灿兵, 康重庆, 夏清. 区域电力市场竞价交易机制的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 34-39.  
Li Canbing, Kang Chongqing, Xia Qing. Study on trading mechanism of regional electricity markets[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 34-39(in Chinese).
- [9] 周佃民, 翟桥柱, 管晓宏. 电力市场结算规则对交易结果的影响[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 38-41.  
Zhou Dianmin, Zhai Qiaozhu, Guan Xiaohong. Influences of market settlement on transaction result in electricity market[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 38-41(in Chinese).
- [10] 张晓东, 高波. 基于供给函数均衡模型的区域电力现货市场模拟分析[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 80-84.  
Zhang Xiaodong, Gao Bo. Simulation of area spot market based on supply function equilibrium model[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 80-84(in Chinese).
- [11] 宋依群. 电力市场的多代理模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 73-79.  
Song Yiqun. Multi-agent model of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 73-79(in Chinese).
- [12] 张少华, 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 52-56.  
Zhang Shaohua, Fang Yong, Li Yuzeng. Incentive mechanism design in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 52-56(in Chinese).
- [13] Silva C, Wollenberg B F, Zheng C Z. Application of mechanism design to electric power markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 862-869.
- [14] 方勇, 李渝曾. 合理回收容量成本的激励性电力竞价机制的建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 18-23.  
Fang Yong, Li Yuzeng. A research on modeling the incentive electricity bidding mechanism of reasonable capacity cost recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 24(1): 18-23(in Chinese).
- [15] 蒋东荣, 李群湛, 刘学军. 考虑电力合约的激励性市场机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 57-63.  
Jiang Dongrong, Li Qunzhan, Liu Xuejun. The mechanism design to electricity markets considering contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 57-63(in Chinese).
- [16] 谢俊, 陈星莺. 激励相容的输配分开电力市场竞价机制初探[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 60-64.  
Xie Jun, Chen Xingying. A preliminary study on incentive compatible bidding mechanism for transmission and distribution separated electricity markets[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 60-64(in Chinese).
- [17] Guan Xiaohong, Ho Yuchi, David L P. Gaming and price spikes in electric power markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 402-408.
- [18] Kahn Alfred E, Cramton Peter C, Porter Robert H, et al. Uniform pricing or pay-as-bid pricing: a dilemma for California and beyond[J]. The Electricity Journal, 2001, 14(6): 70-79.
- [19] 李庆华, 邹斌. 节点电价下输电容量限制与发电厂市场力的仿真分析[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2005, 4(3): 270-275.  
Li Qinghua, Zhou Bin. Simulation of transmission capacities limits and suppliers' market power with node price[J]. Journal of Southern Yangtze University (Natural Science Edition), 2005, 4(3): 270-275(in Chinese).
- [20] Schweppe F C, Caramanis M C, Tabors R D, et al. Spot pricing of electricity[M]. Boston (MA): Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [21] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海: 上海人民出版社, 1996.
- [22] 陈星莺. 输电网开放电力市场交易及供电公司运营策略理论的研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.  
Chen Xingying. Research on the trading of the transmission opening-based market and the running strategy of the district power company[D]. Nanjing: Southeast University, 2002(in Chinese).
- [23] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2006-05-01。

作者简介:

谢俊(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场, xjhu@sohu.com;

陈星莺(1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统经济运行分析与控制、输配电自动化及电力市场等方面的研究;

廖迎春(1975—), 讲师, 研究方向为电力市场与配电系统自动化;

刘皓明(1977—), 博士, 副教授, 研究方向为电力系统动态分析与控制、电力市场。

(编辑 王剑乔)