

# 无套利分析理论在区域电力市场中的应用

吴 玮<sup>1</sup>, 周建中<sup>1</sup>, 朱承军<sup>1,2</sup>, 杨俊杰<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北省武汉市 430074)

(2. 中国长江三峡工程开发总公司, 湖北省宜昌市 443002)

**摘要:** 随着我国区域电力市场的逐步形成, 区域电力市场中的核心电价机制在资源配置中起着基础性的作用。文中针对目前区域电力市场内各省(市)电价的差异, 引入金融学中的无套利分析理论, 提出用无套利均衡分析的方法研究区域电力市场内的均衡电价, 并建立了区域市场内无套利均衡数学模型。通过对国内某一区域电力市场的仿真计算, 验证了该方法是合理、可行的; 提出的模型能够使区域电力市场内各省(市)的电价趋于均衡状态, 维持区域电力市场内参与者竞争的公平性。

**关键词:** 区域电力市场; 发电商; 套利行为; 无套利分析; 均衡电价

**中图分类号:** TM73; F123.9

## 0 引言

当前, 国内电力市场有了很大的发展, 区域电力市场正逐步形成, 华北和华东地区已经初步形成区域市场的局面, 华中地区也在推进形成试点。由于区域内各省(市)的电能资源时空分布不均, 经济发展程度不同, 形成了区域电力市场内各省(市)电价的差异<sup>[1~3]</sup>。市场机制特别是其核心电价机制在资源配置中起着基础性的作用。在区域电力市场中, 发电商和用户根据电价调整生产和消费决策, 使得供需实时过程趋于平衡<sup>[4]</sup>。由于现货市场的价格信息缺乏预测性, 区域市场内各省(市)电能的交易仍然采用双边合同。套利者(arbitrageurs)往往会根据各省(市)电价的波动进行套利行为, 使得市场趋于一种平衡状态; 套利(arbitrage)是一种在净投资为 0 的前提下获取无风险利润的活动, 而不是投机行为<sup>[5]</sup>。由于套利机会的出现是短暂的, 为了降低风险, 区域电力市场中的参与者力图使电能价格趋于一定的方向, 以减少套利者的套利机会。一旦区域电力市场达到均衡状态, 套利机会即消失。

由于电能商品有不可存储的特殊性, 供需具有实时平衡特征, 将现代金融学中的无套利分析理论应用到电力市场中将不同于金融市场, 必须遵循以下原则: ①找到一个政策能导致套利; ②制定无套利的合同价格<sup>[6]</sup>。套利行为对电力市场和套利者来说

都是很有利的, 对于套利者, 套利可以带来低风险的支付; 对于区域电力市场来说, 套利行为使得市场中的电价趋于均衡, 维持市场的流通性, 提供无套利价格机制, 使得参与者公平竞争。

本文针对我国区域电力市场中存在的电价差异, 提出用无套利分析理论解决发电商面临的区域内各省(市)电价差异问题, 使得区域内各省(市)的电价达到无套利均衡, 进而优化其资源配置, 减少套利机会, 降低风险。无套利分析理论在区域电力市场中的应用对规范电力市场行为、防范和控制总体市场风险具有指导作用。

## 1 无套利分析理论的描述

### 1.1 无套利分析原理

20 世纪 50 年代后期, F. Modigliani 和 R. Miller 在研究金融市场中, 提出无套利(no-arbitrage)均衡分析方法<sup>[7]</sup>。当市场处于不均衡状态时, 价格偏离了由供需关系所决定的价值, 此时就出现了无风险套利的机会。而套利力量将会推动市场重建均衡, 市场一旦恢复均衡, 套利机会即消失。在市场均衡时无套利机会, 这就是无套利均衡分析的理论依据。市场的效率越高, 重建均衡的速度就越快。在金融市场中, 各个市场参与者想法各异, 尤其是个人的风险偏好很不一样, 但是, 只要出现套利机会, 所有的市场参与者就都会抓住机会去套取无风险利润。而套利机会消除后所确定的均衡价格, 就与市场参与者的风险无关。无套利均衡分析抓住了金融市场均衡的最为本质的特性, 即市场参与者能够通过准确地预期金融资产及其市场价值度量的

未来发展状况(如价格、利率等),卖掉收益率低的金融资产,买进收益率高的金融资产,进行套利。而套利行为会使市场上所有的金融资产的收益率最终趋向一致,从而建立无套利均衡。因此,基于无套利分析原理,通过求解市场各参与者在金融资产交易中的最优决策过程,可使未来市场不存在套利机会,达到多边交易的均衡<sup>[8,9]</sup>。

## 1.2 基本定理

考虑资本市场,它有  $n$  个资产和  $m$  个可能的自然状态  $s_1, s_2, \dots, s_m$ , 资产在交易初始日期执行,收益在交易期末实现,在交易期中不发生任何交易。对投资者来说,资产  $i$  的当前购买价格是  $p_i^a$ , 出售价格是  $p_i^b$ , 假设出售价格略低于购买价格。

如果至少存在某个资产的出售价格  $p_i^b > 0$ , 存在买卖价格之差(即所谓的价差), 每购买单位资产  $i$  的交易费用率是  $\lambda_i^a$ , 出售单位资产  $i$  的交易费用率是  $\lambda_i^b$ , 这里  $0 \leq \lambda_i^a, \lambda_i^b \leq 1, i=1, 2, \dots, n$ ; 设资产  $i$  在状态  $s_j$  的收益为  $r_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ , 这样,  $\mathbf{P}^a = (p_1^a, p_2^a, \dots, p_n^a)^T$  为买价向量,  $\mathbf{P}^b = (p_1^b, p_2^b, \dots, p_n^b)^T$  为卖价向量,  $\boldsymbol{\lambda}^a = (\lambda_1^a, \lambda_2^a, \dots, \lambda_n^a)^T$  为购买各资产时的交易费用率向量,  $\boldsymbol{\lambda}^b = (\lambda_1^b, \lambda_2^b, \dots, \lambda_n^b)^T$  为出售各资产时的交易费用率向量,  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$  为收益矩阵, 市场完全可以用五元组  $\{\mathbf{P}^a, \mathbf{P}^b, \mathbf{R}, \boldsymbol{\lambda}^a, \boldsymbol{\lambda}^b\}$  描述。调整组合向量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 其中  $x_i$  是投资者对资产  $i$  的调整量(数量)。如果  $x_i \geq 0$ , 意味着投资者买进  $x_i$ ; 若  $x_i < 0$ , 则投资者卖出  $x_i$ 。

令

$$r_i(x_i) = \begin{cases} (1 + \lambda_i^a) p_i^a x_i & x_i > 0 \\ (1 - \lambda_i^b) p_i^b x_i & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, n$ 。

于是,  $r(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n r_i(x_i)$  为总的成本, 收益向量为  $\mathbf{R}^T \mathbf{x}$ 。

**定理 1** 市场  $\{\mathbf{P}^a, \mathbf{P}^b, \mathbf{R}, \boldsymbol{\lambda}^a, \boldsymbol{\lambda}^b\}$  是无套利的, 当且仅当如下优化问题的最优值为 0:

$$\begin{cases} \min r(\mathbf{x}) \\ \text{s. t. } \mathbf{x}^T \mathbf{R} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

利用定理 1 的充要条件, 从理论上可判断市场中是否存在套利机会。但从实践的角度, 我们需要考虑能否在很短的时间内通过计算做出判断。一旦市场出现套利机会, 所有的市场参与者都会抓住套利机会套取无风险利润, 而这种套利力量将会推动市场重建均衡, 市场一旦恢复均衡, 套利机会就消失。市场的效率越高, 重建均衡的速度就越快。

## 2 区域电力市场中的套利机会

由于电能不可存储给电力市场带来的特殊性, 电能交易必须实时平衡, 把无套利分析理论用于区域电力市场中, 首先要考虑区域电力市场内是否存在套利机会。目前, 我国区域电力市场中存在 3 种短期电能交易市场: 双边合同市场、日竞价市场和实时平衡市场。双边合同市场是通过买卖双方直接进行电能交易; 日竞价市场和实时平衡市场是发电商和用户分别向电能交易中心(pool)申报, 经过市场出清后得到交易方案<sup>[10]</sup>。对于竞争完全开放的区域电力市场, 市场参与者充分竞争使得自身的收益最大。

在区域市场中的各参与者至少有两方签订合同交易, 能够自由地购买、出售电能, 因而存在互相交易的买卖关系。在交易初期, 为了规避实时市场中的风险, 发电商和其他参与者签订了一定数量的交易合同。假定合同中的一些重要参数为: 合同中的交易电量  $Q$ , 合同有效的初始日期和终止日期  $[T_0, T_i]$ , 每个时段传输的最大电能和合同电价。利润根据合同电价来结算。

套利机会的产生有以下几个依据:

a. 区域内各省(市)电源分布不均, 机组容量有限, 存在电价的差异。

b. 区域内各省(市)的经济发展实力不同, 吸纳合同电量不同。

c. 合同买方(持有电能, 决定合同初始日期)通过在实时市场中竞价出售电能, 获取实时市场中的利润。由于合同中电能的价值随着时间、区域变化, 实时电价有可能远超出合同购买方购买时的电价。

d. 合同卖方(售出电能, 决定合同终止日期)在实时市场中购买一定的合同电量成本远小于发电成本的电能。通过买进合同所需的部分电能, 降低自身发电成本。

通过对区域电力市场中各省(市)电价的差异采用无套利均衡分析方法, 在发电商侧建立无套利分析的数学模型, 求解出各省(市)的无套利均衡电价, 充分体现区域电力市场的公平竞争, 有利于区域内电能资源的最优配置。

## 3 区域市场中的无套利分析模型

### 3.1 模型的假设

首先对涉及变量说明如下:  $i$  代表某一区域电力市场内的各个省(市);  $g_k$  代表区域内的发电商;  $h$  为在省(市)  $i$  内发电商  $g_k$  拥有的机组,  $h=1, 2, \dots, H(g_k, i)$ ;  $\Phi$  为区域电力市场内的省(市)集合,  $\Phi=$

$\{1, 2, \dots, n\}; \Phi_G$  为区域内发电商的集合,  $\Phi_G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}; \Phi_H$  为在省(市) $i$  内发电商  $g_k$  拥有的机组数目集合,  $\Phi_H = \{1, 2, \dots, H(g_k, i)\}; C_{g_k i h}$  为发电商  $g_k$  在省(市) $i$  内的机组成本函数;  $X_{g_k i h}$  为机组的容量限制。

假设区域电力市场中的参与者为发电商、电网持有者、大用户、套利者(发电商、电网持有者、大用户都可以成为潜在的套利者)。在交易期初, 为了规避实时市场中的风险, 发电商  $g_k (g_k \in \Phi_G)$  和其他参与者签订了一定数量的交易合同。合同中的一些重要参数假定为: 合同中的交易电量  $Q_k$ , 合同有效的初始日期和终止日期  $[T_0, T_1]$ , 每个时段传输的最大电能和合同电价<sup>[11]</sup>。

假定区域内各省(市)负荷需求与电价是线性函数关系, 即  $P_i^t(q_i^t) = P_{i0} - (P_{i0}/Q_{i0})q_i^t$ , 如图 1 所示。

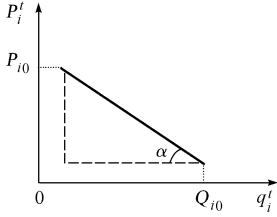


图 1 需求函数  
Fig. 1 Demand function

图中,  $P_{i0}, Q_{i0}$  分别为坐标上的截距,  $P_i^t, q_i^t$  分别为  $t$  时段省(市) $i$  内的电价与负荷需求电量。根据各时段负荷需求电量的不同, 当负荷需求加大时, 电价在逐步降低。

设

$$\mathbf{P}^a = \begin{bmatrix} p_{g_1 1} & p_{g_1 2} & \cdots & p_{g_1 n} \\ p_{g_2 1} & p_{g_2 2} & \cdots & p_{g_2 n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{g_m 1} & p_{g_m 2} & \cdots & p_{g_m n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $p_{g_k i}$  为发电商  $g_k$  与省(市) $i$  签订的合同电价,  $g_k \in \Phi_G, i \in \Phi$ 。

$$\mathbf{W}^a = \begin{bmatrix} W_{g_1 1}^a & W_{g_1 2}^a & \cdots & W_{g_1 n}^a \\ W_{g_2 1}^a & W_{g_2 2}^a & \cdots & W_{g_2 n}^a \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{g_m 1}^a & W_{g_m 2}^a & \cdots & W_{g_m n}^a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}^b = \begin{bmatrix} W_{g_1 1}^b & W_{g_1 2}^b & \cdots & W_{g_1 n}^b \\ W_{g_2 1}^b & W_{g_2 2}^b & \cdots & W_{g_2 n}^b \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{g_m 1}^b & W_{g_m 2}^b & \cdots & W_{g_m n}^b \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $W_{g_k i}^a, W_{g_k i}^b$  分别为发电商  $g_k$  在省(市) $i$  买进、

卖出的电能的交易费用率(相对于成本的费用比值),  $0 \leq W_{g_k i}^a, W_{g_k i}^b \leq 1$ 。

在某一时段  $t \in [T_0, T_1]$  的状态下, 令  $\mathbf{P}^t = [P_1^t, P_2^t, \dots, P_n^t]$ ,  $\mathbf{P}^t$  为  $t$  时段各省(市)的电价向量。假设  $s_{g_k j}$  是发电商  $g_k$  在省(市) $j$  的售电量,  $j \in \Phi$ 。若在区域电力市场内各省(市)电价处于均衡状态时, 各省(市)电价波动范围很小, 即  $|P_i^t - P_j^t| \leq \epsilon$  ( $\epsilon$  为电价波动率,  $i \neq j$ ), 发电商的合同电价与市场实时电价有一定的联系, 所有的发电商在省(市) $j$  出售的电量与该省(市)内的需求电量是等价的, 即  $\sum_{g_k \in \Phi_G} s_{g_k j} = q_j^t$ ; 若存在省(市) $j$  与其他省(市)的电价有很大差异, 即  $|P_i^t - P_j^t| > \epsilon (i \neq j)$ , 套利机会就会存在, 此时  $\sum_{g_k \in \Phi_G} s_{g_k j} + a_j = q_j^t$ , 其中  $a_j$  是套利者出售给省(市) $j$  的电量; 随着  $a_j$  的增加, 其他发电商的售电减少<sup>[12]</sup>。市场在某一时段  $t$  的平衡为发电量和售电量平衡,  $\sum_{i \in \Phi} \sum_{h \in \Phi_H} x_{g_k i h} = \sum_{j \in \Phi} s_{g_k j}$ 。设  $R_{g_k}$  为发电商  $g_k$  在时段  $t$  的收益, 令  $\mathbf{R} = [R_{g_1}, R_{g_2}, \dots, R_{g_m}]$ 。

区域电力市场可以用五元组  $\{\mathbf{P}^a, \mathbf{P}^t, \mathbf{R}, \mathbf{W}^a, \mathbf{W}^b\}$  描述, 根据无套利定理来构建数学模型。

### 3.2 模型描述

在区域电力市场  $\{\mathbf{P}^a, \mathbf{P}^t, \mathbf{R}, \mathbf{W}^a, \mathbf{W}^b\}$  中, 从发电商  $g_k \in \Phi_G$  的角度, 其收益为卖出电能的收益减去合同中的交易费用(包括电网的传输费用)和发电成本。

定义函数:

$$r_{g_k i}(x_i) = \begin{cases} (1 + W_{g_k i}^a) p_{g_k i} x_i & \text{发电或买进电能} \\ (1 - W_{g_k i}^b) p_i^t x_i & \text{出售电能} \end{cases} \quad (5)$$

令

$$r_{g_k}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in \Phi} r_{g_k i} \quad (6)$$

发电商  $g_k$  在时段  $t$  的收益函数为:

$$R_{g_k} = \sum_{j \in \Phi} (P_j^t s_{g_k j} - W_{g_k j}^b s_{g_k j} + \sum_{i \in \Phi} \sum_{h \in \Phi_H} W_{g_k j}^a x_{g_k i h}) - \sum_{i \in \Phi} \sum_{h \in \Phi_H} C_{g_k i h} x_{g_k i h} \quad (7)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} x_{g_k i h} \leq X_{g_k i h} \\ \sum_{j \in \Phi} s_{g_k j} = \sum_{i \in \Phi} \sum_{h \in \Phi_H} x_{g_k i h} \\ \forall s_{g_k j}, x_{g_k i h} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

依据电能的特殊性, 属于同一发电商的发电机组发出的电能与发电商售出的电能是相等的。对电网的持有者而言, 设  $y_i$  为套利者向省(市) $i$  出售的

电量,电网持有者将通过限定网线的传输容量、收取费用,使得在与发电商的交易中获取利润。文献[13]指出,市场参与者(例如发电商)通过向电网持有者购买一定线路的传输协议(FTR—firm transmission right),即使在线路出现阻塞的情况下,仍然不需要支付由于阻塞电网收取的附加费用,保证电能实时交易的畅通性。在一定期限内,FTR可以在区域电力市场内买卖。可以建立电网持有者的目标函数与简单的约束条件:

$$\begin{cases} \max & \sum_{i \in \Phi} W_i y_i \\ \text{s. t.} & L_{ij-} \leq L_{ij} \leq L_{ij+} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $W_i$  为省(市) $i$  的传输费用; $L_{ij+}, L_{ij-}$  分别为网线  $L_{ij}$  的电能容量上、下限。

在电力市场中,发电商通过上网竞价在交易中心(power exchange)与电网持有者进行电能交易。若发电商都以边际成本报价,经过市场出清,得到市场出清价格,区域内所有的发电商出售到省(市) $i$  的电能与电网传输的电能相等:

$$\sum_{g_k \in \Phi_G} s_{g_k i} - \sum_{g_k \in \Phi_G} \sum_{h \in \Phi_H} x_{g_k i h} = y_i \quad i \in \Phi \quad (10)$$

这里构建的无套利数学模型是把式(7)~式(10)作为约束条件考虑,其中电网持有者的目标函数作为隐含的约束条件,通过计算调整变量  $P_j^i, s_{g_k j}, x_{g_k i h}$ , 求出最优解。

市场  $\{P^a, P^r, R, W^a, W^b\}$  是无套利的,当且仅当如下构建的优化数学模型的最优值为 0,  $x$  为发电(售电)电量决策向量:

$$\begin{cases} \min_{\forall g_k \in \Phi_G} & r_{g_k}(x) \\ & R_{g_k} > 0 \\ & x_{g_k i h} \leq X_{g_k i h} \\ \text{s. t.} & \sum_{j \in \Phi} s_{g_k j} = \sum_{i \in \Phi} \sum_{h \in \Phi_H} x_{g_k i h} \\ & L_{ij-} \leq L_{ij} \leq L_{ij+} \\ & \sum_{g_k \in \Phi_G} s_{g_k i} - \sum_{g_k \in \Phi_G} \sum_{h \in \Phi_H} x_{g_k i h} = y_i \\ & \forall s_{g_k j}, x_{g_k i h} \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 模型求解

该模型是线性优化问题,可用数学规划求解。算法步骤如下:

- a. 对于发电商  $g_1$ ,在时段  $T_0$  计算合同交易初期的总成本,获取各省(市)内的电价、区域内统一市场出清电价信息,进行初始化。
- b. 在下一个交易时段,计算此时段发电商  $g_1$  的售出电能与发电(买电)决策  $r_{g_1}(x)$  的最小值是否等于 0,若为 0 则转到步骤 a 计算下一个发电商  $g_2$

的  $r_{g_2}(x)$ ;如果此时段的决策函数  $r_{g_1}(x)$  的最优值不等于 0,套利机会就可能发生。

c. 循环执行步骤 a, b, 调整  $g_k(k=k+1)$  售电(发电)决策,利用模型的必要条件,令  $r_{g_k}(x)=0(k=1,2,\dots,m)$ ,在式(11)约束条件成立的情况下,反解求出各省(市)此时段的无套利均衡电价。

4 算例研究

本文根据国内某一区域电力市场进行实际仿真计算。区域市场由 3 个不同的省份构成,为了满足文中的计算,对于各省内的负荷需求数据、发电容量数据做了仿真调整。假设区域内有 6 个独立的发电商  $g_k(k=1,2,\dots,6)$ ,其中: $g_1, g_2$  在省 1 内; $g_3, g_4$  在省 2 内; $g_5, g_6$  在省 3 内。每个发电商拥有 1 个等效发电机组,发电商总的发电容量远远大于区域内的负荷需求,假设发电商按照边际成本报价策略进行报价。区域电力市场关系如图 2 所示。

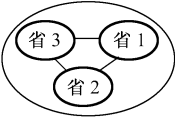


图 2 我国某一简化的区域电力市场  
Fig. 2 A simple regional electricity market in China

目前,我国区域电力市场中各省内的电价仍然是独立计算,一般的计算方法是通过对发电商的边际成本报价,取最大的边际报价。表 1 给出了区域内各独立发电商在时段  $t$  的报价,以及 3 个省在时段  $t$  的负荷需求量。

表 1 区域内发电商在时段  $t$  的报价和各省负荷需求  
Table 1 Biddings of generation companies and load demand of each province in the REM in period  $t$

| 省 | 发电商   | 发电容量限制/MW | 合同电量/MW | 报价/(美元·(MW·h) <sup>-1</sup> ) | 负荷需求/MW |
|---|-------|-----------|---------|-------------------------------|---------|
| 1 | $g_1$ | 40        | 20      | 14.61                         | 70      |
|   | $g_2$ | 30        | 20      | 14.66                         |         |
| 2 | $g_3$ | 80        | 30      | 12.89                         | 90      |
|   | $g_4$ | 50        | 30      | 13.90                         |         |
| 3 | $g_5$ | 30        | 10      | 15.01                         | 50      |
|   | $g_6$ | 50        | 10      | 17.27                         |         |

对于式(11)模型,令  $\epsilon=0.15$  美元/(MW·h),求解区域内各省的无套利均衡电价,得到在时段  $t$  这 3 个省内电价波动的绝对值小于  $\epsilon$ ,验证了本文所用方法的可行性,并且对本文采用的方法、各省内一般定价方法和区域内统一市场出清定价方法得出的各省电价的比较结果进行分析,表 2 给出了 3 种方法下各省内电价的比较结果。

表 2 3 种方法下各省内电价比较  
Table 2 Comparison of the prices in different provinces

| 定价方法      | 各省电价/(美元·(MW·h) <sup>-1</sup> ) |         |         |
|-----------|---------------------------------|---------|---------|
|           | $P_1^i$                         | $P_2^i$ | $P_3^i$ |
| 无套利       | 15.20                           | 15.09   | 15.27   |
| 一般方法      | 14.66                           | 13.90   | 17.27   |
| 区域内统一市场出清 | 15.26                           | 15.26   | 15.26   |

一般的定价方法是选取各省内发电商边际成本报价的最高报价,这种定价方法使得区域内各省的电价存在较大的差异。表 1 中给出省 2 内的发电商  $g_3, g_4$  的边际报价在区域各省内为最低,省 3 的电价为 17.27 美元/(MW·h),比省 2 的电价高出 3.37 美元/(MW·h)。因此,一般的定价方法会使区域内各省的电价差异加大,引起利润较大的套利行为。这种定价不能体现区域市场的公平竞争,不利于区域内电能资源的最优配置,给发电商的决策带来很大的困难。

区域内统一市场出清价没有综合考虑区域内各参与者的无套利均衡,在省 2 内的定价偏高,偏离了省 2 内的无套利均衡电价。由于省 2 内发电商发电容量的充足,若传输不受限制,套利者将部分合同电量在市场中竞价出售,套利机会将在省 2 内发生。

表 3、表 4 给出了在 3 种不同的定价方法下,区域内各发电商的出售电量和收益。无套利均衡电价能够使得区域内电能资源达到最优配置,不存在套利行为;相反,一般定价方法不能充分利用低价的电能资源,发电商不能在区域内公平竞争,套利机会也将在区域电力市场中的各省间发生;区域内统一市场出清电价使得高成本的发电商不能同网竞价,如果没有合同的风险规避,将损失惨重。

表 3 3 种方法下各发电商在区域内售出电量比较  
Table 3 Comparison of the sales of generation companies

| 定价方法      | 各发电商售出电量/MW |           |           |           |           |           |
|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | $s_{g_1}$   | $s_{g_2}$ | $s_{g_3}$ | $s_{g_4}$ | $s_{g_5}$ | $s_{g_6}$ |
| 无套利       | 37.00       | 25.60     | 78.20     | 46.33     | 12.67     | 10.20     |
| 一般方法      | 30.50       | 22.71     | 70.93     | 36.24     | 18.30     | 31.32     |
| 区域内统一市场出清 | 38.50       | 27.33     | 73.28     | 33.56     | 27.33     | 10.00     |

表 4 3 种方法下的发电商收益比较  
Table 4 Comparison of the incomes of generation companies

| 定价方法      | 发电商收益/美元 |        |        |        |        |        |
|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|           | $g_1$    | $g_2$  | $g_3$  | $g_4$  | $g_5$  | $g_6$  |
| 无套利       | 299.44   | 207.18 | 632.88 | 374.95 | 102.54 | 82.55  |
| 一般方法      | 236.97   | 175.45 | 522.54 | 266.98 | 167.50 | 286.68 |
| 区域内统一市场出清 | 311.38   | 221.04 | 592.67 | 271.43 | 221.04 | 80.88  |

5 结语

本文针对目前区域电力市场内各省(市)电价存

在差异这一问题,分析了区域电力市场中套利行为的机理,以及套利行为对发电商的影响,在此基础上建立了无套利数学模型,并通过算例进行了仿真验证。结果表明,将金融学中的无套利分析理论引入到电力市场的研究中,是一种解决目前区域市场内各省(市)电价差异带来的发电商侧最优报价决策问题的有效手段。通过对区域电力市场内各省(市)电价的差异做出均衡分析,可为发电商提供一种分析发电(售电)决策的途径。

参 考 文 献

1 言茂松(Yan Maosong). 谋划我国区域电力市场由两级过渡到一级之路(Roadmap from Two-level to One-level Regional Electricity Market of China). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2004,28(9):1~4

2 柏 瑞,刘福斌,李 灿,等(Bo Rui, Liu Fubin, Li Can, et al). 考虑网络约束的区域电力市场交易计划(Transaction Scheduling Considering Transmission Network Constraints in Regional Electricity Market). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(22):10~15

3 傅书邈,白晓民,张 扬,等(Fu Shutu, Bai Xiaomin, Zhang Yang, et al). 区域电力市场模式及运营方式(Regional Power Market Modes and Their Operation). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2003,27(9):1~5

4 于尔铿,韩 放,谢 开(Yu Erkeng, Han Fang, Xie Kai). 电力市场(Power Market). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998

5 Shahidehpour M, Yamin H, Li Zuyi. Market Operations in Electric Power Systems. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002

6 宋逢明(Song Fengming). 金融工程原理——无套利均衡分析(Financial Engineering Theory: No-arbitrage Equilibrium Analysis). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1999

7 李仲飞,汪寿阳(Li Zhongfei, Wang Shouyang). 投资组合优化与无套利分析(Portfolio Optimization and No-arbitrage Analysis). 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),2001

8 Cornet B, De Boisdeffre L. Arbitrage and Price Revelation with Asymmetric Information and Incomplete Markets. Journal of Mathematical Economics, 2002, 38(4): 393~410

9 Bisin A, Gottardi P. Competitive Equilibria with Asymmetric Information. Journal of Economic Theory, 1999, 87(1): 1~48

10 丁晓莺,王锡凡,胡泽春,等(Ding Xiaoying, Wang Xifan, Hu Zechun, et al). 电力市场中区域电价综合模型(An Integrated Zonal Pricing Formulation in Electricity Market). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2004,28(10):59~64

11 Bjorgan R, Song Haili, Liu Chen-Ching, et al. Pricing Flexible Electricity Contracts. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 477~482

12 Hobbs B B. Linear Complementarity Models of Nash-cournot Competition in Bilateral and Poolco Power. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 194~202

13 Rudkevich A. Investment and Bidding Strategies in Markets for Firm Transmission Rights. In: Proceedings of 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos (CA): IEEE Computer Society Press, 2004. 48~57

吴 玮(1979—),女,博士研究生,研究方向为电力市场。E-mail: wetclose@163.com

周建中(1959—),男,教授,博士生导师,研究方向为人

朱承军(1974—),男,博士研究生,研究方向为电力规划和电力市场。

Wu Wei<sup>1</sup>, Zhou Jianzhong<sup>1</sup>, Zhu Chengjun<sup>1,2</sup>, Yang Junjie<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)  
(2. China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443002, China)

This work is supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30390000) and Trans-century Training Program Foundation for the Talents by the State Education Commission (No. 2003714).

**Key words:** regional electricity market (REM); generation company; arbitrage behavior; no-arbitrage analysis; equilibrium electricity price