

文章编号: 1001-0920(2004)08-0893-05

应用非线性互补方法的电力市场均衡分析

王 旻, 李渝曾, 张少华
(上海大学 自动化系, 上海 200072)

摘 要: 利用一种求解混合非线性互补问题的非线性互补方法, 分析具有输电网络约束的电力市场模型的供应函数 Nash 均衡问题. 该方法利用每个策略发电商优化问题的 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件将均衡问题表述为一个混合的非线性互补问题; 然后采用某些具有特殊性质的非线性互补函数, 将求解混合的非线性互补问题转化为求解一组非线性代数方程. 该方程组中包含不光滑的函数, 因此采用一种基于次梯度的改进的 Levenberg-Marquardt 算法对其求解. 算例分析表明了该方法的有效性.

关键词: Nash 均衡; 非线性互补方法; 次梯度; 电力市场

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

Application of nonlinear complementarity methods to equilibrium analysis of electricity markets

WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua

(Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China. Correspondent: WANG Xian, E-mail: xianwang0427@sina.com)

Abstract: A nonlinear complementarity approach for solving the mixed nonlinear complementarity problem (NCP) is used to analyze the Nash SFE of electric power market models with transmission constraints. The mixed NCP is formed by gathering the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions of each strategic generating firm's optimization problem and reformulated as a set of non-smooth nonlinear algebraic equations with some special NCP-function. Using the sub-gradient, the set of non-smooth nonlinear equations can be solved by an inexact Levenberg-Marquardt algorithm. Numerical examples show the validity of the approach.

Key words: Nash equilibrium; nonlinear complementarity approach; sub-gradient; electricity market

1 引 言

在具有寡头市场特征的电力市场中, 市场参与者可利用策略投标的手段行使市场力, 从而牟取暴利. 因此预测和监管市场参与者的市场力滥用行为是目前电力市场设计和运行需要注意的问题之一. 而寡头竞争的均衡模型是进行市场力分析和预测的重要工具^[1].

SFE 模型因更符合联营体市场的实际情况, 在

发电市场均衡分析中得到了广泛应用, 尤其是线性供应函数均衡 (LSFE) 模型更倍受关注^[2,3]. 但许多基于 SFE 方法的电力市场均衡分析模型没有考虑输电约束的影响^[4~6], 或仅运用一个忽略了 Kirchhoff 电压定律的简化网络^[7]. 文献[2, 3, 8, 9] 在基于 LSFE 方法的模型研究中引入了线性直流潮流或交流潮流的输电约束, 使其能更完整地描述电力市场的特性.

收稿日期: 2003-07-23; 修回日期: 2003-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50377023); 上海市教委发展基金资助项目 (02AK21).

作者简介: 王旻 (1970—), 女, 浙江湖州人, 讲师, 博士生, 从事电力市场博弈分析的研究; 李渝曾 (1947—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事电力市场输电定价、博弈分析等研究.

在均衡模型求解方面,文献[2,7]中的简化模型采用的是求各发电商反应函数的显函数方法,但该方法不能用于因变量增多而使反应函数的显函数无法求出的情形.文献[8,9]在考虑线性直流潮流或交流潮流的输电约束的基础上,提出了描述每个发电商策略行为的两层优化模型,并采用仿真方法,试图以迭代算法模拟得到模型的均衡解.文献[3]在假设线性猜测供应函数截距不变的条件下,将每个市场参与者利润最大化的一阶条件(KKT条件)组合在一起形成了一个混合线性互补问题(LCP)^[10],从而可以利用求解LCP问题的软件包求取模型的均衡解.但当线性供应函数的截距也取为决策变量,或取另外形式的决策变量^[2]时,模型的均衡条件将形成一个混合的非线性互补问题(NCP)^[10].对于这类NCP问题,文献[3]并没给出有效的求解方法.最近,文献[11]针对求解Stackelberg均衡模型中可能出现的非线性互补问题,提出了一种非内点求解方法,但Stackelberg均衡模型中的决策者分为领头者和尾随者,他们的决策不是同时进行而是有严格的主从关系,因此该方法不适用于求多个参与者同时进行决策的寡头竞争均衡问题的解.

本文在考虑输电网络约束的电力市场连续线性供应函数均衡模型的基础上,针对模型求解中可能出现的非线性互补问题,采用文献[12]中的非线性互补方法,将求解混合的非线性互补问题转化为求解一组非线性的代数方程,并应用属于Newton法范畴的基于次梯度的Levenberg-Marquardt算法求解.最后通过一个具有输电约束的3节点算例,表明了该方法的有效性.

2 基本假设

某电力市场存在 N 个策略性发电商,发电商 f ($f = 1, 2, \dots, N$) 在网络节点 i ($i = 1, 2, \dots, I$) 处拥有发电单元 f_i ,该发电单元具有二次发电成本函数 $C_{f_i}(q_{f_i}) = a_{f_i}q_{f_i} + 0.5b_{f_i}q_{f_i}^2$ 和线性的边际成本

$$m_{f_i} = a_{f_i} + b_{f_i}q_{f_i} \quad (1)$$

其中: q_{f_i} 为发电单元 f_i 的发电出力, a_{f_i} 和 b_{f_i} 为成本系数, $b_{f_i} \geq 0$.设在某一小时段节点 i 的逆需求函数为

$$p_i(q_{di}) = c_i - d_i q_{di} \quad (2)$$

其中: q_{di} 和 p_i 分别为节点 i 处的需求电力和电价, c_i 和 d_i 为给定系数, $d_i \geq 0$.

发电商 f 为所属各发电单元以如下线性供应函数向独立系统管理员(ISO)投标:

$$p_i = \alpha_{f_i} + \beta_{f_i}q_{f_i}, \forall f_i \in S_f. \quad (3)$$

其中: p_i 为报价; α_{f_i} 和 β_{f_i} 分别为发电单元 f_i 供应函数的截距和斜率, $\beta_{f_i} \geq 0$; S_f 为发电商 f 所控制的发电单元集合.对于线性供应函数投标情况,为了避免在确定需求的条件下均衡解的多重性,发电商的策略性行为一般受到选择参数 α_{f_i} , β_{f_i} 或 $k_{f_i} = \beta_{f_i}/\alpha_{f_i}$ ^[2]的限制.本文以参数 k_{f_i} , $\forall f_i \in S_f$,作为发电商 f 策略性行为的决策变量,则发电单元 f_i 的供应函数可表示为

$$p_i = k_{f_i}(a_{f_i} + b_{f_i}q_{f_i}). \quad (4)$$

应说明的是,以参数 α_{f_i} 或 β_{f_i} 为决策变量也可以构成类似的均衡模型,本文的方法同样适用.

3 理论模型

3.1 均衡模型的建立

一方面,在获得各发电商的投标后,ISO以社会福利(即用户的用电收入与系统预期的发电成本之差)最大化为目标,并考虑各发电单元的出力限制、传输容量限制、电力平衡和潮流方程等约束条件,确定各节点发电单元的出力 q_{f_i} ,用户的需求电力 q_{di} ,该优化问题可表示为如下的二次规划问题:

$$\max_{q_{di}, q_{f_i}} \left\{ \sum_i (c_i q_{di} - 0.5 d_i q_{di}^2) - \sum_{f_i \in P} k_{f_i} \cdot (a_{f_i} q_{f_i} + 0.5 b_{f_i} q_{f_i}^2) \right\}, \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } q_{di} \geq 0, \forall i \in D; \quad (5b)$$

$$q_{f_i} \leq q_{f_i} \leq \bar{q}_{f_i}, \forall f_i \in P; \quad (5c)$$

$$-\bar{T}_{ij} \leq T_{ij} \leq \bar{T}_{ij}, \forall ij \in A; \quad (5d)$$

$$q_{di} - \sum_{f_i \in P} q_{f_i} + \sum_{j: ij \in A} T_{ij} = 0; \quad (5e)$$

$$Y_m(T_{ij}) = 0, \forall m. \quad (5f)$$

其中: A 为全体传输线的集合; D 为全体用户节点的集合; P 为全体发电单元的集合; $\bar{q}_{f_i}$, q_{f_i} 分别为发电单元 f_i 的容量上、下限; T_{ij} , $\bar{T}_{ij}$ 分别为输电线路 ij 的传输量及其最大输电容量; $Y_m(\cdot)$ 为网络中闭路 m 的电压方程.上述二次规划问题的解中,约束式(5e)的对偶变量 λ_i 即为节点 i 处的市场结清电价.

另一方面,电力市场中各理性的发电商面对ISO决定的电价、出力、负荷和潮流以及其他发电商的决策,通过选择其自身的策略报价参数来追求其利润(售电收入与发电成本之差)的最大化.因此,各发电商的决策问题可表达为如下的两层优化问题:

$$\begin{aligned} \forall f, \max_{k_{f_i}, \forall f_i \in S_f} \pi_f = & \sum_{f_i \in S_f} [\lambda q_{f_i} - a_{f_i} q_{f_i} - 0.5 b_{f_i} q_{f_i}^2], \\ \text{s.t. } k_{f_i \min} \leq k_{f_i} \leq k_{f_i \max}, \forall f_i \in S_f, & \\ \text{ISO program 式(5).} & \end{aligned} \quad (6)$$

其中: π_f 为发电商 f 的利润, $k_{f_i \min}$ 和 $k_{f_i \max}$ 为竞标参数 k_{f_i} 的允许下限和上限

在式(6)的数学规划中, λ 和 q_{f_i} 为式(5)表示的 ISO 优化问题的解, 它们与每个发电商的竞价策略有关. 因而, 式(6)的每个发电商的利润函数不仅与自身的竞价策略有关, 而且与其他发电商的竞价策略也有关. 当每个发电公司都没有动机改变其竞价策略时, 电力市场便达到了相对的稳定点, 即发电商策略性竞标的 Nash 均衡点为 $(\vec{K}_1^*, \dots, \vec{K}_f^*, \dots, \vec{K}_N^*)$, 这里 $\vec{K}_f = \{k_{f_i}, \forall f_i \in S_f\}$ 为发电商 f 的竞价策略.

3.2 均衡模型的求解

每个发电商的优化问题是一个两层的优化问题, 求解难度较大. 因此首先利用内层的 ISO 优化问题(5)的 KKT 条件将两层优化问题转变为一个一般的非线性规划问题. 二次规划问题式(5)的 KKT 条件可表述为下列有关对偶变量 $\mu_{1_i}, \mu_{2_i}, \theta_{ij}, \lambda, \gamma_m$ 的等式和互补条件:

$$(q_{di}, \forall i): q_{di} \geq 0, (-c_i + d_i q_{di} + \lambda) \geq 0, \\ q_{di} \cdot (-c_i + d_i q_{di} + \lambda) = 0; \quad (7a)$$

$$(\mu_{1_i}, \forall i): \mu_{1_i} \geq 0, (-q_{f_i} + \bar{q}_{f_i}) \geq 0, \\ \mu_{1_i} \cdot (-q_{f_i} + \bar{q}_{f_i}) = 0; \quad (7b)$$

$$(\mu_{2_i}, \forall i): \mu_{2_i} \geq 0, (-q_{f_i} + q_{f_i}) \geq 0, \\ \mu_{2_i} \cdot (-q_{f_i} + q_{f_i}) = 0; \quad (7c)$$

$$(\theta_{ij}, \forall ij): \theta_{ij} \geq 0, (-T_{ij} + \bar{T}_{ij}) \geq 0, \\ \theta_{ij} \cdot (-T_{ij} + \bar{T}_{ij}) = 0; \quad (7d)$$

$$(\theta_{ij}, \forall ij): \theta_{ij} \geq 0, (T_{ij} + \bar{T}_{ij}) \geq 0, \\ \theta_{ij} \cdot (T_{ij} + \bar{T}_{ij}) = 0; \quad (7e)$$

$$(q_{f_i}, \forall f_i): -k_{f_i} \cdot (a_{f_i} + b_{f_i} q_{f_i}) - \mu_{1_i} + \\ \mu_{2_i} + \lambda = 0; \quad (7f)$$

$$(T_{ij}, \forall ij): -\theta_{ij} + \theta_{ij} - \lambda - \\ \gamma_m \frac{\partial x_m(T_{ij})}{\partial T_{ij}} = 0; \quad (7g)$$

$$(\lambda, \forall i): q_{di} - \sum_{f_i} q_{f_i} + \sum_{j \in A} T_{ij} = 0; \quad (7h)$$

$$(\gamma_m, \forall m): Y_m(T_{ij}) = 0 \quad (7i)$$

其中: λ 为约束(5e)的对偶变量; μ_{1_i}, μ_{2_i} 分别为发电

单元 f_i 容量上、下限的影子价格; $\theta_{ij}, \bar{\theta}_{ij}$ 分别为输电线 ij 的传输容量上、下限的影子价格; γ_m 为潮流环路 m 的对偶变量.

利用式(7)的 KKT 条件, 各发电商的决策问题可描述为

$$\begin{aligned} \forall f, \max_{k_{f_i}, \forall f_i \in S_f} \pi_f = & \sum_{f_i \in S_f} (\lambda q_{f_i} - a_{f_i} q_{f_i} - 0.5 b_{f_i} q_{f_i}^2), \\ \text{s.t. } k_{f_i \min} \leq k_{f_i} \leq k_{f_i \max}, \forall f_i \in S_f, & \\ \text{式(7).} & \end{aligned} \quad (8)$$

为了求得发电商策略性竞标的 Nash 均衡解

$(\vec{K}_1^*, \dots, \vec{K}_f^*, \dots, \vec{K}_N^*)$, 必须将各发电商的优化问题(8)同时求解. 但因有多个参与者存在并同时决策, 采用通常的优化方法很难求出均衡解. 对于任何一个发电商 f , $\vec{K}_f^*$ 是在给定其他发电商策略 $(\vec{K}_1^*, \dots, \vec{K}_{f-1}^*, \vec{K}_{f+1}^*, \dots, \vec{K}_N^*)$ 不变时的最优策略, 因此 $\vec{K}_f^*$ 必然满足给定其他发电商策略 $(\vec{K}_1^*, \dots, \vec{K}_{f-1}^*, \vec{K}_{f+1}^*, \dots, \vec{K}_N^*)$ 不变时发电商 f 优化问题的 KKT 条件. 进一步, 均衡点 $(\vec{K}_1^*, \dots, \vec{K}_f^*, \dots, \vec{K}_N^*)$ 必然满足所有发电商优化问题的 KKT 条件. 因此, 欲求各发电商策略性竞标的均衡解只需将式(8)的各发电商决策问题的 KKT 条件组合在一起, 形成一组联立的等式和互补条件; 然后求解该组等式和互补条件. 可以看出, 由该组等式和互补条件构成了一个混合的非线性互补问题(NCP), 其中包含了 $\vec{x} \geq 0, \vec{f}(\vec{x}, \vec{y}) \geq 0, \vec{x}^T \cdot \vec{f}(\vec{x}, \vec{y}) = 0$ 的互补条件. 为此, 本文采用文献[12]提出的非线性互补方法来求解.

3.3 非线性互补方法

非线性互补方法是利用一种具有如下特殊性质的函数 $\Psi: R^2 \rightarrow R$:

$$\Psi(a, b) = 0 \Leftrightarrow a \geq 0, b \geq 0, ab = 0 \quad (9)$$

处理非线性互补条件的方法

式(9)意味着如果 a 和 b 满足 $\Psi(a, b) = 0$, 则它们自动满足互补条件 $a \geq 0, b \geq 0, ab = 0$. 任何具有式(5)特性的函数 $\Psi: R^2 \rightarrow R$ 都称为 NCP-函数. 利用 NCP 函数 $\Psi(\cdot, \cdot)$ 可自动保证非线性互补条件的成立, 求解算法可从任意的初始点开始, 并在迭代过程中不要求变量始终保持在正的象限中, 因而比传统的内点法更适用于求解大规模非线性互补问题.

本文采用如下 NCP-函数^[12]:

$$\psi(a, b) := a + b - \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (10)$$

利用式(6), 互补条件(7a) ~ (7e) 可表示为

$$\begin{aligned} (q_{di}, \forall d_i): \psi(q_{di}, -c_i + d_i q_{di} + \lambda) &= 0; \\ (\mu_{1f_i}, \forall f_i \in P): \psi(\mu_{1f_i}, -q_{f_i} + \bar{q}_{f_i}) &= 0; \\ (\mu_{2f_i}, \forall f_i \in P): \psi(\mu_{2f_i}, -q_{f_i} + \bar{q}_{f_i}) &= 0; \\ (\theta_{ij}, \forall ij): \psi(\theta_{ij}, -T_{ij} + \bar{T}_{ij}) &= 0; \\ (\theta_{ij}, \forall ij): \psi(\theta_{ij}, T_{ij} + \bar{T}_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

设 $\bar{y} = (\bar{q}_d^T, \bar{q}_1^T, \dots, \bar{q}_N^T, \bar{\mu}_{11}^T, \dots, \bar{\mu}_{1N}^T, \bar{\mu}_{21}^T, \dots, \bar{\mu}_{2N}^T, \bar{T}^T, \bar{\theta}_1^T, \bar{\theta}_2^T, \bar{\lambda}^T, \bar{Y})^T$, 并用 $\bar{z}(\bar{K}_1, \dots, \bar{K}_N, \bar{y}) = 0$ 表示式(11)和式(7f) ~ (7e), 则每个发电商的竞标决策问题可表示为

$$\max_{K, \bar{y}} \pi_f(\bar{K}_f, \bar{q}_f, \bar{\lambda}), \quad (12a)$$

$$\text{s.t. } \bar{K}_{f \min} \leq \bar{K}_f \leq \bar{K}_{f \max}, \forall f_i \in S_f, \quad (12b)$$

$$\bar{z}(\bar{K}_1, \dots, \bar{K}_N, \bar{y}) = 0 \quad (12c)$$

这里 $\bar{K}_{f \min} = \{k_{f \min}, \forall f_i \in S_f\}$, $\bar{K}_{f \max} = \{k_{f \max}, \forall f_i \in S_f\}$.

进而每个发电商的决策问题所对应的 KKT 条件为

$$(\bar{y}): \frac{\partial \pi_f}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{y}} \cdot \bar{w}_f = 0, \quad (13a)$$

$$(\bar{w}_f): \bar{z}(\bar{K}_1, \dots, \bar{K}_N, \bar{y}) = 0, \quad (13b)$$

$$(\bar{K}_f): \frac{\partial \pi_f}{\partial \bar{K}_f} - \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{K}_f} \cdot \bar{w}_f + \bar{v}_{1f} - \bar{v}_{2f} = 0, \quad (13c)$$

$$\begin{aligned} (\bar{v}_{1f}): \bar{K}_f - \bar{K}_{f \min} \geq 0, \bar{v}_{1f} &\geq 0, \\ \bar{v}_{1f}^T \cdot (\bar{K}_f - \bar{K}_{f \min}) &= 0, \end{aligned} \quad (13d)$$

$$\begin{aligned} (\bar{v}_{2f}): \bar{K}_{f \max} - \bar{K}_f \geq 0, \bar{v}_{2f} &\geq 0, \\ \bar{v}_{2f}^T \cdot (\bar{K}_{f \max} - \bar{K}_f) &= 0 \end{aligned} \quad (13e)$$

这里: $\bar{w}_f$ 为式(12c)的对偶向量; $\bar{v}_{1f}, \bar{v}_{2f}$ 分别为式(12b) $\bar{K}_f$ 的下限和上限的对偶向量. 利用式(10)的 NCP-函数, 互补条件(13)的每个分量可变换为

$$\begin{aligned} (v_{1f_i}, \forall f_i \in S_f): \psi(v_{1f_i}, -k_{f \min} + k_{f_i}) &= 0, \\ (v_{2f_i}, \forall f_i \in S_f): \psi(v_{2f_i}, -k_{f_i} + k_{f \max}) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

因此每个发电商的决策问题所对应的 KKT 条件可用式(13)和(14)的非线性方程组表示. 将各发电商所对应的非线性代数方程组联立成一个总的方程组 $\bar{E}(\bar{x}) = 0$, 记 $\bar{x} = (\bar{y}, \bar{w}_1, \dots, \bar{w}_N, \bar{K}_1, \dots, \bar{K}_N, \bar{v}_{11}, \dots, \bar{v}_{1N}, \bar{v}_{21}, \dots, \bar{v}_{2N})$, 并用基于次梯度改进的

Levenberg-Marquardt 算法求解. 该算法属于 Newton 法的范畴, 在一定条件下具有全局和超线性的收敛性, 尤其适用于求解大规模的非线性代数方程组^[12].

3.4 改进的 Levenberg-Marquardt 算法

由于式(6)的非线性互补函数在原点(0, 0)是不可微的, 这使方程组 $\bar{E}(\bar{x}) = 0$ 中包含一些不光滑的代数方程. 传统意义上牛顿法的搜索方向因梯度的不存在而无法确定, 所以利用一般的牛顿方法无法求解. 本文采用文献[12]中提出的基于次梯度的改进的 Levenberg-Marquardt 算法对方程组 $\bar{E}(\bar{x}) = 0$ 进行求解. 该算法与传统的 Levenberg-Marquardt 算法的不同在于确定搜索方向时只需求出该线性系统的近似解, 因此它特别适用于大规模情形的快速收敛. 另外, 在确定相应于搜索方向的步长时, 本文利用文献[12]中的非单调的线性搜索方法极小化准则函数

$$\Psi(\bar{x}) = \frac{1}{2} \bar{E}^T(\bar{x}) \bar{E}(\bar{x}), \quad (15)$$

得到相应的步长

文献[12]中的收敛定理保证本文算法收敛到 $\Psi(\bar{x})$ 的全局最小值解. 如果此时最小值为 0, 则该解为方程 $\bar{E}(\bar{x}) = 0$ 的解; 若最小值不为 0, 则 Nash 均衡解不存在.

4 算例

设由 3 个节点 ($i = 1, 2, 3$) 组成的电力市场, 其中节点 2 是负荷节点, 节点 3 是发电节点, 节点 1 既是负荷节点, 又是发电节点. 每对节点之间都有输电线相连且具有相同的阻抗. 节点 1 和节点 2 的逆需求函数分别是 $p_1(q_{d1}) = 40 - 0.08q_{d1}$ 和 $p_2(q_{d2}) = 40 - 0.06q_{d2}$ (美元/MWh). 整个电力市场有两个发电商 ($f = 1, 2$), 分别拥有位于节点 1 和节点 3 的发电单元, 其对应的出力为 q_{11} 和 q_{23} , 且均有容量约束 500 MW, 它们的边际成本函数分别为 $m_{c11} = 15 + 0.01q_{11}$ 和 $m_{c23} = 18 + 0.008q_{23}$ (美元/MWh).

考虑两种情况, 一种为无输电阻塞 ($\bar{T}_{12} = 500$ MW) 的情形 (case 1), 另一种为在节点 1 与节点 2 间有输电阻塞 ($\bar{T}_{12} = 25$ MW) 的情形 (case 2). 表 1 和表 2 分别给出了每种情形在线性供应函数 (LSF) 竞争和完全竞争两种竞争类型下的计算结果, 其中完全竞争情况是指各发电商均以真实的边际成本曲线投标.

表 1 3 节点算例的均衡电价和利润

		case 1		case 2	
		L SF 竞争	完全竞争	L SF 竞争	完全竞争
节点电价 /(美元 /MWh)	λ_1	21. 1	19. 3	21. 7	16. 4
	λ_2	21. 1	19. 3	29. 1	25. 9
	λ_3	21. 1	19. 3	25. 4	21. 1
发电商利润 /(美元 /h)	$f = 1$	1 560	943. 6	747. 1	92. 6
	$f = 2$	446. 5	112. 9	1 779	620. 1
社会福利	/(美元 /h)	7 204. 6	7 278. 7	5 902. 1	6 212. 1

表 2 3 节点算例的均衡出力、传输量和供应函数参数

		case 1		case 2	
		L SF 竞争	完全竞争	L SF 竞争	完全竞争
发电商出 力 /MW	q_{11}	361. 8	434. 4	122. 9	136. 1
	q_{23}	188. 8	168	286. 9	393. 7
传输量 /(MW)	T_{12}	146. 8	173. 5	25	25
	T_{31}	21	- 2. 7	130. 9	184. 4
	T_{32}	167. 8	170. 8	155. 9	209. 4
供应函数 参数	k_{11}	1. 134	—	1. 337	—
	k_{23}	1. 082	—	1. 252	—

从表1和表2可以看出: 1) 输电约束未起作用时, 在L SF 或完全竞争条件下, 由于发电成本相对较低, 发电商 1 比发电商 2 获得更多的利润. 如果将节点1与节点2之间传输线的潮流限定在25MW 以内, 则因为输电阻塞的缘故, 不同节点的电价有明显的区别, 从而发电成本较高的发电商 2 比发电商 1 获得了更多的利润. 这是因为输电约束的作用, 使得发电商 2 通过节点 1 与节点 3 间的输电线向节点 1 输送更多的电力, 从而抑制了发电商 1 的发电, 发电商 2 的发电出力在电力市场中占有较大的份额, 且获得了更多的利润. 2) 不论有无输电阻塞, 在L SF 竞争下各发电商都将利用其市场力, 通过策略性投标使发电出力和潮流朝有利于自身的方向改变, 导致比完全竞争情形下更高的电价, 并获得更多的利润, 使社会福利降低. 而且, 在有输电阻塞的情形下, 每个发电商的策略性报价高出实际发电成本的程度比无阻塞的情形更甚, 因而电价更高, 发电商利润更多, 而社会福利更少.

5 结 论

本文基于一个能考虑输电网络约束的电力市场连续线性供应函数均衡模型, 针对模型求解中可能出现的非线性互补问题, 采用有关非线性互补方法, 将求解非线性互补问题转化为求解一组非线性的代

数方程, 并应用基于次梯度的改进的Levenberg-Marquardt 算法求解. 算例分析表明了该方法的有效性.

本文提出的模型方法可进一步考虑输电网损, 并可推广到其他类型的供应函数均衡模型或Cournot 均衡模型的求解. 为求解具有连续变量的大规模均衡问题提供了一条有效的途径.

参考文献(References):

[1] David A. K., Wen F. S. Market power in electricity supply[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2001, 16(4): 352-360.

[2] Ross Buldick. Electricity market equilibrium models: The effect of parametrization [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(4): 1170-1176.

[3] Day C. J., Hobbs B. F., Pang Jong-shi. Oligopolistic competition in power networks: A conjectured supply function approach[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(3): 597-607.

[4] Richard J. Green, David M. Newbery. Competition in the British electricity spot market [J]. *J of Political Economy*, 1992, 100(5): 929-953.

[5] David M. Newbery. Competition, contracts, and entry in the electricity spot market[J]. *Rand J of Economics*, 1998, 29(4): 726-749.

[6] Richard Green. Increasing competition in the British electricity spot market [J]. *The J of Industrial Economics*, 1996, 44(2): 205-216.

[7] Younes Z., Ilic M. Generation strategies for gaming transmission constraints: Will the deregulated electric power market be an oligopoly [J]? *Decision Support Systems*, 1999, 24(3-4): 207-222.

[8] Benjamin F. Hobbs. Strategic gaming analysis for electric power systems: An MPEC approach [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(2): 638-645.

[9] Weber J. D., Overbye T. J. A two-level optimization problem for analysis of market bidding strategies[A]. *IEEE Power Engineering Meeting [C]*. Edmonton, 1999. 682-687.

[10] Benjamin F. Hobbs. Linear complementarity models of nash-cournot competition in bilateral and poolco power [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(2): 194-202.

[11] Maria de Lujan Latorre, Sergio Granville. The stackberg equilibrium applied to AC power system — A non-interior point algorithm [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(2): 611-618.

[12] Francisco Facchinei, Christian Kanzow. A nonsmooth inexact newton method for the solution of large-scale nonlinear complementarity problems[J]. *Mathematical Programming*, 1997, 76(3): 493-512.