

计及输电约束的区域双边电力市场 LSFE 分析

李渝曾, 王 颀, 张少华

(上海大学自动化系, 上海市 200072)

摘要: 建立了一个能考虑输电网络约束的区域双边电力市场线性供应函数均衡(LSFE)模型,并分析了在传输线路发生不同阻塞情形时,有套利和无套利不同的假设对发电商市场力、市场平均电价和网络所有者的不同影响。采用基于非线性互补方法的改进的 Levenberg-Marquardt 算法来求解均衡解。30 节点的 IEEE 测试系统计算结果表明,套利者的出现可以起到降低市场电价、限制发电商市场力的作用,同时有利于整个市场社会福利和消费者利益的提升。

关键词: 区域双边电力市场; 输电约束; 线性供应函数均衡模型; 套利; 非线性互补方法

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

为了在更大范围内促进资源的优化配置、满足电力的供需平衡,许多国家和地区相继组建了区域电力市场^[1]。当前,我国电力市场的改革正处于以省为实体的区域电力市场阶段,期望通过改革打破省间壁垒,实现区域内资源的优化配置,提高市场效率,促进电力工业的发展。

然而,市场力的存在会降低市场的竞争性和市场效率,如何预测、分析和限制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中比较关心的问题之一。众所周知,输电网络约束是影响市场力的一个重要因素^[2],在区域电力市场中,当省间传输线发生阻塞时,可能导致处于局部地理优势的竞争者拥有局部的市场力,因此,进行市场力分析时必须考虑网络约束的作用。另一方面,寡头竞争的均衡模型,特别是与当前发电市场广泛采用的竞标联运的竞争模式相一致的供应函数均衡(SFE)模型,是市场力分析和预测的重要工具^[3~5],其中,线性供应函数均衡(LSFE)模型得到了更多的应用和研究^[6~13]。目前对电力市场进行的均衡分析大部分是基于电力库联营(Pool)交易模式,然而,随着世界和我国电力体制改革的深入,电力市场将不断完善,逐步向用户开放,每个发电商可向各用户售电,而用户也可以自由地选择从发电厂购电;同时,市场中可能产生套利者,他们可以直接从发电厂或市场购电,并向用户售电以从中套利。因此,本文基于上述更

开放、自由的双边模式,建立了一个能考虑输电网络约束的区域双边电力市场 LSFE 模型,并用其分析各市场参与者的行为对市场中的市场力等多方面的影响。

若将各省的省内市场看成本文模型中的节点,而省间的双边交易看成各节点发电商与用户的电力双边交易,则本文中的区域双边电力市场均衡模型与文献[3~13]中的 Pool 交易模式下的均衡模型的不同之处在于:①Pool 模式下每个发电商的决策是基于一个 2 层的优化模型,他们统一向独立系统运行员(ISO)投标卖电,ISO 在获得各发电商的投标后,以社会福利最大化为目标,在输电网络约束条件下确定各节点发电单元的出力和用户的需求。而本文模型中发电商与用户的电力买卖更自由,每个节点上的用户可向各节点的发电商直接购电,而每个策略发电商可分别通过对各节点上的用户以线性供应函数的形式投标卖电来追求其各自利润的最大化,其决策问题是一个单层的优化模型。由于输电网的存在,每家发电公司的发电和售电不必在每个节点都达到平衡,而只需其总的发电和总的售电平衡即可。有关输电定价管理方面,本文采用一种线性直流潮流的输电约束下的传输阻塞定价机制^[14],在此机制下,输电网所有者通过选择输电电量来追求其收益函数(运输费)的最大化。②本文假设市场中可以有許多完全竞争的套利者,若网络中任意两节点间的价格差超过它们之间的传输费用,套利者将在两地买电和卖电。本文进一步比较分析了在传输线路发生不同阻塞情形时,有套利和无套利不同的假设对发电商市场力、市场平均电价、用户收益、社会福利和网络传输费的不同影响。

本文的双边模型与文献[14,15]中的思想相类

似,但存在着几个主要不同之处。文献[14,15]中考虑的发电商竞争的均衡模型分别为 Cournot 模型和猜测供应函数均衡模型,在求均衡解时都是把每个市场参与者利润最大化的一阶条件(KKT 条件)组合在一起形成一个混合的互补问题(MCP——mixed complementary problem)^[10],然后再对其求解。文献[14]基于 Cournot 均衡模型形成的 MCP 是一个混合的线性互补问题(LCP——linear complementary problem),从而可以利用求解 LCP 的软件包来求取模型的均衡解,文献[15]假设线性猜测供应函数的斜率不变,这时所形成的 MCP 同样为 LCP。然而,当线性供应函数的斜率也取为决策变量,或取另外形式的决策变量时,模型的均衡条件将形成一个混合的非线性互补问题(NCP——nonlinear complementary problem)。对于这类 NCP,文献[15]并未给出有效的求解方法。相对文献[14,15]来说,本文考虑的是目前广泛应用的供应函数模型。针对求解市场均衡解中出现的混合的 NCP,本文采用文献[16]中的非线性互补方法,把求解 NCP 转化为求解一组非线性的代数方程,并应用改进的 Levenberg-Marquardt 算法来求解。在此基础上,本文以 30 节点的 IEEE 标准测试系统作为算例,分析了在不同程度的传输阻塞情形下套利者的存在与否对区域双边电力市场产生的不同影响。

1 均衡模型的建立

1.1 基本假设

某区域电力市场存在 N 个策略性发电商和若干用户。发电商 $f(f=1,2,\dots,N)$ 所控制的发电单元集合为 S_f ,在网络节点 $i(i=1,2,\dots,I)$ 处的发电单元为 $f_i \in S_f$,该发电单元具有二次的发电成本函数 $C_{f_i}(g_{f_i}) = c_{f_i} + a_{f_i}g_{f_i} + 0.5b_{f_i}g_{f_i}^2$ 和线性的边际成本 $mc_{f_i} = a_{f_i} + b_{f_i}g_{f_i}$ 。其中: g_{f_i} 为发电单元 f_i 的发电出力; g_{f_i} 的上、下限分别为 $\bar{g}_{f_i}$ 和 $\underline{g}_{f_i}$; a_{f_i}, b_{f_i} 为成本系数; $b_{f_i} \geq 0$ 。设在某一小时时段节点 i 的需求函数为 $q_{di} = c_i - d_i p_i$ 。其中: q_{di} 和 p_i 分别为节点 i 处的需求电力和电价; c_i, d_i 为给定系数, $d_i \geq 0$ 。

各发电商 $f(f=1,2,\dots,N)$ 在网络节点 $i(i=1,2,\dots,I)$ 以线性的供应函数 $q_{f_i} = \alpha_{f_i} + \beta_{f_i} p_i$ 向用户投标卖电。其中: p_i 为节点 i 的电价; q_{f_i} 为发电商 f 对应于电价 p_i 的售电量; α_{f_i} 和 β_{f_i} 分别为发电商 f 在节点 i 的供应函数的截距和斜率, $\beta_{f_i} \geq 0$ 。各发电公司 $f(f=1,2,\dots,N)$ 发电和售电必须达到能量平衡,即 $\sum_i \alpha_{f_i} + \beta_{f_i} p_i = \sum_{f_i} g_{f_i}$ 。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限制于选择参数 α_{f_i} 或 β_{f_i} ,或被用来乘以边际成本而构成线性供应函数报价的参数 k_{f_i} 。本文以参数 $\beta_{f_i}, \forall f_i \in S_f$ 作为发电商 f 策略性行为的决策变量,则发电商 f 在节点 i 的供应函数可表示为 $q_{f_i} = \alpha_{f_i} + \beta_{f_i} p_i$ 。应该说明的是,以参数 α_{f_i} 或 k_{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。

另外,有关输电定价方面,本文采用文献[14]提出的基于直流(DC)潮流的阻塞定价方法。输电网的所有者对于从输电网的中心节点(hub)向节点 i 运送的电收取基于阻塞的转运费(wheeling fee) W_i 。基于 DC 潮流假设,所有的发电和售电都可认为经过中心节点。各发电公司从节点 i 的发电单元向中心点运电需支付 $-W_i$,而从中心点向节点 j 的用户送电则需支付转运费 W_j ,因此,发电公司要将节点 i 的发电单元发出的电送到节点 j 售出,共需付转运费 $-W_i + W_j$ 。

假设电网从中心点运送到节点 i 的总电量为 y_i ,这里 y_i 可以为负数(从节点 i 送到中心点时为负),则利用 DC 潮流分布系数矩阵可求得经过任意输电线 k 的电量 $\sum_i F_{PTDki} y_i$,其中 F_{PTDki} 为分布系数矩阵的第 k 行第 i 列元素。假设任意输电线 k 的容量限制为 $-T_k$ 和 T_k ,如果不计网损,那么输电费仅由阻塞引起和决定。电网所有者在输电线的容量约束条件下通过选择输电量 y_i 来追求其收益函数 $\sum_i W_i y_i$ 的最大化。

另外,本文还假设市场中存在多个完全竞争的套利者,因此不必对每个套利者分别建模^[14]。若网络中任意两节点间的价格差超过它们之间的传输费用,套利者将在两地买电和卖电,记 ar_i 为套利者卖给节点 i 的电量。

1.2 发电商的决策问题

市场中任意一个理性的发电公司 f 在其所拥有的各发电单元的出力限制内,同时受各节点的供需平衡和该公司的电能平衡的约束,通过选择其策略性投标参数和各发电单元的出力,追求其利润(售电收入与发电成本之差)最大化,其优化问题可描述为以下的数学规划:

$$\begin{aligned} \max_{\beta_{f_i} \in g_{f_i}} & \sum_i [(p_i - W_i)(\alpha_{f_i} + \beta_{f_i} p_i)] - \\ & \sum_i (c_{f_i} + a_{f_i} g_{f_i} + 0.5 b_{f_i} g_{f_i}^2 - W_i g_{f_i}) \quad (1) \\ \text{s. t.} & \quad \underline{g}_{f_i} \leq g_{f_i} \leq \bar{g}_{f_i} \quad \forall f_i \in S_f \quad (2) \\ & ar_i + \sum_{j=1}^N (\alpha_{f_i} + \beta_{f_i} p_i) = c_i - d_i p_i \quad \forall i \quad (3) \end{aligned}$$

$$\sum_i (\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i) = \sum_{fj} g_{fj} \quad (4)$$

$$\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i \geq 0 \quad \forall i \quad (5)$$

1.3 网络所有者的优化问题

假设网络所有者从双边交易中收取输电费来获益,它在各条输电线的容量约束条件下通过选择输电电量 y_i 来追求其收益函数 $\sum_i W_i y_i$ 的最大化。其优化问题可用以下的线性规划来描述:

$$\max_{y_i} \sum_i W_i y_i \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad -T_k \leq \sum_i F_{PTDki} y_i \leq T_k \quad \forall k \quad (7)$$

1.4 套利者的优化问题

假设套利者通过市场中买电和卖电来追求其收益最大:

$$\max_{ar_i} \sum_i (p_i - W_i) ar_i \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_i ar_i = 0 \quad (9)$$

若 ar_i 的值为正,表示套利者间节点 i 卖电;若为负,则表示套利者从节点 i 买电。 W_i 为其买卖电所付的转运费。

1.5 市场出清条件

在网络的各节点 i 上,套利者和各家发电公司的售电量的总和与各公司在其上拥有的发电单元的发电量总和之差应该等于网络所有者对该节点提供的输电量:

$$\sum_{f=1}^N (\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i) - \sum_f g_{fi} + ar_i = y_i \quad \forall i \quad (10)$$

2 均衡模型的求解

在这个区域双边电力市场的博弈者为各发电公司、网络所有者及套利者,其各自的决策问题及决策变量分别如式(1)~式(9)所描述,同时它们受到市场出清条件(式(10))的约束。需要说明的是,传输费 W_i 不是各博弈方的决策变量,也就是对任何博弈者来说 W_i 被视为不变,但它是整个均衡模型中的变量。

从式(3)可看出,节点电价 p_i 与每个发电商的竞价策略有关,同时由式(10)可知,节点电价 p_i 与网络所有者的决策变量 y_i 及套利者的决策变量 ar_i 也有关。因而,式(1)所示的每个发电商的利润函数不仅与自身的竞价策略有关,而且与其他博弈者(即各发电公司、套利者和网络所有者)的策略也有关。只有当所有的博弈者都没有动机改变其策略时,电力市场才达到了 Nash 均衡点,即给定其他博弈者

竞争策略的情况下每个博弈者的竞争策略都是其最佳选择。因此,市场的均衡点必然应满足各博弈者决策问题的一阶最优性条件(KKT 条件),可以将各博弈者决策问题的 KKT 条件联立求解,即可得到均衡问题的解。

1) 发电商 $f(f=1,2,\dots,N)$ 决策问题的 KKT 条件可表示为:

$$(\beta_{fi}, \forall i): [(p_i - W_i) + \rho_{fi} - \theta_f + r_{fi}] p_i = 0 \quad (11)$$

$$(p_i, \forall i): (\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i) + \beta_{fi} (p_i - W_i) + \rho_{fi} \left(d_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \right) - \theta_f \beta_{fi} + r_{fi} \beta_{fi} = 0 \quad (12)$$

$$(g_{fi}, \forall f_i \in S_f): -(a_{fi} + b_{fi} g_{fi}) + W_i + \mu_{fi1} - \mu_{fi2} + \theta_f = 0 \quad (13)$$

$$(\mu_{fi1}, \forall f_i \in S_f): g_{fi} - \underline{g}_{fi} \geq 0, \mu_{fi1} \geq 0, \mu_{fi1} (g_{fi} - \underline{g}_{fi}) = 0 \quad (14)$$

$$(\mu_{fi2}, \forall f_i \in S_f): -g_{fi} + \bar{g}_{fi} \geq 0, \mu_{fi2} \geq 0, \mu_{fi2} (-g_{fi} + \bar{g}_{fi}) = 0 \quad (15)$$

$$(\rho_{fi}, \forall i): ar_i + \sum_{j=1}^N (\alpha_{ji} + \beta_{ji} p_i) = c_i - d_i p_i \quad \forall i \quad (16)$$

$$(\theta_f): \sum_i \alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i - \sum_{fj} g_{fj} = 0 \quad (17)$$

$$(r_{fi}, \forall i): \alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i \geq 0, r_{fi} \geq 0, r_{fi} (\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i) = 0 \quad (18)$$

上述各式中: μ_{fi1}, μ_{fi2} 分别为对应于式(2)所示的发电单元 f_i 的出力上、下限的对偶变量; $\rho_{fi}, \theta_f, r_{fi}$ 分别为式(3)~式(5)的对偶变量。

2) 网络所有者决策问题的 KKT 条件可表示为:

$$(y_i, \forall i): W_i + \sum_k F_{PTDki} (-\lambda_{k1} + \lambda_{k2}) = 0 \quad (19)$$

$$(\lambda_{k1}, \forall k): T_k - \sum_i F_{PTDki} y_{ik} \geq 0, \lambda_{k1} \geq 0, (T_k - \sum_i F_{PTDki} y_{ik}) \lambda_{k1} = 0 \quad (20)$$

$$(\lambda_{k2}, \forall k): T_k + \sum_i F_{PTDki} y_{ik} \geq 0, \lambda_{k2} \geq 0, (T_k + \sum_i F_{PTDki} y_{ik}) \lambda_{k2} = 0 \quad (21)$$

上述各式中: $\lambda_{k1}, \lambda_{k2}$ 分别为对应于式(7)所示的第 k 条输电线输电容量上、下约束的对偶变量。

3) 套利者决策问题的 KKT 条件可表示为:

$$(ar_i, \forall i): p_i - W_i - p_h = 0 \quad (22)$$

$$(p_h): \sum_i ar_i = 0 \quad (23)$$

式中: p_h 为对应于式(9)的对偶变量。

从上面的论述可知,求解由式(11)~式(23)和市场出清条件(式(10))联立构成的这组等式和互补

条件就可得到所求的 Nash 均衡解。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,本文采用与文献[16]中相同的非线性互补方法来求解。该方法是利用如下的非线性互补问题的 NCP-函数:

$$\Psi(a, b) \stackrel{\text{def}}{=} a + b - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (24)$$

将式(14)、式(15)、式(18)、式(20)、式(21)所示的非线性互补条件改写成一组等式方程:

$$(\mu_{f1}, \forall f_i \in S_f, \forall f): \Psi(g_{f1} - \underline{g}_{f1}, \mu_{f1}) = 0 \quad (25)$$

$$(\mu_{f2}, \forall f_i \in S_f, \forall f): \Psi(-g_{f2} + \bar{g}_{f2}, \mu_{f2}) = 0 \quad (26)$$

$$(r_{fi}, \forall i, f): \Psi(\alpha_{fi} + \beta_{fi} p_i, r_{fi}) = 0 \quad (27)$$

$$(\lambda_{k1}, \forall k): \Psi\left(T_k - \sum_i F_{\text{PTD}ki} y_{ik}, \lambda_{k1}\right) = 0 \quad (28)$$

$$(\lambda_{k2}, \forall k): \Psi\left(T_k + \sum_i F_{\text{PTD}ki} y_{ik}, \lambda_{k2}\right) = 0 \quad (29)$$

那么,由所有发电商 $f(f=1, 2, \dots, N)$ 所对应的 KKT 条件、网络拥有者的 KKT 条件、套利者的 KKT 条件以及市场出清条件联立而成的混合的 NCP 问题可表示为包括式(11)~式(13)、式(16)、式(25)~式(29)以及式(19)和式(10)在内的一组总的非线性代数方程组。记这组总的方程组为 $E(x) = 0$, 其中 x 为上述所有变量 $(\beta_{fi}, \forall i, f), (p_i, \forall i, f), (g_{fi}, \forall f_i \in S_f, \forall f), (\mu_{f1}, \forall f_i \in S_f, \forall f), (\mu_{f2}, \forall f_i \in S_f, \forall f), (\rho_{fi}, \forall i, f), (\theta_f, \forall f), (r_{fi}, \forall i, f), (y_i, \forall i), (\lambda_{k1}, \forall k), (\lambda_{k2}, \forall k), (W_i, \forall i)$ 构成的向量。然后运用基于次梯度的改进的 Levenberg-Marquardt 算法来对此方程组求解,主要算法步骤参见文献[16]。

3 算例

本文采用文献[17]中的 IEEE 6 机 30 节点系统作为算例。该系统包括 41 条支路、12 个环路和 21 个需求节点。各发电单元的最大、最小出力及其二次发电成本函数、各支路阻抗限制均同文献[17]。假设 6 个发电单元分属 6 家发电商($f=1, 2, \dots, 6$), 他们分别向各需求节点以线性供应函数投标卖电。设各需求节点的逆需求曲线为 $p_i = 40 - d_i q_{di}$, 其中 d_i 可取为当 q_{di} 为文献[17]中给出的量且 $p_i = 4.0$ 美元/(MW · h)时由需求曲线所确定的值, 则需求曲线为 $q_{di} = 40/d_i - p_i/d_i$ 。

本文试图在不同的传输阻塞条件下比较有套利者和无套利者对电力市场的不同影响。表 1 和图 1

给出了发电商在线性供应函数竞争中各种不同条件下的结果。

表 1 不同阻塞程度下系统的电价、费用和收益
Table 1 Prices, costs and revenues of the system under different congestion levels

阻塞情况	传输阻塞程度	加权平均电价/(美元 · (MW · h) ⁻¹)	总传输费/(美元 · h ⁻¹)	社会福利/(美元 · h ⁻¹)	用户收益/(美元 · h ⁻¹)
1	有套利	4.24	0.0	5 424.1	5 217.6
	无套利	4.45	0.0	5 421.3	5 210.3
2	有套利	4.25	2.75	5 423.1	5 216.9
	无套利	4.45	1.29	5 421.2	5 208.7
3	有套利	4.30	14.17	5 421.0	5 206.9
	无套利	4.51	13.72	5 419.3	5 197.1
4	有套利	4.44	43.11	5 416.1	5 178.7
	无套利	4.68	50.42	5 414.4	5 160.5
5	有套利	5.05	173.79	5 403.6	5 031.0
	无套利	5.24	172.09	5 402.5	5 025.2
6	有套利	6.27	435.82	5 353.0	4 727.2
	无套利	6.45	434.19	5 351.9	4 722.4

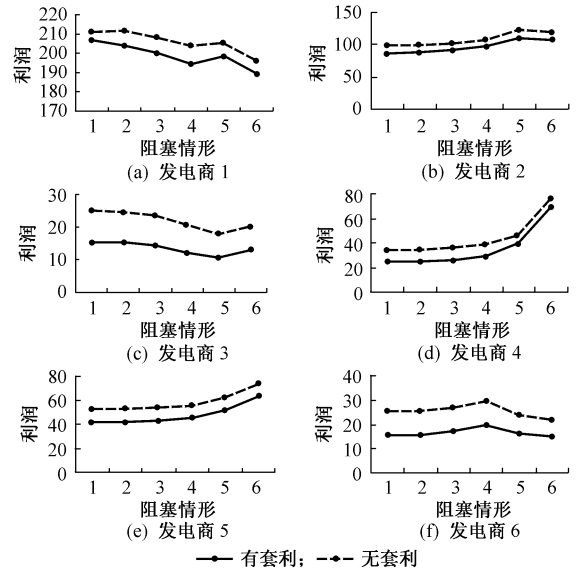


图 1 随阻塞程度而变化的发电商的利润
Fig. 1 Supplier profit versus congestion level

其中,不同的传输阻塞程度分为 6 种:各支路传输无阻塞和各支路传输容量限制为文献[17]中的 56%, 55%, 53%, 50%, 45%, 在表 1 中用阻塞情形 1~阻塞情形 6 表示。不论有无套利者存在,传输容量限制为 56% 时,所有支路中只有 1 条阻塞,55% 时有 2 条阻塞,53% 时有 3 条阻塞,50% 和 45% 时达到 4 条阻塞。阻塞更严重的情形将不再考虑,因为在实际的电力输电网络中出现这种情况的可能性不大。由于在某些支路出现阻塞,会导致各节点的电价不同,因此本文采用文献[12]中的电量加权平均电价 p_w 来比较 2 种不同竞争类型下的电价。电

量加权平均电价 p_w 可如下定义:

$$p_w = \frac{\sum_i p_{di} p_i}{\sum_i p_{di}} \quad (30)$$

从表 1 可看出,随着阻塞程度加大,市场的平均电价将会提高。然而,不论有无阻塞和阻塞的程度如何,在相同的传输容量限制下,与无套利者存在时比较,有套利者存在会使整个市场的平均电价降低,这是由于套利者的出现消除了网络中任意两节点间的不合理价格差,也就是当两节点的价格差超过它们之间的传输费用时,套利者将通过在两地间卖电和买电来消除其中不合理的差价。同时从表中可看出,在相同的传输容量限制下,与无套利者存在时比较,有套利者存在会使用户的收益增加,并使整个社会福利提高。

另外,从图 1 中显示的随阻塞程度而变化的各家发电商利润变化曲线可看出,在相同的传输容量限制下,与无套利者存在时比较,有套利者存在会使各个发电商的利润减少,因此可以限制发电商的市场力。综上所述,套利者的出现可以起到降低市场电价、限制发电商市场力的作用,同时有利于整个市场社会福利的提升。因此从某种程度上来说,在区域双边电力市场中,策略竞争的发电商是不希望出现套利者,而对消费者来说套利者的出现是有利的。

从表 1 还可看出,不发生阻塞时总的传输费用(即网络所有者的收益)为 0,随着阻塞程度的加深,总的传输费用将会逐渐增加,而套利者的存在又会使总传输费用有所不同。一般来说,套利者的存在会使得总传输费用略微提高,但增加的量不大。特别是当阻塞较为严重时,即有 4 条支路都阻塞时,套利者的存在对总传输费增加的影响幅度更小;而当有 3 条支路阻塞时,有套利者存在时甚至会使总的传输费用下降。由此可说明在阻塞较为严重时,套利的存在几乎不会加大网络的阻塞程度,有时反而对缓解阻塞程度有益。

4 结语

本文建立了一个计及输电网络约束的区域双边电力市场 LSFE 模型,并采用非线性互补方法求出市场的均衡解。在此基础上,利用 30 节点的 IEEE 测试系统作为算例,分析了在传输线路发生不同阻塞情形时,完全竞争的套利者对整个电力市场的影响。从分析结果可知,套利者的出现可以起到降低市场电价、限制发电商市场力的作用,同时有利于整个市场社会福利和消费者利益的提高。另外,当阻塞较为严重时,套利的存在几乎不会加大网络的阻

塞程度,有时反而对缓解阻塞程度有益。

参考文献

- [1] XING Wei-guo, LIN Ji-keng, WEI Ping et al. A Study of the Hierarchical Structure for the Power Market in China. In: Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol 3. Piscataway (NJ): IEEE, 2001. 1473—1477.
- [2] DAVID A K, WEN F S. Market Power in Electricity Supply. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(4): 352—360.
- [3] GREEN R J, NEWBERY D M. Competition in the British Electricity Spot Market. Journal of Political Economy, 1992, 100(5): 929—953.
- [4] NEWBERY D M. Competition, Contracts and Entry in the Electricity Spot Market. Rand Journal of Economics, 1998, 29(4): 726—749.
- [5] GREEN R. Increasing Competition in the British Electricity Spot Market. The Journal of Industrial Economics, 1996, 44(2): 205—216.
- [6] BULDICK R. Electricity Market Equilibrium Models: The Effect of Parametrization. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1170—1176.
- [7] YOUNES Z, ILIC M. Generation Strategies for Gaming Transmission Constraints: Will the Deregulated Electric Power Market Be an Oligopoly? Decision Support Systems, 1999, 24(3~4): 207—222.
- [8] HOBBS B F. Strategic Gaming Analysis for Electric Power Systems: An MPEC Approach. 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. In: Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Meeting, Vol 2. Piscataway (NJ): IEEE, 1999. 682—687.
- [10] 赵义术,余贻鑫,刘怀东. 使用 LSFE 分析计及输电系统约束的市场力. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 30—35.
ZHAO Yi-shu, YU Yi-xin, LIU Huai-dong. Transmission Constrained Market Power Analysis Based on LSFE. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 30—35.
- [11] PENG T S, TOMSOVIC K. Congestion Influence on Bidding Strategies in an Electricity Market. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1054—1061.
- [12] YU Z, SPARROW F T, GOTHAM D et al. The Impact of Transmission on Imperfect Electricity Competition. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1170—1176.
- [13] YU Z. Avoiding Congestion Charges in Spatial Electricity Competition: Part II Applications. In: Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Meeting, Vol 3. Piscataway (NJ): IEEE, 2002. 1379—1384.
- [14] HOBBS B F. Linear Complementarity Models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and Poolco Power. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 194—202.
- [15] DAY C J, HOBBS B F, PANG J S. Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 597—607.

WANG Xian, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua. A Nonlinear Complementary Approach to the Solution of Equilibrium Models for Electricity Markets. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(1): 7–11.

[17] ALSAC O, SCOTT B. Optimal Load Flow with Steady-state Security. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1973, 94(3): 45—751.

李渝曾(1947—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事
电力市场输电定价、博弈分析等研究。E-mail: yzli@mail.
shu.edu.cn

王 颢(1970—),女,博士研究生,主要从事电力市场博弈分析和市场力研究。

张少华(1966—),男,博士,副教授,主要从事电力市场风险管理、远期合同定价、博弈分析等研究。

LI Yu-zeng, WANG Xian, ZHANG Shao-hua
(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Linear supply function equilibrium (LSFE) model considering transmission constraints for regional bilateral electricity power market is developed in this paper. Based on this model, it has been analyzed that under different transmission constraints the arbitrager can exert different influence on many facts of the power market such as the market power of suppliers, the average price of the regional bilateral electricity markets and the network holder. An inexact Levenberg-Marquardt algorithm based on the nonlinear complementary approach is used to solve the equilibrium solution. IEEE 30-bus test system is employed as an example, the computational results show that the existence of arbitragers in the regional bilateral electricity markets can reduce the market price, restrict the market power of suppliers, meanwhile, it can also promote the total social welfare of markets and the consumer surplus.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377023, 50107006) and the Development Foundation of Shanghai Education Commission (No. 02AK21).

Key words: regional bilateral electricity market; transmission constraints; linear supply function equilibrium (LSFE) model; arbitrage; nonlinear complementary approach