发电商古诺博弈下差价合约的市场力抑制效应

蒲勇健
(重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要: 通过拓展经典的古诺博弈模型, 运用勒拿指数测度电力市场差价合约对发电商市场力的抑制效应. 在发电商二次成本函数假定下, 得到多发电商纳什均衡解析表达式, 并且发现发电商绝对量差价合约电量的增加会导致发电商勒拿指数下降. 此外, 对对称双发电商情形进行数值模拟, 并推导得出差价合约电量的上限. 研究结果表明, 差价合约对发电商市场力有抑制作用, 在一个确定的上限范围内, 绝对量差价合约电量越大, 抑制效应越强.

关键词: 差价合约; 勒拿指数; 电力市场; 古诺博弈; 市场力
中图分类号: F272 **文献标识码**: A **文章编号**：1000−5781(2018)06−0754−09

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2018.06.004

Market power inhibiting effects of contracts for difference under Cournot game of electricity producers

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

Abstract: This paper presents a methodology to assess the inhibiting effects of market power of contracts for difference (CfDs) in electricity markets. An expanded multi-agent Cournot model is deduced by introducing Lerner Index to evaluate the market power of electricity producers. Nash equilibrium (NE) solutions are obtained, assuming that the cost function for every electricity producer is quadratic. Besides, data simulation is conducted, and the upper limit of contractual electric quantity is derived. The analysis shows that the presence of CfDs has certain market power inhibiting effects on generators, since the increase in the absolute contractual electric quantity will result in the decline of Lerner Index. Under the upper limit, the inhibiting effect increases with the contractual electric quantity.

Key words: contracts for difference; Lerner index; electricity markets; Cournot game; market power

1 引 言

伴随着我国电力市场改革的推进, 竞争机制不断被引入以促进市场的发展. 但是, 由于电力市场自身具备一些特有的技术特征, 譬如电力能量不能存储, 发电商和输变电设施投资大等, 其更具有寡头垄断市场的性质. 在寡头垄断市场中的电力企业具备强大的市场力量, 即能通过价格策略提高市场价格使其偏离产品或服务的边际成本从而获得超额利润[1]. 然而, 市场力的存在会带来市场效率低下、资源配置低效、社会福利降低及消费者利益受损等后果. 同时发电商通过行使市场力会导致市场价格偏高、峰值电价出现尖峰, 甚

收稿日期: 2015−05−19; 修订日期: 2016−01−11.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71673034).

至引发电力危机的出现, 进一步危及电网安全运营. 21 世纪初美国加州电力市场危机出现的原因之一就是发电商利用其市场力采用持留电量和改变竞标曲线各段的斜率来抬高电价[2−4].

设计某种机制来限制电力企业的市场力量, 成为电力市场规制研究中的重要内容. 在文献中提出的采用差价合约的机制限制电力企业市场力量的发挥, 是一种具有启发性的思路[5−7]. 差价合约 (CfDs) 是交易双方为了回避现货交易风险而签订的一类中长期合约. 其功能是调整合约双方利益, 降低市场成员由于现货价格大幅度波动造成的风险. 差价合约中规定了合约电量和合约电价. 在结算时, 对于发电公司的发电量在合约以内的部分, 如果市场电价高于合约价, 发电公司将把按市场价格结算比按合约价格结算多收入的部分返还给购电公司; 如果市场电价低于合约电价, 购电公司将付给发电公司按市场价格结算少收入的部份. 如果合约约定按照固定合约价格交易的电量部分是以绝对量结算, 则为绝对量差价合约; 如果合约约定按照固定合约价格交易的电量部分是以交易量的固定比例结算, 则为相对量差价合约.

目前, 国内外已有文献对差价合约的发电商市场力抑制作用进行研究. 其中, 博弈模型作为分析电力市场参与者行为策略的常见工[8,9], 在现有的市场力抑制作用研究中也是主要分析工具. 但是现有文献利用古诺博弈进行研究时, 仅提供算例分析, 没有从理论层面进行证明. 赵波等[10]和张洪青等[11]分别用简单的完全信息古诺博弈算例表明差价合约可以降低电价. 本文受上述文献思路的启发, 利用古诺模型研究电力市场中差价合约对市场力效应的抑制作用, 建立了可用于多厂商分析的普适性模型. 同时以下文献建立在 Bertrand 模型的基础上, 采用仿真算例和实证分析进一步证实了差价合约存在的市场抑制效应. Elia 等[12]分析了差价合约对市场均衡价格的影响, 并通过十个发电商的 Bertrand 博弈算例表明差价合约可以提高市场力. Qi[13]等将基于确定性合约电量分解算法的差价合约分析系统应用到浙江电力市场, 实证研究了差价合约降低市场力的作用. 胡军峰等[14]给出了单边开放电力市场下差价合约的最优形式. 运用 Bertrand 博弈的一种变体模型进行分析, 提出电网公司设计差价合约交易机制时, 应充分考虑发电企业成本和电力需求负荷的影响, 以实现电网公司购电成本最优. 以上关于差价合约的研究存在一个共同的问题, 少有文献用到产业经济学中的勒拿指数 (Lerner Index). 曾鸣[15]提出研究电力市场市场力时可结合古诺模型和勒拿指数作为分析工具, 但未针对差价合约给出其市场力抑制效应的具体分析. 现有文献考虑差价合约对市场力的抑制效应时所采用的市场力衡量指标为市场均衡价格、厂商均衡竞价与边际成本之差、Herfindal-Hirschman 指数 (HHI)、社会福利等较为间接的指标[10−16].

现有的文献通过间接指标而非勒拿指数表明差价合约对市场力的抑制作用, 存在改进的空间. 因为降低 (相对) 价格或者提高社会福利不一定会降低勒拿指数. 测度市场力变化的指标是勒拿指数而不是价格或社会福利本身. HHI 是衡量产业集中度的常用指标, 也不直接表明市场力. 同时, 现有的电力市场差价合约抑制市场力效应研究还需要进一步拓展, 包括在多发电商竞争 (不仅仅假定两个发电商), 动态博弈, 不对称信息博弈和非固定需求量负荷等方面的一般化.

因此, 本文在经典古诺模型的基础上将衡量市场力的标准指标勒拿指数纳入模型, 并基于多发电商和非固定需求量负荷构建模型, 得到了拓展古诺模型和其纳什均衡表达式. 本文利用该模型研究了绝对量差价合约电量的变化对发电商市场力的抑制效应, 并给出了对称双发电商的表达式以及绝对量差价合约的电量上限值.

2 存在差价合约的电力市场多发电商博弈模型与市场力抑制效应: 拓展古诺博弈

2.1 模型基本假设

差价合约电量在经典古诺博弈中的植入, 拓展了经典古诺博弈模型. 对模型做下列基本假定:

1) 电力市场中存在 N 个发电商, 它们的成本函数分别为

$$C_i = k_i q_i^2/2 + s_i q_i + e_i,\ i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N,\ k_i \geqslant 0,\ s_i \geqslant 0, \tag{1}$$

其中 $C_i,\ q_i,\ e_i$ 分别是第 i 个发电商的总成本, 发电量和固定成本, k_i, s_i 是成本函数系数.

2) 市场逆需求函数为

$$p = a - hQ,\ \ a > 0,\ h > 0, \tag{2}$$

其中 p, Q 分别是市场价格和市场需求电量, a, h 是常系数. 为了使得下面的分析有意义, 假定最高价格不低于发电商最低边际成本, 否则某些发电商在任何情况下都不会供电, 该发电商就不在考虑之中. 于是有 $a \geqslant s_i, i = 1, 2, \ldots, N$.

3) 绝对与相对差价合约

绝对量差价合约定义为企业 i 与购电电网之间签订的差价合约规定, 如果电网向企业购电量为 q_i, 当 $q_i \leqslant q_{ci}$, 交易价格按照合约规定的固定价格 p_c 执行; 当 $q_i > q_{ci}$, 则超出 q_{ci} 的购电量 $q_i - q_{ci}$ 以市场价格交易, 其中 $q_{ci} \geqslant 0$ 为常数. 这里, 假定发电商生产合约电量 q_{ci} 时的成本低于收益, 即 $p_c q_{ci} > k_i q_{ci}^2/2 + s_i q_{ci} + e_i$. 因为边际成本递增, 这个假定意味着发电商生产销售任何不超过合约电量 q_{ci} 的电量的成本都低于其收益.

相对量差价合约定义为企业 i 与购电电网之间签订的差价合约规定, 如果电网向企业购电量为 q_i, 其中的电量 $a_i q_i$ 的交易价格按照合约规定的固定价格 p_c 执行; 超出 q_{ci} 的购电量 $(1 - a_i)q_i$ 以市场价格交易, 其中 a_i 为常数, $i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N$. 这里假定不同企业的合约价格是相同的 p_c.

限于篇幅, 本文仅研究绝对量差价合约的市场力抑制效应, 相对量差价合约的市场力抑制效应将在后续的文章中予以研究和分析.

2.2 存在差价合约的多发电商博弈模型构建

由于电力市场中发电商的发电量是不可储存的, 所以发电商根据市场需求决定发电量, 并且是与竞价过程同时决策的. 可以采用古诺博弈刻画发电商的这种互动决策. 由于本文提出的模型中含有差价合约电量, 因此是对经典古诺模型的一种扩充和拓展.

差价合约要有意义, 一定有 $p_c < a$, 否则, 如果 $p_c \geqslant a$, 电网的购电需求量为零. 于是假定 $p_c < a$.

1) 如果 $p_c \geqslant a - hQ_c$, 其中 $Q_c = \sum\limits_{i=1}^{N} q_{ci}$, 则电网购电量为 Q, 它满足 $p_c = a - hQ$, 于是 $Q = \dfrac{a - p_c}{h}$. 电网从 N 个发电商那里按照价格 p_c 分别购得电量 q_i, 满足 $q_i \leqslant q_{ci}$, $i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N$; $\sum\limits_{i=1}^{N} q_i = Q$.

因为 $p_c \geqslant a - hQ_c$, $Q_c \geqslant (a - p_c)/h = Q$, 所以电网可以按照合约价格购得所需的电量. 根据前面的假定, 此时所有发电商生产市场需要的电量的成本是低于其成本的.

2) 如果 $p_c \leqslant a - hQ_c$, 则电网首先从 N 个发电商那里按照价格 p_c 分别购得电量 q_{ci}, 然后再按照市场价格 p 从 N 个发电商那里购买余下的电量需求量. 记 $\widetilde{q}_i \geqslant 0, i = 1, 2, \ldots, N$ 分别是发电商按照市场价格 p 购买的电量.

根据式(1)和式(2), 设发电商 i 的预期利润为

$$\pi_i = p_c q_{ci} + p\widetilde{q}_i - C_i = p_c q_{ci} + \left(a - h\left(Q_c + \sum_{i=1}^{N} \widetilde{q}_i\right)\right)\widetilde{q}_i - \left(\frac{1}{2}k_i\left(q_{ci} + \widetilde{q}_i\right)^2 + s_i\left(q_{ci} + \widetilde{q}_i\right) + e_i\right), \tag{3}$$

其中因为电网已经按照合约价格 p_c 购买了电量 Q_c, 还有额外的需求量 $\sum\limits_{i=1}^{N} \widetilde{q}_i$, 就意味着市场价格为 $a - h\left(Q_c + \sum\limits_{i=1}^{N} \widetilde{q}_i\right)$, 这是根据需求曲线的性质而得来的结论.

易知 π_i 为凹函数, 因而发电商 i 的预期利润最大化一阶条件为

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial \widetilde{q}_i} = (-2h - k_i)\,\widetilde{q}_i + \left(a - h\left(Q_c + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \widetilde{q}_j\right)\right) - k_i q_{ci} - s_i = 0,\ i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N, \tag{4}$$

于是

$$\begin{aligned}\widetilde{q}_i&=\frac{\left(a-h\left(Q_{\mathrm{c}}+\sum\limits_{j=1,\ j\neq i}^{N}\widetilde{q}_j\right)\right)-k_iq_{\mathrm{c}i}-s_i}{2h+k_i}\\&=\frac{-h}{2h+k_i}\sum_{j=1,\ j\neq i}^{N}\widetilde{q}_j+\frac{a-hQ_{\mathrm{c}}-k_iq_{\mathrm{c}i}-s_i}{2h+k_i},\ i=1,\ 2,\ \ldots,\ N.\end{aligned}\tag{5}$$

根据式(5), 有

$$\widetilde{q}_i=-h\left(\boldsymbol{\eta}_i-\eta_{ii}\boldsymbol{l}_i\right)\boldsymbol{q}-h\eta_{ii}\boldsymbol{l}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}-k_i\eta_{ii}\boldsymbol{l}_i\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}},\tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{\eta}_i=\left(\eta_{i1},\eta_{i2},\ldots,\eta_{iN}\right),\eta_{ij}=\dfrac{1}{2h+k_i},\boldsymbol{\lambda}=\left(\lambda_1,\lambda_2,\ldots\lambda_N\right),\lambda_i=\dfrac{a-s_i}{2h+k_i},i,j=1,2,\ldots,N,\boldsymbol{l}_i$ 是第 i 个分量为 1, 其它分量皆为零的 N 维行向量. $\boldsymbol{l}=(1,1,\ldots,1)$, $\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}=\left(q_{\mathrm{c}1},\ q_{\mathrm{c}2},\ldots,q_{\mathrm{c}N}\right)^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{q}=\left(\widetilde{q}_1,\widetilde{q}_2,\ldots,\widetilde{q}_N\right)^{\mathrm{T}}$.

将式(6) 记为向量形式, 得到 $\boldsymbol{q}=-h\boldsymbol{H}\boldsymbol{q}-\boldsymbol{M}\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}$, 即

$$\boldsymbol{\varPhi}\boldsymbol{q}=-\boldsymbol{M}\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}},\tag{7}$$

其中 $\boldsymbol{\varPhi}=\boldsymbol{E}+h\boldsymbol{H},\boldsymbol{H}=\left(h_{ij}\right)_{N\times N},h_{ij}=\dfrac{1}{2h+k_i},i\neq j,h_{ii}=0,\boldsymbol{M}=\left(m_{ij}\right)_{N\times N},m_{ij}=hh_{ij},i\neq j,m_{ii}=\dfrac{h+k_i}{2h+k_i},\boldsymbol{\varPhi}=\left(\phi_{ij}\right)_{N\times N},\ \phi_{ij}=hh_{ij},\ i\neq j,\ \phi_{ii}=1,\boldsymbol{M}=\boldsymbol{\varPhi}+\boldsymbol{K},\ \boldsymbol{K}=\left(k_{ij}\right)_{N\times N},\ k_{ij}=0,\ i\neq j,k_{ii}=\dfrac{h+k_i}{2h+k_i}-1=-\dfrac{h}{2h+k_i}=-\phi_{ij},\ i,\ j=1,2,\ldots,N.$

矩阵 $\boldsymbol{\varPhi}$ 是可逆的, 证明如下.

证明 假设矩阵 $\boldsymbol{\varPhi}$ 是不可逆的，因此存在不同时为零的 $N-1$ 个数 a_i, 以及自然数 n, $1\leqslant n\leqslant N$, $i\neq n$ 使得

$$1=\sum_{i=1,\ i\neq n}^{N}a_i\frac{h}{2h+k_i},\tag{8}$$

$$\frac{h}{2h+k_n}=\sum_{i=1,\ i\neq j,\ n}^{N}a_i\frac{h}{2h+k_i}+a_j,\ j=1,2,\ \ldots,\ N,\ j\neq n,\tag{9}$$

于是根据式(8)和式(9), 可得

$$a_j=\frac{h}{2h+k_n}-\sum_{i=1,\ i\neq j,\ n}^{N}a_i\frac{h}{2h+k_i}=a_j\frac{h}{2h+k_j},\tag{10}$$

$$a_j=\frac{\dfrac{h}{2h+k_n}-1}{1-\dfrac{h}{2h+k_i}}<0,\ j=1,2,\ \ldots,\ N,\ j\neq n.\tag{11}$$

于是有

$$1=\sum_{i=1,\ i\neq n}^{N}a_i\frac{h}{2h+k_i}<0,\tag{12}$$

式 (12) 与假设矛盾, 所以 $\boldsymbol{\varPhi}$ 是可逆的. 证毕.

根据式(7), 有

$$\boldsymbol{q}=-\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{M}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}=-\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\left(\boldsymbol{\varPhi}+\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}=-\left(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}},\tag{13}$$

于是根据式(13), 有

$$p=a-h\left(\boldsymbol{l}\left(\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{q}\right)\right)=a-h\left(\boldsymbol{l}\left(\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}-\left(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}\right)\right)$$
$$=h\boldsymbol{l}\left(\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}-h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}+a=h\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}-h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}+a, \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\Theta}=\boldsymbol{l}\left(\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{K}\right)=\left(\theta_1,\ \theta_2,\ \ldots,\ \theta_N\right),\ Q=\boldsymbol{l}\left(\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{q}\right)=-\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}, \tag{15}$$

其中 $\boldsymbol{\Theta}$ 是 N 维行向量.

设 $\boldsymbol{\Phi}^{-1}=\left(\varphi_{ij}\right)_{N\times N}$, 由于 $\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{K}=\left(\Delta_{ij}\right)_{N\times N}$,$\Delta_{ij}=\varphi_{ij}\left(-\dfrac{h}{2h+k_j}\right)$, $i,\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ N$, 因为 $\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Phi}^{-1}=\boldsymbol{E}$ 可以写成

$$\sum_{i\neq j}^{N}\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{ij}+\varphi_{jj}=1, \tag{16}$$

$$\sum_{i\neq j}^{N}\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{il}+\varphi_{jl}=0,\ j\neq l,\ j,\ l=1,\ 2,\ \ldots,\ N, \tag{17}$$

于是根据式(16)和式(17), 有

$$\sum_{i=1}^{N}\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{ij}+\varphi_{jj}=1+\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{jj}, \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{il}+\varphi_{jl}=\frac{h}{2h+k_j}\varphi_{jl},\ j\neq l,\ j,\ l=1,\ 2,\ \ldots,\ N, \tag{19}$$

根据式(18)和式(19), 有

$$\left(\frac{h+k_j}{2h+k_j}\right)\varphi_{jj}=1-\frac{h}{2h+k_j}\sum_{i=1}^{N}\varphi_{ij}, \tag{20}$$

$$\left(\frac{h+k_j}{2h+k_j}\right)\varphi_{jl}=-\frac{h}{2h+k_j}\sum_{i=1}^{N}\varphi_{il}, j\neq l, j, l=1,2,\ldots,N. \tag{21}$$

在式(21)中令 $j=l$, 则有

$$\left(\frac{h+k_l}{2h+k_l}\right)\varphi_{ll}=1-\frac{h}{2h+k_l}\sum_{i=1}^{N}\varphi_{il}. \tag{22}$$

由式(21)和式(22), 如果 $\sum\limits_{i=1}^{N}\varphi_{il}\leqslant 0$, 则有 $\varphi_{jl}\geqslant 0,\ j,\ l=1,\ 2,\ \ldots,\ N$, 于是 $\sum\limits_{i=1}^{N}\varphi_{il}\geqslant 0$, 所以 $\sum\limits_{i=1}^{N}\varphi_{il}=0$. 由式(22), $\varphi_{jl}=0,\ j\neq l,\ j,\ l=1,2,\ \ldots,\ N$; $\varphi_{jj}=\dfrac{2h+k_j}{h+k_j}>1>0$. 于是, $0<\sum\limits_{i=1}^{N}\varphi_{il}=0$, 矛盾. 所以 $\sum\limits_{i=1}^{N}\varphi_{il}>0,\ l=1,2,\ \ldots,\ N$.

故根据式(15), 有

$$\theta_j=\sum_{i=1}^{N}\Delta_{ij}=\sum_{i=1}^{N}\varphi_{ij}\left(-\frac{h}{2h+k_j}\right)=-\frac{h}{2h+k_j}\sum_{i=1}^{N}\varphi_{ij}<0, \tag{23}$$

显然, 价格随着差价合约电量的增加而减少.

第 i 个企业的勒拿指数为

$$L_i=1-\left(k_i\left(-\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}+\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}\right)+s_i\right)/\left(h\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{q}_{\mathbf{c}}-h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}+a\right)$$

$$
\begin{aligned}
&= 1 + \frac{k_i\theta_i q_{ci} + k_i \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - k_i \sum\limits_{j=1}^{N} \theta_j - s_i}{h\theta_i q_{ci} + h \sum\limits_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a} \\
&= 1 + \frac{\frac{k_i\theta_i}{h\theta_i}\left(h\theta q_{ci} + h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{ci} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a\right) + k_i \sum\limits_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc}}{h\theta_i q_{ci} + h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a} - \\
&\quad \frac{k_i \sum\limits_{j=1}^{N} \theta_j + s_i + \frac{k_i\boldsymbol{\theta}}{h\theta_i}\left(h \sum\limits_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{ci} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a\right)}{h\theta_i q_{ci} + h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a} \\
&= 1 + \frac{k_i}{h} + \frac{k_i \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{ci} - k_i \sum\limits_{j=1}^{N} \theta_j - s_j}{h\theta_i q_{ci} + h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a} - \frac{\frac{k_i\boldsymbol{\theta}}{h\theta_i}\left(h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{ci} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a\right)}{h\theta_i q_{ci} + h \sum\limits_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a} \\
&= 1 + \frac{k_i}{h} + \frac{\mathit{\Pi}}{h\theta_i q_{ci} + \mathit{\Lambda}},\ \ i = 1, 2, \ldots, N,
\end{aligned} \tag{24}
$$

其中

$$
\mathit{\Lambda} = h \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a,
$$

$$
\mathit{\Pi} = k_i \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - k_i \sum_{j=1}^{N} \theta_j - s_i - \frac{k_i\theta_i}{h\theta_i}\left(h \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{ci} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a\right).
$$

因此根据式(24), 有

$$
\frac{\partial L_i}{\partial q_{ci}} = -\frac{h\theta_i \mathit{\Pi}}{(h\theta_i q_{ci} + \mathit{\Lambda})^2}. \tag{25}
$$

因为

$$
\begin{aligned}
\mathit{\Pi} &= k_i \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - k_i \sum_{j=1}^{N} \theta_j - s_i - \frac{k_i\theta_i}{h\theta_i}\left(h \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - h\boldsymbol{l}\boldsymbol{\Phi}^{-1}\boldsymbol{\lambda} + a\right) \\
&= k_i \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - k_i \sum_{j=1}^{N} \theta_j - s_i - k_i \sum_{j=1,\ j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} + k_i \sum_{j=1}^{N} \sum_{l=1}^{N} \frac{h}{2h + k_j} \varphi_{lj} - a\frac{k_i}{h} \\
&= k_i \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} - k_i \sum_{j=1}^{N} \theta_j - s_i - k_i \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \theta_j q_{jc} + k_i \sum_{j=1}^{N} \theta_j - a\frac{k_i}{h} = -s_i - a\frac{k_i}{h} < 0,
\end{aligned} \tag{26}
$$

根据式(25)和式(26)可得 $\dfrac{\partial L_i}{\partial q_{ci}} = -\dfrac{h\theta_i \mathit{\Pi}}{(h\theta_i q_{ci} + \mathit{\Lambda})^2} < 0$, 勒拿指数是差价合约电量的减函数.

差价合约具有抑制市场力量的效应, 因此, 有下面的结论.

定理 1　存在 N 个发电商的电力市场中, 在拓展古诺博弈纳什均衡中, 每一个发电商的差价合约电量越大, 其勒拿指数就越低, 市场力量就越弱.

发电商滥用市场力不利于资源的优化配置, 对电力市场的良性循环起着较大的负面作用, 因而对于市场

力抑制工具的研究是具有现实意义和迫切需求的. 差价合约作为学术界公认可以制约市场力的工具, 其效应却未得到严格证明. 利用数学工具对该定理进行严密证明, 为差价合约的广泛使用提供了强有力的依据. 同时定理采用的多发电商前提考虑了较为一般的情况, 具有普适性和实际利用价值. 该定理是差价合约具有市场抑制作用的理论依据, 对于发电商制定差价电量提供了定性保障.

3 对称双发电商的情形

如果所有发电商具有相同的成本函数, 即 $k_i=k_j=k,\ s_i=s_j=s,\ e_i=e_j=e,\ i,\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ N$, 则称此情形为对称发电商情形.

当只有两个对称发电商时, 可以导出矩阵 $\boldsymbol{\varPhi}$ 各元素的解析式. 因为

$$\boldsymbol{\varPhi}=(\phi_{ij})_{N\times N}\,,\ \phi_{ij}=\frac{h}{2h+k_i},\ \ i\neq j,\ \phi_{ii}=1,\ i,\ j=1,\ 2,\ \ldots,\ N, \tag{27}$$

对于 $N=2$ 的情形, 有

$$\varphi_{11}+\frac{h}{2h+k}\varphi_{21}=1,\ \ \frac{h}{2h+k}\varphi_{11}+\varphi_{21}=0,\ \ \varphi_{12}+\frac{h}{2h+k}\varphi_{22}=0,\ \ \frac{h}{2h+k}\varphi_{12}+\varphi_{22}=1.$$

设 $\rho=\dfrac{h}{2h+k}$, 可解得

$$\varphi_{11}=\frac{1}{1-\rho^2},\ \varphi_{22}=\frac{1}{1-\rho^2},\varphi_{21}=-\frac{\rho}{1-\rho^2},\ \varphi_{12}=-\frac{\rho}{1-\rho^2},$$

由此可知

$$\sum_{i=1}^{2}\varphi_{i1}=\frac{1}{1-\rho^2}-\frac{\rho}{1-\rho^2}=\frac{2}{1+\rho}>0,\ \sum_{i=1}^{2}\varphi_{i2}=-\frac{\rho}{1-\rho^2}+\frac{1}{1-\rho^2}=\frac{2}{1+\rho}>0.$$

因而, 本节展示的考虑对称双发电商的古诺拓展模型通过对具体参数进行推演验证了第 2 节给出的定理, 可以发现绝对差价合约的合约电量的增加能正向加大市场力抑制效应.

4 关于差价合约电量的上限

根据第 2 节给出的定理可知, 差价合约电量越大, 市场力抑制效应越强, 然而差价合约电量是有上限存在的, 并不能无限扩大. 本节基于这个考虑继续讨论了差价合约电量的上限问题. 差价合约电量 $q_{ci}\,(i=1,2,\ldots,N)$的大小是由发电商与电网之间谈判决定的. 影响谈判结果的因素很多, 可以运用博弈论中的谈判理论构造模型进行研究, 譬如纳什讨价还价博弈或者动态博弈中的鲁宾斯坦讨价还价博弈模型等. 这将是下一步研究的课题. 这里需要指出的是, $q_{ci}\,(i=1,2,\ldots,N)$存在上限, 因为, 如果 $Q_{\rm c}=\sum\limits_{i=1}^{N}q_{ci}$(相对于市场需求来说)太大, 就不存在由市场供求决定的价格, 因为市场需求可以完全由在差价合约电量 $Q_{\rm c}=\sum\limits_{i=1}^{N}q_{ci}$ 范围以内得到满足, 此时, 前面的模型中的 $\widetilde{q}_i\,(i=1,\ 2,\ \ldots,\ N)$就可能为负数, 这是模型不允许的. 所以, 差价合约电量的上限应该由条件 $\widetilde{q}_i\geqslant 0\,(i=1,\ 2,\ \ldots,\ N)$决定. 下面导出这样的条件.

根据式(14), 有

$$\boldsymbol{q}=-\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{M}\boldsymbol{q}_{\rm c}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\rm T}=-\left(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{q}_{\rm c}+\boldsymbol{\varPhi}^{-1}\boldsymbol{\lambda}^{\rm T},$$

可得

$$\widetilde{q}_i+q_{ci}=\sum_{j=1}^{N}\frac{h}{2h+k_i}\varphi_{ij}q_{jc}+\sum_{j=1}^{N}\varphi_{ij}\frac{a-s_i}{2h+k_i}\geqslant q_{ci}, \tag{28}$$

$$\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\frac{h}{2h+k_i}\varphi_{ij}q_{jc}+\left(\frac{h-a+s_i}{2h+k_i}\right)\varphi_{ii}q_{ci}\geqslant-\sum_{j=1}^{N}\varphi_{ij}\frac{a-s_i}{2h+k_i},\ \ i=1,\ 2,\ \ldots,\ N, \tag{29}$$

式(28)和式(29)就是差价合约电量应该满足的条件.

譬如, 如果对称双发电商的情形, 式(28)和式(29)就分别为

$$-\rho^2q_{2c}+\left(\rho\frac{h-a+s}{h}\right)q_{1c}\geqslant-\rho\frac{a-s}{h}+\rho^2\frac{a-s}{h}, \tag{30}$$

$$-\rho^2q_{1c}+\left(\rho\frac{h-a+s}{h}\right)q_{2c}\geqslant-\rho\frac{a-s}{h}+\rho^2\frac{a-s}{h}. \tag{31}$$

于是有 $\left(\left(\frac{h-a+s}{h}\right)^2-\rho^2\right)\rho q_{2c}\geqslant-\rho^2\frac{a-s}{h}+\rho^3\frac{a-s}{h}+\left(-\rho\frac{a-s}{h}+\rho^2\frac{a-s}{h}\right)\left(\frac{h-a+s}{h}\right).$

5　数值分析

定理 1 指出在存在 N 个发电商的电力市场中, 在拓展古诺博弈纳什均衡中, 每一个发电商的差价合约电量越大, 其勒拿指数就越低, 市场力量就越弱. 下面采用 MATLAB 进行数值模拟,讨论这个结论是否成立, 其中 $a=1, h=0.000\,1, s_1=0.001, s_2=0.001, k_1=0.000\,01, k_2=0.000\,01, N=2$. 从图中可以看到, 绝对差价合约电量越大, 勒拿指数越小, 也就是市场力抑制作用越大.

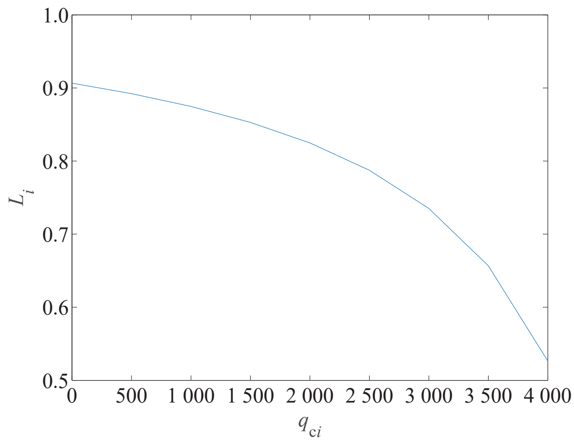

图 1　勒拿指数与合约电量的关系图

Fig. 1　The relationship between Lerner Index and contractual electric quantity

6　结束语

本文针对我国电力市场存在的厂商市场力量强大的现象建立了存在差价合约的多发电商古诺博弈模型, 测度了差价合约的市场力抑制效应. 在发电商具有二次幂函数形式成本函数 (相当于对发电商成本函数进行二阶近似) 假定下, 对拓展古诺博弈中差价合约的市场力量进行研究. 研究发现差价合约能够降低发电商的勒拿指数, 从而对发电商的市场力量进行抑制. 本文是在一般化的较弱假定下, 对电力市场差价合约的市场力抑制效应进行分析, 并且运用产业经济学中测度厂商市场力的标准指标即勒拿指数进行分析, 证明了差价合约完全具备抑制企业市场力量的功能. 论文还给出了清晰的数学解析式, 为未来的相关研究提供了基础性的分析工具. 论文的后续工作包括采用柏川德博弈, 动态博弈 (譬如 Stackelberg 博弈) 以及引入不对称信息博弈模型进行分析, 预计这些后续的研究将拓展本论文的结果, 并且展现出丰富的市场行为.

参考文献:

[1] 宋伊群, 侯志俭, 文福拴. 电力市场三种寡头竞争模型的市场力分析比较. 电网技术, 2003, 27(8): 10–15.
Song Y Q, Hou Z J, Wen F S. Comparison of market power in three oligopoly models of electricity market. Power System Technology, 2003, 27(8): 10–15. (in Chinese)

[2] Budhraja V S. California's electricity crisis. Power Engineering Review, 2002, 22(8): 6–7.

[3] Mensah-Bonsu C, Oren S. California electricity market crisis. Causes, remedies, and prevention. Power Engineering Review, 2002, 22(8): 4–5.

[4] 朱成章. 美国加州电力危机和美加大停电对世界电力的影响. 中国电力, 2003(11): 1– 6.
Zhu C Z. Influence of power crisis in California and blackout in US and Canada on world power industry. Electric Power, 2003(11): 1–6. (in Chinese)

[5] 吴杰康, 龙　军, 王辑祥. 电力市场中市场力的评估与发电竞标策略. 中国电力, 2003, 36(6): 23–26.
Wu J K, Long J, Wang J X. Evaluation of market power and bidding strategies for generation in electricity markets. Electric Power, 2003, 36(6): 23–26. (in Chinese)

[6] 赵学顺, 戴铁潮, 黄民翔. 电力市场中风险规避问题的研究(二). 电力系统自动化, 2001, 25(8): 16–19.
Zhao X S, Dai T C, Huang M X. Study on risk evasion in electricity market (part two). Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 16–19. (in Chinese)

[7] 马新顺, 刘建新, 文福拴, 等. 计及风险并考虑差价合约的发电公司报价策略研究. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 37–41.
Ma X S, Liu J X, Wen F S, et al. Development of risk-constrained optimal bidding strategies for generation companies in electricity markets with contract for difference. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 37–41. (in Chinese)

[8] 段宏波, 朱　磊, 范　英. 能源–环境–经济气候变化综合评估模型研究综述. 系统工程学报, 2014, 29(6): 852–868.
Duan H B, Zhu L, Fan Y. Review on the integrated assessment model of energy-environment-economy for the global climate change. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(6): 852–868. (in Chinese)

[9] 慕银平, 李韵雅. 寡头竞争企业的最优产量及碳排放量联合决策. 系统工程学报, 2014, 29(1): 1–7.
Mu Y P, Li Y Y. Joint decision of the optimal output and carbon emissions for duopoly enterprise. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 1–7. (in Chinese)

[10] 赵　波, 卢志刚. 一种采用博弈论降低电力市场中市场力的方法. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2002, 31(2): 19–22.
Zhao B, Lu Z G. A method of reducing market power based on game theory in power market. Journal of Guizhou University of Technology(Nature Science Edition), 2002, 31(2): 19–22. (in Chinese)

[11] 张洪青, 范晓音. 电力市场中差价合约策略的博弈论分析. 华北电力大学学报(社会科学版), 2008(5): 11–14.
Zhang Xiaoqing, Fan Xiaoyin. Game analysis on contracts for difference in electric market. Journal of North China Electric Power University (Social Science Edition), 2008(5): 11–14. (in Chinese)

[12] Elia E, Maiorano A, Song Y H, et al. Novel methodology for simulation studies of strategic behavior of electricity producers. Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle: IEEE, 2000, 2235–3341.

[13] Qi L, Huang W. The impact of contract for difference on the market power in the restructured Zhejiang electricity market. Power Systems Conference and Exposition. New York: IEEE Press, 2004, 874–880.

[14] 胡军峰, 李春杰, 赵会茹, 等. 单边开放电力市场下最优差价合约. 现代电力, 2009, 26(6): 70–76.
Hu J F, Li C J, Zhao H R, et al. Optimum contract for difference in unilateral open electricity market. Modern Electric Power, 2009, 26(6): 70–76. (in Chinese)

[15] 曾　鸣, 童明光, 张艳馥, 等. 我国未来电力市场中的经济风险: 市场力风险及其防范问题. 电网技术, 2004, 28(9): 44–49.
Zeng M, Tong M G, Zhang Y F, et al. Economic risk in future domestic electricity market power risk and its prevention. Power System Technology, 2004, 28(9): 44–49. (in Chinese)

[16] Nam Y W, Yoon Y T, Don H, et al. Effects of long-term contracts on firms exercising market power in transmission constrained electricity market. Electric Power Systems Research, 2006, 76(6/7): 435–444.

作者简介:

蒲勇健(1961—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 数量经济学, 博弈论, Email: puyjan@sina.com.