

基于非合作博弈与收益共享契约的能源服务商定价策略

李学平,王健民,卢志刚,耿丽君,石丽娜,何良策

(燕山大学 电力电子节能及传动控制河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘要:随着能源互联网的快速发展以及自由化能源市场改革的深入,能源供应链管理与能源的实时平衡对于综合能源系统的稳定运行具有重要作用。在此背景下,提出了一种包含能源公司、能源服务商和用户的综合能源市场定价机制。以能源服务商利益最大化为目标,建立了基于零售价格弹性的能源服务商的非合作博弈模型。能源服务商通过收益共享契约参与能源供应链的管理,同时能源服务商选择能源公司提供的合同条款,以保证自身利润最大化。利用Nikaido-Isoda函数将能源服务商之间的非合作博弈模型转化为最优问题进行求解,并证明了纳什均衡解的存在性和唯一性。通过仿真证明了所提出的模型和方法能够实现以能源服务商为中心的综合能源系统中多方收益的均衡,并着重分析了不同的收益共享因子对能源公司、能源服务商和能源供应链收益的影响。

关键词:能源供应链;非合作博弈;收益共享契约;能源服务商;定价策略

中图分类号:F 123.9;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202112030

0 引言

随着能源市场的开放,能源供应链管理在综合能源系统发展中起着重要作用^[1],同时能源互联网的推进和售电侧的开放为能源服务商 ESP(Energy Service Provider)聚合多类型供能设备提供了环境和契机。随着国家能源体制改革的深入,电力、天然气等能源逐步从垄断和行政定价方式分别走向竞争和价格市场化^[2],综合能源市场给市场参与者带来了更高的收益,同时也加剧了其收益的波动性,这给能源企业的运营带来了巨大的机遇和挑战。

随着能源互联网的发展,能源服务商可以向多个用户供能,以实现能源互联。考虑到不同主体的利益冲突,为了解决分布式能源与电力公司和燃气网络之间的相互不平衡问题,文献[3]建立了静态的非合作博弈模型,并分析了分布式能源站对电网的调峰作用。文献[4]对天然气网和电网与多个分布式能源站的需求进行了耦合分析,并讨论了其潜在的博弈模型。文献[5]提出了一种基于斯坦克尔伯格博弈的多主从能源交易模型,其使更多的分布式能源站通过竞争确定能源价格,以最大化其收益。文献[6]提出了一种基于斯坦克尔伯格双重博弈的电力公司-微能源网-用户的能源交易模型及其求解方法。文献[7]提出了一种基于主从博弈机制的电-气能源系统与多个综合负荷聚合商的互动均衡

模型。文献[8]提出了一种基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略,其能够有效激励智慧能源社区内个体参与者与社区整体协同运行。文献[9]提出了一种基于非合作博弈的冷热电联供微能源网络优化的通用模型及其求解方法。然而,上述研究均只考虑了能源交易量,将能源交易价格简单地处理为有关产量函数的静态博弈问题,并且都只关注到电网和天然气网与分布式能源站间的交互,并没有关注到终端用户与分布式能源站间的联系,即将终端用户对能源的需求看作定值,没有考虑到部分用户的能源需求会随能源价格的变化而变化。

开放的市场模式下,能源服务商如何制定能源零售价格来实现盈利最大化,是当下关注的焦点和亟待解决的问题。文献[10]通过内点法计算了电力系统和综合天然气系统网络的最优边际价格,结果表明综合天然气系统网络的拓扑结构能够影响最优边际价格。文献[11]提出了一种基于非合作博弈的多能源枢纽优化运行方法,建立了基于纳什均衡的多能源枢纽非合作博弈模型,各能源枢纽以日运行成本最小为目标函数并与其他能源枢纽一起参与博弈,仿真结果表明该方法能够提高系统的灵活性。文献[12]运用主从博弈理论来实现社区能源互联网分布式能源管理,但其仅考虑了简单的分时电价模型,未考虑天然气价格的不确定性。然而,上述研究均没有考虑能源供应链的管理在自由化的综合能源市场发展中扮演的重要角色。契约能够有效地避免批发价格和零售价格任意波动的问题,同时还可以减少市场能源价格与市场的能源供需不匹配引起的经济损失^[13]。

能源服务商作为综合能源市场的核心成员,在

收稿日期:2021-02-21;修回日期:2021-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873225);河北省自然科学基金面上项目(E2020203205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61873225) and the General Program of Hebei Natural Science Foundation(E2020203205)

综合能源市场中如何获得最大收益是亟待解决的问题之一。在上述背景下,本文重点关注综合能源市场中多个能源服务商之间的博弈竞价问题以及能源服务商与能源公司 EC(Energy Company)之间的收益协调问题,在能源供应链水平方向上建立了多个能源服务商间的非合作博弈模型,在竖直方向上建立了基于收益共享契约的能源供应链收益协调机制。首先,阐述了综合能源市场与综合能源服务。其次,建立了基于零售价格弹性的多个能源服务商间的非合作博弈模型。此外,通过收益共享契约机制,分析了能源服务商、能源公司与能源供应链的目标函数特性。然后,通过分析所提博弈模型的性质,应用 NI(Nikaido-Isoda)函数证明了该博弈存在唯一的纳什均衡解。最后,通过仿真对所提模型和方法进行了验证,并着重分析了不同的收益共享因子对能源公司、能源服务商和能源供应链收益的影响。

1 综合能源市场

综合能源服务包含综合能源系统本身的基本供能服务和增值服务,其增值服务一般包含能源规划设计服务、工程投资建设服务、多能源运营服务以及投融资服务等^[14]。对于传统的售电企业而言,其职能是由单一的售电模式转化为电、气、冷、热等多种能源同时供应以及多样化的服务模式^[15]。综合能源市场是由能源公司、多个能源服务商以及若干用户组成的经济实体。综合能源市场框架见附录 A 图 A1。本文只研究综合能源市场中能源服务商的定价策略。

能源服务商内部由电转气设备、热电联产设备等能源转换设备组成,内部结构图如图 1 所示。

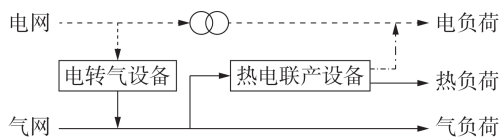


图1 能源服务商的内部结构图

Fig.1 Internal structure diagram of ESP

能源服务商以能源批发价格向能源公司购买电量、天然气量,通过内部能源组件转换,向用户供应电能、热能和天然气。每一个能源服务商从能源公司所提供的一份收益共享契约菜单($w, c_{e,in}, c_{g,in}$)中选择最合适的契约参数,通过设置能源的零售价格使自己的收益最大化,其中收益共享契约包含3个参数,第1个参数是收益共享因子 w ,第2个参数是电的批发价格 $c_{e,in}$,第3个参数是天然气的批发价格 $c_{g,in}$ 。内部能源之间的耦合关系如下:

$$P_e^i = P_{pg,e}^i + \frac{L_e^i}{\eta_{T,e}} - \frac{\eta_{chp,e}}{\eta_{T,e}} P_{chp,e}^i \quad (1)$$

$$P_g^i = L_g^i + P_{chp,g}^i - \eta_{pg,g} P_{pg,e}^i \quad (2)$$

式中: P_e^i 、 P_g^i 分别为能源服务商 i 向能源公司所购电量、天然气量; $P_{pg,e}^i$ 为能源服务商 i 的电转气设备所消耗的电量; L_e^i 、 L_g^i 分别为能源服务商 i 向用户所出售的电量、天然气量; $P_{chp,e}^i$ 为能源服务商 i 的热电联产设备所产生的电量; $P_{chp,g}^i$ 为能源服务商 i 的热电联产设备所消耗的天然气量; $\eta_{T,e}$ 为变压器转换系数; $\eta_{pg,g}$ 为电转气设备转换系数; $\eta_{chp,e}$ 为热电联产装置产电系数。

2 模型搭建

为了实现综合能源市场中各经济主体收益最大化,同时又能够有效地避免批发价格和零售价格的波动,本文在能源供应链水平方向上建立了多个能源服务商间的非合作博弈模型,以使各自收益最大化,在竖直方向上建立了基于收益共享契约的能源供应链的协调机制。

2.1 非合作博弈模型

非合作博弈指在多个参与者变化的策略环境下,每个参与者的变化都可以看成是独立的变化,而每一个参与者的策略变化均与其他参与者的变化无关。通俗意义上而言,此博弈中的参与者在制定自身策略时只会关注自身利益而不顾他人利益。

定义 1^[16]: 一个非合作博弈模型可以定义为 $G = \{N, S_i, U_i(p)\}$ ($i \in N$) 的形式,其中 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 为参与者在博弈中的集合, n 为参与者的总数, $S_i = \{p_i | p_i \in [p_i^{\min}, p_i^{\max}]\}$ 为参与者 i 可能采取的策略集合, $p_i^{\min}$ 、 $p_i^{\max}$ 分别为参与者 i 可能采取的策略集合中元素的最小值和最大值; $U_i(p)$ 为支付函数。本文中, n 具体指能源服务商总数, U_i 具体指能源服务商 i 的效益函数。

定义 2: 对于非合作博弈模型 $G = \{N, S_i, U_i(p)\}$ ($i \in N$),假若一个策略集向量 $p^* = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ 是纳什均衡点,那么对于任意的 $p'_i \in S_i$ ($i \in N$),均满足 $U_i(p_i^*, p_{-i}^*) > U_i(p'_i, p_{-i}^*)$,其中 p_{-i} 为除了参与者 i 之外其他所有参与者选择的策略集合,即 $p_{-i} = \{p_1, \dots, p_{i-1}, p_{i+1}, \dots, p_n\}$, $U_i = (p_i, p_{-i})$ 为参与者 i 的收益函数, $\{p_i, p_{-i}\} = \{p_1, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_n\}$ 表示策略集合。

2.2 基于非合作博弈与收益共享契约的能源服务商定价模型

2.2.1 基于非合作博弈的能源服务商模型

基于非合作博弈的能源服务商模型定义如下:

$$\max U_i(c_e^i, c_g^i, c_{g,e}^i, c_{g,g}^i) \quad (3)$$

$$U_i = (L_h^i c_h^i + L_g^i c_g^i + L_e^i c_e^i - P_g^i c_{g,in}^i - P_e^i c_{e,in}^i) w_i \quad (4)$$

式中: $i \in N$; L_h^i 为能源服务商 i 向用户所出售的热量;

c_e^i, c_g^i, c_h^i 分别为能源服务商 i 的零售电、气、热的单位价格; c_e^{-i}, c_g^{-i} 分别为除能源服务商 i 之外其余 $n-1$ 个能源服务商的零售电价和零售气价。

弹性系数是一个衡量其他能源服务商电力、天然气销量对能源服务商 i 的价格变化的敏感度的指标。为简化分析,认为当能源服务商 i 提高其电能、天然气的零售价格,则能源服务商 i 的能源出售量会相应减少。能源服务商 i 的市场需求可以表示如下:

$$\begin{cases} L_e^i = Q_e^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_e^i \\ L_g^i = Q_g^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_g^i \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q_e^i, Q_g^i 分别为能源服务商 i 的电力、天然气市场规模,即最大可能的电力、天然气需求; $E_{i,n}$ 为能源服务商 n 对于能源服务商 i 零售能源价格的弹性系数,即服务商所售电、气量不仅与该服务商售价有关,还受其他服务商零售价的影响。

2.2.2 基于收益共享契约的协调机制模型

在市场环境下,收益共享契约就是商品批发商以较低的批发价格将商品出售给商品零售商,商品零售商为补偿批发商的经济损失将自己的部分收益与批发商共享,最终达到双方收益的最优状态。

能源供应链系统中,每一个能源服务商都有各自的优化目标,而这些优化目标与供应链整体的优化目标可能不一致。为防止能源市场出现混乱,契约能够有效控制能源销售价格的任意波动。因此,有必要通过收益共享契约来协调供应链中各成员的收益。

基于收益共享契约,即每一个能源服务商从能源公司所提供的一份收益共享契约菜单($w_i, c_{e,in}^i, c_{g,in}^i$)中选择最合适的契约参数设置电、气零售价格来使自己的收益最大化。收益共享契约的参数对于每一个能源服务商而言都是不同的,能源服务商 i 设定最优的电、气零售价格使自己的收益最大化,而不考虑在多个能源服务商之间的协调决策。

本文中的收益共享契约就是指能源服务商可以通过调整其收益共享因子,该共享因子由能源服务商和能源公司共同约定,将能源服务商的一部分利润收益按比例地返给供应商,以此来换取能源公司制定较低的批发价格,从而实现双方互利共赢,使供应链的效益达到最大。收益共享契约能够有效地实现各供应链的成员之间的协调。能源服务商 i 所在的能源供应链的利润 I_i 可以表示为:

$$I_i = L_h^i c_h^i + L_g^i c_g^i + L_e^i c_e^i - P_g^i \lambda_g^i - P_e^i \lambda_e^i \quad (6)$$

式中: λ_e^i, λ_g^i 分别为能源公司向能源服务商 i 批发的电、气的单位传输成本价格。

若收益共享契约能够协调整个能源供应链的利润,则能源供应链的利润函数与能源服务商的利润函数变化一致,具体表示如下:

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_g^i} = \frac{\partial I_i}{\partial c_g^i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_e^i} = \frac{\partial I_i}{\partial c_e^i} \quad (8)$$

若收益共享因子能够协调整个能源供应链的利润,则收益共享因子与批发电价之间的关系为:

$$c_{e,in}^i = \frac{E_{i,i} \lambda_e^i + \eta_{T,e} (1-w_i) \left(Q_e^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_e^i - c_e^i E_{i,i} \right)}{w_i E_{i,i}} \quad (9)$$

若收益共享因子能够协调整个能源供应链的利润,则收益共享因子与批发气价之间的关系为:

$$c_{g,in}^i = \frac{E_{i,i} \lambda_g^i + (1-w_i) \left(Q_g^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_g^i - c_g^i E_{i,i} \right)}{w_i E_{i,i}} \quad (10)$$

式中: $E_{i,i}$ 为能源服务商 i 价格弹性的自相关系数。

3 模型求解

本节首先证明了非合作博弈模型解的存在性与唯一性,同时为方便求解,应用数学方法将非合作博弈模型转化为最优化问题,并采用牛顿型定点迭代算法进行求解。

3.1 非合作博弈解的存在性与唯一性

通过构造正则化NI函数^[17]将非合作博弈模型的纳什均衡问题转化为凸优化问题进行求解。非合作博弈纳什均衡解的存在性与唯一性证明见附录B。

3.2 纳什均衡点的求解

为找到纳什均衡点,基于能源服务商的综合能源市场的协调优化方法,构造的正则化NI函数可表示为:

$$\begin{aligned} \varphi(c_{e,m-1}^i, c_{e,m}^i, c_{g,m-1}^i, c_{g,m}^i) = & \sum_{i=1}^n \left[U_i(c_{e,m}^i, c_{e,m-1}^i, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^i) - \right. \\ & U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^i, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^i) + \frac{\alpha_1}{2} \|c_{e,m}^i - c_{e,m-1}^i\| + \\ & U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^i, c_{g,m}^i, c_{g,m-1}^i) - \\ & \left. U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^i, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^i) + \frac{\alpha_2}{2} \|c_{g,m}^i - c_{g,m-1}^i\| \right] \quad (11) \end{aligned}$$

式中: α_1 和 α_2 分别为正则化NI函数中关于电力和天然气网络的参数; m 为迭代次数。式(11)表示当能源服务商 i 改变其策略(从 $c_{e,m-1}^i$ 变为 $c_{e,m}^i$),其他参与者的策略保持不变时其自身收益的增量。

进而求解优化函数,本文优化函数由所提非合作博弈模型转换得到,具体如下:

$$c_{e,m}^i = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \left[U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^{-i}, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^{-i}) + \frac{\alpha_1}{2} \|c_{e,m}^i - c_{e,m-1}^i\| \right] \quad (12)$$

$$c_{g,m}^i = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \left[U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^{-i}, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^{-i}) + \frac{\alpha_2}{2} \|c_{g,m}^i - c_{g,m-1}^i\| \right] \quad (13)$$

计算当前迭代次数 m 下的牛顿迭代方向为:

$$d_e^m = -(H_e^m)'(c_{e,m}^i - c_{e,m-1}^i) \quad (14)$$

$$d_g^m = -(H_g^m)'(c_{g,m}^i - c_{g,m-1}^i) \quad (15)$$

$$H_e^m = \nabla V_a(c_{e,m}^i) - I \quad (16)$$

$$H_g^m = \nabla V_a(c_{g,m}^i) - I \quad (17)$$

式中: H_e^m 、 H_g^m 分别为计算电力和天然气零售价格的雅可比矩阵; d_e^m 、 d_g^m 分别为计算电力和天然气零售价格的迭代方向; $V_a(c_{e,m}^i)$ 、 $V_a(c_{g,m}^i)$ 分别为关于电力和天然气零售价格的确界函数矩阵; $c_{e,m}^i = [c_{e,m}^i]$; I 为单位矩阵。

依据优化函数和牛顿迭代方向,判断零售电、气价格是否满足收敛条件,若满足则将 $c_{g,m}^i$ 、 $c_{e,m}^i$ 的值作为非合作博弈模型对应的最优解,否则令 $c_{g,m}^i = c_{g,m-1}^i + d_g^m$ 、 $c_{e,m}^i = c_{e,m-1}^i + d_e^m$, $m = m + 1$,并返回求解所提的优化函数。其中收敛条件为 $|c_{g,m}^i - c_{g,m-1}^i| \leq \xi$, $|c_{e,m}^i - c_{e,m-1}^i| \leq \xi$, ξ 为迭代收敛阈值。

定义正则化NI函数的上确界函数 $V_a(c)$ 为:

$$V_a(c) = \max \varphi(c_{e,m-1}^i, c_{e,m}^i, c_{g,m-1}^i, c_{g,m}^i) = \max \sum_{i=1}^n \left[U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^{-i}, c_{g,m-1}^i, c_{g,m-1}^{-i}) - U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^{-i}, c_{g,m}^i, c_{g,m-1}^{-i}) - U_i(c_{e,m-1}^i, c_{e,m-1}^{-i}, c_{g,m-1}^i, c_{g,m}^{-i}) + \frac{\alpha_1}{2} \|c_{e,m}^i - c_{e,m-1}^i\| + \frac{\alpha_2}{2} \|c_{g,m}^i - c_{g,m-1}^i\| \right] \quad (18)$$

函数 $V_a(c)$ 有如下性质:

1) 对于任一策略 $c \in \mathbf{R}^n$, $V_a(c)$ 是非负的;

2) 设当且仅当 $c^* \in \mathbf{R}^n$ 且 $V_a(c) = 0$ 时, c^* 为纳什均衡问题的归一化纳什均衡解。

因此,将求解纳什均衡问题转化为求解式(18)所示的优化问题。当且仅当式(18)的优化问题目标值为0的全局最小时, c^* 为纳什均衡解。

3.3 牛顿型定点迭代算法求解

基于以上讨论,考虑收益共享合同机制约束的非合作博弈零售价格策略模型可以转化为以下非线性规划问题:

$$\min V_a(c) \quad (19)$$

本文采用牛顿型定点迭代算法求解式(19)所示

的非线性规划问题,找出非合作博弈模型的纳什均衡解,得到能源服务商的最优零售电价与气价策略。牛顿型定点迭代法的伪代码见附录C表C1。

4 仿真分析

4.1 参数设置

下文通过仿真来评估能源供应链和能源服务商之间的非合作博弈性能。假设能源供应链由能源公司、3个能源服务商和大量用户组成。3个能源服务商的电、气零售价格之间的弹性系数^[18]为:

$$\begin{bmatrix} 0.1 & -0.0008 & -0.0006 \\ -0.0008 & 0.11 & -0.0004 \\ -0.0004 & -0.0006 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

其他仿真参数设置见附录C表C2。

4.2 不考虑收益共享契约的能源服务商的非合作博弈

根据2.2.1节中的模型,可以得到每个能源服务商的最优零售电、气价格和能源出售量如表1所示。

表1 能源服务商最优零售价格与能源出售量

Table 1 Optimal retail prices and energy sales of ESP

能源服务商	零售电价 / [元·(MW·h) ⁻¹]	零售气价 / (元·km ⁻³)	出售电量 / (MW·h)	出售天然气量 / km ³
1	583.30	4122.17	37.28	292.22
2	601.07	4345.95	41.16	324.59
3	618.21	4565.06	44.98	356.51

因为每个能源服务商出售的电量、天然气量均小于其所能出售的最大容量,所以没有出现电力销售过剩、天然气有剩余或者天然气销售过剩、电量有剩余的情况,能源服务商内部的能源转换装置均按低效率运行,此时可忽略不计。能源服务商与能源公司收益情况如表2所示。

表2 能源服务商与能源公司收益

Table 2 Profits of ESP and EC

能源服务商	能源服务商收益 / 元	能源公司从不同能源服务商获取的收益 / 元
1	867107.96	182447.43
2	1069711.47	252744.54
3	1290180.78	325849.11

采用非合作博弈能够使能源服务商之间进行价格竞争来优化各自收益,但是能源公司总是会以固定的价格向能源服务商进行批发能源,以至于不能很好地协调能源公司、能源服务商、能源供应链之间的收益,因此还需要采用一种协调机制进行协调,从而优化能源供应链上各部分的收益。

4.3 基于收益共享契约的能源服务商的非合作博弈

基于收益共享契约的能源服务商的非合作博弈中,能源公司不再是以固定的批发价格向能源服务

商出售电量、天然气量,而是能源公司给每个能源服务商提供一份收益共享契约菜单,能源服务商会选择最合适的契约参数设置零售价格来使自身的收益最大化。

4.3.1 牛顿型定点迭代算法收敛性分析

利用牛顿型定点迭代算法求解非合作博弈定价策略模型的纳什均衡点,其中式(19)所示的优化问题采用商业求解器KNITRO求解。当 $w=0.70$ 时,能源服务商的能源零售价格收敛曲线如图2所示。由图可以看出,随着迭代次数的增加,牛顿型定点迭代算法的迭代误差逐渐缩小,在第4次迭代后收敛到唯一的纳什均衡点,第6次迭代后,迭代结束,零售电价收敛到最优值,实现了能源服务商引导的多方参与者利益均衡。仿真结果验证了本文所提能源服务商的非合作博弈定价策略模型的合理性及牛顿型定点迭代算法的有效性。

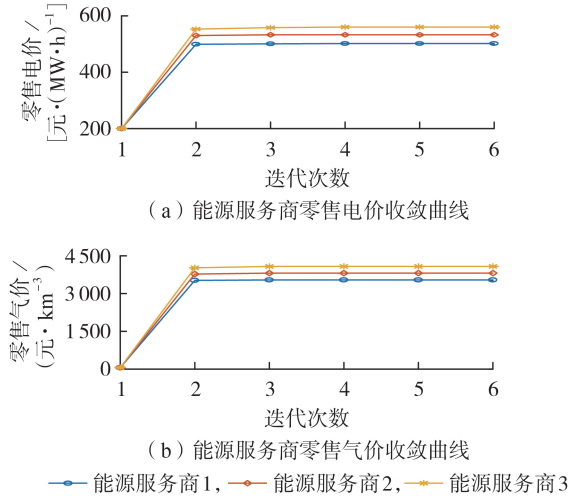


图2 能源服务商零售能源价格收敛曲线

Fig.2 Convergence curves of retail energy prices for ESP

4.3.2 收益共享因子对能源供应链系统的影响分析

随着收益共享因子的变化,根据2.2.2节中的模型可以求解得到能源服务商的能源零售价格、能源销售量、能源服务商的利润以及能源公司的利润等。

当 w 变化时,能源服务商的能源销售量及零售价格如表3所示,能源服务商出售的电、气量收敛曲线如图3所示。

由表3可知,能源服务商所出售的电量、天然气量均未超出其所能出售的最大容量。同时根据图3可知,随着收益共享因子的增大,为均衡能源公司与能源服务商的收益,能源公司的能源批发价格增大,能源服务商之间通过非合作博弈来追求自身效益最大化,故通过改变能源的零售价格来提高自身收益。根据式(20)可知,能源服务商1价格弹性的自相关系数绝对值相对较小,即在能源零售价格均增大的

表3 能源服务商的能源零售价格与能源销售量

Table 3 Energy retail prices and energy sales of ESP

w	能源服务商	出售电量 / (MW·h)	出售气量 / km ³	零售电价 / [元·(MW·h) ⁻¹]	零售气价 / (元·km ⁻³)
0.55	1	44.71	344.92	508.32	3590.11
	2	48.28	375.74	528.40	3823.92
	3	51.02	402.41	555.74	4090.66
0.60	1	44.79	345.30	507.53	3586.35
	2	48.16	375.18	529.59	3829.57
	3	50.90	401.85	556.93	4096.32
0.65	1	44.86	345.62	506.86	3583.16
	2	48.08	374.80	530.41	3833.45
	3	50.82	401.47	557.75	4100.20
0.70	1	44.91	345.90	506.28	3580.43
	2	48.03	374.53	530.97	3836.12
	3	50.76	401.21	558.31	4102.87

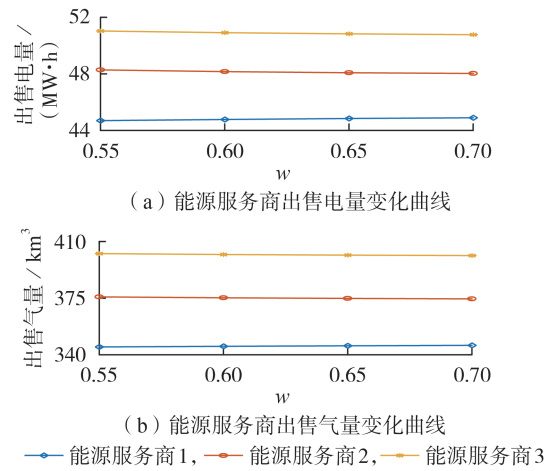


图3 能源服务商能源销售量变化曲线

Fig.3 Variation curves of energy sales for ESP

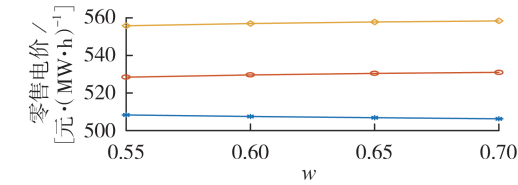
情况下,所出售的能源变化量变化不大。又因为能源市场总需求一样,所以随着收益共享因子逐渐增大,综合能源服务商1的能源销售量逐渐增大,而综合能源服务商2、3的能源销售量逐渐减小。

当 w 变化时,能源服务商的零售电、气价格收敛曲线如图4所示。

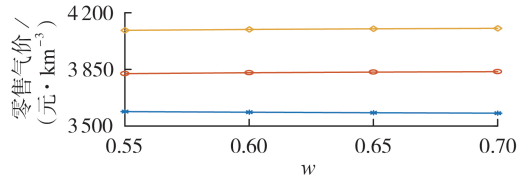
根据表3、图4以及上述仿真分析可知,随着收益共享因子的增大,能源服务商1的能源销售量增大,根据式(5)所示的能源服务商的市场需求计算公式可知,只有能源零售价格较低才会有更大的能源市场,能源服务商1的零售电、气价格下降,根据2.1节中的用户价格弹性需求可知,随着收益共享因子的增大,能源服务商1所出售的电、气量相应增加;反之,能源服务商2、3零售电、气价格升高,其所出售的电、气量相应减少。另外,随着收益共享因子的增加,电力与天然气的零售价格变得越来越低。

当 w 变化时,能源服务商、能源公司及能源服务商所在的能源供应链收益如表4所示。

由表4可知,随着收益共享因子的变化,能源服



(a) 能源服务商零售电价变化曲线



(b) 能源服务商零售气价变化曲线

— 能源服务商1, — 能源服务商2, — 能源服务商3

图4 能源服务商能源零售价格变化曲线

Fig.4 Variation curves of energy retail prices for ESP

表4 不同w下能源服务商、能源公司与能源供应链收益

Table 4 Profits of ESP, ES and energy supply chain with different values of w

w	能源服务商	能源服务商收益 / 元	能源公司从不同能源服务商获取的收益 / 元	能源服务商所在的能源供应链收益 / 元
0.55	1	664 777.15	406 909.87	1 071 687.02
	2	788 667.75	544 743.90	1 333 411.65
	3	904 181.99	730 212.23	1 634 394.22
0.60	1	726 832.73	341 741.21	1 068 573.94
	2	857 779.87	475 586.27	1 333 366.13
	3	983 620.53	650 814.36	1 634 434.89
0.65	1	788 887.78	277 363.04	1 066 250.83
	2	927 339.90	405 989.51	1 333 329.40
	3	1 063 536.36	570 920.27	1 634 456.63
0.70	1	850 942.41	213 543.48	1 064 485.89
	2	997 250.73	336 050.05	1 333 300.78
	3	1 143 826.12	490 641.46	1 634 467.58

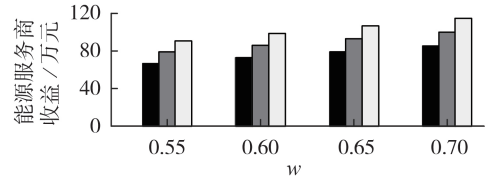
务商、能源公司与能源供应链的收益也在发生变化。结合表2可知,当考虑收益共享契约时,采用合适的收益共享因子,可以协调能源公司与能源服务商的收益,从而使其收益均衡。

当w变化时,能源服务商及能源公司的收益变化柱状图如图5所示。

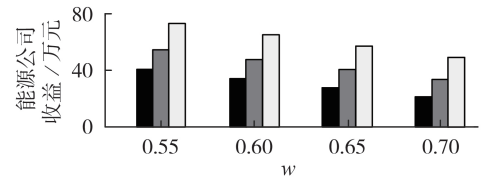
由表4、图5可知,随着收益共享因子的增大,为均衡能源公司与能源服务商之间的收益,能源批发价格随之升高,即能源服务商成本升高,能源服务商将提高能源零售价格以获取更多的收益。由于市场总需求一定,能源销售量变化不大,所以随着收益共享因子逐渐增大,能源服务商的收益将逐渐增大,能源公司的收益将逐渐减小。

当w变化时,能源供应链来自每个能源服务商的利润及能源供应链的总收益变化曲线如图6所示。

根据表4、图6以及上述分析,随着收益共享因子的增大,能源批发价格均逐渐升高,能源服务商将通过改变能源零售价格来获得更大的能源市场,但



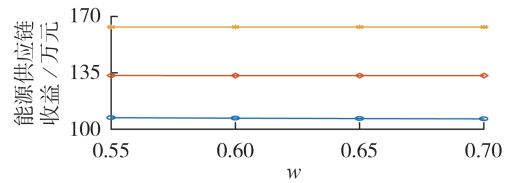
(a) 能源服务商收益变化柱状图



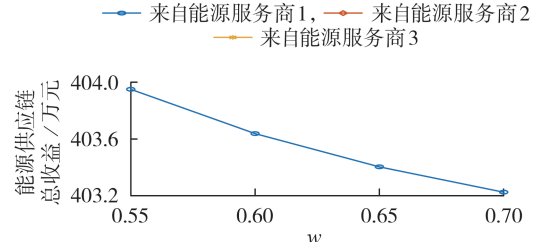
(b) 能源公司收益变化柱状图

图5 能源服务商与能源公司的收益随收益共享因子变化的柱状图

Fig.5 Histograms of profits for ESC and EC vs. revenue sharing factor



(a) 能源供应链收益变化曲线



(b) 能源供应链总收益变化曲线

图6 能源供应链的收益随收益共享因子变化的曲线

Fig.6 Curves of profit for energy supply chain vs. revenue sharing factor

是能源服务商3的价格弹性的自相关系数绝对值较大,与另外2个能源服务商的价格弹性的相关系数绝对值较小,故收益共享因子对能源服务商3能源销售量影响最大,而能源服务商3的能源零售价格又在增大,故能源供应链从能源服务商3所获得的收益随着收益共享因子的增加而增大,从能源服务商1、2所获得的收益随着收益共享因子的增加而减小,整个能源供应链的收益随着收益共享因子的增大而略微减小。

收益共享因子的主要作用是能源公司制约能源服务商的能源零售价格,防止其过高,应用收益共享因子能够协调能源公司及能源服务商的收益,并避免能源批发价格及能源零售价格的任意波动,每一个收益共享因子都对应着唯一的能源零售价格,使

得能源服务商的收益与能源供应链的收益均达到最优。如果能源公司想获利更多,则可以适当减小收益共享因子;如果能源服务商想获利更多,则可以适当增大收益共享因子。

5 结论

为协调综合能源市场中各经济主体的收益,本文提出了基于收益共享契约的多个能源服务商之间零售能源价格竞争的非合作博弈模型,在能源供应链水平方向上建立了多个能源服务商的非合作博弈模型,在竖直方向上建立了基于收益共享契约的能源供应链收益协调机制。同时,本文还证明了能源服务商之间价格博弈纳什均衡解的存在性与唯一性,并采用牛顿型定点迭代算法对上述模型进行求解。仿真分析表明,本文提出的非合作博弈定价机制能够实现综合能源系统中能源服务商引导下的多方收益的均衡。在能源供应链的共享合同交易机制下,能源服务商通过允许能源公司共享其部分收益来获得批发电、气价格的折扣。随着收益共享因子的增加,能源服务商的收益逐渐增加,能源公司收益逐渐减小。因此,应用收益协调机制能够协调能源服务商与能源公司的收益,并避免零售电、气价格和批发电、气价格的任意波动。

本文研究的定价策略未考虑多能源系统的物理约束,若考虑物理约束则系统模型将更加完善、具体,因而下一步将对考虑物理约束的多能源系统定价策略问题展开进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] MA Kai, WANG Congshan, YANG Jie, et al. Pricing mechanism with noncooperative game and revenue sharing contract in electricity market[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 97-106.
- [2] 王守相, 张齐, 王瀚, 等. 高可再生能源渗透率下的区域多微网系统优化规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 33-38, 52.
WANG Shouxiang, ZHANG Qi, WANG Han, et al. Optimal planning method for regional multi-microgrid system with high renewable energy penetration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 33-38, 52.
- [3] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [4] SHEIKHI A, BAHRAMI S, RANJBAR A M. An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs[J]. Energy, 2015, 89: 490-499.
- [5] 吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 等. 基于Stackelberg博弈模型的综合能源系统均衡交互策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 142-150.
WU Lilan, JING Zhaoxia, WU Qinghua, et al. Equilibrium strategies for integrated energy systems based on Stackelberg game model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 142-150.
- [6] 林凯骏, 吴俊勇, 刘迪, 等. 基于双层Stackelberg博弈的微能源网能量管理优化[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 240-250.
LIN Kaijun, WU Junyong, LIU Di, et al. Optimization of micro-energy grid energy management based on double-layer Stackelberg game[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 240-250.
- [7] 李昊飞, 余涛, 瞿凯平, 等. 综合负荷聚合商参与的配电-气能源系统供需互动均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 32-41.
LI Haoifei, YU Tao, QU Kaiping, et al. Interactive equilibrium supply and demand model for electricity-gas energy distribution system with participation of integrated load aggregators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 32-41.
- [8] 冯昌森, 沈佳静, 赵崇娟, 等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 85-93.
FENG Changsen, SHEN Jiajing, ZHAO Chongjuan, et al. Collaborative operation strategy of smart energy community based on cooperative game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 85-93.
- [9] 林凯骏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 25-32.
LIN Kaijun, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Optimization of operation strategy for micro-energy grid with CCHP systems based on non-cooperative game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 25-32.
- [10] AMIRNEKOOEI K, ARDEHALI M M, SADRI A. Optimal energy pricing for integrated natural gas and electric power network with considerations for techno-economic constraints[J]. Energy, 2017, 123: 693-709.
- [11] 魏春, 徐向志, 王国峰, 等. 基于非合作博弈的多能量枢纽优化运行方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 48-57.
WEI Chun, XU Xiangzhi, WANG Guofeng, et al. Optimal operation method of multi-energy hub based on non-cooperative game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 48-57.
- [12] 马丽, 刘念, 张建华. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3655-3662.
MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua. Community energy internet distributed energy management based on master-slave game strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655-3662.
- [13] EYDELAND A, WOLYNIEC K. Energy and power risk management: new developments in modeling, pricing, and hedging[J]. Acta Anaesthesiol Belg, 2014, 32(5): 205-213.
- [14] 王永真. 能源互联网下综合能源服务的新特征、新挑战[J]. 能源, 2020(6): 64-66.
WANG Yongzhen. New features and challenges of comprehensive energy services under the energy internet[J]. Energy, 2020(6): 64-66.
- [15] 王静雯, 李华强, 李旭翔, 等. 综合能源服务效用模型及用户需求评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 411-425.
WANG Jingwen, LI Huaqiang, LI Xuxiang, et al. Comprehensive energy service utility model and user needs assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 411-425.
- [16] 马天男, 杜英, 苟全峰, 等. 基于Berge-NS均衡的电力市场多主体非合作博弈竞争模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 192-204.
MA Tiannan, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Power market multi-agent non-cooperative game competition model based on Berge-NS equilibrium[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 192-204.
- [17] LALITHA C S, DHINGRA M. Optimization reformulations of the generalized Nash equilibrium problem using regularized indicator Nikaido-Isoda function[J]. Journal of Global Optimi-

zation, 2013, 57(3): 843-861.

- [18] 石丽娜. 电-交通互联系统综合优化定价策略研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2020.

SHI Lina. Research on comprehensive optimization pricing strategy of electricity-transport interconnection system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.

作者简介:

李学平(1976—),男,河北唐山人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统经济运行分析与控制(**E-mail**:lixueping@ysu.edu.cn);



李学平

edu.cn);

王健民(1994—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行与控制(**E-mail**:wangjmin@126.com);

卢志刚(1963—),男,河北邯郸人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统经济运行分析与控制(**E-mail**:zhglu@ysu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Pricing strategy of energy service provider based on non-cooperative game and revenue sharing contract

LI Xueping, WANG Jianmin, LU Zhigang, GENG Lijun, SHI Lina, HE Liangce

(Hebei Key Laboratory of Power Electronics Energy Conservation and Transmission Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: With the rapid development of energy internet and the deepening of reforms in the liberalized energy market, the management of energy supply chain and the real-time balance of energy play an important role for the stable operation of integrated energy system. In this context, a comprehensive energy market pricing mechanism including energy companies, energy service providers and consumers is proposed. With the goal of maximizing the interests of energy service providers, a non-cooperative game model of energy service providers based on retail price elasticity is established. Energy service providers take part in the energy supply chain management through revenue sharing contracts, and they choose contract terms provided by energy companies to ensure their own profits maximization. The Nikaido-Isoda function is used to transform the non-cooperative game model among energy service providers into an optimal problem to be solved, and the existence and uniqueness of Nash equilibrium solution is proved. The simulative results prove that the proposed model and method can achieve the balance of multi-party revenue in the integrated energy system centered on energy service providers, and the impacts of different revenue sharing factors on the revenue of energy companies, energy service providers and energy supply chains are analyzed.

Key words: energy supply chain; non-cooperative game; revenue sharing contract; energy service provider; pricing strategy

附录 A

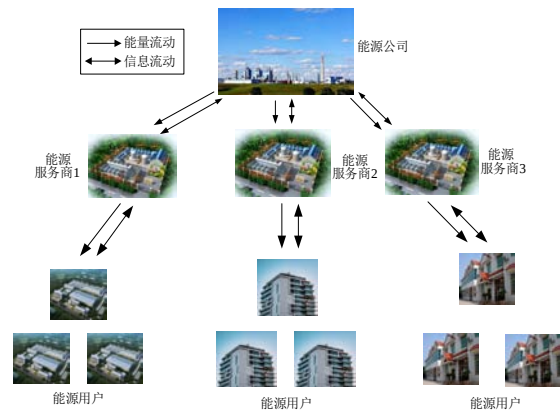


图 A1 综合能源市场架构

Fig.A1 Framework of integrated energy market

附录 B

B1 证明纳什均衡的存在性

向量 $\mathbf{c}^* = [(c_e^1, c_g^1), (c_e^2, c_g^2), \dots, (c_e^n, c_g^n)] (\mathbf{c}^* \in \mathbf{R}^n)$ 为纳什均衡解。当且仅当 $\mathbf{c}^* \in \arg \max_{\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n} U_i(c_e^i, c_g^i) (i \in N)$ 。分别求函数 U_i 关于零售电价、气价的一阶偏导数、二阶偏导数可得：

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_e^i} = \left[Q_e^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_e^i + \frac{c_{e,\text{in}}^i}{\eta_{T,e}} E_{i,i} - c_e^i E_{i,i} \right] w_i \quad (\text{B1})$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial c_e^{i2}} = -2w_i E_{i,i} < 0 \quad (\text{B2})$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_g^i} = \left[Q_g^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_g^i + c_{g,\text{in}}^i E_{i,i} - c_g^i E_{i,i} \right] w_i \quad (\text{B3})$$

$$\frac{\partial^2 U_i}{\partial c_g^{i2}} = -2w_i E_{i,i} < 0 \quad (\text{B4})$$

令 $\frac{\partial U_i}{\partial c_e^i} = 0$ 、 $\frac{\partial U_i}{\partial c_g^i} = 0$ ，可以得到最优相应函数如下：

$$c_e^i = \frac{Q_e^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_e^j + \frac{c_{e,\text{in}}^i}{\eta_{T,e}} E_{i,i}}{2E_{i,i}} \quad i \in N \quad (\text{B5})$$

$$c_g^i = \frac{Q_g^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_g^j + c_{g,\text{in}}^i E_{i,i}}{2E_{i,i}} \quad i \in N \quad (\text{B6})$$

由于 U_i 对零售电价、气价的二阶偏导数均是负数，因此 U_i 关于零售电价、气价的函数总是凸的，所以所提出的能源服务商零售电气价格博弈至少存在一个纳什均衡解。

B2 证明纳什均衡的唯一性

定义 3^[20]：如果对于任意 $c \geq 0$ ，函数 $I(c) = (I_1(c), I_2(c), \dots, I_n(c))$ 是标准的，则必须满足如下性质。

- 1) 正定性： $I(c) \geq 0$ 。
- 2) 单调性：如果 $c \geq c'$ ，则 $I(c) \geq I(c')$ 。
- 3) 可扩展性：对任意 $\beta > 1$ ，均有 $\beta I(c) \geq I(\beta c)$ 。

如果最优响应函数是标准的，则能源服务商的价格博弈有唯一的纳什均衡解。下面证明最优函数是标准的，

假设 $Q_e^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_e^i > 0$ ， $Q_g^i - \sum_{i=1}^n E_{i,n} c_g^i > 0$ 证明过程如下。

1) 正定性证明。

给定最优响应函数：

$$I_1(c) = c_e^i = \frac{1}{2E_{i,i}} \left(Q_e^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_e^j + \frac{c_{e,\text{in}}^i}{\eta_{T,e}} E_{i,i} \right) > 0 \quad (\text{B7})$$

$$I_2(c) = c_g^i = \frac{1}{2E_{i,i}} \left(Q_g^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_g^j + c_{g,\text{in}}^i E_{i,i} \right) > 0 \quad (\text{B8})$$

2) 单调性证明。

假设 c 和 c' 是不同的能源价格，价格元素 $c_e > c'_e$ ， $c_g > c'_g$ 表示对于 $\forall i \in N$ 均有 $c_e^i > c_{e'}^i$ ， $c_g^i > c_{g'}^i$ 。如果 $\forall i \neq j, i, j \in N$ ，有如下不等式成立：

$$I_1(c_e^1, \dots, c_e^i, \dots, c_e^n) > I_1(c_e^1, \dots, c_e^{i'}, \dots, c_e^n) \quad (B9)$$

$$I_2(c_g^1, \dots, c_g^i, \dots, c_g^n) > I_2(c_g^1, \dots, c_g^{i'}, \dots, c_g^n) \quad (B10)$$

$$\frac{\partial I_1(c)}{\partial c_e^i} > 0 \quad (B11)$$

$$\frac{\partial I_2(c)}{\partial c_g^i} > 0 \quad (B12)$$

故具有单调性。

3)可扩展性证明：

比较 $I_1(\beta c)$ 与 $\beta I_1(c)$ ， $I_2(\beta c)$ 与 $\beta I_2(c)$ 。

$$\beta I_1(c) - I_1(\beta c) = \beta \frac{Q_e^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_e^j + \frac{c_{e,\text{in}}^i}{\eta_{T,e}} E_{i,i}}{2E_{i,i}} - \frac{Q_e^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} \beta c_e^j + \frac{c_{e,\text{in}}^i}{\eta_{T,e}} E_{i,i}}{2E_{i,i}} \geq 0 \quad (B13)$$

$$\beta I_2(c) - I_2(\beta c) = \beta \frac{Q_g^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} c_g^j + c_{g,\text{in}}^i E_{i,i}}{2E_{i,i}} - \frac{Q_g^i - \sum_{i \neq j}^n E_{i,n} \beta c_g^j + c_{g,\text{in}}^i E_{i,i}}{2E_{i,i}} \geq 0 \quad (B14)$$

对于所有的 $\beta > 1$ ，均有 $\beta I_1(c) - I_1(\beta c) > 0$ ， $\beta I_2(c) - I_2(\beta c) > 0$ 成立，可扩展性证明完毕。可以得出纳什均衡解是唯一的。

附录 C

表 C1 牛顿型定点迭代算法求解过程

Table C1 Newton-type fixed-point iterative algorithm solution process

算法 I	牛顿型定点迭代算法
步骤 1:	输入初始零售电价和气价 $c_{e,0}^i, c_{g,0}^i$, 设置迭代次数 $m=0$
步骤 2:	循环开始
步骤 3:	求解优化问题
步骤 4:	计算: $H_e^m = \nabla V_a(c_{e,m}^i) - I$ 与 $H_g^m = \nabla V_a(c_{g,m}^i) - I$
步骤 5:	求解牛顿方向 d_e^m 与 d_g^m
步骤 6:	设置 $c_{g,i}^m = c_{g,i}^{m-1} + d_g^m, c_{e,i}^m = c_{e,i}^{m-1} + d_e^m, m = m + 1$
步骤 7:	直到 $ c_{g,i}^m - c_{g,i}^{m-1} \leq \xi, c_{e,i}^m - c_{e,i}^{m-1} \leq \xi$, 循环停止
步骤 8:	输出最优零售价格策略 c^*

表 C2 仿真参数设置

Table C2 Simulation parameter settings

参数	数值	参数	数值
N	3	$c_{e,in}^1 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	200
$\eta_{pg,g}$	0.65	$c_{e,in}^2 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	180
$\eta_{chp,h}$	0.65	$c_{e,in}^3 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	160
$\eta_{chp,e}$	0.35	$c_{g,in}^1 / (元 \cdot km^{-3})$	1200
$\eta_{T,e}$	0.95	$c_{g,in}^2 / (元 \cdot km^{-3})$	1100
$c_h^i / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	5500	$c_{g,in}^3 / (元 \cdot km^{-3})$	1000
$\lambda_e^1 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	50	$Q_e^1 / (MW \cdot h)$	95
$\lambda_e^2 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	48	$Q_e^2 / (MW \cdot h)$	100
$\lambda_e^3 / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	46	$Q_e^3 / (MW \cdot h)$	105
$\lambda_g^1 / (元 \cdot km^{-3})$	100	Q_g^1 / km^3	700
$\lambda_g^2 / (元 \cdot km^{-3})$	95	Q_g^2 / km^3	750
$\lambda_g^3 / (元 \cdot km^{-3})$	90	Q_g^3 / km^3	800