

基于 Stackelberg 博弈模型的综合能源系统均衡交互策略

吴利兰, 荆朝霞, 吴青华, 邓 珊

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510641)

摘要: 提出了一个基于多主多从 Stackelberg 博弈的能源交易模型, 通过分析综合能源系统中多个分布式能源站和用户之间的多种能源的交互方式, 求解它们之间的均衡交互策略。在博弈模型中, 分布式能源站作为领导者负责购入天然气来生产用户所需的电能和热能, 通过竞争决定能源价格, 并且根据用户需求优化生产方式, 从而最大化各自的收益。能源用户作为跟随者, 以最大化消费者剩余为目标, 根据能源价格决定电需求和热需求。通过分析博弈的性质, 证明了该博弈模型存在唯一的均衡解, 并推导出了该均衡解的闭式表达式。同时, 提出了一个分布式算法, 仅使用有限的信息求解出能源交易双方的均衡解。经算例验证, 所提的博弈方法和分布式算法可有效地求解出分布式能源站和用户的均衡交互策略。

关键词: 分布式能源站; Stackelberg 博弈; 超模博弈; 综合能源系统; 分布式算法

0 引言

基于天然气的分布式能源站 (distributed energy station, DES)^[1-2], 可以为用户提供冷、热、电多种能源, 用能效率可达 80% 以上, 是现今综合能源系统 (integrated energy system, IES) 中最具商业前景的一种运营模式^[3-4]。中国国家能源局于 2017 年 3 月发布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》, 鼓励发展多能互补方式, 并逐步开放市场。随着能源种类和市场参与者数量的增加, IES 的优化运行和参与者的交易策略将越来越复杂^[5]。

在 IES 的运行优化方面, 文献[6]考虑了储能, 采用场景分析法对可再生能源建模, 以总运行成本为目标求解包含多个 DES 的 IES 内各单元的最优出力。文献[7-9]建立了微网中含有多个 DES 的调度优化模型, 并且考虑了分时电价并采用混合整数线性规划方法进行求解。以上文献均分析了多个区域的 DES 互联的协同优化问题, 但是都只考虑了 DES 的运行成本, 而未讨论 DES 在市场环境中的收益和定价问题。

随着能源互联网^[10-11]的发展, DES 可以向多个用户供应能源, 实现能源互联。在开放的市场模式下, DES 要如何设定生产策略和如何制定冷热电的

价格来实现盈利最大化, 是当下关注的热点, 但是目前鲜有文献涉及这方面的研究。博弈方法可求解理性市场参与者的最优策略。博弈均衡解将对能源价格的制定和 DES 的规划和运行具有重要指导意义。因此, 为了分析 DES 在市场环境中的最优策略, 关于多种能源生产和交易的均衡交互策略值得研究。

在与 IES 相关的博弈方面, 文献[12-14]建立了静态非合作博弈模型, 用于求解天然气网和电网公司与 DES 之间的均衡交互量, 并分析了 DES 对电网的调峰作用。文献[15]通过建立势博弈模型来分析多个 DES 对电网和天然气网的耦合需求响应。然而上述文献都是建立了只考虑了能源交易量, 而把能源价格简单处理为产量函数的静态博弈模型, 并且都只关注到 DES 与电网和天然气网的交互, 而把用户需求看作定值, 没有涉及与用户交互和热电能源的定价问题。

考虑用户的需求响应时, DES 先决定能源价格, 能源用户 (EU) 根据价格决策需求量^[16-17], 两者存在决策的先后顺序, 根据此特征, 本文采用具有主从复合结构的 Stackelberg 博弈模型来分析 DES 和 EU 之间的交互^[18]。

至今, 已有许多研究提出了不同的 Stackelberg 模型来分析电能供给者和消费者之间的交互。文献[19-20]创建了一个多主多从 Stackelberg 博弈模型来分析多个售电公司和多个用户之间的均衡交易策略。文献[21-22]提出了用于分析多个微网之间针对富余能源的均衡交互策略的多主多从

收稿日期: 2017-09-14; 修回日期: 2017-11-05。

上网日期: 2018-01-03。

国家自然科学基金资助项目 (51437006); 广东创新团队研究项目 (201001N0104744201)。

Stackelberg 博弈模型。然而以上与能源交易有关的动态博弈模型都只关注到电能的交易。目前,关于 IES 中多种能源交易方面的动态博弈方法的研究,仍然是个空缺。

本文将重点关注 IES 中多个 DES 和 EU 之间的均衡定价和定量问题,通过建立多主多从的 Stackelberg 博弈模型,求解出各个参与者理性追求各自目标时的均衡交互策略。首先,建立了 DES 和 EU 的数学模型,分析了双方的目标函数特性。此外,通过分析所提的博弈模型性质,证明了所提能源交易博弈存在唯一的 Stackelberg 均衡解,并推导出均衡解的闭式表达式。最后,提出了仅使用有限信息的分布式迭代算法来求解出该博弈的均衡解。

1 IES 模型

如图 1 所示,本文研究的 IES 包含 K 个 DES ($T = \{1, 2, \dots, K\}$) 和 N 个 EU ($V = \{1, 2, \dots, N\}$)。本模型中,DES 通过消耗天然气向 EU 提供电能和热能,假设 EU 的电需求和热需求都由 DES 提供。作为能源供应商,DES 追求最大化各自的收益,他们之间形成相互竞争。需要强调的是,本文研究的多种能交易模型是建立在完全竞争市场的假设之上的,即所有的生产者都会以统一的市场价格与消费者进行交易。本节将仔细讨论 IES 中 DES 和 EU 的数学模型。

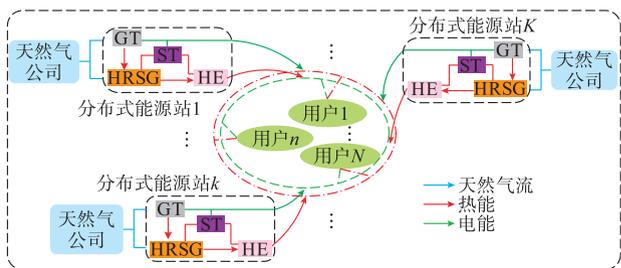


图 1 IES 示意图
Fig.1 Schematic diagram of IES

1.1 DES 模型

图 2 给出了 DES 的简化图,DES 使用各种能源生产和转换设备,通过输入天然气生产出电能和热能供应给用户。其中的能源生产和转换设备包括燃气轮机 (gas turbine, GT)、余热锅炉 (heat recovery steam generator, HRSG)、蒸汽轮机 (steam turbine, ST) 和热交换器 (heat exchanger, HE)。DES_k 的能量转换方程为:

$$\begin{cases} O_k^e = \eta_{GT}^e G_k^{GT} + \eta_{ST}^e \eta_{HR}^s (\eta_{GT}^h G_k^{GT} + G_k^{HR}) \\ O_k^h = \eta_{HE}^h [\eta_{HR}^h (\eta_{GT}^h G_k^{GT} + G_k^{HR}) + \eta_{ST}^h \eta_{HR}^s (\eta_{GT}^h G_k^{GT} + G_k^{HR})] \end{cases} \quad (1)$$

式中: η_{GT}^e 和 η_{GT}^h 分别为燃气轮机的电和热生产效率; η_{HR}^s 和 η_{HR}^h 分别为余热锅炉生产蒸汽和热水的效率; η_{ST}^e 和 η_{ST}^h 分别为蒸汽轮机发电和产热的效率; η_{HE} 为热转换机的热转换效率; O_k^e 和 O_k^h 分别为 DES_k 输出的电量和热量。由于本文假设生产效率为常系数,所以 DES_k 输出电能和热能取决于输入燃气轮机的天然气量 G_k^{GT} 和输入余热锅炉的天然气量 G_k^{HR} 。这类 DES 生产模型的详细介绍可参考文献[23-24]。

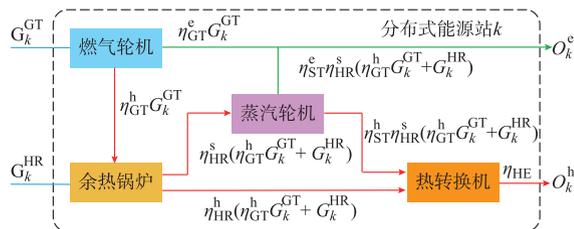


图 2 热电联供 DES 示意图
Fig.2 Schematic diagram of combined heat and power DES

作为 IES 中的盈利机构,每个 DES 都需要确定单位电能和热能价格,和优化生产所需的 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 来实现收益最大化。与此同时,所有 DES 的总产量要满足 EU 的总需求和网络损耗[25]。因此,DES_k 的优化问题描述为:

$$\max U_k^{\text{DES}} = p^e O_k^e + p^h O_k^h - C_k(G_k^{GT}, G_k^{HR}) \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K O_k^e = (1 + \alpha^e) \sum_{n=1}^N d_n^e \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K O_k^h = (1 + \alpha^h) \sum_{n=1}^N d_n^h \quad (4)$$

$$\begin{cases} p^e \geq 0 \\ p^h \geq 0 \\ 0 \leq G_k^{GT} \leq G_{k,\max}^{GT} \\ 0 \leq G_k^{HR} \leq G_{k,\max}^{HR} \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_k^{DES} 为 DES_k 的收益函数; p^e 和 p^h 分别为单位电价和单位热价,在完全竞争市场中,满足 $p^e = p_1^e = p_2^e = \dots = p_k^e$ 和 $p^h = p_1^h = p_2^h = \dots = p_k^h$; $C_k(G_k^{GT}, G_k^{HR})$ 为 DES_k 的成本函数,由可变成本和固定成本组成, $C_k(G_k^{GT}, G_k^{HR}) = c_k(G_k^{GT} + G_k^{HR}) + f_k$, 其中 c_k 为可变成本系数, f_k 为固定成本; d_n^e 和 d_n^h 分别为 EU_n 的电需求量和热需求量; $G_{k,\max}^{GT}$ 和 $G_{k,\max}^{HR}$ 分别为燃气轮机和余热锅炉的容量; α^e 和 α^h 分别为电能和热能传输过程中的网络损耗参数。

1.2 EU 模型

在微观经济学中,效用函数常被用于量化消费者在消费某一商品时获得的满意程度。本文定义 EU_n 的效用为该用户购买电能和热能所获得的满

意度的总和。本文采用常用的二次效用函数来表示 EU_n 消费能源获得的效用^[19-20,26],其表达式为:

$$U_n^{EU} = \left[v_n^e d_n^e - \frac{u_n^e}{2} (d_n^e)^2 \right] + \left[v_n^h d_n^h - \frac{u_n^h}{2} (d_n^h)^2 \right] \quad (6)$$

式中: U_n^{EU} 为 EU_n 的效用; $v_n^e, u_n^e, v_n^h, u_n^h$ 分别为 EU_n 对消费电能和热能的偏好常数,可以反映出用户对能源的需求偏好并影响需求量的大小。

在能源交易中,每个 EU 根据单位电价和热价决定电能和热能的需求量,目标为最大化消费者剩余。消费者剩余即效用与购买能源的成本之差。因此,EU_n 的最优需求响应问题可以描述为^[19-20]:

$$\max W_n = U_n^{EU} - (p^e d_n^e + p^h d_n^h) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} d_n^e \geq 0 \\ d_n^h \geq 0 \\ \forall n \in V \end{cases} \quad (8)$$

式中: W_n 为 EU_n 的消费者剩余函数。

从式(7)和式(8)中可以看出,EU_n 消费者剩余函数对于 d_n^e 和 d_n^h 满足严格凹。因此,分别对式(7)求关于 d_n^e 和 d_n^h 的一阶偏导,可以得到使得 EU_n 得到最大消费者剩余的最优需求响应如下:

$$\begin{cases} d_n^e = \frac{v_n^e}{u_n^e} - \frac{1}{u_n^e} p^e & \forall n \in V \\ d_n^h = \frac{v_n^h}{u_n^h} - \frac{1}{u_n^h} p^h & \forall n \in V \end{cases} \quad (9)$$

值得注意的是,为了保证需求量非负,单位电价和单位热价需要满足 $p^e \leq \min(v_n^e)$ 和 $p^h \leq \min(v_n^h)$ 。

2 IES 中的 Stackelberg 博弈模型

本文建立了多主多从的 Stackelberg 博弈模型来分析 IES 中 DES 和 EU 之间的均衡多能交易问题。Stackelberg 博弈是一种双层的主从复合非合作博弈方法^[18],在博弈中,DES 作为领导者各自以最大化收益的目标来制定单位电价和单位热价,EU 作为跟随者以最大化消费者剩余为目标,根据领导者的行为决定其能源需求量。本文所提的 IES 中的 Stackelberg 博弈模型的标准型表示如下:

$$\Psi = \left\{ V \cup T, \{s_n\}, \{S_k\}, \{W_n\}, \{U_k^{DES}\} \right\} \quad (10)$$

$n \in V, k \in T, n \in V, k \in T$

式中: s_n 为 EU_n 的策略集,包括电需求量 d_n^e 和热需求量 d_n^h ; S_k 为 DES_k 的策略集,包括 p^e, p^h, G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 。

当所有跟随者对领导者策略作出最优响应并且领导者接受了这个响应时,博弈达到 Stackelberg 均

衡^[19-20,26]。令 ρ^* 表示所有 DES 的均衡策略向量, δ^* 表示所有 EU 的最优响应策略向量。若以下条件成立,则 (ρ^*, δ^*) 为所提能源交易博弈的 Stackelberg 均衡。

$$\begin{cases} U_k^{DES}(\rho^*, \delta^*) \geq U_k^{DES}(\rho_k, \rho_{-k}^*, \delta^*) \\ W_n(\rho^*, \delta^*) \geq W_n(\rho^*, \delta_n, \delta_{-n}^*) \\ \forall \rho_k \in S_k \\ \forall k \in T \\ \forall \delta_n \in s_n \\ \forall n \in V \end{cases} \quad (11)$$

式中: ρ_{-k}^* 和 δ_{-n}^* 分别为除了 DES_k 之外的其他 DES 的均衡策略和除了 EU_n 之外的其他 EU 的均衡策略。当所有博弈参与者的策略是 Stackelberg 均衡策略时,任何参与者都无法通过单独改变自身策略来获得更大的利益。

2.1 供给侧分析

Nash 均衡是指当所有参与者都采用均衡策略时,任何一个参与者都无法通过单独改变自身策略来使得自身收益达到更优,即均衡策略是使得各个理性参与者在市场环境下收益最大的一种策略^[27-28]。对于 DES_k,松弛变量 p^e, p^h, G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 的可行域约束可以通过 Lagrange 方程把式(2)中描述的有约束问题转化为无约束问题,问题的 Lagrange 方程为:

$$\begin{aligned} L_k &= p^e O_k^e + p^h O_k^h - [c_k(G_k^{GT} + G_k^{HR}) + f_k] + \\ &\mu_{k,1} \left(\sum_{k=1}^K O_k^e = (1 + \alpha^e) \sum_{n=1}^N d_n^e \right) + \\ &\mu_{k,2} \left(\sum_{k=1}^K O_k^h = (1 + \alpha^h) \sum_{n=1}^N d_n^h \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\mu_{k,1}$ 和 $\mu_{k,2}$ 为 Lagrange 乘子, $\forall k \in T$ 。

式(12)的互补松弛条件为:

$$\begin{cases} \mu_{k,1} \left(\sum_{k=1}^K O_k^e = (1 + \alpha^e) \sum_{n=1}^N d_n^e \right) = 0 \\ \sum_{k=1}^K O_k^e = (1 + \alpha^e) \sum_{n=1}^N d_n^e = 0 \\ \mu_{k,2} \left(\sum_{k=1}^K O_k^h = (1 + \alpha^h) \sum_{n=1}^N d_n^h \right) = 0 \\ \sum_{k=1}^K O_k^h = (1 + \alpha^h) \sum_{n=1}^N d_n^h = 0 \end{cases} \quad (13)$$

把式(1)和式(9)代入式(12),可以得到一阶最优条件如下:

$$\frac{\partial L_k}{\partial p^e} = DG_k^{GT} + EG_k^{HR} + (1 + \alpha^e) A^e \mu_{k,1} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial p^h} = FG_k^{GT} + HG_k^{HR} + (1 + \alpha^h) A^h \mu_{k,2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial G_k^{\text{GT}}} = Dp^e + Fp^h - c_k + D\mu_{k,1} + F\mu_{k,2} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial G_k^{\text{HR}}} = Ep^e + Hp^h - c_k + E\mu_{k,1} + H\mu_{k,2} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial \mu_{k,1}} = \sum_{k=1}^K (DG_k^{\text{GT}} + EG_k^{\text{HR}}) - (1 + \alpha^e)(B^e - A^e p^e) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial L_k}{\partial \mu_{k,2}} = \sum_{k=1}^K (FG_k^{\text{GT}} + HG_k^{\text{HR}}) - (1 + \alpha^h)(B^h - A^h p^h) = 0 \quad (19)$$

$$\text{式中: } A^e = \sum_{n=1}^N (1/u_n^e); B^e = \sum_{n=1}^N (v_n^e/u_n^e); A^h =$$

$$\sum_{n=1}^N (1/u_n^h); B^h = \sum_{n=1}^N (v_n^h/u_n^h); E = \eta_{\text{ST}}^e \eta_{\text{SR}}^h; D =$$

$$\eta_{\text{GT}}^e + \eta_{\text{ST}}^e \eta_{\text{SR}}^h \eta_{\text{GT}}^h; F = \eta_{\text{HE}} (\eta_{\text{ST}}^h \eta_{\text{SR}}^h \eta_{\text{GT}}^h + \eta_{\text{HR}}^h \eta_{\text{GT}}^h);$$

$$H = \eta_{\text{HE}} (\eta_{\text{ST}}^h \eta_{\text{SR}}^h + \eta_{\text{HR}}^h)。$$

从式(14)、式(15)、式(18)和式(19),可以得到 $\mu_{k,1}, \mu_{k,2}, p^e$ 和 p^h 关于 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 的表达式为:

$$\begin{cases} \mu_{k,1} = -\frac{DG_k^{\text{GT}} + EG_k^{\text{HR}}}{(1 + \alpha^e)A^e} \\ \mu_{k,2} = -\frac{FG_k^{\text{GT}} + HG_k^{\text{HR}}}{(1 + \alpha^h)A^h} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} p^e = \frac{B^e}{A^e} - \frac{D \sum_{k=1}^K G_k^{\text{GT}} + E \sum_{k=1}^K G_k^{\text{HR}}}{(1 + \alpha^e)A^e} \\ p^h = \frac{B^h}{A^h} - \frac{F \sum_{k=1}^K G_k^{\text{GT}} + H \sum_{k=1}^K G_k^{\text{HR}}}{(1 + \alpha^h)A^h} \end{cases} \quad (21)$$

把式(20)代入式(16)和式(17)中,得到在确定 p^e 和 p^h 后的最优 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 的值为:

$$\begin{cases} G_k^{\text{GT}} = \frac{p^e(YE - ZD) + p^h(YH - ZF) + c_k(Z - Y)}{Y^2 - XZ} \\ G_k^{\text{HR}} = \frac{p^e(YD - XE) + p^h(YF - XH) + c_k(X - Y)}{Y^2 - XZ} \\ X = \frac{D^2}{(1 + \alpha^e)A^e} + \frac{F^2}{(1 + \alpha^h)A^h} \\ Y = \frac{DE}{(1 + \alpha^e)A^e} + \frac{FH}{(1 + \alpha^h)A^h} \\ Z = \frac{E^2}{(1 + \alpha^e)A^e} + \frac{H^2}{(1 + \alpha^h)A^h} \end{cases} \quad (22)$$

接下来,将求解 $p^e, p^h, G_k^{\text{GT}}$ 和 G_k^{HR} 仅与系统参数和用户需求参数有关的闭式表达式。

把式(21)代入式(22),可以得到:

$$\begin{cases} 2XG_k^{\text{GT}} + X \sum_{g=1, g \neq k}^K G_g^{\text{GT}} + 2YG_k^{\text{HR}} + Y \sum_{g=1, g \neq k}^K G_g^{\text{HR}} = I - c_k \\ 2YG_k^{\text{GT}} + Y \sum_{g=1, g \neq k}^K G_g^{\text{GT}} + 2ZG_k^{\text{HR}} + Z \sum_{g=1, g \neq k}^K G_g^{\text{HR}} = J - c_k \end{cases} \quad (23)$$

式中: $I = B^e D / A^e + B^h F / A^h$; $J = B^e E / A^e + B^h H / A^h$ 。

通过观察,可以把式(23)写成矩阵形式:

$$\begin{cases} (Y^2 - XZ)\mathbf{R}\mathbf{G}^{\text{GT}} = \mathbf{M} \\ (Y^2 - XZ)\mathbf{R}\mathbf{G}^{\text{HR}} = \mathbf{Q} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{G}^{\text{GT}} = [G_1^{\text{GT}}, G_2^{\text{GT}}, \dots, G_k^{\text{GT}}, \dots, G_K^{\text{GT}}]$ 为 DES 输入燃气轮机的天然气量的列向量; $\mathbf{G}^{\text{HR}} = [G_1^{\text{HR}}, G_1^{\text{HR}}, \dots, G_k^{\text{HR}}, \dots, G_K^{\text{HR}}]$ 为 DES 输入余热锅炉的天然气量的列向量; $\mathbf{M} = [M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_K]$, 且 $M_k = YJ - ZI + (Z - Y)c_k$; $\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_k, \dots, Q_K]$, 且 $Q_k = YI - ZJ + (X - Y)c_k$; \mathbf{R} 矩阵如式(25)所示。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

因此,当 $(Y^2 - XZ) \neq 0$ 时,可以得到式(24)的解为:

$$\begin{cases} \mathbf{G}^{\text{GT}} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{M}}{Y^2 - XZ} \\ \mathbf{G}^{\text{HR}} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Q}}{Y^2 - XZ} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^* / |\mathbf{R}|, |\mathbf{R}| = 1 + K$ 。

\mathbf{R} 矩阵的伴随矩阵为 \mathbf{R}^* , 令 \mathbf{R}^* 中的元素为 R_{xy}^* , 则

$$\begin{cases} R_{xy}^* = 1 & x \neq y \\ R_{xy}^* = K & x = y \end{cases} \quad (27)$$

把 \mathbf{R}^{-1} 的值代入式(26),可以得到 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 的闭式表达式如下:

$$\begin{cases} G_k^{\text{GT}} = \frac{YJ - ZI + K(Z - Y)c_k - (Z - Y) \sum_{g=1, g \neq k}^K c_g}{(1 + K)(Y^2 - XZ)} \\ G_k^{\text{HR}} = \frac{YI - XJ + K(X - Y)c_k - (X - Y) \sum_{g=1, g \neq k}^K c_g}{(1 + K)(Y^2 - XZ)} \end{cases} \quad (28)$$

式(28)中, DES_k 的最优运行方式只与其运行参数和 EU 的需求特性有关。把式(28)代入式(21)中,可以得到单位电价和单位热价的闭式表达式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} p^e &= \frac{B^e}{A^e} - \frac{K[D(YJ - ZI) + E(YI - XJ)]}{(1 + \alpha^e)A^e(1 + K)(Y^2 - XZ)} - \\ &\quad \frac{[D(Z - Y) + E(X - Y)] \sum_{k=1}^K c_k}{(1 + \alpha^e)A^e(1 + K)(Y^2 - XZ)} \\ p^h &= \frac{B^h}{A^h} - \frac{K[F(YJ - ZI) + H(YI - XJ)]}{(1 + \alpha^h)A^h(1 + K)(Y^2 - XZ)} - \\ &\quad \frac{[F(Z - Y) + H(X - Y)] \sum_{k=1}^K c_k}{(1 + \alpha^h)A^h(1 + K)(Y^2 - XZ)} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

2.2 DES 的定价博弈

通过对 DES 的目标函数进行分析,发现 DES 的定价博弈满足超模博弈性质。超模博弈中,参与者的策略体现出一定的互补性,即博弈中参与人的最优反应对应关于对手的策略递增。当参与者策略空间有限且目标函数连续可微,参与者目标函数对自身策略的交叉偏导和对其他参与者策略的交叉偏导非负时,该博弈满足超模博弈性质^[29-30]。从微观经济学的角度,如果下列条件成立,则 DES 之间的定价博弈是超模博弈^[31-33]:① S_k 是欧氏空间中一个非空并且紧致的子集;② U_k^{DES} 在 $\{S_k\}$ 上二阶连续可导;③ U_k^{DES} 对自身策略变量的交叉偏导非负,即 $\partial^2 U_k^{\text{DES}}(\rho_k, \rho_{-k}) / (\partial \rho_k \partial \rho_{k_j}) \geq 0, i \neq j$;④ U_k^{DES} 对其他 DES 的策略变量的交叉偏导非负,即 $\partial^2 U_k^{\text{DES}}(\rho_k, \rho_{-k}) / (\partial \rho_k \partial \rho_{-k}) \geq 0$ 。其中, $\rho_k = \{p_k^e, p_k^h, G_k^{\text{GT}}, G_k^{\text{HR}}\}$ 表示 DES_k 的策略变量集合; ρ_{-k} 表示除了 DES_k 之外的其他 DES 的策略变量集合。

结论 1: DES 之间的非合作定价博弈是一个超模博弈。

证明: DES_k 的策略变量满足 $G_k^{\text{GT}} \in [0, G_{k, \max}^{\text{GT}}]$, $G_k^{\text{HR}} \in [0, G_{k, \max}^{\text{HR}}]$, $p_k^e \in [0, \min(v_n^e)]$, $p_k^h \in [0, \min(v_n^h)]$ 。因此, DES_k 的策略集是欧氏空间中一个非空并且紧致的闭区间。从式(2)可以看出, U_k^{DES} 在 $\{S_k\}$ 上满足二阶连续可导。 U_k^{DES} 对自身策略变量的交叉偏导如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial p_k^h} &= 0, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial G_k^{\text{GT}}} = D \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial G_k^{\text{HR}}} &= F, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial p_k^e} = 0 \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial G_k^{\text{GT}}} &= E, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial G_k^{\text{HR}}} = H \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial p_k^e} &= D, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial p_k^h} = F \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial G_k^{\text{HR}}} &= 0, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial p_k^e} = E \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial p_k^h} &= H, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial G_k^{\text{GT}}} = 0 \end{aligned}$$

上述公式表明, DES_k 的目标函数对自身策略变量的交叉偏导都是非负的。 U_k^{DES} 对其他 DES 的策略变量的交叉偏导如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial p_k^e} &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial p_k^h} = \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial G_k^{\text{GT}}} = \\ &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^e \partial G_k^{\text{HR}}} = 0 \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial p_k^e} &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial p_k^h} = \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial G_k^{\text{GT}}} = \\ &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial p_k^h \partial G_k^{\text{HR}}} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial p_k^e} &= D, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial p_k^h} = F \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial G_k^{\text{GT}}} &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{GT}} \partial G_k^{\text{HR}}} = 0 \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial p_k^e} &= E, \quad \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial p_k^h} = H \\ \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial G_k^{\text{GT}}} &= \frac{\partial^2 U_k(\rho_k, \rho_{-k})}{\partial G_k^{\text{HR}} \partial G_k^{\text{HR}}} = 0 \end{aligned}$$

上述公式表明, DES_k 的目标函数对其他 DES 的策略变量的交叉偏导都满足非负条件。因此, DES 之间的非合作定价博弈是一个超模博弈。

根据超模博弈的性质, DES 之间的非合作定价博弈存在纯策略 Nash 均衡解^[31-33]。另外,在 2.1 节中推导出了 DES 策略变量的闭式表达式,这说明 DES 策略集存在唯一非负解。由此证明了 DES 之间的非合作定价博弈的 Nash 均衡解是唯一的。

2.3 Stackelberg 博弈均衡的唯一性

结论 2: DES 与 EU 之间的能源交易博弈存在唯一的 Stackelberg 均衡解。

证明: 从结论 1 可以得出领导者 DES 之间的非合作定价博弈是一种超模博弈,由此证明了领导者博弈存在 Nash 均衡。此外,如式(9)所示, EU 对能源价格的具有唯一的最优响应,并且所有博弈参与者的策略集非空且紧致,由此可得 DES 与 EU 之间的能源交易博弈存在 Stackelberg 均衡。根据 DES 策略变量的闭式表达式如式(28)和式(29)所示, $p^e, p^h, G_k^{\text{GT}}$ 和 G_k^{HR} 只存在唯一的非负解,因此领导者之间的博弈存在唯一的 Nash 均衡。由于领导者 DES 之间的博弈均衡唯一,且跟随者 EU 的最优响

应唯一,可证明 DES 与 EU 之间能源交易博弈的 Stackelberg 均衡唯一。

3 分布式算法

集中优化方法需要知道参与者的目标函数的确切信息,然而现实中交易双方不会愿意向竞争对手透露他们各自的目标函数^[34]。为了保护商业信息,本节提出了一种求解 DES 与 EU 之间能源交易博弈 Stackelberg 均衡的分布式算法,该算法不需要交易双方透露目标函数信息。所提分布式算法的伪代码如下。

```

记迭代次数  $i=0$ ;
随机初始化  $p_i^e$  和  $p_i^h$ ;
while (the termination conditions are not met) do
for (DESk  $k=1,2,\dots,K$ ) do
    将  $p_i^e$  和  $p_i^h$  代入式(22)计算得  $G_{k,i}^{GT}$  和  $G_{k,i}^{HR}$ ;
    通过式(1)求解  $O_{k,i}^e$  和  $O_{k,i}^h$ ;
end for
for (EUn  $n=1,2,\dots,N$ ) do
    将  $p_i^e$  和  $p_i^h$  代入式(9)计算得  $d_{n,i}^e$  和  $d_{n,i}^h$ ;
end for
通过式(30)计算  $p_{i+1}^e$  和  $p_{i+1}^h$ ;
if ( $|p_{i+1}^e - p_i^e| < \theta$  且  $|p_{i+1}^h - p_i^h| < \theta$ ) then
    break
else
    更新单位电价和单位热价并转向下一次迭代;
end if
 $i=i+1$ ;
end while
    
```

假设有一个控制中心作为中间组织来协调求解 Stackelberg 均衡解,值得注意的是,控制中心不需要知道博弈双方的目标函数的信息。控制中心首先初始化单位电价和单位热价,并发送给 DES 和 EU,每个 DES 基于该价格进行运行优化,求解出该价格下的天然气输入 $G_{k,i}^{GT}$ 和 $G_{k,i}^{HR}$,及电能和热能的输出量 $O_{k,i}^e$ 和 $O_{k,i}^h$,把产量信息告知控制中心。每个 EU 得知价格后,求解出该价格下的最优响应需求量 $d_{n,i}^e$ 和 $d_{n,i}^h$,并把需求量信息告知控制中心。控制中心汇总了供应量和需求量后更新价格信号,进入下一次迭代,直至供应量与需求量相等时,价格不再变化,即更新前后的价格小于等于收敛精度 θ 。更新价格是基于供求不平衡量的更新方式,如下式所示:

$$\begin{cases} p_{i+1}^e = p_i^e + \tau_i^e \left[(1 + \alpha^e) \sum_{n=1}^N d_{n,i}^e - \sum_{k=1}^K O_{k,i}^e \right] \\ p_{i+1}^h = p_i^h + \tau_i^h \left[(1 + \alpha^h) \sum_{n=1}^N d_{n,i}^h - \sum_{k=1}^K O_{k,i}^h \right] \end{cases} \quad (30)$$

式中: i 为迭代次数; τ_i^e 和 τ_i^h 分别为电价和热价的速度调整参数。

为了提高算法的收敛速度,采用与当前迭代次数 i 有关的动态速度调整参数^[26],如下:

$$\begin{cases} \tau_i^e = \frac{1}{\lambda^e + \mu^e i} \\ \tau_i^h = \frac{1}{\lambda^h + \mu^h i} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $\lambda^e, \mu^e, \lambda^h$ 和 μ^h 为常数。

4 算例分析

本节将通过算例分析来验证所提的 Stackelberg 博弈模型的有效性和分布式算法的快速收敛性。此外,还将分析 DES 的成本参数、EU 的消费偏好参数及 DES 的数量和 EU 的数量对博弈均衡解的影响。

首先,对由 4 个 DES 和 5 个 EU 组成的 IES,利用本文所提出的 Stackelberg 博弈模型和分布式算法进行算例分析。第 1 个算例中,DES 成本参数设置为 $c_k = \{18.5, 19.0, 19.5, 20.0\}$, $f_k = \{10, 11, 12, 13\}$ 。DES 的生产设备的效率参数 $\eta_{GT}^e, \eta_{GT}^h, \eta_{HR}^e, \eta_{HR}^h, \eta_{ST}^e, \eta_{ST}^h$ 和 η_{HE} 分别设置为 0.35, 0.5, 0.1, 0.7, 0.42, 0.38 和 0.8^[24-25]。网络损耗参数为 $\alpha^e = 0.04$, $\alpha^h = 0.06$ 。图 3 和图 4 给出了分布式算法在不同随机初始点时的收敛图,其中速度调整常数设置为 $\lambda^e = 0.05, \mu^e = 4, \lambda^h = 0.04$ 和 $\mu^h = 4$,收敛精度设置为 $\theta = 10^{-6}$ 。从图中可以看出,所提分布式算法从不同的随机初始值开始,都能在 12 次以内收敛,具有快速收敛性,且闭式表达式得出的结果与分布式算法求出的均衡解相同,验证了两者的正确性。每个 DES 和 EU 的均衡策略分别如附录 A 表 A1 和表 A2 所示。

从附录 A 表 A1 可以看出,Stackelberg 博弈达到均衡时,由于 DES₁ 的成本最低,所以它可以比其他 DES 交易更多的电能和热能,其用于生产所需的天然气输入量也要更多。在完全竞争市场中,所有 DES 的电价和热价分别统一,成本越高的 DES,电能和热能交易量越低,因此收益也越低。在本算例中, $D=0.497, E=0.294, F=0.169, H=0.338$ 。这意味着 G_k^{GT} 主要用于生产电能,而 G_k^{HR} 主要用于生产热能的同时,29.4%的 G_k^{HR} 可产出电能。这是因为余热锅炉在生产热能的同时,产生的蒸汽可被蒸汽轮机用于生产电能。当电需求没有高于热需求时,大部分的电需求能被蒸汽轮机的产出满足,因此不需要太多的天然气输入到燃气轮机。所以本算例中 G_k^{GT} 小于 G_k^{HR} 。

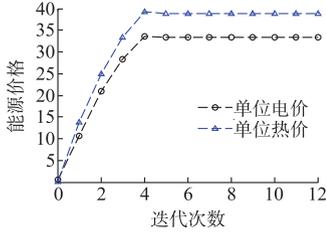


图3 迭代初始值 $p_0^e=0.423\ 8$, $p_0^h=0.017\ 9$ 时的分布式算法收敛图
Fig.3 Convergence diagram of distributed algorithm when $p_0^e=0.423\ 8$, $p_0^h=0.017\ 9$

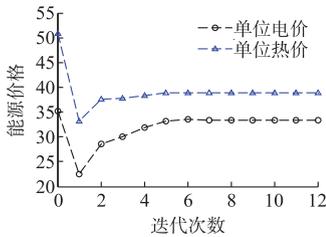


图4 迭代初始值 $p_0^e=35.157\ 9$, $p_0^h=50.845\ 6$ 时的分布式算法收敛图
Fig.4 Convergence diagram of distributed algorithm when $p_0^e=35.157\ 9$, $p_0^h=50.845\ 6$

当能源价格确定之后,EU 将根据自身的消费满意度作出最优响应确定能源需求量。偏好参数 v_n^e/u_n^e 和 v_n^h/u_n^h 更大的 EU 将分别需要更多的电能和热能。附录 A 表 A2 给出了消费偏好参数不同的 EU 的均衡策略和消费者剩余。根据式(9),电需求和热需求分别与 v_n^e 和 v_n^h 成正比,与 u_n^e 和 u_n^h 成反比。从附录 A 表 A2 中也可以看出,与 EU₁ 相比,EU₂ 的 u_n^e 和 EU₃ 的 u_n^h 更大,所以 EU₂ 的电需求和 EU₃ 的热需求比 EU₁ 低。EU₄ 的 v_n^e 和 EU₅ 的 v_n^h 比 EU₁ 更大,所以 EU₄ 的电需求和 EU₅ 的热需求比 EU₁ 高。与式(7)的结果相符,偏好参数和需求量的大小共同影响消费者剩余,因此,EU₂ 和 EU₃ 的消费者剩余低于 EU₁,EU₄ 和 EU₅ 的消费者剩余高于 EU₁。

接下来将讨论 DES 的成本参数、EU 的消费偏好参数、DES 的数量和 EU 的数量对博弈均衡解的影响。为了验证所提方法的普遍性,接下来的算例将对成本参数为 $c_k=18$ 和 $f_k=10$ 的 5 个 DES,与偏好参数为 $u_n^e=7$, $u_n^h=7$, $v_n^e=55$ 和 $v_n^h=60$ 的 10 个 EU 之间的能源交易博弈进行仿真分析。参数设置若有变动会在下文不同的算例中给出。

4.1 DES 的成本参数对博弈均衡解的影响

附录 A 图 A1 至图 A3 描述了当 DES₁ 的可变成本参数 c_1 从 14 至 19 变化,其他 DES 的 $c_k=18(k \neq$

1) 时的博弈均衡解的变化。由附录 A 图 A1 可以看出,单位电价和单位热价随着 c_1 的增大而上升,这是因为 c_1 的增大意味着所有 DES 的可变成本参数总量 $\sum_{k=1}^K c_k$ 增大。根据式(29),单位能源价格将随着 $\sum_{k=1}^K c_k$ 的增大而线性升高。这导致了 EU 的能源需求量减少,随之,如附录 A 图 A2 所示,EU 的消费者剩余也会下降。在式(28)中, $(X - Y) > 0$, $(Z - Y) < 0$ 且 $(Y^2 - XZ) < 0$,因而随着 c_1 的增大,DES₁ 的天然气输入量 G_1^{GT} 将增加而 G_1^{HR} 将减少。如附录 A 图 A3 所示,对于 DES₂ 至 DES₅, c_1 的增大意味着其他 DES 的可变成本参数总和 $\sum_{g=1, g \neq k}^K c_g$ 的增大,根据式(28), $G_k^{GT} (k \neq 1)$ 将减少而 $G_k^{HR} (k \neq 1)$ 将增加。总的来说,DES₁ 的成本升高导致其在市场中的竞争力下降,其市场份额减小,生产所需的天然气总量减少且收益下降。而其他的 DES 的市场份额相应增加,用于生产所需的天然气总量增加且收益有所提升。

4.2 EU 的偏好参数对博弈均衡解的影响

附录 A 图 A4 描述了当 v_n^h 从 40 至 58 变化时,博弈均衡解的变化情况。 v_n^h 越高意味着 EU 对热能的消费满意度越高,则热需求量将增加。由于生产者 DES 的供给特性不变,热需求量的增加引起了单位热价的升高。值得注意的是, v_n^h 对 EU 的电需求和交易的单位电价没有影响。因此,随着热需求的增加,EU 的消费者剩余升高且 DES 的收益上升。此外,当热需求量较低时, G_k^{HR} 较低,这导致由 G_k^{HR} 生产的电能不足以满足用户的电需求,所以需要较多的 G_k^{GT} 用于生产电能。随着热需求增加而电需求保持不变, G_k^{HR} 增加且由蒸汽轮机产生的电能相应增加,因此 G_k^{GT} 将随之减少。

4.3 DES 的数量对博弈均衡解的影响

附录 A 图 A5 和图 A6 描述当 DES 数量从 5 至 15 变化时,DES 与 EU 的博弈均衡解的变化情况。如附录 A 图 A5 所示,更多的 DES 参与能源交易将导致单位电价和单位热价的下降。式(29)也表明, K 的增加会使得 p^e 和 p^h 降低。这是因为 DES 数量增加使得价格竞争更加激烈。随着价格的降低,EU 的电需求和热需求增加,随之 EU 的消费者剩余将升高。此外,如附录 A 图 A6 所示,供应商数量的增加将导致每个 DES 分配到的市场份额减小,因此每个 DES 的能源产量减少,用于生产所需的天然

气量 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 相应减少。能源价格和产量的下降,导致每个 DES 的收益降低。

4.4 EU 的数量对博弈均衡解的影响

附录 A 图 A7 描述了当 EU 的数量从 10 至 30 变化时,DES 与 EU 之间的能源博弈均衡解的变化情况。由于每个 EU 的响应行为不会相互影响,所以 EU 数量的增加并不会影响每个 EU 的能源需求量和消费者剩余。然而,能源需求总量会随着 EU 数量的增加而增加。因此,当 DES 的数量不变时,每个 DES 需要生产更多的电能和热能来满足 EU 的需求。交易产量的增加将使得每个 DES 需要输入更多的天然气 G_k^{GT} 和 G_k^{HR} 用于生产,与此同时,每个 DES 的收益相应升高。尽管 EU 的总需求增加,但是该产量未超过 DES 生产能力,所以单位电价和热价保持不变。

5 结语

本文建立了用于分析 IES 中,多个 DES 和 EU 的能源交易均衡问题的多主多从 Stackelberg 博弈模型。博弈模型考虑了每个 DES 的收益和每个 EU 的消费者剩余。通过分析,证明了领导者 DES 之间的非合作定价博弈满足超模博弈性质,存在纯策略 Nash 均衡。同时,证明了 DES 和 EU 之间的能源交易博弈存在唯一的 Stackelberg 均衡。此外,本文推导了 DES 和 EU 的 Stackelberg 均衡解的闭式表达式。最后,提出了一个仅使用有限信息来求解所提博弈模型的 Stackelberg 均衡解的分布式算法。

算例分析验证了所提的分布式算法具有快速收敛性,其结果与闭式表达式的结果吻合。此外,分别研究了 DES 的成本参数、EU 的消费偏好参数、DES 的数量和 EU 的数量对市场价格的形成和每个市场参与者在博弈中的行为所造成的影响。

在未来的多种能源交易市场中,本文所提的博弈模型有助于分析市场参与者的均衡策略,或者应用于制定中长期交易机制或合同。但是本文考虑的用户模型不够全面,能源类型不够丰富,后续的研究,将拓展能源供应商和消费者的类型和能源的种类,探究更为复杂的多种能源交易问题。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] JIANG X S, JING Z X, LI Y Z, et al. Modelling and operation

optimization of an integrated energy based direct district water-heating system[J]. Energy, 2014, 64: 375-388.

[2] JING Z X, JIANG X S, WU Q H, et al. Modelling and optimal operation of a small-scale integrated energy based district heating and cooling system[J]. Energy, 2014, 73: 399-415.

[3] 雷金勇,谢俊,甘德强.分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J].电力系统自动化,2009,33(23):29-36.

LEI Jinyong, XIE Jun, GAN Deqiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 29-36.

[4] 王雁凌,李蓓,崔航.天然气分布式能源站综合价值分析[J].电力系统自动化,2016,40(1):136-142. DOI: 10.7500/AEPS20150521003.

WANG Yanling, LI Bei, CUI Hang. Comprehensive value analysis for gas distributed energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 136-142. DOI: 10.7500/AEPS20150521003.

[5] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.

JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.

[6] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.

GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.

[7] 马腾飞,吴俊勇,郝亮亮.含冷热电三联供的微能源网能量流计算及综合仿真[J].电力系统自动化,2016,40(23):22-27. DOI: 10.7500/AEPS20160426005.

MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang. Energy flow calculation and integrated simulation of micro-energy grid with combined cooling, heating and power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 22-27. DOI: 10.7500/AEPS20160426005.

[8] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.

LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.

[9] 王成山,洪博文,郭力,等.冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.

WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.

[10] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概

- 念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11. DOI: 10.7500/AEPS20140613007.
- DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to Energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11. DOI: 10.7500/AEPS20140613007.
- [11] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- [12] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [13] 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.
- [14] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S, et al. A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 1007-1016.
- [15] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.
- [16] ALBADI M H, EL-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1989-1996.
- [17] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [18] STACKELBERG V H. Marketform und gleichgewicht [M]. London: Oxford University Press, 1934.
- [19] MAHARJAN S, ZHU Q, ZHANG Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 120-132.
- [20] MAHARJAN S, ZHU Q, ZHANG Y, et al. Demand response management in the smart grid in a large population regime[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 189-199.
- [21] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3524-3533.
- [22] ASIMAKOPOULOU G E, DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1909-1916.
- [23] TAN Z, ZHANG H, SHI Q, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation of large-scale NG distributed energy system driven by gas-steam combined cycle in China[J]. Energy and Buildings, 2014, 76: 572-587.
- [24] JU L, TAN Z, LI H, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China[J]. Energy, 2016, 111: 322-340.
- [25] WU Z L, DING J Y, WU Q H, et al. Two-phase mixed integer programming for non-convex economic dispatch problem with spinning reserve constraints[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 653-662.
- [26] WEI F, JING Z X, WU P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200: 315-329.
- [27] NASH J F. Equilibrium points in n -person games [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1950, 36(1): 48-49.
- [28] NASH J. Non-cooperative games[J]. Annals of mathematics, 1951, 54(2): 286-295.
- [29] TOPKIS D M. Supermodularity and complementarity [M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 2011.
- [30] VIVES X. Nash equilibrium with strategic complementarities [J]. Journal of Mathematical Economics, 1990, 19(3): 305-321.
- [31] MILGROM P, SHANNON C. Monotone comparative statics [J]. Econometrica, 1994, 62(1): 157-180.
- [32] TOPKIS D M. Comparative statics of the firm[J]. Journal of Economic Theory, 1995, 67(2): 370-401.
- [33] MÜLLER A, SCARSINI M. Some remarks on the supermodular order [J]. Journal of Multivariate Analysis, 2000, 73(1): 107-119.
- [34] BAHARLOUEI Z, HASHEMI M. Efficiency-fairness trade-off in privacy-preserving autonomous demand side management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 799-808.

吴利兰(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统运行优化、多种能源交易模式、综合能源系统经济调度。E-mail: wu.lilan@mail.scut.edu.cn

荆朝霞(1975—),女,博士,教授,主要研究方向:分布式综合能源系统规划与运行、电力市场、电力系统规划及运营。E-mail: zxjing@scut.edu.cn

吴青华(1953—),男,通信作者,国家“千人计划”特聘教授,IEEE高级会员,主要研究方向:人工智能、计算机学习、电力系统运行与控制、多代理系统。E-mail: wuqh@scut.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

(下转第 207 页 continued on page 207)

Equilibrium Strategies for Integrated Energy Systems Based on Stackelberg Game Model

WU Lilan, JING Zhaoxia, WU Qinghua, DENG Shan

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: An analytical model of multi-leader multi-follower Stackelberg game between the distributed energy station (DES) and the end user (EU) is proposed in order to explore the interactions between the two parties. The hierarchical Stackelberg game model considers the benefits of both DES and EU, and enables EU to make demand responses to maximize their welfare. In this model, the DES leads the game by independently deciding the amount of natural gas input for the generation of both the electricity and heating energies and jointly setting the energy prices to maximize their own profits. The EUs play as followers and determine the electricity and heating energy demands based on the prices the DES announced. Moreover, the closed-form expression of the Stackelberg equilibrium (SE) of the game between DES and EU is derived. Furthermore, a distributed algorithm is proposed to obtain the SE of this game with limited information. Numerical studies demonstrate the validity of the proposed game scheme as well as the efficiency of the distributed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51437006) and Guangdong Innovation Team Research Project (No. 201001N0104744201).

Key words: distributed energy station; Stackelberg game; supermodular game; integrated energy system; distributed algorithm