

基于需求响应的用户侧综合能源系统 分布式博弈均衡策略

张加贝¹,孙恒一¹,钱 锋²,郑 强²,郑懿敏³,谢 俊³

(1. 昆明电力交易中心有限责任公司,昆明 650200;2. 南京南瑞继保工程技术有限公司,
南京 211102;3. 河海大学 能源与电气学院,南京 211100)

A distributed game equilibrium strategy of customer-side integrated energy system based on demand response

ZHANG Jiabei¹, SUN Hengyi¹, QIAN Feng², ZHENG Qiang², ZHENG Yimin³, XIE Jun³

(1. Kunming Power Exchange Center Co., Ltd., Kunming 650200, China;2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102,
China;3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:用户侧综合能源系统是未来能源消费方式的重要发展方向,实现用户侧综合能源系统的运行优化可以提高其经济效益和环境效益。为此,建立了由多个分布式能源站和多个能源用户组成的用户侧综合能源系统能源交易模型,提出了基于需求响应的用户侧综合能源系统分布式博弈均衡策略。分布式能源站最大化各自收益,能源用户则以各自效用最大化为目标,首先,通过对偶分解将初始问题分解为多个子系统的需求响应优化问题,然后,对各个子系统的需求响应优化问题进行分布式求解。该方法的主要优点是,能源交易实现分布式博弈均衡,各方不需要中央控制器或者任何第三方,同时各市场成员信息隐私得到了保障。最后,通过算例验证了所提用户侧综合能源系统分布式博弈均衡策略的有效性。

关键词:用户侧综合能源系统;分布式能源站;分布式博弈均衡策略;需求响应

Abstract: Customer-side integrated energy system (C-IES) is an important direction of energy consumption in the future. The optimization of C-IES operation can improve the economic and environmental benefits. For this purpose, an energy transaction model for C-IES composed of multiple distributed energy stations (DES) and energy users (EU) is established, and distributed game equilibrium strategy for C-IES based on demand response is proposed. DESs aim to maximize their respective benefits, while EUs aim to maximize their respective utility. Firstly, the initial problem is decomposed into the demand response optimization problem of multiple subsystems through dual decomposition. Then distributed solution is implemented for the demand response optimization problem of each subsystem. The main advantage of this method is that the two sides of the energy transaction do not need a central controller or any third party, and the privacy of DESs and EUs is guaranteed. Finally, the effectiveness of the proposed distributed game equilibrium strategy is verified by a numerical example.

Key words: customer-side integrated energy system; distributed energy station; distributed game equilibrium strategy; demand response

0 引言

天然气作为清洁能源进行发电,不仅环境效益高,而且经济性好。其应用于分布式发电时,既可以实现能源的梯级应用,提高能源利用效率,又可以对系统的安全稳定起到积极的作用^[1-2]。基于天然气的分布式能源站(distributed energy station, DES)构建用户侧综合能源系统(customer - side integrated energy system, C-IES)^[3-4],可以为用户提供热、电多种能源,用能效率可达80%以上,是现今用户侧综合能源系统(integrated energy system, IES)

中最具商业前景的一种运营模式^[5-6]。

在用户侧IES的运行优化方面,文献[7]考虑了储能,采用场景分析法对可再生能源建模,以总运行成本最低为目标,求解包含多个DES的用户侧IES内各单元的最优出力。文献[8]—文献[10]在微网中建立了含有多个DES的调度优化模型,并且考虑了分时电价,采用混合整数线性规划方法进行求解。以上文献都分析了多区域DES互联的协同优化问题,但都只考虑了DES的运行成本,而未讨论DES在市场环境中的定价和收益问题。

能源互联网发展迅速,DES可以向多个能源用户(energy unit, EU)供应能源,实现能源互联。在开放的市场环境下,DES采用哪种生产策略、如何制定能源价格以实现收益最大化,是当下关注的热点。文献

收稿日期:2020-09-12;修回日期:2020-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U1965204)

[11]根据区域中客户热能、电能、冷能的波动性需求,确定待建的分布式能源供应站的数量、位置和能源生产能力,同时确定供应点到需求点的能源输送管道数量和网络布置,以最小化能源供应成本。文献[12]提出了基于成本的分布式天然气发电上网电价定价机制,研究了电力市场化交易机制下分布式天然气发电的竞价上网策略,并提出适合分布式天然气发电的合理定价参数,但该方法未考虑到DES的生产运行优化,易造成能源浪费,增加不必要的成本。

考慮采用具有主从复合结构的博弈模型时,DES先确定能源价格,EU根据价格确定能源需求量,2者存在决策的先后顺序^[13]。根据此特征,可考虑用户的需求响应来分析DES和EU之间的交互关系^[14-15]。需求响应在C-IES中能够应对日益增长的能耗峰值,求解市场参与者的最优策略。此方法对能源价格的制定和DES的优化运行具有重要的指导意义^[16-17]。文献[16]构造了需求响应目标函数来分析验证用户侧存在最佳参与率,电网侧存在最佳激励政策,能有效优化资源调度。文献[17]提出了一种考虑用户需求响应的售电公司购售电决策双层模型,分别以售电公司利润最大化和用户用电效用最大化为目标来分析给出更优的售电公司购电决策方案。然而,以上需求响应模型都只关注到电能的交易,在多种能源方面的研究还有待完善。

本文研究用户侧IES中多个DES和多个EU之间的多能源均衡定价问题,通过建立多主多从的需求数响应模型,求解出各参与者理性追求各自目标时的均衡交互策略。首先,建立了用户侧IES运行优化模型。其次,提出了用户侧IES博弈均衡策略问题,给出了该问题的分布式求解方法。最后,通过算例仿真验证了该分布式博弈均衡策略的有效性。

1 C-IES运行优化模型

1.1 系统组成结构

本文研究的C-IES结构如图1所示,该系统包含K个DES和N个EU。天然气公司向DES提供天然气,EU从DES获取电能和热能,且EU的能源需求全部都由DES提供。

DES的内部结构如图2所示,各DES装备有各种能源生产和转换设备,这些设备将输入的天然气和电产出为热能和电能供应给EU。DES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)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、蒸汽轮机(steam turbine, ST)、热转换器(heat exchanger, HE)和变压器。

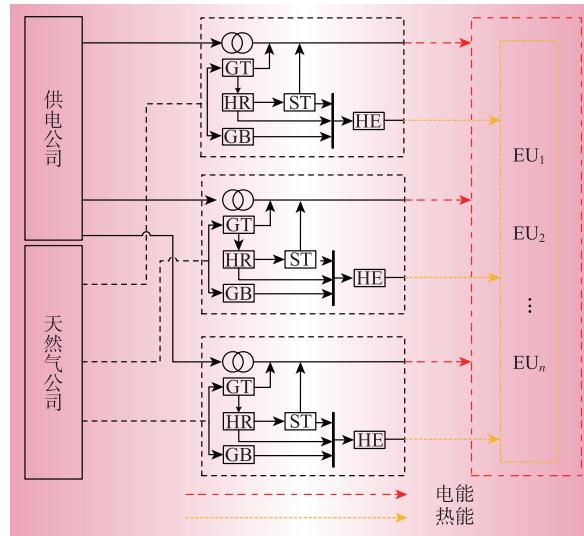


图1 C-IES结构图

Fig. 1 Structure chart of C-IES

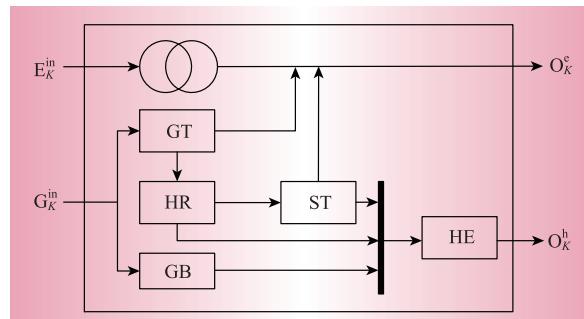


图2 DES结构图

Fig. 2 Structure chart of DES

每个DES内的能量转换方程为

$$\begin{aligned} O_k^e &= \eta_T E_k^{\text{in}} + \eta_{\text{GT}}^e G_k^{\text{GT}} + \eta_{\text{ST}}^e \eta_{\text{HR}}^s \eta_{\text{GT}}^h G_k^{\text{GT}} \\ O_k^h &= \eta_{\text{HE}} [\eta_{\text{GB}}^h G_k^{\text{GB}} + \eta_{\text{GT}}^h G_k^{\text{GT}} (\eta_{\text{ST}}^h \eta_{\text{HR}}^s + \eta_{\text{HR}}^h)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: O_k^e 、 O_k^h 分别为 DES_k 输出的电能、热能; E_k^{in} 为 DES_k 输入的电能; η_{GT}^e 、 η_{GT}^h 分别为燃气轮机中电、热的生产效率; η_{HR}^s 、 η_{HR}^h 分别为余热锅炉的蒸汽、热水的生产效率; η_{ST}^e 、 η_{ST}^h 分别为蒸汽轮机中电、热的生产效率; η_{GB}^h 为燃气锅炉的产热效率; η_{HE} 为热转换机的热转换效率; η_T 为变压器的转换率; G_k^{GT} 、 G_k^{GB} 分别为天然气公司对燃气轮机、燃气锅炉的天然气供给量。

1.2 数学模型

1.2.1 目标函数

在能源供给侧, DES_k 从输入电能和天然气到输出电能和热能的成本包括2部分,表示为

$$C_k = C_{k,e} + C_{k,g} \quad (2)$$

$$C_{k,e} = a_{k,e} (E_k^{\text{in}})^2 + b_{k,e} E_k^{\text{in}} + c_{k,e} \quad (3)$$

$$C_{k,g} = a_{k,g} (G_k^{\text{GT}} + G_k^{\text{GB}})^2 + b_{k,g} (G_k^{\text{GT}} + G_k^{\text{GB}}) + c_{k,g} \quad (4)$$

式中: $C_{k,e}$ 为 DES_k 从输入电能到输出电能的成本; $C_{k,g}$ 为 DES_k 从输入天然气到输出电能和热能的成本; $a_{k,e}$ 、 $b_{k,e}$ 和 $a_{k,g}$ 、 $b_{k,g}$ 为可变成本系数; $c_{k,e}$ 和 $c_{k,g}$ 为固定成本。

在能源需求侧,效用函数常被用于衡量消费者消费既定的商品后所获得的满意度。采用常用的二次效用函数表示 EU_n 消费电能、热能获得的效用如下

$$U_n \triangleq U_n^e + U_n^h = \sum_{k \in K} U_n^e(d_{n,k}^e) + \sum_{k \in K} U_n^h(d_{n,k}^h) \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_n^e \triangleq v_n^e d_{n,k}^e - \frac{u_n^e}{2} (d_{n,k}^e)^2 \\ U_n^h \triangleq v_n^h d_{n,k}^h - \frac{u_n^h}{2} (d_{n,k}^h)^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: U_n^e 、 U_n^h 分别为 EU_n 消费电能、热能获得的效用; v_n^e 、 u_n^e 、 v_n^h 、 u_n^h 分别为 EU_n 对消费电能、热能的偏好系数, 可反映用户对能源的需求偏好, 并且会影响需求量的大小; $d_{n,k}^e$ 、 $d_{n,k}^h$ 分别为 EU_n 对 DES_k 的电能、热能需求。

1.2.2 约束条件

在供给侧, G_k^{GT} 、 G_k^{GB} 分别受燃气轮机、余热锅炉和燃气锅炉的容量约束, 表示为

$$\begin{cases} 0 \leq G_k^{GT} \leq G_{k,\max}^{GT} \\ 0 \leq G_k^{GB} \leq G_{k,\max}^{GB} \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

式中: $G_{k,\max}^{GT}$ 、 $G_{k,\max}^{GB}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉的最大容量。

天然气经 DES_k 后输出的能量应满足其服务的所有用户的需求, 但能量在传输过程中会有一定的损耗, 表示为

$$\begin{cases} (1 + \alpha^e) \sum_{n \in N} d_{n,k}^e = O_k^e \\ (1 + \alpha^h) \sum_{n \in N} d_{n,k}^h = O_k^h \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (8)$$

式中: α^e 、 α^h 分别为电能、热能在传输过程中的网络损耗率。

在需求侧, 每个用户都有必须要运行的设备, 所以每个用户的能源需求都不可小于其基线需求, 为了保证用电安全, 每个用户的能源需求也不可超出需求上限, 表示为

$$\begin{cases} b_n^e \leq \sum_{k \in K} d_{n,k}^e \leq p_n^e \\ b_n^h \leq \sum_{k \in K} d_{n,k}^h \leq p_n^h \end{cases} \quad \forall n \in N \quad (9)$$

式中: b_n^e 、 b_n^h 分别为 EU_n 的电能、热能基线需求; p_n^e 、 p_n^h 分别为 EU_n 的电能、热能需求上限。

2 用户侧IES中的需求响应

DES_k 和 EU_n 都是独立的个体, DES_k 的目标是

最大限度地降低成本, EU_n 的目标是最大限度地提高效用, 但是为了以更低的供给侧成本达到更高的需求侧效用, 个体的最优解可能无法使得整体最优。为了使局部最优与全局最优保持一致, 需要对交互策略进行优化设计。为此, 采用需求侧效用减去供给侧的成本作为目标函数, 需求侧受用户需求约束, 供给侧受供给能力约束和市场约束。多主多从的多能源需求响应优化问题为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{n \in N} U_n - \sum_{k \in K} C_k \\ & \text{s.t. 式(7)一式(9)} \end{aligned} \quad (10)$$

该优化问题是以上述目标函数式(10)和线性约束式(7)一式(9)构成的二次规划优化问题。本文将该多主多从的用户侧IES分解, 等效为多组单售多购的子系统, 然后再对子系统进行优化, 从而满足信息隐私需求。

2.1 分解为单售多购子系统

约束式(9)是一种空间耦合约束, 它将所有的 DES 连接在一起, 这样的约束使得目标的优化变得困难, 通过分解可以将式(10)分解为一系列的子问题, 定义拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} \ell = & \sum_{n \in N} U_n - \sum_{k \in K} C_k + \\ & \sum_{n \in N} \left[\bar{\mu}_n \left(\sum_{k \in K} d_{n,k}^e - p_n^e \right) + \underline{\mu}_n \left(b_n^e - \sum_{k \in K} d_{n,k}^e \right) \right] + \\ & \sum_{n \in N} \left[\bar{\gamma}_n \left(\sum_{k \in K} d_{n,k}^h - p_n^h \right) + \underline{\gamma}_n \left(b_n^h - \sum_{k \in K} d_{n,k}^h \right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$= \sum_{k \in K} \left[\sum_{n \in N} \bar{U}_n - C_k \right] + \sum_{n \in N} \left[\underline{\mu}_n b_n^e - \bar{\mu}_n p_n^e + \underline{\gamma}_n b_n^h - \bar{\gamma}_n p_n^h \right] \quad (12)$$

式中: $\underline{\mu}_n$ 、 $\bar{\mu}_n$ 、 $\underline{\gamma}_n$ 、 $\bar{\gamma}_n$ 为引入的非负拉格朗日乘子, 它们放宽了约束式(9)。式(11)的第一项具有可分性, 即需要解决的第 k 个子系统的问题定义为

$$\zeta_k(\mu, \gamma) \triangleq \max_{d_{n,k}, G_k} \sum_{n \in N} \bar{U}_n - C_k \quad (13)$$

$$\text{s.t. 式(7)一式(8)}$$

对偶问题是使拉格朗日乘子向量上的对偶函数的值最小化, 所以对偶问题表示为

$$\min_{\mu \geq 0, \gamma \geq 0} \varphi(\mu^e, \mu^h) \quad (14)$$

原始问题式(10)是在凹函数上的最大化, 对偶问题式(14)是在凸函数上的最小化。根据文献 [18] 中对“约束条件下的强对偶性的证明”, 式(10)满足约束条件, 所以强对偶性成立。强对偶性条件下, 最优对偶间隙为 0, 因此求解问题式(10)等价于求解其对偶问题式(14)。对于可微对偶函数, 可采用子梯度投影法迭代计算对偶问题的最优解, 拉格朗日乘子的更新方向与对偶函数的子梯度方向是相反的。拉格朗日乘子的更新函数为

$$\begin{cases} \underline{\mu}_n^{e,t+1} = \left[\underline{\mu}_n^{e,t} - v_e \left(\frac{\partial \varphi(\mu)}{\partial \underline{\mu}_n^{e,t}} \right) \right]^+ \\ \bar{\mu}_n^{e,t+1} = \left[\bar{\mu}_n^{e,t} - v_e \left(\frac{\partial \varphi(\mu)}{\partial \bar{\mu}_n^{e,t}} \right) \right]^+ \\ \underline{\mu}_n^{h,t+1} = \left[\underline{\mu}_n^{h,t} - v_h \left(\frac{\partial \varphi(\mu)}{\partial \underline{\mu}_n^{h,t}} \right) \right]^+ \\ \bar{\mu}_n^{h,t+1} = \left[\bar{\mu}_n^{h,t} - v_h \left(\frac{\partial \varphi(\mu)}{\partial \bar{\mu}_n^{h,t}} \right) \right]^+ \end{cases} \quad (15)$$

式中: $[\cdot]^+$ 为 $\max\{0, \cdot\}$ 。

2.2 单售多购子系统模型的求解

式(13)是单售多购用户侧IES中的需求响应问题,与文献[18]中的问题相同,是可以集中求解的凸优化问题。同样,考虑信息隐私,使用分布式方法解决各个子系统的问题。虽然目标函数式(13)在需求侧和供给侧是可分离的,但其中的变量是由约束式(7)和式(8)耦合的。定义拉格朗日函数,考虑到第一项的可分离性得到对偶函数,表示为

$$\begin{aligned} \varphi_k(\lambda_k^e, \lambda_k^h) &= \sum_{n \in N} [\bar{U}_n - (1 + \alpha^e)\lambda_k^e d_{n,k}^e - (1 + \alpha^h)\lambda_k^h d_{n,k}^h] + \\ &\quad [\lambda_k^e o_k^e + \lambda_k^h o_k^h - C_k] \\ &= \sum_{n \in N} f_{n,k}(\lambda_k) + g_k(\lambda_k) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, EU_n 和 DES_k 需要解决的子问题分别为

$$f_{n,k}(\lambda_k) \triangleq \max \bar{U}_n - (1 + \alpha^e)\lambda_k^e d_{n,k}^e - (1 + \alpha^h)\lambda_k^h d_{n,k}^h \quad (17)$$

$$g_k(\lambda_k) \triangleq \max \lambda_k^e o_k^e + \lambda_k^h o_k^h - C_k \quad (18)$$

其对偶问题为

$$\min_{\lambda^e \geq 0, \lambda^h \geq 0} \varphi_k(\lambda_k^e, \lambda_k^h) \quad (19)$$

由于其在约束条件下具有强对偶性,所以可以解决对偶问题式(19)来代替解决初始问题式(13),拉格朗日乘子更新方向与对偶函数的梯度相反,表示为

$$\begin{cases} \lambda_k^{e,t+1} = \left[\lambda_k^{e,t} - v_e \frac{d\varphi_k(\lambda_k^e)}{d\lambda_k^{e,t}} \right]^+ \\ \lambda_k^{h,t+1} = \left[\lambda_k^{h,t} - v_h \frac{d\varphi_k(\lambda_k^h)}{d\lambda_k^{h,t}} \right]^+ \end{cases} \quad (20)$$

2.3 分布式求解方法

分布式求解方法流程如图3所示。 DES_k 先根据初始值计算其能源供应量,再根据 EU_n 的需求量计算得到能源单价,并反馈给 EU_n 。 EU_n 根据能源单价和协调参数计算出自己的能源需求量,再将其反馈给相应的 DES_k 。 EU_n 根据其可以从不同的 DES_k 处获得的能源以及它的能源需求来更新协调参数。

因此,一方面,每个子问题 $\zeta_k(\mu, \gamma)$ 在每个单售多购子系统中分配解决,得出所有 EU_n 对该 DES_k 的总需求以及该 DES_k 的总能源供给,这些子问题

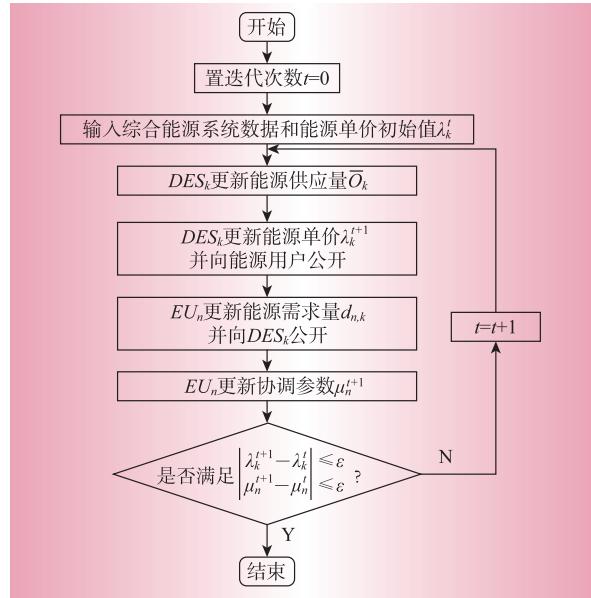


图3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

由式(13)定义,并以分布式方式由式(21)和式(22)解决;另一方面,每个对偶问题 $\varphi_k(\lambda_k^e, \lambda_k^h)$ 在 DES_k 处得到解决,每个对偶问题 $\varphi(\mu, \gamma)$ 在 EU_n 处得到解决。这些问题由式(17)和式(18)定义,拉格朗日乘子由式(23)和式(24)迭代求解。

3 算例分析

本节通过对由2个DES和2个EU组成的用户侧IES进行算例分析来验证所提分布式算法的有效性,相关参数如表1和表2所示。能源单价初始值较低时的收敛图如图4所示,能源单价初始值较高时的收敛图如图5所示。

表1 DES参数

Table 1 Parameters of DES

参数	值	参数	值
$G_{1,\max}^{\text{GT}}$ /kWh	4.00	$G_{2,\max}^{\text{GT}}$ /kWh	8.00
$G_{1,\max}^{\text{GB}}$ /kWh	4.00	$G_{2,\max}^{\text{GB}}$ /kWh	3.75
η_{GT}^e	0.35	η_{GT}^h	0.50
η_{HR}^e	0.10	η_{HR}^h	0.70
η_{ST}^e	0.42	η_{ST}^h	0.38
η_{GB}^h	0.50	η_{HE}^h	0.80
η_{T}^e	0.95	ε	10^{-6}
α^e	0.04	α^h	0.06
v_e	0.03	v_h	0.04
$a_{1,g}$	2.40	$a_{2,g}$	1.90
$b_{1,g}$	2.20	$b_{2,g}$	1.20
$c_{1,g}$	1.20	$c_{2,g}$	1.10
$a_{1,e}$	1.70	$a_{2,e}$	2.30
$b_{1,e}$	1.20	$b_{2,e}$	2.50
$c_{1,e}$	1.30	$c_{2,e}$	1.70

表2 能源用户参数
Table 2 Parameters of EU

参数	值	参数	值
b_1^e /kWh	1.5	b_1^h /kWh	1.3
b_2^e /kWh	2.5	b_2^h /kWh	1.4
p_1^e /kWh	9.5	p_1^h /kWh	10.3
p_2^e /kWh	9.7	p_2^h /kWh	10.4
v_1^e	6.3	v_1^h	7.3
v_2^e	6.6	v_2^h	7.1
u_1^e	1.0	u_1^h	1.2
u_2^e	2.0	u_2^h	2.3

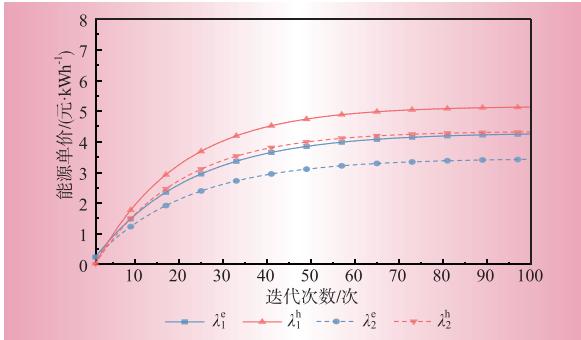


图4 低迭代初始值的收敛图
Fig. 4 Convergent graph for low iteration initials

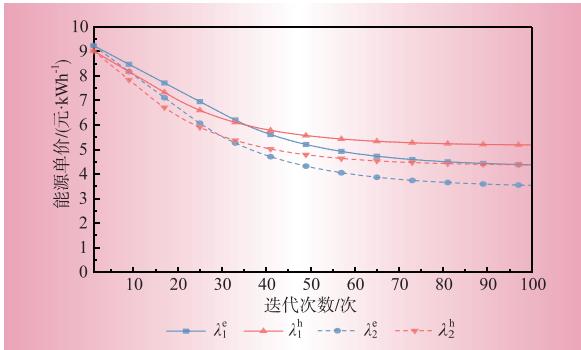


图5 高迭代初始值的收敛图
Fig. 5 Convergent graph for high iteration initials

由图4和图5可见,不论是初始值较低还是初始值较高的情况,单位电价和单位热价都在100次内达到了收敛状态,且达到相同收敛值。

3.1 DES的成本参数对均衡解的影响

当成本函数中的可变成本参数 $a_{k,e}$ 、 $b_{k,e}$ 和 $a_{k,g}$ 、 $b_{k,g}$ 改变,使得供给侧从输入天然气到输出能量的成本产生变化,系统最后的均衡解也会发生相应的改变。图6描述了当DES的可变成本参数 $a_{k,e}$ 、 $b_{k,e}$ 和 $a_{k,g}$ 、 $b_{k,g}$ 各增加0.5,其他参数均不变时,均衡解的变化。

由图6可以看出,DES向EU公开的能源单价以及EU向DES反馈的能源需求均随着可变成本参数的增加而增加。由于可变成本参数的增加引起分布式能源站的成本总量增加,单位能源的价格将随

着成本总量的增大而线性升高,同时也导致用户的能源需求降低。

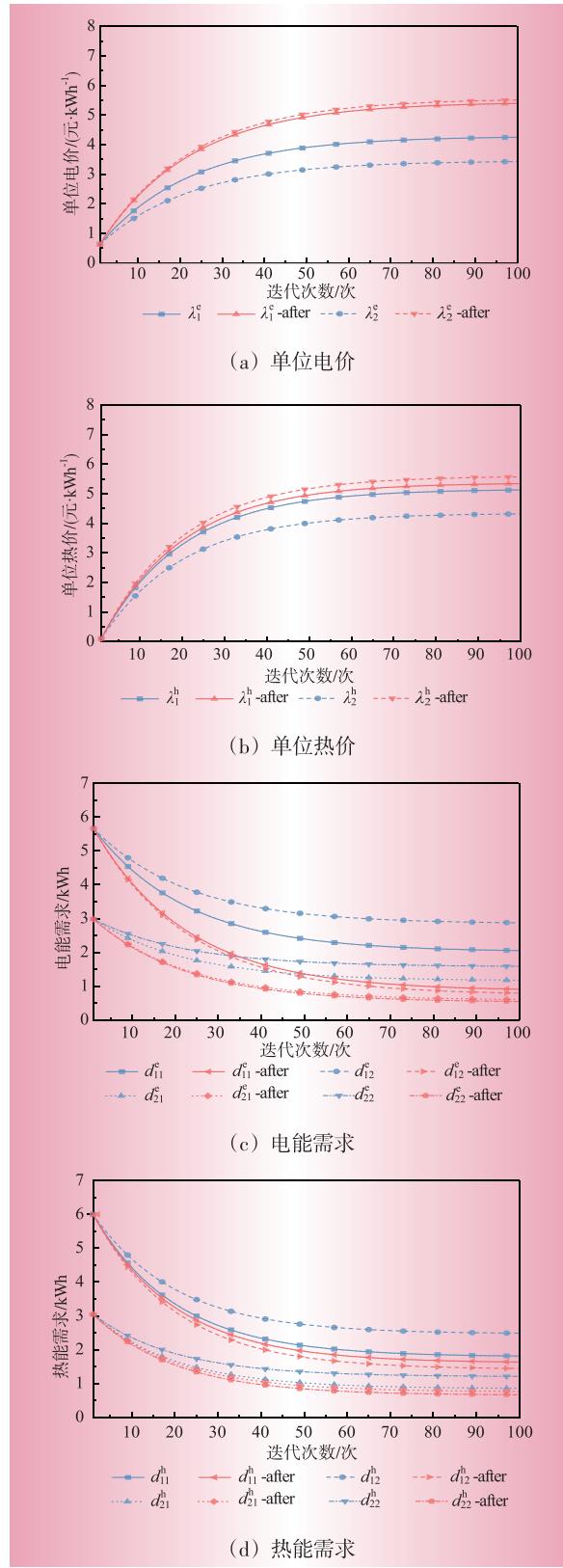


图6 成本参数变化前后的收敛图
Fig. 6 Graphs before and after cost parameters change

3.2 EU的偏好参数对均衡解的影响

图7描述了 v_n^h 各增加1时,均衡解的变化情况。

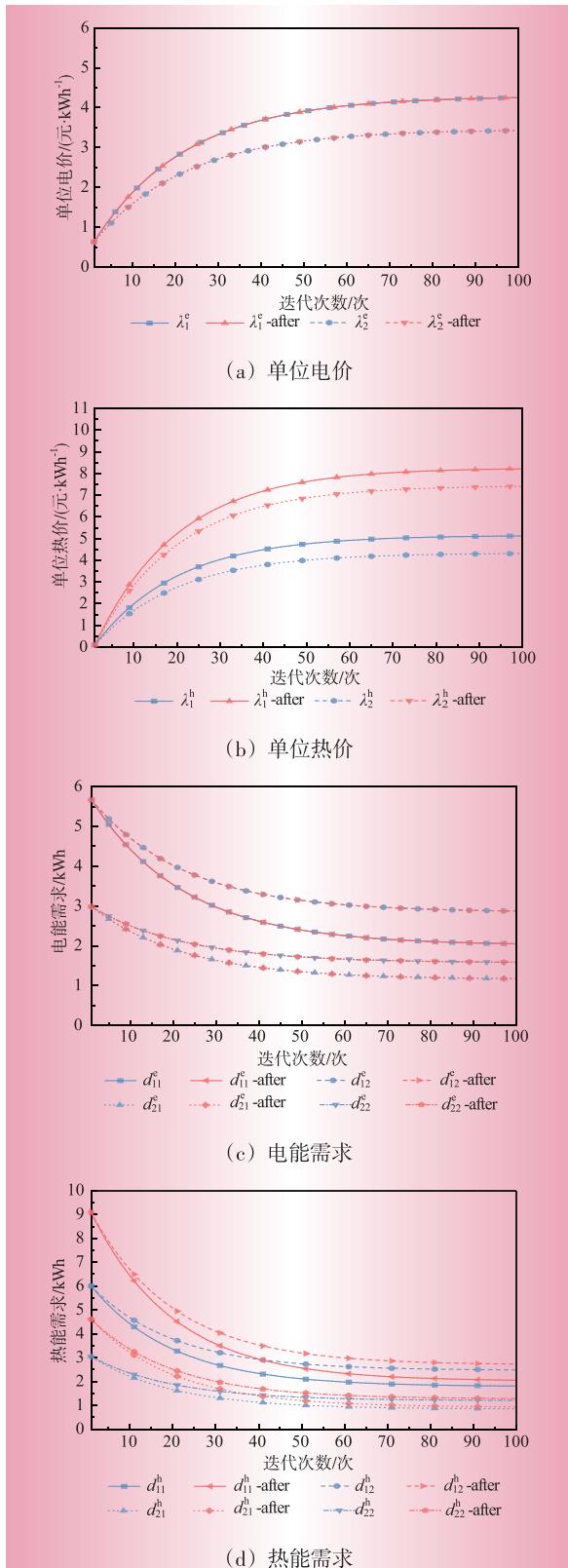


图7 偏好参数变化前后的收敛图

Fig. 7 Graphs before and after preference parameters change

如图7所示,随着热能偏好参数的增加,DES向EU公开的能源单价中,单位电价的收敛值无明显变化,单位热价的收敛值增加,电能需求的收敛值无明显变化,热能需求的收敛值随着偏好参数的增加而增加。

偏好参数反映出用户对能源的需求偏好,并影响需求量的大小。用户的效用随偏好参数变化而变化,均衡解也随之改变。 v_n^h 越高意味着用户对热能的消费满意度越高,则热需求量增加,由于DES的供给函数不变,所以单位热价也随之增高,但用户的电能需求和单位电价没有明显变化。

4 结束语

本文建立了由多个DES和多个EU组成的用户侧IES运行优化模型,提出了基于需求响应的用户侧IES分布式博弈均衡策略,并利用对偶分解法,构造分布式算法求解,最后通过算例分析验证了所提方法的有效性。仿真结果表明,本文所提出的分布式博弈均衡策略可以在保证交易双方信息隐私性的基础上获得全局最优解,该分布式求解算法具有快速的收敛性与有效性。用户侧IES正不断地开发利用更多种类的能源,本文考虑的能源类型还不够丰富,后续将针对该问题开展研究。D

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 徐海华,王旭东,朱星阳,等.用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究[J].电力需求侧管理,2020,22(2):13-20.
XU Haihua, WANG Xudong, ZHU Xingyang, et al. Research on the optimal configuration of energy storage in user side integrated energy system [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(2):13-20.
- [3] 周伏秋,蒋焱,邓良辰,等.能源变革新时代综合能源服务市场机遇[J].电力需求侧管理,2019,21(4):3-6.
ZHOU Fuqiu, JIANG Yan, DENG Liangchen, et al. Comprehensive energy service market opportunities in the context of energy transformation [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):3-6.
- [4] JING Z, JIANG X S, WU Q, et al. Modeling and optimal operation of a small-scale integrated energy based district heating and cooling system[J]. Energy, 2014, 73(3):399-415.
- [5] 于雪风,徐桂芝,刘其辉,等.含电转气及电转热的园区综合能源系统建模与优化运行[J].电力需求侧管理,2020,22(1):58-63.
YU Xuefeng, XU Guizhi, LIU Qihui, et al. Modeling and

- optimal scheduling of integrated energy system for parks including power to gas and power to heat [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1):58–63.
- [6] 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.
- [7] 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): 1 305–1 315.
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): 1 305–1 315.
- [8] 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.
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.
- [9] 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):3 569–3 576.
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):3 569–3 576.
- [10] 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.
- [11] 魏海蕊. 分布式能源供应链的规划与鲁棒运作研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
WEI Hairui. Research on the planning and robust operation of distributed energy supply chain [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [12] 周波. 分布式天然气发电定价机制及实证研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015.
ZHOU Bo. Distributed natural gas power generation pricing mechanism and empirical research [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [13] 国家发展改革委国家能源局. 关于印发“推进并网型微电网建设试行办法”的通知(发改能源[2017]1339号)[EB/OL]. (2020-03-03)[2020-11-17]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-3/202039103036.htm>.
- [14] 郭楷模,岳芳,陈伟,等. 多能互补系统国际发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(2): 144–159.
GUO Kaimo, YUE Fang, CHEN Wei, et al. International development trend analysis of multi-energy complementary system [J]. World Sci-Tech R&D, 2020, 42(2): 144–159.
- HICKS J R. Marktform und gleichgewicht [J]. The Economic Journal, 1936, 3(10):227.
- ALBADI M H, EL-SAADANY E F. A summary of demand response in electricity markets [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11):1 989–1 996.
- 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.
- 彭文昊,陆俊,冯勇军,等. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1 588–1 594.
PENG Wenhao, LU Jun, FENG Yongjun, et al. A demand response strategy optimization considering user participation uncertainty [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1 588–1 594.
- 任艺,周明,李庚银. 考虑用户需求响应的售电公司购售电决策双层模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14):30–36.
REN Yi, ZHOU Ming, LI Gengyin. Bi-level model of electricity procurement and sale strategies for electricity retailers considering users demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):30–36.
- SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBERT R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid [C]// IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2010, Gaithersburg, America:415–420.

作者简介:

张加贝(1982),男,湖南湘潭人,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统自动化、电力市场;

孙恒一(1989),男,云南玉溪人,硕士,高级工程师,研究方向为电力交易平台建设;

钱锋(1978),男,江苏南通人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统分析及EMS高级应用开发工作;

郑强(1993),男,江苏南京人,硕士,工程师,主要从事电力系统分析及EMS高级应用开发工作;

郑懿敏(1996),女,江苏扬州人,硕士,研究方向为电力系统优化运行与电力市场;

谢俊(1979),通信作者,男,安徽安庆人,博士,教授,研究方向为电力市场与电力系统安全经济运行。

(责任编辑 水 鸽)

(上接第10页)

- [13] 国家发展改革委国家能源局. 关于印发“推进并网型微电网建设试行办法”的通知(发改能源[2017]1339号)[EB/OL]. (2020-03-03)[2020-11-17]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-3/202039103036.htm>.
- [14] 郭楷模,岳芳,陈伟,等. 多能互补系统国际发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(2): 144–159.
GUO Kaimo, YUE Fang, CHEN Wei, et al. International development trend analysis of multi-energy complementary system [J]. World Sci-Tech R&D, 2020, 42(2): 144–159.

作者简介:

杜佩仁(1965),男,浙江嘉兴人,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统应用软件系统的设计开发及其规划设计方案研究;

文福拴(1965),男,河南安阳人,教授,博士生导师,研究方向为电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等;

刘艳茹(1985),女,山东潍坊人,硕士,高级工程师,研究方向为配电网规划;

张林垚(1980),男,福建福州人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统规划设计研究。

(责任编辑 水 鸽)