

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210387

## 基于区域互联的能源零售市场双边竞价出清策略

黄德裕<sup>1</sup>, 王丹<sup>1,2</sup>, 贾宏杰<sup>1,2</sup>, 胡庆娥<sup>1,3</sup>, 陈竟成<sup>4</sup>, 李敬如<sup>5</sup>

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津市智慧能源与信息技术重点实验室(天津大学), 天津 300072; 3. 国网天津市电力公司滨海供电分公司, 天津 300450; 4. 国网天津供电公司, 天津 300010; 5. 国网经济技术研究院, 北京 102209)

**摘要:** 随着综合能源系统与多能源市场的发展, 通过市场交易实现能源优化分配已成为研究热点。当前区域间能源互联成为趋势, 多区域的能源传输与交易得以实现。以分布式能源站及多能用户为市场参与主体进行研究, 首先研究互联分布式能源站的运行原理与连接方式, 并建立机理模型, 引入用户竞价策略, 构建互联区域能源零售市场框架。其次, 对比独立或互联区域内双边竞价市场交易机制差异, 提出以各区域总社会剩余最大化为目标的互联区域能源零售市场出清策略。最后, 以某区域综合能源系统为例对冬季典型日的市场出清与区域间能源传输结果进行量化分析, 验证了所提方法可在各个市场出清时刻实现多区域资源优化分配, 提升区域总社会剩余。

**关键词:** 综合能源系统; 能源零售市场; 双边竞价; 互联分布式能源站; 综合需求响应

### Energy retail market double auction clearing strategy for interconnected regions

HUANG Deyu<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1,2</sup>, JIA Hongjie<sup>1,2</sup>, HU Qing'e<sup>1,3</sup>, CHEN Jingcheng<sup>4</sup>, LI Jingru<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin Municipality, Tianjin 300072, China; 3. Binhai Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300450, China; 4. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 5. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** With the development of integrated energy systems and energy markets, the realization of optimal energy allocation through market transactions has become a current research hotspot. Inter-regional energy interconnection has become a trend, and multi-regional energy transmission and trading can be realized. Taking distributed energy stations and multi-energy users as the main market participants, the operating principles and connection methods of interconnected distributed energy stations is studied first. And its mechanism model is established, and user bidding strategies are introduced to construct the framework of an energy retail market. Then, the differences in the trading mechanism of a double auction market in independent or interconnected regions are compared, and an energy retail market clearing strategy with the goal of maximizing the social surplus of regions is proposed. Finally, an integrated energy system is taken as an example to quantitatively analyze the results of market clearing and energy transmission on typical winter days, verifying that the proposed method can realize the optimal allocation of multi-regional resources and increase the total social surplus at each market clearing time.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977141).

**Key words:** integrated energy system; energy retail market; double auction; interconnected distributed energy stations; integrated demand response

## 0 引言

随着经济和科技的飞速发展, 基于化石能源的

能源消费体系使发展中国家的能源短缺和环境问题日益突出<sup>[1-3]</sup>, 因此, 综合能源系统(Integrated Energy System, IES)的概念被提出, 实现多种能源子系统间的协调规划、优化运行与协同管理<sup>[4-11]</sup>。IES中丰富的可调度资源对于需求响应提出了更高的要求, 综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)应运而生, 成为促进能量耦合设备和可再生能源匹配的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51977141); 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0905000); 国家电网公司总部科技项目资助(SGTJDK00DWJS1800232)

有效方法<sup>[12]</sup>。随着研究的推进,多能源市场的调节作用日益凸显,市场规则的设计和制定将直接影响 IDR 效果<sup>[13-14]</sup>。

同时,随着电力体制改革的推进和相关支撑技术的发展,以电能为主的综合能源交易迅速发展,成为学界与能源企业关注的焦点<sup>[15-17]</sup>。文献[18]对比了传统的统一出清机制,提出了一种新型的双边等效 PAB(Pay As Bid)出清算法,使出清结果更加贴合供需曲线交点;文献[19]考虑到联合能源储备及发电商的机会成本,提出将控制储备采购纳入日前电力市场,并设计相应出清算法,可归类为混合整数二次规划问题进行求解;文献[20]研究了包含多个主体的市场博弈机制,分析在双边合同市场中售、购电量对多主体收益的影响,并利用强化学习法对其进行优化;文献[21]基于火电机组深度调峰潜力建立了电力日前市场出清模型,利用市场调节实现可再生能源消纳率的提升。然而,以上对于能源市场的研究大多局限于电力市场,随着 IES 的普及与应用,单一能源服务方式已无法满足用户的多能源需求。

同时,分布式能源站(Distributed Energy Station, DES)作为多能源市场的重要参与者,研究其优化运行对于市场交易的顺利进行具有重要意义。文献[22]基于能源集线器概念,建立了最优扩展规划模型,解决了在负荷和能量站约束条件下的多能量系统规划问题;文献[23]提出了天然气 DES 的综合价值,并建立模型,从能源站本身、电力系统及用户等角度,分析利用其进行发电的价值;文献[24]结合了电热能源系统与储能设备,提出在一个调度周期内对于总输出的优化策略并建立模型,利用遗传算法求解此优化模型;文献[25]关注于家庭能源的管理,以降低成本为优化目标,采用两点估计方法模拟能量输出功率的不确定性,建立新的家庭能源管理框架;文献[26]以最小化运营成本和最大化用户满意度为优化目标,采用重组粒子群优化算法研究能源站中能量管理的最优策略。

然而,以上研究中 DES 仅为单一区域供电,各区域间缺少能源互动和信息交流,能源市场也相对封闭,导致区域间利益损失和分配不均衡,阻碍了 DES 运行可靠性和经济性的提高<sup>[27]</sup>。当区域能源互联成为趋势,区域间能源互补得以实现,能源系统的物理结构发生改变,相应的能源市场交易机制与出清策略却鲜有研究。如何在更高的层面上实现跨区域的资源优化及各区域市场参与者共同利益的最大化,更大程度地发挥能源互补带来的优势,成为互联区域能源市场面临的挑战。

因此,本文首先研究了互联分布式能源站的运

行机理与建模方法,并构建了区域电热联合能源市场架构;之后分析了不同场景下的双边竞价市场交易机制,并提出了互联区域能源市场出清策略,建立了最大化社会剩余的理论基础;最后,通过算例对所提方法进行量化分析与验证。

## 1 电热联合能源市场模型

### 1.1 分布式能源站模型

综合能源系统中,分布式能源站(DES)是用户侧的能源供应中心,可通过能源互补与梯级利用,满足用户的多样化用能需求<sup>[28]</sup>。本文以 A 型与 B 型两种典型 DES 为例进行分析,其主要设备包括:风机(Wind Turbine, WT)、电力电子转换器(Power Electronic Converter, PEC)、热泵(Heat Pump, HP)、热电联产(Combined Heat and Power, CHP)设备、燃气锅炉(Gas Furnace, GF)及热交换器(Heat Exchanger, HE)。A 型 DES 满足式(1)所示的能量平衡方程。

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^{\text{PEC}} & \lambda_1 \eta_{\text{ge}}^{\text{CHP}} & 0 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \eta_{\text{gh}}^{\text{CHP}} + (1 - \lambda_1) \eta^{\text{GF}} & \eta^{\text{HE}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \\ P_h \\ P_{\text{WT}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $L_e$  和  $L_h$  分别为电力和热力负荷功率;  $\eta_{\text{ge}}^{\text{CHP}}$  和  $\eta_{\text{gh}}^{\text{CHP}}$  分别为 CHP 生产电能和热能的效率;  $\eta^{\text{GF}}$  为 GF 生产热能的效率;  $\eta^{\text{PEC}}$  和  $\eta^{\text{HE}}$  分别为 PEC 和 HE 的能量转换效率;  $P_e$ 、 $P_g$ 、 $P_h$  和  $P_{\text{WT}}$  分别为上级电力、天然气、热力网络及风机的输入功率;  $\lambda_1$  为分配系数,表示流经 CHP 的天然气占输入总量的比例。

类似地, B 型 DES 所满足的能量平衡方程为<sup>[29]</sup>

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_2 \eta^{\text{PEC}} & \eta_{\text{ge}}^{\text{CHP}} & 0 & 1 \\ (1 - \lambda_2) \eta^{\text{HP}} & \eta_{\text{gh}}^{\text{CHP}} & \eta^{\text{HE}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \\ P_h \\ P_{\text{WT}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\eta^{\text{HP}}$  为 HP 生产热能的效率;  $\lambda_2$  为分配系数,表示流经 PEC 的电能占输入总量的比例。

两种典型 DES 的能源转换过程丰富了用户能源利用的多样性,提高了系统的可控性。但是单一 DES 仍存在运行成本高、服务范围小等问题。在区域能源互联之后,区域间能量流通得以实现,DES 在资源分配、调度方面的优化作用也能够更好地发挥,进而更加灵活地应对用户负荷的实时改变。同时,多区域内不同 DES 由同一个综合能源服务商进行管理,彼此不存在相互竞争与交易,可避免多主体间协调管理困难的问题,扩大服务范围,提升各区域系统整体经济性。互联 DES 运行示意图如图 1 所示。

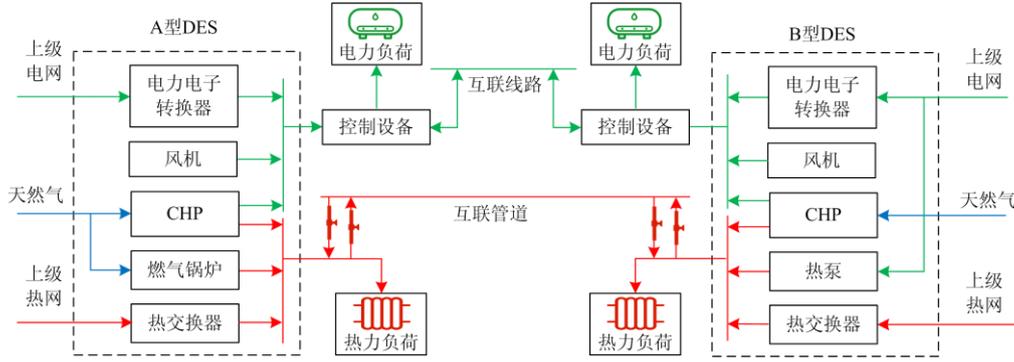


图 1 互联分布式能源站运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the operation of interconnected DESs

在互联 DES 的运行过程中, 通过在每个 DES 的输出端设置控制装置和阀门来控制能源的传输, 根据能否满足该区域用户的能源需求及实现各区域利益提升来决定各区域能源的优化分配。互联 A 型与 B 型 DES 的能量平衡方程可分别修改为

$$\begin{bmatrix} L_c \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^{PEC} & \lambda_1 \eta_{ge}^{CHP} & 0 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \eta_{gh}^{CHP} + (1 - \lambda_1) \eta^{GF} & \eta^{HE} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_c \\ P_g \\ P_h \\ P_{WT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{ec} \\ P_{hc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L_c \\ L_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_2 \eta^{PEC} & \eta_{ge}^{CHP} & 0 & 1 \\ (1 - \lambda_2) \eta^{HP} & \eta_{gh}^{CHP} & \eta^{HE} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_c \\ P_g \\ P_h \\ P_{WT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{ec} \\ P_{hc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $P_{ec}$  和  $P_{hc}$  分别为 DES 间传输的电、热功率。

## 1.2 用户竞价策略

本文所研究用户能源需求主要包括电能与热能。温控负荷可短中断运行而不影响用户舒适度, 因而可视为可控电负荷, 本文以电热水器为例进行分析<sup>[30]</sup>。热能方面, 由于建筑和供暖设备储热能力的提升<sup>[31]</sup>, 室内温度可维持在一定范围内, 因而可将空间供暖负荷视为可控热负荷进行分析。

在双边竞价市场中, 用户需要根据每个出清时刻自身的能源需求等情况在市场中提交竞价。考虑到实际用户无法时刻参与竞价, 因此在市场中引入负荷代理, 由电、热负荷代理收集相应区域内的市场与用户信息计算竞价价格, 并聚合形成各自的需求曲线, 提交至电热联合能源市场。

### 1.2.1 电力用户竞价策略

能源市场中的电负荷代理, 通过市场预测电价的平均值和标准差及区域内负荷状态(由当前水温和所需水温之间的差值定义)计算电力用户竞价价

格, 其与实际水温  $T_{\text{tank}}$  呈线性负相关关系, 在确定水温设定值与温度上下限后, 当前水温越高则用户竞价越低, 当水温超过上限时, 则用户不参与竞价, 当前水温越低则用户竞价越高, 水温超过下限时, 用户竞价达到最高, 具体如式(5)所示<sup>[32]</sup>。

$$p_{\text{bid}} = p_a - \frac{c p_{\text{sd}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{set}}} (T_{\text{tank}} - T_{\text{set}}) \quad (5)$$

式中:  $p_{\text{bid}}$  为电力用户竞价价格;  $p_a$  和  $p_{\text{sd}}$  分别为未来两小时预测电价的平均值与标准差;  $c$  为用户预定义舒适度;  $T_{\text{set}}$  为温度设定值;  $T_{\text{max}}$  为最高水温。

### 1.2.2 热力用户竞价策略

对于热力用户, 其房屋内部温度受室外温度、建筑材料、太阳辐射等方面的影响<sup>[33]</sup>, 主要可通过 DES 对楼宇输入热量进行连续调节来改变。能源市场中的热负荷代理需要首先收集用户信息, 在给定用户可接受室内温度范围的基础上, 计算各建筑物最大和最小的热输入功率  $Q_{\text{max}}$  与  $Q_{\text{min}}$ , 从而确定可调节的热量。具体计算方法如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{aligned} Q_{\text{max}}^i &= Q_{\text{wall\_max}}^i + Q_{\text{win\_max}}^i + Q_{\text{floor\_max}}^i - Q_{\text{solar}}^i \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} Q_{\text{wall\_max}}^i &= \beta_{\text{wall}}^i \cdot S_{\text{wall}}^i \cdot (T_{\text{max}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{wall}}^i \cdot (1 + \delta_{\text{wall}}^i) \\ Q_{\text{win\_max}}^i &= \beta_{\text{win}}^i \cdot S_{\text{win}}^i \cdot (T_{\text{max}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{win}}^i \cdot (1 + \delta_{\text{win}}^i) \\ Q_{\text{floor\_max}}^i &= \beta_{\text{floor}}^i \cdot S_{\text{floor}}^i \cdot (T_{\text{max}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{floor}}^i \\ Q_{\text{solar}}^i &= \sum \alpha_{\text{win}} \times S_A \times S_{\text{win}} \times S_Q \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{min}}^i &= Q_{\text{wall\_min}}^i + Q_{\text{win\_min}}^i + Q_{\text{floor\_min}}^i - Q_{\text{solar}}^i \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} Q_{\text{wall\_min}}^i &= \beta_{\text{wall}}^i \cdot S_{\text{wall}}^i \cdot (T_{\text{min}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{wall}}^i \cdot (1 + \delta_{\text{wall}}^i) \\ Q_{\text{win\_min}}^i &= \beta_{\text{win}}^i \cdot S_{\text{win}}^i \cdot (T_{\text{min}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{win}}^i \cdot (1 + \delta_{\text{win}}^i) \\ Q_{\text{floor\_min}}^i &= \beta_{\text{floor}}^i \cdot S_{\text{floor}}^i \cdot (T_{\text{min}}^i - T_{\text{am}}^i) \cdot \gamma_{\text{floor}}^i \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中：上标  $i$  表示第  $i$  栋建筑；下标 wall、win、floor 分别表示墙体、窗户及地板； $Q_{\text{wall\_max}}^i$ 、 $Q_{\text{win\_max}}^i$ 、 $Q_{\text{floor\_max}}^i$  和  $Q_{\text{wall\_min}}^i$ 、 $Q_{\text{win\_min}}^i$ 、 $Q_{\text{floor\_min}}^i$  分别为建筑结构热量消耗的上下限； $\beta$  为热传输系数； $S$  为结构面积； $T_{\text{max}}^i$ 、 $T_{\text{min}}^i$ 、 $T_{\text{am}}^i$  分别为用户可接受室内温度上下限及环境温度； $\gamma$  和  $\delta$  分别为建筑的温差修正系数与方向修正系数<sup>[34]</sup>； $Q_{\text{solar}}^i$  为太阳辐射热量； $\alpha_{\text{win}}$  为玻璃透射系数； $S_A$  为窗户遮阳系数； $S_{\text{win}}$  为建筑墙面窗户总面积； $S_Q$  为总太阳辐射量。

与电力用户竞价价格类似，热力用户竞价价格也与市场预测热价等因素有关，并且与热功率输入  $Q_{\text{DES}}$  呈线性负相关关系<sup>[35]</sup>，具体可表示为

$$p_{\text{h\_high}} = p_{\text{h\_a}} + \frac{c_{\text{h}} p_{\text{h\_sd}}}{Q_{\text{min}}^i - Q_{\text{exp}}^i} (Q_{\text{DES}} - Q_{\text{exp}}^i) \quad (8)$$

$$p_{\text{h\_low}} = p_{\text{h\_a}} - \frac{c_{\text{h}} p_{\text{h\_sd}}}{Q_{\text{max}}^i - Q_{\text{exp}}^i} (Q_{\text{DES}} - Q_{\text{exp}}^i) \quad (9)$$

式中： $p_{\text{h\_high}}$  和  $p_{\text{h\_low}}$  分别为热力竞价价格的上下限； $p_{\text{h\_a}}$  和  $p_{\text{h\_sd}}$  分别为未来两小时预测热价的平均值与标准差； $c_{\text{h}}$  为用户预定义热舒适度； $Q_{\text{exp}}^i$  为第  $i$  栋楼宇用户期望输入热量。

### 1.3 互联区域电热联合零售能源市场框架

本节构建了综合能源系统中互联区域的电热联合零售能源市场框架，市场主要参与者为互联 DES 与多能用户。

DES 与用户分别为能源的生产者与消费者，通过市场交易实现资源的优化分配。互联区域间存在能源传输，因此区域内用户负荷需求与各 DES 供能可能是不平衡的。在需求侧，电、热负荷代理负责收集负荷信息并形成需求曲线参与市场竞价，而供给侧则由综合能源服务商负责接收上级能源网络的能源价格信息及 DES 的设备信息，对设备供能边际成本进行排序并提交至市场竞价。各区域能源市场根据供需竞价信息，以各区域总社会剩余最大为目标进行出清，决定此时的出清能量与价格以及区域间传输的能量。在市场出清后，由综合能源服务商根据出清结果发出控制信号，调节 DES 供能与用户用能行为。出清间隔时间为  $\Delta t$ ，市场上的能源数量均以 kWh 为单位。

## 2 互联区域双边竞价市场出清策略

### 2.1 互联区域的社会剩余计算

#### 2.1.1 市场出清过程

建立互联区域能源市场架构，其目的是通过各

区域市场参与者进行双边竞价，实现更大范围内的供需资源优化配置。但同时，各区域负荷差异性、DES 配置条件等都给能源市场的竞价与出清带来了挑战，也需要在交易过程中考虑区域内的供需不平衡问题<sup>[36]</sup>。

双边竞价市场出清结果影响着供需双方的能源交易价格与交易量，通常由供需曲线决定。对于需求曲线，认为其由一段代表不可控负荷的水平线段与代表可控负荷的递减曲线组成；而供应曲线则认为其是由 DES 内各设备的供能边际成本与出力情况所决定的阶梯型线段。

各能源的耦合关系影响着电热市场的联合出清，DES 作为统一的多能源供应者，可通过调节站内设备运行状态、调节能源输入分配系数等方式灵活调整供应能源，进而避免不同能源主体存在的市场联合出清时能源管理困难等问题。

#### 2.1.2 社会剩余计算

在经济学中，通常用市场交易后的社会剩余作为社会经济福利的衡量指标，表示市场参与者在交易过程中获得的收益<sup>[37]</sup>。社会剩余在几何上表示为供需曲线所围部分，如图 2 所示，蓝色区域表示消费者剩余，红色区域表示生产者剩余，而绿色区域则表示能源成本，通常为电能、热能与天然气的购买成本。

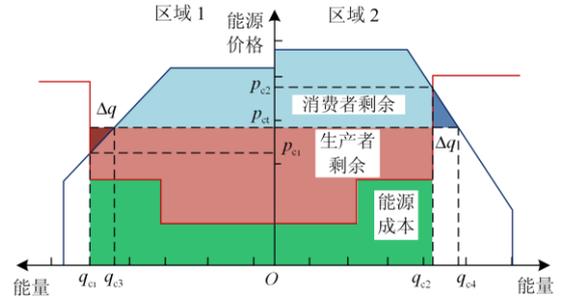


图 2 用户侧双边竞价能源市场出清过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the clearing process of user side double auction energy market

图 2 展示了两区域在独立与互联两种情况下双边竞价能源市场的出清过程。当 DES 仅为独立区域供能时，市场在供需曲线的交点处出清，供应能量与价格均与需求侧相等。区域 1 的市场能源交易价格与交易量分别为  $p_{c1}$  和  $q_{c1}$ ，区域 2 的市场能源交易价格与交易量分别为  $p_{c2}$  和  $q_{c2}$ ， $p_{c1}$  低于  $p_{c2}$ 。

在能源互联区域内，市场出清过程发生了较大改变，独立市场的均衡被打破，新的均衡在多区域内的互联市场形成。与一般商品不同，能源传输的实现使得区域内的供需平衡发生改变，从而为社会

剩余的增加提供可能。区域 1 中的 DES 多余能源  $\Delta q$  供应给区域 2 中的额外负荷, 导致两区域能源市场出清点均沿需求曲线发生移动, 直到两个区域的出清价格相等。此时, 区域 1 的出清价格升高为  $p_{ct}$ , 用户能源需求降低为  $q_{c3}$ , 而区域 2 的出清价格降低为  $p_{ct}$ , 用户能源需求升高为  $q_{c4}$ 。由于各区域 DES 的供应能源仍为  $q_{c1}$  和  $q_{c2}$ , 与需求能源产生了  $\Delta q$  的差额, 图形中出现供需曲线间的三角形部分, 其表示互联所增加的社会剩余。对于区域 1, DES 向其他区域传输能量, 市场出清点上升, 这意味着该 DES 可以以更高的价格出售能源, 此时, 增加的社会剩余为生产者剩余; 对于区域 2, DES 接受从其他区域传输来的能源, 市场出清点下降, 这意味着该区域的用户可以较低的价格购买能源, 此时, 社会剩余的增加为消费者剩余。

以上分析表明, 与独立区域相比, 互联区域的能源市场交易可通过能源互补实现价值创造, 社会剩余在市场出清过程中得到了进一步的提升。当然, 从图 2 可以看出, 增加的社会剩余相对于总社会剩余并不大, 但由于在每个出清时刻均可获益, 因此随时间累积之后也可得到较为可观的收益。

## 2.2 互联区域能源市场出清策略

### 2.2.1 目标函数计算

本文以各区域总社会剩余最大化为目标, 对互联区域内的供需资源进行优化分配。目标函数示意图见图 3, 在几何上, 不仅使供需曲线之间的面积最大, 也要使能源传输带来的三角形面积最大, 具体目标函数如式(10)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \sum_{i=1}^n (S_{ele}^j + S_{heat}^j) \\ S_{ele}^j = p_{clear\_ele1}^j L_{e0}^j - \sum_{k \in (EN, CHP, WT)} D_k^j p_k^j P_k^j + \\ \quad (L_{e1}^j + L_{e\_min}^j) \times (p_{ele\_max}^j - p_{clear\_ele1}^j) / 2 \\ S_{heat}^j = p_{clear\_heat1}^j L_{h0}^j - \sum_{l \in (CHP, HP, GF, HN)} D_l^j p_l^j P_l^j + \\ \quad (L_{h1}^j + L_{h\_min}^j) \times (p_{heat\_max}^j - p_{clear\_heat1}^j) / 2 \end{array} \right. \quad (10)$$

式中:  $i$  表示第  $i$  个互联区域,  $n$  为互联区域数量;  $S_{ele}^j$  和  $S_{heat}^j$  分别为电力和热力社会剩余;  $L_{e0}^j$  和  $L_{h0}^j$  分别为 DES 供应电能、热能功率;  $L_{e1}^j$  和  $L_{h1}^j$  分别为市场出清电、热负荷需求功率;  $p_{clear\_ele1}^j$  和  $p_{clear\_heat1}^j$  分别为市场出清电、热能源价格;  $p_k^j$  和  $p_l^j$  为 DES 中第  $k$  种和第  $l$  种设备产能的边际成本;  $P_k^j$  和  $P_l^j$  分别

为 DES 中第  $k$  种和第  $l$  种设备出力;  $D_k^j$  和  $D_l^j$  分别为描述 DES 中第  $k$  种和第  $l$  种设备选取情况的二元变量, 数值为 1 表示选择该设备产能, 数值为 0 则表示不使用该设备;  $L_{e\_min}^j$  和  $L_{h\_min}^j$  分别为电、热负荷功率下限;  $p_{ele\_max}^j$  和  $p_{heat\_max}^j$  分别为电力、热力竞价价格上限。

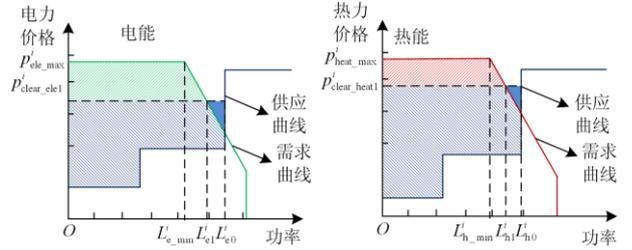


图 3 目标函数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of objective function

### 2.2.2 约束条件

本研究约束条件包括等式约束与不等式约束。等式约束如式(3)、式(4)所示, 不等式约束包括能量输入及设备出力等, 如下所述。

#### 1) 上级网络输入约束

$$P_{e\_min} \leq P_e \leq P_{e\_max} \quad (11)$$

$$P_{h\_min} \leq P_h \leq P_{h\_max} \quad (12)$$

$$P_{g\_min} \leq P_g \leq P_{g\_max} \quad (13)$$

式中:  $P_{e\_min}$ 、 $P_{h\_min}$  和  $P_{g\_min}$  分别为上级网络电能、热能和天然气的输入功率下限;  $P_{e\_max}$ 、 $P_{h\_max}$  和  $P_{g\_max}$  分别为上级网络电能、热能和天然气的输入功率上限。

#### 2) DES 设备输出约束

$$P_{HP\_min} \leq P_{HP} \leq P_{HP\_max} \quad (14)$$

$$P_{CHP\_min} \leq P_{CHP} \leq P_{CHP\_max} \quad (15)$$

$$P_{GF\_min} \leq P_{GF} \leq P_{GF\_max} \quad (16)$$

式中:  $P_{HP}$ 、 $P_{CHP}$  和  $P_{GF}$  分别为热泵、热电联产设备和锅炉输出功率;  $P_{HP\_min}$ 、 $P_{CHP\_min}$ 、 $P_{GF\_min}$ 、 $P_{HP\_max}$ 、 $P_{CHP\_max}$  及  $P_{GF\_max}$  分别为热泵、热电联产设备和锅炉输出功率下限及上限。

#### 3) 电负荷和热负荷上、下限约束

$$L_{e\_min} \leq L_e \leq L_{e\_max} \quad (17)$$

$$L_{h\_min} \leq L_h \leq L_{h\_max} \quad (18)$$

式中:  $L_{e\_max}$  和  $L_{e\_min}$  分别为电负荷功率上、下限;  $L_{h\_max}$  和  $L_{h\_min}$  分别为热负荷功率上、下限。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例场景设置

以图 4 所示的区域电-热综合能源系统为例,对所提互联区域能源市场双边竞价出清策略进行验证,算法流程如图 5 所示。算例中考虑两个居民区与一个商业区的用能情况,其中居民区 1、2 的能源由 A 型 DES 供应,商业区 3 的能源由 B 型 DES 供应,三个区域的 DES 间通过电力线路与热力管道互联,互动负荷包括电热水器和空间供暖负荷,假设负荷可完全响应市场出清结果。各区域的 DES 设备与用户侧参数见附表 1、附表 2,为方便计算,选择的用户数量较少。DES 中各设备供能边际成本根据文献[23]计算,室外温度与风电出力见附图 1,居民区和商业区在上级电、热网络购买能源的价格变化见附图 2,天然气价格恒为 0.35 元/kWh。居民区用能具有政策优惠,因此能源价格较低。市场出清间隔设置为 15 min。

#### 3.2 互联区域电热联合市场出清结果分析

附图 3—附图 5 展示了电热联合双边竞价市场的出清结果以及 DES 中设备出力情况。区域间 DES 的互联使得能源需求量与设备总供能之间存在一定的差距。需求侧的电负荷主要为电热水器,由于其具有更好的可控性,价格对负荷使用影响更加显著,需求曲线较为陡峭。因此,当 DES 之间存在能量传输时,市场出清电价存在更明显的波动。而需求侧的热负荷主要为空间供暖负荷,由于冬天的低温,必须将建筑物中的温度保持在一定水平,因此,价格对热负荷的使用影响相对较小,导致需求曲线趋于平稳且市场出清热价相对稳定。

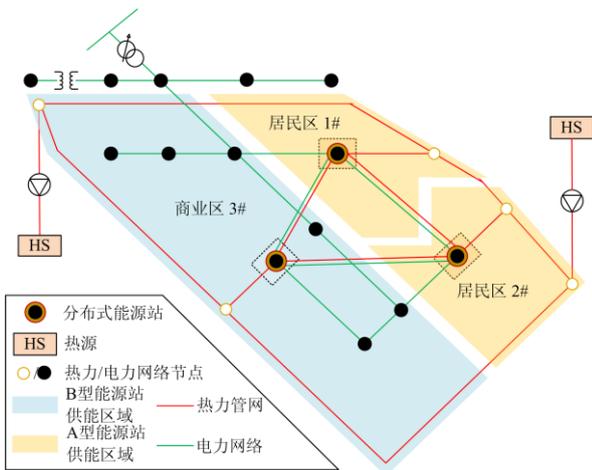


图 4 区域电-热综合能源系统图

Fig. 4 District electricity-heat integrated energy system

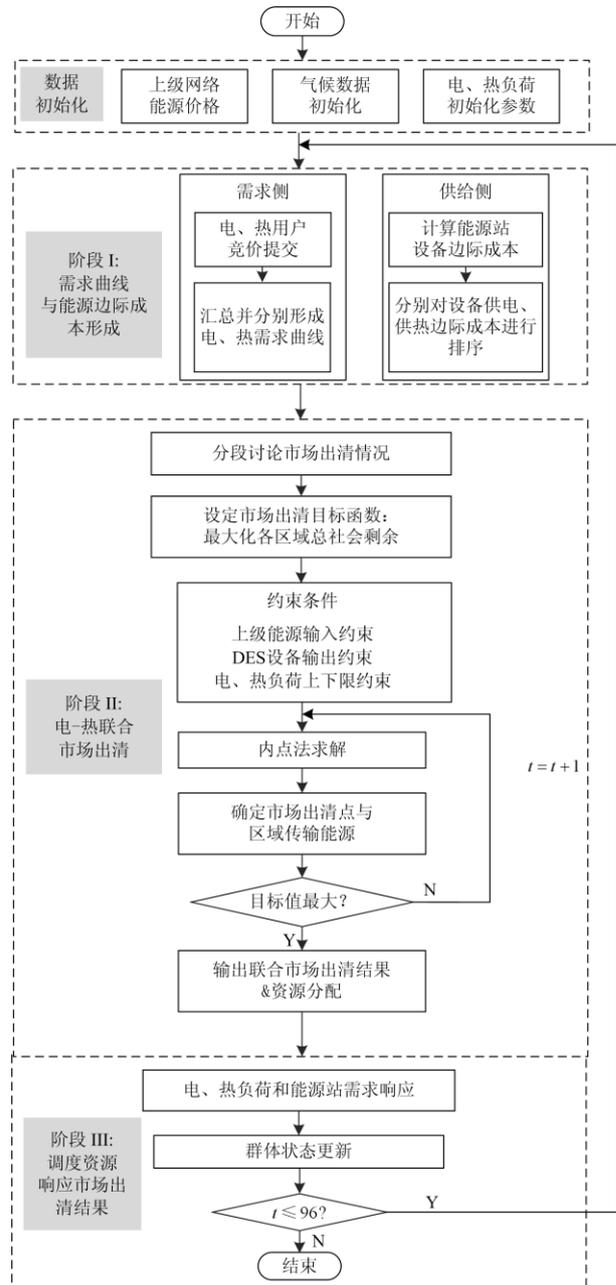


图 5 互联区域双边竞价能源市场出清算法流程图

Fig. 5 Flowchart of double auction energy market clearing method in interconnected regions

三个区域内的出清能源价格并不完全相同,这是由于互联区域数量增加时各区域供需曲线间存在较大差异,并且需求曲线有最高与最低竞价价格限制,当市场出清点位于需求曲线首端或末端时,可传输能源较小,同时优化算法也存在细微误差,很难使各区域市场出清价格保持完全一致。

附图 3—附图 5 中 DES 各设备出力之和与用户能源需求量的差距表现了区域间的能源传输,当各

设备出力之和大于用户能源需求量时, 代表该 DES 向其他区域传输能源, 反之代表该 DES 接受其他区域的能源。由附图 3—附图 5 中可见: 在能源出清价格较低的地区(通常为居民区), DES 倾向于传输能源, 从而能够以更高的价格出售; 能源出清价格较高的区域(通常为商业区)倾向于接受能源, 使用户能够以更低价格购买能源。同时, 由于区域 2 中具有更多的用户, 能源需求量也更多, 因此负荷可调潜力较大, 可传输能量更多。

### 3.3 互联区域电热联合市场社会剩余计算

算例中选取了典型日中 20:00 的市场出清结果进行展示与分析, 算例结果与市场社会剩余见附图 6—附图 8 及附表 3, 其中出清点 0 代表独立区域出清点, 出清点 1 代表互联区域出清点。

由附图 6—附图 8 可见, 由于 20:00 时的气温较低, 用户的能源需求也较大, 各区域电、热能源的市场出清点基本位于需求曲线末端, 只有区域 2 的热力市场除外, 这是由于 CHP 设备增强了电热能源的耦合, 提升了区域 2 的出清热能价格, 影响了用户的用能习惯, 降低了区域 2 内用户的热负荷。20:00 处于负荷高峰期, 上级电、热网络购能成本较高, 因此, 各区域的 DES 均选择通过 CHP 供能。

## 附录

对于互联区域内可传输的能源, 其数量受区域间能源出清价格差异及需求曲线斜率等因素的影响。虽然此时区域之间的能源出清价格相差不大, 但电、热用户需求曲线均相对平坦, 因此传输能量较多, 互联所增加的社会剩余也较大。

## 4 结论

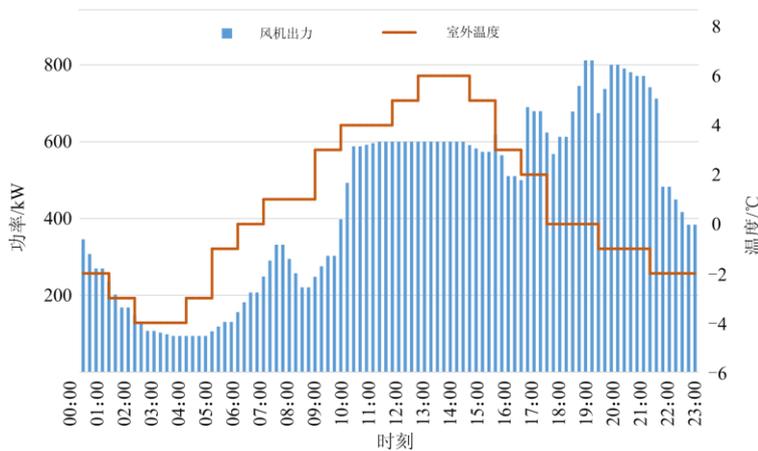
本文以分布式能源站与多能用户为市场参与主体, 针对互联区域的多能源市场进行了以下研究:

1) 建立了互联分布式能源站的机理模型, 引入用户竞价策略, 构建能源互联区域内的电热联合市场架构;

2) 分析了互联区域供需双方收益最大化原理, 在此基础上提出了互联区域双边竞价市场出清策略;

3) 通过算例仿真与量化分析, 验证了所提方法可在各个市场出清时刻实现多区域的资源优化分配与能源互补, 优化能源供需过程, 提升多区域供需双方利益。

本文的后续工作将着手于研究区域互联管线容量可能导致的传输阻塞问题, 分析其对于电热联合能源市场出清的影响, 进一步提升能源供需双方利益及能源市场的实用性与公平性。



附图 1 室外温度与风机出力曲线图

Attached Fig. 1 Diagram of outdoor temperature and wind output

附表 1 分布式能源站设备转换效率

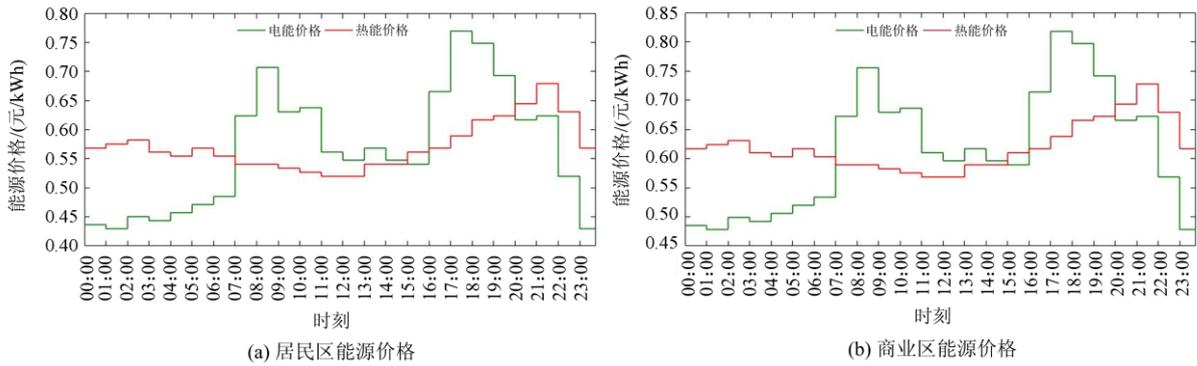
Attached Table 1 Conversion efficiency of DES equipment

设备名称	产能类型	转换效率
PEC	电力	1
CHP	电力	0.3
	热力	0.4
热泵	热力	4
燃气锅炉	热力	0.9
热交换器	热力	1

附表 2 用户侧参数

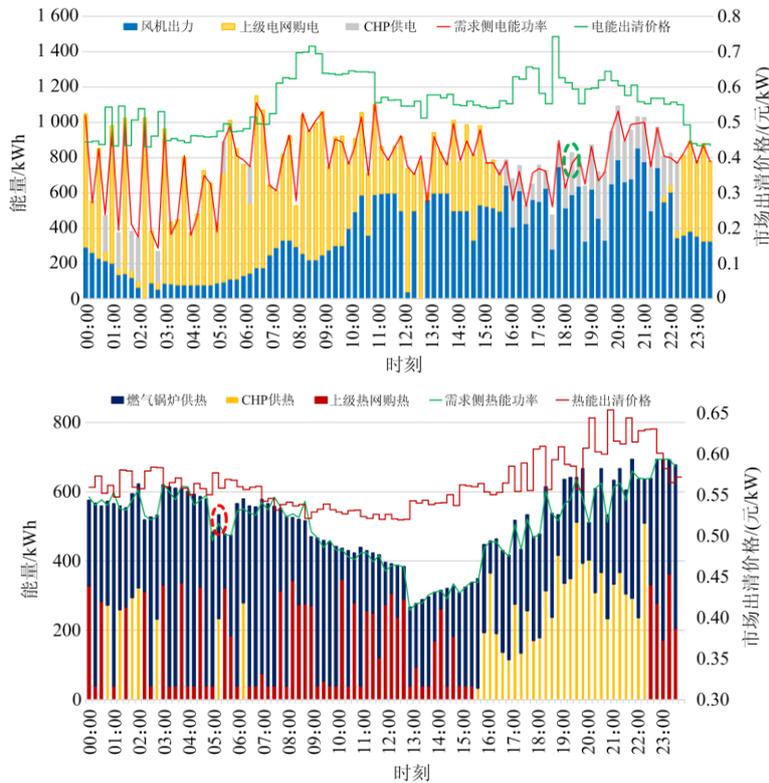
Attached Table 2 Parameters of customer side

区域	用户数量	DES 类型
居民区#1	140	A 型
居民区#2	260	A 型
商业区#3	180	B 型



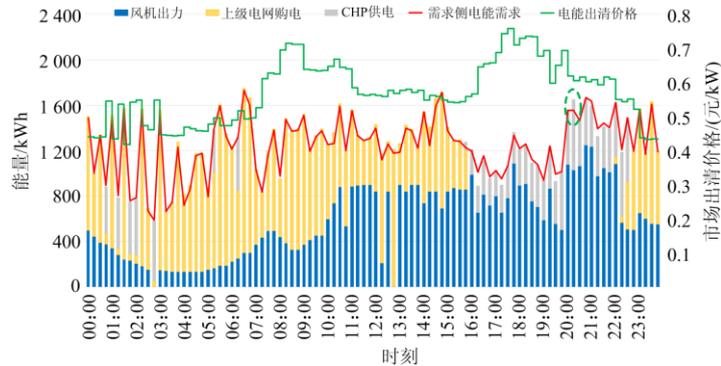
附图 2 不同区域能源价格变化图

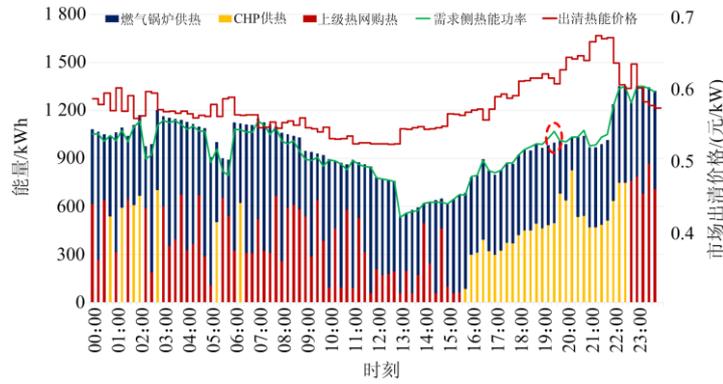
Attached Fig. 2 Diagram of energy price in different regions



附图 3 分布式能源站 1 出清价格与设备供能结果

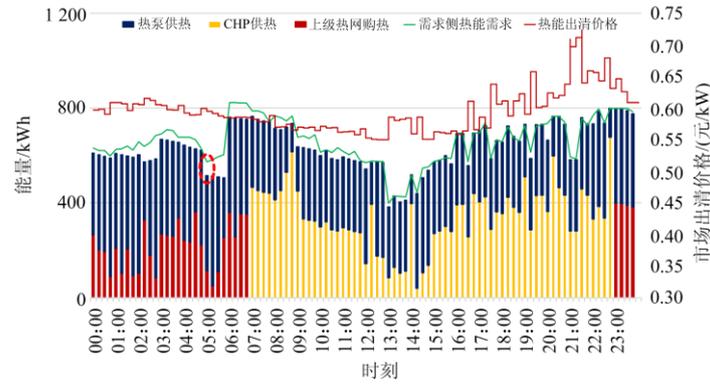
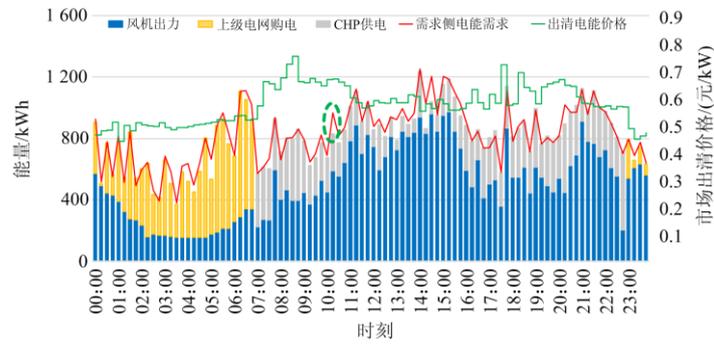
Attached Fig. 3 Diagram of clearing prices and equipment output results of DES 1





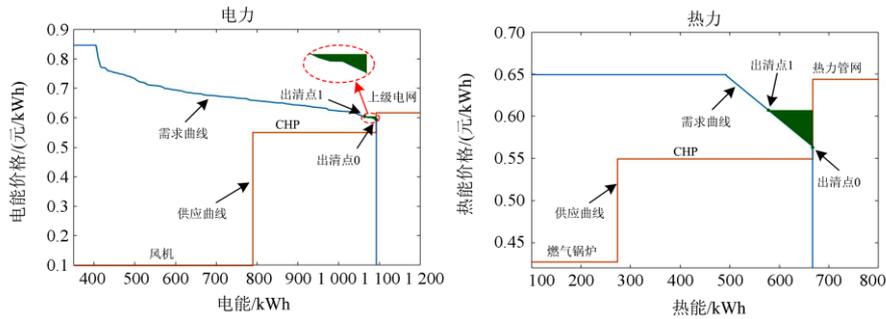
附图 4 分布式能源站 2 出清价格与设备出力结果

Attached Fig. 4 Diagram of clearing prices and equipment output results of DES 2



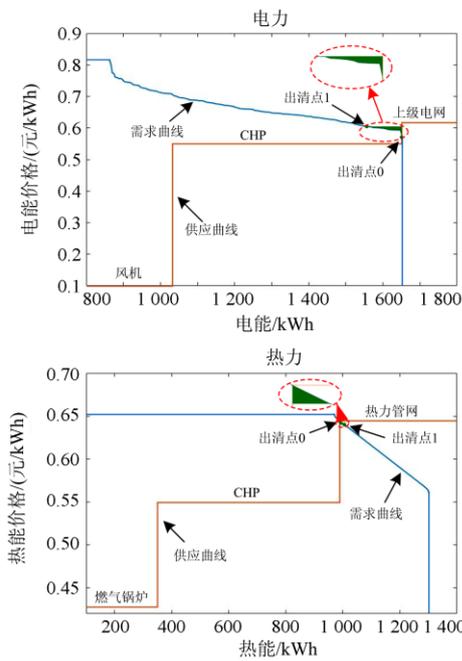
附图 5 分布式能源站 3 出清价格与设备出力结果

Attached Fig. 5 Diagram of clearing prices and equipment output results of DES 3

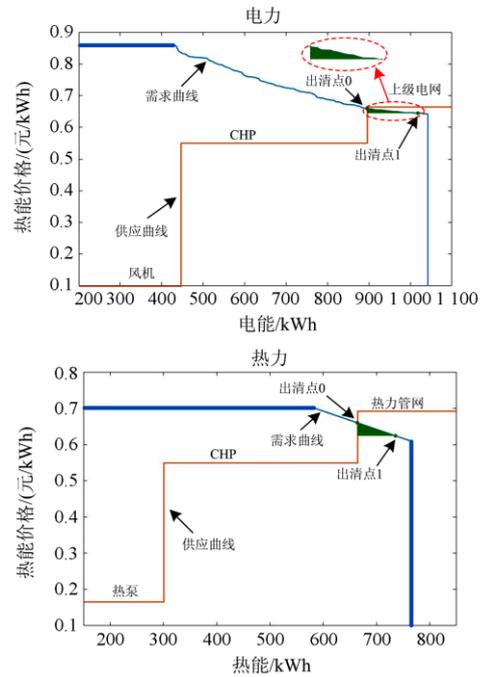


附图 6 20:00 分布式能源站 1 电-热联合市场出清过程

Attached Fig. 6 Diagram of electricity-heat joint market clearing process of DES 1 at 20:00 PM



附图 7 20:00 分布式能源站 2 电-热联合市场出清过程  
Attached Fig. 7 Diagram of electricity-heat joint market clearing process of DES 2 at 20:00 PM



附图 8 20:00 分布式能源站 3 电-热联合市场出清过程  
Attached Fig. 8 Diagram of electricity-heat joint market clearing process of DES 3 at 20:00 PM

附表 3 20:00 能源市场社会剩余

Attached Table 3 Energy market social surplus at 20:00 PM

	电力社会剩余/元	热力社会剩余/元	互联增加电力社会剩余/元	互联增加热力社会剩余/元	总社会剩余/元
DES 1	147.937 675	23.168 475	0.036 3	0.491 3	171.633 7
DES 2	201.794 175	36.080 825	0.402 9	0.009 6	238.287 5
DES 3	107.776 55	53.564 825	0.211 7	0.322 4	161.875 4
合计	457.508 4	112.814 125	0.650 9	0.823 3	571.796 6

参考文献

[1] NIKOLAOS G, OZANERDINC, JOÃO P S. An overview of demand response: key-elements and international experience[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 871-891.

[2] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24.

[3] 汤木易, 罗毅, 胡博, 等. 电热联合调度模型综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 161-175.  
TANG Muyi, LUO Yi, HU Bo, et al. A review of the dispatch model of a combined heat and power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 161-175.

[4] 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.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on several issues of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.

[5] 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.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.

[6] 陈忠华, 高振宇, 陈嘉敏, 等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 32-40.  
CHEN Zhonghua, GAO Zhenyu, CHEN Jiamin, et al. Research on cooperative planning of an integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Protection

- and Control, 2021, 49(8): 32-40.
- [7] 刘文霞, 李征洲, 杨粤, 等. 计及需求响应不确定性的综合能源系统协同优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 41-49.  
LIU Wenxia, LI Zhengzhou, YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 41-49.
- [8] 许周, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 53-59.  
XU Zhou, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Optimal configuration of energy storage for integrated region energy system considering power/thermal flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 53-59.
- [9] 胡伟, 杨梓俊, 王瑾然, 等. 园区综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 13-20.  
HU Wei, YANG Zijun, WANG Jinran, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system in the industry park[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 13-20.
- [10] 白雪婷, 杨瑞琪, 陈泽春, 等. 计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 27-35.  
BAI Xueting, YANG Ruiqi, CHEN Zechun, et al. Optimal operation of the park integrated energy system considering integrated demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 27-35.
- [11] 张利军, 王一铮, 陈飞, 等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.  
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [12] WANG J, ZHONG H, MA Z, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.
- [13] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.  
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [14] LITTLECHILD S. Competition regulation and price controls in the GB retail energy market[J]. Utilities Policy, 2018, 52: 59-69.
- [15] CHEN S, CONEJO AJ, SIOSHANSI R, et al. Equilibria in electricity and natural gas markets with strategic offers and bids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1956-1966.
- [16] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.  
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [17] YAO Y, GAO C, LAI K, et al. An incentive-compatible distributed integrated energy market mechanism design with adaptive robust approach[J]. Applied Energy, 2021, 282.
- [18] 石可, 陈皓勇, 李鹏, 等. 基于协同进化的两种电力市场出清机制分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 68-77.  
SHI Ke, CHEN Haoyong, LI Peng, et al. Analysis on two kinds of electricity market clearance mechanism based on co-evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 68-77.
- [19] DIVÉNYI D, POLGÁRI B, SLEISZ Á, et al. Algorithm design for European electricity market clearing with joint allocation of energy and control reserves[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 111: 269-285.
- [20] 曾嘉志, 赵雄飞, 李静, 等. 用电侧市场放开下的电力市场多主体博弈[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 129-136.  
ZENG Jiazhi, ZHAO Xiongfei, LI Jing, et al. Game among multiple entities in electricity market with liberalization of power demand side market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 129-136.
- [21] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 9-15, 78.  
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Mechanism design of day-ahead market considering deep peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 9-15, 78.
- [22] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB

- A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(5): 2302-2311.
- [23] 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.
- [24] 钱虹, 杨明, 陈丹, 等. 分布式能源站三联供系统优化运行策略研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(6): 74-79, 125.  
QIAN Hong, YANG Ming, CHEN Dan, et al. Optimization strategies for the operation of CCHP system in distributed energy station[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(6): 74-79, 125.
- [25] RASTEGAR M, FOTUHI F M, ZAREIPOUR H, et al. A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2217-2227.
- [26] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135.
- [27] AZADEH M, ALI E, MICHAEL F, et al. Modeling and optimization of a network of energy hubs to improve economic and emission considerations[J]. Energy, 2015, 93: 2546-2558.
- [28] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 152-160.  
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 152-160.
- [29] WANG D, HU Q, JIA H, et al. Integrated demand response in district electricity-heating network considering double auction retail energy market based on demand-side energy stations[J]. Applied Energy, 2019, 248: 656-678.
- [30] WU M, BAO Y, ZHANG J, et al. Multi-objective optimization for electric water heater using mixed integer linear programming[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1256-1266.
- [31] LIU N, HE L, YU X, et al. Multi-party energy management for grid-connected microgrids with heat and electricity coupled demand response[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(5): 1887-1897.
- [32] BROEER T. Analysis of smart grid and demand response technologies for renewable energy integration: operational and environmental challenges[D]. Victoria: University of Victoria, 2015.
- [33] 王丹, 黄德裕, 胡庆娥, 等. 基于电-热联合市场出清的综合需求响应建模及策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 13-30.  
WANG Dan, HUANG Deyu, HU Qing'e, et al. Modeling and strategy of integrated demand response based on electricity-heat joint clearing market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 13-30.
- [34] DE R M, BIANCO V, SCARPA F, et al. Heating and cooling building energy demand evaluation: a simplified model and a modified degree days approach[J]. Applied Energy, 2014, 128: 217-229.
- [35] 雷明梁. 建筑热负荷计算在供暖管网中的应用[J]. 区域供热, 2017(6): 69-76.  
LEI Mingliang. Application of building thermal load calculation in heating pipe network[J]. District Heating, 2017(6): 69-76.
- [36] SAHAND B, DAVID P, NED D, et al. Interconnection-wide hour-ahead scheduling in the presence of intermittent renewables and demand response: a surplus maximizing approach[J]. Applied Energy, 2017, 189: 336-351.
- [37] MANKIW N G. Principles of microeconomics[M]. The Dryden Press, 1998.

收稿日期: 2021-04-11; 修回日期: 2021-05-31

作者简介:

黄德裕(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源市场分析、综合需求响应; E-mail: huangdeyutju@163.com

王丹(1981—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统规划、运行控制等; E-mail: wangdantjuee@tju.edu.cn

贾宏杰(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为大电网稳定性分析、电网规划、新能源集成、综合能源系统分析等。E-mail: hjjia@tju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)