第 49 卷 第 6 期：2275-2286 高电压技术 Vol.49, No.6: 2275-2286
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230307

阶梯式碳交易的城市多能系统能量互补优化调度策略

刘鑫蕊，罗雨晴，侯　敏，王　睿，孙秋野
（东北大学信息科学与工程学院，沈阳 110819）

摘　要：引入城市能源服务中心(urban energy service center, UESC)作为供能和价格引导枢纽，构建了含典型功能的城市多能微网系统集群结构及其阶梯式碳交易机制模型。提出了一种城市多能系统双层优化调度策略，其上层为最小化 UESC 的运营成本，下层考虑城市多功能区域集群间的能量互济，采用交替方向乘子法求解综合能源系统(integrated energy system, IES)集群的分布式调度，协调各 IES 之间的功率交互。最后，利用 IEEE-33 节点电网和 32 节点热网耦合系统，并通过 4 类典型场景验证所提模型与算法的有效性，优化城市多能系统间能量的互济互补，减少系统总运行成本，降低系统碳排放，提高系统运行的经济性、灵活性和韧性。

关键词：城市多能系统；阶梯式碳交易；分布式优化调度；ADMM；KKT 条件

Energy Complementation Optimal Scheduling Strategy of Urban Multi-energy System with Stepped Carbon Trading

LIU Xinrui, LUO Yuqing, HOU Min, WANG Rui, SUN Qiuye
(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The urban energy service center (UESC) is introduced as energy supply and price guidance hub, and an urban multi-energy system structure with typical functional microgrids and a stepped carbon trading model are constructed. Moreover, a bi-layer optimal scheduling strategy of urban multi-energy system is proposed. The upper layer is to minimize the operating cost of UESC. In the lower layer, alternating direction method of multipliers is used to solve the distributed scheduling of integrated energy system (IES) clusters and coordinate the power interaction among them. Finally, IEEE-33-node power grid and 32-node thermal network coupling system are used to verify the effectiveness of the proposed model and algorithm through four typical scenarios. Thereby, the energy complementation between urban multi-energy system can be optimized, the total operating cost and the carbon emission are reduced, and the economy, flexibility and resilience of the system operation are improved.

Key words: urban multi-energy system; stepped carbon trading; distributed optimal scheduling; ADMM; KKT condition

0　引言

随着“双碳”目标的提出，以电能为核心的综合能源系统(integrated energy system, IES)是未来城市能源体系的主要组成部分[1]。IES 以区域能量管理系统(energy management system, EMS)、配电网、供热网为主体[2]，利用多能差异化特性实现能量耦合互补，有效提高能源利用效率和经济效益[3]。

近年来，我国城市化进程加快，多种产业聚集，地理位置紧凑，形成联系密切的城市多功能区，各 IES 的电热负荷特性、用能特点、机组容量配置均不相同，为多能系统能量互补优化调度提供了发展空间。建设城市多能系统，应当充分利用系统间信息交互，采取适当的控制策略，使电、热、气等多种能量有序流动[4]，多种能源形态协同转化。

随着多能系统耦合程度的加深，区域互联系统的优化调度策略受到国内外学者的广泛关注。文献[5]建立以能量枢纽为中心的双层协调控制模型，但并未考虑下层微网间的电能交互。文献[6]研究了含电、热、冷、气多能流的工业园区系统并建模，优

基金资助项目：国家自然科学基金(62173074；U20A2019)；国家重点研发计划(2018YFA0702200)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (62173074, U20A2019), National Key R&D Program of China(2018YFA0702200).

化其生产生活用能。文献[7-8]建立多场景下多微网系统的优化运行模型，研究系统间电能交互对系统内设备出力的影响。但上述研究仅限于降低系统运行总成本，忽略了低碳目标。

引入碳交易能够平衡多能系统经济性与环保性之间的矛盾。文献[9-10]只在电力系统运行调度中考虑碳交易。文献[11-12]采用传统定价方式，针对整个能源供应环节建立低碳经济模型。文献[13]构建奖惩阶梯型碳交易成本模型，但不计及系统内的碳配额共享。现有文献仅关注、考虑单一经济性或环保性指标，缺乏同时兼顾经济性、环保性和极端场景韧性的讨论。

分布式算法在解决多微网优化调度的问题上具有一定优势。文献[14]克服了集中式算法的限制，利用同步型交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers，ADMM)迭代求解可分离变量的优化问题，实现了本地分布式电源的并行优化。文献[15]提出一种基于 ADMM 的离网互联微网系统的分布式优化调度方法，但其单层结构存在不稳定性，内部单微网的运行故障会影响整个互联系统的通信，存在微网间期望交换功率偏差。因此本文提出含城市能源服务中心(urban energy service center, UESC)的双层结构模型，并引入应急 IES 提升城市配电网的安全可靠性。文献[16]提出基于 ADMM 的微网群双层调度方法，但只涉及相邻微网的信息通信，将相邻微电网间的边界变量交换、迭代，不能实现下层微网群能量的完全分布式共享。

针对上述问题，本文主要贡献如下：

1）将含电、热、气的城市多能系统划分成具有典型功能的 IES 集群，建立其内部出力设备模型和含 UESC 的双层供能结构。系统上层引入 UESC，引导 IES 优先于城市能源网向其购电，亦可降低源、荷预测偏差的影响，提高系统运行的经济性、鲁棒性。下层引入应急 IES，灵活切换运行模式，实现对故障 IES 重要负荷的紧急支援，提高系统应对极端场景的韧性水平。

2）提出考虑供需两侧碳配额情况的多边碳交易匹配策略，碳配额随功能型 IES 的电能交易转移共享，碳交易市场采用阶梯式定价机制，进一步提高对系统碳排的约束力，降低环境成本。

3）提出基于 KKT 条件[17-18]和 ADMM 的双层分布式能量互补优化调度策略，迭代求解正常态/故障态下 IES 间、UESC-IES 间的能量互济策略，充分发挥城市多功能区域联合调度的优势，相互支撑、互为备用，提高系统运行的灵活性。

1 城市多能系统结构

城市多能系统结构如图 1 所示。依据 IES 的多功能特性，将城市配电网分为含学校、医院、住宅、商业、工业以及应急管理系统的 6 大区域。单个 IES 由 EMS、光伏、热电联产机组(combined heat and power, CHP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、储能设备以及多种电、热负荷组成。工业 IES 中配备风机、电制氢(electrolytic cell, EL)、氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)，充分发挥氢能清洁、高能效的优势，分担用能需求，进一步降低碳排放。

在系统下层，每个 IES 都配置 EMS，以全连接的形式，利用通信设备传输供需信息。IES 内部的发电、供热机组能够满足其用能需求，当出力不足时，通过 IES 之间的互济互补来实现能量平衡，亦可向上层 UESC 和城市主网购电以保证能量供给。

在系统上层，UESC 作为城市多能系统的枢纽，也同时配备光伏、CHP。系统交易策略包括 IES-IES 和 IES-UESC 的能量交互，保证 IES 从 UESC 购电的优先级高于城市能源网。此外，互济能源的形式不仅限于电能和热能，还包括碳配额。应急管理系统与其他各 IES 之间不涉及碳交易。

1.1 清洁能源机组

风机、光伏输出功率及其上下限约束表示为：

$$0 \le P_t^{\mathrm{WT}} \le P_{\mathrm{N}}^{\mathrm{WT}} \tag{1}$$

$$0 \le P_t^{\mathrm{PV}} \le P_{\mathrm{N}}^{\mathrm{PV}} \tag{2}$$

式中：P_t^{WT}、P_t^{PV} 分别为 t 时刻风机、光伏的输出功率；$P_{\mathrm{N}}^{\mathrm{WT}}$、$P_{\mathrm{N}}^{\mathrm{PV}}$ 分别为风机、光伏的额定功率。

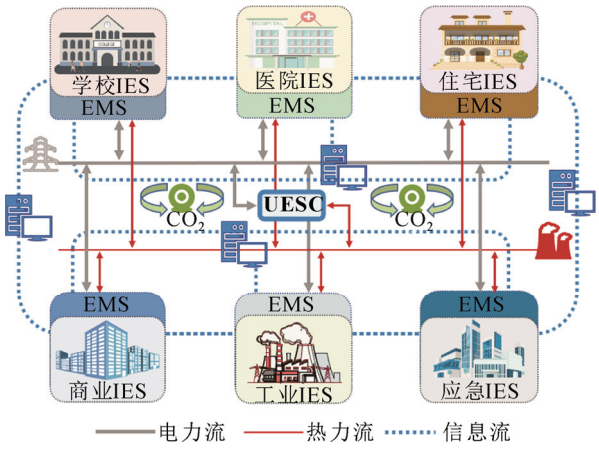


图 1 城市多能系统结构

Fig.1 Urban multi-energy system structure

1.2　多能转化机组

1）CHP

CHP 消耗天然气产生电能和热能。其数学模型及运行约束表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}} = \eta_{\mathrm{e,chp}} P_{\mathrm{g},t}^{\mathrm{CHP}} \\ P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{CHP}} = \kappa P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}} \\ P_{\mathrm{e,CHP}}^{\min} \le P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}} \le P_{\mathrm{e,CHP}}^{\max} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}}$、$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{CHP}}$ 分别为 t 时刻 CHP 机组的发电、制热功率；$P_{\mathrm{g},t}^{\mathrm{CHP}}$ 为 t 时刻消耗天然气功率；$\eta_{\mathrm{e,chp}}$ 为 CHP 发电效率；κ 为热电比；$P_{\mathrm{e,CHP}}^{\max}$、$P_{\mathrm{e,CHP}}^{\min}$ 分别为 CHP 输出电功率上、下限。

2）GB

GB 是以天然气为燃料的高效热源设备。其数学模型及运行约束表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{GB}} = \eta_{\mathrm{h,gb}} P_{\mathrm{g},t}^{\mathrm{GB}} \\ P_{\mathrm{h,GB}}^{\min} \le P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{GB}} \le P_{\mathrm{h,GB}}^{\max} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P_{\mathrm{g},t}^{\mathrm{GB}}$、$P_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{GB}}$ 分别为 t 时刻 GB 的耗气、制热功率；$\eta_{\mathrm{h,gb}}$ 为 GB 气转热效率；$P_{\mathrm{h,GB}}^{\max}$、$P_{\mathrm{h,GB}}^{\min}$ 分别为 GB 输出热功率上、下限。

3）EL

选用质子交换膜电解槽作为电制氢设备。其数学模型及运行约束表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{EL}} = \eta_{\mathrm{el}} P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}} \\ P_{\mathrm{e,EL}}^{\min} \le P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}} \le P_{\mathrm{e,EL}}^{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}}$ 为 t 时刻输入 EL 的电功率；$P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{EL}}$ 为 t 时刻 EL 的产氢功率；η_{el} 为 EL 电转氢效率；$P_{\mathrm{e,EL}}^{\max}$、$P_{\mathrm{e,EL}}^{\min}$ 分别为输入 EL 电功率上、下限。

4）HFC

HFC 的内部反应为电解的逆过程。其数学模型及运行约束表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{HFC}} = \eta_{\mathrm{hfc}} P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{HFC}} \\ P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\min} \le P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{HFC}} \le P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\max} \\ \Delta P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\min} \le P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{HFC}} - P_{\mathrm{H}_2,t-1}^{\mathrm{HFC}} \le \Delta P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\max} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$P_{\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{HFC}}$ 为 t 时刻输入 HFC 的氢能；$P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{HFC}}$ 为 t 时刻 HFC 输出的电功率；η_{hfc} 为 HFC 氢转电效率；$P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\max}$、$P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\min}$ 分别为输入 HFC 氢功率上、下限；$\Delta P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\max}$、$\Delta P_{\mathrm{H}_2,\mathrm{HFC}}^{\min}$ 分别为 HFC 的爬坡上、下限。

1.3　储能机组

IES 储能设备包括蓄电池、储氢罐。

1）容量连续性约束

$$\begin{cases} E_{\mathrm{D},t} = E_{\mathrm{D},t-1}(1-\delta) + \left(P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}} \eta_{\mathrm{D,ch}} - \dfrac{P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}}{\eta_{\mathrm{D,dh}}} \right) \Delta t \\ E_{\mathrm{D}}^{\min} \le E_{\mathrm{D},t} \le E_{\mathrm{D}}^{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$E_{\mathrm{D},t-1}$、$E_{\mathrm{D},t}$ 分别为储能设备 $t-1$、t 时刻的容量状态；$E_{\mathrm{D}}^{\max}$、$E_{\mathrm{D}}^{\min}$ 分别为储能设备最大、最小容量状态；δ 为储能设备能源损耗系数；$P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}$、$P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}$ 为充放能功率；$\eta_{\mathrm{D,ch}}$、$\eta_{\mathrm{D,dh}}$ 为充放能效率。

2）起止容量平衡约束

$$E_{\mathrm{D}}^{T} = E_{\mathrm{D}}^{0} \tag{8}$$

式中：E_{D}^{0}、E_{D}^{T} 分别为储能设备运行起始、终止时刻的容量状态；T 为运行调度周期，本文取 24 h。

3）充放能功率约束

$$\begin{cases} 0 \le P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}} \le U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}} P_{\mathrm{D,ch}}^{\max} \\ 0 \le P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}} \le U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}} P_{\mathrm{D,dh}}^{\max} \\ 0 \le U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}} + U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}} \le 1 \\ U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}} \in \{0,1\} \\ U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}} \in \{0,1\} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$P_{\mathrm{D,ch}}^{\max}$、$P_{\mathrm{D,dh}}^{\max}$ 分别为储能设备最大充放能功率；$U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}$、$U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}$ 分别为 t 时刻充放能状态位。

1.4　含 UESC 的双层结构及其信息网络模型

针对城市多能系统的优化调度研究，已有文献提出的分布式能量管理框架多数设置综合能源供应商，从城市电网、热源厂低价批发能源，再以零售价格向 IES 出售，充当能源交易市场的中介机构。集群运营商收集区域能量管理系统的数据信息，将下层优化结果收集反馈给顶层综合能源供应商，以下层购能策略影响上层售能策略，底层区域 IES 之间不涉及能量交易。

本文提出的 UESC 内部配备光伏和 CHP 机组，其发电、制热模型同式(2)、(3)。下层 IES 向 UESC 购电的优先级高于城市能源网，UESC 与城市能源网是并列关系，而非从属调度关系。不设置集群调度层，下层 IES 都各自配备独立的 EMS，以全连接形式交互供需信息，参与能量互济互补。

含 UESC 的双层信息网络模型如图 2 所示。通信网络中信息流的形成和交互，直接影响能量流的传输方向和定量交易，信息流的建模过程和计算方法详见附录 A。

2　城市多能系统的碳交易机制

系统碳配额随电能交易转移共享，也可直接从碳交易市场购买缺额。规定每个运行周期结束后，

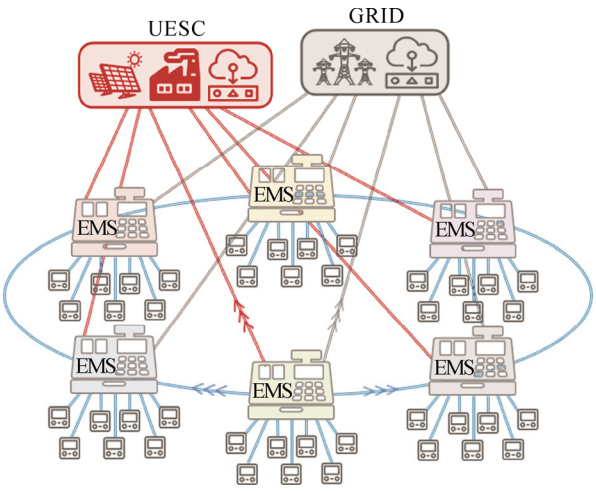


图 2 IES-UESC 双层信息网络模型

Fig.2 IES-UESC bi-layer information network model

各 IES 的碳配额账户均要进行结算、清零。

2.1 碳配额交易模型

根据各 IES 的电、热负荷需求及其生产方式溯源分类，确定清洁能源机组奖励配额量和传统机组免费配额量。各 IES 的碳配额和 IES 集群的碳配额总量表示为：

$$E_{\mathrm{IESn}}^{\mathrm{free}}=\sum_{i=1}^{I=5}E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{free}} \tag{10}$$

$$E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{free}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{k\in K}\chi_{i,k}P_{i,t,k} \tag{11}$$

式中：$K=\{\mathrm{PV,WT,GB,CHP}\},k\in K$；$I$ 为系统中参与碳交易的 IES 总数；$\chi_{i,k}$ 为机组免费或奖励碳配额系数；$P_{i,t,k}$ 为 t 时刻 IES 中供能设备的功率。

本文提出更加符合碳交易市场经济规律的交易策略，在 IES 集群开展多边碳交易，允许一个买方与多个卖方匹配交易，根据多方申报价格，生成交易匹配顺序和交易量。

碳交易双方的申报价格表示为：

$$\begin{cases}V_{i,\mathrm{s}}(x)=V_{i,\min}+(1-\alpha_i(x))(V_{\mathrm{ass}}-V_{\mathrm{com}})\\V_{i,\mathrm{b}}(x)=V_{i,\max}-(1-\alpha_i(x))(V_{\mathrm{ass}}-V_{\mathrm{com}})\end{cases} \tag{12}$$

$$\alpha_i(x)=(x/X)^{1.5k_i/N_i+\alpha_{0,j}} \tag{13}$$

式中：$V_{i,\mathrm{b}}(x)$、$V_{i,\mathrm{s}}(x)$ 分别为第 x 轮交易中买卖双方 IES 的申报价格；$V_{i,\min}$、$V_{i,\max}$ 分别为第 i 个 IES 获得的奖励和惩罚价格；$\alpha_i(x)$ 为第 i 个 IES 在第 x 轮交易申报价格的修正系数；V_{ass}、V_{com} 分别为市场的考核惩罚和补贴奖励价格；X 为最大修正次数；$\alpha_{0,j}$ 为第 j 个卖方 IES 的碳交易意愿度，取值范围为[−1,1]；k_i、N_i 分别为第 i 个 IES 已成交的碳交易量和所需的碳交易量。

2.2 阶梯式碳交易机制

将 IES 实际参与碳交易的总成本作为系统的环境成本[19]。IES 的实际碳排量和市场交易额表示为：

$$E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{actual}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{k\in K}(a_1+b_1P_{i,t,k}+c_1P_{i,t,k}^2) \tag{14}$$

$$E_{\mathrm{IES},t}=E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{actual}}-E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{free}}-E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j} \tag{15}$$

式中：$E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j}$ 为 IES 互济的碳交易量；a_1、b_1、c_1 为机组碳排的计算参数。

碳交易市场采用阶梯式定价机制，划分多个价格区间，购买碳配额越多，所在区间的单价越高。市场阶梯式碳交易费用为

$$V_{\mathrm{lad}}=\begin{cases}\mu E_{\mathrm{IES},t}, & E_{\mathrm{IES},t}\le l\\ \mu(1+\alpha)(E_{\mathrm{IES},t}-l)+\mu l, & l<E_{\mathrm{IES},t}\le 2l\\ \mu(1+2\alpha)(E_{\mathrm{IES},t}-2l)+\mu(2+\alpha)l, & 2l<E_{\mathrm{IES},t}\le 3l\\ \mu(1+3\alpha)(E_{\mathrm{IES},t}-3l)+\mu(3+3\alpha)l, & 3l<E_{\mathrm{IES},t}\le 4l\\ \mu(1+4\alpha)(E_{\mathrm{IES},t}-4l)+\mu(4+6\alpha)l, & 4l<E_{\mathrm{IES},t}\end{cases} \tag{16}$$

式中：μ 为基础碳价；l 为定义的碳排量区间长度；α 为碳配额超限后的价格增长率。

IES 实际参与碳交易的总成本表示为

$$f_{\mathrm{CO_2}}=\begin{cases}-\sum_{i=1,j\ne i}^{N}V_{i,\mathrm{s}}(x)E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j}-V_{\mathrm{lad}}, & E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{free}}\ge E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{actual}}\\ \sum_{i=1,j\ne i}^{N}V_{i,\mathrm{b}}(x)E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j}+V_{\mathrm{lad}}, & E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{free}}<E_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{actual}}\end{cases} \tag{17}$$

3 考虑低碳经济调度的城市多能系统能量互济模型

构建城市多能系统经济优化调度模型，实现 IES-IES、IES-UESC 间的信息传递、能量互济互补。保证供电可靠性的同时，提高能源利用率，降低碳排放，最小化系统运行成本。城市多能系统双层低碳经济调度模型如图 3 所示。

3.1 IES 能量互补优化调度模型

1）目标函数

本文综合考虑 IES 运行成本 $f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{IES}}$、IES 与其他系统之间的能量交易成本 f_{Tra}，并将碳交易费用作为环境成本 $f_{\mathrm{CO_2}}$，其目标函数 F 表示为：

$$F=\min(f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{IES}}+f_{\mathrm{Tra}}+f_{\mathrm{CO_2}}) \tag{18}$$

$$f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{IES}}=\sum_{t=1}^{T}\begin{pmatrix}\sigma_{\mathrm{WT}}P_t^{\mathrm{WT}}+\sigma_{\mathrm{PV}}P_t^{\mathrm{PV}}+\sigma_{\mathrm{CHP}}P_t^{\mathrm{CHP}}+\\ \sigma_{\mathrm{Bat}}\left(P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{Bat}}+P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{Bat}}\right)+\sigma_{\mathrm{GB}}P_t^{\mathrm{GB}}+\sigma_{\mathrm{EL}}P_{\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}}+\\ \sigma_{\mathrm{HFC}}P_t^{\mathrm{HFC}}+\sigma_{\mathrm{H_2}}\left(P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{H_2}}+P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{H_2}}\right)\end{pmatrix} \tag{19}$$

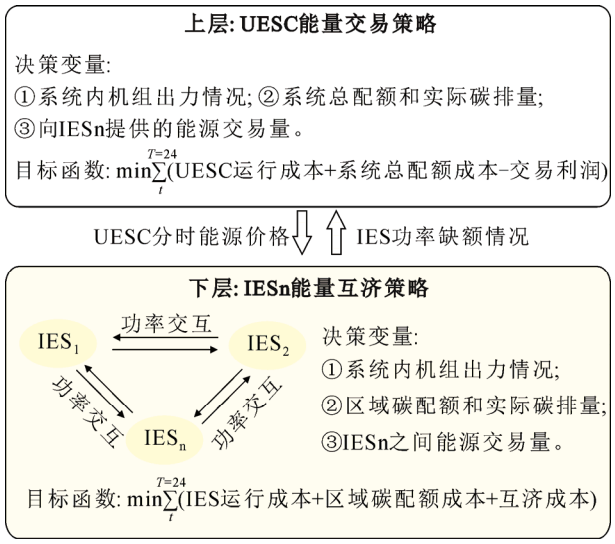


图 3　城市多能系统双层低碳经济调度模型

Fig.3　Urban multi-energy system bi-layer low-carbon economic scheduling model

$$f_{\mathrm{Tra}}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\left(mP_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{Grid}}+m_1P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{UESC}}\right)+\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{N}\sum_{t=1}^{T}m_2P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{IES}j} \tag{20}$$

式中：σ_{WT}、σ_{PV}、σ_{CHP}、σ_{Bat}、σ_{GB}、σ_{EL}、σ_{HFC}、$\sigma_{\mathrm{H_2}}$分别为风机、光伏、CHP、蓄电池、GB、EL、HFC 和储氢罐的运行成本系数；$P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{Bat}}$、$P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{Bat}}$分别为$t$时刻蓄电池的充、放电功率；$P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{H_2}}$、$P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{H_2}}$分别为$t$时刻储氢罐的储、耗氢功率；$m$、$m_1$、$m_2$分别为 IES 向城市能源网、UESC 的购能单价、各 IES 之间的能量互济单价；$P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{Grid}}$、$P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{UESC}}$、$P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{IES}j}$分别为第$i$个 IES 与城市能源网、UESC 和第$j$个 IES 的交互功率；$N$为城市多能系统中 IES 的个数。

以蓄电池为例，根据全寿命周期成本模型，可将其单位功率成本系数表示为[20]

$$\sigma_{\mathrm{Bat}}=\frac{i_{\mathrm{c}}(1+i_{\mathrm{c}})^{T_{\mathrm{equ}}^{\mathrm{B}}}}{(1+i_{\mathrm{c}})^{T_{\mathrm{equ}}^{\mathrm{B}}}-1}\left(C_{\mathrm{Bat}}+C_{\mathrm{Bat}}^{\mathrm{R}}(1+q)^{\frac{T_{\mathrm{equ}}^{\mathrm{B}}}{10}}\right) \tag{21}$$

式中：i_{c}为贴现率；q为每 10 a 间蓄电池维护成本增量百分比；C_{Bat}、$C_{\mathrm{Bat}}^{\mathrm{R}}$分别为蓄电池单位功率的固定、运维成本系数；$T_{\mathrm{equ}}^{\mathrm{B}}$为蓄电池等效运行年限。

2）运行约束

(1)功率平衡约束

式(22)、(23)、(24)分别为第i个 IES 的电、热氢功率平衡约束。$\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}$、$\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}}$、$\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{H_2}}$均为 0，分别为第$i$个 IES 的电、热、氢平衡的标记位。

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}=&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC}}+\sum_{i=1,j\neq i}^{N}P_{\mathrm{IES}j,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}i}+P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{WT}}+\\&P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{PV}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{dh},t}^{\mathrm{Bat}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{HFC}}-\\&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{ch},t}^{\mathrm{Bat}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}}-\sum_{i=1,j\neq i}^{N}P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}j}-P_{i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Load}}\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}}=&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{UESC}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{GB}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{CHP}}+\\&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{HN}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{Load}}\end{aligned} \tag{23}$$

$$\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{H_2}}=P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{H_2},t}^{\mathrm{EL}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{dh},t}^{\mathrm{H_2}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{H_2},t}^{\mathrm{HFC}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{ch},t}^{\mathrm{H_2}} \tag{24}$$

当 IES 内部机组故障、出力不足以供给重要负荷时，负荷供给率如式(25)所示。为避免在下层集群间传输错误的供需信息，故障范围扩大，故障 IES 与城市能源网解耦，进入孤岛运行状态。

$$R_{\mathrm{es}}=\frac{\sum_{k=1}^{K}P_{\mathrm{IES}i,t,k}}{\xi_{\mathrm{m}}P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Load}}}\times100\% \tag{25}$$

式中：R_{es}为负荷供给率；$\sum_{k=1}^{K}P_{\mathrm{IES}i,t,k}$为$t$时刻第$i$个 IES 的内部机组出力之和；$P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Load}}$为$t$时刻第$i$个 IES 的电负荷；$\xi_{\mathrm{m}}$为重要负荷权重值。

故障 IES 的孤岛划分及其恢复的条件表示为

$$L_{\mathrm{d}}=\sum_{i\in N}\xi_iP_iz_i \tag{26}$$

式中：P_i、ξ_i分别为第i个故障 IES 的有功功率、负荷优先恢复系数；z_i为t时刻第i个 IES 的运行状态：$R_{\mathrm{es}}\geq1$时$z_i=0$表示已恢复供电；$R_{\mathrm{es}}<1$时$z_i=1$表示未恢复供电。

应急管理 IES 的供能平衡约束表示为

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}=&P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{WT}}+P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{PV}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{dh},t}^{\mathrm{Bat}}+P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{HFC}}-\\&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{ch},t}^{\mathrm{Bat}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}}-P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Load}}+z_iP_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A}}\end{aligned} \tag{27}$$

式中$P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A}}$为$t$时刻应急管理 IES 向故障 IES 提供的总功率。

(2)机组功率约束

系统中各机组运行约束见式(1)—式(9)。

(3)传输功率约束

$$P_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j,\min}\leq\left|P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{IES}j}\right|\leq P_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j,\max} \tag{28}$$

式中：$P_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j,\max}$、$P_{\mathrm{IES}i}^{\mathrm{IES}j,\min}$分别为 IES 之间传输功率的上、下限。

3.2　UESC 经济优化模型

1）目标函数

UESC 不仅起到城市能源市场服务中介的作用，还具有与下层 IES 相同的能源生产和销售功能。UESC 总成本为

$$R_{\mathrm{UESC}}=\min\sum_{t=1}^{T}\left(f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{UESC}}+f_{\mathrm{CO_2}}-\sum_{i=1}^{N}r_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i}\right) \tag{29}$$

式中：$f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{UESC}}$为 UESC 的运行成本；$r_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i}$为 UESC 对 IES$i$的交易利润。其计算式分别为：

$$r_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i}=\begin{cases}p_{\mathrm{sell},t}^{\mathrm{IES}i}P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}, & P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}\geq 0\\ p_{\mathrm{buy},t}^{\mathrm{IES}i}P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}, & P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}<0\end{cases} \tag{30}$$

$$f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{UESC}}=\sigma_{\mathrm{PV}}P_t^{\mathrm{PV}}+\sigma_{\mathrm{CHP}}P_t^{\mathrm{CHP}} \tag{31}$$

式中：$p_{\mathrm{buy},t}^{\mathrm{IES}i}$、$p_{\mathrm{sell},t}^{\mathrm{IES}i}$分别为 UESC 与第$i$个 IES 之间能量互济的购售单价；$P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}$为 UESC 与 IES 之间能量互济功率。

2）机组功率约束

系统中各机组运行约束见式(2)、(3)。

3）传输功率约束

$$P_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i,\min}\leq\left|P_{\mathrm{UESC},t}^{\mathrm{IES}i}\right|\leq P_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i,\max} \tag{32}$$

式中：$P_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i,\max}$、$P_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i,\min}$分别为 UESC 和 IES 之间传输功率的上、下限。

4 基于 KKT 条件和 ADMM 的双层分布式模型求解方法

本文提出的双层分布式模型中，上、下 2 层之间交易策略复杂，迭代过程相互耦合，寻优过程相互依赖，难以直接求得全局最优解。依据 KKT 条件将上层目标函数转化为下层函数的约束条件，从而将原始双层问题转换成单层问题，并引入 ADMM 算法分布式优化求解。

1）构建上层模型的拉格朗日函数

通过KKT条件降维后的上层目标函数如式(33)所示，约束条件如式(34)所示。N为正常状态下参与下层能量交易的 IES 总数，若有n个 IES 发生故障离网，则$N=N-n$。

$$\begin{aligned}L(x,\delta,u)=&\sum_{t=1}^{T}\left(f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{UESC}}+f_{\mathrm{CO_2}}-\sum_{i=1}^{N}r_{\mathrm{UESC}}^{\mathrm{IES}i}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\delta_{1,i,t}\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\delta_{2,i,t}\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}}+\\&\sum_{t=1}^{T}u_{1,t}\left(\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\mathrm{IES}i}-P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\max}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}u_{2,t}\left(\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\mathrm{IES}i}-P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\max}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}u_{3,t}\left(P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\min}-\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\mathrm{IES}i}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}u_{4,t}\left(P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\min}-\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\mathrm{IES}i}\right)\end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{cases}\partial L/\partial x=0\\ \Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}=0,\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}}=0\\ u_{1,t},u_{2,t},u_{3,t},u_{4,t}\geq 0\\ \Phi_{1,\perp}=\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\mathrm{IES}i}-P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\max}\leq 0\\ \Phi_{2,\perp}=\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\mathrm{IES}i}-P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\max}\leq 0\\ \Phi_{3,\perp}=P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\min}-\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,e},t}^{\mathrm{IES}i}\leq 0\\ \Phi_{4,\perp}=P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\min}-\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{UESC,h},t}^{\mathrm{IES}i}\leq 0\\ u_{m,t}\Phi_{m,\perp}\big|_{m=1}^{4}=0\end{cases} \tag{34}$$

2）大 M 法线性化约束

降维后的单层分布式问题中仍存在非线性约束，主要由互补松弛约束及储能装置启停导致，采用大 M 法[21]，引入二进制变量，将非线性约束线性化，约束条件均类似，以储能装置为例，可表示为

$$\begin{cases}0\leq P_{\mathrm{d,ch}}^{\max}-P_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}\leq MU_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}\\ 0\leq\theta_1\leq M\left(1-U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}\right)\\ 0\leq P_{\mathrm{d,dh}}^{\max}-P_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}\leq MU_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}\\ 0\leq\theta_2\leq M\left(1-U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}\right)\end{cases} \tag{35}$$

式中：M是一个极大值，可设置为 1000；$U_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{D}}$、$U_{\mathrm{dh},t}^{\mathrm{D}}$均为 0−1 变量；$\theta_1$、$\theta_2$为线性化约束过程中大 M 法规定引入的变量，无具体含义。

3）基于 ADMM 算法的系统经济调度

交替方向乘子法是一种适用于求解可分离凸优化的算法[22-23]。根据本文研究问题进行改写，基于 ADMM 算法的系统经济调度总体目标函数为

$$\begin{cases}\min\left(f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{IES}}+f_{\mathrm{Tra}}+f_{\mathrm{CO_2}}\right)\\ \text{s.t. 式(1)—(10)、式(22)—式(28)、式(34)、式(35)}\end{cases} \tag{36}$$

根据目标函数及约束条件构造的增广拉格朗日函数为

$$\begin{aligned}&L(P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC}},P_{\mathrm{IES}j,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}i},P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{WT}},P_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{PV}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{CHP}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{dh},t}^{\mathrm{Bat}},\\&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{HFC}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{ch},t}^{\mathrm{Bat}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{EL}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{UESC}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{GB}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{CHP}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{h},t}^{\mathrm{HN}},\\&P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{EL}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{dh},t}^{\mathrm{H}_2},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{H}_2,t}^{\mathrm{HFC}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{ch},t}^{\mathrm{H}_2},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A}})=\\&f_{\mathrm{Op}}^{\mathrm{IES}}+f_{\mathrm{Tra}}+f_{\mathrm{CO_2}}+\sum_{i=1}^{N}\left(y_{\mathrm{e},i}^{\mathrm{T}}(\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}})+\frac{\rho_{\mathrm{e},i}}{2}\left\|\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e}}\right\|_2^2\right)+\\&\sum_{i=1}^{N}\left(y_{\mathrm{h},i}^{\mathrm{T}}(\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}})+\frac{\rho_{\mathrm{h},i}}{2}\left\|\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h}}\right\|_2^2\right)+\end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\left(y_{\mathrm{H}_2,i}^{\mathrm{T}}(\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{H}_2})+\frac{\rho_{\mathrm{H}_2,i}}{2}\left\|\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{H}_2}\right\|_2^2\right)+$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{m=1}^{4}\left(y_{\perp,1}^{\mathrm{T}}u_{m,t}\Phi_{m,\perp}+\frac{\rho_{\perp,m}}{2}\left\|u_{m,t}\Phi_{m,\perp}\right\|_2^2\right)+$$

$$y_{\partial,i}^{\mathrm{T}}(\partial L/\partial x)+\frac{\rho_{\partial,i}}{2}\left\|\partial L/\partial x\right\|_2^2 \tag{37}$$

应用 ADMM 交替更新的思想，迭代过程为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid},k+1}:=\arg\min\limits_{x}L_\rho(P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid}},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC},k},P_{\mathrm{IES}j,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}i,k},\cdots,P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A},k})\\ P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC},k+1}:=\arg\min\limits_{x}L_\rho(P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid},k+1},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC}},P_{\mathrm{IES}j,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}i,k},\cdots,P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A},k})\\ \vdots\\ P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A},k+1}:=\arg\min\limits_{x}L_\rho(P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{Grid},k+1},P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{UESC},k+1},P_{\mathrm{IES}j,\mathrm{e},t}^{\mathrm{IES}i,k+1},\cdots,P_{\mathrm{IES}i,\mathrm{e},t}^{\mathrm{A},k})\\ y^{k+1}:=y^{k}+\sum\limits_{i=1}^{N}\rho_i\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{e},k+1}+\sum\limits_{i=1}^{N}\rho_i\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{h},k+1}+\\ \qquad\sum\limits_{i=1}^{N}\rho_i\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{\mathrm{H}_2,k+1}+\sum\limits_{m=1}^{4}\sum\limits_{i=1}^{N}\rho_i u_{m,t}\Phi_{m,\perp}\end{cases} \tag{38}$$

式中：$\rho_i>0$为惩罚因子；y为对偶变量；上标k表示迭代次数；u为拉格朗日乘子。

各 IES 根据式(39)进行迭代，直到原始残差和对偶残差同时满足收敛精度，结束迭代。迭代过程中，各 IES 同步并行计算，求解独立进行，实现完全分布式调度优化。整个过程中无需再与上层运营商 UESC 进行信息交互，降低了信息成本，同时也保护了下层 IES 的运行隐私。

$$\begin{cases}\varepsilon_{\mathrm{dual}}\geq\Phi_{\mathrm{IES}i,t}^{k}\\ \varepsilon_{\mathrm{primal}}\geq u_{m,t}\Phi_{m,\perp}\end{cases} \tag{39}$$

式中：$\varepsilon_{\mathrm{primal}}$为原始残差收敛精度；$\varepsilon_{\mathrm{dual}}$为对偶残差收敛精度。

5　仿真分析

以辽宁某城区冬季典型日下的 24 h 为周期，滚动优化步长为 1 h。选用 IEEE-33 节点电网和 32 节点热网耦合系统，各 IES 与城市能源网的节点连接方式及其内部机组单机容量配置详见附录 B。

仿真场景设置如下。

场景 1：不考虑下层 IES 之间的能量互济，不考虑上层 UESC 对下层 IES 的能量互济。

场景 2：不考虑下层 IES 之间的能量互济，考虑上层 UESC 对下层 IES 的能量互济。

场景 3：同时考虑下层 IES 之间及上层 UESC 对下层 IES 的能量互济，不考虑 IES 的应急功能。

场景 4：同时考虑下层 IES 之间及上层 UESC 对下层 IES 的能量互济，考虑 IES 的应急功能。

5.1　基础数据

设置 UESC 售电价格始终低于城市能源网，分时交易电价详见附录 B。城市热网和 UESC 售热价格分别为 0.38 元/kWh、0.32 元/kWh。联络线最大传输功率为 1000 kW，不计传输损耗。

功能型 IES 的用电行为在分时电价和市场激励下自主响应调整，因而具有负荷侧不确定性。建立风机、光伏和电、热负荷的不确定集模型[24]，预测所得的风电、光伏机组功率曲线，以及各 IES 的预测电、热负荷需求曲线如图 4、5 所示。

5.2　仿真结果及分析

1）场景 1 与场景 2 的对比分析

本文场景 1 在文献[25]所述场景 3 的基础上提

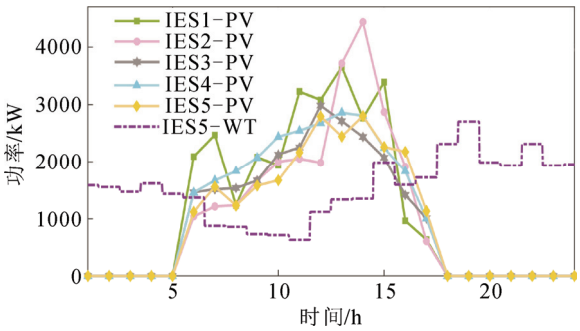


图 4　IES 风电、光伏预测曲线图

Fig.4　IES PV/WT forecast curve

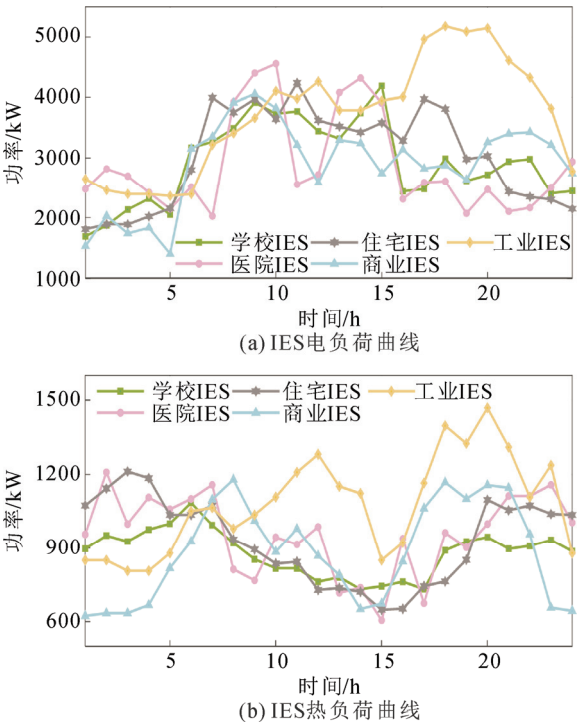


图 5　IES 电、热负荷曲线图

Fig.5　IES electrical-thermal load curve

出了更全面、完善的市场交易策略，制定更符合碳交易市场经济规律的阶梯式定价原则。如图 6 所示，以学校 IES 为例，其用电峰谷期通常与城市能源网分时电价的峰谷期区间一致，购电单价较高。

蓄电池在午间、夜晚用电高峰期，电价较高时逐渐放电。场景 2 优化结果如图 7 所示，可以看出考虑上层 UESC 向下层 IES 售电、售热后，城市能源网与 UESC 同时对 IES 供能，又由于 UESC 的总体售价较低，因此其出清能量明显多于城市能源网。对比场景 1、2 优化结果可知，学校 IES 运行成本降低 5.58%，系统碳排量减少 2438.55 kg，有效提高了系统运行的经济性、环保性。

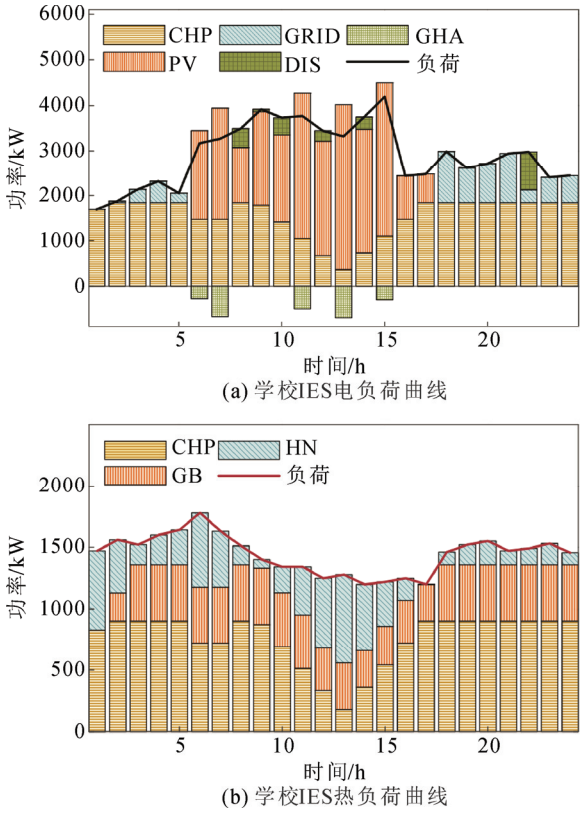


图 6 场景 1 学校 IES 电、热平衡图

Fig.6 College IES electrical-thermal balance in scenario 1

设置源、荷双向不确定半径，研究其对 IES 优化调度产生的影响，优化结果如表 1 所示。波动分别在±5%、±10%以内时，源、荷预测偏差的不确定性对场景 2 的影响更小，也说明引入 UESC 可以提高系统运行的鲁棒性。

2）场景 3 优化结果分析

以学校、工业 IES 为例，在场景 3 协同优化调度下的电、热功率平衡如图 8、9 所示。工业 IES 在 01:00—03:00 和 23:00 两时段需要外部购电，而功率缺额较少，可由 UESC 提供。学校 IES 配备两个单体容量为 1200 kWh 的蓄电池，其最大储能容量为 2160 kWh。蓄电池在 07:00 和 11:00—13:00 两

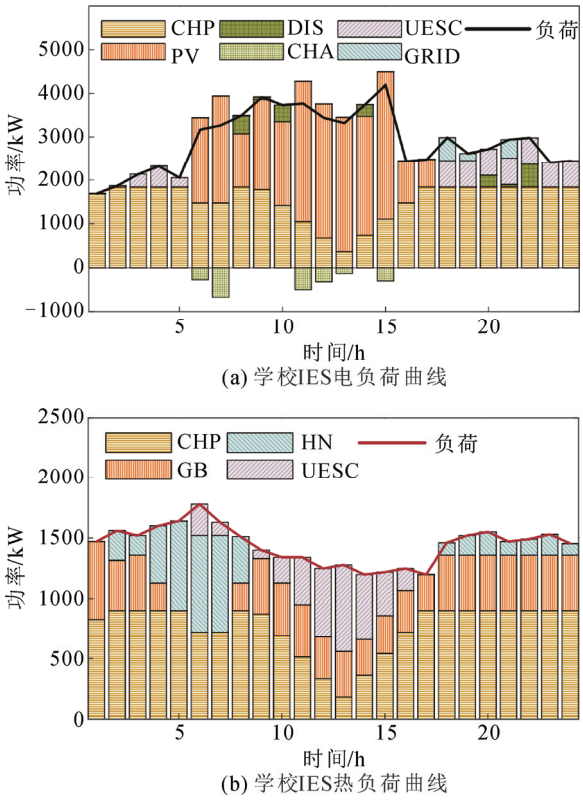


图 7 场景 2 学校 IES 电、热功率平衡图

Fig.7 College IES electrical-thermal balance in scenario 2

表 1 不同源、荷不确定半径下的优化结果

Table 1 Optimization results under different uncertain radius of source and load

不确定半径/%		场景 1 优化结果			场景 2 优化结果		
源	荷	购电成本/元	运行成本/元	碳排量/kg	购电成本/元	运行成本/元	碳排量/kg
–10	–10	3720.03	17 450.10	14 002.36	3410.29	17 376.19	12 397.22
–5	–5	4932.44	18 121.21	15 481.67	4523.20	18 066.33	13 359.10
0	0	6146.23	18 749.65	16 965.54	5679.63	18 367.91	14 526.99
5	5	7441.87	19 396.19	18 545.55	6927.78	18 882.40	15 839.10
10	10	8785.03	19 948.58	20 181.45	8223.72	19 325.23	17 187.62

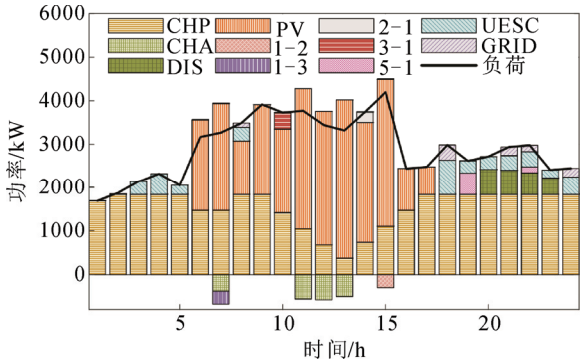


图 8　场景 3 学校 IES 电功率平衡图

Fig.8　College IES electric balance in scenario 3

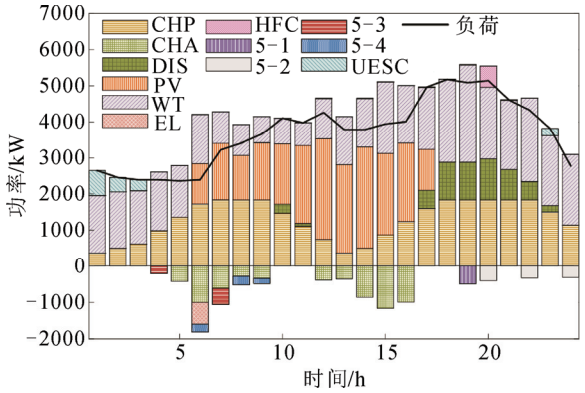


图 9　场景 3 工业 IES 电功率平衡图

Fig.9　Industry IES electric balance in scenario 3

表 2　学校 IES 不同场景下的优化结果

Table 2　Different scenarios optimization of college IES

参数名称	数值		
	场景 1	场景 2	场景 3
发电制热成本/元	18 749.65	18 367.91	18 255.62
上级购电成本/元	6146.23	1181.28	996.55
UESC 购电成本/元	—	4498.35	2993.70
IES 购电成本/元	—	—	373.42
购热成本/元	2652.02	2826.00	2943.33
碳交易成本/元	2316.69	1323.66	785.93
总运行成本/元	29 864.59	28 197.20	26 348.55
碳排量/kg	16 965.54	14 526.99	13 134.55
超额碳排量/kg	6840.58	4508.58	2914.96

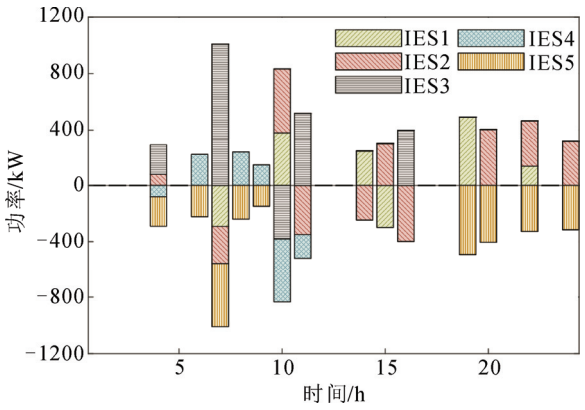


图 10　下层 IES 电功率互济图

Fig.10　Lower layer IES electric complementarity diagram

时段充电，在 20:00—23:00 的晚间用电高峰期放电。在 00:00—06:00 和 18:00—19:00 两时段蓄电池不放电，学校 IES 以谷价向上级购电，补充功率缺额。

与场景 2 相比，IES 从城市能源网和 UESC 的购能有所减少。场景 3 引入下层 IES 之间的能量互济，以学校 IES 为例，不同场景下的优化结果如表 2 所示。总运行成本分别较场景 1、场景 2 减少 3516.04、1667.39 元，降低了 11.773%、5.583%。系统碳排量分别较场景 1、场景 2 减少 3830.99、1392.44 kg，与下层 IES 交互收益 132.59 元。下层 IES 之间的能量互补优化调度情况如图 10 所示。场景 3 优化调度策略不仅提高了系统运行的经济环保性，也提升了系统交易策略的灵活性。

分布式求解过程中，交换信息仅为期望互济功率，各 IES 在场景 3 传递的信息量较场景 2 分别降低 35.09%、22.69%、29.91%、15.58%，对工业 IES 的影响可忽略不计。通过区域分散自治和 UESC 供能系统运营商集中协调相结合的方式，实现资源互济，减少与上层的通信需求和负担，保护 IES 的运行隐私，提高计算效率。

3）场景 4 优化结果分析

以医院 IES 为例，仿真分析某典型日下应急 IES 的救援功能如图 11 所示。08:00 时 CHP 机组故障，医院 IES 离网并与下层 IES 集群解耦。应急 IES 切断自身可时移、中断负荷，蓄电池放电，为医院 IES 无偿供电。10:00 时医院 IES 机组故障解除，系统重新耦合。应急 IES 的供能过程不涉及碳交易，故障 IES 若仍有功率缺额，则向 UESC 购电。引入应急 IES 可提高城市多能系统的韧性水平，在城市 IES 灵活互济的基础上增强其风险应对能力。

6　结论

本文构建城市多能区域 IES 间电/热互济互补的双层多场景分布式协同优化调度模型，结合辽宁某城区冬季典型日负荷数据进行仿真分析，得出结论如下：

1）采用阶梯式定价机制，开展 IES 集群多边

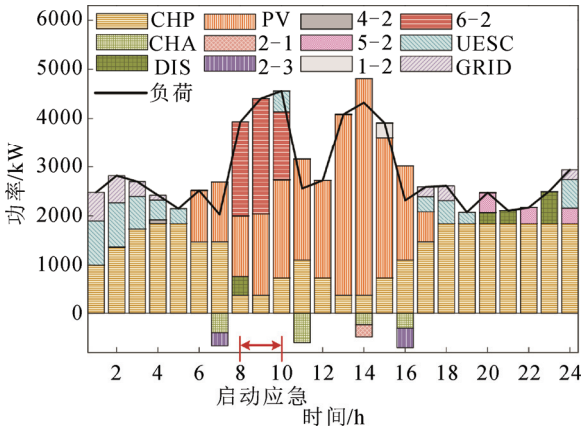


图 11 场景 4 医院 IES 电功率平衡图

Fig.11 Hospital IES electric balance in scenario 4

碳交易，引导碳共享。场景 3 算例所得系统碳排量分别较场景 1、场景 2 减少 14.37%、22.58%，对碳排放的约束力更强，具有良好的环境效益。

2）研究 UESC-IES 间的优化调度策略，协调储能充、放电情况与供、需两侧的能量互济互补。单个 IES 主体的发电制热成本、购能总成本最高可分别降低 2.63%、16.95%，有效提高了系统运行的经济性、灵活性。

3）面对机组突发故障、重要负荷失电等情况，故障 IES 进入孤岛运行状态，调用应急 IES 作为后备保障电源，规避重要用户的停电风险，保证故障范围不扩大、不越级，有效提升了城市多能系统的韧性和风险控制能力。

后续研究工作将考虑城市 IES 集群中多类型负荷耦合特性及参与多时间尺度需求响应情况，围绕投资和运维成本等考虑共享储能电站参与城市多微网联合运行的建设场景和交易模式，进一步构建不同场景下城市多能系统的分布式优化运行模式。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] LIU N, TAN L, SUN H N, et al. Bilevel heat-electricity energy sharing for integrated energy systems with energy hubs and prosumers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3754-3765.

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] 滕 云，刘 硕，回 茜，等. 考虑区域多能源系统集群协同优化的联合需求侧响应模型[J]. 中国电机工程学报，2020，40(22)：7282-7295.
TENG Yun, LIU Shuo, HUI Qian, et al. Integrated demand side response model considering collaborative optimization of regional multi-energy system clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7282-7295.

[4] KARIMI H, JADID S. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: a stochastic multi-objective framework[J]. Energy, 2020, 195: 116992.

[5] 黄武靖，张 宁，董瑞彪，等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5425-5437.
HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437.

[6] 张淑婷，陆 海，林小杰，等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.

[7] 王守相，吴志佳，庄 剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报，2017，37(24)：7185-7194.
WANG Shouxiang, WU Zhijia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194.

[8] 林顺富，刘持涛，李东东，等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报，2020，40(5)：1409-1420.
LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1409-1420.

[9] 王 凯，延肖何，蒋 凯，等. 考虑碳交易的风光储场站参与电力现货市场报价策略与调控方法[J/OL]. 中国电机工程学报，2022 [2023-05-11]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221117.
WANG Kai, YAN Xiaohe, JIANG Kai, et al. The bidding strategy and regulation method for the unified wind/photovoltaic/energy storage power stations in electricity spot market considering carbon trading[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022[2023-05-11]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221117.

[10] 张 刚，张 峰，张 利，等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5490-5499.
ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.

[11] 魏震波，魏平桉，郭 毅，等. 考虑需求侧管理和碳交易的电–气互联网络分散式低碳经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：33-44.
WEI Zhenbo, WEI Ping'an, GUO Yi, et al. Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 33-44.

[12] 陈锦鹏，胡志坚，陈嘉滨，等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3094-3104.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3104.

[13] 张晓辉，刘小琰，钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电–热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报，2020，40(19)：6132-6141.

ZHANG Xiaohui, LIU Xiaoyan, ZHONG Jiaqing. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6141.

[14] 夏世威，邹唯薇，张　茜，等. 基于交替方向乘子法的电力系统分散式经济调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(6)：100-106.
XIA Shiwei, ZOU Weiwei, ZHANG Qian, et al. Decentralized economic dispatch for power system based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 100-106.

[15] 王　程，刘　念. 基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度[J]. 电网技术，2016，40(9)：2675-2681.
WANG Cheng, LIU Nian. Distributed optimal dispatching of interconnected microgrid system based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2675-2681.

[16] 王　皓，艾　芊，吴俊宏，等. 基于交替方向乘子法的微电网群双层分布式调度方法[J]. 电网技术，2018，42(6)：1718-1725.
WANG Hao, AI Qian, WU Junhong, et al. Bi-level distributed optimization for microgrid clusters based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1718-1725.

[17] 张儒峰，姜　涛，李国庆，等. 考虑电转气消纳风电的电–气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报，2018，38(19)：5668-5678.
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678.

[18] YI Z K, XU Y L, ZHOU J G, et al. Bi-Level programming for optimal operation of an active distribution network with multiple virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2855-2869.

[19] 乔学博，杨志祥，李　勇，等. 计及两级碳交易和需求响应的多微网合作运行优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2573-2583.
QIAO Xuebo, YANG Zhixiang, LI Yong, et al. Optimization strategy for cooperative operation of multi-microgrids considering two-level carbon trading and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2573-2583.

[20] 郭明萱，穆云飞，肖　迁，等. 考虑电池寿命损耗的园区综合能源电/热混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化，2021，45(13)：66-75.
GUO Mingxuan, MU Yunfei, XIAO Qian, et al. Optimal configuration of electric/thermal hybrid energy storage for park-level integrated energy system considering battery life loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 66-75.

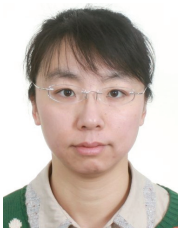
[21] 刘健辰，刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术，2018，42(8)：2604-2611.
LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and Big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.

[22] MOLZAHN D K, DÖRFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.

[23] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends® in Machine Learning, 2011, 3(1): 1-122.

[24] 赵依茗，彭道刚，徐春梅，等. 计及奖惩阶梯型碳交易和源荷不确定性的综合能源调度研究[J/OL]. 电测与仪表，2022[2023-05-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220721.1542.006.html.
ZHAO Yiming, PENG Daogang, XU Chunmei, et al. Research on integrated energy dispatch with a reward and punishment ladder-ytpe carbon trading and source load uncertainty[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022[2023-05-11]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH. 20220721.1542.006.html.

[25] 崔　杨，曾　鹏，仲悟之，等. 考虑阶梯式碳交易的电–气–热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备，2021，41(3)：10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.



刘鑫蕊(通信作者)
1981—，女，博士，教授
主要从事电网信息物理系统、配电网故障分析及自愈控制、综合能源系统优化控制等研究
E-mail:liuxinrui@ise. neu.edu.cn

LIU Xinrui
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-03-03　修回日期　2023-05-24　　编辑　程子丰

附录 A

信息流建模及其定量计算方法如式(A1)—式(A13)所示。系统内部某一节点的信息量和流量守恒分别表示为：

$$F(t)=vD(t) \tag{A1}$$

$$F_{\text{in}}(t)+F_{\text{co}}(t)=F_{\text{dr}}(t)+F_{\text{out}}(t) \tag{A2}$$

式中：v 为信息流速；$D(t)$ 为信息延时；$F_{\text{in}}(t)$ 表示节点信息流入量；$F_{\text{co}}(t)$ 表示转发过程中的信息复制量；$F_{\text{dr}}(t)$ 表示该节点的信息丢弃量；$F_{\text{out}}(t)$ 表示信息输出量。

城市多能网络中共有 d 个信源点位，可表示为

$$d=\sum_{i=1}^{M}m_i \tag{A3}$$

将 t 时刻触发独立信源的发送频率排列在向量 $\boldsymbol{F}_{d\times1}(t)$ 中

$$\boldsymbol{F}_{d\times1}(t)=\begin{bmatrix}v_1 & v_2 & \dots & v_d\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{A4}$$

报文长度放在矢量 $\boldsymbol{S}_{d\times1}(t)$ 中

$$\boldsymbol{S}_{d\times1}(t)=\begin{bmatrix}s_1 & s_2 & \dots & s_d\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{A5}$$

UESC 和所有 IES 信息端口之间的物理连接关系用矩阵 $\boldsymbol{A}_{p\times p}$ 表示

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_{p\times p}=\left[a_{ij}\right]\\ a_{ij}=\begin{cases}1, & \text{端口}i\text{与端口}j\text{物理连接}\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\end{cases} \tag{A6}$$

将城市多能信息网络划分成 $e(e\le6)$ 个广播域，使用 q 个传输端口，广播域和端口之间的关系用矩阵 $\boldsymbol{W}_{e\times q}$ 表示

$$\begin{cases}\boldsymbol{W}_{e\times q}=\left[w_{ij}\right]\\ w_{ij}=\begin{cases}1, & \text{端口}j\text{属于广播域}i\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\end{cases} \tag{A7}$$

所有 IES 的物理端口之间的逻辑或虚拟连接关系用矩阵 $\boldsymbol{L}_{p\times p}$ 表示

$$\begin{cases}\boldsymbol{L}_{p\times p}=\left[l_{ij}\right]\\ l_{ij}=\begin{cases}1, & \text{端口}i\text{与端口}j\text{逻辑相连}\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\end{cases} \tag{A8}$$

通过矩阵 $\boldsymbol{R}_{n\times p}$ 定义信息的传输路径

$$\boldsymbol{R}_{n\times p}=\left[r_{ij}\right] \tag{A9}$$

采用递归方法获取信息传输路径矩阵的参数。$\boldsymbol{R}^{(0)}$ 指示由信源注入确定的信息传输路径的初始状态；$\boldsymbol{R}^{(2u-1)}$ 指示通过向上 u 级交换机的物理路径；$\boldsymbol{R}^{(2u)}$ 指示通过向上 u 级交换机的逻辑路径。

$$\begin{cases}\boldsymbol{R}^{(1)}=-\boldsymbol{R}^{(0)}\boldsymbol{A}_{p\times p}\\ \boldsymbol{R}^{(2u)}=-\boldsymbol{R}^{(2u-1)}\boldsymbol{L}_{p\times p}\\ \boldsymbol{R}^{(2u+1)}=-\boldsymbol{R}^{(2u)}\boldsymbol{A}_{p\times p}\end{cases} \tag{A10}$$

路径矩阵的最终结果为

$$\boldsymbol{R}=-\boldsymbol{R}^{(0)}+2\boldsymbol{R}^{(1)}+\sum_{k=1}^{m}(2u+1)\boldsymbol{R}^{(2u)}+\sum_{k=1}^{m}(2u+2)\boldsymbol{R}^{(2u+1)} \tag{A11}$$

得到信息和端口的关联模型

$$\begin{cases}\boldsymbol{P}_{p\times d}=(p_{ij})\\ p_{ij}=\begin{cases}s_j, & \text{端口}i\text{输入报文}j\\ -s_j, & \text{端口}i\text{输出报文}j\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\end{cases} \tag{A12}$$

根据矩阵 $\boldsymbol{P}_{p\times d}$，可得到系统通信网络中所有设备端口输入输出流量表示为

$$\boldsymbol{N}_{p\times1}=\boldsymbol{P}_{p\times d}\boldsymbol{F}_{d\times1} \tag{A13}$$

附录 B

表 B1　IES 电、热网节点及其机组容量配置

Table B1　IES power-heat network node and unit capacity configuration

功能 IES	电网节点	热网节点	风机 /kW	光伏 /kW	CHP /kW	蓄电池 /kWh	GB /kW
学校	12	1	—	500	2000	1200	800
医院	22	3	—	500	2000	1200	800
住宅	16	4	—	500	2000	1200	800
商业	19	12	—	500	2000	1200	800
工业	17	23	1000	500	2000	1200	800
应急	18	32	1000	500	2000	1200	800

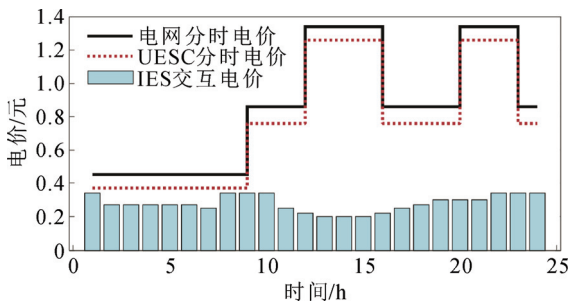


图 B1　分时电价

Fig.B1　Time-of-use power price