

# 考虑云储能的多区互联综合能源系统规划

胡程平<sup>1</sup>, 范明<sup>1</sup>, 刘艾旺<sup>2</sup>, 施云辉<sup>3\*</sup>

1. 国网浙江省电力有限公司嘉兴市供电公司, 浙江省 嘉兴市 314033;
2. 国网浙江省电力有限公司海盐县供电公司, 浙江省 嘉兴市 314399;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## Multi-Area Interconnected Integrated Energy System Planning Considering Cloud Energy Storage

HU Chengping<sup>1</sup>, FAN Ming<sup>1</sup>, LIU Aiwan<sup>2</sup>, SHI Yunhui<sup>3\*</sup>

1. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314033, Zhejiang Province, China;
2. Haiyan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314399, Zhejiang Province, China;
3. Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**摘要:**【目的】为促进储能和用户侧资源高效利用, 提高清洁能源消纳水平, 提出了一种考虑云储能的多区互联综合能源系统规划模型。【方法】在建立区域综合能源系统能源枢纽的基础上, 提出了考虑电/热/气云储能的能源枢纽模型。针对云储能与综合能源系统分属不同投资主体的问题, 考虑云储能投资回报年限约束, 提出了双主体两阶段规划模型: 第一阶段对网架、设备容量以及云储能使用价格进行规划; 第二阶段对综合能源系统的运行策略进行优化。针对多能流网架规划复杂度高的问题, 提出了基于最小生成树的预筛选算法。【结果】对某三园区综合能源系统规划的算例分析结果表明, 所提模型有助于提高能效、降低碳排、提高互连综合能源系统的经济效益。【结论】研究成果揭示了云储能与多区域综合能源系统协同规划的潜力, 并为多类型储能能源领域的深度应用和商业推广提供参考。

**关键词:** 综合能源系统; 能源互联网; 云储能; 能量路由器; 两阶段随机规划

**ABSTRACT:** [Objectives] In order to promote the efficient utilization of energy storage and user-side resources and improve the level of clean energy consumption, a multi-area interconnected integrated energy system planning model considering cloud energy storage was proposed. [Methods] On the basis of establishing the energy router model of the regional integrated energy system, a virtual energy router

model considering electricity/heat/gas cloud energy storage was proposed. Aiming at the problem that cloud energy storage and integrated energy system belong to different investment entities, considering the limitation of the investment return period of cloud energy storage, a dual-subject two-stage planning model was proposed. In the first stage, the grid, equipment capacity and cloud energy storage price were planned. In the second stage, the operation strategy of the integrated energy system was optimized. Aiming at the high complexity of multi-energy flow grid planning, a pre-screening algorithm based on minimum spanning tree was proposed. [Results] The example analysis results of a three-park integrated energy system planning show that the proposed model is helpful to improve energy efficiency, reduce carbon emissions, and improve the economic benefits of interconnected integrated energy systems. [Conclusions] The research reveals the potential of collaborative planning between cloud energy storage and multi-area integrated energy systems, and provides reference for the in-depth application and commercial promotion of multi-type energy storage in the energy field.

**KEY WORDS:** integrated energy system; energy internet; cloud storage system; energy router; two-stage stochastic programming

## 0 引言

在能源互联网环境下, 我国能源供给形式逐渐由分立的供能系统演变为综合能源系统(integrated energy system, IES), 其在满足各类型

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007173)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52007173).

能量需求的同时提高了整体经济性、环保性、可靠性<sup>[1-6]</sup>。IES的规划通常分为两类，一类是单区域IES规划，主要面向产业园区、住宅楼宇等主体开展供能系统规划。目前该领域相关研究较多，如：文献[7]讨论了影响综合能源系统建模的因素及其实用性，并提出了一种多时间尺度规划模型；文献[8]考虑了多能源储能设备，提出了用户侧的能源枢纽(energy hub, EH)规划模型；文献[9]对含冷热电负荷的楼宇IES进行规划，并考虑了储电、储热、储冰多类型储能；进一步地，文献[10]在IES的规划模型中考虑了需求侧响应。另一类是多区域综合能源系统(multi-area integrated energy system, MA-IES)规划，相较于单区域IES规划，其可实现不同资源禀赋园区的互补及更大时空范围内的资源优化配置<sup>[11-13]</sup>。在该研究领域，文献[14]提出了多能源枢纽最优扩展规划模型，以最大化投资收益；文献[15]基于多智能体博弈模型，求解了考虑配网与MA-IES的协同规划问题；文献[16]基于能量广域网的概念，采用虚拟能源枢纽(virtual energy hub, VEH)对MA-IES进行建模，并对MA-IES的VEH容量进行规划。然而MA-IES各区域间通过电、热、气等多能流网络连接，其网架形式相较于单一供能系统更为复杂，目前针对MA-IES的高效路径优化算法鲜见报道。

随着随机性新能源接入的占比提升，储能能在IES规划问题中的作用凸显<sup>[17-18]</sup>。文献[19-20]研究了考虑电/气/冷/热等多种储能的IES规划问题，论证了储能装置在较高比例的新能源接入场景下具备经济性。然而，储能的投资运维成本高，对于园区级的IES往往难以承受。随着共享经济理念的流行，云储能这一商业模式受到关注<sup>[21-23]</sup>。相比于用户分散的投资自建储能，云储能运营商可以集中投建储能，使用户共享储能，实现储能规模化管理，通过规模效应、信息优势和用户需求时空互补，实现整体成本的降低<sup>[24]</sup>。文献[25]综述了云储能的运行机制和商业模式，并提出了建设云储能的关键问题。文献[26]以投资成本最小为目标，提出了一种云储能容量优化配置方法。文献[27]通过虚拟电厂实现云储能的能量信息交互，并基于主从博弈理论设计了一种能源共享运营机制，建

立了能源产消者与云储能运营商的非合作博弈模型。文献[28]提出了发电侧的云储能商业模式，分析了其对参与电厂调峰、调频性能的提升。然而，现有研究大多局限于云储能自身的规划，云储能与IES协同规划的研究仍然较为欠缺。

针对以上问题，本文提出云储能与MA-IES的联合规划模型，针对云储能与IES分属不同投资主体，考虑云储能投资回报年限约束，提出双主体两阶段规划模型，并基于最小费用最大流的预筛选算法，解决多能流网络路径规划高复杂度的难题。最后，通过算例分析验证所提模型的有效性。

## 1 考虑云储能的能源枢纽建模

### 1.1 云储能商业模式

云储能是共享经济商业模式在电网储能资源配置中的应用，其基本架构如图1所示。云储能系统可以分为云储能运营商与云储能用户。云储能运营商是云储能物理设施的拥有者，通过虚拟化技术将储能的份额动态分配给用户。云储能用户可以向云储能运营商购买云储能服务，根据服务类型的不同，可以分为买断制与按量收费制。其中，买断制一次性购买一定功率容量和一定能量容量的云端虚拟储能，而按量收费制则是根据实际的使用量来收费，本文主要研究后者。

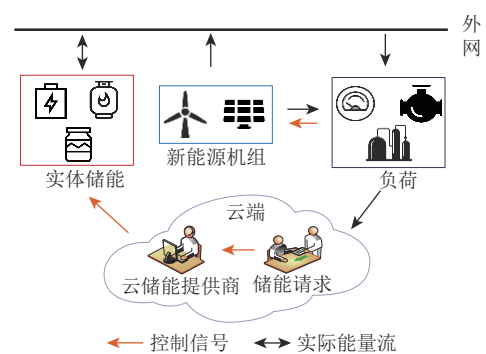


图1 云储能基本架构

Fig. 1 Basic architecture of cloud energy storage

云储能运营商与用户通过实时信息交互实现双向通信，通过能源网络实现物理连接和能量传递。由于云储能运营商可以充分利用规模效应和时空互补，使得投建的储能容量可以小于各用户单独投资之和，从而构成了云储能运营商和用户

之间的互利空间。此外，由于云储能的充分使用，负荷曲线可以更为平滑，新能源可以就地消纳，具有提高机组利用率、节能环保的良好外部效益。

### 1.2 考虑云储能的MA-IES能源枢纽

能源枢纽是描述IES中不同形式能源输入-输出关系的接口，使用能源枢纽对IES进行建模，可以很好地对多能互补进行分析。本文在传统的能源枢纽基础上，提出了考虑云储能的MA-IES能源枢纽，结构如图2所示。其中，云储能运营商控制实体储能，实体储能与用户之间通过外部网络进行能量弱耦合，用户可以根据自身的充放电需求，向所在区域能源枢纽的关口进行等效充放电，云储能提供商根据用户传递的控制信号，镜像地对实体储能进行相应操作。通过以上方式，可实现云储能运营商与用户的双向连接。

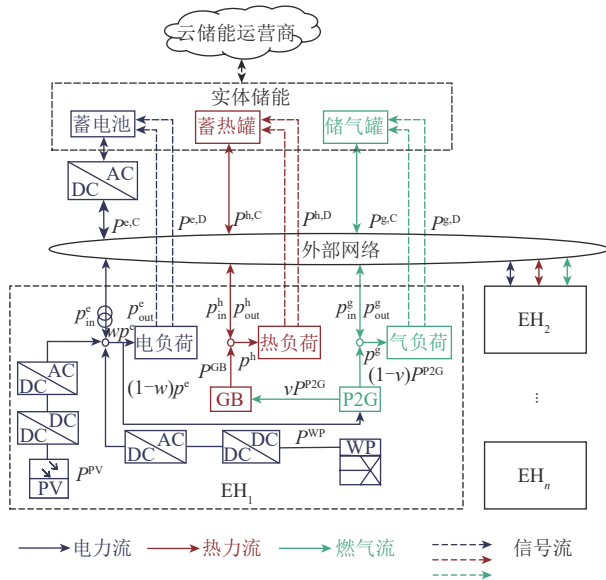


图2 电/热/气耦合云储能能源枢纽结构

Fig. 2 Electric/heat/gas coupling cloud energy storage energy hub structure

在每个园区，其能源枢纽的主要结构和能量流动路线如下：

1) 用电、用热、用气关口注入园区的功率分别为  $P_{in}^e$ 、 $P_{in}^h$ 、 $P_{in}^g$ ，园区返送的功率分别为  $P_{out}^e$ 、 $P_{out}^h$ 、 $P_{out}^g$ 。

2) 园区自身的电、热、气负荷分别为  $P^e$ 、 $P^h$ 、 $P^g$ 。

3) 用户根据各类能源的价格对云储能设备进行充放电，其中，电、热、气充能功率分别为

$P^{e,C}$ 、 $P^{h,C}$ 、 $P^{g,C}$ ，电、热、气放能功率分别为  $P^{e,D}$ 、 $P^{h,D}$ 、 $P^{g,D}$ 。

4) 园区内部自建光伏和风机，其功率分别用  $P^{PV}$  和  $P^{WP}$  表示。其中，新能源出力一部分直接供给电负荷，剩余电力通过能量转换装置转换为气或热，供气负荷或热负荷使用。

5) 园区内部的主要能量转换装置包括电转气设备和燃气锅炉，其效率分别为  $\eta^{P2G}$ 、 $\eta^{GB}$ 。选择电转气(power to gas, P2G)作为电-气-热转化的原因如下：一是工业园区前期往往通过燃气锅炉供应高温蒸汽，采用P2G可以利用原有供热管网，从而减少投资；二是P2G不仅可以用作供热，还可以用作天然气源，灵活性更强。此外，在用户侧还可以装设热泵、电制冷设备，满足采暖、热水和夏季空调等需求。

6) 云储能运营商所控制的物理储能包括电储能、蓄热罐、储气罐3种储能设备。通过用户给定的信号进行充放电操作。

## 2 MA-IES两阶段规划模型

### 2.1 两阶段规划模型

MA-IES规划的目标函数是使总体年运行成本最小化，其中，总体年运行成本包含园区级EH的运行成本  $C_{EH}$  和园区间网络的建设成本  $C_{net}$ ，表示为

$$C = C_{net} + \sum_{j=1}^k P_{ITV_j} C_{EH} \quad (1)$$

式中  $P_{ITV_j}$  表示第  $j$  个场景出现的概率。

园区级EH的运行成本  $C_{EH}$  由设备建设成本  $C_{con}$ 、购能成本  $C_{pur}$ 、运维成本  $C_{maint}$  和环境成本  $C_{envir}$  构成，表示为

$$C_{EH} = C_{con} + C_{pur} + C_{maint} + C_{envir} \quad (2)$$

各项成本分别表示如下：

$$C_{con} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_E} k_{i,j}^{conv} E_{i,j}^{conv} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_P} k_{i,j}^{pro} E_{i,j}^{pro} \quad (3)$$

$$C_{pur} = \sum_{i=1}^N (k_{P,i}^{pur} P_i^{pur} + k_{H,i}^{pur} H_i^{pur} + k_{G,i}^{pur} G_i^{pur}) \quad (4)$$

$$C_{maint} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_E} \rho_{i,j}^m P_{i,j}^{conv} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_P} v_{i,j}^m P_{i,j}^{pro} \quad (5)$$

$$C_{\text{envir}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_p} v_{ij}^e P_{ij}^{\text{pro}} \quad (6)$$

式中： $M_E$ 、 $M_P$ 分别为能量转换设备和能量生产设备的数量； $N$ 为园区级EH的数量； $E_{ij}^{\text{conv}}$ 、 $E_{ij}^{\text{pro}}$ 分别为第*i*个EH中第*j*个能量转换、生产设备的容量； $k_{ij}^{\text{conv}}$ 、 $k_{ij}^{\text{pro}}$ 分别为第*i*个EH中第*j*个能量转换、生产设备的单位造价； $P_i^{\text{pur}}$ 、 $H_i^{\text{pur}}$ 、 $G_i^{\text{pur}}$ 分别为第*i*个EH的购电量、购热量、购气量； $k_{P,i}^{\text{pur}}$ 、 $k_{H,i}^{\text{pur}}$ 、 $k_{G,i}^{\text{pur}}$ 分别为第*i*个EH的购电、购热、购气价格，为简化表述，本文中略去时段*t*，实际应用中价格与时段*t*、园区类型有关； $\rho_{ij}^m$ 、 $v_{ij}^m$ 分别为第*i*个EH中第*j*个能量转换、生产设备的单位运维成本； $P_{ij}^{\text{conv}}$ 、 $P_{ij}^{\text{pro}}$ 分别为第*i*个EH中第*j*个能量转换、生产设备的输出功率； $v_{ij}^e$ 为第*i*个EH中第*j*个能量生产设备的单位功率碳排放成本。

园区间网络的建设成本 $C_{\text{net}}$ 表示为

$$C_{\text{net}} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (k_p^{\text{net}} l_{ij}^p \pi_{ij}^p + k_h^{\text{net}} l_{ij}^h \pi_{ij}^h + k_g^{\text{net}} l_{ij}^g \pi_{ij}^g) \quad (7)$$

式中： $\pi_{ij}^p$ 、 $\pi_{ij}^h$ 、 $\pi_{ij}^g$ 分别为第*i*、*j*个EH之间存在电、热、气连接的0-1变量； $l_{ij}^p$ 、 $l_{ij}^h$ 、 $l_{ij}^g$ 分别为第*i*、*j*个EH之间电、热、气连接管线的长度； $k_p^{\text{net}}$ 、 $k_h^{\text{net}}$ 、 $k_g^{\text{net}}$ 分别为电、热、气连接管线的单位造价。

由于园区在运行中调用云储能所付出的服务费是云储能投资商的收益，为了保证云储能投资商能够在投资年限内收回成本，从而使得规划方案对其有吸引力，引入以下约束：

$$\sum_{t=1}^{T_{\text{CES}}} \left[ \frac{F_{L,t}}{(1+\Pi)^{t-1}} \sum_{i=1}^N C_{\text{CES}}^i p_i^{\text{CES}^t} \right] \geq \sum_{i=1}^N V_{\text{CES}}^i n_i^{\text{CES}} \quad (8)$$

式中： $F_{L,t}$ 为第*t*年的负荷比例系数； $\Pi$ 为贴现率； $C_{\text{CES}}$ 为云储能的服务费； $T_{\text{CES}}$ 为云储能投资商期望达到的投资回收年限； $p_i^{\text{CES}^t}$ 为第*i*个EH调用的云储能充/放能功率； $V_{\text{CES}}$ 为云储能的单位造价； $n_i^{\text{CES}}$ 为云储能在第*i*个EH的投建容量。

此外，MA-IES的规划还受到设备容量、运行工况等约束的限制，在此不再赘述。

## 2.2 最小生成树算法

MA-IES规划中的网架规划需要满足以下要求：1) 确保能源和负荷之间的连通；2) 尽量减少MA-IES的运行成本；3) 最小化不确定场景下

的平均成本。最小生成树算法是一种经典的运筹优化算法，广泛用于物流、计算机网络等领域<sup>[29]</sup>。本文将最小生成树算法扩展到能量网络。

任何负荷和源之间至少有一条路径连通，MA-IES的连通性约束表示如下：

$$\Pi_i \geq 1, \forall i \in S_{X, \text{source}} \quad (9)$$

$$\Pi_i = \sum_{j \in S_{X, \text{load}}} \pi(i, j), i \in S_{X, \text{source}} \quad (10)$$

式中： $\pi(i, j)$ 是0-1变量，1、0分别表示源*i*和负载*j*连通、不连通； $\Pi_i$ 表示电源*i*与负荷连通的数目； $S_{X, \text{source}}$ 、 $S_{X, \text{load}}$ 分别表示电源、负荷节点集合。

所有满足约束(9)和(10)的网络构成MA-IES拓扑结构的候选集 $S_{\text{net}}$ 。在本文中，通过路径优化算法确定 $S_{\text{net}}$ ，并在 $S_{\text{net}}$ 中进一步确定某一最优的拓扑结构 $N_k$ ，使其满足目标函数 $R$ ，如式(11)–(13)所示。

$$R = \arg \min_{N_k \in S_{\text{net}}} C_{N_k} \quad (11)$$

$$C_{N_k} = C_{\text{net}} + \sum C_{\text{EH}_i} \quad (12)$$

$$C_{\text{EH}_i} = \sum_{j \in S_{\text{scenario}}} P_{\text{ITV}_j} C_{\text{EH}_{i,j}} \quad (13)$$

式中： $C_{N_k}$ 为拓扑结构 $N_k$ 对应的总成本，包括该网络的建设成本 $C_{\text{net}}$ 和其中所有EH的运行成本之和 $\sum C_{\text{EH}_i}$ ， $C_{\text{EH}_i}$ 为第*i*个EH的运行成本，其受运行过程中不确定参数的概率分布影响； $S_{\text{scenario}}$ 为场景集； $C_{\text{EH}_{i,j}}$ 为第*i*个EH在第*j*个场景下的运行成本。

## 2.3 候选集筛选

对于含有*N*个区域的MA-IES规划问题，当采用穷举法时，候选集的元素个数指数爆炸，因此本文采用以下方法来减少网络的候选集规模。

将每个EH简化为节点，确定节点之间的直线距离，并给定EH之间的联络能流种类。由于工业园区和居民用户的大多数冷需求是通过就地制冷来满足的，因此本文不考虑供冷管道。构造电/热/气的节点集 $V_e$ 、 $V_h$ 、 $V_g$ ，将其定义为与其他EH有电/热/气联络的EH集合。将MA-IES解耦为电网、热网和天然气网，3个网架均需满足连通性约束。例如，在图3中，将一个5节点的MA-IES解耦为电网(A和B为电源，C、D、E为电负荷)、热网(B为热源，A和C为热负荷，D、E没有热量输入和

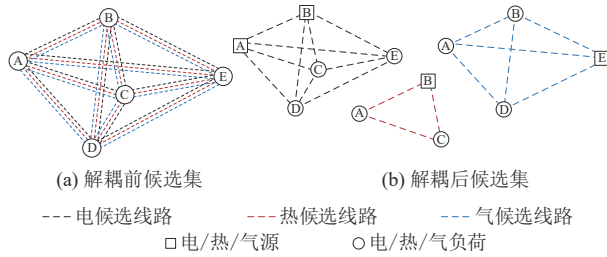


图3 MA-IES网络解耦

Fig. 3 MA-IES network decoupling

输出)和天然气网(E为气源, A、B、D为天然气负荷, C没有天然气输入和输出)。

MA-IES规划的任务之一是规划合理的网架。采用最小生成树算法可以生成总距离最短的能量传输路径, 使网络建设成本最小, 但不能保证总体成本最小。因此, 有必要对综合能量网络的候选集进行如下扩展。

对于一个具有 $n$ 个节点的电力网络, 最小生成树 $L_{min}$ 的元素个数为 $n-1$ , 而候选线路集 $L_c$ 的元素个数为 $n(n-1)/2$ , 分别表示如下:

$$L_{min} = \{l_{s_1}, l_{s_2}, \dots, l_{s_{n-1}}\} \quad (14)$$

$$L_c = \{l_1, l_2, \dots, l_{n(n-1)/2}\} \quad (15)$$

在 $L_c$ 去除 $L_{min}$ 中某条线路 $x$ 之后所生成的最小生成树表示为

$$L_{min,x} = \phi(L_c, x), x \in L_{min} \quad (16)$$

$S(V_e, L_c)$ 、 $S(V_h, L_h)$ 、 $S(V_g, L_g)$ 分别表示电、热、气网络最小生成树集合, 即电/热/气网络拓扑结构的候选集, 表示为

$$S(V_e, L_c) = S(V_h, L_h) = S(V_g, L_g) = \{L_{min}, L_{min,l_1}, L_{min,l_2}, \dots, L_{min,l_{n-1}}\} \quad (17)$$

综上所述, MA-IES拓扑结构的候选集 $S_{net}$ 可以表示为电/热/气网络拓扑结构候选集的直积, 表达式为

$$S_{net} = S(V_e, L_c) \otimes S(V_h, L_h) \otimes S(V_g, L_g) \quad (18)$$

### 2.4 MA-IES规划求解算法

MA-IES规划的求解流程如图4所示, 分为粒子群算法主流程和2个子流程。子流程A通过最小生成树算法实现了网络集的约简, 子流程B给定网络拓扑、设备容量以及云储能服务费, 采用线性规划求解器求解园区各场景下的最优用能策略, 得到运行成本。

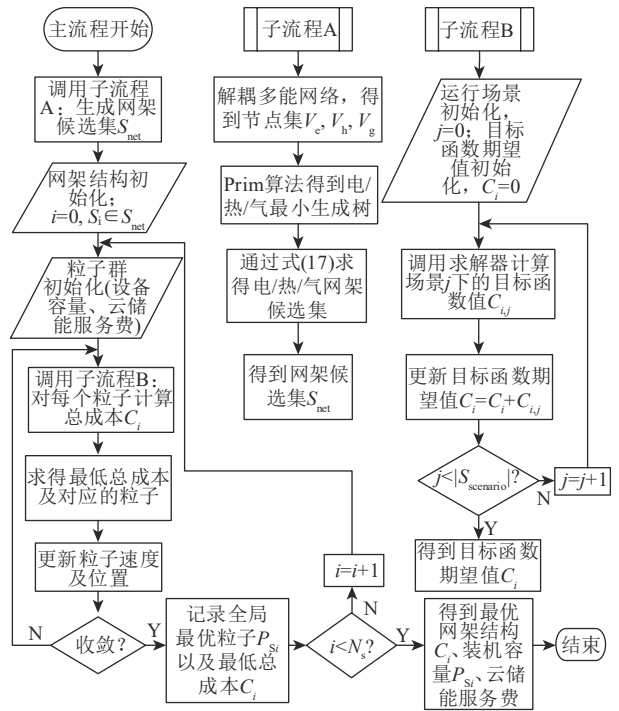


图4 MA-IES两阶段规划求解流程图

Fig. 4 Flow chart of two-stage planning of MA-IES

## 3 算例分析

### 3.1 算例设置

通过3个园区级IES与云储能的联合规划来验证所提模型。待规划MA-IES结构如图5所示。由于地理和气象条件的限制, 可再生能源的选址限定为园区1。另外, 由于可再生能源与储能形成天然的互补性, 云储能运营商控制的物理储能投资选址也选定为园区1。

园区1为生物质、风、光互补园区, 其一次能源为外来的垃圾、风能以及太阳能。由于每日

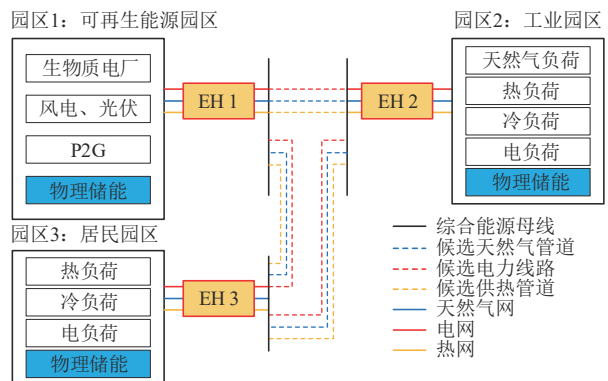


图5 待规划MA-IES结构

Fig. 5 MA-IES structure to be planned

的垃圾产生量基本为恒定值，因此可以预先规划园区1 投建 1 500 t/d 的垃圾填埋场，以及配套的 4 MW 生物质发电厂，以便利用外来垃圾生产电能、天然气和热能。同时，园区1 还拟投资 P2G 设备，以实现天然气和电能的灵活转换。园区2 为工业园区，具备电、热、冷、天然气4种负荷，其典型日负荷曲线如图6所示。园区3 为居民园区，其电、热、冷典型日负荷曲线如图7所示。园区1和园区2 所处区域为可再生能源富集区，光伏和风机的典型日发电曲线如图8所示。典型的电力、热能和天然气的日内价格如图9所示。规划设备经济性参数如表1所示。

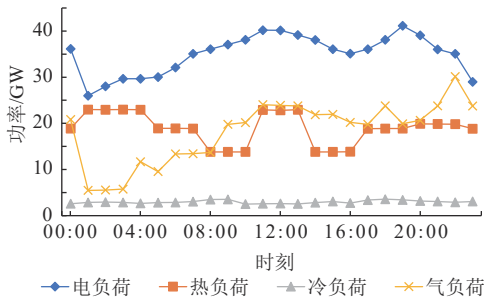


图6 工业园区电、热、冷、天然气典型日负荷曲线

Fig. 6 Typical daily load curves of electricity, heat, cold and natural gas in industrial park

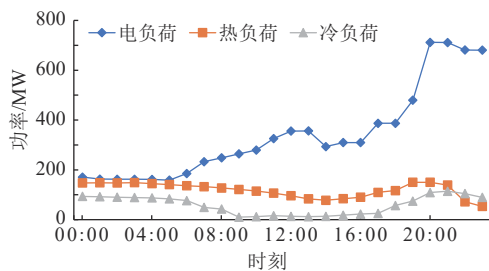


图7 居民园区电、热、冷典型日负荷曲线

Fig. 7 Typical daily load curves of electricity, heat and cold in residential park

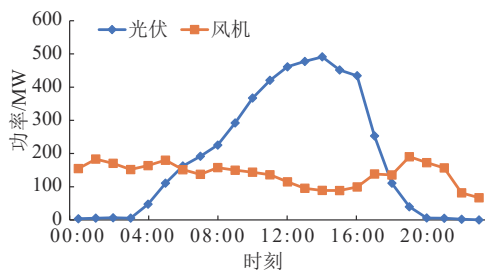


图8 可再生能源园区典型日发电曲线

Fig. 8 Typical daily power generation curves of renewable energy park

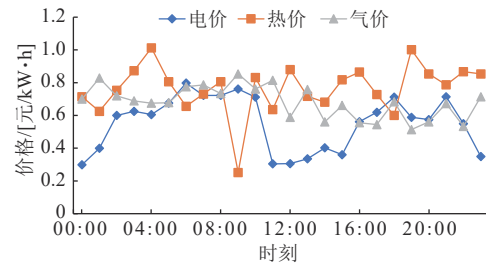


图9 典型电、热、天然气价格

Fig. 9 Typical electricity, heat and natural gas prices

表1 规划设备经济性参数

Tab. 1 Economic parameters of planning device

设备	建设成本	运维成本	可安装园区
垃圾填埋场	6.14 元/(t·d)	0.84 元/(t·d)	1
生物质电厂	4 000 元/kW	2.16 元/kW	1
P2G	7 527 元/kW	1.19 元/kW	1, 2
风机	8 050 元/kW	0.01 元/kW	1
光伏	7 808 元/kW	0.01 元/kW	2, 3
燃气轮机	4 000 元/kW	2.21 元/kW	2
燃气锅炉	303 元/kW	0.006 5 元/kW	2
热泵	1 180 元/kW	0.01 元/kW	2, 3
电制冷	983 元/kW	0.01 元/kW	2, 3
电储能	142.86 元/(kW·h)	0.000 27 元/(kW·h)	1, 2, 3
储热	600 元/(kW·h)	0.000 2 元/(kW·h)	1, 2, 3
储气	256 元/m <sup>3</sup>	0.000 2 元/m <sup>3</sup>	1, 2, 3

### 3.2 园区规划结果分析

表2展示了各园区的规划结果。在园区1中，除了生物质电厂之外，还规划了风机和P2G，容量分别为20 MW和5 MW。作为能源供应园区，园区1没有规划储能装置。在园区2中，总负荷高达21 MW，部分负荷可由园区1提供，其余通过

表2 规划后各设备选址和设计容量

Tab. 2 Location and design capacity of devices after planning

规划设备	设计容量		
	园区1	园区2	园区3
垃圾填埋场	1 685 t/d	—	—
生物质电厂	4.3 MW	—	—
风机	20 MW	—	—
光伏	—	5 MW	—
P2G	5 MW	500 kW	—
燃气轮机	—	—	—
燃气锅炉	—	16 MW	—
热泵	—	—	345 kW
电制冷	—	4.8 MW	250 kW
电储能	—	4.5 MW·h	—
储热	—	6.6 MW·h	3.5 MW·h
储气	—	5.8 万 m <sup>3</sup>	—

屋顶光伏提供，其装机容量为5 MW。在园区3中，没有建设供能设备，全部通过园区1供能。由于光伏建设成本较高，且园区3区域内日照资源匮乏，因此园区3内不安装光伏。在云储能投资方面，园区2和园区3安装了物理储能装置，这是因为储热、储气的调度会产生损耗，因此需要建设在距离负荷较近的地点。园区2储电、储热、储气容量分别为4.5 MW·h、6.6 MW·h、5.8万 m<sup>3</sup>。园区3中，储热容量为3.5 MW·h。

表3显示了MA-IES网架结构的规划结果，括号中的3个参数分别表示园区之间是否投建电能、热能和天然气的传输路径。在园区1、2之间投建电、热、气传输路径，在园区1、3之间建立连接到外部的传输路径，因为园区3仍然需要从外部购买电能、热能和天然气，而园区1需要向外出售能源。

表3 规划后能量传输路径  
Tab. 3 Energy paths after planning

EH	EH <sub>1</sub>	EH <sub>2</sub>	EH <sub>3</sub>
EH <sub>1</sub>	—	(1, 1, 1)	(1, 0, 0)
EH <sub>2</sub>	(1, 1, 1)	—	(0, 0, 0)
EH <sub>3</sub>	(1, 0, 0)	(0, 0, 0)	—

由于园区2、3的电负荷需要园区1提供，因此建设了从园区1到其余2个园区的供电线路。同时，园区2中也有部分天然气负荷依靠园区1提供，因此两者之间投建了天然气线路。园区2的热负荷从14 MW到18 MW不等。为了减少热负荷损失的风险和供热费用，在园区1、2之间建立了供热网络。同时，园区3还规划了热泵和储热装置，以提高供热的效率。

园区3不包含天然气源和天然气负荷，此外，园区3通过热泵和储热装置实现热量自给自足，因此不规划园区3与其余园区的供热管道，以减少热传输过程中的能量损失。园区之间没有冷网，园区2、3的冷负荷分别由4.8 MW和250 kW的内部电制冷提供。

### 3.3 云储能投资结果分析

图10为典型日用户对云端储能设备的充放能功率，其中正值表示充能功率，负值表示放能功率。用户在能源价格较低以及负荷低谷时段进行

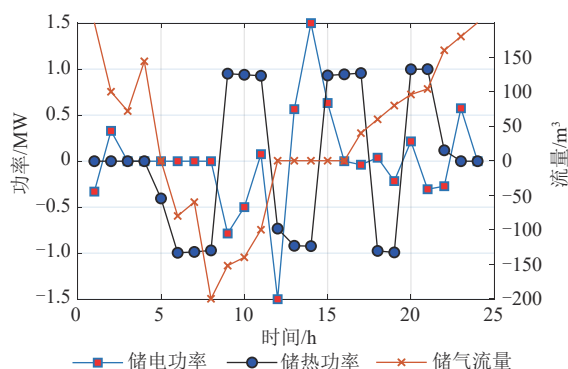


图10 云储能用户总充放能功率  
Fig. 10 Total charge and discharge power of cloud energy storage users

充能，在能源价格较高以及负荷高峰时段进行放能，从而尽可能降低自身购能成本，还在一定程度上对负荷曲线进行削峰填谷。

云储能投资经济性分析如图11所示，可以看出，随着云储能投资回报年限的缩短，云储能服务费上涨，导致用户年运行成本增加。当投资回报年限小于6年时，用户年运行成本不再变化，其原因是用户已没有调用云储能的意愿，其用能计划等同于不加装储能。因此，选择合适的投资回报年限有助于园区和云储能运营商之间达成投资共识。

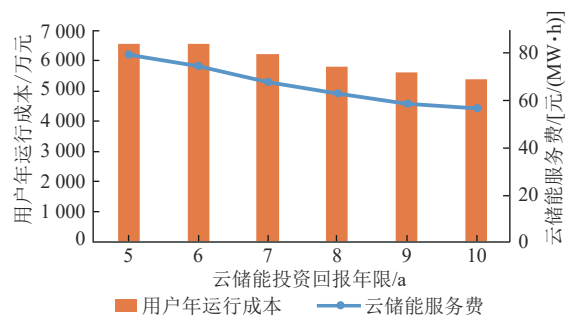


图11 云储能投资经济性分析  
Fig. 11 Economic analysis of cloud storage system

### 3.4 网架规划算法分析

首先，对3个园区进行独立规划，结果如表4所示。然后，采用所提算法对其进行联合规划，结果如表5所示。可以看出，采用联合规划具有明显的经济效益，尽管网架建设成本和设备维护成本有所增加，但能源购买费用大幅下降。联合规划后，园区1建设成本从54 685万元增加到

表4 独立规划结果

Tab. 4 Results of independent planning

园区	成本/万元			售能收益/万元	碳排放/(t/d)
	建设	运维	购能		
1	54 685	2 243	0	15 950	463.78
2	9 211	390	41 334	0	726.03
3	4 789	173	7 286	0	51.10

表5 联合规划结果

Tab. 5 Results of coordinated planning

园区	成本/万元			售能收益/万元	碳排放/(t/d)
	建设	运维	购能		
1	56 167	2 413	0	1 218	357.11
2	10 134	367	170	0	559.04
3	4 432	166	0	0	39.34

56 167万元，这是因为在各园区、P2G设备及园区1中的风机之间建立了网络，增加了建设成本；园区2、3的建设成本基本不变。园区1在向园区2、3提供能源后，仍有剩余能源向外网出售，整个MA-IES对外售能的收入为1 218万元。在独立规划中，园区2、3的能源购买费用为48 620万元，远高于园区1的售能收益15 950万元。在联合规

划后，园区2、3可通过直接从园区1购买低价能源，每年节省能源销售和购买成本高达3.3亿元；总建设成本仅增加2 028万元，总运维成本基本保持不变。

从环保的角度看，采用联合规划后，碳排放量从1 240 t/d减少到955 t/d。独立规划中碳排放量较大的主要原因是园区2、3增加了对外购电，其中燃煤发电比例较大。因此，联合规划提高了MA-IES的环境效益。

为了分析配置云储能在联合规划中的效果，还对3个园区进行联合规划，但不购买云储能服务，结果如表6所示。该方案尽管免除了云储能的服务费用，总计64万元，但由于园区间充放能缺乏云储能服务商的协同，导致总体的储能装机容量增加，其中电储能增加了2 MW·h，储热量增加了4.2 MW·h，储气量增加了1.6万m<sup>3</sup>，园区的建设成本增加了635万元，其余成本项变动较小。因此，购买云储能服务可以减少园区前期的投资成本，提高投资方案的经济性。

表6 云储能服务对联合规划结果的影响

Tab. 6 Impact of cloud storage service on coordinated planning results

是否购买云储能	储电量/(MW·h)	储热量/(MW·h)	储气量/万m <sup>3</sup>	成本/万元				售能收益/万元	碳排放/(t/d)
				建设	运维	服务	购能		
是	4.5	10.1	5.8	70 733	2 946	64	170	1 218	955.5
否	6.5	14.3	7.4	71 368	2 954	0	175	1 226	951.3

## 4 结论

针对多区互连的电、热、气综合能源系统，引入云储能的商业模式，构建了云储能与MA-IES的联合规划模型。针对云储能与IES分属不同投资主体的问题，考虑云储能投资回报年限约束，提出了双主体两阶段规划模型，并通过算例分析进行验证。具体结论如下：

1) 所提出的模型在实现多个园区级综合能源系统规划的同时，可以联合规划云储能的装机容量以及确立服务价格。

2) 相较于传统的自建储能模式，云储能商业模式能够有效降低用户侧储能的投资、建设规模，在减少资源浪费的同时提升了用户的用能效益。

## 参考文献

- [1] 黄彦彰, 周宇昊, 郑文广, 等. 产业园区新型多能联供综合能源服务研究[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 734-740.  
HUANG Y Z, ZHOU Y H, ZHENG W G, et al. Research on new integrated energy system with multi-power combined supply of industrial parks[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 734-740.
- [2] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 42-53.  
HE W, CHEN Z P, HU F Y, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 42-53.
- [3] 宁毕武, 张冠锋, 王海鑫, 等. 考虑梯次利用储能系统安全阈值的综合能源系统低碳经济调度方法[J]. 电

- 力建设, 2023, 44(6): 1-11.
- NING B W, ZHANG G F, WANG H X, et al. A low-carbon economic dispatch method for IES considering the safety threshold of echelon utilization energy storage system[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(6): 1-11.
- [4] 周任军, 吴燕榕, 潘轩, 等. 考虑电热需求响应的区域综合能源系统储能容量优化配置[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 11-17.
- ZHOU R J, WU Y R, PAN X, et al. Optimal placement of energy storage in a regional integrated energy system considering electric and thermal demand responses[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 11-17.
- [5] 江训谱, 吕施霖, 王健, 等. 考虑阶梯碳交易和最优建设时序的园区综合能源系统规划[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12): 11-19.
- JIANG X P, LÜ S L, WANG J, et al. Park-level integrated energy system planning considering tiered carbon trading and optimal construction timing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 11-19.
- [6] 程杉, 陈诺, 徐建宇, 等. 考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2): 40-47.
- CHENG S, CHEN N, XU J Y, et al. Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2): 40-47.
- [7] 吴聪, 唐巍, 白牧可, 等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网规划[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4): 20-28.
- WU C, TANG W, BAI M K, et al. Energy router based planning of energy Internet at user side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 20-28.
- [8] XU X, JIN X, JIA H, et al. Hierarchical management for integrated community energy systems [J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 231-243.
- [9] WANG K, LIU X, ZHAO L, et al. Research on structure and energy management strategy of household energy router based on hybrid energy storage[C]//2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [10] 权超, 董晓峰, 姜彤. 基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2456-2466.
- QUAN C, DONG X F, JIANG T. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2456-2466.
- [11] 李崎勇, 赵新哲, 郑一飞, 等. 基于纳什谈判考虑能源共享的区域综合能源系统优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 22-32.
- LI J Y, ZHAO X Z, ZHENG Y F, et al. Optimal configuration of a regional integrated energy system considering energy sharing based on Nash negotiation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 22-32.
- [12] 张明光, 王文婷, 陈大为. 基于合作博弈的多区域综合能源系统优化调度[J]. *智慧电力*, 2022, 50(10): 102-108.
- ZHANG M G, WANG W T, CHEN D W. Optimal dispatching of multi-regional integrated energy system based on cooperative game[J]. *Smart Power*, 2022, 50(10): 102-108.
- [13] 范宏, 鲁家阳, 陆骁霄. 考虑激励型需求响应的多区域综合能源系统协同规划[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9): 117-124.
- FAN H, LU J Y, LU X X. Coordinated planning of multi-region integrated energy system considering incentive demand response[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9): 117-124.
- [14] ZHANG N, HU Z. A novel power system source-grid-load coordinated planning model considering both efficiency power plant and demand response[C]//2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing, China: IEEE, 2018: 66-71.
- [15] ZHU Y, ZHAO N, ZHANG S, et al. Research on modes of energy utilization in regional energy Internet [C]//2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing, China: IEEE, 2018: 38-42.
- [16] CHEN Y, ZHANG L, CHEN A, et al. Multi-energy network model of virtual energy router[J]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 118: 02052.
- [17] 蒋明喆, 成贵学, 赵晋斌. 考虑动态荷储策略的综合能源系统双层规划模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(5): 44-57.
- JIANG M Z, CHENG G X, ZHAO J B. Double-deck planning model of integrated energy system in consideration of dynamic load energy storage strategy [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5): 44-57.
- [18] 赵晶晶, 应伦杰, 屈靖雅. 多区域含冷热电联供和储能的综合能源系统运行优化[J]. *电测与仪表*, 2022,

- 59(10): 16-22.
- ZHAO J J, YING L J, QU J Y. Operation optimization of multi-region integrated energy system including cool-heat-electricity cogeneration and energy storage equipment[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(10): 16-22.
- [19] 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 M X, MU Y F, XIAO Q, 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.
- [20] 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 Z, SUN Y H, XIE D L, 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.
- [21] 霍龙, 张誉宝, 陈欣. 人工智能在分布式储能技术中的应用[J]. *发电技术*, 2022, 43(5): 707-717.
- HUO L, ZHANG Y B, CHEN X. Artificial intelligence applications in distributed energy storage technologies[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(5): 707-717.
- [22] 徐文滨, 孙一凡, 王林, 等. 区块链架构下考虑共享储能的用户需求响应[J]. *浙江电力*, 2023, 42(4): 54-64.
- XU W B, SUN Y F, WANG L, et al. Demand response of users considering shared energy storage under blockchain architecture[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(4): 54-64.
- [23] 王苗苗, 李华强, 何永祥. 考虑多主体电能交易的云储能服务机制[J]. *电力建设*, 2022, 43(11): 73-84.
- WANG M M, LI H Q, HE Y X. Cloud energy storage service mechanism considering multi-agent power transaction[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(11): 73-84.
- [24] LIU J, ZHANG N, KANG C, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 226-236.
- [25] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3361-3371.
- LIU J K, ZHANG N, KANG C Q. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3361-3371.
- [26] 郝木凯, 张伟, 董青卫, 等. 复杂因素下的多用户共享储能系统优化[J]. *信息与控制*, 2020, 49(2): 242-248.
- HAO M K, ZHANG W, DONG Q W, et al. Optimization of multi-user shared energy storage system considering complex factors[J]. *Information and Control*, 2020, 49(2): 242-248.
- [27] 匡熠, 王秀丽, 王建学, 等. 基于stackelberg博弈的虚拟电厂能源共享机制[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4556-4564.
- KUANG Y, WANG X L, WANG J X, et al. Virtual power plant energy sharing mechanism based on stackelberg game[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4556-4564.
- [28] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(4): 360-366.
- SUN C, CHEN L J, QIU X J, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(4): 360-366.
- [29] SOUISSI O, BENATITALLAH R, DUVIVIER D, et al. Path planning: a 2013 survey[C]//*Proceedings of 2013 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Agdal, Morocco: IEEE, 2013: 1-8.

收稿日期: 2023-11-04。

修回日期: 2024-02-14。

作者简介:



胡程平

胡程平(1986), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网节能降损, 385199098@qq.com;



施云辉

施云辉(1994), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统不确定性规划, 本文通信作者, 11610016@zju.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)