

面向用户级综合能源系统两阶段容量优化配置方法

黎舜瑀^{1,2}, 闫江峰², 孙启宸¹, 雷爽¹, 张子见¹

¹贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳

²贵州电网有限责任公司贵阳金阳供电局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月22日; 发布日期: 2024年11月29日

摘要

“双碳”目标背景下, 综合能源系统将各种冷、热、电、气等能源供应网络耦合, 通过多能互补优势, 可促进可再生能源就地消纳, 提高综合能源利用率。本文提出一种面向用户级综合能源系统的两阶段容量优化配置方法。在第一阶段, 首先搭建用户级综合能源系统设备模型, 然后以年化总成本最低求解设备容量配置方案; 第二阶段以典型日经济性、环保性进行目标优化调度, 最终利用MATLAB内置CPLEX求解器对该混合整数线性规划问题进行求解。算例分析表明, 对综合能源系统灵活调度起到了优化作用, 有效降低运行成本, 同时提高了可再生能源的消纳能力。

关键词

双碳, 用户级综合能源系统, 容量配置, 典型日, 优化调度

Two-Stage Capacity Optimization Allocation Method for User-Level Integrated Energy Systems

Shunyu Li^{1,2}, Jiangfeng Yan², Qichen Sun¹, Shuang Lei¹, Zijian Zhang¹

¹School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Power Grid Co., Ltd. Guiyang Jinyang Power Supply Bureau, Guizhou Guiyang

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 22nd, 2024; published: Nov. 29th, 2024

Abstract

In the context of the “Dual Carbon” goals, integrated energy systems couple various energy supply

文章引用: 黎舜瑀, 闫江峰, 孙启宸, 雷爽, 张子见. 面向用户级综合能源系统两阶段容量优化配置方法[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6618-6627. DOI: 10.12677/mos.2024.136602

networks such as cooling, heating, electricity, and gas. Leveraging the advantages of multi-energy complementarity, they facilitate the on-site integration of renewable energy, thereby enhancing the overall energy utilization efficiency. This paper proposes a two-stage capacity optimization configuration method tailored for user-level integrated energy systems. In the first stage, it begins by constructing an equipment model for the user-level integrated energy system, subsequently solving for the minimum annualized total cost to determine equipment capacity configuration. In the second stage, optimization scheduling based on typical daily economic and environmental objectives is conducted, ultimately solving the mixed-integer linear programming problem using the MATLAB built-in CPLEX solver. Case studies indicate that flexible scheduling of the integrated energy system optimizes its operation, effectively reducing operational costs, while concurrently enhancing the capacity for accommodating renewable energy.

Keywords

Dual Carbon, User-Level Integrated Energy System, Capacity Configuration, Typical Day, Optimization Scheduling

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源部门是现代社会的重要组成部分，为日常活动、工业和经济增长提供所需的动力。然而，对化石燃料的持续依赖导致了严重的环境问题，包括全球变暖和空气污染。随着世界人口的不断增长和对能源的需求不断增加，对可替代、可持续能源的需求日益迫切。可再生能源已经成为全球能源供应的关键组成部分，为实现更洁净和可持续能源未来提供了希望。同时，可再生能源的大规模集成带来了新的挑战。传统能源网络的结构和可再生能源的离散性导致了能源的浪费，也造成了电力系统的不稳定。不同量子网络之间的独立运行导致了能源形式之间的难以互相转化，难以应对可再生能源波动，从而制约了可再生能源的大规模消纳。综合能源系统(integrated energy system, IES) [1]作为一个具有巨大潜力的解决方案引起了广泛的关注，其具有多能互补和能源梯级利用等优势[2]，是实现能源互联网和泛在电力物联的重要基础，涉及冷、热、电、气等多种能源的转换、分配和协调[3]。通过综合能源系统的引入，可以实现更高的能源利用效率，同时有效地解决可再生能源的波动问题，从而提高整个能源供应链的稳定性和可持续性。

目前，国内外对综合能源系统的容量配置和调度策略的研究取得了一定的成果，主要集中于系统的容量优化、选址优化等，采用的技术包括混合整数线性规划[4]、MISOCP (混合整数二阶锥) [5]等。文献[6]在充分考虑供需能量平衡和电/热/冷/耦合的情况下，采用混合整数线性规划方法，研究了一种电能替代用户侧综合能源系统的储能设备优化配置方法；文献[7]提出一种计及源、网、荷多元不确定性的综合能源系统多目标-机会约束规划方法，针对可再生能源出力、负荷需求预测误差以及供能网络中设备 N-1 故障引起的不确定性，建立了基于多目标 - 机会约束规划的双层规划模型，分析了不确定性对系统设备选型与数量配置的影响；文献[8]利用小波变换实现特征降维，再通过 K-means 聚类算法获得多个典型日负荷场景，提出了一种考虑典型日特征权重动态分配的微电网容量配置两阶段规划方法，进行了容量配置和经济成本等规划结果的优化。

在优化调度方面，文献[9]以经济成本和环保成本作为评价指标，利用改进遗传算法和 MATLAB 工

具箱,建立了考虑能源供应效率评价指标的多区域综合能源系统优化配置模型;文献[10]为了准确分析含氢能的电热氢联供系统(electricity heat hydrogen cogeneration system, EHH-CS)的 IES,创新性地提出 EHH-CS 容量配置双层联合迭代模型,通过粒子群算法进行循环迭代求解,以获得协同最优的运行策略及容量配置方案。其次,有文献考虑源荷双侧电、热性能对系统配置的影响;文献[11]考虑源侧加电、热储能容量配置,负荷侧电热综合需求响应对促进风电消纳的价值,优化系统年总费用;文献[12]则是提出一种基于轮盘选择法和改进谱聚类算法生成风光典型场景集,实现对风光出力不确定性的量化,进而改善系统年化总成本和设备平均年利用率。

通过以上分析,目前的研究大多数是通过引入启发式算法解决多目标优化、配置储能优化、计及不确定性等角度来解决综合能源系统容量配置优化的问题。针对综合能源系统两阶段引入启发式算法解决多目标优化、配置储能优化、计及不确定性等问题。然而,遗传算法和粒子群算法等启发式算法求解 IES 模型收敛速度较慢,能源使用效率并不高;配置储能装置容量占比高时,会影响清洁能源消纳能力的同时导致用户的成本增加;计及不确定性则大多从可再生能源的角度出发。较少有研究针对用户级综合能源系统,考虑对综合能源系统容量配置优化以及可再生能源消纳量的影响。因此,本文针对用户级综合能源系统,提出了两阶段容量配置优化方法。

第一阶段对系统年投资建设成本、年运维成本和环境成本进行成本目标优化。在第一阶段可行方案的基础上,以系统的运维成本最小作为第二阶段的优化目标。以一栋居民楼为例,确定系统在典型日下的最优运行方案。

2. 用户级综合能源系统模型

用户级综合能源系统具体结构如图 1 所示。其中分布式光伏系统、分布式天然气系统、储能装置等使得电网、气网、热网间能量耦合更加密切。

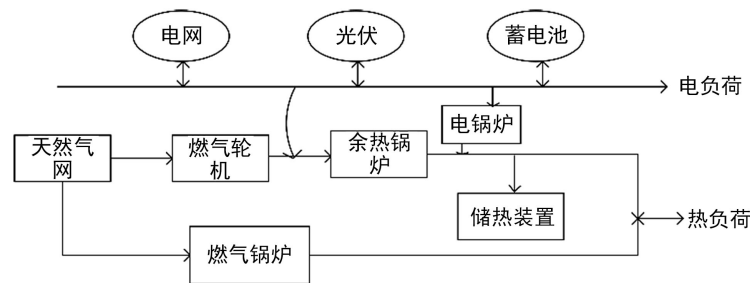


Figure 1. UIES structure
图 1. UIES 结构

2.1. 分布式光伏发电装置

本文研究的综合能源系统中,热负荷主要考虑取暖所需热负荷,未考虑生活用水热负荷,因此只考虑光伏发电设备进行系统供电,光伏发电装置利用太阳能进行发电,其出力特性 P_{PV} 为:

$$P_{PV}(t) = A_{PV} \times \eta_{PV} \times I_t \quad (1)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为光伏板在 t 时刻能产生的电能; A_{PV} 为光伏板面积, m^2 ; η_{PV} 为光伏板效率; I_t 为 t 时刻单位面积光伏板可利用的太阳能, kW/m^2 。

光伏设备总额定功率 $E_{PV,r}$ 与总安装面积 A_{PV} 有如下关系:

$$E_{PV,r} = A_{PV} \times s \quad (2)$$

式中: s 为单位面积光伏板在太阳辐射水平为 1 kW/m^2 时输出功率与面积的转换系数(kW/m^2)。由此, 上式可转换为:

$$P_{PV}(t) = E_{PV,r} \times \frac{\eta_{PV}}{s} \times I_t \quad (3)$$

考虑居民建筑顶层实际场地空间有限制, 光伏设备存在最大容量限制:

$$0 \leq E_{PV,r} \leq E_{PV,r,\max} \quad (4)$$

式中: $E_{PV,r,\max}$ 为光伏设备容量最大值。

2.2. 分布式天然气系统(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)

1) 燃气轮机与余热回收模型

燃气机组通常使用天然气作为燃料, 进行充分燃烧产生高温热气推动转子做功发电, 为居民提供日常所需电量。其发电功率 P_{GT} 与设备输入天然气量 V_{GT} 的关系为:

$$P_{GT} = \eta_{GT} V_{GT} L \quad (5)$$

式中: η_{GT} 为燃气轮机发电效率; L 为天然气低热值, 可取 $9.73 \text{ km} \cdot \text{h/m}^3$; 燃气轮机 CO_2 排放系数本文取 0.42。

作为燃气轮机与吸收式制冷机之间的连接设备, 余热锅炉通过吸收燃气轮机发电后排出的高温废烟中的能量, 产生高温蒸汽。余热锅炉输入热量为:

$$H_{WHB}^{in} = \frac{P_{GT}(1 - \eta_1 - \eta_{GT})}{\eta_{GT}} \quad (6)$$

式中: η_1 为热量散失系数。

余热锅炉制热功率为:

$$H_{WHB}^{out} = H_{WHB}^{in} U_{oph} \eta_h \quad (7)$$

式中: U_{oph} 为制热系数, η_h 为烟气回收率。

2) 锅炉模型

用户级综合能源系统中常见的锅炉为燃气锅炉和电锅炉两种, 投资成本低, 操作灵活, 易维修, 可将不同品质的能量进行转化。此外, 电锅炉在使用过程中不会产生任何有害气体, 对环境友好。其出力与自身输出特性和负荷情况有关:

$$H_{GB} = \eta_{GB} V_{GB} \quad (8)$$

$$H_{EB} = \eta_{EB} P_{EB} \quad (9)$$

式中: $\eta_{GB/EB}$ 为燃气/电锅炉的设备转换效率; V_{GB} 为输入燃气锅炉的天然气量, m^3 ; P_{EB} 为输入电锅炉功率, kW ; $H_{GB/EB}$ 表示燃气/电锅炉的输出热量; 燃气锅炉 CO_2 排放系数本文取 0.45。

2.3. 储能装置

储能装置对于综合能源系统的建设和多能协同运行起着关键作用。本文设置储电装置(Battery)、储热装置(thermal energy storage)作为用户级综合能源系统中的储能设备, 在其容量承受范围内能够极大增强了系统调度计划的灵活性, 通用表达式为:

$$S_{B,H}(t+1) = S_{B,H}(t)(1 - \varepsilon_{B,H}) + \left[\eta_{B,H}^{in} P_{B,H}^{in}(t) H_{B,H}^{in}(t) - \frac{1}{\eta_{B,H}^{out}} P_{B,H}^{out}(t) H_{B,H}^{out}(t) \right] \Delta t \quad (10)$$

$$S_{B,H}^{\min} \leq S_{B,H}(t) \leq S_{B,H}^{\max} \quad (11)$$

$$P_{B,H}^{\min} \leq P_{B,H}^{\text{in}}(t), P_{B,H}^{\text{out}}(t) \leq P_{B,H}^{\max} \quad (12)$$

$$H_{B,H}^{\text{in}}(t) + H_{B,H}^{\text{out}}(t) \in (0,1) \quad (13)$$

式中： $S_{B,H}(t)$ 、 $S_{B,H}(t+1)$ 分别表示储能设备在 t 、 $t+1$ 时刻的容量，维持在下限 $S_{B,H}^{\min}$ 和上限 $S_{B,H}^{\max}$ 之间； $P_{B,H}^{\text{in}}(t)$ 、 $P_{B,H}^{\text{out}}(t)$ 分别为 t 时刻充、放能功率，上、下限功率分别为 $P_{B,H}^{\max}$ 和 $P_{B,H}^{\min}$ ； $H_{B,H}^{\text{in}}(t)$ 和 $H_{B,H}^{\text{out}}(t)$ 均为 0-1 变量，表示充放能状态，任意时间段仅存在一种状态。

为保持不同周期调度的灵活性，令储能装置起始与结束时刻容量相等：

$$S(t_1) = S(t_n), t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad (14)$$

式中： t_1 和 t_n 分别表示调度周期起始时刻和结束时刻； n 取决于所选时间尺度的分辨率[13]。

3. UIES 容量配置和调度策略规划问题的求解方法

本文采用两阶段优化方法对用户级综合能源系统进行规划，并从数学规划的角度建立混合整数线性规划模型，寻求最优解，优化流程如图所示。第一阶段的目的是确定各类设备的最优安装容量，第二阶段在此基础上确定系统设备在每个时刻的最佳运行功率。

对于不同的容量配置方案，其最优运行策略互不相同，对于不同的运行策略，其最优容量配置方案互不相同，两层模型之间的结果相互影响、相互耦合。因此，本文采用两阶段优化方法对用户级综合能源系统进行求解，并从数学规划的角度建立混合整数线性规划模型，寻求最优解，优化流程如图所示。

本文通过对建立的双层模型进行求解，获得最优容量配置及运行策略，求解流程如图 2 所示。

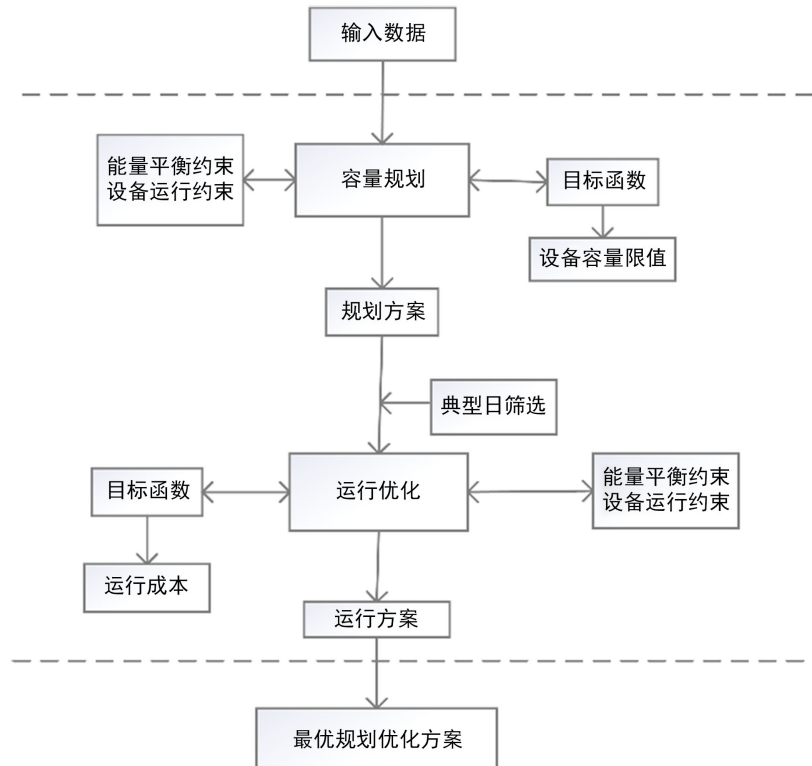


Figure 2. Optimizing process of UIES
图 2. UIES 优化流程

3.1. 第一阶段容量配置模型

3.1.1. 目标函数

为确定系统内各设备的最优配置容量以 1 h 为单位时间的调度策略,使得系统在能源供应时具有最好的经济性。模型以综合能源系统运行的年费用最低为目标函数,年费用主要包括投资建设成本、运维成本表达式为:

$$\min_{up_F}(x) = C_{y,b} + C_{y,r} \quad (15)$$

式中: $C_{y,b}$ 、 $C_{y,r}$ 分别表示年投资成本、年运行维护成本。

1) 年投资建设成本

投资建设成本 $C_{y,b}$ 即设备的购买和安装成本。在进行容量配置优化时,考虑到光伏发电系统、蓄电池储能系统、燃气轮机、燃气锅炉等能源设备的寿命周期各不相同,采用净年值法将系统初期投资费用转换成等年值,从而规避了不同设备寿命周期差异性对投资方案的影响。数学表达式为:

$$C_{y,b} = \sum_{i=1} C_{cap,i} \cdot U_i \cdot \frac{r(1+r)^k}{(1+r)^k - 1} \quad (16)$$

式中: i 为系统中设备类型序号; $C_{cap,i}$ 为各个设备容量限值; U_i 为各个设备单位容量购置成本; r 为设备折现率; k 表示设备使用年限。

2) 年运维成本

年运维成本 $C_{y,r}$ 由设备损耗、维修、人工巡检造成的费用,与设备选型、容量、使用频率和运行方式有关,具体计算公式如下:

$$C_{y,r} = \lambda \sum_{i=1} C_{y,b,i} \quad (17)$$

式中: λ 为系统设备年运维费用占初期投资成本的比例,本文取 0.85。

3.1.2. 约束条件

用户级综合能源系统运行约束包括能量平衡约束、设备运行约束及储能约束,以保证系统供能与系统安全运行。

1) 系统电、热、冷、气平衡约束

$$L_e(t) = P_{PV}(t) + P_{net}(t) + P_{dis}(t) + P_{GT}(t) - P_{EC}(t) - P_{cha}(t) - P_{EB}(t) \quad (18)$$

$$L_h(t) = H_{WHB}(t) + H_{GB}(t) + H_{dis}(t) - H_{AC}(t) - H_{cha}(t) + H_{EB}(t) \quad (19)$$

$$G_{buy}(t) = V_{GT}(t) + V_{GB}(t) \quad (20)$$

式中: $L_e(t)$ 、 $L_h(t)$ 、 $L_c(t)$ 为 t 时刻用户侧电、热、冷负荷; $P_{net}(t)$ 为 t 时刻与大电网交换功率; $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 为 t 时刻电储能充、放电功率; $P_{EC}(t)$ 、 $P_{EB}(t)$ 为 t 时刻电制冷机、电锅炉输入电功率; $H_{cha}(t)$ 、 $H_{dis}(t)$ 为 t 时刻蓄热装置充、放热功率。

2) 设备功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT_max} \\ 0 \leq H_{GB}(t) \leq H_{GB_max} \\ 0 \leq P_{EB}(t) \leq P_{EB_max} \\ 0 \leq H_{WHB}(t) \leq H_{WHB_max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： P_{GT_max} 、 H_{GB_max} 、 P_{EB_max} 、 H_{WHB_max} 、 C_{EC_max} 、 C_{AC_max} 分别为燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、余热锅炉的出力上限。

3) 储能约束

参照上文 1.3 节，电、热储能约束相似，由于篇幅受限，此处不再赘述。

3.2. 典型日选取

基于上述考虑，本文采用 K-means 聚类算法对用户需求侧电、热负荷数据进行分析处理[14]。上层数据来源为某居民楼小区一年内以小时为跨度的实际用户负荷数据集。对负荷进行异常数据的识别修正、数据归一化等预处理后，通过 K-means 算法进行聚类，得到 4 类典型场景，根据主要负荷特点分为春、夏、秋、冬作为下层模型的负荷数据来源，进行优化调度。

3.3. 第二阶段优化调度模型

目标函数

1) 典型日运行成本

以系统在典型日(春、夏、秋、冬)的运行成本(包括购售电成本 C_{grid} 、购气成本 C_{gas} 、设备运行费用 C_{om})：

$$\min_down_F(x) = C_{grid} + C_{gas} + C_{om} \quad (22)$$

$$C_{grid} = \sum_t (C_{grid,buy,t} \times P_{buy,t} - C_{grid,sell,t} \times P_{sell,t}) \quad (23)$$

$$C_{gas} = \sum_t (C_{gas,t} \times G_{buy,t}) \quad (24)$$

$$C_{om} = \sum_i (C_i \times P_i) \quad (25)$$

式中：系统采用分时电、气价机制。 $C_{grid,buy/sell,t}$ 为系统从外电网购电和售电电价； $P_{buy/sell,t}$ 为系统单日实时购/售电量； $C_{gas,t}$ 为系统实时购气成本； $G_{buy,t}$ 为系统从气网单日实时购气量； C_i 为第 i 类设备单位运维成本； P_i 为第 i 类设备运行功率。

3.4. 求解方法

本文研究的设备优化配置问题是一个 0~1 混合整数线性规划问题，该线性规划的模型标准形式为：

目前，对于混合整数线性规划模型有多种软件可以求解，例如 CPLEX、GLPK、LPSOLVE 和 YALMIP。本文采用 MATLAB 编程结合 CPLEX 进行求解。

4. 算例分析

4.1. 算例场景与数据

本文算例以南方某居民小区楼为对象，能源需求主要为电、热负荷需求。将一年按季节划分：3 月到 5 月为春季；6 月到 8 月为夏季；9 月到 11 月为秋季；12 月到 2 月为冬季。UIES 内考虑光伏发电装置、燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、余热锅炉和储能设备，各设备安装容量及其相关参数见表 1。

上层通过规划求解，可以在既满足系统不同种类的用能需求又实现经济性的情况下，得到 UIES 容量配置以及系统全年运行优化调度结果。求解得到的综合成本如下：年投资建设成本、年运维成本、年环境成本、总成本分别为：140.12 万元、104.68 万元、90.45 万元、335.25 万元可以看出，求解结果年运维、年环境成本，占比较大，导致以能源价格主导的各类运行因素对优化规划结果存在较大影响。如能

源价格会影响能源耦合方式的优选，UIES 倾向于首先选取某时段经济性高的能源形式；同时，不同能源利用形式又将影响能源设备的选择，从而影响容量配置结果。

Table 1. System equipment parameter list
表 1. 系统设备参数表

设备名称	年限/年	投资(元/kW)	容量限值
光伏发电装置	12	2200	3000
蓄电池	10	1500	700
燃气轮机	10	1000	1950
燃气锅炉	10	550	1400
电锅炉	10	350	1000
余热锅炉	10	730	1500
储热装置	15	505	770

UIES 的容量配置结果如表 1 所示。光伏发电装置虽然造价很高，但由于不存在环境成本，规划容量达到了 2000 kw，这表明 UIES 倾向于可再生能源的最大化利用；储能部分作为协调可再生能源的消纳以及利用削峰填谷提升系统经济性的关键设备，也得到了充分规划，但由于电储能单位成本较高，使用年限较短，相较于储热装置规划容量较低。

为简化计算，本文以冬季典型日为例，典型日的电、热负荷曲线、光伏出力曲线如下图 3、图 4 所示，优化周期为 24 h，单位优化时间为 1 h。

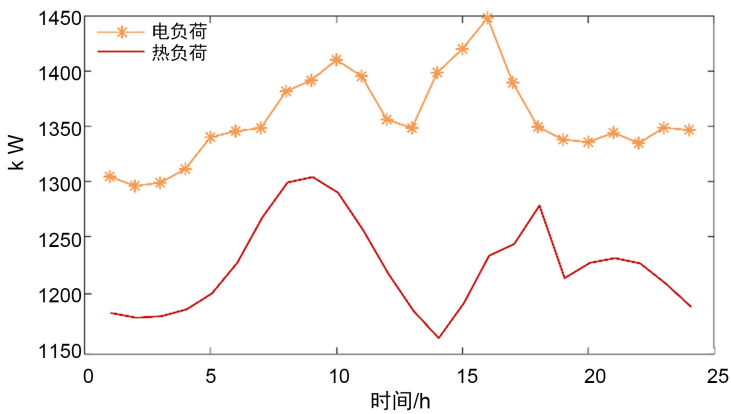


Figure 3. Typical daily load, heat curve
图 3. 典型日电、热负荷曲线

4.2. 优化结果与分析

图 5 为两种下场景电平衡优化结果，光电利用电锅炉装置将电能转化为热能，进而存储在储热装置中，到夜晚，储热装置释放热能，以此降低 CCHP 的电、热出力。调整机组热负荷压力，机组电热耦合得到缓解，提升 CCHP 电出力调节空间，实现负荷大幅度的波动，更能加大光电的消纳程度。

图 6 为热平衡优化结果，CCHP 热出力降低，摆脱“以热定电”约束，电出力调节空间增加，热量此时主要由燃气锅炉提供，电锅炉将光电转化为热能储存在储热装置中，经济性高。到了夜晚，配合电锅炉释放储存的热能，从而又降低 CCHP 热出力，更好的对光电进行消纳。

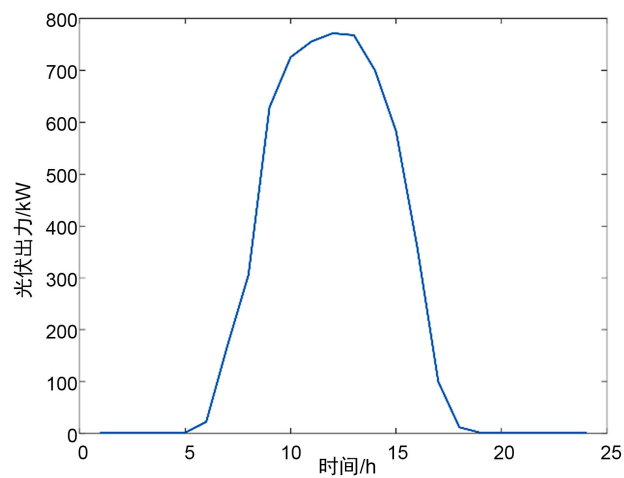


Figure 4. PV predicted output curve
图 4. 光伏预测出力曲线

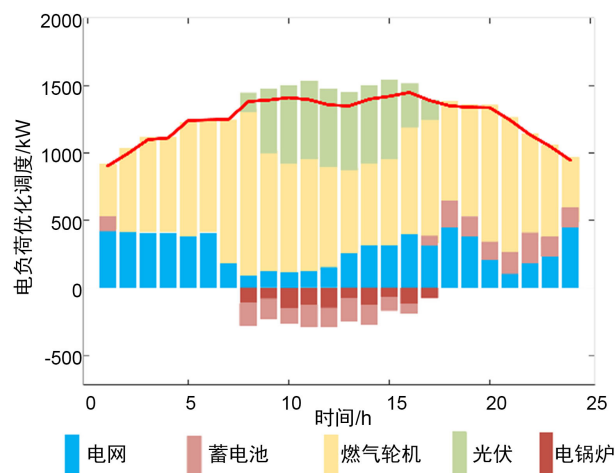


Figure 5. Electric output of each equipment
图 5. 系统各设备电出力

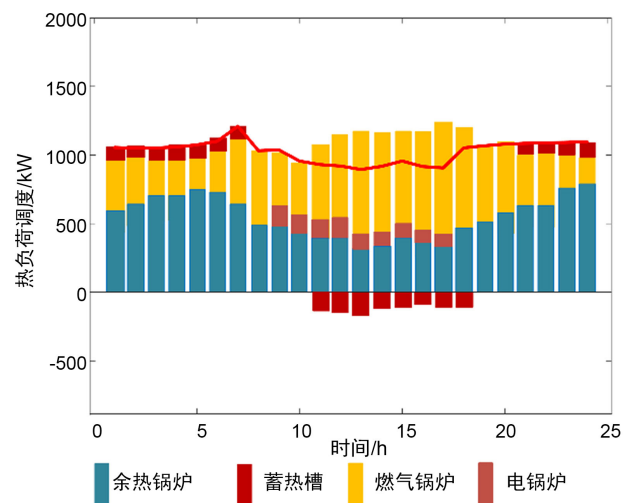


Figure 6. Heat output of each equipment
图 6. 系统各设备热出力

5. 结论

本文针对 UIES 容量配置优化问题进行了研究, 提出一种 UIES 的两阶段容量优化配置方法。对于研究小型用户级综合能源系统, 通过容量配置优化, 可以准确规划长时间段内的方案, 并且相对于仅仅研究典型日内的运行方案, 提升了很大的经济性。另外本文的研究具有一定的局限性: 建立模型未引入智能算法进行联合优化。将在后续工作中进一步研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Energy Independence and Security ACT of 2007.
<http://www.ferc.gov/eventcalendar/files/20050608125055-grid-2030.pdf>
- [3] 郭尊, 李庚银, 周明. 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3090-3100. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1113>
- [4] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
- [5] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.
- [6] 周贤正, 郭创新, 陈玮, 等. 基于混合整数二阶锥的配电-气网联合规划[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 1-11.
<https://doi.org/10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.001>
- [7] 左逢源, 张玉琼, 赵强, 等. 计及源荷不确定性的综合能源生产单元运行调度与容量配置两阶段随机优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8205-8215. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220343>
- [8] 裘愉涛, 黄志华, 盛跃峰. 基于直觉模糊交叉熵的配电网平衡能力提升方法[J]. 浙江电力, 2022, 41(12): 54-62.
<https://doi.org/10.19585/j.zjdl.202212007>
- [9] 钟巍, 孔凡淇, 林小杰, 等. 考虑典型日特征权重动态分配的微电网容量配置两阶段规划方法[J]. 能源工程, 2022, 42(1): 90-98. <https://doi.org/10.16189/j.cnki.nygc.2022.01.013>
- [10] 范宏, 袁倩倩, 邓剑. 多区域综合能源系统的两阶段容量优化配置方法[J]. 现代电力, 2020, 37(5): 441-449.
<https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1077>
- [11] 侯慧, 戈翔迪, 吴细秀, 等. 运行与规划协同的电热氢联供系统最优容量配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 144-151. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.220314>
- [12] 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. <https://doi.org/10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.002>
- [13] 栗然, 孙帆, 刘会兰, 等. 考虑能量特性差异的用户级综合能源系统混合时间尺度经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3615-3624. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0420>
- [14] 姚志力, 王志新. 计及风光不确定性的综合能源系统两层级协同优化配置方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4521-4531. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0853>