

综合能源系统运行优化设计与运行策略研究

廖柏睿¹, 吴晓南², 苏要港¹, 李爽¹

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 工程学院, 四川 南充 637000)

摘要:综合能源系统能整合协调各异质能源,是提高能源利用率和降低运行费用的有效途径。提出了两种运行策略及一种基于穷举法的优化策略方法,建立了包括小型燃气轮机系统、地源热泵、电制冷机、吸收式制冷机、换热器的综合能源系统能量转换模型。在案例研究中,提出了以典型日费用最小为目标的综合能源系统优化方案,对以电定热、以热定电两种运行策略下的场景进行了优化分析,确定设备的最佳容量和运行参数,给出了运行策略对比分析结果。结果表明:以电定热策略的整体经济性优于以热定电策略约10%;与传统供能系统在经济性上的适用性进行对比发现,综合能源系统成本节省比例在5%~30%之间。

关键词:综合能源系统;优化设计;优化策略;优化运行

中图分类号:TK01 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2023.03.011

[引用本文格式]廖柏睿,吴晓南,苏要港,等.综合能源系统运行优化设计与运行策略研究[J].热能动力工程,2023,38(3):82-90. LIAO Bo-rui, WU Xiao-nan, SU Yao-gang, et al. Research on operation optimization design and operation strategy of integrated energy system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 82-90.

Research on Operation Optimization Design and Operation Strategy of Integrated Energy System

LIAO Bo-rui¹, WU Xiao-nan², SU Yao-gang¹, LI Shuang¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu, China, Post Code:610500;
2. College of Engineering, Southwest Petroleum University, Nanchong, China, Post Code:637000)

Abstract: Integrated energy system can integrate and coordinate various heterogeneous energy sources, which is an effective way to improve energy utilization rate and reduce operating cost. Two operation strategies and an optimization strategy method based on the exhaustive method are proposed, and an energy conversion model of integrated energy system including small gas turbine system, ground source heat pump, electric chiller, absorption chiller and heat exchanger is established. In the case study, a integrated energy system optimization scheme aiming at the minimum of typical daily cost is proposed, and the scenarios under two operation strategies of "determining heat by electricity" and "determining electricity by heat" are optimized and analyzed to determine the optimal capacity and operation parameters of equipment, and the comparative analysis results of operation strategies are given. The results show that the overall economy of "determining heat by electricity" strategy is about 10% better than that of "determining electricity by heat" strategy. Compared with the economic applicability of traditional energy supply system, it is found that the cost saving ratio of the integrated energy system is between 5% to 30%.

Key words: integrated energy system, optimization design, optimization strategy, optimal operation

引言

目前,由太阳能、地热能和其他可再生资源组成的清洁能源对社会能源消费越来越重要^[1]。同时,以冷热电联产系统为代表的综合能源系统(Integrated energy system, IES)已被证明是实现经济效益、节能和减少二氧化碳排放的有效方法^[2]。如何根据不同能源的互补性以及二次能源生产中的合理协调是当下要研究问题^[3]。充分利用 IES 的优势来激励热电联产系统,选择合适的性能指标来优化热电联产系统,对实现经济效益和环境保护有重要意义^[4]。

IES 能够整合各类异质能量,达到能量利用最大化,使损失降低。考虑到能源出力的多时空性和多不确定性,采用制定日前和日内两阶段的运行调控方法^[5]。对于可再生能源出力不确定性,可采用概率场景法^[6]、区间优化法^[7]进行处理。文献[8]采用区间法对光热出力能源和负荷进行规划,建立了环境效益最优和系统收益最大的双目标日前调度优化模型。文献[9]计及风、光等可再生能源,提出了基于数据驱动的两阶段优化调度模型。

系统整体运行最常用的运行策略有以热定电策略和以电定热策略^[10],其他文献还提出了电热比策略^[11]、电冷比策略^[12],文献[13]考虑多种不确定性因素,通过对比分析发现,基本运行策略无法同时满足系统冷、热、电能量需求,即使能满足部分能量需求但系统也无法处于最佳状态。上述文献都证明了所提出的运行策略较基本运行策略有提升,但未研究所提出的运行策略能否用于其他类型的系统,因此无法对于不同类型的多能源系统提出一个具有共性的运行策略。

综上所述,IES 优化还有许多的不足,现有研究多数从电气方向入手研究,没有利用好系统之间的能量互联性,仍需探索快速准确的配置和运行协调优化方法。此外,针对建筑规模的 IES 在经济性和适用性方面还有待探索。基于上述考虑,本文对建筑规模的 IES 优化做了研究,初步建立了 IES 理论

模型,提出了一个基于穷举法的成本最小化的运行策略。对于实际案例,比较了以热定电和以电定热两种运行模式下系统对各类建筑的适用性,将 IES 与传统能源系统进行对比分析,验证了建筑规模 IES 在经济上的适用性。

1 区域 IES 描述

区域综合能源由燃气轮机(Gas turbine, GT)、余热锅炉(Waste heat boiler, WHB)、地源热泵(Ground source heat pump, GSHP)、吸收式制冷系统(Absorption chiller, AC)、电制冷机(Electric chiller, EC)、热交换器(Heat exchanger, HE)等组成,能量外部供应来源有电网和天然气,能够为用户提供冷、热、电能量。区域 IES 具体结构如图 1 所示。

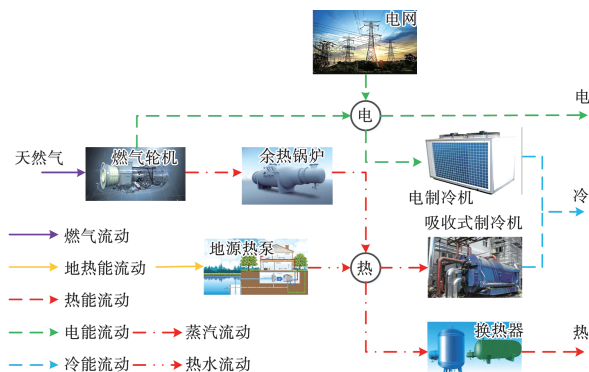


图 1 区域 IES 结构示意图

Fig. 1 Regional IES structure diagram

燃气轮机作为 IES 能量生产侧的核心设备,具有很大的优化潜力。燃气轮机利用天然气作为能源,为用户提供电能,同时产生的高温烟气进入余热锅炉加热循环水,满足用户热能需求。综合能源系统还可以通过吸收式制冷系统和电制冷机为用户提供冷量,电制冷机消耗的电量来自于电网或者燃气轮机,当燃气轮机供电不足时,由电网进行补充供应。当燃气轮机供应的热量不足以支持用户热需求时,可以由地源热泵系统对综合能源系统进行补充热量。如果当综合能源系统所产生的电量高于用户和电制冷需求时,可以进行电量上网销售,当余热锅炉产生的热能高于用户以及吸收式制冷系统热需求时,产生的多余热量可以进行储热。这些情况的产生主要与系统的运行策略有关。

2 IES 运行策略

通过对原动力设备进行调控的方式进行运行策略的划分, IES 涉及的运行策略主要有以电定热策略和以热定电策略。

图 2 是两种运行策略的调控图。其中, 居中区域的曲线是燃气轮机的热电输出曲线; E_{\min} 和 Q_{\min} 是燃气轮机输出的最小电负荷和最小热负荷; E_{\max} 和 Q_{\max} 是燃气轮机输出的最大电负荷和最大热负荷。根据以热定电 3 种模式和以电定热的 3 种模式组合, 将图 2 划分为 9 个区域, 代表了系统输出的 9 种状态, 其中 ($a \sim i$) 9 个点是 9 种状态下的典型负荷状态点。

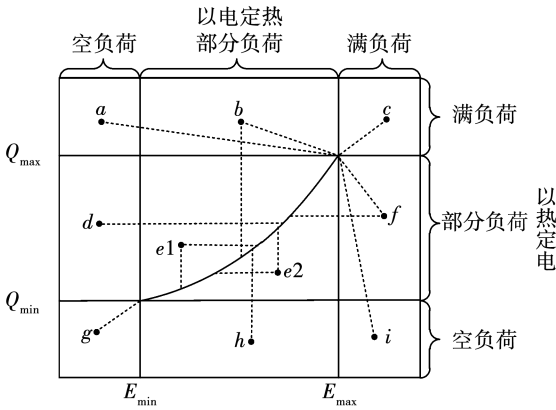


图 2 两种运行策略调控图

Fig. 2 Two operational strategy regulation diagrams

3 区域 IES 设备热力学建模

3.1 能量动力单元

燃气轮机的发电量、天然气消耗量、产热量都与运行负荷率 (PLR) 有关, 燃气轮机 PLR 代表的是燃气轮机发电量和额定功率的比值, 数值在 0 ~ 1 之间, 公式为:

$$PLR = \frac{E_{GT}}{G_{GT}} \quad (1)$$

根据相关技术手册将燃气轮机的运行负荷率 PLR 规定在 25% ~ 100% 之间, 燃气轮机消耗天然气的和产生烟气余热量的公式为:

$$\begin{cases} E_{GT} = 0 & (PLR < 25\%) \\ E_{GT} = G_{GT} \cdot PLR & (25\% \leq PLR \leq 100\%) \end{cases} \quad (2)$$

$$W_{GT} = \frac{E_{GT}}{\eta_{GT}} \quad (3)$$

$$Q_{GT} = \mu_{GT} \cdot W_{GT} \quad (4)$$

式中: E_{GT} —燃气轮机的发电量, kW; G_{GT} —燃气轮机的装机容量, kW; W_{GT} —消耗的天然气的量, kW; Q_{GT} —燃气轮机产生烟气的热量, kW; η_{GT} —天然气发电效率; μ_{GT} —天然气的产热效率。

3.2 能量转换单元

能源转换单元包括地源热泵、吸收式制冷机、电制冷机 3 种设备, 设定设备的能效比为一个定值, 其热力学公式为:

$$Q_{GSHP} = COP_{GSHP} \cdot W_{GSHP} \quad (5)$$

$$C_{AC} = COP_{AC} \cdot Q_{AC} \quad (6)$$

$$C_{EC} = COP_{EC} \cdot E_{EC} \quad (7)$$

式中: Q_{GSHP} —地源热泵产生的热量, kW; COP_{GSHP} —地源热泵的能效比; W_{GSHP} —地源热泵从土壤吸收的热量, kW; C_{AC} —吸收式制冷机生产的冷量, kW; COP_{AC} —吸收式制冷机设定的能效比; Q_{AC} —吸收式制冷机消耗的热量, kW; C_{EC} —电制冷机生产的冷量, kW; COP_{EC} —电制冷机设定的能效比; E_{EC} —电制冷机消耗的电量, kW。

3.3 能量传递单元

能源传递单元包括余热锅炉和热交换器, 设备不存在异质能源的转换, 只是简单的热量交换和传递。同样设定设备的效率为定值, 其热力学公式为:

$$Q_{WHB} = \eta_{WHB} \cdot Q_{CT} \quad (8)$$

$$Q_{HE, out} = \eta_{HE} \cdot Q_{HE, in} \quad (9)$$

式中: Q_{WHB} —余热锅炉产生的热量, kW; η_{WHB} —余热锅炉的换热效率; $Q_{HE, in}$ —进入热交换器的热量, kW; η_{HE} —热交换器效率; $Q_{HE, out}$ —流出热交换器的热量, kW。

4 区域综合能源优化方法

4.1 区域 IES 优化模型

4.1.1 优化假设

以 IES 整体经济性为目标, 为降低求解难度和模型复杂度, 现做如下假设:

(1) 优化变量燃气轮机额定容量 G_{GT} 的最小步长设置为 50, 优化变量电制冷机供冷量占比 m 的最小步长设置为 0.1, 且规定步长连续变化;

(2) 不考虑设备启停功耗以及启停费用;

(3) 整个系统处于稳态运行, 没有超载和负载出现。

4.1.2 优化变量

选取燃气轮机额定容量 G_{GT} 和电制冷机供冷量占比 m 为优化变量。

燃气轮机额定容量直接影响燃气轮机的经济效益和输出大小。当燃气轮机容量选取过小, 会导致系统始终处于满负荷状态, 虽然满负荷有益于燃气轮机, 但不得不考虑外部电网购电导致系统整体费用增加的问题。当燃气轮机容量选取过大, 系统负荷不大时, 燃气轮机将处于低负荷工作状态, 系统效率低。因此, 燃气轮机额定容量大小可以作为一个优化变量。

电制冷机利用高品位的电能发电, 发电成本高, 但是电制冷机的 COP 大; 吸收式制冷机利用燃气轮机的余热进行驱动, 提高能源利用率并实现能量梯级利用, 但是吸收式制冷机的 COP 小。为了尽可能降低系统费用, 需要合理分配二者的使用比例, 因此电制冷机供冷量占比也是一个有意义的优化变量。

4.1.3 约束条件

本文所涉及的约束条件主要是指冷、热、电的平衡约束, 公式为:

$$E_{GT} + E_{grid} \geq E + E_{EC} \quad (10)$$

$$Q_{WHB} + Q_{GSHP} \geq Q_{AC} + \frac{Q}{\eta_{HE}} \quad (11)$$

$$C_{EC} + C_{AC} \geq C \quad (12)$$

式中: E_{grid} —电网购电量, kW; E —用户电负荷, kW; C —用户冷负荷, kW; Q —用户热负荷, 数值上与换热器出口热量 $Q_{HE, out}$ 相等, kW。

4.1.4 目标函数

以 IES 典型日总费用为目标, 由购电费用、购气费用、设备投资费用、设备运行维护费用构成:

$$H = H_{inv} + H_{ope} + H_{gas} + H_{ele} \quad (13)$$

$$H_{inv} = \sum_i \left(\frac{A_i}{365} \cdot c_{inv} \cdot G_i \right) \quad (14)$$

$$H_{ope} = \sum_i^{24} (c_{ope} \cdot W_i) \quad (15)$$

$$H_{gas} = \sum_i^{24} (c_{gas} \cdot W_{gas}) \quad (16)$$

$$H_{ele} = \sum_i^{24} (c_{buy} \cdot W_{buy} - c_{sell} \cdot W_{sell}) \quad (17)$$

式中: H —IES 日总费用, 元; H_{inv} —设备日化总投资费用, 元; H_{ope} —设备日总运行维护费用, 元; H_{gas} —日天然气消耗费用, 元; H_{ele} —日购电费用, 元; i —代表系统设备种类; A_i —一年成本回收系数, 本文设置为 0.031; c_{inv} —单位容量下设备的投资费用, 元/kW; G_i —设备的容量, kW; c_{ope} —单位功率下设备的运行维护费用, 元/kW·h; W_i —设备单位时间内的输出功率, kW·h; c_{gas} —天然气气价, 元; W_{gas} —设备单位时间内消耗的天然气量, kW; c_{buy} —电网购电电价, 元; W_{buy} —单位时间内购买的电量, kW; c_{sell} —电网售电电价, 元; W_{sell} —单位时间内出售的电量, kW。

4.2 区域 IES 优化分析

4.2.1 优化方法

优化方法采用穷举法, 穷举法是将问题所有可能的答案一一列出, 然后根据条件判断此答案是否符合, 符合就保留, 不符合就丢弃。穷举法的优点是不会陷于局部寻优, 所给出的解一定是正确; 但是穷举法也有不足, 数据量容易造成系统崩溃, 效率低下。由于本文所选择的步长适中, 因此选用穷举法求解优化模型。

4.2.2 优化步骤

采用穷举法对 IES 的配置容量和运行参数进行优化, 具体优化步骤如图 3 所示。

4.3 优化模型参数设置

IES 优化模型相关经济参数和技术参数如表 1 和表 2 所示。电价和气价数据来源于当地政策文件, 经济参数和技术参数来自于文献[14-17]。

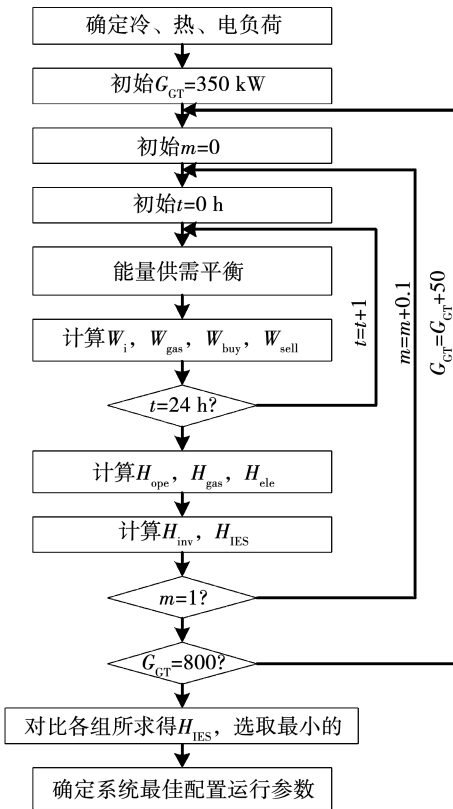


图 3 系统优化步骤示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system optimization steps

表 1 IES 设备技术参数

Tab. 1 IES equipment technical parameters

参数	数值
燃气轮机供电效率	0.47
燃气轮机制热效率	0.3
余热锅炉产热效率	0.8
地源热泵制热效率	4.4
吸收式制冷机制冷效率	1.2
电制冷机制冷效率	4.0
热交换器换热效率	0.8

表 2 IES 设备经济参数

Tab. 2 IES equipment economic parameters

设备类型	投资费用/元 · kW ⁻¹	运行维护费用/元 · kW ⁻¹
燃气轮机	4 000	0.025
余热锅炉	806	0.016
地源热泵	2 480	0.009
吸收式制冷机	1 200	0.01
电制冷机	970	0.07
热交换器	200	0.016

5 区域 IES 优化结果分析

5.1 不同运行策略下优化结果对比分析

为对比在不同运行策略下,各建筑所对应的 IES 设备配置和运行参数以及能量供应差异,选取 3 栋居住建筑和 1 栋商业建筑作为供能对象,且 IES 所供能面积相等。

针对居住建筑,基于以热定电和以电定热两种运行策略进行了 IES 优化设计,结果如图 4 (a) 所示。结果显示,在以热定电模式下,最优的 G_{CT} 为 450 kW, m 为 0.7, 全天的综合能源供能费用为 12 931.25 元, 单位面积的供能成本为 0.862 元/m²。在以电定热策略下,最优的 G_{CT} 为 550 kW, m 为 0.1, 日综合能源供能费用为 11 184.61 元, 单位面积的供能成本为 0.745 元/m²。居民建筑属于民用建筑,整体冷、热、电负荷较小,因此整体费用不高。

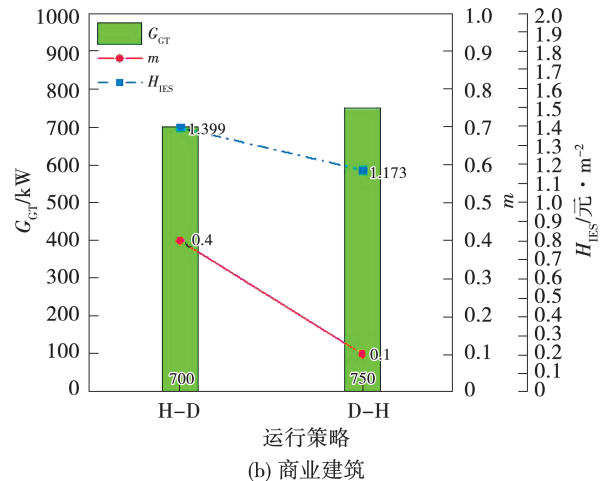
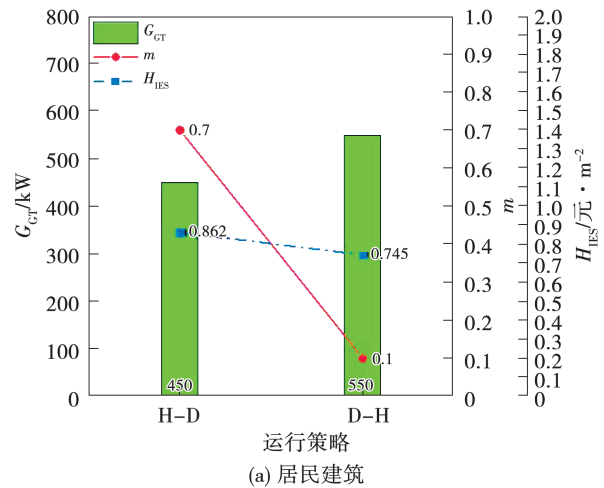


图 4 IES 供能最优参数结果

Fig. 4 Results of IES optimal energy supply parameters

商业建筑热负荷大,且负荷分时段明显,具有较大的波峰和波谷。图4(b)为以热定电策略和以电定热策略下商业建筑的最佳 G_{CT} 和 m ,以及单位供能面积成本 H_{IES} 。在以热定电策略下优化得到的 G_{CT} 为 700 kW, m 为 0.4,日综合能源供能费用为 20 995.14 元,单位面积的供能成本为 1.399 元/ m^2 。在以电定热策略下 G_{CT} 优化结果为 750 kW, m 为 0.1,日综合能源供能费用为 17 605.47 元,单位面积的供能成本为 1.173 元/ m^2 。在较大的 G_{CT} 情况下,燃气轮机机会产生大量的余热。在夏季,余热可以通过余热锅炉产生热蒸汽供给吸收式制冷机和热交换器,因此在以电定热策略下的 m 仅为 0.1,而以热定电策略下的 m 为 0.4,需要加大电制冷机的供冷量。以热定电策略优化结果下 G_{CT} 小于以电定热策略,因此发电量也小,低发电量以及电制冷机的高耗电量造成以热定电策略的日综合能源费用高于以电定热策略。造成以热定电策略的费用高的另一原因是商业建筑的热负荷小,因此原动机的输出功率小,余热排放量小,加大了对电制冷机的使用。

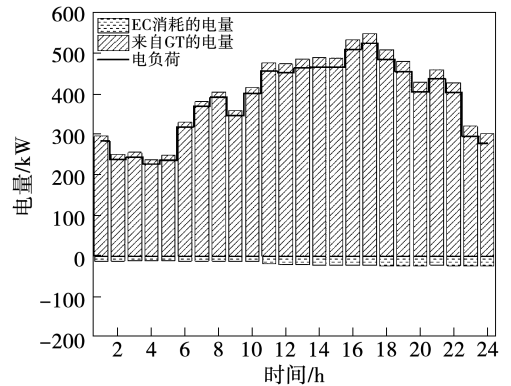
以电定热策略的经济性普遍优于以热定电策略,这是由于以电负荷为导向的运行策略不存在多余浪费的电能。电能的来源是直接购买或者直接生产,热能的来源是生产电能的附带产品和地源热泵供热,而地源热泵消耗清洁能源,不存在高额的能源费用。因此,合理选择系统策略还需要综合考虑能源费用和投资回收费用。

5.2 不同运行策略供需平衡分析

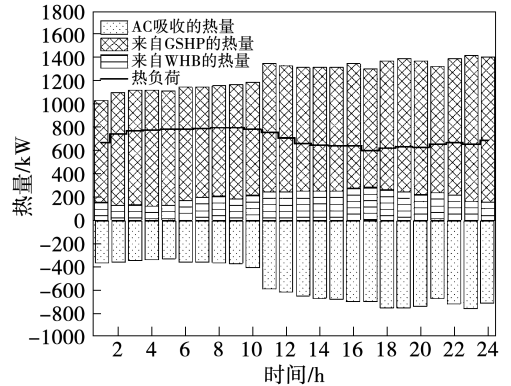
图5和图6为不同运行策略下建筑在典型日的电能和热能的供需平衡情况。其中实线是负荷值,图中正值代表生产的能量和获取的能量,负值代表消耗的能量和储能的能量。

在以电定热运行模式下,原动机部分负荷下会产生多余热量。由于居民建筑的电、热负荷较小,但又高于燃气轮机的启动负荷,因此燃气轮机处于部分负荷状态,电能完全由燃气轮机供给,不依靠外部电网。由于发电量小造成了燃气轮机供热量小,因此系统热量生产大部分由地源热泵系统提供。商业建筑的电、热负荷大,10:00~19:00间用电高峰阶段,燃气轮机满负荷运行,并且需要外部电网补充电量。在以电定热的模式下,商业建筑的燃气轮机满负荷运行协同地源热泵的高效出力产生大量的热,提高了吸收式制冷机的工作效率,因此冷量供给方

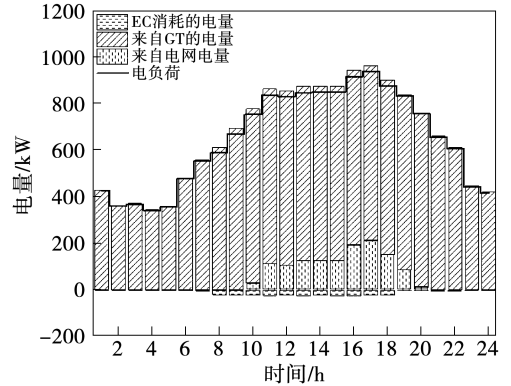
面主要依靠吸收式制冷机,电制冷机辅助补充冷量。



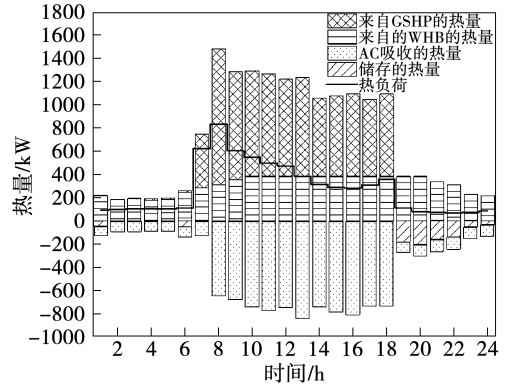
(a) 居民电能供需平衡



(b) 居民热能供需平衡



(c) 商业电能供需平衡



(d) 商业热能供需平衡

图5 以电定热策略下能量供需平衡

Fig.5 Energy supply and demand balance under "determining heat by electricity" strategy

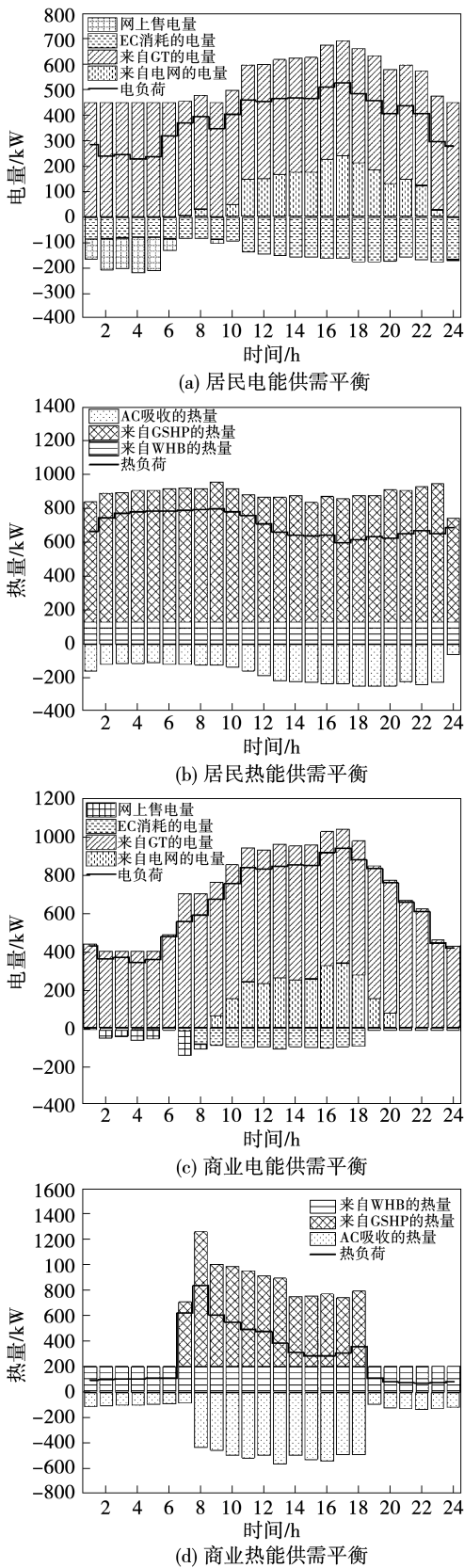


图6 以热定电策略下能量供需平衡

Fig. 6 Energy supply and demand balance under "determining electricity by heat" strategy

在以热定电运行模式下,以热负荷为导向,居民建筑 IES 中燃气轮机满负荷运行,但大部分热量仍然需要由地源热泵提供。其中,0:00 ~ 9:00 时燃气轮机能满足系统所需电负荷,10:00 ~ 23:00 时需额外电网供电,在 23:00 ~ 5:00 时系统存在售电行为。以热为导向的商业建筑 IES 的 G_{CT} 小于以电为导向的 G_{CT} 。

通过对比以电定热模式下的系统储热量和以热定电模式下的系统售电量可以发现,在以电定热的运行模式下,系统的能量供给能够做到充分利用,只有很小的一分部热能需要储存;而在以热定电的运行模式下,系统运行过程中产生了额外电量,导致能源利用率低,没有发挥出系统的经济性和能效优势。因此,两个运行模式的对比下,以热定电运行策略比以电定热运行策略的经济性差。

5.3 与传统供能系统对比

传统供能系统的电负荷由电网承担,冷负荷由电制冷机提供,热负荷由燃气锅炉系统供给。图7为传统供能系统示意图。

居民建筑传统供能系统为燃气锅炉系统,其额定容量为 932 kW,换热器的额定容量为 877 kW,电制冷的机额定容量为 257 kW。商业建筑传统供能系统为燃气锅炉系统,其额定容量为 975 kW,换热器的额定容量为 825 kW,电制冷机额定容量为 283 kW。

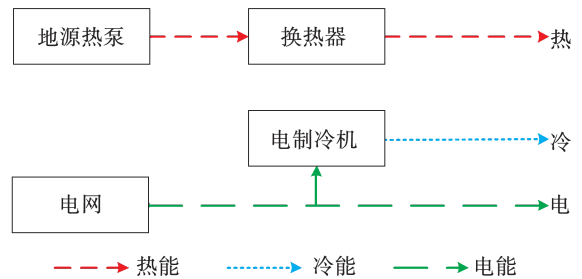


图7 传统供能系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of conventional power supply system

通过对比传统系统与 IES 供能设备的额定容量发现,传统系统的地源热泵和换热器的额定容量高

于 IES 的额定容量,是由于传统系统供能不存在能源梯级利用,浪费了部分余热。表 3 为传统系统和 IES 系统结果对比。由表 3 可知,传统系统居民建筑供能费用为 16 634 元,单位面积费用为 1.109 元/m²;商业建筑供能费用为 22 771 元,单位面积费用为 1.518 元/m²,高于 IES 两种运行策略下的费用。另外,以电定热策略下的两种建筑的相对成本节约率分别为 30.34% 和 20.54%,以热定电策略下的两种建筑的成本节约率分别为 20.32% 和 5.84%。因此,IES 的经济性优于传统系统。

表 3 传统系统和 IES 系统结果对比

Tab.3 Comparison of results between conventional system and IES system

名称	运行方式	总费用 /元	单位面积 费用/元·m ⁻²	相对成本 节约率/%
居民建筑	传统系统	16 634	1.109	0
建筑	以热定电系统	13 254	0.884	20.32
	以电定热系统	11 587	0.772	30.34
商业建筑	传统系统	22 771	1.518	0
建筑	以热定电系统	21 440	1.429	5.84
	以电定热系统	18 093	1.206	20.54

6 结 论

针对综合能源系统,本文选择了燃气轮机容量和电制冷供冷量机占冷负荷比例两个优化变量建立 IES 优化运行模型,对比分析了系统两种运行策略下两类建筑的系统配置方案以及综合费用,同时对 IES 与传统系统的供能方式和费用,得到了以下结论:

(1) 优化结果显示,以热定电策略的 G_{CT} 小, m 大,以电定热策略的 G_{CT} 大, m 小。同时分析发现,燃气轮机额定容量的大小与电制冷机供冷量占比呈负相关。

(2) 通过对比两种运行策略发现,以电定热运行策略下系统能做到自给自足,系统产生的额外热量少,以热定电运行策略下系统产生的上网电量多,因此以电定热策略的能源利用率高。

(3) 以电定热运行策略下系统的单位供能成本

以及综合费用优于以热定电策略,制定以电定热运行策略系统的经济性更优。

(4) 通过对比 IES 和传统供能系统,证实了 IES 供能经济性优于传统方式,针对建筑的相对成本节约率能达到 5% ~ 30%。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2020 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2021(3): 8-22.
National bureau of statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China 2020 on national economic and social development [J]. China Statistics, 2021(3): 8-22.
- [2] 屈小云, 吴 鸣, 李 奇, 等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
QU Xiao-yun, WU Ming, LI Qi, et al. Review on comprehensive evaluation of multi-complementary integrated energy systems [J]. China Power, 2021, 54(11): 153-163.
- [3] MOSAFFA A, FARSHI L. Thermodynamic and economic assessments of a novel CCHP cycle utilizing low-temperature heat sources for domestic applications [J]. Renewable Energy, 2018, 120: 134-150.
- [4] 李航行, 陈 亮, 王春波, 等. 太阳能燃气联合循环机组热电联产性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4931-4940.
LI Hang-xing, CHENG Liang, WANG Chun-bo, et al. Performance analysis of combined heat and power generation of solar gas combined cycle unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4931-4940.
- [5] 汤翔鹰, 胡 炎, 耿 琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.
TANG Xiang-ying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time scale optimization scheduling for integrated energy systems considering multi-energy flexibility [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.
- [6] 程 杉, 徐建宇, 何 畅, 等. 计及不确定性的综合能源系统容量规划方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 17-24.
CHENG Shan, XU Jian-yu, HE Chang, et al. Capacity planning approach for integrated energy systems with uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 17-24.
- [7] 曾 博, 徐富强, 刘 裕, 等. 考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法 [J]. 中国电机工程

- 学报,2021,41(21):7212-7225.
- ZENG Bo, XU Fu-qiang, LIU Yu, et al. Multi-objective interval optimization planning method for energy hub considering synergistic effect of renewable energy and demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21):7212-7225.
- [8] 白牧可,王越,唐巍,等.基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J].电网技术,2017,41(12):3963-3970.
- BAI Mu-ke, WANG Yue, TANG Wei, et al. Day-ahead optimal dispatching of regional integrated energy system based on interval linear programming[J]. Power System Technology, 2017, 41(12):3963-3970.
- [9] 冯智慧,吕林,许立雄.基于能量枢纽的沼-风-光全可再生资源系统日前-实时两阶段优化调度模型[J].电网技术,2019,43(9):3101-3109.
- FENG Zhi-hui, LYU Lin, XU Li-xiong. Two-stage optimal dispatch model of day-ahead and real-time for biogas-wind-solar fully renewable energy system based on energy hub[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3101-3109.
- [10] WANG Jiang-jiang, XIE Xin-qi, LU Yan-chao, et al. Thermodynamic performance analysis and comparison of a combined cooling heating and power system integrated with two types of thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 219:114-122.
- [11] 胡蘭丹,刘东,闫丽霞,等.考虑需求响应的CCHP多能互补优化策略[J].南方电网技术,2016,10(12):75-81.
- HU Lan-dan, LIU Dong, YAN Li-xia, et al. CCHP multi-function complementary optimization strategy considering demand response[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12):75-81.
- [12] LI Long-xi, YU Shi-wei, MU Hai-lin, et al. Optimization and evaluation of CCHP systems considering incentive policies under different operation strategies[J]. Energy, 2018, 162:825-840.
- [13] 吕佳炜,张沈习,程浩忠.计及热惯性和运行策略的综合能源系统可靠性评估方法[J].电力系统自动化,2018,42(20):9-16.
- LYU Jia-wei, ZHANG Shen-xi, CHENG Hao-zhong. Integrated energy system reliability assessment method including thermal inertia and operational strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20):9-16.
- [14] WU Di, HAN Zhong-he, LIU Zhi-jian, et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multi-scenario integrated energy system[J]. Energy, 2021, 217:119311.
- [15] 金红光,郑丹星,徐建中编著.分布式冷热电联产系统装置及应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
- JIN Hong-guang, ZHENG Dan-xing, XU Jian-zhong. Distributed cogeneration system installation and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [16] 林世平主编.燃气冷热电分布式能源技术应用手册[M].北京:中国电力出版社,2014.
- LIN Shi-ping. Distributed energy technology application manual for gas heating and cooling[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [17] 杨欢红,史博文,黄文焘,等.基于综合需求响应的微能源网日前优化调度方法[J].电力建设,2021,42(7):11-19.
- YANG Huan-hong, SHI Bo-wen, HUANG Wen-tao, et al. Day-ahead optimized operation of micro energy grid considering integrated demand response[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7):11-19.

(姜雪梅 编辑)