

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231502

考虑供需匹配特性的冷热电联供系统运行策略研究

李要红, 王鹏翔, 彭斌, 姚鑫

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对以电定热和以热定电运行策略能量冗余以及混合热电运行策略能源不足的特性, 在热电负荷平衡运行策略的基础上, 提出了改进的热电负荷平衡运行策略。以北方某酒店为研究对象, 并以最大化能源利用率为目标对系统的装机容量进行了优化, 同时提出了能源综合指数, 研究了在5种运行策略下购买能量和冗余能量对系统性能的影响。然后分析了在不同运行策略下系统的供需匹配特性和改进的热电负荷平衡策略下系统的能量平衡关系。最后, 通过算例探究了改进的热电负荷平衡策略对提高系统经济性的作用, 并经过对比分析验证了研究的合理性与有效性。研究表明, 与其他4种运行策略相比, 改进的热电负荷平衡运行策略下系统的能源利用率分别提高了4.3%、4.38%、4.75%、4.73%; 能源综合指数分别降低了6.58%、5.96%、2.23%、3.45%; 系统的年总成本分别降低了11.65%、2.74%、1.64%、0.74%。其中, 改进的热电负荷平衡策略下系统的供需匹配性能最优(为0.9382)。

关键词: 运行策略; 能源利用率; 能源综合指数; 供需匹配

Operational strategy of a combined cooling, heating and power system considering the matching characteristics of supply and demand

LI Yaohong, WANG Pengxiang, PENG Bin, YAO Xin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: There is an energy redundancy of the following electric load and following thermal load operational strategies, and an energy deficiency of the following hybrid electric-heating load. Thus an improved following balanced heat-electrical load operational strategy is proposed. Taking a hotel in the north as the research object, the installed capacity of the system is optimized with the goal of maximizing energy utilization rate. At the same time, an energy composite index is proposed, and the effects of purchased and redundant energy on system performance are investigated with five operating strategies. Also the supply and demand matching characteristics of the system using different strategies and the energy balance relationship of the system with the improved strategy proposed are analyzed. Finally, the role of the strategy in improving the system economy is explored through an arithmetic example, and a comparative analysis is conducted to verify the rationality and effectiveness of the study. The results show that, compared with the other four strategies, the energy utilization rate of the system with the improved strategy is increased by 4.3%, 4.38%, 4.75%, and 4.73%, respectively; the energy composite index is reduced by 6.58%, 5.96%, 2.23%, and 3.45%, respectively; and the total annual cost of the system is reduced by 11.65%, 2.74%, 1.64%, and 0.74%, respectively. The system's supply-demand matching performance with the improved following balanced heat-electrical load strategy is optimum at 0.9382.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51966009).

Key words: operational strategy; energy utilization rate; energy composite index; matching supply and demand

0 引言

随着世界人口数量的快速增长和人民生活水平

的不断提高, 全球能源需求呈现持续增长的趋势, 环境污染和能源短缺问题已引起世界各国的广泛关注^[1-3]。传统发电通过燃烧化石燃料, 将热能依次转化为机械能和电能, 在这种能量转化过程中会产生余热, 若将余热直接排入大气, 不仅对环境产生热污染, 而且导致系统整体效率低下^[4-5]。冷热电联供

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51966009); 甘肃省重点研发计划项目资助(20YF8GA057)

(combined cooling heating and power, CCHP)系统主要是通过与电网、天然气、制冷、制热等功能网络相耦合,同时满足用户的电、气、制冷、供热的能源需求^[6-8],是提高能源综合利用率、实现能源可持续发展的重要途径^[9]。

在过去的几十年中,针对 CCHP 系统,很多学者综合考虑其经济性和热力学性能,从结构设计和配置优化的角度进行了广泛的研究^[10-11]。然而,除了系统结构设计优化外,运行策略在系统设计和运行过程中也非常重要。常见的运行策略主要有以热定电(following thermal load, FTL)和以电定热(following electric load, FEL)。能源系统在以热定电下首先满足用户的热负荷,不足的电负荷由电网提供,而以电定热则优先满足用户的电负荷需求,不足的热量由锅炉补充。然而,这两种运行策略都会产生多余的能量^[12],因此有学者在以热定电和以电定热的基础上提出了一些改进的运行策略^[13-14]。文献[15]提出的混合热电(following hybrid electric-heating load, FHL)运行策略,系统根据用户负荷需求在以热定电和以电定热之间切换,避免产生过多的能量。文献[16]对比了在以电定热、以热定电和混合热电运行策略下,对生态城市区域能源系统的年总成本、运行成本、CO₂ 排放量和一次能源消耗量进行了分析,结果表明混合热电运行策略的性能较差。文献[17]比较了某五星级酒店采用以电定热、以热定电和混合热电运行策略时的 CCHP 系统性能,结果表明即使在混合热电运行策略下避免了过多的电能和热能,但系统仍然表现出较低的非设计性能。可见混合热电的运行策略需要进一步修改。文献[18]提出了热电负荷平衡(following balanced heat-electrical load, FBL)运行策略,该策略包含各种冗余能量的三个子策略,通过与混合热电运行策略进行综合性能对比,结果表明在热电负荷平衡策略下系统的综合性能均有所提高,但是系统仍会产生冗余的热能,增加了 CO₂ 的排放,导致同一运行策略下系统的性能降低。

由于负荷需求的不确定性,导致 CCHP 系统在供给侧与需求侧之间存在能量供需不匹配^[19],从而制约了 CCHP 技术的推广与发展,所以制定合理的运行策略是提高供给侧与需求侧能量供需匹配的重要环节。同时,一些不可预测的因素(如气候变化)也会影响匹配性能。文献[20]提取了 5 种无量纲负载匹配参数来描述系统与用户的匹配性能,基于负载匹配参数建立匹配图,用于描述不同用户与 CCHP 系统之间的热、电平衡。文献[21]以现场能

量分数和现场能量匹配作为评价系统匹配性能的目标,但是该方法适用于评估近零能耗建筑物。文献[22]用节能、环保和经济组成的多目标优化函数分析系统的容量配置以及运行策略的协同优化,结果表明 CCHP 系统相比独立供能系统,具有明显的经济、节能与环保的综合优势。虽然现有文献在运行策略方面做了很多的研究,而且取得了较好的效果,但是针对不同运行策略下系统与用户匹配性能的研究较少。

本文以北方某酒店为研究对象,依据酒店整年的负荷需求,提出了一种改进的热电负荷平衡运行策略。首先以能源利用率为目标函数,采用枚举法确定了不同策略下燃气轮机的最优装机容量。然后对比分析了 5 种运行策略下系统的能源利用率,以及通过能源综合指数进一步研究了购买能量和冗余能量对系统性能的影响,最后探究了不同策略下系统的供需匹配特性。本文主要贡献如下:

- 1) 基于以热定电和以电定热运行策略能量冗余以及混合热电运行策略能量不足的特性,在热电负荷平衡策略的基础上,提出了一种改进的热电负荷平衡运行策略;
- 2) 对燃气轮机的装机容量进行了优化,由于燃气轮机的最优容量对策略优化有明显影响,影响了不同运行策略比较的公平性;
- 3) 提出了能源综合指数,研究了在不同运行策略下购买能量和冗余能量对系统性能的影响;
- 4) 分析了不同运行策略下 CCHP 系统的供需匹配关系,研究了在改进的热电负荷平衡策略下系统的能量供需平衡关系。

1 CCHP 系统构成

图 1 为以燃气轮机为动力机组的典型 CCHP 系统结构示意图。系统基于“温度对口、梯级利用”的集成原则进行关键部件耦合,主要由发电、制冷与制热三个机组组成。其中,动力发电机组为燃气轮机,加压预热后的空气与燃料在燃烧室内混合燃烧,产生的高温高压烟气驱动透平做功,从而提供用户电负荷;透平排出的高温烟气通过驱动吸收式制冷机组和换热器分别为用户提供冷负荷和热负荷;冗余的中低温烟气通过有机朗肯循环将其转化为电能,并为用户提供电负荷;不足的冷、热、电负荷分别通过热泵机组、燃气锅炉和电网购电补充;满足用户的冷、热、电负荷需求。

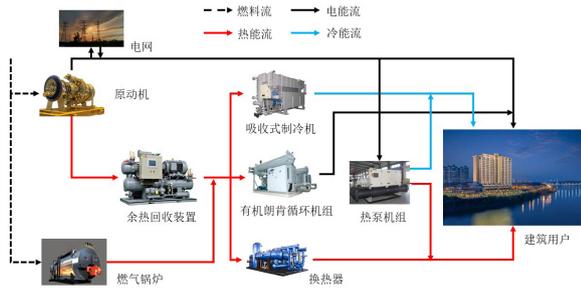


图 1 CCHP 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCHP system structure

2 CCHP 数学模型

2.1 设备模型

2.1.1 燃气轮机

燃气轮机燃烧空气和天然气混合气体产生的电功率和热量的计算公式分别为

$$P_{\text{pgu}}^E = F_{\text{pgu}} \times \eta_{\text{pgu}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{rc}} = \frac{1 - \eta_{\text{pgu}}}{\eta_{\text{pgu}}} P_{\text{pgu}}^E \times \eta_{\text{rc}} \quad (2)$$

式中： P_{pgu}^E 为燃气轮机的发电功率，kW； Q_{rc} 为从燃气轮机回收的热量，kW； F_{pgu} 为燃气轮机的燃料消耗量，kJ； η_{pgu} 和 η_{rc} 分别代表燃气轮机的发电效率和余热回收装置的效率。

燃气轮机发电效率的计算方法^[23]为

$$\eta_{\text{pgu}} = (-1.18f_{\text{pgu}}^3 + 3.69f_{\text{pgu}}^2 - 4.69f_{\text{pgu}} + 3.18d)\eta_{\text{nom}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{nom}} = 10^{-10} \times (P_{\text{cap}}^E)^2 + 8 \times 10^{-6} \times P_{\text{cap}}^E + 0.2464 \quad (4)$$

式中： f_{pgu} 为负载率， $f_{\text{pgu}} = \frac{P_{\text{pgu}}^E}{P_{\text{cap}}^E}$ ，表征燃气轮机输出电功率与额定电功率的比值，为保证燃气轮机的高效稳定运行，选取燃气轮机最低负载率 $f_{\text{pgu}} = 0.25$ ； η_{nom} 为燃气轮机的额定发电效率； P_{cap}^E 表示燃气轮机的装机容量，kW。

2.1.2 吸收式制冷机组
吸收式制冷机组是以中高品位的热能为驱动热源，产生冷量的设备。由于其结构复杂、影响因素众多，为便于分析 CCHP 系统的综合性能，通常将吸收式制冷机组的模型进行简化，则数学模型计算公式^[24]为

$$Q_{\text{ac}} = C_{\text{OP ac}} \times Q_{\text{rc}} \quad (5)$$

式中： Q_{ac} 为吸收式制冷机组的制冷功率，kW； Q_{rc} 为制冷机组吸收的热功率，kW； $C_{\text{OP ac}}$ 为制冷系数。

2.1.3 热泵机组

热泵机组可通过消耗高品位的电能产生能量，因此热泵机组通常被选作调峰设备用于补充不足的能量需求，则数学模型计算公式^[24]为

$$Q_{\text{hp}} = C_{\text{OP hp}} \times P_{\text{hp}}^E \quad (6)$$

式中： Q_{hp} 为热泵机组功率，kW； P_{hp}^E 为热泵机组消耗的电功率，kW； $C_{\text{OP hp}}$ 为能效系数。

2.1.4 换热器机组

以燃气轮机排出的高温气体或余热回收装置回收的蒸汽热源，通过换热器为用户提供热负荷需求，则数学模型计算公式^[25]为

$$Q_{\text{h}} = Q_{\text{th}} \times \eta_{\text{hc}} \quad (7)$$

式中： Q_{h} 为换热器提供的制热功率，kW； Q_{th} 为流经换热器的热量，kW； η_{hc} 为传热效率。

2.1.5 有机朗肯循环机组

有机朗肯循环机组是一种利用低沸点有机物作为工质的热力发电系统。在有机朗肯循环机组中，有机工质在蒸发器中从余热或其他热源中吸收热量，然后变成高温高压的蒸汽，进入透平中膨胀做功，驱动发电机发电，则数学模型计算公式^[26]为

$$P_{\text{orc}}^E = Q_{\text{orc}} \times \eta_{\text{orc}} \quad (8)$$

式中： P_{orc}^E 为有机朗肯循环产生的电功率，kW； Q_{orc} 为有机朗肯循环消耗的热功率，kW； η_{orc} 为转化效率。

2.1.6 燃气锅炉

当系统原动机产生的热量不足以满足用户的热负荷需求时，需要燃气锅炉补燃，实现系统与用户的热能供需匹配，则数学模型计算公式^[27]为

$$Q_{\text{b}} = F_{\text{b}} \times \eta_{\text{b}} \quad (9)$$

式中： Q_{b} 为燃气锅炉输出的热功率，kW； F_{b} 为锅炉的燃料消耗，kJ； η_{b} 为锅炉的效率。

2.2 能量平衡

本文主要研究了系统运行策略与系统匹配性能之间的关系，并没有考虑燃气轮机燃料流量对燃气轮机效率的影响，因此假设燃气轮机处于稳态运行。为了保证 CCHP 系统能源供给与酒店负荷需求的匹配，应满足以下能量平衡关系。

电能平衡的表达式为

$$P_{\text{pgu}}^E + P_{\text{grid}}^E + P_{\text{orc}}^E = P_{\text{d}}^E + P_{\text{hp}}^E \quad (10)$$

式中： P_{grid}^E 为向电网购买的电功率，kW； P_{d}^E 为用户的电负荷，kW。

由于不能保证 CCHP 系统产生的能源与酒店负荷需求之间的实时平衡，因此该系统产生的电力与

电网的关系为

$$\begin{cases} P_{\text{grid}}^E = P_d^E - P_{\text{pgu}}^E + P_{\text{hp}}^E - P_{\text{orc}}^E \\ P_{\text{pgu}}^E + P_{\text{orc}}^E \leq P_d^E + P_{\text{hp}}^E \end{cases} \quad (11)$$

热平衡的表达式为

$$Q_{\text{re}} + Q_b = Q_{\text{rc}} + Q_{\text{th}} \quad (12)$$

$$Q_d = Q_{\text{hp,c}} + Q_{\text{ac}} \quad (13)$$

$$H_d = Q_{\text{hp,h}} + Q_h \quad (14)$$

式中: $Q_{\text{hp,c}}$ 、 $Q_{\text{hp,h}}$ 分别为热泵机组制冷功率和制热功率; Q_d 和 H_d 分别为用户的冷负荷和热负荷。

2.3 评价指标

2.3.1 能源利用率(energy utilization rate, EUR)

能源利用率主要反映系统能源在使用过程中的效率, 是衡量 CCHP 系统运行效率的一个重要指标, 其公式为

$$E_{\text{UR}} = \frac{\sum_t (P_{\text{pgu}}^E + Q_{\text{re}} + P_{\text{grid}}^E + Q_b - Q_c - P_{\text{excess}}^E)}{\sum_t \left(F_{\text{pgu}} + F_b + \frac{P_{\text{grid}}^E}{\eta_c \eta_{\text{grid}}} \right)} \quad (15)$$

式中: Q_c 为系统冗余热能, kW; P_{excess}^E 为系统冗余电能, kW; η_c 和 η_{grid} 分别表示发电效率和电网传输效率; t 为时间。

2.3.2 能源综合指数(energy composite index, ECI)

购买能源(buy energy, BE)主要是体现能源系统在使用能源的过程中所需要额外补充能源的比例, 其公式为

$$B_E = \sum_t (P_{\text{grid}}^E + Q_b) / \sum_t (P_d^E + Q_d + H_d) \quad (16)$$

冗余能量(redundant energy, RE)说明能源系统在运行过程中冗余能量部分对用户负荷需求之间的关系, 其公式为

$$R_E = \sum_t (Q_c + P_{\text{excess}}^E) / \sum_t (P_d^E + Q_d + H_d) \quad (17)$$

为了更加直观地评判系统的能源情况, 采用能源综合指数 E_{CI} 对能源系统的冗余能量和购买能量进行研究。本文采用权重分析方法, 其公式为

$$E_{\text{CI}} = \lambda_1 B_E + \lambda_2 R_E \quad (18)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为权重系数, 且 $0 < \lambda_1$ 、 $\lambda_2 < 1$ 、 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1/2$ 。

2.3.3 能源供需匹配性

由于燃气轮机的运行特性、用户需求的波动、运行策略和其他因素, 系统的输出不能一直满足能量需求, 以达到理想的供需匹配性能, 因此选择能源供需匹配性 M 作为评价指标, 其公式为

$$M = \frac{\sum_t (P_{\text{pgu}}^E + Q_{\text{rc}} \times C_{\text{OP ac}} + Q_{\text{th}} \times \eta_{\text{hc}})}{\sum_t (P_d^E + Q_d + H_d)} \quad (19)$$

2.3.4 经济性能指标

采用系统的年总成本(annual total cost, ATC)表征 CCHP 系统的经济性能指标。年总成本 A_{TC} 包括能源系统的设备折算到使用年限内每年的投资以及系统每年的运行成本^[16,18,28-29], 相关的计算公式为

$$A_{\text{TC}} = \sum_N (R I_{\text{nv}} + C_{\text{ost}} + C_m + C_p) \quad (20)$$

式中: I_{nv} 和 C_{ost} 分别表示系统的初始投资成本和年度能耗运行成本; C_m 和 C_p 分别表示系统的年度维修管理成本和系统被征收的污染物排放成本; N 为设备的数量; R 为成本回收系数。

$$I_{\text{nv}} = \sum_N (cp) \quad (21)$$

$$C_{\text{ost}} = \sum_t (P_c + P_{\text{grid}}^E + P_g (F_b + F_{\text{pgu}})) \quad (22)$$

$$C_m = \sum_N (cM) \quad (23)$$

$$C_p = \varepsilon_{\text{tax}} \times E_{\text{R,CO}_2} \quad (24)$$

式中: c 为系统各设备的容量配置; p 为每台设备的初始投资成本; P_c 和 P_g 分别为购电价格和购气价格; M 为系统各设备单元容量的年维修管理费, 取值为设备单位容量投资的 1.5%; ε_{tax} 为污染物排放税率; $E_{\text{R,CO}_2}$ 为二氧化碳总排放量。

$$E_{\text{R,CO}_2} = \sum_t (\delta_{\text{co}_2,f} (F_{\text{pgu}} + F_b) + \delta_{\text{co}_2,e} P_{\text{grid}}^E) \quad (25)$$

$$R = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (26)$$

式中: $\delta_{\text{co}_2,f}$ 和 $\delta_{\text{co}_2,e}$ 分别为燃料和电能的 CO_2 转化因子; i 是年利率, 取 0.1; n 为设备的使用年限, 取 20 年。

假设系统中的所有设备具有相同的年利率和使用寿命。表 1 显示了每种设备的初始投资成本。

表 1 CCHP 系统设备成本参数^[26,28]

Table 1 Cost parameters of CCHP system equipment^[26,28]

设备	p
热泵机组	2200
吸收式制冷机组	1200
有机朗肯循环机组	7500
换热器	200
燃气轮机	6800
余热回收设备	300
燃气锅炉	300

3 运行策略

由于建筑物的负荷需求具有波动性，系统在运行过程中，燃气轮机的产能与建筑物的能量需求不会实时匹配，从而提出了改进的热电负荷平衡运行策略，如图2所示。横坐标表示系统的输出功率及用户电负荷需求，纵坐标表示系统的输出热功率以及用户的综合热负荷需求，黑色曲线 O_1O_2 表示燃气轮机最佳热产能曲线。在不同的区域燃气轮机的运行方式不同，具体运行方法如下。

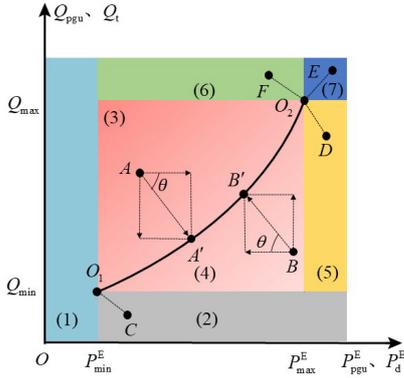


图2 IFBL 运行策略

Fig. 2 IFBL operation strategy

情景 1: 当 $P_d^E < P_{\min}^E$ 时，其中 P_{\min}^E 表示当燃气轮机以 25% 的额定负载运行时燃气轮机产生的最小功率。对应于图 2 中的子区域(1)，此时燃气轮机关闭，用户电能需求将由电网提供，所需的热量由锅炉补充。

情景 2: 当 $P_{\min}^E < P_d^E$ 且 $Q_t \leq Q_{\min}$ 时，其中 Q_{\min} 表示燃气轮机以 25% 的额定负载运行时可回收的最小热量。对应于图 2 中的子区域(2)。燃气轮机以最低负荷率运行，不足的电负荷向电网购买，多余的热量排空。此时 $f_{\text{pgu}} = 0.25$ 、 $P_{\text{pgu}}^E = P_{\min}^E$ 、 $Q_{\text{re}} = Q_{\min}$ 、 $P_{\text{grid}}^E = P_d^E - P_{\text{pgu}}^E$ ， Q_t 为用户的综合热负荷需求，是热负荷和冷负荷之和， $Q_t = Q_d + H_d$ 。如图 2 中 C 点，系统将在 O_1 点运行。

情景 3: 当 $P_{\min}^E \leq P_d^E \leq P_{\max}^E$ 且 $Q_{\text{pgu}} \leq Q_t \leq Q_{\max}$ 时，对应于图 2 中的子区域(3)，如 A 点所示，建筑物负荷位于燃气轮机效率曲线上方，系统在 O_1O_2 之间的 A' 点运行。燃气轮机产生的热量不能完全满足用户热负荷，而燃气轮机产生一部分多余的电量。因此，多余部分的电量用来驱动热泵产热，满足用户缺乏的热能。当系统多余的电量刚好补充用户缺乏的热量时，系统没有能量冗余或补充。此时，系统

原动机的运行点 A' 的位置以及角度 θ 可由式(27)一式(29)来确定。

$$P_{\text{hp}}^E = P_{\text{pgu}}^E - P_d^E \quad (27)$$

$$P_{\text{hp}}^E \times C_{\text{OP hp}} = Q_t - Q_{\text{re}} \quad (28)$$

$$\tan \theta = (Q_t - Q_{\text{re}}) / P_{\text{hp}}^E \quad (29)$$

即当 $\tan \theta = C_{\text{OP hp}}$ 时，系统产生的多余电量刚好用于满足不足的热量。

情景 4: 当 $P_{\min}^E \leq P_d^E \leq P_{\max}^E$ 且 $Q_{\min} \leq Q_t < Q_{\text{pgu}}$ 时，对应于图 2 中的子区域(4)，如 B 点所示，建筑物负荷点位于燃气轮机效率曲线下方，系统在 O_1O_2 之间的 B' 点运行。燃气轮机产生的电量不能完全满足用户电负荷，而燃气轮机产生一部分多余的热量。因此，多余部分的热量被 ORC 吸收转化为电能，以提供此时建筑物不足的电量。当系统通过 ORC 产生的电量刚好补充用户缺乏的电量时，系统没有能量冗余或补充。此时，系统原动机的运行点 B' 的位置以及角度 θ 可由式(30)一式(32)来确定。

$$Q_{\text{orc}} = Q_{\text{re}} \times \eta_{\text{re}} - Q_t \quad (30)$$

$$Q_{\text{orc}} \times \eta_{\text{orc}} = P_d^E - P_{\text{pgu}}^E \quad (31)$$

$$\tan \theta = (Q_{\text{re}} \times \eta_{\text{re}} - Q_t) / (P_d^E - P_{\text{pgu}}^E) \quad (32)$$

即当 $\tan \theta = \eta_{\text{orc}}$ 时，系统产生的多余热量刚好满足不足的电量。

情景 5: 当 $P_{\max}^E \leq P_d^E$ 且 $Q_{\min} \leq Q_t \leq Q_{\max}$ 时，对应于图 2 中的子区域(5)。此时，燃气轮机满负荷运行，用户需要的电量大于原动机所产生的电量，但系统产生的热能会有剩余，将多余的热能通过 ORC 转化为电能。若原动机产生的电能和 ORC 转化的电能不能满足用户需求，则电网提供不足的电量。如图 2 中 D 点，系统将在 O_2 点运行。

情景 6: 当 $P_{\min}^E \leq P_d^E \leq P_{\max}^E$ 且 $Q_{\max} \leq Q_t$ 时，其中 P_{\max}^E 表示当燃气轮机满载运行时燃气轮机产生的最大功率，对应于图 2 中的子区域(6)。此时，燃气轮机满负荷运行，用户需要的热量大于系统回收的热量，但系统产生的电能会有剩余，将多余的电量驱动热泵转化为热能。若热能还不能满足用户需求，则不足的热能将由锅炉提供。如图 2 中 F 点，系统将在 O_2 点运行。

情景 7: 当 $Q_{\max} < Q_t$ 且 $P_{\max}^E < P_d^E$ 时，其中 Q_{\max} 表示燃气轮机满载运行时可回收的最大热量，对应于图 2 中的子区域(7)。此时，燃气轮机满负荷运行，酒店的热负荷大于从燃气轮机回收的热量，电负荷大于系统产生的电量，不足的电量将从电网购买，不

足的热量将由锅炉提供。如图2中E点, 系统运行在 O_2 点, 此时 $f_{pgu} = 1$ 、 $P_{grid}^E = P_d^E - P_{pgu}^E$ 、 $Q_b = Q_t - Q_{re}$ 。

4 结果与分析

4.1 系统数据输入

通过对全国公共建筑的能耗调查发现, 公共建筑能耗要比一般居民住宅的能耗高出许多, 并存在很大的节约空间^[30]。因此, 本文采用DeST软件计算用户的冷热电负荷需求, 获得该建筑整年的负荷波动情景。图3为酒店全年逐时的冷热负荷需求变化曲线。其中, 冬季热负荷需求最大, 夏季冷负荷需求最大, 在过渡季节热负荷和冷负荷需求基本一致。图4表示酒店全年逐时的电负荷需求, 电负荷需求表现出先增大后减小的趋势, 最大负荷需求出现在7、8月。CCHP系统的技术参数如表2所示。

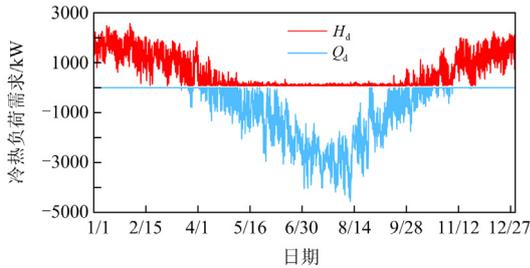


图3 酒店冷热负荷需求

Fig. 3 Hotel cooling and heating load demand

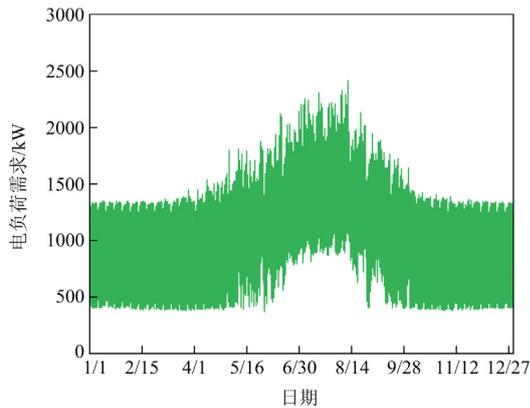


图4 酒店电负荷需求

Fig. 4 Hotel electrical load demand

4.2 燃气轮机容量优化分析

本文以能源利用率为目标函数, 采用枚举法在100~2500 kW范围内寻找系统的最优容量, 枚举法求解计算流程如图5所示。枚举法是一种遍历的寻优算法, 能够对优化变量所有可能的目标值进行计算, 并找到目标值最优时的变量值。虽然该算法的

表2 CCHP系统的技术参数

Table 2 CCHP system technical parameters

参数	符号	数值
污染物排放税率 ^[16]	$\epsilon_{tax}/(\text{元/g})$	0.0002
吸收式制冷机组性能系数 ^[24]	C_{OPac}	0.7
热泵机组性能系数 ^[24]	$C_{OPhp,c}$ $C_{OPhp,h}$	3 3.5
余热回收装置效率 ^[24]	$\eta_{rc}/\%$	8
换热器效率 ^[25]	$\eta_{hc}/\%$	85
有机朗肯循环转化效率 ^[26]	$\eta_{orc}/\%$	19.9
燃气锅炉效率 ^[27]	$\eta_b/\%$	85
CO ₂ 电能转化因子 ^[28]	$\delta_{CO_2,e}/(\text{g/kWh})$	968
CO ₂ 天然气转化因子 ^[28]	$\delta_{CO_2,t}/(\text{g/kWh})$	220
天然气价格 ^[29]	$P_g/(\text{元/kWh})$	0.21
市政电网价格 ^[29]	$P_e/(\text{元/kWh})$	0.87
电网电效率 ^[31]	$\eta_c/\%$	35
电网传输效率 ^[31]	$\eta_{grid}/\%$	92

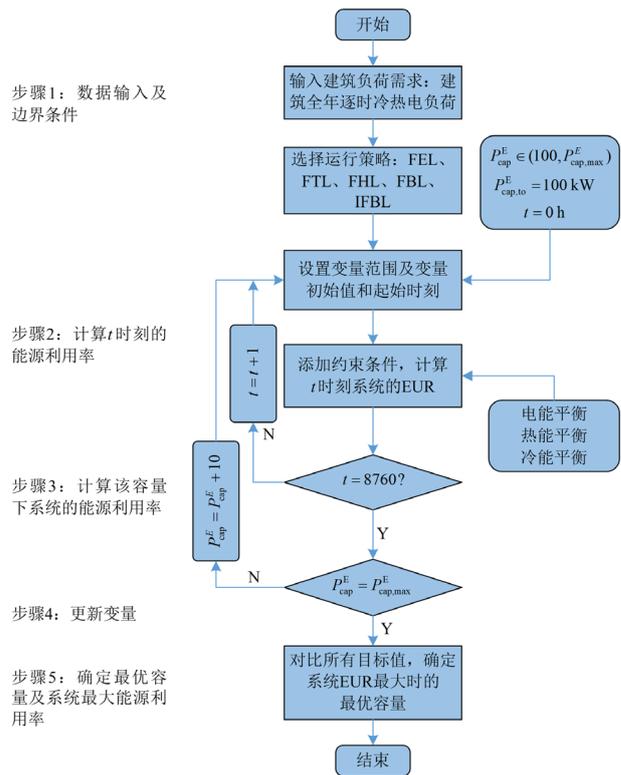


图5 枚举法求解流程

Fig. 5 Solution flow of enumeration method

寻优时间比其他智能算法长, 但避免了其他智能算法可能出现局部最优或多组最优解的问题。此外, 燃气轮机的最优容量对运行策略的优化有明显影响, 直接影响到各种运行策略之间比较的公平性, 但以往的研究很少注意到这一点, 因此有必要对不

同运行策略下燃气轮机的最优容量进行分析。

在 5 种运行策略下 CCHP 系统随燃气轮机容量的变化情况如图 6 所示。系统的能源利用率随燃气轮机容量的增加有相同的变化趋势，在 5 种运行策略下先增大后减小。从图 6 可以看出，在 5 种运行策略下燃气轮机的最优装机容量并不总是相等的，说明了对燃气轮机的最优容量进行优化的重要性。在 FEL、FTL、FHL、FBL、IFBL 运行策略下燃气轮机的最优装机容量分别为 1130 kW、1150 kW、1050 kW、1060 W、1390 kW。因此，在后续的分析中均采用最优容量。通过计算 5 种运行策略在最优装机容量下系统年度能源利用率可知：FEL 为 60.36%、FTL 为 60.38%、FHL 为 60.01%、FBL 为 60.03%和 IFBL 为 64.76%。可以看出，在 IFBL 运行策略下系统能源利用率相对于其他 4 种运行策略分别提高了 4.3%、4.38%、4.75%和 4.73%。

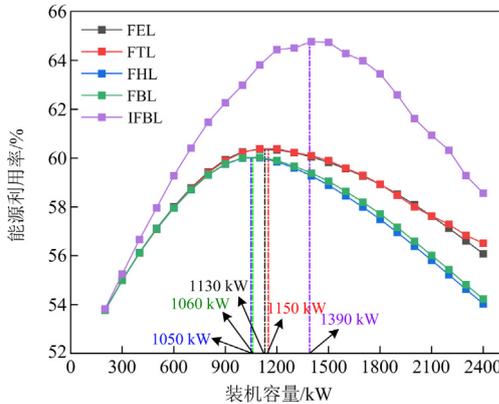


图 6 5 种运行策略的燃气轮机容量

Fig. 6 Capacity of gas turbine for five operation strategies

根据 CCHP 系统在 5 种运行策略下的年运行成本和初始投资成本，计算了系统的年总成本。表 3 显示了在不同运行策略下系统的初始投资成本、年度能耗运行成本、系统的年度维修管理费用和系统被征收的污染物排放成本。在 IFBL 运行策略下燃气轮机装机容量最大，此时系统的初始投资成本和年度维修管理成本最大分别为 2097.33 万元和 31.46 万元，而系统的年度能耗运行成本和被征收的污染物排放成本最小分别为 1280.21 万元和 282.97 万元。通过计算 CCHP 系统在 IFBL 运行策略下的年总成本为 1840.99 万元，均小于其他 4 种运行策略。表 4 显示了 CCHP 系统在 5 种运行策略下的年总成本。从表 4 可以看出，CCHP 系统在 IFBL 运行策略下的年总成本为 1840.99 万元，均小于其他 4 种运行策略，相比于其他 4 种运行策略，IFBL 运行策略下系统的年总成本分别降低了 11.65%、2.74%、1.64%、

0.74%，体现出 IFBL 运行策略的优势。

表 3 不同运行策略下 CCHP 系统的运行成本

Table 3 Operating costs of the CCHP system under different operating strategies

运行策略	I_{inv}	C_{ost}	C_m	C_p	A_{TC}
FEL	1765.02	1515.45	26.47	334.39	2038.64
FTL	1775.17	1357.23	26.62	300.53	1892.89
FHL	1707.17	1347.49	25.60	298.25	1871.86
FBL	1856.45	1317.32	27.84	291.37	1854.60
IFBL	2097.33	1280.21	31.46	282.97	1840.99

表 4 CCHP 系统的年总成本

Table 4 Total annual cost of fees for the CCHP system

运行策略	FEL	FTL	FHL	FBL	IFBL
$A_{TC}/$ 万元	2083.64	1892.89	1871.86	1854.60	1840.99

4.3 系统能源利用率分析

图 7 为不同运行策略下 CCHP 系统的月度能源利用率。在过渡季节的 4 月和 10 月，系统的能源利用率最低，且 IFBL 运行策略相比于 FEL、FTL、FHL、FBL 运行策略的性能最差。而在夏季和冬季，IFBL 运行策略下系统的能源利用率明显优于 FEL、FTL、FHL、FBL 运行策略，且冬季能源利用率高于夏季。结合图 3 和图 4 可知，夏季酒店的冷电负荷需求增加且出现最大值，而热负荷需求减少。此时系统所产生的热能主要用于酒店的生活热水，需求量较少，造成了大量热能的浪费。而对于冷负荷的需求，主要是通过吸收式制冷机组，不足的能量通过电网供电使热泵机组工作产生冷负荷，致使系统的电负荷需求增大。在冬季的 1 月和 12 月，用户处于高热负荷需求状态，系统满负荷运行，此时内部所

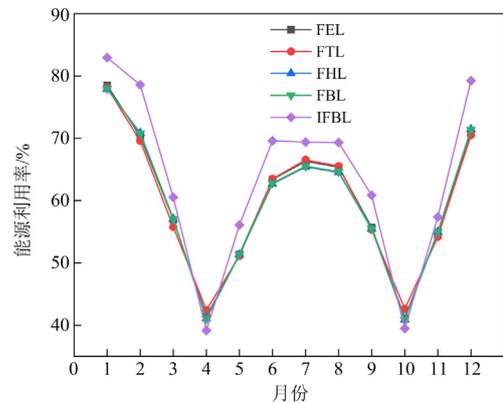


图 7 CCHP 系统能源利用率

Fig. 7 CCHP system energy utilization rate

产生的能量被充分利用, 系统的能源利用率具有最大值(为 82%)。

4.4 系统能源综合指数分析

为了更好地评价冗余能量和购买能量对于系统性能的影响, 本文提出了能源综合指数。图 8 分析了不同运行策略下系统能源综合指数月度变化情况。系统的能源综合指数随着不同月份的变化具有相同的变化趋势, 在 5 种运行策略下过渡季节均达到了最大值。在过渡季节的 4 月和 10 月, 系统的能源综合指数最大, 说明此时系统冗余能量较多或者购买了大量的能量。从图 8 可以看出, IFBL 运行策略下系统的月度能源综合指数优于 FEL 和 FTL 运行策略, 却低于 FHL 和 FBL 运行策略。这是因为: 在 FEL 和 FTL 运行策略下, 系统冗余能量或者购买能量最多导致能源综合指数最大; 而在 FHL 和 FBL 运行策略下, 系统冗余能量为零, 不足的能源只需通过购买电能或天然气才能够满足用户需求, 因此系统的能源综合指数最小。而在夏季和冬季, IFBL 运行策略下系统的能源综合指数相对于 FEL、FTL、FHL、FBL 运行策略均为最优, 说明系统的能源利用率较高, 同时降低了能源的浪费和额外能量的补充。系统一年内能源综合指数如表 5 所示。IFBL 运行策略的能源综合指数最低, 相对于其他 4 种运行策略分别降低了 6.58%、5.96%、2.23%、3.45%, 因此当系统的能源综合指数越小时, 说明系统的能源利用率越高。

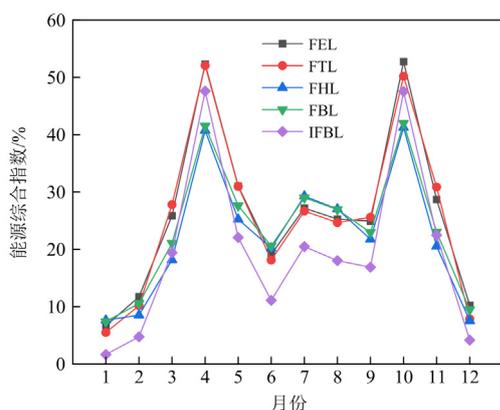


图 8 系统能源综合指数

Fig. 8 System energy composite index

表 5 5 种运行策略下系统能源综合指数
Table 5 System energy composite index for five operating strategies

运行策略	FEL	FTL	FHL	FBL	IFBL
能源综合指数	27.13%	26.51%	22.78%	24%	20.55%

4.5 系统供需匹配分析

图 9 为在不同运行策略下系统月度供需匹配变化趋势, 可以看出: 使用 FEL 运行策略时, 在过渡季节的 4 月和 10 月, 系统的供给侧大于需求侧, 造成大量能量的浪费; 使用 FTL 运行策略时, 在过渡季节的 4 月和 10 月, 表现出最差的供需匹配性, 需要系统额外补充全部的能量; 在 FHL 和 FBL 运行策略下, 系统的供需匹配性均小于 1, 且在冬季的供需匹配性优于夏季的供需匹配特性, 说明系统在夏季时对于冷负荷需求较大, 不足的能量需要通过电网补充; 在 IFBL 运行策略下, 在冬季系统的供需匹配性大于 1, 此时系统处于满负荷运行状态。由于需求侧的热负荷需求较高, CCHP 系统减少从电网购买的电能, 而是通过 ORC 吸收多余的热能将其转化为电能, 这样既减少了 CO₂ 的排放量也降低了运行成本, 同时避免多余能量的浪费。而在其他月份系统的供需匹配小于 1, 此时系统不足的能量由市政电网和燃气锅炉来补充, 以达到理想的供需匹配。

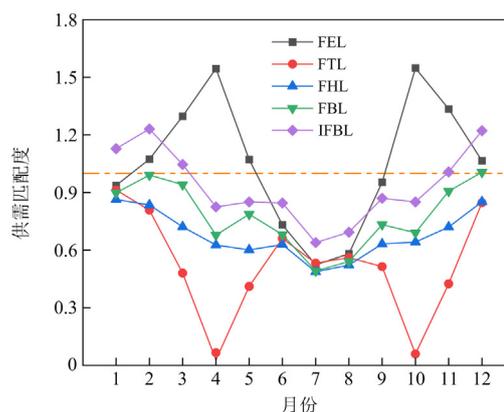


图 9 系统供需匹配分析

Fig. 9 System supply and demand matching analysis

通过计算系统一年内的供需匹配度可知: FEL 为 1.0827、FTL 为 0.5075、FHL 为 0.6813、FBL 为 0.7843 和 IFBL 为 0.9382。结合图 10 可以看出, 在 FEL 运行策略下, 系统供需匹配度的均值大于 1 且方差值较大, 不够稳定。而 IFBL 运行策略下, 系统供需匹配度的均值最接近于 1 且方差值较小, 较为稳定, 具有显著的匹配性能。将不同运行策略的年度匹配性与理想的供需匹配性(即供需匹配都为 1)进行作差且取绝对值, 如图 11 所示。FTL 运行策略的供需匹配性最差, 其差值为 0.4925。IFBL 运行策略的供需匹配性最优, 其差值为 0.0618。

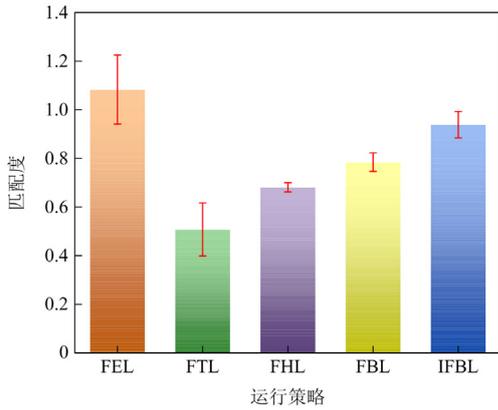


图 10 5种运行策略下匹配性均值方差图

Fig. 10 Mean variance plot of matching under five operating strategies

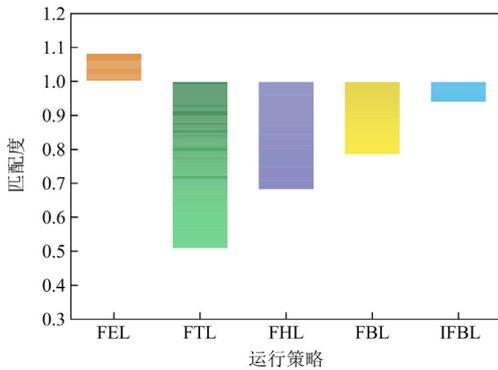


图 11 5种运行策略下匹配性差值分析

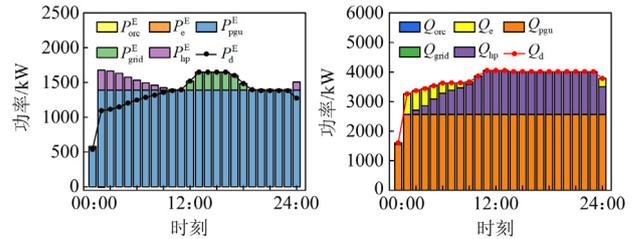
Fig. 11 Matchability difference analysis under five operation strategies

4.6 系统逐时运行特性分析

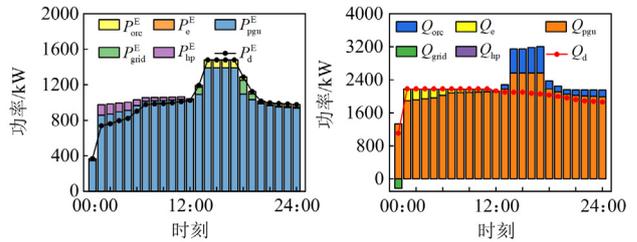
为了深入分析 CCHP 系统的运行特性，基于上述原动机的装机容量、运行策略和供需匹配特性，图 12 展示了在 IFBL 运行策略下，系统夏季和冬季典型日的能量供需平衡图，图中点线表示用户的电负荷和热负荷(或冷负荷)，柱状图代表 CCHP 系统设备的功率或电网的功率。

对于夏季典型日，如图 12(a)所示，在 01:00—10:00 时段内，系统在满足用户电负荷需求的同时，额外产生的电量用于驱动热泵，并为用户提供不足的热能，从而减少燃气锅炉的补充。在 03:00—24:00 时段内，用户的负荷需求超过了燃气轮机的最大装机容量，系统满载运行，多余的电量驱动热泵，不足的热量由燃气锅炉补充。如图 12(b)所示，用户在冬季典型日时，在 02:00—12:00 时段内，系统在满足用户电负荷需求的同时，额外产生的电量用于驱动热泵，并为用户提供部分不足的热能，

从而满足用户的热能需求。在 12:00—24:00 时段内，系统在满足用户热负荷的同时，额外产生的热能用于驱动 ORC 机组，并为用户提供部分不足的电能，从而减少了电网的购电量，其余不足的电量通过电网补充。可见，IFBL 运行策略既减少了电能的浪费，又降低了燃气锅炉的补充，从而提高了系统的供需匹配特性。



(a) 夏季典型日



(b) 冬季典型日

图 12 IFBL 运行策略下典型日的能量供需图

Fig. 12 Energy supply and demand diagram for a typical day under the IFBL strategy

5 结论

本文在 CCHP 系统供给侧与酒店需求侧供需匹配关系的基础上，提出了改进的热电负荷平衡运行策略(IFBL)，通过对 5 种运行策略下燃气轮机装机容量的优化以及性能分析，得到以下结论。

1) FEL、FTL、FHL、FBL 和 IFBL 运行策略下燃气轮机的最优装机容量分别为 1130 kW、1150 kW、1050 kW、1060 kW 和 1390 kW。

2) FEL、FTL、FHL、FBL 和 IFBL 运行策略在最优装机容量下系统年度能源利用率分别为 60.36%、60.38%、60.01%、60.03%和 64.76%。在 IFBL 运行策略下系统能源利用率相对于其他 4 种策略分别提高了 4.3%、4.38%、4.75%和 4.73%。

3) 当系统的能源综合指数越小时，系统的能源利用率越高，能源的浪费和额外能量的补充越低。FEL、FTL、FHL、FBL 和 IFBL 运行策略下系统的年能源综合指数分别为 27.13%、26.51%、22.78%、24%和 20.55%。IFBL 运行策略下系统的能源综合指数最低，相对于其他 4 种运行策略分别降低了

6.58%、5.96%、2.23%、3.45%。

4) CCHP 系统在 IFBL 运行策略下的年总成本为 1840.99 万元, 相比其他 4 种运行策略, 系统的年总成本分别降低了 11.65%、2.74%、1.64%、0.74%。

5) 通过计算系统一年内的供需匹配性能可知: FEL 为 1.0827、FTL 为 0.5075、FHL 为 0.6813、FBL 为 0.7843 和 IFBL 为 0.9382。FTL 策略的供需匹配性能最差, 其差值为 0.4925; IFBL 策略的供需匹配性能最优, 其差值为 0.0618。

参考文献

- [1] 彭静, 王军, 元富军, 等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [2] 范建斌, 孟昭军, 单沫文, 等. 综合能源系统关键技术与国际标准化综述[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 1-9.
FAN Jianbin, MENG Zhaojun, SHAN Mowen, et al. A review of key technologies and international standardization of multi energy coupling systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 1-9.
- [3] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 179-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 179-186.
- [4] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [5] 贾士铎, 康小宁, 黑皓杰, 等. 基于 V2G 负荷反馈修正的电热氢综合能源系统多层协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 100-110.
JIA Shiduo, KANG Xiaoning, HEI Haojie, et al. Multi-layer coordinated optimal dispatch of electric-thermal-hydrogen integrated energy system based on V2G load feedback correction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 100-110.
- [6] 邓炎, 龚赞, 武立康, 等. 基于设备互补特性的冷热电系统优化[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 88-95.
DENG Yan, GONG Zan, WU Likang, et al. Optimizing combined cooling, heating and power system based on device complementary characteristic[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(7): 88-95.
- [7] 葛晨晨, 丁历威, 吕洪坤, 等. 基于多种余能资源的冷热电联供系统设计与优化[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5): 490-500.
GE Chenchen, DING Liwei, LÜ Hongkun, et al. Design and optimization for combined cooling heating and power supply networks incorporating multiple waste energy resources[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 490-500.
- [8] 罗平, 周濠炳, 徐林, 等. 基于区间优化的冷热电联供型多微网日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 137-146.
LUO Ping, ZHOU Haobing, XU Lin, et al. Day-ahead optimal scheduling of multi-microgrids with combined cooling, heating and power based on interval optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 137-146.
- [9] 刘学智, 张沛超, 严正. 第 5 代区域供热供冷驱动的产消型综合能源系统多能流分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 78-90.
LIU Xuezhi, ZHANG Peichao, YAN Zheng. Analysis on multi-energy flow of prosumer-based integrated energy system driven by the fifth generation district heating and cooling network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 78-90.
- [10] 严晓生, 吴迪. CCHP 系统优化配置及与传统热电联产系统的性能对比分析[J]. 中国测试, 2020, 46(7): 159-168.
YAN Xiaosheng, WU Di. Optimal configuration of CCHP system and performance comparison with traditional cogeneration system[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(7): 159-168.
- [11] MA Z, DONG F, WANG J, et al. Optimal design of a novel hybrid renewable energy CCHP system considering long and short-term benefits[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 72-85.
- [12] LI L, YU S, MU H, et al. Optimization and evaluation of CCHP systems considering incentive policies under different operation strategies[J]. Energy, 2018, 162: 825-840.
- [13] 杨秀, 卢炜, 余文昶, 等. 智能小区居民负荷参与优化调度及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 22-34.
YANG Xiu, LU Wei, YU Wenchang, et al. Optimal dispatching and control strategies for residential load of intelligent communities[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 22-34.

- [14] 贺庆, 常大伟, 张俊礼, 等. 天然气冷热电联产系统区间负荷调度策略优化[J]. 动力工程学报, 2022, 42(4): 365-371.
HE Qing, CHANG Dawei, ZHANG Junli, et al. Optimization of interval load scheduling strategy for a CCHP system using natural gas[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(4): 365-371.
- [15] MAGO P J, FUMO N, CHAMRA L M. Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load[J]. International Journal of Energy Research, 2009, 33(9): 852-864.
- [16] KANG L, YANG J, AN Q, et al. Effects of load following operational strategy on CCHP system with an auxiliary ground source heat pump considering carbon tax and electricity feed in tariff[J]. Applied Energy, 2017, 194: 454-466.
- [17] WANG Z, HAN W, ZHANG N, et al. Analysis of inlet air throttling operation method for gas turbine in performance of CCHP system under different operation strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 298-306.
- [18] LI Y, TIAN R, WEI M, et al. An improved operation strategy for CCHP system based on high-speed railways station case study[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 216: 112936.
- [19] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 101-112.
HAO Ting, FAN Xiaozhao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 101-112.
- [20] FENG L, DAI X, MO J, et al. Analysis of energy matching performance between CCHP systems and users based on different operation strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 60-71.
- [21] CAO S, HASAN A, SIRÉN K. On-site energy matching indices for buildings with energy conversion, storage and hybrid grid connections[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 423-438.
- [22] 戴毅茹, 王坚, 曾依浦. 考虑风光气电协同供能的冷热电联供系统多目标优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 963-972.
DAI Yiru, WANG Jian, ZENG Yipu. Multi-objective optimization of combined cooling heating and power system considering photovoltaic-wind-gas-power collaborative energy supply[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 963-972.
- [23] ZHANG N, CAI R. Analytical solutions and typical characteristics of part-load performances of single shaft gas turbine and its cogeneration[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9-12): 1323-1337.
- [24] WANG J J, JING Y Y, ZHANG C F, et al. Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes[J]. Applied Energy, 2011, 88(12): 4621-4631.
- [25] LUO X J, FONG K F. Development of multi-supply-multi-demand control strategy for combined cooling, heating and power system primed with solid oxide fuel cell-gas turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 154: 538-561.
- [26] KANG L, YANG J, AN Q, et al. Complementary configuration and performance comparison of CCHP-ORC system with a ground source heat pump under three energy management modes[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 135: 244-255.
- [27] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q, et al. A novel thermal storage strategy for CCHP system based on energy demands and state of storage tank[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 85: 117-129.
- [28] 蒋润花, 曾蓉, 李洪强, 等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206-3213.
JIANG Runhua, ZENG Rong, LI Hongqiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206-3213.
- [29] YANG G, ZHAI X. Optimization and performance analysis of solar hybrid CCHP systems under different operation strategies[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 327-340.
- [30] 廖虹云. 推进“十四五”建筑领域低碳发展研究[J]. 中国能源, 2021, 43(4): 7-11.
LIAO Hongyun. The path on promoting low-carbon development in building sector during the “14th five year plan” period[J]. Energy of China, 2021, 43(4): 7-11.
- [31] YANG G, ZHAI X. Optimization and performance analysis of solar hybrid CCHP systems under different operation strategies[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 327-340.

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-04-10

作者简介:

李要红(1991—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电热综合能源系统运行优化、低温余热发电系统等。

E-mail: liyaohong@lut.edu.cn

(编辑 姜新丽)