

考虑风光气电协同供能的冷热电联供系统 多目标优化

戴毅茹, 王 坚, 曾依浦

(同济大学 CIMS 研究中心, 上海 201804)

摘要: 建立以光伏发电、风电、燃气、网电多能源协同供能的冷热电联供系统。以独立供能冷热电联供系统为度量基准, 构建由系统投资运行成本、一次能源利用、二氧化碳排放组成的多目标优化函数。针对全年冬季、夏季与过渡季的 3 种典型日的电热冷负荷需求, 分析系统的容量配置以及“以电定热”“以热定电”的运行策略的协同优化。考虑优化问题的连续和组合优化的混合特性, 模型求解采用多目标粒子群双层优化算法。采用正交试验分析关键因素对决策结果的影响作用。仿真结果表明, 风光气电协同供能的冷热电联供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。

关键词: 光伏发电; 风电; 冷热电联供; 多目标粒子群; 正交试验

中图分类号: TK01; N945.15

文献标志码: A

Multi-Objective Optimization of Combined Cooling Heating and Power System Considering Photovoltaic-Wind-Gas-Power Collaborative Energy Supply

DAI Yiru, WANG Jian, ZENG Yipu

(CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A kind of combined cooling heating and power (CCHP) system considering multi-energy collaborative supply consisting of photovoltaic power, wind power, natural gas, and grid power is developed in this paper. By using the independent CCHP system as the measurement benchmark, investment and operation cost, primary energy utilization, as well as carbon dioxide emission are incorporated to formulate multi-objective optimization function. For electrical, heating, and cooling loads on the three kinds of annual typical days

such as winter, summer, and transitional seasons, the collaborative optimization study on device capacity sizing and operation strategy including FEL (following the electrical loads) and FTL (following the thermal loads) is conducted. Due to simultaneous existence of the continuous and combinatorial optimization, a bi-level optimization algorithm of multi-objective particle swarm is proposed. In addition, the orthogonal experimental analysis for the impact of critical system parameters on the optimal result is performed. The results show that compared with the independent CCHP system, the proposed CCHP system considering photovoltaic-wind-gas-power collaborative energy supply has a significantly better performance in economy, energy saving, and environmental protection.

Key words: photovoltaic power; wind power; combined cooling heating and power(CCHP); multi-objective particle swarm optimization; orthogonal experimental analysis

随着光伏发电、风电等清洁能源的飞速发展和广泛普及, 围绕多能协同供能的冷热电联供 (combined cooling heating and power, CCHP) 系统配置及运行优化问题是当前开展 CCHP 系统规划建设的重要内容^[1-3]。文献[4]建立了包括 CCHP、燃气锅炉、太阳能集热器、光伏板、风力涡轮机的能源系统, 分析了该系统在环境与经济综合效益下的优化问题, 结果显示能源梯级利用提高了系统的适应性。文献[5]分析了由微型燃气轮机、燃气锅炉、分布式风电和多元储能组成的多能互补的区域综合能源系统双层规划配置模型。文献[6]从热动力学和可持续性的角度探讨了混合太阳能和生物质能的 CCHP

收稿日期: 2021-12-09

基金项目: 上海市自然科学基金(19ZR1461500)

第一作者: 戴毅茹(1972—), 女, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为能源综合优化利用。

E-mail: zlydyr@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

系统的优化问题。文献[7]以投资和年运行费用最小为优化目标,研究了冬夏季典型日下的CCHP系统、耦合太阳能光热的CCHP系统在“以电定热”和“以热定电”两种运行策略下的优化配置。文献[8]针对包含风机、光伏、CCHP、地源热泵、电储能组成的区域综合能源系统,以系统运行总成本最优为目标,构建了引入电气热综合需求响应的鲁棒优化调度模型。文献[9]建立了多能互补CCHP系统的冷热电混合储能调度规划双层优化模型,以最小化储能运行费用为目标研究了不同供能季日负荷的储能容量配置及调度方案。文献[10]建立了包含风电及光伏的考虑风险成本的跨区域综合能源系统调度优化模型,验证了跨区域实现多能互补的优势。文献[11]提出了一个包含风力涡轮机、光伏发电、CCHP系统、燃料电池和储能装置(电池、冷库、热水箱等)的微电网系统的经济模型。文献[12]以年成本节约率和一次能源节约率为优化目标,研究了太阳能CCHP系统在“以电定热”“以热定电”“以热定电+并网售电”不同运行策略下的运行情况,结果表明,该系统在“以电定热”策略下节能效果最好,在“以热定电+并网售电”策略下经济性最好。

可再生能源的广泛应用及其出力的随机性和波动性使多能耦合互补的能源系统更加复杂,其研究具有重要的前瞻性和应用价值^[13]。然而,现有研究主要围绕经济、能源、环境的单一优化目标或者通过权重将多目标进行单一化处理^[14-15],针对多目标的多能互补CCHP系统的研究亟待深入展开;另一方面,“以电定热”“以热定电”的不同运行策略对CCHP系统的供能特性具有重要的影响作用^[16-17],多能互补CCHP系统的优化问题不能在固定运行策略的场景下展开,需要考虑运行策略在不同时刻的最佳调度问题。对此,本文建立了以光伏发电、风电、燃气、网电多能源协同供能的CCHP系统,通过多目标优化方法,分析了该系统的容量配置与运行策略的协同优化,探究了相比独立供能CCHP系统,其在经济、节能与环保上的综合优势。

1 系统模型

本文构建的风光气电协同供能CCHP系统如图1所示。为平抑光伏发电和风力发电的波动性以及考虑需求侧负荷时变性,配置了电储能装置。内燃机消耗天然气产生电能和热能,并将热能输入给溴

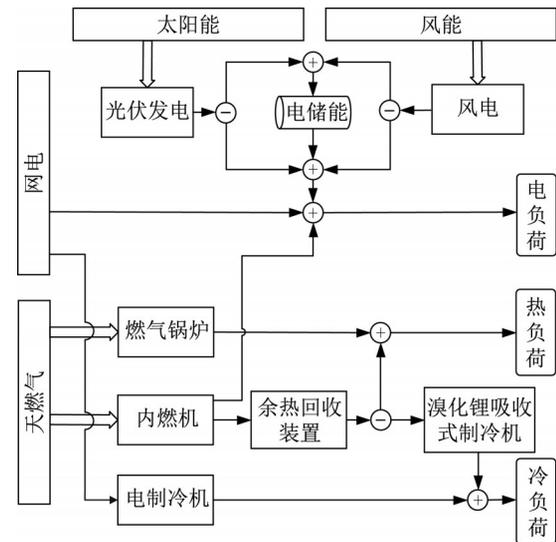


图1 风光气电协同供能CCHP系统

Fig.1 CCHP system considering photovoltaic-wind-gas-power collaborative energy supply

化锂吸收式制冷机制冷。电、热、冷的补足分别来自网电、燃气锅炉和电制冷机。

光伏发电受到太阳辐射强度和温度的直接影响,式(1)为其输出功率。

$$E_{PV,t} = Q_{PV} \rho_{PV,t} \quad (1)$$

式中: $E_{PV,t}$ 、 $\rho_{PV,t}$ 分别为光伏发电的输出功率和出力系数; Q_{PV} 为光伏发电的额定功率; $\rho_{PV,t}$ 的计算采用晶体硅太阳光伏电池的出力模型^[18]。

风速是影响风力发电输出功率的主要因素,本文采用分段线性法建立风力发电机组的出力模型^[19],如公式(2)、(3)所示。

$$E_{WIND,t} = Q_{WIND} \rho_{WIND,t} \quad (2)$$

$$E_{WIND,t} = \begin{cases} 0 & u_t < u_c, u_t > u_s \\ 2.77e^{-3}u_t^2 + 0.123u_t - 0.107 & u_c \leq u_t < u_r \\ Q_{WIND} & u_r \leq u_t \leq u_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{WIND,t}$ 、 $\rho_{WIND,t}$ 分别为风电的输出功率和出力系数; Q_{WIND} 为风电的额定功率; u_t 为实时风速; $u_c = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $u_s = 18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $u_r = 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,分别为切入速度、切出速度和额定速度。

内燃机的热电转换效率与额定功率存在紧密的耦合关系,可以描述为额定功率的函数^[20]。基于内燃机样本数据^[21]拟合,近似得到电转换效率 $\eta_{ICE,e}$ 和热转换效率 $\eta_{ICE,h}$ 关于内燃机额定功率 Q_{ICE} 的多项式函数,如公式(4)、(5)所示。

$$\eta_{ICE,e} = \begin{cases} -6.4572e^{-9}Q_{ICE}^4 + 1.5327e^{-6}Q_{ICE}^3 - 1.2615e^{-4}Q_{ICE}^2 + 4.6878e^{-3}Q_{ICE} + 0.2118, Q_{ICE} < 100 \text{ kW} \\ -1.4919e^{-24}Q_{ICE}^4 - 1.3333e^{-10}Q_{ICE}^3 + 1.2000e^{-7}Q_{ICE}^2 - 5.6667e^{-6}Q_{ICE} + 0.3055, Q_{ICE} \geq 100 \text{ kW} \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_{ICE,h} = \begin{cases} 1.1049e^{-8}Q_{ICE}^4 - 2.5829e^{-6}Q_{ICE}^3 + 2.1020e^{-4}Q_{ICE}^2 - 8.0647e^{-3}Q_{ICE} + 0.6866, Q_{ICE} < 100 \text{ kW} \\ -1.3333e^{-12}Q_{ICE}^4 + 1.0667e^{-9}Q_{ICE}^3 + 5.4333e^{-7}Q_{ICE}^2 - 5.2767e^{-4}Q_{ICE} + 0.5504, Q_{ICE} \geq 100 \text{ kW} \end{cases} \quad (5)$$

考虑到内燃机的 FEL (following the electrical loads) 和 FTL (following the thermal loads) 两种不同运行策略对系统出力性能的影响作用,在此引入 0-1 布尔变量 λ_t , 当 $\lambda_t = 1$ 时表示当前时刻运行 FEL 策略, $\lambda_t = 0$ 表示当前时刻运行 FTL 策略。

当光伏发电和风电出力水平大于电负荷时,电储能装置消纳多余的电能;反之,电储能装置释电能进行补足。另外,余热回收装置的回收效率取为 90%,溴化锂吸收式制冷机的制冷系数取为 0.7,燃气锅炉的转换效率取为 50%,电制冷机的制冷系数取为 3;并且设备运行约束需要满足设备实际出力不能超过其安装容量。

2 优化目标

从经济、节能与环保的不同视角,集成考虑包括综合成本节约率、一次能源节约率、CO₂减排率的多评价指标成为度量 CCHP 系统的主要手段^[22-23]。在此,以独立供能 CCHP 系统作为度量基准,建立由式(6)~(8)组成的多目标优化。

$$M_{CSR} = 1 - \frac{C_{Multi}}{C_{Single}} = 1 - R_{Cost} \quad (6)$$

$$M_{ESR} = 1 - \frac{E_{Multi}}{E_{Single}} = 1 - R_{Energy} \quad (7)$$

$$M_{ERR} = 1 - \frac{D_{Multi}}{D_{Single}} = 1 - R_{Carbon} \quad (8)$$

式(6)~(8)中: M_{CSR} 、 M_{ESR} 、 M_{ERR} 分别为风光气电协同供能 CCHP 系统相对于独立供能 CCHP 系统的综合成本节约率、一次能源节约率、CO₂减排率; C_{Multi} 、 E_{Multi} 、 D_{Multi} 分别表示风光气电协同供能 CCHP 系统的综合成本、一次能源消耗量、CO₂排放量;独立供能 CCHP 系统的相应指标用下标 Single 表示; R_{Cost} 、 R_{Energy} 、 R_{Carbon} 分别为风光气电协同供能 CCHP 系统相对于独立供能 CCHP 系统的综合成本率、一次能源消耗率、CO₂排放率; C_{Multi} 由系统中各个设备的投资成本与网电、天然气的购置成本组成; E_{Multi} 包括网电与天然气用量; D_{Multi} 按照网电与天然气生产中的碳排放计算。相应的计算公式如(9)~(11)所示。

$$C_{Multi} = \sum_i Q_i P_i + \sum_t V_{Elec,t} P_{Elec} + \sum_t V_{Gas,t} P_{Gas} \quad (9)$$

$$E_{Multi} = \sum_t V_{Elec,t} + \sum_t V_{Gas,t} \quad (10)$$

$$D_{Multi} = \sum_t V_{Elec,t} D_{Elec} + \sum_t V_{Gas,t} D_{Gas} \quad (11)$$

式中: Q_i 与 P_i 分别为系统各个设备容量及其单位投资成本; $V_{Elec,t}$ 与 $V_{Gas,t}$ 为各个时刻的网电与天然气消耗量; P_{Elec} 与 P_{Gas} 分别为网电与天然气单位购置成本; D_{Elec} 与 D_{Gas} 分别为生产单位网电与天然气的 CO₂ 排放量。

系统参数设置如表 1 所示。

表 1 系统参数设置

Tab.1 System parameters

设备名称	设备单位投资成本/ (万元·kW ⁻¹)	能源名称	能源单位成本/ (元·kWh ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (kg·kWh ⁻¹)
光伏机组	0.58	网电	高峰:1.04	0.82
风电机组	0.38		11:00—12:00	
电储能	0.35		18:00—22:00	
内燃机	0.8		平段:0.58	
余热回收装置	0.04		08:00—10:00	
溴化锂吸收式制冷机	0.10		13:00—17:00	
燃气锅炉	0.04		23:00—24:00	
电制冷机	0.09		低谷:0.28	
			01:00—07:00	
			天然气	

考虑多目标优化问题是 $\max[M_{CSR}, M_{ESR}, M_{ERR}]$, 根据式(6)~(8), 将其转换为 $\min[R_{Cost}, R_{Energy}, R_{Carbon}]$ 。

分析独立供能 CCHP 在冬季、夏季、过渡季 3 种典型日下,采用 FEL 和 FTL 两种不同运行策略的性能指标(转

换效率分别采用最有利于该运行策略的取值)。计算结果如表 2 所示。由于 FTL 策略下的 $\eta_{ICE,h} = 62.0\%$ 明显高于 FEL 策略下的 $\eta_{ICE,e} = 31.1\%$, 因此在 3 种典型日下, FTL 策略下的成本支出 C_{Single} 、一次能源消耗 E_{Single} 明显低于 FEL 策略, 而 FTL 的一次能源消耗中网电占比较大, 该策略下的 CO_2 排放 D_{Single} 高于 FEL 策略。本文采用 FTL 性能指标作为风光气电协同供能 CCHP 相对独立供能 CCHP 进行系统优化的度量基准。

3 优化求解

3.1 求解算法

在该优化问题中, 决策变量为光伏、风电和内燃机

表 2 FEL 和 FTL 运行策略下独立供能 CCHP 系统性能指标
Tab.2 Performance indications of independent CCHP system in FEL and FTL operation strategies

策略	季节	C_{Single} /万元	E_{Single} /kWh	D_{Single} /kg
$\eta_{ICE,e} = 31.1\%$ $\eta_{ICE,h} = 45.9\%$	FEL 冬季	0.130	3 531.744	847.619
	夏季	0.123	3 273.649	785.676
	过渡季	0.121	3 273.649	785.676
$\eta_{ICE,e} = 25.0\%$ $\eta_{ICE,h} = 62.0\%$	FTL 冬季	0.106	2 246.757	909.586
	夏季	0.094	1 803.534	871.499
	过渡季	0.074	1 158.864	841.415

组的安装容量以及内燃机的 FEL 和 FTL 的运行策略, 具有连续和组合优化的混合特性, 模型求解采用多目标粒子群双层优化算法, 算法流程如图 2 所示。

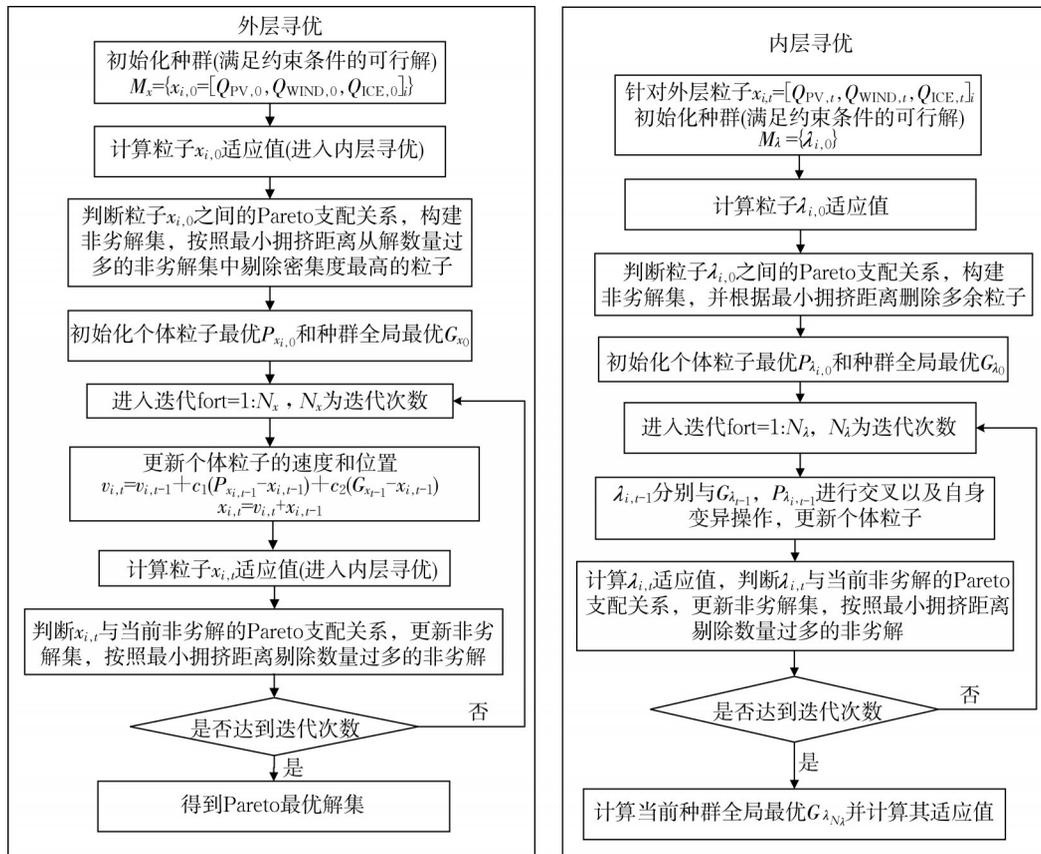


图 2 优化算法流程图

Fig.2 Flow chart of optimization algorithm

3.2 负荷及出力系数

选取北方某一商业楼为分析对象, 其全年冬季、夏季与过渡季典型日的电热冷负荷以及根据当地太阳辐射强度、温度和风速计算得到的光伏发电与风电出力系数如图 3 所示。电负荷的日分布特性全年基本保持稳定, 热冷负荷以及光伏发电与风电出力

系数呈现明显的季节性。

3.3 仿真结果

选择外层优化的种群数 60, 迭代次数 300; 内层优化的种群数 50, 迭代次数 100。非劣解集的 Pareto 解的个数上限设定为 20。选取目标空间中距离原点欧式距离最短的前 10 个 Pareto 最优解进行展示, 结

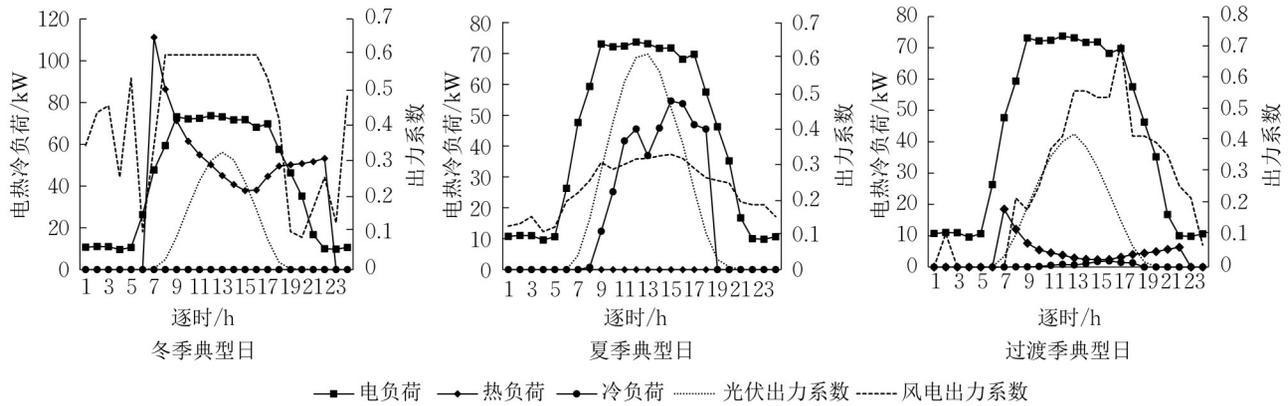


图3 全年典型日电热冷负荷以及光伏与风电出力系数

Fig.3 Annual typical daily electrical, heating, cooling loads, and output coefficients of photovoltaic and wind power

果如表3所示。Pareto最优前沿散点图如图4所示。

从优化结果可以看出,在3种典型日下,内燃机安装容量 Q_{ICE} 相比光伏安装容量 Q_{PV} 和风电安装容量 Q_{WIND} ,优化配置明显偏小,说明从经济、能源和环境的角度,系统应尽可能采用光伏发电和风电的清洁能源供能模式。总体上,风电出力系数要明显大于光伏出力系数, Q_{PV} 和 Q_{WIND} 在冬季、过渡季、夏季随着风电出力系数的减小而呈增长趋势,并且随着 Q_{ICE} 从冬季明显下降到过渡季和夏季, Q_{PV} 和 Q_{WIND} 增长幅度较大。依据目标空间中距离原点欧式距离最短的Pareto最优解, Q_{ICE} 在冬季、夏季、过渡季的优化结果分别为26.778、8.809、7.060 kW,说明内燃机是供应热负荷的最佳方案,而夏季和过渡季的热负荷几乎为0,相应的内燃机安装容量不足10 kW,其出力作用不显著。

在运行策略方面,3种典型日差异较大。在冬季典型日,内燃机在07:00—22:00期间全部采用FTL运行策略,对应着热负荷的需求时段。其原因在于,表3中的 Q_{ICE} 的Pareto最优解小于30 kW,按照 $Q_{ICE}=30$ kW计算内燃机热效率,并考虑到余热回

收效率90%,最终热效率为52%,大于燃气锅炉的热效率50%,内燃机采用优先满足热负荷的运行方式,并将其产生的电量与光伏发电及风电共同满足电负荷需求,因此冬季典型日下的光伏及风电安装容量明显小于其他典型日。在夏季典型日,热负荷为0,电制冷机的制冷系数为3,远大于内燃机余热通过溴化锂吸收式制冷机的制冷效率,冷负荷采用电制冷机制冷,内燃机按照优先满足电负荷的方式运行,体现在冷负荷峰值期间10:00—18:00,内燃机运行策略采用FEL,而在07:00—09:00期间,由于冷负荷处于上升期的起步阶段,负荷较小,并且该阶段电价由低谷上升进入平段,内燃机采用FTL运行满足冷负荷。在过渡季典型日,01:00—10:00和19:00—22:00期间存在热负荷波动,热负荷峰值分别达到18.49 kW和6.32 kW,该阶段电负荷及其电价大部分处于低谷期,内燃机以满足热负荷的FTL运行,在12:00—18:00期间,电负荷处于高峰期及电价位于平段或高峰,内燃机以满足电负荷为主,采用FEL运行。

通过目标值优化,可以明显看出,风光气电协同供能CCHP相比独立供能CCHP系统具有更低的综

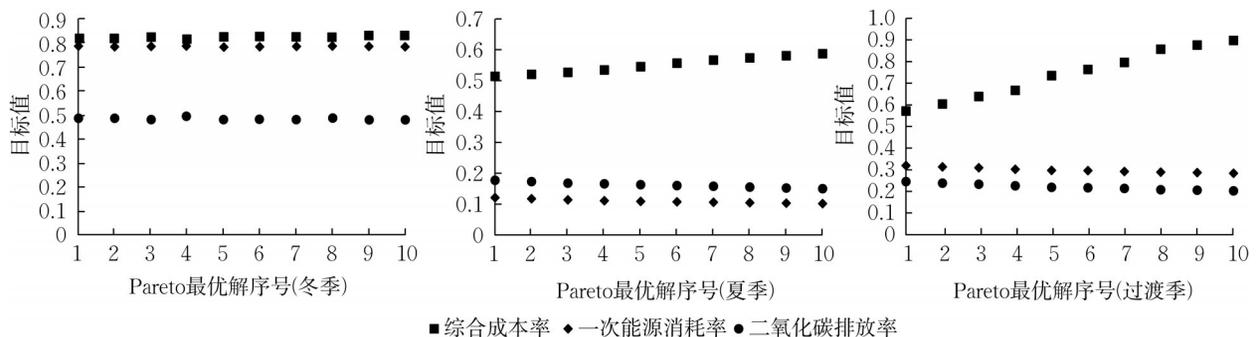


图4 Pareto最优前沿散点图

Fig.4 Scatter diagram of Pareto optimal frontier

合成本、一次能源消耗、CO₂排放。依据目标空间中距离原点欧氏距离最短的 Pareto 最优解,风光气电协同供能 CCHP 相比独立供能 CCHP 系统,综合成本节约率 M_{CSR} 、一次能源节约率 M_{ESR} 、CO₂减排率 M_{ERR} 在冬季典型日分别为 18.3%、21.2%、51.1%,在夏季典型日分别为 48.6%、87.8%、82.3%,在过渡季典型日分别为 42.9%、68.1%、75.5%。

选取表 3 中目标空间中距离原点欧氏距离最短的 Pareto 最优解,进一步分析风光气电协同供能 CCHP 系统在 3 种典型日下各个时刻的出力情况及与独立供能 CCHP 系统在 FTL 运行策略下的出力情况对比,如图 5 所示。光伏发电和风电的出力波形与其出力系数的变化轨迹一致。

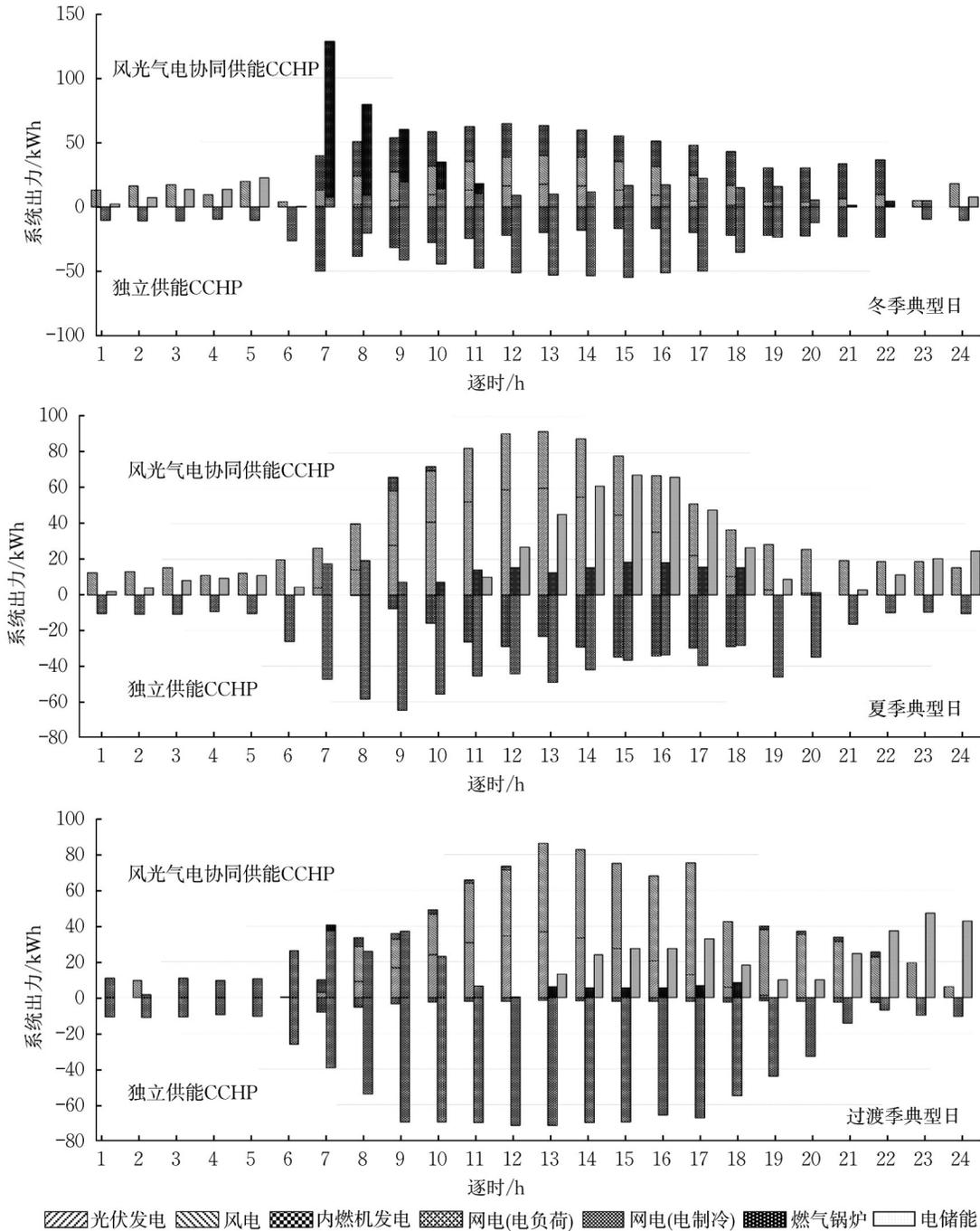


图 5 3 种典型日的系统出力

Fig.5 System output on three kinds of typical day

在冬季典型日,内燃机出力较为明显,主要用于满足热负荷,在 07:00—11:00 期间,热负荷达到峰值,内燃机安装容量不足以满足峰值需求,需要燃气锅炉进行补足;在夏季典型日,内燃机出力弱,仅在 08:00—10:00 期间有较为明显的出力,而该阶段的电储能为 0,说明该阶段的内燃机出力在满足冷负荷的同时,用于补足光伏发电和风电不能满足的电负荷,在 10:00—18:00 期间,冷负荷处于高峰期,尽管网电处于高峰和平段电价,但是因电制冷机的制冷效率远高于内燃机,冷负荷主要由电制冷机消耗网电进行供应;在过渡季典型日,内燃机出力水平低,内燃机在热负荷较高的 07:00—12:00 和 19:00—22:00 期间进行供热,同时由于 01:00—11:00 期间,光伏发电和风电出力水平较弱,而该时段的电价大部分处于低谷和平段,因此采用网电进行电负荷补足。

在 3 种典型日下,电储能对光伏和风力发电的消纳作用明显,特别是夏季和过渡季典型日,在出力系数的高峰期,将富裕的电量进行存储,为后续出力

系数低谷期提供电力供应。而在独立供能 CCHP 系统中,3 种典型日下的冷热负荷由内燃机供应,电负荷由网电进行大量补足。

3.4 正交试验分析

系统经济、性能等众多因素会对系统决策结果产生重要影响,在此采用正交试验方法分析系统部分关键因素对优化决策的影响作用。通过优化过程的初步分析,以冬季典型日为场景,并且仍以独立供能 CCHP 在 FTL 运行策略下的性能指标为度量依据,选择光伏、风电、内燃机的单位投资成本 P_{PV} 、 P_{WIND} 、 P_{ICE} 以及余热回收效率 η_{WHR} 为多因素,分析其对决策目标 R_{Cost} 、 R_{Energy} 、 R_{Carbon} 以及决策变量 Q_{PV} 、 Q_{WIND} 、 Q_{ICE} 的影响。采用 4 因素 3 水平正交试验 $L_9(3^4)$, A1~A3、B1~B3、C1~C3 和 D1~D3 分别代表 P_{PV} 、 P_{WIND} 、 P_{ICE} 和 η_{WHR} 的 3 水平设置。在 A1~A3 中, A2 水平取值为表 1 中 P_{PV} 的设定值 $0.58 \text{ 万元} \cdot \text{kW}^{-1}$, A1 和 A3 水平以该设定值为基准,分别下调和上调 20%,以此类推,其他因素的水平设置如表 4 所示。

表 4 正交试验分析

Tab.4 Orthogonal experimental analysis

实验序号	影响因素				决策目标			决策变量		
	$P_{PV}(A)$	$P_{WIND}(B)$	$P_{ICE}(C)$	$\eta_{WHR}(D)$	R_{Cost}	R_{Energy}	R_{Carbon}	Q_{PV}	Q_{WIND}	Q_{ICE}
1	A1(0.58×80%)	B1(0.38×80%)	C1(0.8×80%)	D1(50%)	0.697 1	0.543 0	0.417 6	82.58	89.32	34.50
2	A1	B2(0.38)	C2(0.8)	D2(70%)	0.826 5	0.685 7	0.454 5	78.89	89.91	34.01
3	A1	B3(0.38×120%)	C3(0.8×120%)	D3(90%)	0.810 5	0.786 8	0.485 7	53.84	62.91	26.98
4	A2(0.58)	B1	C2	D3	0.811 1	0.785 2	0.482 8	56.45	63.75	26.79
5	A2	B2	C3	D1	0.709 3	0.543 0	0.417 6	80.39	89.81	34.44
6	A2	B3	C1	D2	0.860 3	0.725 6	0.482 3	61.72	78.71	39.32
7	A3(0.58×120%)	B1	C3	D2	0.814 5	0.741 2	0.493 8	51.54	74.59	34.06
8	A3	B2	C1	D3	0.852 0	0.785 7	0.487 3	61.87	62.16	24.74
9	A3	B3	C2	D1	0.748 3	0.543 0	0.417 6	77.47	90.42	35.55
极差分析										
决策 目标	极差 R	0.0269	0.0322	0.0250	0.1156					
	R_{Cost} 因素主次顺序	B>A>C>D								
	R_{Cost} 最优水平组合	A1	B1	C3	D1					
	极差 R	0.0182	0.0183	0.0190	0.2429					
	R_{Energy} 因素主次顺序	D>C>B>A								
	R_{Energy} 最优水平组合	A1	B2	C2	D1					
	极差 R	0.0136	0.0116	0.0141	0.0677					
	R_{Carbon} 因素主次顺序	D>C>A>B								
	R_{Carbon} 最优水平组合	A1	B2	C2	D1					
	极差 R	8.15	10.19	9.01	22.76					
	Q_{PV} 因素主次顺序	D>B>C>A								
	Q_{PV} 最优水平组合	A3	B1	C3	D3					
决策 变量	极差 R	4.99	4.74	5.59	26.91					
	Q_{WIND} 因素主次顺序	D>C>A>B								
	Q_{WIND} 最优水平组合	A3	B1	C3	D3					
	极差 R	2.06	2.89	1.03	9.62					
	Q_{ICE} 因素主次顺序	D>B>A>C								
	Q_{ICE} 最优水平组合	A3	B2	C3	D3					

P_{PV} : 光伏机组的单位投资成本(万元·kW⁻¹)
 P_{WIND} : 风电机组的单位投资成本(万元·kW⁻¹)
 P_{ICE} : 内燃机的单位投资成本(万元·kW⁻¹)
 η_{WHR} : 余热回收效率
 R_{Cost} : 综合成本率
 R_{Energy} : 一次能源消耗率
 R_{Carbon} : CO₂ 排放率
 Q_{PV} : 光伏机组装机容量(kW)
 Q_{WIND} : 风电机组装机容量(kW)
 Q_{ICE} : 内燃机装机容量(kW)

选择表3中以目标空间中距离原点欧氏距离最短的 Pareto 最优解展开分析,实验结果如表4所示。根据分析结果,总体上, η_{WHR} 对除 R_{Cost} 以外的其他决策目标和决策变量起到最主要的影响效果。考虑到决策目标和决策变量的最小化为优选目标,最优水平组合以 K 均值的最小化进行选择,针对决策目标 R_{Cost} 、 R_{Energy} 、 R_{Carbon} 及决策变量 Q_{PV} 、 Q_{WIND} 、 Q_{ICE} 的最优水平组合分别为:A1B1C3D1、A1B2C2D1、A1B2C2D1、A3B1C3D3、A3B1C3D3 和 A3B2C3D3。此外,根据分析结果,4个因素对 R_{Carbon} 和 Q_{ICE} 的影响效果相对较弱。

4 结语

本文建立了以光伏发电、风电、燃气、网电多能源协同供能的冷热电联供系统,分析了容量配置与运行策略的协同优化问题。仿真结果表明,由于利用了光伏发电和风电的清洁能源优势,并且考虑了多种能源的协同供能,相比独立供能 CCHP 系统,本文所建立的多能协同供能 CCHP 系统具有更低的综合成本、一次能源消耗量和 CO_2 排放量,表现出明显的经济、节能与环保的综合优势。本文在冷热电联供系统中考虑了风光气电协同供能的特点,后续研究可以继续引入生物质能、太阳能光伏/热等可再生能源技术,进一步提升冷热电联供系统的可靠性和灵活性。此外,针对关键因素的正交实验分析,本文针对光伏、风电、内燃机的单位投资成本以及余热回收效率进行了4因素3水平分析,后续可以遴选更多的经济与性能参数分析其对优化决策的影响效果。

作者贡献声明:

戴毅茹:提出论文研究技术路线,负责系统建模、优化算法设计及仿真结果分析。

王 坚:国内发展现状分析,确定论文选题方向,提出系统构型。

曾依浦:优化算法编程。

参考文献:

- [1] ELANGO K, PRAKASH A, UMASANKAR L. Multiobjective optimization model for renewable energy sources and load demands uncertainty consideration for optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems [J]. Energy Research, 2022, 46(6): 7840. DOI: 10.1002/er.7684.
- [2] HERRANDO M, RAMOS A. Photovoltaic-thermal (PV-T) systems for combined cooling, heating and power in buildings: a review [J]. Energies, 2022, 15(9): 1. DOI: 10.3390/en15093021.
- [3] MAHDAVI N, MOJAVER P, KHALILARYA S. Multi-objective optimization of power, CO_2 emission and exergy efficiency of a novel solar-assisted CCHP system using RSM and TOPSIS coupled method [J]. Renewable Energy, 2022, 185: 506. DOI:10.1016/j.renene.2021.12.078.
- [4] MELO F M, MAGNANI F S, CARVALHO M. A decision-making method to choose optimal systems considering financial and environmental aspects: application in hybrid CCHP systems [J]. Energy, 2022, 250: 123816. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123816.
- [5] 贾文辉,张峰.考虑分布式风电接入下的区域综合能源系统多元储能双层优化配置研究[J].可再生能源,2019,37(10):1524. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.10.017.
JIA Yunhui, ZHANG Feng. A bi-level optimal configuration of multiple storage in regional integrated energy system with distribution wind power inclusion [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(10): 1524. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.10.017.
- [6] NAMI H, ANVARI-MOGHADDAM A, NEMATI A. Modeling and analysis of a solar boosted biomass-driven combined cooling, heating and power plant for domestic applications [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47: 101326. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101326.
- [7] 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. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2020020037.
YAN Xiaosheng, WU Di. Optimal configuration of CCHP system and performance comparison with traditional cogeneration system [J]. China Measurement & Test, 2020, 46(7): 159. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2020020037.
- [8] 黄景光,汪潭,林湘宁,等.面向风电消纳的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J/OL].电测与仪表.[2021-11-17].http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210526.1322.002.html. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2021.12.016.
HUANG Jingguang, WANG Tan, LIN Xiangning, et al. Robust optimal dispatch of regional integrated energy system for wind power consumption [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation. [2021-11-17]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210526.1322.002.html. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2021.12.016.
- [9] 熊文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):118. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.018.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118. DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.018.
- [10] 张晶,范辉,张肖杰,等.考虑风险成本的跨区域综合能源系统

- 调度优化模型[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 121. DOI: 10.19666/j.rld.202104070.
- ZHANG Jing, FAN Hui, ZHANG Xiaojie, *et al.* Optimal model of cross-regional integrated energy system dispatching considering risk cost[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 121. DOI: 10.19666/j.rld.202104070.
- [11] NAZIR M S, DIN S U, SHAH W A, *et al.* Optimal economic modelling of hybrid combined cooling, heating, and energy storage system based on gravitational search algorithm-random forest regression [J]. Complexity, 2021: 5539284. DOI: 10.1155/2021/5539284.
- [12] SONG Z, LIU T, LIN Q. Multi-objective optimization of a solar hybrid CCHP system based on different operation modes [J]. Energy, 2020, 206, 118125. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118125.
- [13] REN F, WEI Z, ZHAI X. A review on the integration and optimization of distributed energy systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 162: 112440. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112440.
- [14] 王磊,姜涛,宋丹,等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 151. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201561.
- WANG Lei, JIANG Tao, SONG Dan, *et al.* Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 151. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201561.
- [15] AGHAEI A T, SARAY R K. Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: a case study in the dairy industry[J]. Energy, 2021, 229: 120788. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120788.
- [16] REN F, WEI Z, ZHAI X. Multi-objective optimization and evaluation of hybrid CCHP systems for different building types[J]. Energy, 2021, 215, 119096. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119096.
- [17] 任洪波,周奥林,吴琼,等. 基于不同运行模式的CCHP-ORC系统运行仿真与性能评估[J]. 热能动力工程, 2019, 34(10): 1. DOI: 10.16146/j.cnki.Rndlge.2019.10.001.
- REN Hongbo, ZHOU Aolin, WU Qiong, *et al.* Operation simulation and performance evaluation of CCHP-ORC system based on different operation modes [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(10): 1. DOI: 10.16146/j.cnki.Rndlge.2019.10.001.
- [18] 毕二朋,胡明辅,袁江,等. 光伏系统设计中太阳辐射强度影响的分析[J]. 节能技术, 2012, 30(171): 45.
- BI Erpeng, HU Mingfu, YUAN Jiang, *et al.* Influence of solar radiation intensity in the design of PV system [J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(171): 45.
- [19] 杨茂,杨琼琼. 风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 34. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.005.
- YANG Mao, YANG Qiongqiong. Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 34. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.005.
- [20] WU Q, REN H, GAO W, *et al.* Multi-criteria assessment of combined cooling, heating and power systems located in different regions in Japan [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73: 660. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.020.
- [21] WANG J, WU J, ZHENG C. Analysis of tri-generation system in combined cooling and heating mode [J]. Energy and Buildings, 2014, 72: 353. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.12.053.
- [22] 张健,徐玉杰,李斌,等. 分布式热电联产系统装机容量及运行策略分析[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 83. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0190.
- ZHANG Jian, XU Yujie, LI Bin, *et al.* Analysis of installed capacity and operation strategy for distributed combined heating and power systems [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(1): 83. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0190.
- [23] GHERSI D E, AMOURA M, LOUBAR K, *et al.* Multi-objective optimization of CCHP system with hybrid chiller under new electric load following operation strategy [J]. Energy, 2021, 219, 119574. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119574.