

面向园区自洽能源系统的综合优化调度研究

邢雪亮^{1,2}, 贾利民^{1,3}, 胡俊杰^{1,2}, 师瑞峰^{1,4}

(1. 国家能源交通融合发展研究院 (华北电力大学), 北京 102206; 2. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206; 3. 轨道交通控制与安全国家重点实验室 (北京交通大学), 北京 100044; 4. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 随着冷热电联供、分布式发电和混合储能在各类综合能源系统中的应用日益增加, 其协同优化调度策略的制定成为进一步改善其能源效率与排放的关键。本文基于多能互补、多源供给和异质能流耦合特性构建具有能源自洽特征的园区自洽能源系统; 针对上述能源系统, 从运行成本、过程排放和外给能源等方面建立包含经济、低碳和自洽的多目标优化模型; 基于上述模型, 提出包括问题等价、变约束映射、目标归一化和决策向量的 PCOD 优化方法, 将原问题模型与经典智能算法进行等价衔接。实验结果表明: 与经典调度算法和标准启发式算法相比, 所提方法能够在保证实时多能流平衡下, 有效降低运行成本、碳排放量和外给能源, 分别最多为 12.24%, 13.48% 和 32.18%, 实现园区自洽能源系统的经济低碳自洽多维运行效益最优。

关键词: 综合能源系统; 能源自洽; 优化调度; 多目标优化; 启发式算法

中图分类号: TM73; X322 文献标志码: A 文章编号: 1007-2691 (2026) 02-0001-11

Study on Comprehensive Optimal Scheduling for Park-level Self-contained Energy Systems

XING Xueliang^{1,2}, JIA Limin^{1,3}, HU Junjie^{1,2}, SHI Ruifeng^{1,4}

(1. China Institute of Energy and Transportation Integrated Development (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. National Key Laboratory of Rail Transit Control and Safety (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China; 4. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the increasing application of combined cooling heating and power (CCHP) systems, distributed generations and hybrid storage in integrated energy systems (IESs), the development of cooperative optimal scheduling strategies has become key to further improving energy efficiency and reducing emissions. This paper constructs a park-level self-contained energy system with energy self-containment features based on the principles of multi-energy complementarity, multi-source supply and polymorphic energy coupling. For the above system, a multiple objective optimization model incorporating economic, low-carbon and self-contained is established, considering operating costs, process emissions and external energy. Then, a PCOD optimization method, including problem equivalence, variable constraint mapping, objective normalization and vector decision, is proposed to bridge the original problem model with the intelligent algorithm. The experimental results show that, compared with classical scheduling strategies and standard heuristics algorithms, the proposed method effectively reduces operating costs, carbon emissions and external energy consumption by up to 12.24%, 13.48% and 32.18%, respectively, while ensuring real-time multi-energy flow balance. It comprehensively achieves the optimal operational benefits in the economic, low-carbon and self-contained dimensions for the park-level self-contained energy system.

Key words: integrated energy system; energy self-contained; optimal scheduling; multiple objective optimization; heu-

ristic algorithm

0 引言

“十四五”能源规划明确以促进我国自治化、清洁化能源系统创新升级为目标,提升清洁能源占比以及供能自治率,推进构建绿色能源体系,助力实现“双碳”目标^[1,2]。能源自治是实现能源系统结构性改革、促进清洁消纳、提高用能可靠性的重要举措,尤其是高能耗高排放的工业园区能源系统^[3,4]。能源自治的定义为充分利用负荷侧承载的可再生资源实现就地能源供给。自治能源系统通过开发并集成分布式能源、多能存储和智能控制管理等技术以实现负荷侧所承载的可再生资源进行充分利用^[5,6]。自治能源系统将供能主体由系统外部能源向内部本地生产过渡转变。构建园区自治能源系统,首先可充分降低园区能源供给的依赖成本,提高园区生产运行的经济性;其次,可充分利用园区基础设施承载的可再生能源,满足“双碳”需求;同时,园区自治能源系统可充分提高园区能源供给的可靠性与弹性,提高能源安全性。因此,自治化发展是当前和未来园区能源系统的必然趋势。

面向园区自治能源系统其能源调度是亟需研究的课题^[7,8]。自治能源系统的能源调度是考虑多能互补、多源供给和异质能流耦合特性下,依据供能单元、负荷模型与预测数据确定运行出力计划,以实现经济、低碳和自治的多目标综合优化。目前常用的能源调度优化方法可分为数学规划法和智能优化法。数学规划法将能源调度视为特定场景下的规划问题。文献[9]针对风电消纳的经济调度建立混合整数规划模型,并采取分段线性化方式处理目标函数再通过 CPLEX 求解。文献[10]提出基于辅助问题原则算法、分块坐标下降法和近似牛顿法的算法来求解多区域综合能源系统经济调度。文献[11]则从中压配电网的负荷峰谷耦合特性评估出发,基于二分图最大权值算法提出一种供区效能优化方法。文献[12]建立冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)型微电网的经济、环保和稳定多目标调度模型,并采用归一化法向约束法进行求解。上述研究主要是将园区能源调度模型视为或简化为线性问题进行求解,并未对原问题的求解方法进行深入研究。

智能优化法不对目标函数进行特定要求,具有更优的普遍适用性。目前基于规模和复杂程度已经有多种形式的高效解法,如启发式算法、模糊优化和凹凸化等^[13]。文献[14]采用多目标灰狼算法(multiple objective grey wolf optimizer, MOGWO)求解考虑成本和损耗最小化的最优潮流规划问题。文献[15]采用多目标粒子群算法(multiple objective particle swarm optimization, MOPSO)求解风光接入的微电网调度策略,但实验结果显示直接使用标准算法无法保证多目标间的均衡性,且未考虑储能系统。文献[16]基于目标级联法实现分层多目标优化,采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-II)进行求解,但是由于未考虑变约束问题使得其所得解的有效性难以保证,且储能单元仅作为峰谷电价转移未参与联合调度。上述研究在采用智能算法时均未能解决标准算法与原问题之间的适配性问题,尤其是储能协调。

综上所述,本文针对园区自治能源系统提出考虑园区自备 CCHP 与产储能设备运行约束下基于 PCOD 算法的多目标日前优化调度方法。首先,介绍具有能源自治特征的园区自治能源系统及其数学模型。然后,建立包含多目标与考虑异质多能流耦合约束的经济低碳自治(economic, low-carbon and self-contained, ECS)调度模型。基于已有研究,分析了当前能源调度算法所面临的问题模型不简化、变约束变量、目标量纲差异和 Pareto 决策等问题,提出了基于改进启发式寻优的 PCOD 优化算法。多组工业园区系统算例分析验证了所提算法的有效性与合理性。

1 自治能源系统模型

1.1 系统架构与能流

通过集成天然气冷热电三联供(combined cooling heating and power, CCHP)、分布式可再生能源和混合储能设备实现多能互补和协同灵活供应是实现高效能源利用和按质用能的典型自治能源系统形式^[17]。该自治能源系统的架构与能量流动示意如图 1 所示。其中,电能供给来源包括城市电网、光伏组件、CCHP 和电储能;冷/热能供给来源包括基于天然气网的燃气锅炉、CCHP 和热储

能设备。

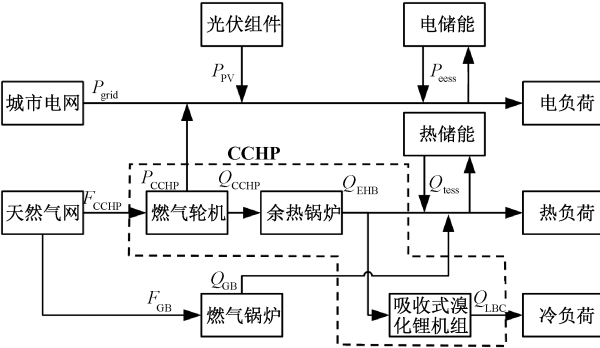


图1 自洽能源系统拓扑图

Fig. 1 Topology of self-contained energy system

1.2 CCHP 单元

典型 CCHP 的主要组成部分包括发电设备、热回收系统和吸收制冷机。

1.2.1 燃气轮机

燃气轮机作为发电设备为用户提供电能。燃气轮机的天然气耗量与输出电热功率关系为

$$\begin{cases} P_{CCHP}(t) = \eta_{CCHP, e} \cdot F_{CCHP}(t) \\ Q_{CCHP}(t) = \eta_{CCHP, h} \cdot F_{CCHP}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{CCHP} 和 Q_{CCHP} 分别为燃气轮机的输出电、热功率; $\eta_{CCHP, e}$ 和 $\eta_{CCHP, h}$ 分别为燃气轮机的电、热转化效率; F_{CCHP} 为燃气轮机的运行功率, 接受指令调度; $t = 1, \dots, n$, n 为时间分辨率, 后续不再赘述。

1.2.2 余热锅炉

余热锅炉的输入热量来自燃气轮机高温烟气回收, 其输出的热功率为

$$Q_{EHB}(t) = \eta_{EHB} \cdot Q_{CCHP}(t) \quad (2)$$

式中: Q_{EHB} 为余热锅炉的输出热功率; η_{EHB} 为高温烟气回收的热转化效率。

1.2.3 吸收式机组

吸收式溴化锂机组作为 CCHP 的冷负荷供应设备。吸收式制冷机组输出的冷功率为

$$Q_{LBC}(t) = \eta_{LBC}(t) \cdot Q_{EHB}(t) \quad (3)$$

式中: Q_{LBC} 为其输出冷功率; η_{LBC} 为其抽汽量调节系数, 接受指令调度。

1.3 燃气锅炉

燃气锅炉是自洽能源系统常用的供热设备, 进一步加强了气热耦合关系。燃气锅炉消耗的天然气的量模型如下:

$$Q_{GB}(t) = \eta_{GB} \cdot F_{GB}(t) \quad (4)$$

式中: Q_{GB} 为燃气锅炉生产的热功率; η_{GB} 为实际

转化效率; F_{GB} 为燃气锅炉的运行功率, 接受指令调度。

1.4 外部能源

该自洽能源系统通过城市电网与天然气网与外部能源系统互联。

1.4.1 城市电网

城市电网供能约束:

$$P_{grid}(t) \in [0, P_{max}] \quad (5)$$

式中: P_{grid} 为城市电网交互功率, 接受指令调度; P_{max} 为城市电网最大供给功率。

1.4.2 天然气网

天然气网供能约束:

$$F_{CCHP}(t) + F_{GB}(t) \triangleq F_{gas}(t) \in [0, F_{max}] \quad (6)$$

式中: F_{gas} 为天然气网总消耗量; F_{max} 为最大天然气网供给量。

1.5 产、储能系统

1.5.1 光伏组件

结合园区场景特点, 本研究采用分布式光伏实现太阳能清洁利用。对于确定的光伏组件, 其发电功率取决于光照辐射强度和环境温度:

$$P_{PV} = \eta_{PV} P_r \frac{I}{I_s} [1 + \partial_p (t_{PV} - t_r)] \quad (7)$$

式中: P_{PV} 为光伏组件的发电功率; η_{PV} 为光伏功率输出的能量转换效率; P_r 为标准光照条件下的光伏组件的额定输出功率; I_s 为标准辐射强度; I 为实际辐射强度; ∂_p 为温度功率系数, 常取 0.004 7; t_r 为额定工作温度; t_{PV} 为实际温度。

1.5.2 电储能

电储能的特性主要由荷电状态 (state of charge, SOC) 和充/放电功率来描述:

$$\begin{aligned} SOC(t) &= (1 - \delta_e) \cdot SOC(t-1) - \\ &\frac{1}{E_e} \int_{t-1}^t \eta_{eess} \cdot P_{eess}(X) dX \end{aligned} \quad (8)$$

式中: δ_e 为其自放电系数; E_e 为其额定容量; η_{eess} 为其充/放电效率; P_{eess} 为其运行功率, 正为放负为充, 接受指令调度。

1.5.3 热储能

热储能的特性主要由热存储状态 (state of thermal, SOT) 和储/释热功率来描述:

$$\begin{aligned} SOT(t) &= (1 - \delta_h) \cdot SOT(t-1) - \\ &\frac{1}{E_h} \int_{t-1}^t \eta_{tess} \cdot Q_{tess}(X) dX \end{aligned} \quad (9)$$

式中: δ_h 为其自释热系数; E_h 为其额定容量; η_{tess}

为其充/放电效率; Q_{less} 为其运行功率, 正为释负为储, 接受指令调度。

2 经济低碳自洽优化模型

2.1 ECS 目标函数

经济目标(E)旨在直接减少系统运行成本; 环境目标(C)旨在直接降低系统碳排放量; 而自洽目标(S)则旨在直接改善系统供能依赖, 同时, 间接提升系统综合能效。本文基于能量建立 ECS 各目标函数的数学模型。

2.1.1 运行成本经济目标

系统调度的运行成本主要由外购买电能和天然气导致, 以系统运行期间外购能源成本为模型, 建立经济目标函数如下:

$$Obj_E = \sum_{i=1}^n \left(p_{\text{grid}}(t) \cdot \int_{i-1}^i P_{\text{grid}}(t) dt + p_{\text{gas}}(t) \cdot \int_{i-1}^i [F_{\text{CCHP}}(t) + F_{\text{GB}}(t)] dt \right) \quad (10)$$

式中: p_{grid} 和 p_{gas} 分别为购电价格和购气价格; P_{grid} 、 F_{CCHP} 和 F_{GB} 分别为时间尺度 Δi 内, 城市电网、CCHP 和燃气锅炉的平均运行功率。

2.1.2 碳排放量环境目标

碳排放目标以系统运行耗能等效碳排放为目标函数, 包括燃气等效碳排放和购电等效碳排放。因此, 碳排放目标模型如下:

$$Obj_C = \sum_{i=1}^n \left(\eta_{\text{grid}} \cdot \int_{i-1}^i P_{\text{grid}}(t) dt + \eta_{\text{gas}} \cdot \int_{i-1}^i [F_{\text{CCHP}}(t) + F_{\text{GB}}(t)] dt \right) \quad (11)$$

式中: η_{grid} 和 η_{gas} 分别是时间尺度 Δi 下的购电等效碳排放因子和燃气等效碳排放因子。

2.1.3 资源用能自洽目标

资源用能自洽目标着重关注系统所用能量的来源, 以降低外部能源依赖并提高能量节约为导向。不同于成本与碳排以减少为目的, 该目标以增加能源自洽供给率为目标。但为保持目标最小化的一致性, 本文基于外购供给率的概念建立目标函数:

$$Obj_S = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\int_{i-1}^i [P_{\text{grid}}(t) + F_{\text{CCHP}}(t) + F_{\text{GB}}(t)] dt \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\int_{i-1}^i [P_{\text{ele}}(t) + Q_{\text{heat}}(t) + Q_{\text{cool}}(t)] dt \right)} \quad (12)$$

式中: P_{ele} 、 Q_{heat} 和 Q_{cool} 分别是时间尺度 Δi 下的电、热和冷负荷功率。

上述目标函数的数学模型均基于购电量和购气量建立, 由于不同目标定义在购电/气量之间赋予不同的系数组, 因此三者间存在相互矛盾关系。

2.2 运行约束条件

运行约束条件包括等式约束和不等式约束。等式约束依据供需平衡、热电耦合特性和能量转换效率等模型建立; 不等式约束模型依据各设备性能特性建立。

2.2.1 等式约束

1) 供需能量平衡约束

电负荷平衡的数学模型如下:

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{CCHP}}(t) + P_{\text{ess}}(t) + P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{ele}}(t) \quad (13)$$

热负荷平衡的数学模型如下:

$$Q_{\text{EHB}}(t) - Q_{\text{LBC}}(t) + Q_{\text{less}}(t) + Q_{\text{GB}}(t) = Q_{\text{heat}}(t) \quad (14)$$

冷负荷平衡的数学模型如下:

$$Q_{\text{LBC}}(t) = Q_{\text{cool}}(t) \quad (15)$$

2) 热电耦合约束

目前应用较多的两种 CCHP 分别为背压式和抽汽式^[18]。抽汽式机组功率一般为百兆瓦级, 常作为大型发电机组, 其热电比可调^[19]。而背压式机组的电功率取决于热负荷, 因此其热电耦合呈线性关系^[20,21], 即公式(1)中的燃气轮机电、热转化效率满足如下关系:

$$\frac{\eta_{\text{CCHP,e}}}{\eta_{\text{CCHP,h}}} = \frac{1}{k_{\text{hp}}} \quad (16)$$

式中: k_{hp} 为热电比常数。

2.2.2 不等式约束

1) 外部资源约束

城市电网和天然气网约束由公式(5)~(6)确定。而光伏组件出力不仅取决于气象因素, 还受配置容量约束影响:

$$P_{\text{PV}}(t) \in [0, P_{\text{PV,max}}] \quad (17)$$

式中: $P_{\text{PV,max}}$ 为光伏组件的最大额定出力。

2) 内部设备约束

园区内部各能源转化设备其运行约束:

$$\begin{cases} F_{\text{CCHP}}(t) \in [F_{\text{min}}, F_{\text{max}}] \\ F_{\text{GB}}(t) \in [0, F_{\text{GB,max}}] \\ P_{\text{ess}}(t) \in [-P_{\text{char}}, P_{\text{dischar}}] \\ Q_{\text{less}}(t) \in [-Q_{\text{char}}, Q_{\text{dischar}}] \end{cases} \quad (18)$$

式中: $F_{\min}$ 和 $F_{\max}$ 分别为燃气轮机的最小和最大工作状态; $F_{GB,\max}$ 为燃气锅炉最大运行功率; P_{char} 和 P_{dischar} 分别为电储能设备的最大充电和放电功率; Q_{char} 和 Q_{dischar} 分别为热储能设备的最大储热和释热功率。为防止热/电储能设备过充和过放,其能量状态满足如下约束:

$$\begin{cases} SOC(t) \in [SOC_{\min}, SOC_{\max}] \\ SOT(t) \in [SOT_{\min}, SOT_{\max}] \end{cases} \quad (19)$$

式中: $SOC_{\min}$ 和 $SOC_{\max}$ 分别为电储能的最小和最大荷电状态; $SOT_{\min}$ 和 $SOT_{\max}$ 分别为热储能的最小和最大储热状态。

3 PCOD 优化算法

经典多目标优化算法求解自洽能源系统优化调度模型的主要难点体现在等价问题简化、变量变约束、各目标量级差异和 Pareto 解集选取。为此,本文建立适用各类典型启发式算法的 PCOD 优化方法求解能源系统优化调度问题。以标准 MOPSO 为例,将该映射策略与智能算法结合的算法流程,如图 2 所示。

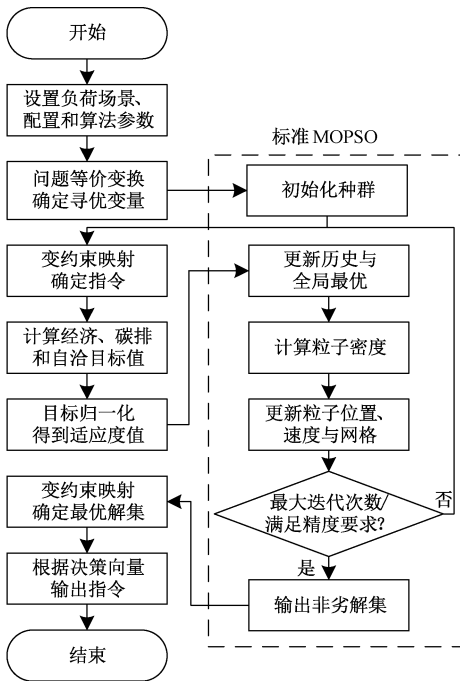


图2 所提算法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

3.1 问题等价变换

已明确共有六个调度控制对象: P_{grid} 、 F_{CCHP} 、 F_{GB} 、 η_{LBC} 、 P_{eess} 和 Q_{less} 。在给定的场景下,通过等式约束(13)~(15)可得如公式(20)所示关系实时成

立。即对于算法中的寻优变量仅需考虑 F_{CCHP} 、 P_{eess} 和 Q_{less} 就可确定所有调度指令。通过约束等价变换实现决策变量解空间维度由 6×24 维到 3×24 维的压缩,提高求解效率。

3.2 变约束等势保序映射

典型启发式算法要求变量可行域为无约束或具有上下确界的超空间。然而,对于该 MOP 存在变约束情况,其部分变量约束受其他变量取值影响。体现在储能容量的实时限制导致其调度指令要考虑实时 SOC/SOT 约束的出力限制,以及由此带来的等式约束下的综合出力约束。

即自变量电储能 P_{eess} 和热储能 Q_{less} 在实际运行中的约束如公式(21)和(23)所示。由此确定的燃气轮机 F_{CCHP} 变量在实际运行时的约束如公式(25)所示。为了解决该变约束问题,本文基于等势保序映射策略^[22],构建双射函数如公式(27)所示。基于马尔可夫过程,通过在具有固定约束的算法搜索空间与变约束的物理指令空间之间建立映射关系,使得在算法空间内的定约束变量具有满足系统中变约束的物理意义,保证了启发式算法应用的前提。固定求解算法空间有助于算法选取与参数优化,从而提高求解精度。

3.3 目标归一化

在运行调度中上述三个目标的单位和数量级均有不同,导致寻优过程在目标之间产生不平衡。常见的目标处理方法有权重系数法、附加指标法、归一化法等^[23]。对于具有不同量纲的优化目标,采用归一化操作可以消去各目标值单位,使得各目标在算法空间被同等对待,提高算法求解性能的同时保证变换后的 Pareto 前沿解不变。因此,本文基于理想点(the ideal point)和最低点(the nadir point)^[24]对 ECS 进行归一化处理,具体操作如下:

1) 定义该 MOP 的最低点 Obj^N 和理想点 Obj^* 如公式(28)~(29)所示。

2) 构建算法目标函数空间 Obj' 与实际目标函数空间 Obj 之间的保序映射实现各目标归一化,如公式(30)所示。

3.4 Pareto 决策向量

由于 MOP 的 Pareto 解集往往由多个元素构成,因此在寻优算法输出非劣解集后需要为解元素选取制定决策方案。常用的解决方法有直接赋权决策和综合定序决策^[25]。本文提出一种新的定

序决策方案:决策向量法。如公式(31)所示,决策者可以根据实际需求,基于对目标的容忍度为各目标设定权值 α β 和 γ 。该权重组在目标函数空间内唯一确定一条决策向量,决策算法将在所获得的 Pareto 解集中选取距离(欧式距离)该决策向量最近的解所对应的解方案作为系统调度的指令输出,如图3所示。

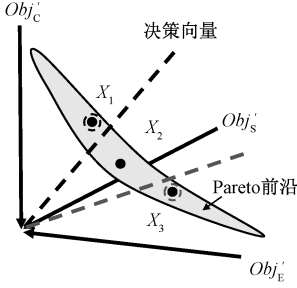


图3 Pareto 决策

Fig. 3 Pareto decision based on baton

$$\begin{cases} P_{\text{grid}} = P_{\text{ele}} - P_{\text{PV}} - \eta_{\text{CCHP},e} \cdot F_{\text{CCHP}} - P_{\text{eess}} \\ F_{\text{GB}} = [Q_{\text{heat}} - Q_{\text{tess}} - (1 - \eta_{\text{LBC}}) \cdot \\ \eta_{\text{EHB}} \cdot \eta_{\text{CCHP},h} \cdot F_{\text{CCHP}}] \cdot \eta_{\text{GB}}^{-1} \\ \eta_{\text{LBC}} = Q_{\text{cool}} \cdot (\eta_{\text{EHB}} \cdot \eta_{\text{CCHP},h} \cdot F_{\text{CCHP}})^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{\text{eess}}(t) \in [P_{\text{eess}}^{\min}(t), P_{\text{eess}}^{\max}(t)] \triangleq [-P_{\text{char}}, P_{\text{dischar}}] \cap [P_{\text{maxSOC}}^{\text{lim}}(t), P_{\text{minSOC}}^{\text{lim}}(t)] \quad (21)$$

式中:

$$\begin{cases} P_{\text{maxSOC}}^{\text{lim}}(t) = [(1 - \delta_e) \cdot \text{SOC}(t-1) - \text{SOC}_{\text{max}}] \cdot \eta_{\text{eess}}^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \cdot E_e \\ P_{\text{minSOC}}^{\text{lim}}(t) = [(1 - \delta_e) \cdot \text{SOC}(t-1) - \text{SOC}_{\text{min}}] \cdot \eta_{\text{eess}}^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \cdot E_e \end{cases} \quad (22)$$

$$Q_{\text{tess}}(t) \in [Q_{\text{tess}}^{\min}(t), Q_{\text{tess}}^{\max}(t)] \triangleq [-Q_{\text{char}}, Q_{\text{dischar}}] \cap [Q_{\text{maxSOT}}^{\text{lim}}(t), Q_{\text{minSOT}}^{\text{lim}}(t)] \quad (23)$$

式中:

$$\begin{cases} Q_{\text{maxSOT}}^{\text{lim}}(t) = [(1 - \delta_h) \cdot \text{SOT}(t-1) - \text{SOT}_{\text{max}}] \cdot \eta_{\text{tess}}^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \cdot E_h \\ Q_{\text{minSOT}}^{\text{lim}}(t) = [(1 - \delta_h) \cdot \text{SOT}(t-1) - \text{SOT}_{\text{min}}] \cdot \eta_{\text{tess}}^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \cdot E_h \end{cases} \quad (24)$$

$$F_{\text{CCHP}}(t) \in [F_{\text{CCHP}}^{\min}(t), F_{\text{CCHP}}^{\max}(t)] \triangleq [F_{\text{min}}, F_{\text{max}}] \cap F_{\text{CCHP},e}(t) \cap F_{\text{CCHP},h}(t) \quad (25)$$

式中:

$$\begin{cases} F_{\text{CCHP},e}(t) \triangleq \begin{bmatrix} (P_{\text{ele}}(t) - \bar{P}_{\text{eess}}(t) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{max}}) \cdot \\ (\eta_{\text{CCHP},e})^{-1}, (P_{\text{ele}}(t) - \bar{P}_{\text{eess}}(t) - P_{\text{PV}}(t)) \cdot \\ (\eta_{\text{CCHP},e})^{-1} \end{bmatrix} \\ F_{\text{CCHP},h}(t) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{Q_{\text{heat}}(t) + Q_{\text{cool}}(t) - \bar{Q}_{\text{tess}}(t) - \eta_{\text{GB}} \cdot F_{\text{GB,max}}}{\eta_{\text{EHB}} \cdot \eta_{\text{CCHP},h}} \\ \frac{Q_{\text{heat}}(t) + Q_{\text{cool}}(t) - \bar{Q}_{\text{tess}}(t)}{\eta_{\text{EHB}} \cdot \eta_{\text{CCHP},h}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\bar{P}_{\text{eess}}(t)$ 和 $\bar{Q}_{\text{tess}}(t)$ 分别为由算法空间中变量对应的电/热储能调度指令值。

$$X = \left\{ \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(n) \\ x_3(1) & x_3(2) & \cdots & x_3(n) \end{bmatrix} \right\} \xrightarrow{\text{mapping}} \left\{ \begin{array}{l} \forall x_i(t) \in [0,1] \end{array} \right.$$

$$C = \left\{ \begin{bmatrix} P_{\text{eess}}(1) & P_{\text{eess}}(2) & \cdots & P_{\text{eess}}(n) \\ Q_{\text{tess}}(1) & Q_{\text{tess}}(2) & \cdots & Q_{\text{tess}}(n) \\ F_{\text{CCHP}}(1) & F_{\text{CCHP}}(2) & \cdots & F_{\text{CCHP}}(n) \end{bmatrix} \right\} \xrightarrow{\text{mapping}} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{eess}}(t) = (P_{\text{eess}}^{\max}(t) - P_{\text{eess}}^{\min}(t)) \cdot x_1(t) + P_{\text{eess}}^{\min}(t) \\ Q_{\text{tess}}(t) = (Q_{\text{tess}}^{\max}(t) - Q_{\text{tess}}^{\min}(t)) \cdot x_2(t) + Q_{\text{tess}}^{\min}(t) \\ F_{\text{CCHP}}(t) = (F_{\text{CCHP}}^{\max}(t) - F_{\text{CCHP}}^{\min}(t)) \cdot x_3(t) + F_{\text{CCHP}}^{\min}(t) \end{array} \right. \quad (27)$$

式中: X 为算法空间内的寻优变量; C 为寻优变量对应物理空间内的调度指令。

$$\text{Obj}_E^N = \{\text{Obj}_E^N, \text{Obj}_C^N, \text{Obj}_S^N\},$$

$$\text{where } \text{Obj}_{E,C,S}^N \triangleq \max\{\text{Obj}_{E,C,S}(X) \mid X \in \text{Pareto 前沿}\} \quad (28)$$

$$\text{Obj}_j^* = \{\text{Obj}_E^*, \text{Obj}_C^*, \text{Obj}_S^*\},$$

$$\text{where } \text{Obj}_{E,C,S}^* \triangleq \min\{\text{Obj}_{E,C,S}(X) \mid X \in \text{Pareto 前沿}\} \quad (29)$$

$$\text{Obj}_j' = \frac{\text{Obj} - \text{Obj}_j^*}{\text{Obj}_j^N - \text{Obj}_j^* + \varepsilon} \quad (30)$$

式中: ε 是防止分母为0,在此取 10^{-6} 。

$$\frac{\text{Obj}_j'_{\text{E}}}{\alpha} = \frac{\text{Obj}_j'_{\text{C}}}{\beta} = \frac{\text{Obj}_j'_{\text{S}}}{\gamma} \quad (31)$$

式中: α 、 β 和 γ 取值均为 $(0,1)$ 。

权值取值越大代表容忍度越高。与已有方法相比,决策向量法基于权值相对关系,不受凸组合取值约束,同时有助于通过图形化方式进行直观的人机交互决策,便于决策者理解与使用。

4 算例分析

以某工业园区自洽能源系统进行案例分析,各组份关键参数见表 A1。本文考虑分时电价与分时气价,如图 A1 所示。设定日前调度时段数为 24,时段持续时间为 1 h。通过高精度预测算法可以确定日前冷、热、电负荷和光伏场景数据^[26]。基于实地调研,本文依据该园区冬季典型日、夏季典型日和一般典型日分别设置三种场景,如图 4 所示。

为统一单位,所有场景中的热能与电能以 3.6 MJ/(kW·h)进行换算。另外,由于当前配置与场景下的光伏和 CCHP 额定出力一般小于负荷需求,因此本文暂不考虑余电上网。

4.1 算法对比

工程应用中,最为广泛采用的 MOP 优化算法有 MOGWO^[14]、MOPSO^[15]和 NSGA-II^[16]等。No free lunch 定理^[27]的存在说明不同的优化算法根据问题的变化表现出不同的求解性能。因此,本文首先对上述智能算法进行对比分析,以确定最佳适配算法。

统一设置种群数为 200、迭代次数为 500,分别独立运行 30 次,整合获得所得的 Pareto 解集。在三种场景下,各算法所得 Pareto 其前沿解数目如表 1 所示,目标函数空间对比效果见图 A2。为了对比所得各 Pareto 解集的优劣,本文引用如下 C 指标^[28]:

$$C_{A,B} \triangleq \frac{|\{b \in B \mid \exists a \in A:a > b\}|}{|B|} \quad (32)$$

可以看出: $C_{A,B} = 1$ 表示 B 解集完全被 A 解集支配;反之, $C_{A,B} = 0$ 表示 B 中的解没有一个被 A 解

表 1 MOP 算法结果

解集数目	MOPSO	MOGWO	NSGA-II
场景 1	64	587	633
场景 2	8	399	128
场景 3	38	259	240

集所支配。为了进一步量化算法性能便于比较,本文对该 C 指标进行扩展,设计如下算法性能指标:

$$C_{k,k} \triangleq \sum_{i=1}^m (C_{k,i} - C_{i,k}), \quad k = 1, \cdots, m \quad (33)$$

式中: m 为参与对比的算法个数。

根据上式,MOPSO、MOGWO 和 NSGA-II 三种算法所得解集的 C 矩阵指标如表 2~表 4 所示。结果表明:在三种场景下,MOGWO 和 NSGA-II 能获得更多的非劣解,但是 MOPSO 所获得的非劣解的质量明显优于它们。在场景 1 和场景 3 下,MOPSO 算法的性能得分明显高于其他;而在场景 2 下,MOPSO 算法的性能得分甚至为满分。因此,后续算例分析的解算方法均采用 MOPSO。MOPSO 也被证实对于连续变量的优化问题具有良好的性能表现^[29]。

表 2 MOP 算法 C 矩阵指标(场景 1)

C	MOPSO	MOGWO	NSGA-II
MOPSO	1.878	1	0.987
MOGWO	0.016	-1.368	0.616
NSGA-II	0.094	1	-0.051

表 3 MOP 算法 C 矩阵指标(场景 2)

C	MOPSO	MOGWO	NSGA-II
MOPSO	2	1	1
MOGWO	0	-2	0
NSGA-II	0	1	0

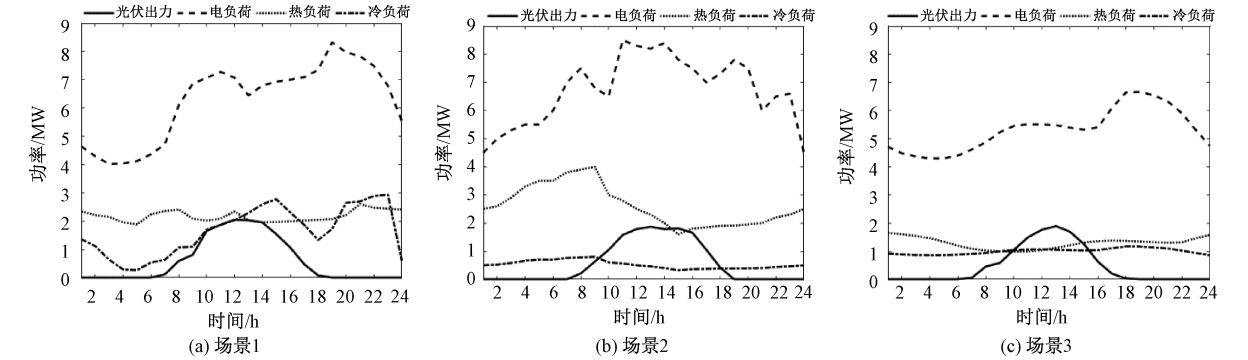


图 4 光伏与负荷预测数据
Fig. 4 Prediction results of PV and loads

表 4 MOP 算法 C 矩阵指标(场景 3)

Tab. 4 C-index matrix of MOP algorithms under case 3

C	MOPSO	MOGWO	NSGA-II
MOPSO	1.711	1	1
MOGWO	0.053	-0.331	0.617
NSGA-II	0.237	0	-1.380

4.2 算例结果分析

针对前述三种场景,从 ESC 三个维度将本文所提的优化方法与经典的以电定热(following the electrical loads, FEL)和以热定电(following the thermal loads, FTL)策略^[30]进行对比。同时,在各场景下模拟三名决策者,对应决策向量分别为 $[0.9, 0.1, 0.1]$ 、 $[0.1, 0.9, 0.1]$ 和 $[0.1, 0.9, 0.9]$ 。

1) 场景 1

在该场景下,一日的热电负荷波动较大,电负荷于 11:00 达到峰值 8.5 MW,于 1:00 达到谷值 4.5 MW,并在 10:00、17:00 和 21:00 出现三次骤降。热负荷整体呈现先增加中减少后稳定的趋势,分别于 9:00 和 15:00 达到峰值和谷值。而冷负荷一日波动较小,约为 0.5 MW 左右。Pareto 前

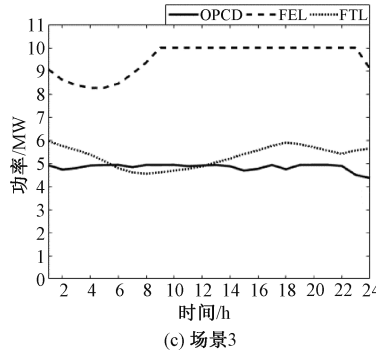
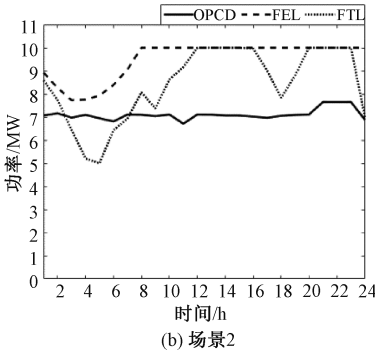
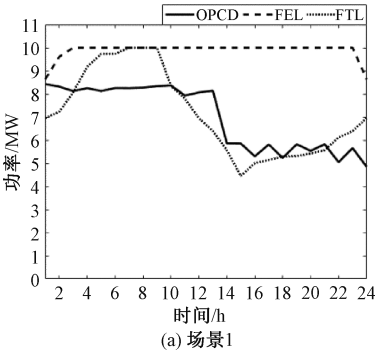


图 5 CCHP 工况对比

Fig. 5 Operation schemes of CCHP

2) 场景 2

与场景 1 相比,场景 2 的热/电负荷波动较小,两者呈现相似变化趋势,而冷负荷波动较大甚至峰值超过热负荷。Pareto 前沿解集的经济、碳排和自洽的范围分别为 9.48 万元~9.58 万元,62.87~63.20 吨,100.63%~100.72%。

从图 5(b)可以看出,PCOD($[0.1, 0.9, 0.1]$)策略下 CCHP 全时段运行在 7 MW 左右,在 21:00~23:00 电/冷负荷双高峰时提高运行工作点。结合图 A4 可知,PCOD 策略下燃气锅炉在 11、14、21、23 时段提高运行功率都伴随着热能存储,为后续的热量需求增加做准备,但受限于热储能容量,储能仅能维持不超过 2 h,超时热负荷不降低则仍

沿解集共有 64 个,见图 A2。其经济成本、碳排放量和自洽率的范围分别为 10.17 万元~10.41 万元,75.29~79.92 吨,98.37%~100.28%。

图 5(a)为 FEL、FTL 和 PCOD 策略下的 CCHP 运行状态。由于当前场景下实时电负荷超过 CCHP 额定电出力,因此 FEL 策略下 CCHP 几乎全时段满功率运行。热负荷仅在 7:00~9:00 时段内超过冷热电联供机组的额定供热功率,因此 FTL 策略下 CCHP 其余时段工作点随热负荷波动而变化。而本文所提方法则不同于前两者:该场景下,CCHP 运行工作点可分为两阶段,即 1:00~13:00 时段内稳定在 8 MW 左右,14:00~24:00 时段内基本稳定在 5.5 MW 左右。结合图 A3 可知,PCOD 策略下的燃气锅炉在 7:00 时段高功率运行以满足热负荷高峰,同时为热储能满功率充能,其余时段均低功率运行,利用热储能进行热量调节。正午时段,电负荷维持高位的同时光伏出力也是最多,再配合电储能有序充放,有效地避免了外购电能增加,体现了自治能源系统的优势。

需燃气锅炉进行热能补给。同时,电储能于 7、12、17 时段大功率充放。其中,12 时段光伏出力高峰同时电负荷减少,所以进行电能存储。7 和 17 时段均为高电价前的低/平价期,实现了峰谷电价转移。

3) 场景 3

场景 3 中,冷热负荷波动都很小,而电负荷波动呈波浪式起伏。Pareto 前沿解集共有 38 个,其 ECS 目标的取值范围分别为 7.77 万元~8.09 万元,64.75~70.23 吨,97.64%~98.22%。

图 5(c)为 FEL、FTL 和 PCOD($[0.1, 0.9, 0.9]$)策略下的 CCHP 运行情况对比。结合图 A5,PCOD 策略下 CCHP 全时段稳定运行在 5 MW

左右。热负荷波动很小,所以燃气锅炉运行较为稳定。热储能全天仅进行一个周期的热量储/释循环,而电储能灵活充放、积极参与电能调节。FEL 策略导致全天所有时段热能生产过剩,造成大量能量浪费。

4)综合分析

表 5 为各策略下的 ECS 目标值,可以看出在前述三种场景下,所提方法与 FTL 相比,可以使经济成本节约最多 12.24%,碳排放量减少最多 13.48%,外购供给率减少 4.08%~5.56%。而较 FEL 策略相比,由于 FEL 充分利用了 CCHP,使得其碳排放量达到了最小,体现了天然气的低碳性。在上述场景中,FEL 会导致大量能源浪费,所提方

法较 FEL 策略可使自洽率减少 9.22%~32.18%,显著提升系统能源供给自洽性。通过附图 A3~A5 对比不同决策向量下生成的方案可以看出,决策权重差异导致调度策略有所区别。其中,储能调度差异最大,而作为供能主体的 CCHP、城市电网和燃气锅炉的运行状态呈现相似性。同时,城市电网和电储能运行状态呈现对称性,体现了储能的能量转移特性,提高了系统经济性。另外,所提方法也是唯一实现外购能源占比率小于 1 的调度策略。在所有权重下所提方法结果在三个目标维度上几乎都是更优于其他标准算法,验证了所提方法的优越性。

表 5 调度目标效果对比

		Tab. 5 Objectives comparison of strategies							
	ECS	FEL	FTL	MOPSO [0.5,0.3,0.2]	MOGWO [0.5,0.3,0.2]	NSGA-II [0.5,0.3,0.2]	PCOD [0.9,0.1,0.1]	PCOD [0.1,0.9,0.1]	PCOD [0.1,0.9,0.9]
场景 1	经济(万元)	10.70	11.60	10.33	10.36	10.39	10.29	10.19	10.18
	碳排(吨)	60.81	88.47	76.01	78.84	77.19	76.54	77.57	76.93
	自洽(%)	116.90	103.67	99.03	98.08	98.78	98.62	98.77	99.03
场景 2	经济(万元)	9.84	9.58	9.59	10.02	9.94	9.58	9.50	9.48
	碳排(吨)	51.59	68.12	63.46	68.72	67.12	62.90	62.92	63.13
	自洽(%)	109.92	104.78	100.79	100.69	101.19	100.64	100.65	100.70
场景 3	经济(万元)	8.04	8.68	7.96	8.05	8.08	7.96	7.94	7.79
	碳排(吨)	30.41	73.31	64.89	68.00	69.29	66.62	70.23	67.44
	自洽(%)	129.96	103.34	98.00	97.20	98.58	97.84	97.78	98.03

5 结 论

在双碳目标下,针对工业园区能源系统综合优化调度问题,本文提出了一种通过在负荷侧开发并集成分布式产、储能设备等新能源技术的园区自洽能源系统及其综合优化调度方法。

1)本文建立了计及多能互补、多源供给和异质能流耦合约束的 ECS 多目标优化调度模型。并针对经典智能算法与实际工程的无缝衔接问题提出了 PCOD 优化方法。

2)该优化方法可以在保证异质能流平衡基础上,高效利用各供能单元并减少外部能源依赖,为工业园区日前调度提供最优方案。该方法保持主体供能单元的基本形态从而提高系统供能可靠性,并充分发挥储能在峰谷转移等方面的灵活性。

3)本文方法可为园区自洽能源系统规划配置和短时调度研究提供支撑。在系统规划阶段根据调度仿真结果对配置合理性进行分析。同时,可结合需求侧响应实现短时调度为可再生能源间歇性与负荷波动性问题提供解决方案。

参考文献:

[1] DAI Y, ZENG Y. Optimization of CCHP integrated with multiple load, replenished energy, and hybrid storage in different operation modes [J]. Energy, 2022, 260: 1-15.

[2] XING X, JIA L. Energy management in microgrid and multi-microgrid [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18 (15): 3480-3508.

[3] 师瑞峰, 宁津, 高毓钦, 等. 含氢储能的公路交通风、光自洽微网系统优化调度策略研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (11): 513-521.

SHI Ruifeng, NING Jin, GAO Yuqin, et al. Research on optimal dispatch strategy of wind and solar selet-consistent microgrid in road transportation system with hydrogen energy storage [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44 (11): 513-521 (in Chinese).

[4] 贾利民, 师瑞峰, 吉莉, 等. 我国道路交通与能源融合发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24 (3): 163-172.

JIA Limin, SHI Ruifeng, JI Li, et al. Road transportation and energy integration strategy in China [J]. Stra-

- tegic Study of CAE, 2022, 24 (3): 163–172 (in Chinese).
- [5] SONG Y, XIA M, YANG L, et al. Multi-granularity source-load-storage cooperative dispatch based on combined robust optimization and stochastic optimization for a highway service area micro-energy grid [J]. Renewable Energy, 2023, 205: 747–762.
- [6] 贾利民, 程鹏, 张蜚, 等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24 (3): 173–183.
- JIA Limin, CHENG Peng, ZHANG Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: development paths and strategies. Strategic Study of CAE, 2022, 24 (3): 173–183 (in Chinese).
- [7] LIU W, MA T, YANG Y. A reliability assessment of an integrated energy system based on coupling energy flow and thermal inertia [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8 (6): 1772–1783.
- [8] LI Y, ZOU Y, TAN Y, et al. Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas, and heat delivery system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9 (1): 273–283.
- [9] 麻秀范, 王戈, 朱思嘉, 等. 计及风电消纳与发电集团利益的日前协调优化调度 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (3): 579–587.
- MA Xiufan, WANG Ge, ZHU Sijia, et al. Coordinated day-ahead optimal dispatch considering wind power consumption and the benefits of power generation group [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (3): 579–587 (in Chinese).
- [10] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (3): 697–707.
- ZHAI Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (3): 697–707 (in Chinese).
- [11] 汤波, 杨鹏, 余光正, 等. 基于负荷峰谷耦合特性的中压配电网供区优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (19): 7051–7063.
- TANG Bo, YANG Peng, YU Guangzheng, et al. Power supply area optimization method of medium voltage distribution network based on load peak valley coupling characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (19): 7051–7063 (in Chinese).
- [12] 陈苏豪, 吴越, 曾伟, 等. 基于 NNC 法和 DMC 算法的 CCHP 型微电网两阶段调度 [J]. 中国电力, 2024, 57 (2): 171–182.
- CHEN Suhao, WU Yue, ZENG Wei, et al. Two-stage dispatch of CCHP microgrid based on NNC and DMC [J]. Electric Power, 2024, 57 (2): 171–182 (in Chinese).
- [13] LIU A, LAU V, KANANIAN B. Stochastic successive convex approximation for non-convex constrained stochastic optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67 (16): 4189–4203.
- [14] DILIP L, BHESDADIYA R, TRIVEDI I, et al. Optimal power flow problem solution using multi-objective grey wolf optimizer algorithm [C]. Intelligent Communication and Computational Technologies, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Singapore, 2018.
- [15] 金立军, 侯珂, 程逸帆. 基于 Pareto 支配法的微电网多目标能量优化短时调度策略研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (S2): 167–175.
- JIN Lijun, HOU Ke, CHENG Yifan. Study on short-term scheduling strategy for multi-objective energy optimization of microgrid based on Pareto domination [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (S2): 167–175 (in Chinese).
- [16] 徐青山, 李淋, 盛业宏, 等. 冷热电联供型多微网主动配电系统日前优化经济调度 [J]. 电网技术, 2018, 42 (6): 1726–1735.
- XU Qingshan, LI Lin, SHENG Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution power system with combined cooling, heating and power-based microgrids [J]. Power System Technology, 2018, 42 (6): 1726–1735 (in Chinese).
- [17] YANG X, WANG X, LENG Z, et al. An optimized scheduling strategy combining robust optimization and rolling optimization to solve the uncertainty of RES-CCHP MG [J]. Renewable Energy, 2023, 211: 307–325.
- [18] LIN C, WU W, ZHANG B, et al. Decentralized solution for combined heat and power dispatch through benders decomposition [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (4): 1361–1372.
- [19] CHEN X, KANG C, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications [J]. IEEE Transactions on Power System, 2015, 30 (4): 1848–1857.
- [20] LIU N, WANG J, WANG L. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10 (3): 1139–1151.
- [21] CHEN W D, CHUA K J. A novel and optimized opera-

tion strategy map for CCHP systems considering optimal thermal energy utilization [J]. *Energy*, 2022, 259: 1–20.

[22] 王於平, 夏业茂, 施建兵, 等. Lebesgue 测度与积分 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2017.

WANG Yuping, XIA Yemao, SHI Jianbing, et al. Lebesgue measure and integral [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2017 (in Chinese).

[23] TAHMASEBI S, MORADI P, GHODSI S, et al. An ideal point based many-objective optimization for community detection of complex networks [J]. *Information Sciences*, 2019, 502: 125–145.

[24] XIANG Y, ZHOU Y, YANG X, et al. A many-objective evolutionary algorithm with Pareto-adaptive reference points [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2020, 24 (1): 99–113.

[25] YANG X, LENG Z, XU S, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ε -constraint method [J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 408–423.

[26] 邢雪亮, 贾利民, 陈卓. 基于经验模态分解的超短期风速混合预测模型 [J]. *华北电力大学学报 (自然科学版)*, 2024, 51 (6): 41–51.

XING Xueliang, JIA Limin, CHEN Zhuo. Hybrid prediction model for ultra-short-term wind speed based on empirical mode decomposition [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2024, 51 (6): 41–51 (in Chinese).

[27] WOLPERT D H, MACREADY W G. No free lunch theorems for optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1 (1): 67–82.

[28] TAN K C, LEE T H, KHOR E F. Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2002, 17: 251–290.

[29] WANG D, TAN D, LIU L. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. *Soft Computing*, 2018, 22: 387–408.

[30] WANG Q, LIU J, HU Y, et al. Optimal operation strategy of multi-energy complementary distributed CCHP system and its application on commercial building [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 127839–127849.

作者简介:
邢雪亮(1995),男,博士研究生,通讯作者,研究方向为能源交通融合、自洽能源系统、能量管理系统等领域,E-mail:xueliangxing@ncepu.edu.cn;
贾利民(1963),男,教授,博士生导师,研究方向为轨道交通控制与安全、交通运输智能化、自洽能源系统等领域,E-mail:lmjia@bjtu.edu.cn;
胡俊杰(1986),男,副教授,博士生导师,研究方向为电动汽车与电网互动等领域,E-mail:junjiehu@ncepu.edu.cn;
师瑞峰(1977),男,教授,博士生导师,研究方向为系统工程、能源融合方向等领域,E-mail:shi.rui Feng@ncepu.edu.cn。