

计及焓效率的综合能源系统多目标模糊优化调度

钟永洁^{1,2}, 胡兵^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 张玮^{1,2}, 陈栋^{1,2}, 杨东^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏省 南京市 210032;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏省 南京市 211153)

MULTI-OBJECTIVE FUZZY OPTIMIZATION SCHEDULING OF INTEGRATED ENERGY SYSTEM CONSIDERING EXERGY EFFICIENCY

ZHONG Yongjie^{1,2}, HU Bing^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Dong^{1,2}, YANG Dong^{1,2}

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China;

2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

摘要:“横向多种能源互补, 纵向源网荷储协调”是综合能源系统的核心特征, 构建综合能源系统是提升社会综合能效、降低用能成本、实现双碳目标的有效途径之一。文中提出了一种计及焓效率的综合能源系统多目标模糊优化调度策略。首先, 在建立各种能源组件单元模型的基础上, 构建输出和输入焓流分析模型。同时设置容量、爬坡、能量平衡等运行约束条件。然后, 建立经济型、综合焓效率型、环保型单目标优化模型, 在此基础上, 基于模糊理论建立多目标模糊优化模型。最后, 基于通用优化软件平台编写模型程序并调用全局求解器对所建的多目标模糊优化模型求解, 综合能源系统运行优化调度的有效性和合理性通过算例分析得到了验证, 所提模型和方法可为综合能源系统多场景优化运行提供指导和借鉴。

关键词: 焓效率; 焓流; 综合能源系统; 多目标; 模糊优化

ABSTRACT: “Horizontal multiple energy complementary, vertical source-network-load-storage coordination” is the core feature of the integrated energy system, building the integrated energy system is one of the effective ways to improve the social comprehensive energy efficiency, reduce energy cost, and achieve the double-carbon goal. A multi-objective fuzzy optimization scheduling strategy for the integrated energy system is proposed in this paper. Firstly, the output and input exergy flow analysis models are constructed based on various energy component unit models. At the same time, set the capacity, climbing, energy balance and other operating constraints. Then, single-objective optimization models including economic, comprehensive exergy efficiency and environmental-friendly are established, and a multi-objective fuzzy optimization model is established based on fuzzy theory. Finally, the model program based on the general optimization software platform is written, and the global solver is employed to solve the built multi-objective fuzzy optimization model. The effectiveness and rationality of integrated energy system operation optimization scheduling are verified by example analysis. The proposed model and method can provide guidance and reference for the multi-scenario optimization operation of integrated energy system.

KEY WORD: Exergy efficiency; exergy flow; integrated energy system; multi-objective; fuzzy optimization

1 引言

综合能源系统具有提高系统综合能效、提升系统运行可靠性、降低用户用能成本、减少系统碳排放和系统其他污染物排放的特征和优势^[1-3],

它整合冷、热、电、气等多种能源资源, 推动打破传统单一能源发展的技术壁垒、市场壁垒和体制壁垒^[1,4-6], 实现多能源的互补互济和协调优化, 有效提升了能源利用效率、促进了能源的可持续

发展^[2,4,7-10]。因此,构建综合能源系统,有利于推动能源转型、助力实现“碳达峰”、“碳中和”控制目标^[3,6,10-12]。

一直以来,传统的区域能源系统缺乏用能的统一优化运行,普遍存在能源浪费、环境污染、供能独立、能源梯级利用水平低等问题,极大地影响了系统的运行效率和经济环境效益^[6-7,13-15]。在这样的背景下,综合能源系统的概念应运而生,综合能源系统将公共冷、热、电、气整合在一起,目的在于整合一定区域内电能、天然气、热能等多种能源,实现多种能源之间的协同优化运行、协同管理、交互响应和互补互济^[4,12,15-17]。综合能源系统一方面通过实现多能源协同优化和互补提高可再生能源的利用率,另一方面通过实现能源梯级利用提高能源的综合利用水平^[5-6,11,18-19]。

综合能源系统根据某一区域内的能源结构和能源禀赋,优化配置各种能源资源^[4,15-16,20-22],同时结合余热利用、热泵、储能等先进技术,充分利用高、低品位能源,为区域内用户提供冷、热、电等技术解决方案^[3,10-12,19,23-25]。近年来,随着综合能源系统等理念的不断推广,能源系统的发展呈现多样化、智能化、信息化趋势^[9,14-15,19,24-25]。随着全球能源的深入渗透,能源利用向着多能协调、多能互补的方向发展,综合能源系统成为多种能源网络的集成发展方向^[46,18,26-28]。为进一步提高用能效率,促进能源的高效利用,进一步减少碳排放,加强多种能源的源、网、荷、储深度融合,构建综合能源系统是未来能源系统发展的必然趋势^[4,17,20-21,25-28]。

基于此,构建考虑烟效率的综合能源系统,对促进建设清洁低碳、经济、安全高效的现代能源体系意义深远^[2-3,10,13-15,22]。基于此,文中提出计及烟效率的综合能源系统多目标模糊优化调度策略,建立综合能源系统多场景优化运行模型。通过建立多种能源组件单元模型、烟流分析模型,以期综合能源系统建模提供更加精细化借鉴。考虑到工程应该中不同场景的实际需求,建立包括经济型优化模型、综合烟效率优化模型、环保型优化模型在内的多目标优化模型,以期满足综合能源系统不同工程应用要求。提出多目标模糊优化方法,综合考虑综合能源系统经济、能效、清洁需求,以期模型和策略为综合能源系统最佳

优化运行提供理论指导。计及烟效率的综合能源系统多目标模糊优化调度策略有效促能源梯级利用,提升能源综合效率,是解决综合能源系统优化运行关键问题的有效手段。

2 综合能源系统的能源组件单元模型

2.1 生物质锅炉模型

生物质锅炉的燃料来源较为广泛,如农业废弃物、林业木材废弃物、城市木材废弃物以及食品残渣等。充分利用生物质材料,可以加快地方经济发展,减少废弃物的数量。通过消耗一定量的生物质,可以为大型商业区、工业园区、产业园等提供生活热水,生物质锅炉模型如下:

$$B_{boil}(t) \cdot \eta_{boil,bio} \cdot LHV_{bio} = H_{bio}(t) \quad (1)$$

式中: $B_{boil}(t)$ 为生物质锅炉在时刻 t 消耗的生物质速率; $\eta_{boil,bio}$ 为生物质锅炉的工作效率; LHV_{bio} 为生物质的低位热值; $H_{bio}(t)$ 为生物质锅炉在时刻 t 产生的热功率。

2.2 太阳能集热器模型

太阳能集热器通过收集的太阳能能量来制取生活热水。太阳能集热器的安装和使用都较为灵活,目前已经得到广泛应用,其模型如下:

$$\eta_{coll} \cdot A_{coll} \cdot G_T(t) = H_{solar}(t) \quad (2)$$

式中: η_{coll} 为太阳能集热器的工作效率; A_{coll} 为太阳能集热器的工作有效面积; $G_T(t)$ 为时刻 t 太阳辐射强度; $H_{solar}(t)$ 为时刻 t 太阳能集热器产生的热功率。

2.3 冷热电联供系统模型

燃气轮机是分布式综合能源系统中较为常见的能源转换单元,作为冷热电联供系统的核心组件,它通过消耗天然气来发电,同时产生大量的高温烟气余热,高温烟气可以通过余热回收装置来梯级利用。燃气轮机模型如下:

$$\begin{cases} G_{GT}(t) \cdot \eta_e \cdot LHV_{gas} = E_{GT}(t) \\ Q_{GT,ex}(t) \cdot \eta_e = E_{GT}(t) \cdot (1 - \eta_e - \eta_{loss}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $G_{GT}(t)$ 为燃气轮机在时刻 t 消耗的天然气速率; η_e 为燃气轮机的发电效率; LHV_{gas} 为天然气的低位热值; $E_{GT}(t)$ 为燃气轮机在时刻 t 的发电功率; $Q_{GT,ex}(t)$ 为燃气轮机在时刻 t 的烟气余热功率; η_{loss} 为燃气轮机热能损失系数。

吸收式制冷机可以回收燃气轮机产生的高温烟气中的热量，用来提供室内供冷所需的冷功率，同时，吸收式制冷机也可以通过直接燃烧天然气来提供室内供冷所需冷量。吸收式制冷机模型如下：

$$\begin{cases} Q_{GT,ex}(t) \cdot \xi_{SC}(t) \cdot \eta_{rec,abs} \cdot COP_{abs} = C_{ex}^{SC}(t) \\ G_{abs}(t) \cdot LHV_{gas} \cdot \eta_{abs} \cdot COP_{abs} = C_{dire}^{SC}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\xi_{SC}(t)$ 为时刻 t 燃气轮机产生的烟气余热流向用于室内供冷吸收式制冷机的分配比例系数； $\eta_{rec,abs}$ 为吸收式制冷机的烟气余热回收效率； COP_{abs} 为吸收式制冷机的工作性能系数； $C_{ex}^{SC}(t)$ 为吸收式制冷机在时刻 t 通过回收燃气轮机烟气余热产生的室内供冷冷功率； $G_{abs}(t)$ 为吸收式制冷机在时刻 t 消耗的天然气速率； η_{abs} 为吸收式制冷机的燃烧室的工作效率； $C_{dire}^{SC}(t)$ 为吸收式制冷机在时刻 t 通过直接消耗天然气产生的室内供冷冷功率。

余热回收锅炉根据使用的目的不同，可以分为生活热水余热回收锅炉和室内采暖余热回收锅炉，其工作原理与吸收式制冷机类似。

室内采暖余热回收锅炉模型如下：

$$\begin{cases} Q_{GT,ex}(t) \cdot \xi_{SH}(t) \cdot \eta_{REC} = H_{ex}^{SH}(t) \\ G_{REC}^{SH}(t) \cdot LHV_{gas} \cdot COP_{REC} = H_{dire}^{SH}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\xi_{SH}(t)$ 为时刻 t 燃气轮机产生的烟气余热流向用于室内采暖余热回收锅炉的分配比例系数； η_{REC} 为余热回收锅炉的热回收效率； $H_{ex}^{SH}(t)$ 为余热回收锅炉在时刻 t 通过回收燃气轮机烟气余热产生的室内采暖热功率； $G_{REC}^{SH}(t)$ 为用于室内采暖余热回收锅炉在时刻 t 消耗的天然气速率； COP_{REC} 为余热回收锅炉直接燃烧天然气时的工作性能系数； $H_{dire}^{SH}(t)$ 为用于室内采暖余热回收锅炉在时刻 t 通过直接消耗天然气产生的室内采暖热功率。

生活热水余热回收锅炉模型如下：

$$\begin{cases} Q_{GT,ex}(t) \cdot \xi_{DHW}(t) \cdot \eta_{REC} = H_{ex}^{DHW}(t) \\ G_{REC}^{DHW}(t) \cdot LHV_{gas} \cdot COP_{REC} = H_{dire}^{DHW}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\xi_{DHW}(t)$ 为时刻 t 燃气轮机产生的烟气余热流向用于提供生活热水余热回收锅炉的分配比例系数； $H_{ex}^{DHW}(t)$ 为余热回收锅炉在时刻 t 通过回收燃气轮机烟气余热产生的生活热水热功率； $G_{REC}^{DHW}(t)$ 为用于提供生活热水余热回收锅炉在时刻 t 消耗的天然气速率； $H_{dire}^{DHW}(t)$ 为用于提供生活热水余热回收锅炉在时刻 t 通过直接消耗天然气产生的生活热水热功率。

2.4 热泵模型

热泵技术是近年来在学术界和工业界均备受关注的新技术，依据地理资源禀赋，可以清洁高效的利用地热能。相比于传统供热方式如电锅炉等只能将部分的电能转化为热能，转换效率通常低于100%，然而，热泵装置通过充分利用地热能，它能够输出自身所耗电若干倍的热能，从而可以大大降低一次能源消耗。热泵模型如下：

$$\begin{cases} E_{HP}^h(t) \cdot COP_{HP}^h = H_{HP}(t) \\ E_{HP}^c(t) \cdot COP_{HP}^c = C_{HP}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $E_{HP}^h(t)$ 为制热状态下热泵在时刻 t 消耗的电能量； $E_{HP}^c(t)$ 为制冷状态下热泵在时刻 t 消耗的电能量； COP_{HP}^h 为热泵的制热工作性能系数； COP_{HP}^c 为热泵的制冷工作性能系数； $H_{HP}(t)$ 为制热状态下热泵在时刻 t 产生的热功率； $C_{HP}(t)$ 为制冷状态下热泵在时刻 t 产生的冷功率。

2.5 储能系统模型

在综合能源系统中，储能系统的应用也较为广泛，是综合能源系统中的重要组件单元，它可以实现能量在时间尺度上的转移。储能系统将某时刻多余的能量或者廉价的能量进行存储，在其它能量需求时刻或者能量价格较高的时刻释放，以实现能量的高效利用和降低用能成本。

根据储能系统应用的目的差异可以将它分为室内供冷、室内采暖、生活热水储能系统。综合能源系统中储能系统模型如下：

$$\begin{cases} C_{sto}^{SC}(t) = C_{sto}^{SC}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma^{SC}) + (C_{sto, in}^{SC}(t) - C_{sto, out}^{SC}(t)) \cdot \Delta t \\ H_{sto}^{SH}(t) = H_{sto}^{SH}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma^{SH}) + (H_{sto, in}^{SH}(t) - H_{sto, out}^{SH}(t)) \cdot \Delta t \\ H_{sto}^{DHW}(t) = H_{sto}^{DHW}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma^{DHW}) + (H_{sto, in}^{DHW}(t) - H_{sto, out}^{DHW}(t)) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

式中： $C_{sto}^{SC}(t)$ 、 $H_{sto}^{SH}(t)$ 、 $H_{sto}^{DHW}(t)$ 分别为用于室内供冷、室内采暖、生活热水的储能系统在时刻 t 的储能； σ^{SC} 、 σ^{SH} 、 σ^{DHW} 分别为用于室内供冷、室内采暖、生活热水的储能系统在时刻 t 的能量损失系数； $C_{sto, in}^{SC}(t)$ 、 $C_{sto, out}^{SC}(t)$ 分别为用于室内供冷的储能系统在时刻 t 的充、放冷功率； $H_{sto, in}^{SH}(t)$ 、 $H_{sto, out}^{SH}(t)$ 分别为用于室内采暖的储能系统在时刻 t 的充、放热功率； $H_{sto, in}^{DHW}(t)$ 、 $H_{sto, out}^{DHW}(t)$ 分别为用于生活热水的储能系统在时刻 t 的充、放热功率； Δt 为时间间隔。

3 综合能源系统焓流分析模型

在综合能源系统焓流分析中，主要从输入和输出角度来考虑焓流变化情况。焓流分析不同于传统的能量流分析，焓流分析模型充分考虑了能量的品位差异，更能反映不同能量、同种能源不同表现形式的品级差异。

3.1 输出焓流分析模型

(1) 电负荷需求焓流分析模型

$$EX_{dem}^e(t) = E_{dem}^e(t) \quad (9)$$

式中： $EX_{dem}^e(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的电负荷需求焓流。

(2) 室内供冷冷负荷需求焓流分析模型

$$EX_{dem}^{SC}(t) = \left(\frac{T_a^{SC}}{T_{req}^{SC}} - 1 \right) \cdot C_{dem}^{SC}(t) \quad (10)$$

式中： $EX_{dem}^{SC}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的室内供冷冷负荷需求焓流； T_a^{SC} 为室内供冷时的环境温度； T_{req}^{SC} 为室内供冷冷流体温度。

(3) 室内采暖热负荷需求焓流分析模型

$$EX_{dem}^{SH}(t) = \left(1 - \frac{T_a^{SH}}{T_{req}^{SH}} \right) \cdot H_{dem}^{SH}(t) \quad (11)$$

式中： $EX_{dem}^{SH}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的室内采暖热负荷需求焓流； T_a^{SH} 为室内采暖时环境温度； T_{req}^{SH} 为室内采暖热流体温度。

(4) 生活热水热负荷需求焓流分析模型

$$EX_{dem}^{DHW}(t) = \left(1 - \frac{T_a^{DHW}}{T_{req}^{DHW}} \right) \cdot H_{dem}^{DHW}(t) \quad (12)$$

式中： $EX_{dem}^{DHW}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的生活热水热负荷需求焓流； T_a^{DHW} 为提供生活热水时环境温度； T_{req}^{DHW} 为生活热水热流体温度。

3.2 输入焓流分析模型

(1) 供电焓流分析模型

$$EX_{grid}^e(t) = \frac{1}{\delta_{gen}} \cdot E_{buy}(t) \quad (13)$$

式中： $EX_{grid}^e(t)$ 为大电网在时刻 t 向综合能源系统输入的电焓流； δ_{gen} 为电厂焓效率系数。

(2) 供天然气焓流分析模型

$$EX_{gas}^{all}(t) = \varsigma_{gas} \cdot G_{gas}^{all}(t) \cdot LHV_{gas} \quad (14)$$

式中： $EX_{gas}^{all}(t)$ 为配气站或气井或天然气系统在时刻 t 向综合能源系统输入的气焓流； ς_{gas} 为天然气焓因子。

(3) 供生物质焓流分析模型

$$EX_{bio}^{all}(t) = \varsigma_{bio} \cdot B_{boil}(t) \cdot LHV_{bio} \quad (15)$$

式中： $EX_{bio}^{all}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 获得的生物质焓流； ς_{bio} 为生物质焓因子。

(4) 供太阳能焓流分析模型

$$EX_{solar}^{all}(t) = \left(1 - \frac{T_a^{solar}}{T_{coll}^{out}} \right) \cdot H_{solar}(t) \quad (16)$$

式中： $EX_{solar}^{all}(t)$ 为太阳能集热器在时刻 t 获得的太阳能焓流； T_a^{solar} 为太阳能集热器工作环境温度； T_{coll}^{out} 为太阳能集热器输出的热流体温度。

4 设置综合能源系统运行约束条件

为确保综合能源系统安全、可靠、稳定的运行，需要考虑多类型的约束限制。在综合能源系统中，通常需要首先考虑各个能源组件单元的容量约束及爬坡约束，以使各个能源组件单元符合实际物理限制。

与此同时，综合能源系统中涉及多种能源形式，如生活热水热能、室内采暖热能、室内供冷能、天然气能量、电能、高温烟气热能等，需要保证它们满足能量平衡约束。

4.1 容量约束

$$X_{ED}(t) \cdot R_{ED}^{\min} \leq R_{ED}(t) \leq X_{ED}(t) \cdot R_{ED}^{\max} \quad (17)$$

式中： $ED=GT$ 、 REC 、 abs 、 bio 、 HP 分别表示燃气轮机、余热回收锅炉、吸收式制冷机、生物质锅炉、热泵能量组件单元； $R_{ED}(t)$ 为能量组件单元 ED 在时刻 t 的出力； $X_{ED}(t)$ 为能量组件单元 ED 在时刻 t 的启停状态，启动取值为 1，停机取值为 0； R_{ED}^{\min} 、 R_{ED}^{\max} 分别为能量组件单元 ED 的最小运行出力、最大运行出力。

4.2 爬坡约束

$$-DR_{ED} \leq R_{ED}(t) - R_{ED}(t - \Delta t) \leq UR_{ED} \quad (18)$$

式中： DR_{ED} 、 UR_{ED} 分别为能量组件单元 ED 的下爬坡率、上爬坡率； Δt 为时间间隔。

4.3 能量平衡约束

(1) 室内供冷冷功率平衡

$$\begin{aligned} C_{ex}^{SC}(t) + C_{dire}^{SC}(t) + C_{HP}(t) + \\ C_{sto,out}^{SC}(t) - C_{sto,in}^{SC}(t) = C_{dem}^{SC}(t) \end{aligned} \quad (19)$$

式中： $C_{dem}^{SC}(t)$ 为室内供冷在时刻 t 的冷负荷需求。

(2) 室内采暖热功率平衡

$$\begin{aligned} H_{ex}^{SH}(t) + H_{dire}^{SH}(t) + H_{HP}(t) + \\ H_{sto,out}^{SH}(t) - H_{sto,in}^{SH}(t) = H_{dem}^{SH}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

式中： $H_{dem}^{SH}(t)$ 为室内采暖在时刻 t 的热负荷需求。

(3) 生活热水热功率平衡

$$\begin{aligned} H_{ex}^{DHW}(t) + H_{dire}^{DHW}(t) + H_{bio}(t) + H_{solar}(t) + \\ H_{sto,out}^{DHW}(t) - H_{sto,in}^{DHW}(t) = H_{dem}^{DHW}(t) \end{aligned} \quad (21)$$

式中： $H_{dem}^{DHW}(t)$ 为生活热水在时刻 t 的热负荷需求。

(4) 天然气功率平衡

$$\left(G_{GT}(t) + G_{abs}(t) + \right. \\ \left. G_{REC}^{SH}(t) + G_{REC}^{DHW}(t) \right) \cdot LHV_{gas} = G_{gas}^{all}(t) \cdot LHV_{gas} \quad (22)$$

式中： $G_{gas}^{all}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 消耗天然气的总速率。

(5) 电力功率平衡

$$E_{GT}(t) + E_{buy}(t) = (E_{HP}^h(t) + E_{HP}^c(t)) + E_{dem}^e(t) \quad (23)$$

式中： $E_{buy}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 从大电网购买的电功率； $E_{dem}^e(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的电负荷需求。

(6) 烟气余热功率平衡

$$Q_{GT,ex}(t) \cdot \left(\xi_{SC}(t) + \xi_{SH}(t) + \right. \\ \left. \xi_{DHW}(t) \right) = Q_{GT,ex}(t) \quad (24)$$

式中： $E_{buy}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 从大电网

购买的电功率； $E_{dem}^e(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 的电负荷需求。

5 单目标优化模型

文中建立多个单目标函数，包括以综合能源系统能源成本最低的经济型优化目标、以综合能源系统综合焓利用最大的焓效率优化目标、以综合能源系统碳排放最小的环保型优化目标。

5.1 经济型优化模型

建立的经济型优化目标函数主要考虑了购电费用、消耗天然气的能源费用、消耗生物质的能源费用。经济型优化模型使得综合能源系统以最经济的方式运行。

$$\min Cost = \sum_t^{cyc} \left(\lambda_{grid}(t) \cdot E_{buy}(t) + \right. \\ \left. \lambda_{gas}(t) \cdot G_{gas}^{all}(t) + \right. \\ \left. \lambda_{bio}(t) \cdot B_{boil}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (25)$$

式中： $\lambda_{grid}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 从大电网购电分时电价； $\lambda_{gas}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 从配气站或气井或天然气系统购天然气气价； $\lambda_{bio}(t)$ 为综合能源系统在时刻 t 购买生物质燃料价格； cyc 为综合能源系统的优化运行周期； $Cost$ 为综合能源系统优化运行周期内的能源成本。

5.2 综合焓效率优化模型

焓效率分析主要考虑综合能源系统的焓流的总输出和总输入差异，以体现不同能源做有用功的能力。

总输出焓：

$$EX_{out}^{all} = \sum_t^{cyc} \left(EX_{dem}^e(t) + EX_{dem}^{SC}(t) + \right. \\ \left. EX_{dem}^{SH}(t) + EX_{dem}^{DHW}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (26)$$

式中： EX_{out}^{all} 为综合能源系统在优化运行周期内输出的总负荷需求焓。

总输入焓：

$$EX_{in}^{all} = \sum_t^{cyc} \left(EX_{grid}^e(t) + EX_{gas}^{all}(t) + \right. \\ \left. EX_{bio}^{all}(t) + EX_{solar}^{all}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (27)$$

式中： EX_{in}^{all} 为优化运行周期内输入到综合能源系统的总焓。

综合焓效率：

$$\max \psi_{ex} = \frac{EX_{out}^{all}}{EX_{in}^{all}} \quad (28)$$

在综合能源系统中，各类能源需求通常为已知量，因此，在各类负荷需求已知的情况下，上式等价转化为：

$$\min EX_{in}^{all} = \sum_t^{cyc} \left(EX_{grid}^e(t) + EX_{gas}^{all}(t) + EX_{bio}^{all}(t) + EX_{solar}^{all}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (29)$$

式中： ψ_{ex} 为综合能源系统在优化运行周期内综合焓效率。

5.3 环保型优化模型

文中的综合能源系统碳排放来源主要包括消耗电能带来的碳排放、消耗天然气带来的碳排放、消耗生物质带来的碳排放。

$$\min Envir = \sum_t^{cyc} \left(\beta_{grid} \cdot E_{buy}(t) + \beta_{bio} \cdot B_{boil}(t) \cdot LHV_{bio} + \beta_{gas} \cdot G_{gas}^{all}(t) \cdot LHV_{gas} \right) \cdot \Delta t \quad (30)$$

式中： $Envir$ 为综合能源系统在优化运行周期内总的碳排放量； β_{grid} 为大电网的碳强度因子； β_{gas} 为天然气的碳强度因子； β_{bio} 为生物质的碳强度因子。

6 多目标模糊优化模型

6.1 目标函数的模糊化

为建立多目标模糊优化模型，需对每个目标函数定义其相应的隶属度函数。文中的多目标包括：最小化经济成本、最小化输入总焓、最小化碳排放量。多目标均要求最小值，因此可以选择反 Sigmoid 函数为它们的隶属度函数，相应的数学表达式为：

$$\mu(F_n) = 1 - \frac{1}{1 + \exp[-\omega_1(F_n - \omega_2)]} \quad (31)$$

式中： $n=1, 2, 3$ 表示目标函数的个数； F_n 为 n 个单目标函数； ω_1 和 ω_2 为反 Sigmoid 函数的特征参数； $\mu(\cdot)$ 为隶属度函数。

6.2 多目标模糊优化求解

目标函数和约束条件均有模糊性或二者之一具有模糊性的优化问题称为模糊优化问题，当目标函数不只一个时为多目标模糊优化。根据最大最小满意度原则，满意度 ϑ 为所有目标函数的隶属度函数中的最小值，也即：

$$\vartheta = \min \{ \mu(F_n) \} \quad (32)$$

依据模糊理论的最大最小原理，多目标优化问题可以转化为满足所有约束条件的满意度 ϑ 最大化的问题，也就是 $\max \vartheta$ 问题，其数学描述如下：

$$\begin{aligned} \max \quad & \vartheta \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \mu(F_n) \geq \lambda \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (33)$$

7 算例分析

7.1 算例介绍

文中算例以夏季典型日为研究对象，仿真步长为 1 小时，仿真周期为一天，也即是 24 小时。算例中综合能源系统结构如图 1 所示：主要能量组件单元包括燃气轮机、太阳能集热器、生物质锅炉、生活热水余热回收锅炉、室内采暖余热回收锅炉、室内供冷吸收式制冷机、热泵、生活热水储能系统、室内采暖储能系统、室内供冷储能系统。在输入侧，向综合能源系统中输入能源类型包括太阳能、生物质、天然气、电力。在输出侧，综合能源系统的输出包括生活热水热负荷、室内采暖热负荷、室内供冷冷负荷、电负荷。

算例中，热泵工作在制冷模式下，为减小热泵工作对环境的影响，文中算例在仿真中规定热泵在白天允许运行工作，也即是 7:00-21:00 时段，在夜晚必须停机。燃气轮机因发电产生的高温烟气分别被生活热水余热回收锅炉、室内采暖余热回收锅炉、室内供冷吸收式制冷机共同回收利用。同时设置夏季室内采暖热负荷无需求。生活热水余热回收锅炉、室内采暖余热回收锅炉、室内供冷吸收式制冷机及燃气轮机消耗的天然气均来源于天然气的气源。

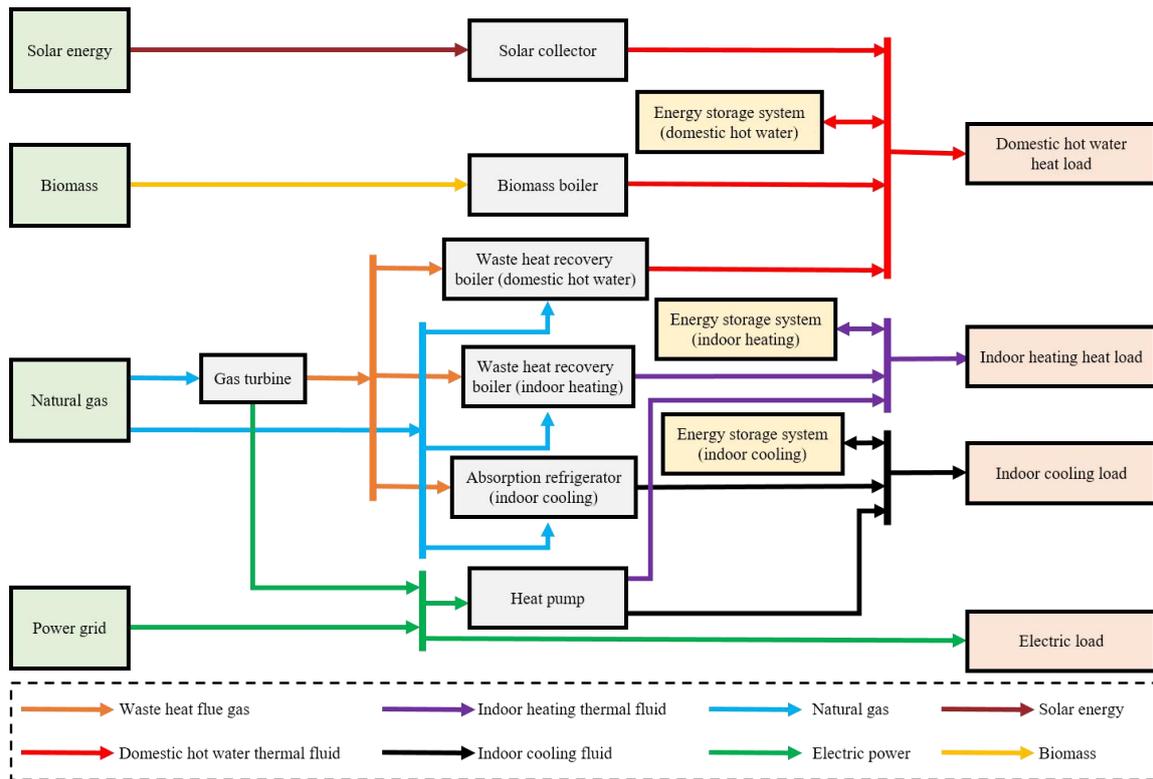


图 1 综合能源系统的算例结构
Fig. 1 Example structure of integrated energy system

算例的主要参数设置：生物质的低位热值为 5.04kWh/kg ，太阳能集热器的工作效率为 0.4 ，燃气轮机的发电效率为 0.24 ，燃气轮机热能损失系数为 0.08 ，吸收式制冷机的烟气余热回收效率为 0.7 ，式制冷机的工作性能系数为 1.2 ，天然气的低位热值为 9.7kWh/m^3 ，热泵的制冷工作性能系数为 3.2 ，储能系统的能量损失系数为 0.1 ，电厂效率系数为 0.33 ，分时电价如图 2 所示。

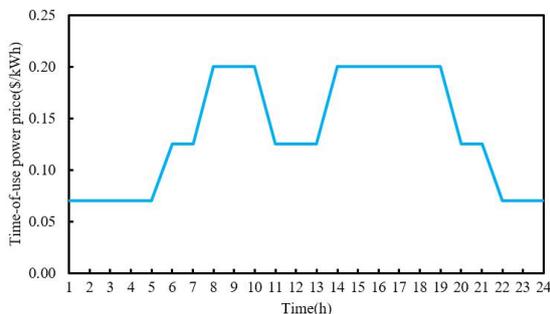


图 2 综合能源系统购电分时电价
Fig. 2 Time-of-use power price of electricity purchase for integrated energy system

7.2 结果分析

文中建立的考虑效率的综合能源系统多

目标模糊优化模型从数学概念上理解是求解 0-1 混合整数非线性规划问题，可采用通用商业优化软件对其求解，文中基于优化软件平台编写模型程序并调用全局求解器对其求解。

算例中单目标优化与多目标模糊优化结果如表 1 所示，从表 1 中可以发现，各个单目标优化之间有明显的冲突，如使综合能源系统运行的能源成本最小优化时，经济最小费用为 $4510.470\text{\$}$ ，而此时总输入焓目标函数的值为 132189.0kWh 、总的碳排放量为 23.51845t 。当然，在优化碳排放最小时，综合能源系统的日运行最小碳排放量为 21.42589t ，而此时总输入焓目标函数的值为 147688.1kWh 、总能源成本为 $5959.737\text{\$}$ 。总的来看，不同优化运行策略下，各个单目标值差异较大。综合能源系统经济型目标函数值的范围为 $[4510.470, 5959.737]\text{\$}$ 、总输入焓目标函数值的范围为 $[125732.1, 147688.1]\text{kWh}$ 、总的碳排放量的范围为 $[21.42589, 23.51845]\text{t}$ 。在多目标模糊优化下，经济型目标函数值为 $4950.025\text{\$}$ ，总输入焓目标函数值为 135645.6kWh ，总的碳排放量为 22.65269t 。

可见,多目标优化结果值均在相应单目标函数值的范围内,多目标模糊优化综合考虑了综合能源

系统的经济性、烟效率、环保性,满足工程现场实际应用需求。

表 1 单目标优化与多目标模糊优化结果

Tab. 1 Results of single-objective optimization and multi-objective fuzzy optimization

Type	single-objective	single-objective	single-objective	multi-objective fuzzy optimization
	Cost (\$)	Ex_m^{all} (kWh)	Envir (t)	ρ
min Cost	4510.470	132189.0	23.51845	4950.025
min Ex_m^{all}	4791.251	125732.1	24.14297	135645.6
min Envir	5959.737	147688.1	21.42589	22.65269

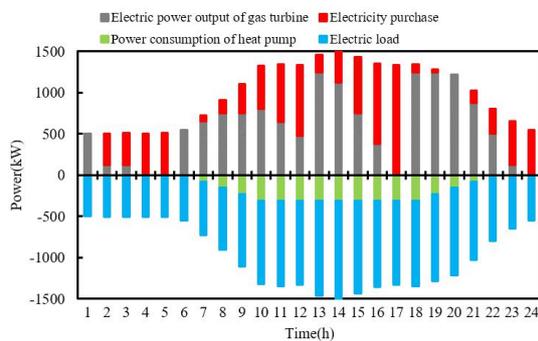


图 3 多目标模糊优化下的综合能源系统电功率平衡
Fig. 3 Electric power balance of integrated energy systems under multi-objective fuzzy optimization

多目标模糊优化下电功率平衡优化结果如图 3 所示,其中正值为输入到电母线的电功率、负值为流出电母线的电功率。根据图 3 的结果,综合能源系统主要在分时电价的平谷期间购电,来满足电负荷的基本需求。而在电价峰谷阶段,主要靠燃气轮机来发电。总的来看,燃气轮机一直处于开机状态,主要原因在于在全天中电热负荷都有需求,而燃气轮机是主要的电、热、气耦合设备,在全天中承担电热负荷的基本载荷功能。从图 3 的结果中可以看到,热泵在白天一直处于工作状态,热泵的制冷效率较高,有效利用热泵装置可以明显减小经济成本与碳排放。在多目标模糊优化策略下运行,综合能源系统的各类型能源均达到最优平衡,满足实际综合能源系统优化运行需求。

8 结语

本文提出计及烟效率的综合能源系统多目标模糊优化调度策略,建立了综合能源系统多场

景优化运行模型。研究结果表明:

(1)根据地理资源禀赋的特征,文中综合考虑了多元化能源转换组件单元、多类型负荷需求,所提出的模型更加精细化、更加符合实际工程应用场景特征。

(2)构建输出和输入烟流分析模型,充分考虑到不同能源品级特征,通过促进低温能源的利用,满足低质量的热能需求,可以减少优质能源的浪费,从而提高整体的烟效率。

(3)提出多目标模糊优化方法,综合考虑了综合能源系统经济、能效、清洁需求,模型和策略可满足综合能源系统不同工程应用要求、可以为综合能源系统最佳优化运行提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] WANG Dan, LIU Liu, JIA Hongjie, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 4(2): 130-145.
- [2] 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):118-126.
- [3] 钟永洁,孙永辉,王庭华,等.电热气互联能源系统动态环保经济协同灵活性调度[J].电网技术,2020,44(7):2457-2465.
- [4] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2019,42(4):2-10.
- [5] MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Real-Time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1227-1242.
- [6] 许周,孙永辉,谢东亮,等.计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J].电力系统自动化,2020,44(2):53-59.
- [7] 杨秀,杨云蔚,张美霞,等.气网动态潮流下多能源网与能量枢纽的联合调度[J].电力自动化设备,2020,40(5):16-25.
- [8] 张文韬,王秀丽,李言,等.大规模风电并网下多区域互联系统热电综合调度模型[J].电网技术,2019,42(1):154-161.
- [9] JIANG Y, XU J, SUN Y, et al. Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution system with multi-CCHP and distributed renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2018,

- 211: 237-248.
- [10] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 38(15): 4318-4328.
- [11] 史佳琪, 胡浩, 张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 126-134.
- [12] LIU Nian, ZHOU Linjie, WANG Cheng, et al. Heat-electricity coupled peak load shifting for multi-energy industrial parks: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1858-1869.
- [13] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
- [14] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-142.
- [15] 陈聪, 沈欣炜, 夏天, 等. 计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 60-68.
- [16] BAHRAMI S, TOULABI M, RANJBAE S, et al. A decentralized energy management framework for energy hubs in dynamic pricing markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 9(6): 6780-6792.
- [17] 文劲宇, 方家琨. 能源互联网中的关键设备与支撑技术[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 1-10.
- [18] 原凯, 李敬如, 宋毅, 等. 区域能源互联网综合评价技术综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 41-52.
- [19] ZHONG Yongjie, ZHOU Hongwei, ZONG Xuanjun, et al. Hierarchical multi-objective fuzzy collaborative optimization of integrated energy system under off-design performance[J]. Energies, 2019, 12(5): 1-27.
- [20] 王守相, 张善涛, 王凯, 等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 125-132.
- [21] SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming, et al. Integrated energy management system: concept, design, and demonstration in China[J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(2): 42-50.
- [22] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 基于多能互补的电/热综合需求响应[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 480-487.
- [23] 刁涵彬, 李培强, 王继飞, 等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4532-4543.
- [24] 魏震波, 黄宇涵, 高红均, 等. 含电转气和热电耦合热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. 电网技术, 2019, 42(11): 3512-3519.
- [25] 钟永洁, 孙永辉, 谢东亮, 等. 含电-热-气-冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 76-84.
- [26] 李国庆, 庄冠群, 田春光, 等. 基于大规模储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 46-52.
- [27] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 560-570.
- [28] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-19.

收稿日期:

作者简介:

钟永洁(1990-), 男, 通信作者, 江苏南京人, 硕士, 研究方向: 能源互联网、综合能源系统建模及其优化, 配电网保护自愈研发。