

采用融合遗传算法的高速公路服务区 综合能源系统优化调度研究

李杰¹, 高爽², 袁博兴², 张懿璞¹

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 710064, 西安;

2. 长安大学电子与控制工程学院, 710064, 西安)

摘要: 为达成“碳中和”目标愿景、促进公路交通系统与新能源的融合,以高速公路服务区为研究对象,考虑服务区内电、冷、热、气共4种负荷需求,构建了包含风光发电的新能源发电方式和电转气设备的高速公路服务区综合能源系统。在此基础上,以风电、光伏出力日前预测和多能负荷日前消耗为输入,各能源设备出力及购能分配为输出,以总成本最低为目标函数,考虑能量平衡、设备安全、运行状态等约束,建立了高速公路服务区综合能源系统优化调度模型。针对高速公路服务区综合能源系统调度问题,设计了遗传-序列二次规划融合优化算法,并以某服务区夏季典型日为例进行验证。结果表明:所构建的调度系统能够有效消纳可再生能源出力,协调外部购电、购气的比例,最终达到降低成本的效果;所提融合算法的调度结果与传统遗传算法、传统序列二次规划算法相比,在成本上分别降低了11.52%、0.70%,求解耗时仅为传统遗传算法的6.7%,独立性相比传统序列二次规划算法得到了提高。

关键词: 高速公路服务区;新能源;遗传-序列二次规划算法;优化调度;电转气

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202405019 **文章编号:** 0253-987X(2024)05-0200-12

Research on Optimal Scheduling of Integrated Energy System in Highway Service Area Based on a Genetic Algorithm-Sequential Quadratic Programming Algorithm

LI Jie¹, GAO Shuang², YUAN Boxing², ZHANG Yipu¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To achieve the vision of “carbon neutrality” and promote the integration of highway transportation systems and new energy resources, the highway service areas is taken as the research object. Considering four types of load demands, including electricity, cooling, heating, and gas, a comprehensive energy system is developed for highway service areas, incorporating wind and solar power generation methods and power-to-gas equipment. On this basis, a comprehensive energy system optimization scheduling model for highway service areas is established, and the daily forecast of wind and solar power and the daily consumption of multi-energy load are taken as input, and the output of each equipment and the allocation of energy purchased are used as output, taking the

lowest total cost as the objective function, considering constraints such as energy balance, equipment safety, and operating status. A genetic sequence quadratic programming fusion optimization algorithm is designed for the scheduling of comprehensive energy systems in highway service areas, and verified using a typical summer day in a service area as an example. The results show that the scheduling system can effectively accommodate renewable energy resources, coordinate the proportion of external electricity purchases and gas purchases, and ultimately reduce costs. The scheduling results obtained using the proposed fusion algorithm outperform those of traditional genetic algorithms and traditional sequential quadratic programming algorithms, with cost reductions of 11.52% and 0.70% respectively. The solving time is only 6.7% of that of traditional genetic algorithms, with improved independence compared to traditional sequential quadratic programming algorithms.

Keywords: highway service area; new energy resources; genetic algorithm-sequential quadratic programming algorithm; optimize scheduling; power-to-gas

随着全球气候变化导致的不利影响频繁显现,中国作为发展中国家勇担责任,主动提出在碳减排上自主贡献,提出“碳达峰、碳中和”^[1]的目标和愿景。作为交通大国,我国的公路建设占有重要地位,公路交通是能源消耗与碳排放的大户。高速公路作为承载长距离车流运输的交通动脉,以其通行能力强、基础设施量大、线长、占地多的特点为新能源利用提供了自然禀赋^[2]。然而,由于公路网络地形的多样性,导致可再生能源利用率并不高。对于高速公路服务区而言,大多还停留在市政供电、煤炭供暖、电力制冷的阶段。面对服务区能源需求的多样性,传统方法是大量使用非可再生资源,这不仅会造成资源浪费,而且会破坏环境。因此,公路交通系统需要寻求新的路径提高新能源利用率,解决能源需求多样化与传统供能单一、耗能高的矛盾。

近年来,针对能源多样化需求,众多学者基于能源耦合关系构建综合能源系统^[3],对多能系统进行统一规划和协调优化运行。综合能源系统优化调度研究包含优化调度模型建立、模型求解两部分。根据建模思路的不同,优化调度建模方法主要有两种:一是根据自身特性分别对电、冷、热、气子系统进行单独建模^[4-6],二是利用能源枢纽^[7-9]对多种能源进行转换与传输并且用方程统一表述。

在电-气互联系统中,电转气设备(P2G)等转换设备的使用可以大大提高系统灵活性和新能源消纳能力。文献[10-12]构建了包含P2G装置或联供设备的优化调度模型,发现转换设备的引入可以有效降低成本,增加环境效益。

考虑到不同负荷需求,增设储能设备可以平抑负荷差异,改变负荷原有时空分布特征。文献[13]综合考虑电储能、储热系统、储气罐,有效利用电价

机制在低谷期储能、高峰期放能以降低运行成本。文献[14]建立包含蓄电池、超级电容器、蓄热罐和储气罐等储能设备的电热气互联综合能源系统,提升了系统运行的灵活性,同时提高了能源利用率。文献[15]在考虑适应燃气负荷波动与燃气价格的情况下建立储气库的日内调度模型,制定了长时间尺度下的储气库优化配置方案。以上文献多研究电能、热能、气能的储能机制,主要考虑电热气互联,而在实际应用场景中,冷负荷需求也是必不可少的。

对于综合能源系统优化调度模型,常见的计算方法有统一求解、分解协调求解、基于群优化的方法和机器学习算法等。文献[16]构建了居民楼宇综合能源系统日前优化模型,将原有的非凸非线性问题转换为混合整数二次规划问题,并基于Yalmip工具箱调用Cplex求解器求解。文献[17]运用Benders分解算法将热电联合经济调度问题分解为主问题和子问题,有效考虑了热电联产机组的非凸可行运行区域。目前常见的求解工具为“Yalmip工具箱+商用求解器”^[18-19]模式,虽然求解效率高,但对编程能力要求高,且给出的结果单一,不能展示各时段各变量优化过程。

尽管已有文献研究了不同场景中的综合能源系统调度问题,获得了较多的研究成果,但当前对于公路交通与包含新能源的综合能源融合的研究尚有不足,尤其是缺乏在该场景下较为完整的综合能源调度过程分析。基于此,本文以高速公路服务区为研究对象,将“电气互联,冷热联供”的综合能源系统与公路交通场景深度融合,并以小时为时间粒度,对综合能源调度的时序过程进行了研究,获得了日前最优调度过程;针对该优化调度问题,分析比较遗传算法(GA)、序列二次规划(SQP)算法和基于遗传算法和

序列二次规划算法的融合遗传算法(GA-SQP)^[20],相比之下,GA-SQP算法既不依赖于初始解,又可大幅降低计算量,不仅降低了运行成本,而且取得了最优的经济性。

1 高速服务区综合能源系统结构

高速公路服务区综合能源系统以电力系统为核心,涉及电、冷、热、天然气等多个能源子系统,经过产、输、储、用以及能量转换等多个环节的协同互补,达到多元能源间有效协调的效果,发挥储电、储冷、储热、储气等资源的调节能力,从而构建能源多元供应体系。能源系统结构图^[21-23]如图1所示。

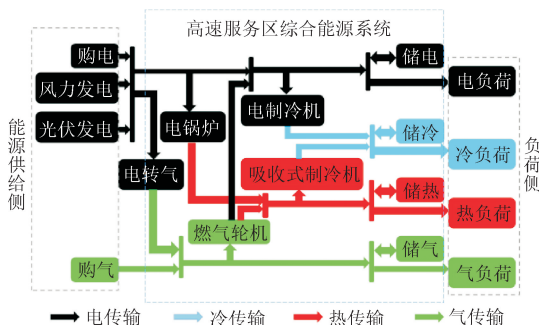


图1 高速公路服务区综合能源系统结构示意图

Fig.1 Schematic of the integrated energy system of the highway service area

综合能源系统中包含很多设备。按照功能可分为能源侧设备、能量转换设备和储能设备等。光伏和风力涡轮机属于能源侧设备,用于电能供应;能量转换设备包含P2G、电锅炉(EB)、燃气轮机(GT)、电制冷机(EC)和吸收式制冷机(AC),用于实现各能源之间的转换,达到协同优化的效果。针对电、冷、热、天然气4种能源需求,相应设置储电、储冷、储热、储气4种储能设备。

从能源过程来看,除能源产生、能源转换、能源分配、能源存储外,还有能源消耗。高速公路服务区的能源消耗以电、冷、热、气等形式存在。其中,电负荷由公路隧道负荷、公路沿线负荷(监控、通信、收费系统设备、养护服务设施)、服务设施负荷(办公、停车场、充电桩)3部分构成;冷负荷、热负荷为生活用冷、用热,如空调、暖气;气负荷为服务区加气站。

1.1 能量转换侧

能量转换侧包含能源转换及能源分配两部分。能量转换主要通过能量转换设备实现,能源分配则涉及能源分配系数。

1.1.1 能源转换

电力系统与天然气系统主要耦合设备为P2G和GT^[24]。由于电价与天然气价格存在波动,因此引入P2G旨在利用价格优势,即在电价低谷期将外部购电和风光发电的部分电量作为P2G的输入,通过低价购电将电能转换成天然气,在满足气负荷需求的基础上降低购气成本。P2G的输入由两部分组成,表达式为

$$P_{P2G}^{\text{in}}(t) = P_{e,P2G}^{\text{buy}}(t) + P_{P2G}^{\text{re}}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{e,P2G}^{\text{buy}}(t)$ 表示外部购电中用于P2G设备转换的电量; $P_{P2G}^{\text{re}}(t)$ 表示可再生能源(光伏发电、风力发电)中用于P2G设备转换的电量。

本文通过能量转换效率对各转换设备建立输入输出线性模型^[25]。对于各能量转换设备的输入输出关系,表达式如下

$$P_i^{\text{out}}(t) = \eta_i P_i^{\text{in}}(t) \quad (2)$$

式中: $i = \text{P2G, EB, GT, EC, AC}$, 则 $P_i^{\text{in}}(t)$ 、 $P_i^{\text{out}}(t)$ 分别为设备 i 的输入功率、输出功率; η_i 为设备 i 的转换效率。

1.1.2 能源分配

能源分配情况由4个分配系数确定,各分配系数与转换设备的输入有如下关系

$$P_{eb}^{\text{in}}(t) = \beta_{eb}^{\text{e,out}}(P_e^{\text{buy}}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) - P_{P2G}^{\text{in}}(t)) \quad (3)$$

$$P_{gt}^{\text{in}}(t) = \beta_{gt}^{\text{g,out}}(P_g^{\text{buy}}(t) + P_{P2G}^{\text{out}}(t)) \quad (4)$$

$$P_{ec}^{\text{in}}(t) = \beta_{ec}^{\text{e,out}}(P_{gte}^{\text{out}}(t) + (1 - \beta_{eb}^{\text{e,out}}) \cdot (P_e^{\text{buy}}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) - P_{P2G}^{\text{in}}(t))) \quad (5)$$

$$P_{ac}^{\text{in}}(t) = \beta_{ac}^{\text{h,out}}(P_{gth}^{\text{out}}(t) + P_{eb}^{\text{out}}(t)) \quad (6)$$

式中: $\beta_{eb}^{\text{e,out}}$ 、 $\beta_{gt}^{\text{g,out}}$ 、 $\beta_{ec}^{\text{e,out}}$ 、 $\beta_{ac}^{\text{h,out}}$ 分别表示电能分配给电锅炉的系数、天然气分配给燃气轮机的系数、电能分配给电制冷机的系数、热能分配给吸收式制冷机的系数,数值范围均为0~1。

1.2 储能侧

储能按照类型分为储电、储冷、储热、储气。利用储能装置可以实现能量在时间上的转移。各储能器通用模型如下

$$X_{\text{ESS}}(t) = X_{\text{ESS}}(t-1) + X_c(t)\eta_{X,c}\Delta t \quad (7)$$

$$X_{\text{ESS}}(t) = X_{\text{ESS}}(t-1) - X_{\text{disc}}(t)\eta_{X,\text{disc}}\Delta t \quad (8)$$

式中: $X_{\text{ESS}}(t)$ 和 $X_{\text{ESS}}(t-1)$ ($X = \text{电能, 冷能, 热能, 气能}$) 分别表示 t 时刻和 $t-1$ 时刻各储能器的剩余能量; $X_c(t)$ 和 $X_{\text{disc}}(t)$ 分别表示 t 时刻的充能功率和放能功率; $\eta_{X,c}$ 和 $\eta_{X,\text{disc}}$ 分别表示充能效率和放能效率; Δt 表示时间间隔,按小时划分。

2 高速服务区综合能源系统

2.1 目标函数

本文构建最小化总成本 F 的目标函数如下

$$\min F = f_e + f_g + f_A \quad (9)$$

式中: F 为总成本; f_e 、 f_g 、 f_A 分别表示购电成本、购气成本和装置运行成本。

(1) 购电成本。购电成本表示系统从外部购电所产生的成本,表达式如下

$$f_e = \sum_{t=1}^T (c_e(t) P_e^{\text{buy}}(t)) \quad (10)$$

式中: $c_e(t)$ 、 $P_e^{\text{buy}}(t)$ 分别表示 t 时刻购电价格和购电功率。

(2) 购气成本。购气成本表示系统从外部购买天然气所产生的成本,表达式如下

$$f_g = \sum_{t=1}^T (c_g(t) P_g^{\text{buy}}(t)) \quad (11)$$

式中: $c_g(t)$ 、 $P_g^{\text{buy}}(t)$ 分别表示 t 时刻购气价格和购气功率。

(3) 设备运维成本。设备运维成本表示系统中各转换设备和储能设备运行维护所产生的成本,表达式如下

$$f_A = \sum_{t=1}^T c_i (P_i^{\text{out}}(t) + E_{\text{ESS}}(t) + C_{\text{ESS}}(t) + H_{\text{ESS}}(t) + G_{\text{ESS}}(t)) \quad (12)$$

式中: c_i 表示设备 i ($i = \text{P2G}, \text{EB}, \text{GT}, \text{EC}, \text{AC}$) 的单位功率运维费用; $P_i^{\text{out}}(t)$ 表示设备 i 在 t 时刻的输出功率。

2.2 约束

2.2.1 等式约束

等式约束主要包含电、冷、热、气功率平衡约束,表达式分别为

$$P_e^{\text{buy}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{gte}}^{\text{out}}(t) + E_{\text{disc}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{P2G}}^{\text{in}}(t) + P_{\text{eb}}^{\text{in}}(t) + P_{\text{ec}}^{\text{in}}(t) + E_c(t) \quad (13)$$

$$P_{\text{ec}}^{\text{out}}(t) + P_{\text{ac}}^{\text{out}}(t) + C_{\text{disc}}(t) = C_{\text{load}}(t) + C_c(t) \quad (14)$$

$$P_{\text{eb}}^{\text{out}}(t) + P_{\text{gth}}^{\text{out}}(t) + H_{\text{disc}}(t) = H_{\text{load}}(t) + P_{\text{ac}}^{\text{in}}(t) + H_c(t) \quad (15)$$

$$P_g^{\text{buy}}(t) + P_{\text{P2G}}^{\text{out}}(t) + G_{\text{disc}}(t) = G_{\text{load}}(t) + P_{\text{gt}}^{\text{in}}(t) + G_c(t) \quad (16)$$

2.2.2 不等式约束

(1) 购能约束。当系统内部供能不足时从外部

购电、购气,需满足如下约束

$$\begin{cases} P_e^{\text{buy}} \leq P_e^{\text{buy}, \max} \\ P_g^{\text{buy}} \leq P_g^{\text{buy}, \max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_e^{\text{buy}, \max}$ 、 $P_g^{\text{buy}, \max}$ 分别表示购电功率和购气功率的上限,均为 7 000 kW。

(2) 设备安全约束。为了保障各设备安全运行,有如下约束

$$\begin{cases} P_i^{\text{out}, \min} \leq P_i^{\text{out}}(t) \leq P_i^{\text{out}, \max} \\ \Delta P_i^{\text{out}, \min} \leq \Delta P_i^{\text{out}}(t) \leq \Delta P_i^{\text{out}, \max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_i^{\text{out}, \max}$ 、 $P_i^{\text{out}, \min}$ 分别表示转换设备输出功率的上下限; $\Delta P_i^{\text{out}, \max}$ 、 $\Delta P_i^{\text{out}, \min}$ 分别表示设备运行爬坡率的上下限。

(3) 运行状态约束。对于各储能器^[26]而言,均有容量约束、充能功率约束、放能功率约束、充放能状态约束 4 个约束。由于充能、放能两种状态不能同时存在,即在某一时刻,储能器只能处于充能或放能的一种状态,因此需要设置充、放能标志位。各约束表达式如下

$$\begin{cases} X_{\text{ESS}, \min} \leq X_{\text{ESS}}(t) \leq X_{\text{ESS}, \max} \\ u_{X, c} X_{c, \min} \leq X_c(t) \leq u_{X, c} X_{c, \max} \\ u_{X, \text{disc}} X_{\text{disc}, \min} \leq X_{\text{disc}}(t) \leq u_{X, \text{disc}} X_{\text{disc}, \max} \\ u_{X, c} + u_{X, \text{disc}} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $X_{\text{ESS}, \min}$ 和 $X_{\text{ESS}, \max}$ ($X = \text{电能}, \text{冷能}, \text{热能}, \text{气能}$) 分别表示储能器容量的下限和上限; $X_{c, \min}$ 和 $X_{c, \max}$ 分别表示储能器充能功率的下限和上限; $X_{\text{disc}, \min}$ 和 $X_{\text{disc}, \max}$ 分别表示储能器放能功率的下限和上限; $u_{X, c}$ 、 $u_{X, \text{disc}}$ 分别代表储能器充、放能标志位,均为二进制变量,取值为 0 或 1。

3 基于 GA-SQP 算法的优化调度

3.1 GA-SQP 算法概述

本文采用 GA-SQP 算法^[27-28]对优化问题进行求解,内层采用二进制编码的遗传算法搜索最优整数变量集,并控制算法终止条件。在整数变量确定后,内层问题转化为普通非线性规划(NLP)问题。针对 NLP 问题,采用序列二次规划算法,基本思想是将主问题分解成多个子问题,每一次迭代求解一个子问题来确定下一个下降方向。

GA-SQP 算法充分考虑了传统 GA 算法与传统 SQP 算法的优缺点,除了可以弥补 GA 算法求解效率低下且易早熟收敛的缺陷,GA-SQP 相比 SQP 算法还可以降低对初始解的依赖性,不易陷入局部最优解。GA-SQP 算法流程图^[29-30]如图 2 所示。

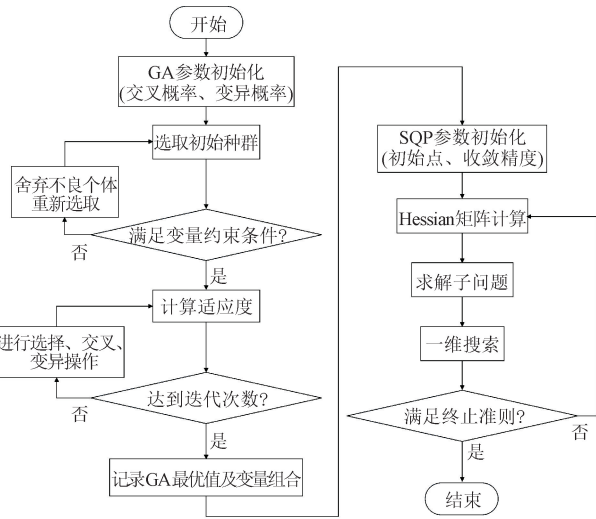


图 2 GA-SQP 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of GA-SQP algorithm

3.2 算法流程描述

GA-SQP 算法流程为：

- (1)初始化参数,如变异概率、交叉概率等。
- (2)根据决策变量数确定种群数目,选取初始种群。
- (3)判断是否满足变量约束条件,如满足则计算适应度,否则舍弃不良个体重新选取。
- (4)判断是否达到迭代次数,如果达到则 GA 算法终止,并记录最优值和变量组合;否则,经过选择、交叉、变异,重新计算适应度。
- (5)将 GA 算法最终解作为 SQP 算法初始值,对 SQP 算法初始化。
- (6)进行 Hessian 矩阵计算。
- (7)求解子问题。
- (8)进行一维搜索。
- (9)判断是否满足终止准则,是则算法结束,否则转到(6)。

在本文中,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1,种群大小为 100,单纯 GA 算法的进化代数设置为 100,GA-SQP 算法中 GA 部分的初始进化代数设置为 5。

4 算例分析

4.1 算例参数

为了验证综合能源调度策略,比较 GA、SQP、GA-SQP 融合算法的经济性。选用某服务区夏季典型日作为研究对象,进行日前优化调度。调度范围为 24 h,时间间隔为 1 h。各设备参数及储能器参数分别如表 1 和表 2 所示。各类输入曲线如图 3 所示。

表 1 各转换设备参数

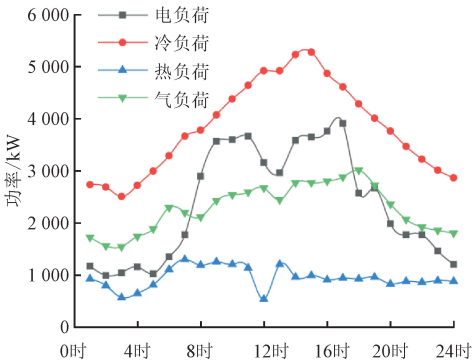
Table 1 Parameters for each conversion device

设备	转换效率	输出功率 上限/kW	爬坡率/ (kW·h ⁻¹)	单位运维成本/ (元·kW ⁻¹)
P2G	0.60	4 000	±1 000	0.080
EB	0.90	3 000	±1 000	0.040
GT	0.35(发电) 0.35(发热)	3 000	±1 000	0.020
EC	0.9	5 500	±1 000	0.015
AC	0.70	3 000	±1 000	0.020

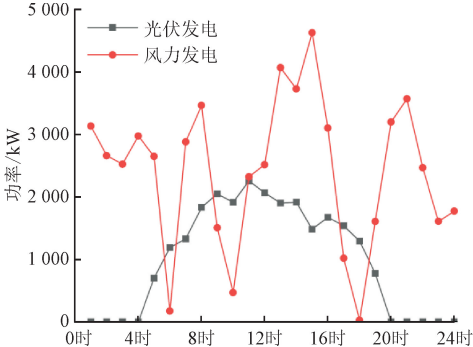
表 2 各储能器参数

Table 2 Parameters for each accumulator

储能器	充能效率, 放能效率	初始储 能容量/ kW	充放能 功率/kW	单位运维成本/ (元·kW ⁻¹)
储电	0.95,0.95	3 000	$0 \leq P_c \leq 600$ $0 \leq P_{disc} \leq 600$	0.096
储冷	0.9,0.9	400	$0 \leq C_c \leq 600$ $0 \leq C_{disc} \leq 600$	0.016
储热	0.9,0.9	400	$0 \leq H_c \leq 600$ $0 \leq H_{disc} \leq 600$	0.016
储气	0.9,0.9	400	$0 \leq G_c \leq 600$ $0 \leq G_{disc} \leq 600$	0.018



(a)服务区内多能负荷日前消耗



(b)光伏发电、风力发电日前预测

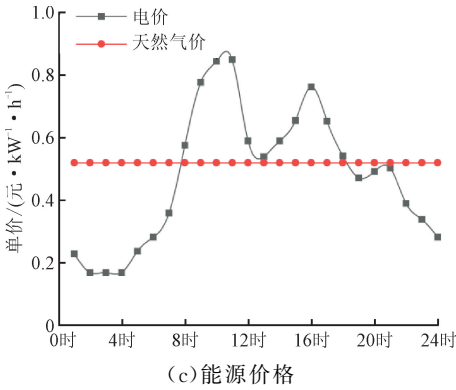


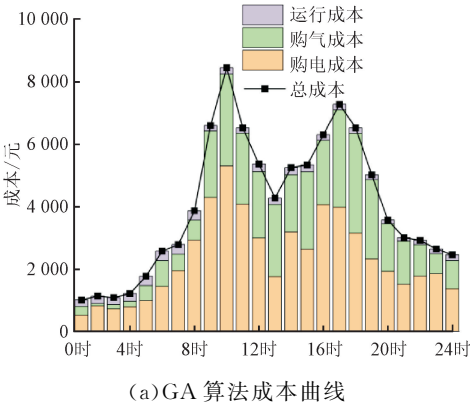
图 3 高速公路服务区日前新能源出力、负荷消耗、能源价格

Fig. 3 Recent new energy output, load consumption, and energy prices in the highway service area

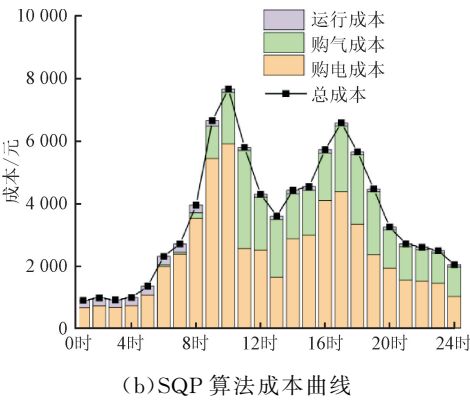
4.2 成本分析

3 种算法的成本曲线分别如图 4 所示。可以看出,3 种算法的成本变化趋势有相似之处,但在具体成本组成上有区别。SQP 算法和 GA-SQP 算法在 1 时至 5 时购气成本均为 0。

从表 3 的成本数据上看,GA-SQP 算法的购气成本介于 GA、SQP 算法之间,低于 GA 算法的 11.55%,高于 SQP 算法的 22.74%;GA-SQP 算法的购电成本和运行成本最低,购电成本比 GA、SQP 算法降低了 10.05%、11.1%,运行成本降低了 27.87%、2.79%;



(a)GA 算法成本曲线



(b)SQP 算法成本曲线

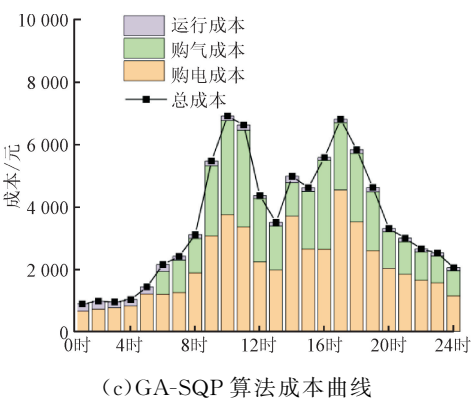


图 4 GA、SQP、GA-SQP 优化算法的成本分布

Fig. 4 Cost distribution of GA, SQP, and GA-SQP optimization algorithms

总成本分别比 GA、SQP 算法降低 11.52%和 0.70%。

表 3 3 种算法成本数据

Table 3 Cost data of three algorithms

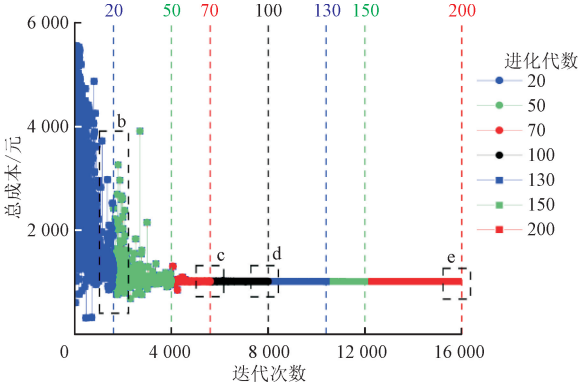
(单位:元)				
算法	购电成本	购气成本	运行成本	总成本
GA	56 336.111	35 539.846	5 010.461	96 886.418
SQP	56 999.277	25 611.920	3 717.601	86 328.798
GA-SQP	50 672.668	31 435.152	3 613.856	85 721.677

4.3 时效分析

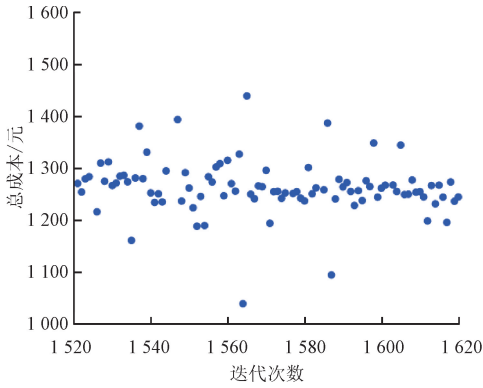
4.3.1 GA 算法进化迭代次数

对于以 1 h 为时间尺度的日内调度需要进行 24 次优化,每小时进行一次优化,下面以 0 时至 1 时优化为例。

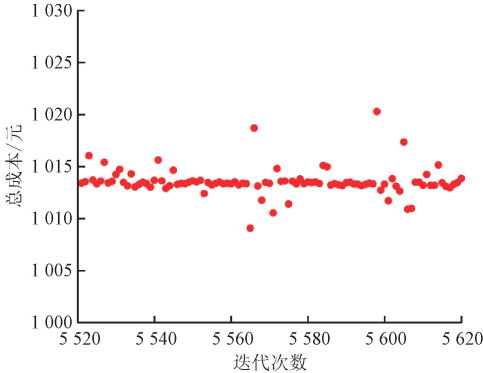
图 5 为 GA 算法中总成本随迭代次数的变化曲线,其中:图 5(a)为总览图,也表示进化代数 200 时的整体迭代曲线;图 5(b)~(e)分别为进化代数为 20、70、100、200 时总成本的变化图,对应图(a)中 b~e。由图可知,随着进化代数增加,迭代次数增加,总成本减小,并在 70 代后渐趋于稳定。进化代数从 20 增加到 200 的过程中,总成本从 1 189.2767 元降低到 1 012 元左右并保持强收敛。



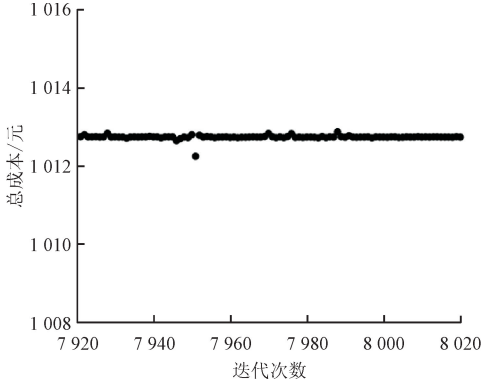
(a)GA 算法中总成本随迭代次数变化



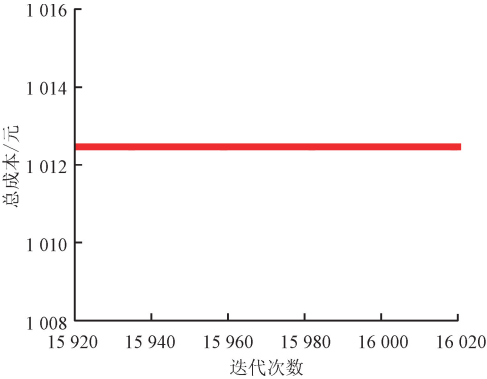
(b)进化代数为 20 代时总成本的变化



(c)进化代数为 70 代时总成本的变化



(d)进化代数为 100 代时总成本的变化



(e)进化代数为 200 代时总成本的变化

图 5 GA 算法中总成本随迭代次数变化曲线

Fig. 5 The curve of total cost with iterations in GA algorithm

图 6 为 GA 算法总成本随进化代数变化。可以看出,当进化代数为 20 时,总成本在 1 200~1 300 元范围内较密集,但总体分布呈分散特点;当进化代数为 70 代时,收敛性提高,但在 1 010~1 015 元之外仍然有浮动;当进化代数增加至 100 时,总成本范围降低至 1 012~1 014 元,集中在 1 012.5 元附近,除小部分断点外,其余点可拟合成一条直线,收敛性较强;当进化代数为 200 代时,总成本不再浮动,稳定在 1 012.5 元。从总体上看,总成本在进化代数 50、70 代有持续降低趋势;至少在进化代数 70 代以后,收敛性趋于良好;进化代数 100 代时收敛性强。观察总成本随进化代数变化情况可知,进化代数在 50 代时出现拐点,从 100 代开始保持稳定。

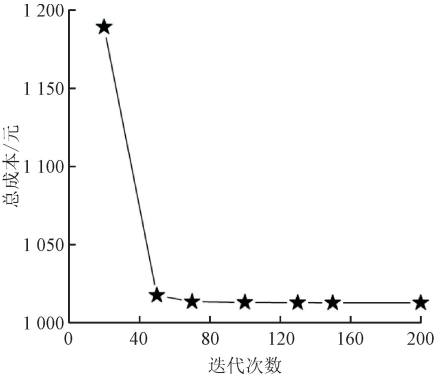


图 6 GA 算法总成本随进化代数变化

Fig. 6 Changes in cost with generations in GA algorithm

由表 4 可知,在目标函数逐渐收敛时,模型求解耗时相应增加。当进化代数为 100 代时,迭代次数为 8 020,耗时 805 s,相比 200 代在时间上减少了 50%;进化代数为 200 时的总成本为 1 012.464 6 元,100 代时的总成本为 1 012.723 5 元,两者之间偏差仅为 0.025 6%。综合考虑时效性与经济性,最终选择 GA 进化代数为 100。

表 4 选择不同进化代数时 GA 算法得到的总成本与耗时

Table 4 The cost and time consumption obtained from the GA algorithm when selecting different generations

进化代数	迭代次数	耗时/s	总成本/元
20	1 620	169	1 189.276 7
50	4 020	411	1 017.265 9
70	5 620	559	1 013.134 0
100	8 020	805	1 012.723 5
130	10 420	1 051	1 012.501 4
150	12 020	1 198	1 012.467 2
200	16 020	1 605	1 012.464 6

4. 3. 2 GA-SQP 算法中 GA 部分进化代数选择

由于在 GA 部分设置不同进化代数会导致

SQP 部分的初值不同,从而影响优化结果,因此选择合适的进化代数是十分必要的。

图 7 展示了 GA-SQP 算法中 GA 部分不同的进化代数对总成本的影响,以 0 时至 1 时为例。如图 7 所示,从进化代数 5 代开始,随着进化代数增加,迭代次数减小,即 SQP 部分的求解时间减少,总成本逐渐稳定在 890.653 元;进化代数设置为 6 代和 8 代时的迭代曲线重合,总成本均为 890.653 元。GA-SQP 算法总求解时间需要综合考虑 GA 运算和 SQP 运算两部分。在 GA 部分选择 1 代时,迭代次数达到 200 左右,为了保持图形美观,并未在图 7 中展示 1 代的迭代曲线。结合表 5,综合考虑时效性与经济性,最终将 GA-SQP 在 GA 部分的进化代数设置为 5。

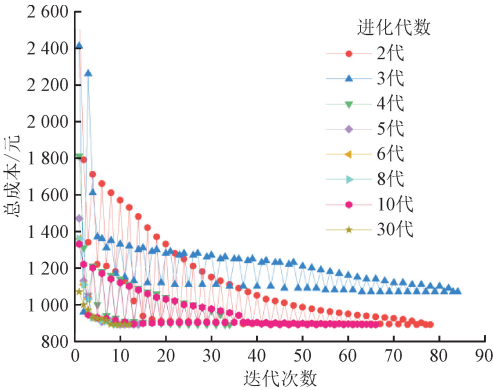


图 7 GA-SQP 算法中 GA 部分总成本随迭代次数的变化
Fig. 7 Changes of total cost with iterations in the GA part of GA-SQP algorithm

表 5 GA-SQP 算法中 GA 部分时间、成本随进化代数变化情况
Table 5 Changes in time and cost with generations in the GA part of GA-SQP algorithm

GA 代数	耗时/s	总成本/元
1	89	948.803 2
2	58	890.659 0
3	65	1 067.229 9
4	51	890.653 8
5	60	890.653 0
6	62	890.653 0
8	75	890.653 0
10	123	890.653 0
30	256	890.653 0

4.3.3 SQP 与 GA-SQP 求解用时比较

考虑到 GA 算法进化代数设置为 100 时耗时在 15 min 左右,远远超过 SQP、GA-SQP 算法的求解耗

时,故接下来仅比较后两者的求解耗时。SQP 算法耗时短,在 24 次优化中任意次优化时间都不超过 80 s。GA-SQP 算法的第一阶段利用 GA 算法的全局寻优能力确定搜索范围,大大提高了运算效率,在 24 次优化中任意次的优化时间都不超过 500 s,总体上,GA-SQP 算法的耗时仅为 GA 算法的 6.7%。图 8 展示了 SQP 算法与 GA-SQP 算法的优化时间,左侧纵轴对应的是 GA-SQP 算法求解耗时,数据用堆积图表示;右侧对应 SQP 算法求解耗时,用点线图表示。

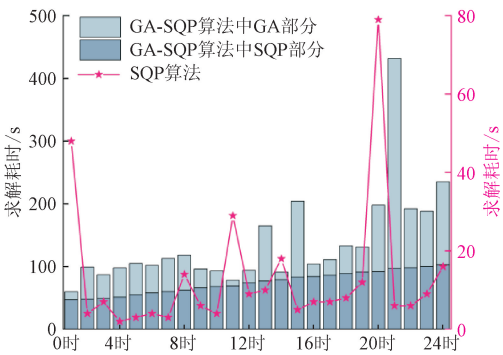


图 8 SQP 算法与 GA-SQP 算法优化时间示意图
Fig. 8 Schematic diagram of optimization time for SQP algorithm and GA-SQP algorithm

4.4 GA-SQP 算法调度结果分析

综合考虑经济性和求解效率可知,GA-SQP 算法比 GA 算法、SQP 算法更优。图 9 展示了 GA-SQP 算法的调度结果。

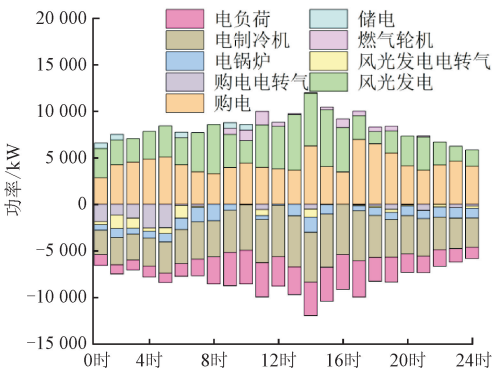
如图 9(a)所示,对于电负荷,购电与风光发电始终是供电的主要来源。8 时至 16 时电价处于高峰期,此时风光发电供电增多,燃气轮机辅助供电。电能除满足电负荷外,还需维持电制冷机设备运行。

如图 9(b)所示,对于冷负荷,电制冷机为主要供冷设备。电制冷机出力变化与冷负荷需求变化密切相关。冷负荷需求在 9 时至 19 时功率超过 4 000 kW,电制冷机随之显现出明显的高峰期。在 12 时、17 时、21 时储冷器充冷以存储多余冷能,并在需要的时候(如 14 时、19 时)向系统放冷。

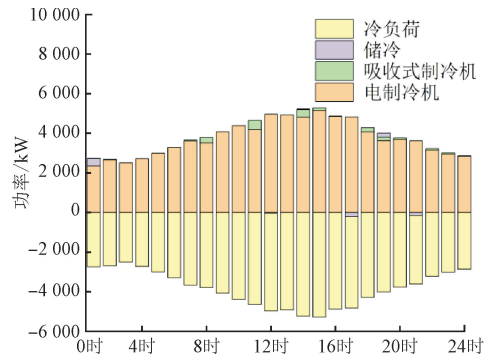
如图 9(c)所示,对于热负荷,电锅炉作为主要供热设备,燃气轮机辅助供热。燃气轮机供热集中在 9 时至 19 时,此时段天然气价格较低,通过燃气轮机将低价天然气转换为热能以满足热负荷需求,降低了购能成本。总体上看,由于吸收式制冷机发挥作用较小、耗热低,电锅炉与燃气轮机输出功率的总和与热负荷需求的变化存在较紧密的关系。

如图 9(d)所示,对于气负荷,外部购气为主要满足需求的来源,P2G 设备辅助供气。P2G 设备根

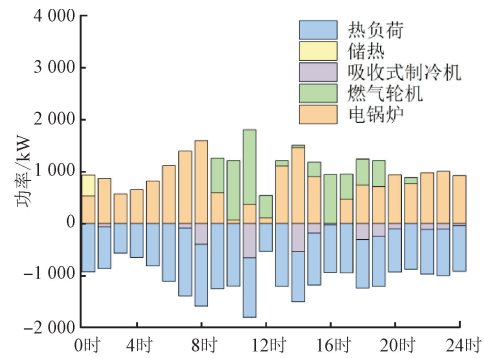
据能源价格合理分配清洁能源用于供电和供气的比例。在 8 时之后主要通过外部购气满足气负荷需求,在 21 时至 24 时的电价低谷期,P2G 设备利用电价优势将外部购电和风光发电的一部分用于满足气负荷。



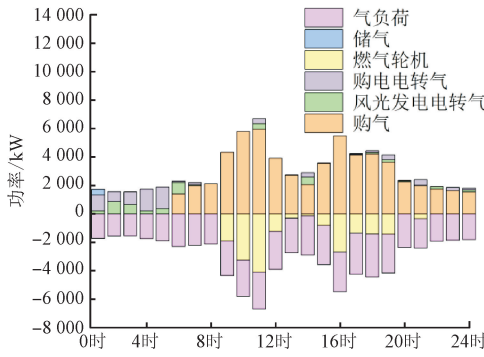
(a)电功率平衡



(b)冷功率平衡



(c)热功率平衡



(d)气功率平衡

图 9 基于 GA-SQP 算法的调度结果

Fig. 9 Scheduling result based on GA-SQP algorithm

综上,GA-SQP 算法在该模型中对价格敏感度高,能充分利用价格优势,很好发挥 P2G 设备作用;同时,储能器的存在增加了调度的灵活性。

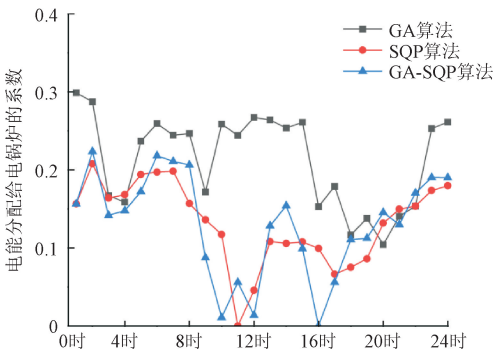
4.5 各分配系数分析

图 10 为不同算法的各分配系数变化情况。其中,与电能有关的系数有两个。按照综合能源系统结构,将电能分配给电锅炉视为电能分配第一阶段,将电能分配给电制冷机视为电能分配第二阶段。在电能分配第一阶段分配的电能比例均小于 30%,在第二阶段分配的电能大部分在 50%以上,少许时刻介于 45%~50%之间。

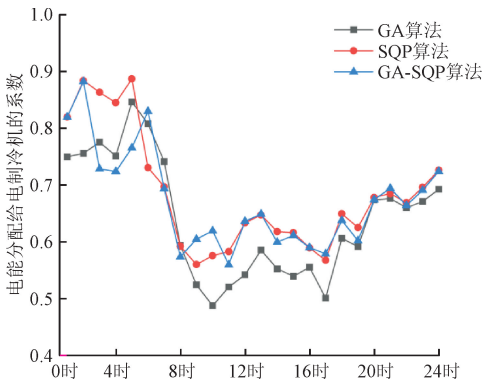
如图 10(a)、(b)所示,电能分配给电锅炉系数、电能分配给电制冷机系数大体变化趋势一致,二者在 8 时至 18 时的电价高峰期均有所降低,表示此时电能更多用来满足电负荷而较少转换为其他能源形式。在 GA 算法中,此情形在电能分配第二阶段较为明显;而在 GA-SQP 算法中,此情形在电能分配第一阶段较为明显。

如图 10(c)所示,天然气分配给燃气轮机系数变化在 3 种算法中表现出较大的差别,但总体上燃气轮机消耗天然气量小于 65%。在天然气价格低谷期时分配给燃气轮机的总量占比增加,表示此时利用天然气价格优势将更多能量经由燃气轮机转换为电能,尽量减少在电价高峰期的购电量。这种利用价格优势的特点在 GA-SQP 算法中表现最为突出。

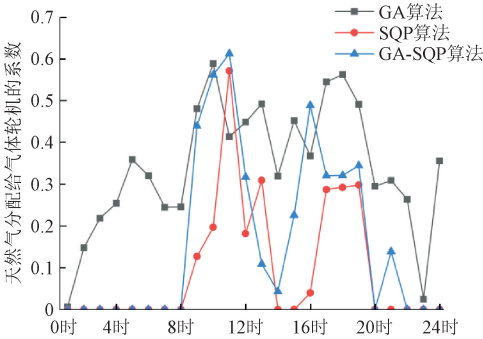
如图 10(d)所示,热能分配给吸收式制冷机系数变化在 3 种算法中依旧表现出较大的差别。在 SQP 算法中,热能分配给吸收式制冷机的量总体接近 0,是因为在此过程中电制冷机已经近乎能够满足所需冷负荷,故保留更多的热能用于满足热负荷。相比之下,GA 算法和 GA-SQP 算法中在能够满足热负荷的前提下,有能力将过剩的热能转化为冷能以满足冷负荷。



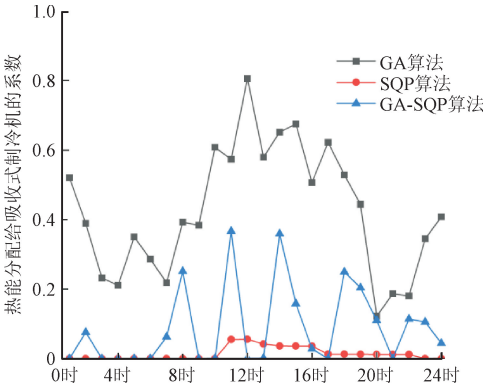
(a)电能分配给电锅炉的系数变化



(b)电能分配给电制冷机的系数变化



(c)天然气分配给燃气轮机的系数变化



(d)热能分配给吸收式制冷机的系数变化

图 10 不同算法分配系数的变化情况

Fig. 10 Changes in allocation coefficients of different algorithms

结上,各分配系数是在不同范围内动态变化着的,且变化结果与调度结果关系密切。分析比较 3 种算法,发现根据 GA-SQP 算法得到的分配系数变化更为合理。

5 结 论

(1)本文建立的“电气互联,冷热联供”模型能够有效消纳可再生能源出力,在价格低谷期充分发挥 P2G 的作用,协调外部购电、购气的比例,同时各储能器通过充、放能提高能源利用率和系统灵活性,最

终达到降低成本的效果。

(2)根据 GA、SQP、GA-SQP 这 3 种优化算法调度结果,从经济性和时效性考虑,3 种算法日前调度所花费成本分别为 96 886. 418 元、86 328. 798 元、85 721. 677 元,GA-SQP 算法相比 GA、SQP 算法在成本上降低了 11. 52%和 0. 70%,其计算耗时相比 GA 大幅降低,与 SQP 算法相比不依赖于初始解,在 3 种算法中兼具了经济性、时效性和稳定性,具有较好的优化效果。

参考文献:

[1] 中共中央国务院印发《国家标准化发展纲要》[J]. 中国标准化, 2021(21): 9-16.

The Central Committee of the Communist Party of China and the state council have issued the national standardization development outline [J]. China Standardization, 2021(21): 9-16.

[2] 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]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 163-172.

[3] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述 [J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2256-2269.

LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems [J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2269.

[4] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3636-3647.

[5] QIN Xin, SHEN Xinwei, SUN Hongbin, et al. A quasi-dynamic model and corresponding calculation method for integrated energy system with electricity and heat [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 6413-6418.

[6] SARTOR K, DEWALEF P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks [J]. Energy, 2017, 137: 961-968.

[7] 黄大为, 杜宇博, 蔡国伟, 等. 基于图论的复杂能源枢纽矩阵建模方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8563-8575.

HUANG Dawei, DU Yubo, CAI Guowei, et al. Matrix modeling method of complex energy hub based on graph theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42

- (23): 8563-8575.
- [8] 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): 16-23.
YANG Xiu, YANG Yunwei, ZHANG Meixia, et al. Coordinated dispatch of multi-energy network and energy hubs considering dynamic natural gas flow [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 16-23.
 - [9] 文云峰, 瞿小斌, 肖友强, 等. 耦合能量枢纽多区域电-气互联能源系统分布式协同优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 22-30.
WEN Yunfeng, QU Xiaobin, XIAO Youqiang, et al. Distributed coordinated optimal dispatch of multi-regional electricity-gas integrated energy systems with energy hubs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 22-30.
 - [10] 崔杨, 闫石, 仲悟之, 等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254-4263.
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254-4263.
 - [11] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微网电/热综合储能优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 46-54.
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 46-54.
 - [12] ZHANG Guangming, WANG Wei, CHEN Zhenyu, et al. Modeling and optimal dispatch of a carbon-cycle integrated energy system for low-carbon and economic operation [J]. Energy, 2022, 240: 122795.
 - [13] 张大海, 负温韵, 王小君, 等. 考虑广义储能及光热电站的电热气互联综合能源系统经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 33-42.
ZHANG Dahai, YUN Yunyun, WANG Xiaojun, et al. Economic dispatch of integrated electricity-heat-gas energy system considering generalized energy storage and concentrating solar power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 33-42.
 - [14] 汤翔鹰, 胡炎, 耿琪, 等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.
TANG Xiangying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.
 - [15] QIAO Zheng, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Multi-time period optimized configuration and scheduling of gas storage in gas-fired power plants [J]. Applied Energy, 2018, 226: 924-934.
 - [16] 刘向向, 卢婕, 严勤, 等. 考虑热惯性的居民楼宇综合能源系统日前运行优化 [J]. 可再生能源, 2020, 38(3): 409-415.
LIU Xiangxiang, LU Jie, YAN Qin, et al. Day-ahead optimal operation of residential building integrated energy system considering thermal inertia [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(3): 409-415.
 - [17] ABDOLMOHAMMADI H R, KAZEMI A. A benders decomposition approach for a combined heat and power economic dispatch [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 21-31.
 - [18] 王珏莹, 胡志坚, 谢仕炜. 计及交通流量调度的智慧综合能源系统规划 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7539-7554.
WANG Jueying, HU Zhijian, XIE Shiwei. Smart multi-energy system planning considering the traffic scheduling [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7539-7554.
 - [19] 周星球, 郑凌蔚, 杨兰, 等. 考虑多重不确定性的综合能源系统日前优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2466-2473.
ZHOU Xingqiu, ZHENG Lingwei, YANG Lan, et al. Day-ahead optimal dispatch of an integrated energy system considering multiple uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2466-2473.
 - [20] 林越峰, 蒋达, 杜文莉. 一种求解混合整数非线性规划问题的混合优化方法 [J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(12): 1447-1451.
LIN Yuefeng, JIANG Da, DU Wenli. A novel hybrid algorithm for solving mixed integer nonlinear programming problem [J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(12): 1447-1451.
 - [21] 权超, 董晓峰, 姜彤. 基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划 [J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2456-2466.
QUAN Chao, DONG Xiaofeng, JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2456-2466.
 - [22] 李宏仲, 房宇娇, 肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(9):

3130-3138.

LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3130-3138.

[23] ZHANG Zhenglin, ZHANG Huijuan, XIE Bo, et al. Energy scheduling optimization of the integrated energy system with ground source heat pumps [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 365: 132758.

[24] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电气互联综合能源系统削峰填谷研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4601-4609.

WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609.

[25] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.

[26] 禚宗衡, 荆朝霞, 叶文圣, 等. 考虑储能灵活能量状态的新型电能量市场机制 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3810-3820.

XUAN Zongheng, JING Zhaoxia, YE Wensheng, et al. New energy market mechanism considering flexible state of energy in energy storage [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3810-3820.

[27] 李佳颖, 陈炯, 张学友. 共享电动汽车的充放电协调控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 105-111.

LI Jiaying, CHEN Jiong, ZHANG Xueyou. Coordinated control of charging and discharging for EV-sharing [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 105-111.

[28] 连广宇, 孙增圻. 机械臂最优运动规划问题的混合求解 [J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 102-104, 107.

LIAN Guangyu, SUN Zengqi. Hybrid algorithm for optimal motion planning of robot arms [J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 102-104, 107.

[29] SAEED T, SABIR Z, SH ALHODALY M, et al. An advanced heuristic approach for a nonlinear mathematical based medical smoking model [J]. Results in Physics, 2022, 32: 105137.

[30] SABIR Z, GUIRAO J L G, SAEED T. Solving a novel designed second order nonlinear Lane-Emden delay differential model using the heuristic techniques [J]. Applied Soft Computing, 2021, 102: 107105.

(编辑 亢列梅)