

计及电动汽车接入的园区综合能源系统 低碳协调运行调度策略

高云 解超 张高航 曹猛 孙理想

(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要 随着电动汽车的普及,大规模电动汽车接入园区综合能源系统(PIES)成为提升能源利用率和减轻园区电网压力的重要途径。为实现低碳运行,本文提出一种电动汽车与高效用氢相结合的双层低碳优化运行策略。首先,基于时空特征相关性模拟电动汽车负荷进行无序充电,在此基础上利用实时电价引导电动汽车进行有序充电;然后,结合改进电转气(P2G)两阶段技术,同时PIES参与碳交易市场,引入阶梯碳交易机制,以系统购能成本、碳交易成本及弃风惩罚成本最低为目标,采用改进鲸鱼优化算法(IWOA)进行求解;最后,通过场景对比验证了本文所提双层低碳优化调度策略的经济性和环保性。

关键词: 电动汽车; 低碳运行; 有序充电; 改进电转气(P2G); 双层优化调度策略

Low-carbon optimized operation strategy of integrated energy system taking into account the participation of electric vehicles in an electric hydrogen production park

GAO Yun XIE Chao ZHANG Gaohang CAO Meng SUN Lixiang

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046)

Abstract Large-scale electric vehicles are connected to the park integrated energy system (PIES), in order to improve the energy utilization rate, reduce the pressure on the park's power grid, and realize low-carbon operation, this paper proposes a two-tier low-carbon optimized operation strategy that combines electric vehicles and efficient hydrogen use. Firstly, the disordered charging of the electric vehicles is simulated based on the spatio-temporal feature correlation, on the basis of which real-time tariffs are utilized to guide the electric vehicles for orderly charging. Combining the improved power-to-gas (P2G) two-phase technology, the park participates in the carbon trading market. The laddering carbon trading mechanism is introduced to minimize the system's cost of purchasing energy, the cost of carbon trading, and the cost of abandoning the wind as a target function. The improved whale optimization algorithm (IWOA) is adopted for solving the problem. Finally, the scenarios are compared to verify the economy and environmental benefits of the two-tier optimal scheduling strategy proposed in this paper.

Keywords: electric vehicles; low-carbon operation; orderly charging; improved power to gas (P2G); two-tier optimal scheduling strategy

0 引言

随着“双碳”目标的提出,大力发展可再生能源发电已成为一项长期且必须完成的任务^[1-2]。然而,由于风、光出力具有间歇性和波动性,以及受

用户用能行为不确定的影响,源侧和负荷侧功率不匹配导致弃风、弃光现象普遍存在。此外,随着电动汽车(electric vehicles, EV)的普及,越来越多电动汽车无序并入电网,对园区综合能源系统(park integrated energy system, PIES)的优化调度提出了新

的挑战^[3-5]。因此,如何合理调度高比例新能源和大规模电动汽车,科学分析不同因素产生的影响,以有效提高风光利用率、降低峰谷差、减少碳排放,已成为亟须解决的重点和关键问题。

目前,将电动汽车有序充电作为灵活性资源参与系统优化调度已有大量研究成果。文献[6]将电动汽车和新能源微电网作为不同的利益主体,利用改进的多目标粒子群算法进行分层优化,实现了运行成本与环境效益共赢。文献[7]以区域综合能源热电联产系统为背景,考虑电动汽车充电行为参与调度,可以有效降低运行成本。文献[8]构建了一种基于运营商-用户的双层模型,并以微电网内的电动汽车为研究对象,兼顾电网和EV利益,促进了新能源消纳、提高了经济效益。文献[9-10]提出动态分时电价引导EV有序充电,研究了基于电价引导的EV充电策略对综合能源系统(integrated energy system, IES)能量优化调度和运行成本的影响,结果表明该策略能有效降低IES负荷峰谷差,提高系统运行效益。随着氢能的出现,低碳可持续发展成为我国能源领域主要发展方向^[11-12]。有学者提出利用电转气(power-to-gas, P2G)装置将富余电能通过电解槽转化为氢能^[13]。文献[14-15]引入P2G装置,以系统成本最小为目标建立了IES低碳优化模型,但其研究对象仅考虑电气、电热,传统P2G处理过于简化,且环保效益考虑不够充分。文献[16]将P2G过程细化为两阶段,以电解槽、甲烷反应器、氢燃料电池替代传统P2G,考虑系统运行成本、环境成本等建立经济调度模型,实现了对能源的高效利用。文献[17]指出传统P2G中,电转天然气的能量转换效率仅为55%,而电转氢气的能量利用效率高达80%,且氢气的利用相较于天然气更加清洁。因此,深入研究P2G技术中提高氢气利用率的方法、探寻氢气的不同使用途径具有重大意义。上述文献研究了EV与IES的交互策略,但仅把EV作为单一调度资源且没有深入挖掘EV配合其他清洁能源调度的潜力,随着EV集群的出现,如何实现EV群有序优化调度的问题亟须解决。

通过上述分析可知,现有研究大多集中在对电动汽车进行单一调度,未将电动汽车与清洁技术相结合,同时未充分考虑碳交易市场的巨大降碳潜力。未来能源市场将是多能协同运行,因此深入研究上述三者协同运行对PIES的影响十分重要。

在上述研究的基础上,本文综合考虑EV充电不确定性和改进P2G技术,为进一步降低系统碳排放,以园区综合能源系统为调度主体,将EV作为直接调度资源,引入两阶段P2G和阶梯碳交易机制,实现园区综合能源系统内电、热、气的快速、低碳最优调度,深入研究多能协同运行策略对园区综合能源系统优化调度的影响,最后构建以综合成本最小为目标的经济低碳调度模型,通过设置不同场景,对比验证本文所提方法的有效性和合理性。

1 PIES 运行框架

本文所构建的计及电动汽车参与的电制氢园区综合能源系统运行框架如图1所示。系统主要包括风力发电系统(wind turbine, WT)、光伏发电系统(photovoltaic, PV)、储能(electricity storage, ES)系统、热电联产(combined heat and power, CHP)机组、燃气锅炉(gas boiler, GB)、改进P2G两阶段电制氢系统,以及园区内电、热、气、氢多种负荷。其中,储能系统包含电、热、气、氢多种储能装置。改进P2G两阶段电制氢系统在传统电解槽(electrolyzer, EL)的基础上,引入甲烷反应器(methane reactor, MR)、燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)和储氢罐,系统内进行实时信息交互,实现功率动态平衡。

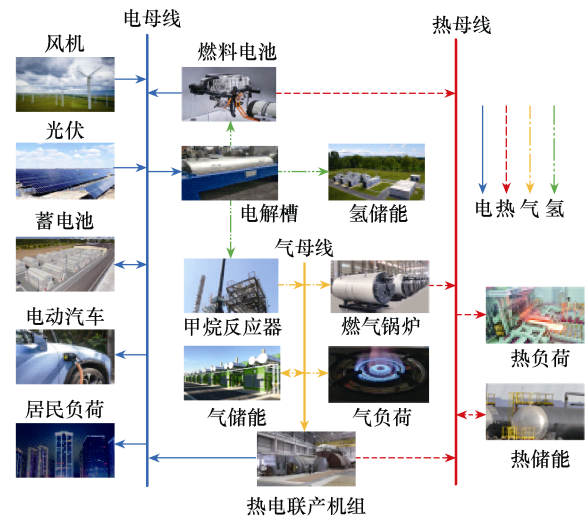


图1 计及电动汽车参与的电制氢园区综合能源系统运行框架

1.1 热电联产机组模型

热电联产机组是通过燃烧天然气得到电能,并对余热进行回收,为热负荷提供能量,其运行模型及相关约束条件为

$$\begin{cases} P_{\text{CHP},e}(t) = \eta_{\text{CHP},e} P_{\text{CHP},g}(t) \\ P_{\text{CHP},h}(t) = \eta_{\text{CHP},h} P_{\text{CHP},g}(t) \\ P_{\text{CHP},g}^{\min}(t) \leq P_{\text{CHP},g}(t) \leq P_{\text{CHP},g}^{\max}(t) \\ \Delta P_{\text{CHP},g}^{\min}(t) \leq P_{\text{CHP},g}(t+1) - P_{\text{CHP},g}(t) \leq \Delta P_{\text{CHP},g}^{\max}(t) \\ \kappa_{\text{CHP}}^{\min} \leq \frac{P_{\text{CHP},h}(t)}{P_{\text{CHP},e}(t)} \leq \kappa_{\text{CHP}}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{\text{CHP},e}(t)$ 、 $P_{\text{CHP},h}(t)$ 分别为 t 时刻 CHP 机组产电、制热的功率； $\eta_{\text{CHP},e}$ 、 $\eta_{\text{CHP},h}$ 分别为 CHP 机组产电、制热效率； $P_{\text{CHP},g}(t)$ 为 t 时刻 CHP 机组消耗的天然气功率； $P_{\text{CHP},g}^{\max}(t)$ 、 $P_{\text{CHP},g}^{\min}(t)$ 分别为 CHP 机组消耗的天然气功率上限、下限； $\Delta P_{\text{CHP},g}^{\max}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{CHP},g}^{\min}(t)$ 分别为 CHP 机组爬坡功率上限、下限； $\kappa_{\text{CHP}}^{\max}$ 、 $\kappa_{\text{CHP}}^{\min}$ 分别为 CHP 机组热电比上限、下限。

1.2 改进 P2G 两阶段运行模型

传统的 P2G 设备可将多余电能转化成氢气或者经过氢气甲烷化设备处理生成甲烷进行利用或存储。改进 P2G 运行模型在此基础上增加了对新能源的利用。改进 P2G 两阶段运行过程如图 2 所示。

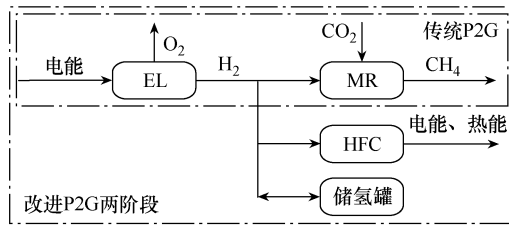


图 2 改进 P2G 两阶段运行过程

电解槽装置能够将多余电量用于电解水得到氢气，其运行模型及相关约束条件为

$$\begin{cases} P_{\text{EL},\text{H}_2}(t) = \eta_{\text{EL}} P_{\text{EL},e}(t) \\ P_{\text{EL},e}^{\min} \leq P_{\text{EL},e}(t) \leq P_{\text{EL},e}^{\max} \\ \Delta P_{\text{EL},e}^{\min} \leq P_{\text{EL},e}(t+1) - P_{\text{EL},e}(t) \leq \Delta P_{\text{EL},e}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{\text{EL},\text{H}_2}(t)$ 为 t 时刻输出氢能； $P_{\text{EL},e}(t)$ 为 t 时刻 EL 输入的电能； η_{EL} 为 EL 的能量转换效率； $P_{\text{EL},e}^{\max}$ 、 $P_{\text{EL},e}^{\min}$ 分别为 EL 输入电能上、下限； $\Delta P_{\text{EL},e}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{EL},e}^{\min}$ 分别为 EL 的爬坡功率上、下限。

氢气甲烷化设备将氢气结合 CO_2 生成天然气，由此提供给气负荷，其运行模型及相关约束条件为

$$\begin{cases} P_{\text{MR},g}(t) = \eta_{\text{MR}} P_{\text{MR},\text{H}_2}(t) \\ P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\min} \leq P_{\text{MR},\text{H}_2}(t) \leq P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\max} \\ \Delta P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\min} \leq P_{\text{MR},\text{H}_2}(t+1) - P_{\text{MR},\text{H}_2}(t) \leq \Delta P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{\text{MR},g}(t)$ 为 t 时刻输出的天然气功率； η_{MR} 为 MR 吸收二氧化碳转化为甲烷的效率； $P_{\text{MR},\text{H}_2}(t)$ 为 t 时刻输入 MR 氢能功率； $P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\max}$ 、 $P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\min}$ 分别为输入 MR 的氢能功率上、下限； $\Delta P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{MR},\text{H}_2}^{\min}$ 分别为 MR 的爬坡功率上、下限。

燃料电池能够在电、热、气能之间进行高效且无污染的转化，在电、热负荷出现供能不足时能迅速产电产热，保障园区综合能源系统的安全稳定运行，其运行模型及相关约束条件为

$$\begin{cases} P_{\text{HFC},e}(t) = \eta_{\text{HFC},e} P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t) \\ P_{\text{HFC},h}(t) = \eta_{\text{HFC},h} P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t) \\ P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\min} \leq P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t) \leq P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\max} \\ \Delta P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\min}(t) \leq P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t+1) - P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t) \leq \Delta P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\max}(t) \\ \kappa_{\text{HFC}}^{\min} \leq \frac{P_{\text{HFC},h}(t)}{P_{\text{HFC},e}(t)} \leq \kappa_{\text{HFC}}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $P_{\text{HFC},e}(t)$ 、 $P_{\text{HFC},h}(t)$ 为 t 时刻 HFC 输出的电、热能； $P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t)$ 为 t 时刻输入 HFC 的氢能功率； $\eta_{\text{HFC},e}$ 、 $\eta_{\text{HFC},h}$ 分别为 HFC 中氢能转化为电、热的效率； $P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\max}$ 、 $P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\min}$ 分别为输入 HFC 的氢能功率上、下限； $\Delta P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\max}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{HFC},\text{H}_2}^{\min}(t)$ 分别为 HFC 的爬坡功率上、下限； $\kappa_{\text{HFC}}^{\max}$ 、 $\kappa_{\text{HFC}}^{\min}$ 分别为 HFC 的热电比上、下限。

2 基于出行特性的电动汽车负荷建模

2.1 时空特性变量数据分析

电动汽车用户交通随机性强，没有相对固定的出行规律。根据美国交通部公布数据建立负荷预测模型可分为 4 类：居民区 (A_1)、工作区 (A_2)、商业区 (A_3) 和其他区域 (A_4)。利用大数据分析，分析总结电动汽车出行目的、出行时间等。本文所用数据来源于 2017 年美国交通部公布的美国家用车辆调查结果^[18]。

为描述 EV 行驶目的，EV 用户在不同区域去往不同目的地的概率不同，本文将 1 天 24h 以 2h 为间隔分为 12 个时段， P_k 为在第 k 个时段内的空间转移概率，矩阵元素 P_{ij} 为从当前地点 A_i 到下一目的地 A_j 的转移概率。根据历史数据可以得到 EV 出行 12 个时段的空间转移概率矩阵 \mathbf{P} 。 \mathbf{P}_7 为一天中 12:00—14:00 的空间转移概率矩阵，如式 (5) 所示。

$$P_7 = \begin{bmatrix} 0.166 & 0.172 & 0.53 & 0.132 \\ 0.292 & 0.266 & 0.39 & 0.053 \\ 0.385 & 0.17 & 0.404 & 0.041 \\ 0.432 & 0.108 & 0.334 & 0.127 \end{bmatrix} \quad (5)$$

EV 首次出行时间地点可以是任意区域,根据数据拟合结果,其首次出行时间符合多维正态分布,即

$$f(t_f) = \sum_{i=1}^n \alpha_i N(\mu_i, \sigma_i) \quad (6)$$

式中: t_f 为首次出行时刻; $f(t_f)$ 为首次出行时间概率密度函数; n 为多维正态分布的维数; α_i 为各个标准

正态分布在多维正态分布中所占的比例, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

$N(\mu_i, \sigma_i)$ 为标准正态分布函数, μ_i 为其期望, σ_i 为其标准差。二阶高斯分布概率密度参数见表 1。

表 1 二阶高斯分布概率密度参数

阶数	参数	
一阶	α_1	0.34
	μ_1	7.46
	σ_1	0.77
二阶	α_2	0.66
	μ_2	9.20
	σ_2	2.75

EV 的行驶时间与起始点有关,且符合对数正态分布, EV 的行驶时间概率密度函数为

$$f(t_d) = \frac{1}{t_d \sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2} \right] \quad (7)$$

式中: t_d 为行驶时长; μ_d 、 σ_d 分别为相对应起讫点的期望和标准差,其值如式(8)所示。

$$\begin{cases} \mu_d \in \{2.80, 2.89, 2.51, 2.61\} \\ \sigma_d \in \{1.13, 0.81, 0.80, 0.93\} \end{cases} \quad (8)$$

电动汽车在四类区域的停车时长有所差异,按停车地点的不同,对数据进行拟合,停车时长概率密度函数为

$$f(t_p) = \frac{1}{t_p \sigma_p \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln t_p - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2} \right] \quad (9)$$

式中: t_p 为停车时长; σ_p 、 μ_p 分别为对应地点停车时长的标准差和期望。停车时长对数分布参数见表 2。

表 2 停车时长对数分布参数

区域	A_1	A_2	A_3	A_4
σ_p	1.18	1.15	1.00	1.39
μ_p	4.34	6.20	3.12	3.70

行驶里程满足于行驶时间的条件概率正态分布,电动汽车可看作匀速行驶,通过行驶时长与其行驶平均速度即可得到行驶里程。

$$S = v(t_d)t_d \quad (10)$$

式中: S 为行驶里程; $v(t_d)$ 为行驶速度,在该行程中一直被认定为一个常数。

2.2 充电行为分析

现阶段国内的电动汽车通常使用锂电池,可将其充电过程看成恒功率充电^[19]。根据大数据显示,超过 70% 的车主为了延长电池使用寿命更倾向于一日一充的充电模式。一般车主会基于当前电池状态来判断是否需要充电,若电池电量不足以支撑到下一目的地则需要当前位置进行充电,另为确保安全还需考虑 30% 的剩余电量。本文假设电动汽车行驶到目的地 A_D 时的充电条件为

$$S_D E - h d_{D+1} < 0.3E \quad (11)$$

式中: S_D 为到目的地 A_D 时的荷电状态; E 为电池容量(kW·h); h 为 EV 每公里耗电量(kW·h/km); d_{D+1} 为车辆行驶至下一目的地的行驶距离。

对于 H 和 W 区域充电的用户,由于用户停放时间长,利用分时电价策略对用户充电起始时间进行调整,在满足用户充电需求的同时可以降低峰谷差,减少用户充电成本。对于 B 和 O 区域充电的用户,一般为无计划性的紧急充电,对充电时间短的需求高,因此利用到即充策略来满足用户需求。在上述两种方式下,当车主结束第 D 次行程到目的地 A_{D+1} 充电时,会对电池进行电量判断,若满足式(12)则采用慢充,若不满足则选择快充。

$$ES_D - h d_D + P_c t_c \geq 0.2E \quad (12)$$

式中: P_c 为慢充功率; t_c 为充电时长。充电结束后,第 $D+1$ 次行程的荷电状态为

$$S_{D+1} = \frac{S_D E - h d_{D+1} + P t_c}{E \eta} \quad (13)$$

式中: η 为充电效率; P 为快充或慢充功率。

本文设置 EV 的仿真参数见表 3。

表 3 EV 仿真参数

参数	数值
电动汽车数量	200
电池容量/(kW·h)	30
充电效率	0.9
百公里耗电量/(kW·h)	15
慢充功率/kW	7
快充功率/kW	20
行驶速度/(km/h)	60

基于上述理论，可采集到各分区内每辆 EV 的充电时长和充电功率，接着将各分区的 EV 负荷进行累加得到每个区域内各个时间段总的 EV 负荷信息。充电需求计算流程如图 3 所示。

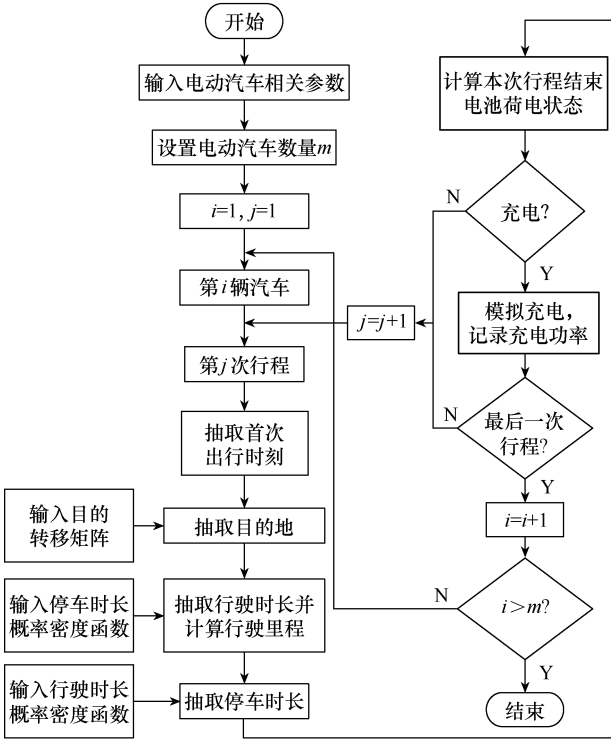


图 3 充电需求计算流程

3 计及 EV 有序充电的 PIES 双层优化调度模型

3.1 双层调度策略

在电、热、气、氢多能耦合的园区综合能源系统实际运行中，为满足 PIES 各功率的实时产销平衡，系统需综合考虑各种因素的影响，制定出最优调度计划，然而，受新能源出力随机性及多能负荷功率不确定性等因素的影响，系统在实时调度时面临巨大挑战。为减少新能源出力及电动汽车负荷充

电随机性的影响，建立如图 4 所示的新能源和电动汽车相互配合接入 PIES 的双层优化调度模型。

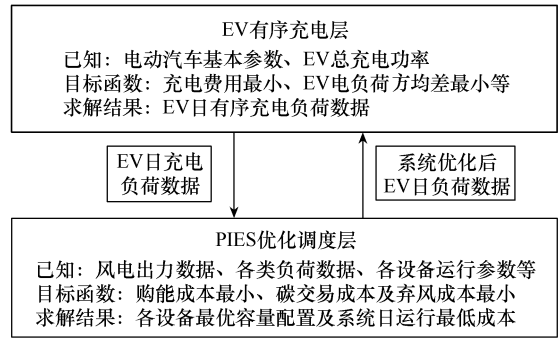


图 4 双层优化调度模型

双层优化调度模型分为两层，上层为 EV 有序充电层，以实时电价为引导，在不影响车主出行的情况下对各个区域、不同时间段的 EV 负荷进行转移，实现 EV 车群的有序充电，同时将上层得到的 EV 负荷数据传入 PIES 优化调度层，通过输入已有数据，结合下层各机组出力情况，综合考虑负荷不确定性，以系统综合成本最小为目标进行容量配置问题的求解。

3.2 上层 EV 有序充电层

1) 目标函数

(1) 电网负荷方均差最小

$$\min f_1 = \frac{1}{\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^m P_{ti} + P_{Bt} - P_{av} \right)^2} \quad (14)$$

$$P_{av} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{Bt}}{T} \quad (15)$$

式中： P_{ti} 为第 i 辆 EV 在 t 时段的充电功率； P_{Bt} 为园区在 t 时段的基础电负荷； P_{av} 为一天 24h 内用电负荷的平均值； m 为 EV 的总数量； T 为一天小时数， $T=24$ 。

(2) 电网负荷均峰比最大

$$P_{\max} = \max \{ P_{ti} + P_{Bt} \} \quad (16)$$

$$P_{ave} = \text{average} \{ P_{ti} + P_{Bt} \} \quad (17)$$

$$\max f_2 = \frac{P_{ave}}{P_{\max}} \quad (18)$$

式中： P_{\max} 为一天中电网的最高负荷； P_{ave} 为一天中电网的平均负荷。

(3) EV 充电费用最低 ($T=96$, 1h 分为 4 段)

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m P_{ti} C_t X_{ti} \Delta t \quad (19)$$

式中: C_t 为 t 时段的电价; Δt 为时段时长; X_{ti} 为 0-1 变量, $X_{ti}=1$ 表示第 i 辆车在第 t 时段处于充电状态, $X_{ti}=0$ 表示第 i 辆车在第 t 时段处于未充电状态。

考虑 EV 充电对 PIES 的影响, 综合考虑多种因素, 得到总目标函数为

$$F = \lambda_1 f_1 - \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \quad (20)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为各个目标函数的加权系数, 并且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$, 取 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1/3$ 。

2) 约束条件

(1) 充电负荷约束

$$P_{ti} + P_{Bt} \leq P_{t-\max} \quad (21)$$

式中, $P_{t-\max}$ 为某小区配电网能承受的功率上限。

(2) EV 电池容量约束

$$10\% \leq S_{\text{end}} \leq 95\% \quad (22)$$

式中, S_{end} 为充电结束后电池荷电状态。

(3) 充电时长约束

$$T_1 \leq T_s + \frac{B(S_{\text{end}} - S_{\text{start}})}{\eta P} \quad (23)$$

式中: T_s 、 T_1 分别为充电开始时刻和结束时刻; S_{start} 为充电开始时电池荷电状态; B 为一小时分钟数, $B=60$ 。

3.3 下层 PIES 优化调度层

1) 目标函数

本文目标包括系统总成本最小及新能源消纳率最高, 其经济性目标函数为

$$\min F_1 = C_{\text{buy}} + C_{\text{CO}_2} + C_{\text{waste}} \quad (24)$$

式中: C_{buy} 为购能成本; C_{CO_2} 为阶梯碳交易成本; C_{waste} 为弃风惩罚成本。

(1) 购能成本

$$C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T (\alpha_t^e P_{\text{buy},e} + \beta_t P_{\text{buy},g}) \quad (25)$$

式中: α_t^e 为 t 时刻电网电价; β_t 为 t 时刻天然气售价; $P_{\text{buy},e}$ 为从上级电网购买电量; $P_{\text{buy},g}$ 为从上级气网购买天然气量。

(2) 阶梯碳交易成本

$$E_{\text{IES}} = E_{\text{IES,pai}} - E_{\text{IES,pei}} \quad (26)$$

式中: E_{IES} 为综合能源系统实际碳排放量; $E_{\text{IES,pai}}$ 为系统在调度过程中的实际碳排放量; $E_{\text{IES,pei}}$ 为系统获得的碳交易配额。具体 IES 实际配额和实际碳排放量在此不再赘述, 参考附录 A。由此可求得阶梯碳交易成本为

$$C_{\text{CO}_2} =$$

$$\begin{cases} \lambda E_{\text{IES}} & E_{\text{IES}} \leq l \\ \lambda(1 + \alpha_{\text{CO}_2})(E_{\text{IES}} - l) + \lambda l & l < E_{\text{IES}} \leq 2l \\ \lambda(1 + 2\alpha_{\text{CO}_2})(E_{\text{IES}} - 2l) + \lambda(2 + \alpha_{\text{CO}_2})l & 2l < E_{\text{IES}} \leq 3l \\ \lambda(1 + 3\alpha_{\text{CO}_2})(E_{\text{IES}} - 3l) + \lambda(3 + 3\alpha_{\text{CO}_2})l & 3l < E_{\text{IES}} \leq 4l \\ \lambda(1 + 4\alpha_{\text{CO}_2})(E_{\text{IES}} - 4l) + \lambda(4 + 6\alpha_{\text{CO}_2})l & 4l < E_{\text{IES}} \leq 5l \\ \lambda(1 + 5\alpha_{\text{CO}_2})(E_{\text{IES}} - 5l) + \lambda(5 + 10\alpha_{\text{CO}_2})l & 5l < E_{\text{IES}} \end{cases} \quad (27)$$

式中: λ 为系统碳交易基价, $\lambda=250$ 元/t; α_{CO_2} 为碳交易价格增长率, $\alpha_{\text{CO}_2}=0.25$; l 为碳排放量区间长度, $l=2t^{[20]}$ 。

(3) 弃风惩罚成本

$$C_{\text{waste}} = K_{\text{waste}} \sum_{t=1}^T P_{\text{waste}}(t) \quad (28)$$

式中: K_{waste} 为能量浪费惩罚系数; $P_{\text{waste}}(t)$ 为 t 时段可再生能源过剩功率。

2) 约束条件

(1) 电功率平衡约束

本文不考虑向上级电网出售电能。

$$P_{\text{buy},e}(t) = P_{\text{E},e}(t) + P_{\text{EL},e}(t) + P_{\text{ES},e}(t) - P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{CHP},e}(t) - P_{\text{HFC},e}(t) \quad (29)$$

式中: $P_{\text{E},e}(t)$ 为电负荷功率; $P_{\text{ES},e}(t)$ 为电储能功率; $P_{\text{DG}}(t)$ 为风机实际出力。

(2) 热功率平衡约束

$$P_{\text{HFC},h}(t) + P_{\text{CHP},h}(t) + P_{\text{GB},h}(t) = P_{\text{E},h}(t) + P_{\text{ES},h}(t) \quad (30)$$

式中: $P_{\text{GB},h}(t)$ 为燃气锅炉发热功率; $P_{\text{E},h}(t)$ 为热负荷功率; $P_{\text{ES},h}(t)$ 为热储能功率。

(3) 天然气平衡约束

本文不考虑向上级气网出售天然气。

$$P_{\text{buy},g}(t) = P_{\text{load},g}(t) + P_{\text{ES},g}(t) + P_{\text{CHP},g}(t) + P_{\text{GB},g}(t) - P_{\text{MR},g}(t) \quad (31)$$

式中: $P_{\text{load},g}(t)$ 为气负荷功率; $P_{\text{ES},g}(t)$ 为气储能功率; $P_{\text{GB},g}(t)$ 为燃气锅炉耗气功率。

(4) 氢平衡约束

$$P_{\text{EL},\text{H}_2}(t) = P_{\text{MR},\text{H}_2}(t) + P_{\text{HFC},\text{H}_2}(t) + P_{\text{ES},\text{H}_2}(t) \quad (32)$$

式中, $P_{\text{ES},\text{H}_2}(t)$ 为氢储能功率。

(5) 风电出力约束

$$0 \leq P_{\text{DG}}(t) \leq P_{\text{DG}}^{\text{max}} \quad (33)$$

式中, $P_{\text{DG}}^{\text{max}}$ 为风机最大出力功率。

(6) CHP、EL、MR、HFC 运行约束如前文式 (1) ~ 式 (4) 所示。

(7) 储能运行约束 (电热气储能设备) 电、热、气、氢储能等效统一建模。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ES},x}^{\text{c}}(t) \leq \zeta_{\text{ES},x}^{\text{c}} P_{\text{ES},x}^{\text{max}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{ES},x}^{\text{d}}(t) \leq \zeta_{\text{ES},x}^{\text{d}} P_{\text{ES},x}^{\text{max}}(t) \\ P_{\text{ES},x}(t) = P_{\text{ES},x}^{\text{c}}(t) \eta_{\text{ES},x}^{\text{c}} - \frac{P_{\text{ES},x}^{\text{d}}(t)}{\eta_{\text{ES},x}^{\text{d}}} \\ S_x(t) = S_x(t-1) + \frac{P_{\text{ES},x}(t)}{P_{\text{ES},x}^{\text{cap}}} \\ S_x(1) = S_x(T) \\ 0 \leq \zeta_{\text{ES},x}^{\text{c}} + \zeta_{\text{ES},x}^{\text{d}} \leq 1 \\ S_x^{\text{min}}(t) \leq S_x(t) \leq S_x^{\text{max}}(t) \end{cases} \quad (34)$$

式中: $P_{\text{ES},x}^{\text{c}}(t)$ 、 $P_{\text{ES},x}^{\text{d}}(t)$ 分别为第 x 种储能在 t 时段的充、放电功率; $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{c}}$ 、 $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{d}}$ 均为 0-1 变量, 用于表示储能装置的充、放电状态, $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{c}} = 1$ 、 $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{d}} = 0$ 表示储能充电状态, $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{c}} = 0$ 、 $\zeta_{\text{ES},x}^{\text{d}} = 1$ 表示储能放电状态; $P_{\text{ES},x}^{\text{max}}(t)$ 为第 x 种储能单次充、放电的最大功率; $P_{\text{ES},x}(t)$ 为不同类型储能 t 时刻的输出功率; $\eta_{\text{ES},x}^{\text{c}}$ 、 $\eta_{\text{ES},x}^{\text{d}}$ 分别为不同类型储能的充、放电效率; $P_{\text{ES},x}^{\text{cap}}$ 为不同类型储能装置的额定容量; $S_x(t)$ 为不同类型储能装置的容量; $S_x^{\text{max}}(t)$ 、 $S_x^{\text{min}}(t)$ 分别为不同类型储能装置的容量上、下限。

3.4 求解算法

本文采用改进鲸鱼优化算法 (improved whale optimization algorithm, IWOA) 进行求解。传统鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 在

捕猎过程中的捕猎速度往往会受到限制, 导致收敛速度下降、迭代过程易陷入局部最优等情况, 而且传统鲸鱼算法在初始化种群时采用概率分布的方式生成随机解, 得到的初始种群分布并不均匀, 导致出现相对密集的情况, 进而影响收敛速度。因此, 针对以上缺陷, 在传统 WOA 的基础上, 改进种群初始化及更新迭代部分, 以提高算法面对大量数据预测时的优化速度, 并提高搜索精度。具体 IWOA 流程见附录 B。

4 算例分析

4.1 算例基础参数

为验证本文所提考虑 EV 有序充电参与电解氢园区低碳运行策略的可行性, 设置算例进行仿真。园区系统运行周期为 24h, 取 1h 为时间步长, 园区系统的风机出力、电、热、气负荷数据如图 5 所示, 本文向上级所购电能均来源于火电机组, 所消耗的碳排放配额为 0.798kg/(kW·h), 燃气机组所消耗的碳排放配额为 0.386kg/(kW·h), 天然气价格为 0.35 元/(kW·h)。单位弃风惩罚成本为 0.2 元/(kW·h)。各储能设备参数、各设备参数及分时电价分别见表 4、表 5 和表 6。

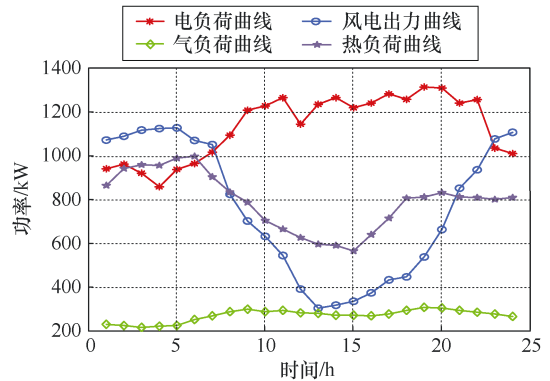


图 5 风机出力、电、热、气负荷数据

表 4 各储能设备参数

设备	容量/kW	容量上限/%	容量下限/%	爬坡速率/%
电储	800	10	90	20
热	600	10	90	20
气	400	10	90	20
氢	300	10	90	20

4.2 有序充电策略分析

1) EV 有序充电策略成本分析

为验证本文所提 EV 有序充电方式对系统经济性的影响、降低负荷峰谷差并增加风电消纳, 设置

表 5 各设备参数

设备	容量/kW	能量转化效率/%	爬坡速率/%
CHP	600	92	20
GB	700	95	20
MR	300	60	20
HFC	200	95	20
EL	500	87	20

表 6 分时电价

时段		价格/[元/(kW·h)]
峰时	11:00—14:00	1.218
	18:00—23:00	
平时	07:00—11:00	0.779
	14:00—18:00	
谷时	00:00—07:00	0.339
	23:00—24:00	

EV 有序充电和无序充电两种场景。场景 1 为 EV 无序充电，场景 2 为 EV 有序充电。两种场景下的系统运行成本及各项指标见表 7。

表 7 两种场景下的系统运行成本及各项指标

参数	场景 1	场景 2
系统总成本/元	10 685.21	10 176.79
购能成本/元	7 795.82	7 516.08
碳交易成本/元	2 837.33	2 637.07
弃风成本/元	48.06	23.64
EV 充电成本/元	1 494.03	1 167.46
负荷方均差	0.034 35	0.004 69
负荷均峰比	0.817 24	0.850 95

由表 7 可知，引入 EV 有序充电后，从经济性上看，与场景 1 相比，场景 2 的 EV 充电成本明显下降，下降了 326.57 元，且系统运行的总成本也有明显下降；从对系统的影响上看，引入 EV 有序充电后，负荷方均差明显减小，而负荷均峰比明显增大，说明园区内负荷峰谷差减小；从对新能源的消纳上看，EV 有序充电能够有效提高对新能源的消纳，有利于更好地建设低碳综合能源系统。

引入 EV 有序充电前后电负荷对比如图 6 所示。结合图 6 与表 7 进行分析可知，在凌晨时段，风电大发，而电负荷处于低谷期，且电价较低，此时 EV 负荷相较于无序充电时明显上升，能够促进对风电的利用，同时尽可能地将富余电能通过电解储存起

来，减少弃风现象发生；在负荷高峰期，通过平移充电时段，EV 负荷明显下降，EV 车群的有序充电策略能够减少园区从电网购电，降低用户成本及系统运行成本。由此可见，EV 车群有序充电能够有效抑制负荷的峰谷波动，同时能提升新能源的利用率。

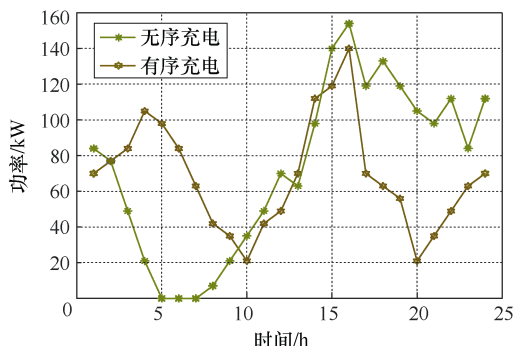


图 6 引入 EV 有序充电前后电负荷对比

电功率平衡图如图 7 所示，优化前后电负荷对比如图 8 所示。结合图 7 和图 8 可以看出，在考虑电动汽车有序充电后，园区负荷更趋于平坦，峰谷差有所下降。在 01:00—06:00 时段，风电富余，将 EV 充电负荷尽可能集中于此时段，可以达到最大限度消纳新能源的目的；而在 18:00—22:00 时段，园区电负荷应尽可能降低，以缓解园区用电压力，减少高峰期的购电量，提升调度经济性。园区系统其他功率平衡图见附录 C。

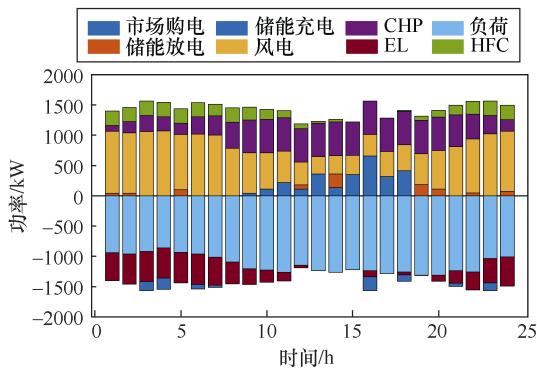


图 7 电功率平衡图

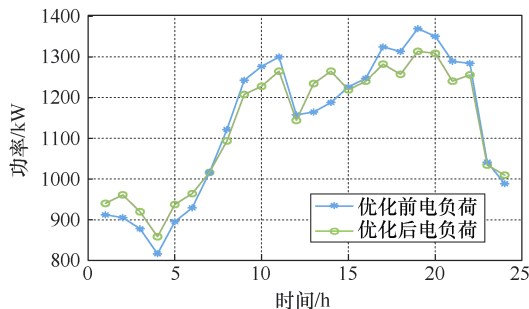


图 8 优化前后电负荷对比

2) 敏感性分析

不同数量 EV 参与有序充电前后对比见表 8。

表 8 不同数量 EV 参与有序充电前后对比

数量	参与前充电成本/元	参与后充电成本/元	负荷方均差	负荷均峰比
200	1 494.03	1 167.46	0.004 692	0.850 95
400	2 773.76	2 283.48	0.002 751	0.851 71
600	4 446.83	3 729.36	0.001 224	0.854 64
800	5 595.40	4 630.72	0.001 134	0.855 15

由表 8 数据可以看出, EV 车主参与有序充电前的充电成本高于参与有序充电后的充电成本, 随着 EV 数量的增加, 系统的负荷方均差减小, 说明园区内负荷曲线整体更趋于平坦, 峰谷差更小; 同时, 负荷均峰比增大, 反映出越来越多的 EV 参与有序充电, 有利于保证园区系统的供电稳定性, EV 负荷与整体负荷紧密协调, 各个机组之间可以实现以较高的效率协调运行, 进而实现多能互补。

4.3 细化 P2G 效益分析

为验证 PIES 加入改进 P2G 两阶段技术后系统运行的经济性, 设置以下两种场景进行对比分析。场景 3 为考虑传统 P2G 的 PIES, 场景 4 为考虑改进 P2G 两阶段技术的 PIES。考虑改进 P2G 两阶段技术前后效益对比见表 9。从表 9 可以看出, 场景 4 的系统运行总成本低于场景 3, 降低了 871.51 元, 同时碳排放成本显著下降。可见, 细化 P2G 两阶段运行能够有效降低系统运行总成本, 减少碳排放, 并增加新能源的利用率, 减少弃风现象。

表 9 考虑改进 P2G 两阶段技术前后效益对比

参数	场景 3	场景 4
系统总成本/元	11 048.30	10 176.79
购能成本/元	7 652.39	7 516.08
碳交易成本/元	3 352.40	2 637.07
弃风成本/元	43.51	23.64

由表 9 可知, 场景 3 中, P2G 能够在风力富余时段将多余的电能制成氢气, 再由氢气吸收 CO₂ 转换为天然气, 提供给热、气负荷, 从而极大地实现风能的就地消纳, 减少从电网、气网购能的成本; 在场景 4 中, 引入改进 P2G 两阶段运行设备后, 系统的总成本、购能成本及碳交易成本均有明显下降, 同时 PIES 的新能源消纳率也得到了提升。这主要是因为引入 EL、HFC 和 MR 组合运行机组, 由富余

电能电解得到的氢气会先提供给 HFC, HFC 高效率的产电、制热能力减少了能源转换过程中的损耗, 提高了能源利用率, 而剩余部分的氢能经过 MR 转化成天然气进行热电联产供能, 虽然 MR 能够吸收部分 CO₂ 将氢能转化成天然气进行消耗, 但是天然气燃烧仍然会产生 CO₂, 场景 4 中的 HFC 直接燃烧氢气, 能够承担部分 CHP、GB 机组的出力且不会产生 CO₂, 降低了碳排放量。因此, 相比于传统 P2G, 细化的 P2G 两阶段技术更容易实现 PIES 的低碳优化运行。

4.4 系统低碳机制分析

为体现本文引入阶梯碳交易机制后的调度优势, 设置以下几种场景进行对比分析。场景 5 为考虑传统碳交易机制但目标函数不考虑碳交易成本, 场景 6 为考虑传统碳交易机制且目标函数考虑碳交易成本, 场景 7 为考虑阶梯碳交易机制且目标函数考虑碳交易成本。三种场景的 PIES 运行成本见表 10。

表 10 三种场景的 PIES 运行成本

参数	场景 5	场景 6	场景 7
系统总成本/元	11 542.04	9 895.20	10 176.79
购能成本/元	7 168.35	7 332.64	7 516.08
碳交易成本/元	4 308.47	2 524.40	2 637.07
弃风成本/元	65.22	38.16	23.64

由表 10 可知, 在场景 5 中, 优化目标未考虑碳交易成本, 购能成本低于其他场景的原因是气价总是低于电价, 因此系统大量购买天然气进行供能, 但大量使用天然气导致产生较多的 CO₂, 从而使系统的碳排放量处于较高的位置; 在场景 6 中, 系统考虑碳交易成本, 但天然气已处于一定水平, 此时购气比购电节约的成本已低于天然气燃烧所产生 CO₂ 的碳交易成本, 此时购电增加, 购气减少; 在场景 7 中, 系统运行总成本比场景 5 减少了 1 365.25 元, 比场景 6 增加了 281.59 元, 但由于考虑了阶梯碳交易机制, 碳交易价格的增长极大地限制了系统碳排放量, 此时会增大购电量, 碳排放量显著下降, 同时阶梯碳交易机制也促进了新能源的利用。由此可见, 在引入阶梯碳交易机制后, 园区系统能够有效地减少碳排放量, 具有良好的经济性和环保性。

4.5 算法对比分析

为验证改进鲸鱼优化算法的有效性, 设置两种

场景进行对比,电动汽车数量以200辆为例。不同优化算法的对比结果见表11,不同优化算法的收敛结果对比如图9所示。

表11 不同优化算法的对比结果

算法	EV 充电成本/元	迭代次数	求解时长/s
IWOA	1 167.46	25	19.3
WOA	1 292.48	120	30.9
粒子群优化算法	1 326.78	57	32.0
灰狼优化算法	1 287.12	27	39.4

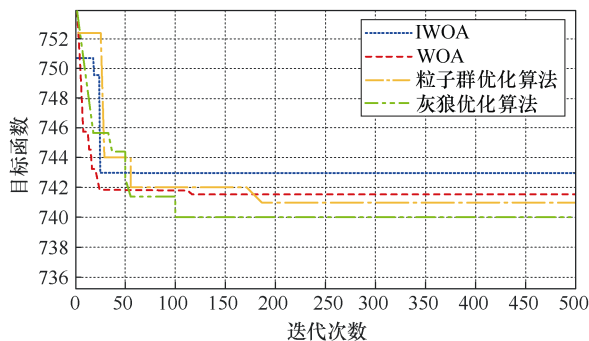


图9 不同优化算法的收敛结果对比

结合图9和表11可知,在EV数量为200的情况下,灰狼优化算法的总体性能最差,虽然其迭代次数低于除IWOA外的其他算法,但其求解时长最大,不满足快速生成调度策略的要求;而粒子群优化算法不能满足EV充放电成本的经济需求;同时,WOA的收敛速度较慢,迭代次数最多,容易陷入收敛死局;本文所提IWOA较WOA在迭代次数及求解时长方面的改善效果显著。

为进一步验证本文所提IWOA的有效性,给出不同数量EV下不同算法的收敛时长见表12。由表12可知,不同数量EV下,IWOA的收敛时长均优于WOA。值得注意的是,随着EV数量的增加,二者收敛时长的差别会进一步突显,对应WOA的求解时长和迭代次数均显著变大,进一步证明了本文所提IWOA的有效性。

表12 不同数量EV下不同算法的收敛时长

EV 数量	收敛时长/s			
	IWOA	WOA	粒子群优化算法	灰狼优化算法
200	19.3	30.9	32.0	39.4
300	22.8	38.6	39.3	123.9
400	25.4	43.1	45.6	不收敛

5 结论

本文以电、热、气多能耦合园区综合能源系统为研究对象,构建热电联产机组、细化P2G两阶段运行、阶梯碳交易的PIES低碳优化运行模型,同时考虑不同区域的EV的不同充电方式,提出了一种以最小运行成本为目标的双层优化调度策略,通过对比分析,得到如下结论:

1) 结合居民出行数据分析,构建的时空特征变量交互的交通行为特性模型基本符合电动汽车的行驶特性。对于H和W区域充电的用户,由于用户停放时间长,利用分时电价策略对用户充电起始时间进行调整,在满足用户充电需求的同时可以降低峰谷差,EV用户充电成本下降了21.85%。

2) 将传统电解槽制氢消纳新能源替换成细化P2G两阶段运行,产生的氢气优先供给HFC进行热电联产,同时MR能够吸收CO₂,结合阶梯碳交易机制,使碳排放成本下降了38.79%,新能源弃用成本下降了63.75%。

3) 针对传统WOA寻优慢的问题,IWOA通过Tent混沌映射生成初始种群,利用基于捕猎速度控制因子的迭代更新策略,提升了面对大量数据预测时的优化速度,并提高了搜索精度。

参考文献

- [1] 徐韶峰. 拥抱碳中和,助力构建电网低碳可持续未来[J]. 电气技术, 2020, 21(12): 7-8.
- [2] 袁坤龙,张少康,常冉,等. 阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源系统需求响应优化运行[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 8-16.
- [3] 于仲安,马静瑶. 含风电耦合制氢的主从博弈多区域综合能源系统协调调度策略[J]. 电气技术, 2023, 24(7): 1-10.
- [4] 王海鑫,袁佳慧,陈哲,等. 智慧城市车-站-网一体化运行关键技术研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 112-132.
- [5] 房宇轩,胡俊杰,马文帅. 计及用户意愿的电动汽车聚合商主从博弈优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5091-5103.
- [6] 肖朝霞,张可信,冯冀. 含电动汽车充电站的风/光/柴独立微电网分层优化调度[J]. 天津工业大学学报, 2022, 41(4): 61-74.
- [7] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等. 基于改进CPSO算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设

- 备, 2017, 37(6): 193-200.
- [8] 孙科, 陈文钢, 陈佳佳, 等. 基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 53-65.
- [9] 宋晓通, 吕倩楠, 孙艺, 等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3744-3754.
- [10] KOLTHANARAT S, SOMSIRI P, TUNGPIMLRUT K. Contribution of real-time pricing to impacts of electric cars on distribution network[C]//2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019: 1-5.
- [11] 郭静蓉, 向月, 吴佳婕, 等. 考虑 CCUS 电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1290-1302.
- [12] MA Yiming, WANG Haixin, HONG Feng, et al. Modeling and optimization of combined heat and power with power-to-gas and carbon capture system in integrated energy system[J]. Energy, 2021, 236: 121392.
- [13] MEHRJERDI H, SABOORI H, JADID S. Power-to-gas utilization in optimal sizing of hybrid power, water, and hydrogen microgrids with energy and gas storage[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103745.
- [14] 董海鹰, 贡韞韵, 马志程, 等. 计及多能转换及光热电站参与的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3689-3699.
- [15] 李鹏, 韩建沛, 殷云星, 等. 电转氢作为灵活性资源的微网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 28-35, 139.
- [16] 刘志坚, 刘瑞光, 梁宁, 等. 含电转气的微型能源网日前经济优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 535-543.
- [17] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
- [18] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2017 national household travel survey[EB/OL]. [2018-07-16]. <http://nhts.ornl.gov>.
- [19] 欧名勇, 陈仲伟, 谭玉东, 等. 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 35(5): 54-59.
- [20] 邹宇航, 曾艾东, 郝思鹏, 等. 阶梯式碳交易机制下

综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2185-2198.

附录 A

本文购电所消耗的碳排放量均视为火电机组, 且 MR 机组在运行过程中会消耗系统产生的 CO₂, 实际碳交易模型为

$$E_{\text{IES,pai}} = E_{\text{buy,e}} + E_{\text{total}} - E_{\text{MR}} \quad (\text{A.1})$$

$$E_{\text{buy,e}} = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_{\text{buy,e}}(t) + c_1 P_{\text{buy,e}}^2(t)) \quad (\text{A.2})$$

$$E_{\text{total}} = \sum_{t=1}^T [a_2 + b_2 (P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{GB}}(t)) + c_2 (P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{GB}}(t))^2] \quad (\text{A.3})$$

$$E_{\text{MR}} = \sum_{t=1}^T \xi P_{\text{MR}}(t) \quad (\text{A.4})$$

式中: $E_{\text{buy,e}}$ 为从上级电网购电的实际碳排放量; E_{total} 为 CHP、GB 机组总的碳排放量; E_{MR} 为实际吸收 CO₂ 量; ξ 为 MR 机组运行中吸收的 CO₂ 参数; a_1 、 b_1 、 c_1 为燃煤机组的碳排放计算参数; a_2 、 b_2 、 c_2 为耗气型机组的碳排放计算参数。实际碳排放模型参数见表 A.1。

表 A.1 实际碳排放模型参数

耗电型	a_1	b_1	c_1
		36	-0.38
耗气型	a_2	b_2	c_2
	3	-0.004	0.001

附录 B

本文在传统鲸鱼算法的基础上, 在种群初始化及更新迭代部分进行改进, 以提升算法面对大量数据预测时的优化速度, 并提高搜索精度。

1) 基于 Tent 混沌映射的种群初始化策略

在算法初始阶段引入混沌理论, 针对混沌随机性、非重复等特点进行改进, 可以得到在搜索空间中均匀分布的初始种群。其中, Logistic 映射的混沌序列在应用中较为常见, 但与 Tent 映射相比, 前者收敛速度、寻优效率相对较低, 因此本文采用 Tent 混沌映射初始化种群, 以扩大初始解的搜索范围, 并提高收敛速度。混沌值 $X(m)$ 表达式为

$$X(m+1) = \begin{cases} 2X(m) & 0 \leq X(m) \leq 0.5 \\ 2(1-X(m)) & 0.5 < X(m) \leq 1 \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

基于 Tent 混沌映射的初始化步骤如下:

步骤 1, 随机生成一个 $0 \sim 1$ 的 y 维矩阵, 即 $X(1)$ 。

步骤 2, 第一个个体 $X(1)$ 按式 (B.2) 迭代逐渐生成 Tent 混沌序列。

步骤 3, 得到搜索空间所有解之后, 再次映射到原空间, 其表达式为

$$X(y) = (\max(y) - \min(y)) \frac{1 + X_0}{2} + \min(y) \quad (B.2)$$

式中: $X(y)$ 为 Tent 混沌映射生成的初始解; X_0 为初始解; $\max(y)$ 、 $\min(y)$ 分别为控制变量的上、下限。

2) 基于捕猎速度控制因子的迭代更新策略

为了减少传统鲸鱼算法局部最优的风险并加快收敛速度, 本文借鉴生物学原理, 加入鲸鱼捕猎速度控制因子, 具体表达式为

$$V = \gamma \left(1 - \frac{t_{gen}}{t_{maxgen}} \right)^\theta \quad (B.3)$$

式中: V 为捕猎速度控制因子; t_{gen} 为当前迭代次数; t_{maxgen} 为总迭代次数; γ 、 θ 为速度决定参数。

在迭代初期, 鲸鱼捕猎时体力消耗少且速度快, 导致位置变化范围大, 从而具有较高的全局探索能力。随着捕猎行为的增加, 体力消耗增加, 捕猎速度降低, 因此可以在后期细化局部搜索以提高搜索精度。捕猎速度的参数调整应根据模型复杂性进行适应性设置: 对于复杂模型, 可以提高参数 θ 以增强全局搜索能力并减少局部最优的风险; 对于数据量大的简单模型, 可以提高参数 θ 以加快收敛速度。为优化鲸鱼速度控制因子, 引入余弦型函数, 其表达式为

$$V = \begin{cases} \gamma \left(1 + \cos \frac{\pi t_{gen}}{t_{maxgen}} \right)^\theta & \frac{t_{gen}}{t_{maxgen}} \leq 0.5 \\ \gamma \left(1 - \cos \frac{\pi t_{gen}}{t_{maxgen}} \right)^\theta & \frac{t_{gen}}{t_{maxgen}} > 0.5 \end{cases} \quad (B.4)$$

由此可得到改进算法迭代过程中的位置更新策略, 包括包围捕猎、螺旋更新及随机搜索三阶段引入速度控制因子的位置更新模型。

(1) 包围捕猎

$$X(t+1) = X^2(t) - VAD \quad p < 0.5 \quad (B.5)$$

式中: $X(t)$ 为猎物的位置; A 为控制因子; D 为鲸鱼与猎物之间的距离; p 为随机数且 $p \sim N(0, 1)$ 。

(2) 螺旋更新

$$X(t+1) = X^2(t) - VDe^{br} \cos(2\pi r) \quad p \geq 0.5 \quad (B.6)$$

式中: b 为收缩参数; r 为 -1 到 1 之间的随机数。

(3) 随机搜索

$$X(t+1) = X^n(t) - VAD \quad (B.7)$$

式中, $X^n(t)$ 为随机搜索的解的位置。

IWOA 具体流程如图 B.1 所示。

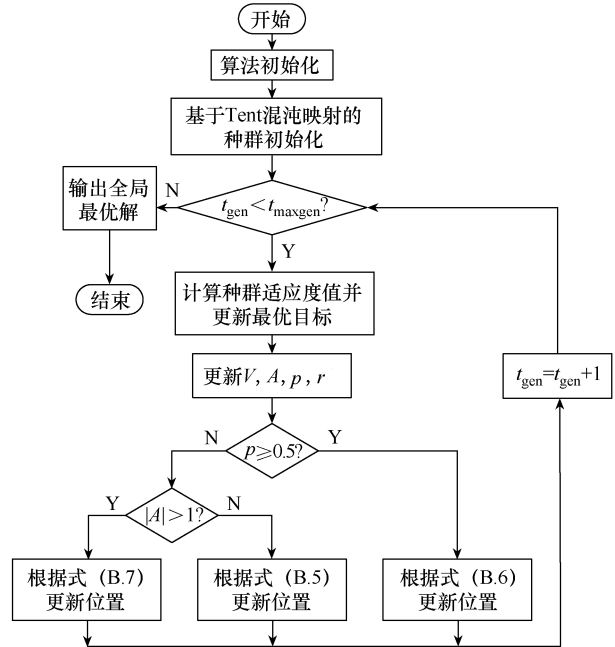


图 B.1 IWOA 流程

附录 C

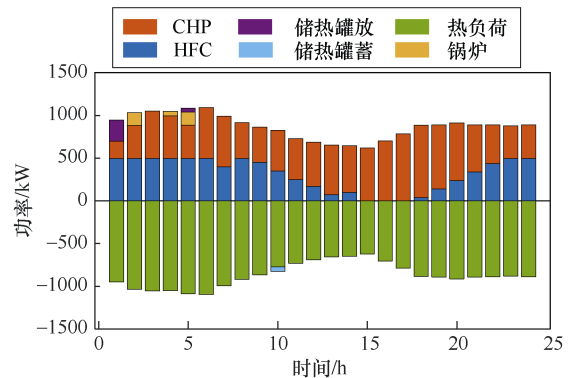


图 C.1 热功率平衡图

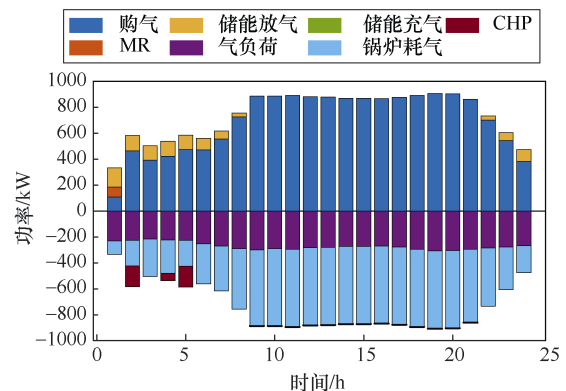


图 C.2 气功率平衡图

(下转第 34 页)

37.98%。

3) 建立多目标优化模型进行求解, 取得最小电力成本与最大产量的协调优化方案; 在相同的计算复杂度和迭代次数下, 与 NSGA-II 相比, NBI 算法能够对可行域中的更多范围进行搜索, 从而更容易获取全局最优解。

后续可进一步研究季节性需求响应策略, 以及不同电力来源与用电模式的结合, 评估其对降低碳排放量的贡献。

参考文献

- [1] PARASCHIV S, PARASCHIV L S. Trends of carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018[J]. Energy Reports, 2020, 6: 237-242.
- [2] IEA. Industry: tracking report 2022[EB/OL]. [202412]. <https://www.iea.org/topics/industry>.
- [3] IPCC. Climate change 2023: synthesis report[EB/OL]. [202412]. <https://www.ipcc.ch/report>.
- [4] TSOUMALIS G I, BAMPOS Z N, CHATZIS G V, et al. Overview of natural gas boiler optimization technologies and potential applications on gas load balancing services[J]. Energies, 2022, 15(22): 8461.
- [5] 梁珩, 黄耕, 侯宾, 等. 工业用户连续参与需求响应的用户基线负荷精准计算方法[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 34-42.
- [6] 王长浩, 高红均, 周文毅, 等. 考虑准线需求响应的高比例新能源电力系统调度优化[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4427-4435.
- [7] 袁坤龙, 张少康, 常冉, 等. 阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源系统需求响应优化运行[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 8-16.
- [8] 王昀, 谢海鹏, 孙啸天, 等. 计及激励型综合需求响应的电-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1926-1934.
- [9] 徐成司, 董树锋, 华一波, 等. 基于改进一致性算法的工业园区分布式综合需求响应[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5175-5187.
- [10] 李智轩, 李嘉丰, 叶晓华, 等. 基于 Copula 函数与多目标进化算法的负荷区间预测[J]. 电气技术, 2024, 25(6): 24-30.
- [11] 边晓燕, 史越奇, 裴传逊, 等. 计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4529-4543.
- [12] 温春雪, 赵天赐, 于赓, 等. 基于改进粒子群算法的储能优化配置[J]. 电气技术, 2022, 23(10): 1-9, 58.
- [13] CAPONE M, GUELPA E, VERDA V. Multi-objective optimization of district energy systems with demand response[J]. Energy, 2021, 227: 120472.
- [14] 马光宇. 钢铁联合企业电力系统分析与优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [15] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- [16] 刘澧庆, 吴宁, 张焕亨, 等. 微电网经济型二次频率和电压控制的多目标优化模型及仿真验证[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 521-529.

收稿日期: 2024-08-28

修回日期: 2024-11-28

作者简介

刘宝勇 (1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源场站优化运行、太阳能风能资源测量与评估。

(上接第 25 页)

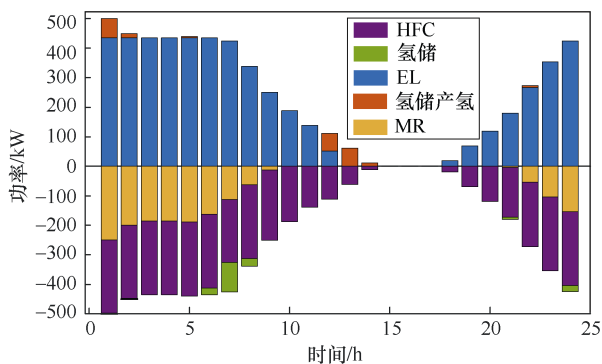


图 C.3 氢功率平衡图

收稿日期: 2024-08-17

修回日期: 2024-10-11

作者简介

高云 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统优化运行。