

考虑灵活性和多主体参与的综合能源系统低碳经济调度

王金凤¹, 张钊源¹, 张宇晖¹, 王耀斌¹, 申森林², 荣家鹏²

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网焦作供电公司, 河南 焦作 454002)

摘要: 为了应对高比例可再生能源接入和多能负荷耦合给系统调度带来的巨大挑战, 对包含系统运营商、用户聚合商和电动汽车等在内的多主体参与的综合能源系统(integrated energy system, IES)调度问题进行研究。首先分析了 IES 中灵活性需求和供给资源, 对灵活性指标进行量化; 其次, 建立了考虑灵活性和多主体参与的 IES 低碳经济调度多目标双层优化模型, 上层模型考虑 IES 运营商收益和系统灵活性, 并引入绿证(green certificate trade, GCT)-碳交易(carbon emissions trad, CET)机制; 下层模型考虑用户聚合商成本和电动汽车自身效益, 两层之间通过能源价格和购能量进行交互迭代; 最后对所提上层模型采用改进 PSO 算法进行求解, 对下层模型使用 CPLEX 软件求解。算例结果表明, 相对于传统的单目标经济调度, 所提模型兼顾了 IES 的经济性和灵活性, 相较于仅考虑运营商的利益, 本文模型可以均衡多方主体利益。相较于传统 PSO 算法, 改进 PSO 算法收敛时迭代次数减少了 52.94%, 求得的最优解与理想解接近程度提升了 10.13%, 有着较好的收敛性和寻优性。

关键词: 综合能源系统; 灵活性; 多主体; 绿证-碳交易; 经济调度

中图分类号: TM73; TK01

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.06.007

综合能源系统作为节能减排和提高能源利用率重要手段, 为实现“双碳”目标提供了有力支撑^[1]。吴永孝等^[2]提出了 1 种考虑供需两侧的 IES 优化调度策略, 通过供需两侧协同优化促进了风电消纳和提升系统低碳性。骆钊等^[3]建立了考虑绿证交易的 IES 调度模型, 绿证交易能给系统带来收益并提升可再生能源消纳率。陈浩等^[4]建立了考虑绿证和碳交易机制模型, 通过协同交互和内部转化提升可再生能源消纳率和减少碳排放。李红伟等^[5]建立了含风光和储氢的 IES 低碳调度模型, 通过引入 P2G 技术和碳捕集设备实现多能耦合, 有效地提升风光消纳并促进系统深度脱碳。Arvanitidis 等^[6]研究了 1 种核能综合能源系统架构, 通过整合核能基荷发电与间歇性可再生能源、储能装置及热网络, 提升了系统运行灵活性与效率, 并助力脱碳目标达成。

然而可再生能源出力的不确定性和负荷侧波动增加了 IES 系统调节的难度, IES 对系统灵活调节能力的需求愈发明显^[7]。Chicco 等^[8]将 IES 灵活性

定义为: 在确保系统稳定运行基础上, 系统具备在指定区域内运行时, 有效调节各类能源供应、需求以及功率流动的能力。章健等^[9]建立电-气需求侧负荷响应鲁棒优化模型, 在选择合适的电价、气价约束系数后, 提升了新能源消纳及应对新能源波动性的能力。王金凤等^[10]通过构建系统净负荷典型场景集评估系统灵活性, 得出在高比例风电系统需配置向下灵活性资源以减少弃风现象。潘超等^[11]通过充分挖掘和整合多元灵活性资源, 提高系统的风电消纳能力以及降低碳排放水平。

IES 作为涵盖能源生产、传输和消费的平台, 涉及 IES 运营商、用户等多个利益相关者。王韵楚等^[12]设计了 1 个需求侧互动机制来引导用户积极且高效地参与需求响应。Yang 等^[13]提出了一个考虑资源灵活性与固体氧化物燃料电池分段控制的低碳社区 IES 优化调度模型, 通过调动不同类型储能设备和负荷侧灵活资源, 有效促进系统低碳经济运行。为平衡 IES 运营商和用户之间的利益, 文献[14]提出了 1 种基于 PSO 算法的电动汽车充放电

收稿日期: 2026-05-03; 修订日期: 2026-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62203395)

作者简介: 王金凤(1977—), 女, 河南商丘人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事电力系统规划与运行、需求侧管理等研究,

E-mail: wangjinfeng@zzu.edu.cn。

的两阶段优化策略,以提升电网的稳定运行同时提高电动汽车用户的经济效益。文献[15-18]分别建立了基于博弈模型的优化调度框架,有效促进了用户与能源供应商之间的协调优化,进而实现多主体之间的分布式协同运行。

综上所述,IES 优化调度研究在模型构建已取得显著进展,为系统运行提供了多样化的解决方案,但现有研究目标多聚焦于多主体间经济性优化,忽视了系统调度的灵活性目标;或者考虑灵活性,但主要关注运营商的利益。因此,本文建立考虑灵活性和多主体参与的低碳优化模型,兼顾运行经济性灵活性。

1 IES 灵活性指标量化

1.1 灵活性需求情况分析

IES 灵活性需求主要源于风能、光能、负荷的波动性和不确定性。此外,风、光出力反调峰特性可能导致净负荷曲线与负荷曲线成相反波动趋势。

净负荷和灵活性资源出力之间的关系通常可分为三种情形:净负荷波动超过灵活性资源出力上限,此时系统无法满足向上灵活性需求,可能引发供能中断或系统运行不稳定;净负荷保持在灵活性资源输出的上下限之间时,此时系统能够较好地满足灵活性需求,实现供需平衡;净负荷波动低于灵活性资源处出力下限,此时系统面临无法满足向下灵活性需求,此时系统存在资源过剩的情况,可能导致系统闲置资源的浪费和经济损失。

根据灵活性方向性特征,IES 的灵活性需求向上、向下分别可以用下式所示^[10]:

$$\begin{cases} P_u^t = \max(P_{NL}^{t+1} - P_{NL}^t, 0); \\ P_d^t = -\min(P_{NL}^{t+1} - P_{NL}^t, 0). \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_u^t 、 P_d^t 分别为 IES 在 t 时刻的向上、向下灵活性需求; P_{NL}^{t+1} 、 P_{NL}^t 分别为 $t+1$ 时刻、 t 时刻的净负荷。

1.2 灵活性供给情况分析

源、储能侧的灵活性资源具备控制方便和调度灵活的特性。负荷侧的需求响应机制通过激励用户调整用电行为,提升整个 IES 的运行效率和灵活性。

(1) 能源转换设备灵活性供给情况。能源转换设备提供的电灵活性裕度如下式所示:

$$\begin{cases} S_u^{S,t} = \sum_{j=1}^N \min(P^{max} - P^t, R^{up}); \\ S_d^{S,t} = \sum_{j=1}^N \min(P^t - P^{min}, R^{down}). \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_u^{S,t}$ 、 $S_d^{S,t}$ 分别为能源转换设备在 t 时刻可提供的上调、下调灵活性总裕度; P^{max} 、 P^{min} 分别为能源转

换设备最大、最小功率; P^t 为 t 时刻实际输出功率; R^{up} 、 R^{down} 分别为向上和向下爬坡速率。

(2) 储能设备灵活性供给情况。储能设备提供的灵活性裕度如下式所示:

$$\begin{cases} S_u^{S,t} = \min(\eta_{chr}(S_{BT}^t - S^{min}), P_{chr}^{max}); \\ S_d^{S,t} = \min(\eta_{dis}(S^{max} - S_{BT}^t), P_{dis}^{max}). \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_u^{S,t}$ 、 $S_d^{S,t}$ 分别为储能设备在 t 时刻可提供的上调、下调灵活性裕度; S_{BT}^t 为 t 时刻蓄电池的剩余电量; η_{chr} 、 η_{dis} 分为充、放效率; P_{chr} 、 P_{dis} 分别为冲、放功率; S^{max} 、 S^{min} 分别为储能设备容量上、下限。

(3) 负荷需求响应灵活性供给情况。负荷需求响应提供的灵活性裕度取决于其可调节容量和系统运行状态,如下式所示:

$$\begin{cases} S_u^{L,t} = P_{cut}^{t,max} - P_{cut}^t + P_{out}^{t,max} - P_{out}^t; \\ S_d^{L,t} = P_{in}^{t,max} - P_{in}^t. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_u^{L,t}$ 、 $S_d^{L,t}$ 分别为负荷需求响应在 t 时刻可提供的上调、下调灵活性裕度; $P_{cut}^{t,max}$ 、 $P_{out}^{t,max}$ 和 $P_{in}^{t,max}$ 分别为 t 时刻可削减、可转出和可转入负荷的最大值; P_{cut}^t 、 P_{out}^t 和 P_{in}^t 分别为 t 时刻已削减、已转出和已转入负荷。

综上所述,灵活性资源在 t 时刻供给的上调灵活性 F_u^t 、下调灵活性 F_d^t 如下式所示:

$$\begin{cases} F_u^t = S_u^t + S_u^{S,t} + S_u^{L,t}; \\ F_d^t = S_d^t + S_d^{S,t} + S_d^{L,t}. \end{cases} \quad (5)$$

1.3 灵活性评价指标

为更准确地评估系统的灵活性,需建立灵活性评价指标。其物理意义在于衡量 IES 应对净负荷波动的响应能力,指标数值越大,表明系统的灵活性越充裕,对负荷波动的适应能力越强。灵活性评价指标如下式表示:

$$F_i = 0.5(F_u^i + F_d^i)/P_L^i. \quad (6)$$

式中: i 分别表示电能、热能、冷能; F_u^i 、 F_d^i 分别为电能、热能、冷能的上调和下调灵活性供给; P_L^i 为向 IES 提供的电能、热能和冷能功率。

2 考虑灵活性和多主体参与的 IES 低碳经济调度模型

随着电力市场改革步的稳步推进,已形成了包含 IES 运营商在内的多主体参与优化多元竞争格局,如图 1 所示。本文建立多主体参与的双层优化调度模型如图 2 所示。上层模型考虑 IES 运营商收益和系统灵活性,并引入绿证-碳交易机制;下层模型考虑用户聚合商成本和电动汽车自身效益。IES 运营商作为上层领导者,可优先发布电能、热能和冷

能价格策略;用户聚合商和电动汽车作为下层参与者,可根据能源价格变化实施更合理的需求响应策略和充放电计划,以保证其自身的目标取得最优,同时将自身的用能调整及时反馈给 IES 运营商。

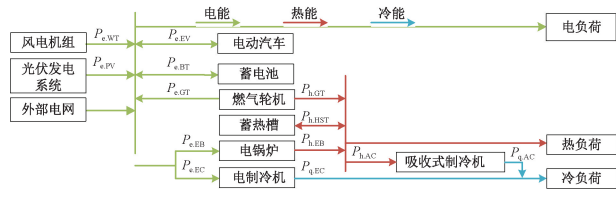


图 1 IES 结构图

Figure 1 IES structure diagram

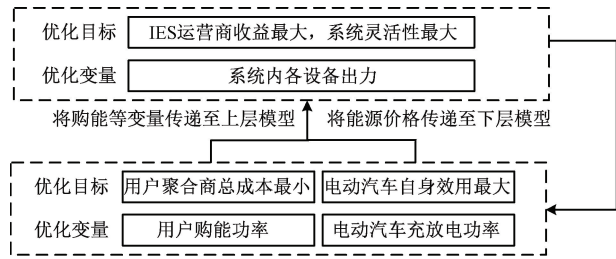


图 2 考虑多主体参 IES 优化的双层模型

Figure 2 A bi-level model considering multi-entity participation in IES optimization

2.1 上层模型

(1) 目标函数。上层目标函数包括 IES 运营商经济性目标和灵活性目标。对于经济性目标而言,由于用户聚合商参与优化运行,IES 运营商不再需要承担需求响应成本。IES 运营商经济性目标函数为运行利润最大,目标函数如下:

$$\max F_1 = F_{s,yh} + F_{s,EV} + F_{gri} - F_{pe} - F_{em} - F_{GCT} - F_{CET} \quad (7)$$

式中: $F_{s,yh}$ 为向用户聚合商售能收益; $F_{s,EV}$ 为向电动汽车售电收益; F_{gri} 向大电网售电收益; F_{pe} 为购能成本; F_{em} 为设备运行维护成本; F_{GCT} 为绿色证书交易成本; F_{CET} 为碳交易成本,各成本具体表达式如式(8)。

$$\begin{cases} F_{pe} = \sum_{t=1}^T (\alpha_{g'}^t P_{g'}^t + \alpha_e^t P_e^t); \\ F_{em} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_i P_i^t; \\ F_{GCT} = \lambda_{GCT} (Q_{gs} - Q_{gd}); \\ F_{CET} = \lambda_{CET} (E_0 - E_C); \\ F_{gri} = \sum_{t=1}^T \alpha_{se}^t P_{se}^t; \\ F_{s,yh} = \sum_{t=1}^T \alpha_{i,se}^t \cdot P_{i,load}^t; \\ F_{s,EV} = \sum_{t=1}^T [\alpha_{EV}^t \cdot (P_{e,EV,chr}^t - P_{e,EV,dis}^t)]. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_{g'}^t$ 、 α_e^t 、 α_{se}^t 、 $\alpha_{i,se}^t$ 、 α_{EV}^t 分别为 t 时刻购气、购电、向大电网售电价格、向用户聚合商售能价格和电动机车电价; $P_{g'}^t$ 、 P_e^t 、 P_{se}^t 、 $P_{i,load}^t$ 、 $P_{e,EV,chr}^t$ 、 $P_{e,EV,dis}^t$ 分别为 t 时刻购气、购电、向大电网售电功率向用户聚合商售能功率和电动汽车充放电功率; C_i 为设备维护成本; P_i^t 为该设备 t 时刻运行功率; λ_{GCT} 、 λ_{CET} 分别为绿证交易价格和碳交易价格; Q_{gs} 、 Q_{gd} 分别为 IES 运营商的绿证配额数量和系统获得的绿证数量; E_0 、 E_C 分别为实际碳排放量、初始碳配额。

绿证数量计算方法如下式所示^[19]:

$$\begin{cases} Q_{gs} = \alpha_{GCT} \sum_{t=1}^T P_{load}^t; \\ Q_{gd} = \kappa_{GCT} \sum_{t=1}^T P_{ge}^t. \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_{GCT} 、 κ_{GCT} 分别为绿证配额转化系数和可再生能源发电所获得绿证转换系数; P_{load}^t 、 P_{ge}^t 分别为 t 时刻系统电能总需求和可再生能源发电量。

碳排放额度计算方法如下式所示:

$$\begin{cases} E_0 = \sigma_1 \sum_{t=1}^T P_{grid}^t + \sigma_2 \sum_{t=1}^T P_{GT,g}^t; \\ E_C = \sigma_3 \sum_{t=1}^T P_{grid}^t + \sigma_4 \sum_{t=1}^T P_{GT,g}^t. \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{grid}^t 、 $P_{GT,g}^t$ 分别为 t 时刻向大电网购电功率和燃气轮机消耗的燃气量; σ_1 、 σ_3 分别为购电功率碳配额和实际碳排放系数; σ_2 、 σ_4 分别为燃气轮机单位天然气碳配额和实际碳排放量系数。

灵活性目标函数:

$$\max F_2 = (F_e + F_h + F_q) / 3 \quad (11)$$

式中: F_e 、 F_h 、 F_q 分别为电能、热能、冷能灵活性评价指标。

(2) 约束条件。在 IES 中,电能、热能等多种供需关系相互约束,其运行受到多种约束条件的限制,以确保系统在满足各类负荷需求的同时保持稳定和高效运行。

1) 电功率平衡约束

$$P_e^t + P_{e,WT}^t + P_{e,PV}^t + P_{e,GT}^t + P_{e,BT,dis}^t + P_{e,EV,dis}^t = P_{e,load}^t + P_{e,EC}^t + P_{e,EH}^t + P_{e,BT,chr}^t + P_{e,EV,chr}^t \quad (12)$$

式中: P_e^t 、 $P_{e,WT}^t$ 、 $P_{e,PV}^t$ 、 $P_{e,GT}^t$ 、 $P_{e,BT,dis}^t$ 分别为 t 时刻与大电网交互功率、风电机组电功率、光伏电功率、燃气轮机电功率、蓄电池放电功率; $P_{e,load}^t$ 、 $P_{e,EC}^t$ 、 $P_{e,EH}^t$ 、 $P_{e,BT,chr}^t$ 分别为 t 时刻电负荷、电制冷耗电功率、电锅炉耗电功率、蓄电池充电功率。

2) 热功率平衡约束

$$P_{h.GT}^t + P_{h.EB}^t + P_{h.HST.dis}^t = P_{h.load}^t + P_{h.AC}^t + P_{h.HST.chr}^t \quad (13)$$

式中: $P_{h.GT}^t$ 、 $P_{h.EB}^t$ 、 $P_{h.HST.dis}^t$ 分别为 t 时刻燃气轮机热功率、电锅炉热功率、蓄热槽放热功率; $P_{h.load}^t$ 、 $P_{h.AC}^t$ 、 $P_{h.HST.chr}^t$ 分别为 t 时刻的热负荷、吸收式电制冷机耗热功率、蓄热槽蓄热功率。

3) 冷功率平衡约束

$$P_{q.AC}^t + P_{q.EC}^t = P_{q.load}^t \quad (14)$$

式中: $P_{q.AC}^t$ 、 $P_{q.EC}^t$ 分别为 t 时刻吸收式制冷机冷功率、电制冷机冷功率; $P_{q.load}^t$ 为 t 时刻的冷负荷。

4) IES 设备运行功率约束

设备运行功率约束主要包括其出力约束和爬坡约束。可再生能源设备出力约束如下式所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{e.WT}^t \leq P_{e.WT}^{t,max} \\ 0 \leq P_{e.PV}^t \leq P_{e.PV}^{t,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{e.WT}^{t,max}$ 、 $P_{e.PV}^{t,max}$ 分别为 t 时刻风电机组和光伏发电的最大电功率。

燃气轮机、电锅炉、吸收式制冷机、电冷机、蓄电池和蓄热槽出力约束、爬坡功率约束:

$$\begin{cases} -P_j^{down} \leq P_j^t - P_j^{t-1} \leq P_j^{up} \\ P_j^{min} \leq P_j^t \leq P_j^{max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_j^{down} 、 P_j^{up} 分别表示第 j 个设备的向上和向下的爬坡功率; P_j^{min} 、 P_j^{max} 分别为第 j 个设备出力的最小、最大功率; P_j^t 为第 j 个设备 t 时刻运行功率。

2.2 下层模型

2.2.1 电动汽车模型。

根据电动汽车并网时间、离网时间、并网离网时的电池荷电状态以及最大充放电功率等因素,本文参考文献[20]将该区域内电动汽车分为 n 个不同的类别。电动汽车集群的充放电功率可用下式表示:

$$\begin{cases} P_{e.EV.chr}^t = N_{EV} \sum_{i \in N_{EV}^t} \rho_i P_{e.EV.i.chr}^t \\ P_{e.EV.dis}^t = N_{EV} \sum_{i \in N_{EV}^t} \rho_i P_{e.EV.i.dis}^t \end{cases} \quad (17)$$

式中: N_{EV} 为参与调度的电动汽车数量; N_{EV}^t 为第 i 类电动汽车集合; ρ_i 为第 i 类电动汽车占比; $P_{e.EV.i.chr}^t$ 、 $P_{e.EV.i.dis}^t$ 为第 i 类电动汽车充放电功率。

电动汽车作为灵活性资源,在接入 IES 后可为系统提供灵活性供给,其提供的灵活性裕度如下式:

$$\begin{cases} S_u^{EV,t} = N \cdot \rho_i \min(\eta_{EV.i.chr} (S_{EV.i}^t - S_{EV.i}^{min}), p_{e.EV.i.chr}^{max}) \\ S_d^{EV,t} = N \cdot \rho_i \min(\eta_{EV.i.dis} (S_{EV.i}^{max} - S_{EV.i}^t), p_{e.EV.i.dis}^{max}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $S_u^{EV,t}$ 、 $S_d^{EV,t}$ 分别为 t 时刻电动汽车提供的向上和向下的灵活性; S_{EV}^t 为 t 时刻电动汽车的电池容量; $\eta_{EV.i.chr}$ 、 $\eta_{EV.i.dis}$ 分别为 t 时刻 i 类电动汽车充、放电效率; S_{EV}^{max} 、 S_{EV}^{min} 分别为电动汽车电池容量最大值和最小值; $p_{e.EV.chr}^{max}$ 、 $p_{e.EV.dis}^{max}$ 分别为电动汽车充放电功率的上限。

(1) 目标函数。电动汽车将根据 IES 运营商制定的电价,制定其充电和放电的策略,最大化其自身效用,其目标函数为:

$$\max F_{EV} = \sum_{t=1}^T [\omega_{EV}^t \cdot (\eta_{EV.chr} P_{e.EV.chr}^t - p_{e.EV.dis}^t / \eta_{EV.dis}) - \alpha_{EV}^t (p_{e.EV.chr}^t - p_{e.EV.dis}^t)] \quad (19)$$

式中: F_{EV} 为电动汽车自身效用; ω_{EV}^t 为电动汽车的单位效用; $\eta_{EV.chr}$ 、 $\eta_{EV.dis}$ 为电动汽车充放电效率; $P_{e.EV.chr}^t$ 、 $P_{e.EV.dis}^t$ 为该车充放电功率。

(2) 约束条件。对于电动汽车充放电约束如下:

$$\begin{cases} S_{EV}^t = S_{EV}^{t-1} (1 - \gamma_{EV}) + (\eta_{EV.chr} P_{e.EV.chr}^t - p_{e.EV.dis}^t / \eta_{EV.dis}); \\ S_{EV}^{min} \leq S_{EV}^t \leq S_{EV}^{max}; \\ I_{EV.chr}^{min} P_{e.EV.chr}^t \leq p_{e.EV.chr}^t \leq I_{EV.chr}^{max} P_{e.EV.chr}^t; \\ I_{EV.dis}^{min} p_{e.EV.dis}^t \leq p_{e.EV.dis}^t \leq I_{EV.dis}^{max} p_{e.EV.dis}^t \end{cases} \quad (20)$$

式中: γ_{EV} 为电动汽车损耗系数; $I_{EV.chr}$ 、 $I_{EV.dis}$ 为充电、放电标识; $p_{e.EV.chr}^{min}$ 、 $p_{e.EV.dis}^{min}$ 分别为电动汽车充电、放电功率的下限。

2.2.2 用户聚合商模型。

(1) 目标函数。用户聚合商的目标函数包括购能成本和向用户支付需求响应成本,表达式为:

$$\min F^t = F_{buy} + F_{com} \quad (21)$$

式中: F^t 为用户聚合商目标函数; F_{buy} 为购能成本; F_{com} 为需求响应成本。各成本见式(22)。

$$\begin{cases} F_{buy} = \sum_{t=1}^T (\alpha_{i.se}^t P_{i.load}^t); \\ F_{com} = \sum_{t=1}^T (C_{tran} P_{i.tran}^t + C_{cut} P_{i.cut}^t + C_{re} P_{i.re}^t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{i.load}^t$ 为 t 时刻需求响应后的电、热、冷负荷; $P_{i.tran}^t$ 、 $P_{i.cut}^t$ 、 $P_{i.re}^t$ 、 C_{tran} 、 C_{cut} 、 C_{re} 分别为可替代电、热、冷负荷功率及其补偿系数。

(2) 约束条件。可平移负荷参与调度的约束如下:

$$\begin{cases} P_{i.in}^t \leq k_1 P_{i.pri}^t \\ P_{i.out}^t \leq k_2 P_{i.pri}^t \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{i.in}^t$ 、 $P_{i.out}^t$ 分别为 t 时刻转入和转出的功率;

k_1, k_2 分别为转入和转出功率所占原负荷的比例。此外在一个运行周期内,整体用能保持不变。

可削减电负荷参与调度约束如式所示:

$$P_{i, \text{cut}}^t \leq k_3 P_{i, \text{pri}}^t \quad (24)$$

式中: $P_{i, \text{cut}}^t$ 为 t 时刻削减的电、热、冷负荷; k_3 为可削减负荷比例。

可替代电负荷参与调度的约束如式所示:

$$\begin{cases} P_{ij}^t \cdot P_{ji}^t = 0; \\ 0 \leq P_{ij}^t \leq \varphi P_i^t. \end{cases} \quad (25)$$

式中: P_{ij}^t 为 t 时刻 i 类负荷转化为 j 类负荷功率; φ 为转化比例。

2.3 模型求解步骤

由于传统 PSO 算法容易陷入局部最优解^[21-22]或后期迭代慢的问题^[23], 本文采用基于蛭螂算法^[24](dung beetle optimizer, DBO)的改进多目标粒子群优化算法(DBO-PSO)求解上层模型, 下层模型使用 CPLEX 软件求解。通过改进后 PSO 算法求解所得到的解并非一个, 而是获得多目标优化问题的 Pareto 前沿, 文中采用 TOPSIS 法从 Pareto 前沿中筛选出折中解, 以便后续分析。

2.3.1 改进 PSO 优化算法。

(1) 惯性权重 w 的改进。权重随求解过程自适应改变, 初期取较大值搜索全局, 后期取较小值使其能够更精准地聚焦于当前优质解附近的区域。惯性权重 w 如下式所示:

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \left[\frac{(t-1)}{(T-1)} \right]^{\cos(\pi/T)} \quad (26)$$

式中: w_{\max}, w_{\min} 分别为 w 的最大值和最小值; t 为迭代次数; T 为最大迭代次数。

(2) 学习因子的改进。较大的个体认知因子 c_1 有利于增强粒子群算法的全局搜索能力, 而较大的群体认知因子 c_2 则有助于提升局部搜索能力, 因此选择采取正弦函数构造学习因子, 如下式所示:

$$\begin{cases} c_1 = 2\sqrt{1 - |\sin(0.5\pi t/T)|}; \\ c_2 = 2\sqrt{|\sin(0.5\pi t/T)|}. \end{cases} \quad (27)$$

(3) 粒子位置更新的改进。本文将粒子种群划分为四个种群, 分别采取不同的位置更新公式。

第一类种群的采取标准粒子群位置更新公式:

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_1 (p_{i, \text{best}}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g_{i, \text{best}}^t - x_i^t); \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}. \end{cases} \quad (28)$$

式中: x_i^t 为第 t 次迭代第 i 个粒子的位置; w 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子; $p_{i, \text{best}}^t, g_{i, \text{best}}^t$ 分别为个体、群体最优值; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数。

第二类种群位置更新基于局部最优解, 其速度更新公式为

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_1 (p_{i, \text{best}}^t - x_i^t) \quad (29)$$

第三类种群位置更新公式与全局最优解相关, 其速度更新公式为

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_2 r_2 (g_{i, \text{best}}^t - x_i^t) \quad (30)$$

第四类种群的位置更新公式如下:

$$x_i^{t+1} = [1 + a \sin(0.5\pi t/T)] x_i^t \quad (31)$$

式中: a 为 $(0, 1)$ 上的一个随机数。

2.3.2 求解流程。

本文所提模型的求解流程如图 3 所示。

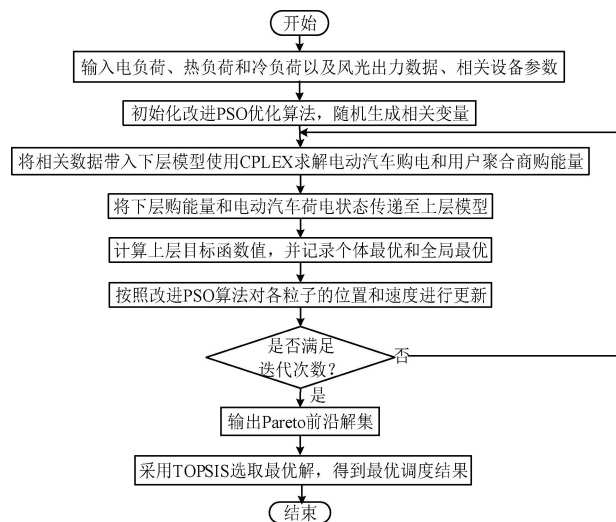


图 3 双层优化模型求解流程图

Figure 3 Flowchart of the bi-level optimization model solving process

3 算例与结果分析

3.1 算例描述

算例选取北方某地典型场景, 风光联合出力、电、冷和热负荷的预测值见图 4, IES 中各设备相关参数以及储能参数见文献[25]和文献[26], IES 与大电网交互电价参见文献[26]。可转移负荷和可替代负荷的补偿价格为 0.1 (元· $\text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 对于可削减负荷为 0.5 (元· $\text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。算法参数设置如下: 种群规模为 50, 最大迭代次数为 200。线性递减惯性权重从初始值 0.9 递减至 0.4, 初始学习因子 $c_1 = 2$ 和

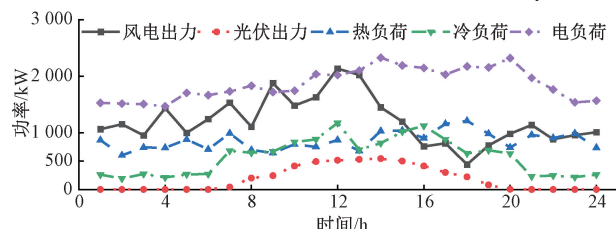


图 4 新能源出力以及负荷预测曲线

Figure 4 Output of renewable energy and load forecast

$c_2 = 1.5$ 。计算机硬件配置是 Windows11, CPU 为 i5-12600KF, 软件是 MATLAB R2024a。

表 1 电动汽车参数

Table 1 Parameters of electric vehicles kW

类别	并网时间	电池容量	初始电量	占比
第 1 类	19:00-07:00	64	25	13%
第 2 类	9:00-17:00	40	25	20.2%
第 3 类	21:00-06:00	24	12	19.4%
第 4 类	10:00-17:00	32	16	26.4%
第 5 类	18:00-08:00	40	15	21%

3.2 场景设置与调度结果分析

验证本文所提的考虑灵活性和多主体参与的 IES 低碳经济调度模型的有效性, 设置以下 5 个场景进行分析, 调度结果如表 2 所示。

场景一: 上层 IES 运营商只考虑经济性目标, 下层只考虑聚合商进行优化, 不考虑绿证-碳交易机制;

场景二: 上层 IES 运营商进行多目标优化, 下层考虑聚合商多主体优化, 不考虑绿证-碳交易机制;

场景三: 在场景二的基础上引入电动汽车进行多主体优化, 不考虑绿证-碳交易机制;

场景四: 在场景三的基础上考虑碳交易机制;

场景五: 在场景四基础上考虑绿证-碳交易机制。

(1) IES 运营商运行结果分析。由表 2 可知, 场景二在场景一的基础上进行考虑经济性和灵活性的多目标优化, IES 运营商减少了 1 212 元的收益使得系统灵活性增加了 10.3%, 有效的兼具经济型性和灵活性。场景三电动汽车作为灵活性资源接入系统后, 电能灵活性提升了 16.1%, 表明电动汽车作为

灵活性资源具有提高系统灵活性的重要作用。

场景四在场景三的基础上考虑了碳交易成本, 使得 IES 运营商总利润减少 5 517 元, 碳排放量减少了 1 195 kg, 表明系统在实现低碳目标和运行经济效益两者之间无法同时满足。场景五在场景四的基础上进一步考虑绿证, 系统通过绿证交易机制抵消部分碳排放使得碳排放量进一步减少 1 169 kg, 碳交易成本减少 428 元, 同时需承担 290 元的绿证交易成本。通过对比 3 个场景碳排放量, 可以充分表明绿证-碳交易机制对减少碳排放的有效性。

图 5 为场景五 IES 电、热、冷功率优化结果优化结果。从图 5(a) 可知, 系统更倾向于向大电网购电减少碳排放; 电动汽车发挥其储能特性, 在满足自身充电需求的情况下替代蓄电池进行充放电以平衡系统电功率。从图 5(b) 可以看出, 考虑碳交易机制下, 系统减少了燃气轮机出力, 更多的使用了电锅炉出力; 蓄热槽在 18:00-19:00 在热量供应不足时进行放热以满足功率平衡。对于图 5(c) 的冷功率而言, 主要由电制冷机进行制冷, 剩余冷功率由吸收式制冷机补足。

图 6 所示为场景五和场景二下系统灵活性对比结果。电动汽车为系统提供灵活性受其并网时间影响, 由于多数电动汽车在 18:00-8:00 时间内处于并网状态, 可以看出在此时间段系统灵活性提升较大。

(2) 用户聚合商运行结果分析。用户聚合商作为主体参与 IES 系统优化调度, 从表 2 中可以看出五个场景中用户聚合商总成本最大为 39 727 元, 最小为 39 654 元, 相差仅 73 元, 这说明用户聚合商能根据系统内资源变化通过需求响应机制维持较为稳

表 2 各场景调度结果

Table 2 Scheduling results of each scenario

市场主体	市场指标	场景一	场景二	场景三	场景四	场景五
IES 运营商	收益/元	25 081	23 869	24 162	18 645	18 925
	运行成本/元	11 106	12 366	12 652	17 857	17 542
	碳交易成本/元	—	—	—	4943	4 515
	绿证交易成本/元	—	—	—	—	290
	碳排放/kg	19 037	19 681	18 974	17 779	16 610
电能灵活性		0.25	0.31	0.36	0.36	0.36
热能灵活性		0.73	0.75	0.74	0.71	0.72
冷能灵活性		0.76	0.85	0.86	0.79	0.82
系统灵活性		0.58	0.64	0.65	0.62	0.63
用户聚合商	总成本/元	39 654	39 721	39 723	39 725	39 727
	购能成本/元	36 187	36 235	36 232	35 922	35 882
	需求响应成本/元	3 467	3 486	3 491	3 803	3 845
电动汽车	自身效用	—	—	6.25	6.28	6.29
	充电成本/元	—	—	582	580	585

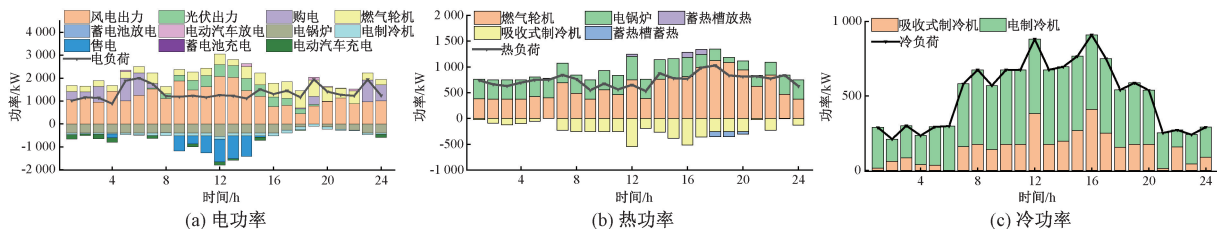


图5 场景五电、热、冷功率优化结果

Figure 5 Optimal operation results of electrical, thermal and cooling power in scenario five

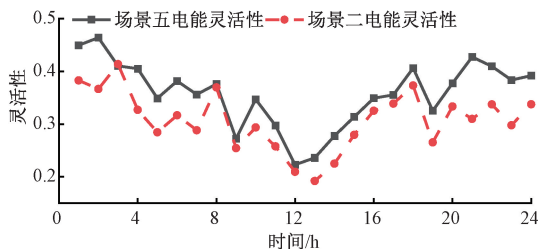


图6 场景五与场景二电能灵活性

Figure 6 Electrical energy flexibility of scenario five compared to scenario two

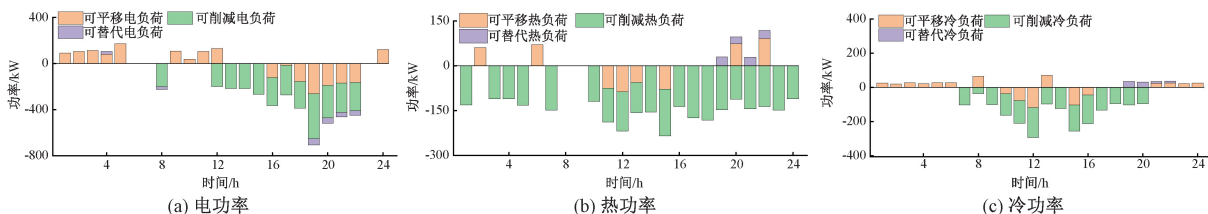


图7 场景五电、热、冷功率需求响应结果

Figure 7 Demand response results of electrical, thermal and cooling power in scenario five

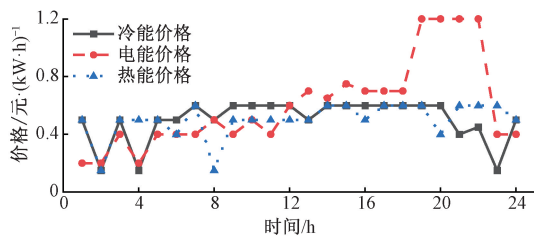


图8 场景五功率价格

Figure 8 Power prices in scenario five

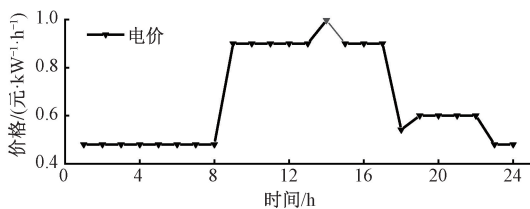


图10 电动汽车充放电价格

Figure 10 Electric vehicle charging and discharging prices

图10所示。从图10可知,电动汽车充放电价格在0.48~1(元·kW·h⁻¹)之间波动,为电动汽车提供了灵活的充放电选择空间。电动汽车选择合适时间进行充放电以实现自身效用最大化。

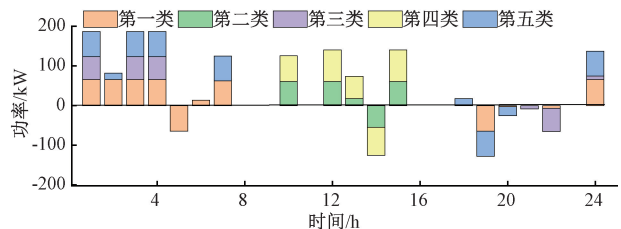


图9 电动汽车充放电功率

Figure 9 Electric vehicle charging/discharging power

定的总成本。

图7、图8分别为用户聚合商需求响应结果和购能价格。优化结果表明:在电价与热价、冷价出现较大差异时,进行能源的替代以减少购能成本,如19:00-22:00时。

(3)电动汽车运行结果分析。从表2中可以看出,在考虑电动汽车参与的场景中,其自身效用和充电成本能有效地保持在稳定水平。场景五中五类电动汽车充放电功率和充放电价格分别如图9和

以第一类电动汽车为例,并网后并未选择立即

3.3 改进粒子群优化算法效果分析

为验证本文提出的改进策略的有效性,在场景五上层模型求解中分别采取 PSO 算法和改进 PSO 算法,设置迭代次数为 200 次。通过 TOPSIS 计算 Pareto 最优解与理想解的相对接近度评估优化结果,其收敛情况如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,采用 PSO 算法时,当迭代到 102 次时收敛,理想解接近程度为 0.79;采取本文所提的改进 PSO 算法时,迭代到 48 次时收敛,接

近程度为 0.87,收敛时迭代次数减少了 52.94%,最优解与理想解接近程度提升了 10.13%。通过对比可知,本文采取的改进 PSO 算法相较于 PSO 算法有着较好的收敛性和寻优性。

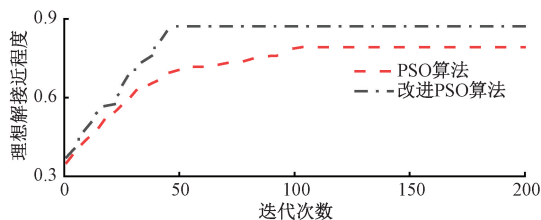


图 11 算法迭代对比

Figure 11 Comparison of algorithm iterations

4 结论

本文以系统灵活性为切入点,挖掘 IES 中各类灵活性资源,建立考虑灵活性和多主体参与的 IES 低碳经济调度多目标优化模型,得出以下结论:

(1)考虑多主体优化调度能有效的平衡各方利益。用户聚合商能根据能源价格引导用户参与需求响应并进行能源替换,减少购能成本并有效的降低峰谷差。电动汽车作为灵活性资源,在满足自身充电需求时不仅能为系统带来一定的经济收益,还能有效的提高系统灵活性。

(2)考虑碳交易机制能降低系统碳排放,在此基础上考虑绿证交易机制能进一步减少碳排放并增加 IES 运营商收益。

(3)模型采取改进 PSO 算法和 CPLEX 联合算法求解多目标优化模型,相较于传统 PSO 算法和 CPLEX 联合算法有着较好的收敛性和寻优性。同时,多目标优化模型能使系统在运行时兼具经济性和灵活性。

参考文献:

[1] Zhong Haiwang, Zhang Ning, Du Ershun, et al. Planning, operation and market of new power system: research progress and practice [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7084-7104. [钟海旺,张宁,杜尔顺,等. 新型电力系统中的规划运营与电力市场:研究进展与科研实践[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7084-7104.]

[2] Wu Yongxiao, Xiao Hui, Zeng Linjun, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems considering bilateral response of supply and demand[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 13-23. [吴永孝,肖辉,曾林俊,等. 考虑供需双边响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 13-23.]

[3] Luo Zhao, Qin Jinghui, Liang Junyu, et al. Operation

optimization of integrated energy system with green certificate cross-chain transaction[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1311-1319. [骆钊,秦景辉,梁俊宇,等. 含绿色证书跨链交易的综合能源系统运行优化[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1311-1319.]

- [4] Chen Hao, Ma Gang, Qian Da, et al. Optimization of regional integrated energy systems under green certificate and carbon trading mechanism considering tiered demand response [J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(5): 21-30. [陈浩,马刚,钱达,等. 绿证-碳交易机制下考虑阶梯需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(5): 21-30.]
- [5] Li Hongwei, Wu Jiahang, Wang Jiayi, et al. Low-carbon economic dispatch of a wind, solar, and hydrogen storage integrated energy system considering P2G and carbon capture[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 26-36. [李红伟,吴佳航,王佳怡,等. 计及 P2G 及碳捕集的风光氢储综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 26-36.]
- [6] Arvanitidis A I, Alamaniotis M. Optimal security constrained economic dispatch in nuclear integrated energy systems[C]//Proceedings of the 2025 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [7] Yuan Tiejia, Zhang Wenda. A review of research on source-storage-load coordinated planning for new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(17): 6664-6683. [袁铁江,张文达. 新型电力系统源-储-荷协同规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(17): 6664-6683.]
- [8] Chicco G, Riaz S, Mazza A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517.
- [9] Zhang Jian, Zhang Yuxiao, Zhu Yongsheng, et al. Robust optimal dispatch of electric-gas integrated energy system considering with demand response [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(6): 66-72. [章健,张玉晓,朱永胜,等. 计及 DR 的电-气综合能源系统的鲁棒优化调度[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(6): 66-72.]
- [10] Wang Jinfeng, Zhang Huihui, Zhu Fangyuan. Evaluation of system operational flexibility of high proportion wind power system based on the typical scene set[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(6): 93-98. [王金凤,张惠惠,祝方圆. 基于典型场景集的高比例风电系统运行灵活性评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2021, 42(6): 93-98.]
- [11] Pan Chao, Fan Gongbo, Wang Jinpeng, et al. Low-car-

- bon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633-1647. [潘超, 范宫博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1633-1647.]
- [12] Wang Yunchu, Zhang Zhi, Lu Feng, et al. Stepwise incentive mechanism of demand response considering uncertainty of user behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 64-73. [王韵楚, 张智, 卢峰, 等. 考虑用户行为不确定性的阶梯式需求响应激励机制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 64-73.]
- [13] Yang Mao, Wang Yuxin, Wang Jinxin, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems in low-carbon communities considering flexibility of resources and segmental control of solid oxide fuel cells [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 13(3): 915-927.
- [14] Zhang Liang, Sun Chenglong, Cai Guowei, et al. Charging and discharging optimization strategy for electric vehicles considering elasticity demand response [J]. eTransportation, 2023, 18: 100262.
- [16] Ma Yan, Guo Xingchen, Chen Ruke, et al. Coordinated planning of electricity-gas integrated energy system considering multi-agent profit [J]. Smart Power, 2021, 49(2): 1-6. [马艳, 郭星辰, 陈汝科, 等. 基于多主体收益的电-气综合能源系统协调规划研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 1-6.]
- [17] Li Yang, Wang Chunling, Li Guoqing, et al. Optimal scheduling of integrated demand response-enabled integrated energy systems with uncertain renewable generations; a Stackelberg game approach [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113996.
- [19] Yang Jie, Xu Wenya, Ma Kai, et al. Integrated demand-side management for multi-energy system based on non-cooperative game and multi-energy pricing [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 34: 101047.
- [18] Huang Yuehua, Qiu Yuancheng, Zhang Lei, et al. Optimal scheduling of electricity-heat energy system considering Stackelberg game [J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2024, 36(9): 115-123. [黄悦华, 邱元城, 张磊, 等. 考虑主从博弈的电热能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(9): 115-123.]
- [19] Chen Ji, Wang Bing, Chen Yuquan, et al. A Multi-agent collaborative optimization method for integrated energy systems based on green certificate-stepped carbon trading joint mechanism [J]. Smart Power, 2025, 53(9): 10-18. [陈霁, 王冰, 陈玉全, 等. 基于绿证-阶梯碳交易联合机制的综合能源系统多主体协同优化方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 10-18.]
- [20] Liao Hui, Li Yaodong, Gong Xianfu, et al. Low carbon dispatch of the park integrated energy system based on the electric vehicles flexible load storage characteristics [J]. Thermal Science, 2024, 28(1B): 659-673.
- [21] Wei Le, Zhang Junsong, Fang Fang, et al. Load recovery strategy of electric-gas-thermal integrated energy system based on MST-improved-PSO [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(32): 13834-13844. [魏乐, 张峻松, 房方, 等. 基于MST改进PSO的电-气-热综合能源系统负荷恢复策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13834-13844.]
- [22] Liu Xinghua, Xie Shenghan, Tian Jiaqiang, et al. Two-stage scheduling strategy for integrated energy systems considering renewable energy consumption [J]. IEEE Access, 2022, 10: 83336-83349.
- [23] Huang Kun, Fu Ming, Ding Xiaohua. Security and economic integration scheduling of electricity-heat integrated energy system [J]. IEEE Access, 2023, 11: 112236-112247.
- [24] Guo Qin, Zheng Qiaoxian. Multi-strategy improved dung beetle optimizer and its application [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2024, 18(4): 930-946. [郭琴, 郑巧仙. 多策略改进的蜣螂优化算法及其应用[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(4): 930-946.]
- [25] Du Huachen. Research on collaborative optimization configuration of integrated energy systems considering electricity heating cooling demand response [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2025. [杜华琛. 考虑电-热-冷需求响应的综合能源系统协同优化配置研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2025.]
- [26] Lu Jiafu, Liang Ning, Xu Huihui, et al. Coordinated optimal dispatch of multiple integrated energy systems under dynamic carbon-green certificate trading interaction mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 52-60. [卢佳富, 梁宁, 徐慧慧, 等. 动态碳-绿证交易交互机制下多综合能源系统协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 52-60.]

Low Carbon Economic Dispatch of IES Considering Flexibility and Multi-Entity Participation

WANG Jinfeng,¹, ZHANG Zhaoyuan¹, ZHANG Yuhui¹, WANG Yaobin¹, SHEN Senlin², RONG Jiapeng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Jiaozuo Electric Power Supply Company, Jiaozuo 454002, China)

Abstract: To address the significant challenges posed by high-proportion renewable energy integration and multi-energy load coupling to system scheduling, this study investigated the scheduling problem of an integrated energy system (IES) involving system operators, user aggregators, electric vehicles, and other participants. First, the flexibility demand and supply resources in the IES were analyzed, and flexibility indicators were quantified. Subsequently, a multi-objective bi-level optimization model considering flexibility and multi-entity participation was established for the IES's low-carbon economic dispatch. The upper-level model considered the IES operator's revenue and system flexibility, incorporating a green certificate-carbon trading mechanism, while the lower-level model accounted for user aggregator costs and electric vehicle self-benefits, with interactions between the two levels through energy prices and purchase quantities. Finally, an improved PSO algorithm was employed to solve the proposed upper-level model, and CPLEX software was used for the lower-level model. The case study results demonstrated that the proposed model balanced system economy and flexibility compared to the traditional single-objective economic dispatch. Compared with only considering the benefits of operators, the proposed model can balance the interests of multiple parties. Additionally, compared to the traditional PSO algorithm, the improved PSO algorithm reduced the number of iterations at convergence by 52.94%, improved the closeness of the obtained optimal solution to the ideal solution by 10.13%, and had better convergence and optimization performance.

Keywords: integrated energy system (IES); flexibility; multi-entity; green certificate-carbon trading; economic dispatch