

计及电动汽车碳积分奖惩机制的综合能源系统 优化调度

徐慧慧¹,赵宇洋¹,田云飞¹,柴宜¹,徐雅崙²,梁宁²

(1. 国网甘肃省电力公司 经济技术研究院,兰州 730050;2. 昆明理工大学 电力工程学院,
昆明 650500)

摘要:为挖掘具有源荷双重特性的电动汽车低碳调度潜力,提出计及电动汽车碳积分奖励机制的IES优化调度方法。首先,构建考虑动态碳排因子的电动汽车碳积分奖励机制模型,在荷侧实现电动汽车与需求响应资源协同低碳运行。其次,建立考虑两阶段电转气、氢燃料电池、储氢罐与碳捕集相耦合的源侧灵活响应模型,丰富氢能多元灵活应用的同时降低碳排放。最后,以系统总运行成本最小为目标,构建IES日前低碳调度模型。仿真结果表明,所提方法能够有效提高电动汽车参与系统调度的积极性与经济性。

关键词:电动汽车;碳积分;综合能源系统;优化调度

Optimal scheduling of integrated energy system considering carbon credit reward mechanism of electric vehicles

XU Huihui¹, ZHAO Yuyang¹, TIAN Yunfei¹, CHAI Yi¹, XU Yayin², LIANG Ning²

(1. Institute of Economic Technology, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China;
2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: In order to tap the potential of low-carbon scheduling of electric vehicles with dual characteristics of source and load, an IES optimal scheduling method considering the carbon integral reward mechanism of electric vehicles is proposed. Firstly, a carbon reward mechanism model of electric vehicles considering dynamic carbon emission factors is constructed to realize the coordinated low-carbon operation of electric vehicles and demand response resources on the load side. Secondly, a source-side flexible response model considering the coupling of two-stage power-to-gas, hydrogen fuel cell, hydrogen storage tank and carbon capture is established to enrich the flexible application of hydrogen energy and reduce carbon emissions. Finally, with the goal of minimizing the total operating cost of the system, the IES day-ahead low-carbon scheduling model is constructed. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the enthusiasm and economic of electric vehicles participating in system scheduling.

Key words: electric automobile; carbon credit; hydrogen-containing integrated energy system; optimal scheduling

0 引言

我国在“十四五”规划中明确指出要实现“碳达峰,碳中和”的战略目标。据统计,我国道路交通领域碳排放占总量的10%^[1],以电动汽车(electric vehicle, EV)为代表的新能源汽车成为“双碳”目标下汽车行业实现低碳转型的关键。

EV具有源、荷双重特性及快速响应的特点,能够与电力系统协调配合有效降低碳排放^[2]。现阶段,许多学者将碳交易机制引入综合能源系统(inte-

grated energy system, IES)与EV相互配合实现低碳运行。文献[3]为引导EV充放电行为以降低碳排放,建立动态响应特性的EV充放电策略。文献[4]为提高EV参与调度积极性,构建考虑价格与碳配额的协同博弈调度模型。上述文献大多是以EV为从体侧考虑其源荷双重特性与IES协同运行,但对于将碳奖励机制引入EV层面,鼓励其积极参与IES低碳调度的研究还有待探索。

氢能作为一种清洁高效能源,在电力、交通等领域具有广阔的应用前景。IES中利用碳捕集(carbon capture system, CCS)和电转气(power-to-gas, P2G)等技术能够有效减少碳排放,提高新能源利用率。文献[5]建立考虑风电相关性与碳捕集互补的

收稿日期:2025-08-20;修回日期:2025-10-03

基金项目:国网甘肃省电力公司科技项目(B2273025
0040)

低碳调度模型,兼顾系统经济性与低碳性。文献[6]构建计及CCS-P2G耦合运行的调度模型,实现风光的完全利用。上述文献从传统P2G制氢用途对IES调度影响进行详细分析,但在考虑多环节氢能利用与EV协同配合对IES优化调度的影响仍需进一步探索。

随着用能需求多样化,通过引入需求响应机制,可实现IES多能源互补,调动荷侧灵活性资源。文献[7]分析电力、热力、天然气负荷可调度价值,并将其引入IES优化调度,提高新能源消纳率。文献[8]建立考虑奖惩碳交易的IES供需双响应模型,挖掘供需灵活特性。文献[9]考虑源荷两侧灵活调整及响应机制,建立主从博弈IES低碳调度模型,但未进一步探讨源侧氢能多元化运用与荷侧需求灵活性资源、EV协同作用对IES调度的影响。

综上所述,本文为挖掘EV低碳调度潜力,提出计及EV碳积分奖励机制的IES优化调度方法。研究的创新之处如下:①在负荷侧构建考虑动态碳排放因子的EV碳积分奖励机制模型,以市场化手段引导EV提高参与IES调度的积极性,实现EV与灵活性需求响应资源的协同低碳优势。②在源侧构建考虑两阶段P2G、氢燃料电池、储氢罐与CCS、热电联产相耦合的源侧灵活响应模型,提高氢能利用率的同时降低碳排放。

1 计及电动汽车碳积分奖励机制的IES优化调度模型

1.1 IES研究框架

IES研究框架如图1所示。由图1可知,IES源侧主要包括上级电网、上级气网、风电、热电联产(combined heat and power, CHP)、燃气锅炉(gas boiler, GB)、CCS、电解槽(electrolyzer, EL)、甲烷反应器(methane reactor, MR)、氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)及储电、热、气、氢罐;负荷侧包括电、热、气、氢负荷与EV。

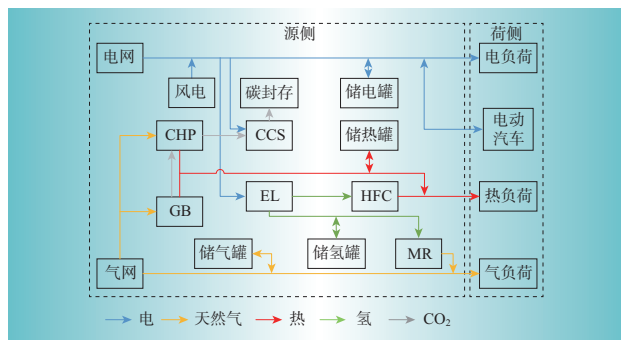


图1 IES研究框架

Fig. 1 IES research framework

1.2 EV碳积分奖励机制

碳普惠机制是推动形成绿色低碳生活方式的重要手段。将其引入EV调度层面与基准线法相结合,以燃油汽车相同行驶距离下的碳排放为基准,碳积分为载体,将使用新能源充电的EV与燃油车碳排放差值作为EV获得的碳积分奖励,能够进一步激励EV提高参与IES调度的积极性。

为体现EV集群充电消纳新能源的实时性,将每时段消纳风电量与碳积分奖励机制相结合,构建考虑动态碳排放因子的EV碳积分奖励模型如下

$$\lambda_t = \frac{\kappa_t^{\text{HD}} P_t^{\text{HD}} + \kappa_t^{\text{WT}} P_t^{\text{WT}}}{P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{HD}}} \quad (1)$$

$$c_t^{\text{EV}} = P_t^{\text{EV},c} x Q_c^{\text{EV}} \Delta t - P_t^{\text{EV},c} \lambda_t \Delta t \quad (2)$$

$$C_{c,\text{EV}} = p_c \sum_{t=1}^T c_t^{\text{EV}} \quad (3)$$

式中: λ_t 为EV在 t 时段的动态碳排放因子; κ_t^{HD} 和 κ_t^{WT} 为 t 时段IES中传统燃煤/气和风电机组输出功率占比; P_t^{HD} 和 P_t^{WT} 分别为 t 时段传统燃煤/气、风电机组输出功率; c_t^{EV} 为 t 时段EV获得的碳积分量; $P_t^{\text{EV},c}$ 为 t 时段EV充电功率; x 为EV行驶距离; Q_c^{EV} 为单位行驶距离下燃油汽车产生的碳排放量; Δt 为时间间隔; p_c 为单位碳积分交易价格; $C_{c,\text{EV}}$ 为EV碳积分收益。

EV集群充放电模型为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,j}^{\text{EV},c} \leq B_{t,j}^{\text{EV},c} P_j^{\text{EV},c,\max} & t \in t_{\text{in}} \\ 0 \leq P_{t,j}^{\text{EV},d} \leq B_{t,j}^{\text{EV},d} P_j^{\text{EV},d,\max} & t \in t_{\text{in}} \\ S_{t,j}^{\text{EV}} = S_{t-1,j}^{\text{EV}} + (\eta_c P_{t,j}^{\text{EV},c} - P_{t,j}^{\text{EV},d} / \eta_d) \Delta t / S_j^{\text{EV},\max} \\ S_j^{\text{EV},\min} \leq S_{t,j}^{\text{EV}} \leq S_j^{\text{EV},\max} \\ B_{t,j}^{\text{EV},c} + B_{t,j}^{\text{EV},d} = 1 \\ P_{t,j}^{\text{EV},c} = 0, t \notin t_{\text{in}}, P_{t,j}^{\text{EV},d} = 0 & t \notin t_{\text{in}} \\ P_t^{\text{EV},c} = \sum_{j=1}^N P_{t,j}^{\text{EV},c} & t \in t_{\text{in}} \\ P_t^{\text{EV},d} = \sum_{j=1}^N P_{t,j}^{\text{EV},d} & t \in t_{\text{in}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{t,j}^{\text{EV},c}$ 和 $P_{t,j}^{\text{EV},d}$ 分别为 t 时段第 j 辆EV充、放电功率; $P_j^{\text{EV},c,\max}$ 和 $P_j^{\text{EV},d,\max}$ 分别为第 j 辆EV充、放电最大功率; $B_{t,j}^{\text{EV},c}$ 和 $B_{t,j}^{\text{EV},d}$ 分别为 t 时段第 j 辆EV充、放电状态; $S_{t,j}^{\text{EV}}$ 为 t 时段第 j 辆EV荷电状态; $S_j^{\text{EV},\max}$ 和 $S_j^{\text{EV},\min}$ 分别为第 j 辆EV荷电状态上、下限; η_c 和 η_d 分别为EV充、放电效率; $P_t^{\text{EV},d}$ 为 t 时段EV放电功率; t_{in} 为EV并网时刻。

1.3 氢能多元化运用

本文在IES源侧引入EL、MR、热电比可调的HFC、储氢罐实现两阶段P2G过程,丰富氢能多元应用场景。其中,EL通过电解水制取氢能,一部分直

接供给HFC满足负荷侧电、热能需求,减少能量梯级损耗;一部分作为MR制取天然气的燃料,进一步供给CHP、GB生产电、热能。同时,利用储氢罐可将多余氢能储存起来,在负荷用能需求较高时段分担系统供能压力,实现氢能灵活时移。

(1) EL模型

$$\begin{cases} Q_t^{\text{EL}} = \eta_{\text{EL}} P_t^{\text{EL}} \\ P_{\min}^{\text{EL}} \leq P_t^{\text{EL}} \leq P_{\max}^{\text{EL}} \\ \Delta P_{\min}^{\text{EL}} \leq P_t^{\text{EL}} - P_{t-1}^{\text{EL}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{EL}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_t^{EL} 为 t 时段EL消耗电功率; Q_t^{EL} 为 t 时段EL输出氢功率; η_{EL} 为EL电制氢转换效率; $P_{\max}^{\text{EL}}$ 和 $P_{\min}^{\text{EL}}$ 分别为EL消耗电功率上、下限; $\Delta P_{\max}^{\text{EL}}$ 、 $\Delta P_{\min}^{\text{EL}}$ 分别为EL爬坡上、下限。

(2) MR模型

$$\begin{cases} G_t^{\text{MR}} = \eta_{\text{MR}} Q_t^{\text{MR}} \\ Q_{\min}^{\text{MR}} \leq Q_t^{\text{MR}} \leq Q_{\max}^{\text{MR}} \\ \Delta Q_{\min}^{\text{MR}} \leq Q_t^{\text{MR}} - Q_{t-1}^{\text{MR}} \leq \Delta Q_{\max}^{\text{MR}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_t^{MR} 为 t 时段MR消耗氢功率; G_t^{MR} 为 t 时段MR输出气功率; η_{MR} 为MR氢转气转换效率; $Q_{\max}^{\text{MR}}$ 和 $Q_{\min}^{\text{MR}}$ 分别为MR消耗氢功率上、下限; $\Delta Q_{\max}^{\text{MR}}$ 和 $\Delta Q_{\min}^{\text{MR}}$ 分别为MR爬坡上、下限。

(3) 热电比可调的HFC模型

$$\begin{cases} \pi_{\min}^{\text{HFC}} \leq H_t^{\text{HFC}} / P_t^{\text{HFC}} \leq \pi_{\max}^{\text{HFC}} \\ P_t^{\text{HFC}} = \eta_{\text{HFC},e} Q_t^{\text{HFC}} \\ H_t^{\text{HFC}} = \eta_{\text{HFC},h} Q_t^{\text{HFC}} \\ Q_{\min}^{\text{HFC}} \leq Q_t^{\text{HFC}} \leq Q_{\max}^{\text{HFC}} \\ \Delta Q_{\min}^{\text{HFC}} \leq Q_t^{\text{HFC}} - Q_{t-1}^{\text{HFC}} \leq \Delta Q_{\max}^{\text{HFC}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\pi_{\max}^{\text{HFC}}$ 和 $\pi_{\min}^{\text{HFC}}$ 分别为HFC热电比可调上、下限; P_t^{HFC} 、 H_t^{HFC} 和 Q_t^{HFC} 分别为 t 时段HFC输出电、热功率和消耗氢功率; $\eta_{\text{HFC},e}$ 和 $\eta_{\text{HFC},h}$ 分别为HFC消耗氢功率转换为电、热功率效率; $Q_{\max}^{\text{HFC}}$ 和 $Q_{\min}^{\text{HFC}}$ 分别为HFC消耗氢功率上、下限; $\Delta Q_{\max}^{\text{HFC}}$ 和 $\Delta Q_{\min}^{\text{HFC}}$ 分别为HFC爬坡上、下限。

(4) 储氢罐

$$\begin{cases} 0 \leq Q_t^c \leq Q_{c,\max} B_t^c \\ 0 \leq Q_t^d \leq Q_{d,\max} B_t^d \\ B_t^{Q,c} + B_t^{Q,d} \leq 1 \\ S_t^Q = S_{t-1}^Q + \eta_{Q,c} Q_t^c - Q_t^d / \eta_{Q,d} \\ S_{Q,\min} \leq S_t^Q \leq S_{Q,\max} \\ S_1^Q = S_{24}^Q \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_t^Q 为 t 时段储氢罐容量; $S_{Q,\max}$ 和 $S_{Q,\min}$ 分别为储氢罐容量上、下限; Q_t^c 和 Q_t^d 分别为 t 时段储氢罐充、放氢功率; $\eta_{Q,c}$ 和 $\eta_{Q,d}$ 分别为储氢罐充、放氢效率; $Q_{c,\max}$ 和 $Q_{d,\max}$ 分别为储氢罐充、放氢上限; $B_t^{Q,c}$ 和 $B_t^{Q,d}$ 分别为 t 时段储氢罐充、放氢状态; S_1^Q 和 S_{24}^Q

分别为储氢罐始、末容量。

1.4 负荷需求灵活响应模型

本文在负荷侧考虑电、热、气多元负荷的横、纵双向维度需求响应能力。其中,横向需求响应为多元负荷在用能高峰时段将负荷转移至低谷时段;纵向需求响应为多元负荷在同一时间维度上削减部分负荷或实现负荷之间的相互替代。模型如下所示

$$\begin{cases} e_t^{\text{DR}} = e_t^{\text{load}} + e_t^{\text{tran}} + e_t^{\text{cut}} + e_t^{\text{re}} \\ 0 \leq e_t^{\text{tran}} \leq e_{\max}^{\text{tran}} e_t^{\text{load}} \\ 0 \leq e_t^{\text{cut}} \leq e_{\max}^{\text{cut}} e_t^{\text{load}} \\ 0 \leq e_t^{\text{re}} \leq e_{\max}^{\text{re}} e_t^{\text{load}} \\ e_t^{\text{tran}} = B_t^{\text{tran},\text{in}} e_t^{\text{re},\text{in}} - B_t^{\text{tran},\text{out}} e_t^{\text{re},\text{out}} \\ e_t^{\text{re}} = B_t^{\text{re},\text{in}} e_t^{\text{tran},\text{in}} - B_t^{\text{re},\text{out}} e_t^{\text{tran},\text{out}} \\ B_t^{\text{tran},\text{in}} + B_t^{\text{tran},\text{out}} = 1 \\ B_t^{\text{re},\text{in}} + B_t^{\text{re},\text{out}} = 1 \\ \sum_{t=1}^T e_t^{\text{tran}} = 0 \\ \sum_{t=1}^T e_t^{\text{re}} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: e_t^{DR} 、 e_t^{load} 、 e_t^{tran} 、 e_t^{cut} 和 e_t^{re} 分别为 t 时段需求响应后多元、固定、可转移、可削减和可替代负荷量; $e_{\max}^{\text{tran}}$ 为可转移负荷最大占比; $e_t^{\text{tran},\text{in}}$ 和 $e_t^{\text{tran},\text{out}}$ 分别为 t 时段可转移负荷转入、转出负荷量; $B_t^{\text{tran},\text{in}}$ 和 $B_t^{\text{tran},\text{out}}$ 分别为 t 时段可转移负荷转入、转出状态; $e_{\max}^{\text{cut}}$ 和 $e_{\max}^{\text{re}}$ 为可削减、可替代最大占比; $e_t^{\text{re},\text{in}}$ 和 $e_t^{\text{re},\text{out}}$ 分别为 t 时段可替代负荷转入、转出负荷量; $B_t^{\text{re},\text{in}}$ 和 $B_t^{\text{re},\text{out}}$ 分别为 t 时段可替代负荷转入、转出状态。

1.5 IES低碳经济调度模型

(1) 目标函数

本文构建以EV用能成本 C_{EV} 、IES购能成本 C_{GN} 、弃风成本 C_{QF} 、碳交易成本 C_{TJ} 、碳封存成本 C_{FC} 、需求响应成本 C_{DR} 之和的总运行成本 C_{IES} 最小化为目标的IES调度模型,其目标函数如下

$$\min C_{\text{IES}} = C_{\text{EV}} + C_{\text{GN}} + C_{\text{QF}} + C_{\text{TJ}} + C_{\text{FC}} + C_{\text{DR}} \quad (10)$$

$$C_{\text{EV}} = \sum_{t=1}^T (p_t^{\text{EV},c} P_t^{\text{EV},c} - p_t^{\text{EV},d} P_t^{\text{EV},d}) - C_{\text{c,EV}} \quad (11)$$

$$C_{\text{GN}} = \sum_{t=1}^T (p_t^{\text{e,GN}} P_t^{\text{GN}} + p_t^{\text{g,GN}} G_t^{\text{GN}}) \quad (12)$$

$$C_{\text{TJ}} = \begin{cases} cS_c & 0 \leq S_c \leq h \\ c(1+\theta)(S_c - h) + ch & h \leq S_c \leq 2h \\ c(1+2\theta)(S_c - 2h) + c(2+\theta)h & 2h \leq S_c \leq 3h \\ c(1+3\theta)(S_c - 3h) + c(3+\theta)h & 3h < S_c \end{cases} \quad (13)$$

$$C_{\text{QF}} = c_{\text{QF}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{QF}} \quad (14)$$

$$C_{\text{FC}} = c_{\text{FC}} \sum_{t=1}^T (G_t^{\text{CCS}} - G_t^{\text{MR}}) \quad (15)$$

$$C_{DR} = p_{cut} \sum_{t=1}^T |e_t^{cut}| + p_{re} \sum_{t=1}^T |e_t^{re}| \quad (16)$$

式中: $P_t^{EV,c}$ 和 $P_t^{EV,d}$ 分别为 t 时段 EV 充、放电单价; P_t^{GN} 和 G_t^{GN} 分别为 IES 在 t 时段购电、气量; $P_t^{e,GN}$ 和 $P_t^{g,GN}$ 分别为 t 时段 IES 购电、气单价; c_{OF} 为弃风惩罚系数; P_t^{OF} 为 t 时段弃风功率; S_c 为 IES 实际碳排放权交易额; c 为碳基价; θ 为增长率; h 为碳排放区间长度; C_{FC} 为碳封存成本系数; G_t^{CCS} 为 t 时段 CCS 捕集 CO_2 量; p_{cut} 和 p_{re} 分别为可中断、可替代负荷补偿系数。

(2) 约束条件

$$\begin{cases} P_t^{GN} + P_t^{CHP} + P_t^{HFC} + P_t^{WT} + P_t^{dis} + P_t^{EV,d} = \\ P_t^{CCS} + P_t^{EL} + P_t^{ch} + P_t^{EV,c} + P_t^{DR} \\ H_t^{CHP} + H_t^{HFC} + H_t^{GB} + H_t^{dis} = H_t^{ch} + H_t^{DR} \\ G_t^{GN} + G_t^{MR} + G_t^{dis} = G_t^{CHP} + G_t^{GB} + G_t^{ch} + G_t^{DR} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_t^{CHP} 和 H_t^{CHP} 分别为 t 时段 CHP 输出电、热功率; P_t^{WT} 为 t 时段风电出力; P_t^{ch} 和 P_t^{dis} 分别为 t 时段储电罐充、放功率; P_t^{CCS} 为 t 时段 CCS 运行功率; H_t^{ch} 和 H_t^{dis} 分别为 t 时段储热罐充、放功率; G_t^{ch} 和 G_t^{dis} 分别为 t 时段储气罐充、放功率; H_t^{GB} 为 t 时段 GB 输出热功率; G_t^{CHP} 和 G_t^{GB} 分别为 t 时段 CHP、GB 消耗气功率; P_t^{DR} 、 H_t^{DR} 和 G_t^{DR} 分别为 t 时段需求响应后电、热、冷负荷量。

CHP、GB、CCS、储能罐和风电出力约束已有大量相关研究,具体模型详见文献[10]—文献[12]。

2 算例分析

为验证本文所提计及 EV 碳积分奖励机制的 IES 优化调度方法的有效性,以一天 24 h 为调度周期,利用 CPLEX 求解。初始多元负荷及风电出力如图 2 所示。碳交易价格 c 为 0.30 元/kg,增长率 q 为 0.20,碳排放量区间长度 h 为 1 000 kg。参考上海环境能源交易所每单位碳积分交易价格为 0.05 元/碳积分。

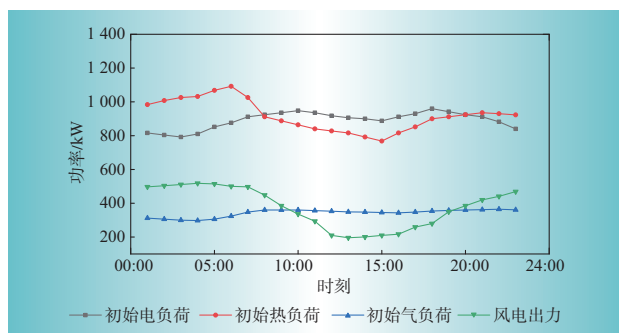


图2 初始多元负荷及风电出力

Fig. 2 Initial multivariate load and wind power output curves

2.1 IES 优化结果对比分析

本文设置以下 5 个场景进行对比分析:① 计及 EV 碳积分奖励机制的 IES 优化调度;② 不考虑 EV 及碳积分奖励机制的 IES 优化调度;③ 不考虑碳积分奖励机制的 IES 优化调度;④ 不考虑氢能多元化运用的 IES 优化调度;⑤ 不考虑负荷侧需求灵活响应的 IES 优化调度。IES 不同场景优化结果对比如表 1 所示。

表1 IES 不同场景优化结果

Table 1 Optimization results of IES different scene

场景	总运行成本	碳交易成本	需求响应成本	EV 碳积分收益
1	19 712.34	691.27	3 169.25	132.88
2	21 164.28	838.03	3 060.98	
3	20 318.63	704.78	3 089.95	
4	19 810.05	696.00	3 136.78	132.43
5	22 934.12	1 738.10		99.48

对比场景 1 和场景 3,由于场景 3 中未考虑 EV 碳积分奖励机制,因此其低碳调度潜力有限,IES 碳交易及总运行成本分别增加了 1.95%、3.08%;对比场景 1 和场景 2,由于场景 2 未在荷侧考虑 EV 参与的灵活响应及碳积分奖励机制,在一定程度上削弱了 EV 在风电高发时期将未利用的电储能起来,并在低发时期释放的灵活低碳响应能力,使碳交易成本及总运行成本分别上升了 21.23%、7.37%;对比场景 1 和场景 4,由于场景 1 在源侧考虑了氢能多元化运用,使氢能不仅可由 MR 生成天然气,还可直接传输给 HFC 生成电、热进行供能,多余电能还可通过储氢罐进行能源的时移利用,使碳排放减少了 274 kg。对比场景 1 和场景 5,由于场景 5 未考虑负荷侧需求灵活响应能力,无法与 EV 协同作用提高 IES 运行灵活性及碳减排潜力,虽减少了需求响应成本,却使总运行成本上升了 16.34%,且碳排放也较场景 1 上升了 30.16%。

2.2 计及 EV 碳积分奖励机制的效益分析

考虑碳积分奖励机制对 EV 的影响如图 3 所示。考虑 EV 碳积分奖励机制后,风电出力高峰时段为 EV 主要充电时期,这是因为 EV 在该时段充电可获得的碳积分奖励收益最大。由表 1 可知,考虑 EV 碳积分奖励机制后,EV 碳积分收益增加了 132.88 元,且使系统碳交易及运行成本分别降低了 1.92%、2.99%。表明考虑 EV 碳积分奖励机制,使得 EV 在降低系统运行成本的同时提高了响应的积极性,进一步降低系统碳排放。

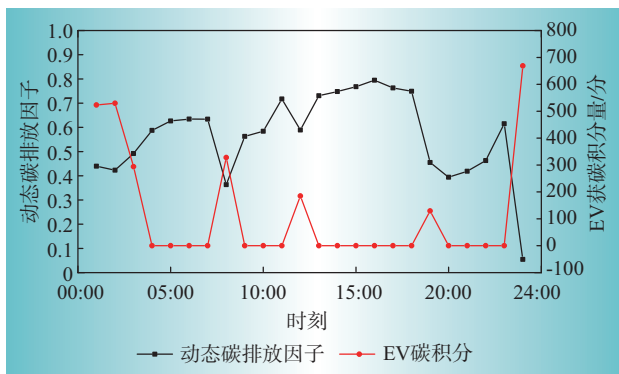


图3 EV动态碳排放因子及碳积分

Fig. 3 EV dynamic carbon emission factor and carbon integral

2.3 不同碳积分交易价格IES效益分析

不同碳积分交易价格对IES效益分析的影响如图4所示。碳积分交易价格与EV获得的碳积分收益呈正相关,与IES总运行成本呈负相关。当单位碳积分价格从0.01元/碳积分上升至0.15元/碳积分, EV碳积分收益增加了354.21元, IES总运行成本减少了2 126.04元。表明随着碳积分价格的升高, EV参与调度的积极性对系统低碳经济运行的影响是有限的, 当碳积分价格过高时, EV碳积分收益增长与系统运行成本降低速度渐缓, 并趋于稳定状态, 表明选取适当的碳积分交易价格有助于提高EV参与调度积极性及IES经济效益。

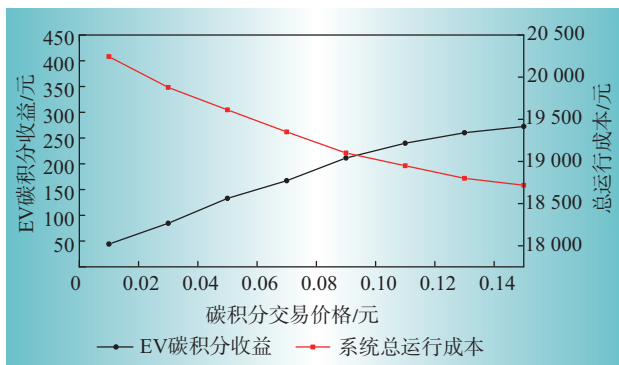


图4 不同碳积分交易价格敏感度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of different carbon integral trading prices

2.4 IES运行特性分析

场景1优化调度策略下电功率平衡结果如图5所示。在01:00—07:00时和23:00—24:00时电价较低且风电高发时段, IES在保证荷侧供能需求前提下, 一部分通过向外部电网购电、利用富余风电由EL制取氢气, 传递给MR生成天然气; 一部分直接供应给HFC进行供能; 一部分存于储氢罐中在荷侧需求较高时段释放分担系统供能压力。此外, 在碳积分奖励机制激励下, EV倾向于在风电高发时段参与

IES调度, 与荷侧灵活需求响应协同作用提高系统经济性及碳减排潜力。

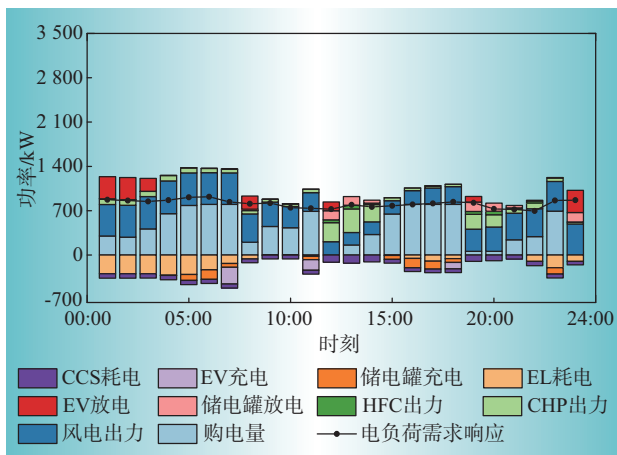


图5 IES电功率平衡

Fig. 5 IES electric power balance

3 结束语

本文构建计及EV碳积分奖励机制的IES优化调度模型, 结论如下:

(1) 在荷侧建立计及动态碳排因子的EV碳积分奖励机制模型, 能够有效引导EV提高参与IES调度的积极性, 使系统碳排放及运行成本下降了6.71%、6.86%。

(2) 碳积分奖励机制对于EV参与IES调度具有积极作用, 采取合理的碳积分交易价格有助于EV与IES内源荷侧资源协同互补。

(3) 在源侧建立EL、HFC、储氢罐、MR的氢能多元化应用模型, 与荷侧EV、灵活性资源协调配合, 进一步促进了IES低碳经济运行。

参考文献:

- [1] FANG K, LI C L, TANG Y Q, et al. China's pathways to peak carbon emissions: new insights from various industrial sectors[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118 039.
- [2] 胥栋, 叶傲霜, 张少迪, 等. 基于电动汽车价格弹性需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(4): 73-79.
- [3] 侯星驰, 李静宇, 武昭原, 等. 电-碳市场下计及动态

- 响应特性的电动汽车充放电定价策略[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20241106.0901.002>.
- HOU Xingchi, LI Jingyu, WU Zhaoyuan, et al. Charging and discharging pricing strategy of electric vehicles considering dynamic response characteristics in electricity-carbon market[J/OL]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20241106.0901.002>.
- [4] 李咸善, 陈敏睿, 程杉, 等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2 286-2 296.
- LI Xianshan, CHEN Minrui, CHENG Shan, et al. Research on optimal scheduling strategy of microgrid with electric vehicles based on dual incentive cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2 286-2 296.
- [5] 安源, 嘉程昊, 宁旭阳, 等. 考虑风光相关性与灵活碳捕集的互补系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 40-49.
- AN Yuan, JIA Chenghao, NING Xuyang, et al. Low-carbon economic dispatch of complementary system considering wind-solar correlation and flexible carbon capture[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(11): 40-49.
- [6] 金旭荣, 尹江, 杨国华, 等. 计及风光不确定性的CCS-P2G耦合运行虚拟电厂优化调度[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(5): 1 129-1 141.
- JIN Xurong, YIN Jiang, YANG Guohua, et al. Optimal scheduling of CCS-P2G coupled virtual power plant considering wind and solar uncertainty[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(5): 1 129-1 141.
- [7] 万庆祝, 闵现娟, 于佳松, 等. 需求响应下的电制氢多模式利用综合能源系统优化调度[J]. 供用电, 2024, 41(12): 81-92.
- WAN Qingzhu, MIN Xianjuan, YU Jiasong, et al. Optimal scheduling of integrated energy system for multi-mode utilization of electricity-generated hydrogen under demand response[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(12): 81-92.
- [8] 李艺丰, 黄曲黎, 闫朝阳, 等. 基于奖惩机制碳交易的综合能源系统供需双响应低碳调控[J]. 可再生能源, 2024, 42(8): 1 111-1 119.
- LI Yifeng, HUANG Qucan, YAN Zhaoyang, et al. Supply-demand dual-response low-carbon regulation of integrated energy system based on reward and punishment mechanism carbon trading[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(8): 1 111-1 119.
- [9] 余洋, 吴千, 霍宇航, 等. 计及自适应阶梯碳势-碳价与供需双响应基于主从博弈的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2 702-2 714.
- YU Yang, WU Qian, HUO Yuhang, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on master-slave game considering adaptive ladder carbon potential-carbon price and supply-demand dual response[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2 702-2 714.
- [10] 陈志, 胡志坚, 翁菖宏, 等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 148-155.
- CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.
- [11] 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.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [12] 任宇路, 程昱舒, 张雪瑞, 等. 碳交易下含氢储能的综合能源系统运行优化[J]. 电测与仪表, 2025, 62(12): 11-19.
- REN Yulu, CHENG Yushu, ZHANG Xuerui, et al. Operation optimization of integrated energy system with hydrogen storage under carbon trading[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(12): 11-19.

作者简介:

徐慧慧(1989), 女, 河南商丘人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与低碳技术。

(责任编辑 方德康)