

考虑电动汽车出行链的园区综合能源系统低碳经济运行研究

付波¹, 丁慧晴¹, 权轶¹, 马森源¹, 李超顺²

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要: 电动汽车实际出行行为存在一定的随机性和不确定性, 其充电负荷的时空分布特性为园区综合能源系统的低碳经济运行带来双重挑战。为解决园区内存在的可再生能源供需失衡以及园区综合能源系统整体的经济问题, 提出了一种考虑电动汽车出行链的园区综合能源系统低碳运行研究模型。首先, 介绍了园区综合能源系统的构成与运行机制, 建立了含有绿证-碳交易机制的微网运营商和用户聚合商电热负荷模型。其次, 利用非齐次半马尔科夫链理论模拟电动汽车出行行为, 构建电动汽车随机出行链, 结合车辆在各状态间的转移规律和停留时间分布建立充电决策机制。最后, 为了实现园区经济效益最大化以及降低园区的碳排放量, 构建了微网运营商与含电动汽车的用户的 Stackelberg 博弈模型。结果表明, 所建立的模型不仅可以满足电动汽车在复杂出行链下的充电需求, 而且可以增加园区综合能源系统的经济和环境效益。

关键词: 电动汽车; 非齐次半马尔科夫; 园区综合能源系统; 绿证-碳交易机制; 主从博弈

Study on Low-Carbon Economic Operation of Integrated Energy Systems in Parks Considering Electric Vehicle Travel Chain

FU Bo¹, DING Huiqing¹, QUAN Yi¹, MA Senyuan¹, LI Chaoshun²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The actual travel behavior of electric vehicles has a certain degree of randomness and uncertainty, the spatial and temporal distribution characteristics of their charging loads pose double challenges to the low-carbon economic operation of the integrated energy system in parks. To solve the imbalance between the supply and demand of renewable energy existing in the park and the overall economic problems of integrated energy systems in parks, a low-carbon operation model of integrated energy systems in parks that considers the travel chain of electric vehicles is presented. Firstly, the composition and operation mechanism of integrated energy systems in parks containing EVs is introduced, and the microgrid operator model containing the green certificate-carbon trading mechanism and the electrical and thermal loads of user aggregator are established, respectively. Secondly, the nonhomogeneous semi-Markov chain theory is used to simulate the travel behavior of EVs, construct a stochastic travel chain for EVs, and establish a charging decision mechanism by combining the transfer law and residence time distribution of vehicles between states. Finally, to maximize the interests of each subject and reduce the carbon emissions in the park, a Stackelberg game model between users containing electric vehicles and the microgrid operator is constructed. The results show that the established model can meet the charging demand of EVs under the complex travel chain, effectively increase the economic and environmental benefits of integrated energy systems in parks.

Key words: electric vehicles; nonhomogeneous semi-Markov chain; integrated energy systems in parks; green certificate-carbon trading; Stackelberg game

0 引言

具有实现资源的优化配置和能源的高效利用等优势,的园区综合能源系统低碳运行是支撑“双碳”目标的核心路径^[1-2]。通过对园区综合能源系统内传统机组进行低碳化改造,集成风电、光伏等绿色无污染的可再生能源进行供电,减少系统购电成本,降低碳排放量,是当前极具有前景的发展方向。根据最新的论坛研究报告预测,2030年我国的电动汽车^[3]保有量或达1亿辆,市场占有率超70%,相比于传统燃油车,其可以利用可再生资源提供动力,对降低我国对石油资源依赖和改善环境污染等问题提供了发展思路。

针对园区综合能源系统的碳排放问题,有学者在园区综合能源系统优化调度中引入碳交易机制,文献[4-5]在系统优化的过程中引入阶梯式碳交易机制。文献[6]提出带有赏罚因数的阶梯式碳交易机制,降低了系统的用能成本。文献[7]考虑柔性负荷和碳交易机制,进一步提高综合能源系统的经济性和环保性。然而,上述文献仅考虑了碳交易机制限制系统碳排放量,忽略了绿证机制能促进新能源消纳这一优势。绿证机制作为促进可再生能源发展的市场化工具,通过对可再生能源发电量的认证和交易,能够显著提高园区能源系统的整体经济效益。文献[8]将绿证和碳交易机制引入综合能源系统中,提升了风电的消纳空间。文献[9]在源网荷储系统构建碳-绿证耦合交易机制,大大促进碳减排和可再生能源消纳。文献[10]考虑了绿证机制的碳减排属性,建立碳-绿证协同交易能够充分调动可再生能源出力的积极性。将绿证与阶梯式碳交易机制两者结合,既可以降低系统的碳排放量,又能进一步促进风电、光伏等可再生能源的开发与利用。

随着新能源在园区综合能源系统中的渗透不断加深,风电与光伏的波动性带来弃风弃光现象日益突出。与此同时,电动汽车的快速发展为缓解可再生能源消纳难题提供了全新的解决思路。基于电动汽车的负荷特性及快速响应的优点,将其引入园区综合能源系统的低碳经济运行中,参与大规模可再生能源消纳,并有效减少传统机组的碳排放。目前将电动汽车作为充电负荷参与园区综合能源系统调度,有学者做了相关研究。文献[11]将电动汽车引

入碳交易市场,提高了可再生能源的消纳水平,同时降低电动汽车用户的成本。文献[12]考虑了不同规模的电动汽车对综合能源系统的低碳经济调度效果,当电动汽车负荷超过系统调度需求时,其经济性和低碳性也随之下降。文献[13]优化电动汽车的负荷曲线,能够大大促进工业园区的光伏消纳。然而上述文献未能充分体现电动汽车负荷的时空特性,忽略了电动汽车的实际出行行为。进一步探究得到,大多数学者对电动汽车出行行为的研究主要采用以下两种方法:一是通过蒙特卡洛法对车辆出行进行模拟^[14-15],利用随机抽样方法来模拟出行过程中各变量的不确定性和随机性;二是对电动汽车一日内的所有行程和目的地在时空上的链式组合即出行链进行研究分析。基于统计历史数据进行出行链的分析与控制,通过历史数据分析车辆出行行为模式构建出行链模型以描述电动汽车的行为模式并实现优化控制。文献[16]提出的充电站集聚模型能够较好地同时反映电动汽车荷电状态与到达时间的随机分布特性,但是未充分考虑电动汽车用户的出行需求。文献[17]基于用户行为意愿的基础上采用双向门控循环单元对电动汽车行为特征进行建模分析。然而,车辆的出行行为不仅受到时间因素的影响,如高峰时段或非高峰时段,还表现出空间上的随机性,涉及不同位置间的出行频率与充电需求分布。文献[18-19]虽然采用马尔科夫理论来辅助电动汽车用户随机出行的行为,体现了电动汽车的个体差异,但未探讨电动汽车实际出行中充电负荷的时空分布特性对园区综合能源系统低碳经济运行的影响。因此,考虑电动汽车充电行为的时空随机性,构建充电决策机制以协调其充电需求与园区内风光等新能源的供给能力,亟待开展深入研究。

此外为了解决园区综合能源系统中存在的多主体利益冲突,博弈论^[20]得到了广泛应用,其中主从博弈是一种典型的动态博弈,领导者制定策略方案后,跟随者在领导者的策略约束条件下做出最优回应。同样地,领导者在决策时会预期跟随者作出的回应,合理地选择最有利于自己的策略,以此达到最大化收益。文献[21]在主从博弈的基础上,以区域综合能源系统为基础,引入一种动态综合需求响应(integrated demand response, IDR)机制。文献[22]基于纳什谈判-主从博弈的点对点分布式交易策略,实现利润的最大化,并合理分配收益,最小

化用户用能成本。文献[23]提出了虚拟电厂与EV的主从博弈模型,将虚拟电厂作为售电实体,实现EV的有序并网。上述文献重点研究代理商的设计或利润的最大化,未考虑用户侧灵活资源的合理调配与控制。

综上所述,本文基于非齐次半马尔科夫链理论构建电动汽车随机出行链模拟车辆出行行为,通过结合电动汽车在各状态间的转移规律和停留时间分布,构建了充电决策机制。在含有风光等可再生能源的园区综合能源系统中,引入绿证-碳交易联合机制,建立基于主从博弈与考虑电动汽车出行链的综合能源系统低碳经济运行模型,并分析验证了所提模型的可行性。

1 考虑电动汽车随机出行链的园区综合能源系统模型

为方便实现统一规划,假设园区内所有用户由一个用户聚合商管理。由此,园区综合能源系统由微网运营商和含电动汽车的用户聚合商两部分组成。园区综合能源系统框架图如图1所示。微网运营商通过为用户制定合理的售电价和售热价,参与能源交易,并通过价差实现经济收益。此外微网运营商配有热电联产设备,通过高效的能源转换过程,向用户提供电能和热能,满足用户侧的多元化能源需求。电动汽车作为一个独立的用能单元纳入园区综合能源系统,可以显著增强系统的灵活性和稳定性。

用户侧负荷分为电负荷和热负荷,每个用户均配备光伏发电装置及电制热设备。假设微网运营商设定的售电价格低于电网侧的售电价格,用户仅从微网运营商处购电,并将其盈余电量统一售回电网。同时,当用户电能供应充足但存在热能缺口时,用户可以通过电制热设备将电能转化为热能,以满足其热能需求。电动汽车根据自身出行链产生的充电需求和电价引导,可以有效优化充电行为以及园区可再生能源的使用。

基于上述分析,园区综合能源系统的运行机制如下:微网运营商依据电网定价和用户的历史购热数据,制定合理的售能策略。用户根据自身负荷需求选择最优用能方案,并通过调节电热负荷分布以实现效益最大化。考虑随机出行链的电动汽车在满足自身出行目的的用电需求情况下,在风光发电高

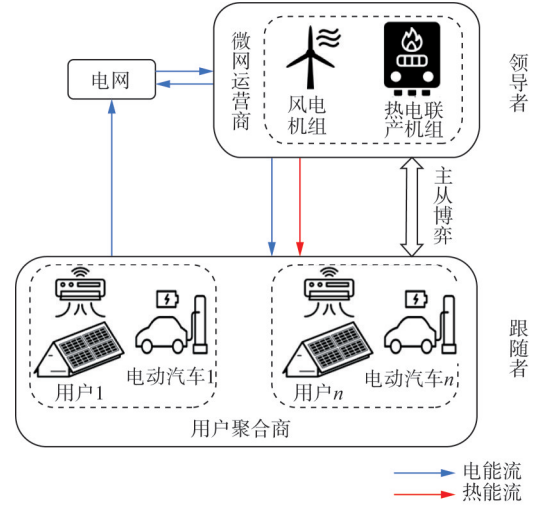


图1 园区综合能源系统框架图

Fig. 1 Framework diagram of integrated energy systems in parks

峰期优先充电,能有效提高可再生能源的利用率,降低园区碳排放。

1.1 微网运营商

1) 售价约束。微网运营商将售电价和售热价作为自身策略集,并利用和用户的主从博弈求出最优的售价策略集,相应约束为:

$$\nu_t^{\text{EG},b} < \nu_t^{\text{MGO},s} < \nu_t^{\text{EG},s} \quad (1)$$

$$\mu_t^{\text{MGO},\min} < \mu_t^{\text{MGO},s} < \mu_t^{\text{MGO},\max} \quad (2)$$

式中: $\nu_t^{\text{EG},s}$ 、 $\nu_t^{\text{EG},b}$ 分别为电网售电、购电价格; $\nu_t^{\text{MGO},s}$ 、 $\mu_t^{\text{MGO},s}$ 分别为微网运营商 s 的售电价格与售热价格; $\mu_t^{\text{MGO},\max}$ 、 $\mu_t^{\text{MGO},\min}$ 分别为热价上下限。

2) 机组模型。微网运营商侧配有热电联产机组和风电机组,为用户侧提供电能和热能。CHP 机组的耗气成本与机组输出电功率^[24]的关系可表示为:

$$E_t^{\text{CHP}} = \frac{F_{\text{ng}} P_t^{\text{CHP},e}}{Q_{\text{LHV}} \eta_c^{\text{CHP}}} \quad (3)$$

式中: E_t^{CHP} 为 CHP 机组燃气成本; F_{ng} 为燃气的单价; $P_t^{\text{CHP},e}$ 为 CHP 机组 t 时段内输出的电功率; Q_{LHV} 为天然气低热值; η_c^{CHP} 为 CHP 机组的发电效率。

CHP 机组在 t 时段内的供热、供电关系^[25]可表示为:

$$\begin{cases} P_t^{\text{CHP},h} = \frac{1 - \eta_c^{\text{CHP}} - \eta_{\text{loss}}^{\text{CHP}}}{\eta_c^{\text{CHP}}} \eta_B P_t^{\text{CHP},e} \\ P_t^{\text{CHP},h} = L_t^{\text{MGO},h} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_t^{\text{CHP},h}$ 为 CHP 机组 t 时段内输出的热功率; $\eta_{\text{loss}}^{\text{CHP}}$ 为散热损失率; η_B 为制热系数; $L_t^{\text{MGO},h}$ 为用户

在 t 时段内从微网运营商购买的热功率。

风电机组在发电过程产生的运维成本 E_t^{WT} 可表示为:

$$E_t^{\text{WT}} = \sum_{i=1}^T K_w P_{w,i} \quad (5)$$

式中: K_w 为风机运维成本系数; $P_{w,i}$ 为风电机组在 t 时段内出力; T 为一天总时段。

3) 目标函数。微网运营商收益目标函数 E_{MGO} 表达式如下。

$$E_{\text{MGO}} = E_{\text{MGO}}^{\text{G,e}} + E_{\text{MGO}}^{\text{L,e}} + E_{\text{MGO}}^{\text{L,h}} + E_{\text{cha}} - \sum_{i=1}^T E_i^{\text{CHP}} - E_t^{\text{WT}} - E_{\text{CET}} + E_g \quad (6)$$

以上各项可以详细表示为:

$$\begin{cases} E_{\text{MGO}}^{\text{G,e}} = \sum_{i=1}^T [-\nu_i^{\text{EG,s}} \cdot \max(L_i^{\text{c}} + P_{t,\text{EV}} - P_t^{\text{CHP,e}} - P_{w,i}, 0) - \nu_i^{\text{EG,b}} \cdot \min(L_i^{\text{c}} + P_{t,\text{EV}} - P_t^{\text{CHP,e}} - P_{w,i}, 0)] \\ E_{\text{MGO}}^{\text{L,e}} = \sum_{i=1}^T \nu_i^{\text{MGO,s}} \max(L_i^{\text{c}}, 0) \\ E_{\text{MGO}}^{\text{L,h}} = \sum_{i=1}^T \mu_i^{\text{MGO,s}} L_i^{\text{MGO,h}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E_{\text{MGO}}^{\text{G,e}}$ 为微网运营商与电网交易的收益; L_i^{c} 为用户经过需求响应后的净电负荷值; $P_{t,\text{EV}}$ 为电动汽车在 t 时段内的充电负荷值; $E_{\text{MGO}}^{\text{L,e}}$ 、 $E_{\text{MGO}}^{\text{L,h}}$ 分别为微网运营商与用户的电、热交易的收益; E_{cha} 为微网运营商与电动汽车交易的收益; E_{CET} 为阶梯式碳交易成本; E_g 为绿证交易收益。

4) 绿证-碳交易联合机制。绿证交易机制作为可再生能源配额制的市场化补充工具, 能量化可再生能源的环境价值。对于园区综合能源系统, 绿电的消纳水平通过可再生能源的发电量占总发电量的比值表示。国家规定对超过绿证配额的可再生能源发电企业, 对其发放绿色证书。发电企业可在我国绿色电力证书交易平台开展交易从而获得额外利润。

本文中考虑绿证-碳交易联合机制, 其中绿色证书交易机制模型^[26]如下。

$$E_g = \frac{C_g^{\text{per}} \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{t=1}^T \xi P_{i,t}^{\text{c}}}{Q_g} \quad (8)$$

式中: E_g 为绿证收益; C_g^{per} 为每本绿证的价格, 元/本; N_g 为新能源机组数量, 包括风电、光伏; Q_g

为单位绿证所要求的新能源发电量; $P_{i,t}^{\text{c}}$ 为 t 时刻第 i 台新能源机组出力; ξ 为可再生能源获得发电收益的比例系数。

阶梯式碳交易指当碳排放量超过配额时, 超出部分需进入市场交易, 并按照分段定价机制进行交易^[27]。碳排放配额公式为:

$$E^{\text{p}} = \lambda_p (c_{\text{ch}} P_t^{\text{CHP,e}} + P_t^{\text{CHP,h}}) + \lambda_g P_t^{\text{buy,e}} \quad (9)$$

式中: E^{p} 为园区系统的碳排放配额; λ_p 为 CHP 单位碳排放配额; c_{ch} 为 CHP 机组发电量的折算系数; λ_g 为购电的碳排放配额; $P_t^{\text{buy,e}}$ 为微网运营商在 t 时段的购电量。

碳排放计算公式为:

$$E_t = \lambda_i (c_{\text{ch}} P_t^{\text{CHP,e}} + P_t^{\text{CHP,h}}) + \lambda_u P_t^{\text{buy,e}} \quad (10)$$

式中: E_t 为系统实际碳排放量; λ_i 为 CHP 单位碳排放系数; λ_u 为购电的碳排放系数。

阶梯式碳排放交易成本 E_{CET} 计算公式为:

$$E_q = \sum_{i=1}^T E_i - E^{\text{p}} \quad (11)$$

$E_{\text{CET}} =$

$$\begin{cases} K_{\text{CET}} E_q, E_q \leq l \\ K_{\text{CET}} (1 + \alpha) (E_q - l) + K_{\text{CET}} l, l \leq E_q \leq 2l \\ K_{\text{CET}} (1 + 2\alpha) (E_q - 2l) + K_{\text{CET}} (2 + \alpha) l, 2l \leq E_q \leq 3l \\ K_{\text{CET}} (1 + 3\alpha) (E_q - 3l) + K_{\text{CET}} (3 + 3\alpha) l, 3l \leq E_q \leq 4l \\ K_{\text{CET}} (1 + 4\alpha) (E_q - 4l) + K_{\text{CET}} (4 + 6\alpha) l, 4l \leq E_q \leq 5l \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_q 为系统净碳排放量; K_{CET} 为碳交易基价; l 为碳排放量区间长度; α 为价格增长率。

1.2 用户聚合商

本文将用户侧的电负荷分为固定电负荷和柔性电负荷, 其中柔性电负荷进一步分为可转移负荷和可削减负荷。用户通过调整柔性负荷的供电时段, 以实现需求响应。此外, 用户侧的电制热设备能够在电价较低或电量充足时提供热能。综上, 用户侧的电负荷模型如下。

$$\begin{cases} L_t^{\text{c}} = L_t^{\text{c,r}} + L_t^{\text{c,s}} + \Delta L_t^{\text{c}} \\ L_{\min}^{\text{c,s}} \leq L_t^{\text{c,s}} \leq L_{\max}^{\text{c,s}} \\ \sum_{i=1}^T |L_t^{\text{c,s}} - \overline{L}_t^{\text{c,s}}| = k \sum_{i=1}^T |L_t^{\text{c,r}} + L_t^{\text{c,s}}| \\ \overline{L}_t^{\text{c}} = L_t^{\text{c,r}} + \overline{L}_t^{\text{c,s}} + \Delta L_t^{\text{c}} \\ L_t^{\text{c}} = \overline{L}_t^{\text{c}} - L_t^{\text{p}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: L_t^{c} 为 t 时段内的电负荷; $L_t^{\text{c,r}}$ 为 t 时段内的固定电负荷; $L_t^{\text{c,s}}$ 为 t 时段内的柔性电负荷; ΔL_t^{c} 为电

制热设备消耗电量; $L_{\max}^{c,s}$ 、 $L_{\min}^{c,s}$ 分别为用户柔性电负荷的上下限值; $\overline{L}_i^{c,s}$ 为用户需求响应后的柔性电负荷; k 为用户柔性电负荷的所占比值; $\overline{L}_i^c$ 为用户需求响应后的电负荷; L_i^p 为用户侧光伏机组 i 时段出力。

在供热部分, 用户侧的热负荷同样可分为固定热负荷与柔性热负荷。柔性热负荷包含可削减热负荷与可替代负荷。综上, 用户侧热负荷模型如下。

$$\begin{cases} L_i^h = L_i^{MGO,h} + L_i^{c,h} + L_i^{h,s} \\ L_i^{c,h} = \eta^{c,h} \Delta L_i^c \\ 0 \leq L_i^{c,h} \leq L_{\max}^{c,h} \\ \Delta L_{\min}^c \leq \Delta L_i^c \leq \Delta L_{\max}^c \\ 0 \leq L_i^{h,s} \leq L_{\max}^{h,s} \end{cases} \quad (14)$$

式中: L_i^h 为用户在 i 时段的净热负荷; $L_i^{c,h}$ 为电制热设备产生的热功率; $L_i^{h,s}$ 为可削减热负荷; $L_{\max}^{h,s}$ 为可削减热负荷的允许限值; $\eta^{c,h}$ 为电制热设备的转化效率; $L_{\max}^{c,h}$ 为电制热设备的输出功率最大值; $\Delta L_{\max}^c$ 、 $\Delta L_{\min}^c$ 分别为可替代负荷上下限值。

综上, 用户聚合商收益目标函数 E_{user} 表达式如下。

$$\begin{cases} E_{\text{user}} = E_{\text{user}}^{l,c} - E_{\text{MGO}}^{l,c} - E_{\text{MGO}}^{l,h} - E^{\text{EV}} \\ E_{\text{user}}^{l,c} = \sum_{t=1}^T [\alpha (\overline{L}_t^c)^2 + \beta \overline{L}_t^c + \gamma] \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{\text{user}}^{l,c}$ 为用户的用电效用函数; α 、 β 、 γ 为用电效用函数的参数; E^{EV} 为电动汽车日出行成本。

2 基于电动汽车随机出行链的充电决策机制

园区内电动汽车从家出发, 在一定的时间顺序内依次经过若干目的地, 最后到达终点并完成所有行程的过程即为电动汽车出行链。本文考虑电动汽车实际出行行为的随机性和不确定性, 基于非齐次半马尔科夫链理论构建电动汽车随机出行链, 通过利用车辆在不同状态之间的转移概率及其随时间变化的动态特性, 刻画电动汽车的行为模式, 更好地满足其充电需求灵活性。并结合电动汽车在各状态间的转移规律和停留时间分布, 构建了充电决策机制。该机制通过优化电动汽车的充电时间和功率分配, 协调电动汽车的充电需求与园区内风光等新能源的供给能力, 促进可再生能源在园区综合能源系统中的消纳。

2.1 电动汽车随机出行链

假设电动汽车用户出行的首次出发点均为家, 经过一条完整的出行链后, 最后返回起始点即为结束一次行程。电动汽车随机出行链如图2所示。一天内, 当单辆电动汽车从首次出行起始时刻 T_{start} 出发, 经过第一次转移概率决策, 确定下一目的地1, 抽取行驶时长 $T_{r,1}$, 得到行驶里程为 d_1 , 根据目的地1的停驻时长概率密度函数抽取停驻时长 $T_{p,1}$, 得到下一出行起始时刻, 重复以上步骤, 当最终时刻达到 T_{end} , 即为结束出行。综上, 得知电动汽车各个时段行驶或停止的区域, 且每个区域的行驶时长和停驻时长不同, 既体现了电动汽车的个体差异, 又在提高车辆出行行为随机性的同时, 减少了计算量。

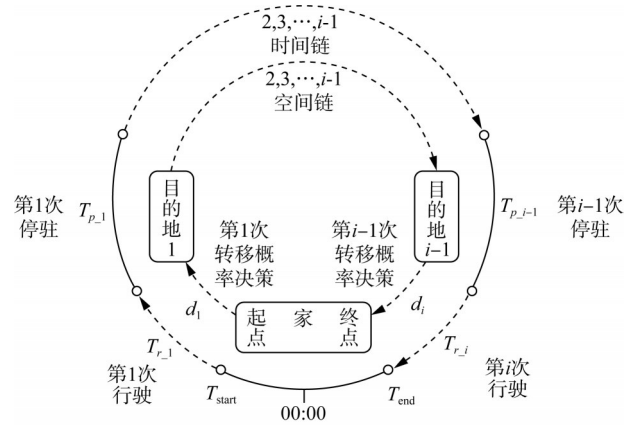


图2 电动汽车随机出行链

Fig. 2 Stochastic travel chain for electric vehicles

2.2 基于非齐次半马尔科夫链理论的状态转移概率

本文使用马尔科夫状态转移矩阵来描述电动汽车在不同区域不同时间的转移规律。设电动汽车在时间 t_n 的状态为 G_n (n 为状态数量), 即:

$$G_n(t_n) = g_n \quad (16)$$

状态转移概率表示为在当前状态 i 的条件下, 转移到下一状态 j 的概率。即:

$$\begin{aligned} P(G_{n+1}(t_{n+1}) = j | G_n(t_n) = i, G_{n-1}(t_{n-1}) \\ = g_{n-1}, \dots, G_0(t_0) = g_0) \\ = P(G_{n+1}(t_{n+1}) = j | G_n(t_n) = i) = p_{ij} \end{aligned} \quad (17)$$

马尔科夫过程存在无后效性, 即下一状态 g_{n+1} 仅与当前状态 g_n 有关, 与之前的状态 $g_{n-1}, \dots, g_0$

无关。根据电动汽车转移特性, 满足以下约束条件。

$$P_t = \begin{pmatrix} p_{t,1,1} & \cdots & p_{t,1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{t,n,1} & \cdots & p_{t,n,n} \end{pmatrix} \quad (18)$$

其中, $\begin{cases} 0 \leq p_{t,m,q} \leq 1 \\ \sum_{q=1}^n p_{t,m,q} = 1 \end{cases}$, t 表示时间, $m, q = 1, 2, \dots, n$

2.3 电动汽车出行特征量

1) 日首次出行起始时刻 T_{start} , 据文献[14]统计, 电动汽车用户日首次出行起始时刻服从正态分布函数, $\mu_s = 7.5$, $\sigma_s = 8$, 如式(19)所示。

$$f_s(x) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (19)$$

2) 行驶时长, 电动汽车的行驶时长的概率密度服从广义极值分布, 如式(20)所示。

$$f_r(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_r} \exp\left(-(1 + \xi z)^{-1 - \frac{1}{\xi}}\right) (1 + \xi z)^{-1 - \frac{1}{\xi}}, & \xi \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma_r} \exp(-z - \exp(-z)), & \xi = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$z = \frac{x - \mu_r}{\sigma_r} \quad (21)$$

式中 σ_r 、 μ_r 为广义极值分布的尺度参数与位置参数, 不同目的地之间的行驶时长不同, 其值参考文献[32]。

3) 停驻时长, 根据文献[19]统计, 电动汽车在不同目的地的停驻时长由该地的场所性质决定。研究显示, 在家的停驻时长的概率密度 $S_H(x)$ 如式(22)所示; 而在工作区的停驻时长的概率密度 $S_W(x)$ 如式(23)所示。

$$S_H(x) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x}{\alpha}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$S_W(x) = \begin{cases} \sum_{m=1}^8 a_m \sin(b_m x + c_m), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中 a_m 、 b_m 、 c_m 为停驻时长的概率密度分布的参数, 其值参考文献[19]。

4) 充电时长, 电动汽车的充电时长满足以下条件:

$$t_{\text{cha},ij} = \begin{cases} T_{p,ij}, & t_{\text{cha},ij} \geq T_{p,ij} \\ (C_{\text{max}} - \sum_{t=k}^{t_j} C_t) \frac{Q}{P_0}, & t_{\text{cha},ij} < T_{p,ij} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $t_{\text{cha},ij}$ 为状态 i 、 j 之间的充电时长; $T_{p,ij}$ 为状态 i 、 j 之间的停驻时长; C_t 为电动汽车在停驻阶段每个时刻的荷电状态; k 为停驻阶段的起始时刻; t_j 为状态 j 的开始时刻; P_0 为常规充电功率; Q 为电池容量。

2.4 电动汽车充电决策机制

利用非齐次半马尔科夫链理论搭建起电动汽车出行链, 得到用户的每日出行行驶状态, 包括各个时段所经过的区域以及每段行程的耗电量。设计以下充电决策机制判断电动汽车是否充电: 1) 在每段行程结束时, 电池电量应保持在不低于 λ 倍的电池容量。2) 计算当前行程结束时的电池电量, 若当前电量大于 λ 倍的电池容量与下一段行程所需电量之和, 则不需要充电。电动汽车电池在充电过程中会逐渐退化, 这种退化会影响电池的寿命和性能, 从而带来一定的成本。根据文献[28-30]研究表明, 当 λ 取 0.2 时, 电池内阻变化最小, 电池衰退程度最低。

综上, 电动汽车日出行成本的目标函数可以表示为:

$$\begin{cases} E^{\text{EV}} = E_{\text{cha}} + E_{\text{deg}} \\ E_{\text{cha}} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \gamma_t^{\text{MGO}} \cdot P_{n,t,\text{EV}} \cdot \Delta T \\ E_{\text{deg}} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T a_n P_{n,t,\text{EV}}^2 + b_n P_{n,t,\text{EV}} \\ 0 \leq P_{n,t,\text{EV}} \leq P_{n,t,\text{EV}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: E_{cha} 为电动汽车充电成本; E_{deg} 为电动汽车在充电过程中产生的电池退化成本; $P_{n,t,\text{EV}}$ 为不同种类的电动汽车在 t 时段内的充电功率; ΔT 为电动汽车充电时间段; a_n 、 b_n 为电池退化系数; $P_{n,t,\text{EV}}^{\text{max}}$ 为电动汽车充电功率的允许限值; N 为电动汽车种类。

3 主从博弈模型及求解策略

3.1 博弈模型

微网运营商通过与用户聚合商进行主从博弈确定最优的售能方案, 用户聚合商通过售电方案对自身电、热柔性负荷和电动汽车充电策略进行动态调整。由决策顺序可得, 微网运营商为领导者, 用户聚合商为跟随者。主从博弈模型如图 3 所示。

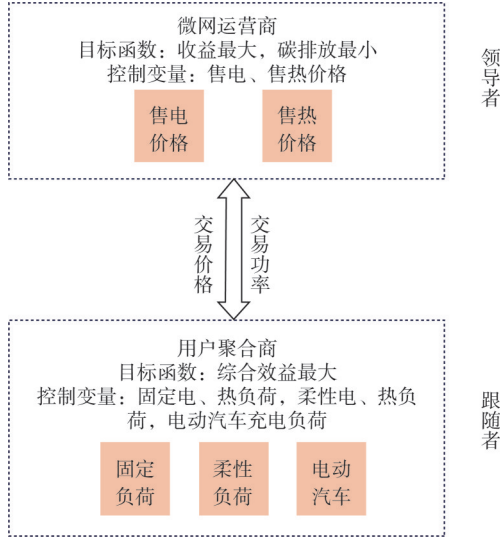


图 3 博弈模型图

Fig. 3 Stackelberg game model diagram

3.2 模型求解方法及流程

对于微网运营商, 目标函数为一天内收益最大和碳排放量最小, 求解一天内最优售电售热价格; 对于用户聚合商, 目标函数为一天内收益最大, 求解一天内最优柔性电负荷分布、热负荷削减量以及电动汽车充电负荷分布。

利用遗传算法初始化、更新上层微网运营商的售能方案, 下层问题用 cplex 求解器进行求解, 流程如下。

1) 初始化微网运营商, 用户聚合商以及电动汽车的参数, 迭代次数 $k=0$, 设定种群 $m=40$, 迭代次数为 150, 种群交叉概率为 0.8, 变异率为 0.05, 收敛误差 $\varepsilon=0.01$ 。

2) 利用遗传算法随机生成微网运营商的售电价格和售热价格, 并将方案传递下层。下层用户聚合商接收售能方案后, 利用 cplex 求解器求解电、热负荷分布优化结果并计算用户聚合商收益 E_{user}^k , 再将用户侧的购电量和购热量返回给上层。微网运营商根据下层用户侧用能方案计算当前收益 E_{MGO}^k 。

3) 然后利用遗传算法的选择、变异生成新的售能策略, 重复步骤(2), 计算用户聚合商的收益 E_{user}^{k+1} 和微网运营商的收益 E_{MGO}^{k+1} 。

4) 当 $E_{\text{MGO}}^{k+1} > E_{\text{MGO}}^k$, 则 $E_{\text{MGO}}^{k+1} = E_{\text{MGO}}^{k+1}$, $E_{\text{user}}^{k+1} = E_{\text{user}}^k$; 反之, $E_{\text{MGO}}^{k+1} = E_{\text{MGO}}^k$, $E_{\text{user}}^{k+1} = E_{\text{user}}^{k+1}$ 。

5) 若满足收敛条件: $|E_{\text{MGO}}^{k+1} - E_{\text{MGO}}^k| \leq \varepsilon$ 且 $|E_{\text{user}}^{k+1} - E_{\text{user}}^k| \leq \varepsilon$, 则结束程序; 反之, 返回

步骤3)。

具体求解流程如图4所示。

4 算例分析

4.1 参数与场景设置

本文算例以某市工业园区为研究对象, 假设一天分为 $T=24$ 个时间段, 微网运营商侧的 CHP 参数及风电参数等数据参考文献[31]; 绿证-碳交易联合机制的相关参数参考文献[26]; 用户侧柔性负荷占比与热负荷上下限及遗传算法等参数参考文献[25]; 电动汽车出行特征量等参数参考文献[32-33]; 电动汽车相关参数见文献[19]。针对本文建立的含电动汽车随机出行链与绿证-碳交易联合机制的园区综合能源系统主从博弈模型, 使用 Matlab 对以下场景进行建模, 并分析所提模型在园区综合能源系统的经济与环境效益两个角度的优点。4 种场景设置如下。

场景1: 考虑电动汽车普通出行链, 不考虑绿证-碳交易联合机制; 场景2: 考虑电动汽车随机出行链, 不考虑绿证-碳交易联合机制; 场景3: 考虑电动汽车普通出行链, 考虑绿证-碳交易联合机制; 场景4: 考虑电动汽车随机出行链与绿证-碳交易联合机制。

4.2 不同场景下优化结果分析

4 种场景的各主体的收益或成本优化结果如表1所示。相比考虑电动汽车普通出行链而不考虑电动汽车随机出行链以及绿证-碳交易联合机制(场景1), 分别考虑电动汽车随机出行链(场景2)与绿证-碳交易联合机制(场景3)可以为园区综合能源系统带来更好的低碳效益。

其中, 场景2的电动汽车随机出行链模型相较于场景1实际碳排放量下降 426.75 kg, 微网运营商收入增加 130 6.76 元, 园区综合能源系统的风光消纳率增加 6%。这是因为在园区综合能源系统中加入电动汽车随机出行链, 可以更好的消纳风光出力, 充分利用可再生能源充电, 进一步优化园区综合能源系统的经济效益; 并促使热电联供机组输出功率减少, 使得系统的碳排放量大幅降低。

场景3相比于场景1, 园区综合能源系统的实际碳排放量减少 868.06 kg, 园区综合能源系统的风光消纳率增加 9%。加入绿证-碳交易联合机制后, 促进系统节能减排, 微网运营商侧热电联供机

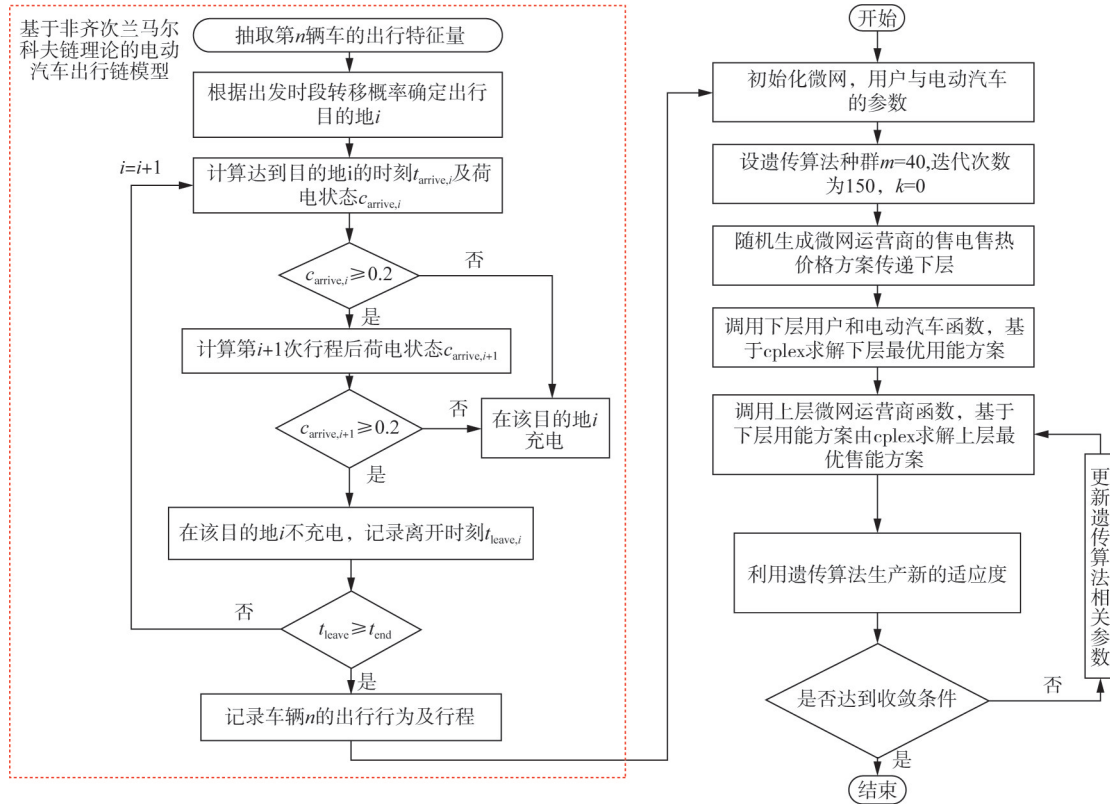


图 4 模型求解流程图

Fig. 4 Flowchart for model solving

表 1 不同场景下各主体的收益与成本分析

Tab. 1 Analysis of the benefits and costs of each subject under different scenarios

场景	1	2	3	4
微网运营商/元	10 849.48	12 156.24	11 669.55	12 202.32
用户聚合商/元	15 579.96	17 149.65	15 337.16	15 645.44
电动汽车充电成本/元	14 845.80	16 911.44	14 445.98	15 404.73
绿证收益/元			572.85	607.63
碳交易成本/元			1 073.13	1 016.67
实际碳排放量/kg	3 123.49	2 696.74	2 255.43	1 421.55
风光消纳率	0.84	0.90	0.93	0.98

组的出力下降, 风电机组的出力增多, 用户聚合商侧增加从微网运营商的购电量, 利用电制热设备满足自身热需求。

场景 4 结合场景 2 和场景 3 的优势, 园区综合能源系统的风光消纳率可达 98%。相较于场景 2 与场景 3 分别减少碳排放 127 5.19 kg 与 833.88 kg, 大大降低了园区综合能源系统的实际碳排放量; 同时, 相较于场景 3, 场景 4 在加入电动汽车随机出行链后微网运营商与用户聚合商的收入分别增加了 532.77 元与 308.28 元。进一步证明了加入基于非

齐次半马尔科夫链理论的电动汽车随机出行链, 有效促进风光在园区的消纳, 降低系统的碳排放量, 验证了其合理性。

本文将重点针对场景 1 (考虑普通出行链及不考虑绿证-碳交易联合机制) 与场景 4 (本文所提模型) 展开分析。主要讨论电动汽车普通出行链与随机出行链对领导者微网运营商制定售能价格的影响, 同时分析用户聚合商侧的柔性负荷占比情况, 并分析不同出行需求的电动汽车对提高园区综合能源系统的经济与环境效益的贡献。

场景 4 的微网运营商与用户聚合商的收益优化结果以及园区内风电机组、光伏机组与用户侧的电、热负荷曲线分别如图 5—6 所示。场景 1、4 的微网运营商售能策略优化结果如图 7—8 所示。场景 1、4 的用户聚合商电、热需求响应结果如图 9—10 所示。

结合图 7—10 分析, 图 7—8 反映了场景 1、4 的微网运营商售电价格和售热价格变化, 这是由于加入电动汽车随机出行链和绿证-碳交易联合机制后, 改变了微网运营商侧热电联供机组的出力以及

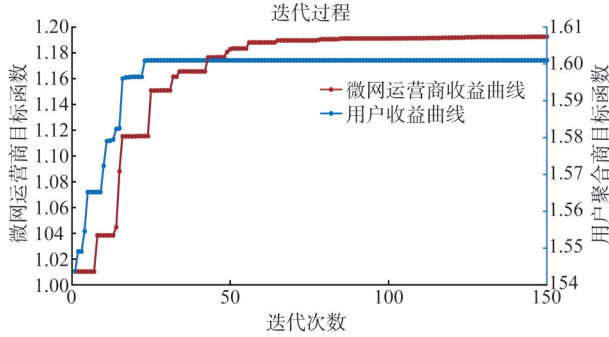


图5 场景4的园区综合能源系统收益迭代图

Fig. 5 Iterative diagram of the benefits of integrated energy systems in parks for Scenario 4

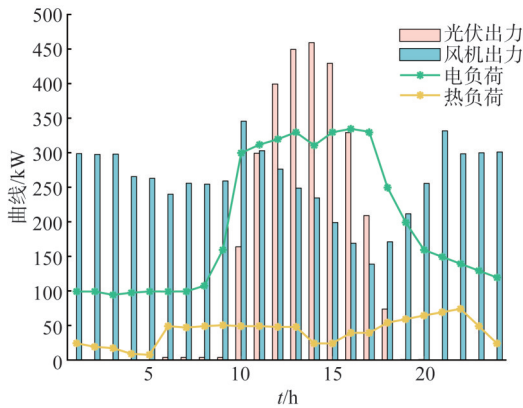


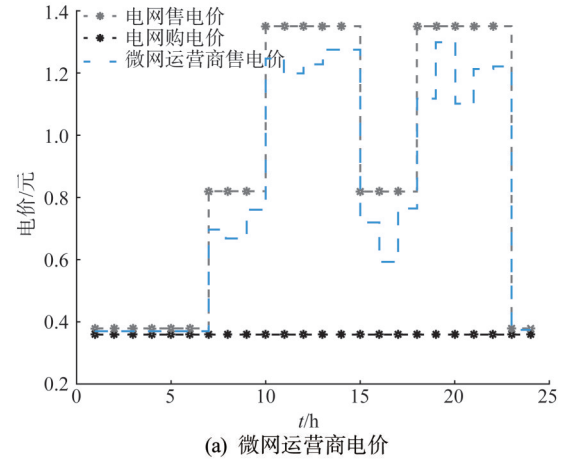
图6 园区综合能源系统负荷曲线图

Fig. 6 Load profile of integrated energy systems in parks

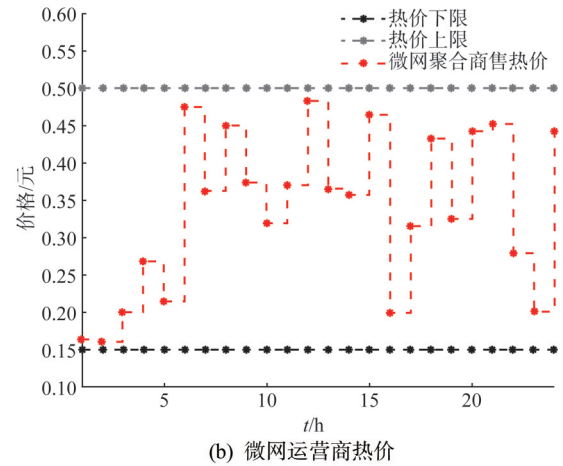
调节了用户聚合商侧电负荷与热负荷的大小,进一步优化了主从博弈中领导者与跟随者的决策。图9—10反映了场景1、4的用户都趋向于在低价时段增加购电量,在高价时段减少用电量;同时,在供电价格低于供热价格的时间段内,用户均选择使用电制热设备满足自身热需求。相较于考虑电动汽车普通出行链的场景1,场景4在园区综合能源系统中加入电动汽车随机出行链模型并考虑绿证-碳交易联合机制后,可以看出场景4中的用户聚合商侧的柔性负荷占比更大,更能降低自身的用电成本;同时相比于场景1,场景4的用户侧电热负荷灵活性更强,这是因为加入绿证-碳交易联合机制后,促使用户更多地使用电制热设备,减少园区综合能源系统的碳排放量,大幅提高了园区的经济与环境效益。

4.3 敏感因素分析

在场景4中,针对不同绿证价格下,微网运营商的收益、碳交易成本和绿证收益的变化如图11



(a) 微网运营商电价



(b) 微网运营商热价

图7 场景1的微网运营商售能策略图

Fig. 7 Energy sales strategy diagram of micronetwork operator for scenario 1

所示。不同碳交易价格下,碳交易成本和碳排放量的变化如图12所示。

由图11所示,随着绿证价格逐渐增大,绿证收益呈线性递增趋势,微网运营商收益逐渐增大,值得注意的是,当绿证价格在 $[10, 50]$ 内变化时,绿证收益小于碳交易成本;当绿证价格在 $[50, 100]$ 内变化时,绿证收益大于碳交易成本。这是由于绿证价格偏低时,微网运营商的风机出力较少,绿证收益减少,热电联供机组出力较多,微网运营商购电量增加,碳排放量增加,碳交易成本增加,微网运营商的收益偏低;当绿证价格偏高时,激励风机出力,绿证收益增加,热电联供机组出力减少,微网运营商购电量减少,碳排放量相应减少,碳交易成本降低,微网运营商收益增加。由此可见,绿证价格偏低时,会对园区综合能源系统产生

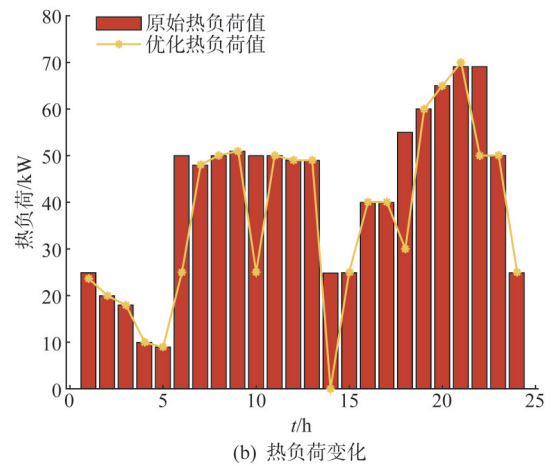
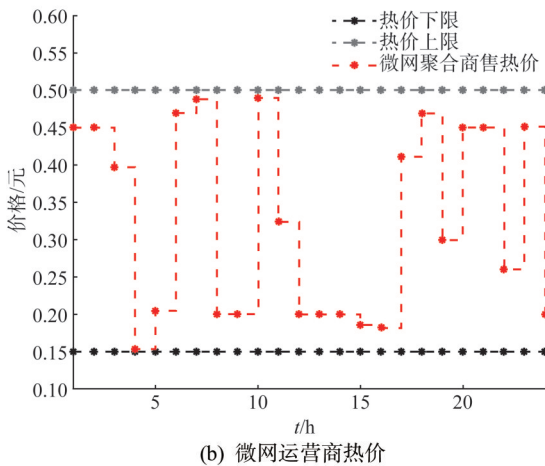
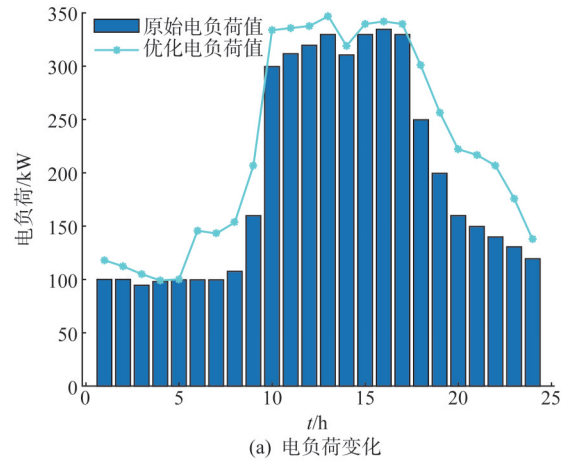
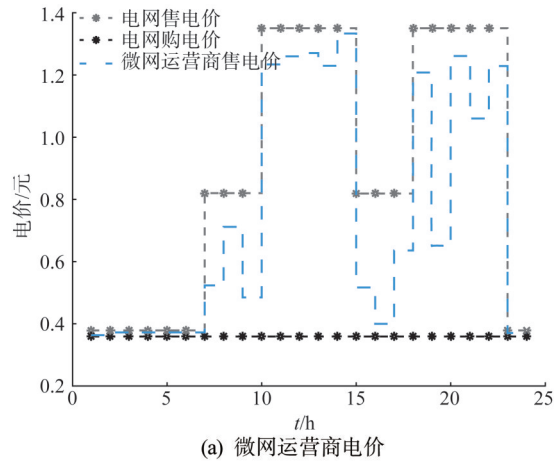


图 8 场景4的微网运营商售能策略图

Fig. 8 Energy sales strategy diagram of micronetwork operator for scenario 4

图 9 场景1的用户聚合商电热需求响应结果

Fig. 9 Electric heat demand response results of user aggregator for scenario 1

经济性影响。

由图 12 所示,随着碳交易价格逐渐增大,碳排放量呈递减趋势,碳交易成本整体呈上升趋势。当碳交易价格在 $[210, 230]$ 内变化时,碳排放量降低速率较快;当碳交易价格在 $[190, 220]$ 内变化时,碳交易成本增大速率最慢。由此可见,当碳交易价格升高在一定范围内,可以降低碳排放量并减少碳交易成本,但当碳交易价格偏高时,虽然减少了碳排放量,但碳交易成本过高。由此可见,碳交易价格过高时,会对园区综合能源系统产生经济性影响。

5 结论

本文针对园区内存在的可再生能源供需失衡以及园区综合能源系统整体的经济问题,提出了一种

考虑电动汽车出行链的园区综合能源系统低碳运行研究模型,并通过算例分析验证了所提模型的合理性,主要结论如下。

1) 本文在微网运营商侧引入绿证-碳交易联合机制后,改变了热电联供机组的出力和其售能策略。经过对比,系统的碳排放量下降了 21%。证明文中引入绿证-碳交易联合机制在降低碳排放方面具有明显优势。

2) 利用非齐次半马尔科夫链理论模拟电动汽车出行行为,构建了电动汽车随机出行链,同时建立了含电动汽车的用户与微网运营商的主从博弈模型,满足了电动汽车在复杂出行链下的充电需求,促进了风电、光伏等新能源在园区的消纳,实现了园区中各主体的共赢。

本文考虑了微网运营商和用户的博弈行为,忽

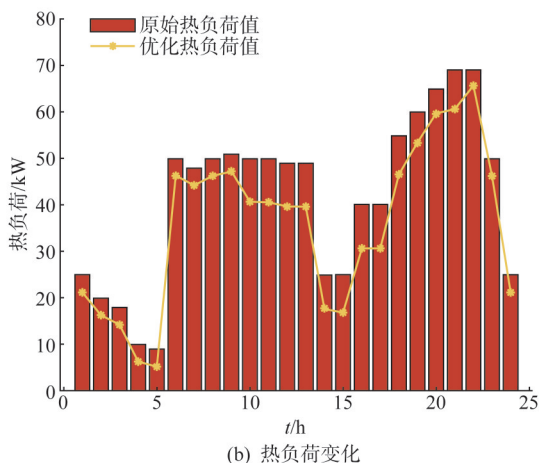
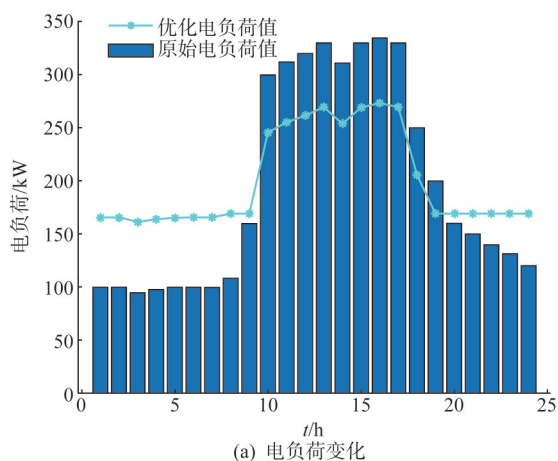


图10 场景4的用户聚合商电热需求响应结果

Fig. 10 Electric heat demand response results of user aggregator for scenario 4

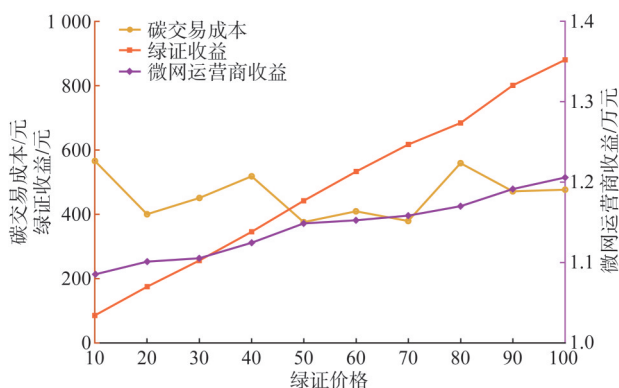


图11 不同绿证价格下各收益变化图

Fig. 11 Variation of each return at different green certificate prices

略了电网也可以作为博弈方主动参与博弈中,如何平衡和优化各方的策略也是未来研究中值得关注的问题。另外本文未充分考虑电动汽车实际出行行为

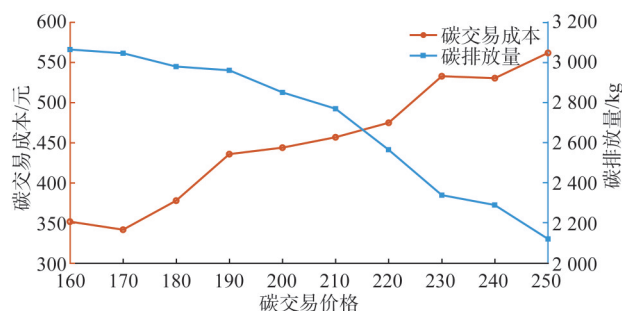


图12 不同碳交易价格下碳交易成本和碳排放量的变化图

Fig. 12 Plot of carbon trading costs and carbon emissions at different carbon trading prices

的随机性,在后续的研究工作中需进一步考虑多种因素(如天气)对模型随机性的影响,增强模型的适用性。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 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):2256-2272.
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [3] 于东民,杨超,蒋林洳,等.电动汽车充电安全防护研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(6):2145-2164.
YU Dongming, YANG Chao, JIANG Linru, et al. Review on safety protection of electric vehicle charging[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2145-2164.
- [4] 曾艾东,邹宇航,郝思鹏,等.考虑阶梯式碳交易机制的园区工业用户综合需求响应策略[J].高电压技术,2022,48(11):4352-4363.
ZENG Aidong, ZOU Yuhang, HAO Sipeng, et al. Comprehensive demand response strategy of industrial users in the park considering the stepped carbon trading mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4352-4363.
- [5] 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.
- [6] 周步祥,陈阳,臧天磊,等.考虑气网掺氢与低碳奖励的气电耦合系统优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(2):1-8.
ZHOU Buxiang, CHEN Yang, ZANG Tianlei, et al. Optimal scheduling of natural gas-electricity coupling system considering hydrogen-mixed natural gas network and low-carbon reward[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 1

- 8.
- [7] 李若琼, 司宇杰, 杨承辰, 等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116 - 129.
- LI Ruojiong, SI Yujie, YANG Chengchen, et al. Day-ahead and intra-day low-carbon optimal scheduling of new power system source-load considering flexible load [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 116 - 129.
- [8] 刘晓军, 聂凡杰, 杨冬锋, 等. 碳捕集电厂-电转气联合运行模式下考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2207 - 2222.
- LIU Xiaojun, NIE Fanjie, YANG Dongfeng, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering green certificates-carbon trading mechanism under CCPP-P2G joint operation model [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2207 - 2222.
- [9] 韩晓娟, 王祖冉, 徐铭璐. 基于碳-绿证交易的多场景源网荷储两阶段鲁棒-博弈优化调度[J]. 电网技术, 2026, 50(1): 188 - 197.
- HAN Xiaojuan, WANG Zuran, XU Minglu. Robust optimal scheduling method of multi-scenario source-network-load-energy storage robust-game based on carbon-green certificate trading mechanisms [J]. Power System Technology, 2026, 50(1): 188 - 197.
- [10] 王愿, 李彦斌, 宋明浩, 等. 计及多重不确定性和时间相关性的虚拟电厂参与碳-绿证协同交易优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4938 - 4947.
- WANG Yuan, LI Yanbin, SONG Minghao, et al. Optimal scheduling of virtual power plant participating in carbon-green certificates collaborative trading considering multiple uncertainties and time correlations [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4938 - 4947.
- [11] 刘自发, 伊特格勒. 计及电动汽车碳交易的主动配电网两阶段优化调度[J]. 现代电力, 2025, 42(5): 1060 - 1070.
- LIU Zifa, YI Tegele. Two-stage optimal dispatching of active distribution network considering electric vehicles carbon trading [J]. Modern Electric Power, 2025, 42(5): 1060 - 1070.
- [12] 吴佳琦, 张谦, 黄耀宇, 等. 计及电动汽车的综合能源系统多主体协同低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 36 - 47.
- WU Jiaqi, ZHANG Qian, HUANG Yaoyu, et al. Multi-agent collaborative low-carbon economic dispatch in integrated energy system considering electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 36 - 47.
- [13] 肖秋瑶, 杨颢, 宋政湘. 考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1392 - 1401.
- XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1392 - 1401.
- [14] 赵书强, 周靖仁, 李志伟, 等. 基于出行链理论的电动汽车充电需求分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 105 - 112.
- ZHAO Shuqiang, ZHOU Jingren, LI Zhiwei, et al. EV charging demand analysis based on trip chain theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 105 - 112.
- [15] 钱科军, 谢鹰, 张新松, 等. 考虑充电负荷随机特性的电动汽车充电网络模糊多目标规划[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4404 - 4414.
- QIAN Kejun, XIE Ying, ZHANG Xinsong, et al. Fuzzy multi-objective optimization of electric vehicle charging network with stochastic characters of charging load [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4404 - 4414.
- [16] 郑竞宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 32 - 38, 21.
- ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charge station in residential district [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 32 - 38, 21.
- [17] 徐俊俊, 程奕凌, 张腾飞, 等. 计及充电行为特征与可调性的电动汽车集群优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 23 - 32.
- XU Junjun, CHENG Yiling, ZHANG Tengfei, et al. Optimal scheduling of electric vehicle clusters considering characteristics and adjustability of charging behavior [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 23 - 32.
- [18] TANG D, WANG P. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 627 - 636.
- [19] 肖俊明, 冯超, 朱永胜, 等. 非齐次半马尔科夫充放电策略辅助用户随机出行的多目标动态电力调度[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3571 - 3582.
- XIAO Junming, FENG Chao, ZHU Yongsheng, et al. Multi-objective dynamic power dispatching model with NHSMPP charging and discharging strategy to assist random trip of users [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3571 - 3582.
- [20] 李晨朝, 陈佳佳, 王敬华. 基于主从博弈和IGDT的含电动汽车需求响应光伏园区储能优化配置[J]. 电力建设, 2025, 46(4): 126 - 136.
- LI Chenzhao, CHEN Jiajia, WANG Jinghua. Optimal configuration of energy storage in photovoltaic park with electric vehicle demand response based on Stackelberg game and information gap decision theory [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(4): 126 - 136.
- [21] TAN J, LI Y, ZHANG X, et al. Operation of a commercial district integrated energy system considering dynamic integrated demand response: A Stackelberg game approach [J]. Energy, 2023(274): 126888.
- [22] 聂永辉, 李宗锴. 基于纳什谈判和主从博弈的多园区综合能源系统优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 37 - 43.
- NIE Yonghui, LI Zongkai. Optimized scheduling of multi-campus integrated energy system based on Nash negotiation and master-slave game [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 37 - 43.
- [23] 张高, 王旭, 蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 48 - 55.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 48 - 55.
- [24] 马丽, 刘念, 张建华, 等. 基于主从博弈策略的社区能源互联网分布式能量管理[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3655 - 3662.
- MA Li, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Distributed energy

- management for community energy internet based on master-slave game strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3655 – 3662.
- [25] 帅轩越, 马志程, 王秀丽, 等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 679 – 690.
- SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 679 – 690.
- [26] 王冲, 陆煜, 左娟, 等. 计及光热电站与风氢系统互补运行的低碳经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 188 – 196.
- WANG Chong, LU Yu, ZUO Juan, et al. Low-carbon economic scheduling strategy with complementary operation of concentrated solar power plant and wind-hydrogen system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 188 – 196.
- [27] 王义, 靳梓康, 王要强, 等. 考虑电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统低碳运行[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 21 – 29.
- WANG Yi, JIN Zikang, WANG Yaoqiang, et al. Low-carbon operation of an integrated energy system in a park considering shared energy storage characteristics of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 21 – 29.
- [28] 吕国良. 基于用户出行行为的电动汽车充电负荷建模方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [29] LIAO X, MA J, JIANG Z, et al. Many-objective optimization based mutual feed scheduling for energy system of integrated energy station [J]. Applied Soft Computing, 2024 (161): 111803.
- [30] SURI G, ONORI S. A control-oriented cycle-life model for hybrid electric vehicle lithium-ion batteries [J]. Energy, 2016 (96): 644 – 653.
- [31] 陈兴龙, 曹喜民, 陈洁, 等. 绿证-碳交易机制下热电灵活响应的园区综合能源系统优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 110 – 120.
- CHEN Xinglong, CAO Ximin, CHEN Jie, et al. Optimized dispatch of park integrated energy system with thermoelectric flexible response under green certificate-carbon trading mechanism [J]. Electric Power, 2024, 57(6): 110 – 120.
- [32] 麻秀范, 李颖, 王皓, 等. 基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S2): 190 – 202.
- MA Xiufan, LI Shuo, WANG Hao, et al. Research on demand of charging piles based on stochastic simulation of EV trip chain [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 190 – 202.
- [33] 周原冰, 龚乃玮, 王皓界, 等. 中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 1 – 11.
- ZHOU Yuanbing, GONG Naiwei, WANG Haojie, et al. Study on the influence of electric vehicle development and the vehicle-grid interaction on new energy storage configuration in China [J]. Electric Power, 2024, 57(10): 1 – 11.

收稿日期: 2024-10-28; 网络首发日期: 2025-06-03

作者简介:

付波(1973), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统优化调度、智能控制和模式识别, fubofanxx@hbut.edu.cn;

丁慧晴(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, 1196722028@qq.com;

权轶(1980), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化调度和电力经济调度, quanyi@hbut.edu.cn.