

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210394

基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型

龚诚嘉锐¹, 林顺富^{1,2}, 边晓燕¹, 李东东¹, 沈运帷¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200063)

摘要: 在未来电力市场环境下, 针对具有不同利益诉求的主体实现经济优化调度问题, 基于电价型需求响应与主从博弈, 提出了以负荷聚合商经济效益最大、电动汽车与空调各自用电成本最低、分布式电源运营商经济效益最大为目标的经济优化模型。通过优化负荷聚合商发布的电价信息、调整电动汽车与空调各自用电策略以及改变分布式电源运营商售电策略实现纳什均衡。利用仿真验证了所提模型在优化各主体经济性的同时能有效降低负荷峰谷差, 提高新能源利用率。

关键词: 电动汽车; 空调; 负荷聚合商; 需求响应; 主从博弈; 多主体; 能量管理

Economic optimization model of a load aggregator based on the multi-agent Stackelberg game

GONG Chengjiarui¹, LIN Shunfu^{1,2}, BIAN Xiaoyan¹, LI Dongdong¹, SHEN Yunwei¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200063, China)

Abstract: In the future electricity market environment there will be many demands for economic optimal scheduling from different interested parties. Thus, based on the price-based demand response and the Stackelberg game, an economic optimization model is proposed to: maximize the economic benefits of the load aggregator; minimize the electricity costs of electric vehicles and air conditioners; maximize the economic benefits for the distributed generation operator. The Nash equilibrium can be achieved by optimizing the electricity price information released by the load aggregator, adjusting the respective electricity consumption strategies of electric vehicles and air conditioners, and changing the electricity sales strategies of the distributed generation operator. The simulation results show that the proposed model can optimize the economy of each subject, reduce the load peak valley difference and improve the utilization rate of renewable energy.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903400).

Key words: electric vehicles (EV); air conditioners (AC); load aggregator (LA); demand response; Stackelberg game; multi agent; energy management

0 引言

随着我国社会经济的快速发展, 能源供给侧和需求侧均出现重大变化。在供给侧, 为了缓解化石能源危机与日益严重的环境问题, 以风电、光伏为主的分布式电源大量接入电网。分布式电源出力具有间歇性、波动性, 发电时间与负荷用电时间难以匹配, 给电网运行带来难题^[1-2]; 在需求侧, 电动汽

车与空调将成为城市电网负荷的重要组成部分^[3]。2020年底, 全国电动汽车销售量为124.6万辆, 同步增长14.6%^[4]; 空调负荷在夏冬两季已占城市电网尖峰负荷的30%~40%^[5]。电动汽车和空调的增加必将对电网的运行带来挑战^[6-9]。因此, 如何有效整合供需两侧资源, 参与系统优化运行具有重要的意义。

电动汽车与空调参与需求响应是实现系统优化运行、促进分布式电源消纳的有效途径^[10-11]。目前, 已有学者对电动汽车、空调参与需求响应展开研究。文献[12]的研究结果表明, 电动汽车参与高渗透率光伏微网优化运行可有效提高微网中光伏利用率,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0903400); 上海市科学技术委员会项目资助(19020500800); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”(20SG52)

减少分布式电源并网对上级电网的冲击; 文献[13]利用电价弹性矩阵优化分时电价, 降低了系统负荷峰谷差与电动汽车充放电成本, 实现多目标优化; 文献[14]提出了基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电策略, 实现削峰填谷并兼顾了电网与电动汽车用户双方的利益; 文献[15]利用电动汽车的储能特性平抑联络线功率波动, 降低新能源接入对电网的影响, 提高了新能源利用率; 文献[16]为提高配电网中风电消纳量, 利用空调参与需求响应, 提出考虑不同主体经济性与能源效率的多目标优化模型; 文献[17]提出考虑空调用户舒适度的双层调度模型。解决了高峰时段电力供需不平衡问题, 提高了系统运行效率; 文献[18]为提高风电消纳能力, 以系统弃风量最低为优化目标, 提出空调负荷通过需求响应参与风电消纳的调度策略。上述研究为电动汽车、空调参与系统运行和实现新能源消纳提供了参考, 但多以系统经济性或新能源消纳能力为优化目标, 没有考虑电动汽车与空调自身运行成本对系统优化运行以及新能源利用率的影响, 也未考虑在电力市场环境下, 对具有不同利益诉求的主体进行优化。在国家制定的《清洁能源消纳计划》中明确要求, 推进辅助服务市场建设, 培养负荷聚合商、柔性负荷等新兴市场主体。近年来, 关于负荷聚合商进入电力市场正在有序推进, 山东、山西等省份负荷聚合商已参与市场运行。所以对负荷聚合商与柔性负荷开展经济优化研究具有重要意义。

为充分反映不同主体利益诉求, 积极调动电动汽车、空调参与需求响应, 提升新能源利用率, 本文基于电价型需求响应与主从博弈, 提出以负荷聚合商经济效益最大、电动汽车与空调各自用电成本最低、分布式电源运营商(Distributed Generation Operator, DGO)经济效益最大为目标的经济优化模型; 通过优化负荷聚合商发布的电价信息、电动汽车、空调各自用电策略以及分布式电源运营商售电策略实现纳什均衡; 利用仿真验证了所提模型在优化各主体经济性的同时能有效降低负荷峰谷差, 提高新能源利用率。并分析了电动汽车与空调不同满意度对系统运行的影响。

1 负荷聚合商参与优化运行的系统结构

负荷聚合商是需求响应资源的整合者, 可将小型的、分散的需求响应资源整合后, 参与系统运营^[19]。本文研究包含负荷聚合商、电动汽车、空调与分布式电源运营商的多主体优化运行。负荷聚合商负责向区内柔性负荷与刚性负荷供电, 赚取收益;

电动汽车、空调经负荷聚合商聚合后可参与电价型需求响应。刚性负荷不改变用电方式, 不参与需求响应; 分布式电源运营商拥有风机、光伏、储能系统。为保证经济效益, 分布式电源运营商优先考虑向负荷聚合商售电和自建储能系统充电, 再将剩余新能源出力向电网销售。本文所建立的优化模型结构图如图 1 所示。

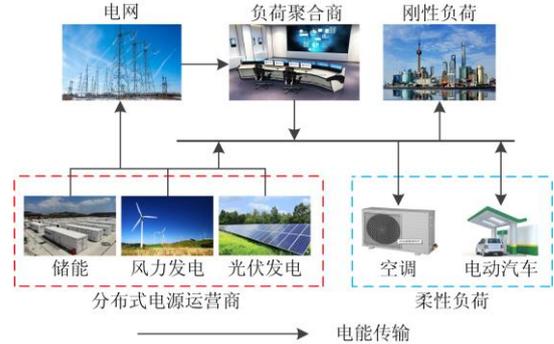


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

2 满意度模型建立

2.1 电动汽车满意度

本文以具有车入网(Vehicle-to-grid, V2G)功能的私家电动汽车为研究对象, 不讨论进行电池更换的大型电动汽车。私家电动汽车的用电行为受日行驶里程、接入、驶离电网时间影响, 可在其接入、驶离时间范围内的任意时段进行充放电。假设私家电动汽车以恒功率充放电, 电动汽车充放电功率方程与荷电状态(State of Charge, SOC)方程详见文献[20]。

本文采用电动汽车满意度 λ^{EV} 描述电动汽车参与需求响应的满意程度, 将 λ^{EV} 分为出行满意度 $\lambda^{EV,1}$ 和支出满意度 $\lambda^{EV,2}$ 。

电动汽车 k 的出行满意度 $\lambda^{EV,1}$ 可以表示为

$$\lambda_k^{EV,1} = \begin{cases} 1 & S_{lea,k}^{EV} = 90\% \\ S_{lea,k}^{EV} & \text{other} \\ 90\% & \\ 0 & S_{lea,k}^{EV} \leq (20\% + S_{w,k}^{EV}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{lea,k}^{EV}$ 表示第 k 辆电动汽车驶离电网的 SOC; $S_{w,k}^{EV}$ 表示第 k 辆电动汽车日行驶里程所需 SOC。

电动汽车 k 的支出满意度可表示为

$$\lambda_k^{EV,2} = 1 - \frac{C_k^{EV} - C_k^{EV,\min}}{C_k^{EV,\max} - C_k^{EV,\min}} \quad (2)$$

式中: C_k^{EV} 表示电动汽车运行成本; $C_k^{EV,\max}$ 和 $C_k^{EV,\min}$

分别表示电动汽车只考虑充电状态的最大、最小运行成本。

电动汽车满意度 λ^{EV} 如式(3)所示。

$$\lambda^{EV} = \frac{\sum_{k=1}^K (\lambda_k^{EV,1} + \lambda_k^{EV,2})}{2K} \quad (3)$$

电动汽车出行满意度与支出满意度数值越大,表示电动汽车用户对行驶里程、支出水平越满意。

2.2 空调满意度

本文考虑定频空调参与需求响应,空调模型详见文献[6]。

对于空调可以通过改变空调的设定温度范围,即改变空调占空比的方式改变用电功率,参与需求响应。本文采用空调满意度 λ^{AC} 描述空调用户参与需求响应的满意程度,将空调满意度 λ^{AC} 分为温度满意度 $\lambda^{AC,1}$ 和支出满意度 $\lambda^{AC,2}$ 。

本文引入描述人体与温度关系的人体舒适度评价指标(Predicted Mean Vote, PMV)衡量空调用户对室内温度的满意程度。PMV 计算公式如下^[21]。

$$I_{PMV} = 2.43 - \frac{3.76(T_s - T_a)}{M_o(I_{cl} + 0.1)} \quad (4)$$

式中: T_s 表示室内温度; T_a 表示皮肤温度; M_o 表示人体代谢率; I_{cl} 表示服装热阻。

PMV 的值 I_{PMV} 与人体感受的关系如表 1 所示。标准 ISO7730 指出 I_{PMV} 在 ± 0.5 内,人体无法察觉温度改变,《GB 50019-2016 采暖通风与空气调节设计规范》规定 I_{PMV} 属于 ± 1 范围内,满足夏季人体舒适度需求。

表 1 I_{PMV} 与人体温度舒适度关系

Table 1 Relationship between I_{PMV} and human body temperature comfort

I_{PMV}	-3	-2	-1	0	1	2	3
人体感受	寒冷	凉	较凉	适中	较暖	暖	较热

依据表 1 数据可利用式(4)分别计算出 I_{PMV} 为 0.5、-0.5、1、-1 时对应的室内温度边界 $\theta^{H,f}$ 、 $\theta^{L,f}$ 、 $\theta^{H,s}$ 、和 $\theta^{L,s}$ 。空调用户 i 在时段 t 温度满意度 $\tau_{t,i}^{AC}$ 可表示为

$$\tau_{t,i}^{AC} = \begin{cases} 1 & \theta^{L,f} \leq \theta_{t,i} \leq \theta^{H,f} \\ 1 - \frac{|\theta_{t,i} - \theta^{H,f}|}{\theta^{H,f}} & \theta^{H,f} \leq \theta_{t,i} \leq \theta^{H,s} \\ 1 - \frac{|\theta_{t,i} - \theta^{L,f}|}{\theta^{L,f}} & \theta^{L,s} \leq \theta_{t,i} \leq \theta^{L,f} \\ 0 & \theta_{t,i} \leq T_t^{L,s}, T_t^{H,s} \leq \theta_{t,i} \end{cases} \quad (5)$$

综上所述,空调用户 i 的温度满意度可以表

示为

$$\lambda_i^{AC,1} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \tau_{t,i}^{AC} \quad (6)$$

空调用户 i 的支出满意度为参与电价型需求响应前后用电成本的变化情况,如式(7)所示。

$$\lambda_i^{AC,2} = 1 - \sum_{t=1}^T P_t^{LA} \frac{(P_{t,i}^{AC} - P_{t,i}^{AC,b})}{P_{t,i}^{AC*}} \quad (7)$$

式中: $P_{t,i}^{AC,b}$ 和 $P_{t,i}^{AC}$ 分别表示空调用户在 t 时刻参与需求响应前后的空调用电功率; p_t^{LA} 表示 t 时刻负荷聚合商对柔性负荷的售电价格。

综上,空调满意度 λ^{AC} 如式(9)所示。

$$\lambda^{AC} = \frac{\sum_{i=1}^I (\lambda_i^{AC,1} + \lambda_i^{AC,2})}{2I} \quad (8)$$

空调温度满意度与支出满意度数值越大,表示空调用户对室内温度、支出水平越满意。

3 多主体主从博弈模型

3.1 各主体优化模型

1) 负荷聚合商效用模型

对负荷聚合商建立如下模型:

$$\max P^{LA} = I^{LA} - C^{LA} \quad (9)$$

$$I^{LA} = C^{AC} + C^{EV,C} + C^{Load} + C^{EV,P} \quad (10)$$

$$C^{LA} = I^{DGO,1} + C^G + C^{EV,D} \quad (11)$$

式中: P^{LA} 表示负荷聚合商的净收益; I^{LA} 和 C^{LA} 分别表示负荷聚合商的售电收益与购电成本; C^{AC} 表示空调购电成本; $C^{EV,C}$ 表示电动汽车购电成本; C^{Load} 表示刚性负荷购电成本; $C^{EV,P}$ 表示电动汽车惩罚成本; $I^{DGO,1}$ 表示负荷聚合商从分布式电源运营商的购电成本; C^G 表示负荷聚合商从电网的购电成本; $C^{EV,D}$ 表示电动汽车售电收益。

刚性负荷不参与需求响应,以固定分时电价购电,成本为

$$C^{Load} = \sum_{t=1}^T P_t^{base} p_t \quad (12)$$

式中: P_t^{base} 表示 t 时段的刚性负荷; p_t 表示 t 时段购电价格。

新发布的售电电价会导致电动汽车集中在低电价时段接入充电,在完全消纳该时段新能源后迫使负荷聚合商额外从电网购电,增加负荷聚合商运行成本。因此,负荷聚合商判断同等电价的其余时段新能源是否存在盈余,若存在,将在售电电价之外增加惩罚电价,引导电动汽车在其余时段充电,避免增加负荷聚合商购电成本;若不存在,则不发布

惩罚电价, 允许电动汽车在该时段充电。电动汽车惩罚成本为

$$C^{EV,P} = \sum_{t=1}^T \Delta P_t^{EV,C} p_t^P \quad (13)$$

$$P_t^{EV,C*} = P_t^{PV} + P_t^{WT} + P_t^{ESS} + P_t^{EV,D} - P_t^{base} - P_t^{AC} \quad (14)$$

$$\Delta P_t^{EV,C} = \begin{cases} P_t^{EV,C} - P_t^{EV,C,max} & P_t^{EV,C} > P_t^{EV,C,max} \\ 0 & P_t^{EV,C} \leq P_t^{EV,C,max} \end{cases} \quad (15)$$

$$p_t^P = 1.1 p_t^G \quad (16)$$

式中: $P_t^{EV,C}$ 表示电动汽车充电负荷; $\Delta P_t^{EV,C}$ 表示接受惩罚的充电容量; $P_t^{EV,C,max}$ 表示不接受惩罚的最大充电容量; p_t^P 表示惩罚电价; p_t^G 表示负荷聚合商从电网购电电价。

从电网购电成本为

$$C^G = \sum_t P_t^G p_t^G \quad (17)$$

式中, P_t^G 表示负荷聚合商从电网购电功率。

2) 柔性负荷效用模型

柔性负荷包括空调和电动汽车, 其参与电价型需求响应的目的是实现各自用电成本最低, 建立如下模型。

$$\min C^{AC} = \sum_t P_t^{AC} p_t^{LA} \quad (18)$$

$$\min C^{EV} = C^{EV,C} + C^{EV,P} + C^{EV,L} - C^{EV,D} + C^{EV,B} \quad (19)$$

$$C^{EV,C} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T P_{t,k}^{EV,C} p_t^{LA} \quad (20)$$

$$C^{EV,L} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left[P_{t,k}^{EV,C} (1 - \eta_c) p_t^{LA} + P_{t,k}^{EV,D} \left(\frac{1}{\eta_d} - \eta_d \right) p_t^{DR} \right] \quad (21)$$

$$C^{EV,D} = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T P_{t,k}^{EV,D} p_t^{DR} \quad (22)$$

$$p_t^{DR} = 0.8 p_t^{LA} \quad (23)$$

$$C^{EV,B} = C^{EV,f} + C^{EV,d} \quad (24)$$

式中: p_t^{LA} 表示负荷聚合商对柔性负荷售电电价; $C^{EV,L}$ 表示电动汽车的电能损耗成本; p_t^{DR} 表示电动汽车放电的售电电价; $C^{EV,B}$ 表示电动汽车的动力电池成本; 对于参与 V2G 的电动汽车而言, 在成本计算时, 还需要考虑因为放电导致的动力电池功率波动成本, $C^{EV,f}$ 表示充放电状态改变产生的动力电池寿命成本; $C^{EV,d}$ 表示动力电池放电成本。动力电池模型与相关参数详见文献[12]。

3) 分布式电源运营商效用模型

分布式电源运营商为提高经济收入, 降低分布式电源运营商的运行成本, 自身储能系统不从常规

电网购电, 在负荷聚合商无法进一步消纳分布式电源出力时, 储能系统开始充电, 消纳剩余分布式电源出力, 并且储能系统可参与电价型需求响应, 在电价较高时段放电, 以实现分布式电源运营商收益最大化。对分布式电源运营商建立如下模型。

$$\max P^{DGO} = I^{DGO1} + I^{DGO2} - M^{DGO} - C^{ESS} \quad (25)$$

$$I^{DGO1} = \sum_t ((P_t^{PV,1} + P_t^{WT,1}) p_t^{DG} + P_t^{ESS,D} p_t^{DR}) \quad (26)$$

$$I^{DGO2} = \sum_t (P_t^{PV,2} + P_t^{WT,2}) p_t^{sell} \quad (27)$$

$$M^{DGO} = \sum_t (K^{PV} P_t^{PV} + K^{WT} P_t^{WT} + K^{ESS} |P_t^{ESS}|) \quad (28)$$

$$p_t^{DG} = 1.1 p_t^{sell} \quad (29)$$

式中: P^{DGO} 、 P^{DGO1} 、 I^{DGO2} 、 M^{DGO} 以及 C^{ESS} 分别表示分布式电源运营商的净收益、对负荷聚合商售电收益、对电网的售电收益、运维成本以及储能系统寿命成本, 储能系统寿命成本模型计算详见文献[22]; P_t^{PV} 和 P_t^{WT} 分别表示风电、光伏出力, 上标 1、2 分别表示向负荷聚合商或电网售电; p_t^{DG} 表示向负荷聚合商售电电价; p_t^{sell} 表示向电网售电电价; $P_t^{ESS,D}$ 表示储能系统 t 时段放电电量; K^{WT} 、 K^{PV} 和 K^{ESS} 分别为风机、光伏和储能系统的单位电量运行维护成本系数; P_t^{ESS} 表示储能系统运行功率。

3.2 约束条件

1) 电功率平衡约束

$$P_t^{AC} + P_t^{EV,C} + P_t^{base} = P_t^G + P_t^{PV,1} + P_t^{WT,1} + P_t^{ESS} + P_t^{EV,D} \quad (30)$$

2) 负荷聚合商购电约束

$$0 \leq P_t^G \leq P_t^{Grid,max} \quad (31)$$

式中, $P_t^{Grid,max}$ 为负荷聚合商从电网购电功率的最大值。

3) 负荷聚合商售电电价约束

$$p_t^{LA,min} \leq p_t^{LA} \leq p_t^{LA,max} \quad (32)$$

$$\sum_t p_t^{LA} = C_{sum}^{price} \quad (33)$$

式中: $p_t^{LA,max}$ 和 $p_t^{LA,min}$ 分别表示负荷聚合商售电电价的最大值与最小值; C_{sum}^{price} 表示负荷聚合商售电电价之和为固定值。

4) 风机与光伏

$$P_t^{PV,1} + P_t^{PV,2} \leq P_t^{PV} \quad (34)$$

$$P_t^{WT,1} + P_t^{WT,2} \leq P_t^{WT} \quad (35)$$

5) 储能系统

储能系统包含设备容量约束、充放电状态约束、

充放电功率约束等, 详见文献[22]。

6) 电动汽车

私家电动汽车运行时的约束条件如式(26)。

$$\begin{cases} P_{t,k}^{EV} = 0, t \notin [t_k^{ar}, t_k^{lea}] \\ S_{ar,k}^{EV} = 0.9 - S_{W,k}^{EV} \\ S_{W,k}^{EV} = \frac{w_k e}{B} \\ 20\% \leq S_{t,k}^{EV} \leq 90\% \\ (20\% + S_{W,k}^{EV}) \leq S_{lea,k}^{EV} \end{cases} \quad (36)$$

式中: t_k^{ar} 和 t_k^{lea} 分别表示第 k 辆电动汽车的接入与驶离电网时间; $S_{ar,k}^{EV}$ 表示第 k 辆电动汽车接入电网的初始 SOC; w_k 表示第 k 辆电动汽车的日行驶里程; e 表示电动汽车行驶百公里耗电量; B 表示电动汽车电池容量。为保障电动汽车电池寿命, 避免过充、过放, 限制 SOC 在 20%~90% 范围内变化, 保障电动汽车顺利出行, 其驶离时荷电状态 $S_{lea,k}^{EV}$ 大于日行驶里程所需荷电状态 $S_{W,k}^{EV}$ 与电池基本荷电状态之和。

3.3 多主体主从博弈模型及求解

在本博弈模型中, 负荷聚合商作为博弈中的领导者, 先进行决策并向跟随者传递策略; 电动汽车、空调与分布式电源运营商作为跟随者, 依据领导者的策略做出决策, 传递给领导者, 直至纳什均衡[23]。本文所述博弈模型结构如图 2 所示。

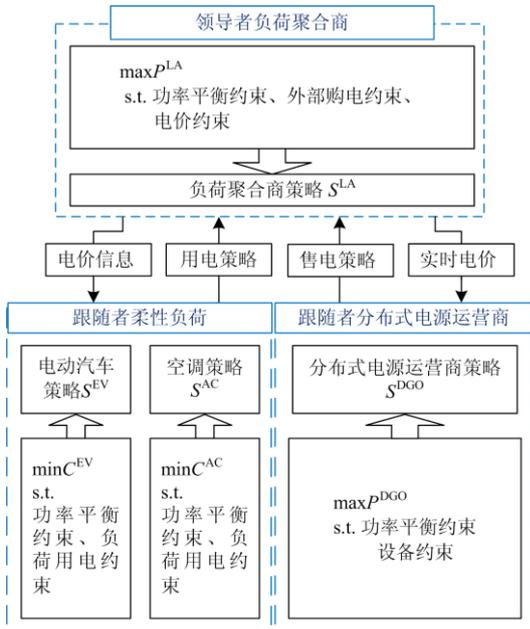


图 2 多主体主从博弈结构

Fig. 2 Structure diagram of multi-agent Stackelberg game

该主从博弈可以描述为

$$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} LA \cup EV \cup AC \cup DGO \\ \{S^{LA}(p_i^{LA}, p_i^p)\}, \\ \{S^{EV}(P^{EV,C}, P^{EV,D})\}, \{S^{AC}(\theta^{set})\}, \\ \{S^{DGO}(P_i^{PV,1}, P_i^{PW,1}, P_i^{ESS})\}, \\ \{P^{LA}\}, \{C^{EV}\}, \{C^{AC}\}, \{P^{DGO}\} \end{array} \right\} \quad (37)$$

式中: $LA \cup EV \cup AC \cup DGO$ 为博弈的全部参与者; S^{LA} 、 S^{EV} 、 S^{AC} 和 S^{DGO} 为不同参与者的策略集; P^{LA} 、 C^{EV} 、 C^{AC} 和 P^{DGO} 为各主体的效用函数。

在博弈中, LA 与 DGO 以最大化效用函数为目标; EV 与 AC 以最小化效用函数为目标, 博弈的全部参与者将调整自身策略直至实现目标。当博弈的全部参与者 $LA \cup EV \cup AC \cup DGO$ 达到纳什均衡时, 各主体不再改变策略。实现纳什均衡时有

$$(p_i^{LA*}, p_i^{p*}) = \arg \max P^{LA}(p_i^{LA}, p_i^p, P^{EV,C*}, P^{EV,D*}, \theta^{set*}, P_i^{PV,1*}, P_i^{PW,1*}, P_i^{ESS*}) \quad (38)$$

s.t.

$$\begin{aligned} (P^{EV,C*}, P^{EV,D*}) &= \arg \min C^{EV}(P^{EV,C}, P^{EV,D}, p_i^{LA*}, p_i^{p*}) \\ (\theta^{set*}) &= \arg \min C^{AC}(\theta^{set}, p_i^{LA*}) \\ (P_i^{PV,1*}, P_i^{PW,1*}, P_i^{ESS*}) &= \arg \max P^{DGO}(P_i^{PV,1}, P_i^{PW,1}, P_i^{ESS}, p_i^{LA*}) \end{aligned} \quad (39)$$

式中, *表示纳什均衡解, 全部策略均满足前文所述的约束条件。

为了避免粒子群算法陷入局部最优解, 本文采用改进粒子群算法进行求解。通过调整惯性因子, 实现权重线性递减, 较大的权重惯性有利于全局搜索, 较小的权重有利于局部搜索, 提高粒子群算法的寻优能力。惯性因子的权重线性递减方法为

$$\delta = \delta_{max} - \frac{j(\delta_{max} - \delta_{min})}{j_{max}} \quad (40)$$

式中: $\delta_{max} = 0.9$; $\delta_{min} = 0.4$; j_{max} 表示博弈模型最大迭代次数。

模型收敛判据如下。

$$\begin{cases} P_j^{LA} - P_{j-1}^{LA} = 0 \\ C_j^{EV} - C_{j-1}^{EV} = 0 \\ C_j^{AC} - C_{j-1}^{AC} = 0 \\ P_j^{DGO} - P_{j-1}^{DGO} = 0 \end{cases} \quad (41)$$

式中: P_j^{LA} 、 C_j^{EV} 、 C_j^{AC} 以及 P_j^{DGO} 分别表示第 j 次迭代运算时的负荷聚合商、电动汽车、空调以及分

布式电源运营商的效用函数; j 代表求解时迭代次数。求解流程如图 3 所示, 具体步骤如下。

- 1) 输入初始数据, 设定基本参数。包括风机、光伏日出力曲线、刚性负荷曲线、电动汽车运行参数、空调运行参数、储能系统运行参数等。
- 2) 初始化种群, 并设置种群的初始速度。
- 3) 基于负荷聚合商初始策略, 电动汽车、空调以及分布式电源运营商分别依据自身效用函数, 做出决策并传递给负荷聚合商; 负荷聚合商收到跟随者策略后做出决策, 并传递给跟随者。
- 4) 依据判据判断博弈模型是否收敛, 若收敛, 跳出循环, 输出模型结果; 否则更新粒子位置, 更新粒子速度并重复步骤 3), 直至满足收敛判据, 跳出循环, 输出结果。

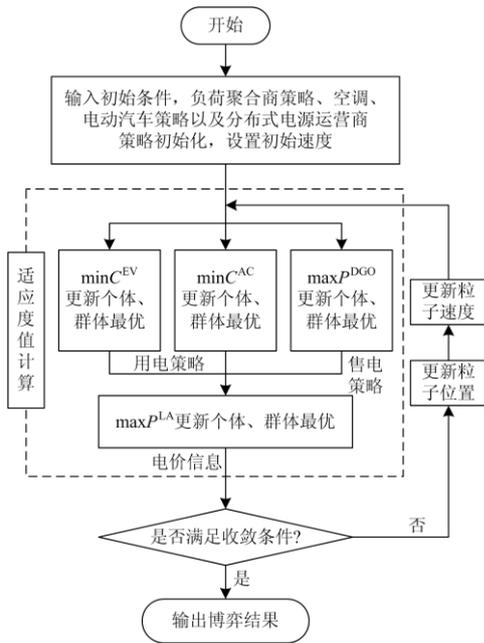


图 3 多主体主从博弈求解流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-agent Stackelberg game solving

4 算例分析

4.1 系统组成以及指标

本文在低压配电网能量管理基础上, 实现多主体经济优化, 暂未考虑不同电压等级影响。假定系统运行结构如图 1 所示, 优化周期 T 为 24 h, 时间间隔 Δt 为 1 h。分布式电源运营商的风电装机容量为 3 000 kW, 光伏装机容量为 2 500 kW, 储能系统设备参数为 300 kW/2 000 kWh, 其余储能参数详见文献[22]。该系统内部共有空调 400 台, 室内等值热阻、热阻服从正态分布, 即 $R_i^a \sim N(2, 0.27^2)$, $C_i^a \sim N(2, 0.27^2)$ 。空调初始运行状态 $s_{p,i}^{AC}$ 满足 $[0, 1]$ 内

独立同分布的均匀分布, 初始室内温度 $\theta_{p,i}$ 满足对应舒适度温度范围 $[\theta^H, \theta^L]$ 内独立同分布的均匀分布。空调运行功率 P_i^{ac} 满足 $[10, 18]$ 内独立同分布的均匀分布。空调其余相关参数详见文献[24], 该系统内部共有私家电动汽车 300 辆, 电动汽车运行参数参见文献[14], 接入与离开电网时间服从正态分布, 即 $t_k^{lea} \sim N(8.92, 3.24^2)$, $t_k^{ar} \sim N(17.1, 3.3^2)$; 日行驶里程服从对数正态分布, 即 $\ln(w_k) \sim N(3.1, 0.88^2)$ 。该负荷聚合商对刚性负荷售电价格详见文献[25], 负荷聚合商从电网购电价格与分布式电源运营商向电网售电价格详见文献[26], 其余各项参数如表 2 所示, 刚性负荷大小如图 4 所示, 夏季典型日的风机、光伏出力如图 5 所示, 该地区夏季典型室外温度如图 6 所示。

新能源利用率 φ^{use} 表示系统利用分布式电源运营商的新能源发电量占其新能源发电总量的比例。

$$\varphi^{use} = \sum_{t=1}^T \frac{P_t^{WT,1} + P_t^{PV,1} + P_t^{ESS,D}}{P_t^{PV} + P_t^{WT}} \times 100\% \quad (42)$$

表 2 设备参数

Table 2 Parameters of equipment

参数	数值	参数	数值
k^{WT} / (元/kWh)	0.11	$p_t^{LA,max}$ / 元	1.0
k^{PV} / (元/kWh)	0.08	$p_t^{LA,min}$ / 元	0.4
k^{ESS} / (元/kWh)	0.02	C_{sum}^{price} / 元	17.4
$P_t^{Grid,max}$ / kW	2 000	—	—

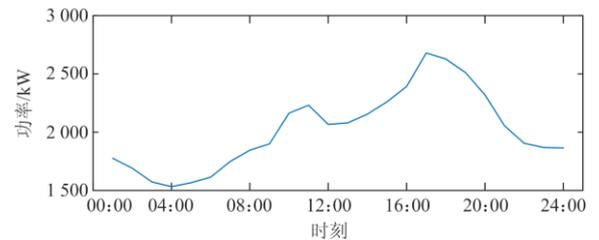


图 4 系统 24 h 刚性负荷

Fig. 4 System 24-hour rigid loads

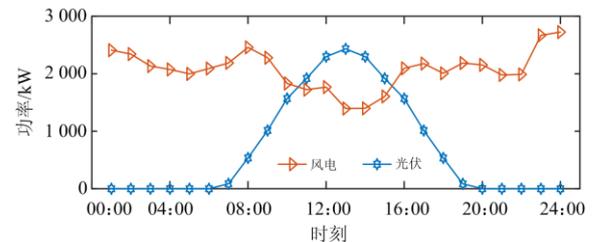


图 5 夏季典型日风光出力

Fig. 5 Typical daily power outputs of WT and PV in summer

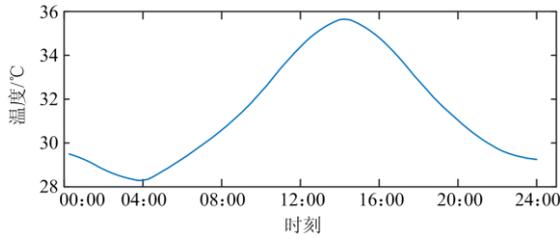


图 6 夏季典型日室外温度

Fig. 6 Typical daily outdoor temperature in summer

4.2 不同模式仿真结果及分析

为验证所提出的基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型的有效性，设计以下三种模式进行仿真验证。

1) 模式 1: 采用分时电价，空调与电动汽车均不参与需求响应(无主从博弈)。

2) 模式 2: 采用分时电价，空调温度满意度与电动汽车出行满意度均为 1 时参与需求响应(无主从博弈)。

3) 模式 3: 该模型为文中所述模型，采用电价型需求响应，利用主从博弈优化实时电价，空调温度满意度与电动汽车出行满意度均为 1 时参与需求响应。

上述三种模式各主体目标函数优化结果如表 3 所示，三种模式的新能源利用率与削峰填谷效果如表 4 所示，三种模式的柔性负荷购电电价如图 7 所示，三种模式的功率平衡如图 8 所示。

表 3 三种模式的运行性能对比

Table 3 Operation costs and benefits of the three modes

模式	p_{LA}	C^{AC}	C^{EV}	p^{DGO}	C^G	C^{Load}	C^{EVP}	C^{EVC}	C^{EVD}	C^{EVL}	C^{EVB}	$I^{DGO,1}$	$I^{DGO,2}$	M^{DGO}	C^{ESS}
模式 1	8 556	14 482	1 565	34 408	4 871	36 778	0	1 355	—	64	147	39 188	1 683	6 290	173
模式 2	8 681	13 247	981	34 482	2 568	36 778	0	988	411	136	269	39 353	1 593	6 290	174
模式 3	8 865	13 072	927	34 606	1 864	36 778	0	1 096	610	157	284	39 607	1 464	6 292	173

单位: 元

表 4 三种模式的新能源利用率与削峰填谷效果

Table 4 Renewable energy utilization rate and peak load shifting effect of three modes

模式	$\phi^{use}/\%$	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差/kW
模式 1	91.62	4 122	1 659	2 463
模式 2	92.14	3 881	1 983	1 898
模式 3	93.16	3 849	1 998	1 851

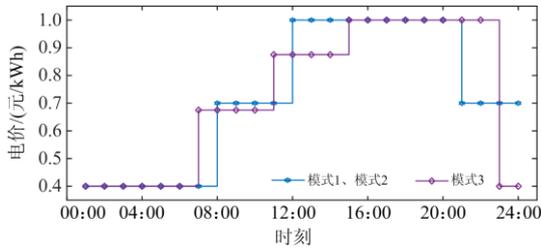
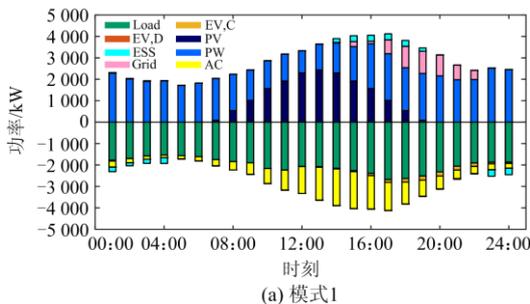
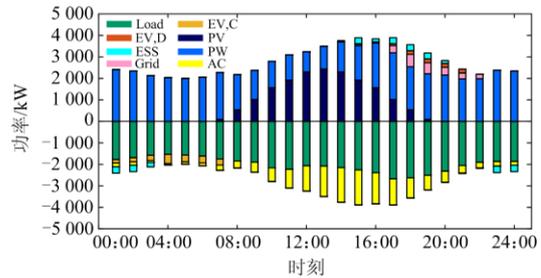


图 7 三种模式的柔性负荷购电电价

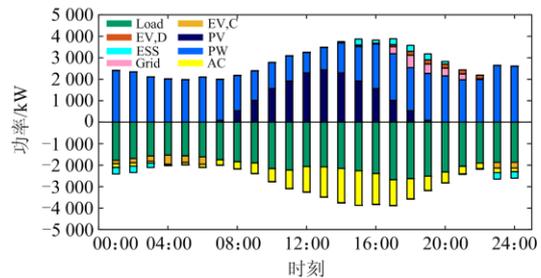
Fig. 7 Purchase electricity price of flexible loads of the three modes



(a) 模式1



(b) 模式2



(c) 模式3

图 8 三种模式的功率平衡

Fig. 8 Power balance of the three modes

在模式 1 中，因为空调不改变用电方式，电动汽车依据出行规律集中在电价为峰值时接入电网，导致该模式运行时缺乏灵活性。由表 3、表 4 可知，与模式 2、模式 3 相比，模式 1 中各主体经济性、新能源利用率以及削峰填谷表现均较差。

观察表 3 与图 8 可发现，在模式 2 中，空调负

荷参与需求响应后, 实现负荷削减, 与同样采用分时电价策略的模式 1 相比, 用电成本下降了 1 235 元。电动汽车参与需求响应后, 其充电时段与模式 1 不同, 充电负荷转移至 01:00—07:00 的低电价时段充电, 自身充电成本较模式 1 仍下降了 367 元。空调负荷与电动汽车负荷通过分时电价参与需求响应实现了削峰填谷, 相较于模式 1, 峰谷差降低 565 kW。在该时段充电有效增加了分布式电源运营商向负荷聚合商售电量, 提高了售电收益与新能源利用率。

电动汽车利用 V2G 技术在 17:00—21:00 时段内放电, 增加放电收益, 在提升自身经济性时兼顾负荷聚合商的利益, 对比图 8(a)与图 8(b)可发现, 电动汽车在该时段内放电, 有效减少负荷聚合商向电网购电量, 负荷聚合商对电网购电成本大幅降低, 由 4 871 元下降至 2 568 元。可见, 当柔性负荷依据分时电价参与需求响应后, 可降低自身用电成本, 提升负荷聚合商与分布式电源运营商的收益。

为了进一步优化各主体利益, 模式 3 在模式 2 的基础上采用主从博弈模拟不同利益主体的交互过程, 用博弈所得的实时电价代替分时电价。结合表 3, 模式 3 的空调负荷用电成本虽然较模式 2 下降了 175 元, 但降低幅度远低于模式 2 与模式 1 的用电成本之差。这是因为空调负荷主要受温度影响, 为满足用户对室内温度的要求, 几乎不改变用电行为。同时观察图 7、图 8(b)和图 8(c), 模式 3 中, 电动汽车在实时电价引导下, 在 17:00—22:00 时段内放电, 总发电量较模式 2 增加, 其售电收益同步上升, 较模式 2 增加 199 元。因电动汽车发电量增加, 负荷聚合商在该时段内从电网购电量下降。负荷聚合商向电网支付购电费用与模式 2 相比降低 704 元。同时, 电动汽车总发电量增加, 使总充电量上升, 充电成本、电能损耗成本与电池成本相继提升。

依据实时电价, 电动汽车将充电时段调整至 23:00—次日 06:00, 与模式 2 相比, 电动汽车新增了 23:00—24:00 充电时段, 增加了该时段内分布式电源运营商对负荷聚合商的售电量, 分布式电源运营商对负荷聚合商的售电收益较模式 2 提高了 254 元, 且新能源出力的利用率提升至 93.16%。在模式 3 中, 空调和电动汽车通过主从博弈与实时电价进一步挖掘自身需求响应潜力, 相较于模式 2 峰谷差降低至 1 851 kW。

对比不同模式的仿真结果, 考虑主从博弈的模式 3 比不考虑主从博弈的模式 2 可更明显提升负荷聚合商、分布式电源运营商收益, 降低空调与电动汽车的用电支出。这是因为利用主从博弈可以使博

弈中的领导者与跟随者有效互动, 更精确地反应了不同主体的利益诉求以及多主体交互时供需关系, 对参与博弈的多方主体实现了目标优化。

4.3 不同柔性负荷数量下仿真结果及分析

针对不同设备数量带来的影响。在模式 3 的基础上采用 5 个算例进行分析。算例中空调温度满意度与电动汽车出行满意度均为 1。

算例 1: 为原文中模式 3, 电动汽车 300 辆, 空调 400 台。

算例 2: 电动汽车 150 辆, 空调 400 台。

算例 3: 电动汽车 450 辆, 空调 400 台。

算例 4: 电动汽车 300 辆, 空调 300 台。

算例 5: 电动汽车 300 辆, 空调 500 台。

不同柔性负荷数量下系统运行性能仿真结果如表 5 所示。

表 5 不同柔性负荷数量的系统运行性能
Table 5 Operation performance of the different numbers of flexible loads

算例	$P^{LA}/\text{元}$	$C^{AC}/\text{元}$	$C^{EV}/\text{元}$	$P^{DGO}/\text{元}$	$\phi^{use}/\%$	峰谷差/ kW
算例 1	8 865	13 072	927	34 606	93.16	1 851
算例 2	8 744	13 158	475	34 548	91.65	1 989
算例 3	9 076	13 126	1374	34 636	94.01	1 793
算例 4	8 568	9 874	956	34 428	89.17	1 564
算例 5	8 983	1 5985	913	34 708	95.22	2 327

观察表 5 中算例 2 与算例 4 的仿真结果可以发现, 电动汽车或空调数量减少将降低自身运行成本, 负荷聚合商与分布式电源运营商收益降低, 新能源利用率降低; 由例 3 与算例 5 仿真结果可知, 电动汽车或空调数量提高将增加自身运行成本, 负荷聚合商与分布式电源运营商收益升高, 新能源利用率升高。就峰谷差而言, 观察图 8(c)可发现柔性负荷与刚性负荷叠加后, 空调负荷主要影响负荷峰值, 电动汽车负荷主要影响负荷谷值。算例 2 中电动汽车数量减少会降低谷荷, 增大峰谷差; 算例 3 中电动汽车数量增加会增大谷荷, 减小峰谷差; 算例 4 中空调数量减少会降低峰荷, 减小峰谷差; 算例 5 中空调数量增加会增大峰荷, 增大峰谷差。

4.4 不同满意度下的仿真结果及分析

为深入研究空调、电动汽车的满意度对经济运行的影响, 后续算例在模式 3 的基础上通过对 λ^{AC} 和 λ^{EV} 控制变量进行仿真分析。

1) 空调满意度分析

为研究不同空调温度满意度对系统经济性影响, 设置 3 个算例进行仿真分析, 3 个算例中电动汽车出行满意度 $\lambda^{EV,1}$ 均等于 1, 设置的 3 个算例如下。

- (1) 算例 6: 空调温度满意度 $\lambda^{AC,1}=1$;
 - (2) 算例 7: 空调温度满意度 $\lambda^{AC,1}=0.95$;
 - (3) 算例 8: 空调温度满意度 $\lambda^{AC,1}=0.90$ 。
- 不同算例仿真结果如表 6、图 9 所示。

表 6 不同算例下的经济性与满意度

Table 6 Economy and satisfaction of different cases

参数	算例 6	算例 7	算例 8
λ^{AC}	1.01	1.00	1.00
$\lambda^{AC,1}$	1.00	0.95	0.90
$\lambda^{AC,2}$	1.01	1.04	1.10
$P^{LA}/\text{元}$	8 865.63	8 716.27	8 473.94
$C^{AC}/\text{元}$	13 072.97	12 486.53	11 374.19
$P^{DGO}/\text{元}$	34 779.45	3 416.75	33 091.36
$\phi^{use}/\%$	93.16	92.76	91.05
峰谷差/kW	1 851	1 814	1 692

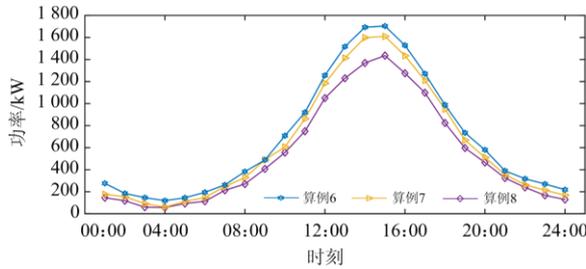


图 9 不同算例下空调功率

Fig. 9 Power of air conditioners in different cases

结合表 6 与图 9, 对比算例 6、算例 7 与算例 8, 可发现空调温度满意度由 1.00 下降至 0.90 时, 空调支出满意度由 1.01 上升至 1.10, 空调满意度由 1.01 下降至 1.00, 基本不变。随着空调温度满意度下降, 空调用电功率曲线相应降低, 导致空调用电成本下降了 1 968.78 元, 负荷聚合商收益下降 391.69 元, 分布式电源运营商收益下降 1 688.09 元, 新能源利用率降低了 2.11%, 峰谷差降低 159 kW。

这是因为当空调温度满意度降低, 空调用户减少空调开启时间, 从而使空调负荷用电量下降, 降低空调负荷用电成本, 所以空调支出满意度上升。因为空调温度满意度与空调支出满意度变化幅度相对一致, 所以空调满意度维持不变。同时, 空调负荷用电量的减少降低了峰谷差, 也降低了空调负荷对新能源的消纳能力, 导致分布式电源运营商减少向负荷聚合商的售电量, 增加向电网的售电量。负荷聚合商与分布式电源运营商收益相继降低。

2) 电动汽车满意度分析

为研究不同电动汽车出行满意度对系统经济性影响, 设置 3 个算例进行仿真分析, 3 个算例中空调温度满意度 $\lambda^{AC,1}$ 均等于 1, 设置的 3 个算例如下。

- (1) 算例 9: 电动汽车出行满意度 $\lambda^{EV,1}=1$;
 - (2) 算例 10: 电动汽车出行满意度 $\lambda^{EV,1}=0.95$;
 - (3) 算例 11: 电动汽车出行满意度 $\lambda^{EV,1}=0.90$ 。
- 不同算例仿真结果如表 7、图 10 所示。

表 7 不同算例下的经济性与满意度

Table 7 Economy and satisfaction of different cases

参数	算例 9	算例 10	算例 11
λ^{EV}	0.83	0.86	0.90
$\lambda^{EV,1}$	1	0.95	0.90
$\lambda^{EV,2}$	0.66	0.77	0.89
$P^{LA}/\text{元}$	8 865.63	8 795.91	8 749.14
$C^{EV}/\text{元}$	927.19	801.84	743.29
$P^{DGO}/\text{元}$	34 779.45	34 688.22	34 627.94
$\phi^{use}/\%$	93.16	92.83	92.45
峰谷差/kW	1 851	1 870	1 897

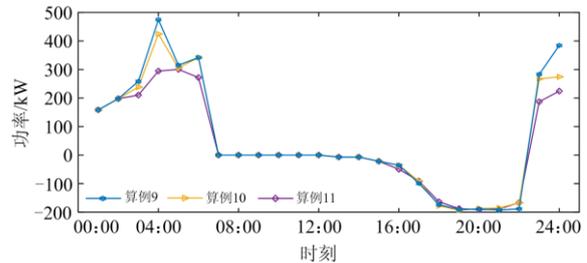


图 10 不同算例下电动汽车功率

Fig. 10 Power of electric vehicles in different cases

观察表 7, 对比算例 9、算例 10 与算例 11 的仿真结果可以发现, 电动汽车出行满意度由 1.00 下降至 0.90 时, 电动汽车支出满意度从 0.66 提升至 0.89, 电动汽车满意度由 0.83 提升至 0.90, 电动汽车运行成本减少 183.9 元, 负荷聚合商收益降低 116.49 元, 分布式电源运营商收益降低了 151.51 元, 新能源利用率降低了 0.71%, 峰谷差增加 46 kW。

结合图 10 可发现, 随着电动汽车出行满意度逐渐降低, 电动汽车发电量几乎不变, 其充电量相应减少。电动汽车出行满意度降低导致电动汽车驶离电网 SOC 降低, 充电功率减少, 放电功率几乎不变是因为部分电动汽车在接入电网时满足出行需求, 可参与放电。总充电功率减少, 使电动汽车运行成本降低, 电动汽车支出满意度提高。出行满意度下降幅度低于支出满意度的上升幅度, 所以电动汽车满意度提高。电动汽车出行满意度的降低, 使电动汽车充电负荷在 02:00—06:00 下降, 增大了峰谷差, 减少了电动汽车对新能源消纳, 降低了分布式电源运营商向负荷聚合商的售电量。因此, 负荷聚合商与分布式电源运营商的收益相继降低。

5 结论

本文提出一种基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型。研究表明, 与不考虑主从博弈相比, 利用主从博弈更明显地提高了负荷聚合商、空调、电动汽车以及分布式电源运营商的经济性, 提升了新能源利用率、减小负荷峰谷差, 实现了多方共赢。对空调与电动汽车在不同满意度下仿真结果进行分析可知, 当空调温度满意度与电动汽车出行满意度下降时, 各自支出满意度均会升高, 负荷聚合商与分布式电源运营商经济性以及新能源利用率均有所降低。空调温度满意度降低将缩小峰谷差, 电动汽车出行满意度下降将增大峰谷差。为了更好地促进空调、电动汽车参与需求响应, 提高新能源利用率, 研究风光不确定性给系统优化运行带来的影响和不同电压等级的多主体经济优化运行策略具有一定的价值。

参考文献

- [1] BIRD L, LEW D, MILLIGAN M, et al. Wind and solar energy curtailment: a review of international experience[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 577-586.
- [2] 宋汶秦, 吕金历, 赵玲霞, 等. 光热-风电联合运行的电力系统经济调度策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(5): 95-102.
SONG Wenqin, LÜ Jinli, ZHAO Lingxia, et al. Study on the economic dispatch strategy of power system with combined operation of concentrated solar power and wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(5): 95-102.
- [3] CHEN S, LIU C. From demand response to transitive energy: state of the art[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(1): 10-19.
- [4] 李奇威. 中国汽车工业发展报告(2020)[EB/OL]. <http://www.caam.org.cn/tjsj> 2020.
LI Qiwei. China automobile industry development report (2020) [EB/OL]. <https://www.caam.org.cn/tjsj> 2020.
- [5] 何金松, 叶鹏, 张涛, 等. 面向电力系统应用的空调负荷研究综述[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 15(4): 343-349.
HE Jinsong, YE Peng, ZHANG Tao, et al. Research overview of air conditioning load for power system application[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 15(4): 343-349.
- [6] 南思博, 李庚银, 周明, 等. 智能小区可削减柔性负荷实时需求响应策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 42-50.
NAN Sibao, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Real-time demand response of curtailable flexible load in smart residential community[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 42-50.
- [7] 杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 132-140.
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 132-140.
- [8] 倪凯旋. 基于分布式博弈的电动汽车充电站最优调度方法[J]. *供用电*, 2020, 37(2): 79-84.
NI Kaixuan. Optimal scheduling of electric vehicle charging station based on distributed game[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(2): 79-84.
- [9] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 92-100.
YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 92-100.
- [10] ABDORREZA R, MOHAMMAD S, JAMSHID A, et al. Optimal operation of microgrids through simultaneous scheduling of electrical vehicles and responsive loads considering wind and PV units uncertainties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 721-739.
- [11] XIE Kang, HUI Hongxun, DING Yi. Review of modeling and control strategy of thermo statically controlled loads for virtual energy storage system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 283-295.
- [12] 杨晓东, 张有兵, 蒋杨昌, 等. 微电网下考虑分布式电源消纳的电动汽车互动响应控制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(2): 390-400.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, JIANG Yangchang, et al. Renewable energy accommodation-based strategy for electric vehicle considering dynamic interaction in microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(2): 390-400.
- [13] 赵玉, 徐天奇, 李琰, 等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 92-101.
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price[J]. *Power System Protection and Control*, 2020,

- 48(11): 92-101.
- [14] 王毅, 麻秀范, 万毅, 等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充放电引导策略[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4353-4361.
WANG Yi, MA Xiufan, WAN Yi, et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4353-4361.
- [15] 王明深, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑电动汽车集群储能能力和风电接入的平抑控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 211-219.
WANG Mingshen, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Smoothing control strategy considering energy storage capability of electric vehicle aggregators and wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 211-219.
- [16] 何后裕, 郭健翔, 王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 180-187.
HE Houyu, GUO Jianxiang, WANG Yongli. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 180-187.
- [17] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [18] 罗庆, 张新燕, 晁勤, 等. 基于逆向需求响应的风力发电与储能式空调负荷的调度模型研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 191-195.
LUO Qing, ZHANG Xinyan, CHAO Qin, et al. Research on load scheduling model of wind power generation and energy storage air conditioning based on reverse demand response[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(5): 191-195.
- [19] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业务的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 78-86.
- [20] 师景佳, 袁铁江, KHAN S A, 等. 计及电动汽车可调度能力的风/车协同参与机组组合策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3433-3440.
SHI Jingjia, YUAN Tiejia, KHAN S A, et al. Unit commitment strategy considering cooperated dispatch of electric vehicles based on scheduling capacity and wind power generation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3433-3440.
- [21] 曾光, 田永铮, 赵华, 等. 环境因素及综合因素对 PMV 指标的影响分析[J]. 建筑节能, 2007(3): 11-16.
ZENG Guang, TIAN Yongzheng, ZHAO Hua, et al. Analysis on the environment and synthesis factors affecting the PMV index[J]. Building Energy Efficiency, 2007(3): 11-16.
- [22] HE G, CHEN Q, KANG C, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2359-2367.
- [23] SIVANANTHAM G, GOPALAKRISHNAN S. A Stackelberg game theoretical approach for demand response in smart grid[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2019(10): 177-184.
- [24] MATHIEU J L, KAMGARPOUR M, LYGEROS J, et al. Arbitraging intraday wholesale energy market prices with aggregations of thermostatic loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 763-772.
- [25] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3134.
GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimized operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3134.
- [26] 宫建锋, 曹雨晨, 屈高强, 等. 基于全局优化和多主体博弈的微网日前电热联合经济调度[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 22-30.
GONG Jianfeng, CAO Yuchen, QU Gaoqiang, et al. Research on day-ahead power and heat combined dispatch of microgrid based on global optimization and multi-agent game[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 22-30.

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

龚诚嘉锐(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性负荷、需求响应; E-mail: 596519426@qq.com

林顺富(1983—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量及智能电网用户端技术。E-mail: shunfulin@shiep.edu.

(编辑 许威)