

7-20-2022

## Modeling and Simulation of Optimal Strategy for Electric Vehicles Participating in Power Grid Frequency Regulation

Li Yao

*1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;; yaoli\_bfu@126.com*

Junjie Hu

*1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;; junjiehu@ncepu.edu.cn*

Wenshuai Ma

*1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

Zhile Yang

*2.Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Invited Papers & Special Columns is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Modeling and Simulation of Optimal Strategy for Electric Vehicles Participating in Power Grid Frequency Regulation

## Abstract

**Abstract:** Electric vehicles (EVs) have similar characteristics of distributed energy storage, and making full use of the flexibility of EVs can provide ancillary services to the grid and gain benefits. *Considering the influence of uncertain factors, a bidding model for electric vehicle aggregator (EVA) to participate in the day-ahead energy market and frequency regulation ancillary service market is constructed with the maximum revenue expectation of EVA as the target. A real-time energy distribution incentive strategy based on contract theory is proposed to realize the distribution of EVA's frequency regulation demand under the condition of maximizing social welfare.* Through case studies, the benefits of EVAs that aggregate different types of EVs participating in the day-ahead energy market and frequency regulation ancillary service market are compared and quantified, and the real-time energy adjustment of EVs inspired by contracts is analyzed. Simulation results show the validity of the proposed method.

## Keywords

electric vehicle, ancillary service, bidding strategy, frequency regulation reserve, contract incentive

## Recommended Citation

Li Yao, Junjie Hu, Wenshuai Ma, Zhile Yang. Modeling and Simulation of Optimal Strategy for Electric Vehicles Participating in Power Grid Frequency Regulation[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(7): 1417-1429.

# 电动汽车参与电网调频优化策略建模与仿真

姚丽<sup>1</sup>, 胡俊杰<sup>1\*</sup>, 马文帅<sup>1</sup>, 杨之乐<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 电动汽车 (electric vehicles, EVs) 具有分布式储能特性, 充分利用 EV 灵活性可以合理地电网提供辅助服务, 并获取收益。在考虑不确定性因素影响下, 以电动汽车聚合商 (electric vehicle aggregator, EVA) 收益期望最大为目标, 构建 EVA 参与日前能量及调频辅助服务市场投标模型。提出一种基于合约理论的实时能量分配激励策略, 在社会福利最大化情况下, 实现 EVA 调频需求量分配。通过算例仿真, 对比量化了聚合不同类型 EVs 的 EVAs 参与日前能量及调频辅助服务市场的收益情况, 以及分析了经过合约激励后的 EVs 的实时调整情况, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电动汽车; 辅助服务; 申报策略; 调频备用; 合约激励

中图分类号: TP391.9; TM73 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)07-1417-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0289

## Modeling and Simulation of Optimal Strategy for Electric Vehicles Participating in Power Grid Frequency Regulation

Yao Li<sup>1</sup>, Hu Junjie<sup>1\*</sup>, Ma Wenshuai<sup>1</sup>, Yang Zhile<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Electric vehicles (EVs) have similar characteristics of distributed energy storage, and making full use of the flexibility of EVs can provide ancillary services to the grid and gain benefits. Considering the influence of uncertain factors, a bidding model for electric vehicle aggregator (EVA) to participate in the day-ahead energy market and frequency regulation ancillary service market is constructed with the maximum revenue expectation of EVA as the target. A real-time energy distribution incentive strategy based on contract theory is proposed to realize the distribution of EVA's frequency regulation demand under the condition of maximizing social welfare. Through case studies, the benefits of EVAs that aggregate different types of EVs participating in the day-ahead energy market and frequency regulation ancillary service market are compared and quantified, and the real-time energy adjustment of EVs inspired by contracts is analyzed. Simulation results show the validity of the proposed method.

**Keywords:** electric vehicle; ancillary service; bidding strategy; frequency regulation reserve; contract incentive

## 引言

为了实现“双碳”目标, 习近平主席在中央财经委员会第九次会议上强调要实施可再生能源

替代行动, 构建以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1-2]</sup>。但高比例新能源出力具有间歇性、不确定性及波动性等特点<sup>[3]</sup>, 新能源的不断接入会使系统中可调度容量与可调度电力的比例大幅下降, 系

收稿日期: 2022-03-30

修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(52177080); 北京市科技新星计划(Z201100006820106)

第一作者: 姚丽(1997-), 女, 硕士生, 研究方向为电动汽车与电网互动。E-mail: yaoli\_bfu@126.com

通讯作者: 胡俊杰(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电动汽车与电网互动。E-mail: junjiehu@ncepu.edu.cn

统的调频能力和资源不足问题将变得日趋明显<sup>[4-5]</sup>。

EV (electric vehicle)具有快速精准的动态响应能力,并且EV集群能够以相对较低的成本提供可观的备用容量<sup>[6-7]</sup>,为解决高比例新能源并网下系统调频问题提供了新的研究思路<sup>[8-9]</sup>。一方面,我国作为全球最大的EV市场,具有可观的EV保有量<sup>[10]</sup>;另一方面,随着我国市场建设的快速推进,江苏等多地先后出台了调频辅助服务市场交易实施细则<sup>[11]</sup>,允许一定规模的需求侧响应资源通过EVA汇聚等方式参与调频市场交易,提供调频辅助服务,因此以EVA (electric vehicle aggregator)聚合规模化EV参与系统调频辅助服务变得切实可行<sup>[12]</sup>。

已有不少文献针对利用EV灵活性为市场提供辅助服务进行了研究<sup>[13-15]</sup>,并进行仿真验证。文献[16]构建了EV同时参与现货和备用市场的优化模型,提出了基于效容比指标求解策略的分布式算法,并基于动态仿真平台验证了算法的有效性,但文中未考虑基础负荷等不确定性影响。在EVA联合参与能量与调频辅助服务市场日前优化调度方面,多以最大化EVA在市场中的收益期望为优化目标,采用随机优化<sup>[17-19]</sup>或鲁棒优化<sup>[20-22]</sup>建立日前上报决策模型。文献[20]建立了不确定性资源灵活性的鲁棒可行集,并在此基础上,采用协调优化方法合理地分配日前发用电计划与备用容量,通过与常规模型仿真对比,验证了所提鲁棒可行集的必要性,但是忽略了EV日前容量优化与实时调控的能量耦合性。在实时对各EV充电功率分配调度方面<sup>[23-25]</sup>,文献[25]通过引入动态电价机制,构建了多利益主体EVA之间的非合作动态博弈模型,采用基于交替方向乘子法的实时分布式算法对实时优化调度策略进行求解,并通过算例仿真验证了所提模型可有效降低EVA充电成本,但是其重点探讨了电网与EVA之间的利益博弈机制,对于EVA与EV用户之间的利益博弈互动未进行探讨。

由于放电产生的电池消耗的存在,在没有经济补偿的前提下EV用户普遍不愿意参与大规模的能量交易,为了激励用户参与市场交易,还应对

EV用户与EVA之间进行利益探讨及激励设计<sup>[26-28]</sup>。同时,由于两者均为自利主体,交易过程中存在信息不对称情况<sup>[29-33]</sup>。文献[30]以平衡负荷聚合商与用户之间的实际利益为出发点,基于委托一代理理论构建了不对称情形下的最优激励模型,文献通过理论模型推导以及仿真分析给出了最优激励合约和调度策略建议,通过算例证明了所提策略不仅能提高用户参与积极性还能显著提高参与者净收益。文献[31-32]在分析EV的充放电特性的基础上,采用合约理论的方法来设计信息不对称情况下的EV最优调度策略。文献[33]提出了一种基于合约理论的产消者参与调频市场交易策略,但该文忽略了其定义的产消者类型的动态变化,同时未考虑多市场交易。总结已有的研究成果可以发现,EVA参与申报优化方法已有较多的研究,但EVA面向不同类型的EV用户,如何有针对性的设计出提高不同EV用户参与积极性的激励策略,更有效地调用EV的灵活性,仍缺乏量化的激励合同设计方法。

以上述研究工作为基础,本文首先提出一种以EVA为主体参与日前能量及辅助服务市场的能量交易框架。其次,考虑市场价格等不确定性因素影响,构建EVA日前投标模型,以EVA参与能量市场与调频辅助服务市场的收益期望最大为目标优化EVA日前申报容量。然后,提出一种基于合约理论的激励策略,以社会福利最大化为目标,对EVA调频需求进行实时分配,优化EVA管理的各EV充、放电功率。最后,通过算例对比分析不同类型EVA参与日前能量市场与调频辅助服务市场的经济效益,以及所提激励方法的优势,验证了本文所提方法的有效性。

## 1 集群EV参与调频市场的交易框架

考虑到EV单体的容量有限,以电动汽车聚合商EVA聚合区域内多种类型EV(包括私家车、公交车等)的充放电资源,代理EV参与电能量市场和调频辅助服务市场交易。据此,本文提出了一

种以 EVA 为主体的 EV 参与日前能量市场及调频辅助服务市场交易框架如图 1 所示, 该框架由电网、EVA 和 EV 三部分组成。

在日前阶段, EVA 根据历史参与调控的充电站规模及市场价格, 预测其可调容量, 并以 EVA 收益期望最大为目标, 进行日前能量及调频辅助服务市场容量申报。

在实际运行时, EVA 对其代理区域内 EV 运行状态等信息进行整合, 并将信息反馈给电网调度

中心, 调度中心下发调频功率指令给 EVA。

EVA 集中调控车辆以其在能量市场的各时段中标量为功率基点运行, 同时根据接收到的调频指令, 结合 EV 充放电参数、状态信息等情况, 以 5 min 为周期, 实时签订激励合约, 确定 EV 调频补偿价格以及 EV 调频容量。激励合约的实时签订是在满足 EVA 参与调频市场需求的同时, 给予用户一定调频补偿, 从而提高用户的参与意愿。

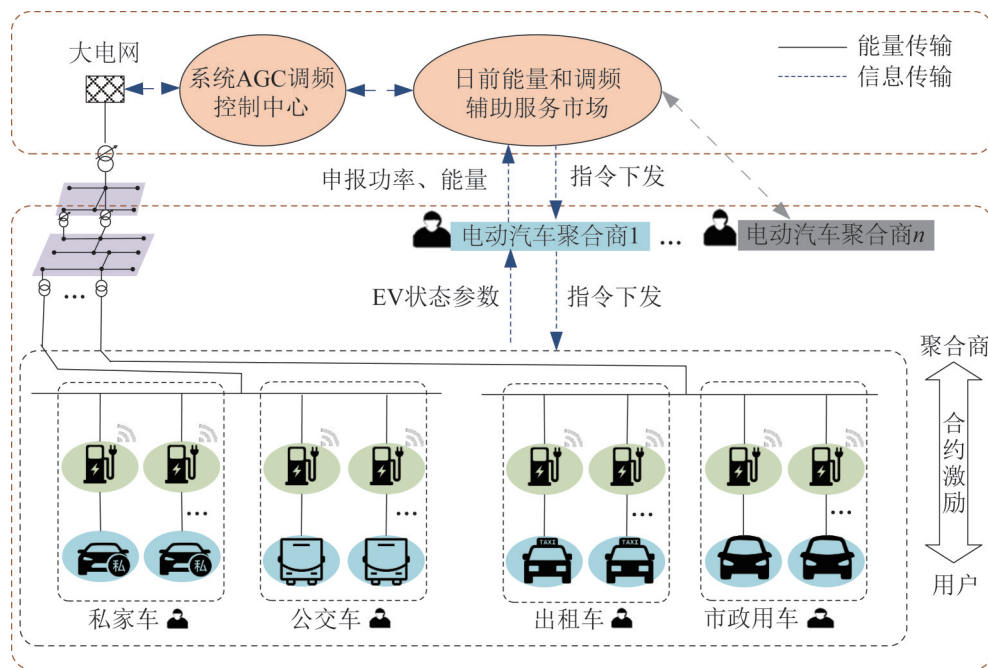


图 1 EV 参与日前能量及调频辅助服务市场交易框架

Fig. 1 Trading framework for EVs participation in the day-ahead energy market and frequency regulation ancillary services market

## 2 EV 聚合商参与市场联合优化模型

本文参考美国 PJM 电力市场相关规则<sup>[34]</sup>, 设定日前交易时间尺度为 1 h, 实时决策时间尺度为 5 min。考虑市场价格、调频需求量的不确定性, 构建 EVA 参与日前能量与调频辅助服务市场联合优化模型。

### 2.1 EV 充、放电模型

本文建立了 EV 充、放电模型, 其中 EV 充、放电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^c \leq P_j^{cmax}, & t \in [t_j^{arr}, t_j^{dep}] \\ P_j^{dmax} \leq P_{j,t}^d \leq 0, & t \in [t_j^{arr}, t_j^{dep}] \\ P_{j,t}^c = P_{j,t}^d = 0, & t \notin [t_j^{arr}, t_j^{dep}] \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{j,t}^c \cdot P_{j,t}^d = 0 \quad (2)$$

式中:  $t$  为时段编号, 每 1 h 为一个时段, 全天共有 24 个时段;  $P_{j,t}^c$ ,  $P_{j,t}^d$  分别表示车辆  $j$  在第  $t$  个时段的充电功率、放电功率;  $P_j^{cmax}$ ,  $P_j^{dmax}$  分别为第  $j$  辆 EV 最大可充、放电功率;  $t_j^{arr}$  为第  $j$  辆 EV 开始接受调度的时段;  $t_j^{dep}$  表示第  $j$  辆车离开的时段。

为保证同一辆车不能同时进行充放电, 还需

满足约束为

$$P_{j,t}^c \cdot P_{j,t}^d = 0 \quad (2)$$

只有在充电功率/放电功率为0,或同时为0时,式(2)才成立。在仿真中,为线性化式(2),本文采用优化变量 $P_{j,t}$ 表示电动汽车充放电功率<sup>[35]</sup>为

$$\begin{cases} P_j^{\text{d,max}} \leq P_{j,t} \leq P_j^{\text{c,max}}, t \in [t_j^{\text{arr}}, t_j^{\text{dep}}] \\ P_{j,t} = 0, & t \notin [t_j^{\text{arr}}, t_j^{\text{dep}}] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{j,t} > 0$  为充电,  $P_{j,t} < 0$  为放电。

充放电功率与电量的关系为

$$SOC_{j,t} = SOC_{j,t-1} + P_{j,t} \cdot \frac{\Delta t}{E_j^{\text{cap}}} \quad (4)$$

式中:  $SOC_{j,t}$  为第 $j$ 辆车在 $t$ 时段的荷电状态, 本文未考虑电池充、放电效率;  $E_j^{\text{cap}}$  为车辆 $j$ 电池的容量。

EV的电量安全约束为

$$SOC_j^{\text{min}} \leq SOC_{j,t} \leq SOC_j^{\text{max}} \quad (5)$$

式中:  $SOC_j^{\text{min}}, SOC_j^{\text{max}}$  分别为EV电池荷电态上、下限值。

EV的充电需求约束为

$$SOC_{j,t} \geq SOC_j^{\text{exp}}, t = t_j^{\text{dep}} \quad (6)$$

式中:  $SOC_j^{\text{exp}}$  为第 $j$ 辆EV用户驶离时期望的电量状态。

## 2.2 目标函数

考虑到市场价格、调频信号与EV接入、离开的不确定性, 以不同场景下EVA的收益期望最大为目标, 建立目标函数为  $\max \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_n (I_{n,t}^{\text{rev}} + I_{n,t}^{\text{eng,s}} - I_{n,t}^{\text{eng}})$ , 其中,  $n$  为场景编号, 共有 $N$ 种场景;  $\lambda_n$  为第 $n$ 个场景发生的概率;  $t$  为一天内的时段编号, 每1h为一个时段,  $T$  为时段总数, 全天共24个时段;  $I_{n,t}^{\text{rev}}, I_{n,t}^{\text{eng,s}}, I_{n,t}^{\text{eng}}$  分别为第 $n$ 个场景下第 $t$ 个时段的EVA参与调频辅助服务市场收益、EVA售电收益以及EVA购电成本, 计算方式如下

(1) 调频市场收益

$$I_{n,t}^{\text{rev}} = I_{n,t}^{\text{rev,cap}} + I_{n,t}^{\text{rev,mil}} \quad (7)$$

$$I_{n,t}^{\text{rev,cap}} = \pi_{n,t}^{\text{reg,cap}} (R_{n,t}^{\text{rup}} + R_{n,t}^{\text{rdn}}) \eta_{n,t}^r \quad (8)$$

$$I_{n,t}^{\text{rev,mil}} = \pi_{n,t}^{\text{reg,mil}} M_{n,t} \eta_{n,t}^r \quad (9)$$

式中:  $I_{n,t}^{\text{rev,cap}}, I_{n,t}^{\text{rev,mil}}$  分别表示第 $n$ 个场景下第 $t$ 个时段的调频市场容量收益、调频里程收益;  $\pi_{n,t}^{\text{reg,cap}}, \pi_{n,t}^{\text{reg,mil}}$  分别表示调频市场容量价格、里程价格;  $R_{n,t}^{\text{rup}}, R_{n,t}^{\text{rdn}}$  为EV在第 $t$ 个时段提供的上、下调频容量, 为待优化变量。

$M_{n,t}$  为第 $t$ 个时段调频里程, 计算公式为

$$M_{n,t} = \sum_{\tau \in \Gamma_t} |P_{n,t,\tau}^{\text{req}} - P_{n,t,\tau-1}^{\text{req}}| + \sum_{\tau \in \Gamma_t} |R_{n,t}^{\text{rup}} (\delta_{n,\tau}^{\text{up}} - \delta_{n,\tau-1}^{\text{up}}) + R_{n,t}^{\text{rdn}} (\delta_{n,\tau}^{\text{dn}} - \delta_{n,\tau-1}^{\text{dn}})| \quad (10)$$

式中:  $\tau$  为实时运行中的时间点, 记时段 $t$ 内的全部时刻构成集合为 $\Gamma_t$ ;  $P_{n,t,\tau}^{\text{req}}$  为需要响应的调整功率;  $\delta_{\tau}^{\text{up}}$  为上调频信号, 取值为[0,1];  $\delta_{\tau}^{\text{dn}}$  为下调频信号, 取值为[-1,0]。

$\eta_{n,t}^r$  表示时段 $t$ 内的运行准确度<sup>[14,35]</sup>, 计算公式为

$$\eta_{n,t}^r = 1 - \frac{\sum_{\tau \in \Gamma_t} |P_{n,t,\tau}^{\text{req}} - P_{n,t,\tau}^{\text{res}}|}{\sum_{\tau \in \Gamma_t} |P_{n,t,\tau}^{\text{req}}|} \quad (11)$$

式中:  $P_{n,t,\tau}^{\text{res}}$  为实际响应的调整功率。响应功率 $P_{n,t,\tau}^{\text{res}}$  与需求功率 $P_{n,t,\tau}^{\text{req}}$  越接近, 调频准确度越高, 当EVA完全响应系统需求时, 准确度为1。

(2) 售电收益

EVA向用户收取的费用为

$$I_{n,t}^{\text{eng,s}} = \pi_{n,t}^{\text{eng,s}} P_{n,t} \Delta t \quad (12)$$

式中:  $\pi_{n,t}^{\text{eng,s}}$  为第 $n$ 个场景下第 $t$ 个时段的EVA售电价格;  $\Delta t$  为交易时段长度;  $P_{n,t}$  是集群EV在第 $t$ 个时段的功率, 计算式为

$$P_{n,t} = P_{n,t}^{\text{eng}} - R_{n,t}^{\text{rup}} + R_{n,t}^{\text{rdn}} \quad (13)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{eng}}$  为EV在第 $t$ 时段的功率基点, 为待优化变量。

(3) 购电成本

EVA向电网支付费用为

$$I_{n,t}^{\text{eng}} = \pi_{n,t}^{\text{eng}} P_{n,t}^{\text{eng,eva}} \Delta t \quad (14)$$

式中:  $\pi_{n,t}^{\text{eng}}$  为第 $n$ 个场景下第 $t$ 个时段的能量市场

价格;  $P_{n,t}^{\text{eng,eva}}$  为EVA在第 $t$ 个时段与电网交易功率, 且  $P_{n,t}^{\text{eng,eva}} = P_{n,t}^{\circ}$

### 2.3 约束条件

电动汽车参与能量市场与调频辅助服务市场运行还需要考虑的约束条件如下:

(1) 功率约束

$$-P_{\max} \leq P_{n,t} \leq P_{\max} \quad (15)$$

$$R_{n,t}^{\text{rup}} \leq P_{n,t}^{\text{eng}} + P_{\max} \quad (16)$$

$$R_{n,t}^{\text{rdn}} \leq P_{\max} - P_{n,t}^{\text{eng}} \quad (17)$$

式中:  $P_{\max}$  为EV最大功率, 在本文中假设EV充、放电功率最大值一致;  $R_{n,t}^{\text{rup}}, R_{n,t}^{\text{rdn}}$ , 其应时刻小于最大可调容量。

(2) EV容量约束

为了满足用户临时取车等不确定性要求, EVA必须保证参与调控EV的电量始终大于保底电量, 且离网时达到其期望电量。

每辆EV的功率与荷电状态为

$$P_{n,j,t,\tau} = P_{n,j,t}^{\text{eng}} - P_{n,j,t,\tau}^{\text{rup}} + P_{n,j,t,\tau}^{\text{rdn}} \quad (18)$$

$$SOC_{n,j,t,\tau} = SOC_{n,j,t,\tau-1} + P_{n,j,t,\tau-1} \Delta\tau \quad (19)$$

式中:  $P_{n,j,t,\tau}$  为第 $n$ 个场景下第 $\tau$ 个时段第 $j$ 辆车的功率;  $P_{n,j,t}^{\text{eng}}$  为EV在第 $t$ 时段的功率基点;  $P_{n,j,t,\tau}^{\text{rup}}, P_{n,j,t,\tau}^{\text{rdn}}$  为第 $n$ 个场景下第 $\tau$ 个时段第 $j$ 辆车的上调频容量、下调频容量;  $SOC_{n,j,t,\tau}$  为第 $n$ 个场景下第 $\tau$ 个时段第 $j$ 辆车的荷电状态。

对于集群中的每辆EV, 在任意时刻其电池容量都需要满足容量约束为

$$SOC_j^{\text{base}} \leq SOC_{n,j,t,\tau} \leq SOC_j^{\text{max}} \quad (20)$$

式中:  $SOC_j^{\text{base}}$  为第 $j$ 辆车的保底电量。

同时, 每辆EV离网时还需要满足EV用户期待离网电量为

$$SOC_{n,j,t}^{\text{dep}} \geq SOC_j^{\text{exp}} \quad (21)$$

式中:  $SOC_{n,j,t}^{\text{dep}}$  为第 $n$ 个场景下第 $j$ 辆车的离网电量。

为了计算方便, 本文将所有车辆的期望离网电量设置为85%, 保底电量设置为20%。

## 3 基于合约理论的激励策略设计

EVA作为EV用户与电力市场之间的沟通桥梁, 需要提供调频补偿费用以此吸引用户参与调频辅助服务。同时, 在日前投标阶段, 采用历史数据预测的方式进行容量申报, 在实时运行时可能无法满足调频指令需求, 需要通过补偿方式, 激励车辆参与系统调频。本节提出了基于合约理论的调频补偿机制, 根据EVA调频辅助服务需求容量, 以5 min为一个时段与EV签订最优合约, 用以调度足够的EV参与调频辅助服务。

电动汽车的类型取决于许多参数, 包括电池的荷电状态、行驶计划、电池容量等, 并且可能存在显著差异。由于EVA无法准确预测用户信息, 二者间存在着信息不对称的情况, 合约理论可有效处理EVA与内部资源交易的信息不对称问题, 并且能够有效激励资源参与交易, 增加市场活力<sup>[29-33]</sup>。

### 3.1 合约建立

根据日前投标结果, 结合调频信号, 计算EV的可调容量 $\theta$ , 将EV的可调容量 $\theta$ 按升序进行排序, 并划分为 $I$ 种类型, 其集合记为 $\Theta$ ,  $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_I]$ 。针对 $I$ 种可调容量类型, 设计一份包含 $I$ 个合同条款的合约, 即 $\theta_i$ 对应的合约条目为 $(T_i, R_i)$ ,  $T_i$ 为第 $i$ 条合约调用的调频容量,  $R_i$ 为对应获得的调频补偿。因此, EVA对内部全体EV设计的合约为

$$\begin{cases} C = \{(T_i, R_i), \forall i \in \Psi\} \\ \Psi = \{1, \dots, i, \dots, I\} \end{cases} \quad (22)$$

当存在信息不对称的情况下, EVA不知道EV可实时参与调控的可调容量, 只知道EV的类型总数和概率分布, 将EV属于 $\theta_i$ 的概率表示为 $\lambda_i$ 。

在此场景下, EV选择合约的原则是自身效用最大化。对EV用户而言, 认为其效用为参与调频交易所得回报与参与调频辅助服务的生产成本的差值, 即





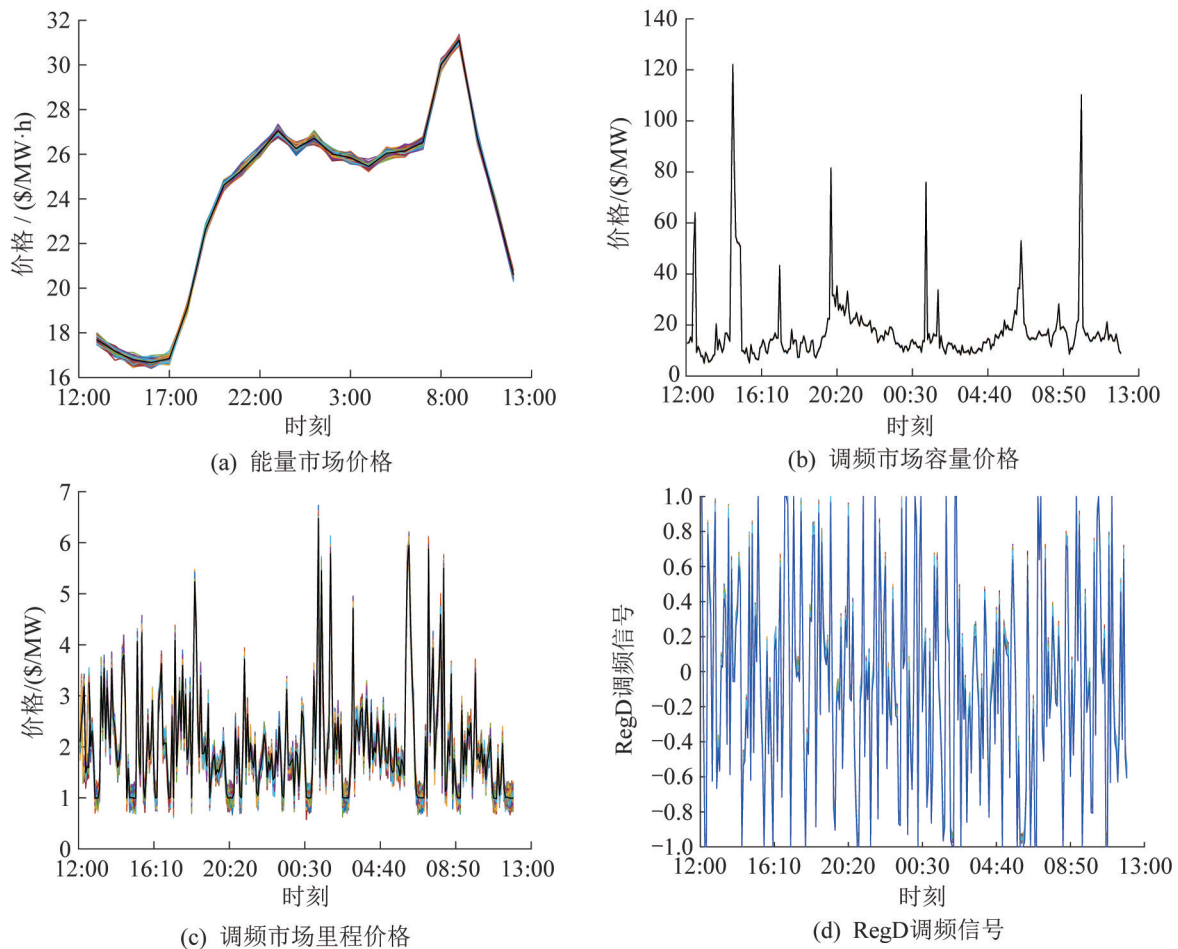


图2 场景集  
Fig. 2 Scenario set

仿真具体参数如表1所示。

表1 电动汽车仿真参数设置

Table 1 Electric vehicle simulation parameter settings			
EV类别	到达时间	离开时间	初始SOC分布
私人EV	$N(19,1^2)$	$N(8,1^2)$	$N(0.5,0.03^2)$
公交车	$N(23,0.5^2)$	$N(7,1^2)$	$N(0.4,0.03^2)$

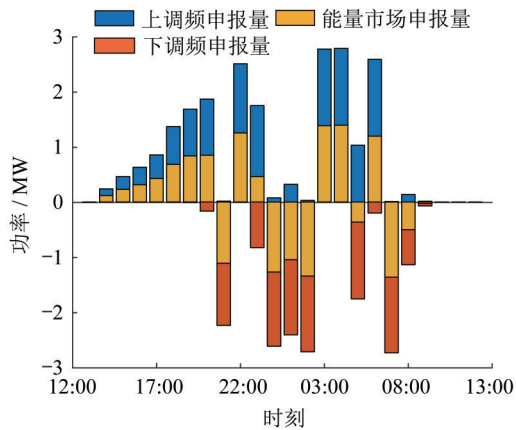
## 4.2 日前投标申报结果分析

为了探索不同类型EV参与日前能量与调频辅助服务市场优势,本节假设电动汽车能够完全响应调控指令,以EVA单独管理200辆私人EV(方案1)、单独管理200辆公交车(方案2)、各管理200辆车(方案3)为例,以EVA收益期望最大为目标,进行EVA日前投标申报容量优化,优化结果如图3,4所示,需要指出的是本文设定的上、下调

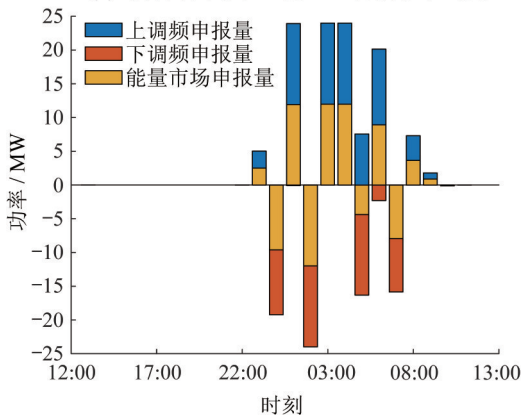
频申报量均为正数,为了方便实验结果对比与展示,将优化后的下调频申报量表示为负数制图。

通过图2(a)及3(a)、(b)可以看出,在能量市场申报方面,私人EV入网且能量市场低价时段,即12:00—17:00时段,EVA会尽可能安排电动汽车充电,以满足后续放电需求。随着价格升高,EVA会调整车辆进行放电,以此获得最大利益。当价格再次达到相对低点的03:00—08:00,EVA会开启第二次充电计划,以保证EV用户离网时满足期望离网电量,本文优化模型可以通过价格引导EVA日前申报计划的制定,实现“削峰填谷”效果。对于调频容量申报方面,因为EV功率的限制,以及离网电量的约束,EVA会在能量市场功率基点基础上尽可能上报上、下调频容量,以实

现利润最大化。



(a) 仅含有私人EV的EVA日前优化结果



(b) 仅含有电动公交的EVA日前优化结果

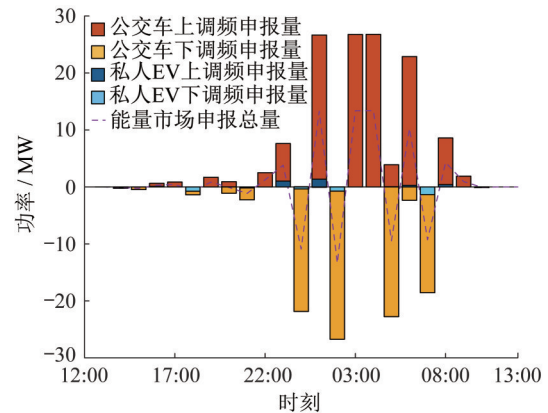
图3 聚合单种类型EV的EVA优化调度结果

Fig. 3 Optimization scheduling results of EVA with a single type of EV

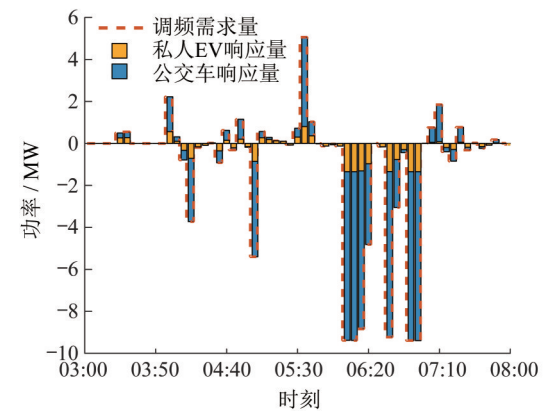
同时,通过图3(a),3(b)对比可知,公交车因电池容量大,其可调能力明显大于私人EV,相比于聚合私人EV,公交车参与辅助服务市场更具有优势,根据表2数据可知,聚集相同数量的EV,公交车聚合商收益为私家车聚合商4倍。又因本文假设公交车中午回场后并没有入网行为,若公交车参与多时段市场其优势将进一步体现。

图4(a)展示了含私人EV和公交车的EVA日前投标优化结果,相较单类型EV申报,由两者联合申报可实现多时段、高容量申报。由图4(b)可以看出,方案3的调频需求量由公交车和私人EV共同提供,私人EV所提供的调频容量远小于公交,但由于公交的可调时间限制,公交车仅能在晚22

至早8点左右提供服务,存在一定局限性。



(a) 联合调控私人EV及公交的EVA日前优化结果



(b) 调频容量对比

图4 含多类型EV的EVA优化调度结果

Fig. 4 Optimization scheduling results of EVA with multiple EV types

表2给出了三种方案下各项费用情况,可以看出,各EVA在参与调频辅助服务市场时都具有一定的优势,且调频市场收益均大于能量市场收益。对比方案1,2可知,同等数量下私人EV收益远小于公交收益,EVA需要大量聚合私人EV以达到理想收益,可调容量越大,期望总收益越大。通过方案2,3对比可知,私人EV通过其时间广度弥补了公交车非可调时段的收益。

总的来说,私人EV的入网、离网时间随机性强,可调时间范围广,但其可调容量较小,需要聚合大量资源才能达到市场交易规定容量。电动公交车入网、离网时间相对固定,可调时间较为集中,可调容量大,但无法满足可调时段外的调

频需求。EVA 为了获得更大收益, 应考虑多类型灵活资源联合投标。

表 2 电量成本与调频收益情况

方案	期望购电成本	期望调频总收益	期望售电收益	期望总收益
1	127.06	770.30	129.48	772.71
2	687.49	3 570.53	700.51	3 583.55
3	815.85	4 340.85	831.31	4 356.31

### 4.3 基于合约的实时调频容量调整分析

本节使用方案 3 进行基于合约激励的调度分配分析。假设 EV 的单位调频成本价格是日前能量市场价格的 0.5 倍, EVA 单位调频收益价格为调频市场容量出清价格, 即  $\gamma_{ev} = 0.5\pi_{n,t}^{eng}$ ,  $\gamma_{EVA} = \pi_{n,t}^{reg, cap}$ , EVA 将部分调频收益作为用户参与调控的补偿。

#### (1) 合约有效性分析

为了分析所提策略的特点, 本文采用两种签约方式进行对比, 方案 1 是 EVA 能够完全掌握 EV 的所有信息, 由 EVA 的自利性决定了所有类型的用户的效用都为 0, 同时所有类型的调频补偿  $R_i$  都为定值, 即可认为 EVA 为用户提供了一份固定合约, 后文简称为固定激励, 同时, 因为给予固定激励价格, 本文假设愿意参与的用户比例为 40%。本文所提激励为方案 2, 称为合约激励。

图 5 展示了 10 辆私人 EV 在不同时段下参与调频市场的获得的效用值。虽然同为私人 EV, 但在不同时刻提供的可调容量不同, 其分属为不同合约类型, 获得的效用也不同, 体现了合约签订的差异性。以 24:00 为例, 车辆 1~5 因为没有可调容量, 所以其用户效用为 0, 车辆 8, 9 因为都能提供相同的下调频容量, 所以获得效用也相同, 而在 02:00 时, 因为所有车辆都没有提供可调容量, 所以效用均为 0。同时, 对于同一辆车, 不同时段能够提供的可调容量不同、需要竞争的车辆不同, 获得调频补偿不同, 效用也不同, 体现了合约激励的时变性。

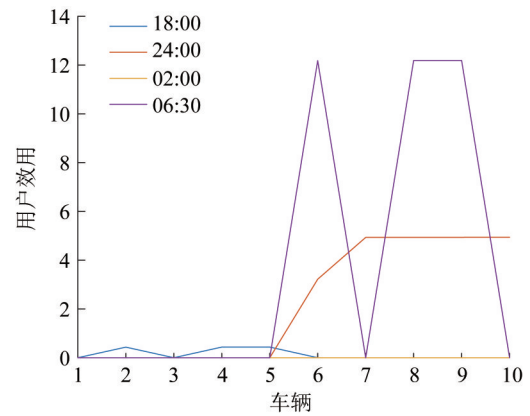
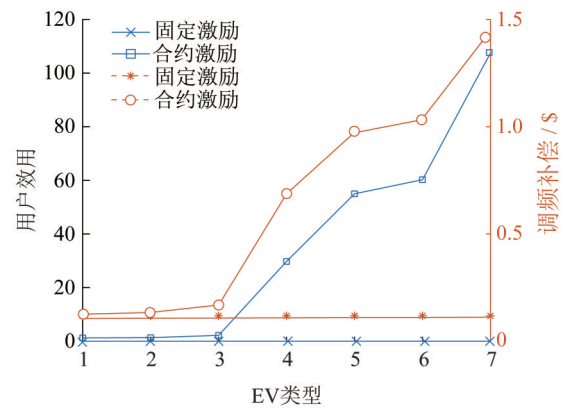
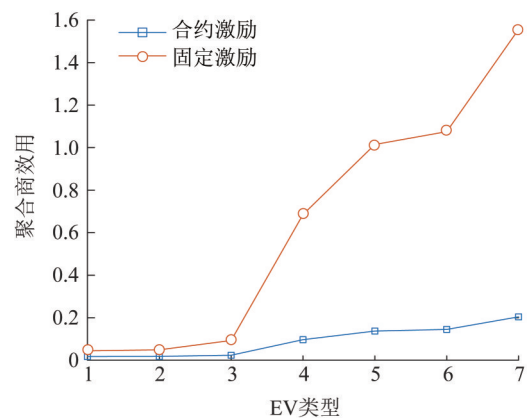


图 5 不同时段下不同 EV 的效用  
Fig. 5 Utility of different EVs at different times

图 6 为不同激励方式下用户效用及 EVA 效用的对比。抽取 5 辆私人 EV, 5 辆公交车, 在 05:00 时, 按照合约规则, 根据 EV 可调容量分类, 合约可分为 7 种类型, 分别记为类型  $\theta_1 \sim \theta_7$ , 合约编号越大, 代表 EV 可调容量越高, 调频能力越强。



(a) 用户效用及调频补偿



(b) EVA 效用

图 6 不同激励方式的对比  
Fig. 6 Comparison of different incentives

图6(a)可以看出, 合约类型所代表的EV可调容量越高, 其获得用户效用以及调频补偿越高。同样, 由图6(b)可知EV可调容量越高, EVA效用也越高, 两者都符合合约理论的单调性约束。从用户效用可知, EV的调频能力越强, 可以获得的效用就越高, 从而侧面激励了低调频能力的EV提升调频能力, 使其获得更大的效用。针对调频补偿进行分析, 可以看出固定激励模式下, EVA给予用户的补偿不随EV调频能力差异而变化, 而合约激励模式下, EV即使提供较小的调频容量也能获得较高收益, 并且调频能力越强获得的补偿越多, 运用合约差异化的补偿方式可以有效激励用户与EVA签约, 积极参与调频市场交易。由图6(b)可以看出, 在合约激励方式下, EVA的效用低于固定激励模式下, EVA通过减少部分调频收益的方式改变了EV用户在固定激励模式下的不利地位, 合理运用合约理论, 可以有效激励EV用户参与调频市场交易。

表3给出了两种激励方案实时调度结果的对比。由表3可以分析出, 经过合约激励调整, EVA总调整量满足调频总需求量, EVA总效用仍为正数, 可以认为EVA给予了用户一定的补偿后, 仍能保证EVA的收益, 体现了本文所提方法的有效性。固定激励方式下, 愿意参与调控EV的可调容量决定了其可以提供的总调整量, 从而导致调频量不足情况出现, 以调频市场价格的0.8倍作为调频量不足的惩罚进行计算, 可以得到考虑惩罚后的EVA总效用小于合约激励方式下的EVA总效用。

表3 激励方案结果对比

Table 3 Comparison of different incentive schemes			
类型	总需求量/MW	总调整量/MW	EVA总效用
合约激励	531.37	531.37	1 149.94
固定激励	531.37	271.89	1 021.64

## (2) 单辆EV优化调度结果分析

采用上述策略对EVA的日前投标优化及实时功率分配后, 随机抽取EVA中某辆EV, 分配调整

后结果如图7所示, 从上到下分别为调整后实际响应量、实际功率与SOC。从图7(a)可以看出, 在本文所提分配方式下, EV30每时刻的调频响应量与原申报调频响应量具有一定出入, 这是因为实际分配后EV的调频响应量不仅与自身可调节能力有关, 还有与同时刻提供不同可调容量的EV有关, 合约激励后会根据EVA实时需求进行调整。同时, 根据功率基线计算获得EV调整后实际功率, 可以得知在市场价格高峰时期EV30更趋向于卖电, 在价格相对低的时段更趋向于充电, 与日前总体优化结果趋势一致。车辆虽通过合约改变了其响应量的大小, 但合约调整量被约束于可调容量范围内, 因此车辆的实际功率整体趋势并不会改变。为验证分配后结果仍能满足用户出行需求, 刻画车辆SOC时间变化图, 由图7(c)可知, EV30虽然经过多次放电, 但时刻SOC能够满足合同要求, 并在离网前保证能够满足期望电量。

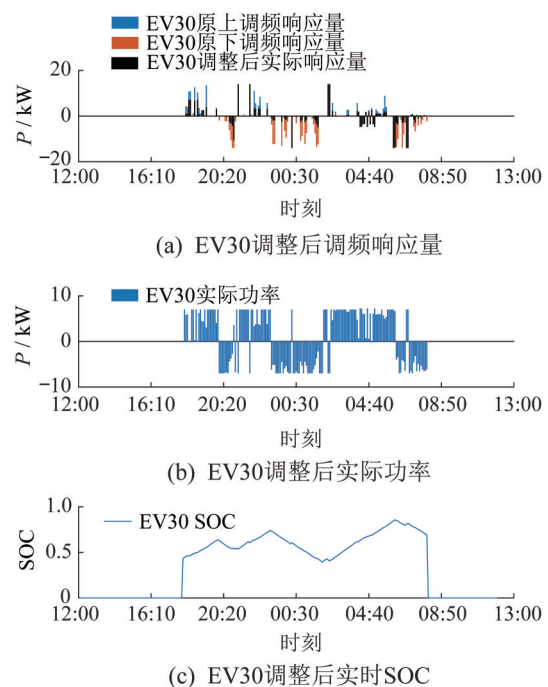


图7 第30辆私家车分配后调度结果  
Fig. 7 Optimization scheduling results of EV30

## 5 结论

本文首先提出了以EVA为主体的多类型EV

参与日前能量市场及调频辅助服务市场交易框架。其次,在考虑多种不确定性因素影响下,以EVA收益期望最大为目标,构建多类型EV参与日前能量市场和调频辅助服务市场申报模型。进一步,基于合约理论进行了EVA调频容量实时分配激励合约设计,提高EVA实时跟踪能力及用户参与性。通过算例验证,可以得到如下结论:

(1) 在不确定性因素下,通过对多场景的日前申报模型进行求解得到EVA最优申报方案,能够实现多类型EV群体协调申报,并追求EVA收益最大的目标。

(2) 私人EV的入网、离网时间随机性强,可调时间范围广,但其可调容量较小,需要聚合大量资源才能达到市场交易规定容量。电动公交车入网、离网时间相对固定,可调时间较为集中,可调容量大,但无法满足可调时段外的调频需求。EVA应考虑多类型灵活资源联合申报,以获得更大收益。

(3) 本文提出的基于合约理论的实时分配激励策略,一方面,可以使EVA在实时层面更合理分配EV资源,满足调频辅助服务市场需求。另一方面,通过对EV进行差异性调频补偿,增加用户之间的利益竞争,可以有效地激励用户参与调频市场交易。

本文的模型中没有考虑EV参与调频意愿的不确定性,今后的研究将通过问卷调查和知识提取等方法着眼于这些因素的分析。

## 参考文献:

- [1] 新华社,中国政府网. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. [2021-03-15]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content\\_5593154.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm)  
Xinhua News Agency, Chinese Government Website. Xi Jinping Presided over the Ninth Session of the Financial and Economic Commission of the CPC Central Committee[EB/OL]. [2021-03-15]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content\\_5593154.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm)
- [2] 辛保安. 为实现“碳达峰、碳中和”目标贡献智慧和力量[J]. 国家电网, 2021(3): 2-3.  
Xin Baoan. Contribute Wisdom and Strength to Achieve

- the Goal of "Carbon Peak and Carbon Neutral"[J]. State Grid, 2021(3): 2-3.
- [3] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.  
Kang Chongqing, Yao Liangzhong. Key Scientific Issues and Theoretical Research Framework for Power Systems with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [4] 李明节,陈国平,董存,等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.  
Li Mingjie, Chen Guoping, Dong Cun, et al. Research on Power Balance of High Proportion Renewable Energy System[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [5] 胡泽春,罗浩成. 大规模可再生能源接入背景下自动发电控制研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 2-15.  
Hu Zechun, Luo Haocheng. Research Status and Prospect of Automatic Generation Control with Integration of Large-scale Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power systems, 2018, 42(8): 2-15.
- [6] 吴巨爰,薛禹胜,谢东亮,等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107.  
Wu Juai, Xue Yusheng, Xie Dongliang, et al. Capability Evaluation and Simulation Analysis of Electric Vehicle Participating in Operation Reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107.
- [7] Hu Junjie, Yang Guangya, Koen Kok, et al. Transactive Control: a Framework for Operating Power Systems Characterized by High Penetration of Distributed Energy Resources[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy (S2196-5625), 2017, 5(3): 451-464.
- [8] 胡泽春,宋永华,刘辉. 电动汽车与电网互动的调控策略[M]. 科学出版社, 2019: 195-237.  
Hu Zechun, Song Yonghua, Liu Hui. Electric Vehicle and Power Grid Interaction: Dispatch and Control Strategies [M]. Science Press, 2019: 195-237.
- [9] Sarker M R, Dvorkin Y, Ortega-Vazquez M A. Optimal Participation of an Electric Vehicle Aggregator in Day-Ahead Energy and Reserve Markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2016, 31(5): 3506-3515.
- [10] 人民日报,中国政府网. 截至2021年底全国新能源汽车保有量达784万辆[EB/OL]. [2021-01-12]. [http://www.gov.cn/shuju/2022-01/12/content\\_5667734.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-01/12/content_5667734.htm)  
People's Daily, Chinese Government Website. By the end of 2021, the Number of New Energy Vehicles in China will Reach 7.84 Million[EB/OL]. [2021.01.12]. [http://www.gov.cn/shuju/2022-01/12/content\\_5667734.htm](http://www.gov.cn/shuju/2022-01/12/content_5667734.htm)
- [11] 国家能源局江苏监管办公室. 江苏电力辅助服务(调频)

- 市场交易规则(试行)的通知[EB/OL].[2020-06-30]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-7/202073154200.htm>  
Jiangsu Energy Regulatory Office of National Energy Administration of the People's Republic of China. Notice of Trading Rules of Jiangsu Electric Auxiliary Service (FM) Market (Trial) [EB/OL]. [2020-06-30]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-7/202073154200.htm>
- [12] 沈运帷, 李扬, 高赐威, 等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 151-161.  
Shen Yunwei, Li Yang, Gao Ciwei, et al. Application of Demand Response in Ancillary Service Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 151-161.
- [13] 雷敏, 华一飞, 赵洪山, 等. 计及电池寿命的电动汽车参与电网调峰策略[J]. 现代电力, 2020, 37(5): 510-517.  
Lei Min, Hua Yifei, Zhao Hongshan, et al. Participating Peak Load Regulation of Power Grid Considering Battery Life[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(5): 510-517.
- [14] 吴洲洋, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 148-157.  
Wu Zhouyang, Ai Xin, Hu Junjie. Reserve Optimization and Real-time Scheduling of Frequency Regulation Ancillary Service with Flexible Resource on Flexible Demand Side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [15] 袁桂丽, 苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与AGC调频服务研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2538-2548.  
Yuan Guili, Su Weifang. Virtual Power Plants Providing AGC FM Service Considering Uncertainty of Electric Vehicles[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548.
- [16] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮. 电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 75-81.  
Wu Juai, Xue Yusheng, Xie Dongliang. Optimization of Reserve Service Capability Made by Electric Vehicle Aggregator[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(9): 75-81.
- [17] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁, 等. 考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 86-96.  
Zhan Xiangpeng, Yang Jun, Han Sining, et al. Two-Stage Market Bidding Strategy of Charging Station Considering Schedulable Potential Capacity of Electric Vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [18] 许梦瑶, 艾小猛, 方家琨, 等. 考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2033-2041.  
Xu Mengyao, Ai Xiaomeng, Fang Jiakun, et al. Two-stage Stochastic Optimal Scheduling Model for Joint Regulation EV and Thermal Units Considering Users Enthusiasm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2033-2041.
- [19] 黄张浩, 张亚超, 郑峰, 等. 基于不同利益主体协调优化的主动配电网日前-实时能量管理方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2299-2308.  
Huang Zhanghao, Zhang Yachao, Zheng Feng, et al. Day-ahead and Real-time Energy Management for Active Distribution Network Based on Coordinated Optimization of Different Stakeholders[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2299-2308.
- [20] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 73-80, 89.  
Wu Jiechen, Ai Xin, Hu Junjie, et al. Optimization of Demand-side Flexible Resource Scheduling with Uncertain Factors[J]. Power system automation, 2019, 43(14): 73-80, 89.
- [21] 文艺林, 胡泽春, 宁剑, 等. 基于分布鲁棒机会约束的充电运营商参与调峰市场投标策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 23-32.  
Wen Yilin, Hu Zechun, Ning Jian, et al. Bidding Strategy of Charging Operator Participating in Peak Regulation Market Based on Distributionally Robust Chance Constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 23-32.
- [22] 张巍, 李怀宝, 董晓伟, 等. 虚拟电厂的灵活性辅助服务投标策略研究[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3): 47-56.  
Zhang Wei, Li Huaibao, Dong Xiaowei, et al. Research on Flexible Auxiliary Service Bidding Strategy of Virtual Power Plant[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(3): 47-56.
- [23] 魏震波, 田轲, 罗筱均, 等. 电动汽车聚合商参与下的主辅联合市场均衡分析[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 50-57.  
Wei Zhenbo, Tian Ke, Luo Xiaojun, et al. Analysis on Equilibrium of the Main and Auxiliary Joint Markets Considering the Aggregators of Electric Vehicles[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 50-57.
- [24] Liu H, Huang K, Wang N, et al. Optimal Dispatch for Participation of Electric Vehicles in Frequency Regulation based on Area Control Error and Area Regulation Requirement[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2019, 240(4): 46-55.
- [25] 陈吕鹏, 潘振宁, 余涛, 等. 基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019,

- 43(24): 32-40, 66.
- Chen Lüpeng, Pan Zhenning, Yu Tao, et al. Dynamic Coordination Mechanism of Grid Frequency Regulation with Multiple Photovoltaic Generation Units[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(24): 32-40, 66.
- [26] Xie S, Zhong W, Kan X, et al. Fair Energy Scheduling for Vehicle-to-Grid Networks Using Adaptive Dynamic Programming[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (S1045-9227), 2016, 27(8): 1-11.
- [27] 张潇, 栗然, 马涛, 等. 基于主从博弈和贪心策略的含电动汽车主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 103-110.
- Zhang Xiao, Li Ran, Ma Tao, et al. Stackelberg Game and Greedy Strategy Based Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Electric Vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 103-110.
- [28] 张鸾, 罗正军, 周德群. 基于主体的可再生能源电力消纳交易仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 170-178.
- Zhang Luan, Luo Zhengjun, Zhou Dequn. Agent-based Research on Power Absorption Simulation Analysis of Renewable Energy[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(1): 170-178.
- [29] 刘维扬, 王冰, 王敏, 等. 智能合约技术下电动汽车入网竞价机制研究[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4344-4352.
- Liu Weiyang, Wang Bing, Wang Min, et al. Research on Electric Vehicles Participating in Bidding Mechanism of Power Grid Based on Smart Contract Technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4344-4352.
- [30] 李伟, 韩瑞迪, 孙晨家, 等. 基于用电偏好的可平移负荷参与需求响应最优激励合同与激励策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增): 185-193.
- Li Wei, Han Ruidi, Sun Chenjia, et al. An Optimal Incentive Contract and Strategy of Shiftable Loads Participation in Demand Response Based on User Electricity Preference[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 185-193.
- [31] Zhang K, Mao Y, Leng S, et al. Optimal Charging Schemes for Electric Vehicles in Smart Grid: A Contract Theoretic Approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2018, 19(9): 3046-3058.
- [32] Zhou Z, Wang B, Guo Y, et al. Blockchain and Computational Intelligence Inspired Incentive-Compatible Demand Response in Internet of Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence (S2471-285X), 2019, 3(3): 205-216.
- [33] 马丽雅, 刘文霞, 孙浩男, 等. 基于合约理论的产消者参与调频市场交易策略[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1347-1356.
- Ma Liya, Liu Wenxia, Sun Haonan, et al. Contract Theory Based Transaction Strategy for Prosumers to Participate in the Frequency Modulation Ancillary Service Market[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1347-1356.
- [34] 陈达鹏, 荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-9.
- Chen Dapeng, Jing Zhaoxia. Analysis of Frequency Modulation Compensation Mechanism in Frequency Modulation Ancillary Service Market of the United States[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-9.
- [35] 李华珍, 柳有权, 朱家伟, 等. 基于改进粒子群算法的居民需求响应调度优化与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(8): 1969-1979.
- Li Huazhen, Liu Youquan, Zhu Jiawei, et al. Residential Demand Response Scheduling Optimization and Simulation Based on an Improved PSO Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1969-1979.
- [36] Lipp T, Boyd S. Variations and Extension of the Convex - Concave Procedure[J]. Optimization & Engineering (S1389-4420), 2016, 17(2): 263-287.
- [37] 王浩浩, 陈嘉俊, 朱涛, 等. 计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 208-217.
- Wang Haohao, Chen Jiajun, Zhu Tao, et al. Joint Bidding Model and Algorithm of the Wind-Storage System Considering the Energy Storage Life and the Frequency Regulation Performance[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-217.