



考虑用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略

王明深 潘益 缪惠宇 韩华春 曾飞 袁晓冬

Frequency Regulation Strategy of EV Aggregator Considering Various User Requirements

WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, HAN Huachun, ZENG Fei, YUAN Xiaodong

引用本文:

王明深, 潘益, 缪惠宇, 等. 考虑用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略[J]. 现代电力, 2024, 41(3): 565–573. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355

WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, et al. Frequency Regulation Strategy of EV Aggregator Considering Various User Requirements[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(3): 565–573. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于价值网络的电动汽车聚合运营价值评估

Value Evaluation of Electric Vehicle Aggregation Operation Based on Value Network

现代电力. 2023, 40(6): 1005–1012 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0130>

计及电池寿命的电动汽车参与电网调峰策略

Strategy of Electric Vehicles Participating Peak Load Regulation of Power Grid Considering Battery Life

现代电力. 2020, 37(5): 510–517 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0060>

计及激励型需求响应的电动汽车聚合商充电优化调度

Optimal Charging Scheduling for Electric Vehicle Aggregator Considering Incentive Demand Response

现代电力. 2019, 36(6): 16–22 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I6/16>

考虑充电站需求特性的电动汽车充电站与配电网联合规划方法

Joint Planning of Distribution Network with Electric Vehicle Charging Station Considering the Demand Characteristics of Charging Stations

现代电力. 2020, 37(5): 491–500 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0063>

计及电动汽车需求差异的智能电网调度策略

Smart Grid Dispatching Strategy Considering the Difference of Electric Vehicle Demand

现代电力. 2021, 38(2): 221–229 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0283>

基于IGDT理论的电动汽车负荷聚合商需求侧放电投标决策模型

IGDT-based Demand Side Discharge Bidding Decision Strategy for Electric Vehicle Load Aggregator

现代电力. 2020, 37(5): 484–490 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0793>

考虑用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略

王明深, 潘益, 缪惠宇, 韩华春, 曾飞, 袁晓冬

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103)

Frequency Regulation Strategy of EV Aggregator Considering Various User Requirements

WANG Mingshen, PAN Yi, MIAO Huiyu, HAN Huachun, ZENG Fei, YUAN Xiaodong

(Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211101, Jiangsu Province, China)

摘要: 规模化电动汽车与电网互动成为重要的调频手段, 针对调频互动控制无法保障用户各类需求、难以充分调动用户参与积极性的问题, 提出一种保障用户多样化需求的电动汽车集群调频控制策略, 以实现高比例新能源电网的频率稳定。首先, 综合考虑用户交通用能、调频喜好、数据保护需求的交互影响, 建立有限信息环境下电动汽车集群可调节能力的概率评估模型; 进而, 考虑集群调频不确定性和调频控制时长对用户延时充电的影响, 提出考虑时序延时调频恢复的概率调频控制策略; 最后, 算例结果验证了所提出的调频控制策略在保障用户需求、降低数据保护造成的不确定性影响、提升系统频率稳定方面的有效性。

关键词: 电动汽车; 入网状态; 电动汽车集群; 多样化需求; 频率控制; 状态恢复

Abstract: The large-scale vehicle-to-grid interactions have become an important mean for frequency regulation. In allusion to the problems that frequency regulation interactive control can not ensure various requirements of users and can not fully mobilize the enthusiasm of users to participate, a frequency regulation strategy of electric vehicle (EV) aggregator was proposed to ensure the various requirements of EV users and improve the frequency stability of the power grid with high penetration of renewable new energy. Firstly, considering the interactive influence of the users' energy consumption of traveling, frequency regulation preference, and data protection, a probability evaluation model of the adjustable ability of EV aggregator is established under the limited information environment. Secondly, considering the influence of the uncertainty of aggregator's frequency regulation and the duration of frequency regulation con-

trol on the delay charging of users, a probabilistic frequency regulation strategy considering the timing delay frequency regulation recovery is proposed. Finally, the results of an example verified the effectiveness of the proposed frequency regulation strategy in ensuring user requirements, reducing the impact of uncertainty caused by data protection, and improving system frequency stability.

Keywords: electric vehicle (EV); grid-connecting state; EV aggregator; various requirements; frequency regulation; state recovery

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0355

0 引言

近年来, 随着电网中风、光等新能源的高比例接入, 新能源出力随机间歇性造成的系统功率波动愈发明显^[1], 传统发电机由于响应时滞长、爬坡速率低等问题, 难以准确追踪新能源造成的快速功率变化, 由此引发的电网频率稳定问题日益突出^[2-3]。

伴随着交通低碳化、清洁化的发展需求, 电动汽车在世界范围内快速发展。截至 2021 年, 我国电动汽车数量已达到 640 万辆, 预计到 2025 年和 2030 年, 我国电动汽车数量将达到 2180 万和 8350 万辆^[4], 如此大规模的电动汽车接入电网将会对系统功率平衡产生深刻影响。电动汽车利用电池储能提供动能, 交通出行结束后需要从电网获取电能, 电动汽车接入电网的时长远大于所需要的充电时长, 在充电过程中能够通过改变充电时段, 甚至通过放电为电网提供支撑^[5]。大规模分散入网的电动汽车通过电气连接聚集成集群, 借助现代通信手段, 能够为电网提供调节容量大、响应速度快的优质调频服务^[6]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52107099); 中国博士后科学基金项目 (2021M690810, 2022T150152)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107099); China Postdoctoral Science Foundation (2021M690810, 2022T150152)。

已有研究针对电动汽车集群模型及可调节能力评估展开研究。考虑电动汽车交通出行结束后接入电网的时序分布特性,文献[7-8]结合电动汽车可切换的充放电状态,建立了电动汽车集群可调节能力评估模型;考虑电动汽车出行受用户出行习惯、交通用能、出行目的等因素的影响,文献[9-10]通过分析电动汽车接入电网影响因素的时空耦合关联特性,提出了电动汽车集群可调节能力评估方法;考虑补偿电动汽车调节过程存在的电池损耗成本和提供调节收益对用户参与调节积极性的影响,文献[11-12]提出电动汽车集群参与系统调节的调度模型。然而,现有研究在建模过程中主要考虑用户的交通用能和调节参与积极性的影响,但缺少对用户参与不同调节方式喜好的分析。同时,集群模型是基于能够采集电动汽车及用户所有终端数据的基础上,缺少对用户个人数据保护影响的分析,缺少对电动汽车集群调节能力在用户多方面需求下的不确定性评估。

已有文献针对电动汽车集群调频控制策略展开研究。考虑电动汽车在充电、闲置、放电3种状态之间的切换模式,文献[13]提出了电动汽车集群参与调频的多模式控制策略;考虑用户的期望荷电状态和计划充电时间,文献[14-15]提出了根据调频偏差自适应控制的电动汽车调频控制策略;根据剩余电量对集群中的电动汽车进行自组织分类,文献[16]提出了电动汽车充放电控制终端变参数下垂调频控制方法。然而,已有电动汽车调频控制策略难以兼顾用户的交通用能、调频喜好、数据保护需求,同时忽视了多样化需求下调频的不确定性问题,难以保障电动汽车集群的调频效果。

为解决上述问题,本文分析用户交通用能、调频喜好、数据保护需求之间的交互影响,进而分析单体电动汽车在多样化需求下的可调节能力,建立考虑调频不确定性的电动汽车集群可调节能力评估模型,最后提出考虑电动汽车调频状态平稳恢复的电动汽车集群概率调频控制策略。

1 多样化需求下电动汽车集群调频特性

1.1 单体电动汽车调频能力

电动汽车出行结束后,用户根据自身出行计划决定是否接入电网充电,入网电动汽车根据与

电网交换功率的方向分为充电、空闲、放电3种入网状态。交换功率与入网状态的关系如式(1)所示,接入电网后电池荷电状态(state of charge, SOC)的变化如式(2)所示。

$$P_j(t) = \begin{cases} P_j^{\text{cr}}, & \theta_j(t) = 1, \text{充电} \\ 0, & \theta_j(t) = 0, \text{空闲} \\ -P_j^{\text{dr}}, & \theta_j(t) = -1, \text{放电} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为当前时刻; j 为集群中心数据采集范围内的充电桩编号; $P_j(t)$ 为电动汽车与电网交换功率; $\theta_j(t)$ 用来指示电动汽车的入网状态, $\theta_j(t)$ 为1、-1、0分别代表电动汽车从电网获取电能、向电网反馈电能、与电网无任何有功功率交换; P_j^{cr} 和 P_j^{dr} 分别为额定充电和放电功率。

$$S_j(t) = \begin{cases} S_j(t-\Delta t) + \frac{P_j(t) \cdot \eta_j^{\text{cr}} \cdot \Delta t}{Q_j}, & \text{充电} \\ S_j(t-\Delta t), & \text{空闲} \\ S_j(t-\Delta t) + \frac{P_j(t) \cdot \Delta t}{\eta_j^{\text{dr}} \cdot Q_j}, & \text{放电} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_j(t)$ 为电动汽车的电池SOC状态值; η_j^{cr} 和 η_j^{dr} 分别为充电和放电效率。

根据电动汽车的3种入网状态,定义了电动汽车的4种调频方式,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_j^{\text{c2i}} = -P_j^{\text{cr}}, & \text{充电} \rightarrow \text{空闲} \\ \Delta P_j^{\text{i2d}} = -P_j^{\text{dr}}, & \text{空闲} \rightarrow \text{放电} \\ \Delta P_j^{\text{d2i}} = P_j^{\text{dr}}, & \text{放电} \rightarrow \text{空闲} \\ \Delta P_j^{\text{i2c}} = P_j^{\text{cr}}, & \text{空闲} \rightarrow \text{充电} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔP_j^{c2i} 、 ΔP_j^{i2d} 、 ΔP_j^{d2i} 、 ΔP_j^{i2c} 分别为电动汽车在“充电→空闲”、“空闲→放电”、“放电→空闲”、“空闲→充电”调节方式下的可调节功率;其中,“充电→放电”调频方式可以看作“充电→空闲”和“空闲→放电”调频方式的结合,同理可知“放电→充电”调频方式。本文未定义“充电→放电”和“放电→充电”调频方式,主要是考虑到电动汽车从充电切换到空闲和放电造成的电池损耗成本不同,用户对于是否参与放电的喜好也不相同。

1.2 用户多样化调频需求

1) 交通用能需求。

电动汽车接入电网的目的是满足未来交通出行的用能需求。接入电网后，电动汽车 SOC 的变化过程受到入网状态和交换功率大小的影响，为表征电动汽车从接入电网到离开电网的 SOC 变化范围，电动汽车入网后的运行区域如图 1 所示。图中： t_j^{mi} 和 t_j^{fsh} 分别代表电动汽车接入和离开电网时刻； S_j^{mi} 和 S_j^{dem} 分别代表电动汽车入网初始 SOC 和出行需求 SOC 状态值； S_j^{min} 和 S_j^{max} 分别代表电动汽车 SOC 变化范围的最小值和最大值。运行区域上边界“*A-B-C*”代表电动汽车入网后立即以额定功率充电，直到电池 SOC 达到最大值，并保持到离开电网时刻 t_j^{fsh} ；下边界“*A-D-E*”代表电动汽车入网后立即以额定功率放电，直到电池 SOC 达到最小值，并保持到强制充电时刻 t_j^{ac} ；强制充电边界“*E-F*”代表电动汽车进入不可中断的充电过程，以保证离开电网前 SOC 能够达到 S_j^{dem} ；上下边界及强制充电边界所围成的区域即为入网电动汽车的最大运行区域。

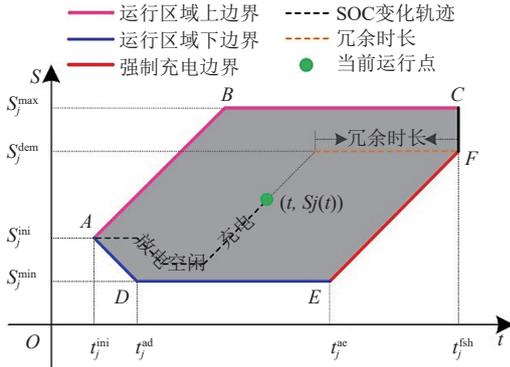


图 1 电动汽车入网运行区域

Fig. 1 Operation area of an EV under grid connection

为了分析入网电动汽车充满电后能够处于空闲状态的最大时长，将 T_j^{dun} 定义为电动汽车的冗余时长，即当前时刻到离开电网时刻的时长与所需最小充电时长的差值，如式(4)所示。

$$T_j^{dun}(t) = (t_j^{fsh} - t) - \frac{(S_j^{dem} - S_j(t)) \cdot Q_j}{P_j^{cr} \cdot \eta_j^{cr}} \quad (4)$$

充电过程中，式(4)能够计算电动汽车的实时冗余时长。冗余时长大于0且数值越大，则代表电动汽车可以在离开前更早地完成充电，充电过程能够进行功率控制；冗余时长小于或等于0，则代表电动汽车会进入充电状态，以保障用户的出行用能需求。

2) 调频喜好需求。

用户可以根据自身调频喜好选择参与调频的方式，按照喜好的不同用户可以分为3类：1) 用户不参与调频；2) 用户选择参与“充电→空闲”和“空闲→充电”的调频方式；3) 用户选择参与4种调频方式；考虑用户调频喜好的电动汽车可调节能力如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_j^{c2i} = -P_j^{cr} \cdot \delta_j^c \cdot \delta_j^d, \text{ 充电} \rightarrow \text{空闲} \\ \Delta P_j^{i2d} = -P_j^{dr} \cdot \delta_j^c \cdot \delta_j^d, \text{ 空闲} \rightarrow \text{放电} \\ \Delta P_j^{d2i} = P_j^{dr} \cdot \delta_j^c \cdot \delta_j^d, \text{ 放电} \rightarrow \text{空闲} \\ \Delta P_j^{i2c} = P_j^{cr} \cdot \delta_j^c \cdot \delta_j^d, \text{ 空闲} \rightarrow \text{充电} \end{cases} \quad (5)$$

式中： δ_j^c 和 δ_j^d 均为0-1变量； $\delta_j^c = 0$ 和 $\delta_j^c = 1$ 分别代表用户不参与和参与“充电→空闲”、“空闲→充电”的调频方式； $\delta_j^d = 0$ 和 $\delta_j^d = 1$ 分别代表用户不参与和参与“空闲→放电”、“放电→空闲”的调频方式。

3) 数据保护需求。

用户接入充电桩充电时，可以根据自己对数据的重视程度选择是否上传个人数据。部分用户比较注重个人敏感信息，不希望上传身份信息(车牌等)、用能计划、调频喜好、车辆参数等个人数据，而有一定比例的用户则对数据上传的敏感程度不高，更倾向于通过上传个人数据获取一定的价格补贴，以降低用能成本。

为了分析个人数据是否上传对电动汽车集群调节能力评估的影响，充电桩作为调频终端设备，上传的数据分为终端数据和个人数据，终端数据和个人数据的集合分别定义为 Φ^{up} 和 Φ^{con} ，如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Phi^{up} = \{t, j, P_j(t), \gamma_j(t)\} \\ \Phi^{con} = \{ID, t_j^{fsh}, S_j^{dem}, \delta_j^c, \delta_j^d, S_j(t), Q_j, P_j^{cr}, P_j^{dr}\} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\gamma_j(t)$ 为0、1分别代表充电桩无车接入、有车接入； Φ^{up} 数据集是调频终端的运行数据，不涉及用户个人数据，是集群中心可以获取的数据； Φ^{con} 数据集是用户个人数据，通过车桩通信、用户终端设置的方式获取，用户可以自己选择是否上传该部分数据。

个人数据的缺失程度会影响集群中心对群体电动汽车调节能力的评估精度，本文主要针对海量规模的慢充车辆，这部分车辆以私家车为主，

考虑到私有桩个人数据采集难度大,假设调频终端仅上传 Φ^{up} 数据集的数据信息,集群中心能够通过根据充电功率判断不同接入状态的电动汽车数量,如式(7)所示。电动汽车通过充电桩接入电网后,集群中心可以与充电桩通信,获取充电桩与电网交换的功率,并将交换功率值定义为电动汽车的额定充放电功率,入网电动汽车额定充放电功率的平均值如式(8)所示。

$$\begin{cases} N^{\text{cc}}(t) = |\Omega^{\text{cc}}(t)|; \Omega^{\text{cc}}(t) = \{j|P_j(t) > 0, \gamma_j(t) = 1\} \\ N^{\text{ei}}(t) = |\Omega^{\text{ei}}(t)|; \Omega^{\text{ei}}(t) = \{j|P_j(t) = 0, \gamma_j(t) = 1\} \\ N^{\text{ed}}(t) = |\Omega^{\text{ed}}(t)|; \Omega^{\text{ed}}(t) = \{j|P_j(t) < 0, \gamma_j(t) = 1\} \\ N^{\text{non}}(t) = |\Omega^{\text{non}}(t)|; \Omega^{\text{non}}(t) = \{j|\gamma_j(t) = 0\} \\ \Omega(t) = \{\Omega^{\text{cc}}(t), \Omega^{\text{ei}}(t), \Omega^{\text{ed}}(t)\} \\ N(t) = N^{\text{cc}}(t) + N^{\text{ei}}(t) + N^{\text{ed}}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:针对集群覆盖范围, $\Omega^{\text{cc}}(t)$ 、 $\Omega^{\text{ei}}(t)$ 、 $\Omega^{\text{ed}}(t)$ 分别为接入充电、空闲、放电状态电动汽车的充电桩编号的集合; $\Omega(t)$ 为接入电网的充电桩编号的集合; $\Omega^{\text{non}}(t)$ 为未接入电动汽车的充电桩编号的集合; $N^{\text{cc}}(t)$ 、 $N^{\text{ei}}(t)$ 、 $N^{\text{ed}}(t)$ 分别为入网电动汽车处于充电、空闲、放电状态的数量; $N(t)$ 为接入电网的电动汽车总数量; $N^{\text{non}}(t)$ 为未接入电动汽车的充电桩数量。

$$\begin{cases} \bar{P}^{\text{cr}} = \left(\sum_{j \in \Omega(t)} P_j^{\text{cr}} \right) / N(t) \\ \bar{P}^{\text{dr}} = \left(\sum_{j \in \Omega(t)} P_j^{\text{dr}} \right) / N(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: \bar{P}^{cr} 和 \bar{P}^{dr} 分别为入网电动汽车额定充电和放电功率的平均值。

对于集群控制中心,敏感信息的缺失会降低集群控制中心对电动汽车可调节能力评估的预测精度,但可以通过大数据预测、误差控制等方式降低预测误差。

2 电动汽车集群频率控制策略

2.1 电动汽车集群调频外特性

电动汽车参与调频时,电动汽车集群可以看作由大规模分散接入电网的车辆电池组成的调频资源,集群调频外特征可以看作受外在因素影响的储能站,集群在某一时刻调频外特征的示意图如图2所示。图中: $P_A(t)$ 为集群的输出功率; $P_A^{\text{max}}(t)$ 和 $P_A^{\text{min}}(t)$ 分别为集群输出功率调整范围的

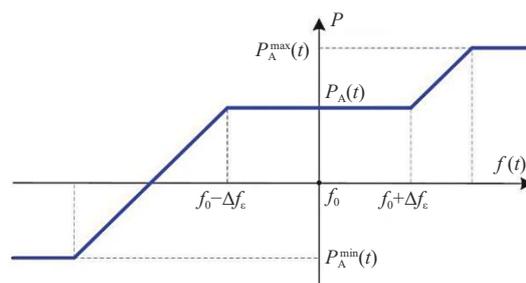


图2 电动汽车集群调频特性

Fig. 2 Frequency regulation characteristic of EV aggregator

最大值和最小值; f_0 为电力系统额定频率; $f(t)$ 为 t 时刻系统频率; Δf_ϵ 为系统频率所允许最大偏移量。

由于集群控制中心采集到的入网电动汽车数据有限(如式(6)所示),有限信息环境下集群的输出功率及其调节范围的评估如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_A(t) = \sum_{j \in \Omega(t)} P_j(t) \\ P_A^{\text{c,min}}(t) = P_A(t) - (N^{\text{cc}}(t) - (1 - \varphi^{\text{c}} - \varphi^{\text{d}}) \cdot N^{\text{e0}}(t)) \cdot \bar{P}^{\text{cr}} \\ P_A^{\text{min}}(t) = (1 - \varphi^{\text{c}} - \varphi^{\text{d}}) \cdot N^{\text{e0}}(t) \cdot \bar{P}^{\text{cr}} - \varphi^{\text{d}} \cdot N(t) \cdot \bar{P}^{\text{dr}} \\ P_A^{\text{d,max}}(t) = P_A(t) + N^{\text{ed}}(t) \cdot \bar{P}^{\text{dr}} \\ P_A^{\text{max}}(t) = (N(t) - (1 - \varphi^{\text{c}} - \varphi^{\text{d}}) \cdot (N(t) - N^{\text{e0}}(t))) \cdot \bar{P}^{\text{cr}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ^{c} 为用户仅选择参与“充电→空闲”和“空闲→充电”调频方式的百分比; φ^{d} 为用户选择参与4种调频方式的百分比; $N^{\text{e0}}(t)$ 为不受控情况下处于充电状态的电动汽车数量,可以根据不受控状态下集群的充电功率来计算; $P_A^{\text{c,min}}(t)$ 为集群输出功率在“充电→空闲”方式下的下调范围; $P_A^{\text{d,max}}(t)$ 为集群输出功率在“放电→空闲”方式下的上调范围; $P_A^{\text{min}}(t)$ 为允许放电的电动汽车总功率与处于不受控充电状态电动汽车总功率的差值; $P_A^{\text{max}}(t)$ 为所有入网车辆充电的总功率与处于不受控空闲状态电动汽车总功率的差值。

2.2 电动汽车集群频率控制策略

2.2.1 集群调频控制

1) 系统频率控制。

电力系统的频率偏移为 $\Delta f(t)$,电动汽车集群目标变化功率 $\Delta P_A^*(t)$ 如式(10)所示。

$$\Delta P_A^*(t) = \begin{cases} \beta(t) \cdot (\Delta f(t) - \Delta f_\epsilon); \Delta f(t) > \Delta f_\epsilon \\ 0; -\Delta f_\epsilon \leq \Delta f(t) \leq \Delta f_\epsilon \\ \beta(t) \cdot (\Delta f(t) + \Delta f_\epsilon); \Delta f(t) < -\Delta f_\epsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\beta(t)$ 为频率偏差系数,用于根据系统实时

频率偏差计算集群的目标调节功率， $\beta(t)$ 的评估如式(11)所示。

$$\beta(t) = \frac{1}{\alpha(t)} \cdot K_A \quad (11)$$

式中： K_A 为系统频率偏差系数，根据系统运行经验数据获取； $\alpha(t)$ 为集群功率调节的误差系数，用于修正用户多样化需求造成的不确定，可以根据式(10)得到的集群目标调节功率与式(9)得到的实际调节功率的差值计算得到，如式(12)所示。

$$\alpha(t) = \frac{P'_A(t) - P_A(t)}{\Delta P_A^*(t)} \quad (12)$$

式中： $P'_A(t)$ 为频率调节后集群的输出功率。

2) 集群控制信号。

为满足用户的数据保护需求，提升集群中心对大量调频终端的控制效率，集群的目标调节功率转化为概率控制信号。

当 $\Delta P_A^*(t) < 0$ 时，控制信号如式(13)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_A^{c2i}(t) = \max(\Delta P_A^*(t), P_A^{c,\min}(t) - P_A(t)) \\ U_A^{c2i}(t) = \frac{\Delta P_A^{c2i}(t)}{P_A(t) - P_A^{c,\min}(t)} \\ \Delta P_A^{i2d}(t) = \max(\Delta P_A^*(t) - \Delta P_A^{c2i}(t), P_A^{\min}(t) - P_A^{c,\min}(t)) \\ U_A^{i2d}(t) = \frac{\Delta P_A^{i2d}(t)}{P_A^{c,\min}(t) - P_A^{\min}(t)} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $U_A^{c2i}(t)$ 为集群中充电状态电动汽车参与“充电→空闲”的概率控制信号； $U_A^{i2d}(t)$ 为集群中空闲状态电动汽车参与“空闲→放电”的概率控制信号； $\Delta P_A^{c2i}(t)$ 和 $\Delta P_A^{i2d}(t)$ 分别为集群参与“充电→空闲”和“空闲→放电”的可调节功率。

当 $\Delta P_A^*(t) > 0$ 时，控制信号如式(14)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_A^{d2i}(t) = \min(\Delta P_A^*(t), P_A^{d,\max}(t) - P_A(t)) \\ U_A^{d2i}(t) = \frac{\Delta P_A^{d2i}(t)}{P_A^{d,\max}(t) - P_A(t)} \\ \Delta P_A^{i2c}(t) = \min(\Delta P_A^*(t) - \Delta P_A^{d2i}(t), P_A^{\max}(t) - P_A^{d,\max}(t)) \\ U_A^{i2c}(t) = \frac{\Delta P_A^{i2c}(t)}{P_A^{\max}(t) - P_A^{d,\max}(t)} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $U_A^{d2i}(t)$ 为集群中放电状态电动汽车参与“放电→空闲”的概率控制信号； $U_A^{i2c}(t)$ 为集群中空闲状态电动汽车参与“空闲→充电”的概率控制信号； $\Delta P_A^{d2i}(t)$ 和 $\Delta P_A^{i2c}(t)$ 分别为集群参与“放电→空闲”和“空闲→充电”的可调节功率。

当 $\Delta P_A^*(t) = 0$ 时，则有 $U_A^{c2i}(t) = U_A^{i2d}(t) = 0$ 和 $U_A^{d2i}(t) = U_A^{i2c}(t) = 0$ 。

3) 调频终端响应。

调频终端用于响应集群中心的概率控制信号，在参与系统调频的同时，保障用户的交通通用能和调频喜好需求。

对于任一调频时刻，控制信号为一组概率值，当 $\Delta P_A^*(t) < 0$ 时，控制信号为 $[U_A^{c2i}(t), U_A^{i2d}(t)]$ ，当 $\Delta P_A^*(t) > 0$ 时，控制信号为 $[U_A^{d2i}(t), U_A^{i2c}(t)]$ 。

①当调频终端接收到 $[U_A^{c2i}(t), U_A^{i2d}(t)]$ 后，调频终端首先响应 $U_A^{c2i}(t)$ ，响应完成后再响应 $U_A^{i2d}(t)$ ，根据用户出行需求和调频喜好决定实际响应概率，如式(15)所示。

$$\begin{cases} u_j^{c2i}(t) = U_A^{c2i}(t) \cdot (T_j^{\text{dun}}(t)/T_0^{\text{dun}})^{\varepsilon} \cdot \delta_j^c \\ u_j^{i2d}(t) = U_A^{i2d}(t) \cdot (T_j^{\text{dun}}(t)/T_0^{\text{dun}})^{\varepsilon} \cdot \delta_j^d \end{cases} \quad (15)$$

式中： $u_j^{c2i}(t)$ 为电动汽车参与“充电→空闲”的实际响应概率； $u_j^{i2d}(t)$ 为电动汽车参与“空闲→放电”的实际响应概率； T_0^{dun} 为保障用户交通通用能需求的冗余时长参考值； ε 为保障用户交通通用能需求的调节指数。

②当调频终端接收到 $[U_A^{d2i}(t), U_A^{i2c}(t)]$ 后，调频终端首先响应 $U_A^{d2i}(t)$ ，响应完成后再响应 $U_A^{i2c}(t)$ ，根据用户出行需求和调频喜好决定实际响应概率，如式(16)所示。

$$\begin{cases} u_j^{d2i}(t) = U_A^{d2i}(t) \cdot (T_j^{\text{dun}}(t)/T_0^{\text{dun}})^{\varepsilon} \cdot \delta_j^d \\ u_j^{i2c}(t) = U_A^{i2c}(t) \cdot (T_j^{\text{dun}}(t)/T_0^{\text{dun}})^{\varepsilon} \cdot \delta_j^c \end{cases} \quad (16)$$

电动汽车调频主要利用其短时间内的快速支撑能力，难以长时间提供响应能力支撑，与调节速度慢的发电机形成优势互补。系统频率稳定后，需要通过发电机的调节能力来将受控状态的电动汽车恢复到原状态。

2.2.2 集群调频恢复

集群参与调频的开始时刻为 t_0 ，则调频过程中的受控功率如式(17)所示。

$$\Delta P_A^r(t) = P_A(t_0) - P'_A(t) + \sum_{j \in \Omega^{10}(t)} P_j(t_j^{\text{ini}}) \quad (17)$$

式中： $\Delta P_A^r(t)$ 为集群需要恢复的受控功率； $\Omega^{10}(t)$ 为 t_0 时刻到当前时刻新接入的电动汽车数量。

1) 当 $\Delta P_A^r(t) > 0$ 时，恢复上调到充电状态的电动汽车至原空闲状态，恢复信号为调频终端的

延时时长, 如式 (18) 所示。

$$T^r(t) = \frac{\Delta P_A^r(t)}{\gamma} \quad (18)$$

式中: $T^r(t)$ 为上调恢复信号; γ 为发电机爬坡率。

调频终端接收到恢复信号 $T^r(t)$ 后, 受控充电状态的电动汽车, 根据恢复信号确定转为空闲状态的时间延时, 如式 (19) 所示。

$$\tau_j^r(t) = T^r(t) \cdot \pi_j(t) \quad (19)$$

式中: $\pi(t)$ 为服从 $U(0,1)$ 均匀分布的随机数; $\tau_j^r(t)$ 为上调受控电动汽车恢复原状态的时间延时。

2) 当 $\Delta P_A^r(t) < 0$ 时, 恢复下调到放电和空闲状态的电动汽车至原状态, 恢复信号为调频终端的延时时长, 如式 (20) 所示。

$$\begin{cases} T^{\text{rd}}(t) = \frac{\Delta P_A^{\text{rd}}(t)}{\gamma} \\ T^{\text{rc}}(t) = \frac{\Delta P_A^r(t) - \Delta P_A^{\text{rd}}(t)}{\gamma} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $T^{\text{rd}}(t)$ 为用于恢复放电状态电动汽车至空闲状态的下调恢复信号; $T^{\text{rc}}(t)$ 为用于恢复空闲状态电动汽车至放电状态的下调恢复信号; $\Delta P_A^{\text{rd}}(t)$ 为放电状态的电动汽车总功率, 如式 (21) 所示。

$$\Delta P_A^{\text{rd}}(t) = \sum_{j \in Q^{\text{rd}}(t)} P_j(t) \quad (21)$$

调频终端接收到恢复信号 $T^{\text{rd}}(t)$ 后, 受控放电状态的电动汽车, 根据恢复信号确定转为空闲状态的时间延时, 如式 (22) 所示。

$$\tau_j^{\text{rd}}(t) = T^{\text{rd}}(t) \cdot \pi_j(t) \quad (22)$$

式中: $\tau_j^{\text{rd}}(t)$ 为下调受控放电状态电动汽车恢复到空闲状态的时间延时。

调频终端完成受控放电状态的恢复后, 继续执行恢复信号 $T^{\text{rc}}(t)$, 受控空闲状态的电动汽车, 根据恢复信号确定转为充电状态的时间延时, 如式 (23) 所示。

$$\tau_j^{\text{rc}}(t) = T^{\text{rc}}(t) + T^{\text{rc}}(t) \cdot \pi_j(t) \quad (23)$$

式中: $\tau_j^{\text{rc}}(t)$ 为下调受控空闲状态电动汽车恢复到充电状态的时间延时。

3 算例分析

3.1 算例场景

算例采用考虑电动汽车集群调频控制的电力

系统等值调频模型, 如图 3 所示, 模型中的调频参数含义及其数值如表 1 所示^[17]。集群覆盖范围内, 一天中接入的电动汽车数量为 1 万辆, 电动汽车接入和离开电网的时间以及用能参数如表 2 所示^[18,19], 根据表中参数的分布规律, 采用蒙特卡罗方法抽样获取每辆电动汽车的时间参数和用能参数的数值, 假设电动汽车接入电网后即刻开始充电, 时间参数用于模拟各电动汽车接入和离开电网的时序过程, 用能参数用于模拟电动汽车与电网的功率交换、电池 SOC 变化过程, 调频终端利用时间和用能参数共同保障离网时电动汽车的用能需求。集群中, 假设用户仅参与“充电→空闲”调频方式的比例为 0.4, 用户参与 4 种调频方式的比例为 0.3, 其余用户不参与任何调频方式, 即接入电网后立即开始充电, 直到 SOC 满足用户需求。

表 2 中, $N(\mu, \sigma) \in [\mu_1, \mu_2]$ 表示在 $[\mu_1, \mu_2]$ 范围内服从平均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布, $U(\alpha, \beta)$ 表示在 $[\alpha, \beta]$ 范围内服从均匀分布。

为了保障用户的多样化需求, 本文假设充电桩能够与电动汽车通信, 获取电动汽车的电池电量、SOC 等信息, 用户在接入电网时需要在充电

表 1 电力系统等值调频模型参数

Table 1 Parameters of equivalent frequency regulation of power system

参数	数值
系统惯性常数 H/s	4.44
负载阻尼系数 D/pu	1.0
调速器调节速率 R/pu	0.09
调速器的时间常数 T^G/s	0.2
涡轮机时间常数 T^C/s	0.3
再加热时间常数 T^R/s	12
高压涡轮影响系数 F^{H1}/pu	0.17
机械功率增益因数 K^m/pu	1.0

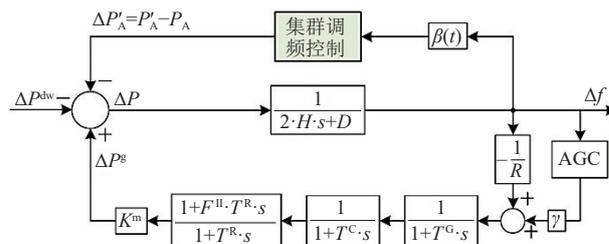


图 3 考虑电动汽车集群调频的电力系统等值调频模型

Fig. 3 Equivalent frequency regulation model of the power system with EV aggregator

表 2 电动汽车接入/离开电网的交通用能参数
Table 2 Traveling energy consumption parameters of EVs for connecting /leaving the power grid

参数	分布规律
接入电网时刻 t_j^{mi}	$N(-6.5, 3.4) \in [0, 5.5]$ $N(17.5, 3.4) \in [5.5, 24]$
接入电网时刻 t_j^{sh}	$N(8.9, 3.4) \in [0, 20.9]$ $N(32.9, 3.4) \in [20.9, 24]$
接入电网初始SOC值 s_j^{mi}	$N(0.3, 0.05) \in [0.2, 0.4]$
离开电网需求SOC值 s_j^{dem}	$N(0.8, 0.03) \in [0.7, 0.9]$
SOC最大和最小允值 s_j^{max}/s_j^{min}	1.0/0.1
电池容量 Q_j /kW·h	35
额定充电/放电功率 P_j^c/P_j^d /kW	$U(5.0, 7.0)$
充电/放电效率 η_j^c/η_j^d	$U(0.88, 0.95)$

桩上设定需求 SOC、调频喜好、离开电网时间等信息，充电桩所采集到的信息用于保障用户的多样化需求，并不上传至集群控制中心。

以 18:00 为仿真初始时刻，假设系统在 1s 时由于风电波动发生大小为 0.3 pu 的功率骤降，系统所允许的频率偏移最大值为 0.02 pu^[20]。电动汽车集群能够在频率发生偏移后快速响应，电动汽车调频控制的时间间隔为间隔为 0.5s，发电机的自动发电控制（automatic generation control, AGC）在电动汽车参与调频的 30s 后启动，帮助集群中的电动汽车由受控状态恢复到原状态，同时实现系统频率的无差调节。

集群控制中心仅采集充电桩的功率交换状态数据，并根据采集的数据和集群调频控制策略，控制中心向各电动汽车发送控制信号；电动汽车用户的用能需求、调频喜好、电池容量及状态等数据仅存储在本地调频终端控制器，终端控制器接收集群中心的控制信号，并根据终端存储的用户数据决定是否参与调频，以保障用户的多样化需求。

3.2 算例结果与分析

考虑电动汽车集群的快速响应能力，系统的频率偏移曲线如图 4 所示。可以看出，利用集群的快速调频能力，在 9.251s 时，系统的频率即可恢复到系统允许偏移的范围内，同时系统频率稳定后的频率值保持在死区范围内。

考虑电动汽车集群的调频恢复，系统的频率偏移曲线如图 5 所示。可以看出，调频恢复过程中系统的频率变化平稳，在集群参与调频的情况下，系统频率恢复到目标值（即实现误差调节）

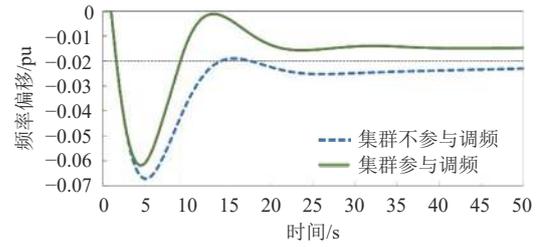


图 4 考虑电动汽车集群调频响应的频率偏移曲线
Fig. 4 Frequency deviation profile considering the frequency regulation of EV aggregator

的时间与集群不参与的情况相比，存在一定延时，原因是电动汽车充放电存在功率损耗。

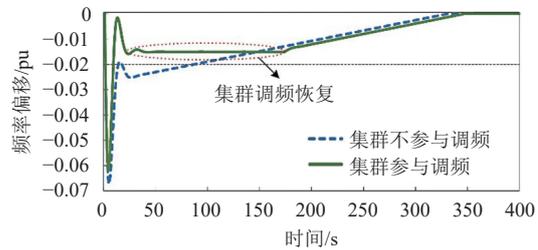


图 5 考虑电动汽车集群调频恢复的频率偏移曲线
Fig. 5 Frequency deviation profile considering the frequency regulation recovery of EV aggregator

在调频控制和调频恢复过程中，电动汽车集群总输出功率和总放电功率如图 6 所示。在调频控制过程中，可以看出集群的总输出功率快速下降，一部分电动汽车由充电状态转为空闲状态，甚至一部分电动汽车转为放电状态，而发电机接收到 AGC 信号后，会增加发电机的输出功率，放电的电动汽车首先恢复至空闲状态，然后受控处于空闲状态的电动汽车恢复至充电状态。调频前原状态为空闲状态的部分电动汽车，在调频过程中，放电会造成电动汽车的 SOC 低于用户需求值，需要恢复到充电状态，直到 SOC 满足用户需求值，因此，由于放电的车辆恢复到充电状态后，再恢复到空闲状态，电动汽车集群输出功率在恢

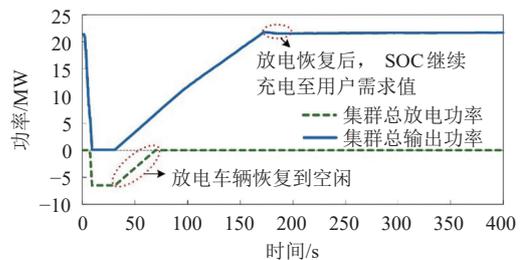


图 6 调频过程中电动汽车集群总输出功率和总放电功率
Fig. 6 Total power output and total discharging power of EV aggregator during frequency regulation

复到最大值后,会有一个降低的过程。

用户的多样化需求会造成集群调频外特性的评估误差。为验证评估误差对调频控制效果的影响,集群控制中心对用户参与不同调频方式占比的估计存在误差,当误差分别为5%、10%、20%、40%时,集群的调频控制效果如图7所示。可以看出,本文所提的调频控制策略能够有效降低误差对调频效果的影响。

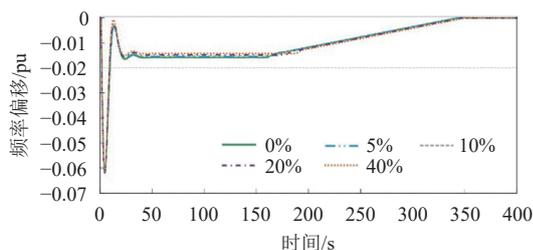


图7 不同调频方式参与度下电动汽车集群调频曲线
Fig. 7 Frequency regulation profile with EV aggregator under different participation rates for various frequency regulation modes

4 结论

交通用能和调频喜好需求直接影响电动汽车集群的可调节能力大小,数据保护需求则限制了数据采集的范围。本文综合考虑用户的多样化需求,提出集群调频外特性的等效建模方法;系统频率发生偏移后,所提出的调频控制策略,能够保障系统频率快速恢复到系统允许范围内,提升系统频率稳定性;在系统AGC频率无差调节过程中,采用延时控制方法对集群中的电动汽车进行调频状态恢复,从而保障系统频率的平稳恢复。

致谢

国网江苏省电力公司科技项目—新能源电力系统电动汽车集群互动技术与试验验证(J2021186)对本文的研究提供了资助,谨此深表感谢。

参考文献

- [1] 毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].*中国电机工程学报*,2020,40(9):2745-2756.
MAO Jiaan, MA Jing, KUAI Shengyu, *et al.* Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2745-2756 (in Chinese).
- [2] 刘晋,王哲,韩民晓,等.计及风电附加频率控制作用的电力系统暂态稳定性分析[J].*现代电力*,2019,36(2):66-72.
LIU Jin, WANG Zhe, HAN Minxiao, *et al.* Power system transient stability analysis considering additional frequency control of wind turbines[J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(2): 66-72 (in Chinese).
- [3] 唐陇军,陈子墨,朱兰,等.控制性能标准下考虑系统频率偏差特性的多时间尺度机组优化调度[J].*现代电力*,2023,40(3):314-322.
TANG Longjun, CHEN Zimo, ZHU Lan, *et al.* Multi-time scale unit optimal scheduling considering system frequency deviation characteristics under CPS index[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(3): 314-322 (in Chinese).
- [4] 中国汽车工程学会.节能与新能源汽车技术路线图2.0[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [5] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(7):1-8.
- [6] 史文龙,秦文萍,姚宏民,等.计及电动汽车需求差异的智能电网调度策略[J].*现代电力*,2021,38(2):221-232.
SHI Wenlong, QIN Wenping, YAO Hongmin, *et al.* Smart grid dispatching strategy considering the difference of electric vehicle demand[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(2): 221-232 (in Chinese).
- [7] 张亚朋,穆云飞,贾宏杰,等.电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J].*电力系统自动化*,2019,43(12):94-103.
ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 94-103 (in Chinese).
- [8] LE Floch Caroline, KARA Emre Can, MOURA Scott. PDE modeling and control of electric vehicle fleets for ancillary services: A discrete charging case[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 573-581.
- [9] 刘峻岐,蒋姝俊,王照琪,等.基于时空耦合关联分析的电动汽车集群可调度能力评估[J].*电力建设*,2021,42(12):83-92.
LIU Junqi, JIANG Shujun, WANG Zhaoqi, *et al.* Dispatchable capability of eclectic vehicle clusters considering temporal-spatial characteristics[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(12): 83-92 (in Chinese).
- [10] GUO Zhaomiao, ZHOU Zhi, ZHOU Yan. Impacts of integ-

- rating topology reconfiguration and vehicle-to-grid technologies on distribution system operation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 1023–1032.
- [11] 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.* A coordinated optimization scheduling of wind-hydro-thermal power system based on requirement of peak load and frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2033–2041(in Chinese).
- [12] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(1): 58–71.
- YANG Jingsi, QIN Wenping, SHI Wenlong, *et al.* Two-stage optimal dispatching of regional power grid based on electric vehicles' participation in peak-shaving pricing strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(1): 58–71(in Chinese).
- [13] 董镔, 蔡新雷, 崔艳林, 等. 基于马尔科夫链的电动汽车聚合建模及多模式调频控制策略[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 622–634.
- DONG Kai, CAI Xinlei, CUI Yanlin, *et al.* Aggregation modeling based on Markov chain and multi-mode control strategies of aggregated electric vehicles for frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 622–634(in Chinese).
- [14] 苏粟, 李家浩, 李泽宁, 等. 考虑用户需求的电动汽车虚拟同步机辅助调频控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(11): 40–47.
- SU Su, LI Jiahao, LI Zening, *et al.* Auxiliary frequency regulation control strategy based on virtual synchronous machine for electric vehicles considering user demand[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 40–47(in Chinese).
- [15] LIU Hui, QI Junjian, WANG Jianhui, *et al.* EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3763–3772.
- [16] 陈仲伟, 欧名勇, 谭玉东, 等. 电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(6): 77–83.
- CHEN Zhongwei, OU Mingyong, TAN Yudong, *et al.* Self-organized droop frequency regulation method for EV aggregator[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(6): 77–83(in Chinese).
- [17] 李承霖. 基于电动汽车与温控负荷的电力系统频率协调控制策略[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [18] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, *et al.* A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2768–2778.
- [19] GUO Yunpeng, LIU Weijia, WEN Fushuan, *et al.* Bidding strategy for aggregators of electric vehicles in day-ahead electricity markets[J]. *Energies*, 2017, 10(1): 144–163.
- [20] ZHANG Fang, HU Zechun, XIE Xu, *et al.* Assessment of the effectiveness of energy storage resources in the frequency regulation of a single-area power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3373–3380.

收稿日期: 2022-09-18

作者简介:

王明深(1990), 男, 博士, 工程师, 研究方向为“车-桩(站)-网”充换电设施规划与运营管控, E-mail: wmshtju@163.com;

潘益(1993), 男, 博士, 工程师, 研究方向为综合能源系统建模、优化, E-mail: panyi_scu@163.com;

缪惠宇(1992), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电能质量评估与控制, E-mail: 2392341409@qq.com;

韩华春(1988), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电动汽车 V2G、新能源并网关键技术, E-mail: 598543427@qq.com;

曾飞(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为电能质量评估与控制, E-mail: zeng_nj2021@126.com;

袁晓冬(1979), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电动汽车 V2G、电能质量与新能源, E-mail: 1838658@qq.com。