

电动汽车集群可调控潜力分析与互动控制研究综述

王明深¹, 董晓红², 戴强晟¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211101; 2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300000)

摘要: 随着电动汽车(electric vehicle, EV)和充电设施产业的持续推广普及, 未来 EV 将会逐步取代燃油汽车, 而 EV 接入电网将对电网产生不可忽视的影响。首先, 总结 EV 接入电网的特点, 分析 EV 车接入电网带来的机遇与挑战。其次, 从 EV 集群建模分析其可调控潜力与互动控制策略的 2 个应用场景, 进行国内外研究现状综述, 总结现有研究不足。最后从 EV 集群建模和控制策略方面, 对未来开展进一步研究提供一些思路与方向。

关键词: 电动汽车; 集群建模; 可调控潜力; 互动控制策略

Overview of regulatory potential and interactive control of electric vehicle aggregator

WANG Mingshen¹, DONG Xiaohong², DAI Qiangsheng¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211101, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300000, China)

Abstract: With the continuous popularization of electric vehicles (EV) and charging facilities industry, EV will gradually replace fuel vehicles in the future, and EV access to the power grid will have a significant impact on the power grid. First, the characteristic of EV access to the power grid is summarized, and the opportunities and challenges brought by EV access to the power grid are analyzed. Next, the research status from the EV aggregator modeling and two application scenarios of interactive control strategies is summarized, and the existing research deficiencies are analyzed. Finally, some ideas and directions for further research from the aspects of EV aggregator modeling and control strategy are provided.

Key words: electric vehicle; EV aggregator modeling; regulatory potential; interactive control strategies

0 引言

近年来, 随着经济社会的快速发展, 世界各国对能源的需求与日俱增。交通运输业的能源消耗在各行业中十分突出^[1], 交通领域用能向清洁化、低碳化转变成为未来发展的必然趋势。电动汽车(electric vehicle, EV)以其节能、减排、低碳、环保的巨大优势, 成为汽车发展的新形式。近年来, 在各国政府和工业界的支持下, EV 与充电设施产业得到快速发展。2019 年全球电动汽车销量已达到 224 万辆, 其中中国的 EV 销量已占全球市场的 50.5%。截止到 2019 年, 全球 EV 充电桩保有量已达到 736.2 万辆, 而中国充电桩保有量占全球市场的 39.6%^[2]。

基金项目: 基于电动汽车“交通流-信息流-能量流”协同仿真的城市区域充电设施与配电网协同规划研究项目资助(E202020131)

随着汽车技术的不断革新和动力电池技术的不断突破, EV 已经进入了高速发展阶段, 未来 EV 将会逐步取代燃油汽车, EV 的市场占比将会越来越高。大量 EV 接入电网获取电能, 会产生新的负荷, 这将会改变电网负荷的时空分布特性, 继而改变电网的潮流分布, 对源荷平衡^[3]、输电网^[4]、配电网^[5]、电网规划^[6]、碳排放^[7]等多方面产生不容忽视的影响。作为新增负荷, EV 集群接入电网可带来以下机遇: 提高终端设备利用率, 降低出行成本和污染排放等。

由于受车辆类型、用户交通出行规律、EV 数量、电池特性、政策法规^[8]等影响, EV 接入电网具有以下几个方面的特点: 单体容量小、EV 数量多、乘用车停靠时间长、EV 充电时间相对短、EV 接入电网具有时空分布特性、EV 与电网互动需要兼顾用户的利益、EV 与电网互动的实现产生大量信息流、EV 与电网互动需要用户的广泛参与等特点。

由于每一辆 EV 都有一定的电能存储能力, 理

论上也具备一定的调控能力。尽管单台 EV 的调控容量很小,完全可以忽略,但数以万计乃至百万计的 EV 出现后,经过有机协调(如有序充电,甚至在理想情况下向电网反送电),则可在用户侧形成可观调控能力,对促进电网安全经济运行有重要意义。通过利用 EV 的可调控潜力,实现 EV 与电网的友好互动。

作为可调节手段, EV 集群接入电网可带来以下机遇:实现电力系统削峰填谷,电力系统频率调控,电力系统紧急控制手段,增加电力系统的备用容量,改善电力系统稳定性和可靠性,促进可再生能源的消纳等。EV 集群并网潜力是机遇与挑战并存的。由于单体 EV 接入电网获取电能的过程,受用户交通出行规律、用户用能需求、电池特征参数、电力市场价格等因素的影响,在对大规模 EV 群体进行建模评估其可调控潜力时,这些因素会直接增加模型构建的复杂度;此外,考虑到用户不同的参与度,通信技术水平的不断改善,市场政策的不断调整,不同应用场景对 EV 集群建模方法、控制和竞价策略的要求不同,因此 EV 互动控制时需要充分考虑应用场景的基础条件、技术可行性和实现目标。

为分析大规模 EV 并网的影响,同时实现大规模并网 EV 在不同应用场景下的利用,构建合适的 EV 集群模型,是所有后续研究的基础。面向不同应用场景时的控制策略或市场应用所构建的 EV 集群模型,在考虑 EV 特点的基础上,还需满足不同应用需求。EV 集群模型构建为控制策略和市场应用的实现提供所需要的模型、参数、约束条件等。本文从 EV 集群建模分析其可调控潜力与互动控制的 2 个应用场景,进行国内外研究现状综述,总结现有研究不足。最后从 EV 集群建模和控制策略方面,对未来开展进一步研究提供一些思路与方向。

1 电动汽车集群模型的国内外研究现状

单台 EV 的能量存储和调节能力都很小,只有大量 EV(称为 EV 集群)接入电网后才能具有足够的调控容量,从而为电网提供调控能力,为此需要研究和构建 EV 的集群模型。EV 集群的建模过程需要精细化分析 EV 接入电网过程,其过程受到“用户出行相关因素”、“车辆与充电设施相关因素”的影响, EV 接入电网具有时间和空间上的随机性。

用户出行相关因素包括出行时间、出行距离、用户出行和并网决策选择等因素,而用户出行和并网决策选择涉及多个方面,包括出行路径选择、充电方式选择、充电需求选择、互动决策选择。EV

充电方式包括慢充和快充两种方式,快充的优势在于充电时间短,但是由于目前电池技术手段的限制,快充对电池损伤较大,一般作为应急充电方式,且由于快充要求尽快完成充电,快充的 EV 处于不可控状态,不能实现与电网互动,故本文只讨论 EV 慢充方式。

1.1 研究现状

文献[9-11]根据交通统计数据,获取 EV 出行时间的分布规律,在此基础上,利用抽样算法获取单体 EV 的出行参数值,从而构建了 EV 集群的统计学模型,用以评估 EV 集群充电负荷的时间分布特性。文献[12-14]分析了不同类型车辆日出行距离的分布,假设 EV 采用一日一充的模式,根据日出行距离来估算 EV 接入电网时的电池荷电状态值,在此基础上构建了考虑出行距离的 EV 集群模型。文献[15-17]采用 Origin Destination 矩阵分析方法刻画 EV 用户对出行路径的选择,获取 EV 出行终点和并网接入点,从而达到交通网和电网耦合的目的,动态模拟 EV 出行和并网过程,通过模拟所有 EV 的动态并网过程,获得 EV 集群模型以评估充电负荷的时空分布规律和分析 EV 动态接入电网的影响;文献[18-20]充分考虑了用户对充电需求的差异性,在保证 EV 用户用能需求的基础上,建立了 EV 集群模型,分析了用户充电需求对集群模型的影响。文献[21-23]则考虑了 EV 与电网的互动能力,研究了充电和放电两种电网功率交换形式,建立了 EV 集群模型来获取集群在不同时刻的可调节容量。

车辆与充电设施相关因素包括 EV 类型和电池特征,其中电池特征包括电池类型、电池容量、出行能耗、充放电效率等。文献[24]介绍了最具应用前景的 3 种 EV 电池,包括铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池,并从电化学性能和经济性角度比较了不同类型电池的发展趋势。文献[25]表明电池容量直接影响 EV 用户接入电网充电行为,电容量越大,电池续航里程越大,用户对充电的焦虑程度越低,充电的频率越低。文献[26-28]分析了 EV 出行过程中的能耗问题,如受温度、交通拥堵等影响,能耗直接影响 EV 接入电网时的初始状态,在此基础上,建立了 EV 集群模型,分析能耗对 EV 充电负荷的影响;文献[29-30]考虑了电池类型、电池容量、充电效率的影响,根据各 EV 的参数信息,可以获取单体 EV 的充电过程和响应能力,进而通过求和的方法获得 EV 集群在不同时刻的充电负荷和响应能力。

1.2 研究不足

已有文献在研究 EV 集群建模过程时,分析了来自用户出行相关因素、车辆与充电设施相关因素

的影响,建模时需要参照相关因素提取 EV 参数,并根据历史统计数据获取 EV 参数的分布规律,进而获取各单体 EV 的参数值,模拟每辆 EV 接入电网的充电过程,通过求和方法获取 EV 集群的充电负荷和响应能力。已有研究在 EV 集群建模时,未能综合考虑用户出行相关因素、车辆与充电设施相关因素的影响,忽略了这些因素对建模过程的交互影响。已有 EV 集群模型需要获取各独立 EV 的参数值,对于大规模 EV 集群,建模过程的计算量极大且模型实际应用时对通信设施的性能要求高,需要提出考虑现有基础条件和实际可行性的有效建模方法以简化集群建模的复杂度。EV 集群建模方法还需要考虑具体的实现目标,以满足具体的实际应用需求,如利用 EV 集群平抑控制可再生能源功率波动、调节系统频率、参与日前市场竞价等,在各自建模过程中,需重点考虑的因素会有所不同。

2 电动汽车集群平抑控制研究现状

近年来,为应对能源危机,风力发电、光伏发电等可再生能源发电以其节能减排的巨大优势,在世界范围内快速发展。随着可再生能源发电在电网中的大规模接入,可再生能源发电随机间歇性的特点,将会给电网的安全稳定运行产生深刻影响^[31-33]。可再生能源发电功率具有强波动性,而传统发电机由于受到爬坡率的限制,难以追踪功率的快速变化,该因素已成为制约可再生能源发电大规模入网的主要障碍^[34-36]。以电池为代表的传统储能资源能够有效追踪功率波动,然而,目前大规模配置传统储能资源成本很高。随着需求响应技术的不断发展,以 EV 为代表的需求侧资源拥有快速的功率调节能力,有取代传统储能资源的潜力,成为平抑可再生能源功率波动的新选择^[37-39]。

2.1 研究现状

利用 EV 集群的可调节潜力,已有研究提出了平抑可再生能源功率波动的控制策略。文献[40]针对配网中的 EV 集群提出了三层能量管理模型,分析了网侧调度中心与集群运营商的职责与分工,探究了 EV 集群用于平抑可再生能源功率波动的可行性。文献[41]提出了 EV 在多种运行模式下灵活控制策略,给出了利用 EV 为电网提供功率支撑的实现架构,验证了 EV 平抑功率波动实际应用的可能性。文献[42]面向风电大规模接入的背景,设计了 EV 集群平抑风电功率波动的双层控制器,上层计算功率波动率并发送相应的控制信号,下层在考虑 EV 荷电状态和用户出行的基础上提出了平抑功率波动的模糊控制器。文献[43]在考虑非工作日和工作日

负荷在不同区域分布差异性的基础上,分析了微网中 EV 集群充放电和可再生能源的协同互补特性,能够降低可再生能源接入对电网的冲击。文献[44]提出了用于限制光伏功率波动的 EV 集群有序充放电策略,根据系统净负荷功率的波动量,按照筛选条件选择满足要求的 EV 进行充电或放电的操作,从而提高电网中光伏的渗透率。文献[45]提出了考虑 EV 集群的微网联络线功率平滑方法,在可调节容量约束下,通过在短和长时间尺度上分别对 EV 集群和楼宇虚拟储能进行优化调度,从而达到有效平抑联络线功率波动的目的。文献[46]提出了 EV 集群参与平抑光伏功率波动的实时调度策略,在考虑用户出行和充放电约束的基础上,建立了利用 EV 集群跟踪光伏功率的凸优化模型,通过日内实时滚动优化实现了对光伏功率的有效平抑。

2.2 研究不足

已有文献在研究 EV 集群平抑控制策略时, EV 集群从整体上作为一个虚拟电厂参与平抑控制时,未能充分考虑 EV 集群和传统发电机的协同控制,未能充分顾及 EV 集群在不同电网节点上响应能力的差异性。EV 集群在响应平抑目标功率时,集群中 EV 运行状态具有差异性,针对大规模 EV 集群采用优化方法会增加模型的复杂度,难以满足实时控制的要求,需要提出有效的算法,根据各 EV 运行状态的差异设计相应的控制信号,在保证用户出行和用能需求的基础上,达到快速控制和充分利用 EV 可调节潜力的目的。

3 电动汽车集群频率控制研究现状

在可再生能源大规模接入背景下,源荷功率不平衡造成系统频率波动受到越来越多的关注^[47-50],现阶段储能资源的缺乏以及传统发电机爬坡率的限制,频率波动问题难以获得有效支撑^[51-54]。随着需求响应技术的快速发展,以 EV 为代表的需求侧资源能够参与系统频率调节^[55-57]。

3.1 研究现状

按照反应时间的不同,目前 EV 集群的频率响应可以分为一次调频和二次调频^[58-60]。一次调频要求 EV 集群在频率偏移发生后几秒内快速响应,实际应用时要求集群控制中心能够根据频率偏差迅速计算得到频率控制信号,并向集群中的 EV 发送相应的频率控制信号,一次调频的实现对于集群控制中心和通信设施的要求极高,需要集群控制中心能够迅速处理大量的数据,需要通信设施能够实现高质量的实时通信;二次调频要求 EV 集群在频率偏移发生 30 秒后参与系统频率响应,响应持续时间为

5~20 分钟, 实际应用允许的延时较长, 该控制的实现对控制中心和通信设施的要求远低于一次调频, 但控制中心和通信设施的质量越高, 控制效果会越好^[61-63]。文献[64-69]将集中控制方式下的群体 EV 看作一个集群, 利用 EV 集群的可调度潜力进行系统一次调频, 但并未介绍如何利用现有通信设施传输 EV 的控制信号, 一次调频的实现需要建立在通信设施质量高和集群控制中心运算能力强的假设条件下, 很难在当前通信条件下满足实际应用需求, 目前关于 EV 集群的一次调频还处于理论研究阶段; 文献[70-72]利用分散控制方式下的 EV 进行系统一次调频, 分散式控制不需要集群控制中心, 要求终端设备能够根据系统频率偏移情况迅速做出功率调整, 对通信设施要求低, 但要求终端设备能够采集系统频率、采集 EV 运行信息、实现智能算法等, 目前终端设备投入的成本较高。

针对 EV 集群的频率控制, 系统二次调频对通信设施和集群控制中心的要求远低于一次调频, 在现有的技术条件下, EV 集群更适用于参与系统二次调频^[73]。文献[74]给出了 EV 集群二次调频的实现框架, 提出了考虑网络约束的模型预测控制策略, 利用 EV 集群来追踪系统的二次调频信号, 并验证了 EV 集群进行二次调频的可行性。文献[75]结合丹麦电网高渗透率风电的特征, 利用 EV 集群在长时间尺度上提供的可调节容量, 结合丹麦电网典型日的算例, 有效评估了 EV 集群参与二次调频的实际应用价值。文献[76]考虑了 EV 在行驶状态、充电状态、受控状态之间的相互转换, 提出了 EV 集群储能能力评估模型, 并探究了 EV 集群在二次调频过程中与热泵负荷集群和电池储能系统的互补特性。文献[77]基于 EV 的快速响应特性, 在考虑各 EV 接入电网过程中实时 SOC 的基础上, 提出了一种功率分配方法来确定调频过程中各 EV 的目标控制功率。文献[78]以 EV 集群运营商作为调度中心和 EV 之间的中间商为出发点, 阐述了 EV 集群参与二次调频的实现过程, 运营商需要上传 EV 的特征参数和运行数据, 同时需要保证 EV 在完成调频任务时, 满足 EV 用户对电池荷电状态的需求。文献[79]提出了最优模糊控制器来实现 EV 集群参与二次频率调节, 通过选定 SOC 阈值的方法, 保证 SOC 过低的 EV 不会参与放电控制, 同时保证 SOC 过高的 EV 尽量减少充电控制, 从而保证电池的 SOC 稳定。文献[80]针对 EV 集群参与系统频率调节, 提出了面向 EV 集群控制中心的不确定性控制方法, 该方法不需要获取 EV 的详细充放电信息, 能够将调频功率分配给集群中的各 EV, 并通过集群控制中心与各

EV 之间的实时修正以保证用户出行需求。

3.2 研究不足

已有文献在产生频率控制信号时, 不同 EV 由于运行状态的差异, 各 EV 需要实现不同的功率调节目标, 因此, 需要针对每辆 EV 产生不同的控制信号。针对大规模 EV 集群, 频率控制需要产生大量的独立控制信号, 实时计算量大, 会造成一定的计算延时。同时, 发送独立的控制信号需要集群控制中心与各 EV 建立独立的通信通道, 通信成本高, 且大量独立控制信号会造成实时通信压力大。与此同时, 独立控制信号需要获取用户的实时运行信息和充电位置信息等用户隐私, 隐私暴露问题会影响用户积极参与频率调节。频率控制实际上影响了用户的充电习惯和充电需求, 目前尚未提出有效的控制策略来降低这种影响。

4 工作展望

关于 EV 集群的研究, 尽管目前已做了一些研究, 但研究深度和广度还远远不够, 因此未来将在以下几个方面进一步开展深入探究:

1) 关于 EV 集群建模方面: EV 集群模型在一定程度上仍然依赖用户上传的数据, 建模过程未能充分考虑用户数据隐私保护的问题, 如数据上传过程中如何考虑不同类型数据的隐私保护, 在大数据时代数据隐私保护背景下, 如何建立合理有效的 EV 集群模型还需要进一步深入研究。

2) 关于 EV 集群控制策略方面: 考虑 EV 用户数据隐私保护需求和 EV 运行状态差异性, 同时考虑通信设施的技术条件, 如何开发适用于大规模 EV 集群的概率控制信号, 在降低通信成本的同时保证 EV 集群的控制精度。

参考文献

- [1] International Energy Agency. World energy balances [DB/OL]. [2020-02-11]. <https://www.iea.org/statistics/>.
- [2] Global EV outlook 2020[R]. International Energy Agency, 2020.
- [3] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148. MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [4] WANG Mingshen, MU Yunfei, LI Fangxing, et al. State space model of aggregated electric vehicles for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 981-994.

- [5] 杨昕然, 吕林, 向月, 等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 102-108, 122.
YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under “EV-road-grid” coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108, 122.
- [6] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10.
XIAO Xiangning WEN Jianfeng TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [7] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [8] 陈丽丹, 张尧, ANTONIO F. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 177-197.
CHEN Lidan, ZHANG Yao, ANTONIO F. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 177-197.
- [9] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
LUO Zhuowei, HU Zhechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [10] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [11] 和敬涵, 谢毓毓, 张金国. 电动汽车充电负荷时空分布及其对配电网的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 83-88.
HE Jinghan, XIE Yuyu, ZHANG Jinguo. Temporal and spatial distribution research for electric vehicle charging load and the impacts on distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 83-88.
- [12] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [13] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 电动汽车充电负荷对丹麦配电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 18-23.
XU Lizhong, YANG Guangyan, XU Zhao, et al. Impacts of electric vehicle charging on distribution network in Denmark[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 18-23.
- [14] 张聪. 规模化电动汽车出行规律及充电负荷建模研究 [C] // 江苏省电机工程学会城市供用电专业委员会, 2017: 9-15.
ZHANG Cong. Research on travel law and charging load modeling of large scale electric vehicles[C] // Urban power supply and consumption Professional Committee of Jiangsu Electrical Engineering Society, 2017: 9-15.
- [15] 张晨斌, 丁明, 张晶晶. 基于交通出行矩阵的私家车充电负荷时空分布预测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 78-87.
ZHANG Chenyu, DING Ming, ZHANG Jingjing. Temporal and spatial distribution forecasting of private car charging load based on origin-destination matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 78-87.
- [16] 黄小庆, 陈颀, 陈永新, 等. 大数据背景下的充电站负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 68-74.
HUANG Xiaoqing, CHEN Jie, CHEN Yongxin, et al. Load forecasting method for electric vehicle charging station based on big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 68-74.
- [17] 李晓辉, 李磊, 刘伟东, 等. 基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 117-125.
LI Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.
- [18] 张美霞, 蔡雅慧, 杨秀, 等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 154-161.
ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 154-161.
- [19] 刘洪, 张旭, 刘畅, 等. 考虑充电设施充裕性的电动私家车出行与充电需求时序交互分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5469-5478.
LIU Hong, ZHANG Xu, LIU Chang, et al. Timing interactive analysis of electric private vehicle traveling and charging demand considering the sufficiency of charging facilities[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5469-5478.
- [20] SHAHIDINEJAD S, FILIZADEH S, BIBEAU E. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 135-141.
- [21] 葛少云, 连恒辉, 刘洪, 等. 电动汽车时序响应能力模型与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 33-38, 151.
GE Shaoyun, LIAN Henghui, LIU Hong, et al. Timing response capability model and control method of electric

- vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(3): 33-38, 151.
- [22] 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): 94-110.
ZHANG Yanpeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capacity evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 94-110.
- [23] DONADEE J, SHAW R, GARNETT O, et al. Potential benefits of vehicle-to-grid technology in California: High value for capabilities beyond one-way managed charging[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2019, 7(2): 40-45.
- [24] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. *电网技术*, 2011, 35(4): 1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(4): 1-7.
- [25] KNUITSEN D, WILLÉN O. A study of electric vehicle charging patterns and range anxiety[J]. Uppsala, Sweden: Uppsala University, 2013.
- [26] 王海玲, 张美霞, 杨秀. 基于气温影响的电动汽车充电需求预测[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(23): 123-128.
WANG Hailing, ZHANG Meixia, YANG Xiu. Electric vehicle charging demand forecasting based on influence of weather and temperature[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(23): 123-128.
- [27] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 216-225.
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 216-225.
- [28] 苏舒, 林湘宁, 张宏志, 等. 电动汽车充电需求时空分布动态演化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(16): 4618-4629.
SU Shu, LIN Xiangning, ZHANG Hongzhi, et al. Spatial and temporal distribution model of electric vehicle charging demand[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(16): 4618-4629.
- [29] MENG J, MU Y, JIA H, Et Al. Dynamic frequency response from electric vehicles considering travelling behavior in the Great Britain power system[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 966-979.
- [30] MENG J, MU Y, WU J, et al. Dynamic frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2015, 3(2): 203-211.
- [31] PARSON B, MILLIGAN M, ZAVADIL B, et al. Grid impacts of wind power: a summary of recent studies in the United States[J]. *Wind Energy*, 2004, 7(2): 87-108.
- [32] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 147-158.
LU Zhongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147-158.
- [33] 丰颖, 负志皓, 周琼, 等. 考虑风电接入的在线风险评估和预防控制[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(2): 61-68.
FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assessment and preventive control considering wind-power integration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(2): 61-68.
- [34] 杨建, 张利, 王明强, 等. 计及出力水平影响与自相关性的风电预测误差模拟方法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(9): 96-102.
YANG Jian, ZHANG Li, WANG Mingqiang, et al. Wind-power forecasting error simulation considering output level and self-correlation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(9): 96-102.
- [35] 刘文龙. 储能提升含高比例可再生能源电力系统频率稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
LIU Wenlong. Improving frequency stability of large scale renewable energy integrated power system using energy storage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [36] 李本新, 韩学山, 刘国静, 等. 风电与储能系统互补下的火电机组组合[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(7): 32-37, 54.
LI Benxin, HAN Xueshan, LIU Guojing, et al. Thermal unit commitment with complementary wind power and energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(7): 32-37, 54.
- [37] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(1): 27-34.
XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. High penetration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(1): 27-34.
- [38] 蒋效康. 计及需求响应的含大规模风电和电动汽车电力系统优化运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
JIANG Xiaokang. Power system optimal operation with large-scale wind power and electric vehicle integrated considering demand response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [39] 于飞. 考虑风电消纳的电动汽车分布式充放电调度策略研究[D]. 沈阳: 东北电力大学, 2018.
YU Fei. Research on distributed charging and discharging

- dispatching strategies for electric vehicles considering wind power accommodation[D]. Shenyang: Northeast Dianli University, 2018.
- [40] 刘其辉, 余培, 祝培鑫. 基于新能源消纳/负荷平抑的电动汽车能量管理策略[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(5): 5-10, 16.
LIU Qihui, YU Pei, ZHU Peixin. Electric vehicle energy management strategies for renewable energy consumption/load smoothing[J]. Power DSM, 2019, 21(5): 5-10, 16.
- [41] KHEMAKHEM S, REKIK M, KRICHEN L. A flexible control strategy of plug-in electric vehicles operating in seven modes for smoothing load power curves in smart grid[J]. Energy, 2017, 118: 197-208.
- [42] RAOOFAT M, SAAD M, LEFEBVRE S, et al. Wind power smoothing using demand response of electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 164-174.
- [43] 刘祎玲. 微网中电动汽车充放电策略与可再生能源协同互补研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
LIU Yiling. Charging/discharging strategies of electric vehicles and the synergistic complementary operation with renewable energy in a micro-grid[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [44] 谢小英, 李文军, 宣文华, 等. 一种平抑光伏和负荷波动的电动汽车有序充放电策略[J]. 燕山大学学报, 2015, 39(4): 352-356.
XIE Xiaoying, LI Wenjun, XUAN Wenhua, et al. A method of smoothing PV and load fluctuation by organized charging/discharging for electric vehicles[J]. Journal of Yanshan University, 2015, 39(4): 352-356.
- [45] 杜丽佳, 靳小龙, 何伟, 等. 考虑电动汽车和虚拟储能系统优化调度的楼宇微网联络线功率平滑控制方法[J]. 电力建设, 2019, 40(8): 26-33.
DU Lijia, JIN Xiaolong, HE Wei, et al. A tie-line power smoothing control method for an office building microgrid by scheduling thermal mass of the building and plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 26-33.
- [46] 胡俊杰, 周华嫣然, 李阳. 集群电动汽车平抑光伏波动实时调度策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2552-2560.
HU Junjie, ZHOU Huayanran, LI Yang. Real-time dispatching strategy for aggregated electric vehicles to smooth power fluctuation of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2552-2560.
- [47] NGUYEN N, MITRA J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 354-363.
- [48] PRADHAN C, BHENDE C N, SRIVASTAVA A K. Frequency sensitivity analysis of dynamic demand response in wind farm integrated power system[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(6): 905-919.
- [49] EL-HAMEED M A, ELKHOLY M M, EL-FERGANY A A. Efficient frequency regulation in highly penetrated power systems by renewable energy sources using stochastic fractal optimiser[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(12): 2174-2183.
- [50] HUANG Y, XU Q S, ABEDI S, et al. Stochastic security assessment for power systems with high renewable energy penetration considering frequency regulation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 6450-6460.
- [51] TURK A, SANDELIC M, NOTO G, et al. Primary frequency regulation supported by battery storage systems in power system dominated by renewable energy sources[J]. Journal of Engineering-Joe, 2019, 1: 4986-4990.
- [52] HENNINGER S, SCHROEDER M, JAEGER J. Combining frequency containment reserves and renewable power leveling in energy storage systems[J]. Energy Procedia, 2016, 99: 147-156.
- [53] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 115.
- [54] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.
- [55] WU Y K, TANG K T. Frequency support by demand response—review and analysis[J]. Energy Procedia, 2019, 156: 327-331.
- [56] MUHSSIN M T, CIPCIGAN L M, SAMI S S, et al. Potential of demand side response aggregation for the stabilization of the grids frequency[J]. Applied Energy, 2018, 220: 643-656.
- [57] BABAHAJANI P, SHAFIEE Q, BEVRANI H. Intelligent demand response contribution in frequency control of multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1282-1291.
- [58] SHI Q, LI F, HU Q, et al. Dynamic demand control for system frequency regulation: concept review, algorithm comparison, and future vision[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154: 75-87.
- [59] XIAO G X, LI C B, YU Z C, et al. Review of the impact of electric vehicles participating in frequency regulation on power grid[C] // Chinese Automation Congress, 2013, Changsha, China.
- [60] PENG C, ZOU J X, LIAN L. Dispatching strategies of electric vehicles participating in frequency regulation on power grid: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy

- Reviews, 2017, 68(1): 147-152.
- [61] HUI H, DING Y, SONG Y, et al. Modeling and control of flexible loads for frequency regulation services considering compensation of communication latency and detection error[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 161-174.
- [62] LEDVA G S, VRETTOS E, MASTELLONE S, et al. Managing communication delays and model error in demand response for frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 1299-1308.
- [63] QI J J, KIM Y, CHEN C, et al. Demand response and smart buildings: a survey of control, communication, and cyber-physical security[J]. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2018, 1(4): 18.
- [64] 李承霖, 周宇, 胥峥, 等. 基于电动汽车能效电厂的系统频率控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(11): 68-74.
LI Chenglin, ZHOU Yu, XU Zheng, et al. System frequency control strategy based on efficient power plant of electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(11): 68-74.
- [65] IZADKHAHAST S, GARCIA-GONZALEZ P, FRÍAS P. An aggregate model of plug-in electric vehicles for primary frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(3): 1475-1482.
- [66] MU Y, WU J, EKANAYAKE J, et al. Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 1142-1150.
- [67] KARIMINEJAD N, TAHER S A, SHAHIDEHPOUR M, et al. A hierarchical governor/turbine and electric vehicles optimal control framework for primary frequency support in power systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6702-6712.
- [68] MARINELLI M, MARTINENAS S, KNEZOVIC K, et al. Validating a centralized approach to primary frequency control with series-produced electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2016, 7: 63-73.
- [69] IZADKHAHAST S, GARCIA-GONZALEZ P, FRÍAS P, et al. Design of plug-in electric vehicle's frequency-droop controller for primary frequency control and performance assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4241-4254.
- [70] LIU H, HU Z, SONG Y, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [71] XU X, ZHANG C, GU L. Decentralized primary frequency regulation control strategy for vehicle-to-grid[C] // *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, 2016, Shanghai, China.
- [72] MOLINA-GARCIA A, BOUFFARD F, KIRSCHEN D S. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 411-419.
- [73] 何丽娜. 电动汽车充电负荷频率响应控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
HE Lina. Research on the control strategy for electric vehicles charging load to participate in system frequency response[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [74] GALUS M D, KOCH S, ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, a cogeneration unit[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4568-4582.
- [75] PILLAI J R, BAK-JENSEN B. Integration of vehicle-to-grid in The Western Danish Power System[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(1): 12-19.
- [76] MASUTA T, YOKOYAMA A. Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1253-1262.
- [77] LI J, AI X, HU J. Supplementary frequency regulation strategy considering electric vehicles[C] // *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, 2018, Beijing, China.
- [78] 付文波. 电动汽车参与电网二次频率调节控制策略研究[D]. 南京: 江苏大学, 2016.
FU Wenbo. Vehicle-to-grid control for the supplement frequency regulation of a power grid[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2016.
- [79] FALAHATI S, TAHER S A, SHAHIDEHPOUR M. Grid secondary frequency control by optimized fuzzy control of electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 5613-5621.
- [80] LIU H, QI J, WANG J, 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.

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-08-07

作者简介:

王明深(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为群体电动汽车充电规划、优化调控与运营机制; E-mail: wmshtju@outlook.com

董晓红(1989—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电动汽车充电设施与配电网系统规划, 需求侧响应; E-mail: dxh@hebut.edu.cn

戴强晟(1989—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为智能配电网、电力系统规划与运行控制。E-mail: day_qs@163.com