

引用格式:刘嘉彦,李祖坤,李畅,等.电动汽车与电力—交通耦合网互动:综述与展望[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):12-24.

Citation: LIU Jiayan, LI Zukun, LI Chang, et al. Interaction between electric vehicles and power-transportation coupled networks: current status, challenges and development trends[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 12-24.

电动汽车与电力—交通耦合网互动:综述与展望

刘嘉彦, 李祖坤, 李 畅, 李 勇

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

摘 要:随着电动汽车的广泛普及,交通电气化程度不断上升,配电网与交通网呈现出深度耦合的趋势。实现电动汽车与电力—交通耦合网间的高效互动,可有效提升电网运行稳定性,并缓解交通网的拥堵,因此,其成为电力系统和电动汽车领域研究的热点。全面介绍电力—交通耦合网的基本概念,并深入探讨3个关键领域:电力—交通网耦合系统建模和状态预测、两网耦合下的EV充电站规划以及两网耦合下的优化调度与控制,并分析其标准体系建设状况,对其未来的发展方向提出前瞻性的展望。

关 键 词:电动汽车;电力—交通耦合网;充电站规划;优化调度与控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.002 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)05-0012-13

Interaction between electric vehicles and power-transportation coupled networks: current status, challenges and development trends

LIU Jiayan, LI Zukun, LI Chang, LI Yong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With the widespread popularization of electric vehicles (EVs) and the increasing level of electrification in transportation, there is a growing trend of deep coupling between the distribution grid and the transportation network. Achieving efficient interaction between EVs and the power-transportation coupled network can effectively enhance the stability of grid operation and alleviate congestion in the transportation network, thus becoming a research hotspot in the fields of power systems and EVs. This paper provides a comprehensive introduction to the basic concept of the power-transportation coupled network and delves into three key areas: modeling and state prediction of the power-transportation coupled system, EV charging station planning under the coupling of the two networks, and optimal dispatch and control under the coupling of the two networks. Additionally, it analyzes the status of the development of its standard system and offers forward-looking prospects for its future direction.

Key words: electric vehicle; power-transportation coupled network; planning of charging stations; optimal dispatch and control

随着化石能源的逐渐枯竭和气候变化问题的日益严峻,全球各国正面临着能源转型的紧迫需求。电动汽车(electric vehicle, EV)以其在促进可持续发展与环境保护方面的显著潜力,正逐步取代传统的化石燃料汽车^[1]。为此,各国提出了一系列

EV发展规划,并制定了推动EV的相关政策。截至2023年底,中国EV保有量达到2 041万辆,占汽车总量的6.07%,预计到2025年,EV将占汽车总量的大约20%。并预计到2035年,纯EV将成为新车销售的主流,同时公共交通工具也将实现全面电动

收稿日期:2024-06-15;修回日期:2024-07-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024ZD0800804);国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U22B20104);湖南省自然科学基金(2024JJ6143);长沙市自然科学基金(kq2208028)

通信作者:李 勇(1982—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事长期从事能源/电力系统优化运行与控制等方面的研究;E-mail: yongli@hnu.edu.cn

化。国际能源署在其可持续发展情景中提出,到2030年,全球EV的保有量需达到2.5亿辆,到2035年,EV数量将增长到5.85亿辆,这将占到全球汽车总量的30%,如图1所示。



图1 2023—2035年电动汽车保有量

Figure 1 Electric vehicle ownership from 2023 to 2035

然而,EV的大规模普及给电网带来了巨大的挑战,尤其是在电网侧充电基础设施接入、充电负荷随机性冲击等方面。大规模EV接入电网带来的时序充电特性会极大地影响负荷分布,在充电高峰期,其会进一步加重运行负荷,使得电网调节能力减弱,降低电网运行的稳定性^[2]。同时,现有的充电基础设施难以满足用户不断增长的充电需求^[3]。《2023中国电动汽车用户充电行为研究报告》显示,70.6%的用户认为充电网络覆盖度低,高速服务区充电服务满意度最低,85.4%的用户认为排队时间过长,仅有26%的用户对充电价格表示满意。与此同时,单桩充电利用率不高,投资建设成本难以收回等问题也逐渐凸显,过低的充电桩利用率成为EV充电行业盈利能力面临的最大挑战^[4]。此外,由于EV补能形式与燃油车的区别,充电桩的分布会在一定程度上改变交通流,尤其在高峰充电时段其会带来拥堵、排队等问题。

随着新能源汽车保有量的不断提升,EV参与的电力—交通网耦合更加紧密,通过挖掘EV的用户行为、交通分布、充电时间、配电网承载能力等特征,可以更合理地规划充电基础设施。在此基础上通过激励手段合理引导EV用户充电行为,结合智能有序充电策略,能够在交通网规避拥堵、电网侧促进安全稳定与经济运行,全方位提升交通网和电力网的运行效率。因此,展开EV与电力—交通耦合网互动的研究具有重大意义。

本文旨在对EV与电力—交通耦合网互动的发展现状进行总结与分析,从电力—交通网耦合系统概述、电力—交通网耦合系统的建模与状态预测、

电力—交通网耦合下的EV充电站规划、电力—交通网耦合下的优化调度与控制4个方面展开介绍,并探讨其标准体系建设状况,分析未来的发展趋势。通过深入研究,本文期望为EV与电力—交通网耦合系统的互动提供有价值的见解和建议,对构建更加智能、高效、绿色的电力—交通网耦合系统进行展望。

1 电力—交通网耦合系统概述

1.1 V2G基本概念

车—网互动(vehicle-to-grid, V2G)技术在电动汽车充电时通过双向变换器控制,实现电动汽车与电网间的双向能量流动^[5]。V2G不仅包括能量的交换,还涉及信息的通信,使得电动汽车可以作为移动储能单元参与电网的调节和管理。其中,城市电网与交通系统之间的能量耦合流程体现在电力的供应与需求管理上。充电桩通过交流/直流并网手段接入配电网各个节点,满足车辆的充电需求,在电网有需求时通过V2G技术将电能回馈电网,从而实现能源的双向流动和电力负荷的平衡。同时,电网必须有效管理由于EV充电引起的额外负荷,通过需求响应策略和储能系统等技术手段来优化电网运行。信息耦合流程则涉及到数据的收集、交换和智能控制。智能交通系统收集实时交通数据,如车辆流量和充电需求,并通过通信网络与智能电网系统共享这些信息。这些数据帮助电网预测和调整充电桩的运行策略,以适应不断变化的充电需求和电力供应状况。这种信息的双向流动和智能控制机制,不仅提高了能源使用效率,还为EV车主带来了潜在的经济收益,促进了城市可持续发展。

1.2 基于V2G技术的电力—交通网耦合系统

电动汽车既是交通网的重要用户,也是配电网的用电终端^[6]。在交通网中,EV的车辆特点、出行路径规划等驾驶者行为习惯直接或间接地影响了道路交通的通畅程度;另一方面,道路交通信息同样影响了驾驶者对EV充电路径的选择。在配电网中,EV的充电时间和充电模式等因素在配电网的稳定与经济运行中扮演着关键角色,而电网可通过电价引导等方式改变EV的充电方式^[7]。随着EV保有量逐年增加,EV及其充电设施对电力网络和交通网络的耦合作用越来越强,在引导EV参与智能有序充电的背景下,交通—电力耦合网络模型随之建立。电力—交通耦合网络模型交互影响示意

如图2所示。

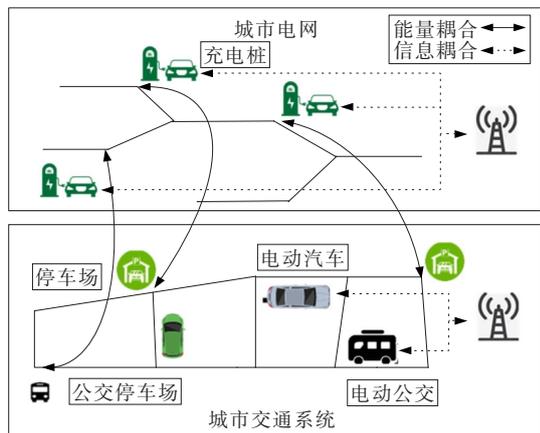


图2 城市电气化交通系统与城市电网的耦合结构

Figure 2 Coupling structure of urban electrified transportation system and urban power grid

电力—交通耦合网络由电动交通工具、充电基础设施、电网、能源管理系统、通信网络等部分组成,以“车”“站”“网”为三大核心,如图3所示。在“车”部分,对不同电动交通工具进行充电的时空分布预测;在“站”部分,通过路径规划与定价机制引导充电行为;在“网”部分,通过调节EV充电功率,提升配电网的稳定性与经济性,“车”“站”“网”三者通过V2G系统耦合协同、互动管理。交通—电力耦合网络模型有效整合了交通和电力资源,一方面,为EV用户提供更可靠和经济的充电服务,减少交通拥堵,提高交通网运行效率;另一方面,为电网运营商提供了更多的灵活性和控制能力,在提高能源利用效率,减少环境污染方面发挥了重要作用。



图3 “车”“站”“网”互动管理

Figure 3 Interactive management of “vehicle”, “station”, and “network”

2 电力—交通网耦合系统建模与状态预测

在电力交通网耦合系统中,准确预测充电负荷和交通流量对于实现能源效率和交通流畅至关重

要。随着电动汽车的普及,对于充电速度和便捷性的要求也日益提高。本节将探讨充电负荷预测和交通流预测的先进方法,分析影响预测准确性的关键因素,并评估不同预测技术在实际应用中的有效性。

2.1 充电负荷建模与预测

EV不仅作为电网的负荷存在,还兼备储能的潜力,其充、放电行为在时间和空间上呈现出随机性和波动性,精准的EV充电负荷时空分布预测是研究EV对电网运行影响的基础。从影响EV充电负荷分布的因素入手,可将其分为客观因素和主观因素两大方面。其中,客观因素包括规模数量、电池特性、出行环境以及充电电价等方面,主观因素则主要考虑用户行为、用户心理以及补给方式等个人因素^[8],对其设置不同的权重得到的预测结果亦不同,充分考虑各种因素可提高负荷预测的精度。

EV的充电将不可避免地面临排队问题,而充电站的分布会影响用户充电的排队时间,改变EV充电负荷的时空分布。排队论是一种经典的建模方法,如图4所示。在分析EV充电行为的基础上,基于排队论^[9-10]建立充电服务设施排队模型,可有效提高充电负荷预测的准确性。但该方法忽略了电动汽车的流动性,并未充分考虑用户的主观因素,用户的行驶习惯、出行路径、充电时刻以及博弈心理等。通过对用户进行行为分析,搭建出行链、马尔可夫链、交通出行矩阵等反映出行规律的模型^[11-12],对充电负荷的时空分布建模将更为准确。研究EV在一定区域和时间内的出行规律,并采用蒙特卡洛模拟、数理统计分析、后悔理论等方法建立用户充电需求的概率模型^[13-14],其系统的可靠性参数由数学公式进行计算,能进一步提高充电模型精度。

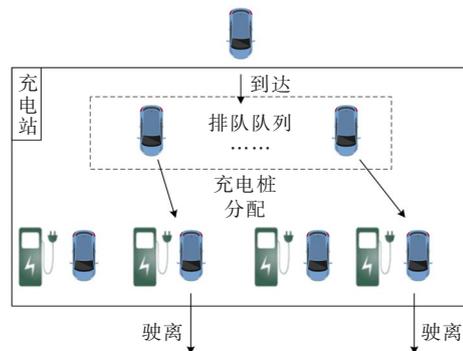


图4 充电站电动汽车充电排队模型

Figure 4 Queuing model for electric vehicles at charging station

除了上述机理模型驱动方法外,数据驱动型的预测方法逐渐得到青睐,运用机器学习、强化学习、深度学习以及集成学习等智能算法对EV历史充电数据进行处理分析^[15-16],对EV充电负荷进行预测,其效果更接近真实充电负荷。在此基础上,将机理建模与数据建模两种方法相结合,在简化预测模型的同时,减少对历史数据的依赖性,能够进一步提高预测精度。文献[17]提出了一种EV充、放电容量的组合预测方法,基于EV历史充电数据和用户参与EV与电网互动(V2G)意愿,分析车辆荷电状态(state of charge, SOC)特性、出行时间特性以及用户对价格的敏感度,建立随机森林分类模型,判断车辆是否参与V2G调度,并对影响用户决策的特征因素进行重要性评估,采用蒙特卡洛方法模拟电动汽车出行和充、放电情况,分别预测充、放电容量。

2.2 交通流建模与预测

随着智能交通系统的发展与EV的大规模普及,交通流建模与预测逐渐成为研究的热点问题。它对于缓解交通拥堵、提高道路安全、优化能源分配和提升出行效率具有至关重要的作用,电力—交通网耦合系统的协同优化往往立足于交通网的运行状况。

在交通流预测的早期研究中,主要采用时间序列分析来对交通流进行预测,其中运用较多的是自回归积分滑动平均模型(auto regressive integrated moving average, ARIMA)^[18]以及自适应卡尔曼滤波器^[19]等方法。然而,此类方法难以拟合非线性和不确定性的交通流数据。

深度学习凭借其在获取数据高层特征方面的独特优势,成为了交通流预测新的解决方案之一。通过结合深度信念网络和长短期记忆神经网络,进行短时交通速度预测取得了良好的预测结果^[20]。除了时序特性外,交通流也具有明显的空间相关性,卷积神经网络被用于分析交通网络中相邻位置间的互相影响。文献[21]提出了一种基于卷积神经网络的多特征预测模型,综合考虑了多种时空特征和外界因素,对网络规模的交通流进行预测。然而单一的方法预测精度有限,可将不同的方法融合,形成混合模型,进一步提升交通流预测精度。因此,文献[22]结合深度卷积神经网络和长短期记忆神经网络的优点,建立了时空递归卷积网络,将其用于交通流预测,提升预测精度。此外,通过将空间和时间依赖分别以序列到序列建模和图卷积

网络建模,可以在多步交通状态预测中捕获复杂的非平稳时间动态和空间相关性^[23]。

3 双网耦合下的EV充电站规划

充电设施的缺乏以及不合理的充电站规划是制约EV发展的主要原因之一^[23]。制定合理的充电站规划策略是现阶段促进电力—交通耦合网高效运行的重要研究方向。传统充电基础设施规划方法与加油站规划方法相结合^[24]的策略并未充分考虑EV充电时间过程耗时较长的特点,可能导致空间资源的浪费。因此,需要探索更为合理的充电站规划方法,以实现交通系统的电气化^[25]。目前的规划方法主要从充电便利性、建设成本等方面考虑,而随着对电力—交通耦合网的高效运行需求的增加,考虑双网耦合下的EV充电站规划也愈发受到关注。

3.1 基于便利性和建设成本的充电站规划

电动车的充电需求与人们的移动能源需求密切相关,其充电负荷受到日常活动模式的影响,这决定了电动车在1d内的行驶距离、充电地点选择以及充电时间的安排。文献[26-27]依据国家驾驶行为模式和人口统计数据,对电动车的驾驶模式进行了模拟。然而,这些研究并未充分考虑交通系统的基本原理。马尔可夫链被广泛应用于模拟电动车的移动性,原点—目的地(origins-destinations, OD)分析作为一种分析交通流特性的方法,其在时间和空间维度上的应用也得到了推广。文献[28-29]开发了时间和空间上对电动车的移动行为进行精确模型。基于这些空间信息,文献[30]提出了一种基于OD分析的电动车充电建模方法,更有效地规划了充电设施。对于公共交通领域的电动车,如城市公交车,其充电设施的规划原则是在固定的行驶路线上选择适宜的充电站点。文献[31]针对城市公共汽车系统,提出了电动车充电站的布局方案。此外,智能城市中动态无线充电的概念也为电动车充电设施的规划提供了新的思路和解决方案^[32]。

在充电站的规划建设过程中,除了考虑交通信息之外,还必须兼顾地点的施工难度和建设成本。通过分析真实的地理信息,需要对城市中建设的各项信息进行对比,包括土地租金、充电设施的建设与维护成本、站点电气化组件的投入以及电网能源的损耗等^[33]。同时,充电站的容量配置也不容忽

视。由于EV的充电所需时间远超燃油车辆的加油时间,若充电站容量过小,则会增加用户的等待时长。相反,若充电站容量过大,则可能导致充电设备的空置率提高,造成建设成本的浪费,影响充电站运营商的盈利能力。基于排队理论的充电站模型^[34]能够有效地反映EV在站点中的进出流量,这一模型已被应用于充电站的规划与设计^[35]。此外,文献[36]采用M/M/s排队理论对高速公路上充电站中EV的排队现象进行了模拟,为充电站的优化配置提供了理论依据和实践指导。

为了提升EV充电站内充电设施的使用效率,学术界已经开始着手研究充电站的建设与规划。文献[37]提出了一种创新的单充电器多端口(single charger with mutiple ports, SCMP)充电站设计方案。该方案允许一个充电器通过多条电缆与多个停车位端口相连,通过智能控制电缆的连接与断开,充电器可以为不同停车位上的EV提供充电服务。这种设计方案不仅能够有效降低充电站的建设与运营成本,缩短单个充电器的空闲时间,提升盈利潜力,还能在一定程度上减轻电网升级改造的财务负担。在SCMP方案的基础上,有学者进一步提出了多充电器多端口(mutiple charges with mutiple ports, MCMP)充电站规划方法,旨在进一步提升充电站的运营灵活性^[38]。与SCMP方案相比,MCMP方法通过多个充电器为多个停车位提供服务,不仅进一步降低了所需安装的充电器总数,减少了建设与维护成本,还增强了充电站在高峰时段或面对快速增长的充电需求时的服务能力。

这些创新性的充电站规划方法对于提升充电站的经济效益具有重要意义,同时也为EV的推广和可持续发展提供了支持。通过降低电网改造成本和提高充电设施的使用率,这些方法有助于减少EV的整体运营成本,吸引更多消费者选择EV作为出行工具。此外,通过提升充电站的服务质量和效率,这些方法还能改善用户的充电体验,为EV产业的发展注入新的活力。

3.2 考虑交通和配电网互动的充电站规划

随着充电站建设的快速推进,充电设施对电网系统的影响将不可忽略。美国加利福尼亚大学洛杉矶分校^[39]对EV用户和充电站的使用情况进行了一年的统计,对不同品牌和型号的EV充电行为进行分析,总结出了一定的共性规律。文献[40]提出了一种基于排队分析的方法来模拟EV

充电站24 h内的充电负荷曲线,并探讨了这种变化对配电系统运营商的统计影响。结果显示,EV充电带来的静态负荷显著改变了电网的高峰和低谷时段。考虑到EV充电负荷的负面影响对配电网的稳定性带来的巨大影响,文献[41]讨论了IEEE 33系统安装充电站后的可靠性问题。此外,充电站对配电网电能质量的影响也是目前关注点之一^[42]。综合上述因素,文献[43]对充电站对电网影响的趋势、存在的问题、相关标准和缓解措施进行了总结。

因此,规划结果需要根据实际电力系统的条件进行调整,电力系统中充电站的选址在满足经济和安全运行限制的同时,应尽量减少充电站规模及其对应电网升级的投资成本。文献[44-45]分别研究了具备车对网(V2G)功能的EV充电站在配电网中的最优规模和选址问题。但是,这些研究并未根据实际交通条件进行调整。因此,通过结合EV数量、电力系统安全运行限制和EV续航里程的影响,建立综合考虑交通和电力网络互动的EV充电站选址定容模型是实现双网耦合建模的必要条件之一^[46]。文献[47]将交通网络的利益整合到配电网和充电站联合规划模型中,旨在减轻充电站对交通条件的负面影响。该研究设计的多目标联合规划模型可以最小化规划成本和不平衡交通流,并通过新的双层Benders分解算法进行求解。

随着能源转型的加快,可再生能源以分布式发电(distributed generation, DG)的形式越来越多地整合到配电网中。相较于输电系统,配电系统结构更为脆弱。因此,EV充电设施的规划也越来越多地与DG的规划相结合^[48-49]。因此,文献[50]考虑DG和负载消耗的时间变化特性,提出了考虑配电网DG单元、EV充电站和储能系统的选址定容规划方法,采用二次锥模型进行求解。文献[51]提出了环保型的远程混合微电网概念,并设计了一个相应的智能EV充电站和DG的联合规划方法。

如图5所示,通过进一步考虑交通与电力网络的互动,了解双网耦合下充电站规划的决策变量、参与主体与影响因素,制定合理的交通网—配电网耦合下的充电站规划方案,可以有效减轻充电站对交通和电网的负面影响,推动EV的普及和可持续发展,这些研究成果对于实现充电站的经济高效运营、降低电网升级成本、提升服务质量具有重要价值。

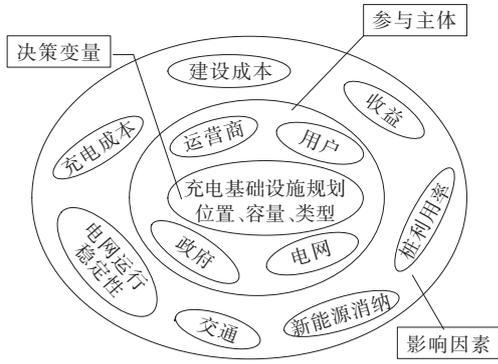


图 5 两网耦合下充电站规划决策变量、参与主体和影响因素

Figure 5 Decision variables, participating entities and influencing factors in charging station planning under the coupling of two networks

4 两网耦合下的优化调度与控制

交通网络和电力配电网作为现代社会的两大基础设施,其高效协同运行对于城市可持续发展至关重要。交通网络的流动性和配电网的稳定性相互影响,共同决定了城市运行的效率和可靠性。如图 6 所示,本节旨在探讨交通网与配电网耦合下的优化调度问题,以期实现两大网络的和谐运作和资源的最优分配。

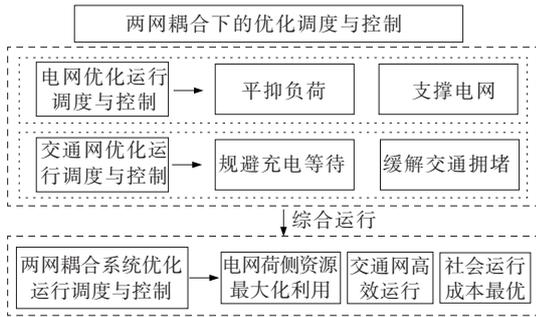


图 6 两网耦合下的优化调度与控制

Figure 6 The optimal dispatch and control under two-network coupling

4.1 电网优化运行调度与控制

大规模 EV 的无序充电负荷为电网的稳定运行带来了巨大的影响,为了优化配电网的运行效率,充分利用 EV 的灵活可调资源特性,对 EV 的充电进行有序高效管理,可实现 EV 与电网之间的高效互动。常用的 EV 调控方式主要包括集中式控制、分散式控制和分层式控制,如图 7 所示。

集中式充电调度方式^[52-54]将所有 EV 的调控集中在一个中心控制系统,该中心系统负责收集所有车辆的电力需求信息,统一制定策略并下发指令。

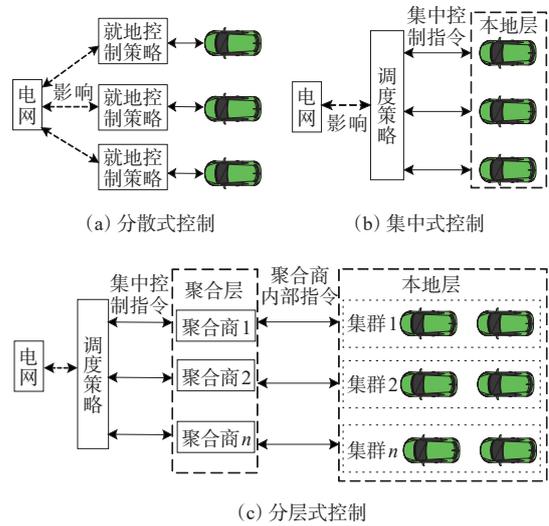


图 7 现有不同类型的 EV 充电控制框架

Figure 7 Existing different types of EV charging control frameworks

分散式调度是一种在 EV 个体层面进行管理和调控的方式,在该模式下,每辆 EV 都装备有智能控制系统,能够根据车辆自身的状态和外部环境(如电价变化、电网需求等)自主做出决策^[55-57]。分层式控制结合了分散式和集中式控制的优点,通过建立多层次的控制系统来管理 EV^[58-60]。在这种模式下, EV 内部的控制系统负责处理局部和即时的调控需求,而上层的中心系统则负责制定长期和全局的策略。这种控制方式适用于大规模 EV 的管理和调控,能够有效地平衡电网负荷和提高能源利用效率。

EV 有序充、放电策略可应用于配电网的削峰填谷^[61-62]。文献[63]提出了类似的方法,利用 EV 作为分布式储能单元的潜力,平抑电网中的负荷波动,实现削峰填谷。文献[64]提取了不同类型 EV 充电负荷特性,并分析了集群 EV 与电网在系统稳定性方向的交互与影响,通过 EV 充电时间及充电功率等灵活资源的集群调控,实现了需求侧负荷削峰填谷的目标。

由于接入高充电功率的 EV 充电站,配电网中的功率流发生了巨大变化,经济调度可能导致电网中出现超出安全运行范围的电流或电压。为应对这一挑战,将 EV 充电的调度问题可以扩展到最优潮流(optimal power flow, OPF),能够实现配电网潮流的综合优化^[65]。然而,这种问题往往是高度非凸问题,一般通过最小化发电和充电成本,满足网络、物理和非弹性负载为约束,优化配电网潮流。文献[66-68]分别提出了不同的 EV 充电策略,用于联合优化功率流路由和 V2G 调度,以提供调节服

务,改善电力潮流并降低发电成本。

电动汽车作为可调度的移动储能,亦可参与电网的频率调节,改善电网运行状态,通过分散式的V2G控制方法^[69]或EV集群调频控制策略^[70],能够在保障客户的充电需求同时实现一定程度上的电网频率支撑。在此基础上,文献[71]提出了一种基于滑模比例-积分(proportional-integral,PI)控制的发电机和EV集群联合优化方法,有效降低了系统调频成本。调频需要频繁充、放电以满足有功功率需求,计及电池寿命损耗下,EV参与能量-调频市场的协同优化策略,能在确保用户收益前提下,缓解电池损耗,提高用户集群化管理的意愿^[72]。此外,文献[73]通过使用EV对微网系统进行频率控制,也能在一定程度上利用V2G技术实现。

近年来,可再生能源(renewable energy sources, RESs)在电力系统中的渗透率迅速增长^[74]。因此,在制定协调充电调度策略时,与RESs的互动已成为研究热点。文献[75]提出了含有RESs的配电网V2G动态调节的优化模型,采用V2G抑制由RESs渗透引起的电压波动,并最小化运营成本。文献[76]引入了适当的随机模型来捕捉可再生能源的波动性和间歇性,并在提出了系统发生故障后采用有序充电和可再生能源调控相结合的支撑方法。文献[77]研究了一种通过使用车对网系统来平滑大规模风电波动的方法,设计并建立了能源管理和优化系统。此外,EV可整合到住宅能源系统的最佳管理中,提高能源利用效率^[78-79]。

4.2 交通网优化运行调度与控制

EV充电策略必须充分考虑交通网络的影响,合理选择EV路径将有助于提高EV用户的出行效率,缓解用户在高峰时段充电的困难。

文献[80]研究了一种去中心化策略,将EV分配到一个FCS网络中,目标是 minimized 排队时间。文献[81]建立了电动汽车的动态能耗模型与充电站的M/M/S排队模型,在双向Martins算法的基础上求解充电路径优化问题。然而,传统方法没有考虑到不同方面用户的个性化需求,限制了该策略的有效性和扩展性。

为了有效地分流高峰时段的充电需求,文献[82]提出了一种基于动态排队长度相互影响的个性化快速充电导航策略,可以实现有序充电。此外,为了解决高峰时段过多的流量导致的计算能力不足的问题,算力优化方法能够有效缓解路径导航带来的算力不足问题^[83]。文献[84]采用基于分层

的增强式强化学习方法求解充电路径引导问题,有效提高了收敛速度,优化了充电成本,且在环境参数变化时体现了良好的适应性。由于交通网络存在随机性和不确定性,简化的确定性模型与实际交通网络之间的偏差可能导致电池过度放电甚至在途中耗尽电力。为了提高导航的准确性,可将先前的确定性充电导航扩展到基于随机交通网络模型和在线信息的在线导航系统中^[85]。

合理的EV导航策略能为用户提供距离或耗时最短的路径,减少能耗。对于固定路线的公共交通系统,其导航策略通常集中在最小化驾驶成本、提高使用寿命和驾驶安全性上。文献[86-87]为使用电池的机场班车设计了调度路径方法,每辆班车都有固定的时间表。私人EV用户需要合理安排充电站的导航路径,文献[88]采用启发式控制策略来优化给定扭矩和速度的EV车辆的能量消耗。文献[89]采用了行程信息并集成了最佳路径规划,使驾驶员能够选择适当的驾驶模式以实现最佳能耗。图8给出了基于实时交通流的EV充电导航框架。

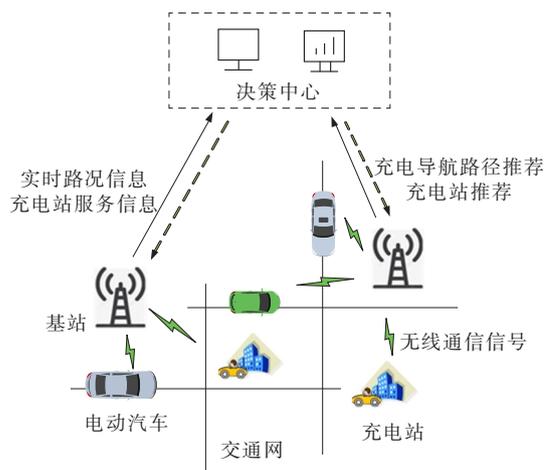


图8 基于实时交通流的EV充电导航

Figure 8 EV charging navigation based on real-time traffic flow

而目前大多数研究,忽视了电动汽车从道路驶向充电站途中的降速转弯、避障与停车等复杂情景,无法做到对实际充电路径的准确描述。为此,文献[90]提出一种三段式表达法以描述电动汽车的充电路径,并设计了一种包含状态空间、动作空间、状态转移与奖励函数的充电导航方案,将充电路径规划建模为马尔可夫决策过程,并利用Q学习方法与深度Q网络(deep Q-network, DQN)方法求解,考虑了降速转弯等现实场景,实现了更好的路径规划效果。

4.3 双网耦合系统优化运行调度与控制

经过上述讨论,可以发现EV的行驶行为、充电方式会综合影响电力网络和交通网络的运行。因此,考虑电力—交通耦合网互动的研究也是目前研究热点之一。

为了改善交通网的拥堵和电力网的运行波动,通过考虑时间成本和充电成本,能够实现对双网耦合下的电动汽车导航路径优化^[91]。文献[92]提出了一个交通用户均衡模型,用于描述由汽油车和EV组成的交通流的稳态分布,通过迭代求解交通分配问题和最优功率潮流问题,实现双网耦合。文献[93]通过同时考虑交通网络的动态用户均衡和配电网的交流动态最优功率流,提出了交通—配电协调模型,该模型最小化交通网络的出行成本和配电网的能源服务成本。文献[94]提出了一种基于分层博弈方法的综合充电交通运营框架,通过大量电动汽车的充电导航将电力系统与交通系统连接起来。它通过吸引电动汽车在非高峰时段充电,通过实时导航节省车主的时间,使得2个系统受益;文献[95]提出了一种考虑混合需求不确定性的电力—交通耦合网络鲁棒定价模型,以引导系统在不确定风险下实现最优运行状态。为了解决集中式控制方式计算效率不高的问题,采用一个分散的优化架构分析EV充电对交通网和配电网的影响^[96],电力和交通网络之间的协调将通过将交通流量在交通网络中的导航路径优化,并可缓解耦合网络中的拥堵。

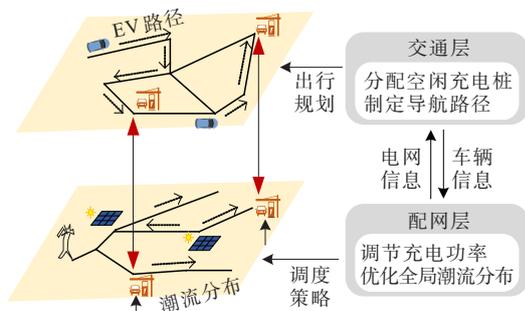


图9 交通网与配电网耦合下的优化调度

Figure 9 Optimal dispatch under the coupling of transportation network and distribution network

5 标准体系建设

随着车网互动试点规模不断扩大,终端设备与系统平台的升级改造需求日益凸显,涉及的技术复杂性和成本投入巨大。在此背景下,构建和完善中国车网互动标准体系显得尤为迫切。

中国目前主要在电动汽车与间歇性电源协同调度、有序充电与V2G等方面开展标准立项研究,但暂未形成系统的标准体系。在车辆侧,目前国内汽车行业与充、放电相关的标准主要为《电动汽车用传导式车载充电机》(GB/T 40432—2021)、《电动汽车用充放电式电机控制器技术条件》等,充电设施侧V2G相关标准包括:《电动汽车充换电设施接入配电网技术规范》(GB/T 36278—2018)、《电动汽车充换电设施术语》(GB/T 29317—2021)、《电动汽车非车载充电装置技术条件》(NB/T 33021—2015)等。在电网侧,V2G相关标准涉及电力需求响应、能源互联网、可调节负荷并网运行与控制等多个技术领域,大多数处于立项或编制阶段。而国际上已制定了较为完善的标准体系,如具备设备层车桩间双向充、放电功能标准的日本CHAdeMO协议、IEC、ISO及OpenADR等,可较好地支撑开展车网双向互动业务。

中国车网互动标准体系已开展了部分标准的规划和制修订工作,但整体仍落后国际步伐,在后续研究中,在相关终端设备、接入电网、系统平台、通信协议、检测评估等方面仍需进一步细化和完善。

6 结语

本文介绍了电力—交通网耦合系统的基本构架,重点讨论了电力—交通网耦合系统的状态预测与建模、双网耦合下的EV充电站规划研究以及双网耦合下的优化调度与控制,并分析了其标准体系建设状况。推动EV与电力—交通网耦合系统的互动,有利于改善EV大规模接入带来的负荷需求,缓解交通拥堵,促进可再生能源消纳,并为全球可持续发展带来巨大益处,然而,现有研究仍存在许多不足之处,需要进一步完善,具体内容如下:

1) 搭建强大的数据平台,对配电网和交通网的海量数据进行采集、处理与分析,实现对电力系统和交通系统运行状态的实时监控与全面感知,并对其进行准确建模与预测。

2) 信息安全问题在电力—交通耦合系统中尤为突出。随着技术的发展,需要更加严格的安全协议和隐私保护措施来确保数据传输的安全性和用户隐私的保护。

3) 需要建立完善的市场模式以及激励体系,保证电力—交通耦合系统调控的经济性,保障各方利

益,提升其参与调度的积极性,为车网互动的商业化提供动力。

4) 充分考虑交通网和配电网的耦合特性,探索电网和交通网络的协调运营,制定更为合理有效的EV调度策略,提高交通网与配电网的运营效率。

5) 统一的标准体系是EV与电力—交通网耦合系统互动的前提。当前,亟待建立一套涵盖硬件接口、通信协议、操作流程及服务规范的综合性标准体系。

6) 需要促进跨学科合作, EV与电力—交通网耦合系统的互动发展需要汽车工程、电力系统、信息学科等多个学科的协同合作。跨学科的研究团队将为车站网互动的创新提供更为广阔的视角。

参考文献:

- [1] 侯慧,何梓姻,侯婷婷,等.大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(14):177-187.
HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. Overview of research on demand response strategies and potential assessment for large-scale vehicle-grid interaction[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 177-187.
- [2] 蔡黎,葛棚丹,代妮娜,等.电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述[J].智慧电力,2022,50(7):96-103.
CAI Li, GE Pengdan, DAI Nina, et al. Review of research progress on load prediction and grid interaction of electric vehicles[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 96-103.
- [3] 侯慧,唐俊一,王逸凡,等.城区电动汽车充电站布局规划研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.
- [4] 丁唯一,武东,由天宇,等.中国充电基础设施发展预期报告(2020—2025)[R].北京:亿欧智库,2020.
DING Weiyi, WU Dong, YOU Tianyu. China Charging Infrastructure Trend Report[R]. Beijing: EO Intelligence, 2020.
- [5] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 164-171.
- [6] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [7] 邓衍辉,李剑,卢国强,等.考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):33-44.
DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 33-44.
- [8] 张夏韦,梁军,王要强,等.电动汽车充电负荷时空分布预测研究综述[J].电力建设,2023,44(12):161-173.
ZHANG Xiawei, LIANG Jun, WANG Yaoqiang, et al. Overview of research on spatiotemporal distribution prediction of electric vehicle charging[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 161-173.
- [9] 刘勇,李全优,戴朝华.电动汽车充电负荷时空分布建模研究综述[J].电测与仪表,2022,59(8):1-9.
LIU Yong, LI Quanyou, DAI Chaohua. Review on the spatiotemporal distribution modeling of electric vehicle charging load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 1-9.
- [10] 陈宋宋,王阳,周颖,等.基于客户用电数据的多时空维度负荷预测综述[J].电网与清洁能源,2023,39(12):28-40.
CHEN Songsong, WANG Yang, ZHOU Ying, et al. A review of multi-time-space load forecasting based on customer electricity consumption data[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 28-40.
- [11] 余洋,陆文韬,刘霖,等.考虑复杂出行链基于双链马尔科夫的电动汽车负荷建模方法[J].电网与清洁能源,2024,40(1):109-118.
YU Yang, LU Wentao, LIU Mai, et al. A load modeling method for electric vehicles based on double chain Markov considering complex travel chains[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 109-118.
- [12] 张晨晟,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. A 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.
- [13] 李含玉,杜兆斌,陈丽丹,等.基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J].电力系统自动化,2019,43(21):88-96.
LI Hanyu, DU Zhaobin, CHEN Lidan, et al. Trip simulation based charging load forecasting model and vehicle-to-grid evaluation of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 88-96.

- [14] 魏金柱,马志鹏.基于蒙特卡洛算法的大规模电动汽车充电负荷预测[J].电工技术,2024(3):49-53.
WEI Jinzhu, MA Zhipeng. Monte-Carlo-algorithm-based load prediction of electric vehicles large-scale charging [J]. Electric Engineering, 2024(3):49-53.
- [15] 周润,向月,王杨,等.基于智能电表集总数据的家庭电动汽车充电行为非侵入式辨识与负荷预测[J].电网技术,2022,46(5):1897-1908.
ZHOU Run, XIANG Yue, WANG Yang, et al. Non-intrusive identification and load forecasting of household electric vehicle charging behavior based on smart meter data[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1897-1908.
- [16] ZHANG X, CHAN K W, LI H R, et al. Deep-learning-based probabilistic forecasting of electric vehicle charging load with a novel queuing model[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(6): 3157-3170.
- [17] 邓艺璇,黄玉萍,黄周春.基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J].电力系统自动化,2021,45(21):181-188.
DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 181-188.
- [18] Ahmed M S, Cook A R. Analysis of Freeway Traffic Time-series Data by Using Box-jenkins Techniques [M]. 1979.
- [19] GUO J H, HUANG W, WILLIAMS B M. Adaptive Kalman filter approach for stochastic short-term traffic flow rate prediction and uncertainty quantification[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 43: 50-64.
- [20] JIA Y H, WU J P, BEN-AKIVA M, et al. Rainfall-integrated traffic speed prediction using deep learning method[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(9): 531-536.
- [21] YANG D, LI S J, PENG Z, et al. MF-CNN: traffic flow prediction using convolutional neural network and multi-features fusion[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2019, 102(8): 1526-1536.
- [22] YU H Y, WU Z H, WANG S Q, et al. Spatiotemporal recurrent convolutional networks for traffic prediction in transportation networks[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1501.
- [23] ZHANG Z C, LI M, LIN X, et al. Multistep speed prediction on traffic networks: a deep learning approach considering spatio-temporal dependencies[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 105: 297-322.
- [24] CAI H, JIA X P, CHIU A S F, et al. Siting public electric vehicle charging stations in Beijing using big-data informed travel patterns of the taxi fleet[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014, 33: 39-46.
- [25] LAM A Y S, LEUNG Y W, CHU X W. Electric vehicle charging station placement: formulation, complexity, and solutions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2846-2856.
- [26] KELLY J C, MACDONALD J S, KEOLEIAN G A. Time-dependent plug-in hybrid electric vehicle charging based on national driving patterns and demographics[J]. Applied Energy, 2012, 94: 395-405.
- [27] SAARENPÄÄ J, KOLEHMAINEN M, NISKA H. Geodemographic analysis and estimation of early plug-in hybrid electric vehicle adoption[J]. Applied Energy, 2013, 107: 456-464.
- [28] HU S R, WANG C M. Vehicle detector deployment strategies for the estimation of network origin - destination demands using partial link traffic counts[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(2): 288-300.
- [29] KUDOH Y, ISHITANI H, MATSUHASHI R, et al. Environmental evaluation of introducing electric vehicles using a dynamic traffic-flow model[J]. Applied Energy, 2001, 69(2): 145-159.
- [30] MU Y F, WU J Z, JENKINS N, et al. A Spatial - Temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 114: 456-465.
- [31] WANG X M, YUEN C, HASSAN N U, et al. Electric vehicle charging station placement for urban public bus systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(1): 128-139.
- [32] MAGLARAS L A, TOPALIS F V, MAGLARAS A L. Cooperative approaches for dynamic wireless charging of Electric Vehicles in a smart city[C]//2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Cavtat, Croatia. IEEE, 2014: 1365-1369.
- [33] SADEGHI-BARZANI P, RAJABI-GHAHNAVIEH A, KAZEMI-KAREGAR H. Optimal fast charging station placing and sizing[J]. Applied Energy, 2014, 125: 289-299.
- [34] ZHU J, LI Y, YANG J, et al. Planning of electric vehicle charging station based on queuing theory[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 1867-1871.
- [35] WANG G B, XU Z, WEN F S, et al. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2363-2372.
- [36] DONG X H, MU Y F, JIA H J, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1452-1461.
- [37] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, et al. Optimal planning of

- PEV charging station with single output multiple cables charging spots[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2017, 8(5):2119-2128.
- [38] CHEN H M, HU Z C, LUO H C, et al. Design and planning of a multiple-charger multiple-port charging system for PEV charging station[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(1):173-183.
- [39] JIANG Z M, TIAN H, BESHIR M J, et al. Statistical analysis of Electric Vehicles charging, station usage and impact on the grid[C]//2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT).Minneapolis,MN.IEEE,2016:1-5.
- [40] HAFEZ O, BHATTACHARYA K. Queuing analysis based PEV load modeling considering battery charging behavior and their impact on distribution system operation[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(1): 261-273.
- [41] DEB S, KALITA K, MAHANTA P. Impact of electric vehicle charging stations on reliability of distribution network[C]//2017 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy).Kollam,India.IEEE,2017:1-6.
- [42] POTHINUN T, PREMRUDEEPREECHACHARN S. Power quality impact of charging station on MV distribution networks: a case study in PEA electrical power system[C]//2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Glasgow, UK. IEEE,2018:1-6.
- [43] WANG L, QIN Z A, SLANGEN T, et al. Grid impact of electric vehicle fast charging stations: trends, standards, issues and mitigation measures - an overview[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics,2021,2:56-74.
- [44] LIU Z P, WEN F S, LEDWICH G. Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 102-110.
- [45] KHALKHALI K, ABAPOUR S, MOGHADDAS-TAFRESHI S M, et al. Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2015,9(7):666-676.
- [46] ZHANG H C, MOURA S J, HU Z C, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):2595-2605.
- [47] YANG W T, LIU W J, CHUNG C Y, et al. Joint planning of EV fast charging stations and power distribution systems with balanced traffic flow assignment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(3):1795-1809.
- [48] MORADI M H, ABEDINI M, TOUSI S R, et al. Optimal siting and sizing of renewable energy sources and charging stations simultaneously based on Differential Evolution algorithm[J] International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015,73:1015-1024.
- [49] LIU Z P, WEN F S, LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2541-2551.
- [50] ERDINÇ O, TAŞCIKARAOĞLU A, PATERAKIS N G, et al. Comprehensive optimization model for sizing and siting of DG units, EV charging stations, and energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(4):3871-3882.
- [51] SHAABAN M F, MOHAMED S, ISMAIL M, et al. Joint planning of smart EV charging stations and DGs in eco-friendly remote hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(5):5819-5830.
- [52] 翁国庆,张有兵,戚军,等.多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J].电工技术学报, 2014,29(8):36-45.
- WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):36-45.
- [53] VAN Q D, BAE J H, LEE J D, et al. Monitoring of power allocation in centralized electric vehicle charging spot system[J].Energy Procedia,2012,17:1542-1549.
- [54] XU Y J, PAN F. Scheduling for charging plug-in hybrid electric vehicles[C]//2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Maui, HI, USA. IEEE, 2012:2495-2501.
- [55] 程杉,王贤宁,冯毅焜.电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J].电力系统自动化,2018,42(1):39-46.
- CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
- [56] 王毅,王飞宏,侯兴哲,等.住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(20):53-58.
- WANG Yi, WANG Feihong, HOU Xingzhe, et al. Random access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):53-58.
- [57] HUTTERER S, AFFENZELLER M, AUINGER F. Evolutionary optimization of multi-agent controlstrategies for electric vehicle charging[C]// Proceedings of the 14th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation. Philadelphia

- Pennsylvania USA.ACM,2012.
- [58] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等.基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J].电力系统自动化,2012,36(11):30-37.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.
- [59] 许少伦,严正,冯冬涵,等.基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(11):7-13+21.
XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13+21.
- [60] 王婷,陈晨,谢海鹏.配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J].电力建设,2022,43(9):12-24.
WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [61] SANGSWANG A, KONGHIRUN M. Optimal strategies in home energy management system integrating solar power, energy storage, and vehicle-to-grid for grid support and energy efficiency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5716-5728.
- [62] RASSAEI F, SOH W S, CHUA K C. Demand response for residential electric vehicles with random usage patterns in smart grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1367-1376.
- [63] ERDOGAN N, ERDEN F, KISACIKOGLU M. A fast and efficient coordinated vehicle-to-grid discharging control scheme for peak shaving in power distribution system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 555-566.
- [64] 甫日甫才仁,李明,郑云平,等.规模化电动汽车接入对电网调度的影响机制[J].电工电气,2024(2):15-18+40.
FU Rifucairen, LI Ming, ZHENG Yunping, et al. The impact mechanism of large-scale electric vehicle integration on power grid dispatch[J]. Electrotechnics Electric, 2024(2): 15-18+40.
- [65] SOJOURI S, LOW S H. Optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles in smart grids[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA. IEEE, 2011: 1-6.
- [66] ZHANG S Y, LEUNG K C. Joint optimal power flow routing and vehicle-to-grid scheduling: theory and algorithms[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(1): 499-512.
- [67] STEEN D, TUAN L A, CARLSON O, et al. Assessment of electric vehicle charging scenarios based on demographical data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1457-1468.
- [68] DE HOOG J, ALPCAN T, BRAZIL M, et al. Optimal charging of electric vehicles taking distribution network constraints into account[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 365-375.
- [69] LIU H, HU Z C, SONG Y H, 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.
- [70] 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.
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.
- [71] 吴二博,梁军,黄征,等.基于滑模PI控制的电动汽车集群出力与调频联合优化[J].电力自动化设备,2024,44(2):87-93.
WU Erbo, LIANG Jun, HUANG Zheng, et al. Joint optimization of EV cluster output and frequency regulation based on sliding mode PI control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 87-93.
- [72] 张谦,邓小松,岳焕展,等.计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略[J].电工技术学报,2022,37(1):72-81.
ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 72-81.
- [73] MOHAMED T H. Load frequency control of an isolated small power system with contribution of vehicle-to-grid V2G scheme[C]//2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). Cairo, Egypt. IEEE, 2016: 336-341.
- [74] LIU J Y, LI Y, REHTANZ C, et al. An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 991-1001.
- [75] GAO S, CHAU K T, LIU C H, et al. Integrated energy management of plug-in electric vehicles in power grid with renewables[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3019-3027.
- [76] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-

- AGHTAIE M. Reliability studies of modern distribution systems integrated with renewable generation and parking lots[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017,8(1):431-440.
- [77] WANG W, LIU L, LIU J Z, et al. Energy management and optimization of vehicle-to-grid systems for wind power integration[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021,7(1):172-180.
- [78] IGUALADA L, CORCHERO C, CRUZ-ZAMBRANO M, et al. Optimal energy management for a residential microgrid including a vehicle-to-grid system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014,5(4):2163-2172.
- [79] YANG Y, JIA Q S, GUAN X H, et al. Decentralized EV-based charging optimization with building integrated wind energy[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019,16(3):1002-1017.
- [80] YUDOVINA E, MICHAILIDIS G. Socially optimal charging strategies for electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015,60(3):837-842.
- [81] HOU W C, LUO Q S, WU X D, et al. Multiobjective optimization of large-scale EVs charging path planning and charging pricing strategy for charging station[J]. *Complexity*, 2021,2021(1):8868617.
- [82] JI C L, LIU Y B, LYU L, et al. A personalized fast-charging navigation strategy based on mutual effect of dynamic queuing[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020,56(5):5729-5740.
- [83] LIU C S, WU J, LONG C N. Joint charging and routing optimization for electric vehicle navigation systems[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014,47(3):2106-2111.
- [84] 詹华, 江昌旭, 苏庆列. 基于分层强化学习的电动汽车充电引导方法[J]. *电力自动化设备*, 2022,42(10):264-272.
ZHAN Hua, JIANG Changxu, SU Qinglie. Electric vehicle charging navigation method based on hierarchical reinforcement learning[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022,42(10):264-272.
- [85] LIU C S, ZHOU M, WU J, et al. Electric vehicles en-route charging navigation systems: joint charging and routing optimization[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019,27(2):906-914.
- [86] BARCO J, GUERRA A, MUÑOZ L, et al. Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles: a case study[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(1):1-16.
- [87] KURTULUS C, INALHAN G. Model based route guidance for hybrid and electric vehicles[C]//2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Gran Canaria, Spain. IEEE, 2015:1723-1728.
- [88] MAPELLI F, MAURI M, TARSITANO D. Energy control strategies comparison for a city car Plug-In HEV[C]//2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Porto, Portugal. IEEE, 2009:3729-3734.
- [89] CHAU C K, ELBASSIONI K, TSENG C M. Drive mode optimization and path planning for plug-In hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017,18(12):3421-3432.
- [90] 宋宇航, 陈宇帆, 魏延岭, 等. 基于强化学习环境设计策略的电动汽车充电路径规划[J]. *电力系统自动化*, 2024,48(11):184-196.
SONG Yuhang, CHEN Yufan, WEI Yanling, et al. Charging path planning for electric vehicles based on reinforcement learning environment design strategy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024,48(11):184-196.
- [91] SHI X Y, XU Y L, GUO Q L, et al. A distributed EV navigation strategy considering the interaction between power system and traffic network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020,11(4):3545-3557.
- [92] WEI W, WU L, WANG J H, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018,9(6):6764-6779.
- [93] SUN G Z, LI G Y, XIA S W, et al. ALADIN-based coordinated operation of power distribution and traffic networks with electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020,56(5):5944-5954.
- [94] TAN J, WANG L F. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations: a hierarchical game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017,8(2):846-856.
- [95] 谢仕炜, 张亚超, 舒胜文, 等. 考虑混合需求不确定性的电力—交通耦合网络最优定价策略[J]. *中国电机工程学报*, 2023,43(22):8652-8666.
XIE Shiwei, ZHANG Yachao, SHU Shengwen, et al. Optimal pricing strategy for the coupled electricity-traffic network considering mixed demand uncertainty[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023,43(22):8652-8666.
- [96] MANSHADI S D, KHODAYAR M E, ABDELGHANY K, et al. Wireless charging of electric vehicles in electricity and transportation networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018,9(5):4503-4512.