

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240546

电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述

袁洪涛^{1,2}, 徐潇源^{1,2}, 严正^{1,2}, 方陈³, 柳劲松³

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海 200240; 3. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 分布式充换电设施因充电功率小、调度关系复杂、空间集约程度低等难题, 难以满足快速增长的电动汽车补能需求, 因此具有统一调度主体、调度关系清晰、具备集中通信与管控能力的集中充换电设施(centralized EV charging and battery swapping facilities, CCSF)成为构建充换电网络的关键。首先对 CCSF 的发展背景及典型适用场景进行介绍, 总结梳理了典型 EV 负荷需求模拟方法, 并对典型 CCSF 研究现状、结构组成和数学模型进行论述。然后从 CCSF 独立规划、计及 CCSF 的电网协同规划及电网与交通网协同规划三个维度分析 CCSF 规划研究现状。其次从有序充电策略、智能充电路径引导、计及 CCSF 的电网协同调度等方面总结 CCSF 的优化运行研究现状。最后结合 CCSF 研究瓶颈对未来研究工作进行展望。综上 CCSF 可满足 EV 快速补能需求, 具有促进新能源消纳、提高电网承载能力、实现充电负荷有序管理、降低个体差异性影响、提升运行效率和促进系统低碳转型的优势。**关键词:** 集中充换电设施; 电动汽车; 规划; 运行; 电力系统

Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling

YUAN Hongtao^{1,2}, XU Xiaoyuan^{1,2}, YAN Zheng^{1,2}, FANG Chen³, LIU Jinsong³

(1. Key Laboratory of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute, Shanghai 200240, China; 3. Electric Power Science Research Institute, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: It is difficult for distributed charging and battery swapping facilities to meet the rapidly growing demand because of problems such as small charging power, complex scheduling relationships, and low spatial intensity. Centralized EV charging and battery swapping facilities (CCSF) with a unified dispatching body, clear dispatching relationships, and centralized communication and management and control capabilities have become an inevitable choice. This paper first introduces the development background and typical applicable scenarios of CCSF, elaborates the typical EV load demand simulation method, and summarizes the typical CCSF research status, structural composition and mathematical model. Secondly, it analyzes the planning research status of CCSF from the aspects of independent planning and power grid collaborative planning considering CCSF and power grid-traffic network collaborative planning. Then it summarizes optimal operation research status of CCSF in orderly charging strategy, intelligent charging path guidance, and power grid collaborative dispatch considering CCSF. Finally, combined with the CCSF existing research bottleneck, the future research directions are prospected. Overall, CCSF can meet the rapid energy replenishment needs of EVs, and has the advantages of promoting new energy consumption, improving power grid carrying capacity, realizing charging load orderly management, reducing the influence of individual difference, improving system operating efficiency, and promoting system low-carbon transformation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2166201).

Key words: centralized EV charging and battery swapping facilities; EV; planning; operation; power system

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2166201); 上海市科学技术委员会科技计划项目资助(23DZ1201202)

0 引言

在我国经济发展模式逐步转向高质量发展背景下，能源消费革命成为必经之路。近年来我国交通运输行业碳排放在我国碳排放总量中的占比不断上升，从2005年的6.4%上升到2020年的约10%^[1]，因此交通领域电气化转型已成为消费侧革命的重要组成部分。近年来，电动汽车(electric vehicle, EV)产业得到长足发展^[2]，国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》阐明了新能源汽车发展愿景，2023年2月工信部等八部委在全国范围内启动公共领域车辆全面电动化先行区试点工作，2023年11月住建部印发《关于全面推进城市综合道路交通体系建设的指导意见》，明确表明将“加强充换电站等配套能源设施统筹建设”。

与常规用电负荷特性不同，EV用户一方面具有用电负荷单元和交通流组成单元的特点，其行驶和充电行为会同时对电网和交通网产生影响；另一方面，V2G(vehicle to grid)技术的不断发展，也使其具备电源调节潜力。在交通网侧，交通网络的拓扑结构、道路通行的拥堵情况将影响EV用户的行驶路径选择，从而影响EV车流量分布，改变EV充电负荷的时空分布情况，并对电网中各节点充电负荷以及支路潮流分布产生影响。在电网侧，不同选址的EV充电电价^[3]及服务能力等因素会影响EV用户的行驶路径及行驶终点决策，从而影响交通网流量分布和交通状况^[4]。近年来，随着EV数量增长，交通网络拥堵情况加重^[5]，EV无序充电负荷与居民日常生活用电负荷高峰的重合率较高，造成线路阻塞^[6]、变压器重载、电压下降等后果，显著影响电网安全运行。因此分析EV行驶及充电行为，挖掘EV调节潜力，具有重要价值。

充换电设施兼具电网负荷和交通网枢纽双重身份，是实现电网和交通网耦合发展的关键元件。目前典型补能模式包括交流慢充、直流快充模式^[7-8]、换电模式^[9-10]和超充模式4类，我国已投运的EV补能设施以分布式充换电模式为主，补能模式以交流慢充为主，主要适用于电动私家车(electric private vehicle, EP)，其充电功率小、停车时间长，存在空间集约度低、服务范围有限、个体效能低、规划布局盲目等缺点。另外，由于其分属不同调度主体，彼此之间隶属关系非常复杂^[11]，难以满足系统调节需求。近年来CCSF发展势头较快，与分布式设施相比，补能模式以直流快充为主，主要适用于电动出租车(electric taxi, ET)、电动公交车(electric bus, EB)等运营车辆，对老旧小区、城区边缘等充电网

络覆盖薄弱区域的EP用户也有较好适应性，此类用户充换电需求急迫、充电功率大、补能时长较短。集中充换电设施(centralized EV charging and battery swapping facilities, CCSF)具有统一的运营主体，可通过统一通信与控制策略降低调度关系的复杂度，能够实现EV充电负荷的有序管理。

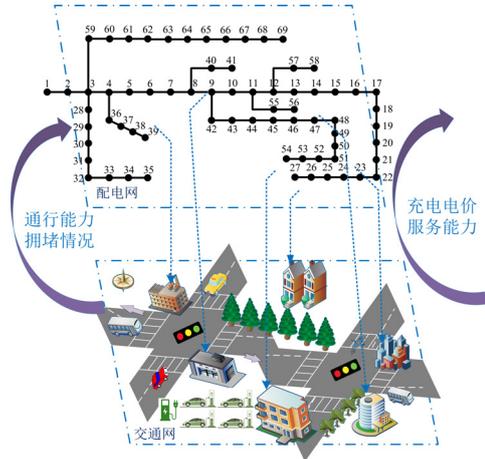


图1 交通网-电网耦合示意图

Fig. 1 Diagram of transportation network-power grid coupling

本文面向两网耦合下的CCSF，首先对其发展背景进行介绍；然后基于典型EV负荷需求模拟方法概述其研究现状，并对典型架构和数学模型进行阐述；其次分别针对协同规划和优化运行两个方面，对现有研究成果进行系统梳理；最后从计及两网耦合的负荷需求模拟、协同规划、计及EV调节潜力的协同优化及典型运行场景与商业模式等方面探讨下一阶段研究方向。

1 EV集中充换电设施发展背景

随着EV数量增长和充电技术更新换代，受补能时长和空间资源等因素限制，充电快速化和充电设施集约化是未来必然的发展方向，因此具有统一调度主体、调度复杂程度低、空间集成度较高、采取快充和超充模式、具有有序充放电调节能力的CCSF具有广阔的发展潜力。

1.1 EV充电与服务模式

目前常用的EV充电模式主要有交流慢充、直流快充、直流超充和无线充电模式等，不同充电模式的运行特征、指导政策等对比见表1。

根据EV不同的充电和补能模式特点，常见的EV服务模式主要分为分布式充换电模式和集中模式，其中集中模式又可细分为集中充电模式、集中充换电模式和集中光储充模式。与资产及充换电决策权归属用户的分布式充换电模式不同，集中模式

具有统一的调度主体, 可有效减小个体运行差异对系统的影响, 实现多种补能模式有序调节。EV 各服务模式运行特征见表 2。

表 1 常见的 EV 充电模式

Table 1 Conventional EV charging mode

模式	运行特征	指导方针政策	适用场景
交流慢充	效率低、充电慢	较多	家庭/作区
直流快充	效率高、充电快, 对电池寿命影响大 ^[7-8]	《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》	商业/工业区
直流超充	充电倍率达 4 C 以上, 功率在 350 kW 以上	《深圳市新能源汽车超充设施专项规划(2023—2025 年)》	高速公路/集中充电站
无线充电	效率低、功率小、服务便捷	《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》	集中充电站

表 2 典型 EV 服务模式

Table 2 Conventional EV service mode

模式	运行特征	适用用户
分布式充换电	资产及充换电决策权归用户所有, 电网缺乏对充电决策的控制权限及措施 ^[12] , 仅通过电价信号等方式激励 EV 个体参与响应, 个体有效参与电网响应概率小 ^[13] , 调度潜力难量化 ^[14]	EP/ET/EB
集中充电	主体单一, 可接受电网调度安排, 实现 EV 充电负荷有序管理, 降低个体差异性影响	ET/EB
集中充换电	将集中充电和换电服务模式集成, 可挖掘两种补能模式调度潜力, 具有平抑充电负荷曲线 ^[15] 、调控系统电压 ^[16-17] 、改善电能质量 ^[18] 、削峰填谷 ^[19-20] 、加速电网故障恢复 ^[21] 、土地及空间利用率较高 ^[22] 等优势	EB/EP
集中光储充	平滑负荷曲线、降低系统整体运行成本 ^[23]	ET/EB

1.2 EV 集中充换电设施适用场景分析

与分布式充换电设施(其主要由各类分散布置于商业区、工作区和居民区的充电桩组成)不同, CCSF 一般布局于公共区域的特定位置以形成高效的 EV 充换电服务网络, 充电功率一般为 30 kW 以上。CCSF 具有统一调度运营主体, 具有集中通信与管控策略, 具备实现 EV 充电负荷有序管理的能力。在电力-交通耦合发展背景下, CCSF 具有成为区域充换电服务网络重要枢纽的潜力。综合来看, CCSF 典型应用场景如下。

1) 老旧小区等容量受限区域场景

城市老旧小区一般为公共车位, 车位一般无固定产权无法建设私人充电桩, 公共空间资源紧张, 由于建设年代久远, 台变容量有限无法适应规模化

EV 充电负荷接入。针对此类场景, 建设 CCSF 可以通过集中规划设计、集中施工运维解决公共车位无法安装私人充电桩的问题, 也能避免分布式设施重复施工导致的资源浪费和混乱问题。

2) EV 渗透率较低区域场景

城区边缘和外围乡镇区域等 EV 渗透率较低区域, 由于存在收益较低、利用效率不高、成本回收期较长等问题, 目前充电桩网络覆盖较薄弱, 并反过来制约此类区域 EV 规模增长。

此类场景 EV 用户空间分布较广泛, 若批量建设分布式充换电设施很容易造成资源浪费、网损增加等, 通过在区域集中建设 CCSF 可以显著提高充电桩的利用效能, 提高投资效益, 减少系统损耗。

3) 高速公路沿线区域场景

高速公路作为目前物流和客运的主要途径, 具有全封闭、全立交、严格控制出入的运行特点^[24], 因此在高速公路服务区设置 CCSF 对缓解用户里程焦虑、解决 EV 续航里程较低的问题、满足 EV 补能需求具有重要意义。

4) “集中充电, 统一配送” 场景

作为一种具有发展前景的新型补能模式, 换电模式具有高效补能、延长电池使用寿命等优势。针对此种模式, 电网提出“集中充电, 统一配送”的电能补给运行方式^[25]。在该方式下, 电池集中更换点将更换后的电池统一配送至 CCSF 中进行集中充电, 可减小受 EV 时空不确定性的影响。

5) 其他快速补能需求场景

针对 ET、EB 等运营车辆和其他电量过低的 EV 等具有快速补能需求的用户, CCSF 能够快速满足其充电需求, 减少里程焦虑。

2 EV 集中充换电设施研究现状

2.1 EV 充换电负荷需求模拟研究

EV 负荷分布具有时空随机性、波动性和间歇性的特点, 其用户出行特性和充电决策会对电网产生较大的影响。构建 EV 充换电需求模型是分析 EV 充电负荷对电网影响^[26]、进行充换电设施规划及优化运行的前提^[12], 也是电网统一调度^[27]、电力市场化运行^[28]、便捷用户出行和确保系统安全经济高效运行的关键。

针对 EV 负荷模拟, 目前研究主要考虑时间分布特性、空间分布特性及基于 GIS/GPS 数据的时空分布特性 3 种方式。

2.1.1 负荷需求模拟研究基础

1) 区域功能划分及交通路网建模

将地块按功能定位及负荷用电特征划分为工

业区、商业区和居民区等区域，基于划分后地块功能属性，可根据不同类型的 EV 用户行为特性在各区域间生成出行特征。不同类型的 EV 用户，不仅其初始位置所在的地块属性上存在差异，而且其行为特性也有所区别。

2) EV 用户类型划分

由于不同 EV 用户类型彼此之间行为特性和充电需求差异巨大，因此需根据 EV 用户行为习惯及功能类型将 EV 车辆类型分为私家车、公交车和出租车等多种类型^[4]。

3) 路阻模型

道路路阻用来表征用户通过路段的行程耗费，一般用道路距离、行驶速率、通行时间和通行成本等进行衡量。目前学者主要采用美国联邦公路局 BPR 模型表征交通路网的路阻模型，其主要适用于无信号灯系统的高速网络，除 BPR 路阻模型外，文献[29]提出基于 Logit 模型的流量延误函数表征道路路阻抗函数。

2.1.2 计及时间特性的 EV 负荷建模

目前针对 EV 负荷时间分布特性已经有较多的研究。目前的研究成果主要基于美国国家公路交通部门 NHTS 统计数据，并对 EV 到站时间等典型特征参数构建概率模型，采取蒙特卡洛法进行随机模拟。此外在实际道路交通网络运行中，EV 用户行程花费不仅会消耗在道路路阻上，而且在 EV 充电设施排队接受充电服务过程中也会产生行程花费，目前典型的排队论建模方法见表 3。文献[30]基于经典燃油车辆的数据，采用蒙特卡洛模拟方法分析了 EV 日行驶里程数和起始充电时间这两个关键参数；文献[31]针对出租车、公务车、私家车和公交车等多种类型的车辆调研数据，采用蒙特卡洛法模拟其起始充电时间和起始 SOC 分布。

表 3 典型排队论建模方法

Table 3 Typical queuing theory modeling methods

建模方法	参考文献
ET 到站、充电服务时间分别服从负指数和正态分布	[32]
EV 充电站服从 M/M/n/K 混合制排队系统，由 Little 法则获取空闲概率、利用率、停留时间和队长	[33]
计及道路交通流量影响的排队模型，参考 BPR 函数对充电站的等待时间进行建模，获取 EV 总充电时间	[34]
假设车辆到达充电站过程服从泊松分布，获取系统平均排队等待时间和平均队长	[35]

上述研究都是基于参数明确的概率分布运用蒙特卡洛法进行随机抽样模拟，这类建模方式特征参数设置相对主观，不能反映行驶过程中受交通因素

影响的多种类型 EV 用户的实际出行特征，无法准确反映 EV 用户的真实出行行为及时空分布特性。

2.1.3 计及空间分布特性的 EV 负荷建模

该领域研究工作主要是基于 CCSF 出发，通过起止矩阵(origin-destination, OD)分析法、出行链和交通流量分析等方式对其空间分布特性进行建模。此类预测方法计及 EV 空间属性，但是对交通网络的拥堵情况考虑较为粗糙，忽略了交通流量的可调度性以及受交通流影响的 EV 用户行为决策调整。

1) OD 矩阵

OD 矩阵表示交通路网中所有自起点至终点的交通出行和抵达行为集合，刻画 EV 用户的出行需求^[34]。矩阵的行表示各起点的出行需求，矩阵的列表示各终点的抵达行为。通过 OD 分析法可以准确刻画 EV 用户在不同区域间的出行行为，为分析其充电负荷的空间分布奠定基础。文献[36]考虑 EV 随机动态行为，构建了预测 EV 充电负荷的“车-路-网”耦合模型。文献[37]基于深圳地区电动出租车实际数据，采用 OD 矩阵建立区域 EV 充电负荷模型。

2) 速度-流量模型

速度-流量模型表征车流量和车流速度之间的关系，用于预测路段平均车速和出行时间^[15]。通过速度-流量模型可以获取在不同路段不同通行条件下车流量的通行速率，进而得到不同 EV 用户的负荷空间分布情况。

$$\begin{cases} V_{jk}(t) = \frac{V_{jk}^0}{1 + \left(\frac{q_{jk}(t)}{C_{jk}}\right)^\beta} \\ \beta = a + b \cdot \left(\frac{q_{jk}(t)}{C_{jk}}\right)^r \end{cases} \quad (1)$$

式中： $V_{jk}(t)$ 为直连道路(j,k)上 EV 用户第 t 时段的行驶速率； V_{jk}^0 为直连路段(j,k)的零流速度； $q_{jk}(t)$ 为直连道路(j,k)在第 t 时段的道路通行流量； C_{jk} 为直连道路(j,k)通行上限，由道路类型决定； $q_{jk}(t)/C_{jk}$ 表示直连道路(j,k)第 t 时段的饱和系数； r 、 a 和 b 为不同类型道路的系数； β 为过程系数。

3) 出行链模型

针对单辆 EV 的空间分布研究交通领域中通常会采用“出行链”的建模方法。出行链是指 EV 用户为了满足自己某项活动需要，按照时序在不同功能区域间转移的出行安排。通常将出行链与马尔科夫模型、数据驱动算法结合，以挖掘用户出行时刻、

空间坐标和 SOC 状态等信息。通过对不同类型用户构建对应出行链模型, 进而获取不同 EV 在不同区域和路段的充电需求, 结合蒙特卡洛等抽样方法最终获取 EV 充电需求空间分布特性。文献[38]基于不同用户出行特征及规律构建对应动态出行链模型, 并结合不同场景建立 EV 充电负荷需求模型。

4) 交通流量分析模型

目前有研究采用交通流量分配模型表示较大规模交通网络的宏观流量特征。根据时间尺度的不同, 交通流量分配模型分为静态配流法(static traffic assignment, STA)^[39]、半动态配流法(semidynamic traffic assignment, SDTA)^[40]和动态配流法(dynamic traffic assignment, DTA)^[41]3类, 不同交通流量分配模型的特征对比见表 4。通过对交通网络的宏观流量特征进行量化分析, 可以得到 EV 用户在不同时段不同路段上的行驶情况, 进而预测其充电负荷的空间分布。

表 4 典型交通流量分析方法对比

Table 4 Comparison of typical traffic flow analysis methods

交通流量分配模型	特征	参考文献
STA	评估长时间尺度下(超过 90 min)交通流达到的均衡状态, 常用于交通网的规划指导, 无法体现引导前后各路段交通流状态间的影响, 无法反映短期(3~15 min)交通流时空分布的动态变化, 适用于长期规划。	[42-43]
SDTA	适用于多阶段交通系统建模(15~90 min), 可反映接受引导前后变化出行决策对交通运行状态的影响以及交通运行状态在多时间段的耦合关系, 在满足建模颗粒度和精度同时也可提高算法求解效率。	[44]
DTA	考虑短时间尺度内(>15 min)交通流变化, 常用于对交通网路段流量的感知和监测, 求解难度大, 求解效率不高, 研究较少。	[45]

2.1.4 基于 GIS/GPS 数据时空分布特性建模

随着大数据、云计算和深度学习等技术的推广, 对海量 EV 用户出行行为及充放电情况进行数据挖掘成为可能^[46]。文献[46]基于强化学习算法, 提出一种计及多充电场景的 EV 充电负荷预测方法。文献[47]通过分析网约车历史出行轨迹数据, 得到功能区域划分、行驶归类分布和出行路径选择等特征量, 并构建计及出行和充电行为特征的 EV 负荷预测模型。文献[48]以瑞典城市实际 GIS 数据为基础, 通过马尔科夫链模型分析 EV 行为, 构建城市区域不同功能区的 EV 充电负荷预测模型。但是相关文献的建模精度依赖于数据集的完整性, 因此在数据有限或精度不足的场景下模型的准确性受限。

2.2 CCSF 典型模型

现有关于 CCSF 的研究主要分为高速公路应用

场景^[24]、集中光储充应用场景^[49]、换电系统“集中充电, 统一配送”应用场景^[50]和集中充换储应用场景^[15]等。

2.2.1 高速公路场景 CCSF 模型

与常规城市道路不同, 高速公路具有全封闭、行驶路径单一的特点^[51], 考虑高速公路服务区典型配置, 此场景下 CCSF 组成架构中还包括超市、餐厅等服务设施, 其典型服务模式如图 2 所示。

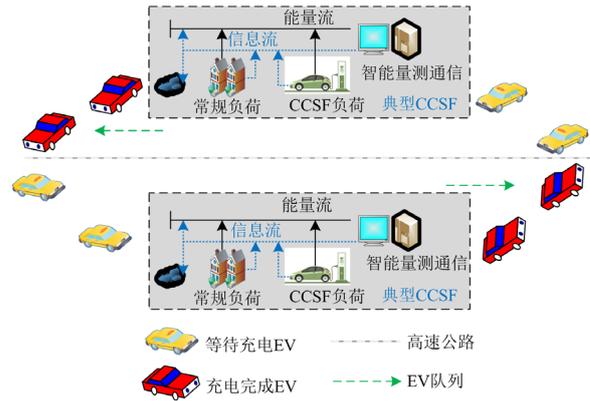


图 2 高速公路 CCSF 服务模式示意图

Fig. 2 Diagram of CCSF service mode on highways

由于高速公路场景所在区域负荷密度较低, 此场景下 CCSF 通常需 10 kV 或 35 kV 专用线路供电^[51]。现有文献主要是通过排队论^[24]、交通流分析^[52]等方法确定 CCSF 服务需求确定其配置容量, 其典型服务模式如图 3 所示。

高速公路场景 CCSF 充电桩一般具备较高功率, 通常为 120 kW 以上。以国网公司在京沪高速沿线的快充站配置规划为例, 每座 CCSF 配置 4 台 120 kW 直流充电机、8 个充电桩, 可同时为 8 辆电动汽车充电。根据交通运输部和国家能源局近期发布的《加快推进公路沿线充电基础设施建设行动方案》, 要求高速公路服务区建设的充电基础设施或预留建设安装条件的车位原则上不低于停车位的 10%, 至 2025 年底前高速公路服务区充电基础设施能够提供基本充电服务并实现进一步加密优化。

2.2.2 集中光储充 CCSF 场景模型

此类场景 CCSF 组成架构主要由控制中心、光伏发电系统、交流设备和充电机等组成^[49], 其典型服务模式如图 3 所示。

此类场景下 CCSF 站内功率关系如式(2)所示。

$$P_j^{PV}(t) + P_j^{grid}(t) = P_j^{EV}(t) + P_j^{ESS}(t) \quad (2)$$

式中: $P_j^{PV}(t)$ 、 $P_j^{ESS}(t)$ 、 $P_j^{grid}(t)$ 和 $P_j^{EV}(t)$ 分别为第 j 个光储充 CCSF 中光伏发电功率、储能装置充放电功率、电网供电功率和 EV 充电需求值。

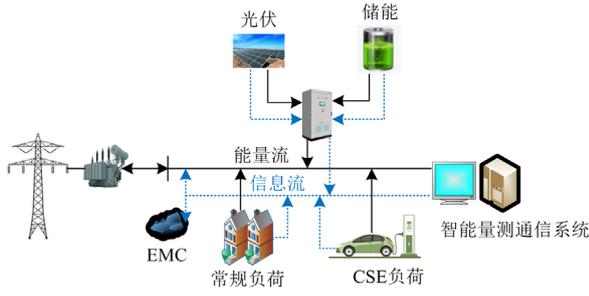


图3 光储充 CCSF 服务模式示意图

Fig. 3 Diagram of CCSF service mode for PSC

第 j 个 CCSF 在第 t 时段的电量 $E_j(t)$ 可表示为

$$E_j(t) = E_j(t-1) + (P_j^{PV}(t) + P_j^{grid}(t) - P_j^{ESS}(t) - \frac{P_j^{EV}(t)}{\eta_c})\Delta t \quad (3)$$

式中： η_c 为充电效率； Δt 为时间间隔。

近年来，集中光储充应用场景已经有较多的规范和标准出台，主要包括《光储充一体化电站技术要求》、《共用直流母线光储充一体化系统通用要求》、《光储充检电站在线监测数据传输要求》和《光储充检一体化智能充电站建设规范》等。以国网电动汽车有限公司京津塘徐官屯“光储充”一体化示范项目为例，该项目配置光伏容量为 292.1 kW，储能容量为 205 kWh，充电设备为 4 台 60 kW 直流快充桩。

2.2.3 “集中充电，统一配送”场景 CCSF 模型

此类场景 CCSF 运行架构主要由集中充电站决策中心、CCSF 站内装置等构成^[50]，其典型运行模式为：在一个调度周期内，CCSF 充电站与特定的电池更换点进行若干次电池配送，将电池更换点的电池回收至 CCSF，后者对电池进行集中充电后启动新一轮电池配送过程。该类场景 CCSF 运行模型表述如下。

第 j 个 CCSF 第 t 时段的最大充放电功率分别为

$$P_{max,j}^c(t) = (M_{j,s} - D_j(t))P_{battery}^c \quad (4)$$

$$P_{max,j}^d(t) = (M_{j,s} - D_j(t))P_{battery}^d \quad (5)$$

式中： $P_{max,j}^c$ 和 $P_{max,j}^d$ 分别为第 j 个 CCSF 第 t 时段的最大充、放电功率； $M_{j,s}$ 为第 j 个 CCSF 一次最多可同时充放电电池数量； $D_j(t)$ 为第 j 个 CCSF 第 t 时段的待更换电池量。

第 j 个 CCSF 在第 t 时段的电量 $E_j(t)$ 表示为

$$E_j(t) = E_j(t-1) + P_j^c(t)\eta_c\Delta t - \frac{P_j^d(t)}{\eta_d}\Delta t - \omega D_j(t-1) + L_j(t-1) \quad (6)$$

式中： $P_j^c(t)$ 和 $P_j^d(t)$ 分别为第 j 个 CCSF 第 t 时段充、放电功率； η_c 和 η_d 分别为充、放电效率； ω 为电池额定容量； $L_j(t-1)$ 为第 j 个 CCSF 在第 $t-1$ 时段中用户更换下来的电池剩余电量。

“集中充电，统一配送”应用场景作为国家电网在 2011 年确定的主要智能充换电运营模式，具备远距离电池输送能力，能够辅助不同区域进行能量互动，有效提高电网的运行灵活性。采用换电模式的 EV 补能时长一般为 3~5 min，接近传统燃油补给方式，在同等土地利用面积条件下，换电模式的资源利用率可达到充电模式的 3 倍以上，电池寿命可达到快充模式的 2~4 倍，同时相应的充电功率一般仅为快充模式的 1/4 以下，可有效提高资源利用率。以山东青岛薛家岛 EV 智能充换储一体化示范电站为例，其采用“换电为主、插充为辅、集中充电、统一配送”运营模式，可同时为 120 辆 EB 电池充电，集中充电站可同时为 360 辆 EV 电池充电。充电站最大充放电功率为 4320 kW，储能充放电功率为 2000 kW。在配送功能上，集中充电站配置电池 1440 组，可满足黄岛区 10 个配送站的电池需求。

2.2.4 集中充换储 CCSF 场景模型

此类场景 CCSF 结构上主要由站内外调度单元、充换电和梯级储能系统组成，其结构示意图见图 4。站内调度单元通过对 CCSF 站内信息流、功率流等状态量进行实时监测，将站内情况反馈给站外调度单元，并根据后者下发的指令制订站内调度方案^[15]。此类场景下站内功率和能量关系分别表示为

$$P_{CCSF}(t) = P_{BCS}(t) + P_{BSS}(t) + P_{ESS}(t) \quad (7)$$

$$E_{CCSF}(t) = E_{BSS}(t) + E_{ESS}(t) \quad (8)$$

式中： $P_{CCSF}(t)$ 、 $P_{BCS}(t)$ 、 $P_{BSS}(t)$ 和 $P_{ESS}(t)$ 分别为 CCSF、快充系统、换电系统和梯级储能系统第 t 时段的充放电功率； $E_{CCSF}(t)$ 、 $E_{BSS}(t)$ 和 $E_{ESS}(t)$ 分别为 CCSF、换电系统和梯级储能系统第 t 时段的能量值。

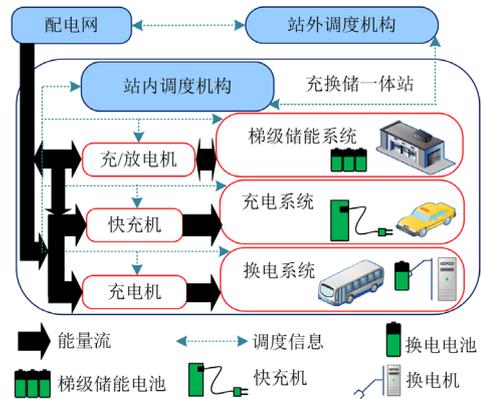


图4 集中充换储 CCSF 服务模式示意图

Fig. 4 Diagram of CCSF service mode for CCSF

集中充换储应用场景无需电池配送系统, 换电系统更换的电池可就地充电。以上海嘉定安亭集中充换放储一体化电站示范项目为例, 其配置 5 kW 充电桩 19 台、35 kW 快充桩 2 台、换电机 2 套、4 kW 分箱充电机 40 台和 10 kW 分箱充电机 60 台, 可同时为 19 辆乘用车进行慢速常规充电、2 辆乘用车进

行快速充电。此外今年 3 月蔚来汽车首座集中充换储一体站在江西投运, 其充放电功率为 62.5 kW, 充电效率为 98.2%, 可进一步降低补能时长。

综上所述, 本文介绍的 4 类 CCSF 典型运行场景的特征对比如表 5 所示。

表 5 CCSF 典型运行场景特征对比

Table 5 Comparison of typical operating scenario characteristics for CCSF

运行场景	基本特征	建模影响因素	元件组成	典型用户	运行特点
高速公路	为满足用户快速补能需求, 以直流快充和超充模式为主	高速各时段流量和到达率等	控制中心、变流设备和充电机等	私家车、重卡、公务车等	充电设备功率大、容量高
集中光储充	有较充足的空间配置光伏和储能设施, 缓解电网供电压力	各时段流量和堵塞情况, 光伏和储能配置容量等	光伏和储能装置、控制中心、变流设备和充电机等	私家车、公务车、公交车等	多能量流和信息流交互, 平滑充电曲线
集中充电统一配送场景	充电设施和电池更换点分散设置, 能够对电池进行集中有序充电	各时段流量和堵塞情况, 各时段电网运行情况等	控制中心、变流设备和充电机, 以及对应电池更换点换电机等	私家车、公交车、重卡等	交通网和电网耦合程度高, 有序充电调度潜力大
集中充换储	将充电设施、换电设施和储能装置集成于一体	各时段流量和堵塞情况, 各时段电网运行情况等	控制中心、变流设备和充/换电机和梯级储能装置等	出租车、公交车、网约车、重卡等	多能量流和信息流交互, 调度潜力大

3 集中充换电设施规划研究现状

EV 渗透率不断提高改变了传统电网负荷特性, 给经典的电网规划带来了新的挑战^[53]。CCSF 规划是指在满足两系统正常运行约束的前提下, 通过 CCSF 选址和充电桩容量优化配置最小化系统综合成本, 实现配置最优。CCSF 规划对保障 EV 充电需求、改善电网运行条件和节能环保等方面具有重要作用。本文从 CCSF 独立规划、计及 CCSF 的电网规划及电网与交通网协同规划 3 方面对 CCSF 的规划研究成果进行综述, 并给出了相关文献的综合对比和分析, 见表 6。

3.1 规划考虑因素

合理的 CCSF 规划受到多方面因素的影响, 主要包括电网、交通网、建设条件和经济性等因素。

1) 电网因素

作为新型负荷, CCSF 作为一种新型元件已逐渐成为电网重要负荷组成部分, 由于电网供电能力有限, 不同电网节点可供接入容量受限, 另外电网的结构特征、电源组成和负荷分布特性等因素也会对 CCSF 拟接入节点产生影响, 因此 CCSF 需要选择合适的节点接入以满足电网安全稳定约束, 同时缓解对电网的不利影响。

2) 交通网因素

作为重要的电-交耦合枢纽单元, CCSF 在交通网中的地位同样不可忽视。随着 EV 渗透率不断提

高和充电快速化发展, CCSF 在交通网中的布局不仅会影响其收益, 反过来也会对交通流量分布产生新的影响, 因此 CCSF 的站址选择也要充分考虑道路交通网络的影响因素。

3) 建设条件

在确定 CCSF 站址时, 需要结合区域规划情况, 综合考量社会和地理因素, 充分计及 CCSF 施工便利情况、各类政策因素和社会影响等因素。

4) 经济性

除上述因素外, 在 CCSF 规划中还需要充分考虑运营成本、EV 用户使用成本和电网收益等因素, 实现在电网、CCSF 运营商和 EV 用户之间达到共赢, 实现系统最优。

3.2 CCSF 独立规划

针对 CCSF 独立规划分析, 现有研究主要根据 EV 充电负荷分布和需求分别进行选址^[54]和定容^[55]。在分析方法上, 现有文献主要采用排队论模型确定 EV 服务需求^[56], 也有文献通过构建交通流量分布模型以确定充电服务需求^[24,49]。文献[24]以路段传播动态仿真模型为基础, 结合排队论模型获取 EV 用户充电需求, 构建以 EV 用户排队时间和 CCSF 年建设运维成本最小为目标的高速公路 CCSF 选址定容模型, 并采用多目标粒子群算法进行求解。文献[54]基于高速路网场景下 EV 的 SOC 运行模型提出一种 EV 充电需求分布模型, 构建以 CCSF 建站

表 6 计及 CCSF 规划的参考文献比较

Table 6 Comparison of the references on the CCSF collaborative planning

编号	负荷预测法	交通网络	决策变量	目标函数	分析主体			求解算法
					电网	CCSF	用户	
[24]	动态流(路段传输模型)/排队论	√	CCSF 选址及充电桩数量	CCSF 年投资运维成本及用户充电等待时长最小	×	√	√	多目标粒子群
[49]	静态流/排队论	√	CCSF 充电桩、光伏和储能容量	CCSF 设备日寿命周期成本和电网交互功率成本最小	×	√	√	自适应变异粒子群
[51]	动态流	√	CCSF 选址及充电桩数量	CCSF 年规划收益(充电和消费收入扣除运维成本)最大	√	√	×	改进遗传算法
[52]	动态流/排队论	√	CCSF 选址及充电桩数量	CCSF 和电网年投资和运营成本, EV 用户排队时间最小	√	√	√	快速非支配排序遗传
[54]	静态流	√	CCSF 选址及充电桩数量	CCSF 年建站、运维和接网成本最小	√	√	×	CPLEX 工具包
[55]	动态流	√	CCSF 数量、选址及充电桩数量	CCSF 年投资运行成本及用户充电等待时长最小	×	√	√	混沌粒子群
[56]	出行链/OD 矩阵	√	CCSF 选址及充电桩数量	CCSF 年投资运行成本及用户绕行距离最小	×	√	√	GUROBI 工具包
[57]	OD 矩阵/排队论	√	CCSF 选址、电网线路建设和变压器扩容	CCSF 投资运维和电网投资成本最小	√	√	×	分支定界法
[58]	静态流/排队论	√	CCSF 选址	EV 用户总驾驶成本最小	√	√	√	邻域搜索算法

成本和运维成本最小为目标的 CCSF 选址定容模型, 并采用 Cplex 软件包进行求解。文献[55]提出一种高速公路运行场景下的 EV 动态车流模拟方法, 构建以 CCSF 运营者和 EV 用户综合效率最优为目标的高速公路 CCSF 规划模型, 并采用混沌粒子群算法进行求解。上述文献虽然能够根据 EV 充电负荷的时空分布确定 CCSF 需求点位置和容量, 但是未考虑电网规划和运行情况。

3.3 计及 CCSF 的电网协同规划

作为电-交耦合枢纽, CCSF 的接入给电网的安全稳定运行带来了新的挑战。文献[49]基于高速公路车流量数据分布规律, 综合考虑 EV 用户和光储充 CCSF 利益, 构建一种以 CCSF 设备日寿命周期成本和电网交互功率成本最小为目标的 CCSF 和电网协同规划模型, 并采用自适应变异粒子群算法进行求解。文献[51]提出一种计及 EV 故障的动态交通仿真法获取其出行及充电需求, 构建以经济收益最大为目标的 CCSF 和电网协同规划模型, 并采用改进遗传算法进行求解。文献[56]采用出行链捕捉 EV 用户快充需求, 并计及 EV 用户充电决策有限理性, 构建一种以用户绕行距离和 CCSF 投资运行成本最小为目标、考虑电网接纳能力的区县区域 CCSF 和电网协同规划模型, 并采用 GUROBI 工具包进行求解。上述研究表明通过对 CCSF 和电网开展合理有效的协同规划, 能够充分满足 EV 用户充电需求、系统正常稳定运行的需求, 同时有效降低了规划成本。

3.4 计及 CCSF 的电网与交通网协同规划

合理的 CCSF 规划不仅要考虑自身的投资运营情况, 还要综合考虑规划区域内的交通网和电网因素^[8]。文献[52]基于 LTM 构建动态路段传输模型, 并通过 M/M/K 排队论计算 EV 用户排队时长, 构建以高速公路 CCSF、电网年总投资运营成本和 EV 用户总排队时长最小为目标的规划模型, 采用快速非支配排序遗传算法进行求解。文献[57]基于 OD 矩阵和排队论提出一种容量流加油站模型以获取 EV 充电需求, 构建以 CCSF 投资运维和电网投资成本最小为目标的规划模型, 并采用分支定解法求解。文献[58]基于变分不等式获取区域 EV 用户路径选择和充电行为模型, 构建一种以 EV 用户总行驶成本最小为目标的 CCSF 规划模型, 并采用邻域搜索算法求解。

4 EV 集中充换电设施优化运行研究现状

EV 充电负荷需求的不断增长, 给电网调度运行造成了新的压力。CCSF 优化运行是指根据两网运行状态, 在满足 EV 用户充电和行为需求的前提下, 综合考虑区域可调节资源调节潜力、系统运行经济性、不同系统交互等因素获取优化调节策略, 目的是让系统综合成本最小或综合收益最大。作为一种新型的广义移动储能元件, 通过合理有效的引导和调度策略, CCSF 具有成为电网新型可调节资源的潜力。本文从有序充放电调度策略、智能充电导航引导策略、计及 CCSF 的电网协同调度和计及

CCSF 的电网与交通网协同优化 4 个方面对 CCSF 的综合对比和分析, 见表 7。 的优化运行研究成果进行综述, 并给出了相关文献

表 7 计及 CCSF 的优化运行参考文献比较

Table 7 Comparison of the references on the CCSF optimal planning

参考 文献	负荷预测法	交通 网络	决策变量	目标函数	分析主体			EV 需求不 确定模型	求解算法
					电网	CCSF	用户		
[39]	静态流	√	EV 最优路径、充电 决策和电价	EV 行驶和电网总 运行成本最小	√	×	√	随机	基于凸优化的 最佳响应分解
[50]	时间概率	×	光热机组出力、 CCSF 充电功率	购电和负荷波动 惩罚成本最小	√	√	×	随机	BMIBN 工具包
[60]	时间概率	×	常规机组出力、 CCSF 充放电功率	计及网损的总成本 最小	√	√	×	随机	粒子群
[63]	静态流	√	EV 最优行驶路径	EV 总行驶能耗、时间 和成本最小	×	√	√	随机	约束 A*(CA*)
[66]	分时段动态	√	EV 最优路径和充电 站决策方案	EV、电网和交通网 综合路阻最优	√	√	√	随机	自适应 Dijkstra 路径搜索
[67]	基于 GPS 历史数据	√	EV 充电站决策方案	EV 排队时间最小	×	√	√	随机	×
[68]	静态流	√	EV 最优路径和 充放电功率	电网网损及开关切换 成本最小	√	×	√	随机	CPLEX 工具包
[70]	静态流	×	CCSF 充放电功率	电网网损成本最小	√	√	×	随机	CPLEX 工具包
[72]	静态流	×	CCSF 充放电功率	电网用电成本最小	√	√	×	随机	EGAHR 算法
[73]	静态流	√	EV 充电电价	电网总运行成本最小	√	√	×	随机	遗传和邻域 搜索算法
[74]	静态流	√	电网元件输出功率	电网总运行成本最小	√	√	×	鲁棒	延迟约束生成 算法

4.1 优化运行考虑措施

CCSF 运行管控需要考虑多种措施, 包括 CCSF 站内调节措施、电网设备调控措施和交通网-电网协同优化措施等。

1) CCSF 站内调节措施

作为 EV 补能设施, CCSF 站内调节措施主要包括调节充电功率的时序分配和调整充电服务费用。前者属于直接控制措施, 主要针对换电系统的集中充电模式, 通过优化电池组充电负荷曲线实现调节; 后者属于间接控制措施, 主要针对快充系统的快速充电模式, 通过调节充电服务费影响 EV 用户充电决策和出行路径选择。

2) 电网设备调控措施

CCSF 接入后, 电网元件的出力调节措施影响也更加广泛和深入。通过计及 CCSF 等新元件运行特性, 可以对电网中常规的调节性资源如储能装置、电容器组、微型燃气轮机等元件出力进行优化管控, 实现配合 CCSF 运行需求的系统调节目标。

3) 交通网-电网协同优化措施

CCSF 提高了交通网和电网之间的耦合程度。随着 EV 渗透率不断提高, 交通领域调节措施如红

绿灯时长设定、道路通行费等因素也具备成为协同优化措施的潜力。通过对交通网和电网两系统内的调节措施进行协同组合, 可以充分发挥两网协同的优势, 进一步提高调节效果。

4.2 EV 有序充放电调度策略

EV 有序充电策略以经济性等指标最优为目标, 对 CCSF 中的 EV 充电功率和充电时段进行优化调整。有序充电可缓解 EV 接入对电力系统的冲击、减小负荷曲线峰谷差、缓解配电设备过载、降低网络损耗^[59]。文献[50]提出一种考虑光热发电机组的 CCSF 运行策略, 构建以 CCSF 日购电成本和负荷波动惩罚成本最小为目标的有序充电模型, 采用 BMIBN 工具包进行求解。文献[60]考虑“集中充电, 统一配送”运行场景, 以计及网损的系统总成本最小为目标, 提出一种含高速公路 CCSF 的双层经济调度模型, 并采用粒子群算法进行求解。由于 EV 快充用户补能需求紧迫, 充电时间有限, 因此该策略对快充用户适用性不强。

4.3 EV 智能充电导航引导策略

EV 智能充电导航引导通过结合道路交通数据、EV 用户出行需求和 EV 电量等信息, 以 EV 出行时

间、距离和综合成本最优为目标,采用 Dijkstra^[61]、Floyd^[62]、A*^[63-64]等算法对 EV 前往 CCSF 的路径进行优化。对于有快速充电需求的车辆而言,此类策略能够在满足其能量补给需求的前提下,挖掘其空间调度潜力^[65]。文献[63]以 EV 用户总成本最小为目标,构建一种综合考虑 EV 行驶时长和能耗的最优路径规划模型,并采用约束 A*算法进行求解。文献[66]基于“时间-流量”路阻模型,以 EV 用户、电网和交通网三方综合路阻最优为目标,提出一种综合考虑电网运行状态及实时道路交通数据的 EV 路径优化及充电导航策略,采用自适应 Dijkstra 路径搜索算法进行求解。文献[67]基于 ET 的 GPS 历史行驶轨迹,提出一种以 EV 用户排队总耗时最小为目标的路径导航策略。

4.4 计及 CCSF 的电网协同调度

目前针对考虑 CCSF 的电网运行优化研究主要集中在经济调度^[68-69]、配网重构^[70-71]、能量管理^[72]、无功优化、堵塞管理等方面。文献[68]计及 EV 用户的时空分布可调节特性,以系统网损和开关切换总成本最优为目标,提出一种计及 EV 负荷需求和可再生能源(renewable energy source, RES)出力不确定性的配电网动态重构策略,采用 CPLEX 工具包进行求解。文献[70]计及 EV 的停泊特性,以提高配电网电压质量和降低线路损耗为目标,提出一种计及 CCSF 的配电网动态重构策略,采用 CPLEX 工具包进行求解。文献[72]计及 CCSF 需求侧的不确定性和供给侧的协调性问题,以电网取电成本最小为目标构建 CCSF 智能充电策略,采用基于带精英策略的遗传混合递推(EGAHR)算法进行求解。

4.5 计及电网与交通网协同的 CCSF 优化

近年来,交通网和电网协同优化已经成为研究热点,两网协同优化需要结合交通流量分配模型及道路拥堵情况等信息充分考虑交通网络的约束条件。文献[39,73-74]均在计及交通网和电网的经济调度策略后,利用不动点理论获取两网耦合的均衡运行点。在此基础上,文献[39]以 EV 用户行驶成本和电网运行成本最优为目标构建优化模型,采用基于凸优化的最佳响应分解算法进行求解。文献[73]提出一种以电网总运行成本最优为目标,计及两网耦合的 EV 充电站最优定价模型,并采用遗传和邻域搜索算法进行求解。文献[74]在用户均衡建模中进一步考虑 EV 用户出行行为的不确定性,构建以电网运行成本最小为目标的两阶段鲁棒优化模型,并采用延迟约束生成算法进行求解。

综上所述,综合考虑两网运行状态、各类可调节资源运行特性、不确定性因素和各类调控措施,

EV 集中充换电设施优化运行基本模型为

$$\begin{cases} \min C_{\zeta}(\mu'_{\zeta}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} r_{\zeta}(\mu'_{\zeta}) \geq 0, \zeta \in \{\text{TN}, \text{DN}\} \\ d_{\zeta}(\mu'_{\zeta}) = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\zeta \in \{\text{TN}, \text{DN}\}$ 表示对应区域的交通网和电网, TN 为交通网络, DN 为配电网; $C_{\zeta}(\mu'_{\zeta})$ 为 EV 集中充换电设施优化运行目标函数,一般分为技术性指标(如网络综合路阻、排队时长等)和成本性指标(如运行、各类惩罚、开关切换和网损成本等); μ'_{TN} 和 μ'_{DN} 分别为交通网和电网在各时段的运行决策变量,前者包括 EV 各时段出行路径等,后者包括 EV 充电决策、充放电功率和 CCSF 充电电价等; $r_{\text{TN}}(\mu'_{\text{TN}}) \geq 0$ 和 $r_{\text{DN}}(\mu'_{\text{DN}}) \geq 0$ 分别为交通网和电网不等式约束,前者包括交通流量上下限约束等,后者包括电网安全运行约束等; $d_{\text{TN}}(\mu'_{\text{TN}}) = 0$ 和 $d_{\text{DN}}(\mu'_{\text{DN}}) = 0$ 分别为交通网和电网等式约束,前者包括交通流量守恒约束等,后者包括功率平衡约束等。

5 研究展望

在加速构建新型电力系统背景下,国内外学者针对 CCSF 开展较多研究,但是 EV 充电需求建模困难、运营主体分散、元件响应特性各异、运行场景和商业模式尚不明确等因素给 CCSF 协同规划与运行管控带来了新的挑战。针对上述问题,本文对现有研究成果进行系统梳理,在充分考虑交通网-电网耦合特性加强、EV 调节潜力提高、电力体制改革加快等因素的条件下,提出未来潜在的研究方向。

5.1 计及两网耦合的 EV 充电负荷需求模拟

目前典型 EV 负荷需求模拟主要包括考虑时间分布特性、空间分布特性和基于 GPS 历史出行数据时空分布特性。在基于时间分布特性的负荷模拟方面,现有研究主要是基于 NHTS 历史统计数据对 EV 到站时间^[30]、到站 SOC^[31]等典型特征参数构建概率模型,并采取蒙特卡洛法模拟负荷需求。但是上述建模方法不能反映行驶过程中受交通因素影响的多种类型 EV 用户实际出行特征,如何基于 EV 用户客观的特征参数构建准确的概率模型,从而有效反映 EV 用户的真实出行行为及时空分布特性是研究难点。

在基于空间分布特性的负荷模拟方面,现有文献主要是通过 OD 分析法^[37]、出行链^[38]和交通流量分析^[39]等方式对其空间分布特性进行建模。文献[37]

以深圳地区电动出租车实际数据为基础, 采用 OD 分析法建立区域 EV 充电负荷模拟模型。文献[38]针对不同类型的 EV 用户行为特征建立动态出行链模型, 在不同场景下构建统一的 EV 充电负荷需求模拟模型。文献[39]通过对交通网络的宏观流量分布特征进行分析, 构建考虑不同路段的 EV 行为和充电需求的模拟模型。但是上述建模方法对交通网络各时段的通行和拥堵等实时情况考虑不够, 忽略了交通流量的可调度性以及受交通流影响的 EV 用户行为决策调整。随着新型 EV 无线充电^[75]和自动驾驶模式^[76]等技术模式的应用, 交通网-电网耦合特性将会更加紧密。如何构建综合考虑两网关键元件耦合特性、相互作用机理的 EV 充电负荷模拟方法是研究难点。研究中要重点关注对 EV 用户行为的不确定性建模, 特别是需要综合考虑用户类型及其行为的理性和随机性等因素影响。

在基于 GPS 等历史出行数据对 EV 时空分布特性负荷模拟方面, 由于 EV 用户行为特性具有明显的时间和空间相关性, 与社会、经济、环境等外部因素关联程度高, 因此可通过采用数据驱动方法提取其历史行为规律, 辨识其模型关键特征参数。数据驱动技术能够避免复杂系统结构建模, 有效应对影响因素较为复杂的系统^[77]。近年来, 学者在 EV 充电负荷需求模拟中充分考虑云计算^[78]、大数据^[27]、人工智能^[79-81]等新方法, 例如采用 KNN 算法^[79]、卷积神经网络算法^[80]、改进型随机森林算法^[81]等构建 EV 充电负荷预测模型。相关数据挖掘技术能够有效处理数据的非线性、隐含特征提取不充分和连续数据深层次特征难以提取等问题。但数据驱动技术需要大量 EV 行为轨迹、充电特征等真实数据支撑, 由于其涉及社会安全、用户隐私等因素, 数据的有效提取和挖掘是制约此类技术推广的难点。考虑到对信息数据隐私安全的保护需要, 以及分布式算法在数据安全、计算效率和数据处理方面的优势, 因此如何在计及多主体数据隐私保护的因素影响下, 基于新型数据驱动方法和分布式算法构建高效准确的 EV 负荷预测模型是未来的研究方向。

5.2 计及两网耦合的 CCSF 规划

目前国内外学者针对计及两网耦合的 CCSF 规划展开了相关研究, 但是在运营主体和交通流动态特性等因素上考虑不够全面。

5.2.1 不同运营主体影响

目前 CCSF 规划方面的研究通常假定存在一类“超级规划者”可获取区域所有信息, 但实际上交通网和电网耦合运行环节涉及不同运营主体, 包括政府、电网、交通主管部门、车企、CCSF 和 EV

用户等。不同主体之间运行调度权限、信息数据和利益各不相同。统一运营管理模式表示 EV 用户将充电决策决定权交给控制主体, 由其统一决定 EV 的充放电行为, 控制主体主要为城市中央调控机构^[82]、“智慧城市”^[83]等。然而实际运行中不存在能够对各类利益主体进行统一调用的“超级主体”^[84]。随着电力市场建设进程加快, 电网调度中心一般仅通过电价信号引导 CCSF 调整充放电策略及其充电服务费设定, 进而影响 EV 用户充电决策^[85-86]。因此构建 CCSF 规划模型时如何充分计及各运营主体之间的信息交互及调度隶属关系影响是研究难点。在研究中需要明确各运营主体的角色和职责, 并根据不同主体之间调度隶属关系构建不同层次的协调架构, 建立有效的利益分配和风险共享机制, 考虑采用计算效率较高、可拓展性较强的分布式优化算法进行处理, 实现各方互利共赢。

5.2.2 交通流动态特性影响

传统 CCSF 规划问题中一般考虑交通网络的稳态状况, 其交通流通常建模为单个时间尺度下的静态模型。然而传统静态模型无法有效衡量交通流动态特性的演变过程, 因此近年来半动态^[44]和动态交通流^[45]逐渐成为研究热点。与静态交通流相比, 后者建模精确度更高, 但目前缺乏统一的数学模型, 求解方法也更加复杂, 难以直接用于解决实际工程问题。在研究中需要构建计及交通流动态演变特性影响的 CCSF 规划模型, 并采用高效算法进行求解。

5.3 计及 EV 可调潜力的 CCSF 优化运行

相比于传统固定储能, EV 作为移动的广义储能其在规模上占绝对优势, 对动力电池进行有序调度的经济性也显著高于传统固定储能电站。但由于 CCSF 运营主体复杂, 加上 EV 用户响应潜力受主观、行为特性模糊等因素影响, 目前 EV 的调度潜力挖掘空间有限。如何客观有效地挖掘 EV 的调度潜力是一项复杂且持续的挑战。

5.3.1 EV 调节潜力量化

对 EV 的可调节潜力进行精细化建模是 CCSF 优化运行的基础。目前 EV 可调节潜力主要体现在有序充电^[87]和 V2G^[88]两种模式。对有序充电模式而言, EP 等用户出行需求较小、停车等待时间较长的 EV 类型调节潜力主要体现在调节时序灵活性高, 而 EB 和 ET 等运营车辆调节潜力主要体现在出行及用电特性较规律, 充电功率较大; 对 V2G 模式而言, EV 调节潜力主要取决于充放电调节能力和可用容量, 其中充放电调节能力主要由各时段充放电功率及停放时长决定, 可用容量为 EV 电池容量与用户充电需求之差。

现有文献主要从确定性角度对 EV 可调节潜力进行刻画, 未来的研究需要考虑如何在计及动态交通流时变特性和 EV 用户行为不确定性的基础上, 对 EV 用户具备的可调节潜力进行有效量化评估。

5.3.2 两网融合背景下的调节措施

在交通网和电网耦合特性不断加强的背景下, 传统电力系统调节措施的调控效果也在发生深刻变化。与传统电网调节手段(如对储能装置、电容器组、无功补偿器、分段开关等元件各时段状态值进行调控)相对应, 交通网的调节手段(如各时段充电服务价格、关键道路通行费用等措施)也具备成为两网协同优化调控措施的潜力。如何在计及 RES 的两网耦合背景下, 对两系统内的调节措施进行协同组合, 充分发挥两网协同优势以实现多方共赢是研究难点。

5.4 运行场景及商业模式

5.4.1 典型运行场景

随着电池成本不断下降和商业模式不断发展, CCSF 潜在应用场景不断扩大, 包括参与调频^[88]、备用^[89]和调峰等辅助服务市场、参与电网阻塞管理、为系统提供故障恢复支撑和作为韧性资源等。

1) 参与碳减排调节

区域碳排总量是由区域内传统机组发电量和跨区联络线交互电量决定, CCSF 规划和优化运行将会对系统内潮流分布和网损等产生显著影响^[90], 进而对区域碳排放总量产生影响^[91]。但是目前针对计及碳减排的 CCSF 规划及优化问题研究较少。

2) 参与辅助服务市场

随着我国电力市场化改革进程不断深入, EV 作为移动储能元件具有为电力系统提供调频服务和旋转备用支撑的潜力^[88]。通过合理的调控手段挖掘 EV 调度空间, 可降低电网对灵活性资源的需求, 提高系统对 RES 的消纳能力, 降低系统损耗和提高运行经济性, 同时在满足用户出行需求和不影响电池使用寿命的前提下为电网提供备用支撑^[89]。

3) 故障恢复支撑

在电力系统发生故障的情况下, 若不能及时恢复可能会进一步引发连锁反应。紧急状况下通过引导 EV 用户在系统需要区域充放电, 可显著提高电网的运行可靠性^[92]、减少停电损失并提供紧急支撑^[93]。在此基础上进一步计及两网耦合, 实现不同类型调节资源协调调度, 可保证故障设备修复策略更加可靠, 进一步提高电网韧性。

5.4.2 商业模式

近年来, 分时租赁模式与共享 EV 得到快速发展, 分时租赁是有序充电在商业模式上的体现^[94], 可满足用户出行需求, 缓解电网负荷波动、减少投

资成本, 提升租赁公司收益。共享 EV 具有提高使用效率、缓解交通拥堵等优点。共享出行可分为单程和往返两种形式, 前者需另外考虑空闲车辆空闲调度^[85]。共享 EV 主要受交通网络拥堵和服务价格两大因素影响^[95]。与传统 EV 相比, 共享 EV 行为特性和收费模式多样化制约了其负荷预测精度, 传统路径导航策略难以直接适用。目前分时租赁与共享 EV 服务模式已在部分地区试点, 包括重庆已启动的“山地城市 EV 分时租赁模式及支撑技术与示范应用”等项目。

6 结语

随着“双碳”目标下能源消费侧交通领域电气化转型加快, EV 充电负荷的不断提高对新型电力系统带来了新的挑战。交通网-电网耦合发展有助于充分发挥 EV 的调节潜力、提高系统运行效率、降低碳排放, 加快“双碳”目标实现。CCSF 具备统一的集中通信与控制中心, 能够接受统一调度安排, 实现对 EV 充电负荷时空层面的有序管理, 降低 EV 个体差异性对系统的影响, 实现系统运行整体最优。面向 CCSF 的协同规划和运行调度的研究为多网协同发展、充分挖掘 EV 可调度空间及满足系统未来调节需求提供了一种新思路。

本文介绍了计及两网耦合特性的 CCSF 发展背景、研究现状及运行架构, 概述了主要的 EV 负荷需求模拟方法。在此基础上, 对国内外 CCSF 的协同规划和运行优化两个维度的研究进展进行分析, 在协同规划方面分别从 CCSF 单独规划、计及 CCSF 的电网协同规划及两网协同规划三方面进行对比; 在运行优化方面分别从有序充放电策略、智能充电引导策略、电网协同调度和两网协同优化运行等四个方面进行介绍。面对 EV 充电需求建模困难、主体分散、用户特性各异等因素, 本文在计及两网耦合特性、EV 调节潜力等因素前提下分析其对 CCSF 规划和运行的影响, 并展望了其潜在的研究方向, 为未来的研究提供参考。

参考文献

[1] WANG X, ZHOU Y, BI Q, et al. Research on the low-carbon development path and policy options of China's transportation under the background of dual carbon goals[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10.

[2] 王泽森, 唐艳梅, 门向阳, 等. 独立海岛终端一体化系统下电动汽车的投放数量规划研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 2005-2016.

WANG Zesen, TANG Yanmei, MEN Xiangyang, et al. Research on the quantity planning of electric vehicle on

- the isolated island terminal integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2005-2016.
- [3] HE F, YIN Y, WANG J, et al. Sustainability SI: optimal prices of electricity at public charging stations for plug-in electric vehicles[J]. Networks and Spatial Economics, 2016, 16(1): 131-154.
- [4] 袁泉, 汤奕. 基于路-电耦合网络的电动汽车需求响应技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1627-1637. YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle demand response technology based on traffic-grid coupling networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1627-1637.
- [5] 姚恩建, 何媛媛, 金方磊, 等. 面向自组织平衡的共享电动汽车调度优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 135-141. YAO Enjian, HE Yuanyuan, JIN Fanglei, et al. A self-organized equilibrium-oriented relocation optimization method for electric vehicle sharing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 135-141.
- [6] HAFEZ O, BHATTACHARYA K. Integrating EV charging stations as smart loads for demand response provisions in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1096-1106.
- [7] 李斌, 刘畅, 陈慧妙, 等. 基于混合整数规划的电动公交车快速充电站有序充电策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2623-2629. LI Bin, LIU Chang, CHEN Huimiao, et al. Coordinated charging of plug-in electric buses in fast charging stations based on mixed-integer programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2623-2629.
- [8] 翁国庆, 黄飞腾, 张有兵, 等. 电动公交车电池集群参与海岛微网能量调度的V2G策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 31-37. WENG Guoqing, ZHANG Feiteng, ZHANG Youbing, et al. V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 31-37.
- [9] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1285-1301. JIANG Lizhou, BIE Chaohong, LONG Tao, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285-1301.
- [10] 潘樟惠, 高赐威. 电动汽车换电网络协调规划[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 480-487. PAN Zhanghui, GAO Ciwei. Coordinated planning of EV battery-swapping network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 480-487.
- [11] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127. LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [12] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10. WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [13] 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.
- [14] 薛飞, 雷宪章, 张野飏, 等. 电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 29-34. XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 29-34.
- [15] 袁洪涛, 韦钢, 张贺, 等. 计及充换储一体站的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2453-2467. YUAN Hongtao, WEI Gang, ZHANG He, et al. Robust optimal scheduling of active distribution network considering with the charging-swapping-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2453-2467.
- [16] 楚皓翔, 解大, 娄宇成, 等. 电动汽车智能充放储一体化电站无功电压调控策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 48-54. CHU Haoxiang, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Strategy of reactive power and voltage control for integrated EV station of intelligent charging, discharging and storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 48-54.
- [17] 韦钢, 李明, 卢炜, 等. 充放储一体站并网的多级阶梯电压控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3823-3831. WEI Gang, LI Ming, LU Wei, et al. Multistage ladder voltage control partitioning method containing grid-connected charging-discharging-storage integrative station[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3823-3831.

- [18] 杨敏霞, 刘高维, 房新雨, 等. 计及电网状态的充放储一体化站运行模式探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1202-1208.
YANG Minxia, LIU Gaowei, FANG Xinyu, et al. Discussion on operation mode of charging-discharging-storage integrated station considering power network statuses[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1202-1208.
- [19] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 考虑不确定因素下含充换储一体化站的微网能量优化[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 669-676.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of microgrid containing charging-swapping-storage integrated station under uncertain factors of wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 669-676.
- [20] 楚皓翔, 解大. 考虑电网运行状态的电动汽车充放储一体化充换电站充放电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 96-101.
CHU Haoxiang, XIE Da. Charging/discharging control strategy of EV charging-discharging-storage integrated station considering operational status of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 96-101.
- [21] 孙俊博, 解大, 娄宇成, 等. 充放储一体化电站的黑启动方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 43-50.
SUN Junbo, XIE Da, LOU Yucheng, et al. Black-start scheme for charging-discharging-storage integrated station[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 43-50.
- [22] 何晨可, 韦钢, 朱兰, 等. 电动汽车充换放储一体化电站选址定容[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 479-489.
HE Chenke, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Locating and sizing of electric vehicle charging-swapping-discharging-storage integrated station[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 479-489.
- [23] 李睿雪, 胡泽春. 电动公交车光储充电站日运行随机优化策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3772-3779.
LI Ruixue, HU Zechun. Stochastic optimization strategy for daily operation of electric bus charging station with PV and energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3772-3779.
- [24] 葛少云, 朱林伟, 刘洪, 等. 基于动态交通仿真的高速公路电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2991-3001.
GE Shaoyun, ZHU Linwei, LIU Hong, et al. Optimal deployment of electric vehicle charging stations on the highway based on dynamic traffic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2991-3001.
- [25] 张兆轩, 陈璟华, 赵炳耀, 等. 考虑集中充电站的电池换电站选址定容规划[J]. 广东工业大学学报, 2021, 38(5): 59-67.
ZHANG Zhaoxuan, CHEN Jinghua, ZHAO Bingyao, et al. Locating and sizing planning of battery swapping stations considering centralized charging station[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2021, 38(5): 59-67.
- [26] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [27] 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.
- [28] 王浩林, 张勇军, 毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 207-213.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 207-213.
- [29] 温旭丽, 吴恣, 曹蕊. 几种典型路阻函数的特性比较及参数选择研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(2): 205-208.
- [30] 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 Guangya, XU Zhao, et al. Impacts of electric vehicle charging on distribution networks in Denmark[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 18-23.
- [31] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华. 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 Zechun, SONG Yonghua. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [32] 张维戈, 陈连福, 黄彧, 等. M/G/k 排队模型在电动出租车充电站排队系统中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 724-729.
ZHANG Weige, CHEN Lianfu, HUANG Yu, et al. Application of M/G/k queuing model in queuing system of electric taxi charging station[J]. Power System

- Technology, 2015, 39(3): 724-729.
- [33] HONG J H, CHOI J I, LEE J H, et al. Determining the proper capacity of electric vehicle charging station[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2009, 58(10): 1911-1915.
- [34] 邵成成, 李徐亮, 钱涛, 等. 基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1368-1376.
- SHAO Chengcheng, LI Xuliang, QIAN Tao, et al. Simulation of EV fast charging load based on traffic equilibrium[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1368-1376.
- [35] 姜欣, 冯永涛, 熊虎, 等. 基于出行概率矩阵的电动汽车充电站规划[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 272-281.
- JIANG Xin, FENG Yongtao, XIONG Hu, et al. Electric vehicle charging station planning based on travel probability matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 272-281.
- [36] 张晨彧, 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.
- [37] ZHANG H, TANG W, HU Z, et al. A method for forecasting the spatial and temporal distribution of PEV charging load[C]// Proceedings of 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA: 1-5.
- [38] TANG D, WANG P. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 627-636.
- [39] WEI W, WU L, WANG J, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764-6779.
- [40] LÜ S, WEI Z, CHEN S, et al. Integrated demand response for congestion alleviation in coupled power and transportation networks[J]. Applied Energy, 2021, 283.
- [41] DIVISION T A, BOARD T R. Dynamic traffic assignment: a primer[M]. Washington, USA: Transportation Research Board, 2011.
- [42] NAKAYAMA S I, TAKAYAMA J I, NAKAI J Y, et al. Semi-dynamic traffic assignment model with mode and route choices under stochastic travel times[J]. Journal of Advanced Transportation, 2012, 46(3): 269-281.
- [43] 谢仕炜, 胡志坚, 王珏莹. 考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8408-8424.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8408-8424.
- [44] 柯松, 陈磊, 杨军, 等. 基于半动态交通流模型的电动汽车出行引导策略[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3362-3380.
- KE Song, CHEN Lei, YANG Jun, et al. Electric vehicles travel guidance strategy based on semi-dynamic traffic flow state model[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3362-3380.
- [45] ZHOU Z, ZHANG X, GUO Q L, et al. Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135.
- [46] DABBAGHJAMANESH M, MOEINI A, KAVOUSI-FARD A. Reinforcement learning-based load forecasting of electric vehicle charging station using Q-learning technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(6): 4229-4237.
- [47] 邢强, 陈中, 黄学良, 等. 基于数据驱动方式的电动汽车充电需求预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3796-3813.
- XING Qiang, CHEN Zhong, HUANG Xueliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting model based on data-driven approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3796-3813.
- [48] SHEPERO M, MUNKHAMMAR J. Spatial Markov chain model for electric vehicle charging in cities using geographical information system (GIS) data[J]. Applied Energy, 2018, 231: 1089-1099.
- [49] 杨健维, 李爱, 廖凯. 城际高速路网中光储充电站的定容规划[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 934-943.
- YANG Jianwei, LI Ai, LIAO Kai. Capacity planning of light storage charging station for intercity highways based on charging guidance[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 934-943.
- [50] 邓友均, 张永熙, 李波, 等. 考虑光热发电的集中充电站有序充电决策[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 31-38.
- DENG Youjun, ZHANG Yongxi, LI Bo, et al. Decision-making of orderly charging of centralized charging station considering concentrating solar power[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 31-38.
- [51] 葛少云, 周昊, 刘洪, 等. 考虑车辆事故影响的高速公路充电站与服务区协同规划[J]. 电力系统及其自动化

- 学报, 2019, 31(3): 1-8.
- GE Shaoyun, ZHOU Hao, LIU Hong, et al. Coordinated planning for highway charging stations and rest area considering the impact of traffic accidents[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(3): 1-8.
- [52] 范云松, 田俊山, 郑传钊, 等. 高速公路与电网耦合背景下的充电站布局规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(9): 40-52.
- FAN Yunsong, TIAN Junshan, ZHENG Chuanzhao, et al. Layout and planning of electric vehicle charging stations under background of coupled expressway and power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(9): 40-52.
- [53] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [54] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 高速路网上电动汽车充电站布点优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 82-89.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Planning of electric vehicle charging stations in highway network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 82-89.
- [55] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 基于动态车流模拟的高速公路充电站多目标优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 56-62, 79.
- LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multi-objective planning of electric vehicle charging stations on expressway based on dynamic traffic flow simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 56-62, 79.
- [56] 陈卓旭, 宛玉健, 胡泽春, 等. 考虑随机用户均衡的区县级电动汽车快充站规划[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(15): 25-34, 79.
- CHEN Zhuoxu, WAN Yujian, HU Zechun, et al. Planning of electric vehicle fast charging station at district and county levels considering stochastic user equilibrium[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(15): 25-34.
- [57] ZHANG H, MOURA S J, HU Z, 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.
- [58] WANG C, HE F, LIN X, et al. Designing locations and capacities for charging stations to support intercity travel of electric vehicles: an expanded network approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 210-232.
- [59] WANG G, ZHAO J, WEN F, et al. Dispatch strategy of PHEVs to mitigate selected patterns of seasonally varying outputs from renewable generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 627-639.
- [60] 李学平, 高菲, 卢志刚. 含高速公路集中充电站的双层经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 126-132.
- LI Xueping, GAO Fei, LU Zhigang. Bi-level economic dispatch considering expressway centralized charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 126-132.
- [61] 袁铁江, 计力, 田雪沁, 等. 考虑燃料电池汽车加氢负荷的电-氢系统协同优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 16-25.
- YUAN Tiejiang, JI Li, TIAN Xueqin, et al. Synergistic optimal operation of electricity-hydrogen systems considering hydrogen refueling loads for fuel cell vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 16-25.
- [62] MYOUPPO J F, FABRET A C. A modular systolic linearization of the Warshall-Floyd algorithm[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1996, 7(5): 449-455.
- [63] WANG Y, JIANG J, MU T. Context-aware and energy-driven route optimization for fully electric vehicles via crowd sourcing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1331-1345.
- [64] 葛晓琳, 何鋋博, 符杨, 等. 融合分层规划和 A* 算法的共享电动汽车换车与充电路径规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7668-7681.
- GE Xiaolin, HE Hongbo, FU Yang, et al. Interchange and charging path planning of shared electric vehicles based on A* algorithm combined with hierarchical programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7668-7681.
- [65] WEI W, WU D, WU Q, et al. Interdependence between transportation system and power distribution system: a comprehensive review on models and applications[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 433-448.
- [66] 邢强, 陈中, 冷钊莹, 等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 534-549.
- XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-549.
- [67] TIAN Z, JUNG T, WANG Y, et al. Real-time charging

- station recommendation system for electric-vehicle taxis[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(11): 3098-3109.
- [68] GUO Zhaomiao, ZHOU Zhi, ZHOU Yan. Impacts of integrating topology reconfiguration and vehicle-to-grid technologies on distribution system operation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 1023-1032.
- [69] 朱永胜, 常稳, 武东亚, 等. 考虑充放储一体站与电动汽车互动的主从博弈优化调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(7): 157-167.
- ZHU Yongsheng, CHANG Wen, WU Dongya, et al. A Stackelberg game optimization scheduling strategy considering the interaction between a charging-discharging-storage integrated station and an electric vehicle[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 157-167.
- [70] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁. 考虑电动汽车停泊特性的充电站-电网互动策略研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 43-50.
- ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining. Station-to-grid interactive strategy considering parking characteristics of electric vehicles[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 43-50.
- [71] 石铖, 安锐, 高红均, 等. 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(22): 133-144.
- SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 133-144.
- [72] 赵文薇, 林兵, 卢宇, 等. 面向汽车充电预约的光储充电站能量调度策略[J]. *计算机工程*, 2023, 49(12): 262-273.
- ZHAO Wenwei, LIN Bing, LU Yu, et al. Energy scheduling strategy for photovoltaic storage charging station for vehicle charging reservation[J]. *Computer Engineering*, 2023, 49(12): 262-273.
- [73] CUI Y, HU Z, DUAN X. Optimal pricing of public electric vehicle charging stations considering operations of coupled transportation and power systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3278-3288.
- [74] WEI W, MEI S, WU L, et al. Robust operation of distribution networks coupled with urban transportation infrastructures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(3): 2118-2130.
- [75] 刘登伟, 周坤卓, 刘野然, 等. 基于双拾取结构的恒功率输出动态无线电能传输系统研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3899-3906.
- LIU Dengwei, ZHOU Kunzhuo, LIU Yeran, et al. Research on constant output power based on double pick-up in dynamic wireless power transfer system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3899-3906.
- [76] ZHANG H, SHEPPARD C J R, LIPMAN T E, et al. Joint fleet sizing and charging system planning for autonomous electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(11): 4725-4738.
- [77] ABDULLAH H M, GASTLI A, BEN-BRAHIM L. Reinforcement learning based EV charging management systems-a review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 41506-41531.
- [78] 郑牡丹. 基于云计算的充电站充电负荷预测体系结构研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- ZHENG Mudan. Research of charging station load forecasting architecture based on cloud computing[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [79] MAJIDPOUR M, QIU C, CHU P, et al. Fast prediction for sparse time series: demand forecast of EV charging stations for cell phone applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(1): 242-250.
- [80] LI M, LENZEN M, KECH F, et al. GIS-based probabilistic modeling of BEV charging load for Australia[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3525-3534.
- [81] LI Y, HUANG Y, ZHANG M. Short-term load forecasting for electric vehicle charging station based on niche immunity lion algorithm and convolutional neural network[J]. *Energies*, 2018, 11: 1-18.
- [82] SUN G, LI G, XIA S, 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.
- [83] 徐诗鸿, 张宏志, 石栋, 等. 面向智慧城市的快充负荷充电服务费制定策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3187-3201.
- XU Shihong, ZHANG Hongzhi, SHI Dong, et al. Setting strategy of charging service fee for fast charging load of smart cities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3187-3201.
- [84] MORADIPARI A, ALIZADEH M. Pricing and routing mechanisms for differentiated services in an electric vehicle public charging station network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1489-1499.
- [85] LIANG Y, DING Z, DING T, et al. Mobility-aware charging scheduling for shared on-demand electric vehicle fleet using deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(2): 1380-1393.
- [86] 侯慧, 樊浩, 苏舒, 等. 多方互利共赢的电动汽车智能充电服务策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(19): 66-73.

HOU Hui, FAN Hao, SU Shu, et al. Multilateral win-win strategy for smart charging service of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 66-73.

[87] 李怡然, 张姝, 肖先勇, 等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 129-135, 143.

LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 129-135, 143.

[88] 刘坚. 电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 44-50.

LIU Jian. An analysis on the application potential and position of electric vehicle energy storage[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 44-50.

[89] DALLINGER D, KRAMPE D, WIETSCHEL M. Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 302-313.

[90] AMER A, AZAB A, AZZOUZ M, et al. A stochastic program for siting and sizing fast charging stations and small wind turbines in urban areas[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1217-1228.

[91] 卢志刚, 姜春光, 李学平, 等. 清洁能源与电动汽车充电站 协调投资的低碳效益分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 163-171.

LU Zhigang, JIANG Chunguang, LI Xueping, et al. Low-carbon benefit analysis on coordinating investment for clean energy and electric vehicle charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 163-171.

[92] LI G, HUANG G, BIE Z, et al. Component importance assessment of power systems for improving resilience under wind storms[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 676-687.

[93] 刘伟佳, 孙磊, 林振智, 等. 含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 49-58.

LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage systems and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 49-58.

[94] 徐爽, 万靖, 崔世常, 等. 不对称信息下新型储能容量租赁市场的博弈均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 13-24.

XU Shuang, WAN Jing, CUI Shichang, et al. Game equilibrium analysis of energy storage leasing market with asymmetric information[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 13-24.

[95] WEI W, WU D, WU Q, et al. Interdependence between transportation system and power distribution system: a comprehensive review on models and applications[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 433-448.

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-07-29

作者简介:

袁洪涛(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为含电动汽车的电网规划和优化运行; E-mail: yuanhongtao@sjtu.edu.cn

徐潇源(1989—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统不确定性分析、电力系统优化运行等; E-mail: xuxiaoyuan@sjtu.edu.cn

严正(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析及智能电网。E-mail: yanz@sjtu.edu.cn

(编辑 许威)