

# 电动汽车入网负荷预测及其与电网互动研究进展综述

蔡黎<sup>1</sup>,葛棚丹<sup>1</sup>,代妮娜<sup>1</sup>,徐青山<sup>2</sup>,王坤<sup>3</sup>,张一<sup>4</sup>,贺超<sup>1</sup>

(1. 重庆三峡学院 电气工程系, 重庆 404000; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏南京 210096;  
3. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏南京 210037; 4. 国网重庆市电力公司, 重庆 400000)

**摘要:** 电动汽车(EV)充电负荷预测技术和EV与电网互动(V2G)技术,能够有效减小规模化EV入网对电网的影响,实现充电桩的合理布局、高效利用和对电网能量的削峰填谷。通过对比传统EV负荷预测方法和现代EV负荷预测方法的优劣,分析V2G充电技术的研究进展,并介绍了国内外EV与电网互动的应用实例。最后,对EV入网需要解决的问题进行了总结和展望,提出了几点可能的研究思路。

**关键词:** 电动汽车; 负荷预测; 互动策略; V2G; 有序充电

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 2096-4145(2022)07-0096-08

## Review of Research Progress on Load Prediction and Grid Interaction of Electric Vehicles

CAI Li<sup>1</sup>, GE Pengdan<sup>1</sup>, DAI Nina<sup>1</sup>, XU Qingshan<sup>2</sup>, WANG Kun<sup>3</sup>, ZHANG Yi<sup>4</sup>, HE Chao<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China;  
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210037, China;  
4. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** EV charging load prediction technology and V2G technology can effectively reduce the impact of accessed large-scale EV on power grid, realize the rational layout of charging piles & efficient utilization, peak shaving and valley filling of power grid energy. By comparing the advantages and disadvantages of traditional and modern EV load prediction methods, the research progress of V2G is analyzed, and the application examples of EV and power grid interaction at home and abroad are introduced. Finally, the problems that need to be solved when entering the power grid are summarized and prospected, and several possible research approaches are proposed.

**Key words:** electric vehicle; load forecasting; interactive strategy; V2G; orderly charging

## 0 引言

我国的石油、天然气储量缺乏,目前占总消耗量 60%~70%的石油仍依赖进口,燃油车对石油的消耗超过了石油总消耗量的 1/3。燃油车产生的 CO、CO<sub>2</sub>、氮氧化物、颗粒物等污染物加剧了温室效应和酸雨等环境问题<sup>[1]</sup>。2020 年,习近平宣布碳中和目

标:中国的 CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取在 2060 年前实现碳中和。在资源短缺和环境保护的双重推动下,电动汽车(Electric Vehicle, EV)因高效能、零污染、低排放等优点逐渐受到各国政府的重视<sup>[2]</sup>。2020 年 11 月,中华人民共和国国务院颁布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)年》中强调了“开展智能有序充电、新能源汽车与可再生能源融合发展、加强新能源汽车与电网能量互动”等内容。由此可见,电动汽车入网研究已经上升为国家战略<sup>[3]</sup>。

当海量 EV 同时接入电网充电,将形成配电网不能接受的负荷高峰,对配电网的正常运行造成干扰<sup>[4]</sup>,进一步引发线路过载、电压不稳定、谐波污染、

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51877044);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2021jcyj-msxmX0301)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51877044); The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2021jcyj-msxmX0301)

网络损耗等电能质量问题<sup>[5-6]</sup>。因此,针对EV的充电负荷进行预测、分析无序充电对电网的影响、制定EV与电网互动策略、帮助电网调峰调频实现稳定运行等工作更加具有长远意义。

目前,由于研究侧重点不同,对EV负荷预测及EV与电网互动策略的研究尚未形成广泛认可的研究方案。本文旨在对近几年国内外EV负荷预测与电网策略的理论研究成果和应用实例进行总结、归纳、分析,为EV与电网互动策略的深入研究提供有益参考。

## 1 负荷预测

### 1.1 传统负荷预测方法

传统的EV充电负荷预测方法有回归分析法、小波分析法、相似日法、神经网络法、支持向量机法(Support Vector Machine, SVM)、蒙特卡洛模拟法等<sup>[7-9]</sup>。负荷预测需考虑充电行为和电池状态2个方面的因素:温度、天气状况、节假日、特殊日期、生活习惯、交通状况等通过影响车主的充电行为进而影响充电负荷;充电时间、电池特性、充电功率、起始电量、等通过电池状态影响充电负荷。

有关传统负荷预测方法的研究主要集中在以下方面:DHAVAL B等<sup>[10]</sup>用回归分析法预测短期充电负荷,回归分析法是一种较为基础和简单的负荷预测法,根据影响因素(自变量)与充电负荷(因变量)之间的关系,依据回归方程推断预期的充电负荷,但回归分析法预测精度较低且对历史数据的依赖性较大,目前很少用其预测EV充电负荷。GHANAVATI A K等<sup>[11]</sup>用小波分析法预测EV充电负荷,通过对充电负荷历史数据进行小波变换体现负荷序列的周期性,得到一系列分解出的子序列,再对各子序列分别进行预测,最后将全部预测值进行合并重构得到最终的预测结果,该方法预测精度较高但对历史数据及小波基的选取依赖性较大。陈弘川等<sup>[12]</sup>用相似日法进行短期负荷预测,相似日法旨在降低人为选取样本带来的误差,结合相似度评价函数对相似度进行量化,筛选出相似度值达标的样本数据,该方法需要大量的充电站历史数据做支撑。各候选日与预测日间的相似度 $\theta_i$ 表达式为:

$$\theta_i = 1 / \sum_{i=1}^n k_i t_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $k_i$ 为第*i*个影响因素影响权重系数; $t_i$ 为第*i*个

日期距离待预测日的时间; $n$ 为影响因素的总个数。

EV负荷预测中采用相似日法时一般与其他方法结合使用,且只用于前期样本数据的选取工作,如相似日法与神经网络法相结合<sup>[13]</sup>。JHAN等<sup>[14]</sup>采用神经网络法进行日前负荷预测和日内负荷预测,同样需要大量的充电设施历史数据作为样本输入网络进行训练。使用神经网络法,关键在于隐含层节点数的确定(即隐含层神经元数的确定),太少会降低预测精度,太多会使网络复杂化,出现过拟合现象,采用神经网络法预测EV充电负荷目前只停留在理论研究阶段,实际应用中较难实现。刘敦楠等<sup>[15]</sup>采用SVM法预测EV充电负荷,SVM是一种基于统计学的新型机器学习方法,具有速度快、精度高、使用方便等优点,在预测EV充电负荷时比神经网络法更加实用,但其预测精度对历史数据样本的选取依赖性很大,需要筛选大量历史充电数据才能得到合适的样本。

综上所述,回归分析法、小波分析法、相似日法、神经网络法、SVM法等都是基于充电设施历史数据的负荷预测法。目前我国EV普及程度有限,大部分地区充电桩的历史数据均不能满足实际预测需要,充电站历史数据的缺乏促使了蒙特卡洛方法的发展。XU L等<sup>[16]</sup>采用蒙特卡洛模拟法预测EV充电负荷,蒙特卡洛模拟法是一种基于用户出行规律的预测方法,其主要推断为:当随机事件大量不断重复出现时必然呈现出规律性。蒙特卡洛模拟法是我国近年来应用较多的一种方法,通过对用户出行数据进行大量重复随机抽样,模拟用户的日常出行习惯,得出概率模型进行预测。蒙特卡洛估计量 $F_N$ 的表达式为:

$$F_N = \frac{1}{N} \sum \frac{f(X_i)}{p(X_i)} \quad (2)$$

式中: $f(X_i)$ 为随机变量 $X_i$ 的概率分布函数; $p(X_i)$ 为随机变量 $X_i$ 的概率密度函数; $N$ 为模拟次数。

### 1.2 现代负荷预测方法

在传统负荷预测的基础上,各种现代新型的方法不断被提出,传统方法与现代方法的结合进一步提高了负荷预测的精度。袁小溪等<sup>[17]</sup>提出一种基于网格划分的贝叶斯正则化反向传播(Back-propagation, BP)神经网络预测法,将待预测区划分为大小相同的网格以减少神经元数量,结合粒子群优化算法解决神经网络易陷入局部最优解的缺点,结果表明真实值和预测值间的平均绝对百分比误差为3.2%,可用于指导充电设施的建址和定容,其

缺点在于交通流量数据统计时选用3类日期数据的加权平均值进行计算,准确性相对不足,未来若引入实时交通流量数据进行计算则预测精度将进一步提高。张永<sup>[18]</sup>在商用区充电负荷预测中采用反向预测法,结合图论和最短路径算法并考虑全局的最佳路线得到待充电车辆数,再用待充电车辆数乘以充电功率得到充电负荷,该方法以实时路况为基础,并充分考虑交通堵塞情况,可以引导需要紧急充电的车辆去最佳充电点进行充电,但研究假设和计算过于简单,导致误差过大,需加以改善进一步提高超短期负荷预测精度。BUZNA L等<sup>[19]</sup>提出一种基于分层预测的EV充电负荷预测法,采用梯度增强回归树、分位树回归林、分位数回归神经网络3种标准概率模型预测低负荷区域的子问题,通过分位数回归法得出分层透视图,预测出高负荷地区的总负荷,该方法在荷兰某地区验证显示在高负荷地区的日前预测和小时前预测均表现良好,但仅适用于充电设施普及程度较高的地区。ZHU J等<sup>[20]</sup>提出一种基于长短时记忆法(Long Short-Term Memory, LSTM)的超短期EV充电负荷预测法,收集深圳某大型充电站2017年6月初至2018年7月初的充电数据,分别采用人工神经网络法、循环神经网络法、长短时记忆法等多种深度学习方法进行预测,结果表明长短时记忆法表现最好,预测误差比传统人工神经网络法降低30%以上。龙雪梅等<sup>[21]</sup>提出一种基于后悔理论和考虑“路网—电网”信息交互的充电负荷预测方法,对电动私家车和电动出租车进行预测,用蒙特卡洛法模拟用户的充电行为,对北京三环某交通路网模型进行仿真,对比结果显示负荷预测必须考虑路网和电网的影响。黄汉远等<sup>[22]</sup>提出一种远期EV和太阳能发电装置同时接入电网的负荷预测模型,鉴于EV电池具有良好的储能性质,可以接纳过剩的新能源,预计可为新能源的发展带来巨大的潜力。

### 1.3 负荷预测分析

传统负荷预测方法过于依赖历史数据或规律,当模型失配后会导致预测精度降低。为提高负荷预测的精确性,在考虑常见影响因素和传统方法的基础上,引入新型建模及分类方法:如网格化方法、分区分类预测法、LSTM法、考虑用户心理因素的方法、考虑新能源接入的方法等,通过与传统方法相结合使得预测精度不断提高。传统与现代EV充电负荷预测方法对比如图1所示。

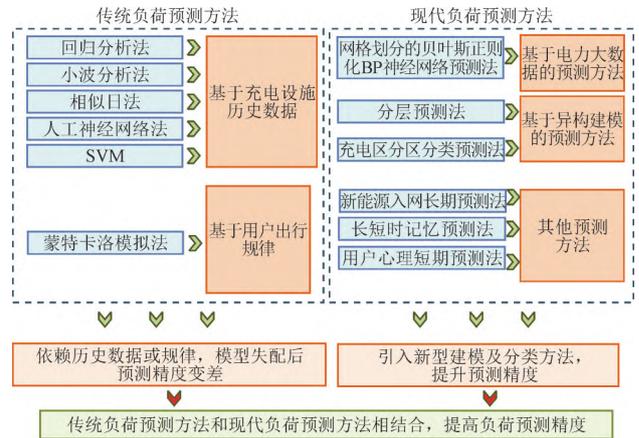


图1 传统与现代EV充电负荷预测方法对比  
Fig.1 Comparison of traditional and modern EV charging load forecasting methods

欧美国家的EV保有量较大、标准较统一、充电站历史负荷数据较完善,大多采用基于充电站历史数据的负荷预测法,在实际应用中取得了良好的预测精度。我国EV数量大、标准不统一,目前EV充电站还处于建立发展阶段,在实际工程中采用基于历史数据的负荷预测法难度较大,因此多采用基于用户行为的蒙特卡洛模拟法。目前国内外研究大多针对单一车型(私家车)、或单一类型充电区域(居民充电区)。由于不同车型充电行为特征不同,不同类型充电区域负荷特征不同,对不同车型、不同类型充电区域根据其特征分别采用不同的方法进行预测,可提高预测精度。此外,应充分考虑车主意愿、车主心理以及城市交通对车主充电行为造成的影响。由于EV电池具有良好的储能性和接纳过剩新能源的潜力,未来基于新能源、EV与电网的大数据交互预测方法将是负荷预测的重要方向。

## 2 EV与电网互动

### 2.1 有序充电

有序充电是电网能量向EV的单向流通,指在EV、EV用户、EV充电站和电网间建立信息互动平台,感知负荷变化趋势、预测负荷信息。通过分时计价、分区计价或其他策略动态引导、控制用户的充电行为。采用负荷高峰时提高电价、低谷时降低电价,达到优化电网负荷运行曲线、保障电网稳定运行、提高充电设施利用率的目标,为用户提供更加便捷、高效、优惠的充电服务。

马英姿等<sup>[23]</sup>提出一种基于博弈论、粒子群优化算法的有序充电策略,充分考虑电网侧收益和运行稳定性,仿真证明博弈均衡法比普通分时电价的

负荷方差降低约 10%、电网额外增益提高约 5.8 倍,验证了博弈均衡法的优势,但未考虑用户侧需求和收益。XU X 等<sup>[24]</sup>提出一种考虑用户充电意愿的有序充电策略,该策略充分考虑用户驾驶习惯、意愿指数及充电需求,将用户有序参与充电的意愿量化为意愿指数,结果表明:该策略可在传统有序充电的基础上进一步降低用户充电费用,使电网峰谷差降低,但未考虑电网公司的盈利情况。宋晓通等<sup>[25]</sup>提出一种考虑综合能源系统和 EV 交互影响的动态分时电价充电策略,以短期负荷水平为依据,以 1 h 为周期滚动更新充电费用,结果显示:动态分时电价引导下用户充电费用降低约 20%、综合能源系统运行成本降低约 10%,对电网负荷稳定性的优化效果显著。WANG W 等<sup>[26]</sup>在确保电网最大效益的同时重点提高 EV 车主满意度,构造广义主从博弈模型并证明了广义主从平衡点存在的唯一性,通过求解平衡点生成最优充电策略。张良等<sup>[27]</sup>提出一种基于粒子群优化算法的两阶段有序充电优化策略,弥补了传统实时电价法和分时电价法在负荷低谷时产生新负荷高峰的缺陷。WANG L 等<sup>[28]</sup>提出一种基于遗传算法的 EV 多目标有序充电交互网络模型,考虑变压器约束和用户需求约束,以用户花费最低、电网负荷方差最小、电网成本最低来制定收费标准,通过仿真验证了该策略的有效性。QIAN B 等<sup>[29]</sup>基于电力市场运营模式,充分考虑在电力市场激励条件下参与需求响应的车辆数,对价格补偿的成本及效益进行分析,提出价格补偿机制和两层优化充电模型,并通过实例仿真验证了该优化方法的有效性。

目前,参与我国充电桩建设的企业主要是国家电网有限公司和 EV 生产厂家。在有序充电相关研究中,国网公司重点考虑电网侧的利益,以电网公司收益和电网稳定运行为主要目标建立有序充电策略。EV 生产厂家为了提高 EV 销量会重点考虑用户端利益,以用户享受更优惠的充电费用和便捷的充电服务为主要目标建立相关策略。可持续发展的、稳定的有序充电策略应使电网、用户、发电厂 3 方共同受益<sup>[30-31]</sup>。

## 2.2 V2G

车辆到电网(Vehicle-to-Grid, V2G)是有序充电基础上的进一步扩展,车主不使用 EV 时,可将 EV 中储存的电能售卖给电网公司,V2G 旨在实现电网与 EV 间电能的相互流通,在有序充电作用的基础上还可帮助电网“削峰填谷”,帮助消纳新能源发电产生的过剩电能。

李怡然等<sup>[32]</sup>提出一种综合考虑用户和电网供需两侧利益及用户响应度的 V2G 策略,通过两个阶段对调度策略进行优化:第一阶段考虑电池充放电动态损耗成本和用户最低充电费用,制定出放电次数和深度优化的策略;第二阶段在第一阶段的基础上,考虑电网端削峰填谷的需求,并确保电网端平稳运行。仿真结果显示:与只考虑用户端最低充电费用的有序充电策略对比,平均放电功率下降约 30%,用户充电成本较低且电池损耗得到改善,随着用户响应度的提升,电网负荷峰谷差明显得到改善。该策略考虑用户响应度、电池损耗、电网稳定运行、用户收益等,相较其他 V2G 策略较为全面,若加上对电网侧收益的考虑将更加完善。LI X 等<sup>[33]</sup>分析了比亚迪、特斯拉、尼桑、荣威 4 大汽车品牌的 EV 车主、电网、发电厂 3 方参与 V2G 调峰的成本和收益,在车主的收益分析中充分考虑汽车成本和电池循环使用寿命,对比结果显示:发电厂的净利润总是最大的;当电网峰值电价是谷值电价 3 倍以上时车主可获得收益,且电池成本越低车主参与 V2G 调峰获得的收益越高;当负荷峰谷电价相差过大时,电网公司盈利为负;V2G 策略长久稳定的发展,必须制定公平合理的利润分配机制。LI S 等<sup>[34]</sup>提出一种增加电池使用寿命的双向 V2G 调度方法,采用雨流循环技术对电池老化指数进行量化,建立使电池老化指数最小和电网负荷波动最小的 V2G 充放电策略,仿真结果显示:该模型有效抑制了电池老化现象,但车主充电信息、电池状态的预测误差过大会影响模型的有效性,提高基础预测工作的准确性才能得到有效的电池抗老化 V2G 策略。

V2G 的实施过程中需要电池反复向电网充放电,对电池寿命造成很大影响<sup>[35]</sup>,导致用户放电所得收益不及电池老化带来的损失<sup>[36]</sup>。不仅如此,电网公司需花费大量资金建立智能化基础设施,加大了建设成本。目前各种延缓电池老化的 V2G 策略以及对 V2G 电池老化带来的损失和收益的综合评估研究不断提出,一致得出结论:在适当的调控策略下,参与 V2G 带来的收益大于反复充放电造成电池老化带来的损失<sup>[37-38]</sup>。但 V2G 实施中的电池老化、投资成本过大、各方收益机制公平与否仍是目前重点需要解决的问题。未来,电池技术的进步和电池成本的降低可减缓电池老化带来的损失,可进一步提升参与 V2G 用户的收益,促进 V2G 的推广和普及。

## 2.3 有序充电与 V2G 对比

有序充电为能量单向流通,在满足 EV 充电需

求的同时,利用峰谷电价差、分时电价等措施引导EV车主调整充电时间,帮助电网削峰填谷。V2G为能量双向流通,当电网负荷过低时通过向车主支付电费引导车主把EV中储存的电能反向传输给电网,当电网负荷过高时通过降低电价引导用户充电,最终帮助电网实现调峰、调频、促进新能源消纳的目的。

长期来看,V2G相比有序充电具有更大的电量调节规模,可加入更加多元的电力市场商业模式中,车主和充电桩运营商的盈利也要更大。但由于电池成本高、充放电对电池损耗大等因素,目前V2G大规模推广的可行性不如有序充电。

### 3 应用实例

近年来国内外有关EV与电网互动的项目开展较多,本文挑选具有代表意义的几个应用实例予以介绍。

#### 3.1 V2G和换电站试点项目

2017年以来,我国开始陆续进行V2G的试点应用。2019年,上海市进行了3次V2G试点项目,各项指标均按国家标准实施<sup>[39]</sup>。国网上海市电力公司、国网电动汽车服务有限公司、星星充电、蔚来集团等多家企业均参与其中。项目设立了参与“削峰填谷”响应的补偿激励措施,试点结果显示:私人充电桩、专用充电桩以及换电站3类的响应效果存在较大差异:(1)私人充电桩在价格激励下日负荷明显升高,响应率为5.3%,价格激励制度效果明显,假设每年参与响应频次为3~10次,则单桩年收益为42~140元之间。假设每年5次响应全部用于新能源消纳且每次3h,则单桩每年消纳新能源达 $1.05 \times 10^6$  kWh;(2)专用充电桩响应补偿和响应率较高,响应率为75%,假设每年参与响应频次为3~10次,则年补偿收益为70~235元之间,据上海目前专用充电桩数量和响应率预测,1年专用桩总削峰容量达 $2.1 \times 10^5$  kW;(3)换电站响应率为81.2%,是3者中最高的,且电价补偿远高于前2种,假设每年参与响应频次为3~10次,单站年均收益为2300~5000元之间<sup>[40]</sup>。3类充电设施参与V2G响应效益对比如表1所示。

由表1可知,在V2G策略调控下,3类充电设施均有收益,能够满足日内调峰需求,实现“削峰填谷”保证电网的稳定运行。私人充电桩数量多、响

表1 3类充电设施参与V2G响应效益对比

Table 1 Benefit comparison of three types of charging facilities participating in V2G response

参数	私人桩	专用桩	换电站
响应率/%	5.3	75	81.2
响应次数/年	3~10	3~10	310
单桩年均收益/元	42~140	70~235	1500~5000
资源潜力	数量高	响应率高	有限
日内调峰可行性分析	可行	可行	可行

应潜力大,缺点是本次响应率最低,需推动个人用户积极参与响应;专用桩响应率较高,具有综合集中协调的优势,缺点是响应潜力有限;换电站响应率最高,缺点是电池数量有限、响应潜力小,需提高协调能力可提升其响应能力。

上海的试点项目规模较小,更偏向于关注充电桩运营商本身的效益。但是该项目中没有规定EV和充电设施的参与条件及响应时长,不论其响应时间长短,只要有响应量就归入参与响应类,所统计的响应率精度有待商榷。后续可通过设定响应时长门槛(如接入充放电时长达半小时以上才算参与响应)进一步提高响应率精度。不同电价补偿机制对用户的参与积极性影响不同,该项目中的电价补偿只取了对应补偿机制的最大值,并没有体现出不同电价补偿对V2G的影响。

#### 3.2 分时租赁项目

由于EV续航里程不足和充电桩较少的问题尚未解决,导致消费者对购买EV积极性较低。在EV推广前期,公交车、出租车等公共交通和基于分时租赁的共享汽车将成为EV消纳和推广的重要方式<sup>[41]</sup>。重庆是典型的山地城市,近年来汽车以及共享汽车产业较发达。目前共享汽车均使用EV,共享汽车的有序充电通过分时租赁实现,根据不同用户租车时间段的不同,提前有序分配EV进行充电。分时租赁模式本质是有序充在商业模式上的表达,旨在达到用户使用便捷、电网负荷平稳、出租时间最大化、充电桩利用率最大化、充电桩建设投资最小化、租赁公司利润最大化的目的。

2015年12月,重庆市启动“山地城市电动汽车分时租赁模式及支撑技术与示范应用”项目。2016年10月,基于该项目的“E+租车”手机APP开始上线运营,该平台综合各EV租赁公司的车辆数、位置、充电情况等信息,实现实时路况显示、附近车辆位置显示、实时导航、租车、还车、扣款等服务。验收结果显示:截止2018年7月,该项目在重庆市建成49个充电站、5478个充电桩、1260个分租点、接入4939辆EV<sup>[42]</sup>。

在该项目中,国网重庆市电力公司、盼达出行、长安出行等 18 家企业共同成立了 EV 分时租赁联盟,旨在解决单个公司充电桩和覆盖范围有限等问题。该项目中,电网公司不仅是充电设施建设者,还是分时租赁平台的运营者,在充电桩有限的情况下,通过合理分配充电实现充电桩利用的最大化,为充电桩运营商节约了投资成本,为用户提供便捷的一站式租车服务。项目运营至今尚存在恶意损伤租赁汽车、充电用户身份认证困难、盗取车内设施或证件、乱停车、车辆检修不及时等问题,未来将在后续运营中着手解决。

### 3.3 促进过剩风能消纳项目

2017 年,NISSAN 汽车生产公司与 Tennet 电力系统运营商、The Mobility House 公司联合在德国的奥芬巴赫工厂进行了大规模的 EV 与电网互动试点项目,旨在利用 EV 电池的存储能力最大程度上消纳可再生能源风能<sup>[43]</sup>。

德国北部的新能源发电主要为可再生能源风力发电,2019 年风力发电约占总发电量的 46%,南部主要采用常规化石燃料发电。由于电网间能源存在运输障碍,当可再生能源发电分散地接入电网,就会存在能源过剩的情况。该项目将北部风力发电供给 EV 充电、南部充满电的 EV 能源回收至电网,通过取代部分南部发电量使得风力发电能源利用率提高。项目中充电桩采用最新的双向充电技术,单桩可承受高达 150 kW 的能量,可同时为 4 辆 EV 提供充电服务。数据显示,2017—2018 年间共减少 CO<sub>2</sub> 碳排放约 8×10<sup>6</sup> t,每年帮助消纳过剩风能大于 5 TWh<sup>[44]</sup>,此项目对节能减排和促进德国能源由不可再生向可再生转型具有重大意义。

目前德国由于天然气、石油等化石能源的短缺,导致节能减排压力巨大,对新能源的发展和利用需求迫切。EV 和 V2G 作为促进可再生能源发展、实现节能减排的重要举措,发展迅速且取得了可观的成果,市场体系目前已较为完善。为了推动包含“能效优先、可再生能源开发利用、跨领域耦合”3 大要素的能源结构转型,涵盖 EV 充放电体系、新能源发电系统及其它分布式电源的“能源互联网”将成为德国下一步发展的着力点。

## 4 总结与展望

近年来我国开展有序充电应用的实例较多,而 V2G 刚起步,具备放电功能的 EV 以及支持 V2G 的

充电桩数量较少,试点项目有限且大多依赖政府开展,尚未形成明确的商业模式。目前,国内实施有序充电的可行性高于 V2G,随着电池技术的突破和电池成本的降低,V2G 策略的优势将逐步显现。未来重点需要解决的问题和研究方向主要有以下几个方面:

1) 未来有序充电策略方面应考虑在电网、车主、充电站运营商 3 者之间建立合理的利益分配机制,并解决用户隐私保护问题,如匿名身份识别、支付保护、位置隐私保护等。

2) 解决 V2G 电池老化、电池成本高、智能充电桩建设成本高等问题。调动消费者参与 V2G 的积极性,为 V2G 的推行培育良好的发展环境。

3) 在碳达峰、碳中和的背景下,EV 普及程度会越来越高,EV 入网策略的研究和应用意义重大。EV 与电网间高度智能化、自动化的综合能源管理系统的加入将是 EV 入网策略未来发展的方向。

4) 目前我国充电桩保有量还相对不足,一些新型的辅助充电模式应运而生,如“移动补电车”模式、“自动充电机器人”模式等。以上新型充电模式暂未实现规模化应用,但随着 EV 发展规模壮大,类似辅助充电模式将不断进入市场,为用户提供更加全面、智能的充电服务。

5) EV 发展革命和新能源的利用都需要电网的参与。未来“微电网储能系统电动汽车充电站”可将新能源发电技术与 EV 充电结合起来,如以光伏系统为主的“光储充放一体化微电网系统”,可实现 EV 与新能源发电的互助协调发展,促进能源结构的转型,未来有很大的发展空间。

### 参考文献

- [1] SU J. Research on the impact of automobile exhaust on air pollution [C]. Atlantis: 2022 International Conference on Urban Planning and Regional Economy, 2022.
- [2] OBAID M, TOROK A, ORTEGA J. A comprehensive emissions model combining autonomous vehicles with park and ride and electric vehicle transportation policies[J]. Sustainability, 2021, 13 (9): 4653.
- [3] QIU Y Q, ZHOU P, SUN H C. Assessing the effectiveness of city-level electric vehicle policies in China[J]. Energy Policy, 2019, 130 (C): 22-31.
- [4] DULAU L I, BICA D. Effects of electric vehicles on power networks [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 46(1): 370-377.
- [5] FENG K D, ZHONG Y L, HONG B Z, et al. The impact of plug-in electric vehicles on distribution network[C]. Virtual: 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 2020.
- [6] 蔡黎, 张权文, 代妮娜, 等. 规模化电动汽车接入主动配电网研究进展综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 75-82.

- CAI Li, ZHANG Quanwen, DAI Nina, et al. Review on research progress of large-scale electric vehicle access to active distribution network [J]. Smart Power, 2021, 49(6): 75-82.
- [7] HONG T, XIE J, BLACK J. Global energy forecasting competition 2017: hierarchical probabilistic load forecasting[J]. International Journal of Forecasting, 2019, 35(4): 1389-1399.
- [8] HAMMAD M A, JEREB B, ROSI B, et al. Methods and models for electric load forecasting: a comprehensive review[J]. Logistics, Supply Chain, Sustainability and Global Challenges, 2020, 11(1): 51-76.
- [9] NTI I K, TEIMEH M, NYARKO-BOATENG O, et al. Electricity load forecasting: a systematic review[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2020, 7(1): 1-19.
- [10] DHAVAL B, DESHPANDE A. Short-term load forecasting with using multiple linear regression[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020, 10(4): 3911.
- [11] GHANAVATI A K, AFSHARINEJAD A, VAFAMAND N, et al. Short-term load forecasting based on wavelet approach[C]. Istanbul: 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2020.
- [12] 陈弘川, 蔡旭, 孙国歧, 等. 基于智能优化方法的相似日短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 121-127.  
CHEN Hongchuan, CAI Xu, SUN Guoqi, et al. Similar day short-term load forecasting based on intelligent optimization method[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 121-127.
- [13] ZHANG J, LIU C, GE L. Short-term load forecasting model of electric vehicle charging load based on MCCNN-TCN[J]. Energies, 2022, 15(7): 2633.
- [14] JHA N, PRASHAR D, RASHID M, et al. Electricity load forecasting and feature extraction in smart grid using neural networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 96(10): 7479.
- [15] 刘敦楠, 张悦, 彭晓峰, 等. 计及相似日与气象因素的电动汽车充电负荷聚类预测[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 43-49.  
LIU Dunnan, ZHANG Yue, PENG Xiaofeng, et al. Clustering prediction of electric vehicle charging load considering similar days and meteorological factors[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 43-49.
- [16] XU L, WANG B, CHENG M X, et al. Research on electric vehicle load forecasting based on travel data[J]. EDP Sciences, 2021, 257(1): 1017.
- [17] 袁小溪, 潘鸣宇, 段大鹏, 等. 基于网格划分的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 19-26.  
YUAN Xiaoxi, PAN Mingyu, DUAN Dapeng, et al. Prediction method of electric vehicle charging load based on grid division[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 19-26.
- [18] 张永. 电动汽车的充电负荷预测方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [19] BUZNA L, DE F P, FERRUZZI G, et al. An ensemble methodology for hierarchical probabilistic electric vehicle load forecasting at regular charging stations[J]. Applied Energy, 2021, 283(11): 6337.
- [20] ZHU J C, YANG Z L, MOURSHED M, et al. Electric vehicle charging load forecasting: a comparative study of deep learning approaches[J]. Energies, 2019, 12(14): 2692.
- [21] 龙雪梅, 杨军, 吴赋章, 等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 86-93.  
LONG Xuemei, YANG Jun, WU fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology[J]. Automation of Electric Power system, 2020, 44(14): 86-93.
- [22] 黄汉远, 顾丹珍, 郑德博. 远期大规模的电动汽车与分布式光伏接入配电网的负荷预测模型[J]. 可再生能源, 2021, 39(5): 650-657.
- HUANG Hanyuan, GU Danzhen, ZHENG Debo. The load forecasting model of long-term large-scale electric vehicle and distributed photovoltaic access distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(5): 650-657.
- [23] 马英姿, 马兆兴. 基于博弈算法的电动汽车有序充电优化及效益分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 10-16.  
MA yingzi, MA Zhaoxing. Optimization and benefit analysis of orderly charging of electric vehicles based on game algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 10-16.
- [24] XU X D, PENG M F, LI S J, et al. A personalized orderly charging strategy for electric vehicles considering users' needs[C]. Guangzhou: 2018 International Conference on Power System Technology, 2018.
- [25] 宋晓通, 吕倩楠, 孙艺, 等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3744-3756.  
SONG Xiaotong, LV Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3756.
- [26] WANG W, LI X, CHEN F. Study on orderly charging and discharging strategy of EVs with customer satisfaction[C]. Virtual: 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2020.
- [27] 张良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1837-1852.  
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1837-1852.
- [28] WANG L, WAN Y, CAO W, et al. Multi-objective orderly charging strategy for electric vehicles based on interactive network model[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(4): 519-525.
- [29] QIAN B, LUO X E, LIN X M, et al. User compensation mechanism and benefit analysis under orderly charging mode[C]. Chengdu: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020.
- [30] 周步祥, 刘治凡, 黄河, 等. 计及多种充电模式的电动汽车充电站有序充电双层优化策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 15-22.  
ZHOU Buxiang, LIU Zhifan, HUANG He, et al. A bi-layer optimal strategy for coordinated charging of electric vehicle charging station considering multiple charging modes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 15-22.
- [31] 张宏, 董海鹰, 陈钊, 等. 基于分时电价的风电-光伏-光热联合发电基地并网优化调度策略[J]. 电源学报, 2021, 97(5): 91-101.  
ZHANG Hong, DONG Haiying, CHEN Zhao, et al. Grid-connected optimal dispatching strategy for wind-photovoltaic-concentrating solar power combined power generation base based on time-of-use electricity price[J]. Journal of Power Supply, 2021, 97(5): 91-101.
- [32] 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.
- [33] LI X Z, TAN Y T, LIU X X, et al. A cost-benefit analysis of V2G electric vehicles supporting peak shaving in Shanghai[J].Electric Power Systems Research, 2020, 179(10): 6058.
- [34] LI S Q, LI J W, SU C, et al. Optimization of bi-directional V2G behavior with active battery anti-aging scheduling[J].IEEE Access, 2020, 8(11): 186-196.
- [35] THINGVAD A, CALEARO L, ANDERSEN P B, et al. Empirical capacity measurements of electric vehicles subject to battery degradation from V2G services[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(8): 7547-7557.
- [36] LEHTOLA T A, ZAHEDI A. Electric vehicle battery cell cycle aging in vehicle to grid operations: a review[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 9(1): 423-437.
- [37] 蔡黎, 高乐, 徐青山, 等. 电动汽车 V2G 关键技术研究及应用进展[J]. 电池, 2020, 50(1): 87-89.  
CAI Li, GAO Le, XU Qingshan, et al. Research and application progress in V2G key technology of electric vehicle[J]. Battery, 2020, 50(1): 87-89.
- [38] EBRAHIMI M, RASTEGAR M, MOHAMMADI M, et al. Stochastic charging optimization of V2G-capable PEVs: a comprehensive model for battery aging and customer service quality[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(3): 1026-1034.
- [39] 国家电网公司. 电动汽车充换电网络运营监控系统通信规约: Q/GDW 11177.1-2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [40] 张永伟, 朱晋, 熊英, 等. 电动汽车与电网互动的商业前景—上海市需求响应试点案例研究报告白皮书[R]. 上海: 自然资源保护协会, 2020.
- [41] 白麟, 刘欣. “山地城市电动汽车分时租赁模式及支撑技术与示范应用”通过验收[N]. 重庆日报, 2018-7-27.
- [42] CARLEY S, SIDDIKI S, NICHOLSON C S. Evolution of plug-in electric vehicle demand: assessing consumer perceptions and intent to purchase over time[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 70(1): 94-111.
- [43] ROEDER S. The car as an energy storage system[J]. ATZ Worldwide, 2021, 123(3): 8-13.
- [44] ELSHURAFALI A M, FARAG H M, HOBBS D A. Blind spots in energy transition policy: case studies from Germany and USA[J]. Energy Reports, 2019, 5(1): 20-28.

(责任编辑 李 萌)

收稿日期: 2022-02-03; 修改日期: 2022-07-05

作者简介: 蔡黎(1981), 男, 重庆人, 硕士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车。

(上接第95页)

- XING Rui. Electricity market transaction analysis under the background of electricity market liberalization[J]. Small and medium-sized enterprise management and technology (mid-term), 2021, 30(7): 169-170.
- [16] 黄海煜, 熊华强, 江保锋, 等. 区域电网省间调峰辅助服务交易机制研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 119-124.  
HUANG Haiyu, XIONG Huaqiang, JIANG Baofeng, et al. Research on inter-provincial peak shaving auxiliary service trading mechanism of regional power grid[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 119-124.
- [17] 向恩民, 潘虹锦, 钟鑫, 等. 考虑内部多地区间交互协作的复杂省级电力市场交易优化决策[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 59-66.  
XIANG Enmin, PAN Hongjin, ZHONG Lei, et al. Transaction optimization decision of complex provincial electricity market considering internal multi-regional interaction and cooperation[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 59-66.
- [18] 舒畅, 钟海旺, 夏清, 等. 约束条件弹性化的月度电力市场机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 587-595.  
SHU Chang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Design of monthly electricity market mechanism with elastic constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 587-595.
- [19] ZHOU M, ZHAI J, LI G, et al. Distributed dispatch approach for bulk AC/DC hybrid systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 3325-3336.
- [20] BAHRAMI S, WONG V W S. Security-constrained unit commitment for AC-DC grids with generation and load uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 2717-2732.
- [21] 胡晨旭, 关立, 罗治强, 等. 跨区域省间富余可再生能源现货交易优化出清模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 110-116.  
HU Chenxu, GUAN Li, LUO Zhiqiang, et al. Cross-regional inter-provincial rich renewable energy spot trading optimization clearing model[J]. Power System Automation, 2021, 45(13): 110-116.
- [22] 程海花, 郑亚先, 耿建, 等. 基于拓展网络流方法的跨区跨省交易路径优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 129-134.  
CHENG Haihua, ZHENG Yaxian, GENG Jian, et al. Transregional and provincial transaction path optimization based on extended network flow method[J]. Power System Automation, 2016, 40(9): 129-134.
- [23] 张显, 周鑫, 耿建, 等. 基于网络流的发输电计划协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 55-60.  
ZHANG Xian, ZHOU Xin, GENG Jian, et al. Coordinated optimization method of generation and transmission plan based on network flow[J]. Power System Automation, 2013, 37(19): 55-60.
- [24] 郑亚先, 程海花, 杨争林, 等. 计及清洁能源的跨区跨省交易路径优化建模与算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 112-119.  
ZHENG Yaxian, CHENG Haihua, YANG Zhenglin, et al. Modeling and algorithm for cross-regional and cross-provincial transaction path optimization considering clean energy[J]. Power System Automation, 2017, 41(24): 112-119.
- [25] 罗治强, 姚寅, 董时萌, 等. 基于图论网络流算法的新能源跨区域交易路径输电定价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 130-136.  
LUO Zhiqiang, YAO Yin, DONG Shimeng, et al. Transmission pricing strategy of new energy cross-regional transaction path based on graph theory network flow algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 130-136.

(责任编辑 徐秋芳)

收稿日期: 2021-10-17; 修改日期: 2022-06-13

作者简介: 朱军飞(1972), 男, 湖南永州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定控制和电力市场研究工作。