

国内外车网互动试点成效分析与发展建议

赵 轩,张元星,李 斌,刁晓虹,李涛永,蒋林洳,张 晶

(中国电力科学研究院有限公司 北京市电动汽车充换电工程技术中心,北京 100192)

摘要:规模化电动汽车与电网双向有序互动可为电网提供多元化辅助服务、平抑新能源出力与负荷波动,同时电动汽车用户可节省充电成本,并通过向电网提供辅助服务获得收益。介绍了电动汽车与电网双向智能互动的基本概念和发展情况,阐释了电动汽车与电网互动(简称为“车网互动”)的典型应用场景、能量优化管理策略和通信协议标准现状,并针对典型示范项目分析了国内外车网互动的技术思路 and 主要结论及成效,对比总结了国内外示范项目的特点、经验和局限性。结合我国相关产业与技术发展趋势,针对目前国内试点项目的局限性,从理论研究、商业模式、市场机制等方面给出了我国车网互动技术未来发展的建议。

关键词:电动汽车;车网互动;辅助服务;智能电网;调频;新能源消纳

中图分类号:U 491.8

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208017

0 引言

2022年4月,国家能源局和科学技术部联合印发了《“十四五”能源领域科技创新规划》,提出要推进电动汽车与智能电网之间能量和信息的双向互动,发展电动汽车及其网联技术等低碳交通技术,推动能源、交通、信息三大基础设施网络的互联互通、融合发展,鼓励电动汽车等用户侧储能参与电力系统的调峰、调频。根据我国充电联盟的数据统计,截至2022年1月,全国充电基础设施累计数量为273.1万台,同比增长了59.1%,1月份充电基础设施增量为11.4万台^[1],之后新能源汽车和充电基础设施继续爆发式增长。电动汽车作为用户侧的灵活可调资源,兼具储荷双重属性,规模化电动汽车与电网双向智能互动的发展潜力巨大。在新型电力系统“双高”“双峰”的形势下,研究电动汽车与电网的能量双向交互,促进电网削峰填谷和清洁能源消纳,实现电动汽车与能源互联网的融合发展,对于保障电网安全稳定运行、优化能源结构具有重要的意义。

新能源汽车充电负荷的快速增长对电网造成了严重的冲击,车主的出行和充电行为具有高度随机性特征,无序充电负荷与原有用电负荷叠加,加剧了配电网负荷峰谷差较大的问题。世界资源协会的调研报告指出,北京市电动汽车充电负荷与居民用电负荷的同时率高达85%,当私家车电动化渗透率超过50%时,大多数配电网变压器都会面临过载风险^[2]。已有配电网线路增容困难,改造投资大,通过

电动汽车与电网的双向有序互动参与电网调峰、调频等辅助服务,已成为平抑配电网负荷波动、促进新型电力系统发展的重要手段。在前期技术积累的基础上,电网公司、充电设施运营商和车企联合开展了一系列电动汽车与电网互动(VGI)试点示范工程,对电动汽车参与电网各类型辅助服务的控制技术、通信协议、商业模式等进行了验证,为电动汽车与电网双向智能互动的推广应用积累了宝贵的经验。

本文系统地分析了国内外VGI典型应用场景、能量优化管理策略、通信协议标准的现状,研究了国内外VGI典型试点示范项目的技术思路 and 主要成效;在此基础上,对比分析了国内外VGI示范项目的特点、经验和局限性,并从理论研究、商业模式、市场机制等方面给出了我国VGI技术未来发展的建议。

1 VGI技术概述

1.1 VGI的基本概念与历史发展

VGI技术的发展经历了单向无序充电、单向有序充电(V1G)、双向有序充放电(V2G)这3个阶段。V2G是指能量和信息通过充放电设施,在电动汽车和电网之间进行双向有序动态交互^[3-5]。除了与大电网交互外,VGI通常还包含电动汽车向楼宇放电(V2B)以及电动汽车向住宅放电(V2H)。1997年Kempton教授及其研究团队首先开始对VGI和V2G技术进行探索^[6],证明了电动汽车可以为电力系统提供功率平衡、绿电消纳等服务;2005年,其团队初步分析了V2G技术的经济性、初步控制策略和整体架构;2007年,其团队合作研发了1辆支持放电并网的电动汽车,该车接入电网后接受控制命令实现了V2G功能^[7-8]。上述一系列研究证明了电动汽车只需进行简单的技术更新,就可向电网提供双向充放电服务。在之后的近15年内,世界各地的研究团队

收稿日期:2022-05-23;修回日期:2022-08-01

在线出版日期:2022-08-19

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5400-202211163A-1-1-ZN)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(5400-202211163A-1-1-ZN)

基于不同的侧重点开展了一系列的相关技术研究和试点工程应用,对 V2G 提供频率响应(FR)、削峰填谷等电网调控服务以及用户收益机制等方面进行了细化研究和示范验证,取得了一系列的成果,成功推动了双向 VGI 技术从概念走向落地应用。VGI 的典型技术架构如图 1 所示。

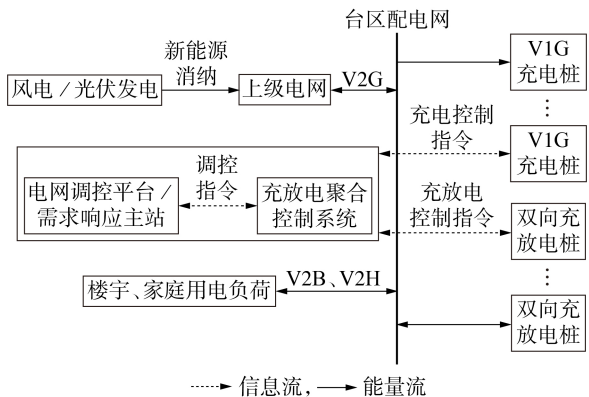


图1 VGI的典型技术架构

Fig.1 Typical technical architecture of VGI

我国也已经开展了较多的VGI示范项目。首先从有序充电开始,我国第一个规模化电动汽车有序充电示范工程——郑州世纪家园示范站于2018年7月建成投运^[9];随后,北京、南京、上海、广州等地均开展了居民区有序充电站的推广建设,并取得了良好的示范效果。2021年4月,我国最大的工业园区V2G商业化示范站在保定长城工业园区建成投运^[10],电动汽车通过负荷聚合商或虚拟电厂参与电力需求响应和电网辅助服务,既可以平抑新能源及用电负荷波动,也可以为车主增加额外的收益。V2G的推广应用需要电动汽车及其用户、充放电设施、充电聚合商(运营商)、虚拟电厂、需求响应管理中心、电网调度机构、电力交易中心等多主体之间具备完整的互动模式、标准体系、交易机制、补贴政策,其规模化、常态化参与各类互动市场的运行还需要

各方的共同努力。

1.2 VGI的典型应用场景和能量优化管理策略

目前,国内外VGI的应用主要集中在峰谷价差套利、为电网提供调峰服务、为电网提供调频服务这3类场景。峰谷价差套利是一种用户自发地根据电价波动来赚取充放电差价的行为,其目标为收益最大化;为电网提供调峰、调频服务则是为了满足电网的运行需求,其目标为保证电网负荷和频率运行在稳定的范围内,用户也会因此得到奖励或补贴,但在充放电策略上存在较大的区别。除此之外,少数国外VGI试点工程也对备用服务、电压控制(VC)、阻塞管理(CM)、应急电源等应用场景进行了初步探索。VGI的典型应用场景、优化目标和约束条件如图2所示。由图可以看出,大部分优化控制策略都会兼顾所列各种约束条件,因此针对典型应用场景及其对应的能量优化管理策略进行总结分析如下。

1)调峰服务应用场景。

电动汽车参与电网调峰是通过改变其在负荷侧的充放电功率,或在短时间内将负荷转变为电源来维持发用电平衡,响应速度较快,且可以减少发电机组的调峰成本。参与调峰控制的总体目标是降低电网一段时间内的负荷峰谷差,电网根据需求制定并下发目标功率曲线,电动汽车聚合商一般以实际充放电功率与计划充放电功率相差最小作为主要的优化目标,以充放电功率、电池容量、荷电状态(SOC)上下限、可用时间等作为约束条件,制定相应的充放电策略^[11]。常用的求解算法包括矢量粒子群优化算法、动态规划算法、遗传算法、内点法等^[12]。

2)调频服务应用场景。

电力系统调频对响应时间的要求较高,通常为秒级到分钟级,电动汽车充放电参与电网调频具有双向调节、响应速度快、储备裕度小等优点。当参与电网一次调频时,电动汽车聚合商接收调频调度指令,根据下辖充电站的可调资源情况下发控制策

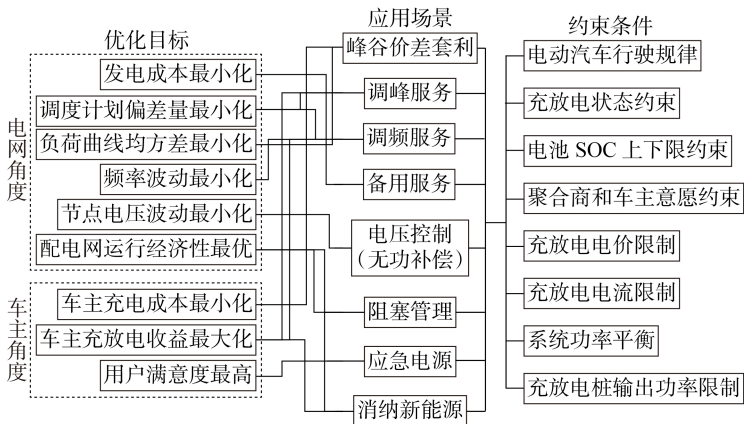


图2 VGI的典型应用场景、优化目标和约束条件

Fig.2 Typical application scenarios,optimization objectives and constraints of VGI

略^[13]。当参与电网二次调频时,电动汽车主要与发电机组配合,聚合商以收到的自动发电控制(AGC)指令为基础,以区域控制偏差量最小为目标,计算并将调频任务下发至各充电站,从而减少发电机组的调频损耗,节省调频成本^[14-15]。

3) 峰谷价差套利应用场景。

峰谷价差套利是指车主在电价较低时充电,在电价较高时放电,即使不考虑额外的放电补贴,车主也能够利用电价差节约充电成本。该应用场景的重点在于制定合理的电价梯度来吸引用户,并在此基础上以收益最大或成本最低为目标制定充放电策略,使车主获得套利的同时,电网也能获得削峰填谷、平抑负荷波动的调控效果^[16]。

4) 备用服务应用场景。

电动汽车提供备用服务是指在电力系统发电与负荷之间存在较大的偏差时,上调充电功率以参加上调备用市场,放电或下调充电功率以参加下调备用市场,且通常要求参与主体提前制定充放电策略,并上报备用可调容量,目前的策略大多以聚合商收益最大为目标^[17]。备用市场对响应时间的要求较为宽松,通常为分钟至小时级。由于电动汽车放电更接近负荷点,其提供备用服务比远距离发电机组更能及时解决发用电不平衡问题;而且传统备用服务大多由高能耗、高排放的小型火电机组提供,电动汽车提供备用服务不但能减少发电投资,而且更为清洁环保^[18]。

5) 其他应用场景。

电动汽车提供电压控制辅助服务是指通过调整电动汽车充放电向系统注入或从系统吸收无功功率,当电压过低时降低充电功率或向电网放电,以维持系统的电压在允许的范围内。电动汽车参与电力市场阻塞管理是指根据电力市场制定的交易计划和最优调度策略,控制电动汽车的充电负荷,避免电网区域联络线路出现容量越限问题,提高系统的短期运行可靠性。电动汽车的移动储能特性能够在停电或电源短缺时向用电设备甚至小范围微电网提供应急电源。电压控制、阻塞管理、应急电源这3种应用场景在目前的国内外VGI示范应用中较为少见,故本文不再详述其能量优化管理策略。

1.3 VGI的通信协议标准

国外VGI的通信协议已经建立了相对完备的标准体系。在电动汽车的电池管理系统和充放电设施之间的通信协议方面,有国际标准化组织(ISO)和日本电动汽车快速充电器协会(CHAdeMO)这2个具有代表性的标准系列。ISO系列标准主要对传导充电、无线充电等车桩之间的双向互动用例、高级通信协议、协议一致性测试要求进行了规范;CHAdeMO

标准则是目前唯一可将双向供电技术用于实际工程的国际标准,但仅面向会员单位开放使用,其开放性和兼容性有待进一步提升^[19]。在充放电设施/场站和聚合商、运营商、综合能源管理系统、电网调控平台之间的通信协议方面,IEC 63110、IEC 63380、IEC 61850-7-420、IEC 61850-90-8、SAE J2836-3、J2847-3、OCPP(Open Charge Point Protocol)、OpenADR(Open Automated Demand Response communication specification)等标准针对不同的VGI场景进行了描述,其中OpenADR已被纳入IEC标准,推广前景较好;OCPP对外免费公开,开放性较好^[20]。

我国的VGI标准暂未形成完整的体系。在车桩之间的通信协议方面:目前已开展的有序充电和V2G试点均是在GB/T 27930—2015的基础上进行修改和升级,从而实现充放电控制功能;正在修订中的大功率Chaoji充电系统协议具有良好的兼容性,已经考虑了电动汽车放电的交互流程。在充放电桩与上级平台之间的通信协议方面:NB/T 33029—2018、DB31/T 1296—2021、T/CEC 239.7—2019分别明确了电动汽车充放电参与新能源消纳和需求响应的功能及信息模型^[21-23];正在编制的《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列电力行业标准对可调节负荷并网的数据模型和接口协议进行了规范,发布后有助于实际工程应用中数据传输的常态化和标准化^[24]。

2 国外VGI的示范应用

根据V2G-hub网站的统计,截至2022年3月,由世界各地政府、车辆制造商、充电设备制造商、输配电运营商、新技术公司、高校及科研机构发起了100多个VGI示范项目^[25-26]。除了V1G,欧美国家的示范项目大多对电动汽车向电网放电以提供调频、备用、消纳新能源等服务的能力进行了技术与商业模式上的验证;而亚洲国家则更多地是对V2B或V2H进行验证,且其中日本最具代表性。国内外VGI场景或服务的分类有所差别,具体如表1所示。

表1 国内外VGI场景或服务的分类

Table 1 Classification of domestic and foreign VGI scenarios or services

国外应用场景或服务	国内应用场景
快速频率响应	调频
动态遏制调频(DC)	
备用服务	备用
电压控制	调峰
阻塞管理	
配电网服务(DS)	峰谷价差套利
充电时间转移(TS)	
峰谷价差套利(A)	应急电源
应急电源	

总体而言,V2G在增强电网灵活性和可靠性方面的潜力巨大,但其商业化推广需要更大规模的市场平台以及更成熟的动力电池和能量转换设备技术加以支撑。近10年来,部分国外VGI示范项目的的相关信息见附录A表A1,以下选取部分典型的试点案例,以能量管控策略、通信协议为主要关注点,分别对试点内容及其成效进行总结分析。

2.1 美国PJM试点项目

PJM是最早进行V2G探索的电力系统运营商之一,2007年其与特拉华大学合作,验证了电动汽车响应电网调控信号的能力以及电动汽车作为移动储能为电网提供服务的可行性,开启了V2G示范项目的先河^[27]。在商业模式方面,研究了车主充电行为与电价信号之间的互动效应,利用动态零售电价信号引导电动汽车的充电行为,响应频率调节需求,车主通过峰谷电价差套利以节省充电成本,单辆电动汽车每月可获利\$100左右。在消纳新能源方面,PJM与通用汽车和OnStar公司合作验证了根据可再生能源出力制定充电计划的有序充电调控策略,OnStar作为聚合运营商,通过比较PJM调控区域的实时风电出力与负荷状况,为雪佛兰车队制定了面向绿电消纳的有序充电计划。风电出力的高峰时段通常为22:00至次日06:00,该时段恰好为低谷电价时段,此时电动汽车充电可在促进新能源消纳的同时降低车主的充电成本。

2.2 英国VIGIL项目

VIGIL(VehIcle to Grid Intelligent controL)项目(2018—2020年)开发了英国第一个V2G综合管理控制平台,形成了一系列相关的软硬件成果,并且阿斯顿大学校园内的2处示范点部署验证了该平台。该平台在考虑楼宇和电动汽车用户需求以及电网限制条件下,实时监控电动汽车的充放电行为,管理楼宇能源的分配情况,实现了对平台内每辆电动汽车充放电时间、方式和速率的全面控制。基于对电动汽车数量快速增长带来的区域变电站过载问题的研究,Nortech公司开发了主动网络控制器,用于监测本地变电站的电压水平和可用容量,保证电网在规定的限制条件下工作,同时可识别动态余量并通知VIGIL平台向配电网运营商提供灵活服务。Grid Edge公司为VIGIL平台提供了分布式能源资产的优化控制方法,允许所有站点根据自身需求调整运行状态并向配电网提供服务,同时确保配电变压器不越限运行,提升配电容量利用率。ByteSnap Design公司开发了一款智能充电桩通信控制器,并将其整合至阿斯顿大学校园的V2G单元中,可通过OCPP 2.0通信协议实现楼宇管理系统直接对V2G单元进行远程和本地控制。阿斯顿大学使用来自监测系统的真实数据,研究了V2G对动力电池性能退

化和电网电能质量的影响^[28]。

2.3 英国Sciurus项目

Sciurus项目(2018—2021年)是当时世界上最大的家用V2G试点项目。该项目在英国的325个家庭中配备了壁挂式家用V2G充电桩和用于监控充放电电量、设置充电启动时间和电池SOC范围、在用户临时用车时提高充电速度的手机应用软件(APP),智慧能源平台实时监控用户需求和电力辅助服务市场,并制定最优充放电计划^[29-30]。该项目对用户家庭私桩参与V2G的技术方案和商业潜力进行了探索,验证了住宅场景V2G提供频率响应、动态遏制调频等辅助服务的潜力,并重点研究了不同服务模式下的价格激励和用户收益,具体包括如下内容。①多种价格激励机制的结合。车主可以从峰谷价差套利、提供电力辅助服务和最大化消纳台区光伏发电3种渠道获取收益,单台车桩参与V2G服务的年平均收益达340£。②不同渠道的收益比较。V1G能给用户带来大约120£的年收益,在此基础上,调频响应服务可将单车年收益提高至513£,而动态遏制调频服务的单车年收益最大可达725£,但目前V2G参与动态遏制调频服务还面临很多挑战,无法规模化推广。③电池容量的差异性。相较于电池容量小的电动汽车,电池容量超过40kW·h的车辆参与V2G能够多获得近20%的年收益,不同车辆之间的收益差距可能来源于小容量电池的损耗折算。

2.4 丹麦Parker项目

Parker项目(2016—2018年)是全球首个V2G商业化示范项目,围绕电网辅助服务、通信协议测试和技术推广性3个维度开展研究,并公开了详细的研究成果,对世界各地V2G技术的发展及试点推广起到了引领作用^[31]。

在电力辅助服务方面,该项目全面总结了V2G技术未来可能向大电网、台区配电网和楼宇配电变压器提供的辅助服务,具体包括功率平衡、稳压、调频、平移负荷峰谷、提供备用电源、就地电能交易、消纳分布式能源等,并主要针对丹麦需求最大的调频辅助服务进行了深入研究,证明了参与V2G的车辆和充电桩在技术层面已经足够成熟,可提供几乎所有类型的调频服务。在某公共充电站为期2a的实验中,电动货车单车向电网提供调频服务的时长达13000h,年收益为1860€,已成为较为成熟的商业模式。但通过研究负荷曲线可发现,V2G参与调频提高了线路的最大负载率,也增加了负荷波动^[32]。由于该项目所在实验场所的变压器强度高、线路短,负荷波动没有造成电网末端电压越限,但未来大规模V2G给电网安全带来的影响还需进一步研究。

在通信协议测试方面,该项目从可控性、可测性、性能参数3个维度梳理了参与电网辅助服务的车、桩设备需要具备的能力,量化了7个描述车桩互动信息交互能力的指标,分别为双向能流性、响应时间、上升爬坡速率、下降爬坡速率、响应准确度、调控颗粒度、调控精度,并指出目前的V2G通信协议没有完全涵盖应有的信息。项目测试结果表明,车桩互动性能主要取决于电力电子元器件的设计、控制软件 and 使用的通信协议。在CHAdeMO协议的实验条件下,远程控制带来的通信延迟约为3 s,本地硬件的响应时间约为4 s,爬坡速率平均可以达到3.3 kW/s,所以达到5 kW调控容量的总响应时间约为8.6 s^[31]。在该实验环境下,调控精度满足需求,但响应准确度超过了当地标准要求的 $\pm 5\%$ 限值,未来可以通过智慧聚合控制来提高电力电子元器件的响应准确度。实验测试还揭示了V2G通信协议存在的问题,国际现行的相关通信协议标准均或多或少地缺少对关键信息的规定,导致车桩间放电通信协议无法通用,从而影响车桩放电控制的准确性和可靠性,制约V2G技术的推广和发展。

在技术推广性方面,Parker在前期EDISON(Electric vehicles in a Distributed and Integrated market using Sustainable energy and Open Networks)等项目的基础上扩展了车型、数量、动力电池容量、辅助服务种类、持续时长、配电网区域等,对4种不同车型响应电网功率信号的情况进行了测试。整体而言,所有车型都能很好地遵循调控信号提供调频辅助服务,但不同车型提供的放电功率略有不同^[32]。这可能是由于车辆的额定工作状态点不同,且不同车辆提供服务时的电池SOC不同。

2.5 荷兰“CITY-ZEN”项目

荷兰V2G试点项目是阿姆斯特丹智能城市创新平台“CITY-ZEN”项目(2014—2019年)的一部分,其目标是展示V2G的应用,测试其对电网稳定性的支撑能力,探究V2G发展在政策和商业模式方面的阻碍,并对相关控制技术和响应能力进行实验,整合电动汽车电池和能源管理系统,使之能够灵活响应电网的高峰负荷需求。测试结果表明,V2G响应电网调控的时间与普通储能电池差异不大^[33],但由于该项目只有4台充电桩参与响应,在某些时段的可调容量储备不足。而且在当时的市场环境下,V2G的补贴激励政策不够,用户无法直接参与电能交易以获利。缺少成熟的配套政策和商业模式成为该项目推广应用的最大壁垒。

2.6 美国INVENT项目

INVENT项目(2017—2020年)在加州大学圣地亚哥分校部署了50台V2G充电桩,并将学校班车升级为支持V2G的电动巴士,以减少设施的维护成

本,提高清洁能源利用率。该项目的一大特色是将Nuvve公司的V2G优化控制平台与加州大学圣地亚哥分校的光伏发电预测系统和建筑能耗管理系统进行整合,一方面利用V2G实时响应建筑用电负荷变化,向校内微电网提供削峰填谷、频率调节等服务,另一方面光伏发电预测系统根据光伏出力对充放电时间进行优化,在白天光伏出力多的时段充电进行就地消纳,在夜晚向微电网放电以提供清洁能源。该项目的局限性在于支持V2G的充放电桩数量很少,充放电优化控制策略与实际匹配性弱。对于V2G对电池性能的影响,该项目分析指出,放电确实会缩短车载电池的寿命,但这种危害远小于频繁刹车、加速等不良驾驶习惯导致的电池性能退化,且不同V2G服务对电池性能的影响不同,深度满循环充放电对电池损害较大,浅充浅放则损害很小^[34]。

2.7 德国 Re-dispatch 项目

Re-dispatch 试点项目的主要目标是验证电动汽车的可调潜力,即利用电动汽车电池作为移动储能,在需要时将其电能反馈到电网,从而减轻电网的压力,降低输配电维护成本。该项目对15辆电动汽车、V2G充电桩和部分V1G充电桩进行了测试,结果表明:上级电网根据需求向V2G聚合管理系统发送调控服务需求信号,系统实时不间断地向上级电网报告可用V2G资源,响应时间随区域负荷和可再生能源发电情况的变化而变化,从几秒到2 min不等。

2.8 日本V2H/V2G试点项目

自2011年日本东海岸发生地震以来,日本能源供应商和汽车行业一直在努力寻找降低能源风险的解决方案,最初的尝试更多地在于V2H和V2B。最具代表性的是2012年日产汽车开发的“LEAF to home”系统,其核心是尼吉康开发的电动汽车双向充电机,可以将动力电池的高压直流电转换为日本家庭使用的100 V交流电,且其采用CHAdeMO快充协议,补贴后的成本大约为33万JPY¥。该系统可以在停电或其他紧急情况下作为应急电源使用,也可以通过赚取峰谷电价差价为用户节省用电成本。此外,电动车辆供电系统委员会(EVPOSSA)和CHAdeMO先后推出的V2H指南也进一步促进了日本V2H/V2B的规模化发展^[35]。

在V2G方面,2018年,在日本经济产业省的补贴政策支持下,日本丰田、中部电力公司联合美国Nuvve公司申请并开展了2018年度虚拟电厂示范项目中的V2G部分,该项目最大的特点是融合了丰田公司园区内的电力供需控制模拟系统、V2G控制系统和工厂能源管理系统(FEMS)。20辆丰田普锐斯电动汽车通过车载双向充电机的智能接入模块接收控制系统指令,车主在手机应用软件上设置用车计划,在车辆停放期间提供V2G服务;电力供需控制

模拟系统模拟中部电力的供需控制命令,并在实车上进行测试;FEMS将工业园区内的电动汽车接入V2G控制系统,并根据供需控制指令和FEMS用户情况集中制定20辆电动汽车的充放电计划^[36]。源-网-荷系统耦合控制实现了台区配电网的功率平衡调控和可再生能源消纳,验证了V2G在能源管理效率提升和工业园区源-荷平衡控制中的积极作用。

3 国内VGI示范应用

国内在V2G试验验证及示范工程方面主要是由国家电网、南方电网公司组织车企、桩企、运营商联合开展的有序充电、电动汽车参与需求响应、源网荷储协同互动^[37-38]、虚拟电厂^[39-40]等示范项目。国内目前针对V1G的研究较丰富,而关于V2G的研究和试点应用尚处于起步阶段,与国外差距仍较大。近年来,国内VGI典型试点项目的基本信息见附录A表A2。下文主要从台区电动汽车有序充电、台区车网双向互动、电动汽车参与需求响应、电动汽车参与电网辅助服务这4个方面对国内VGI试点项目的特征及其成效进行分析。

3.1 台区电动汽车有序充电

台区电动汽车有序充电的典型示范项目包括国内首个规模化有序充电示范项目——郑州世纪家园示范项目、北京海淀西八里庄小区示范项目、广东深圳碧新路示范项目等。根据国家电网公司2019年发布的《泛在电力物联网白皮书2019》,电动汽车有序充电是指在配电网、用户、充电桩以及电动汽车之间进行充分的信息交互和分层控制,全面感知配电变压器的负荷变化趋势,动态调整充电时间和功率,优化配电变压器的负荷运行曲线,实现削峰填谷。电动汽车有序充电既能满足用户的充电需求,又可以提升配电网设备和发电设备的利用率,减少电网和发电设备的投资成本^[41]。

为了缓解大规模电动汽车并网充电带来的峰值负荷叠加、台区过载风险提高等问题,自2018年起,国内很多省级电网公司牵头开展了台区有序充电技术研究和示范工程建设。在硬件设备方面,将充电桩改造升级为功率可调的有序充电桩,并配置能源控制器和能源路由器;在控制策略方面,采取用户许可、电网调控的模式,车主可在手机应用软件上设置用车时间、充电电量等需求,有序充电主站实时监控台区配电变压器的负荷变化情况,在保证用户充电需求的前提下,制定并下发控制策略,动态调整充电功率,转移充电时间,达到移峰填谷的目标;在商业模式方面,引导电动汽车在用电或电价低谷时段充电,以降低用户的充电成本。

在示范场景方面,目前各地的有序充电项目大多以居民社区为场景,例如北京海淀西八里庄小区

示范项目^[42]等,住宅小区具有私人充电桩数量庞大、居民充电行为相对固定的特点,电动汽车的停车时间较长但实际充电时间较短,具有较高的调节潜力。同时,社区配电变压器的承载力往往有限,且老旧小区增容改造困难,电动汽车充电负荷与其他用电负荷的叠加现象显著,是示范推广有序充电的良好场景。以广东深圳碧新路示范项目^[43]为代表的公共站有序充电示范项目,大多采用有序直流快充桩,公共场站内车辆的停车时间较短,有序充电可调资源相对较少,大功率设施能够及时保证用户的出行充电需求。

国内电动汽车有序充电试点项目验证了VGI技术在居民区推广的可行性,存量充电桩的改造升级和增量有序充电桩的部署无需耗费过多的成本,就可达到削峰填谷、降低配电网扩容改造费用的目的。但目前的试点项目也存在一定的局限性,车主只能通过峰谷价差节省一定的充电成本,且出台居民峰谷电价政策的省市仍然较少,电动汽车在居民区有序充电的获利空间太小,导致用户的参与意愿不强。

3.2 台区车网双向互动

世界资源研究所对V2G给出了如下定义:在满足电动汽车充电需求的前提下,将电动汽车视作移动储能,当电网负荷或本地负荷过高时,由电动汽车向电网负荷或本地负荷馈电;当电网负荷或本地负荷过低时,可通过有序充电来调整负荷峰谷差^[2]。相较于V1G,V2G的推广在各个方面都面临着更大的挑战,包括双向信息流的通信协议、充放电设备双向能量变换结构等技术的研发以及更复杂的多目标优化调控策略等,除此之外,放电对电池造成的损耗一直是车主参与V2G的最大顾虑。开展试点示范工程,实测控制策略的有效性以及V2G对电池性能的影响,探索合适的商业模式,平衡各方利益的同时激发车主的参与意愿,能够进一步促进车网双向融合互动。

国内V2G试点项目近几年刚起步,目前主要由国网电动汽车公司发起,在商业楼宇和工业园区建设试点项目,大多与对应台区的综合能源管理系统相结合,同时作为源、荷参与调控。由于并网放电对配电网造成的影响尚处于研究阶段,大功率放电是否会给配电网带来冲击等问题尚不明晰,目前试点项目配装的双向充放电桩的功率较小,以20 kW左右为主,实际的放电功率需根据实际调控需求和电池的剩余容量确定。选取2个典型的V2G示范项目进行具体分析如下。

1) 北京人济大厦V2G示范项目。

该示范项目除了布置了电动汽车充放电桩外,还布置了一座2 MW·h的用户侧储能电站共同参与楼宇用电负荷调控。监控系统实时监控变压器负载

率、分时电价等信息,上级主站系统制定并下发充放电功率调节策略,平抑楼宇用电负荷曲线。车主通过手机应用软件设置车辆SOC上下限、用车时间、参与意愿等,赚取放电收益^[44]。由于国内尚无公开的车-桩-网双向充放电系统和通信协议标准,目前V2G试点项目普遍采用车企-桩企-平台聚合商联合定制私有通信协议的模式,该模式虽然便于前期试点开展,但极大地限制了技术推广,而且未来出台双向充放电设备和通信协议标准后也会造成改造升级问题。

2) 北京中再中心 V2G 示范项目。

北京中再中心 V2G 示范站是我国第一座商业化运营的 V2G 充电站,于 2020 年参与了华北调峰辅助服务市场。国网电动汽车公司的公务用车和员工私家车可在用电高峰时段内反向放电供给楼宇负荷,放电电价为 0.7 元/(kW·h)。国网电动汽车公司的统计数据显示,在远距离通勤员工“家充单位放”的场景下,车主 V2G 收益能够覆盖其充电成本。场站的充电峰谷价差约为 0.4 元/(kW·h),截至 2022 年初,共有 256 个车主参与智能充放电,累计降低 4 027 元充电成本,充放电量为 108 021 kW·h,累计所获充放电收益为 41 716 元^[45]。

3.3 电动汽车参与需求响应

1) 冀北虚拟电厂示范工程。

冀北虚拟电厂示范工程于 2019 年 12 月建成并投运,通过先进的用户侧智能计量控制终端、边缘智能网关、物联网云平台、5G 通信等技术,聚合分布式电源、分布式储能、可控负荷、充电桩等不同类型的分布式资源,参与了华北调峰辅助服务市场。上层管控平台负责负荷分析、潜力计算、聚合仿真、交易结算等,实现多个分布式能源的协调优化运行,以虚拟电厂的形式实时响应低谷时段的调峰需求,达到提高用户收益、减少传统电厂建设投资的目的。

该虚拟电厂示范工程一期实时接入与控制蓄热式电采暖、储能、电动汽车充电站、分布式光伏等 11 类分布式资源,容量约为 1.6×10^5 kW。在秦皇岛多类型资源综合试点工程中,电动汽车充电桩提供了 816 kW 的可调资源,占该试点工程可调资源总量的 1.25%^[46]。相较于蓄热电锅炉和大工业用户等规模大、可控性强的负荷,电动汽车的随机性和分散性特点给聚合控制带来了挑战,未来还需进一步开展充电可调潜力的精准预测、充放电实时控制策略的相关研究,更好地挖掘和利用电动汽车这一灵活储能资源。

2) 上海需求响应实践试点。

2014 年,上海市成为国家发展改革委指定的首个需求响应试点城市,近年来一直在积极探索负荷侧可调资源参与削峰填谷需求响应。2019 年,上海

市开展了 6 次试点活动,其中,在端午节开展的“填谷”需求响应试点中首次接入了电动汽车,参与方包括国网电动汽车公司、蔚来汽车、星星充电等,场站类型覆盖了私人充电桩、专用充电桩以及换电站,充电运营商的平台与虚拟电厂控制平台间采用了国际通用的 Open ADR 通信协议。对用户设置了直接经济激励,削峰响应补偿价格上限为 30 元/kW,填谷响应补偿价格上限为 12 元/kW。单个用户的响应次数不超过 10 次,响应时长不超过 10 h^[47]。试点结果表明:价格激励有较强的引导效果,填谷响应时段的平均充电负荷为平常的 7.8 倍;专用充电桩的充电行为集中可控,需求响应参与度明显高于私人充电桩;在电池配备充足的情况下,3 种类型场站中换电站的响应率最高^[48]。

3.4 电动汽车参与电网调峰和调频辅助服务

1) 参与华北电网调峰实践。

2019 年,根据华北能源监管局发布的《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场试点方案(征求意见稿)》,国网公司华北分部针对电动汽车参与电力调峰辅助服务市场进行了前期准备,包括打通电网调控系统和电动汽车聚合服务平台,实现单台充电桩的充电功率连续调控等。2020 年 4 月,国网公司华北分部在国内首次将电动汽车充电桩调节资源正式纳入华北电力调峰辅助服务市场并正式结算^[49],电动汽车参与电网实时调控和调峰辅助服务市场由单向充电拓展至充放电 2 种形态。

截至 2020 年 8 月,华北源网荷储调控平台共接入 2 618 座充/换电站,共计 27 018 台充电桩,电动汽车可调资源总量达 9.8×10^4 kW,储能等其他可控负荷资源总量约为 2.6×10^5 kW,为京津唐电网提供的最大调峰电力约为 4.0×10^4 kW,负荷侧资源累计获得调峰收益约为 268 万元^[50]。参与调峰辅助服务市场的电动汽车以公交车为主,其主要在凌晨和午后这 2 个用电低谷时段以大功率充电,将电网的调峰能力提升至原来的 3 倍,同时可以消纳低谷时段大发的光伏、风力绿电。从充电桩参与调峰辅助服务市场的典型日出清情况来看,经过辅助服务市场机制的引导,00:00—05:00 用电低谷时段的电动汽车充电功率明显大于基础负荷功率,发挥了移峰填谷的作用^[51],车主在为电网提供调峰服务的同时,也从调峰市场获得了收益。

2) 参与华东电网调频实践。

2021 年 9 月,华东电网的多类型可调节负荷资源首次完成了区域调频响应试验,华东源网荷储协控制平台的可调节负荷资源池实时跟踪电网的频率变化,当监测到电网频率跌破 49.95 Hz 时,资源池自动触发可调节负荷调频支援指令,根据当前生效策略实时计算华东省市的实际可用调节分量,并下

发控制指令给各省市的可调节负荷协调控制平台。电动汽车作为重要的可调节负荷资源参与了本次区域调频响应,累计响应功率为 1 452 kW。试验结果显示,在接到指令 2 min 后,安徽省的可调节负荷资源池内电动汽车充电功率下调 452 kW,8 min 后,浙江省的可调节负荷资源池内电动汽车充电功率下调 1 000 kW。本次区域调频响应试验期间系统频率最低降至 49.897 Hz,累计调用 2 510 kW 负荷侧资源,涉及电动汽车、中央空调、循环泵、风冷热泵、储能这 5 类可调节负荷^[52],实现了覆盖秒级至分钟级负荷侧资源对电网频率的调节响应。

4 分析与建议

4.1 国外 VGI 示范项目的成效经验

通过对上述国内外典型 VGI 示范项目的技术分析可知,欧美国家的 VGI 试点工程起步较早,成熟度较高,对国内 VGI 的发展具有借鉴意义。表 2 从参与主体、商业模式、运营策略 3 个方面总结了国外 VGI 示范项目的特点,具体分析如下。

1) 试验场景广泛多元。项目涉及公司园区、高校校园、家庭用户等具有 VGI 应用潜力的多种场景,不同场景中电动汽车的出行规律和充放电时空分布特性不同,项目验证的侧重点也不同。公司园区和高校校园场景中电动汽车的出行和停车规律相对固定,车辆的可调节潜力较高,且大多配备了园区/校园或楼宇一体化综合能源管理系统,便于将电动汽车与其他用电负荷和可再生能源发电系统进行协同控制,验证了 VGI 稳定台区配电网负荷波动、消纳可再生能源的能力。家庭 V2G 充电桩的配置提高了用户参与的灵活性,可在夜间用电低谷时段消纳风

力发电,达到双赢的目的。

2) 试点验证内容丰富。上文总结的 50 例国外 VGI 试点工程验证服务内容占比情况见附录 A 图 A1,涵盖了调峰、调频、备用、紧急电源(EB)等应用场景,价格机制和收益模式也更多元化。相较于其他 VGI 服务,调频服务对响应时间、准确度的要求更高,国内试点经验较少,而近 30% 的国外 VGI 试点工程已经对调频服务进行了研究,例如丹麦 Parker 项目对频率响应能力进行量化,验证了规模化电动汽车放电提供动态跟踪和快速频率升降响应的能力。除此之外,国外试点工程对电池退化、对电能质量的影响、通信协议兼容性等技术问题的研究也更为深入。

3) 与可再生能源结合紧密。随着分布式光伏等用户侧新能源发电渗透率不断提高,电力系统的不确定性进一步增强,电动汽车作为灵活的储荷资源,在新能源发电量较高时通过充电进行及时消纳,可以避免弃风弃光问题的发生,在新能源发电量较低时,又可以通过 V2G 向电网供给绿电,提高能源利用效率。国外新能源发电占比较高,VGI 示范项目中将台区可再生能源出力和其他电力负荷进行综合优化分析,制定同时满足电动汽车用户需求和绿电消纳的充放电计划,达到源-网-荷-储协调互补的效果。

4) 用户参与度高。用户认可可是 VGI 技术大范围推广的前提,为此研究人员对电动汽车的出行、泊车、充电行为进行刻画,从用户职业、车型、电池容量等角度进行特征分类,对不同类型的用户进行参与意愿调研,分析用户需求、调节潜力和用户对电池寿命衰减的顾虑,并据此选择合适的示范用户,精准制

表 2 国外 VGI 示范项目的特点分析

Table 2 Characteristic analysis of foreign VGI pilot projects

项目名称	参与主体	商业模式	运营策略
美国 PJM 试点项目	PJM、特拉华大学、Onstar、通用汽车	峰谷价差套利	以跟踪可再生能源发电为目标的有序充电策略
英国 VIGIL 项目	阿斯顿大学、Nortech、Grid Edge、ByteSnap Design	未重点研究	以提升配电变压器容量利用率为目标,动态监测节点电压水平,考虑楼宇负荷和配电变压器容量限制制定充放电策略
英国 Sciurus 项目	OVO Energy、Cenex、Nissan、Innovate UK 等	峰谷价差套利、调频辅助服务市场收益、消纳光伏的补贴	以用户充电成本最小为优化目标,聚合响应电网计划负荷曲线的充放电策略
丹麦 Parker 项目	丹麦技术大学、Nuvve、Nissan、Enel	调频辅助服务市场收益	以聚合商参与调频收益最大为目标,监测台区电网频率,按照计划频率曲线动态制定充放电策略
荷兰“CITY-ZEN”项目	Enervalis、NewMotion、Alliander 电网公司	未重点研究	以响应电网高峰负荷需求为目标的充放电策略
美国 INVENT 项目	加州大学圣地亚哥分校、Nuvve、BMW 等	未重点研究	以响应校园楼宇负荷变化和最大化消纳台区光伏发电为目标,制定削峰填谷和提供调频辅助服务的充放电策略
德国 Re-dispatch 项目	The Mobility House、Nissan、TenneT 输电公司	未重点研究	以降低配电网运行维护费用、跟踪台区负荷变化和可再生能源发电为目标的充放电策略
日本 V2H/V2G 试点项目	Nuvve、丰田汽车、日本中部电力公司	峰谷价差套利、辅助服务市场收益	以响应中部电力公司供需控制指令为目标,兼顾园区工业用户负荷的充放电策略

定价格激励机制以保证用户的收益,进一步激发普通电动汽车车主对于交通碳减排等能源环境战略目标的认可度。

4.2 国外VGI示范项目的局限性

1)硬件技术成熟度较低,推广成本较高。国外VGI示范项目起步较早,当时市场化的双向充放电桩和支持放电的电动汽车都很少,且价格高昂,双向充放电桩的成本远远超过普通充电桩成本。虽然双向充放电技术已经能够实现,但其性能还需进一步检验和提高,这也是很多国外示范项目关注充放电控制响应特性的重要原因之一。Nissan、丰田等日系车企在车辆供应商中占据了主导地位,除了丹麦Parker项目、美国INVENT项目之外的多数国外示范项目都没有考虑不同电动汽车车型对VGI适应性、稳定性的影响。

2)试点车桩和电网规模较小,成果适应性有待提高。在目前国外的VGI示范项目中,真正参与电网调峰、调频辅助服务的项目主要在包含100台左右充放电桩的台区/园区级电网进行小规模验证,例如丹麦Parker项目调频测试的电网范围局限在东丹麦DK2电网,参与的车桩数量只有50台,缺乏对大电网和跨城市/区域电网的互动支撑验证分析,其技术性结论和成果的可推广性仍存在一定的局限性。

4.3 国内VGI试点项目的成效经验

表3总结了国内近年来典型VGI试点项目的成效经验,具体分析如下。

1)电动汽车提供调峰、调频辅助服务的规模较大,成效较为显著。国内车桩基数大,可调资源总量丰富,通过聚合商的整合优化能够克服单车/单桩随机性高、功率小的弱点,产生与工商业用户相当的电网服务效果。在安徽、山东等地组织的需求响应

试点中,电动汽车的可调负荷规模都达到了兆瓦级别;参与华北电力调峰辅助服务市场的充电桩超过2万台,在夜间负荷低谷调峰最困难的02:00—05:00时段,某典型单站的调峰能力最大可达到0.61 MW,提供了可观的调峰电力^[53];参与华东电网调频辅助服务的单次试验中,系统频率最低降至49.897 Hz,参与调频的充电负荷规模超过1.4 MW,电动汽车等可调负荷对系统稳定性起到了显著的支撑作用。

2)居民小区充电、商业办公区放电是具有较大推广潜力的VGI示范应用场景。在阶梯电价的背景下,居民区私人充电桩的充电电价较低,商业办公区公共充电站的充电电价较高,通过合理制定电动汽车的充放电电价,车主能够通过V2G实现“零成本”出行(放电收益能抵消充电成本)。在不考虑放电对电池寿命衰减影响的基础上,以北京市某公共充电站和某代表性车型为例,居民区的阶梯电价为0.4883元/(kW·h),公共充电站的峰时段电价为1.6449元/(kW·h),在居民区充电、公共充电站放电的模式下,经估算可得当电动汽车的日行驶里程小于135 km时,可通过峰谷价差套利实现“零成本”出行。如果再考虑放电补贴收益,则“零成本”的实现更加容易。未来可以挖掘符合条件的车主先行示范推广,提升这部分车主对V2G的参与度和满意度,以此进一步带动社会公众对V2G的认可。

4.4 国内VGI试点项目的局限性

现有国内VGI试点项目已从不同的层面验证了有序充电和V2G技术的可行性及价值,但仍具有明显的局限性。

1)国内VGI试点项目已实现规模化或常态化的应用场景主要集中于台区有序充电、削峰填谷、参与调峰辅助服务等,参与调频辅助服务和绿电交易的试点项目相对较少,且主要以试验验证为主。相关

表3 国内VGI试点项目的特点分析

Table 3 Characteristic analysis of domestic VGI pilot projects

项目名称	示范场景	收益结算方式	成效经验
河南郑州世纪家园项目	居民区有序充电	峰谷价差套利	电动汽车在小区的停车时间长、充电时间短,充电负荷与其他用电负荷的叠加现象显著,是有序充电的良好应用场景
北京西八里庄小区项目	居民区智能有序充电	峰谷价差套利	充电高峰负荷由20:00转移至23:00至次日凌晨,负荷峰谷差降低了58%,变压器负载率降低了10%
深圳碧新路项目	公共站有序充电	峰谷价差套利	利用边缘计算物联网关技术,实时采集跟踪台区配电变压器的负载率和充电桩的运行功率
北京中再中心项目	公共充电站有序充电、V2B	峰谷价差套利、放电补贴收益	动力电池在正常质保的基础上,额外提供了1500次V2G循环质保,减少了车主对电池损耗的顾虑
国网华北电网电力调峰实践	V2G、有序充电	聚合商代理结算	经过辅助服务市场机制的引导,电动汽车充电功率在凌晨用电低谷时段明显大于基础负荷功率
上海削峰填谷需求响应实践	有序充电、换电	与用户直接结算	价格激励对电动汽车车主有较强的引导效果,专用充电桩和换电站的响应率较高
冀北虚拟电厂示范工程	有序充电	虚拟电厂代理结算	相较于工业等规模大、可控性强的负荷,电动汽车的随机性和分散性导致其参与度还有待提高
国网华东电网电力调频实践	有序充电	聚合商代理结算	电动汽车参与调频的容量和响应速度比储能、循环泵等传统意义上的优秀负荷表现更优

理论研究和国外示范项目验证了电动汽车聚合资源参与电力系统调频可达到秒级的响应速率,且具有功率储备裕度小、无调频死区等优点,而国内对于VGI参与调频辅助服务的尝试起步较晚,推广较慢,成熟度还有待进一步提高。

2)国内双向充放电设备标准、车桩间通信协议标准仍未出台,目前的V2G试点项目中车桩间只能采用私有通信协议的形式,试点项目开发部署的充放电设备无法与社会面的电动汽车进行充放电双向通信,极大地阻碍了V2G技术的推广应用。且现有试点项目的车桩定制通信协议大多无法实现充放电平滑转换,必须重新进行握手、绝缘检测等流程,拉长了充放电转换时间和响应时间,限制了V2G参与电网调频等对响应时间要求高的辅助服务。

3)国内VGI还存在市场机制不够灵活和健全的问题,已有试点项目的收益模式大多停留在利用峰谷价差套利节省车主充电成本的初步阶段,放电价格机制也较为粗放。一方面对车主的激励不够,导致其参与度不高;另一方面充放电价格无法动态反映电力市场的供需情况,不利于推广电动汽车等负荷侧灵活资源参与辅助服务市场。

4)目前参与V2G项目的车桩数量相对较少,很多项目中电动汽车的放电电量直接被同一配电变压器下的其他负荷消纳,并没有真正地并入电网。作为时空分布具有高随机性的电源,规模化电动汽车并网放电可能会造成配电网末端电压越限,当在同一并网点放电同时率较高时,可能对并网点造成电流冲击,且充放电桩内含大量的电力电子设备,还可能给配电网带来较严重的谐波污染。针对传统充电桩的电能质量问题,相关研究已经给出了丰富的治理方案,如采用多脉波整流、有源滤波和无源滤波相结合的方法治理谐波污染^[54-56],或在制定能量优化策略时考虑电压偏差等电能质量指标^[57]等,但关于规模化电动汽车并网放电给电网带来的安全风险和防御策略的研究仍较欠缺。

4.5 发展建议

在汲取国外VGI示范工程经验的基础上,结合我国新型电力系统和电力辅助服务市场的背景,在新能源汽车产业与技术迅速发展的趋势下,针对我国VGI继续发展和推广应用给出以下建议。

1)在充放电商业模式方面,随着动力电池技术的进步和补贴政策的落地,车主的购车成本会进一步降低,应研究并争取更灵活的充放电电价机制,有效引导车主有序充电,达到削峰填谷的目的。具体可从以下方面实施:①综合考虑电网、聚合商、车主多方利益,制定计及负荷方差、充电成本、出行满意度、电网收益、电网安全的定价策略^[58];②针对不同

的应用场景和不同用户对价格的敏感程度,制定个性化、针对性的定价方案^[59-60];③涉及放电时应评估分析频繁充放电对动力电池衰减的影响,合理设置放电电价进行补偿,并加强对公众的宣传,减轻车主对电池损耗的担忧。

2)在动力电池寿命损耗方面,准确地刻画V2G对电池衰减的影响是制定合理补偿机制、提高后续示范项目用户参与度的关键。目前相关的模型主要是将电池寿命衰减具体表示为关于温度、放电深度、SOC、循环次数的函数,在此基础上,可在以下方面进行改进:①可以在电动汽车充放电能量优化策略中,将放电深度、SOC区间作为约束条件,以避免电池过度放电导致的寿命快速衰减^[61];②可以将电池寿命衰减率折算为车主参与V2G的成本,并将其计入以车主或聚合商利润最大化为目标函数的优化策略中,这相当于对车主进行了补偿^[62-63];③可以和厂商协调,在原有电池质保期的基础上,为参与V2G的电动汽车增加额外的质保寿命,以减轻用户的顾虑。

3)在电力市场交易机制方面,应积极推动出台电动汽车充放电资源聚合参与电网需求响应、辅助服务和台区有序充电的市场交易政策,进一步细化电动汽车聚合商的责任、参与形式、参与门槛和补偿标准。从鼓励电动汽车等负荷侧灵活可调资源参与电网需求响应和辅助服务市场的角度出发:调峰辅助服务市场应逐步提高聚合商或虚拟电厂参与调峰的补偿价格上限,建立其与发电等其他市场主体的竞争报价机制,提高电动汽车提供辅助服务的收益;调频辅助服务市场首先应逐步放开参与主体限制,允许电动汽车以聚合商的形式参与调频辅助服务市场,并优化调频效果的评价指标,强调响应时间等能够体现电动汽车等负荷侧资源优势的指标,提高电动汽车聚合商的竞争力和调用次序^[64],以此来激发各类电动汽车用户参与VGI业务的意愿,通过试点示范逐步完善多方互利共赢的市场机制。

4)在VGI优化控制策略方面:①建立车-桩-路-网信息互联互通机制,融合大数据、区块链、移动互联等新技术,细化计算电动汽车的出行特征、充电行为等,精准刻画各类电动汽车用户、充电站的画像,为负荷聚合商提供更为精确的充放电调节潜力预测,为电动汽车集群参与电网需求响应、辅助服务提供支撑;②扩大试点项目的规模,基于车-桩-网全链条监测数据,进一步分析大规模电动汽车充放电参与源网荷储综合优化调控给新型电力系统的安全稳定运行带来的影响,研究相应的配电网潮流优化、电能质量治理和安全保护措施,助力交通网与能源网的深度、安全融合互通。

5 结论

在能源互联网融合发展的背景下,电动汽车与电网的双向智能互动技术已成为新趋势,国内外已经开展了一系列涵盖V1G和V2G的VGI试点项目。本文首先选取了近10年来国外的典型VGI示范工程,对其主要技术路线和示范成效进行了分析;然后,从有序充电、车网双向互动、参与需求响应、参与电网辅助服务市场4个角度对国内相关的VGI试点项目进行了分析;在此基础上,分别总结了国内、国外VGI示范工程可借鉴的经验和目前存在的局限性,并结合我国新能源汽车和智能电网发展的现状,给出了VGI未来发展的建议。未来需要电网公司、聚合运营商、设备制造企业、车企和用户共同努力,推动形成更加灵活的电力市场机制,研究满足多方主体需求的充放电调控策略,开发高性价比的软硬件产品,提高动力电池充放电循环寿命和安全性,制定用户利好的价格激励机制,为电动汽车与电网双向智能互动的规模化推广应用提供支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中国充电联盟. 2021年全国电动汽车充换电基础设施运行情况[EB/OL]. (2022-01-12)[2022-05-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Wkoo-0WdfnbX-0At4LyOxQ>.
- [2] 薛露露,夏俊荣,禹如杰,等. 新能源汽车如何更友好地接入电网系列一:中国电动汽车与电网协同的路线图与政策建议[R]. 北京:世界资源研究所(美国)北京代表处,2019.
- [3] 骆娇. 电动汽车充放电系统及其控制策略研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2021.
- [4] LUO Jiao. Research on electric vehicle charging and discharging system and its control strategy[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021.
- [5] 师瑞峰,李少鹏. 电动汽车V2G问题研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 28-37.
- [6] SHI Ruifeng, LI Shaopeng. Review on studies of V2G problem in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(6): 28-37.
- [7] 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.
- [8] LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianrong, 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.
- [9] KEMPTON W, LETENDRE S E. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997, 2(3): 157-175.
- [10] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [11] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [12] 河南省人民政府门户网站. 国内首个规模化电动汽车有序充电项目在郑州投运[EB/OL]. (2018-07-14)[2022-05-23]. <http://www.henan.gov.cn/2018/07-14/663815.html>.
- [13] 国家电网报社. 全国最大规模工业园区车网互动V2G项目正式投运[EB/OL]. (2021-04-14)[2022-05-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1696995260207524981&wfr=spider&for=pc>.
- [14] 魏倩. V2G模式下的电网调峰控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [15] WEI Qian. Research on grid peaking control strategy in V2G mode[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [16] 周健飞,孙宇轩,代军. 基于V2G技术的微电网调峰控制策略研究[J]. 电力与能源, 2019, 40(3): 351-353.
- [17] ZHOU Jianfei, SUN Yuxuan, DAI Jun. Peak load control strategy of microgrid based on V2G[J]. Power & Energy, 2019, 40(3): 351-353.
- [18] 杨健维,董鸿志,廖凯,等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 200-206.
- [19] YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.
- [20] 韩海英. V2G参与电网调峰和调频控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [21] HAN Haiying. The study on the control strategy of V2G participating peak regulation and frequency regulation of the grid[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [22] 赵竞智. 电动汽车参与电网辅助调频控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- [23] ZHAO Jingzhi. Research on control strategy of electric vehicle participating in grid frequency regulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [24] 李锦瑞. 电动汽车V2G充电站充放电控制策略与谐波特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015.
- [25] LI Jintang. Research on charge-discharge control strategy and harmonic characteristics of V2G charging station[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [26] 吴巨爱,薛禹胜,谢东亮,等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [27] WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107, 168.
- [28] 武小梅,谢旭泉,林翔,等. 电动汽车提供备用服务的地区电力市场模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 71-76.
- [29] WU Xiaomei, XIE Xuquan, LIN Xiang, et al. Local electricity market model considering reserve service provided by electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 71-76.
- [30] CHAdeMO Association. Vehicle to X(V2X) already a reality at CHAdeMO[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://www.chademo.com/technology/v2x/>.
- [31] Open Charge Alliance. Open charge point protocol 2.0.1[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-201/>.
- [32] 能源行业电动汽车充电设施标准化技术委员会. 电动汽车充电与间歇性电源协同调度技术导则:NB/T 33029—2018[S]. 北京:中国电力出版社, 2018.
- [33] 上海市市场监督管理局. 电动汽车智能充电桩智能充电及互动响应技术要求:DB31/T 1296—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [34] 中国电力企业联合会. 电力需求响应信息模型第7部分:电动汽车:T/CEC 239.7—2019[S]. 北京:中国电力出版社, 2019.
- [35] 国家电网运行与控制标准化技术委员会. 可调节负荷并网运

- 行与控制技术规范(报批稿)[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/hnkYvjQjEsXcpEqM5j82eg>.
- [25] V2G around the world[EB/OL]. (2022-03-05)[2022-05-23]. <https://www.v2g-hub.com/>.
- [26] Everoze & EV Consult. V2G global roadtrip:around the world in 50 projects[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://www.v2g-hub.com/reports>.
- [27] KEMPTON W, UDO V, HUBER K, et al. A test of Vehicle-to-Grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://www1.udel.edu/V2G/resources/test-v2g-in-pjm-jan09>.
- [28] VIGIL (Vehicle to Grid Intelligent control)[EB/OL]. (2022-07-02)[2022-07-28]. <https://www.v2g-hub.com/projects/vigil-vehicle-to-grid-intelligent-control/>.
- [29] Cenex. Sciurus-trial-insights-findings from 300 domestic V2G units in 2020[EB/OL]. [2022-07-28]. <https://www.v2g-hub.com/reports>.
- [30] Cenex. Commercial viability of V2G:project sciurus white paper [R/OL]. [2022-07-28]. <https://www.v2g-hub.com/reports>.
- [31] ANDERSEN P, TOGHROLJERDI S, SØRENSEN T. The Parker project[EB/OL]. [2022-05-23]. https://parker-project.com/wp-content/uploads/2019/03/Parker_Final-report_v1.1_2019.pdf.
- [32] ANDERSEN P B, TOGHROLJERDI S H, SOUSA T, et al. The Parker project:cross-brand service testing using V2G[J]. World Electric Vehicle Journal, 2019, 10(4):66.
- [33] CITY-ZEN key innovation forms[EB/OL]. [2022-05-23]. <http://www.cityzen-smartcity.eu/ressources/smart-grids/vehicle2grid/>.
- [34] Electric Vehicle Integration (INVENT)[EB/OL]. [2022-05-23]. <https://nuvve.com/projects/ucsd-invent/>.
- [35] ZECCHINO A, THINGVAD A, ANDERSEN P, et al. Suitability of commercial V2G CHAdemo chargers for grid services [C]//31st International Electric Vehicles Symposium & Exhibition & International Electric Vehicle Technology Conference. Kobe, Japan: [s.n.], 2019: 1-8.
- [36] NEZU Y. V2G demonstration:simultaneous control of the peak shift and the frequency adjustment considering the daily vehicles operation[R]. [S.l.]:Toyota Tsusho Corporation, 2021.
- [37] 宁剑, 吴继平, 江长明, 等. 考虑资源运行特性的可调节负荷调峰调频优化控制策略[J/OL]. 电力系统自动化. [2022-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220322.0950.002.html>. DOI:10.7500/AEPS20210805007.
- [38] 宁剑, 江长明, 张哲, 等. 可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17):1-8.
- NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17):1-8.
- [39] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(6):2097-2108.
- TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2097-2108.
- [40] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9):3175-3183.
- WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under Ubiquitous Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3175-3183.
- [41] 国家电网公司. 《泛在电力物联网白皮书2019》摘要[N]. 国家电网报, 2019-10-15(2).
- [42] 程伟. 北京电力试点居民区电动汽车智能有序充电[EB/OL]. (2019-06-26)[2022-05-23]. <http://www.chinapower.com.cn/dwddqc/20190626/1279154.html>.
- [43] 华为. 揭秘南网电动首个智能有序充电场站[EB/OL]. (2020-06-12)[2022-05-23]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200612/1080806.shtml>.
- [44] 国网电动汽车服务有限公司. 客户侧储能[EB/OL]. [2022-05-23]. <http://www.evs.sgcc.com.cn/#/smartEnergy/e-storage>.
- [45] 国网电动汽车服务有限公司. V2G让电动汽车成为移动储能[R]. [S.l.]:国网电动汽车服务有限公司, 2021.
- [46] 国网冀北虚拟电厂示范工程投运传统电网实现能源互联三级跨越[EB/OL]. (2019-12-12)[2022-05-23]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c13071472/content.html>.
- [47] 刘坚, 熊英, 金亨美, 等. 电动汽车参与电力需求响应的成本效益分析:以上海市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1):86-94.
- LIU Jian, XIONG Ying, KIM Hyoungh Mi, et al. Economic assessment of demand response delivered by electric vehicles in Shanghai[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1):86-94.
- [48] 中国电动汽车百人会, 自然资源保护协会. 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[EB/OL]. [2022-05-23]. <http://www.nrde.cn/information/informationinfo?id=250&cook=2>.
- [49] 国网华北分部将车网互动充电桩纳入电力调峰辅助服务市场[EB/OL]. (2020-04-22)[2022-05-23]. http://epaper.indaa.sgcc.com.cn/dwb/con/202004/21/con_43394.html.
- [50] 负荷侧资源参与辅助服务市场的路径研究[EB/OL]. (2020-09-08)[2022-05-23]. <http://system.nc.sgcc.com.cn/site13/mtbd/2020/09/434936.shtml>.
- [51] 史沛然, 李彦宾, 江长明, 等. 第三方独立主体参与华北电力调峰市场规则设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5):168-174.
- SHI Peiran, LI Yanbin, JIANG Changming, et al. Rule design and practice for third-party independent entities participating in electric power peak regulation auxiliary service market of North China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5):168-174.
- [52] 华东电网可调节负荷资源首次完成区域调频响应试验[EB/OL]. (2021-09-30)[2022-05-23]. <http://www.ec.sgcc.com.cn/neweip/fbxw/119507.jhtml>.
- [53] 国家发展和改革委员会能源研究所. 可再生能源与电动汽车融合示范项目调研报告[EB/OL]. [2022-05-23]. <http://img.sae-china.org/web/2021/07/%E8%B0%83%E7%A0%94%E6%8A%A5%E5%91%8A%20ERI.pdf>.
- [54] 吴宇飞. 电动汽车接入对微电网电能质量影响与谐波抑制策略研究[D]. 沈阳:东北大学, 2018.
- WU Yufei. Research on the impact of electric vehicle access on the micro-grid power quality and harmonic suppression strategy[D]. Shenyang:Northeastern University, 2018.
- [55] 王淑雅. 含电动汽车充电的微电网谐波抑制策略研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2019.
- WANG Shuya. Research on micro-grid harmonic suppression strategy with electric vehicles charging[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [56] 吴怡. 电动汽车充电站谐波分析与治理最优方案研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- WU Yi. Study on optimal scheme for harmonic analysis and management of EV charging station[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [57] 高旭. 分布式储能对配电网电能质量的影响[D]. 济南:山东大学, 2020.

- GAO Xu. Influence of distributed energy storage on power quality of distribution network[D]. Jinan:Shandong University, 2020.
- [58] 杨思渊,姜子卿,艾芊. 考虑备用服务的电动汽车代理商竞价与定价联合优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):25-32.
YANG Siyuan,JIANG Ziqing,AI Qian. Joint optimization of bidding and pricing strategy for electric vehicle aggregators considering reserve service[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):25-32.
- [59] 崔金栋,罗文达,周念成. 基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450,4644.
CUI Jindong,LUO Wenda,ZHOU Niancheng. Research on pricing model and strategy of electric vehicle charging and discharging based on multi view[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(15):4438-4450,4644.
- [60] 王敏,吕林,向月. 计及V2G价格激励的电动汽车削峰协同调度策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):27-33,85.
WANG Min,LÜ Lin,XIANG Yue. Coordinated scheduling strategy of electric vehicles for peak shaving considering V2G price incentive[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(4):27-33,85.
- [61] 李家浩. 考虑电池寿命以及用户充电需求的电动汽车友好型辅助调频控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
LI Jiahao. Research on friendly FR control strategy of electric vehicle considering battery life and user's charging demand[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.
- [62] 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.
- [63] 崔杨,周飞杰,赵钰婷,等. 考虑替代效应的电动汽车负荷参与调频辅助服务市场出清方式[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):111-119.
CUI Yang,ZHOU Feijie,ZHAO Yuting,et al. Clearing mode of electric vehicle load participating in frequency regulation ancillary service market considering substitution effect[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(7):111-119.
- [64] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
LI Jiamai,AI Qian,YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):37-56.

作者简介:



赵 轩

赵 轩(1997—),女,工程师,硕士,主要研究方向为电动汽车充换电技术、车网互动技术(E-mail:xuan32016@163.com);

张元星(1988—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电动汽车充换电技术、车网互动技术(E-mail:zhangyuanxing1988@163.com)。

(编辑 陆丹)

Effect analysis and development suggestion of domestic and foreign vehicle grid integration pilots

ZHAO Xuan,ZHANG Yuanxing,LI Bin,DIAO Xiaohong,LI Taoyong,JIANG Linru,ZHANG Jing
(Beijing EV Charging and Battery Swapping Engineering & Technology Research Center,
China Electric Power Research Institute Co.,Ltd.,Beijing 100192,China)

Abstract: The bi-directional ordered integration between large-scale EVs(Electric Vehicles) and power grid can provide diversified auxiliary services for the power grid,smooth the fluctuation of new energy output and load,meanwhile,EV users can save charging costs and obtain profits by providing auxiliary services to the power grid. The basic concept and development situation of bi-directional intelligent integration between EVs and power grid are introduced. The typical application scenarios,energy optimization management strategy and communication protocol standard for VGI(Vehicle Grid Integration) are explained. In view of the typical demonstration projects,the technical ideas,main conclusions and achievements of domestic and foreign VGI are analyzed,and the characteristics,experience and limitations of the domestic and foreign demonstration projects are compared and summarized. Combining with the trends of related industry and technology,and aiming at the limitations of domestic VGI pilot projects,some suggestions on the future development of China VGI technology from the perspectives of theoretical research,business modes,market mechanism,and so on,are given.

Key words: electric vehicles;vehicle grid integration;ancillary services;smart grid;frequency modulation;new energy consumption

附录 A

表 A1 国外 VGI 示范项目基本信息

Table A1 Basic information of foreign VGI pilot projects

序号	项目名称	国家	起始时间	充/放电桩数量	验证内容
1	M-tech Labo	日本	2010 年	5	TS
2	Leaf to home	日本	2012 年	4000+	TS, V2B
3	V2G Aggregator project	日本	2018 年	—	—
4	Parker	丹麦	2016 年	50	FR, DS, A
5	ACES	丹麦	2017 年	50	FR, DS, TS
6	Grid Motion	法国	2017 年	15	FR, R, A
7	INEES	德国	2012 年	40	FR
8	Vehicle-to -coffee	德国	2015 年	1	TS
9	Honda, Offenbach	德国	2017 年	1	TS
10	Redispatch V2G	德国	2018 年	10	CM
11	BDL	德国	2021 年	50	FR, A, TS
12	SEEV4City	荷兰, 挪威, 英国, 比利时	2016 年	13	DS, TS
13	City -Zen Smart City	荷兰	2014 年	4	DS, A
14	Amsterdam Vehicle2Grid	荷兰	2014 年	2	TS
15	Solar-powered bidirectional EV charging station	荷兰	2015 年	1	TS
16	Smart Solar Charging	荷兰	2015 年	22	DS, A, FR
17	NewMotion V2G	荷兰	2016 年	10	FR
18	Hitachi, Mitsubishi and Engie	荷兰	2018 年	1	TS
19	Direct Solar DC V2G Hub	荷兰	2020 年	14	FR, DS, TS, EB
20	EFES	英国	2013 年	4	FR, TS
21	ITHECA	英国	2015 年	1	FR
22	Nissan Enel UK	英国	2016 年	100	—
23	The Network Impact of Grid-Integrated Vehicles	英国	2018 年	16	DS
24	Sciurus	英国	2018 年	325	FR, DC
25	VIGIL	英国	2018 年	—	通信控制平台
26	Electric Nation Vehicle to Grid	英国	2020 年	100	—
27	Fiat -Chrysler V2G	美国	2009 年	—	FR, TS
28	Grid on wheels	美国	2012 年	15	FR, TS
29	JumpSmartMaui	美国	2012 年	80	DS, FR
30	US Air Force	美国	2012 年	13	FR, TS, R
31	US DoD – Fort Carson	美国	2013 年	5	TS
32	Clinton Global Initiative School Bus Demo	美国	2014 年	6	FR, TS
33	Torrance V2G School Bus	美国	2014 年	2	FR, TS
34	Distribution System V2G for Improved Grid Stability for Reliability	美国	2015 年	2	DS, TS
35	CSDNRG Evgo, UCSD	美国	2015 年	9	—
36	KIA Motors, Hyundai Technical Center Inc., UCI	美国	2016 年	6	TS
37	NYSERDA	美国	2016 年	5	—
38	BlueBird School Bus V2G	美国	2017 年	8	FR, TS
39	INVENT	美国	2017 年	50	FR, DS, TS
40	UCLA WinSmartEV	美国	—	1	DS, TS
41	Realising Electric Vehicle to Grid Services	澳大利亚	2020 年	51	FR, R
42	IREQ	加拿大	2012 年	1	DS, TS
43	Powerstream pilot	加拿大	2013 年	—	微网 V2G
44	Zem2All	西班牙	2012 年	6	—
45	GrowSmarter	西班牙	2015 年	6	TS
46	Korean V2G	韩国	2015 年	3	TS
47	Elia V2G	比利时	2018 年	2	FR
48	V2G Zelzate	比利时	2020 年	22	FR, R, TS
49	Suvisahti pilot	芬兰	2017 年	1	光储充一体
50	Genoa pilot	意大利	2017 年	2	—

表 A2 国内典型 VGI 试点项目的基本信息

Table A2 Basic information of typical domestic VGI pilot projects

序号	项目名称	时间	充/放电桩数量	功率	参与主体
1	青岛光储充放微电网试点	2017 年	—	200kW	青岛特锐德电气股份有限公司
2	郑州世纪家园小区有序充电	2018 年	50	交流 1.3-7kW	国网河南省电力公司
3	北京人济大厦 V2G/有序充电	2018 年	5	交流 7kW/直流 30kW-150kW	国网电动汽车公司
4	GEF-6 上海示范区项目	2018 年	309	—	中国工业和信息化部、联合国工业发展组织、中国汽车工程学会
5	北京西八里庄小区有序充电	2019 年	54	—	国网北京市电力公司
6	冀北虚拟电厂实践	2019 年	—	调节量 816kW	国网冀北电力公司
7	上海削峰填谷需求响应实践	2019 年	269	调节量 1068kW	国网上海市电力公司、国网电动汽车公司、自然资源协会、蔚来汽车、星星充电等
8	深圳碧新路公共站有序充电	2020 年	55	直流双枪	南网电动汽车公司、华为
9	合肥居民区有序充电	2020 年	30	交流 1.8-7kW	国网合肥市供电公司
10	北京中再中心 V2G/有序充电	2020 年	12	直流 V2G 15kW	国网电动汽车公司
11	国网蔚来创新港 V2G	2020 年	15	直流 V2G 15kW	国网电动汽车公司、蔚来汽车
12	安徽合肥虚拟电厂实践	2020 年	—	调节量 4.32MW	国网安徽省电力公司
13	国网华北电网调峰辅助服务市场实践	2020 年	27006	调节量 40MW	国网华北分部、国网电动汽车公司、特来电、冀北综合能源公司
14	山西“新能源+电动汽车”协同互动智慧能源试点	2020 年	—	消纳新能源 20.81MWh	国网山西省电力公司、国网山西省电动汽车公司
15	扬州金玺小区有序充电	2021 年	100	交流 7kW	国网扬州市供电公司
16	广州新材料园 V2G/有序充电	2021 年	29	直流 120kW /交流 7kW/ V2G 15kW	广东电网电动汽车公司
17	保定长城工业园区 V2G	2021 年	50	—	国网电动汽车公司、长城汽车、中国汽车工程学会
18	国网华东电网调频实践	2021 年	—	调节量 1.45MW	国网华东分部、国网江苏省电力公司、国网安徽省电力公司
19	山东削峰填谷需求响应实践	2022 年	9238	调节量 26.4MW	国网山东省电动汽车公司
20	浙江虚拟电厂实践	2022 年	—	200kW	国网浙江省电力公司

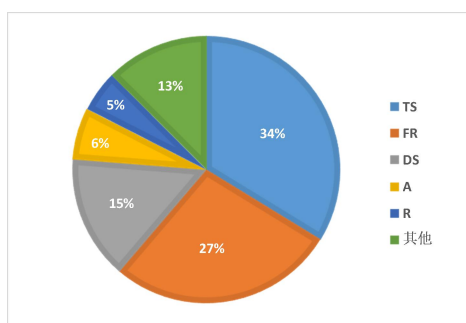


图 A1 国外 VGI 试点项目验证服务占比情况

Fig.A1 Proportion of ancillary services verified in foreign VGI pilot projects