

# 英国 EV-elocity 项目对我国 V2G 项目开展的借鉴与启示

张占龙<sup>1</sup>, 杜渐<sup>1</sup>, 郑嘉琪<sup>1</sup>, 王伟亮<sup>1</sup>, 高山<sup>2</sup>, 杨越<sup>2</sup>, 颜开<sup>2</sup>, 姜天尉<sup>2</sup>  
(1. 国网江苏省电力有限公司 双创中心, 南京 211100; 2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

**摘要:**近年来我国在电动汽车领域发展迅速,但当大量电动汽车接入电网时会对电网的稳定性和可靠性构成挑战,而V2G技术可以平衡电网峰谷差和促进新能源消纳,提高电网的灵活性,从而有效缓解大量电动汽车无序接入电网带来的问题。以英国的EV-elocity项目为案例,深入分析了V2G项目的环境价值、电池老化和用户反馈等方面,这些也是目前我国在开展V2G项目中关注相对较少的问题。此外,还简要介绍了我国V2G项目的实施情况,并指出我国V2G研究在项目开展和研究方向层面所面临的问题。最后,针对环境价值、电池老化、用户体验和接受度等方面提出了相关建议,这些建议旨在缩小与发达国家在该技术领域的差距,从而推动我国V2G项目的开展和V2G技术的应用。

**关键词:** V2G; 低碳优化; 电池老化; 用户反馈; 标准政策

## Learning and inspiration of the UK EV-elocity project for V2G research in China

ZHANG Zhanlong<sup>1</sup>, DU Jian<sup>1</sup>, ZHENG Jiaqi<sup>1</sup>, WANG Weiliang<sup>1</sup>, GAO Shan<sup>2</sup>, YANG Yue<sup>2</sup>,  
YAN Kai<sup>2</sup>, JIANG Tianwei<sup>2</sup>

(1. Business Startups and Innovation Center of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In recent years, China has been developing rapidly in the field of electric vehicles, but when a large number of electric vehicles are connected to the power grid, it will pose a challenge to the stability and reliability of the power grid. V2G technology can balance the peak-to-valley difference of the grid and promote the consumption of new energy, improve the flexibility of the grid, and thus effectively alleviate the problems caused by the uncontrolled access of a large number of electric vehicles to the grid. Taking the EV-elocity project in the UK as a case study, the environmental value, battery aging and user feedback of the V2G project are analyzed in depth, which are also issues that have received relatively little attention in carrying out the V2G project in China at present. In addition, the implementation of V2G projects in China is also briefly introduced, and the problems faced by V2G research in China at the level of project development and research direction are pointed out. Finally, relevant suggestions are made with respect to environmental value, battery aging, user experience and acceptance, which are aimed at narrowing the gap with developed countries in the field of this technology so as to promote the development of V2G projects and the application of V2G technology in China.

**Key words:** V2G; low-carbon optimization; battery aging; user feedback; standard policies

## 0 引言

近年来,我国在电动汽车领域取得了显著的进展。政府出台的一系列支持政策、电动汽车的不断普及以及技术水平的提升,使得我国电动汽车保持着高速增长的势头。据统计,2023年我国新能源汽车产量为958.7万辆,同比增长35.8%,新能源汽车销量949.5万辆,同比增长37.9%,2024年第一季度新能源汽车产量和销量达到211.5万辆和209万辆,

市场占有率有从2021年的13.4%提升至31.1%。我国充电基础设施方面也持续高速增长,有力支撑了我国电动汽车规模化市场的快速发展。截至2023年底,我国充电基础设施保有量达到859.6万台,同比增长了65%。这一增长势头的背后,既是政府推动新能源汽车发展的政策扶持,也是市场对清洁、高效交通方式的不断追求。然而,随着电动汽车和充电设施数量的不断增加,当大量电动汽车同时选择在相似的时间段充电时,就会导致充电需求集中在某一时段,给电网带来额外的负荷压力。这种负荷的不可预测性和集中性使得电网调度变得更加困难,增加了电网的运行成本和风险<sup>[1-2]</sup>,因此如何

收稿日期:2024-04-02;修回日期:2024-06-05

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(SGJSSC00KJJS2310025)

更好地整合这些移动能源成为了一个迫切需要解决的问题。

正是在这一背景下, V2G(vehicle-to-grid)技术成为解决电动汽车与电力系统之间协同问题的创新手段。电动汽车通过 V2G 技术可以连接到电网, 实现双向能量流动<sup>[3]</sup>, 相较于传统的单向充电模式, 该模式可以在电网负荷侧需求较高或可再生能源输出不稳定时提供有效支撑, 有助于平衡电网峰谷差, 促进新能源的消纳<sup>[4-6]</sup>。

目前, 欧美等发达国家在 V2G 技术研发方面起步较早, 拥有丰富的技术积累和先进的研发水平, 并且欧美发达国家的电力市场机制较为成熟, 有较为成熟的通信协议和规范体系<sup>[7]</sup>。我国的一些 V2G 试点项目更多聚焦于验证电动汽车集群对于电网的削峰填谷成效, 但对于 V2G 产品服务在社会、市场的接受程度的调研并不深入。考虑到我国能源结构“碳达峰”、“碳中和”的需求, 目前的试点项目对于 V2G 项目的环境价值也缺乏具体的量化指标。此外, 由于电动汽车电池寿命有限, 厂商对电池保修只适用于特定范围, V2G 对电池健康的影响不容小觑。研究欧美国家在 V2G 项目的开展情况, 将有助于我国加速相关技术研发与标准制定<sup>[8]</sup>。英国于 2022 年完成的 EV-elocity 由英国政府提供资金支持, 致力于提供有关 V2G 技术优势的确凿数据, 利用了一系列实际试验来证明该技术在社会中的实际价值。EV-elocity 的成功使该项目得到了英国研究与创新机构(UK research and innovation, UKRI) 和 Innovate UK 的认可, 并将其沿用为影响案例研究。本文选取英国 EV-elocity 项目作为案例进行剖析<sup>[9]</sup>, 旨在通过对该项目的经验教训进行分析, 为我国 V2G 技术的发展提供可借鉴的经验和启示, 从而促进国内 V2G 技术的推广与应用。

## 1 EV-elocity 项目背景及运营策略

### 1.1 EV-elocity 项目背景

EV-elocity 项目由英国商业、能源和工业战略部以及零排放车辆办公室在 2018 年 9 月至 2022 年 1 月期间资助完成。该项目尝试在一系列真实场景中演示 V2G, 以获得对这一新兴产业的技术手段、客户体验和商业模式的深入理解。将项目进行细化, 可以分为如下 5 个项目目标: ① 研究部署技术中立的后端系统和用户界面(即可以在任意平台部署、应用), 以管理和操作 V2G 单元, 为后续研究工作提供框架; ② 在英国各地开展 V2G 试点项目, 收集充电

器、用户和车辆行为的数据; ③ 深入研究电动汽车的电池管理系统, 寻找减轻电池老化和延长电池寿命的方案; ④ 开展用户调查, 收集用户参与 V2G 项目的反馈; ⑤ 建立循证的技术-经济模型, 分析 V2G 技术在英国的可行性。

参与项目的各机构的职责、分工为: CX(cenex) 作为项目的牵头人, 统筹规划, 负责确保项目按时、按预算和按质量交付。其他具体任务由不同机构分别负责完成: 各地市政厅、大学与社会机构分别在不同场地负责项目示范点管理; CX 与 CC(crowd charge) 共同负责参与项目 V2G 站点的人员指派、运营和技术支持, 并协调车辆遥测和充电器数据的收集、处理和交付工作; 诺丁汉大学和华威大学等机构负责电池老化、用户行为和基于技术-经济模型的可行性分析 3 个目标的研究, 其中诺丁汉大学管理项目的外部通信、传播和开发工作。

### 1.2 运营策略及 4 阶段 V2G 运行试验

考虑到各机构的目标和诉求, 团体一致认为项目的运营策略不应侧重于电网服务或创收。相反的, 项目应更加注重充电体系中计量电表后的行为, 亦即充电设备、用户与汽车电池。

基于该运营策略, 项目的示范阶段分为以下 4 期。通过 4 期运行试验, 项目为后续的用户行为、电池健康、环境价值研究的进行提供了框架。各阶段启动时期与项目参与方信息如图 1, 不同颜色标识对应项目不同阶段。



图 1 实验各阶段开始日期与场所

Fig. 1 Starting dates and sites of each phase of the trial

第 1 阶段是单相无序充电, 该阶段充电不进行优化, 驾驶员也无法进行调整。每辆车一插上电就能获得最大功率的充电, 而不会有电动汽车的放电和出口。第 2 阶段是固定排程的电价优化和低碳优化, 分为 a、b 两个时期, a 时期根据分时电价表制定固定的充放电安排: 充电被安排在最便宜的时期, 放电被安排在最昂贵的时期。b 时期以电网的碳排放最小

为优化目标,安排电动汽车的充放电时间段。第3阶段是动态排程的电价优化和低碳优化,电价动态优化是通过Crowd Charge应用程序进行实时信息输入,并优化充电行为,低碳动态优化是基于英国电网排放因子的每日24 h前瞻预测。第4阶段的电池健康优化要求尽可能长时间地将电动汽车的电池 $S_{oc}$ 保持在50%,以最大限度地减少日历老化。

### 1.3 各阶段策略测试结果分析

4个阶段的V2G运行试验首先通过站点功率数据刻画了各个智能充电阶段的单日典型充电行为。固定排程电价优化的2a阶段试验显示站点活动在午间与夜间较为活跃;固定排程低碳优化的2b阶段试验中,充电活动则明显集中在夜晚的早些时候。3a阶段的行为与2a较为类似,取决于站点的电价结构;3b阶段的行为除了2b阶段所述的夜晚前期充电高峰,在电网排放因子最高的傍晚时段同样出现了放电高峰。

同时,初步的试验结果显示:采用固定方法或动态方法都可以实现类似的充电成本或二氧化碳排放降低。与固定排程相比,针对电价或碳的动态优化可使削减二氧化碳排放因子的性能提高3%,另外电池保护与电价或低碳优化之间显然存在权衡关系。第2节详细地分析了项目对于V2G环境价值与电池老化的研究。

## 2 EV-elocity项目重点研究方向

EV-elocity项目在上述4个阶段的运行策略基础上,针对V2G的环境价值和电动汽车的电池损耗方面开展了重点研究。

### 2.1 V2G的经济环境价值

华威大学采用REVOLVE模型进行试验,通过采用量化指标的实例验证V2G技术可实现的经济、环境价值。模型运行流程如图2所示,REVOLVE模型能够以30 min的颗粒度模拟大量V2G站点在1年内的充、放行为。将该模型分别运行在单项最

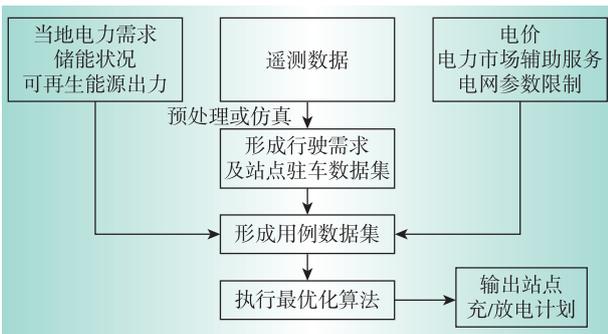


图2 REVOLVE模型运作流程

Fig. 2 Operation of REVOLVE model

优模式(即成本最优或碳排放最优)与综合最优模式下,模型输出充电计划的统计结果,从而可以由此分析出V2G价值的理论上界。

华威大学站点年度的单项优化结果表明:碳排放最优的优化方式显著降低了碳排放水平,同时达成了少量的成本优化,年度的净碳排放量甚至为负值;成本最优的优化方式显著减少成本的同时,碳排放量也有较大削减。即使这两种单项优化方式的目标不同,但均在另一个优化目标上达成了一定成效。

综合最优方式运行的基础是成本最优方式。为了计及碳排放影响,该方法将碳定价作为成本,计入充电成本中参与优化:碳定价越高,计及成本,模型便降低碳排放以最优化成本。该优化方式旨在确定能够显著激励碳减排的碳定价水平区间。此项试验中,华威大学在不同的碳定价水平下分别运行成本最优方式,结果表明:初始纳入碳定价后,碳排放量即出现显著跌落;随后区间内,碳排放随碳定价大致呈稳定线性下降;更大的碳定价下,碳排放净值转负乃至到达边际,趋近于单独的碳排放最优方式的减排量。以英国的实际碳定价(约为85英镑/t)作为实际考量,应用这种成本碳排放协同优化方式有望每年在每车上达成180 kg以上的碳减排。

上述优化是在双费率电价的基础上进行的。此外,动态电价被认为能够达成更大程度的碳排放与成本削减。

### 2.2 V2G对电池损耗的影响

华威大学不仅参与上述优化方式的研究,还参与评估分析了V2G对电池老化的影响,该研究将电池的老化分为:日历老化和循环老化。日历老化主要受存储温度、电池状态、静置时间等因素影响,循环老化则主要受环境温度、充放电次数、充放电深度和速率等因素影响。在开展实验时,首先建立了半经验模型来预测日历老化和循环老化,利用不同实验室条件下电池老化的实验数据来确定并验证电池日历老化和循环老化模型参数,最终考虑两种不同的电池老化方式建立一个综合电池老化模型,以便预测电动汽车不同运行情况下的电池容量总损失。

实验后续共设定5种不同的充放电模式,分别探究不同情况下的电池老化情况:标准充电(standard charging, STD CHA),电动汽车电池连接到充电器后立即开始充电,然后充满电离开;时移充电(time-shifted charging, TS CHA),电动汽车连接到充电器后,会在适当时间充电,使其在出发时电量达到100%;智能单向充电(smart charge V1G, SC V1G),智能充电但无法向电网反馈能量;智能双向充放电(smart charge V2G, SC V2G),将电动汽车的电量放电

到日历老化最低的SOC,然后在适当时间充电,使其在出发时达到100%;混合智能单向充电和双向充放电(combined SC V1G and V2G, SC VxG),综合考虑影响日历老化的SOC状态和影响循环老化的充电次数的充电方案<sup>[10]</sup>。结果显示,在电动汽车使用频率较低的情况下,相较于标准充电模式,SC V2G充电模式下,由于电池充放电的次数增加,电池老化加快,而SC VxG模式对电池老化的改善效果最好。当电动汽车使用频率较高的情况下,相较于标准充电模式,后面几种充电模式均显著提高了电池的寿命,TS CHA和SC V1G模式对电池老化效果改善最好,相较于标准充电模式,电池老化缓解效果提高了14.9%,其次是SC VxG策略,电池老化的缓解效果提高了12.3%。

### 2.3 项目挑战及用户反馈

EV-elocity项目在英国不同地区开展时面临着各种各样的困难和挑战,这些问题有些是和V2G控制策略密切相关的,有些则是现场设备的安装甚至包括合理选择项目合伙人等非技术相关问题。本文主要以位于英国拉夫堡地区的试验场地来介绍项目开展时面临的问题。

位于英国拉夫堡的Cenex公司在开展V2G项目时面临的主要问题是V2G系统的调试难度高和持续可靠性低。由于系统不成熟,V2G安装和运行过程中的排障需要整个供应链的协作,大大增加了项目成本。另一个较为严重的问题是当电动汽车长时间不活动(不充电或不放电)时会处于离线状态,此时需要远程手动重新启动会话,否则系统将无法按照现场操作的要求控制车辆的充电状态。

项目结束,还对参与V2G项目的用户的使用体验进行了调查。用户对V2G项目的缺点反馈除充电桩设备可靠性差之外,主要包括:①在充电测试的第2个阶段存在车辆只能在清晨充电50%;②在充电测试的第3个阶段存在充电时间安排不方便、收费时间表不容易理解、充电状态未实现可视化以让用户知道车辆何时充满电等问题。但用户对V2G项目也有积极的反馈:参与V2G项目可以促进可再生能源的利用;充电时的动态电价可以减少充电成本;参与V2G项目将有助于减少碳排放,保护环境等。

## 3 国内V2G项目开展现状及不足

我国虽然关于V2G研发起步较晚,但在政府相关政策的扶持和国内电动汽车相关产业的推动下,我国已在多个地区进行V2G相关项目探索。2024年1月4日国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部 and 市场监管总局联合印发了《关于加强新能源

汽车与电网融合互动的实施意见》,该意见明确将在长三角、珠三角等条件相对成熟的地区开展车网互动规模化试点示范,2025年底前建成5个以上示范城市以及50个以上双向充放电示范项目。总体而言我国的V2G示范项目呈现以下特点:①试点项目多样,在多个城市如北京、上海、深圳等开展了V2G试点项目,这些试点不仅包括公共领域的大型车辆,如公交和出租车,也包括私人电动汽车的参与。②政府支持强烈,国内V2G项目均得到了国家政策的大力支持,政府通过政策支持和资金投入,推动了V2G技术的研发与试点实施。③侧重技术验证与实证,多数项目聚焦于验证V2G技术的实际应用效果,包括电动汽车的充放电能力、电网的调节能力以及系统的整体稳定性和效率。

虽然我国开展的V2G示范项目已取得部分成效,但相较于国外项目我国目前但仍面临着一些问题。在项目建设层面上,我国单个项目的广度、深度较为匮乏。EV-elocity项目地理跨度尺度较大,从英格兰中部的华威大学到英格兰中东部的诺丁汉再到英格兰北部的利兹,项目实际考量的V2G场景较为复杂多样,但项目在策略实施与数据收集方面达成了协同,也使得项目最终的成果更具普适性与说服力。在我国,跨区域、多方位、跨场景的V2G示范项目有待实施运行。同时,EV-elocity项目在Cenex公司的牵头下实现了试验场点、通信数据平台、器件管理平台与研究机构的合作与协调,在立项中规定了各方主体的工作目标与合作关系,体系架构与任务分工较为明确。项目自2020年重组后,根据运营策略在若干年的项目运营中安排了明晰的阶段试验日程,表现出较强的持续性与规划性,也因此能够为研究机构的科研产出提供丰富的现实场景实验数据。同时,项目实施过程中进行了深入的用户调研,丰富的用户反馈为进一步、大范围的V2G项目建设提供了条件。现阶段我国的V2G示范项目确实完成了部分V2G技术层面可行性的证明,但是如果想要实现V2G技术在社会中的普遍渗透以获取效益,项目主办方仍需纳入更多主体参与,作出持续的、长远的项目规划,并充分考虑参与者的诉求。

在研究方向层面上,EV-elocity项目较为全面、完备的电池老化与经济环境价值研究在国内并不多见。V2G技术可能导致的电池老化加剧问题在国外已经成为限制V2G开展的桎梏之一。该项目使用日历老化、循环老化结合的半经验性模型,探讨了电池在不同充电策略下的损耗状况。国内目前对电动汽车电池老化的研究较少,使用经验模型的研究往往存在案例不广泛、缺乏实际数据的问题;使用物理模

型的研究往往无法考虑电池老化的多重因素,且上述研究大多未能综合考量日历老化与循环老化问题。国内研究对V2G的环保与经济价值大多给出的是定性的正面描述,而以现实场景的数据为基础,使用定量方法建立统一的经济环境计算模型以综合考量V2G的经济、环保价值的研究存在短板。

#### 4 对国内V2G项目开展的启示与建议

近年来,国内电动汽车数量不断增加,大量电车无序充电给电网的稳定性带来了巨大压力<sup>[11-12]</sup>,为了妥善利用好电动汽车这一柔性负荷,在分析英国EV-elocity项目开展相关经验的基础上,并结合我国V2G试点项目开展情况及不足,对我国今后开展V2G项目提供以下建议。

##### (1) 考虑V2G的环境价值

英国EV-elocity项目在4个试验阶段中不仅考虑了充电成本的优化,并在对应不同阶段进行了低碳排放的优化。相对而言,国内开展的V2G项目主要应用场景主要是有序充电、削峰填谷、参与调峰辅助服务等,针对V2G的低碳优化和绿电交易开展的项目较少,且主要为理论研究。并且,国内大部分V2G试点项目在制定电动汽车的充放电策略时主要考虑电网的需求,如调峰调频等;或者从用户和充电聚合商的角度出发,最大程度降低充电成本和提高收益等,对V2G本身所带来的环保价值的研究较少。因此,在今后开展相关试点项目时,为了提高项目的环保成效可以从以下方面努力:①参考英国EV-elocity项目的做法,将电动汽车充放电活动所产生的碳排放进行定价,计入充电成本当中,从而实现在减少充电成本的同时降低碳排放;②将电动车辆的储能与可再生能源相结合,在可再生能源出力较大时存储多余的能量,以便在需要时释放能量到电网中,从而促进新能源的消纳,最大程度利用好V2G的环境价值。

##### (2) 标准化与规范制定

发达国家的V2G市场相对成熟,有多个竞争激烈的企业和组织参与标准制定和推广,形成了较为完善的标准体系,包括通信协议、数据格式、充电接口等。如美国加州政府针对车网互动全环节开展了标准化工作:在车桩通信协议方面重点推荐ISO 15118系列标准,在桩平台通信协议方面重点推荐OCCP标准协议,并且相关部门加大推动标准落地执行力度,为V2G实现规模化商业性用奠定坚实基础<sup>[8]</sup>。国内目前中日合作开发的ChaoJi充电系统具备高功率输出、安全可靠、向前/后兼容性好的特点,作为2015版充电标准的替代方案,可以更好地适应

未来便捷智能充电需求。但国内V2G标准化方面的政策支持和监管体系尚未完善,相关政策缺乏针对性和连续性,标准制定和推广的机制还需要进一步完善。对此,国内应该鼓励行业组织、企业和研究机构积极参与标准制定和推广工作,形成多方参与、合力推进的局面,促进其在产业界的广泛应用,形成统一的标准体系。另外需要建立健全的标准化监管体系,确保标准的有效实施和执行,推动V2G技术标准化工作向着更加规范、统一和成熟的方向发展。

##### (3) 考虑电池损耗影响

V2G技术需要频繁进行充放电循环,这对电动车电池的寿命和健康状态提出了更高的要求,长期使用可能会影响电池的性能和使用寿命,这也是制约V2G技术商业化的一个因素。目前,国外已经通过开展相关V2G项目探索电池充放电过程对电池寿命的影响,并提出了一些优化策略和措施。如本文重点研究的英国EV-elocity,分析了影响电池日历老化和循环老化的各种因素,并比较了不同充电方式的优劣。国内针对V2G项目研究较少考虑电池老化因素,相比之下研究深度和广度还有待提高。因此,国内在开展V2G项目时可以借鉴国外现有的电池老化优化策略,如温度控制优化,通过合理的冷却或加热措施,维持电池工作温度在适宜范围内,可以减缓电池老化速度;充放电循环优化,控制充放电循环的次数和深度,可以减少电池的机械应力和化学损伤,从而延长电池寿命等。此外,除了技术方面的研究,还可以针对参与车网互动的用户提供一些补偿优惠政策,如根据电池的放电量进行补偿、更换电池时进行费用减免、提供电池质保之外的V2G循环质保服务等。

##### (4) 重视用户体验与接受度

由于V2G技术涉及到电动车用户的参与和行,而用户的行为通常是受到多种因素影响的,因此其行为具有一定的不确定性。为了实现V2G技术的推广和应用,还需要重点考虑用户体验和接受度,并且要尽可能准确地评估用户参与V2G行为的不确定性。为了提高用户对V2G技术的认同和采用率,可以从以下几个方面努力:开展广泛的宣传和教育活动,向用户普及V2G技术的优势,解释其对环境、经济的积极影响;设计简洁直观的用户界面,确保用户能够轻松理解和操作V2G系统,优化充电过程中的用户交互体验,减少用户的操作负担;引入一些经济激励措施,例如制定合理的电价政策,提供V2G用户相应的奖励,从而提高用户的参与度。在准确评估用户参与度方面,可以从以下2方面努力:①数据收集与挖掘:加强对用户行为数据的收集与挖掘,通过对大量数据的分析,可以更全面地理解用户行为的

模式和规律,提高评估的准确性;②模型优化与创新:不断优化和创新评估用户行为的模型和方法,结合机器学习、深度学习、Agent-Based模拟等先进技术,不断改进现有的模型,提高评估的精度和效率。

## 5 结束语

在双碳战略的大背景下,V2G技术的研发将有效推动风能光能等可再生能源的消纳,提高电网调节裕度,增强电网稳定性,因此V2G技术在全球范围内收到了广泛关注。目前欧美和日本等国家在V2G技术研发和标准制定方面仍处于领先水平,本文通过对英国开展的EV-elocity项目进行分析,总结了该项目在开展过程中充电策略优化、V2G的环境价值和电池损耗等重点研究方向,项目的不足及用户反馈等。结合该项目的经验和我国的实际情况对我国将来的V2G技术研发提出了相关建议。未来,随着各项标准和政策的制定,V2G技术应用会更加成熟,将会减少碳排放,推动绿色能源转型;用户侧也会降低充电成本,并通过向电网提供服务而获得经济回报。V2G技术的成功推广将为社会和经济带来可持续发展,实现电动汽车与电力系统的良性互动。D

## 参考文献:

- [1] 陈鹏,刘友波,袁川,等.考虑电动汽车充电模式的配电网可开放容量提升改造策略[J/OL].电网技术,1-18 [2024-04-10]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2236>.  
CHEN Peng, LIU Youbo, YUAN Chuan, et al. Strategy for enhancing the available capacity of distribution networks considering electric vehicle charging modes [J/OL]. Power Grid Technology, 1-18 [2024-04-10]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2236>.
- [2] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J/OL].电力系统自动化,1-21 [2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240207.2141.004.html>.  
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-21 [2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240207.2141.004.html>.
- [3] 季韵秋,李锐华,胡波.一种户用型多端口能量路由器功率协调控制策略[J].电机与控制应用,2023,50(10):31-38.  
JI Yunqiu, LI Ruihua, HU Bo. A power coordination control strategy for a household multi-port energy router [J]. Electric Machines and Control Application, 2023, 50(10):31-38.
- [4] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].电力系统自动化,2023,47

(18):17-32.

PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18):17-32.

- [5] 谭俊,张世通,刘广一,等.电动汽车参与多元电碳市场策略框架研究[J].供用电,2022,39(12):59-66.  
TAN Jun, ZHANG Shitong, LIU Guangyi, et al. A strategic framework research for integrating electric vehicles into joint electricity and carbon market [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12):59-66.
- [6] 张元星,刁晓虹,李涛永,等.全球车网互动标准进展研究及相关建议[J].电力信息与通信技术,2023,21(2):13-24.  
ZHANG Yuanxing, DIAO Xiaohong, LI Taoyong, et al. Research on the progress of global vehicle to grid standards and relevant suggestions [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(2):13-24.
- [7] 李立理,张剑,刘雨薇,等.美国加州车网互动政策标准与市场机制最新进展及其启示[J/OL].电力系统自动化,1-9 [2023-12-28].  
LI Lili, ZHANG Jian, LIU Yuwei, et al. The latest development of policy, standards and market mechanism of Vehicle-Grid integration in California and its implications [J/OL]. Automation of Electric Power Systems. 1-9 [2023-12-28].
- [8] EV-elocity project final report [EB/OL]. [2022-06-21]. <https://www.ev-elocity.com/news/full-report-carbon-cost-and-battery-conditioning-benefits-for-vehicle-to-grid-chargingpoints/>.
- [9] T M N B, M. S, T Q D, et al. A study of reduced battery degradation through state-of-charge pre-conditioning for vehicle-to-grid operations [J]. IEEE Access, 2021(9):155 871-155 896.
- [10] 程奕凌,张腾飞,吴巨爱,等.基于双层有向图的多微网优化协调运行控制[J].电力系统自动化,2022,46(21):20-29.  
CHENG Yiling, ZHANG Tengfei, WU Juai, et al. Optimal coordinated operation control for multi-microgrid based on bi-level directed graph [J]. Automation of Electric Power Systems. 2022, 46(21):20-29.
- [11] 高爽,戴如鑫.电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J].电力系统自动化,2023,47(18):60-67.  
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle aggregation participating in frequency-regulation ancillary service market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18):60-67.
- [12] R K, D S, E W, et al. Optimal V2G scheduling of an EV with calendar and cycle aging of battery: an mILP approach [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024:1.

### 作者简介:

张占龙(1988),男,河南安阳人,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

杜渐(1988),男,江苏淮安人,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

郑嘉琪(1992),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

(责任编辑 郝 逊)