

从试点到成熟应用：V2G发展展望

山博轩¹, 杨郁²

¹纽卡斯尔大学科学、农业和工程学院, 英国 纽卡斯尔

²石家庄供电公司, 河北 石家庄

收稿日期: 2024年5月29日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

V2G (Vehicle-to-Grid) 技术作为一种创新的能源解决方案, 通过实现电动车与电网之间的双向能量交换, 不仅优化了电能使用, 也为可再生能源的消纳和电网负荷调节提供了新的思路。本文综述了V2G技术的主要研究方向, 包括充电技术、对电网的影响、电网优化调度等, 重点分析了国内典型试点, 包括车网互动、综合能源系统、地区性综合示范等, 提出了试点中存在的限制与问题, 并对V2G技术未来发展进行展望, 并对试点工作的开展提出建议。

关键词

V2G, 需求响应, 新能源消纳, 新型电力系统

From Pilot to Mature Application: V2G Development Prospects

Boxuan Shan¹, Yu Yang²

¹Faculty of Science, Agriculture & Engineering, Newcastle University, Newcastle, UK

²Electricity Power Supplying Company of Shijiazhuang, Shijiazhuang Hebei

Received: May 29th, 2024; accepted: Jun. 18th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

Vehicle-to-Grid (V2G) technology, as an innovative energy solution, facilitates bidirectional energy exchanges between electric vehicles and the power grid. Not only does it optimize the use of electricity, but it also offers new approaches for the integration of renewable energy and grid load management. This article provides an overview of the main research directions of V2G technology, including charging technology, its impact on the power grid, and power grid optimization and scheduling. It focuses on analyzing typical domestic pilot projects, including vehicle grid interaction,

文章引用: 山博轩, 杨郁. 从试点到成熟应用: V2G 发展展望[J]. 智能电网, 2024, 14(2): 11-20.

DOI: 10.12677/sg.2024.142002

comprehensive energy systems, and regional comprehensive demonstrations. The limitations and problems in the pilot projects are proposed, and the future development of V2G technology is discussed. Suggestions are also made for the pilot work.

Keywords

V2G, Demand Response, Renewable Energy Integration, New Power System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

新型电力系统具有清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动的特征。新型电力系统构建需要形成清洁主导的能源供给体系, 负荷侧特性由传统消费者向产消者转变, 实现各类能源互通互济、灵活转换, 提升整体效率。而新型电力系统构建需要融合应用“大云物移智链”等新型数字化技术, 实现新型电力系统能量流和信息流的深度融合, 实现源网荷储多要素、多主体协调互动[1]。为加强新能源消纳, 在用户侧要加快微电网、储能、“互联网+”智慧能源等技术攻关, 用市场办法引导用户参与调峰调频、主动响应新能源出力变化[2]。

根据电动汽车(Electric Vehicle, EV)具有移动分布式能量存储的特性, 在 V2G 架构下, 电动汽车同时具备源、荷、储三重属性, 具有“双向通信, 双向输能”的特性。V2G 技术(Vehicle to Grid)为智能电网提供了一种全新的服务: EV 在电网的统一调度和控制下, 完成与电网之间双向的信息流和电力流的互动和交换, 利用大量储能作为电网和可再生能源发电的缓冲, 优化智能电网中能源供需双方平衡, 同时惠及电网侧与用户侧, 可平抑电网负荷、提升可再生能源消纳、改善用户经济效益、减少网损等[3] [4]。

2. V2G 涉及的关键技术研究现状

2.1. 充电与逆变技术

常规充电分为交流慢充和直流快充。交流慢充采用单相交流电源供电, 充电功率一般不超过 7 kW, 充电桩仅为汽车车载充电机提供交流充电电源以及必要的保护、计量、结算等辅助功能, 一般用在居民小区等需要长时间停车的场合[5]。

直流快充一般采用三相交流供电, 带有电力电子变换模块, 为汽车提供电压和电流可控的直流充电电源, 充电功率通常在 60 kW 以上, 充满电平均需要 40~60 min, 是公共场所充电的重要形式。为了将充电时间缩短到 10~15 min, 单枪充电功率 350 kW 及以上的大功率直流充电技术成为研究热点。对于纯电动乘用车需要将电压平台从 500 V 升级到 800 V, 零部件成本有所提高。大功率直流充电关键技术主要包括两方面: 一是由宽电压增益 DC-DC 电路拓扑和宽范围软开关等构成的高效大功率变换技术; 二是实现多个充电模块并联的无主均流和投切控制的智能充电控制策略[6]。

无线充电技术包括电磁感应式、磁耦合谐振式、微波式。采用电磁感应式充电的能量转换效率高, 并且功率传输范围宽, 但是传输距离较近, 需控制在 0.1 米内。磁耦合谐振的传输线圈一次侧(原边)与二次侧(副边)谐振频率不会轻易受到外界磁场的干扰, 传输效率高, 有效距离在几米内。微波辐射的方向具有全方位性, 但能量损耗大, 传输效率较低, 且辐射对人体有一定的影响[7]。

2.2. 通信协议标准化

电动汽车与充电桩之间的通信(V2C—Vehicle-to-Charger)方面, ISO 15118 是支持电动汽车与充电站之间通信的国际标准, 包括充电控制、付款方法以及车辆认证等多个方面, 能够实现充电过程的自动化和个性化。IEC 61851 涉及电动汽车充电系统的通信接口要求, 包括充电模式和连接器类型等。CHAdeMO 标准最初由日本汽车制造商和电力公司共同开发, 可支持双向充电, 适合于 V2G 场景应用。

充电桩与后端系统之间的通信(C2B—Charger-to-Backend)方面, OCPP (Open Charge Point Protocol)是一种开放的应用层协议, 用于电动汽车充电站和中央管理系统之间的通信。它支持远程监控、控制充电桩、固件更新、计费 and 统计数据的收集等功能。OMA-DM (Open Mobile Alliance Device Management), 用于远程设备管理, 包括固件更新、配置和故障管理等。

电网与充电桩/电动汽车之间的通信(G2V/G2C—Grid-to-Vehicle/Grid-to-Charger)方面, IEC 61968/IEC 61970 属于智能电网通信框架, 用于电网管理系统和其他电网操作系统之间的数据交换。OpenADR 是一种信息交换协议, 支持电力系统的需求侧响应(DM)管理, 是一种开放、高度安全、双向的信息交换模型和智能电网标准, 支持能源供应商向电动汽车充电站及电动汽车用户发送需求响应计划和价格信息, 实现电动汽车智能充电管理。

总体上看, 影响力较大的标准主要包括 ISO、IEC, 而 OCPP、OpenADR 作为充电站与负荷聚合商、能源供应商之间的开放式通信协议已被广泛应用。从全球车网互动试点案例相关介绍来看, CHAdeMO 是目前车桩间实现双向充放电功能使用最多的成熟标准, 但技术开放性和标准兼容性仍有待进一步提升[8]。

2.3. EV 充放电对电网的影响

2.3.1. 电能质量影响

大规模 EV 接入电网会对电网运行的稳定性、电能优质性、电网运行经济性造成影响。比如, 由于 EV 是非线性负载, 接入电网时会产生谐波污染, 这些污染会造成电能波形的畸变, 甚至影响变压器的使用寿命[9]。

EV 接入配电网最常见的问题是不对称负荷导致电网三相电压的不对称与谐波污染。对于三相不平衡, 可以采用三相电压型变流器联络配电网中的各个变压器实现负载合理配置, 合理规划充电桩位置, 降低电网电压失衡。对于 EV 充电时产生谐波污染引起电网电压和电流波形的畸变的问题, 较为成熟的抑制方法有有源滤波与无源滤波。无源滤波电路结构相对简单, 但只能消去特定次数谐波。有源滤波可以动态抑制, 还可进行无功补偿。目前我国有源滤波技术仍处于低压阶段, 高压侧研究较少。此外, EV 充放电还会造成孤岛效应, 威胁电力施工人员生命安全, 因此如何将 EV 入网的不利影响降到最低仍是当前重点研究方向[10]。

针对电动汽车充电随机性引起的配网电压质量劣化, 可以通过有序充电控制[11]、EV 与分布式电源协调控制[12]、V2G 模式改善电能质量[13]。文献[14] [15]分析了电动汽车充电负荷的不确定性及其影响因素, 从电动汽车与电网的互动架构、通讯、管理机制和控制方法等方面对电动汽车与电网互动的解决方案进行了探讨, 并指出电网需要具备足够的监测及管理能力的支持大规模电动汽车的接入[14] [15]。

2.3.2. 负荷预测影响

精准的负荷预测是设备提高利用率、电网提高稳定性、电能质量改善的必要条件。充电负荷预测是根据过往数据探索充电负荷变化趋势。

目前, 我国多数研究 EV 充电负荷的预测方法是通过蒙特卡罗法进行抽样模拟。但使用蒙特卡罗法进行抽样时, EV 充电概率密度函数考虑影响因子较少, 仅通过划分车型、单纯考虑用户出行特征、预测

时间固定, 并存在参数设置主观等问题, 较少考虑城市发展程度、产业结构差别、交通情况、地形差异、用户充电心理、排队时间以及有关用户充电行为成本等因素影响预测 EV 充电负荷。此外, 由于 EV 渗透率、充电桩类型、普及现状、地理位置都对充电负荷有所影响, 所以 EV 充电负荷预测也需“因地制宜”。文献[16]研究了基于供需两侧协同优化的电动汽车 V2G 充放电负荷时空分布预测方法。通过求取供需两侧协同优化方案, 得到最优充电和放电时段, 并分别进行负荷预测[16]。

2.4. 考虑 V2G 的电网优化调度策略研究

在考虑到电动汽车充放电参与电网负荷调整时, 电网的优化调度策略应考虑诸多影响因素。如果以提升电动汽车参与调度的灵活性为目标, 可以考虑调整充放电速度的算法[17]。为了提升客户参与电网调控的积极性, 还应考虑到电池充放电可能造成的电池劣化问题, 但是, 如果算法以减少电池的充放电次数为限制条件, 会影响调度的经济性[18]。如果客户通过需求响应机制参与调峰, 还应考虑充电过程中临时改变充电计划的情况。对集中式充电站进行实时控制, 可以避免算法的局限, 但是在一定程度上会影响电动汽车的储能应用效率[19]。

综上, 在电网优化调度的算法中, 需要集中考虑各种条件限制和因素影响, 而且这些因素还有一定的内在制约关系, 往往难以实现全部结果的最优。

随着 EV 数量的增长及分布式能源接入的不断增加, 分布式光伏和 EV 的互补调度被认为是一种极具潜力的发展模式, 城市中分布式光伏与 EV 互补调度不需要额外的设备就能进行工作, 是未来微网系统的重要发展方向。文献[20]以就近消纳光伏、减小并网节点功率波动、最大化经济收益、满足 EV 用户电量需求为目标, 构建光伏-EV 互补模型, 优化 EV 的运行策略, 使其能够根据系统内关键信息决定当前时刻 EV 充放电幅度, 实现分布式光伏-EV 的智能互补调度[20]。文献[21]针对 EV 接入新能源微网(NEMG)后的经济运行问题, 建立计及 EV 有序充放电行为和车主综合满意度的 NEMG 多目标分层调度数学模型并提出求解计算方法。EV 层以最大化车主的综合满意度为目标, 通过 CPLEX 软件求解得到 EV 充放电计划并传递给 NEMG 层。NEMG 层基于 EV 充放电计划调整微电网内部可控分布式电源出力, 以达到最小化系统综合成本和交互功率波动的目标。仿真结果表明, 含 EV 微电网分层架构相比不分层架构能够实现 EV 和 NEMG 的互利共赢, 验证了所提方法的科学性及其有效性[21]。

3. V2G 技术的应用与试点

3.1. V2G 应用框架

3.1.1. 常用的 EV 调控方式

包括分散式控制、集中式控制和分层式控制。

分散式控制模式决策过程在本地进行, 多适用于无法集中管理、EV 即插即用的应用场景, 建设成本低, 但难以保证整体最优。集中式控制模式将区域内的 EV 通过一定形式聚集, 由调度中心统一管理, 控制精度高, 可以实现全局最优, 但对系统的双向通信能力和信息存储能力要求较高、计算压力较大。

分层式控制模式综合了集中式控制和分散式控制的特征, 在调度层和本地层之间增加了由聚合商组成的聚合层, 分担了区域的 EV 数据统计、可调度容量评估以及 EV 功率就地分配等任务, 并对分散的 EV 进行统一且灵活的管理调度, 能够降低集中式的通信和计算压力。现有的车网互动技术研究大多在分层式控制框架的基础上[22]。

3.1.2. V2G 融合架构和平台建设

V2G 车网融合架构在逻辑上可划分为三个层次, 即物理层、平台层及融合层。

物理层为车网交互的物理基础,即电动汽车、充电站、智能电网。通过传感和通信技术采集电动汽车和充电桩状态信息,包括充电桩的运行状态,收集电动汽车用户行为信息,实时计算可调度的容量等,并上传到平台层。鉴于电力汽车的高速移动特性,需考虑移动通信的可靠性和信息安全问题。

平台层进行各类信息收集、储存、计算,并实时下发指令。平台层包括充换电运营管理平台和电网调控平台。充换电运营管理平台,可以是充换电服务商的运营平台,也可以是聚合商的运营平台。负责户、车、桩和其他社会平台的信息采集、充电服务管理等功能;连接电动汽车用户和电网,对电网实现信息反馈与调控指令下发,对电动汽车用户进行可调度能力分析和充放电引导调控。通过平台,用户可以直接参与或者聚合后参与电网调控。

融合层是 V2G 应用服务层,也是多方交易平台。在此,聚合电动汽车负荷资源,推动参与市场化电力交易和电网优化运行,通过多方灵活交易加快推动形成源网荷储互动。目前,此平台一般为需求响应平台,具有需求侧管理、负荷资源管理、有序用电等功能。除此之外,还需要提供 V2G 互动管理功能,比如可调 EV 群体日前/日内充放电计划的计算与生成、电网级车网互动策略的生成及分解、市场出清等功能[23]。

3.2. 国外试点概况

全球范围内的车网协同示范实践非常活跃。试点示范项目主要分为技术方案探索、商业模式探索和社会效益验证三类,其中近两年商业模式探索项目的比例逐渐提升,也从侧面说明 V2G 模式的产业化进程在逐渐加快。从具体应用场景来看,车网协同多通过参与电力市场服务获得收益,时移、频率响应、地区服务、电力套价、紧急供电依次位居应用场景的前五位,其中 50% 以上的项目探索了电动汽车在电力市场上的时移服务,30% 以上的项目探索了电动汽车参与电力市场频率响应的服务[24]。

3.3. 国内试点研究情况

3.3.1. 车网互动方面

目前我国已有多个车网互动项目在全国试点,并已在部分地区实现了商业化运营。

据不完全统计国网电动汽车服务有限公司目前已在浙江、上海、江苏、河北等 15 个省市建设了近 50 个 V2G 车网互动项目,与国内 8 家主机厂实现了 10 余款 V2G 车型开发,共有近 4000 台电动车参与过车网互动,开展台区重过载治理、低电压调节以及提升配网台区分布式清洁能源接入和消纳能力,有效发挥电动汽车移动储能特性的潜在价值[25]。

市场交易方面。2020 年 4 月 15 日,国家电网有限公司华北分部在国内首次将车网互动(V2G)充电桩资源正式纳入华北电力调峰辅助服务市场并正式结算。根据统计和测算,京津唐电网供区内约有 40 万辆电动汽车,若通过 V2G 方式实现有序车网互动,可提供 180 万千瓦可移动的优质调节资源。参与电网实时调控和调峰辅助服务后,电动汽车日平均调峰收益约占其充电费用的 60%,可大幅度降低充电成本,有效提升电动汽车用户参与的积极性[26]。

有序充电方面。北京环球影城园区内共建设 901 个充电桩,包括 861 个新型交流有序充电桩、37 个直流快充充电桩以及 3 个大功率充电桩。智慧有序充电桩、可以智能调节充电桩的输出功率,在满足车主充电需求前提下,为车主自动选择低电价时段进行充电,降低用电成本[27]。

3.3.2. 综合能源系统建设应用

国网天津电力加快充电基础设施建设,构建“光储充换”绿色充电系统和“冷热电”综合能源系统,建成国内首座集数字化、网联化、生态化功能于一体的津门湖新能源车综合服务中心。中心设有 71 个智能充电车位,利用屋顶和车棚建设 379 千瓦光伏电站,配有 1000 千瓦时储能设施和绿色能源管理服务平

台, 构建了一套“2+1”的源网荷储交直流绿色微能源网。截至 2023 年 8 月, 光伏发电累计 85 万千瓦时, 储能累计充放电量 126.31 万千瓦时, 全站实现节能减排二氧化碳 11640 吨, 楼宇能源自给率达到 85%, 整体达到绿色二星建筑和“近零能耗”标准。中心提供国内技术最先进、充电方式最全、充电安全性最高、互动性最强的充电体验, 自投运以来, 累计充换电 50.43 万次, 充换电量超 1082 万千瓦时, 日最高充换电量 2.4 万千瓦时, 在天津市公共充电站排名第一位[28]。

3.3.3. 个人 V2H

文献[12]中, 北京中再大厦 V2G 试点项目是全国第一座 V2G 商业化运营项目, 共包括 12 个 V2G 充电桩可实现 V2G 车辆的双向充放电。该项目主要对 V2G 模式的商业化运行模式进行探索。低谷电价为 0.3023 元/千瓦时(23 点到次日 7 点), 高峰电价为 1.4167 元/千瓦时, 而在高峰时段放电价格为 0.7 元/千瓦时(10 点到 15 点; 18 点到晚上 21 点), 具备 V2G 功能的电动汽车可在用电高峰时段放电为中再大厦供能。在谷充峰放的模式下, 参与该项目的 V2G 车主每度电收益接近 0.4 元, 年收益可达到 4000 元。

3.3.4. 地区性综合示范实践

以上海市大规模电动汽车 - 电网智能互动示范工程为例[29]。

1. 基础条件:

电动汽车体量: 截止到 2021 年底上海市电动汽车保有量超过 62 万辆, 累计建成各类充电桩超过 50 万个, 均居全国首位。

技术基础: 包括平台与标准。在全国率先建成省级车网互动平台, 并牵头发布了国内首个电动汽车智能充电桩及互动响应技术标准。在上海市开展车网互动已经具备比较良好的技术条件。

电网需求:

调节资源需求: 上海电网 40%以上的电力是从区外受入, 其中清洁能源占比超过 70%。电网对灵活调节资源是有实际需求。

新能源消纳需求: 根据规划, 在“十四五”期间, 上海规划建设深海海上风电, 大约在 500 万千瓦左右。电网有消纳本地新能源发电的压力。

负荷调整需求: 上海电网最大峰谷差一般在 5 月份左右, 此时电网负荷处于低位且处于水电的丰水期。因此, 在用电低谷期的填谷负荷需求比较显著。

2. 配套设施

政策配套。上海市政策配套比较齐全, 全面覆盖了车网互动基础设施的互联互通、智能化推广、价格激励、互动体系建设以及示范应用等几方面, 为上海市车网互动提供了非常坚实的政策保障。

统一标准。2021 年上海市在国内首个发布了关于车网互动方面的地方标准, 《电动汽车智能充电及互动响应的技术要求》, 如享受上海市相关的财政补贴, 均需满足地方标准的技术要求, 能够与上海市电力需求响应管理平台的互动, 实现车网的智能交互。智能自动充电桩要通过智能充电管理平台, 接受上海市电力需求响应平台的调控。

平台建设。初步建成上海市车网互动公共服务平台, 主要包括资源管理、市场运营、运营商子系统和系统管理等几个方面。通过平台实现了对上海市充电负荷的可观、可测、可调和可控, 逐步实现了上海市充电桩资源和充电负荷的统一接入、统一管理和统一调控。平台具备充电资源的分类、分组管理功能, 对不同的编组实现不同的调控策略。平台打通了与电网侧数据中台的数据交互关系, 实现了电网拓扑和用户电力信息的全链路双向溯源, 从而可以实现局部充电桩的精准调控。

3. 商业模式

以需求响应为主, 分中长期、日内和快速三个大类, 六个小时的需求响应品种。调控价格, 削峰从

2.4 元~9 元/千瓦时到每千瓦时, 填谷从 0.96 元~3.6 元/千瓦时。在 2022 年 7 月 26 日~28 日, 整体申报规模超过 10 万千瓦。交流充电桩超过 3000 多个, 直流充电桩超过 4000 个, 整体最大削峰达到 1.4 万千瓦, 创造上海地区车网互动的最大规模。

3.4. 问题与限制

从以上试点内容中可以看出, 当前大部分充电设施参与市场的运营模式仍以利用低谷电价的有序充电为主, 车主自发形成利用低谷电价的充电习惯, 在一定程度上形成了填谷的负荷调控资源。与有序充电相比, V2G 模式可调节电量规模要大得多, 可参与电力市场交易的场景更多元, 车主和负荷聚合商可获得的远期收益也更大, 对电网的新能源消纳、参与调峰辅助服务、源网荷诸互动, 都将发挥积极的作用。

同时, 也应看到, V2G 技术的推广应用, 车、桩、网的融合互动, 还存在一些问题和限制。

3.4.1. 商业模式不成熟

目前电动汽车参与需求响应的试点大多依赖半行政化的有序用电系统配合才能够顺利开展。如果没有成熟的商业模式, 各类试点缺乏可持续性。

3.4.2. 存在成本疏导问题

V2G 的推广应用与自动化需求响应的实施, 涉及先进的智能化终端、通信技术、需求响应系统等支撑, 前期投入高。在没有成熟的盈利的商业模式的情况下, 难以大范围推广。

3.4.3. 技术细节还有待进一步验证和研究

电动汽车参与电力需求响应业务发展刚起步, 试点项目开展数量有限, 因此缺少实测数据用于负荷响应特性研究, 一些技术特性如电动汽车充电基线的认定仍存在争议, 如何协调需求响应与峰谷电价政策的关系还需机制创新[30]。

3.4.4. 缺乏有效的 V2G 引导策略

影响 EV 用户充放电行为的除了峰谷电价, 还有其他很多因素, 包括充电桩的位置、电池的荷电状态、充放电对电池的损耗、交通情况等。就目前而言, 续航仍是影响购买的主要因素, 因此, 频繁充放电对电池的影响成为制约用户参与电网互动重要原因。

4. 发展展望与建议

V2G 技术为电网提供辅助服务, 参与频率调节、需求响应等, 有助于提升可再生能源利用率, 更好的应用气候变化和环境压力。同时, 可以推动 V2G 上下游产业、技术发展, 促进新质生产力提升。随着电动汽车的持续普及和推广, 不断加强政策与法规支持, V2G 技术应用将更具可行性和价值性。

4.1. 深化电池技术与寿命管理研究

电池技术是进一步拓展 V2G 应用的基础和瓶颈, 需要可靠的续航里程、充放电次数和使用寿命的保障。在电池技术方面, 需积极探索新型电池技术, 开展全固态电池研究, 以提高能量密度和循环寿命。研究如何优化电动汽车电池的使用, 以延长其寿命。开发高效的电池管理系统, 开展荷电与健康状态估计, 加强故障诊断和热管理, 实现更精确剩余寿命预测。开发智能算法, 对电动汽车充放电进行有效管理, 适应不稳定输出。建立实时数据监控系统, 精确控制电池能量流, 保证能量供需平衡。

4.2. 电网互动与能源管理

开展互动技术研究。研究综合考虑各影响因素的、更精准的需求预测模型, 以预测电网在不同时间

的需求变化。研究电动汽车用户的充电行为及其对需求响应的响应模式，形成多种类用户行为模型。研究电网对大规模 V2G 实施的适应性和承载能力，包括优化调度、多源协同调度，电动汽车大规模、大功率参与 V2G 应用对电网稳定性的影响等。

进一步验证 V2G 的技术细节，明确相关概念和指标，比如负荷基线、充电基线、响应准确度、响应速度与可靠性等。

4.3. 实现平台功能升级

V2G 技术应用过程中，涉及多个主体、多个平台，各平台之间应建立有效的信息交互，实现互联互通，使多平台的功能互相衔接、互相配合，形成多系统集成、跨域协同、运行顺畅、管理高效的有机整体。随着接入 EV 的数量规模不断扩大，系统将承受更大的运行压力，也将积累更多数据，在此基础上，应进一步扩展平台功能。充分挖掘数据价值，提高对负荷、可再生能源出力、充放电曲线的预测的精准度，研究基于电网需求变化的动态电价模型。

4.4. 发挥聚合商的作用

在 V2G 体系中，聚合商扮演着极其重要的角色。他们主要作为连接电动车用户和电网运营商之间的中介，通过聚合多辆电动车的能量存储能力，为电网提供辅助服务和需求响应。同时，聚合商可以将分散的新能源发电设施、储能装置、可调负荷等多种资源进行聚合优化管控，实现源网荷储一体化调节，并参与电网调峰调频和电力市场交易，实现发电侧与用电侧的双侧调节。聚合商通过分布式云和边缘计算可以对聚合的各类终端用户，实现更准确的负载预测和优化调度策略，确保快速准确地响应电网的调节需求。

同时，也应考虑到 V2G 聚合商的商业盈利性质，以及交易初期聚合商与 EV 等市场主体的历史行为信息不足的问题，建立并完善对于二者的行为评估和信用评价体系，通过调度策略的调整，引导二者规范市场行为，激发市场的良性竞争和活跃度。

4.5. 试点工作的相关建议

车网互动示范应用有助于推动车网互动的发展与应用。政策支持、商业模式、技术研究等一方面将支持试点项目建设，另一方面，也将通过试点项目得到验证。

1. 探索更丰富的商业模式。除需求响应服务外，可以扩展参与频率调节、备用/应急服务、储能交易、辅助服务等，形成电动汽车用户的能源 - 经济双向收益的商业模式，打造多方参与、合作共赢的生态系统。为用户提供灵活多样的服务套餐，如按需充电、优先调度、紧急备用电源等，以满足市场的多元需求。

2. 探索政府补贴和政策支持的更多方式。包括政府对项目建设提供财政补贴、对相关方实施税收优惠或低息贷款，降低项目建设直接成本。此外，政府还可以通过制定友好的政策环境，如简化审批流程、提供充电设施建设的用地优先权等，进一步降低间接成本。

3. 探索开展跨行业合作。电网公司、聚合商、汽车制造商和充电设施提供商之间的合作，可以实现资源共享和成本分摊。例如，汽车制造商可以在销售电动车时提供充电桩安装服务，电网公司可以提供地点和电力资源，共同推动 V2G 技术的应用和充电基础设施的建设。

4. 鼓励用户参与。通过设计吸引用户参与的激励机制，如提供充电折扣、优先充电权或电网回馈收益分享，可以激发用户参与电网互动的积极性。在电池管理方面，可以在用户购车的时候，与电力公司或汽车销售商签订有关电池更换的协议，比如约定在电池容量低于某个阈值之前进行一定次数或时长的

充放电, 可以免费更换新电池。对回收的旧电池可用于新能源电厂或者微电网的储能或者调频设备, 当电池使用至完全报废时进行贵重金属的回收。

5. 结语

打造气候弹性强、安全韧性强、调节柔性强、保障能力强的数智化坚强电网, 在对负荷灵活调控方面, 特别是在削峰填谷、新能源消纳方面, 技术还有待进步, 实践有待拓展。随着技术不断进步, 政策和商业模式将更加健全和趋于成熟, V2G 将具有更为广泛的市场接受度, 涌现更加多元化的应用场景, 实现区域电力市场整合, 增强整个电力系统的灵活性和经济性。

参考文献

- [1] 辛保安. 新型电力系统构建方法论研究[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 1-18.
- [2] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.162555>
- [3] 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. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000060>
- [4] 凌嘉伟. 用于 V2G 网络的数据通信安全方法研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2021. <https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000444>
- [5] 华光辉, 夏俊荣, 廖家齐, 等. 新能源汽车充换电及车网互动[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 779-787. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0067>
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究报告·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.11.001>
- [7] 谭泽富, 张伟, 王瑞, 等. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 42-47+111.
- [8] 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. <https://doi.org/10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2023.02.02>
- [9] 魏阳喆. 电动汽车充电对电网影响综述[J]. 时代汽车, 2022(2): 108-109+120.
- [10] 谭泽富, 周正洋, 高树坤, 等. V2G 应用进展综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(3): 222-229.
- [11] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11-18+213. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.31.005>
- [12] 张雷, 李鸿, 韩聪. 一种含光伏储能与电动汽车的节点功率电压控制策略[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 20-23+27.
- [13] Zhang, C., Chen, C., Sun, J., Zheng, P., Lin, X. and Bo, Z. (2014) Impacts of Electric Vehicles on the Transient Voltage Stability of Distribution Network and the Study of Improvement Measures. *Proceedings of the 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Hong Kong, 7-10 December 2014, 1-6. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066085>
- [14] 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+25. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.04.006>
- [15] 田立亭, 张明霞, 汪免伶. 电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 43-49+217. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.31.009>
- [16] 彭伟伦, 马力, 刘琦颖, 等. 基于供需两侧协同优化的电动汽车 V2G 充放电负荷时空分布预测研究[J/OL]. <https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20230832>, 2024-04-28.
- [17] 周天沛, 孙伟. 基于微网的电动汽车与电网互动技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 98-104+117.
- [18] 吕广强, 魏鑫杰, 郭震. 限制充放电切换次数的电动汽车与光伏发电协同调度研究[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1894-1901. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0201>
- [19] 崔明勇, 吕静, 薛思嘉, 等. 考虑电动汽车优先级需求的两阶段优化调度策略[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(4): 20-28.
- [20] 陈宁, 李法社, 王霜, 等. 基于深度强化学习算法的分布式光伏-EV 互补系统智能调度[J/OL]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231846>, 2024-04-28.
- [21] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022,

- 50(12): 63-71. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.211149>
- [22] 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]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240207.2141.004.html>, 2024-04-12.
- [23] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6357-6371. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211267>
- [24] 祝月艳, 石红, 方海峰. 我国电动汽车与电网协同发展现状分析与发展建议[J]. 汽车工业研究, 2021(4): 8-11.
- [25] 北极星储能网. 全国最大规模工业园区车网互动 V2G 项目在河北保定正式投运[EB/OL]. 2021-04-14. <https://news.bjx.com.cn/html/20210414/1147343.shtml>, 2024-04-01.
- [26] 世纪新能源网. 国内首次! 华北将 V2G 充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL]. 2020-04-21. <https://www.ne21.com/news/show-152421.html>, 2024-04-01.
- [27] 搜狐网. 北京环球影城 901 个充电桩、多处大型设施, 背后有强大支撑[EB/OL]. 2021-09-18. https://www.sohu.com/a/490768607_163278, 2024-04-01.
- [28] 财经头条. 数智化坚强电网的“四大特征” [EB/OL]. 2024-02-22. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/1784473157/6a5cc64502002uewp>, 2024-04-01.
- [29] 知乎. 【金砖社区充电论坛】上海市电力需求响应中心副主任 赵建立: 《上海市大规模电动汽车-电网智能互动示范工程建设实践》 [EB/OL]. 2022-09-06. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/561858286>, 2024-04-01.
- [30] 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. <https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.011>