

车网互动的价值匹配与规模化应用路径分析

邓叶航¹, 龚成明¹, 高 剑², 邵长宏³, 郭 杉⁴, 张利利⁵

- (1. 南京德睿特来电源研究院有限公司, 江苏省南京市 210012; 2. 国网四川省电力公司, 四川省成都市 610041;
3. 北汽福田汽车工程研究总院, 北京市 102206; 4. 内蒙古电力科学研究院, 内蒙古自治区呼和浩特市 010020;
5. 青岛上合特来电虚拟电厂科技有限公司, 山东省青岛市 266318)

摘要: 针对车网互动(V2G)理论潜力与现实应用间的矛盾,提出其规模化发展是一个从“网的需求”向“车的自觉”演进的过程。系统阐释了V2G在能力与规模上与新型电力系统需求的匹配特性;提出V2G运营商作为新型经营主体,在承担“确定性创造者、价值变现者与技术创新者”多重角色的基础上,将进一步发展成为新的平衡责任与可靠性责任主体,并探讨了实现这一目标所需的关键技术和机制;在此基础上,指出电动汽车的角色演化是推动V2G实现规模化应用的关键因素,同时构建了V2G向交通-能源深度融合演进的四阶段路线图,以期产业协同发展提供理论参考。

关键词: 新型电力系统; 车网互动; 价值匹配; 规模化应用; 灵活性资源; 新型经营主体

0 引言

面向双碳目标,中国正同步推进以新能源为主体的新型电力系统建设^[1-2]与道路交通领域的全面电动化^[3]。风电、光伏等可再生能源的高比例接入,给电力系统的电力电量平衡与安全稳定运行带来巨大挑战。大规模车网互动(vehicle-to-grid, V2G)^[4-5]在理论上可以形成规模化的可调节负荷与移动储能资源池,然而却面临着显著的“困境”:当前电网调控体系和配套技术支持系统尚不具备对行为高度不确定的海量、分散的车辆主体进行统筹分析和精准调控的能力;电动汽车用户难以用经济有效的方式,在行驶计划、电池容量和充电时段等多重约束下灵活响应电网需求;大规模无序充电及被动响应甚至会加剧电网运行压力,使其由潜在的灵活性资源转变为制约系统安全的额外风险^[4]。V2G的挑战具有全球普遍性,美国能源部在其2025年《车辆到电网集成评估报告》中亦指出,尽管V2G对实现交通电气化和电网现代化至关重要,但其实施面临着技术、市场、标准和安全等多方面的巨大挑战^[5]。

在此背景下,国内外围绕V2G领域已开展系统的理论研究,形成了从技术体系到工程实践的较为丰富的研究积累,但仍存在一些关键性不足。在V2G体系框架研究方面,文献[6-7]分别从V2G整

体架构、技术体系和运营模式等方面,对V2G产业演进的总体框架与关键技术进行了综述,为V2G价值挖掘提供了重要参考。然而,此类研究较少从新型电力系统多维需求与电动汽车多重约束之间的耦合关系出发,系统阐释V2G在满足系统需求方面的价值所在;在聚合建模与调控技术方面,文献[8-9]系统梳理了现有V2G聚合建模方法在模型泛化能力、评估维度与量化表征精度等方面存在的问题,提出V2G面对不同市场需求的可调容量建模方法;文献[10]总结了V2G调控方面存在的功率波动与分解偏差的问题,提出面向大规模V2G调控的集总功率分解策略。然而,上述工作搭建的模型仍偏局限,对于推动规模化V2G所必须面对的社会化摩擦成本关注不足。例如,在电网-运营商-用户多主体协同过程中产生的信息不对称、多主体责任分担不清、电池衰减风险归属及用户参与不确定性等问题,都缺乏刻画与应对分析;在市场机制与商业模式方面,已有研究关注V2G在现货市场、辅助服务市场及绿电交易环境下的参与方式及交易策略^[11-13],并探索规模化V2G的收益实现方式^[11,13-15]。然而,对于谁来承担将分散资源转化为可靠电网资源所需的系统工程成本,以及如何系统性降低摩擦成本,仍缺乏深入探讨;在标准与技术规范方面,围绕充换电设施有序充电、V2G双向能量互动及互动响应技术,国内已陆续出台了一系列标准^[16-17],中国电力企业联合会发布的《车网互动技术标准体系(2025版)》^[18]更是明确了V2G标准体系框架,覆盖V2G全产业链环节。在V2G工程实践方面,已由早期的商业前景

收稿日期: 2025-09-30; 修回日期: 2026-06-01。

上网日期: 2026-06-17。

内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2022JBGS0043)。

探索^[19],逐步过渡到国家层面的规模化应用试点阶段^[20-21]。然而,正如文献[22]指出,目前的工程实践仍主要集中于特定区域或特定平台场景,且大多实现方式仍以有序充电为主,距离形成常态化、可复制和可推广的V2G运行机制尚存在明显差距。值得注意的是,现有研究在分析V2G发展路径时,车企往往被定位为传统的设备制造主体,较少关注其在车辆能源属性嵌入、双向充放电能力定义及能源生态构建中的战略主动性。然而,从产业实践来看,车辆层面能否系统性支持双向充放电功能,正是当前V2G从有序充电迈向规模化充放电应用的关键瓶颈之一。

综合上述分析,V2G向双向充放电规模化发展所面临的关键挑战在于实现电力系统价值链和汽车产业价值链博弈之间的高水平均衡:一方面,通过技术标准规制、政策激励以及聚合商的服务产品设计有效消除电力系统价值链上的摩擦成本,让汽车产业对V2G的相关投入建立确定性的预期;另一方面,汽车产业通过研发投入有效释放动力电池的富余循环能力并提供商业化的质保支持双向充放电,大幅拓展电力系统价值链的空间。

本文围绕上述V2G规模化发展的内在逻辑,对其价值基础、实现主体、关键推动因素与应用路径进行了系统分析。首先,立足新型电力系统需求,深入分析了V2G的多维度价值匹配逻辑及其规模化支撑基础;其次,阐述了以V2G运营商为代表的新型经营主体^[23]在降低摩擦成本、实现价值塑造与传递中的关键作用,并进一步分析了其所需的核心技术与市场机制;再次,指出电动汽车角色演化是推动V2G规模化落地的关键变量,进而探讨车企由“自发响应”走向“自觉布局”的战略转型路径;最后,在上述分析基础上,构建了V2G规模化发展从“网的需求”到“车的自觉”的四阶段演进路线图。

1 新型电力系统下V2G的价值逻辑

1.1 新型电力系统的灵活性与可靠性需求

新能源发电的高度不确定性让灵活性成为新型电力系统中的紧缺资源^[24],国际能源署早在2018年的报告便指出,灵活性是电力系统的新特征^[25]。化石燃料机组的逐步退出引起系统惯量的大幅降低,大量电力电子设备的应用增加了系统故障诱因及故障演化的复杂性,将给新型电力系统的安全可靠运行带来全新的挑战,近期发生的欧洲伊比利亚半岛大停电事件深刻揭示了这一问题^[26]。面对这样的挑战,新型电力系统平衡能力及内禀特性^[27-28]须得到系统强化与提升,迫切需要在以下3类资源的供

给上取得关键突破:

1)充分挖掘和激励用户侧的负荷转移(load shifting,LS)资源。新能源占比提升后净负荷的峰谷差突出,相比传统电力系统中主要的削峰应用场景,LS消纳新能源的填谷价值尤其突出。

2)新增多类型的储能(energy storage,ES)资源,通过能量时移平衡多时间尺度下新能源出力余缺,有效降低化石能源机组的容量需求,从而充分释放新能源发电容量,大幅提升新能源消纳水平。

3)构建全新的系统支撑(system support,SS)资源,包括快速频率响应和爬坡等高性能有功调节能力,故障穿越能力以及虚拟惯量、虚拟阻抗、无功调节和黑启动等构网能力。

LS和ES资源的需求在时空尺度上呈现新特征:受气象学基础制约,新能源日前出力预测准确性在短期内很难取得突破^[29],系统日前至日内时间尺度上的调节压力尤为突出;空间上,源荷储广泛分布于配电网末端,需要“大电源、大电网”与“分布式”兼容并举、多种电网形态并存,共同支撑系统安全稳定和高效运行^[2,30]。

1.2 V2G的价值适配

V2G能够为新型电力系统提供上述3类资源,其中,最先具备规模化应用基础的是LS资源。其本质在于电动汽车充电时间的安排具有显著的调节空间,可在价格信号的引导下实现跨时段的LS,而刻画这类LS能力的核心工具是价格弹性模型。文献[31]系统构建了多维价格弹性矩阵,对分时电价条件下负荷在不同时段之间的转移机理进行了理论分析和样本研究。结果表明,常规工业及居民负荷的价格弹性通常集中在较低区间,其绝对值一般不超过0.2,体现出传统用电负荷在时间维度上的刚性特征。

近年来,已有较多研究将价格弹性分析方法引入电动汽车灵活性分析之中^[32-33],从理论上论证了电动汽车负荷在价格引导下具备更强的跨时段LS潜力。然而,上述研究大多基于仿真数据或假设参数开展分析,尚缺乏基于真实运营场景、覆盖实际用户行为的直接实证支撑,对电动汽车充电负荷价格响应的强度及其与常规负荷之间的差异仍缺乏清晰证据。

在实际工程应用中,特来电在华北、华东、西南等地区参与调峰和需求响应业务的过程中,持续观测到电动汽车充电负荷对价格信号具有较显著的响应特征。为进一步从实证角度分析充电负荷的价格弹性,特来电在成都市、海口市和上海市3个城市各

自选取两处地理位置存在一定间距,但服务半径与外部条件高度相近的充电站开展对比分析。如图1所示,固定电价场景用于刻画充电负荷时间分布的相对“自然状态”,分时电价场景用于观察价格信号对用户充电行为的调节作用。在用户行为经过一定适应、各场站日内负荷分布趋于稳定后,选取典型运行日数据进行分析,结果如表1所示。

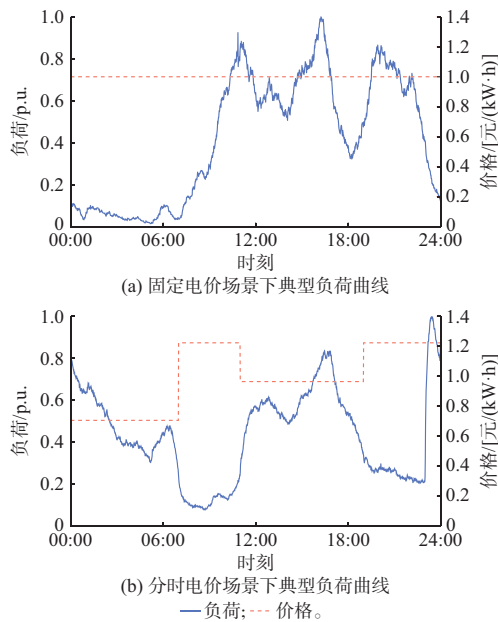


图1 不同电价模式下的充电负荷曲线
Fig. 1 Charging load curves under different electricity price modes

结果表明,在分时电价机制下,充电负荷整体上表现出较为显著的跨时段转移特征。在成都市样本中,低谷时段(23:00—07:00)电价较固定电价下降29.4%,对应充电电量占比由4.51%提升至41.43%;而高价时段(07:00—11:00、19:00—23:00)电价分别上升22.4%,对应电量占比分别下降77.3%和70.0%。在海口市样本中,低价时段(02:00—10:00)电价下降60.0%,电量占比由16.32%提升至78.83%;而高价时段(16:00—20:00、20:00—22:00、22:00—00:00)电价分别上升36.7%、62.0%和36.7%,对应电量占比分别下降83.0%、95.9%和68.1%。在上海市样本中,高价时段(18:00—21:00、21:00—22:00)电价分别上升33.5%和12.6%,对应电量占比分别下降83.2%和78.5%。总体而言,电动汽车充电负荷相较于常规负荷具有更强的价格响应能力,其日内分布更容易受到价格信号的调节,体现出较强的LS潜力。

在此基础上,采用文献[31-34]中一致的价格弹性测算方法分析发现,电动汽车充电负荷的价格响应并非简单表现为减少充电,而更多体现为充电时段的转移。低价时段价格下降会吸引充电需求向该时段集中,而高价时段价格上升则会抑制对应时段的充电行为。由此可见,电动汽车充电负荷的核心价格响应特征在于日内不同时段之间负荷的重新分布,这也是其能够作为高效LS资源参与系统调节的重要基础。

表1 不同电价场景下电量及电价对比
Table 1 Comparison of electricity quantity and electricity price under various electricity price scenarios

城市	时段	固定电价		分时电价		电价变化比例/%	电量变化比例/%
		充电电价/[元/(kW·h)]	电量占比/%	充电电价/[元/(kW·h)]	电量占比/%		
成都市	23:00—07:00	1.0	4.51	0.706	41.43	−29.40	+818.60
	07:00—11:00	1.0	13.06	1.224	2.97	+22.40	−77.30
	11:00—19:00	1.0	59.00	0.965	46.92	−3.50	−20.50
	19:00—23:00	1.0	23.43	1.224	8.68	+22.40	−70.00
海口市	00:00—02:00	1.0	0	0.846	3.20	−15.40	
	02:00—10:00	1.0	16.32	0.400	78.83	−60.00	+383.00
	10:00—16:00	1.0	46.17	0.846	13.55	−15.40	−70.70
	16:00—20:00	1.0	18.81	1.367	3.20	+36.70	−83.00
	20:00—22:00	1.0	17.07	1.620	0.70	+62.00	−95.90
	22:00—00:00	1.0	1.63	1.367	0.52	+36.70	−68.10
上海市	22:00—06:00	0.7	34.92	0.459	30.65	−34.40	−12.20
	06:00—08:00	0.7	0	0.788	1.21	+12.60	
	08:00—15:00	0.7	25.90	0.934	56.12	+33.50	+116.70
	15:00—18:00	0.7	4.30	0.788	5.40	+12.60	+25.60
	18:00—21:00	0.7	19.00	0.934	3.20	+33.50	−83.20
	21:00—22:00	0.7	15.88	0.788	3.42	+12.60	−78.50

进一步分析可见,电动汽车充电负荷内部呈现“高弹性主体”与“刚性内核”并存的结构特征。即便在高价时段,成都市样本中07:00—11:00和19:00—23:00时段的充电电量占比之和仍为11.65%,海口市样本中16:00—20:00、20:00—22:00和22:00—00:00时段的充电电量占比之和仍为4.42%,上海市样本中18:00—21:00和21:00—22:00时段的充电电量占比之和仍为6.62%。这说明部分充电需求仍受用户刚性需求的影响,难以通过价格信号进一步引导转移。因此,在面向实际调控和交易的建模中,应考虑将充电负荷区分为可转移部分与刚性部分,避免将其整体视为完全弹性资源。

除此以外,在低基数负荷和强价格激励场景下,传统基于比例变化定义的线性价格弹性模型容易得到偏高或偏离直觉的表观弹性值。因此,线性价格弹性模型更适用于对响应强度进行初步刻画,而在精细化定价与聚合调控场景中,仍有必要进一步引入分段非线性或饱和修正的弹性建模方法,以更准确描述不同价格区间下的负荷响应规律。

上述典型样本数据从真实运营角度揭示了充电负荷显著的价格响应特征,并表现出较强的跨时段转移能力,特别是在当前全国统一电力市场体系加快建设、部分地区现货市场频现显著峰谷价差甚至负电价背景下,这种高价格弹性特征正是V2G作为高效LS资源参与电网调节运行及现货市场交易的核心价值基础。但是,要获得具有广泛指导意义的电动汽车充电负荷价格弹性模型,仍需基于更大样本、更长周期、覆盖多区域多场景的充电运营数据,结合用户画像与出行链分析等方法开展系统性建模,这也是未来研究的重要方向。

其次,电动汽车动力电池在全生命周期内的可用循环次数相对于其行驶需求可能存在显著富余。为刻画这一特征,本文构建了一个基于行驶里程约束的简化估算指标,用于衡量动力电池在满足车辆出行需求后的循环次数富余度,具体如式(1)所示。

$$E = \left(\frac{C \times r}{R} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为动力电池循环次数富余度; C 为动力电池的保证循环次数; r 为电动汽车满电续航里程; R 为电动汽车全生命周期行驶里程。

需要指出的是,式(1)仅用于在宏观层面评估电池循环寿命的冗余程度,其参数设定采用相对保守的假设。根据2015年发布的国家标准^[35], C 要求达到1 000次以上。对于个人乘用车,目前的平均续航

里程^[36]已达到508 km,考虑不同工况条件下的保守估计,取 $r=400$ km、 $R=200\ 000$ km^[37-38]进行计算,可得 $E=100\%$,表明即使在采用2015年标准最低保证循环次数的前提下,动力电池在满足整车生命周期行驶需求后,仍存在约100%的循环次数富余度。近年来动力电池技术水平已显著提升,主流的磷酸铁锂电池的循环寿命普遍达到2 000次以上^[39],实际富余度将显著高于上述结果。

不同用途车辆的行驶里程差异巨大,导致其可用于V2G的富余寿命呈现显著分化,在评估ES价值潜力时必须予以区分。对于私家车而言,其年均行驶里程约10 000~20 000 km,全生命周期 R 通常在200 000 km左右, E 值较高,是提供ES价值的主力资源池;对于出租车和网约车而言,日均运营里程远高于私家车,全生命周期 R 可达600 000~800 000 km^[40]。在满足自身高强度运营需求后,其电池循环寿命富余度 E 有限,参与V2G放电将进一步增加电池循环损耗,并压缩车辆的有效运营周期。对于此类车辆,V2G的价值定位应侧重于利用其长时间在线特性提供LS价值与SS价值,或通过换电等模式实现电池资产的专业化统一调度与梯次利用;对于公交车与物流车而言,其一般具有固定路线和场站、运营规律性强的特点,虽然 R 值也较高,但其集中管理、统一调度的运营模式使其成为初期V2G示范和提供调节价值的优质资源^[41]。通过换电模式或场站内集中充放电管理,可一定程度上规避单体车辆电池寿命不足的约束。

从资源属性角度看,这种循环寿命冗余意味着电动汽车动力电池在参与V2G时,其新增调节能力并不依赖于额外配置专用储能电池,从而在电池侧体现出较低的边际寿命消耗成本。相较于需要单独建设和配置储能单元的常规储能,动力电池是一种具备显著成本优势的ES资源^[42]。但这一优势的发挥必须建立在对不同车辆类型的分群聚合与差异化潜力评估基础之上,而非采用统一参数进行估算。实际应用中,可结合车辆类型、使用年限、电池健康状况等因素构建精细化的可调度容量评估模型,而这正是未来V2G规模化推广应用的重要研究方向。

再者,用于实现电动汽车充放电的基础设施本质上以电力电子设备为核心,其在结构与控制层面均具有高度的技术可塑性^[43],相较于传统以机电设备为主的负荷,充电设施通过功率电子器件与数字化控制系统的有效协同,可在不改变硬件拓扑的情况下,实现对有功功率、无功功率及动态响应特性的灵活调节。考虑到充电设施通常具有较长且分散的在线时间,这种控制灵活性可在日内至实时的时间

尺度上提供显著的SS价值^[44-46]。

V2G提供的LS、ES与SS三类价值之间并非简单的并列关系,而是呈现出明显的能力递进与基础依存关系。LS价值主要依托于充电时间的灵活性,通过价格信号引导即可实现,其技术门槛相对较低;ES价值的规模化释放有赖于双向充放电基础设施的广泛部署,当充电设施具备双向能量交互能力后,电动汽车才能从单纯的可调负荷进一步演化为能够进行能量时移的储能资源。与此同时,用于实现双向充放电的设施本质上以电力电子变换器为核心,其在控制层面所具备的高度技术可塑性,又构成了系统支撑能力的关键物理基础。因此,从技术实现路径上来看,ES能力的形成往往也是SS能力实现的重要前提条件。

由此可见,V2G在能力结构上呈现出从LS到ES、再到SS逐级递进的演进关系,这一内在逻辑不仅揭示了V2G价值实现的技术基础,也构成了V2G规模化发展路径的物理依据,即V2G往往首先以单

向充电调度释放LS价值,在双向充放电基础设施逐步普及后释放ES价值,并最终在构网控制与系统级协同调度技术成熟后全面发挥SS价值。

如图2所示,V2G在时空尺度上能够高度契合系统需求。在时间维度上,其灵活性主要分布在日前和日内尺度上,通过制定电池充放电计划、根据价格信号引导用户转移充电时间以及充电设施电力电子控制,为系统提供不同类型的调节资源;在空间维度上,其接入点更接近用户负荷,更贴近实际用电需求;相较于固定式储能,电动汽车的低边际成本和移动性赋予其独特的成本和灵活性优势,从而成为系统高价值的LS、ES与SS资源。值得注意的是,V2G的价值适配需要依托新型经营主体对分散资源的组织与协调才能得以释放。新型经营主体通过对资源运行状态的持续感知、可调节能力的统一评估以及调度指令的分层下发,将系统层面的调节需求转化为可执行的调度计划,从而在电力系统需求与V2G资源之间发挥关键的桥梁与缓冲作用。

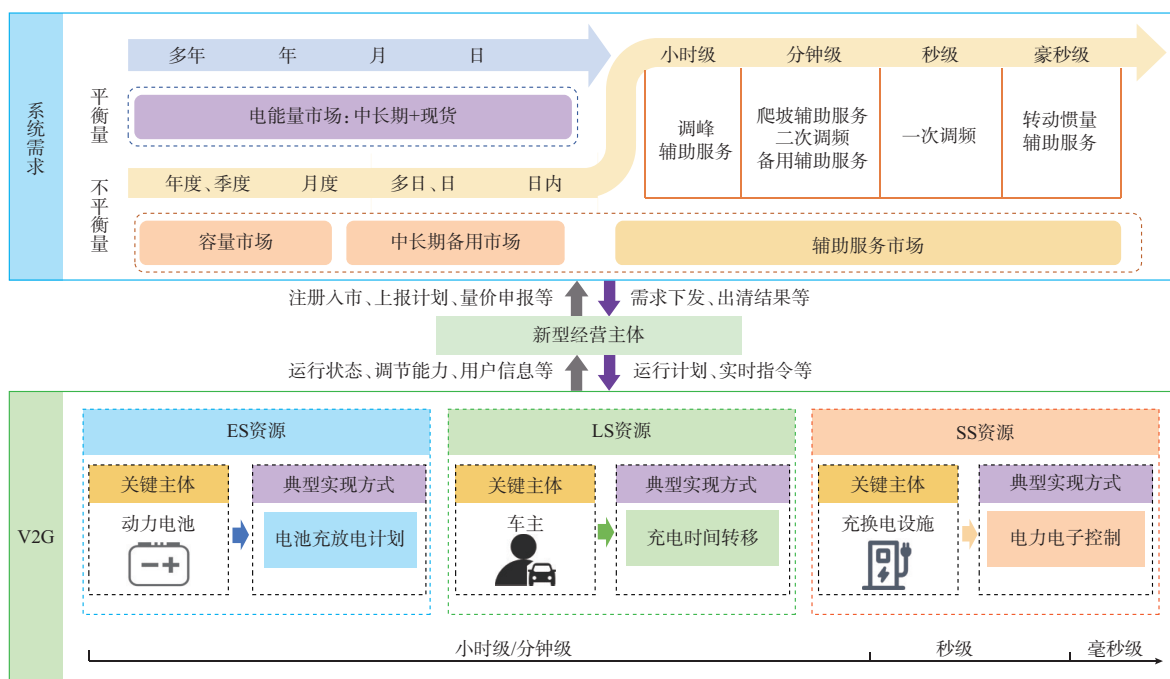


图2 V2G与系统需求的价值适配框图

Fig. 2 Block diagram of value matching between V2G and system demands

1.3 价值匹配的规模支撑

本节进一步从规模层面对LS、ES和SS三方面的V2G系统级贡献潜力进行定量刻画,分析其是否具备影响系统资源结构的量级条件。为此,本节基于统计数据与结构性假设对未来V2G可贡献的潜力进行宏观估算,刻画理论资源规模上限与量级特征,从规模层面对前述价值匹配逻辑进行验证。需要指出的是,实际工程潜力需结合用户行为、接入场

景与响应概率等因素进行一定的折减,但有限的折减不影响这里的结论。

在LS方面,随着中国政府宣布新一轮国家自主贡献目标^[47],新能源汽车将在2035年前后成为新售车辆主流,届时新能源汽车保有量预计将达到2亿辆以上^[48]。预计到2035年,新能源汽车日均充电量将达到3.25 TW·h^[49]。按照上节估计的约68%的充电负荷可进行转移,日均可调节电量预估

可达 2.2 TW·h 以上,在 2035 年全社会日均用电量占比可达 5%^[50],可提供的削峰能力将达 0.12 TW,在届时的社会最大负荷(2.26 TW^[51])占比达到 5.3%,几乎可以满足目前需求响应管理办法中的 5% 以上全社会最大负荷的需求响应能力的全部^[52]。

在 ES 方面,电动汽车所搭载的动力电池构成了规模巨大的分布式储能单元。2035 年,动力电池总装车量将超过 1.952 TW·h^[49]。作为对比,根据工信部发布的《新型储能技术发展路线图(2025—2035 年)》^[53],2035 年中国新型储能装机规模预计将超过 0.3 TW。即便在极为保守的假设下,仅考虑 25% 的车辆参与 V2G 放电,且放电倍率限制在 0.5C 以内以满足电池寿命与安全要求^[54],其可提供的等效储能规模将达到 0.244 TW,在量级上与同期集中式新型储能系统的装机规模几乎相当。在实际应用中,准确的等效储能规模可结合用户充电行为、聚合调控能力及市场机制等因素来更准确地确定^[55]。

在 SS 方面,随着电力电子控制技术的发展和具备构网能力的双向充放电拓扑在技术路径上已具备量产条件,量产成本有较大幅度的下降空间。考虑一半的充放电量在具备构网运行能力的设施上实现,其可提供的调节容量仍有望达到 0.122 TW 以上。该规模显著高于现有储能系统构网支撑能力^[56],并可在一定程度上对冲未来部分化石能源机组退役所带来的系统支撑能力缺口^[57]。实际应用中,通过持续完善构网控制技术、并网标准及市场激励机制可不断使这样的潜力变为现实。

综合以上分析,V2G 的 LS 规模潜力已具备较为扎实的现实基础,并将随着电动汽车保有量的持续增长而快速释放;而在 ES 与 SS 维度,其潜在规模虽已在量级上显现,其价值释放程度取决于用户行为特征、技术成熟度及市场机制完善程度等因素,而这也是 V2G 规模化发展路径中的突破点。本节测算结果为宏观资源规模的理论潜力刻画,而基于微观充电行为数据构建精细化潜力评估模型,将是未来 V2G 研究与实践的重要方向。

2 新型经营主体驱动的 V2G 价值匹配机制

2.1 V2G 规模化发展的关键挑战

从系统层面来看,推动 V2G 走向规模化首先面临多主体协同的复杂性,表 2 列出了 V2G 中相关多主体和能够贡献的资源类别之间的关系。LS 资源来自车主对部分出行和充电时间灵活性的让渡,ES 资源则来自车载动力电池的富余循环寿命,SS 资源甚至不是来自车辆本身,而是来自实现能量双向流

动的电力电子变换器与控制系统。

表 2 V2G 价值匹配与实现基础
Table 2 V2G value matching and realization basis

资源类别	核心贡献者	价值本质与来源
LS	车主	让渡充电灵活性,响应时序电价或调度信号
ES	动力电池	释放电池空闲储能容量,实现能量时移与套利
SS	充换电设施	通过先进电力电子与构网控制,提供快速功率支撑

为了实现规模化 V2G,需要在电力系统高度集中精准的调控体系与分散分布的车辆资源之间建立有效的协同机制,但是两者在控制方式、响应特性及行为主体等方面的差异带来了显著的摩擦成本。从交易经济学^[58]视角来看,V2G 规模化发展的难点并不在于单次充放电行为本身能否产生价值,而在于该价值能否以可接受的组织成本被识别、交易和兑现。V2G 资源的价值并不会因其物理存在而自动转化为可实现的市场收益,而必须经过信息识别、能力聚合、交易组织、履约执行、效果核证与收益结算等一系列组织过程。谈判、缔约、执行、监督等环节产生的成本一旦超过交易本身带来的边际灵活性收益,零散资源交易便难以成立。V2G 中的摩擦成本正是由资源颗粒度小、状态高度不确定、主体行为异质、信息采集与验证成本高等因素共同决定的,其根源主要体现为以下 3 个层面:

1)高度不确定的用户行为与电力系统对确定性资源的严格需求之间的内在冲突。电网调度体系需要的是可观、可测、可调、可控的“确定性”调节资源,然而,单体电动汽车的充电行为并非单纯的物理过程,而是用户出行目的、消费习惯、风险偏好等社会因素与气象、交通等物理因素深度耦合下的产物,呈现高度随机与强异质性。在此条件下,海量分散分布的资源难以通过现有通信与调度控制直接纳入电网的调控体系,普通车主亦难以跟踪区域高频和动态变化的电价信号,在多重约束下形成优化决策。其结果是,资源侧响应与系统侧需求之间存在显著偏差。对于单个资源而言,这种偏差意味着其能力识别、状态确认和履约验证成本极高;对于市场组织而言,则意味着大量零散交易需要付出高昂的信息搜寻、沟通协调和核证成本,从而削弱了 V2G 灵活性价值的实际可交易性。

2)电池资产所有权与使用权的分离,使得成本归属与收益分配机制难以有效建立。V2G 的 ES 价值,本质来源于消耗电池循环寿命所换取的跨时

段收益。然而,电池资产归属车主所有,其每一次充放电带来的边际寿命损耗,却构成V2G运营中的核心成本。如何量化、确认并合理补偿这种损耗,是打通V2G经济模型的关键难题。当前,产业界仍缺乏被车企、用户与运营商共同认可的电池衰减模型、计量方法与责任认定机制,使得成本核算与收益分配缺乏可信基础。由此,市场各方在谈判补偿标准、约定参与边界、验证损耗结果及处理潜在争议时,将面临较高的博弈成本与信任成本。这表明,V2G并非有套利空间就能自然发生的简单市场行为,而是一个高度依赖规则设计、标准统一与责任清晰化的复杂交易过程。

3)多主体目标函数冲突与责任边界模糊,进一步放大了系统运行的不确定性与风险。在V2G生态中,电网关注安全与系统成本,运营商追求利润最大化,车主强调使用便捷与经济性,而车企更侧重于销量与品牌价值。当系统出现异常,如发生电池安全事故或非预期加速老化时,责任究竟在于车端的充放电策略、充电桩端的功率控制,还是运营商聚合调度指令的不当难以清晰界定,这种责任边界的模糊性构成了最大的一项社会化摩擦成本。同时,部分研究认为SS价值可通过简单的就地响应实现的观点^[22]也严重低估了将分布式资源转化为电网级可靠资源的系统工程复杂性。一个异构的资源池必须接受统一的参数整定、实时的协同控制和严格的性能监控,否则海量的、独立的就地响应不仅无法提供有效支撑,反而可能因为群体行为的不确定性而危害电网安全^[59-62]。

2.2 V2G中新型经营主体多维价值定位

摩擦成本的结构化分析表明,V2G规模化的最大障碍并非技术本身,而是缺乏一个能够系统性地弥合信息不对称、化解物理资产分离矛盾、清晰界定多主体责任边界的核心组织者。

国家能源局关于支持电力领域新型经营主体创新发展的指导意见中明确了资源聚合类新型经营主体主要包括虚拟电厂(负荷聚合商)和智能微电网等。在此背景下,V2G运营商成为V2G场景下最具代表性的新型经营主体,是当前用电侧能够系统性整合电动汽车充放电资源、并同时具备电力与电量双重调节能力的核心资源整合者^[23],其通过整合技术与市场,弱化不确定性风险并创造全新系统服务能力,大幅降低实现V2G价值的摩擦成本,并进一步实现V2G的双向价值匹配。具体而言,新型经营主体的价值定位可归纳为以下3个维度:

1)面向LS的价值:新型经营主体是“确定性创

造者”。电动汽车资源具有显著随机性与强个体差异性,故单体资源难以直接满足电网对可预测性和可控性的要求。V2G运营商大规模聚合、统计建模与群体协同优化机制,利用大数定理弱化个体波动,将高度不确定的用户侧响应转化为电网侧具有概率约束可控性和统计意义下确定性的调节资源。

2)面向ES的价值:新型经营主体是电池资产的“专业变现者”。V2G运营商通过集中化的市场交易决策、跨时段套利与多市场协同申报,将分散在用户侧的电池循环寿命转化为可持续的经济收益。同时,可以通过精细化的电池健康管理,动态权衡ES价值与衰减成本,实现电池全生命周期价值“变现”的最大化。

3)面向SS的价值:新型经营主体是系统级服务的“技术创新者”。V2G运营商通过系统集成与先进控制技术,将海量、异构、分布式的充放电逆变器集群进行统一建模与协调控制,使其在系统层面等效为能够提供关键稳定性支撑的“虚拟同步发电机”^[44]。

2.3 面向多维价值实现的聚合调控架构与核心技术

为实现上述多重价值,新型经营主体需构建一个横向融合多类主体、纵向贯通电网运行到分散资源的聚合调控架构。如图3所示,新型经营主体可以通过微电网聚合分布式资源,实现面向用户侧的能源优化管理,进一步也可以参与配电网的就地互动,实现区域电力与电量的安全交互;还可以通过虚拟电厂形式参与整体系统运行,根据系统运行需求对内部聚合的资源进行优化调度,进而实现多层级的协同调控。

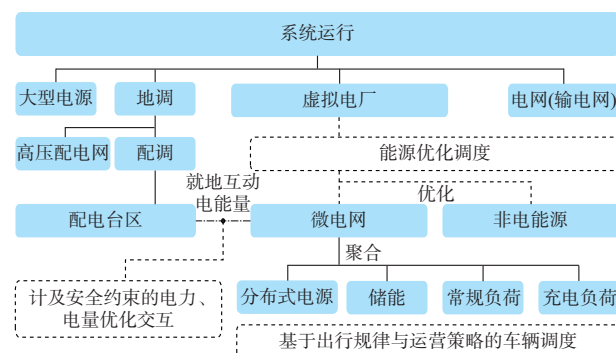


图3 多层级协同调控框架
Fig. 3 Multi-level collaborative regulation framework

在上述架构下,尚有多项关键技术需要突破:

1)在“确定性创造”方面,需要基于聚合-分解框架,实现聚合对象充电需求和放电能力的精准预测,并通过偏差反馈与预测校正^[63]等技术保证申报结

果执行和控制指令的精准执行。

2)在“专业变现”方面,需要对用户侧充放电行为进行建模和分析^[64],其中尤为复杂的是价格弹性的建模和分析。常规负荷的价格弹性具有时间交叉特性,已经是一个两维的结构^[31],由于电动汽车的移动特性,还需要考虑空间维度的交叉影响,其主要表现为地理空间上不同充电站(或充电区域)之间的充电需求转移效应,即某一区域、某一时段的价格变化,会引导部分车辆将充电行为转移至其他区域或节点完成;该效应可进一步与配电网节点拓扑、电价分区及容量约束相耦合,在聚合层面体现为跨节点、跨时段的负荷重新分布的特征。因此,价格弹性将是一个三维的结构,可以表示为三维张量,其元素为特定时间、空间和价格条件交叉影响下的价格弹性系数。实际应用中,需要通过实际的价格调整扰动-分析价格弹性-优化定价的迭代来持续提升价格弹性这一关键参数的准确性,行为经济学^[65]及人工智能^[66]方法有助于更好地解决这一问题。

3)在“专业变现”方面,还需要解决用户运营定价和电力交易申报的联合优化问题,其本质是充电运营商的批零收益最大化,其中“批”为运营商在批发侧市场的购电成本,“零”为其在零售侧向电动汽车用户提供的充电服务总收益。因此,该联合优化目标可以表示为式(2)。

$$\max W = \sum_{i=1}^{N_{EV}} \sum_{t=1}^{N_t} (p_t^f m_{i,t} \Delta t + p_t m_{i,t} \Delta t - p_t^b m_{i,t} \Delta t) \quad (2)$$

式中: W 为联合优化目标; N_{EV} 为电动汽车数量; N_t 为一个结算周期的时段数量; Δt 为单位时段的时长; $m_{i,t}$ 为时段 t 第 i 辆电动汽车的充电负荷; p_t^f 、 p_t 和 p_t^b 分别为时段 t 的基础电价、充电服务费定价和购电电价。

考虑到运营商交易策略、资源运行特性以及定价机制等的影响,需要满足如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{i=1}^{N_t} (m_{i,t} \Delta t) \leq Q_{\max} \\ 0 \leq m_{i,t} \Delta t \leq Q_{i,t}^{\text{charge}} \\ p_{t,\min}^f \leq p_t^f \leq p_{t,\max}^f \\ p_{t,\min} \leq p_t \leq p_{t,\max} \\ m_{i,t} \Delta t = \lambda_i (p_t^f + p_t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q_{\max}$ 为充电运营商在日前市场的总申报电量的上限; $Q_{i,t}^{\text{charge}}$ 为时段 t 的最大充电容量; $p_{t,\min}^f$ 、 $p_{t,\max}^f$ 和 $p_{t,\min}$ 、 $p_{t,\max}$ 分别为基础电价和充电服务费定价的最小值和最大值; λ_i 表示与第 i 辆车匹配的价格弹性函数。

$Q_{\max}$ 受到与电网签订的合同容量或交易策略等因素影响, $Q_{i,t}^{\text{charge}}$ 取决于该时段下所有充电设备额定功率之和, λ_i 受到电动汽车类型、用户画像等的影响。因此,此类问题一般建模为非线性规划(nonlinear programming, NLP)问题,可以通过调用非线性求解器^[67]、启发式算法^[68]和强化学习^[69]等方法进行求解,需要根据实际情况选择合适的方法。

图4展示了特来电基于该联合优化模型,在甘肃省兰州市某场站于2025年8月16日开展应用验证的结果,并选取8月9日作为基准日进行对比分析。对比基于真实运行数据开展策略回代测算,在相同用户需求与市场价格条件下,采用联合优化策略后,场站收益较基准运行方式提升约16.2%。该案例表明,相较于将充电运营与市场交易决策割裂处理的传统模式,通过将用户侧定价策略、负荷价格弹性与市场侧申报策略进行协同建模与联合优化,能够实现运营商收益较显著的提升。该实践结果从应用层面反映了用户行为与市场交易策略之间的耦合特征,为V2G场景下批零协同机制研究与运营策略设计提供了工程验证依据。

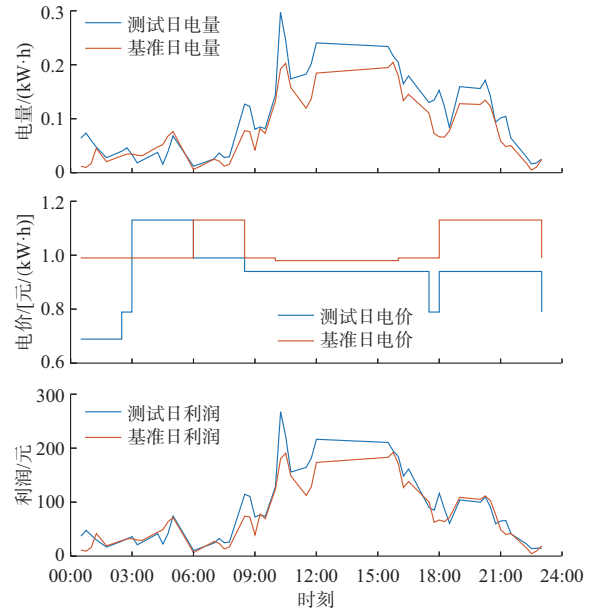


图4 实际案例对比结果
Fig. 4 Comparison results of actual cases

4)电池的安全防护及健康保障是“专业变现”过程中的重要一环。需要通过准确评估电池健康状态(state of health, SOH)、电池荷电状态(state of charge, SOC)及热失控风险,在充放电策略执行过程中运用故障预警、热管理、温度控制等相关技术^[70-72]提升电池健康度,对可能的热失控风险进行主动干预。

5)实现SS价值的技术创新集中于电力电子和

通信控制两个领域。电力电子变换器需要在拓扑、器件等方面吸收最新的成果^[41],实现功能的完备性、性能的最优化和全生命周期成本最低的平衡;通信控制方面则涵盖分布式资源建模^[73]、群体协同控制以及低延迟高可靠的通信架构等关键技术^[74],以支撑海量电动汽车资源的实时感知、快速响应与稳定调控。

2.4 支撑V2G经济价值闭环的政策与市场机制

V2G能否走向规模化,关键不在于单点技术是否可行,而在于能否构建一个由多方共同受益、能够持续运转的经济价值闭环。这个闭环需要技术、市场与政策机制的共同作用,实现可交易的价值来源及实现途径、合适的分配规则和有效的风险兜底。

1)拓展V2G的市场收益渠道。V2G经济闭环的起点,在于其创造的系统性价值能够通过市场化渠道转化为稳定的货币收益。单一市场品种难以支撑可持续的商业模式,多品种叠加是提升整体收益的重要路径。具体而言,可参与的市场品种包括:利用分时电价差进行峰谷套利,获取能量时移的基础收益;参与需求响应和调峰、调频等辅助服务市场,将SS和ES价值独立变现;未来还可探索容量市场和配电网层级的灵活性市场,将V2G集群的确定性与可调度性转化为长期稳定的容量收益和灵活性收益。当前的关键瓶颈在于辅助服务市场对分布式资源的开放程度不足,容量市场机制尚处探索阶段。需要在现货比例、限价范围等方面完善电能量市场,并向分布式资源充分开放辅助服务市场^[75],为V2G创造多品种收益叠加的制度空间。《电力并网运行管理规定》^[76]明确把通过聚合商、虚拟电厂等形式聚合的可调节负荷纳入市场调度体系,使得电动汽车、储能系统等新型可调资源有望成为系统的“新型平衡责任主体”,为其参与上述市场提供了制度入口。

2)建立公平透明的多主体收益分享机制。V2G价值链涉及电网、运营商、车主、车企等多个主体,各方的贡献、收益与承担的风险必须得到公平的分配和匹配。当前多数V2G商业模式仅计算峰谷电价差收益,而忽略全成本,导致表观可行但实际不可持续。完整的V2G成本结构包括充放电设备的投资折旧、通信与平台运营的技术成本、聚合调控的管理成本,以及最为关键的电池损耗补偿成本。电池损耗是V2G特有的隐性成本,其合理量化需要建立在车企、用户与运营商共同认可的电池衰减模型基础上,并通过用户易于接受的方式纳入V2G的定价与收益分配机制。在成本透明的基础上,运营商需在车主补偿、电网服务费与自身利润之间形成稳定的分成框架。在双向充放电规模化应用阶段,政府的双向计量计费政策、放电补贴在培养用户习惯

和引导初期投入方面仍发挥关键作用。在标准层面,则需加速推动通信协议的统一与强制性互操作认证,降低多主体间的信息摩擦与交易成本。

3)构建风险共担的生态化保障体系。V2G面临的核心风险包括电池安全事故、非预期加速老化以及聚合调控偏差导致的考核惩罚等。《电力系统辅助服务管理办法》^[77]明确规定,聚合商、虚拟电厂等新型经营主体可参与电力辅助服务,并通过细则明确了它们的“系统可靠性责任”,这为V2G运营商的权责边界提供了制度依据。在此基础上,还需进一步探索由车企(提供电池健康数据与质保背书)、保险机构(开发V2G电池衰减险)、运营商(优化调度以减少考核惩罚)和车主(让渡部分使用灵活性)共同参与的风险共担机制。整个社会可以从V2G的系统性价值中获益,这更需要统一的法规、标准等,将V2G的公共价值转化为对参与主体的制度化激励与风险保障。

V2G经济价值闭环的形成并非单一政策所能成就,而是需要在价值来源、价值分配与价值保障3个环节协同推进制度创新。当运营商能够获得稳定盈利、车主能够感知到实在收益、车企能够看到差异化竞争优势时,V2G的规模化发展才能从政策驱动转向市场驱动的良好循环。

3 电动汽车的角色演化

V2G发挥LS价值实质上是通过人和网的互动实现的,其中新型经营主体在降低各类摩擦成本方面发挥着关键作用。然而,V2G要实现ES价值乃至SS价值时,则必须充分调动车辆,特别是动力电池的参与。因此,推动V2G真正走向规模化的关键因素是电动汽车的角色演化,即车辆从被动用能终端,演进为具备可规划运行边界、可量化寿命成本、可参与多层级能源市场的“能源单元”。双向充放电应用的突破,为这一角色演化提供了物理基础,而车企在这一演化过程中的战略选择,构成了V2G规模化落地的决定性因素。

3.1 双向充放电应用的困境

2020年发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》就已明确提出加强新能源汽车与电网(V2G)能量互动、统筹新能源汽车充放电和电力调度需求、鼓励“光储充放”(分布式光伏发电-储能系统-充放电)多功能综合一体站建设等诸多目标,但是直至目前,仍无对电动汽车上市须具备双向充放电的明确要求,国内电动汽车通过直流接口的放电应用,很大程度上还是技术标准之外的非常规行为,对车企和用户来说都存在较大的风险。

造成这一困境的主要因素包括:1)汽车及动力

电池企业面临着成本和服务等多方面的激烈竞争,在看不到批量应用机会能够显著提升车辆竞争力的情况下,对潜在的技术投入和额外的售后服务持谨慎态度;2)由于缺少批量应用的机会,双向充放电基础设施成本仍然较高,电动汽车移动储能的成本优势难以凸显。

3.2 双向充放电应用的突破

ES 价值具有显著的社会属性,对于行业当前面临的电池衰减的风险负担、研发投入的战略不确定性、跨行业协调的生态复杂性等挑战,难以由单一主体独立化解,需要内生的产业驱动与外部政策催化协同发力,共同推动双向充放电应用的突破。

从全球实践来看,已有若干车企完成了从“设备制造商”向“能源生态参与者”的局部转型,但不同案例的价值实现路径并不相同,其可复制性也存在明显差异。日产 Leaf 系列车型早在 2012 年便推出车辆到家庭(vehicle-to-home, V2H)商业化方案^[78],本质上是车辆放电能力优先嵌入家庭备用供能场景,其优势在于用户收益直观、场景封闭、责任边界相对清晰,故更容易形成产品卖点;福特 F-150 Lightning 则将双向供电能力与应急备电需求结合,直接将供电能力转化为整车竞争优势^[79]。上述国际案例说明,当双向充放电能力能够直接转化为用户可感知价值时,车企更有动力主动投入。

相比之下,面向电网的 V2G 场景虽然系统价值更高,但其收益链条更长、参与主体更多,价值传导也更复杂。国内商用车领域,北汽福田的微网能源系统实践,更多体现了商用车场景中“集中管理、统一调度、场景封闭”的优势,说明在运营主体明确、车辆调度边界清晰的条件下, V2G 更容易率先形成可复制方案^[80]。在乘用车领域,比亚迪对外放电与家庭能源协同探索,反映的是整车-电池垂直整合企业在供电能力嵌入方面具有天然优势^[81];从换电网络的实践中可以看到,当前阶段车企通过换电体系直接掌握电池资产边界,可一定程度上降低电网互动的组织成本和责任不确定性^[82]。

上述国内案例表明,部分车企已经具备主动构建能源生态的战略意识,但受制于若干核心顾虑,相关布局尚未上升为行业主流战略。一方面是放电行为引发的电池寿命加速衰减可能引发大规模质保纠纷,侵蚀品牌价值;另一方面是 V2G 能源服务业务的商业模式尚不清晰,难以支撑独立的战略投入。而对于 V2G 运营商而言,当前商业模式以充电服务费为核心, V2G 放电业务需要额外投入双向充放电设备、聚合调控平台开发和电力市场准入资质,而辅助服务市场的收益规模和稳定性尚不足以覆盖上述增量成本。在此条件下,运营商普遍希望车企和保

险机构能够承接电池衰减风险,否则难以设计出对车主有吸引力且自身可持续盈利的收益分享方案。

也正因为双方诉求不同,现阶段价值实现的主要阻碍并不只是技术不足,而是“能力供给方”和“价值变现方”之间尚未形成稳定协同机制:车企担心开放双向充放电能力后承担额外质保和品牌风险,运营商则担心在缺乏车企数据支持和风险共担机制的情况下难以设计可持续的放电业务模型。进一步看,国内现有成功案例大多集中于商用车、公交车、园区等相对封闭场景,尚未普遍扩展到大规模开放市场化 V2G 场景,其根本原因就在于开放场景下对标准互操作、责任划分、收益分成和风险保障的要求更高。因此,车企与运营商价值实现路径的真正障碍,不在于哪一方主动性的问题,而在于目前还缺少一套能够同时满足车企风险可控与成本覆盖、运营商收益可算、用户感知明确、电网调用可靠的技术、制度与商业协同框架。

近期国家层面的 V2G 试点工作正是破解上述困局的“催化剂”。广东和江苏等地明确了电动汽车通过充放电设施在表前直接对电网放电的电价政策^[83-84],使双向充放电应用场景的拓展获得了关键背书,促成车企明确了包含车辆充放电应用的电池质保政策,鼓励充放电运营企业主动联合保险企业推出针对所有车型充放电的电池衰减保险^[85]并明确了双向充放电设备快速降本的目标,进而也促进了应用场景的快速拓展。表前放电政策对双向充放电的关键激励作用如图 5 所示。预计在未来几年,双向充放电设施规模和放电量可实现持续快速增长。足够规模的试点示范应用也将有助于形成对技术条件的共识,推进相关标准的快速应用。

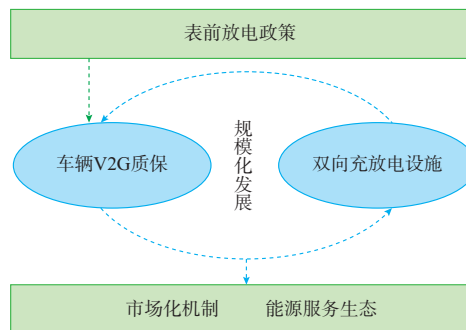


图 5 表前放电政策的催化作用
Fig. 5 Catalytic role of policies in front-of-meter discharging

3.3 电动汽车能源生态定位的深化拓展

车辆双向充放电走向规模化应用的过程中,车企所面临的不仅是技术能力的拓展,更是价值定位的重构。在相关政策机制逐步明确、电力市场价格信号趋于稳定以及电池寿命保障体系不断完善的前

前提下,新能源车企将逐步形成区别于传统整车制造的全新竞争力,并完成从对外部V2G需求的“自发”响应到面向能源系统的“自觉”规划的重要转变。

需要指出的是,这种“自觉”的战略转型,并非简单叠加充放电功能,而是体现在对车辆能源属性的系统认知与设计中,使车企能够在产品定义阶段主动考虑车辆在不同时间尺度(日前、日内、实时)、不同运行场景(居住地、工作地、园区等)下的价值实现方式,推动电动汽车与新型电力系统多维价值需求的匹配。其形成的前提在于:双向充放电所带来的潜在收益能够覆盖额外的研发投入、电池衰减风险以及质保责任成本,并能够通过市场机制形成相对稳定的收益预期。

在上述条件逐步成熟的背景下,部分领先的车企可能率先完成从单一交通工具制造商向能源系统重要参与者的角色拓展,推动V2G商业模式创新,使电动汽车真正嵌入智慧能源体系的价值链条,特别是在V2G价值匹配框架下,车企通过车辆充放电能力配置、动力电池寿命管理策略以及车端控制与通信接口等方面的设计,可将原本分散、偶发的充放电行为转化为具有稳定预期的能源资源,从而借助V2G形成差异化的市场竞争优势,推动电动汽车向具备能源与交通双重属性的“能源新物种”演进,并进一步驱动交通与能源系统的深度融合,即国际上广泛讨论的行业耦合(sector coupling, SC)新范式^[5]。然而,不同企业的技术积累、风险偏好与战略定位差异,将导致其参与节奏与路径呈现明显分化,并不会形成完全同步的行业跃迁。

此外,随着电池技术特别是钠离子电池、固态电池等技术^[86]的不断成熟,动力电池的保证循环次数将得到显著提升,这将进一步降低双向充放电对车辆全生命周期价值的边际影响。在此背景下,车企对车辆能源价值的认知将由“风险约束”逐步转向“机会导向”,积极参与能源生态,并通过相应的产品设计、服务模式与数据交互等战略,从根本上打消终端用户的顾虑,使企业能够在整个产业链上主动获取竞争力和回报。

随着车辆的能源属性更加突出,汽车行业对有关技术的边界会趋于模糊。例如,目前“换电”^[87]主要是一种补能方式,未来可能有更多车辆支持较为灵活的单独更换电池的方式,即使不通过换电补能,也可以在生命周期的某个阶段便捷地更换电池;增程车辆的车载补能器也可能不仅作为长途驾驶的增程手段,还可以作为一种移动发电手段接入电网。可以预见,当车企完成对车辆能源属性的自觉认知与系统布局后,电动汽车将不再仅是能源系统的响应对象,而是成为推动交通与能源系统深度融合、加

速SC进程的重要载体。

4 V2G规模化应用路径

从以上分析可见,V2G规模化发展遵循一个从LS到ES再到SS的递进路径。在LS阶段,新型经营主体初步形成了资源聚合调控的技术和运营体系;在此基础上,ES阶段重点通过放电价格机制、动力电池质保体系的构建进一步提升聚合调控的能力和值,电动汽车作为ES资源的普及将为产消型用户能源管理提供全新的场景。由于构网特性在单向充电变换器上难以实现,所以电动汽车作为ES资源的普及也是进一步发挥SS资源价值的基础。通过对实现ES资源价值的双向变换器提出统一的构网能力要求后,充放电基础设施将有力支撑新型电力能源系统的深度重构。

上述过程可总结为承前启后的4个阶段,如图6所示。每一阶段的核心特征与应用场景不同,但共同推动了V2G由“基础应用”向“深度融合”的演进,目前中国正处于第1阶段向第2阶段突破的过程中。

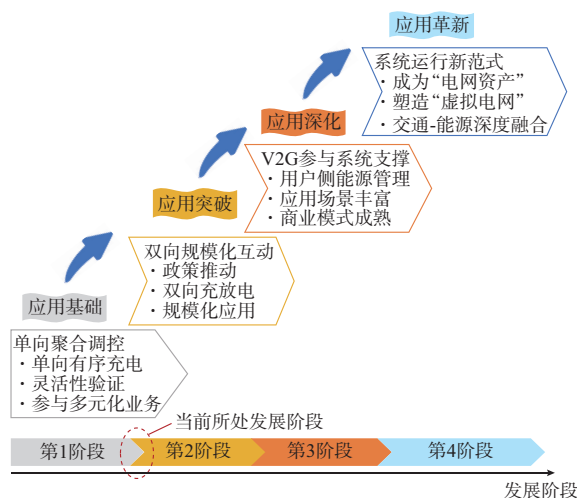


图6 规模化V2G发展路线图
Fig. 6 Large-scale V2G development roadmap

4.1 单向聚合调控的应用基础与市场验证

规模化的聚合调控从LS价值起步已有充分的实践验证。这一阶段的关键突破在于,新型经营主体通过其优秀的聚合调控能力,证明了海量分布式电动汽车作为一种可靠资源的可用性,并成功参与到调峰辅助服务、需求响应、电力现货市场等多元化的业务体系中,电网以实际应用充分检验了规模化电动汽车作为LS资源的潜力。

图7展示了特来电在山东省某区域充电站开展的聚合电动汽车以虚拟电厂身份参与电力现货市场的实际测试运行结果。选取2025年2月9日至2月

21日作为测试周期,执行现货申报与运营定价的联合运营。测试过程中,虚拟电厂基于日前现货价格预测结果,对聚合充电负荷进行统一申报,并在日内结合充电需求与市场价格变化动态调整运营定价策略。基于相似日原则^[88],选取2024年11月平均运营数据作为基准场景数据。相关运行数据均来源于企业实际运营平台和电力交易系统的结算记录。测试结果表明,在联合优化策略下,日均服务费单价相较基准场景下降约52%,同时受价格信号引导,日均充电电量提升约133%。由此可见,通过电力交易和充电运营的联合优化,电价成本的降低得以有效传导至用户,同时显著提升了充电运营商的市场竞争力。

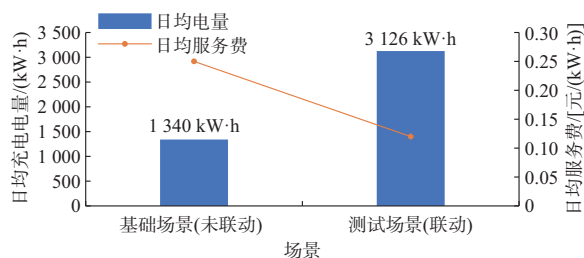


图7 运营与交易联动前后电量及服务费对比

Fig. 7 Comparison of electricity and service fees before and after operation and trading linkage

4.2 双向互动规模化的窗口期

当前正处于从单向充电调度向双向充放电规模化应用发展的关键突破期。国家层面已启动多批V2G试点并取得阶段性进展,初步验证了双向充放电的技术可行性,但是相关电价政策支持 and 双向充放电技术标准应用范围仍然有限。国内已有一些虚拟电厂聚合充电资源参与需求响应和电力现货市场的实践案例,但这些案例大多仍局限于单向充电调度,其商业模式的可持续性仍然不足,主要可通过参与需求响应、现货市场获取收益,但需求响应开展频次低、持续时间短,难以形成稳定的收入流;电力现货市场虽可提供更高频次的套利机会,但价差空间有限,激励不足。

破解上述困境的关键突破口在于主管部门明确表前放电的电价政策和其他相关激励政策。这不仅能为放电收益提供长期稳定的定价锚点,有助于引导相关产业加大在该领域的投入,培养用户参与V2G的行为习惯,也将促成保险、金融及第三方服务机构等生态主体更积极地参与和支持V2G应用,从而逐步构建起覆盖价值创造、风险分担与收益分配全链条的商业闭环。这一趋势在国际上已得到初步验证。近年来,以欧洲和美国为代表的国家和地区,通过政策引导与产业协同,围绕价格机制、市场准入、风险分担和电池质保等关键问题形成系统性

解决方案,已相继落地一批具有规模特征的V2G应用项目。

在欧洲,荷兰乌得勒支市依托明确的双向充放电结算机制和分布式资源参与电力市场的制度安排,将500辆具备V2G能力的共享电动车队直接纳入城市能源系统运行,通过向电网提供灵活性资源以降低整体能源成本^[89],使其成为欧洲首个实现V2G能源服务商业化落地的城市级案例^[90]。在美国,马萨诸塞州政府于2025年启动的MassCEC V2X示范项目^[91],是首个覆盖住宅、公共建筑及商业设施等多类场景的大规模双向充放电项目,目的是验证电动汽车在削峰填谷、应急备用和综合能源管理等业务中的系统价值。

从经济角度来看,车辆双向充放电具有内在成本优势,缩短其向规模化应用转变的过渡过程,还可以有效降低单向充电设施投资的沉没成本。通过把单向的充电资产转变为双向充放电资产,也可显著提升充放电资产及电网配套资产的利用率,带来明显的社会效益。

更为重要的是,随着政策信号的逐步明确,V2G正在吸引保险、金融和第三方服务商等多元主体参与其生态构建。上述国际V2G项目实践表明,围绕电池寿命衰减、责任边界界定以及收益分配机制等关键不确定性问题,相关配套制度已开始同步探索,为双向互动的规模化应用逐步扫除非技术性障碍。由此可见,V2G的规模化发展并非单一技术突破的结果,而是政策、市场与产业体系协同演进的综合体现。

4.3 V2G深度融合至用户侧能源管理

随着双向互动的普及,V2G将进入应用深化阶段。驱动这一阶段演进的关键,在于新型经营主体通过用户侧能源管理实现进一步的价值变现,即通过其专业的市场交易和能源资产管理,将V2G的价值潜力融入综合能源管理、常态化的系统支撑服务、分布式韧性与容量支撑等广阔的场景中,转化为可持续的商业回报。不断成熟的商业模式又可反过来支持电力市场交易体系在接纳新型经营主体方面的持续完善和创新,新型经营主体进而成为新型电力系统中的一种重要的平衡责任主体。如图8所示,未来预期将形成一种典型的“职-住”双目的地充放电模式,其中电动汽车作为ES资源充分参与园区能源管理及系统级互动。

4.4 交通-能源融合与电力系统运行新范式

V2G的进一步发展将深刻重塑电动汽车、道路交通和电力能源领域的融合及各自发展的范式。通过建立针对海量分布式资源的统一标准体系,如目前针对风/光逆变器、储能变流器等的并网技术标

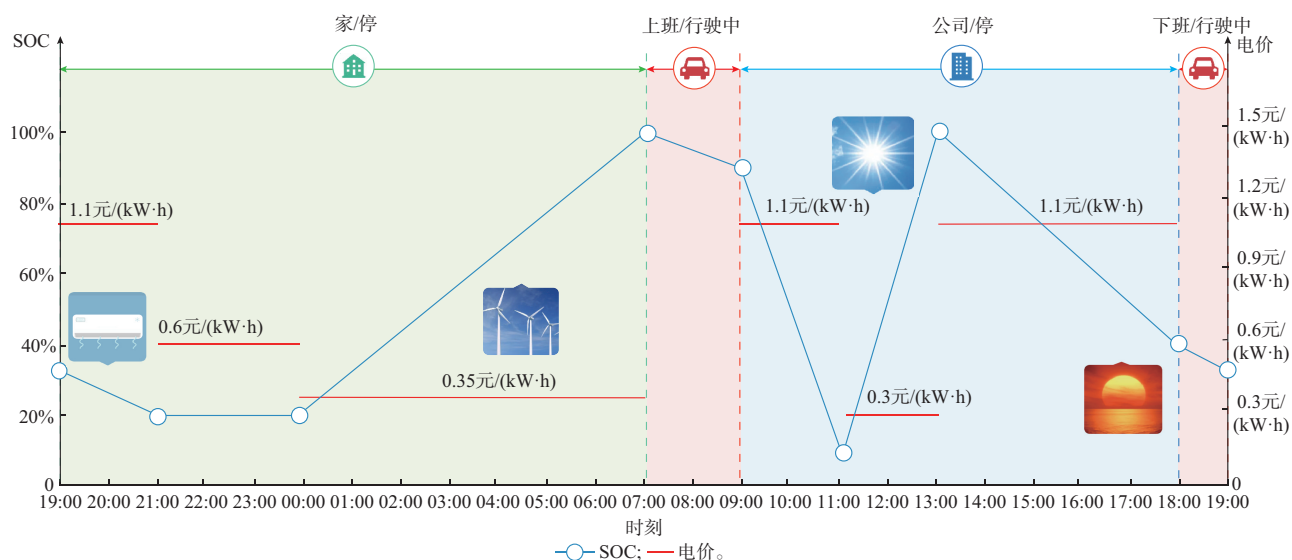


图8 职住双目的地的私家车典型充放电场景

Fig. 8 Typical charging and discharging scenarios of private cars in dual destinations of work and residence

准,将进一步拓展应用至数以亿计的电动汽车充放电变换器,使其能够作为可靠性资源全面纳入电网的规划、仿真、调度和控制体系。

到这一阶段,新型电力系统的稳定性将不再仅仅依赖于少数大型同步发电机组,海量具备构网能力的分布式资源将发挥重要的协同支撑作用。在电网调控系统的协调下,新型经营主体按照市场规则 and 标准规制进行高水平运营,电动汽车将从传统负荷全面转变为系统支撑资源,灵活通过LS、ES和SS等方式支撑电网安全可靠运行;相应的聚合商发展成为新型电力系统中重要的可靠性责任主体^[92]。

自动驾驶技术的发展还将促成电动汽车演化为能源流动的载体,有望形成不依赖传统配电网扩建的“虚拟电网”,如图9所示,真正实现交通与能源两大系统的深度融合。这种形式对于低发电小时数的光伏发电接入场景来说,是一种很有吸引力的能源配送方式;在新能源就近消纳场景采用容量一部制输配电价^[93]后,可以通过电动汽车从异地输入电力,提供短时间的局部容量支撑,大幅降低容量费用。

5 结语

本文从新型电力系统灵活性及可靠性需求出发,厘清了V2G在新型电力系统中的核心价值。V2G凭借其在规模上的充裕性、成本上的边际优势以及时空尺度上的灵活匹配潜力,能够为系统提供高质量的负荷转移、储能支持与系统支撑资源。针对V2G规模化落地过程中存在的社会化摩擦成本,阐明了新型经营主体的关键作用,并将其价值系统

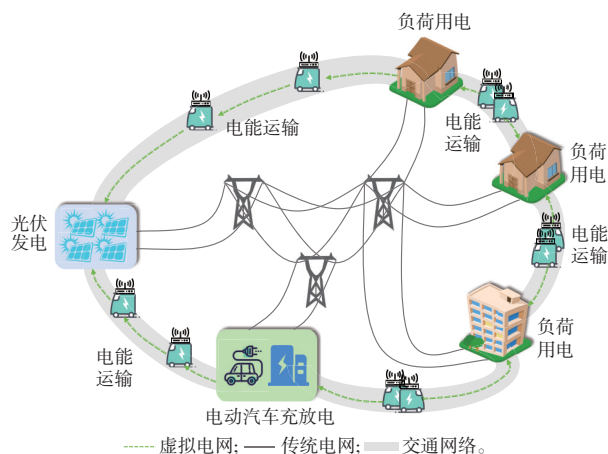


图9 虚拟电网示意图

Fig. 9 Schematic diagram of virtual power grid

性地归纳为“确定性的创造者”“电池资产的专业变现者”和“系统级服务的技术创新者”3个层面,阐述了支撑其实现价值所需的关键技术体系与配套机制。进而,本文做出了跨产业的预理性分析,指出V2G规模化发展离不开电动汽车自身的角色转型。分析了驱动车企从“自发”走向“自觉”中表前放电政策这一确定性背书的关键作用。最后,基于上述分析,构建了从基础单向聚合调控,经由双向互动规模化突破,迈向未来交通-能源深度融合及电力系统运行新范式的发展路线图。

展望未来,V2G规模化发展有赖于多方面协同、持续推进。在技术层面,精细化的用户行为建模、非线性价格弹性刻画、低延迟高可靠通信与信息安全以及构网型双向变换器的规模化量产,都是亟待突破的核心方向。在产业层面,随着新一代电池

技术的成熟,动力电池循环寿命将进一步提升,用户参与V2G的顾虑将从“风险约束”逐步转向“机会导向”;车企若能在产品定义阶段将车辆的能源属性纳入系统规划,并与充电运营商、电网及市场机制形成协同,则有望率先完成从交通工具制造商向能源系统参与主体的角色转型,形成全新的竞争力与能源产品生态。在机制层面,完善的现货市场与辅助服务市场定价机制、清晰的双向计量计费规则和合理的质保与保险制度安排,是打通价值变现通道、激励各方主体积极参与的制度基础。自动驾驶技术的演进还将进一步拓展电动汽车作为“移动储能”与“虚拟电网”节点的应用边界,推动交通与能源系统在更深层次的融合。

可以预见,新型电力系统与新能源汽车这两场面向双碳目标分别兴起的产业革命,将在V2G的牵引下实现深度融合,共同塑造未来能源体系的新范式。

参考文献

- [1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [2] 章建华,林山青,何洋,等.新型电力系统发展蓝皮书[M].北京:中国电力出版社,2023.
ZHANG Jianhua, LIN Shanqing, HE Yang, et al. Blue book on new-type power system development [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [3] 万钢.以新能源汽车创新引领加快向汽车强国迈进的步伐[J].高科技与产业化,2024,30(3):24-27.
WANG Gang. To lead the innovation of new energy vehicles to accelerate the pace of automobile power [J]. High-Technology & Commercialization, 2024, 30(3): 24-27.
- [4] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [5] U. S. Department of Energy. Vehicles-to-grid integration assessment report [R]. Washington, D. C., USA: U. S. Department of Energy, 2025.
- [6] 龚成明,韩亚宁.车网互动的实践进展与框架设计[J].新能源汽车供能技术,2021,5(1):14-17.
GONG Chengming, HAN Yaning. On the practical progress and framework design of vehicle to grid [J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2021, 5(1): 14-17.
- [7] 于德翔,龚成明.电动汽车充电网——技术、产品、平台及运营[M].北京:中国电力出版社,2024.
YU Dexiang, GONG Chengming. Electric vehicle charging network: technology, products, platforms, and operations [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2024.
- [8] 王杨洋,茆美琴,杨铖,等.面向多场景辅助服务的大规模电动汽车聚合可调度容量建模[J].电力系统自动化,2024,48(7):103-115.
WANG Yangyang, MAO Meiqin, YANG Cheng, et al. Aggregated and schedulable capacity modeling of large-scale electric vehicles for multi-scenario auxiliary services [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 103-115.
- [9] 孔祥玉,张培榕,刘高华,等.基于分层聚合的虚拟电厂互动调节能力多维量化评估[J/OL].电力系统自动化:1-18[2025-10-14].<https://doi.org/10.7500/AEPS20250425003>.
KONG Xiangyu, ZHANG Peirong, LIU Gaohua, et al. Plants based on hierarchical aggregation multi-dimensional quantitative assessment of interactive regulation capability for virtual power [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-18 [2025-10-14]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20250425003>.
- [10] 陈卓旭,胡泽春,鲍志远,等.大规模电动汽车充换电设施集总功率实时分解策略[J/OL].电力系统自动化:1-13[2025-10-13].<https://doi.org/10.7500/AEPS20250319001>.
CHEN Zhuoxu, HU Zechun, BAO Zhiyuan, et al. Real-time decomposition strategy of aggregate power for large-scale electric vehicle charging and battery swapping facilities [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-13 [2025-10-13]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20250319001>.
- [11] 牟玉亭,宋梦,明昊.市场环境下降规模车网互动研究现状与展望[J].电力需求侧管理,2025,27(4):49-56.
MU Yuting, SONG Meng, MING Hao. Research status and prospects of large-scale market-driven vehicle-to-grid interaction [J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(4): 49-56.
- [12] 朱聆,汪隆君,陈志峰,等.计及三相不平衡的电动汽车充电站参与调压辅助服务模型[J].电力系统保护与控制,2025,53(17):1-12.
ZHU Han, WANG Longjun, CHEN Zhifeng, et al. Voltage regulation ancillary service model for electric vehicle charging station considering three-phase unbalance [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(17): 1-12.
- [13] 葛鑫鑫,路佳鑫,王飞,等.现货市场下考虑绿电合约分解的EV型虚拟电厂优化投标模型[J/OL].电力系统自动化:1-10[2025-10-13].<https://doi.org/10.7500/AEPS20250430005>.
GE Xinxin, LU Jiaxin, WANG Fei, et al. Optimal bidding model for electric vehicle virtual power plant considering green electricity contract decomposition in spot market [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-10 [2025-10-13]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20250430005>.
- [14] 李世春,刘浩斌,谢佳宏,等.住宅/办公区用电行为主导的配电网-代理商-电动汽车互动调度策略[J/OL].电力系统及其自动化学报:1-13[2025-10-13].<https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001708>.
LI Shichun, LIU Haobin, XIE Jiahong, et al. Interactive scheduling strategy of distribution network agent electric vehicle dominated by residential/workplace electricity consumption behavior [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA: 1-13 [2025-10-13]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001708>.
- [15] 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.
- [16] 能源互联网与电动汽车互动规范:GB/T 44638—2024[S].北京:中国电力企业联合会,2024.
Specification for interaction between Energy Internet and electric vehicle: GB/T 44638—2024 [S]. Beijing: China Electricity Council, 2024.
- [17] 电动汽车充换电设施有序充电和V2G双向能量互动技术规范:DB4403/T 342—2023[S].2023.
Technical specification for coordinated charging and V2G of electric vehicle charging/battery swap infrastructure: DB4403/T 342—2023[S]. 2023.
- [18] 中国电力企业联合会.车网互动技术标准体系(2025版)[R].2025.
China Electricity Council. Technical standard system for vehicle-to-grid (2025 edition)[R]. 2025.
- [19] 中国电动汽车百人会.电动汽车与电网互动的商业前景:上海需求响应试点案例[EB/OL].(2020-06-01)[2025-09-30].
https://www.sohu.com/a/440389928_120978496.
China EV100 Association. Business prospects of vehicle-to-grid: demand response pilot case in Shanghai[EB/OL]. (2020-06-01) [2025-09-30]. https://www.sohu.com/a/440389928_120978496.
- [20] V2G Hub. Insights: global V2G projects overview[EB/OL].(2025-09-25)[2025-09-25]. <https://www.v2g-hub.com/insights/>.
- [21] 关于公布首批车网互动规模化应用试点的通知:[2025]241号[EB/OL].(2025-04-02)[2025-12-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396958.html.
Notice on the publication of the first batch of large-scale vehicle-to-grid pilot programs: [2025]No. 241[EB/OL]. (2025-04-02) [2025-12-23]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396958.html.
- [22] 杨卫东,辛耀东,郭王勇,等.车网互动的工程实施困境与对策建议[J/OL].*电力系统自动化*:1-17[2025-10-13].<https://doi.org/10.7500/AEPS20240930008>.
YANG Weidong, XIN Yaozhong, GUO Wangyong, et al. Challenges and countermeasure suggestions of engineering implementation for vehicle-to-grid [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-17[2025-10-13]. <http://doi.org/10.7500/AEPS20240930008>.
- [23] 国家能源局.关于支持电力领域新型经营主体创新发展的指导意见[EB/OL].(2024-11-28)[2025-09-22].https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-11/28/c_1212408354.htm.
National Energy Administration. Guidance on supporting the innovative development of new business entities in the power sector[EB/OL]. (2024-11-28) [2025-09-22]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-11/28/c_1212408354.htm.
- [24] 李政,李伟起,张忠伟,等.“双碳”目标下中国电力系统灵活性资源发展策略研究[J].*中国工程科学*,2024,26(4):108-120.
LI Zhen, LI Weiqi, ZHANG Zhongwei, et al. Development strategy of flexible resources in China's power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(4): 108-120.
- [25] International Energy Agency. World energy outlook 2018[EB/OL]. [2025-09-22]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- [26] 舒印彪,汤涌,张正陵,等.欧洲伊比利亚半岛电网“4·28”大停电事故分析及启示[J].*中国电机工程学报*,2025,45(17):6603-6612.
SHU Yinbiao, TANG Yong, ZHANG Zhengling, et al. Analysis and lessons of the April 28, 2025 blackout in the Iberian Peninsula power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(17): 6603-6612.
- [27] 李逸欣,吴伟杰,张伊宁,等.大规模新能源接入的电力系统惯量缺失机理及惯量水平评估[J].*南方能源建设*,2024,11(5):132-139.
LI Yixin, WU Weijie, ZHANG Yining, et al. Mechanism of inertia loss and evaluation of inertia level in power systems with large scale new energy access [J]. *Southern Energy Construction*, 2024, 11(5): 132-139.
- [28] 刘学成,杨军,申锦鹏,等.基于系统动力学模型的电力系统等效惯量时空演变趋势研究[J].*全球能源互联网*,2024,7(5):579-590.
LIU Xuecheng, YANG Jun, SHEN Jinpeng, et al. Analysis of spatio temporal evolution trend of equivalent inertia in power system based on system dynamics model[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(5): 579-590.
- [29] 王伟胜,王铮,董存,等.中国短期风电功率预测技术现状与误差分析[J].*电力系统自动化*,2021,45(1):17-27.
WANG Weisheng, WANG Zheng, DONG Cun, et al. Status and error analysis of short-term forecasting technology of wind power in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(1): 17-27.
- [30] 新能源车扎堆“零点充电”导致用电负荷飙升,海南电网统调负荷首次突破800万千瓦[EB/OL].(2024-06-22)[2025-10-11].
<http://hainan.sina.cn/news/zh/2024-06-22/detail-inazqvzi2676525.d.html>.
Surge in power load caused by concentrated “midnight charging” of new energy vehicles, Hainan power grid's total regulated load exceeds 8 million kW for the first time[EB/OL]. (2024-06-22) [2025-10-11]. <http://hainan.sina.cn/news/zh/2024-06-22/detail-inazqvzi2676525.d.html>.
- [31] 唐文升,王阳,张煜,等.基于多维价格弹性系数的分时电价对负荷特性影响机理[J].*中国电力*,2024,57(2):202-211.
TANG Wensheng, WANG Yang, ZHANG Yu, et al. Influence mechanism of time-of-use electricity prices on industry load characteristics based on multi-dimensional price elasticity coefficient matrix [J]. *Electric Power*, 2024, 57(2): 202-211.
- [32] 侯慧,何梓嫻,侯婷婷,等.大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J].*电力系统保护与控制*,2024,52(14):177-187.
HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, etc. Review of large-scale vehicle-grid interactive demand response strategies and potential assessment [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 177-187.
- [33] NEHIBA C. Electric vehicle usage, pollution damages, and the electricity price elasticity of driving [J]. *Journal of*

- environmental economics and management, 2024, 124: 102915.
- [34] 郭伟嘉,刘敦楠,王文,等.基于智能合约的电动汽车充电服务费自适应调整机制[J].电力自动化设备,2022,42(10):13-20. GUO Weijia, LIU Dunnan, WANG Wen, et al. Adaptive adjustment mechanism of electric vehicle charging service fees based on smart contracts [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 13-20.
- [35] 电动汽车用动力电池循环寿命要求及试验方法:GB/T 31484—2015[S].北京:中国电力出版社,2015. Cycle life requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 31484—2015 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [36] 9月纯电车新品多数续航在600公里以上[EB/OL].(2025-10-04)[2025-10-17].<https://www.163.com/dy/article/KB17JMO9051191D6.html>. Most new pure electric vehicles in september have a range above 600 km [EB/OL]. (2025-10-04) [2025-10-17]. <https://www.163.com/dy/article/KB17JMO9051191D6.html>.
- [37] 王震坡,梁兆文.中国新能源汽车大数据研究报告[M].北京:机械工业出版社,2024. WANG Zhenpo, LIANG Zhaowen. China new energy vehicle big data research report [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2024.
- [38] 周原冰,龚乃玮,王皓界,等.中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J].中国电力,2024,57(10):1-11. ZHOU Yuanbing, GONG Naiwei, WANG Haojie, et al. Impact of EV development and vehicle-grid interaction on new energy storage configuration in China[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 1-11.
- [39] 磷酸铁锂电池寿命特性:循环次数、家用年限与衰减规律解析[EB/OL].(2026-01-16)[2026-03-03].<https://cj.sina.com.cn/articles/view/7880068201/1d5b04c6901901pvoa froms=ggmp>. Analysis of the lifespan characteristics of lithium iron phosphate batteries: cycle times, household service life, and degradation patterns[EB/OL]. (2026-01-16) [2026-03-03]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/7880068201/1d5b04c6901901pvoa froms=ggmp>.
- [40] 中国新能源汽车用车报告(2024年)[EB/OL].(2024-12-10)[2025-10-20].<https://aigc.idigital.com.cn/djyanbao/2024-12-16.pdf>. China new energy vehicle report (2024) [EB/OL]. (2024-12-10) [2025-10-20]. <https://aigc.idigital.com.cn/djyanbao/2024-12-16.pdf>.
- [41] 魏一凡,韩雪冰,卢兰光,等.面向碳中和的新能源汽车与车网互动技术展望[J].汽车工程,2022,44(4):449-464. WEI Yifan, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Prospect of interactive technology between new energy vehicles and vehicle network for carbon neutrality [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 449-464.
- [42] HAN X, MAO S, WANG Y, et al. Manipulation of lithium dendrites based on electric field relaxation enabling safe and long-life lithium-ion batteries[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 3699.
- [43] 陈宇,祝之森,白敬波,等.电力电子设计智能化:技术路线综述和前沿探索[J/OL].中国电机工程学报:1-19[2025-12-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241598>. CHEN Yu, ZHU Zhisen, BAI Jingbo, et al. Intelligent design of power electronics: technical roadmap overview and frontier exploration[J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering: 1-19 [2025-12-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241598>.
- [44] WU J, XU Z, GU C. Research and practice of electric vehicle charging participating in power system frequency regulation [C]// 34th World Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS34), June 25-28, 2021, Nanjing, China: 1-8.
- [45] ALAMGIR S, HASSAN S J U, MEHDI A, et al. A comprehensive review of vehicle-to-grid (V2G) technology as an ancillary services provider [J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106813.
- [46] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报,2025,45(1):277-297. LIU Hui, YU Siqu, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-297.
- [47] 习近平在联合国气候变化峰会上的致辞[EB/OL].(2025-09-25)[2025-09-30].https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202509/content_7042184.htm. Address by Xi Jinping at the United Nations Climate Change Summit [EB/OL]. (2025-09-25) [2025-09-30]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202509/content_7042184.htm.
- [48] 2030年中国将迎来新能源革命爆发期[EB/OL].(2025-02-27)[2025-09-30].https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/kjrd/qtrd_kjrd/202502/t20250227_196972.html. China's new-energy revolution will enter a takeoff phase in 2030 [EB/OL]. (2025-02-27) [2025-09-30]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/kjrd/qtrd_kjrd/202502/t20250227_196972.html.
- [49] 《中国动力电池产业面向2035发展框架研究报告》:到2035年全球动力电池装机量接近4TW·h,储能电池规模将达到1.6TW·h[EB/OL].(2024-06-04)[2026-01-09].<https://news.bjx.com.cn/html/20240604/1380893.shtml>. China's Power Battery Industry Development Framework for 2035 Research Report: by 2035, the global power battery installed capacity will be close to 4 TW·h, and the scale of energy storage battery will reach 1.6 TW·h [EB/OL]. (2024-06-04) [2026-01-09]. <https://news.bjx.com.cn/html/20240604/1380893.shtml>.
- [50] 2035年全社会用电量将达16万亿千瓦时[EB/OL].(2024-05-31)[2026-01-09].<https://finance.sina.cn/2024-05-31/detail-inaxcwss3565746.d.html>. In 2035, the electricity consumption of the whole society will reach 16 trillion kW·h [EB/OL]. (2024-05-31) [2026-01-09]. <https://finance.sina.cn/2024-05-31/detail-inaxcwss3565746.d.html>.
- [51] 亟待围绕保供和转型构建新型电力系统[EB/OL].(2022-10-31)[2026-01-09].https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2022-10/31/content_25946949.htm. Urgent need to build a new power system around supply security and transformation [EB/OL]. (2022-10-31) [2026-01-09]. https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2022-10/31/content_25946949.htm.

- 25946949.htm.
- [52] 国家发展和改革委员会. 电力需求侧管理办法(2023年版)[EB/OL]. (2023-09-27)[2026-01-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/P020230927316131533276.pdf>. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Power demand side management approach (2023 edition)[EB/OL]. (2023-09-27)[2026-01-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/P020230927316131533276.pdf>.
- [53] 工业和信息化部装备工业发展中心. 新型储能技术发展路线图(2025—2035年)[R/OL]. (2025-09-18)[2026-01-09]. https://www.miit-eidc.org.cn/art/2025/9/18/art_1644_11711.html. Equipment Industry Development Center of Ministry of Industry and Information Technology. New energy storage technology development roadmap (2025-2035)[R/OL]. (2025-09-18)[2026-01-09]. https://www.miit-eidc.org.cn/art/2025/9/18/art_1644_11711.html.
- [54] ZHAO Z, KONG S, BO B, et al. Research on battery aging and user revenue of electric vehicles in vehicle-to-grid (V2G) scenarios[J]. *Electronics*, 2025, 14(23): 4567.
- [55] 辛清瑶, 黄博川, 张斌. 面向碳中和的车网互动储能潜力及资源替代效益评估[J/OL]. *系统工程理论与实践*: 1-20[2026-03-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20260107.1719.066>. XIN Qingyao, HUANG Bochuan, ZHANG Bin. Energy storage potential and resource substitution assessment of vehicle-to-grid interaction toward carbon neutrality [J/OL]. *System Engineering Theory and Practice*: 1-20[2026-03-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20260107.1719.066>.
- [56] 中国储能网. 全场景渗透! 2025年构网型储能技术、应用16个重大突破[EB/OL]. (2025-11-27)[2026-01-09]. <https://www.escn.com.cn/news/show-2149272.html>. China Energy Storage Network. Whole scene penetration! 2025 grid-type energy storage technology, application of 16 major breakthroughs [EB/OL]. (2025-11-27)[2026-01-09]. <https://www.escn.com.cn/news/show-2149272.html>.
- [57] 赵紫原. 到期煤电机组: 退役还是延寿(行业观察)[N]. *中国能源报*, 2022-05-23. ZHAO Ziyuan. Expired coal-fired power units: retire or extend life? (industry observation) [N]. *China Energy News*, 2022-05-23.
- [58] NAGLE F, SEAMANS R, TADELIS S. Transaction cost economics in the digital economy: a research agenda [J]. *Strategic Organization*, 2025, 23(2): 351-365.
- [59] JANG S, OZAY N, MATHIEU J L. Probabilistic constraint construction for network-safe load coordination [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 39(2): 4473-4485.
- [60] YANG T, ZU G, WANG B. Steady-state security region-based decentralized coordination of distributed energy resources in distribution grids[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(12): e13141.
- [61] 汪岩佳, 王宇川, 王西田, 等. 考虑虚拟电厂中分布式资源联动不确定性的优化调度策略[J/OL]. *电力系统自动化*: 1-10[2025-10-13]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20250205001>. WANG Yanjia, WANG Yuchuan, WANG Xitian, et al. Optimized scheduling strategy considering the interdependent uncertainty of distributed resources in virtual power plant [J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-10[2025-10-13]. <https://doi.org/10.7500/AEPS20250205001>.
- [62] YU X, LIU N, XUE Y. The role of cyber-physical-social systems in smart energy future [J]. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*, 2024, 2: 35-42.
- [63] DENG Y H, HU Y J, DING D X, et al. Real-time optimal control method of electric vehicle virtual power plant based on deviation feedback-predictive correction [C]// 2025 9th International Conference on Power Energy Systems and Applications, June 20-22, 2025, Nanjing, China: 611-616.
- [64] 吕思, 陈胜, 卫志农, 等. 面向电力-交通系统协同运行的建模、求解与应用评述[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(13): 1-15. LYU Si, CHEN Sheng, WEI Zhinong, et al. Review of modeling, solution and application for coordinated operation of power-transportation systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(13): 1-15.
- [65] 吴巨爱. 考虑参与者行为的电动汽车聚合商运行优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2019. WU Juai. Operation optimization of electric vehicle aggregator considering the participants' behaviors [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019.
- [66] 李志煌, 邵振国, 朱少林, 等. 基于主从博弈推演和改进多任务学习的居民用户需求响应潜力评估[J]. *电网技术*, 2025, 49(5): 1781-1791. LI Zhihuang, SHAO Zhenguo, ZHU Shaolin, et al. Assessing the potential of residential user demand response based on stackelberg game theory and improvements in multi-task learning [J]. *Power System Technology*, 2025, 49(5): 1781-1791.
- [67] BERTUCCI J P, HOFMAN T, SALAZAR M. Joint optimization of charging infrastructure placement and operational schedules for a fleet of battery electric trucks [C]// 2024 American Control Conference (ACC), July 10-12, 2024, Toronto, Canada: 2995-3000.
- [68] KALAKANTI A K, RAO S. Dynamic pricing for electric vehicle charging [C]// Proceedings of the 40th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing, March 31-April 4, 2025, Catania, Italy: 1609-1611.
- [69] SALAZAR E J, JURADO M, SAMPER M E. Reinforcement learning-based pricing and incentive strategy for demand response in smart grids[J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1466.
- [70] 王芳, 夏军. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2021. WANG Fang, XIA Jun. Safety analysis and design of power battery systems for electric vehicles [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [71] 电动汽车充电过程电池系统安全风险监测及故障预警规范: T/CSAE 254—2022[S]. 北京: 中国汽车工程学会, 2022. Specification for safety risk monitoring and fault early warning of electric vehicle battery system during charging process: T/CSAE 254—2022 [S]. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2022.
- [72] 李亚伦, 欧阳明高, 赵争鸣. 电动汽车车能互动的充电机理、系

- 统构型与推广路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6920-6940.
- LI Yalun, OUYANG Minggao, ZHAO Zhengming. Charging mechanism, system configuration, and promotion pathway of vehicle to grid for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6920-6940.
- [73] 林超凡, 别朝红. 新型电力系统不确定性静态建模及量化分析方法评述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 14-27.
- LIN Chaofan, BIE Zhaohong. Review of static modeling and quantitative analysis methods for uncertainties of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 14-27.
- [74] 高洪超, 康重庆, 李嘉宇, 等. 新型电力系统下虚拟电厂的技术演进研判与运营挑战分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19): 6057-6071.
- GAO Hongchao, KANG Chongqing, LI Jiayu, et al. Technical evolution judgment and operation challenge analysis of virtual power plant under new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19): 6057-6071.
- [75] 成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 89-99.
- CHENG Ruiting, ZHANG Yongjun, LI Licheng, et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption [J]. Strategic of CAE, 2023, 25(2): 89-99.
- [76] 国家能源局. 电力并网运行管理规定: (2021)60号[EB/OL]. (2021-12-21)[2025-12-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391369.htm.
- National Energy Administration. Provisions on the administration of grid-connected power operation: [2021]No. 60 [EB/OL]. (2021-12-21)[2025-12-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391369.htm.
- [77] 国家能源局. 电力辅助服务管理办法: (2021)61号[EB/OL]. (2021-12-21)[2025-12-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm.
- National Energy Administration. Measures for the administration of electric power ancillary services: [2021]No. 61 [EB/OL]. (2021-12-21)[2025-12-23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm.
- [78] Nissan launched "LEAF to Home" V2H EV power supply system [EB/OL]. (2012-05-31)[2026-04-25]. <https://global.nissannews.com/en/videos/video-197552998002>.
- [79] Powering your house with an EV during an outage [EB/OL]. (2024-04-17)[2026-04-25]. <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/powering-your-house-with-an-ev-during-an-outage>.
- [80] 新浪财经. 北汽福田车网互动微网能源系统面世[EB/OL]. (2025-05-28)[2026-04-25]. <https://finance.sina.com.cn/wm/2025-05-28/doc-ineycmqv5830323.shtml>.
- Sina Finance. BAIC Foton Unveils vehicle-to-grid microgrid energy system [EB/OL]. (2025-05-28)[2026-04-25]. <https://finance.sina.com.cn/wm/2025-05-28/doc-ineycmqv5830323.shtml>.
- [81] The complete EV bidirectional charging revolution: how V2G, V2H, and V2L are transforming electric vehicles into energy powerhouses [EB/OL]. (2026-04-23)[2026-04-25]. <https://dardoor.com/the-complete-ev-bidirectional-charging-revolution-how-v2g-v2h-and-v2l-are-transforming-electric-vehicles-into-energy-powerhouses>.
- [82] 经济日报. 换电基础设施建设迈入新阶段[EB/OL]. (2026-02-24)[2026-04-25]. http://paper.ce.cn/pc/content/202602/24/content_328536.html.
- Economic Daily. Battery swapping infrastructure construction enters a new phase [EB/OL]. (2026-02-24)[2026-04-25]. http://paper.ce.cn/pc/content/202602/24/content_328536.html.
- [83] 广东省发展改革委. 广东省发展改革委关于新能源汽车向电网放电上网电价问题的批复[EB/OL]. (2025-05-14)[2025-09-11]. https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4710468.html.
- Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Reply of the Guangdong Provincial Development and Reform Commission on the issue of on-grid electricity price for new energy vehicles discharging to the power grid [EB/OL]. (2025-05-14)[2025-09-11]. https://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4710468.html.
- [84] 江苏省发展改革委. 关于支持车网互动规模化应用试点城市和试点项目建设电价政策有关事项的函[EB/OL]. (2025-08-12)[2025-10-13]. https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2025/8/14/art_51012_11628764.html.
- Jiangsu Provincial Development and Reform Commission. Electricity pricing policies for pilot cities and pilot projects of large-scale V2G interactive applications [EB/OL]. (2025-08-12)[2025-10-13]. https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2025/8/14/art_51012_11628764.html.
- [85] 中国南方电网. 全国首创V2G责任险助力车网互动规模化[EB/OL]. (2025-07-04)[2025-09-22]. https://www.csg.cn/xwzx/2025/2025gsyw/202507/t20250704_348500.html.
- China Southern Power Grid. Nationwide first V2G liability insurance facilitates large-scale V2G [EB/OL]. (2025-07-04)[2025-09-22]. https://www.csg.cn/xwzx/2025/2025gsyw/202507/t20250704_348500.html.
- [86] 王春艳, 李梦义, 那伟, 等. 钠离子电池: 新能源技术的革命[J]. 科技视界, 2025, 15(23): 28-31.
- WANG Chunyan, LI Mengyi, NA Wei, et al. Sodium-ion batteries: revolution in new energy technologies [J]. Science & Technology Vision, 2025, 15(23): 28-31.
- [87] 刘文霞, 张蕾蕾, 刘宗歧, 等. 城市纯电动汽车发展模式论证方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 34-40.
- LIU Wenxia, ZHANG Leilei, LIU Zongqi, et al. A development pattern argumentation method for battery electric vehicles in cities [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 34-40.
- [88] 鲍志远, 胡泽春. 大规模电动汽车充换电设施可调能力聚合评估与预测[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4103-4117.
- BAO Zhiyuan, HU Zechun. Aggregated assessment and prediction of adjustable capacity for large-scale electric vehicle charging and battery swapping facilities [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4103-4117.
- [89] Dutch car sharing firm adds Renault EVs capable of powering local grid [EB/OL]. (2025-06-04)[2025-12-31]. <https://>

- www. reuters. com /business/energy/dutch-car-sharing-firm-adds-renault-evs-capable-powering-local-grid-2025-06-04/.
- [90] Utrecht becomes Europe's first city with a vehicle-to-grid (V2G) car-sharing service [EB/OL]. (2025-06-05) [2025-12-31]. <https://media.renaultgroup.com/utrecht-becomes-europes-first-city-with-a-vehicletogrid-v2g-carsharing-service/lang=fra>.
- [91] Healey-Driscoll administration announces \$50 million investment in electric vehicle charging infrastructure [EB/OL]. (2024-02-07) [2025-12-31]. <https://www.mass.gov/news/healey-driscoll-administration-announces-50-million-investment-in-electric-vehicle-charging-infrastructure>.
- [92] 刘战,周越,林宇峰,等. 考虑不同主体利益的电动汽车与电网互动的机制与实现方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 120-133.
- LIU Zhan, ZHOU Yue, LIN Yufeng, et al. Interaction mechanism and implementation method of electric vehicle and power grid considering benefits of different subjects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 120-133.
- [93] 国家发改委. 关于完善价格机制促进新能源发电就近消纳的通知[EB/OL]. (2025-09-12) [2025-09-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202509/t20250912_1400444.html.
- National Development and Reform Commission. Notice on improving price mechanism to promote nearby renewable power consumption [EB/OL]. (2025-09-12) [2025-09-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202509/t20250912_1400444.html.
- 邓叶航(1999—),男,硕士,主要研究方向:电力需求侧管理。E-mail:dengyeh@teld.cn
- 龚成明(1977—),男,通信作者,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向:微电网和虚拟电厂、电动汽车与电网互动技术、产消型用户能源管理系统、电力系统运行与控制。E-mail:gongcm@teld.cn
- 高 剑(1975—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向:电网调度运行、大电网安全稳定分析、源网荷储协调控制、清洁能源调度运行管理、配电网规划、大电网安全稳定划管理。E-mail:457399216@qq.com
- (编辑 代长振)

Value Matching and Large-scale Application Pathway Analysis of Vehicle-to-Grid

DENG Yehang¹, GONG Chengming¹, GAO Jian², SHAO Changhong³, GUO Shan⁴, ZHANG Lili⁵

(1. DERI-TELD Energy Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

3. BAIC Foton Motor Engineering Research Institute, Beijing 102206, China;

4. Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China;

5. Qingdao SCO-TELD Virtual Power Plant Technology Co., Ltd., Qingdao 266318, China)

Abstract: Aiming at the contradiction between the theoretical potential and practical application of vehicle-to-grid (V2G), this paper proposes that its large-scale development is a process evolving from “grid’s demand” to “vehicle’s self-awareness”. The matching characteristics of V2G in capability and scale with the demands of new power systems are systematically elucidated. V2G operators, as new business entities, while undertaking multiple roles of “certainty creator, value realizer, and technology innovator”, will further develop into new entities bearing balancing responsibility and reliability responsibility. The key technologies and mechanisms required to achieve this goal are discussed. Furthermore, it is pointed out that the role evolution of electric vehicles is a key factor in promoting large-scale V2G application. A four-stage roadmap for the evolution of V2G toward deep integration of transportation and energy is constructed, which is expected to provide theoretical reference for industrial collaborative development.

This work is supported by Inner Mongolia’s “Leader-follower” S&T Project (No. 2022JBGS0043).

Key words: new power system; vehicle-to-grid (V2G); value matching; large-scale application; flexibility resource; new business entity

