



中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响

周原冰^{1,2}, 龚乃玮^{1,2}, 王皓界^{1,2}, 肖晋宇^{1,2}, 张赞^{1,2}

(1. 全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031; 2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031)

摘 要: 电力系统新型储能发展预期高, 但存在与其他灵活调节资源统筹考虑不足的问题。随着电动汽车持续快速发展, 未来电动汽车车网互动必将影响新型储能需求, 新型储能规划必须与电动汽车发展统筹考虑。通过分析影响电动汽车发展与车网互动调节能力的关键因素, 研判中国电动汽车的发展规模, 结合电动汽车用能习惯与电力系统调节需求, 构建了中国电动汽车灵活性潜力研究模型, 并从系统全局优化角度, 评估车网互动灵活调节能力, 分析了对中国及其 7 个区域新型储能配置的影响。

关键词: 新型储能; 电动汽车; 车网互动; 源网荷一体化规划; 随机动态模型

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202405058

0 引言

构建新型电力系统对于实现“碳达峰、碳中和”目标至关重要^[1-5]。新型电力系统中, 电源构成由传统确定性的常规电源占主导, 向随机性、间歇性、波动性的新能源发电占主导转变, 负荷从“被动型”向具有灵活能力的“主动型”转变, 供需双侧均呈现高度不确定性。系统平衡方式也因此发生根本转变, 由传统的源随荷动方式, 转变为不确定发电与不确定负荷双向匹配, 需要更强的系统灵活调节能力。当前, 中国灵活调节电源装机比重不足 6%, 系统调节能力不足问题逐渐凸显^[6-7]。

新型储能, 即锂离子电池、液流电池、飞轮、压缩空气、氢/氨、储热/冷等除抽水蓄能外的新兴储能技术, 具有多种优势。随着技术经济性进步, 新型储能正在逐步成为系统灵活调节能力的重要支撑^[8-15]。截至 2023 年底, 已投运新型储能累计装机规模达 3 139 万 kW/6 687 万 kW·h, 平均储能时长 2.1 h, 相关投资已超千亿元。系统平衡和安全需要新型储能, 但新型储能相关基础设施投资大, 势必将推高系统供电成本。过量配

置, 将造成重大资源浪费。

因此, 未来系统究竟需要多少新型储能、什么形式的新型储能是需要重点研究的课题。多数专家学者对新型储能需求预期较高: 到 2030 年为 1.5 亿~3.2 亿 kW, 到 2050 年能够达到 10 亿 kW 以上。然而, 抽蓄、电动汽车发展等各种因素将影响新型储能需求, 尤其是电动汽车车网互动将产生重要影响。电动汽车自带储能, 停靠时间长, 具备向电网反送电 (vehicle to grid, V2G) 的“移动储能”特性^[16-23]。近 5 年, 中国电动汽车销量年均增速已高达 67%。截至 2023 年底, 中国电动汽车保有量已达到 2 041 万辆, 占中国汽车比重达 6.1%。2023 年 1—7 月, 中国电动汽车充电量约 441.4 亿 kW·h, 占全社会用电量的 0.8%。如果未来电动汽车持续快速发展, 并实现与电网的良性互动, 将大幅降低系统对新型储能的配置需求。

基于这一考虑, 本文从系统全局优化角度, 结合中国和分区域电力系统供需平衡, 充分考虑源荷互动, 将自下而上的微观技术路线和系统宏观视角相结合, 统筹量化研究电动汽车未来发展规模及车网互动对新型储能配置的影响: 1) 基于系统视角, 将电动汽车调节与新型电力系统规划运行进行统筹协调, 得出具有实际应用意义的电动汽车灵活调节能力; 2) 充分考虑各种影响因素与随机行为, 建立科学合理的规模预测与全时域全景可观性灵活调节模型; 3) 全面考虑调

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-08-23。

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (SGGE0000JYJS2400035)。



节功率、持续时长、调节时段等重要参数,区分短期与长期调节能力,合理准确定位电动汽车车网互动对储能的替代性。研究尺度覆盖近中期到远期,涵盖中国及其 7 大区域,对于科学准确评估未来系统新型储能配置具有重要意义。

1 机理与影响因素

1.1 灵活性机理

电动汽车停靠时间长且配置储能电池,具有双向调节和响应速度快的特点。根据相关统计,中国私人电动汽车日均行驶时间仅为 2.6 h,平均 90% 的时间处于非行驶状态^[24]。在保障自身出行需求的前提下,可以通过 V2G 形式,在系统负荷高峰期放电支撑电网供电,在低谷期充电补充出行和放电消耗的电量,通过“源-荷”角色的灵活变换与电网进行友好互动。车网互动的实施途径,可以通过电网、负荷聚合商等直接发布调度指令,根据电动汽车响应情况给予相应经济补偿,也可以通过峰谷电价等市场手段间接引导。

与电化学储能类似,电动汽车可双向调节,响应精度高,响应速度最高可达毫秒级,持续时间跨越秒级到数小时,能够适应系统从短期到长期的多时间尺度调节需求。短时上,主要发挥调频作用,响应速度达到秒级到分钟级,持续数秒至数分钟;长时上,主要发挥削峰填谷、日内调峰作用,提供日内小时级、跨日的调节能力,持续作用时间达数小时。

电动汽车的基础属性是交通工具,满足其用能需求是基本前提,因此,电动汽车可视作具有一定约束条件的电化学储能,在控制策略上需要考虑其负荷特性的特殊性和复杂性。除充放电功率、电量等约束外,电动汽车在网时间往往无法同时覆盖电网负荷高峰期和低谷期,导致电动汽车在电网负荷高峰期放电后,可能在次高峰期而非低谷期集中充电,引发新的电网负荷高峰期,需要从系统视角统筹考虑电动汽车集群调度控制目标。

1.2 影响因素分析

1.2.1 发展规模影响因素

电动汽车的发展规模主要受以下因素影响:

1) 出行用能需求与用能习惯,受经济发展、人

口规模等宏观因素影响;2) 电动汽车的续航里程、充电时间、使用寿命、安全性等关键技术成熟度与经济性;3) 充电桩数量、布局、充电便利程度等充换电基础设施完善程度;4) 政府规划目标、环境约束、优惠政策等政策机制。

发达国家汽车保有量的历史数据表明,汽车保有量与人均 GDP 关系呈现“缓-急-缓”的贡珀茨曲线形状^[25]:人均 GDP 较低阶段,汽车保有量缓慢增长,在人均 GDP 达到 10000 美元~25000 美元时,汽车规模高速增长,随着人均 GDP 进一步提升,汽车保有量增速放缓趋于饱和。基于此发展规律,结合未来中国经济发展和人口预测等数据,可研判中国汽车需求总量。为满足这一固定用能需求,存在传统燃油汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车等多种技术路线,各种技术互相竞争,其市场份额取决于技术成熟度与经济性。一般而言,某项技术越成熟、成本越低,其市场规模将增长越快、占领市场份额越高。电动汽车续航里程、充电时间、使用寿命、安全性等关键技术成熟度,直接影响用户出行体验和用能效果,是决定电动汽车规模化发展的首要因素。随着电动汽车技术逐渐成熟,其成本将随规模效应、技术研发投入等因素快速下降,当下降速度高于传统燃油汽车时,电车与油车的价格差距加速缩小,经济性成为决定电动汽车在何时以多大规模替代燃油汽车的关键因素。

除电动汽车自身技术成熟度外,充电桩的数量、布局、充电便利度等基础设施完善程度,也是影响用户用能效果的重要因素。文献[26-28]研究证实了电动汽车规模与充电桩数量的正相关性。文献[29]通过量化研究,发现提高大功率快充桩比例、提升社区和单位充电桩安装率,到 2025 年能够将中国新能源汽车销量渗透率由 16% 提升至 24%。

政府规划目标、环境约束、优惠政策等政策机制也对电动汽车产业发展起到明显影响作用。根据建立的政策成效量化分析模型,在电动汽车发展前期,补贴及税收减免激励政策对产业发展促进作用最为明显,政策强度每增加 1%,对产业发展贡献度增加 1.38%。在由政策驱动向市场驱动的转型阶段,基础设施投资与技术研发创新的鼓励政策起到主要驱动作用。

1.2.2 调节能力影响因素

电动汽车车网互动提供的灵活调节能力大小主要受 3 方面因素影响：1) 参与车网互动的电动汽车数量；2) 电动汽车的行为特性与物理参数，包括电动汽车行驶里程、并网时间等；3) 电动汽车的物理参数，包括电池容量、电池充放电程度、充放电功率等。

电动汽车参与 V2G 的数量，取决于用户意愿度、参与调节的收益和参与的便利度及由此带来的电池损耗成本息息相关。电动汽车的行为特性随机性与不确定性较强，是影响其负荷特性的主要因素，由电动汽车日行驶里程、充电频次、接入电网时间与在网时长、初始荷电状态（state of charge, SOC）、参与 V2G 调节后的最小离网 SOC、参与调节意愿度等关键物理量表征。其中，日行驶里程和充电频次，决定电动汽车充电需求总量和接入电网时的电池 SOC 状态。日行驶里程越高、充电频次越低，则充电前的耗电量越高，意味着初始 SOC 越小、所需充电电量越高。最小离网 SOC、最大放电深度和参与调节意愿度直接影响 V2G 可调节资源量，其中前 2 个指标分别决定了电动汽车在接入电网后累计和单次放电时间。最小离网 SOC 越低，电动汽车所需的净充电电量越少，在接网时段内累计放电时间就越长。最大放电深度越高，则电动汽车单次持续放电时间越长。

在优惠政策、经济激励、峰谷电价等政策机制的影响下，电动汽车根据电网调节需求，统筹

并量化各类潜在复杂影响因素决策其充放电行为，系统根据电动汽车集群参与系统调节前后的全局负荷特性，形成新的净负荷曲线与调节需求，交互迭代，形成闭环模拟。

2 车网互动模型

车网互动模型由源网荷储一体化规划（GTEP）子模型与考虑 V2G 调节惯性的电动汽车负荷子模型 2 部分所构成，研究框架如图 1 所示。2 个子模型数据交互与迭代，实现源网荷储一体化协同模拟仿真，如图 2 所示。

GTEP 模型以确保用电可靠性为前提、以综合度电成本最低作为优化目标，进行电力电量平衡分析计算，模型框架如图 3 所示。模型以电源装机、电网容量、发输电成本效率数据和可再生能源资源禀赋与政策目标为输入，统筹电力供需平衡、机组运行、电力传输、机组建设等约束条件，以综合度电成本最低作为优化目标，采用大规模混合整数规划算法（CPLEX）优化求解并输出目标水平年的电源装机结构及 8760 h 的发电结构、潮流变化、燃料消耗及碳排放量等参数。

考虑 V2G 调节惯性的电动汽车负荷子模型影响因素包括用户行为特性、技术与基础设施水平、电网调节需求。用户行为特性是影响负荷特性的首要因素，涉及电动汽车接入电网时间、在网时长、日行驶里程、充电频次以及参与 V2G 调节后的最小离网 SOC、最大放电深度、参与调节

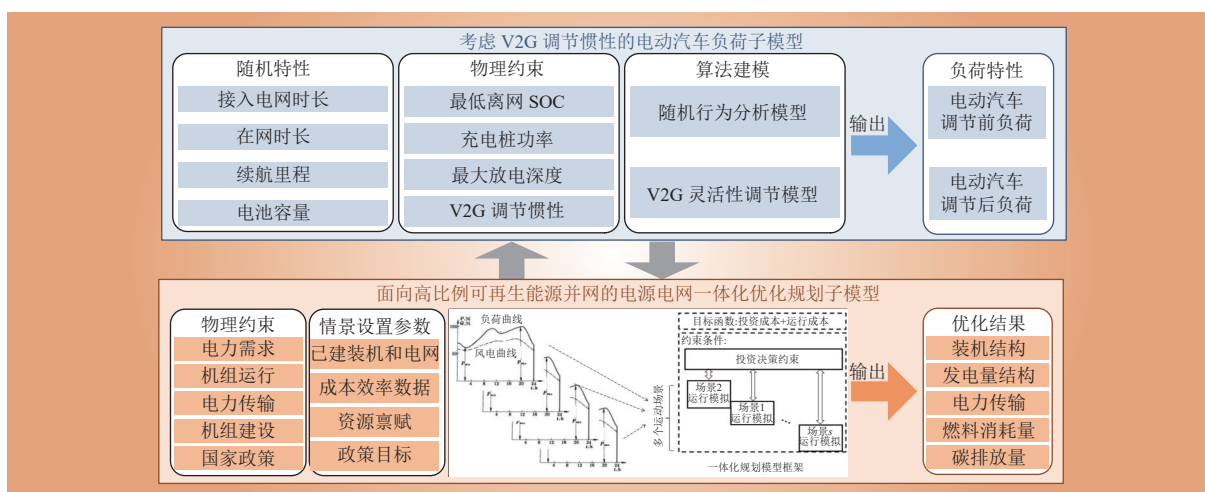


图 1 电动汽车车网互动灵活性潜力研究框架

Fig. 1 Research framework for the potential of flexibility of electric vehicle

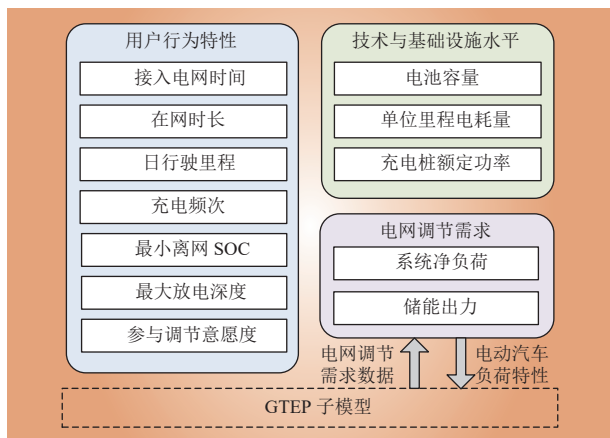


图 2 GTEP 子模型与电动汽车负荷子模型的交互迭代
Fig. 2 Interactive iteration of GTEP sub-model and electric vehicle load sub-model

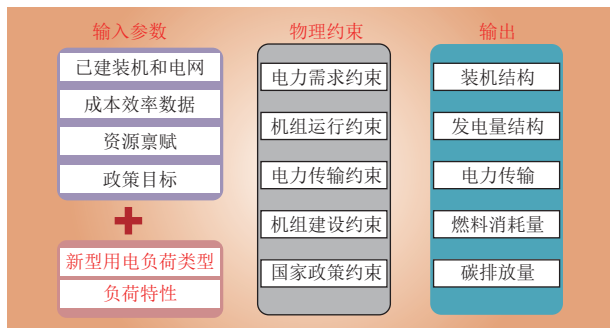


图 3 GTEP 子模型框架
Fig. 3 GTEP sub-model

意愿度等。技术与基础设施水平主要由电池容量、单位里程电耗量、充电桩额定功率表征。电网调节需求由 GTEP 模型结合净负荷与储能出力数据生成，电动汽车根据电网需求，统筹并量化各类潜在复杂影响因素，生成电动汽车参与系统调节前后的 8760 h 全局负荷特性，并同步更新 GTEP 子模型负荷侧数据与电网调节需求数据，形成闭环模拟。

从架构上看，模型由随机行为分析模型与 V2G 灵活性调节模型构成。

1) 随机行为分析模型。模型采用蒙特卡洛算法构建电动汽车随机行为分析模型，还原用户不确定行为随机特征。模型通过对用户行为习惯的观察或抽样试验以及动力电池技术发展趋势研判，计算电动汽车日接入电网时间、日在网时长、日行驶里程、电池容量等参数的概率分布，并从概率分布中重复生成随机参数。其中，电动

汽车在网时长、电池容量与日行驶里程服从高斯分布，即

$$f(\xi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

式中： $f(\xi)$ 为高斯分布 ξ 的概率密度函数； μ 和 σ 分别为高斯分布的期望和标准差。电动汽车首次接入电网初始剩余电量与动力电池容量、日行驶里程数呈线性关系，因此也服从式 (1) 中高斯分布。电动汽车每日接入电网时间服从加权高斯混合分布，即

$$f(\xi) = \sum_{i=1}^K \frac{k_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\xi - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (2)$$

式中： K 为高斯分布组件数量（这里取 $K=3$ ）； k_i 为第 i 个高斯分布的权重； μ_i 和 σ_i 分别为第 i 个高斯分布的期望和标准差。

2) V2G 灵活性调节模型。传统 V2G 仿真模型以当下电力系统需求为调节目标，用户出行需求为主要约束进行构建，实现电动汽车在高峰期时段放电，在负荷低谷期时段充电。但实际场景中，电动汽车在网时间难以完全覆盖电网高峰期和低谷期，电动汽车高峰期放电后，出行需求约束有一定概率导致车辆集群在后续次高峰期集中充电，引起新的高峰负荷，使调节结果背离系统所需。因此，本文新增 V2G 调节惯性约束，使 V2G 计及对电力系统的后续影响，约束条件为

$$\begin{cases} P_{ev}(n, t) \leq P_{evb}(n, t), & t \in \{t | P_{evb}(n, t) = 0, t \in T_{on}\} \\ \sum_{n'=1}^n P_{ev}(n', t) \leq L_{lim+}(t) - L(t), & t \in \{t | P_{evb}(n, t) = 0, t \in T_{on}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中： n 为汽车序号； t 为时间； T_{on} 为电动汽车在网时间； $P_{evb}(n, t)$ 为不参与调节时电动汽车充电功率； $P_{ev}(n, t)$ 为参与 V2G 后电动汽车充电功率（充电为正，放电为负）； $L_{lim+}(t)$ 为区域内净负荷最高限值； $L(t)$ 为区域内净负荷值。不符合惯性约束的电动汽车停止 V2G 放电调节，仅优化自身充电行为。考虑 V2G 调节惯性约束的调节策略如图 4 所示。

基于该方法，V2G 仿真模拟可充分平衡用户侧与系统侧需求，高度还原电动汽车参与 V2G 调节后 8760 h 负荷的真实特性，使 V2G 调节过程具备全对象、全要素、全时域的可观测性。

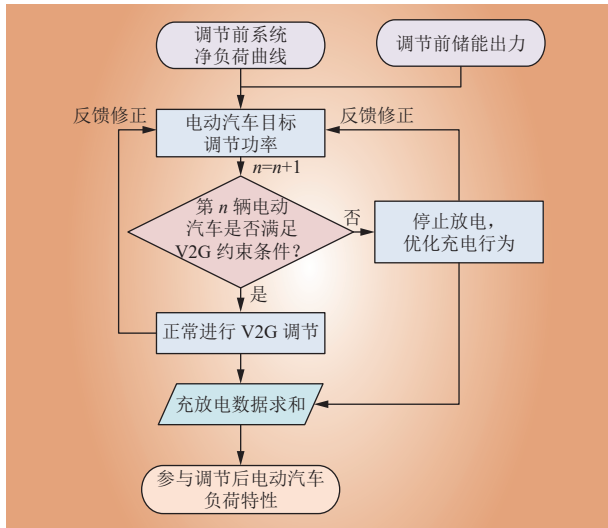


图 4 考虑 V2G 调节惯性约束的调节策略

Fig. 4 The V2G adjusting strategy with adjusting inertia constraint considered

3 对新型储能配置的影响

3.1 电动汽车发展规模

研究机构预测，到 2030 年中国电动汽车保有量为 0.8 亿~1 亿辆。基于技术专利分析法、莱特学习曲线等数学算法，建立中国电动汽车发展预测模型，如图 5 所示。

根据技术成熟度与经济性分析，当前电动汽车在技术成长期，即将迈入技术成熟期，成熟度指标达到 0.8（指标范围为 0~1），随后进步速度

放缓，到 2035 年左右完全成熟。电动汽车技术学习率为 17.3%，而典型燃油汽车学习率为 4%，电动汽车成本下降速度快于传统燃油汽车，在许多应用场景中，电动车已经实现与燃油车相同水平的整体运营经济（total operating economy, TOE）平价。

因动力电池等核心技术、基础设施发展等存在不确定性，预计到 2030 年，电动汽车保有量达到 0.8 亿~1.1 亿辆，占全国汽车总量的 25% 左右，如图 6 所示。年用电量达到 0.4 万亿~0.5 万亿 kW·h，占全社会用电量比重达 3% 左右。到 2050 年，电动汽车成为主要交通方式，保有量达到 3 亿~3.3 亿辆，占全国汽车比重达到 70% 左右。届时，电动汽车用电量将达到 1.2 万亿~1.3 万亿 kW·h，占全社会用电量比重增至 7% 左右。

分区域来看，东中部地区人口集中、设施便利，电动汽车发展进程显著快于西部、北部地区。预计到 2030 年、2050 年，东中部地区电动汽车负荷占全国的比重分别为 68%、64%。

3.2 车网互动灵活性分析

在电动汽车车网互动的 2 种模式中，有序充电模式是强制性的，而提供 V2G 服务则取决于用户意愿。V2G 意愿度与用户出行需求、车辆运营强度等用能需求，V2G 对车辆使用寿命造成的损失，充放电便利程度，和参与 V2G 调节的收益息息相关。

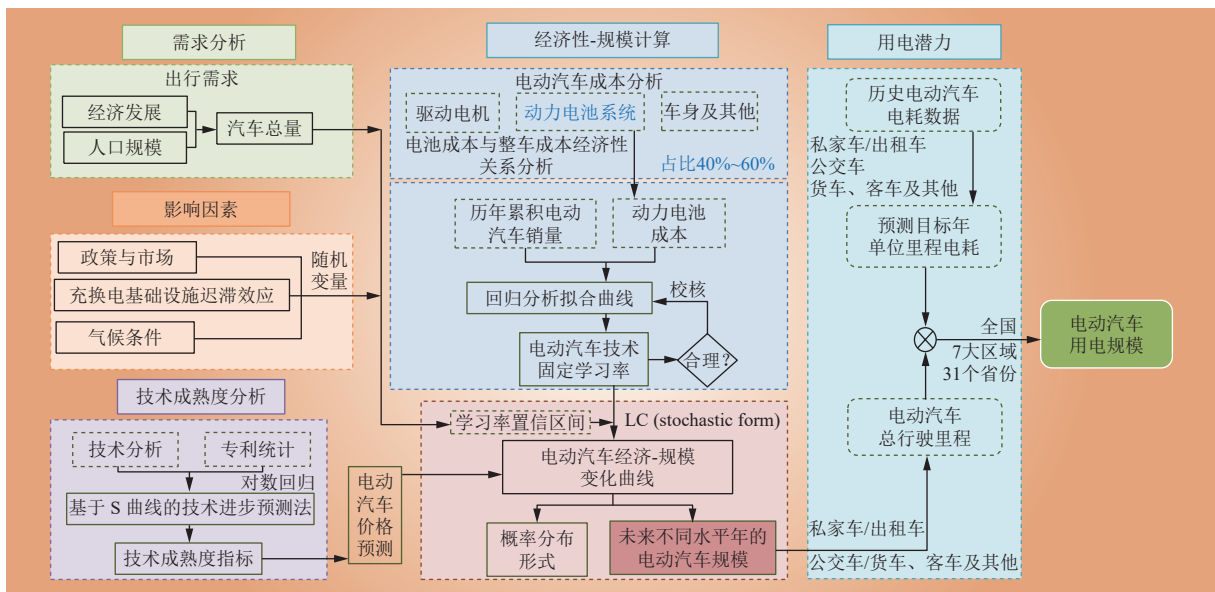


图 5 电动汽车发展预测模型

Fig. 5 Electric vehicle development potential evaluation algorithm

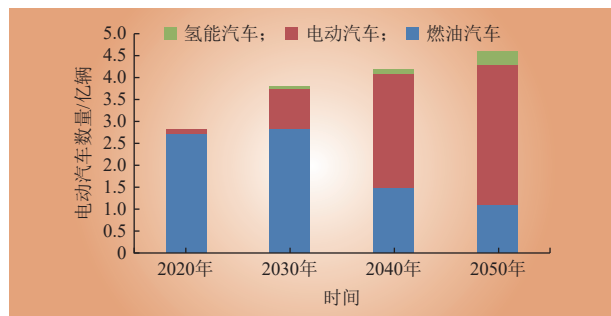


图 6 电动汽车规模预测

Fig. 6 Forecasting of vehicle population

3.2.1 V2G 意愿度分析

当电动汽车动力电池全生命周期的循环寿命，大于其出行需求的循环次数时，理论上具备 V2G 能力。当出行需求的循环次数小于其循环寿命的一半时，从经济性角度而言，即认为车主有意愿提供 V2G 服务。预计到 2030 年，锂电池循环寿命能够达到 3 000 次以上，到 2050 年能够达到 4 500 次以上。如果过渡到固态体系，循环寿命将高达上万次，届时电动汽车参与 V2G 意愿度将进一步提升。

对不同车型全生命周期出行进行用能需求分析，如表 1 所示。私家车是未来提供 V2G 的主要对象，私家车年均行驶里程不高于 2 万 km，全生命周期出行需求最高占用 1 400 次循环寿命，分别约占 2030 年、2050 年电池总循环寿命的 47%、32%，具备 V2G 经济性。出租车、公交车等运营车辆不具备 V2G 经济性，全生命周期所需循环次

表 1 电动汽车分车型用能需求分析

Table 1 Energy demand analysis by vehicle type

种类	参数		全生命周期 出行用能/ (万kW·h)	电池 容量/ (kW·h)	出行循 环次数
私家	年行驶里程/万km	0.8~2	2~7	100	1320
	百km耗电量/(kW·h)	15~22			
出租	年行驶里程/万km	6~9	14~34	100	6800
	百km耗电量/(kW·h)	15~25			
公交	年行驶里程/万km	3.2~4.5	43~88	300	5867
	百km耗电量/(kW·h)	90~130			
长途 客运	年行驶里程/万km	1.5~4	18~96	540	3556
	百km耗电量/(kW·h)	80~160			
小型 货车	年行驶里程/万km	2~4	8~36	600	1200
	百km耗电量/(kW·h)	25~60			

数分别为 6 800 次、5 867 次，已超过最高循环寿命，无提供 V2G 能力。

长途客运、货车在行驶需求较低时具备 V2G 经济性。长途客运全生命周期出行需求占用 667~3 556 次循环寿命，根据 2030 年和 2050 年电池总循环寿命，可以得出 2030 年、2050 年长途客运车的年行驶里程分别低于 2 万、3 万 km 时，才有意愿提供 V2G。货车正常行驶里程不高于 4 万 km，全生命周期出行需求最高占用 1 200 次循环寿命，占总循环寿命的不超过 40%。研究判断货车未来换电模式和氢能 2 种技术路线并行，本文暂不讨论该模式。

根据对私家车参与 V2G 意愿度的问卷调查显示，车主重点关注是否影响电池使用寿命（92%）、影响后续出行（73%）和基础设施完善程度（65%）3 大影响因素，V2G 意愿度分析结果如图 7 所示。到 2030 年、2050 年，结合 V2G 经济性与基础设施完善程度等多重因素综合考虑，保守估计全国有 30%、60% 左右的私家车愿意参与车网互动，分别达到 0.27 亿、1.68 亿辆。

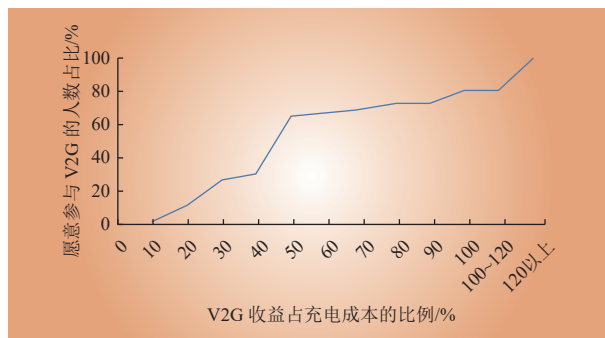


图 7 V2G 意愿度分析

Fig. 7 V2G willingness analysis

3.2.2 车网互动灵活性潜力

2050 年 1 月典型日电动汽车调节前后的负荷特性如图 8 所示。初始的系统净负荷曲线呈双峰特性，分别在早 08:00—11:00 与晚 18:00—23:00 时段出现高峰，在光伏大发的午间 14:00 时左右进入低谷，电动汽车的初始负荷曲线，与系统净负荷曲线的峰谷时段基本重叠。车网互动后，电动汽车充放电时段转移。充电时刻集中转移至 14:00 和凌晨时段的净负荷低谷期，放电时刻集中转移至净负荷的双高峰期早 09:00 与晚 20:00。系统净负荷曲线峰谷差显著缩小，削峰填

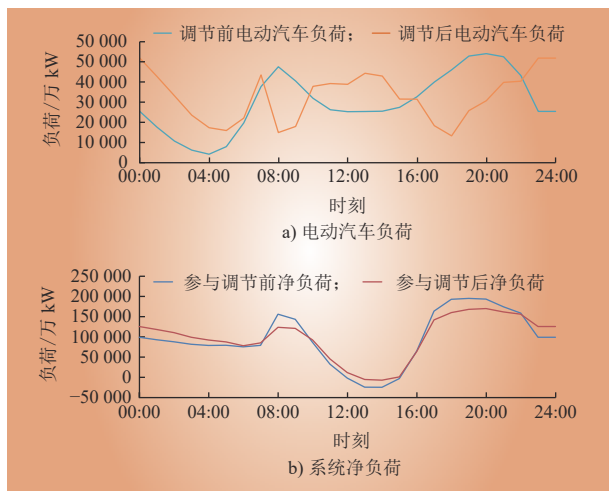


图 8 2050 年 1 月典型日电动汽车负荷曲线和系统净负荷曲线

Fig. 8 Electric vehicles load characteristics and net load characteristics in January Typical day in 2050

谷和主动顶峰效果显著。

根据 1.2.2 节的分析，车网互动调节能力的不确定性主要受用户参与意愿度、单次平均在网时长、电池最大放电深度、日平均接网频次、慢充电桩功率等因素影响。根据单次平均在网时长 9 h、最大放电深度 40%、日均接网次数 0.27 次，慢充电桩功率 7 kW 计算，到 2030 年，通过车网互动削峰、填谷分别达 205 万、624 万 kW 左右。系统净负荷峰值由初始的 14.2 亿 kW 下降至 14.18 亿 kW，谷值由初始的 -10.54 亿 kW 提高至 -10.5 亿 kW，峰谷差缩小了 624 万 kW，较调节前降低 0.2 个百分点。通过 V2G 模式提供的顶峰能力达到 704 万 kW 左右。电动汽车在负荷高峰期的等效发电量达到 90 亿 kW·h 左右，最大充电负荷由初始的 0.69 亿 kW 提升至 0.74 亿 kW，最小充电负荷由初始的 0.18 亿 kW 降至 0.15 亿 kW。

到 2050 年，车网互动对系统削峰填谷效果更加明显，通过 V2G 模式为系统提供顶峰能力，如图 8 和图 9 所示。根据表 2 所示的车网互动参数进行计算，削峰填谷分别达 0.2 亿~2.8 亿、1.1 亿~2.5 亿 kW。系统净负荷峰值由 19.5 亿 kW 降至 16.7 亿~19.3 亿 kW，谷值由初始的 -19.4 亿 kW 提升至 -18.3 亿~-17.6 亿 kW，峰谷差缩小 1.2 亿~5.2 亿 kW，相比调节前缩小近 12 个百分点。考虑意愿度、同时率等因素，通过 V2G 模式提供的顶峰能力达到 1.1 亿 kW。电动汽车在负荷高峰期的

等效发电量达到 3 787 亿 kW·h 左右，最大充电负荷由初始的 5.5 亿 kW 提升至 6.5 亿 kW，在净负荷高峰期开启放电模式，最大放电功率出现于 11 月 15 日 06:00，最高可达 0.93 亿 kW。

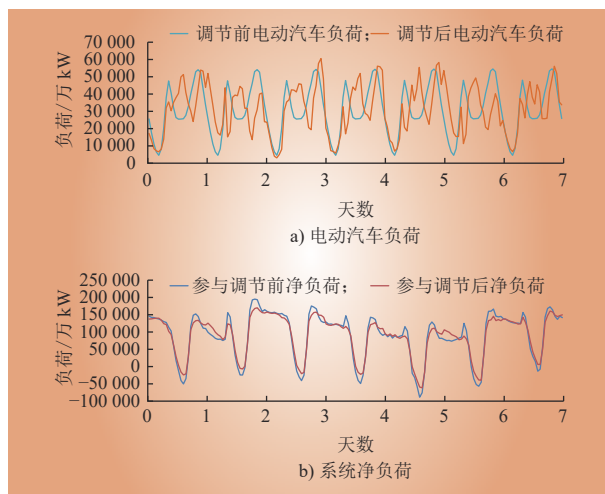


图 9 2050 年典型周电动汽车负荷曲线和系统净负荷曲线

Fig. 9 Electric vehicles load characteristics and net load characteristics in typical week in 2050

表 2 2050 年车网互动参数设置

Table 2 Electric Vehicle network interactive scene settings

私家车保有量/亿辆	参与意愿度/%	续航里程/km	慢充占比/%	单次在网时长/h	最大放电深度/%	日均接网频次	慢充功率/kW
2.8	40~80	600~1200	80	6~11	30~50	0.5~2.0	10~30

车网互动调节效果对充电功率这一参数的敏感度较高。当充电功率由 7 kW 提高至 15 kW，车网互动对系统削峰填谷的效果提升显著，随着充电功率进一步提高，调节效果存在边际递减效应，对系统影响的差别不大，如图 10 所示。到

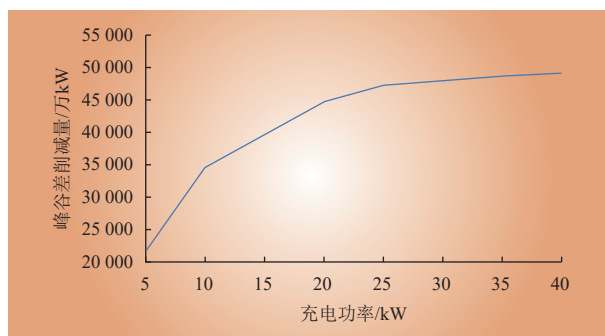


图 10 充电功率对车网互动削峰填谷效果的敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of charging power to interactive peak clipping and valley filling effect of vehicle network



2050 年,当充电功率由 5 kW 提升至 10 kW,系统净负荷峰谷差削减量提高 1.3 亿 kW;而当充电功率由 10 kW 提升至 15 kW,峰谷差削减量仅提高 0.55 亿 kW;当充电功率提高至 20 kW·h,峰谷差削减量进入饱和状态;当充电功率由 35 kW 提升至 40 kW·h,峰谷差削减量仅提高 477 万 kW。

分区域来看,按照充电桩功率 20 kW 计算,

到 2030 年,华东、华北、西北、东北地区车网互动效益明显,其中华东减少 0.9 亿 kW,而西南、华南、华中由于水电、气电等调节电源布局较多,电动汽车参与调节的需求不迫切。到 2050 年,华南、华东地区分别削峰、填谷效果最为明显,分别达到 0.8 亿、1.3 亿 kW 左右,详细数据如表 3 所示。

表 3 车网互动削峰填谷各区域效果
Table 3 V2G Peak shaving and valley filling effects in various regions

参数		东北	华南	华北	西北	华东	华中	西南
调节前	最大净负荷/万kW	12430	45268	48131	31472	54997	33657	17445
	最小净负荷/万kW	-27478	-3020	-91415	-100501	-30606	-15835	-79
	电动汽车最大负荷/万kW	3502	7073	8976	2832	20064	7192	6258
	电动汽车最小负荷/万kW	231	364	660	47	1119	389	384
调节后	最大净负荷/万kW	11060	37159	45141	29117	52171	33132	14784
	最小净负荷/万kW	-25725	-43	-84750	-98294	-17426	-10699	2696
	电动汽车最大负荷/万kW	7139	13809	18041	6829	32914	11609	7712
	电动汽车最小负荷/万kW	-4293	-7752	-8800	-5229	-9178	-3203	-924
净负荷最大值削减量/万kW		1370	8109	2990	2355	2826	525	2661
净负荷最大值削减量占净负荷最大峰谷差比重/%		3.4	16.8	2.1	1.8	3.3	1.1	15.2
净负荷最小值提升量/万kW		1753	2977	6665	2207	13180	5136	2775
净负荷最小值提升量占净负荷最大峰谷差比重/%		4.4	6.2	4.8	1.7	15.4	10.4	15.8

3.3 对新型储能装机与投资的影响

以文献[4]的新型储能配置需求预测为初始边界条件,到2030年、2050年,全国初始的储能装机需求总量分别达到2.6亿、9.5亿kW,其中新型储能装机需求分别达到0.9亿、6.5亿kW。车网互动后,在系统提供灵活性方面,电动汽车对短周期电化学储能的替代作用显著,新型储能需求总量下降明显。需要说明,新型储能的其他多样性功能不在本文讨论范围内。

按照2030年充电功率7kW、2050年充电功率20kW计算,到2030年,车网互动替代新型储能装机2161万kW左右,替代比例达到9%,全部为短时储能,新型储能需求经车网互动后下降至0.7亿kW。电动汽车全年最大充、放电功率分别达到7371万、1525万kW,相当于范围为[-7371, -1525]万kW的锂电池。到2050年,车网互动替代新型储能装机0.4亿~2.8亿kW,替代比例达到19%左右。6h短时储能和720h长时的储能需求

分别下降了1.8亿、1500万kW左右,新型储能需求下降至4.6亿kW左右。

分区域来看,车网互动对东北、华北、西北、华东地区的储能替代作用显著。华南、华中地区的储能装机需求以季节性长期储能为主,日调节主要依赖跨区调节与灵活性调节电源,而车网互动主要在日调节发挥作用,因此车网互动减少了该地区对跨区调节与灵活性调节电源的需求,但是对新型储能装机的影响并不显著。西南地区以水电装机为主,灵活性调节能力较强,对储能及负荷灵活性调节需求较低,车网互动未明显影响储能装机。到2050年,车网互动对东北、华北、西北、华东地区的储能装机替代比例分别达到19%、11%、16%、44%。

车网互动显著降低新型电力系统投资成本和运行成本,为参与用户提供收益。电动汽车参与电力系统调节后,到2030年节省储能投资1300亿元。以单向充电桩双向改造成本1000元/桩,



车桩比 1:1 计算, 充电基础设施双向充放电改造及新建增加的投资约 720 亿元, 电力系统总成本下降 580 亿元。按照电化学储能寿命 10 年、贴现率为 8%、运维成本系数 0.5%、充放电效率 95% 计算, 折算年费用减少 120 亿元, 平均每位参与调节的车主年收益约 500 元。到 2050 年, 节省储能投资 1.1 万亿元, 储能投资成本由调节前的 5.1 万亿元降低至 4 万亿元, 折算到每年的费用将减少 1877 亿元, 平均每位参与调节的车主年收益约 1117 元, 与车辆年充电成本基本持平。

4 结论与建议

电动汽车车网互动是未来新型电力系统灵活性的重要资源, 到 2030 年、2050 年, 中国电动汽车规模将分别达到 0.8 亿~1.1 亿辆、3 亿~3.3 亿辆, 约占全社会用电量比重的 3%、7%。经车网互动, 系统最大负荷可分别削减 0.02 亿、2.2 亿 kW, 最小负荷分别提升 0.06 亿、2.2 亿 kW, 系统净负荷峰谷差分别能够缩小 0.06 亿、4.5 亿 kW。考虑意愿度、同时率等因素, 通过 V2G 模式向系统提供主动顶峰能力可约达 0.07 亿、1.1 亿 kW。

车网互动对短周期电化学储能的替代作用显著, 能够大幅节省新型储能投资。到 2030 年、2050 年, 车网互动分别相当于 0.2 亿、1.9 亿 kW 新型储能的灵活性, 系统新型储能需求分别下降至 0.7 亿、4.6 亿 kW, 节省 0.1 万、1.1 万亿元投资。东北、华北、西北、华东地区的储能替代作用显著, 可通过车网互动解决储能型日调节需求; 华南、华中、西南等调节电源布局较多, 车网互动参与调节的需求不迫切。

影响电动汽车调节效果的最主要因素是行业政策、市场机制和商业模式。未来通过不断完善市场机制、基础设施和标准体系, 创新虚拟电厂等商业模式, 灵活整合电动汽车分散性资源, 充分实现“源荷互动”, 释放车网互动灵活性潜力。

参考文献:

- [1] 辛保安, 新型电力系统与新型能源体系 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [2] 周原冰, 张士宁, 侯方心, 等. 电力行业碳达峰及促进全社会碳减排影响分析 [J]. 中国电力, 2024, 57(9): 1-9.
- [3] 崔杨, 安宁, 付小标, 等. 面向高比例新能源电力系统调峰需求的储能容量配置方法综述 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 1-8.
- [4] 朱静慧, 高佳, 余欣梅, 等. 碳中和背景下我国生态碳汇发展形势及建议 [J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(6): 1-8.
- [5] 李吉峰, 唐克, 王孜航, 等. 计及多源互补特性的新型电力系统分布式电源承载能力评估 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 62-68.
- [6] 岳昊. 中国构建新型电力系统面临的问题、风险与建议 [N]. 电力决策与舆情参考, 2021(16): 26-36.
- [7] 余潇潇, 宋福龙, 周原冰, 等. “新基建”对中国“十四五”电力需求和电网规划的影响分析 [J]. 中国电力, 2021, 54(7): 11-17.
- [8] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究 [J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.
- [9] 中国化学与物理电源行业协会. 2024 年中国新型储能产业发展白皮书 [R]. 天津: 中国化学与物理电源行业协会, 2024.
- [10] 中国能源研究会储能专委会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2024[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2024.
- [11] 刘坚. 我国新型储能发展问题分析与政策建议 [J]. 中国能源,



- 2022, 44(6): 6–10, 35.
- LIU Jian. Analysis and policy suggestions on the development of new energy storage in China[J]. *Energy of China*, 2022, 44(6): 6–10, 35.
- [12] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084–4095.
- LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, *et al.* Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4084–4095.
- [13] 李丰, 姚韵, 张会娟, 等. 新型储能经济性 & 价格机制研究[J]. 价格理论与实践, 2022(4): 66–70, 204.
- LI Feng, YAO Yun, ZHANG Huijuan, *et al.* Research on new energy storage price mechanism and economic[J]. *Price: Theory & Practice*, 2022(4): 66–70, 204.
- [14] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024(2): 260–272.
- LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, *et al.* Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. *Power Generation Technology*, 2024(2): 260–272.
- [15] 任子俊, 曲小慧, 王敏之, 等. 新型电力系统中电化学储能应用与关键技术综述[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(6): 1–7, 78.
- REN Zijun, QU Xiaohui, WANG Minzhi, *et al.* A review of electrochemical energy storage applications and key technologies in new-type power systems[J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2023, 43(6): 1–7, 78.
- [16] 赵添辰, 张弓, 张云飞, 等. “双碳”目标下抽水蓄能提升系统保供能力的技术经济性研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 1059–1073.
- ZHAO Tianchen, ZHANG Gong, ZHANG Yunfei, *et al.* Technical and economic research on the capacity of supply assurance for pumped-storage systems under the target of “dual carbon”[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(3): 1059–1073.
- [17] 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.
- [18] 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.* Technology prospects of carbon neutrality-oriented new-energy vehicles and vehicle-grid interaction[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(4): 449–464.
- [19] 吴佳琦, 张谦, 吴小汉, 等. 电动汽车与电网互动的关键问题研究综述[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 411–430.
- WU Jiaqi, ZHANG Qian, WU Xiaohan, *et al.* A review of key issues in electric vehicle and power grid interaction[J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2022, 12(4): 411–430.
- [20] BAE S, KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 394–403.
- [21] 卢慧, 谢开贵, 胡博, 等. 混合交通流下计及储能型柔性开关影响的交通-配电网联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 108–119.
- LU Hui, XIE Kaigui, HU Bo, *et al.* Coordinated planning of transportation and distribution networks with mixed traffic flow and E-SOP[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(22): 108–119.
- [22] 于霄宇, 纪正森, 嵇灵, 等. 双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 25–31, 39.
- YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, *et al.* Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in China under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. *Smart Power*, 2024, 52(2): 25–31, 39.
- [23] 王斐, 李正烁, 叶萌, 等. 电动汽车充电对电网的影响及其优化调度研究述评[J]. 南方电网技术, 2016, 10(6): 70–80.
- WANG Fei, LI Zhengshuo, YE Meng, *et al.* Review on research of impact of electric vehicles charging on power grids and its optimal dispatch[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(6): 70–80.
- [24] 杨捷, 郭凡, 曹子健. 电动汽车储能 V2G 模式的成本与收益分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(S1): 45–51.
- YANG Jie, GUO Fan, CAO Zijian. Cost and benefit analysis of EV energy storage through V2G[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(S1): 45–51.
- [25] 王旖旎. 中国汽车需求预测: 基于 Gompertz 模型的分析[J]. 财经问题研究, 2005(11): 43–50.
- WANG Yini. CAR OWNERSHIP FORECAST IN CHINA: an analysis based on gompertz equation[J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2005(11): 43–50.
- [26] MA S C, FAN Y. A deployment model of EV charging piles and its impact on EV promotion[J]. *Energy Policy*, 2020, 146: 111777.
- [27] 王慧芳. 充电基础设施对电动汽车推广的影响机制研究——基于



两侧间接网络效应的分析[D]. 广州: 暨南大学, 2019.

WANG Huifang. Research on the influencing mechanism of charging infrastructure on the promotion of electric vehicles: based on the analysis of indirect network effect on both sides[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.

[28] 郭磊, 王克文, 文福拴, 等. 电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 56–70.

GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, *et al.* Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2019, 34(3): 56–70.

[29] 中国汽车工程学会, 清华四川能源互联网研究院. 中国电动汽车充电基础设施发展战略与路线图研究(2021-2035)[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2021.

车工程学会, 2021.

作者简介:

周原冰(1971—), 男, 高级工程师(教授级), 从事能源电力规划、能源技术经济、新能源与智能电网、能源互联网、新型电力系统研究, E-mail: yuanbing-zhou@geidco.org;

龚乃玮(1990—), 女, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事新型电力系统、能源电力市场等研究, E-mail: naiwei-gong@geidco.org。

(责任编辑 于静茹)

Study on the Influence of Electric Vehicle Development and the Vehicle-Grid Interaction on New Energy Storage Configuration in China

ZHOU Yuanbing^{1,2}, GONG Naiwei^{1,2}, WANG Haojie^{1,2}, XIAO Jinyu^{1,2}, ZHANG Yun^{1,2}

(1. Global Energy Interconnection Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China)

Abstract: With the continuous and rapid development of electric vehicles, the positive interaction between electric vehicles and the power grid in the future will affect the new energy storage configuration of the power system. In view of the insufficient overall planning of the current new energy storage, resulting in high development expectations, this paper proposes that new energy storage and the development of electric vehicles must be considered as a whole, and pay attention to the replacement of vehicle-grid interaction for short-term new energy storage. The key factors affecting the development of electric vehicles and the adjustment ability of the vehicle-grid interaction are analyzed. Based on the development of electric vehicles in China, combined with the energy consumption habits of electric vehicles and the system adjustment demand, the interaction model of the electric vehicles and the system in China is constructed. The flexible adjustment ability of electric vehicles is evaluated, and the impact on the new energy storage configuration in China and its seven regions is analyzed.

This work is supported by Science and Technology Project of Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (No.SGGE0000JYJS2400035).

Keywords: new energy storage; electric vehicles; the vehicle-grid interaction; source-network-load integration planning; stochastic dynamic model