

NRDC



电动汽车发展对配电网影响 及效益分析

2018年7月

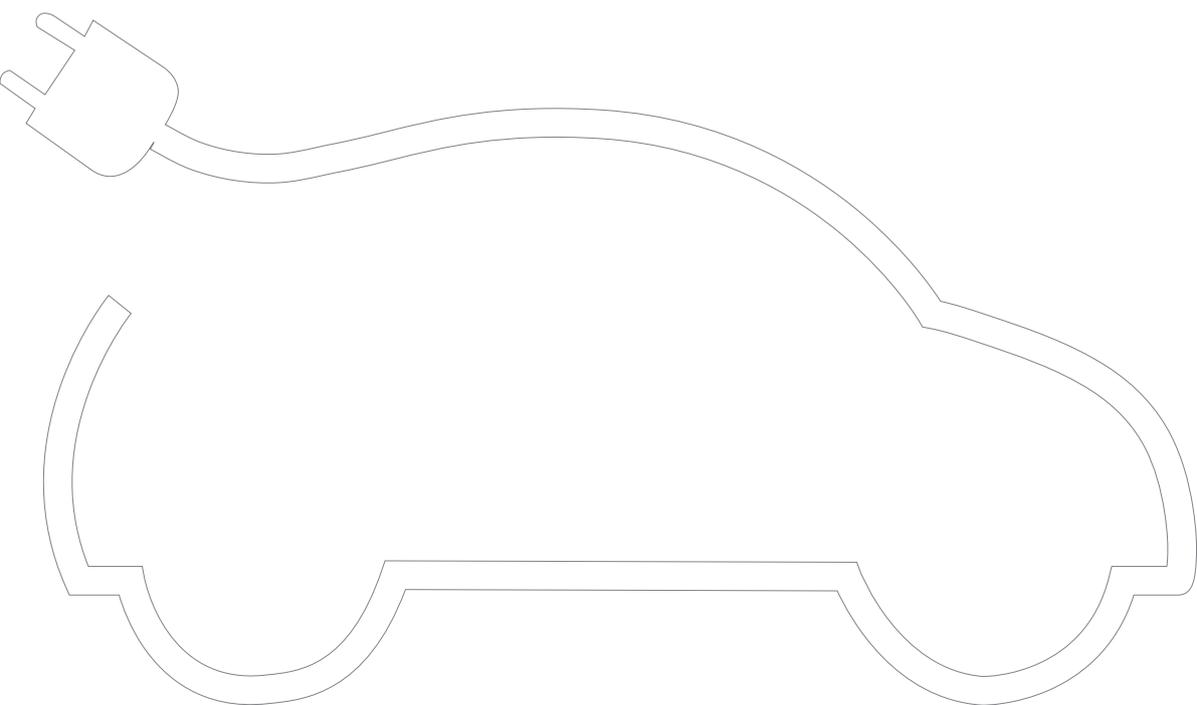


国家电网
STATE GRID

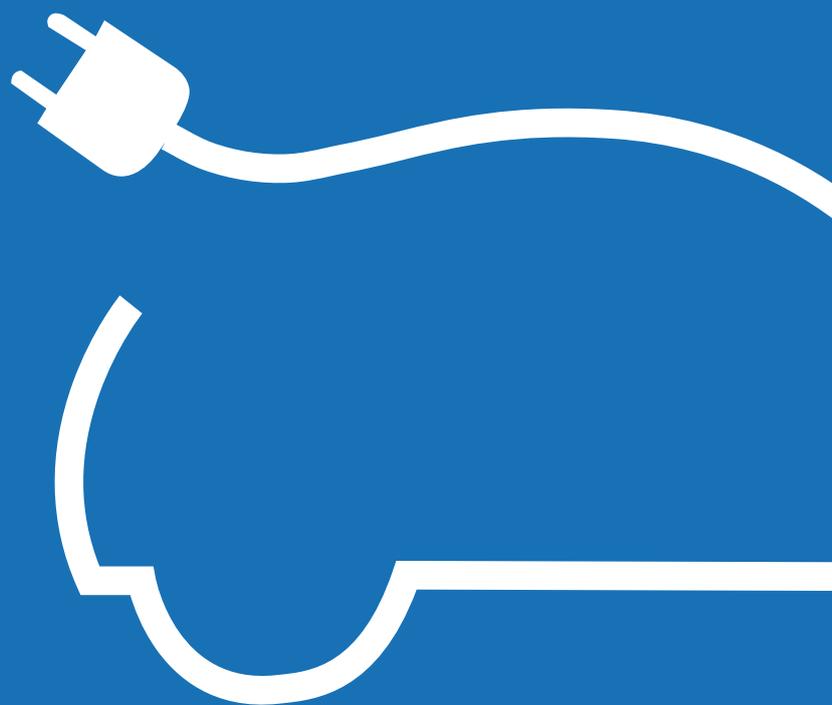
国网能源研究院有限公司
STATE GRID ENERGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.



自然资源保护协会
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL



电动汽车发展对配电网影响 及效益分析



目录

1. 电动汽车与充电基础设施发展概况	18	5. “车-桩-网”互动对配电网效益评价体系	34
1.1 电动汽车与充电基础设施发展现状与趋势	18	5.1 提升配电网经济性的效益评价	34
1.1.1 国内外电动汽车发展现状	18	5.2 提升配电网安全稳定性的效益评价	35
1.1.2 国内外充电基础设施分析	19	5.3 提升配电网环境友好性的效益评价	36
1.2 电动汽车与充电基础设施用电特性	21	5.4 综合效益评价体系	36
1.2.1 电动汽车充电行为特性分析	21	6. 案例	37
1.2.2 充电基础设施用电特性分析	21	6.1 住宅公寓分散式充电桩	37
2. 国内充电基础设施现状	23	6.2 商业场所分散式充电桩	39
2.1 对整体电网的影响	23	6.3 城市集中式充电站	41
2.2 对配电网的影响	24	6.4 案例效益汇总	43
2.3 对供电服务的影响	24	7. 结论和建议	44
3. 电动汽车充电基础设施与电网互动研究	25	7.1 结论	44
3.1 “车-桩-网”互动模式	25	7.2 建议	44
3.2 “车-桩-网”互动的技术路线	26	8. 下一步研究方向	45
3.3 “车-桩-网”互动的政策与市场环境	27		
4. “车-桩-网”互动对配电网的影响	29		
4.1 对配电网负荷特性的影响	30		
4.2 对配电网需求侧资源发展的影响	31		
4.3 对配电网规划建设的影响	31		
4.4 对配电网调度运行的影响	33		
4.5 对供电服务的影响	33		

图目录

图 1-1 全国各地区电动汽车充电设施情况（截止 2017 年底）	20
图 3-1 “车-桩-网”互动模式中信息传递框架	26
图 3-2 五种充电模式发展路径	27
图 3-3 充电设施服务内容与运营模式的演变趋势	28
图 3-4 充电设施市场格局发展展望	28
图 4-1 车桩网互动模式	29
图 6-1 住宅区负荷曲线	37
图 6-2 商业区负荷曲线	39
图 6-3 光伏就地消纳能力	41

表目录

表 1-1 2017 年中国新能源汽车销售量	19
表 1-2 充电基础设施的“需求侧”特征	21
表 1-3 各类充电基础设施的用电特性	22
表 3-1 充电基础设施与电网互动的五种模式	25
表 4-1 电动汽车有序无序充电负荷对比（单位：万千瓦）	30
表 4-2 典型小区电动汽车充电设施配电容量需求	31
表 4-3 无序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本	32
表 4-4 有序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本	32
表 5-1 “车-桩-网”互动对配电网效益评价体系	34
表 6-1 案例效益汇总	43

执行摘要

交通领域的“电能替代”与“清洁替代”逐渐成为实现人类可持续发展的必经之路。电动汽车作为一种重要的清洁能源动力受到了各国的高度关注和大规模投入，车辆数量快速增长，技术水平不断提高。充电网络也同样处于产业快速发展时期，大规模充电基础设施投入运营，给配电网发展带来新的机遇和挑战。

充电基础设施规划、建设、运营体系已经建立，但电动汽车与电网互动问题尚未得到足够重视，配套支持政策、激励机制、商业模式、“车-桩-网”的交互接口与标准体系等未能有效建立。电动汽车缺乏采用互动充电模式的动力，总体上表现出无序集中充电特性，节能减排等综合效益难以充分体现，随着电动汽车规模及充电需求总量的增加，未来将损失更多的潜在综合效益，导致社会资源的巨大浪费。

本报告首先从充电基础设施的组成及特点、现状与趋势、用电特性三个方面研究充电基础设施发展概况。分别分析充电基础设施对整体电网、配电网、客户服务带来的影响。基于以上分析，研究了充电基础设施与电网互动模式、技术路线、政策与市场环境。分析了互动对配电网负荷特性、需求侧资源、电网规划建设、电网调度运行、供电服务的影响。建立了“车-桩-网”互动对配电网综合效益影响的评价体系。最后对住宅公寓分散式充电桩；商业场所分散式充电桩、城市集中式充电站进行了案例分析并提出相关建议。

国内外电动汽车发展现状

全球新能源汽车市场实现高增长，销量再创历史新高。国际能源署（IEA）统计，2017年全球电动汽车销量超过122.3万辆，较2016年增长58%，使得电动汽车销量在全球汽车销量中的占比超过了1%。中国2017年新能源汽车销量77.7万辆，同比增长53.3%，超过此前70万辆的预期。中国汽车工业协会预测，预计2018年新能源汽车销量超过100万辆，将继续保持高速增长。全球电动汽车的保有量超过300万辆，较2016年增长超过50%。IEA预测到2030年全球电动汽车保有量将达1.25亿辆。

中国、美国、欧洲等是全球电动汽车销量主要集中的国家或地区。据中汽协和IEA统计，2017年，中国新能源乘用车销量57.8万辆，同比增长超过72%，占全球销量49%；美国累计销量20万辆，同比增长26.1%，占全球销量16.3%；欧洲累计销量30.7万辆，同比增长39%，占全球销量的25.1%。

动力电池仍是制约瓶颈，但是技术经济指标提升很快。在能量密度方面，铝空气电池能量密度达到 780Wh/kg，锂电池达到 350Wh/kg，固态电池达到 360Wh/kg。在充电倍率方面，典型创新性产品最高充电倍率已超过 100C（即只需 1/100 小时即可充满额定容量）。2017 年，我国动力电池单体能量密度已经达到 240Wh/kg，系统能量密度达到 150Wh/kg。

国内外充电基础设施发展现状

充电设施形成规模化发展。世界各国十分重视充电基础设施的发展，据 IEA 发布的《Global EV outlook 2018》报告显示，2017 年公共慢充桩数量为 318128 个，同比增长了 80870 个。公共快充桩数量为 112023 个，同比增长了 35714 个。据中国电动汽车充电基础设施促进联盟统计，截至 2017 年底累计建设充电桩 45 万个，私人充电桩 24 万个，公共充电桩 21 万个。

充电设施在各地区普及程度不同。从区域分布来看，中国以 213903 个公共桩居首位，美国以 45868 个公共桩排名第二，荷兰排名第三，其公共充电桩为 33431 个。中国主要分布在北京、广东、上海、江苏、山东，以上 5 个省市的公共充电设施占全国的比重约为 60%。

电动汽车与充电基础设施用电特性

电动汽车充电行为特性分析

对充电基础设施的“需求侧”——各类电动汽车而言，其是否具备固定停车条件是影响各类电动汽车用户对不同的充电基础设施需求的最关键要素。各类电动汽车对不同充电基础设施需求具体如表 1 所示。



表 1 充电基础设施的“需求侧”特征

“需求侧”特征	公交车	其他大中型载客车	环卫车	其他大中型载货车	出租车	网约车	其他轻小型客车	轻小型货车
专用充电	强	较强	强	较强	弱	弱	强（无固定停车条件除外）	较强
城际公共快充	弱	较强	弱	较强	弱	弱	较强	较强
室内公共充电	弱	弱	弱	弱	强	强	较强（无固定停车用户强）	弱
智能用电服务	强	较强	强	较强	弱	弱	强	弱
充电信息服务	弱	弱	弱	较强	强	强	强	较强

充电基础设施用电特性分析

电动汽车用户行为特性的差异具体表现在充电时间分布和速率要求两个方面，充电基础设施本身用电特性的差异表现在可引导性、容量需求、电压等级和负荷特性四个方面。各类充电基础设施的用电特性如表 2 所示。

表 2 各类充电基础设施的用电特性

设施类型	用户行为特性		设施用电特性			
	时间分布	速率要求	可引导性	容量需求	电压等级	负荷特性
集中式专用充电站	根据车辆运行集中时段充电	3 ~ 5 小时	较强	数百 kVA 至上万 kVA/ 站	10kV	一般在用电低谷时段
城际快充站	分布较均匀，白天多于晚间	10 分钟 ~ 1 小时	弱	630kVA/ 站	10kV	冲击型负荷，时间分布较均匀，白天大于夜间
城市公共充电基础设施	快充：分布较均匀 慢充：白天为主	快充：10 ~ 30 分钟 慢充：数小时	弱	快充：70kVA/ 桩 慢充：8kVA/ 桩	0.4kV	快充：时间分布较均匀，白天大于夜间 慢充：白天与前半夜为主，一般与周围商业用电负荷高峰叠加
分散式专用充电桩	集中在白天（办公区）或夜间（居民区）	数小时	强	4-8kVA/ 桩	0.4kV	办公区以白天为主，与早高峰负荷叠加 居民区以夜间为主，与晚高峰用电负荷叠加

充电基础设施对电网的影响分析

从对整体电网的影响、对配电网的影响、对供电服务的影响三方面研究充电基础设施对电网影响。

对整体电网的影响

无序用电下对负荷的影响。到 2020 年与 2030 年，在无序充电情形下，国家电网公司经营区域峰值负荷增加 1361 万千瓦和 1.53 亿千瓦。分区域来看，加快发展地区占比最大，超过 62% 和 58%。分设施来看，分散式专用充电桩占比最大，约 68% 和 75%。

对配电网的影响

电动汽车的聚集性充电可能会导致局部地区的负荷紧张，电动汽车充电时间的叠加或负荷高峰时段的充电行为将会加重配电网负担。

1. 对供电服务的影响

由于已有的公共配电网和用户侧配电设施在当年建设时没有考虑电动汽车充电需求，电动汽车的发展使得部分地区的局部配电网产生了增容改造的需求。

2. 对配网电能质量和安全管理的影响

电动汽车充电设施这一类大功率、非线性负荷的设备，且布局分散，会产生很高的谐波电流和冲击电压，并存在用户私拉电线和飞线充电等问题，给电网公司配电侧管理带来了较大挑战。

对供电服务的影响

1. 大量单个用户小容量“零散报装”，急剧增加了电网公司业扩报装服务的工作量，对电网公司服务体系提出了更高的要求；

2. 现有部分公共配电容量的公平处置问题，可能会出现对“后来者”不公平现象；

3. 会出现大量高压自管户的“转供电”或同一场地管理多个电力用户的问题，增加营销服务复杂程度。

充电基础设施与电网互动的五种模式

根据互动目的、手段与层次不同，“车-桩-网”互动可以分为价格引导模式、本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式共五种互动模式，如表 3 所示。

表 3 充电基础设施与电网互动的五种模式

互动模式	主要内容	关键条件
价格引导模式	通过分时电价等手段引导用户在“低谷”充电，分时电价政策，用户可自主根据价格选择目的在于避开高峰负荷，引导低谷充电。	分时电价政策，用户可自主根据价格选择充电时段。
本地优化的智能充电模式	根据小区配电台区的负荷状态以及车的充电状态，自动优化充电的时序、功率等。目的在于降低本地增容压力，充分利用谷电，提高设备利用效率。	1. “台变-桩-车”的双向实时信息互动的技术与标准； 2. 台变对充电桩控制调度的机制和技术手段。
全网优化的智能充电模式	根据清洁能源消纳、大电网稳定运行等方面的需求，结合小区配电台区的负荷状态以及车的充电状态，自动优化充电的时序、功率等。目的主要在于提高系统调峰频与吸纳清洁能源能力。	1. “电源-大电网-配电网-桩-车”双向信息互动的技术与标准； 2. 电网对充电桩控制调度的机制和技术手段； 3. 大电网需求响应、辅助服务市场等保障机制。
本地优化的智能充放电模式	实现电动汽车对本地电网放电，自动优化本地充电桩的充放电时序、功率、流向等。目的在于通过放电增强本地优化能力同时，获取峰谷差价收益。	1. 在“本地充电模式”上增加功率双向流动技术与标准； 2. 动力电池的充放电损耗成本低于参与本地互动的收益（如峰谷电价差等）。
全网优化的智能充放电模式	实现电动汽车与大电网放电，自动优化全网充电桩的充放电时序、功率、流向等。目的在于通过放电增强全网优化能力的同时，最大化峰谷差价和参与辅助服务市场的收益。	1. 在“全网充电模式”上增加功率双向流动技术与标准； 2. 动力电池的充放电损耗低于参与大电网互动的收益（如辅助服务收益等）。

充电基础设施在电动汽车与电网互动中起到中间集聚作用

充电基础设施与电动汽车用户在物理层、信息层、交易层建立了直接的联系，通过“互联网+”能够将分散资源整合进统一平台，形成电网与电动汽车用户之间中间层网络，如图 1 所示。

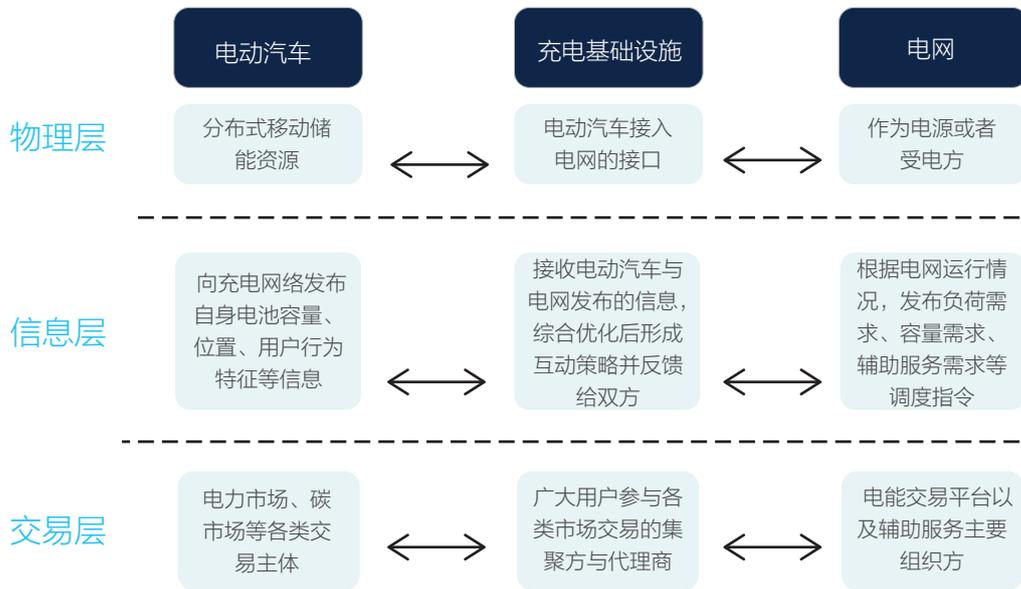


图1 “车-桩-网”互动模式中信息传递框架

充电设施服务内容与运营模式演变趋势

充电设施服务历经从提供基本充电服务，到提供增值服务，再到提供市场交易等多元服务的三个阶段发展，具体如图2所示。



图2 充电设施服务内容与运营模式的演变趋势

充电设施市场格局发展展望

由于充电基础设施市场具有典型的“网络经济”特点，将逐步由当前的“散、乱、小”走大型平台运营商主导，大量中小型运营商与大平台互联互通的产业生态格局，如图 3 所示。

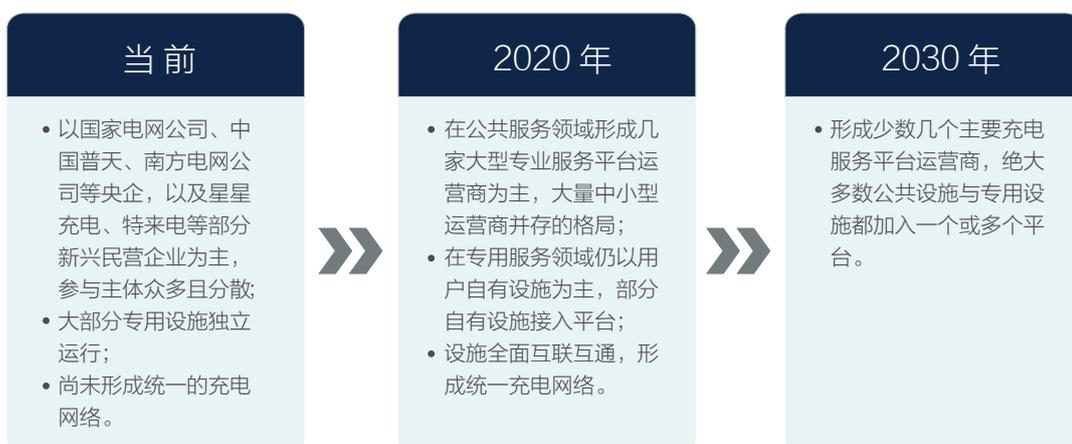


图 3 充电设施市场格局发展展望

“车-桩-网”互动对配电网的影响

基于图 4 所示车桩网互动模式，从配电网负荷特性、需求侧资源发展、电网规划建设、电网调度运行和供电服务五个角度，对比电动汽车无序充电行为对电网影响分析，“车-桩-网”互动对配电网运行的影响。

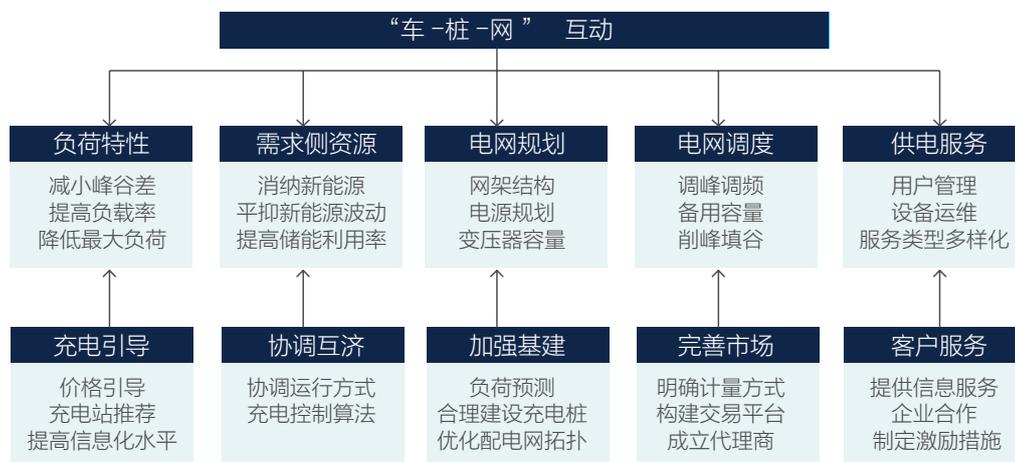


图 4 “车-桩-网”互动模式

对配电网负荷特性的影响

“车-桩-网”互动引导下对负荷有明显影响。电动汽车有序无序充电负荷对比如表 4 所示。

表 4 电动汽车有序无序充电负荷对比（单位：万千瓦）

设施类型	2020 年		2030 年	
	无序	有序	无序	有序
集中式专用充电站	290	145	1920	960
分散式专用充电桩	890	297	11486	3829
城际快充站	5	5	219	219
城市公共充电设施	205	143	1725	1203
总计	1361	590	15350	6211

对配电网需求侧资源发展的影响

在“车-桩-网”互动模式中，电动汽车从本质上讲是一种移动储能资源，既可以充电，又可以放电，增加了配电网需求侧资源的种类。

电动汽车的充电行为具有集聚性和随机性的特点，通过“车-桩-网”互动的研究，依靠电价、辅助服务市场等手段，进一步使电动汽车能够与分布式电源协调运行。

对配电网规划建设的影响

以一个 2000 户的居民区配电设施为例，按当前标准，其居民区配电容量在 4000kVA 左右。电动汽车有序充电可减缓城市电网建设和局部配电网建设改造。如表 5 所示。

表 5 典型小区电动汽车充电设施配电容量需求

户数：车位数	充电车位比例	单桩容量	无序充电情形	有序充电情形
1:0.5	100%	7kVA	+4200kVA(+105%)	+1400kVA (+35%)

降低配电网建设改造成本。如表 6 和表 7 所示。

表 6 无序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本

项目	规格	成本
变压器	2500kVA	10 万
环网柜	3 面	7.5 万
低压柜	5 面	25 万
TT 接箱（1 进 10 出）及线缆	30 个	195 万
表箱及线缆	30 个	45 万
表箱后改造	300 个	15 万
总计		297.5 万元

表 7 有序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本

项目	规格	成本
变压器	2500kVA	10 万
环网柜	3 面	7.5 万
低压柜	5 面	25 万
TT 接箱（1 进 30 出）及线缆	30 个	240 万
表箱及线缆	90 个	135 万
表箱后改造	900 个	45 万
总计		462.5 万元

对配电网调度运行的影响

增大了电网灵活性调节能力。电动汽车的停驶特性与电网负荷的爬坡特性存在较好的匹配关系。一辆普通的电动私家车在其全生命周期内行驶所耗电量仅占电池充放电潜力的小部分，其可参与辅助服务，提高新能源消纳能力。

对供电服务的影响

提高供电服务水平。“车-桩-网”互动中需要对电动汽车有序充电行为进行引导，提出了对电网充电服务以及相关的信息服务等基本服务的更高要求，倒逼电网提高供电服务水平，增强充电运营商核心竞争力，有助于其构筑竞争优势壁垒。

促进供电服务类型多样化。“车-桩-网”互动涉及房地产开发商、物业企业、停车管理企业等场地拥有方，电网企业、汽车企业、设备制造企业等上下游相关方，互联网企业等新兴企业。因此，在基本服务基础上，充电运营企业可为用户、相关商家以及上下游产业方提供更多增值服务，充分挖掘各方的潜在价值，提高综合效益水平。

“车-桩-网”互动对配电网效益评价体系

从经济性、安全稳定性、环境友好性三个方面建立“车-桩-网”互动对配电网效益评价体系，如表 8 所示。

表 8 “车-桩-网”互动对配电网效益评价体系

评价对象	一级指标	二级指标
“车-桩-网”互动对配电网效益评价	经济性指标	配电网扩建容量减少量
		节约配电网建设成本
		提高存量电网资源利用率
	安全稳定指标	事故支撑能力
		降低配网最大负载率
		对供电可靠性的贡献
		对调峰能力的贡献
	环境友好指标	可再生能源消纳能力
		提高节能减排效益

社会综合效益评价体系

“车-桩-网”互动模式提升的社会经济效益 = (无序充电模式电网建设成本 + 无序充电模式因供电质量造成的生产损失成本 + 无序充电模式碳排放成本) - (互动模式电网建设成本 + 互动模式因供电质量造成的生产损失成本 + 互动模式碳排放成本)

案例分析

住宅公寓分散式充电桩

以一个 2000 户的居民区配电设施为例，按当前标准，其居民区配电容量在 4000kVA 左右。假定不占用原有居民用电容量，考虑户均车位 0.5 个，单个充电桩配置容量 7kVA，同时率按照 0.6 考虑，按照 100% 配置充电桩。有序充电对负荷的影响如图 5 所示。

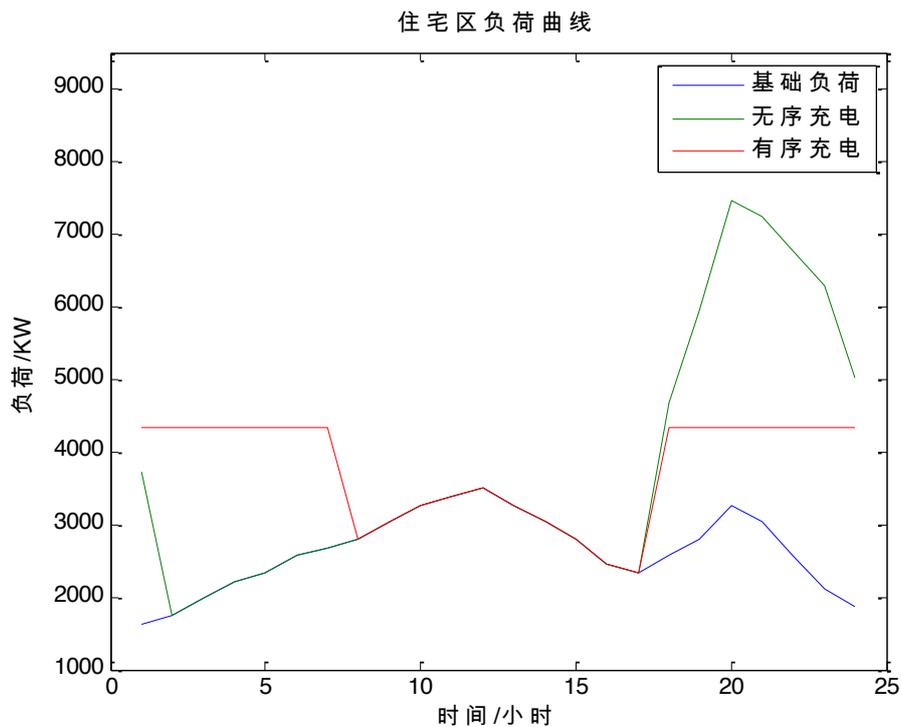


图 5 三种情景下居民区负荷曲线

商业场所分散式充电桩

以一个基础负荷为 4000KVA 左右的商业区配电网为例，该商业区拥有一个 1000 个充电桩的地下停车场。假定不占用原有用电容量，单个充电桩配置容量 7kVA，同时率按照 0.6 考虑，按照 100% 配置充电桩。有序充电对负荷的影响如图 6 所示。

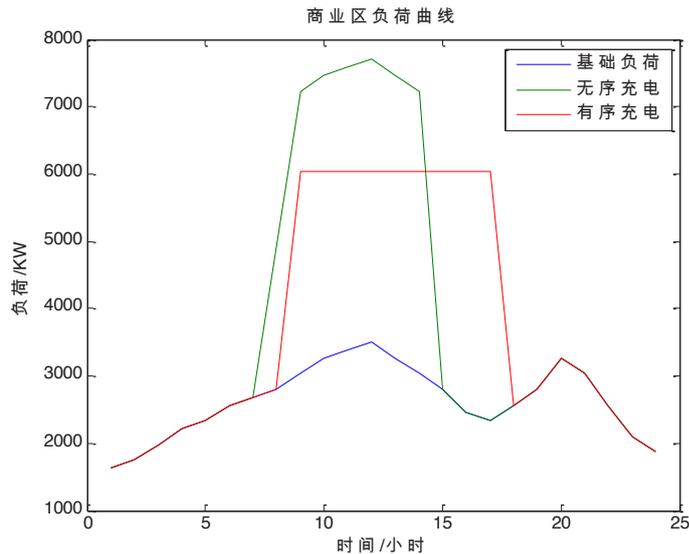


图 6 三种情景下商业区负荷曲线

城市集中式充电站

以一个基础负荷为 40MW 左右的区域配电网为例，该区域拥有 3 个集中式充电站，其容量之和为 20MW，同时拥有容量为 25MW 的光伏发电板。有序充电对负荷的影响如图 7 所示。

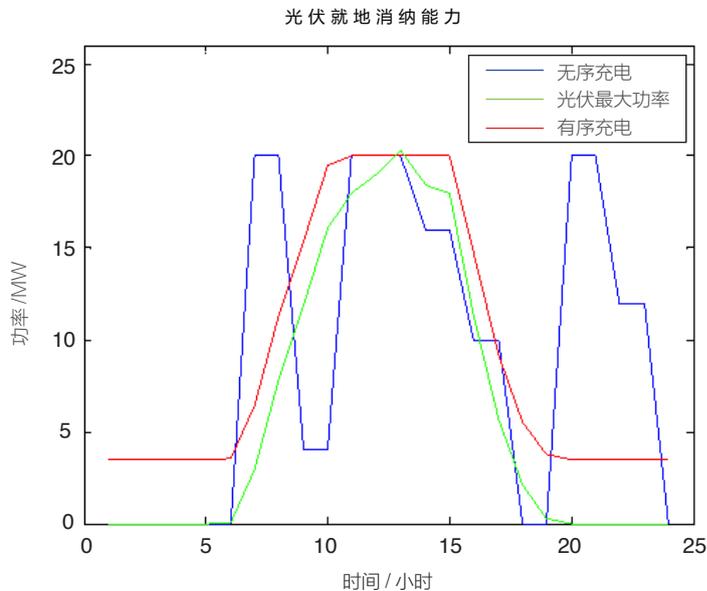


图 7 三种情景下光伏就地消纳能力曲线

表 9 案例效益汇总

二级指标	住宅公寓分散式充电桩			商业场所分散式充电桩			城市集中式充电站		
	无序充电	有序充电	改进量	无序充电	有序充电	改进量	无序充电	有序充电	改进量
配电网扩容减少量 (KVA)	3966.67	833.33	3133.34	4200	2540.7	1659.3	17330	0	17330
节约配电网建设成本 (万元)	50	15	35	57.5	40	17.5	200	0	200
提高存量电网资源利用率	0.5	0.838	0.338	0.47	0.599	0.1273	0.552	0.83	0.18
事故支撑能力(MWh)	0	60	60	0	60	60	0	120	120
降低配网最大负载率	0.996	0.578	0.418	0.96	0.755	0.2074	0.956	0.62	0.33
对供电可靠性的贡献	0	1.2	1.2	0	1.2	1.2	0	0.5	0.5
对调峰能力的贡献(kW)	1708.2	705.5	1002.7	2210.9	1795.1	415.8	10280	960	9320
可再生能源消纳能力 (kWh)	0	47667	47667	0	25317	25317	28410	310	2810
提高节能减排效益	0	0.503	0.503	0	0.267	0.2669	0.13	0.16	0.03

结论

- (1) “车-桩-网”互动能够发挥电动汽车移动储能特性，实现削峰填谷，消纳新能源，减少对配电网供电服务、增容改造的影响提高经济、社会、环境效益。
- (2) “车-桩-网”互动依据发展阶段分为五种典型模式。“车-桩-网”互动可以分为价格引导模式、本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式共五种互动模式。
- (3) “车-桩-网”互动对配电网负荷特性、需求侧资源发展、电网规划建设、电网调度运行和供电服务具有重要影响。“车-桩-网”互动对负荷特性有明显影响，可以显著降低对电网最大负荷的影响。“车-桩-网”互动促进需求侧资源的协调运行，最大程度消纳新能源。“车-桩-网”的互动降低配电网建设改造成本。“车-桩-网”的互动增大了电网灵活性调节能力。“车-桩-网”互动模式能够提高配电网的管理效率，丰富电网的服务模式。

总之，“车-桩-网”互动模式能够提高配电网的经济性、安全稳定性和环境友好性，为发展“车-桩-网”互动提供重要论证支撑。

建议

- (1) 加快突破电动汽车与电网互动关键技术。加大投入研发可控充放电桩提高充电基础设施智能化水平，使得充放电电流能够精细化控制。
 - (2) 科学合理建设改造配电网。充分考虑电动汽车互动对配电网的影响，优化“车-桩-网”互动模式下配电网的规划建设。
 - (3) 推动政府制定相应的激励政策。推动出台政策来激励电动汽车用户参与“车-桩-网”互动，加快完善车联网平台，加强对电动汽车用户的管理。
 - (4) 加快建设电力市场。加快建立“车-桩-网”互动下电动汽车集群参与电网辅助服务的市场机制。
 - (5) 探索“车-桩-网”互动商业模式。探索合理的商业模式使得参与“车-桩-网”互动的各主体共赢，保证“车-桩-网”互联持续健康发展。
 - (6) 优化电动汽车充电控制模式。推动形成本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式。
-

下一步研究方向

- (1) 动力电池梯次利用政策机制、市场评估模型及商业模式评价研究。
- (2) 研究燃料电池汽车发展前景及其对配电网形态的影响。

电动汽车与充电基础设施发展概况

1.1 电动汽车与充电基础设施发展现状与趋势

1.1.1 国内外电动汽车发展现状

1. 国外电动汽车发展现状

2017 年以来，全球各国对发展新电动汽车更加重视，不少国家通过出台财政补贴、减免税收、加大研发支持以及停车优惠等非财税激励政策来优化发展环境。

- (1) 从市场规模来看，2017 年全球新能源汽车市场实现高增长，销量再创历史新高。据国际能源署 (IEA) 统计，2017 年全球电动汽车销量超过 122.3 万辆，较 2016 年增长 58%，使得电动汽车销量在全球汽车销量中的占比超过了 1%。全球电动汽车的保有量超过 300 万辆，较 2016 年增长超过 50%。国际氢能委员会发布的《氢能未来发展趋势调研报告》显示，预计到 2030 年，全球燃料电池乘用车将达到 1000 万辆至 1500 万辆。
- (2) 从区域分布来看，中国、美国、欧洲等是全球电动汽车销量主要集中的国家或地区。据中国汽车工业协会统计，2017 年，中国新能源乘用车销量 57.8 万辆，同比增长超过 72%，占全球销量 49%。美国累计销量 20 万辆，同比增长 26.1%，占全球销量 16.3%。欧洲累计销量 30.7 万辆，同比增长 39%，占全球销量的 25.1%。
- (3) 从技术发展来看，现阶段，动力电池仍是制约瓶颈，但是技术经济指标提升很快。在能量密度方面，铝空气电池能量密度达到 780Wh/kg，锂电池达到 350Wh/kg，固态电池达到 360Wh/kg。

2. 国内电动汽车发展现状

- (1) 从市场规模看，2017 年新能源汽车市场依然实现平稳发展。中国汽车工业协会统计，2017 年新能源汽车销量 77.7 万辆，同比增长 53.3%，超过此前 70 万辆的预期，详细数据见表 1-1。中汽协预测，预计 2018 年新能源汽车销量超过 100 万辆，将继续保持高速增长。

表 1-1 2017 年中国新能源汽车销售量

	12月	1-12月累计	环比增长	同比增长	同比累计增长
新能源汽车	16.3	77.7	32.3	56.8	53.3
新能源乘用车	9.8	57.8	13.6	110.3	72.0
纯电动	8.2	46.8	14.5	104.9	82.1
插电式混合动力	1.3	11.1	9.6	141.9	39.4
新能源商用车	6.4	19.8	76.5	13.0	16.3
纯电动	6.2	18.4	79.2	18.7	21.5
插电式混合动力	0.3	1.4	26.7	-48.1	-26.6

数据来源：中国汽车工业协会

(2) 截止 2017 年底，中国新能源汽车保有量超过 170 万辆，约占全球保有量的 55%。预计 2018 年销量突破 100 万辆。2017 年中国新能源汽车市场呈现三大特征：应用领域方面，受私人购车、分时租赁、网约车需求影响，乘用车市场开始占据主导地位，占比接近 75%；技术路线方面，受政策支持影响，以纯电动汽车为主，占比接近 84%；续航里程方面，由于动力电池技术进步，新能源乘用车长里程趋势明显，200 公里以上车型超过 50%，300 公里以上车型相比 2016 年翻了两番。

(3) 从技术发展来看，通过我国《中国制造 2025》、《节能与新能源汽车技术路线图》、《促进汽车动力电池产业发展行动方案》等政策引导和支持，我国动力电池技术提升。2017 年，我国动力电池单体能量密度已经达到 240Wh/kg，系统能量密度达到 150Wh/kg，成本 1.5 元 / 瓦时，2020 年纯电动汽车电池系统单价有望降至 1 元 /Wh。

1.1.2 国内外充电基础设施分析

1. 国外充电基础设施发展情况

(1) 总体规模

作为连接车辆、用户的中间环节，电动汽车充电基础设施网络的商业化、规模化发展是整个电动汽车产业规模化发展的先决条件。世界各国十分重视充电基础设施的发展。

据 IEA 发布的《Global EV outlook 2018》报告显示，2017 年公共慢充电桩数量为 318128 个，同比增长了 80870 个；公共快充桩数量为 112023 个，同比增长了 35714 个。

(2) 区域分布

从区域分布来看，中国以 213903 个公共桩居首位，美国以 45868 个公共桩排名第二，荷兰排名第三，其公共充电桩为 33431 个。而慢充电桩数量排名前 5 位的国家为中国 130508 个、美国 39601 个、荷兰 32976 个、德国 22213 个、日本 21507 个；快充桩数量排名前 5 位的国家为中国 83395 个、日本 7327 个、美国 6267 个、韩国 2531 个、德国 2076 个。

2. 国内充电基础设施现状

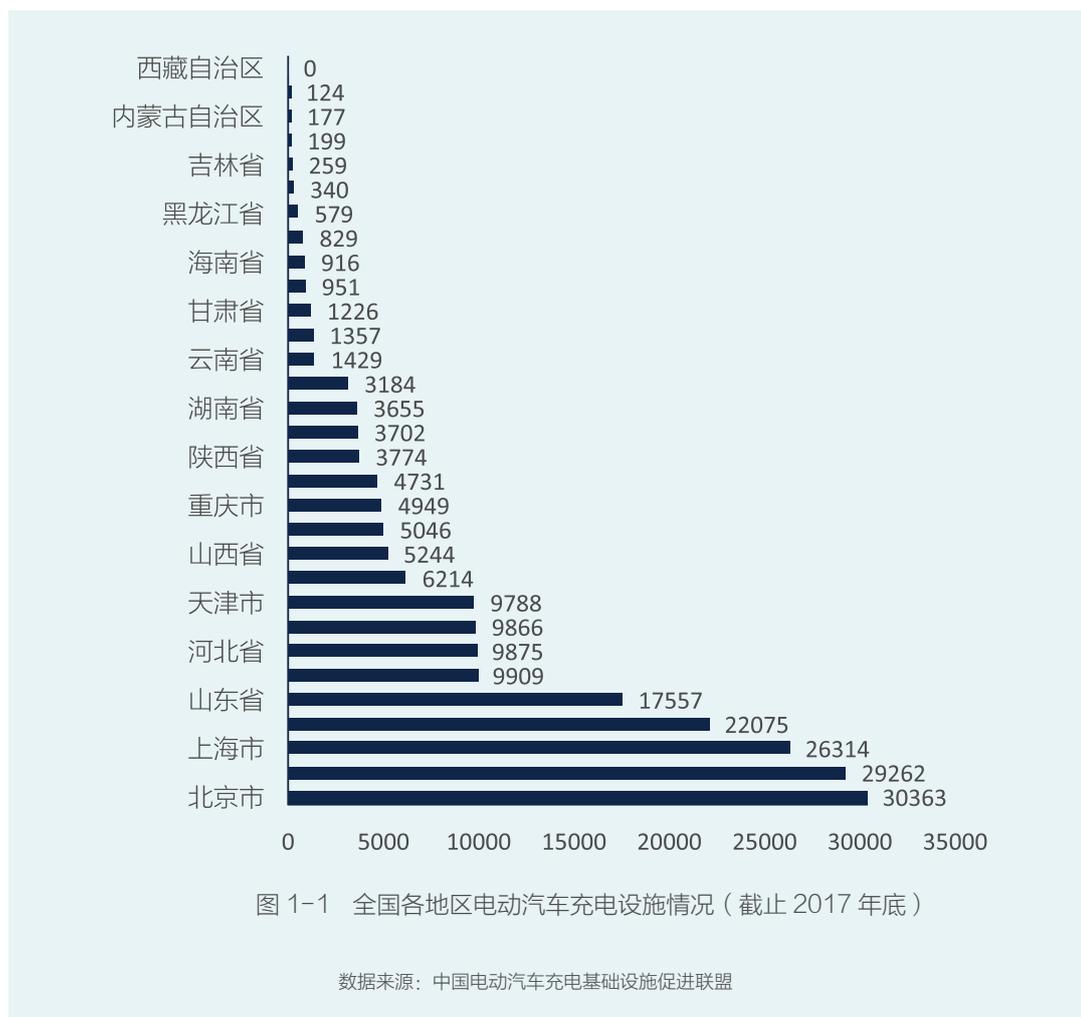
(1) 总体规模

主要分布在北京、广东、上海、江苏、山东，以上5个省市的公共充电设施占全国的比重约为60%。车桩比3.8:1，慢充快充桩比为1.4:1。公共充电设施利用率低，可持续的商业模式尚未形成。

根据中国电动汽车充电基础设施促进联盟统计，截止2018年5月，我国公共类充电桩数量为266231个，同比增长59.5%；其中交流充电桩116761个，直流充电桩84174个，交直流一体充电桩65296个。私人类充电桩304412个，其中交流充电桩304399个，直流充电桩13个。总体来说，我国已经成为全球最大的充电桩市场，在数量上具有绝对的领先优势。

(2) 区域分布

分地区看，由于全国各省市推广系能源汽车的进程和力度不统一。导致各省市充电基础设施的建设运营也呈现出较大的差异性，部分省市建设速度较快，如北京、上海、广州、江苏、山东等，这5省市充电桩总数量站全国总数量的60%，详细数据见图1-1。部分省市建设进展十分缓慢，如新疆、西藏、青海、内蒙等，数量不足两百个。总体来看，国内的充电基础设施市场呈现东部、中部、南部强，而西部和北部弱的特点。



1.2 电动汽车与充电基础设施用电特性

1.2.1 电动汽车充电行为特性分析

对充电基础设施的“需求侧”——各类电动汽车而言，其是否具备固定停车条件是影响各类电动汽车用户对不同的充电基础设施需求的最关键要素。对于有固定停车条件的用户，其对充电基础设施的需求一般以专用充电设施及其配套的智能用电服务为主，以公共充电设施及相关信息服务为辅；而无固定停车条件的用户，则对市内公共充电设施及相关信息服务有强烈需求，市内公共充电网络应重点关注出租、网约等营运车辆以及不具备固定停车条件的私家车用户。各类电动汽车对不同充电基础设施需求具体表 1-2 所示。

表 1-2 充电基础设施的“需求侧”特征

“需求侧”特征	公交车	其他大中型载客车	环卫车	其他大中型载货车	出租车	网约车	其他轻小型客车	轻小型货车
专用充电	强	较强	强	较强	弱	弱	强（无固定停车条件除外）	较强
城际公共快充	弱	较强	弱	较强	弱	弱	较强	较强
室内公共充电	弱	弱	弱	弱	强	强	较强（无固定停车用户强）	弱
智能用电服务	强	较强	强	较强	弱	弱	强	弱
充电信息服务	弱	弱	弱	较强	强	强	强	较强

1.2.2 充电基础设施用电特性分析

各类充电基础设施在用户行为特征和设施本身用电特征两方面具有明显的差异。用户行为特性的差异具体表现在充电时间分布和速率要求两个方面，设施本身用电特征的差异表现在可引导性（具备充电引导潜力）、容量需求、电压等级和负荷特性四个方面。具体地，集中式充电站主要接入 10kV 的电压等级，分散式桩主要接入 0.4kV 的电压等级。专用设施的可引导性要高于公共设施，但若无合理引导，专用设施充电时间相对集中，且与已有的居民或者商业负荷高峰时间段叠加，可能会显著加大高峰负荷。

表 1-3 各类充电基础设施的用电特性

设施类型	用户行为特性		设施用电特性			
	时间分布	速率要求	可引导性	容量需求	电压等级	负荷特性
集中式专用充电站	根据车辆运行集中时段充电	3 ~ 5 小时	较强	数百 kVA 至上万 kVA/ 站	10kV	一般在用电低谷时段
城际快充站	分布较均匀，白天多于晚间	10 分钟 ~ 1 小时	弱	630kVA/ 站	10kV	冲击型负荷，时间分布较均匀，白天大于夜间
城市公共充电基础设施	快充：分布较均匀 慢充：白天为主	快充： 10 ~ 30 分钟 慢充：数小时	弱	快充：70kVA/ 桩 慢充：8kVA/ 桩	0.4kV	快充：时间分布较均匀，白天大于夜间 慢充：白天与前半夜为主，一般与周围商业用电负荷高峰叠加
分散式专用充电桩	集中在白天（办公区） 或夜间（居民区）	数小时	强	4-8kVA/ 桩	0.4kV	办公区以白天为主，与早高峰负荷叠加 居民区以夜间为主，与晚高峰用电负荷叠加

2 充电基础设施对电网的影响分析

电动汽车充电对电网的影响因素主要是电动汽车的普及程度、电动汽车的类型、电动汽车的充电时间、电动汽车的充电方式以及电动汽车的充电特性。当电动汽车接入电网的方式仅限于通过充电基础设施时，电动汽车对电网的影响就笼统地反映在充电基础设施对电网的影响。充电基础设施对电网影响，从整体电网的影响、对局部配电网的影响、对供电服务的影响三方面进行研究。

2.1 对整体电网的影响

根据不同类型的充电基础设施用电特性来看，公共充电设施的用电行为较为分散，没有明显的峰谷差别。而专用设施的用电行为相对集中，峰谷差别更为明显。综合来看，在无序充电前提下，充电基础设施负荷最大的时刻应该是傍晚时分大量私家车主回到居住地，开始使用私人专用充电桩为私家车充电的时刻。

无序用电下对负荷的影响。到 2020 年与 2030 年，在无序充电情形下，国家电网公司经营区域峰值负荷增加 1361 万千瓦和 1.53 亿千瓦，预计相当于当年区域峰值负荷的 1.6% 和 13.1%。

分区域来看，加快发展地区占比最大，超过 62% 和 58%。分设施来看，分散式专用充电桩占比最大，约 68% 和 75%。

2.2 对配电网的影响

电动汽车充电不仅会影响配电网的负荷平衡，而且会给配电网带来其它问题。电动汽车的聚集性充电可能会导致局部地区的负荷紧张，电动汽车充电时间的叠加或负荷高峰时段的充电行为将会加重配电网负担。

1. 对供电服务的影响

由于已有公共配电网和用户侧配电设施都没有考虑充电需求，所以部分发展较快地区的充电设施建设会产生局部配网增容改造的需求，根据不同用户与电网的产权界面，带来的影响也有所不同。

2. 对配网电能质量和安全管理的影响

充电网络充放电是一类大功率、非线性负荷，工作时既需要电网提供稳定可靠的大电流供电，又会同时产生很高的谐波电流和冲击电压，若不采取相对应的措施，可能会给供电质量带来谐波污染、降低功率因数以及系统电压波动三方面的影响。

由于各类充电设施布局十分分散，而且很多直接布置在 380V 和 220V 的低压侧，这也增加了未来配电网开展电能质量监测和治理的难度。此外，随着车辆增多，部分不合理的接线也可能会增加各级配电网保护动作跳闸的风险，可能会带来较大的用电安全隐患，给配网侧的用电安全管理提出了较大挑战。

2.3 对供电服务的影响

一是电动汽车用户“散”与“多”的零散报装模式对业扩服务提出了更高要求。居民区充电桩一般采取单个用户小容量“零散报装”的模式，与此前住宅开发商大容量“整体报装”模式相比工作量增加了数十倍，对电网企业报装服务效率与质量提出更高要求。

二是现有部分公共配电容量的公平处置问题，可能会出现“后来者”不公平现象。发展初期，部分用户可以利用容量裕度接入少量充电桩，但随着数量的快速增加，将出现容量不足无法满足用户报装需求的情况，可能引起用户对电网供电服务的不满与抱怨。

三是会出现大量高压自管户的“转供电”或同一场地管理多个电力用户的问题，增加营销服务复杂程度。

3 电动汽车充电基础设施与电网互动研究

3.1 “车-桩-网”互动模式

根据互动目的、手段与层次不同，“车-桩-网”互动可以分为价格引导模式、本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式共五种互动模式。具体如表 3-1 所示。

表 3-1 充电基础设施与电网互动的五种模式

互动模式	主要内容	关键条件
价格引导模式	通过分时电价等手段引导用户在“低谷”充电，目的在于避开高峰负荷，引导低谷充电。	分时电价政策，用户可自主根据价格选择充电时段。
本地优化的智能充电模式	根据小区配电台区的负荷状态以及车的充电状态，自动优化充电的时序、功率等。目的在于降低本地增容压力，充分利用谷电，提高设备利用效率。	<ol style="list-style-type: none"> “台变-桩-车”的双向实时信息互动的技术与标准； 台变对充电桩控制调度的机制和技术手段。
全网优化的智能充电模式	根据清洁能源消纳、大电网稳定运行等方面的需求，结合小区配电台区的负荷状态以及车的充电状态，自动优化充电的时序、功率等。目的主要在于提高系统调峰频与吸纳清洁能源能力。	<ol style="list-style-type: none"> “电源-大电网-配电网-桩-车”双向信息互动的技术与标准； 电网对充电桩控制调度的机制和技术手段； 大电网需求响应、辅助服务市场等保障机制。
本地优化的智能充放电模式	实现电动汽车对本地电网放电，自动优化本地充电桩的充放电时序、功率、流向等。目的在于通过放电增强本地优化能力同时，获取峰谷差价收益。	<ol style="list-style-type: none"> 在“本地充电模式”上增加功率双向流动技术与标准； 动力电池的充放电损耗成本低于参与本地互动的收益（如峰谷电价差等）。
全网优化的智能充放电模式	实现电动汽车与大电网放电，自动优化全网充电桩的充放电时序、功率、流向等。目的在于通过放电增强全网优化能力的同时，最大化峰谷差价和参与辅助服务市场的收益。	<ol style="list-style-type: none"> 在“全网充电模式”上增加功率双向流动技术与标准； 动力电池的充放电损耗低于参与大电网互动的收益（如辅助服务收益等）。

3.2 “车-桩-网”互动的技术路线

对“车-桩-网”互动模式的手段分析易知充电基础设施作为电动汽车和电网的中间层，在物理层、信息层和交易层都起到了中间集聚的作用，如图 3-1 所示。

在物理层，电动汽车作为分布式移动储能资源，充电基础设施作为电动汽车接入电网的接口，而电网扮演电源或者售电方的角色。

在信息层，电动汽车向充电网络发布自身电池容量、位置、用户行为特征等信息，充电基础设施接收电动汽车与电网发布的信息，综合优化后形成互动策略并反馈给双方，电网根据其运行情况，发布负荷需求、容量需求、辅助服务需求等调度指令。

在交易层，电动汽车参与电力市场、碳市场等各类交易主体，电网成为电能交易平台以及辅助服务主要组织方。

因此，充电基础设施与电动汽车用户在物理层、信息层、交易层建立了直接的联系，通过“互联网+”能够将分散资源整合进统一平台，形成电网与电动汽车用户之间中间层网络。

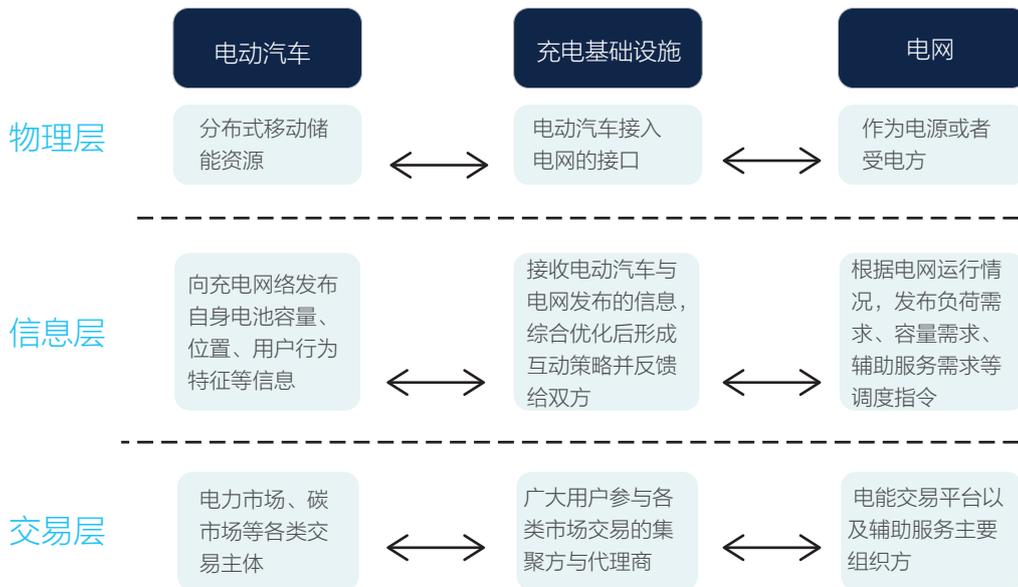


图 3-1 “车-桩-网”互动模式中信息传递框架

在广泛应用价格引导模式的基础上，本地优化的智能充电模式有望率先应用，一方面有利于降低局部配电网的建设改造成本，另一方面能够在技术、设备、标准等方面打下良好基础。下一阶段随着电池成本下降与梯次利用的推广，大电网需求响应、电力市场等配套条件逐渐成熟，本地与全网优化的智能充放电模式得到广泛应用。

当前，充电基础网络与智能电网融合发展处于起步阶段，仅有部分试点项目，同时，价格引导模式已在多地开始实行，到 2020 年，价格引导模式全面推行，本地优化的智能充电模式率先应用，全网优化的智能充电模式随着智能电网的建设以及电力市场改革推进等取得进展，“本地充放电模式”开始取得一定应用。到 2030 年，本地与全网优化的智能充放电模式全面推广电动汽车与充电基础设施作为重要的分布式储能资源参与电网运行，提高清洁能源消纳能力和电网资产效率。如图 3-2 所示。



图 3-2 五种充电模式发展路径

3.3 “车-桩-网”互动的政策与市场环境

当前，对充电基础设施而言，提升充电服务的用户体验，创新合作模式突破建设瓶颈是重点工作，充电网络包含手机 APP 的信息平台初步建成，具备动态更新、查询、导航等功能，部分地区已出现分时共享充电桩等新模式，但是，目前缺乏多方利益共享模式，协调困难。

2020 年左右，随着车辆与用户规模的快速增长，基于信息平台与大数据的各类增值服务以及商业模式有望成为主流驱动力，增值业务收入占比提升，产业链上下游合作创新，“车-网”与“车-车”等多端信息交互，平台提供预约充电、定期充电、电子商务等服务有望提供给广大用户，在此基础上，政府与市场共同推动下，各利益相关方合作共建公共充电基础设施，充电车位与电动汽车分时共享快速发展。

2030 年，随着电池、智能电网等关键技术的进步以及电力市场、碳市场等交易机制的成熟，与电网的智能互动有望成为下一个行业创新发展的热点。具体如图 3-3 所示。



图 3-3 充电设施服务内容与运营模式的演变趋势

由于充电基础设施市场具有典型的“网络经济”特点，将逐步由当前的“散、乱、小”走大型平台运营商主导，大量中小型运营商与大平台互联互通的产业生态格局。具体如图 3-4 所示。

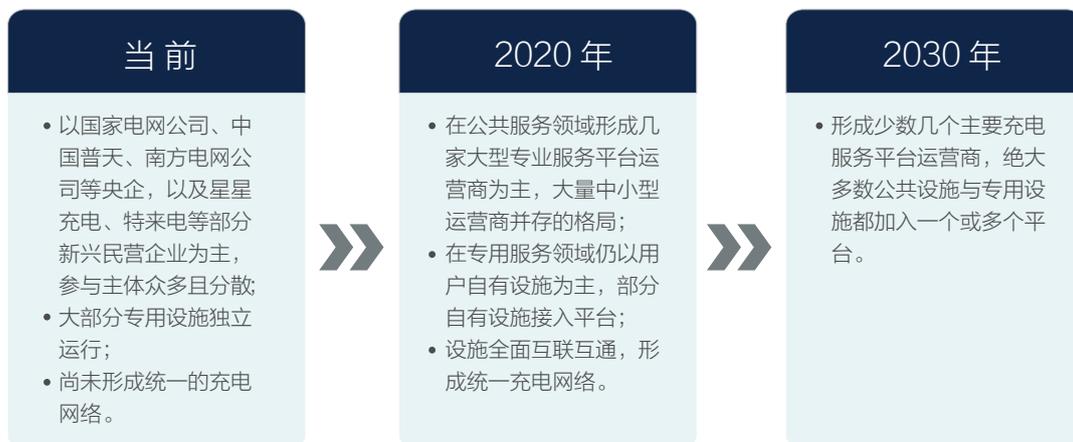


图 3-4 充电设施市场格局发展展望

4 “车-桩-网”互动对配电网的影响

目前，我国电动汽车产业步入快速发展期，大量电动汽车的充电行为将给电网带来较大影响，而电动汽车的储能特性也将为电力系统的安全经济运行提供新的机遇。

当前阶段下，“车-桩-网”互动模式是从不同手段与层次实现电动汽车有序充电行为，“车-桩-网”互动模式对电网影响着重分析有序充电行为对电网的影响。因此，从配电网负荷特性、需求侧资源发展、电网规划建设、电网调度运行和供电服务五个角度，对比电动汽车无序充电行为对电网影响分析“车-桩-网”互动对配电网运行的影响。

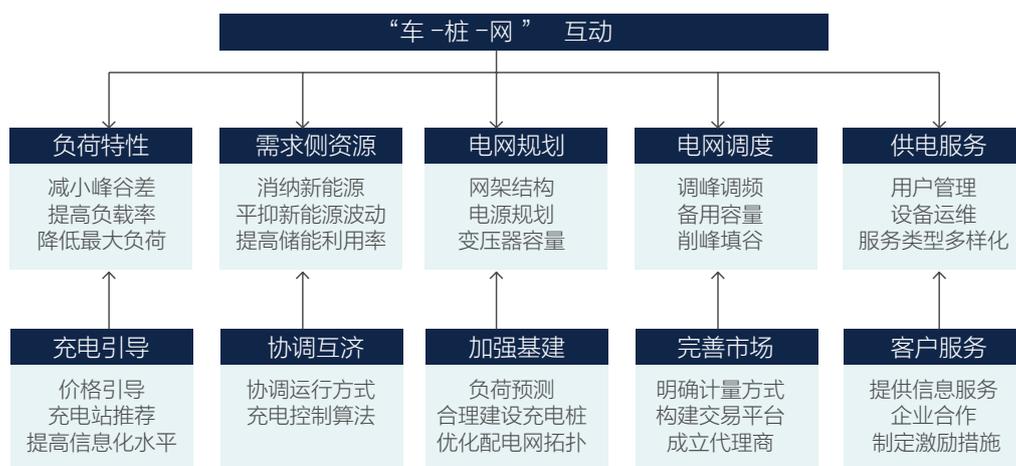


图 4-1 “车-桩-网”互动模式

4.1 对配电网负荷特性的影响

“车-桩-网”互动引导下对负荷有明显影响。无序充电时，分散式专用充电桩充电高峰与基础负荷叠加，使得峰谷差变大，配电网的最大负荷增大。可能造成配电网线路过负荷，局部电压过低。有序充电可以使电动汽车利用配电网谷期容量进行充电，从而平抑负荷波动，降低峰谷差，降低尖峰负荷。

通过进行有序用电引导，将电动汽车用户相对集中的无序充电行为尽可能分散到夜间低谷时段，可以显著降低对电网最大负荷的影响。有序用电降低对最大负荷影响主要通过专用设施的价格引导和智能充电管理实现，有望使充电负荷下降 50%-70%，对负荷降低贡献最大。公共充电引导主要通过价格引导实现，充电负荷有望下降 30% 左右。（本报告负荷特性分析均为冬季晚 19 点负荷，假定无序充电情景下，集中式专用充电站同时率 0.05~0.6，分散式专用充电桩 0.4，城际快充站 0.05，城市公共快充桩 0.1，城市公共慢充桩 0.3。）

表 4-1 电动汽车有序无序充电负荷对比（单位：万千瓦）

设施类型	2020 年		2030 年	
	无序	有序	无序	有序
集中式专用充电站	290	145	1920	960
分散式专用充电桩	890	297	11486	3829
城际快充站	5	5	219	219
城市公共充电设施	205	143	1725	1203
总计	1361	590	15350	6211

无序充电时，分散式专用充电桩充电高峰与基础负荷叠加，使得峰谷差变大，配电网的最大负荷增大。可能造成配电网线路过负荷，局部电压过低。而有序充电可以使电动汽车利用配电网谷期容量进行充电，从而平抑负荷波动，降低峰谷差，降低尖峰负荷。对专用充电桩尤其明显，通过有序安排电动汽车充电时序与功率，在夜间负荷低谷时期对电动汽车进行充电，从而提高配电网的负荷率，降低最大负荷。所以配电网侧需要通过价格引导，制定合理的分时充电电价。同时加强建设车联网平台，设计信息发布平台，获取电动汽车充电需求，发布实时电价信息，加强与电动汽车的信息交互。设计充电站推荐、充电预约APP，提高电动汽车的调度能力。

4.2 对配电网需求侧资源发展的影响

“车-桩-网”的互动增加了配电网需求侧资源的种类。在“车-桩-网”互动模式中，电动汽车从本质上讲是一种移动储能资源，既可以充电，又可以放电。通过对“车-桩-网”互动的技术的研究，能够实现满足大电网需求的电动汽车充放电计划。

电动汽车的充电行为具有集聚性和随机性的特点，电动汽车无序充电行为对电网负荷、潮流、稳定性都有不利影响。对“车-桩-网”互动的研究，能够通过电价、辅助服务市场等手段，合理调控电动汽车充电行为，进一步使电动汽车能够与分布式电源协调运行。

4.3 对配电网规划建设的影响

“车-桩-网”的互动减缓城市电网建设和局部配电网建设改造。以一个2000户的居民区配电设施为例，按当前标准，其居民区配电容量在4000kVA左右。假定不占用原有居民用电容量，考虑户均车位0.5个，单个充电桩配置容量7kVA，同时率按照0.6考虑，则100%配置充电桩时，无序充电下小区用电总容量要增加105%，在有序用电模式下用电下仅增加35%。

表 4-2 典型小区电动汽车充电设施配电容量需求

户数：车位数	充电车位比例	单桩容量	无序充电情形	有序充电情形
1:0.5	100%	7kVA	+4200kVA (+105%)	+1400kVA (+35%)

“车-桩-网”的互动降低配电网建设改造成本。以上面 2000 户的居民区配电设施改造升级为例。无序充电模式：在停车场建设配套供电设施，由环网柜、专用变压器、低压柜、 π 接箱、线缆、表箱以及表箱后改造等项目组成，总成本接近 300 万元，可支持 300 个 7kw 的交流慢充桩，平均每个充电桩 1 万元。有序充电模式：专用变压器、环网柜、低压柜均保持不变，通过扩展 π 接箱、线路、表箱等设备，总成本 463 万元，可支持最大 900 个 7kW 的交流慢充桩，平均每个充电桩 0.5 万元，降低约 50%。

表 4-3 无序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本

项目	规格	成本
变压器	2500kVA	10 万
环网柜	3 面	7.5 万
低压柜	5 面	25 万
π 接箱（1 进 10 出）及线缆	30 个	195 万
表箱及线缆	30 个	45 万
表箱后改造	300 个	15 万
总计		297.5 万元

表 4-4 有序充电情景下典型小区电动汽车充电设施配电成本

项目	规格	成本
变压器	2500kVA	10 万
环网柜	3 面	7.5 万
低压柜	5 面	25 万
π 接箱（1 进 30 出）及线缆	30 个	240 万
表箱及线缆	90 个	135 万
表箱后改造	900 个	45 万
总计		462.5 万元

4.4 对配电网调度运行的影响

“车-桩-网”的互动增大了电网灵活性调节能力。电动汽车的停驶特性与电网负荷的爬坡特性存在较好的匹配关系。当早晨电网负荷爬升以及夜间电网负荷快速降低的同时，电动汽车也处于停驶状态，可以通过充电基础设施接入电网，参与电网的削峰填谷。一辆普通的电动私家车在其全生命周期内行驶所耗电量仅占电池充放电潜力的小部分，其参与电网灵活调度的潜力非常大，参与辅助服务，提高新能源消纳能力。

因此，为实现电网灵活性调节能力：1) 需明确电动汽车与电网互动的体系框架；2) 在电动汽车推广力度大的城市先行开展有序充放电试点。

4.5 对供电服务的影响

“车-桩-网”的互动提高供电服务水平。“车-桩-网”互动中需要对电动汽车有序充电行为进行引导，提出了对电网充电服务以及相关的信息服务等基本服务的更高要求，倒逼电网提高供电服务水平，增强充电运营商核心竞争力，有助于其构筑竞争优势壁垒。

“车-桩-网”的互动促进供电服务类型多样化。“车-桩-网”互动涉及房地产开发商、物业企业、停车管理企业等场地拥有方，电网企业、汽车企业、设备制造企业等上下游相关方，互联网企业等新兴企业。因此，在基本服务基础上，充电运营企业可为用户、相关商家以及上下游产业方提供更多增值服务，充分挖掘各方的潜在价值，提高综合效益水平。

因此，供电电网针对新的供电服务要求，需采取如下措施：1) 明确交易机制；2) 开展交易试点。

5 “车-桩-网”互动对配电网效益评价体系

表 5-1 “车-桩-网”互动对配电网效益评价体系

评价对象	一级指标	二级指标
“车-桩-网”互动对配电网效益评价	经济性指标	配电网扩建容量减少量 节约配电网建设成本 提高存量电网资源利用率
	安全稳定指标	事故支撑能力 降低配网最大负载率 对供电可靠性的贡献 对调峰能力的贡献
	环境友好指标	可再生能源消纳能力 提高节能减排效益

5.1 提升配电网经济性的效益评价

1) 配电网扩建容量减少量

配电网容量配置是适应负荷发展的重要支撑，也是配电网投资建设重要方面。随着电动汽车、家用设备等负荷的增多，对配电网容量配置提出了更高要求。而“车-桩-网”互动可以充分利用电动汽车移动储能特性，实现对配电网负荷的优化调整，合理利用谷期容量，降低峰期负荷，减少配电网容量的配置。因此，配电网备用容量减少量是评价“车-桩-网”互动对配电网经济性影响的重要指标，其可由下面公式计算：

$$\text{配电网扩建容量减少量} = \text{无序充电容量增加量} - \text{有序充电容量增加量}$$

2) 节约配电网建设成本

为适应“车-桩-网”的运行，需要加强城市配电网建设和局部配电网建设改造。依据大型集中充电站建设需求，及时建设或改造配套变电站，满足充换电基础设施接纳条件。对老旧小区和公共停车场依据需要及时进行电网增容改造。相比无序充电，有序充电能够减少电网设备投入量减少配电网建设成本。因此，节约配电网建设成本也是评价“车-桩-网”互动对配电网经济性影响的重要指标，可由下面公式计算：

$$\text{节约配电网建设成本} = \text{无序充电建设成本} - \text{有序充电建设成本}$$

建设成本 = 增加设施 1 × 设施 1 价格 + …… + 增加设施 n × 设施 n 价格

3) 提高存量电网资源利用率

配电网资源利用率是配电网对设备资源等管理水平的直接体现。随着配电网需求侧资源的增多，配电网需要整合这些资源，充分挖掘资源特性优势，实现需求侧资源的协调、高效、稳定运行。从而提高配电网现有需求侧资源的利用效率，充分利用现有设备的容量。因此提高存量电网资源利用率也是“车-桩-网”互动对配电网经济性影响的重要指标，包括年最大负荷利用率、主变容量利用率、线路容量利用率 3 个方面综合分析，可由下面公式计算：

$$\text{存量电网资源利用率} = \frac{\text{配电网平均负载}}{\text{配电网额定容量}}$$

存量电网资源利用率提升 = 有序充电下存量电网利用率 - 无序充电下存量电网利用率

5.2 提升配电网安全稳定性的效益评价

1) 事故支撑能力

事故支撑能力是指配电网发生故障时能够调用的用户资源支撑配电网恢复供电行为的能力。传统情况下，配电网恢复供电行为是通过切负荷来实现的。“车-桩-网”互动模式下，电动汽车的放电行为能够实现对配电网电能的反馈，增大了配电网事故支撑能力。因此，事故支撑能力是衡量“车-桩-网”互动对配电网安全运行的重要指标，其计算公式如下：

事故支撑能力 = “车-桩-网”互动下向电网反馈电力

2) 降低配网最大负载率

最大负载率是指配电网最大负载与配电网额定负载的比值，最大负载率是衡量配电网安全运行的重要指标。最大负载率越大，电网承担负荷波动性的能力就越大。最大负载率越小，电网承担负荷波动性的能力就越小。“车-桩-网”互动模式下可以调动电动汽车通过放电向电网放电，降低峰时负荷，从而提高配电网最大负载率。

$$\text{配网最大负载率} = \frac{\text{配电网最大负载}}{\text{配电网额定负载}}$$

配网最大负载率减少量 = 无序充电下配网最大负载率 - 有序充电下配网最大负载率

3) 对供电可靠性的贡献

供电可靠性是衡量配电网稳定运行的重要指标，也是配电网供电服务的重要指标。供电可靠性是指配电网能够持续不间断向用电负荷供电的能力，“车-桩-网”互动模式下，当外部发生故障引起负荷停电时，电动汽车可以运行在 V2G 模式下，成为内部电源，向负荷供电，从而保证重要负荷，减小停电负荷比例，从而提高供电可靠性。因此，“车-桩-网”互动模式下的供电可靠性可以通过电动汽车放电带动负荷的能力来表示，即：

$$\text{对供电可靠性的贡献} = \frac{\text{电动汽车放电容量}}{\text{配电网常规负荷}}$$

4) 对调峰能力的贡献

供电质量是配电网供电服务水平的指标之一，也是配电网安全稳定运行的重要指标。供电质量体现在电压质量和频率水平两个方面。无序充电模式下，电动汽车充电功率与原有负荷峰值叠加，产生负荷尖峰，造成配电网负荷波动变大，对电网的扰动增大，增大了电网调频负担，使得电网电压与频率的稳定性下降。所以可以通过配电网负荷的标准差来描述配电网负荷的波动程度，由于配电网负荷的波动程度影响电网的调频难度，进而反映配电网的供电质量，即：

负荷的波动程度 = 基础负荷与充放电负荷之和的标准差

对调峰能力的贡献 = 无序充电模式下负荷的波动程度 - 有序充电模式下负荷的波动程度

5.3 提升配电网环境友好性的效益评价

1) 可再生能源消纳能力

可再生能源消纳能力是衡量“车-桩-网”互动对配电网环境友好性的效益评价指标之一。目前我国电力供大于求的矛盾日益突出，可再生能源出力受限，弃水弃风弃光现象严重，也成为可再生能源发展亟待解决的难题。“车-桩-网”互动模式可以与可再生能源协调配合，利用电动汽车消纳可再生能源，平抑可再生能源的波动，为提高可再生能源消纳能力提供了重要途径。

可再生能源消纳能力 = 有序充电模式下可再生能源消纳量 - 无序充电模式下可再生能源消纳量

2) 电网节能减排效益

电网节能减排是指通过“车-桩-网”互动能够减少配电网碳排放量的能力，是衡量“车-桩-网”互动对配电网环境友好性的效益评价指标之一。电网节能减排主要体现在“车-桩-网”互动下减少化石能源使用量上，因此其计算公式如下：

$$\text{电网节能减排效益} = \frac{\text{可再生能源使用量}}{\text{本地区使用总电量}}$$

电网节能减排效益提升量 = 有序充电模式下电网的节能减排效益 - 无序充电模式下电网的节能减排效益

5.4 综合效益评价体系

提高配电网的经济性指标能够提升配电网的利益，提高配电网的安全稳定指标可以使得用户有一个更好的用电环境，提高用户的利益，提高配电网的环境友好指标对社会与自然生态有利。综合可知，“车-桩-网”互动模式对电网利益、用户利益、环境利益均有所提升，而这三者可以归属为社会综合效益，即“车-桩-网”互动模式对国民经济绿色协调发展的贡献。通过下式计算：

“车-桩-网”互动模式提升的社会经济 = (无序充电模式电网建设成本 + 无序充电模式因供电质量造成的生产损失成本 + 无序充电模式碳排放成本) - (互动模式电网建设成本 + 互动模式因供电质量造成的生产损失成本 + 互动模式碳排放成本)

6 案例

6.1 住宅公寓分散式充电桩

以一个 2000 户的居民区配电设施为例，按当前标准，其居民区配电容量在 4000kVA 左右。假定不占用原有居民用电容量，考虑户均车位 0.5 个，单个充电桩配置容量 7kVA，同时率按照 0.6 考虑，按照 100% 配置充电桩。

在无序充电情况下，由于白天小区居民将电动汽车驶出小区，充电负荷大多集中在下午 6 点之后，与原有负荷高峰叠加，造成负荷尖峰。其最大有功功率从 3500KW 上升至 7466.67KW，增大 113.3%，峰谷差从 1866.7KW 上升至 5716.7KW，增大了 206.25%，负荷标准差由 522.7KW 上升至 1708.2KW，增大了 226.8%。

而按照有序充电模式，最大有功功率从 3500KW 上升至 4333.3KW，增大了 23.81%，峰谷差从 1866.7KW 上升至 2000KW，增大了 6.68%，负荷标准差从 522.7KW 上升至 705.5KW，增大了 34.97%。

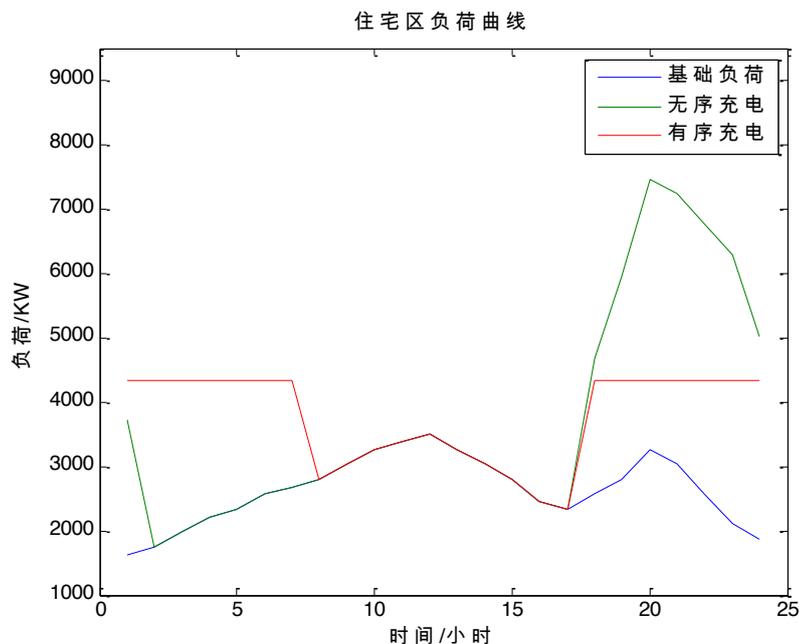


图 6-1 住宅区负荷曲线

1. 互动模式下，配电网扩建容量减少量 $=3966.667-833.33=3133.33\text{KVA}$ 。
2. 无序充电模式下，需要加装一台容量为 4000KVA 的变压器，需要 40 万元。环网柜，需要 10 万元。有序充电模式下，需要加装一台容量为 1000KVA 的变压器，需要 10 万元。环网柜，需要 5 万元。节约电网建设成本 $=40+10-(10+5)=35$ 万元。
3. 无序充电模式下，住宅区最大负荷为 7466.67KW，配电网经过改造后，容量为 7500KW，配电网的平均负荷为 3772.222，资源利用率 $=3772.222/7500=0.5030$ 。有序充电模式下，住宅区最大负荷为 4333.33KW，配电网经过改造后，容量为 4500KW，配电网的平均负荷为 3772.222，资源利用率 $=3772.222/4500=0.8383$ 。可见“车-桩-网”互动模式下配电网的资源利用率可以从 50.3% 提升至 83.83%，提高了 33.53% 的利用率。
4. 无序充电模式下，电动汽车不会运行在 V2G 模式，无法向电网反馈电能。而“车-桩-网”互动模式下电动汽车可以按照配电网的调度运行在 V2G 模式下，向配电网反馈电能。所以该住宅最大反馈的有功 $=1000*0.6*7=4200\text{kW}$ 。在假设电池容量为 100kWh，放电时电动汽车的平均电量为 60%，则可以向电网反馈 60kWh 的电量，即以 4.2MW 的功率反馈 14.2857 小时，于是事故支撑能力 $=60\text{MWh}$ 。
5. 无序充电模式下，配电网经过改造，变压器的容量为 7500kVA，由于配电网的最大功率为 7466.67kW，所以无序充电模式下，配电网的最大负载率为 $7466.667/7500=99.56\%$ ，而有序充电模式下，配电网的最大功率为 4333.33kW，所以其最大负载率为 $4333.33/7500=57.78\%$ ，降低了 41.78% 可见“车-桩-网”互动模式能够大大降低配电网的负载率。
6. “车-桩-网”互动模式下，当外部电网发生故障时，电动汽车可以运行在 V2G 模式下向负荷供电，减少负荷停电。该住宅小区的最大放电容量为 4200kW，小区基础负荷的最大值为 3500kW，最大放电容量与小区基础负荷的比值为 $4200/3500=1.2>1$ ，可见当外部电网发生故障的时候，电动汽车作为电源向小区其他负荷供电，能够保证小区不停电。
7. 负荷标准差越大，电网调频负担越大，容易造成频率波动以及电压波动，影响电能质量，通过负荷标准差可以反映配电网的供电质量。在无序充电模式下，住宅区负荷的标准差为 1708.2kW，有序充电模式下，负荷标准差为 705.5kW，相比无序充电模式减小了 1002.7kW，大大增强了配电网的电能质量。
8. “车-桩-网”互动模式下，配电网可以有序调度电动汽车充放电功率，作为整体负荷参与电力市场。在夜间（下午 8 点至次日早上 6 点）可以购买弃风电量，从而提高可再生能源消纳能力，则可再生能源的消纳能力 $=47667\text{kWh}$ 。
9. “车-桩-网”互动模式下消耗的弃风电量，体现了配电网的节能减排效益。电网节能减排效益 $=47667/94867=50.25\%$ 。

6.2 商业场所分散式充电桩

以一个基础负荷为 4000KVA 左右的商业区配电网为例，该商业区拥有一个 1000 个充电桩的地下停车场。假定不占用原有用电容量，单个充电桩配置容量 7kVA，同时率按照 0.6 考虑，按照 100% 配置充电桩。

在无序充电情况下，由于白天大量的电动汽车驶入商业区工作，充电负荷大多集中在早上 9 点至中午时间，与原有早高峰负荷叠加，造成负荷尖峰。其最大有功功率从 3500KW 上升至 7700KW，增大 120%，峰谷差从 1866.7KW 上升至 6066.7KW，增大了 225%，负荷标准差由 522.7KW 上升至 2210.9KW，增大了 322.98%。

而按照有序充电模式，最大有功功率从 3500KW 上升至 6040.74KW，增大了 72.59%，峰谷差从 1866.7KW 上升至 4407.4KW，增大了 136.11%，负荷标准差从 522.7KW 上升至 1795.1KW，增大了 243.43%。

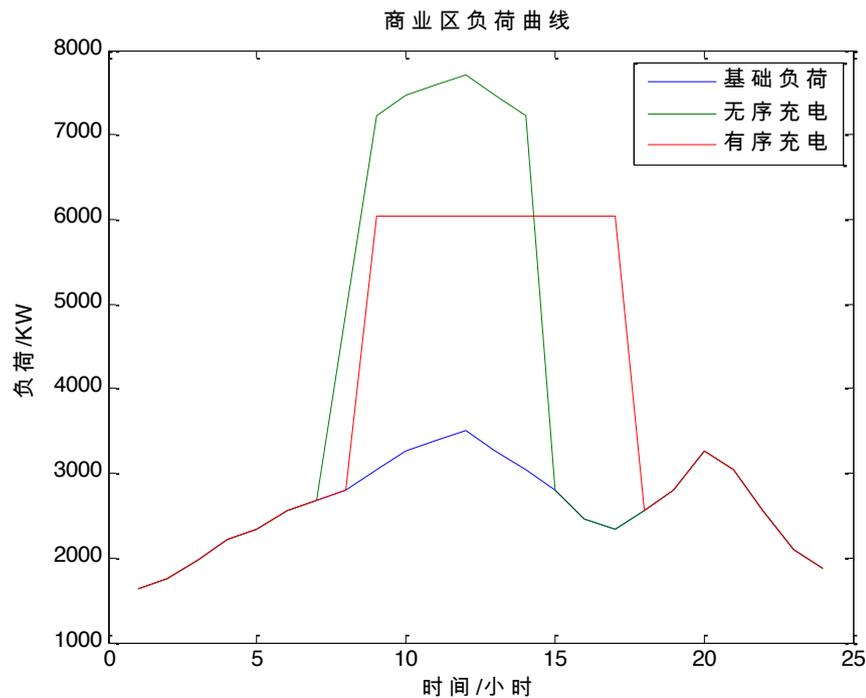


图 6-2 商业区负荷曲线

1. 配电网扩建容量减少量 $=4200-2540.7=1659.3\text{KVA}$ 。
2. 无序充电模式下，需要加装一台容量为 4500KVA 的变压器，需要 45 万元。环网柜，需要 12.5 万元。有序充电模式下，需要加装一台容量为 3000KVA 的变压器，需要 30 万元。环网柜，需要 10 万元。节约电网建设成本 $=45+12.5-(30+10)=17.5$ 万元。
3. 无序充电模式下，配电网经过改造后，容量为 8000KW，配电网的平均负荷为 3772.222，资源利用率 $=3772.222/8000=0.4715$ 。有序充电模式下，商业区最大负荷为 6040.741KW，配电网经过改造后，容量为 6300KW，配电网的平均负荷为 3772.222，资源利用率 $=3772.222/6300=0.5988$ 。可见“车-桩-网”互动模式下配电网的资源利用率可以从 47.15% 提升至 59.88%，提高了 12.73%。
4. 无序充电模式下，电动汽车不会运行在 V2G 模式，无法向电网反馈电能。而“车-桩-网”互动模式下电动汽车可以按照配电网的调度运行在 V2G 模式下，向配电网反馈电能。所以该商业区最大反馈的有功 $=1000*0.6*7=4200\text{KW}$ 。在假设电池容量为 100KWH，放电时电动汽车的平均电量为 60%，则可以向电网反馈 60MWH 的电量，即以 4.2MW 的功率反馈 14.2857 小时，于是事故支撑能力 $=60\text{MWH}$ 。
5. 无序充电模式下，配电网经过改造，变压器的容量为 8000KVA，由于配电网的最大功率为 7700KW，所以无序充电模式下，配电网的最大负载率为 $7700/8000=96.25\%$ ，而有序充电模式下，配电网的最大功率为 6040.74KW，所以其最大负载率为 $6040.74/8000=75.51\%$ ，降低了 20.74%，可见“车-桩-网”互动模式能够大大降低配电网的负载率。
6. “车-桩-网”互动模式下，当外部电网发生故障时，电动汽车可以运行在 V2G 模式下向负荷供电，减少负荷停电。该商业区的最大放电容量为 4200KW，商业区基础负荷的最大值为 3500KW，最大放电容量与商业区基础负荷的比值为 $4200/3500=1.2>1$ ，可见当外部电网发生故障的时候，电动汽车作为电源向商业区其他负荷供电，能够保证商业区不停电。
7. 负荷标准差越大，电网调频负担越大，容易造成频率波动以及电压波动，影响电能质量，通过负荷标准差可以反映配电网的供电质量。在无序充电模式下，商业区负荷的标准差为 2210.9KW。有序充电模式下，负荷标准差为 1795.1KW，相比无序充电模式减小了 415.8KW，大大增强了配电网的电能质量。
8. “车-桩-网”互动模式下，配电网可以有序调度电动汽车充放电功率，作为整体负荷参与电力市场。在夜间（下午 8 点至次日早上 6 点）可以购买弃风电量，从而提高可再生能源消纳能力，则可再生能源的消纳能力 $=25317\text{KWh}$ 。
9. “车-桩-网”互动模式下消耗的弃风电量，体现了配电网的节能减排效益。电网节能减排效益 $=25317/94867=26.69\%$ 。

6.3 城市集中式充电站

以一个基础负荷为 40MW 左右的区域配电网为例，该区域拥有 3 个集中式充电站，其容量之和为 20MW，同时拥有容量为 25MW 的光伏发电板。

在无序充电情况下，由于集中式充电站拥有快速补电能力，电动汽车用户按需前往集中式充电站充电，故一天 24 小时中各时段均有可能有充电负荷。无序充电模式下，该区域配电网最大有功功率从 40MW 上升至 57.33MW，增大 43.32%，峰谷差从 21.33MW 上升至 38.67MW，增大了 81.29%，负荷标准差由 5.97MW 上升至 10.28MW，增大了 72.19%。

而按照有序充电模式，最大有功功率从 40MW 减小至 37.33MW，减小了 6.68%，峰谷差从 21.33MW 减小至 4.48MW，减小了 79%，负荷标准差从 5.97MW 减小至 0.95MW，减小了 84.09%。有序充放电模式，最大有功功率从 40MW 减小至 33.12MW，减小了 17.2MW，峰谷差从 21.33MW 减少至 0MW，减少了 100%，负荷标准差从 5.97MW 减小至 0MW，减小了 100%。

同时，运行在无序充电模式下，由于电动汽车充电负荷不能与光伏功率很好的配合，所以存在着 28.41MWh 的弃光电量，弃光比例 18.71%，运行在有序充电模式下，弃电量为 0.31MWh，弃光比例 0.20%。

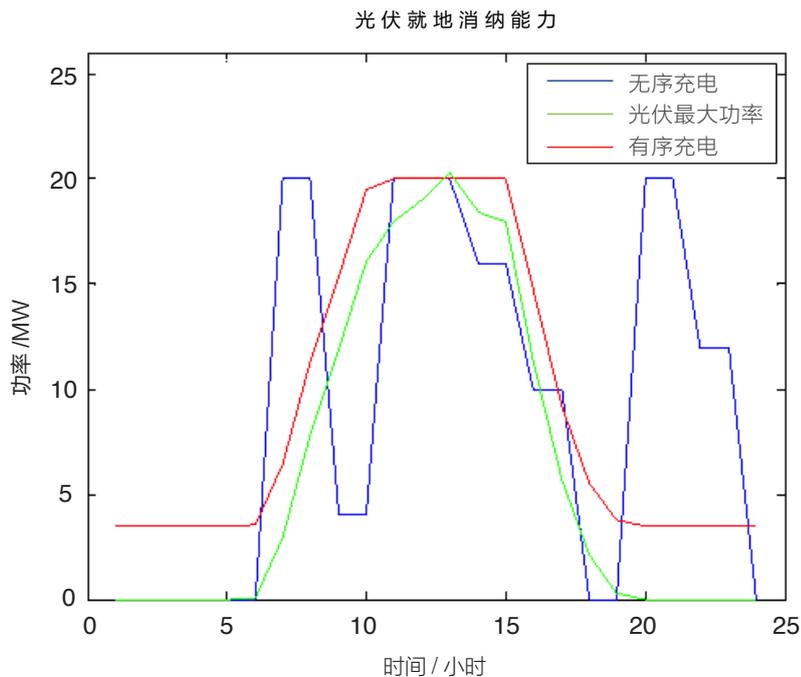


图 6-3 光伏就地消纳能力

1. 配电网扩建容量减少量 $=17.33-0=17.33\text{MW}$ 。
2. 无序充电模式下，变压器容量为 60MVA，需要新增 20MVA 的变压器，价钱为 200 万元。而有序充电模式下，原有变压器不需要扩容。故节约电网建设成本 $=200$ 万元。
3. 无序充电模式下，区域配电网最大负荷为 57.33MW，配电网经过改造后，容量为 60MW，配电网的平均负荷为 33.12MW，资源利用率 $=33.12/60=55.2\%$ 。有序充电模式下，区域配电网最大负荷为 37.33MW，配电网不需要再增加变压器，配电网的平均负荷为 33.12MW，资源利用率 $=33.12/40=82.80\%$ 。可见“车-桩-网”互动模式下配电网的资源利用率可以从 55.2% 提升至 82.8%，提升了 17.6%。
4. 无序充电模式下，电动汽车不会运行在 V2G 模式，无法向电网反馈电能。而“车-桩-网”互动模式下电动汽车可以按照配电网的调度运行在 V2G 模式下，向配电网反馈电能。所以该商业区最大反馈的有功功率为 20MW，按照平均 SOC=0.6，一共能反馈 120MWH 的电能，即事故支撑能力 $=120\text{MWH}$ 。
5. 无序充电模式下，配电网经过改造，变压器的容量为 60MW，由于配电网的最大功率为 57.33MW，所以无序充电模式下，配电网的最大负载率为 $57.33/60=95.6\%$ ，而有序充电模式下，配电网的最大功率为 37.33MW，所以其最大负载率为 $37.33/60=62.2\%$ ，在有序充放电模式下，配电网的最大功率为 33.12MW，所以其最大负载率为 $33.12/60=55.2\%$ ，降低了 33.4%，可见“车-桩-网”互动模式能够有效的降低配电网的负载率。
6. “车-桩-网”互动模式下，当外部电网发生故障时，电动汽车可以运行在 V2G 模式下向负荷供电，减少负荷停电。该区域配电网的最大放电容量为 20MW，最大放电容量与配电网基础负荷的比值为 $20/40=0.5$ ，可见当外部电网发生故障的时候，电动汽车作为电源向配电网其他负荷供电，能够减小配电网 50% 的停电功率。
7. 负荷标准差越大，电网调频负担越大，容易造成频率波动以及电压波动，影响电能质量，通过负荷标准差可以反映配电网的供电质量。在无序充电模式下，区域配电网负荷的标准差为 10.28MW。有序充电模式下，负荷标准差为 0.96MW，减小了 9.32MW，相比无序充电模式负荷的波动大大减小，增强了配电网的电能质量。
8. 无序充电模式下，由于电动汽车充电需求与光伏功率不匹配，无法实现光伏就地消纳，出现了 28.41MWh 的弃光电量，弃光比例为 18.71%。有序充电模式下，电动汽车充电功率能够追踪光伏功率的波动，能有效的消纳光伏，弃风电量仅为 0.31MWh，弃风比例为 0.2%。可以看出，“车-桩-网”互动模式下，促进可再生能源消纳量 $=28.41\text{MWh}-0.31\text{MWh}=28.10\text{MWh}$ 。
9. 无序充电模式下，电动汽车就地消纳的光伏为 123.41MWh，占总负荷功率的比例为 $123.41/946.67=13.04\%$ ，有序充电模式下，电动汽车消纳的光伏为 151.51MWh，占总负荷功率的比例为 $151.51/946.67=16\%$ 。“车-桩-网”互动模式下，配电网中新能源的占比提高了 2.96%，这部分电能表示的是清洁能源代替火电的比例，体现出了配电网的节能减排效益。

6.4 案例效益汇总

表 6-1 案例效益汇总

二级指标	住宅公寓分散式充电桩			商业场所分散式充电桩			城市集中式充电站		
	无序充电	有序充电	改进量	无序充电	有序充电	改进量	无序充电	有序充电	改进量
配电网扩容 容量减少量 (KVA)	3966.67	833.33	3133.34	4200	2540.7	1659.3	17330	0	17330
节约配电网 建设成本 (万元)	50	15	35	57.5	40	17.5	200	0	200
提高存量电 网资源利用 率	0.5	0.838	0.338	0.47	0.599	0.1273	0.552	0.83	0.18
事故支撑 能力(MWh)	0	60	60	0	60	60	0	120	120
降低配网最 大负载率	0.996	0.578	0.418	0.96	0.755	0.2074	0.956	0.62	0.33
对供电可靠 性的贡献	0	1.2	1.2	0	1.2	1.2	0	0.5	0.5
对调峰能力 的贡献(kW)	1708.2	705.5	1002.7	2210.9	1795.1	415.8	10280	960	9320
可再生能源 消纳能力 (kWh)	0	47667	47667	0	25317	25317	28410	310	2810
提高节能减 排效益	0	0.503	0.503	0	0.267	0.2669	0.13	0.16	0.03

7 结论和建议

7.1 结论

当前环境下，各国都十分重视电动汽车的发展，未来电动汽车的保有量会逐年快速增长，电动汽车充电基础设施也在不断完善，与电动汽车充电设施运营平台日趋成熟。当前技术水平已经能够实现电动汽车快速充电，未来电动汽车技术能够支持“车-桩-网”互动的发展。

- (1) “车-桩-网”互动能够发挥电动汽车移动储能特性，实现削峰填谷，消纳新能源，减少对配电网供电服务、增容改造的影响，实现经济、社会、环境效益。
- (2) “车-桩-网”互动依据发展阶段分为五种典型模式。“车-桩-网”互动可以分为价格引导模式、本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式共五种互动模式。
- (3) “车-桩-网”互动对配电网负荷特性、需求侧资源发展、电网规划建设、电网调度运行和供电服务具有重要影响。“车-桩-网”互动对负荷特性有明显影响，可以显著降低对电网最大负荷的影响。“车-桩-网”互动促进需求侧资源的协调运行，最大程度消纳新能源。“车-桩-网”的互动降低配电网建设改造成本。“车-桩-网”的互动增大了电网灵活性调节能力。“车-桩-网”互动模式能够提高配电网的管理效率，丰富电网的服务模式。

总之，“车-桩-网”互动模式能够提高配电网的经济性、安全稳定性和环境友好性，为发展“车-桩-网”互动提供重要论证支撑。

7.2 建议

- (1) 加快突破电动汽车与电网互动关键技术。加大投入研发可控充放电桩，提高充电基础设施智能化水平，使得充放电电流能够精细化控制。
- (2) 科学合理建设改造配电网。充分考虑电动汽车互动对配电网的影响，优化“车-桩-网”互动模式下配电网的规划建设。
- (3) 推动政府制定相应的激励政策。推动出台政策来激励电动汽车用户参与“车-桩-网”互动，加快完善车联网平台，加强对电动汽车用户的管理。
- (4) 加快建设电力市场。加快建立“车-桩-网”互动下电动汽车集群参与电网辅助服务的市场机制。
- (5) 探索“车-桩-网”互动商业模式。探索合理的商业模式使得参与“车-桩-网”互动的各主体共赢，保证“车-桩-网”互联持续健康发展。
- (6) 优化电动汽车充电控制模式。推动形成本地优化的智能充电模式、全网优化的智能充电模式、本地优化的智能充放电模式、全网优化的智能充放电模式。

8 下一步研究方向

(1) 动力电池梯次利用政策机制、市场评估模型及商业模式评价研究。

动力电池梯次利用政策机制研究。动力电池梯次利用安全质量标准、废旧电池回收处理责任体系。梯次利用项目的建设补贴、减税等激励政策机制研究。动力电池梯次利用的价格机制政策研究。

动力电池梯次利用市场评估模型研究。动力电池梯次利用规模评估；动力电池梯次利用价值研究；动力电池梯次利用应用场景研究。

动力电池梯次利用商业模式评价研究。动力电池梯次利用项目的投资运营的模式；动力电池梯次利用项目的盈利模式；动力电池梯次利用的利益分配；动力电池梯次利用项目投资回收测算和盈亏平衡分析，以及政策敏感性分析。

(2) 研究燃料电池汽车发展前景及其对配电网形态的影响。

研究氢能产业的发展现状与前景。从氢能产业链的制氢、储运氢、用氢等环节研究发展现状与前景。

提出氢能产业发展的政策机制建议。氢能作为国家战略性新兴产业的重要组成部分，研究加快推动氢能开发和产业应用的政策机制。

研究氢燃料电池汽车发展的前景。考虑发展阶段、技术成熟、成本趋势等因素，研究氢燃料电池汽车的发展前景。

研究氢燃料电池汽车发展对能源系统和电网形态影响。研究燃料电池汽车对能源系统、充电设施建设运营以及配电网形态的影响。

参考资料

- [1] 冯国峥. 北京地区电动汽车发展预测与电力电网应对措施 [D]. 华北电力大学 (北京), 2011.
- [2] 陈昊. 车用替代能源综合评价与发展策略 [J]. 中国能源, 2013, 01: 31-36+43.
- [3] 刘雪. 纯电动汽车、混合动力汽车及燃油汽车市场规模的动态模拟 [D]. 上海理工大学, 2014.
- [4] 川野大輔, 孔莉. 日本汽车行业发展动态 [J]. 国外内燃机, 2015, 06: 9-12.
- [5] 孙田田, 王林, 郭巧巧, 王鑫国. 纯电动汽车与氢燃料电池汽车发展现状及前景 [J]. 科技视界, 2016, 04: 163-164.
- [6] 尹力卉, 左晨旭. 新能源汽车的分类、发展历程及前景 (三) [J]. 汽车维修与保养, 2016, 02: 104-106.
- [7] 蔡仲旺, 王广凤. 我国电动汽车产业现状与发展策略研究 [J]. 现代经济信息, 2016, 01: 351-352.
- [8] 王哲. 国内外新能源汽车发展现状及趋势 [J]. 交通与港航, 2015, 06: 13-14.
- [9] 戴咏夏, 刘敏. 电动汽车充电设施接入对配套电网建设的影响 [J]. 电力建设, 2015, 07: 89-93.
- [10] 孙晓菲. 电动汽车规模化发展对电网企业运营的影响研究 [D]. 华北电力大学, 2013.
- [11] 张乐平, 张明明, 林伟斌. 电动汽车与电网统一互动架构设计与探讨 [J]. 现代电力, 2014, 01: 34-39.
- [12] 罗晓梅, 黄鲁成. 燃油汽车与纯电动车能源足迹实证研究 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2014, 09: 84-90.
- [13] 许晓慧, 陈丽娟, 张浩, 丁孝华. 规模化电动汽车与电网互动的方案设想 [J]. 江苏电机工程, 2012, 02: 53-55+58.
- [14] 苗轶群. 含电动汽车及换电站的微网优化调度研究 [D]. 浙江大学, 2012.
- [15] 吴耀文. 三级电网体系结构智能规划的若干关键问题研究 [D]. 武汉大学, 2012.
- [16] 吴万禄. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划 [D]. 上海电力学院, 2014.
- [17] 姚伟锋. 考虑电动汽车广泛接入的电力系统规划与运行策略 [D]. 浙江大学, 2014.
- [18] 王力成. 考虑光伏与电动汽车充电功率不确定性的配电网调度方法研究 [D]. 浙江大学, 2015.
- [19] 张文忠, 王岱, 余建辉. 资源型城市接续替代产业发展路径与模式研究 [J]. 中国科学院院刊, 2011, 02: 134-141.
- [20] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高. 中国乘用车与商用车保有量预测 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2011, 06: 868-872.

- [21] 龚利全, 赵维霞, 史炜, 何涛. 新能源汽车发展潜力分析 [A]. 四川省汽车工程学会、成都市汽车工程学会. 四川省第十二届汽车学术年会论文集 [C]. 四川省汽车工程学会、成都市汽车工程学会., 2015:12.
- [22] Electricity Information. International Energy Agency. 2015.
- [23] Energy Technology Perspectives 2012. International Energy Agency, 2012.
- [24] EU Transport GHG: Routes to 2050 II. 2012.
- [25] Global EV Outlook 2016. International Energy Agency, 2016.
- [26] Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change & Call to Action. Lima-Paris Action Agenda, 2015.
- [27] 节能与新能源汽车产业发展规划 (2012-2020). 国务院, 2012, 07.
- [28] 关于扩大混合动力城市公交客车示范推广范围有关工作的通知. 四部委, 2012, 08.
- [29] IHS: Global Hydrogen Fuel Cell Vehicle Market To Exceed 70,000 by 2027. <http://insideevs.com/compare-plug-ins/>.
- [30] Some EV History – History of Electric Cars and other Vehicles. [2009-11-13] <http://www.econogics.com/ev/evhistory.htm>.
- [31] How Henry Ford And Thomas Edison Killed The Electric Car. <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/how-henry-ford-and-thomas-edison-killed-the-electric-car.4169/>.
- [32] Pecas Lopes J A, Soares F J, Rocha Almeida P M. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1):168-183.
- [33] National Research Council. Overcoming Barriers to Electric-Vehicle Deployment. Washington D.C. : National Research Council, 2013.
- [34] 刘坚. 电动汽车与能源互联网的融合发展. 中国电力企业管理, 2016, 2: 22-25.
- [35] 陈昕儒, 林祥逸, 吴奇珂. 计及用户行为的电动汽车负荷预测 [J]. 电工技术, 2017(1):129-130.
- [36] 陈桂枝. 基于交通行为的城市电动汽车充电网络规划与运营研究 [J]. 中国科技纵横, 2016(18).
- [37] 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的探讨与建议 [J]. 中国电力企业管理, 2016(3):51-55.
- [38] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述 [J]. 电网技术, 2011, 127-131.

联系我们

自然资源保护协会 (NRDC)
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编: 100026
电话: +86-10-5927 0688