

智能电网 关键技术研究与应用丛书

V2G技术： 电动汽车接入智能电网

Vehicle-to-Grid:
Linking Electric Vehicles
to the Smart Grid

[澳] 鲁君伟 (Junwei Lu) 等著
贾汗吉·侯赛因 (Jahangir Hossain)
李建林 马会萌 谢志佳 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



智能电网关键技术研究与应用丛书

V2G 技术：电动汽车 接入智能电网

Vehicle-to-Grid: Linking Electric
Vehicles to the Smart Grid

[澳] 鲁君伟 (Junwei Lu) 等著
贾汗吉·侯赛因 (Jahangir Hossain)
李建林 马会萌 谢志佳 徐少华 译
汪免伶 李 蓓 程 伟



机械工业出版社

未来规模化的电动汽车充放电将给电网的运行带来深远的影响和挑战,本书针对插电式电动汽车在智能电网中的应用情况、插电式电动汽车和V2G技术对智能电网和可再生能源系统的影响、与电动汽车相关的功率转换技术和监控技术、电动汽车应用对智能电网带来的经济、社会及环境影响等方面展开了介绍。本书可供从事电动汽车、智能电网、储能技术应用等领域相关研究人员参考使用,也可供高等院校广大师生借鉴参考。

Vehicle-to-Grid: Linking Electric Vehicles to the Smart Grid/ by Jenwei Lu and Jahangir Hossain/ISBN: 978-1849198554

Original English Language Edition published by The IET.

Copyright © The Institution of Engineering and Technology 2015

All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from the IET. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 IET 授权机械工业出版社在中国境内地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-8646 号。

图书在版编目(CIP)数据

V2G 技术:电动汽车接入智能电网/(澳)鲁君伟等著;
李建林等译. —北京:机械工业出版社, 2018. 1
(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: Vehicle-to-Grid: Linking Electric Vehicles to the
Smart Grid

ISBN 978-7-111-58796-5

I. ①V… II. ①鲁… ②李… III. ①电动汽车-电力
系统-研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 320241 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:阎洪庆

责任校对:张征 封面设计:鞠杨 责任印制:孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14 印张·277 千字

0001—3500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-58796-5

定价:69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

电动汽车不仅是一种新型的交通工具，同时也是一个个“分散式”储能单元，在能源互联网中起到能量缓冲作用，可从时序上有效调节电力系统的供需平衡。除电动汽车关心的续航里程、安全运营、消防施救以及碳资产交易外，将车、桩、停进行一体化统筹设计、规划，接入省市级统一调度、管理平台，发挥一个个“分散式”储能系统的汇聚效应，让电动汽车这些零散的储能单元，参与电网互动，将带来更大的价值。

近年来，电动汽车产业蓬勃发展，截至目前，我国新能源汽车保有量达百万辆，随着电动汽车保有量的增加，区域配电网中将存在大量处于停驶状态的电动汽车。未来规模化的电动汽车充放电将给电网的运行带来机遇和挑战，新能源接入、电力系统安全经济运行与电动汽车充放电三者之间的相互作用和关系，是新能源电网和电动汽车发展面临的重要问题。

本书对电动汽车技术、V2G技术和电动汽车对智能电网的影响等内容进行了介绍，主要包括插电式电动汽车在智能电网中的应用情况、插电式电动汽车和V2G技术对智能电网和可再生能源系统的影响、与电动汽车相关的功率转换技术和监控技术、电动汽车应用对智能电网带来的经济、社会及环境影响等。本书既适合作广大读者的科普读物，又适用于高等院校的教学。

本书得到了国家重点研发计划项目（2017YFB0903504）、国家电网公司科技项目（DG71-17-003）、国家自然科学基金（51777197）和中国电力科学研究院专著出版基金的大力资助，在此深表谢意。中国电力科学研究院的修晓青、靳文涛、房凯等同志在本书的翻译过程中提供了诸多帮助并提出宝贵意见，机械工业出版社的付承桂和诸多同志也为出版本书付出了辛勤的努力，在此表示诚挚的感谢。

电动汽车及V2G技术涉及多学科、多领域的专业知识，尽管译者竭力求实，但受到水平和专业领域所限，本书难免存在错误和不妥之处，恳请读者不吝赐正。

译者

于中国电力科学研究院有限公司

原书前言

随着可再生能源资源（RES）的普及和现代交通的电气化整合，电力系统正经历着重大的变革。环境合规性和节能性的需求，是未来非常重要的一个问题。处理基础设施老化问题，以提高电网的可靠性，同时应该提高运营效率和客户服务水平。正在发生的变化对于配电网来说非常重要，其伴随机电元件的“盲动”和手动操作，都需要转化融入智能电网。智能电网被视为下一代电网，采用双向电能流和信息流来建立分布广泛的自动化能源输送网络。为适应更大的需求响应，智能电网需要满足环保要求，还将支持接入插电式电动汽车，包括纯电动车和插电式混合动力电动汽车，以及分布式电源和储能设备。很明显，这些需求和变化，是目前电力行业面临的巨大挑战。插电式电动汽车在电力系统中发挥着重要的作用。电动汽车的接入会给未来智能电网带来重要影响，电动汽车不仅通过从电网吸收能量来降低燃油消耗，也可以作为储能装置向电网提供能量。如果电动汽车具备 V2G 功能，其与电网间的电能是可双向流动的，这既可以作为柔性负载（充电模式），也可作为储能设备（放电模式）。为了最大限度地发挥 V2G 的优点，新建的电动汽车基础设施必须接入智能电网，以满足驾驶者的期望，并确保安全性。

本书涵盖了 V2G 技术和智能电网概念，对电动汽车、电池充电技术和基础设施相关内容进行了具体深入的研究，也探讨了 V2G 对智能电网和可再生能源系统的影响。第 1 章对插电式电动汽车在智能电网中的应用进行了简要的介绍，第 2 章讨论了插电式电动汽车和 V2G 技术对智能电网和可再生能源系统的影响，第 3 章探讨了智能电网中的分布式能源与插电式电动汽车的电池储能，第 4 章探讨了智能电网及电动汽车中的功率转换技术，第 5 章讲述了含电动汽车的智能电网的功率监控技术，第 6 章介绍了配网层的电动汽车充电技术和 V2G 技术及应用接口，第 7 章描述了电动汽车应用给智能电网带来的经济、社会和环境方面的影响。

目录

译者序

原书前言

第1章 插电式电动汽车在智能电网中的应用介绍 1

摘要	1
1.1 引言	1
1.2 智能电网和微网	2
1.3 智能电网中插电式电动汽车对分布式能源的影响	3
1.4 V2G 技术和插电式电动汽车充电基础设施	5
参考文献	7

第2章 电动汽车和 V2G 对智能电网和可再生能源系统的影响 9

摘要	9
2.1 引言	9
2.2 电动汽车类型	10
2.3 机动车保有量和电动汽车变化量	15
2.4 预测电动汽车对电网的影响	21
2.5 对驾驶者和智能电网的影响	25
2.6 标准化和即插即用	27
2.6.1 IEC 61850 通信标准及其扩展标准 IEC 61850-7-420	28
2.6.2 电动汽车建模的 IEC 61850 扩展标准	28
2.7 结论	33

参考文献	33
------	----

第3章

智能电网中的分布式能源与插电式电动汽车 中的电池储能	37
-------------------------------	----

摘要	37
3.1 引言	37
3.2 分布式能源	38
3.2.1 太阳能	38
3.2.2 风能	41
3.2.3 燃料电池	44
3.2.4 电动汽车	45
3.2.5 备用电源	47
3.2.6 光伏在微网中的 MPPT 策略	48
3.3 智能电网和微网	49
3.3.1 微网拓扑	51
3.3.2 微网控制策略	54
3.3.3 仿真结果与讨论	57
3.3.4 实验结果与讨论	60
3.4 结论	62
参考文献	63

第4章

智能电网及电动汽车中的功率转换技术	68
-------------------	----

摘要	68
4.1 引言	68
4.2 电动汽车的动态模型	70
4.2.1 接入智能电网单相节点的电动汽车系统动态 建模	71
4.2.2 接入智能电网三相节点的电动汽车系统动态 建模	73
4.3 带有电动汽车的智能电网的功率转换问题	74
4.4 反馈线性化及含有电动汽车的智能电网系统的 反馈线性化	75
4.4.1 反馈线性化综述	75
4.4.2 含有电动汽车的智能电网的反馈线性化特性	76
4.4.3 含有电动汽车的智能电网的微分反馈线性化	76

4.5 含有电动汽车的智能电网的分布式控制器设计	77
4.6 性能评测	78
4.6.1 电动汽车充电过程中的控制效果评估	81
4.6.2 电动汽车放电过程中的控制效果评估	82
4.7 结论	84
附录 A 李导数及相对次数定义	84
附录 B 含有电动汽车的智能电网中内部动态参数的 稳定性	85
附录 C 系统参数	86
参考文献	86

第 5 章 含电动汽车的智能电网功率控制与监测

摘要	90
5.1 引言	90
5.2 电动汽车渗透率对电网功率分布的影响及其控制和 监测要求	91
5.2.1 电压和频率调节	92
5.2.2 间歇性可再生能源智能电网的支撑与平衡	92
5.2.3 通过“智能充电/放电”控制和监测	93
5.3 混合动力电动汽车动力总成结构	95
5.4 工业应用中的控制、监测和管理策略	97
5.4.1 电动汽车感应电动机 (IM) 控制	97
5.4.2 电动汽车电池管理和监测要求	98
5.4.3 电动汽车电池管理技术	100
5.4.4 电动汽车电池容量监测技术	103
5.5 V2G 通信系统	107
5.6 系统模型	109
5.6.1 风电机组建模	109
5.6.2 光伏系统建模	110
5.6.3 电动汽车储能系统 (EV-ESS) 建模	113
5.7 问题公式化及控制策略	117
5.8 仿真结果	119
5.8.1 严重三相故障	120
5.8.2 计划性孤岛	120
5.9 结论	125
参考文献	125

第 6 章

在配电网层的 PEV 充电技术和 V2G 技术及应用接口 131

摘要	131
6.1 引言	131
6.1.1 概述	131
6.1.2 V2G 概念介绍及 PEV 通信要求	136
6.1.3 分布式发电和智能电网	138
6.1.4 充电形式和实用性接口	140
6.1.5 本地、集中式和分布式发电	141
6.2 现行 PEV 充电标准	142
6.2.1 插座类型	143
6.3 接触型 PEV 充电	145
6.3.1 G2V 技术的整流器拓扑结构	145
6.3.2 V2G 的逆变器拓扑结构	146
6.3.3 DC/DC 变流器	148
6.3.4 具有 STATCOM 能力的全桥变流器	149
6.3.5 内置 STATCOM	150
6.3.6 PEV 车载充电系统设计	151
6.4 微网中充电站的智能变压器	152
6.5 接触式充电安全注意事项	154
6.5.1 交流充电	154
6.5.2 直流充电	154
6.6 PEV 的无线充电系统	155
6.6.1 无线电力的特性	155
6.6.2 无线电力传输方法	157
6.6.3 PEV 的无线充电系统标准	168
6.6.4 PEV 的无线充电系统应用	170
6.6.5 无线充电的安全性考虑	173
6.7 结论	176
参考文献	177

第 7 章

PHEV 在智能电网中的经济、社会和环境的影响 189

摘要	189
7.1 引言	190
7.2 经济层面	190

7.2.1 电动汽车智能充电	192
7.2.2 作为分布式能源的 PHEV	195
7.3 社会层面	198
7.3.1 便利性	198
7.3.2 不确定性、信任和公平	199
7.3.3 安全顾虑	199
7.3.4 公共认知和克服变革阻力	200
7.4 环境层面	200
7.4.1 PHEV 的全寿命周期评估和与其他汽车技术的 对比	201
7.4.2 环境影响的对比评估	202
7.4.3 与汽车电池和电动机相关的全球金属储量、产量和 价格数据	203
7.5 发展 PHEV 调度系统的一般方法	206
7.5.1 简介	206
7.5.2 开发负荷预测模型	208
7.5.3 初始调度	210
7.5.4 在线控制系统	211
7.6 结论	211
参考文献	212

第 1 章

插电式电动汽车在智能电网中的应用介绍

Junwei Lu, Jahangir Hossain

摘要

智能电网被视为下一代电网，利用其电力和信息双向流动的特点，可构建一个广泛分布且弹性自主的能量传递网络。在满足需求响应、支持插电式电动汽车、分布式发电和储能应用的同时，智能电网还需要符合环保要求。插电式电动汽车（包括纯电动汽车和混合电动汽车）将在电力系统中发挥重要作用。插电式电动汽车接入电网将对未来智能电网产生重要影响。插电式电动汽车既可通过使用电能而降低石油消耗，也可作为储能装置向电网提供电能。如果插电式电动汽车具备V2G功能，车辆和电网间的能量是可以双向流动的，在这种情况下，电动汽车可以是柔性负载（充电模式），也可以是储能装置（放电模式）。为更大限度地发挥V2G的优势，新建插电式电动汽车基础设施必须确保能够从电网充电，并能确保安全性，这也符合驾驶者的需求。本章介绍了智能电网的基本理念及其“组成单元”——微网，介绍了插电式电动汽车对智能电网中分布式能源的影响、V2G技术和插电式充电基础设施。

1.1 引言

插电式电动汽车包括纯电动汽车和混合动力汽车，其可以通过使用电能来降低石油消耗，这是低碳出行的核心理念，但对未来电网性能和负荷需求也影响重大。为了迎合这一新兴发展趋势，无论在电网还是插电式电动汽车相关充电基础设施领域，电力公司和企业投资者都需要长期参与投入。随着应用的普及，插电式电动汽车对未来智能电网和负荷需求将产生重大影响。作为新型电力负荷，为

了使插电式电动汽车在峰荷时段需求最小，需要对其严格管理。智能电网、微网技术与 V2G 的结合将使插电式电动汽车可作为分布式储能装置，给电池充电，并在电网需要电力时输出电能。插电式电动汽车在微网和智能电网中的应用能够提供监管服务、旋转备用和削峰能力，从而提高电力系统收益。但插电式电动汽车的充电基础设施和电池技术在发展中面临着各种各样的技术、环境和经济方面的障碍，克服这些障碍对未来 V2G 的应用至关重要，也将对未来电网和负荷需求产生很大的影响。本章对插电式电动汽车在智能电网中的应用进行了简要的介绍，并阐述了与本书相关的一些基本信息，后续各章将分别针对各主题的技术细节进行讨论。

1.2 智能电网和微网

智能电网采用先进的信息和通信技术，通过输电系统输送至电力用户，结合日益增长的分布式发电和储能资源，来提高大电网的可靠性、安全性和高效性。智能电网的愿景是实现低压电网，并让用户参与到智能电表和智能家庭等电力系统的运作中。《智能电网——技术与应用》一书中对智能电网的定义和运行进行了阐述^[1-2]。智能电网有多种不同的类型，均采用了包括硬件和软件在内的信息和通信技术，智能电网倡导整合插电式电动汽车，插电式电动汽车将提高智能电网的效益。

美国能源部（DOE）定义微网为“作为与电网相关的单一可控的实体，在明确的电气边界内，一组相互关联的负载和分布式能源控制器。微网可以和电网连接或断开，使其可在并网模式和孤岛模式运行”^[3]。微网是“智能电网的组成单元”，包含一些基本的操作技术，有分布式发电、分布式储能、互连开关和控制系统，如图 1.1 所示。分布式发电是位于或靠近负荷的小型能源，分布式发电技术传统意义上包括光伏（PV）、风能、燃料电池、微型燃气轮机、往复式内燃机与发电机。分布式储能（DS）技术在发电和负荷不完全匹配的微网中应用。互联开关是微网和其他配电系统或智能电网间的连接点。微网控制系统的设计需保证微网在并网和离网模式下能安全运行。

微网是包含分布式能源和负荷的电力系统，具备从大电网和当地电网并网和离网的能力，微网也可以是地区电网规划的一部分。微网的运行模式一般包括并网模式、并网转孤岛模式、孤岛模式和重新并网模式。微网标准是指在设备和配电系统中的计划性孤岛，包含至少一个分布式能源和相关负载，将更容易满足 IEEE 1547 系列标准中的电能质量要求^[4]。IEEE 1547.4 涵盖微网规划和操作的关键因素，有电压、频率、电能质量、含单个和多个的公共连接点、保护策略和限制、监控、信息交互与控制、负载和用户需求协议、知悉分布式能源的特性、确定稳态和暂态状

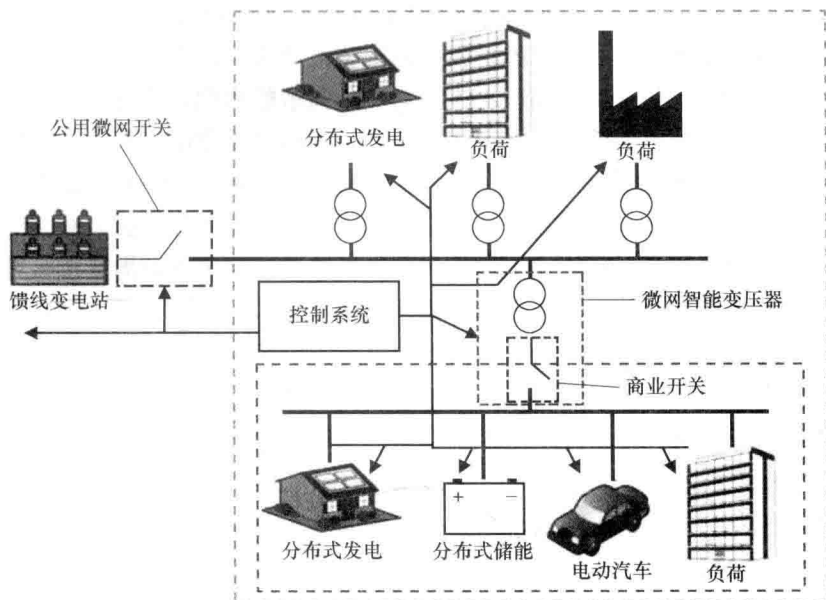


图 1.1 IEEE 1547 标准中介绍的微网基本概念

况、设备间的相互作用、备用差、分级卸载、需求响应、冷负荷启动、附加设备的要求、逆变器相关的附加功能。

1.3 智能电网中插电式电动汽车对分布式能源的影响

配电和负荷需求管理技术需利用信息交互技术和分布式控制系统，来促进插电式电动汽车和电力负荷一体化以降低成本。插电式电动汽车对智能电网需求响应的影响已从负荷跟踪扩展到负荷调整策略^[2]，因此，插电式电动汽车能作为分布式储能设备使用，在电池中存储电能，当电网需要时向电网输送电能。V2G 技术通过提供监管服务、旋转备用和调峰能力可有效降低电能成本。智能电网和微网技术使插电式电动汽车、充电负荷得以切换到非高峰时段，从而平抑日负荷曲线，能够显著降低发电机和电网投资需求。以这种方式，插电式电动汽车能从智能电网获益并促进投资。但是，在发展过程中仍有很多的技术、实践和经济障碍，如电池放电效率低和存储容量有限等，都对未来 V2G 技术供求有深远影响^[5]。

使用可再生能源的插电式电动汽车与清洁电力发电相整合，如太阳能光伏发电和风力发电，在清洁能源输出方面具有很大的潜力。现在，约 12% 的电力来自可再生能源，但风能和太阳能的可变性或许会带来运营挑战^[6]。V2G 技术使得车载电池储能能够平衡间歇性可再生能源、提升电网稳定性、和/或降低高峰时段电网

的电力需求。V2G 技术、电网和其他基础设施将减少未来交通系统的化石燃料使用和温室气体的排放，同时也解决了电网需求和电动汽车消费者的接纳问题。还有一个值得关注的问题是全民应用电动汽车对电力需求的影响，主要是因为由煤和天然气发电机组供能的公用基础设施满足日益增长的电力需求能力是有限的，所以电动汽车的快速应用普及对电网容量和智能电网技术的需求和投资将会产生重大影响。由于轻型车辆的快速普及，电动汽车将占有大部分耗电量，甚至将成为高峰负荷。随着消费越来越高，从智能电网技术获益也越多，需提升电力系统管理负荷的能力，即尽量安排电动汽车在非峰值时段充电^[7-10]。

插电式电动汽车的电池并网对微网和未来智能电网的影响巨大。电动汽车的功率流动可以是双向的，如车辆可作为柔性负载（充电）或储能设备（放电），该双向过程必须是可控的，以实现更经济的和最优的电网控制。如图 1.2 所示，与微网相连接的电动汽车更具优势，有助于系统运行优化，使得可再生能源系统高效渗透，同时可平滑负荷曲线。微网包括低压配电系统、分布式能源、储能设备和可控负荷，通过连接到电网或孤岛以控制、协调方式进行操控。在电网中，插电式电动汽车的不可控并网增加了峰值需求，这会产生技术经济问题。鉴于电动汽车的车载电池是微网的可控元件，充放电（V2G 过程）可以采用最佳方式执行。这是因为电动汽车的电池管理可用来实现平衡微网中的发电负荷、孤岛运行、黑启动和功率调节。电动汽车作为储能装置和柔性负荷，在微网中或在带有分布式发电机的商业

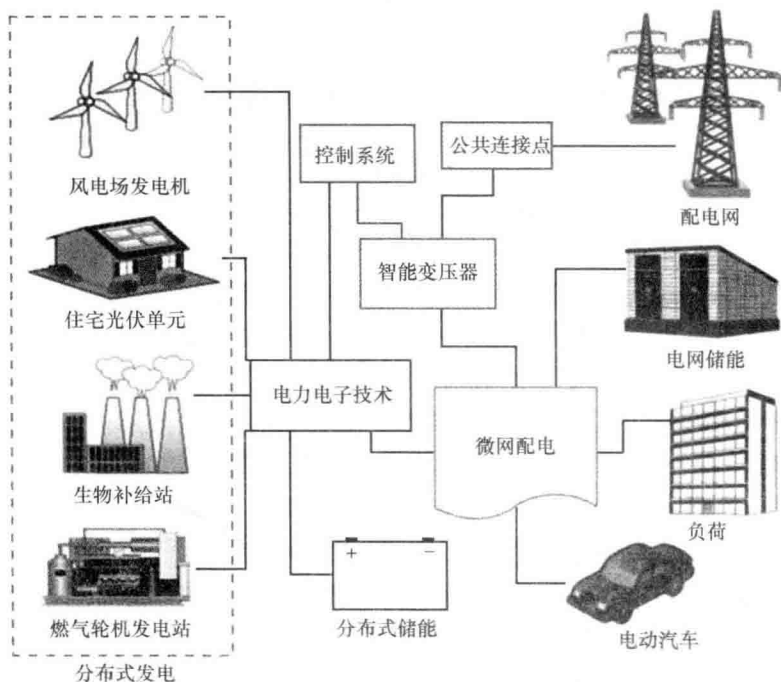


图 1.2 插电式电动汽车在微网中产生的影响

建筑中,能有效利用可再生能源的高产出和低负荷需求。除了技术和经济效益,电动汽车充电过程使用的是二氧化碳排放量很低的能源,降低了电动汽车的二氧化碳排放量,因此这种应用模式很环保。有些电动汽车接入住宅区的低压电网,或停车场的大量电动汽车接入配电侧馈线,都可能造成配电网或变压器的局部过载。一些配电网在接近其自身运行极限状态下运行,局部负载可能使其超过运行极限警报线。此外,这些负荷造成的潜在不平衡状态会使得主馈线或其他分支产生问题,因此,负荷预测和调度将在微网和未来含 V2G 的智能电网中发挥重要作用。车辆因 V2G 技术变成了宝贵资源,节约能源并减少了二氧化碳排放量。如图 1.3 所示,如果可以提高正午高峰时段太阳能的可利用性,将会更好地为电动汽车供电,同时,插电式电动汽车可在谷荷时段存储光伏能源。在第 2、3、4、5 和 7 章,将更详细地研究峰值需求管理。

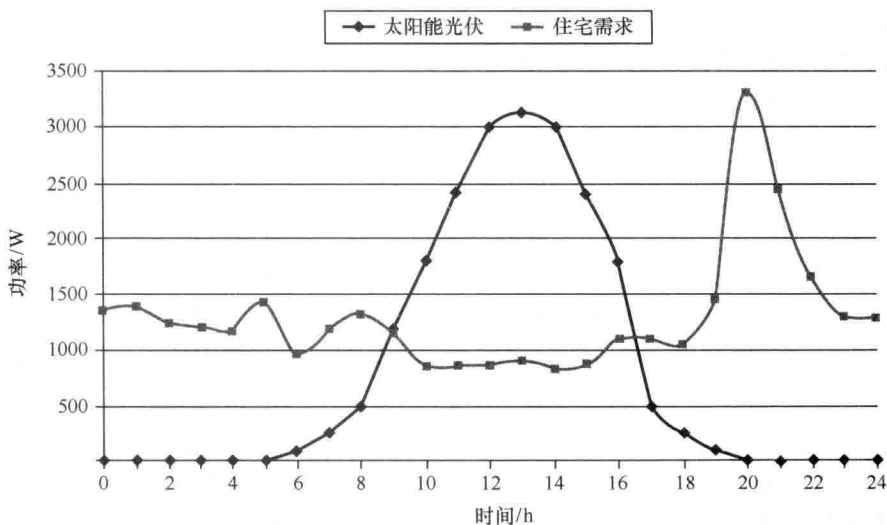


图 1.3 提高正午高峰时段的太阳能可利用性,将会更好地为电动汽车供电

1.4 V2G 技术和插电式电动汽车充电基础设施

近年来,由于环保问题和日益升高的化石燃料价格,插电式电动汽车的应用一直在显著增长。车辆在 G2V 模式中作为负荷和在 V2G 模式中作为电源时,具有双重动态特性。经过精心设计,具有四象限拓扑的 V2G 新概念能够提高公用电网的性能效率,通过提供无功功率支撑、有功功率调节和跟踪各种可再生能源资源来提高电网运行的稳定性,通过削峰填谷和电流谐波滤波来维持负荷平衡^[11-12]。功率因数校正(PFC)单向充电器只从电网向汽车电池充电,控制输入功率因数与电网一致,换

句话说，它们并不是用来和电网交换无功功率的。现在，市场上的大部分插电式电动汽车用的都是这种充电器，鉴于其局限性，在无功功率运行方面它们不如其他类型的拓扑结构有前途。四象限的拓扑结构适用于无功功率补偿，该项目的第二个创新是对 V2G 系统的四象限节能充电系统商业化设计，这将提高系统电压稳定性。

插电式电动汽车通过从电网充电的方式降低了石油消耗，为更大限度地发挥电动汽车的优势，新建电动汽车的基础设施必须能利用可再生能源，以满足驾驶者的期望，并确保安全性。插电式电动汽车在减排和降低运输成本方面已展现了广阔的前景。虽然电动汽车大规模应用还需再过几年时间，但是电力公司、汽车公司都热切期待着有机会可以降低排放量和汽油消耗、创造新服务并增加税收、开拓新的市场以提升就业。这对电力公司的影响尤其明显，如交通运输市场的电气化可使其收入大幅增长。对消费者来说，与传统燃油汽车相比，电动汽车将大大降低运营成本。电动汽车将带来经济和环境效益，此外还可作为储能设备，这对微网和未来智能电网将会产生重要影响。有文献已研究了一些拓扑结构和控制方法，包括使用电动汽车双向充电器进行无功功率补偿，这使得电动汽车可以作为一种分布式能源进行双向功率传输^[13-16]。

电动汽车充电设施是微网和未来智能电网的重要组成部分，包括物理充电设施（连接器和仪表）、计费、调度、非高峰时段智能充电或低需求时段光伏电能存储的其他智能化功能。随着电动汽车占总用电负荷比重的增长，电网需整合其他资产以提升容量来提供电力系统辅助服务功能（备用发电容量和削峰设备）、潜在性的功率硬件和软件，使电动汽车电池可用作储能装置。这一技术的其他三项功能也很有前景：智能充电、V2G 通信和快速充电。自动化智能充电系统利用电网频率、电压、可再生能源发电的电力供应和定价信息来确定发送至电动汽车电力的时间和数量^[5]。V2G 通信配合智能充电功能使电动汽车能够向电网反馈电能。双向车载充电系统使电动汽车能够平衡间歇性可再生能源的弹性出力、供应应急备用电源，并能作为并网储能装置。电动汽车充电变得越来越方便和低成本，这也是很多人选择买电动汽车的原因。无线电力传输让 V2G 通信有了更进一步的发展，虽然电动汽车用户可以在家或工作时为车辆充电，一旦上路，充电站却不能满足需求。表 1.1 给出了拥有四象限拓扑的双向车载充电系统可用的不同充电系统。第 6 章对插电式电动汽车充电设施进行了详细的研究。

表 1.1 插电式电动汽车各种充电系统的比较

充电基础设施	充电等级		直流充电	V2G 功能	四象限 拓扑结构
	单相	三相			
插电式电动汽车 车载充电系统	水平 1 水平 2 家用充电	水平 2 家用/工业/ 公共充电	不适用	带有隔离变压器且应用双向 DC/DC 变流器的 V2G	是

(续)

充电基础设施	充电等级		直流充电	V2G 功能	四象限 拓扑结构
	单相	三相			
常规充电站 (仅直流)	不适用	水平 2 家用/工业/ 公共充电	水平 3 公用快充	不适用	不适用
以智能变压器为基础的充电站 (直流和交流)	不适用	水平 2/水平 3 工业/公共充电	水平 3 公共快充	带有隔离变压器且应用内置双向 DC/DC 变流器的 V2G	是
应用内置电动机驱动系统的三相充电 (DC/AC 逆变器)	不适用	水平 2/水平 3 工业/公共充电 车载快充	不适用	应用插电式电动汽车内置双向 DC/AC 电动机驱动逆变器的 V2G	是
无线充电站和插电式电动汽车车载无线充电系统	水平 1 水平 2 家用充电	水平 2 家用/工业/ 公共充电	不适用	应用双向 DC/DC 变流器的 V2G	是

参 考 文 献

- [1] J. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, and N. Jenkins, *Smart Grid – Technology and Application*, Singapore: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Trevor MORGAN, “Smart grids and electric vehicles: Made for each other?” Discussion Paper No. 2012-02, Menecon Consulting, United Kingdom (Further information about the International Transport Forum is available at www.internationaltransportforum.org).
- [3] Peter Asmus, “Why microgrids are moving into the mainstream,” *IEEE Electrification Magazine*, March, 2014.
- [4] IEEE Standards Coordinating Committee 21, “IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems,” IEEE Std 1547.4™-2011, July 20, 2011.
- [5] Qiuwei Wu (Editor), *Grid Integration of Electric Vehicles in Open Electricity Market*, Wiley, 2013.
- [6] C. Gearhart, J. Gonder, and T. Markel, “Connectivity and convergence,” *IEEE Electrification Magazine*, June, 2014.
- [7] F. Ahourai and M. A. Al Faruque, “Grid impact analysis of a residential microgrid under various EV penetration rates,” Technical Report 13-08, July 30, 2013.
- [8] Wencong Su, Habiballah Rahimi-Eichi, Wenteng Zeng, and Mo-Yuen Chow, “A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment,” *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, Vol. 8, No. 1, February 2012.