

学校编码: 10384
学 号: 32420131152288

分类号__密级__
UDC__

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于光伏并网的 V2G 系统研究与设计

Study and Design of V2G system based on
Grid-connected PV Power Generation

孙纯鹏

指导教师姓名: 张风燕 教授

专 业 名 称: 光 伏 工 程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩日期: 2016 年 5 月

2016 年 5 月

基于光伏并网的VSC系统研究与设计

孙纯鹏

指导教师

张风燕

教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

随着分布式可再生能源渗透率的不断提高,光伏等可再生能源接入电网的方式更加多样。同时近年来电动汽车飞速发展,解决充电问题已成为当务之急。在减少大规模充电对电网产生影响的同时,将电动汽车作为储能单元参与电网的调峰调频有利于电网的安全经济运行。本文研究基于光伏发电的 V2G 系统,旨在增加新能源消纳并促进电动汽车的清洁化和低碳化。系统的最大创新点在于实现了光伏发电并网、电动汽车充电与 V2G 服务的分时复用。

针对家庭单相并网选取了双向两级式的电路拓扑,不仅结构简单而且易于控制。对双向全桥电路和 Buck-Boost 电路设计了相互独立的控制系统,实现控制系统的完全解耦。提出基于直流母线电压信号的控制策略,实现两级变换器之间的功率平衡与能量的双向流动。结合小信号模型的传递函数,分别设计了充电、光伏并网和 V2G 模式下变换器的闭环控制器。

在此基础上介绍了基于 TMS320F28335 控制的软硬件设计过程,其中硬件设计包括功率器件的选型、采样电路以及外围电路的设计。软件设计介绍了控制软件设计方案,包括 DSP/BIOS 系统、控制系统的框架以及部分功能实现。

最后研制了一台 3.3kW 的样机进行了原理验证实验,仿真和实验结果证明了本文设计的正确性和有效性。

关键词: 光伏并网 电动汽车 双向变换器 V2G

Abstract

As the penetration of DRERs increasing, the access that renewable energy sources such as photovoltaic(PV) connected to grid is more diverse. At the same time, EVs developed rapidly in recent years, how to solve the problem of EV's charging become imperative. Reducing scale charging's impact to the power grid, the batteries on EVs as a distributed resource provide peak shaving and frequency regulation in favour of the power grid. The paper mainly studies the grid-connected photovoltaic system with V2G function, aims to increasing renewable consumption and promoting the cleaning and low carbonization of the electric vehicles. The innovation of the system is actualizing the time-sharing multiplex along grid-connected photovoltaic generation, EV charging and V2G service.

On the topology selection of the single-phase grid-connected system, the two stage bidirectional converter is simple and easy to control. The bidirectional AC/DC and Buck-Boost converters have independent control to realize the system completely decoupling. Proposed a scheme based on DC bus voltages sigh to realize power balancing and bidirectional power of the two stage bidirectional converter. Combined with the small signal model, the close loop of the two stage of converter is designed on three different working modes: grid-connected photovoltaic generation, EV charging and V2G service.

The whole control system is based on DSP28335 chip, hardware design procedure including topology selection, the choice of power devices, sample circuit and peripheral circuit. Software design includes the software control system framework, DSP/BIOS, control algorithm and some function realization.

At the end, a 3.3kW converter prototype was designed to verify the availability and effectiveness of the proposed system and control strategy.

Keywords: PV grid-connected; electric vehicle; bidirectional converter; V2G

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 课题背景及研究意义	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 V2G 技术研究现状	2
1.2.2 光伏充电站研究现状	3
1.2.3 单相光伏逆变器研究现状	5
1.3 选题意义	6
1.4 本文研究内容	7
第二章 光伏并网与 V2G 变换器理论分析	9
2.1 使用习惯可行性分析	9
2.2 技术实现可行性分析	10
2.2.1 光伏并网功能实现	10
2.2.2 电动汽车充放电功能实现	12
2.3 系统主电路拓扑选择	13
2.4 系统功能概述	14
2.4.1 功能要求	14
2.4.2 工作模式	14
2.4.3 最大功率点追踪	16
2.4.4 电池充电技术	19
2.5 本章小结	20
第三章 数学模型与控制策略设计	22
3.1 拓扑分析	22
3.1.1 双向 AC/DC 变换器拓扑分析	22
3.1.2 双向 DC/DC 变换器拓扑分析	23
3.2 主电路拓扑数学模型建立	24
3.2.1 双向 AC/DC 全桥电路模型分析	24

3.2.2 Buck-Boost 变换器模型分析.....	27
3.2.3 光伏电池等效电路及数学建模.....	27
3.3 系统充电模式控制策略分析	32
3.4 系统并网模式控制策略分析	33
3.4.1 V2G 模式控制策略分析.....	33
3.4.2 光伏并网模式控制策略分析.....	35
3.5 系统仿真模型	36
3.6 本章小结	42
第四章 主电路设计	43
4.1 系统构成及指标	43
4.2 主电路设计与参数选取	44
4.2.1 功率器件 IGBT 选型.....	44
4.2.2 交流侧滤波电感设计.....	45
4.2.3 输入滤波电容设计.....	46
4.2.4 直流母线稳压电容设计.....	46
4.2.5 Buck-Boost 储能电感设计.....	46
4.2.6 直流侧滤波电容设计.....	47
4.3 控制系统电路设计	47
4.3.1 主控芯片资源配置.....	47
4.3.2 直流电压采样调理电路.....	48
4.3.3 交流电压采样调理电路.....	48
4.3.4 电流采样调理电路.....	49
4.3.5 辅助电源设计.....	49
4.4 本章小结	50
第五章 实验验证与结果分析.....	51
5.1 软件编译器及操作系统	51
5.1.1 主程序软件平台介绍.....	51
5.1.2 DSP/BIOS 配置.....	52
5.2 主程序设计	53
5.2.1 系统初始化.....	53
5.2.2 系统主程序循环.....	54
5.2.3 子模块流程设计.....	55

5.3 实验结果与分析	56
5.4 本章小结	59
第六章 总结与展望	60
6.1 全文工作总结	60
6.2 后续工作展望	60
参 考 文 献	62
致 谢	67

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background	1
1.2 Research situation	2
1.2.1 Vehicle-to-Grid Technology.....	2
1.2.2 Photovoltaic charging station	3
1.2.3 Single-phase PV Grid-connected Inverter	5
1.3 Significance of The Subject	5
1.4 The Main Research	7
Chapter 2 Theoretical analysis of grid-connected photovoltaic and V2G converter	9
2.1 Feasibility analysis of habits	9
2.2 Feasibility analysis of Technology realization	10
2.2.1 Grid-connected Photovoltaic function	10
2.2.2 EV charging and discharging function.....	12
2.3 Topology of main circuit of system	13
2.4 Overview of subsystem function	14
2.4.1 Functional requirements.....	14
2.4.2 Operating Modes.....	14
2.4.3 Maximum power point tracking.....	16
2.4.4 Battery charging technology	19
2.5 Summary	20
Chapter 3 Mathematical model and control strategy design	22
3.1 Topology analysis	22
3.1.1 Bidirectional AC/DC converter.....	22
3.1.2 Bidirectional DC/DC converter	23
3.2 The mathematical model of the main circuit topology	24
3.2.1 Bidirectional AC/DC full-bridge circuit	24
3.2.2 Buck-Boost converter	27
3.2.3 Equivalent circuit and mathematical modeling of photovoltaic cells.....	27

3.3 Analysis of the control strategy of the charging mode	32
3.4 Analysis of control strategy for grid inversion mode	33
3.4.1 V2G function	33
3.4.2 Grid connected photovoltaic	35
3.5 System simulation	36
3.6 Summary	42
Chapter 4 The design of main circuit	43
4.1 System constitution and index	43
4.2 Parameter selection	44
4.2.1 IGBT selection	44
4.2.2 filtering inductor at AC side	46
4.2.3 Input filter capacitor	46
4.2.4 DC bus capacitor	46
4.2.5 Buck-Boost energy-storage inductor	46
4.2.6 filtering inductor at DC side	47
4.3 The design of Control system circuit	47
4.3.1 Resource configuration of main control chip	47
4.3.2 DC voltage sampling	48
4.3.3 AC voltage sampling	48
4.3.4 Current sampling	49
4.3.5 Auxiliary power supply	49
4.4 Summary	50
Chapter 5 Experimental verification and result analysis	51
5.1 Software compiler and operating system	51
5.1.1 Software platform	51
5.1.2 DSP/BIOS configuration	53
5.2 Design of main program	53
5.2.1 System initialization	54
5.2.2 Main program cycle	55
5.2.3 Subroutine flow	56
5.3 Experimental results and analysis	56
5.4 Summary	59
Chapter 6 Conclusion and Outlook	60
6.1 Conclusion	60
6.2 Prospect for Future Work	60

References	62
Acknowledgement	67

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 课题背景及研究意义

1.1 研究背景

中国国民经济的飞速发展，促进了居民汽车保有量的增长。据国家统计局数据，2005-2014 年我国汽车保有量年均增长高达 15.61%。然而汽车数量的增长带来了石油能源减少、环境污染、城市空间拥挤等问题，于是新能源汽车得到飞速发展。2015 年中国以 37 万的销量成为 2015 年电动汽车销量最高的国家，但是与近 50 万辆的电动汽车保有量相比，截止 2015 年底我国充电桩的保有量才 4.9 万个，缺口明显。在这样的背景下，能否科学合理地加快停车场、居民活动集中区等公共场所建立与新能源电动车配套的充电设施成为当务之急。

随着电动汽车保有量的提高，大量的电动汽车电池可以考虑在停车时为电网提供能量缓冲。车辆到电网（Vehicle-to-grid, V2G）的概念是将电动汽车作为一种分布式的储能装置参与电网调节，除利用电网对电池充电之外，还充分发挥其储能、调峰、应急等功能，在降低碳排放量的同时又在一定程度上提高了电网的运行效率。

同时近年来随着我国新能源持续快速发展，在各方的共同努力下，新能源装机和发电量逐年大幅增长。大力发展新能源和可再生能源，积极推进能源革命已成为世界各国可持续发展和培育新的经济增长点的重要战略选择。2015 年，全国光伏发电新增装机约 15.13GW，同比增长逾 40%；全国光伏发电累计装机量达到约 43GW，超越德国成为全球光伏累计装机量最大的国家。随着新能源大规模开发，运行消纳矛盾也日益突出，特别是我国的“三北”地区弃光弃风严重，去年全年甘肃省弃光率达到 30.7%，青海也超过 22%^[1]。弃风弃光的主要原因在于我国能源供应和能源需求呈逆向分布，在资源上“西富东贫、北多南少”，在需求上则恰恰相反。就太阳能资源而言，全年太阳辐射总量高原大于平原、西部大于东部，而能源需求主要集中在东部、中部地区。一方面“三北”地区经济发展相对滞后、电力需求不足、电力市场狭小；另一方面输电通道建设周期较长，很多在建的特高压要到 2017 年以后才能投入使用。因此东部地区在电力消纳上优势明

显，同时由于土地资源紧张，东部地区天然适合发展分布式，十三五将迎来分布式发展的黄金期。目前分布式和 V2G 技术已经成为新能源企业、研究机构和学者的研究热点，希望借此提高可再生能源利用的效率和优化电网运行。

1.2 研究现状

1.2.1 V2G技术研究现状

V2G 概念在 2005 年被 W Kempton 提出并开始尝试应用 V2G 技术解决电动汽车以及其他可再生能源并网的问题^[2]。

首先 V2G 技术是智能电网技术的重要组成部分，可以实现电动汽车与电网间的能量双向、可控和实时运动。电动汽车充放电控制装置需要满足电动汽车和电网的信息交互功能，对交换能量、电网运行状态、电价信号、车辆信息、电池状态、费用等信息在两者间进行传递^[3]。因此，V2G 是电力电子、通信、调度和计量、需求侧管理等众多技术的高端综合应用^[4]。

规模化的电动汽车充电行为将引起电网负荷的增长和电能需求量的增加。电动汽车充电桩属于大功率负载，电动汽车大规模接入配电网，由于其充电时间地点的高度随机性，会对配电网网损、电能质量、可靠性、稳定性等方面产生影响。研究显示^[5]，个人使用的小型车辆（包括纯电动车和混合动力车），其行驶时间仅为总时间（可以理解成一天 24 小时）的 10% 左右，90% 前后的时间为停止时间。如果将这 90% 的时间接入电网，既可进行充分利用车辆的电池资源，也可以减轻车主的使用成本。同时在不妨碍电动汽车使用的条件下可以给电网提供各种服务，包括调峰调频、辅助新能源发电接入、旋转备用、有功无功调节等。随着注册为电网调度的电动汽车比例的增加，可有效缓解电动汽车对系统高峰负荷的影响^[6]。

集成了 V2G 技术的微电网具有更少的储能装置和更小的投资成本，电动汽车作为一种分布式电源在平衡功率负载，维持微电网稳定运行上起到了非常重要的作用。电动车电池提供额外的存储容量，它可以在微电网孤岛运行时得到充分利用。文献^[7]对本地控制和集中式充电控制提出了不同的控制策略并进行了开发和测试：本地控制方法是通过测量电动汽车电池的 SOC 来确定电池的充放电速率；集中控制策略通过调整电动汽车的充电速率将单向负载连接到所述微电网。

仿真结果表明,电动汽车的电池在孤岛运行条件中对电压平衡和频率控制具有较好的调节作用。在不同的渗透水平和不同的控制参数下电动汽车对微电网的影响,以可再生能源的渗透和降低燃料消耗为长期目标。该模型中微源到微电网的逆变器采用基于功率、频率和电压的控制算法^[8]。由于动力电池流向电网只占汽车停放时间中有限的一部分,所以把电动汽车作为电网的支撑是可能的^[9]。文献^[10]介绍了估计 V2G 停车场系统的电力容量的数学模型,由于电动车的需求/供给模型表现出随机的特征,最终分析表明最佳增益系数为 40.3%。

文献^[11]提出了一种基于价格实现削峰平谷作用的分布式电动汽车协调机制,将电动汽车作为单纯的负载管理在给定的电动汽车充电需求和流动模式下提供服务。利用可再生分布式能源(DER)和电动汽车充电需求之间的协同作用提高电网的 EV / RES 渗透率水平,从而减少电网的不必要投资。文献^[12]通过分析受控电动汽车的特征,提出电动汽车用户、运营商、电网公司和弃风电场合作的 V2G 商业合同模式。建立以运营商期望收益最大化为目标,以满足用户个体需求和电费补偿约束,考虑弃风功率限制、机组调节速率限制的运营商日前优化调度模型。提出了针对所建非线性混合整数规划问题的求解算法。

1.2.2 光伏充电站研究现状

太阳能充电站是充分利用光伏发电的能量进行充电的新型电动汽车充电站,为了减少光伏发电诸多因素引起的不稳定性,一般利用蓄电池将多余的能量储存起来,作为太阳能光伏充电站的后备能量并在电网低谷时充分存储低价电能。光伏与充电桩结合形成光伏充电站,是电动汽车促进可再生能源消纳的最直接的物理形态。美国对光伏充电站的研究处于领先状态,2013年11月13日,美国太阳能遮阴停车场设计师兼制造商 Envision Solar International 宣布位于圣地亚哥国际机场的 EV-ARC 电动车充电站部署实验获得成功,如图 1.1 所示。EV-ARC 电动车充电站在美国发明、设计及制造而成,是世界首个全自动、可移动的独立光伏发电充电站,无需地基挖坑,亦可免除建设审批与并入电网。此外, EV-ARC 安装在一块标准的停车位内,日光伏发电量约为 16kWh,存储于一个 22kWh 的车载电池储能装置之中。该光伏系统还配备 Envision Track 专有的跟踪系统。该跟踪系统不仅可令太阳能列阵跟踪太阳光线,而且相比于传统固定式列阵发电量提升 18%至 25%。



图 1.1 太阳能光伏汽车充电站

国内方面，北京市的首个太阳能光伏公共充电站位于北京 CBD 地区华茂中心停车场。其太阳能电站装机容量目前为 25 kW ，充电桩共有 100 台。虽然光伏充电站所发电量远不能满足这么多充电桩的用电需求，但该部分光伏发电直接销售给电动汽车，其电价和服务费合计可达 1.37 元/kWh 。这使光伏可以不需要国家补贴就能实现盈利，对于城市发展分布式光伏具有非常重要的意义。湖北襄阳邓城电动汽车充电项目是国内首座具备商业运营条件的光伏智能充电站，将光伏组件收集的能量储存在锂电池中，不仅可以给电动汽车充电，还可以将多余的能量回馈给电网。特斯拉也于 2014 年在上海浦东金桥建成国内第一个超级充电站，也是全球第一个安装太阳能装置、建设速度最快的超级充电站。

目前光伏充电站主要存在两大技术难题：首先是光伏发电不稳定性，从技术层面存在光伏方阵发电密度低、发电不稳定、发电效率低等缺点，而电动汽车充电具有高电压、大电流、大功率的特点，这与目前太阳能光伏发电的特点有冲突。同时电动车太阳能光伏充电站发电量受天气的影响较明显，多云天气、大风下雨及雾霾天气更会大大降低发电量。此外，夜晚没有太阳光无法发电，离网型太阳能光伏充电站理论上无法 24 小时提供服务。

其次蓄电池成本过高束缚太阳能充电站的产业化。为了避免光伏发电诸多因素引起的不稳定性，需要利用蓄电池将多余的能量储存起来作为太阳能光伏充电站后备能量或者夜间备用电能。对于建设企业来说，蓄电池采购成本过高，再加上蓄电池在使用寿命期内会随着使用环境和其他因素的影响而产生衰减，蓄电池

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.