

小型风光互补发电系统控制器的研究

摘要

如何解决能源危机问题，已经成为全球关注的热点。在当前可利用的几种可再生能源中，太阳能和风能是应用比较广泛的两种。太阳能、风能在资源条件和技术应用上都有很好的互补特性，综合考虑太阳能和风能在多方面的互补特性而建立起来的风光互补发电系统是一种经济合理的供电方式。小型风光互补发电系统可以满足远离电网地区的独立供电的需求。

本论文的主要工作如下：

1、分析了小型风光互补发电系统的结构，研究了小型风光互补发电系统各个组成部分的工作原理及其运行特性。

2、分析了风力发电、光伏发电以及蓄电池充电的控制策略，重点研究了最大功率点跟踪控制，并在此基础上，归纳总结出一套可行的总体控制方案。

3、设计了一个以 dsPIC30F2010 单片机为核心的小型风光互补发电系统控制器，对开关电源电路、电流检测电路、电压检测电路、DC/DC 变换电路、卸载电路等模块电路进行了硬件设计，在软件方面，采用功能块设计的方法，对 AD 采样、PWM 控制、光伏充电、风机充电、卸载保护、PI 控制、状态显示和过放保护等进行了软件编程。

4、对控制器进行了实验调试，实验结果表明本文研究开发的小型风光互补发电控制器结构简单，能够实现光伏发电和风力发电的最大功率点跟踪控制，满足蓄电池分段式充电以及过充、过放保护的要求。

关键词：风力发电；光伏发电；风光互补；最大功率点跟踪；蓄电池

Research on Controller of Small-scale Wind & Light complementary electricity-generating system

Abstract

How to solve the energy crisis has become a hotspot of global concern. Solar energy and wind energy are two kinds of widely used renewable energy in the current availability renewable energies. Solar energy and wind energy have complementary characteristics both in resource condition and technical application. Wind & Light complementary electricity-generating system thinking over there complementary characteristics is an economic and reasonable way of power supply. Especially, the small-scale Wind & Light complementary electricity-generating system can meet the needs of independent power supply required for people who live far away from the power grid.

The main work of this paper is as follows:

1、The structure of the small-scale Wind & Light complementary electricity-generating system is analyzed, and the discusses on principle and characteristic of operation for each part of the system are also carried out in this paper.

2、The control strategy of wind generation, photovoltaic generation and battery charging are analyzed. An integrated and feasible control project is generalized based on the maximum power point tracking control strategy.

3、A controller of small-scale Wind & Light complementary electricity-generating system is designed based on dsPIC30F2010 MCU. The hardware of several circuit modules on the controller are described, such as power supply circuit, current detection circuit, voltage detection circuit, DC / DC conversion circuit and unloading circuit. The software is structured with subroutine modules, mainly including AD sampling, PWM control, photovoltaic charging, wind charging, overload protection, PI control, status display , battery protection and so on.

4、Relative experiments and analyses are finished. The results indicate that the controller of the small-scale Wind & Light complementary electricity-generating system is reasonable and feasible. Which can achieve the control strategy of maximum power point tracking(MPPT), and can meet the needs of battery charging and protection.

Key words: Wind Generation ; Photovoltaic Generation ; Wind & Light complementary ; Maximum Power Point Tracking (MPPT) ; Battery;

插图清单

图 1- 1 可再生能源利用	1
图 1- 2 传统风车及现代风力发电厂	2
图 1- 3 近年来全球风力发电装机总容量	2
图 1- 4 近年来世界光伏发电装机容量	3
图 1- 5 小型风光互补发电系统的应用案例	5
图 1- 6 典型风光互补结构框图	6
图 2- 1 小型风光互补发电系统结构	8
图 2- 2 风力发电机组能量转化框图	9
图 2- 3 水平轴风机与垂直轴风机对比	9
图 2- 4 小型风光互补发电系统风力机	11
图 2- 5 风轮气流图	11
图 2- 6 风力机的功率曲线	13
图 2- 7 理想太阳能电池等效电路	15
图 2- 8 太阳能电池实际等效电路图	16
图 2- 9 太阳电池 V-I 特性曲线	17
图 2- 10 不同日照和温度下 V-I 特性曲线	17
图 2- 11 不同日照和温度下 V-P 特性曲线	18
图 2- 12 铅酸蓄电池充放电时电压变化	20
图 3- 1 叶尖速比 λ 与 C_p 关系	21
图 3- 2 叶尖速比控制框图	22
图 3- 3 风机的最大负载功率曲线	23
图 3- 4 最大负载功率曲线控制框图	23
图 3- 5 风机的功率输出曲线	24
图 3- 6 最大功率点搜索控制框图	25
图 3- 7 恒压控制法框图	26
图 3- 8 扰动观察法控制框图	26
图 3- 9 蓄电池理想充电曲线	28
图 3- 10 蓄电池实际的充电电流曲线	29
图 4- 1 小型风光互补发电系统	31
图 4- 2 小型风光互补发电控制器框图	31
图 4- 3 单片机及其外围电路	32
图 4- 4 UC3844 内部结构图	32
图 4- 5 反激式开关电源	33
图 4- 6 di/dt RCD 缓冲电路的波形	34

图 4- 7 关断时的负载曲线	34
图 4- 8 带缓冲电路 BUCK 变换器	35
图 4- 9MOSFET 驱动电路	35
图 4- 10 TLP250 内部结构	36
图 4- 11 MOSFET 驱动信号波形	36
图 4- 12 电压检测电路	37
图 4- 13 ACS706ELC-20A 的输出特性	37
图 4- 14 所示是电流采样实验波形	38
图 4- 15 卸载电路	38
图 4- 16 主程序流程图	39
图 4- 17 滞环控制图	40
图 4- 18 风机充电程序框图	41
图 4- 19 光伏充电 PI 控制程序流程图	42
图 4- 20 控制器实物图	43
图 4- 21 BUCK 电路续流二极管两端的电压波形	43
图 4- 22 风机充电时风机输出电压及蓄电池充电电流波形	44
图 4- 23 光伏充电启动电流波形	44
图 4- 24 风机与光伏电池同时给蓄电池充电电流波形	44

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

王清

签字日期：09年4月2日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权合肥工业大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

王清

导师签名：

丁永生

签字日期：09年4月2日

签字日期：09年4月2日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

致 谢

在结束本论文之际，谨向所有支持与帮助过我的老师、同学和朋友们致以诚挚的谢意。

本论文的研究工作是在导师王群京教授的悉心指导下完成的，导师渊博的学识，严谨的治学态度，敏锐的科学洞察力，以及对科研与育人事业的真挚热爱，平易近人的高尚品德，都使我深受感染，并终身受益。做人，做事，做学问，学生从导师所得，永生难忘！今借此机会对导师及其家人表示最深的谢意和祝福！

特别敬谢李国丽老师、胡存刚老师和姜卫东老师，他们一直以来都尽心尽力地为我们分忧解难，无论在学习上还是生活上，都给予我们最大的帮助。

在合肥工业大学电气学院两年多的学习和生活中，感谢实验室的王安邦师兄、钱喆师兄、鞠鲁峰师兄、王红涛、朱少林、史晓锋、刘军、许维国、漆星等平时学习生活中的大力帮助，还有已经毕业的师兄们：陈权、夏琨、李峥、任涛、李智、任冰、吴海岸等，他们在学习和日常生活中给予我许多帮助和支持。

感激我的父母和家人，有了他们精神和生活上的鼓励和支持，我才可以安心地完成学业。

感谢所有帮助我的人！

感谢各位评委在百忙之中抽出时间给我评审！

作者：王涛

2009年03月

第一章 绪论

1.1 可再生能源发电的现状

1.1.1 可再生能源利用

当今世界，电力已经越来越成为人们生活中必不可少的动力来源，与此同时，资源紧缺、环境污染的压力也在不断增大。在不破坏人类生存环境的同时，如何解决能源危机、满足人类需求，是人们不断思考的问题，利用可再生能源是一条很好的出路。近年来，可再生能源的利用在世界范围内得到迅速发展，一些可再生能源技术的利用如光伏发电、风电等年增长速度都在 20%以上，可再生能源已成为实现能源多样化、应付气候变化和社会实现可持续发展的重要替代能源^{[1][2]}。

现在用来发电的可再生能源主要有：风能、太阳能、地热能、生物能和海洋能等^[4]，图 1-1 为一些可再生能源的应用^[7]。

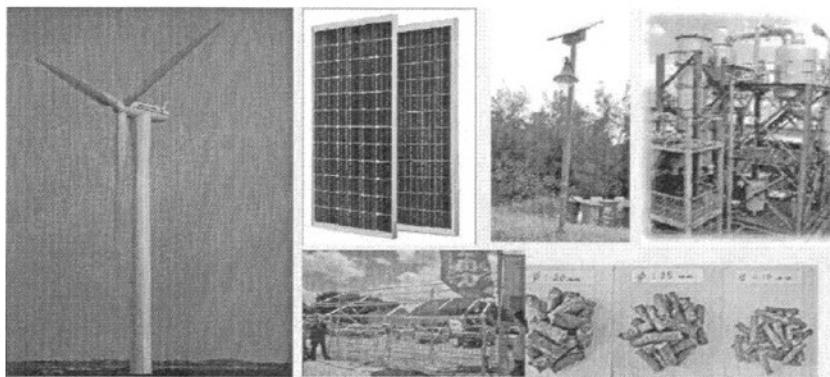


图 1-1 可再生能源利用

我国有丰富的可再生能源资源，在水电、沼气、太阳能热的利用方面已取得了显著成效，近年来加快了风电、生物液体燃料和太阳能发电的发展，开发利用可再生能源已成为我国缓解能源供需矛盾、减轻环境污染、调整能源结构、转变经济增长方式和促进社会主义新农村建设的重要途径。“十五”时期，我国可再生能源技术和产业发展取得了显著成绩，水力发电装备制造和施工技术日臻完善，沼气技术不断进步和完善，风电技术和产业发展开始起步，太阳能光伏电池及组件的生产能力迅速扩大。在“十一五”时期，我国将继续大力发展战略性新兴产业，加快发展生物质能、风电和太阳能，加强农村可再生能源开发利用，逐步提高可再生能源在能源供应中的比重，为更大规模开发利用可再生能源创造条件。其中风力发电和太阳能发电是两种发展前景最好新能源利用方式^{[5][6]}。

1.1.2 风力发电的现状

人类利用风能历史悠久，最初是将风能转换为机械能，后来则是主要转化成电能。图 1-2 为传统的风车以及现代风力发电厂实物图^[7]。

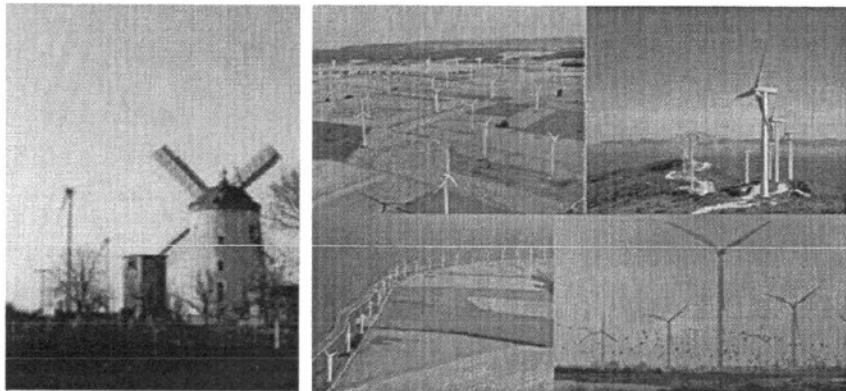


图 1-2 传统风车及现代风力发电厂

人们利用风力发电始于 25 年前，目前已经发展成为一个成熟的产业。近年来，风能的开发利用成绩十分显著，截止到 2007 年底，全球的风力发电装机容量已达到 94000MW，分布全球 60 多个国家，其中德国、美国、西班牙、印度、中国、丹麦、意大利、法国、英国、葡萄牙、加拿大、荷兰、日本等 13 个国家装机容量已超过 GW。欧洲丹麦、德国、西班牙等国家风力发电起步早，技术相对比较成熟，2006 年丹麦风电装机容量和发电量占该国总发电装机容量和发电量的比例分别为 25% 和 20%，德国为 17% 和 7%，西班牙为 15% 和 6%。我国风电产业起步较晚，和欧美发达国家仍有很大差距。全球风力发电总装机容量近年来的发展曲线如图 1-3 所示^{[10][11][12]}。

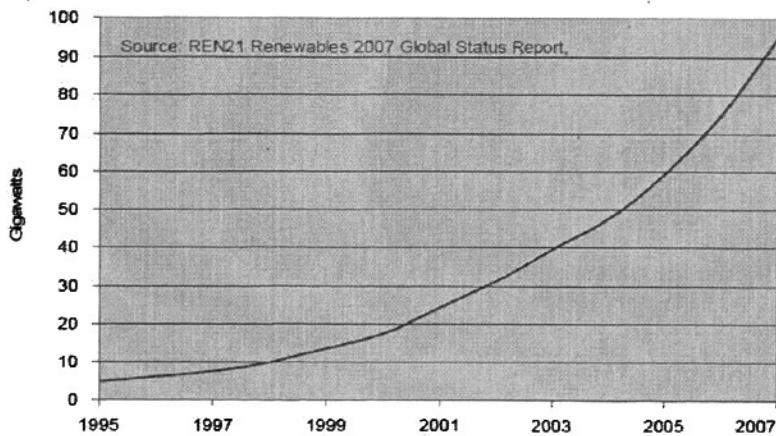


图 1-3 近年来全球风力发电装机总容量

我国幅员辽阔，实际可开发的风能储量为 2.53 亿千瓦，为可再生能源和新能源利用技术提供强大的发展空间。我国风电产业起步虽然比较晚，但是发展极为迅速，尤其是 2006 年实施《可再生能源法》后，连续两年装机容量增长速度超过 100%，2007 年我国风电累计装机容量约为 590 万千瓦，仅次于美国、西班牙，成为世界风力发电增长最快的市场之一，风力发电规模已居世界第五。

专家预计，如果坚持和完善积极的风电扶持政策，稳步增强风电设备生产能力和技术质量水平，我国今后数年内将继续保持约 400 万千瓦新增装机容量的增长速度，2010 年可以实现风电累计装机容量 1400-1500 万千瓦。若 2010 年后每年新增 700-800 万千瓦，达到目前欧洲现有的水平，则 2020 年保守估计风电可以实现 8000 万至 1 亿千瓦装机容量。在 2020 年之后，我国风电可能超过核电成为第三大主力电源，2050 年甚至可能超过水电，成为第二大主力电源，具有很好的发展前景^{[13][14]}。

1.1.3 光伏发电的现状

太阳能光伏发电产业是 20 世纪 80 年代以来世界上增长最快的高新技术产业之一，近年来世界光伏发电装机容量如图 1-4 所示^[10]。2007 年世界太阳电池产量 4000MWp，至 2007 年底累计生产达到 12.64GWp，累计安装约 12.0GWp。最近 10 年平均年增长率为 41.3%，最近 5 年的年平均增长率为 49.5%，2007 年比 2006 年增长率高达 56.2%。据欧盟估计，全球光伏发电有望在 2020 年达到 70GW。目前世界推广应用太阳能光伏发电系统德国处于领先地位，太阳电池生产量是日本第一。日本新能源和工业技术发展组织(NEDO)在 2004 年 6 月发表的“面向 2030 年光伏路线图的概述”中提出：到 2030 年累计安装太阳电池组件容量要达到 1000GW，届时日本所有住宅所消费的电力中将有 50% 由太阳能光伏发电提供，大约占全部电力供应的 10%^[15]。

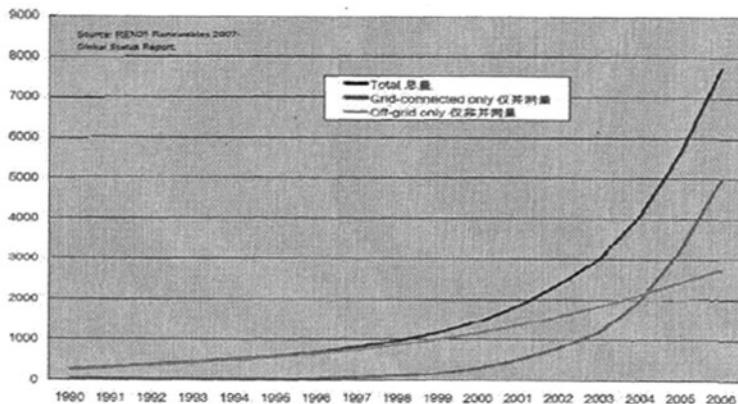


图 1-4 近年来世界光伏发电装机容量

我国太阳能储量丰富,其中西藏西部的太阳能辐射总量居世界第一位。至 2006 年,我国的光伏发电技术还处于较为落后的水平,与日本、德国、美国的差距很大,光伏发电装机总量 80MW,占世界总量约 1%。我国能源发展规划指出,我国太阳能光伏发电行业 2010 年实现总装机容量达到 400MW,2020 年光伏发电将占总发电量的 1.1%,系统总产值将由 200 亿元上升到 3000 亿元,2040 年将占 26%,2050 年以后将成为能源支柱。所以推算,2010 年前国内光伏发电产业的复合增长率将超过 40%,2010 至 2040 年,全行业的复合增长率也将达到 25%。我国光伏发电产业正在蓬勃发展,相信不久将赶上世界太阳能发展的潮流^[16]。

1.2 风光互补发电的提出

风能是由太阳能的转化而来的,其转换过程受到季节、地理和天气等诸多因素制约。太阳能与风能在时间上和地域上都有很强的互补性,白天太阳光最强时,风很小,晚上光照很弱,但由于地表温差变化大而风能加强。在夏季,光照强度大而风小,冬季,光照强度弱而风大。太阳能与风能相互配合利用,扬长避短,就能充分发挥二者最大的作用。

近年来,很多人都致力于风能、太阳能的综合利用研究。1981 年,丹麦的 N. E. Busch 等提出太阳能和风能混合利用技术问题,同年,美国的 C. I. Aspliden 研究太阳能-风能混合转换系统的气象问题。前苏联的 N. Aksarin 等根据概率原理,统计出近似的太阳能-风能潜力的估计值。余华扬等 1982 年也提出了太阳能-风能发电机的能量转换装置^[18]。

由于地域差别,在很多偏远地区,地广人稀,电网覆盖面有限,对偏远地区生活和工作的人们而言,一般情况下用电负荷都不大,所以采用电网输送电力就不合理。因此在远离电网的地区,人们的电力来源就要依靠独立供电系统,现在常用的供电方案是柴油发电机,但是由于偏远地区交通不便,所以柴油的储运成本太高,而且难以保障持续供电,所以柴油发电机只能作为一种短时的应急电源,要解决长期稳定可靠的供电问题,只能依赖当地的自然能源。太阳能和风能是最普遍的自然资源,也是取之不尽的可再生能源,而且两者在时间变化分布上有很强的互补性。结合风能、太阳能的特点,综合利用风力发电和太阳能光伏发电技术而建立的风光互补发电系统无疑是解决独立供电的最佳方案^{[20][21]}。

风光互补发电与单独的风力发电或光伏发电相比较,有以下优点:

- 1) 利用风能、太阳能的互补特性,可以获得比较稳定的总电能输出,系统有较高的供电稳定性和可靠性。
- 2) 在保证同样供电的情况下,可大大减少储能蓄电池的容量。
- 3) 对混合发电系统进行合理的设计和匹配,可以基本上由风光互补系统供

电，很少或基本不用启动备用电源如柴油发电机等，并可获得较好的社会效益和经济效益。

1.3 小型风光互补控制器的发展水平

风能随机性强，小型风力发电系统一般采用蓄电池储存电能，从而保证供电系统的不间断供电。但是蓄电池的容量有限，若连续很长一段时间没有风的话，就无法正常供电，给用户的生活带来不便。再加上用户的用电量逐渐增大，小型风力发电机组的单机容量也随之逐年增加，传统的单一的户用型小型风力发电组供电远远不能满足用电需要。由于技术的各方面的限制，单一的增加风力发电机容量已经不可行。这样一来只有利用光伏发电来弥补这个不足。图 1-5 所示^[7]为小型风光互补发电系统的一些应用案例。在成本方面，风力发电一次性投资较低，而光伏发电系统维护量低，所以采用风光互补系统，性价比会大大提高。由于太阳能电池组价格居高不下，所以目前小型风光互补发电系统中，仍以风力发电为主，约占整个体系的 60%-70%。总之，小型风光互补发电系统是今后相当一段时期内的发展趋势，小型风光互补发电系统有望逐步代替单一的小型风电系统。

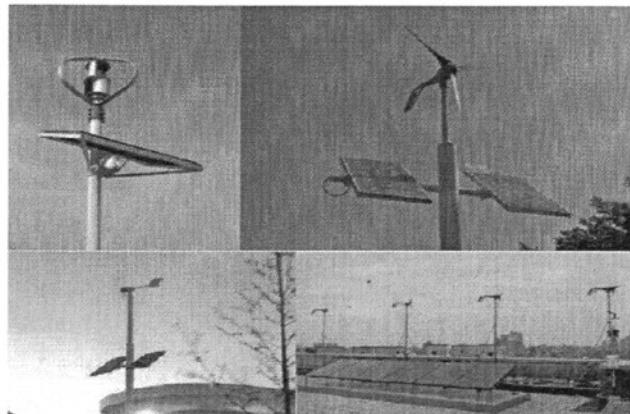


图 1-5 小型风光互补发电系统的应用案例

目前典型的风光互补发电系统主要设备包括：太阳能电池板、风力发电机组、蓄电池组、卸载负载、控制器、逆变器、直流负载、交流负载。其典型结构如图 1-6 所示。

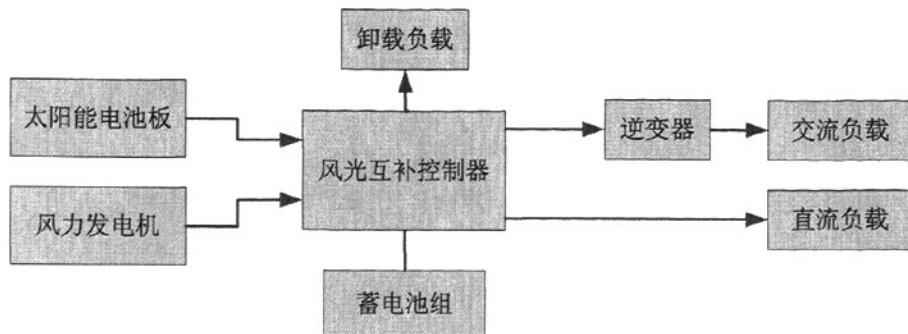


图 1-6 典型风光互补结构框图

控制器是小型风光互补发电系统的核心，它控制着整个系统使其合理稳定地运行。控制器的主要功能是对蓄电池进行充电放电控制、保护、调节与分配系统输入输出电量和执行监控功能。根据发电系统的要求，控制器的复杂程度以及功能特点不尽相同，一般具有的保护功能有：蓄电池过充保护、欠压保护、蓄电池反接保护和自动卸荷功能等。

当前国内风光互补系统中普遍采用的控制策略是对蓄电池进行浮充充电的控制模式，也就是让负载尽可能多地消耗由太阳电池方阵和风力机组发出的电。一般通过蓄电池电压检测来确定其状态，若有系统功率输入大于负载功率，则给蓄电池充电；若输入功率不足，则蓄电池放电以保证负载运行。也有一些控制器采用电流、温度因素来补偿内阻损耗引起的蓄电池状态变化。

国外在小型风光互补控制器的控制策略上开展了大量的研究工作。在传统的浮充充电模式的基础上，注意到将剩余容量(SOC)作为蓄电池充放电管理的判断准则，从负荷用电与系统供电平衡的方面来改善控制器性能和系统性能。在 SOC 计算方面，根据有关资料显示，较为普遍接受的方法采用多参数进行准确度补偿^[22]。

在主电路方面，大部分控制器采用风光共用一个功率变换电路的方法，这种方法可以降低成本，两者同时控制，简单易行。但是这种方案太阳能风能利用率低，一旦主电路出现故障，整个系统就会处于瘫痪状态。为了提高控制器的可靠性，本文设计的风光互补控制器是对风力发电机输入和光伏太阳电池板输入进行分开控制，两者互不干扰，当其中一路出现故障时，不影响另一路工作，保证了系统的稳定性。

1.4 论文的主要内容

本论文的研究课题来源于安徽省科技攻关重点项目“户用型永磁风力发电机及其控制系统”（06012179）。

论文的研究思路是综合考虑风能及太阳能的各自特点，以典型小型风光互

补发电系统的结构为基础，认真分析发电系统中的电能产生、电能变换、电能存储等环节在整个系统运行过程中的工作状态，分析和比较系统的各种控制方法，优化控制策略，总结出切实可行最适合本系统的控制策略，设计出符合此控制策略的控制器，实现小型风光互补系统高效、合理发电的目标。

本文的主要内容如下：

第一章介绍风能、太阳能发电等可再生能源的发展现状、小型风光互补控制器的发展水平，给出了课题的来源、研究意义和论文的结构安排。

- 第二章在介绍小型风光互补发电系统的结构的基础上，分析该系统各组成部分的工作原理及运行特性。
- 第三章研究了风力发电、光伏发电、蓄电池充放电的控制策略，并根据小型风光互补发电系统的要求，设计一套总体的控制方案。
- 第四章设计开发了一套小型风光互补控制器，首先对控制器的硬件电路及各模块电路工作原理进行了详细分析；然后进行控制器软件的设计，介绍了主程序框图及一些控制子程序图；最后对控制器进行调试，分析实验结果。
- 第五章首先总结了本文所做的工作，分析了本文设计的控制器的特点及一些不足之处，并对课题进行了展望。

本章小结：

本章主要介绍风能、太阳能等可再生能源的发展现状，风光互补发电的提出以及应用，小型风光互补控制器的发展水平，最后介绍一下课题的来源、研究意义和论文的结构安排。

第二章 小型风光互补发电系统

2.1 小型风光互补发电系统的总体结构

本文课题研究的小型风光互补发电系统总体结构^[23]如图 2-1 所示，系统主要由电能产生环节、电能变换控制环节和电能存储消耗环节三部分组成。

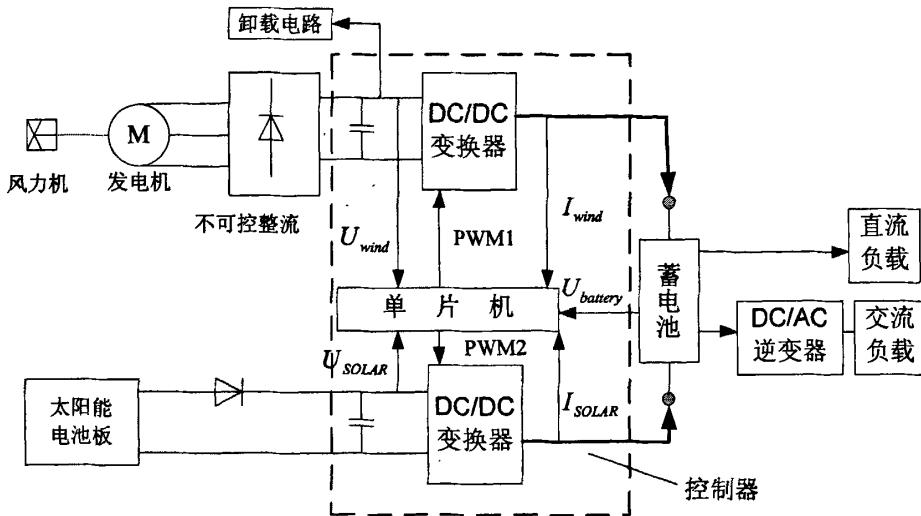


图 2-1 小型风光互补发电系统结构

电能产生环节又可以分为风力发电和光伏发电两个部分。

电能变换控制环节由不可控制三相整流桥、防反二极管、DC/DC 变换器等组成。风力发电机组产生的三相交流电通过不可控制三相整流桥，经过电容稳波后送入 DC/DC BUCK 变换器，得到蓄电池充电所需的直流电。为了防止反电压损坏光伏电池板，其产生的直流电先通过一个防反二极管后，再送入 DC/DC BUCK 变换器。其中 DC/DC 环节即功率变换器，是电能变换的核心部分，整个控制器的控制重点就是控制 BUCK 变换器。

电能存储消耗环节分为存储和消耗两部分。电能的存储部分主要由蓄电池来承担，蓄电池是整个风光互补发电系统的储能核心，它的主要作用就是消除由于天气等原因引起能量供给和需求的不平衡，在整个系统中起到电能调节和平衡负载的作用。当发电量大于负载消耗量时，系统给蓄电池充电，当发电量小于负载消耗量时，蓄电池给负载供电。

电能的消耗部分主要由卸载电路、直流负载、交流负载三个部分组成。根据用户的用电类型不同，负载分为直流和交流两种。直流负载可由蓄电池直接引入，也可以通过一个升压或降压电路（DC/DC）来提供用户需要的直流电压。而交流负载需要设计 DC/AC 逆变器。卸载电路的主要作用是：当风速很高，但

仍未达到过速保护的状态时，系统仍需要给负载或蓄电池供电，为了减小大风给开关管及其电路造成的损坏，控制器可以开启卸载电路，使一部分功率在卸载电路消耗掉，从而减少大风对控制器的冲击。

2.2 风力发电机组的构成

风力发电机组属于小型风光互补发电系统的电能产生的一个部分，主要由风力机、传动机构和发电机等组成。其能量转化过程框图如图 2-2 所示^[7]，风力机将风能转化为机械能，传动机构传递机械能，发电机把机械能转化为电能。

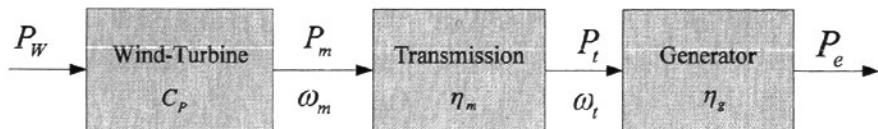


图 2-2 风力发电机组能量转化框图

其中 C_p 为风能利用系数，根据贝兹（Betz）理论可知 C_p 最大为 0.593^[24]， η_m 为传动机构的能量传动效率，可达到 95% 以上， η_g 为发电机的发电效率，专用发电机可以达到 80%， P_w 为风的功率， P_e 为经过变换后产生的电功率。下面介绍风力发电机组的三个重要组成部分：风力机、传动机构和发电机。

2.2.1 风力机

1) 风力机分类^[25]

风力机是利用风轮从风中吸取能量再转化为其他形式的能量的装置，风力机经过 2000 多年的研究存在形形色色的多种样式，不过归纳起来，可以分成水平轴风力机和垂直轴风力机两类，如图 2-3 所示^[7]。

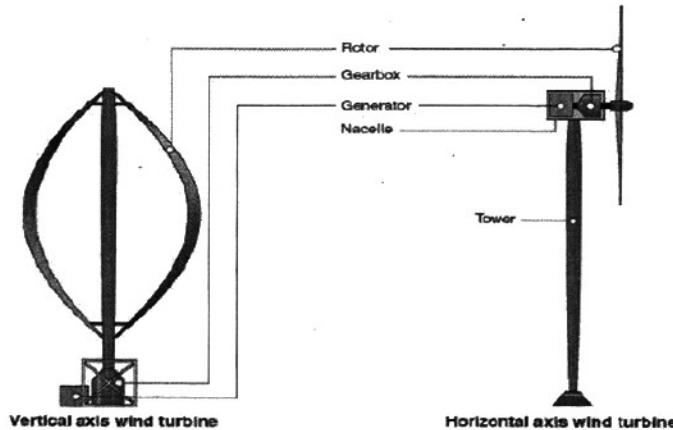


图 2-3 水平轴风机与垂直轴风机对比

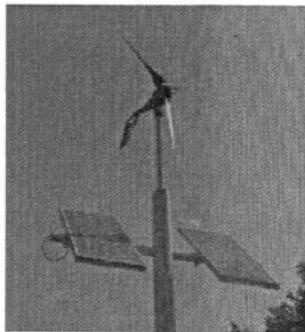
水平轴风力机的风轮围绕一个水平轴旋转，工作时，风轮的旋转平面与风

向垂直。风轮上的叶片是径向安置的,与旋转轴相垂直,并与风轮的旋转平面成一角度。风力机的叶片个数一般视用途而定,叶片数多的风力机通常称为低速风力机,它在低速运行时,有较高的风能利用系数和较大的转矩;叶片数少的风力机通常称为高速风力机,它在高速运行时有较高的风能利用系数,但起动风速较高。在发电系统中普遍采用 1-4 个叶片的风力机,最常见的是 2 个叶片和 3 个叶片的风力机。

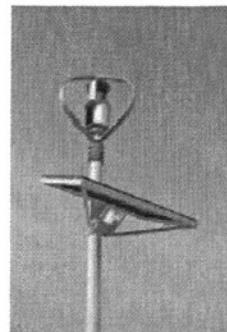
水平轴风力机按照接受风向的不同可以分为“上风向型”和“下风向型”。上风向型风力机的叶轮正面迎着风向,即在塔架的前面迎风旋转,这种风机一般都需要有某种调向装置来保持叶轮迎风。下风向型风力机的叶轮背顺着风向,这种风力机能够自动对准风向,可以免除调向装置。但是对于下风向型风力机,由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮,塔架就干扰了流过叶片的气流而形成所谓塔影效应,使性能有所降低。

垂直轴风力机的转动轴与地面垂直,风轮围绕着这个垂直轴旋转。它具有几个突出的优点:一是风轮机塔架结构简单,无需对风装置;二是发电机传动机构和控制机构等装置在地面或低空,维修维护方便;三是叶片容易制造,成本低。垂直轴风力机可分为两个主要类型,一类是利用空气动力的阻力做功,典型的结构是 S 型风力机,另一类是利用翼型的升力做功,最典型的是达里厄(Darrieus)型风力机。S 型风力机由两个轴线错开的半圆柱形叶片组成,其优点是起动转矩较大,缺点是由于围绕着风轮产生不对称气流,从而对它产生侧向推力,这种风力机在风轮尺寸、重量和成本一定的情况下提供的功率输出较低,因而在发电系统中较少采用。达里厄(Darrieus)型风力机是法国人 G.J 1.M.Darrieus 于 1925 年发明的,并且在 1931 年取得了专利。达里厄型风力机有 H 型、△型、Y 型、菱形和 ϕ 型等多种形式,目前最流行的是以 H 型和 ϕ 型。这种类型的风力机是水平轴风力机的主要竞争者。

目前用于小型风光互补发电系统的风力机主要有两种类型,如图 2-4 所示,一种是水平轴高速风力机,另一种是垂直轴达里厄型风力机。



a) 水平轴风力机



b) 达里厄型风力机

图 2-4 小型风光互补发电系统风力机

由于水平轴风力发电机的技术成熟，在小型风光互补发电系统中绝大多数采用水平轴高速风力机，特别是几百瓦的离网充电式小型/微型风力发电机绝大多数是水平轴式的。

2) 风力机的空气动力学特性^{[24][25]}

现代风力发电机采用空气动力学原理，就像飞机的机翼一样，风并非推动叶片运动，而是吹过叶片形成叶片正反面的压差，这种压差会产生升力或阻力，令叶轮不断横切风流旋转起来，产生旋转动能。

由流体力学可知，气流的动能为 $E = \frac{1}{2} \rho S v^2$ ，其中 ρ 为气体的密度， v 为气

体的速度， S 为气体流过截面积。风力机的第一个气动理论是由德国的贝兹（Betz）于 1926 年建立的。由于流经风轮后的风速不可能为零，因此风所拥有的能量不可能完全被利用。也就是说只有风的一部分能量可能被吸收，成为桨叶的机械能。那么风轮究竟能够利用多少风能呢？

贝兹假设风轮是理想的，假定风轮没有轮毂，叶片无穷多，通过风轮的气流没有阻力，此外，假定气流经过整个风轮扫掠面时，是均匀的，并且气流速度的方向在通过风轮前后都是沿着风轮轴线的，如图 2-5 所示。

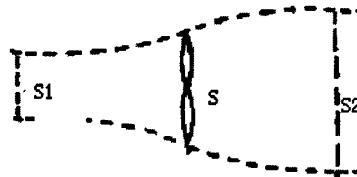


图 2-5 风轮气流图

设气流在截面 S_1 、 S 、 S_2 处的风速分别为 v_1 、 v 、 v_2 。如果空气是不可压缩的，由连续条件可知：

$$S_1 v_1 = S v = S_2 v_2 \quad (2-1)$$

风作用在风轮上的力可由欧拉（Euler）理论得：

$$F = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (2-2)$$

风轮吸收的功率为：

$$P = F v = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (2-3)$$

风轮上游和下游气流的动能差为：

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2-4)$$

根据能量守恒定律可知，风轮吸收的功率应该等于气流动能的变化量，即：
 $P = \Delta E$ ；计算得：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2-5)$$

风作用在风轮上的力：

$$F = \frac{1}{2} \rho S (v_1^2 - v_2^2); \quad (2-6)$$

风轮吸收的功率：

$$P = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2); \quad (2-7)$$

直接对式 2-7 中的 v_2 求导得：

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - 2v_1 v_2 - 3v_2^2) \quad (2-8)$$

令式 2-8 中 $\frac{dP}{dv_2} = 0$ 得两个解：

$$\text{解 (1)} : v_2 = -v_1, \text{ 此解无意义; } \text{解 (2)} : v_2 = \frac{v_1}{3}$$

根据分析可得当 $v_2 = \frac{v_1}{3}$ 时，P 为最大值；

将解 (2) 带入式 2-7 得：

$$P_{MAX} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (2-9)$$

风机理论最大效率：

$$\eta_{max} = \frac{P_{MAX}}{E} = \frac{\frac{8}{27} \rho S v_1^3}{\frac{1}{2} \rho S v_1^2} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2-10)$$

这就是著名的贝兹 (Betz) 理论的极限值。

风力机实际能得到的有用功率输出是 $P = \frac{1}{2} \rho v^3 S C_p$ ，其中 C_p 为风力机的实

际风能利用系数，根据贝兹 (Betz) 极限理论得知 $C_p < 0.593$ ，其功率损失部分可以解释为留在尾流中的动能。

3) 风力机的输出功率特性^{[24][25][26]}

前面根据风力机的空气动力学特性，分析了理想风力机的功率输出。但在实际的风力发电系统中，风力机起动时，需要一定的力矩来克服其内部的摩擦阻力，这一力矩称作风力机的起动力矩。起动力矩与风力机本身传动机构的摩擦阻力有关，因此风力机有一个最低的工作风速 V_{min} （一般为 $3-4m/s$ ），只有风速大于 V_{min} 时风力机才能工作。而当风速超过某一值的时候，基于安全上的考虑（主要是塔架和桨叶强度），风力机应当停止运转，所以每台风力机都规定有最高工作风速 V_{MAX} ，该风速值与风力机的设计强度有关，是设计时给定的参数。介于最低风速 V_{min} 和最高风速 V_{MAX} 之间的风速叫做风力机的工作风速，相应于工作风速风力机有功率输出，风力机的输出功率达到标称功率时的工作风速称为该风力机的额定风速。为充分利用风力资源进行发电，应按当地的风力资源来确定风力机的起动风速和额定风速，进而选择合适的机型。风力机的功率输出特性可以用图 2-6 的功率曲线来表示，

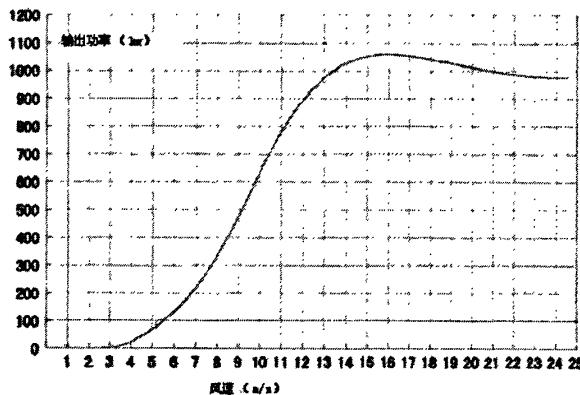


图 2-6 风力机的功率曲线

2.2.2 传动机构

风力发电机组的传动机构一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴节和制动器等。一般情况下，风力机联结低速轴，然后经过增速齿轮箱，高速轴联结发电机，但是并不是所有风力发电机组的传动机构都是这样的。有些风力机的轮毂直接连接到齿轮箱上，不需要低速传动轴，也有一些风力机特别是小型风力机设计成无齿轮箱的，风轮直接连接到发电机，即直驱式风力发电机组。

2.2.3 发电机

发电机在风力发电系统中承担着机械能到电能转化的过程。它直接影响这个转换过程的性能、效率和供电质量。因此，选用可靠性高、效率高、控制及供电性能良好的发电机系统，是风力发电工作的一个重要任务。小型风光互补发电系统中的发电机一般有三相永磁同步发电机、直流发电机、电磁式交流发

电机、爪极式发电机、磁阻式发电机和感应子式发电机等。

随着永磁材料的技术发展，永磁材料磁性能的大大提高，目前在小型风力发电系统中主要使用三相永磁同步发电机。三相永磁同步发电机一般体积较小、而且价格便宜；永磁同步发电机的定子结构与一般同步电机相同，转子采用永磁结构，由于没有励磁绕组，不消耗励磁功率，因而有较高的效率，省去了换向装置和电刷，可靠性高，定子铁耗和机械损耗相对较小，使用寿命长。另外，起动阻力矩是用于微型、小型风电装置的低速永磁发电机的重要指标之一，它直接影响风力机的起动性能和低速运行性能。为了降低切向式永磁发电机的起动阻力矩，必须选择合适的齿数、极数配合，采用每极分数槽设计，分数槽的分母值越大，气隙磁导随转子位置越趋均匀，起动阻力矩也就越小。

采用永磁同步发电机的小型风力发电机组一般采用直驱式结构，为了调节其输出功率，可以另加输出控制电路，即通过控制器来实现。

直驱式三相永磁同步发电机有如下优点：

- 1) 由于传动系统部件的减少，省去了沉重的齿轮箱，零部件的数量得到大量简化。
- 2) 永磁发电技术的采用，提高了风力发电机组的可靠性和效率。
- 3) 机械传动机构的减少降低了风力发电机组的噪音，减少了机械损耗，提高了传动效率。
- 4) 可靠性的提高，降低了风力发电机组的运行维护成本。

根据上文所介绍，结合实际应用的需要，本文设计的小型风光互补发电系统采用的是 600W 的小型风力发电机组，采用水平轴、三叶片、上风向、定浆距、直接驱动和三相永磁同步发电机的总体方案。

2.3 太阳能光伏电池板

小型风光互补发电系统中的另一个电能产生环节是太阳能光伏电池板，它负责将太阳光辐射转换成电能。

2.3.1 太阳能光伏发电的工作原理^{[27][28]}

1954 年，美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成了实用的单晶硅太阳电池，诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。太阳能电池的发电原理是利用“光生伏打效应”将太阳能辐射直接转化为电能。

太阳能电池是用半导体材料制成的，当太阳光照射到太阳能电池上的半导体 PN 结上时，电池吸收光能，在半导体导带和价带中产生非平衡载流子：电子-空穴对。在电池内建电场作用下，光生电子和空穴被分离，电池两端出现异号电荷的积累，即产生“光生电压”，这就是“光生伏打效应”。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载，则负载就有“光生电流”流过，从而获得功率

输出。这样，太阳的光能就直接变成了可以付诸实用的电能。

上述太阳能电池将光能转化为电能的工作原理概括为如下三个主要过程：首先，太阳能电池吸收一定能量的光子后，半导体内产生电子-空穴对，成为“光生载流子”，两者的电性相反；然后，电性相反的光生载流子被半导体 P-N 结所产生的静电场分离开；最后，光生载流子电子和空穴分别被太阳能电池的正负极所收集，并在外电路中产生电流，从而获得电能。

2.3.2 太阳能光伏电池板的等效电路^{[27][28]}

为了便于分析光伏电池的工作特性，常常把光伏电池和其负载系统用一个等效电路来表示，图 2-7 所示为理想太阳能电池的一个等效电路。

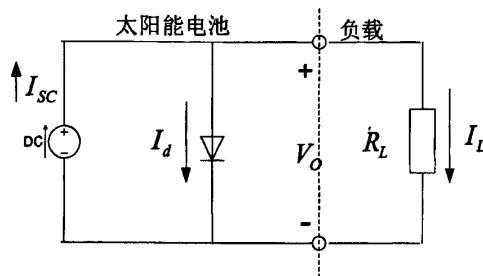


图 2-7 理想太阳能电池等效电路

图 2-7 中把太阳能电池看成能稳定产生光电流 I_{sc} 的电流源，它表示太阳能电池板受到光照时产生恒定电流 I_{sc} 的能力。这个等效电路说明：太阳能电池受阳光照射后产生了一定的光电流，其中一部分用来抵消 P-N 结的结电流 I_d ，另一部分即为供给负载的电流 I_L 。负载电压 V_o 、结电流 I_d 、负载电流 I_L 的大小都与负载有关，但负载并不是唯一的决定因素，这只是理想情况，实际的太阳能电池的等效电路更为复杂。为了更准确地表达太阳能电池的特性，图 2-8 给出了实际等效电路图。

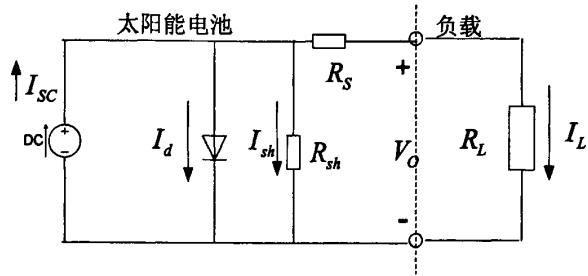


图 2-8 太阳能电池实际等效电路图

图 2-8 所示的实际等效电路考虑到了太阳能电池本身的内阻，用 R_s 表示串联内阻，它主要由电池的体电阻、表面电阻、电极的导体电阻、电极与硅表面的接触电阻等组成， R_{sh} 是旁漏电阻，它是由硅片的边缘不清洁或体内的缺陷引起的。流过负载的电流 I_L 为：

$$I_L = I_{SC} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (V_o + I_L R_s) \right] - 1 \right\} - \frac{V_o + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (2-11)$$

其中 q 为电子电荷； I_s 为二极管饱和电流； K 为波尔兹曼常熟； T 为热力学温度； A 为常熟因子，正偏电压大时 A 值为 1，正偏电压小时 A 值为 2。

从式 2-11 中可以看出：

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (V_o + I_L R_s) \right] - 1 \right\} \quad (2-12)$$

$$I_{sh} = \frac{V_o + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (2-13)$$

即得流过负载的电流 I_L 为：

$$I_L = I_{SC} - I_d - I_{sh} \quad (2-14)$$

一个理想的太阳能电池，串联电阻 R_s 很小，而并联电阻 R_{sh} 很大。由于 R_s 、 R_{sh} 分别串联和并联在电路中，所以在理想的电路计算时，它们可以忽略不计。

此时，流过负载的负载电流 I_L 为：

$$I_L = I_{SC} - I_d \quad (2-15)$$

2.3.3 太阳能光伏电池板的工作特性^{[27][28][29]}

太阳电池的 V-I 特性可如图 2-9 所示，这是在某一确定的日照强度和温度下，太阳电池的输出电压和输出电流之间的关系。从 V-I 特性可以看出，太阳电池是输出电流在大部分工作电压范围内近似恒定，在接近开路电压时，电流下降率很大。

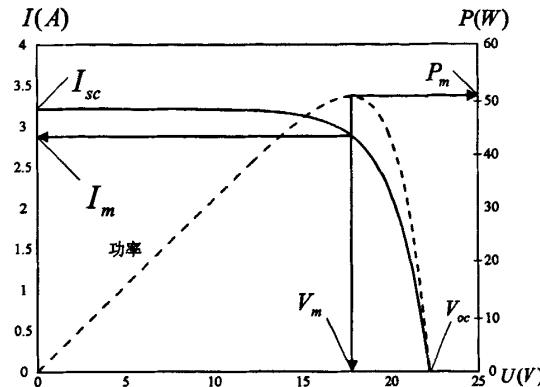


图 2-9 太阳电池 V-I 特性曲线

对应太阳电池特性曲线，其相应的几个最重要参数定义如下：

1. 短路电流 I_{sc} , 在给定温度和日照强度下所能输出的最大电流；
2. 开路电压 U_{oc} , 在给定温度和日照强度下所能输出的最大电压；
3. 最大功率点电流 I_m , 在给定温度和日照强度下相应于最大功率点的电流；
4. 最大功率点电压 V_m , 在给定温度和日照强度下相应于最大功率点的电压；
5. 最大功率点功率 P_m , 在给定温度和日照强度下可能输出的最大功率，

$$P_m = I_m \cdot V_m$$
。

光伏电池的输出功率具有很强的非线性，环境因素影响很显著，尤其是光照和温度。太阳电池的伏安特性随日照强度 S 和电池温度 T 的变化而变化。不同日照和温度下表现出的电压-电流(V-I)和电压-功率(V-P)特性，如图 2-10 和 2-11 所示。

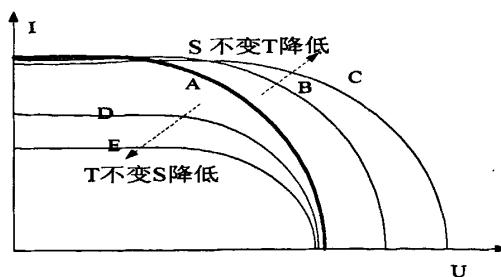


图 2-10 不同日照和温度下 V-I 特性曲线

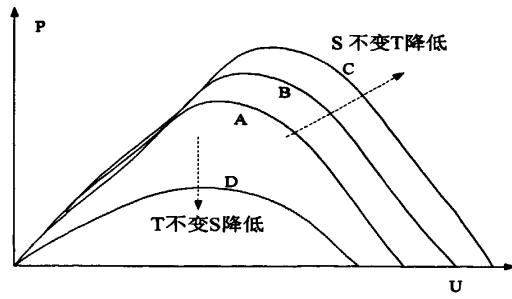


图 2-11 不同日照和温度下 V-P 特性曲线

图 2-10 中反应电压-电流($V-I$)特性受环境的影响。在一定温度和光照下，太阳能电池的输出特性为 A 曲线，当日照强度 S 不变温度 T 降低时，输出特性向 B、C 方向变化，当温度 T 不变而日照强度 S 减小时，很明显特性曲线向 D、E 方向变化。

图 2-11 则反应电压-功率($V-P$)特性受环境的影响。在一定温度和光照下，太阳能电池的输出特性为 A 曲线，当日照强度 S 不变温度 T 降低时，输出特性向 B、C 方向变化，当温度 T 不变而日照强度 S 减小时，很明显特性曲线向 D 方向变化。

由太阳能电池的 $V-I$ 、 $V-P$ 特性曲线可知，要想充分利用太阳能电池板，就要使输出功率跟踪最大功率点，这就需要 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 控制来实现，控制策略将在第三章进行详细的描述。

2.4 蓄电池

在小型风光互补发电系统中，蓄电池是必不可少的辅助设备。蓄电池是整个发电系统中主要起三个作用：一是储能，由于自然风和日照是不稳定的，在风、日照充足的条件下，可以存储供给负载后多余的电能，在风力、日照不佳的情况下，可以输出电能给负载；二是稳压，风力发电机的转速和输出电压的大小取决于风速的大小，由于自然风的变化极大，随机性强，使得电压浮动范围很大，通过蓄电池调节，供电电压可以保持稳定；三是风光互补，风力发电与光伏发电是两个独立发电系统，它们在某个时刻的发电强度有很大差别，利用蓄电池可以将二者产生的电能结合起来，实现二者的互补。蓄电池容量配置是否合理，对小型风光互补发电的技术经济指标影响很大。容量选小了，系统发出多余的电量得不到储存；容量选大了，一则增加投资，二则蓄电池可能会长期处于充电不足的状态，直接影响使用的效率和寿命。

在常用的蓄电池中，主要有铅酸蓄电池、碱性镍蓄电池和铁镍蓄电池。其中铅酸蓄电池价格低廉、性能可靠、安全性高，且技术上又不断进步和完善，在小型风力发电及光伏发电中得到了广泛的应用。本文设计的小型风光互补发

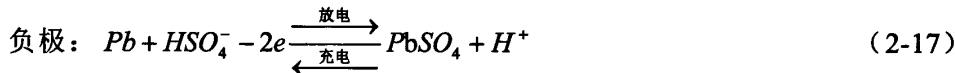
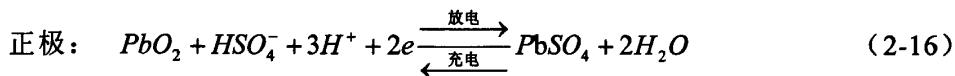
电系统选用铅酸蓄电池作为储能装置。

铅酸蓄电池的容量是把完全处于充电状态的铅酸蓄电池，按一定的放电条件，放电到所规定的终止电压为止，能够释放的电量用安时（ $A \cdot h$ ）表示。

2.4.1 铅酸蓄电池的工作原理^{[30][31][32]}

依据哥来德斯东和特利浦双硫酸化理论：铅酸电池释放化学能的过程（放电）是负极进行氧化，正极进行还原的过程；铅酸电池补充化学能（充电）的过程则是负极进行还原，正极进行氧化的过程。

铅蓄电池充电时，正极上的硫酸铅氧化成二氧化铅(PbO_2)，负极上的硫酸铅还原成金属铅；放电时正、负两极都生成硫酸铅($PbSO_4$)这种硫酸盐。该过程可用化学反应方程式^[30]表达如下：



铅酸蓄电池的放电反应和充电反应互为可逆反应。放电反应消耗电解液中的硫酸(H_2SO_4)，生成水(H_2O)，结果是硫酸溶液的浓度降低。充电时极板中的硫酸铅转变成铅和二氧化铅，产生硫酸，浓度又逐渐升高，最后达到稳定值。因此，可以用电池中硫酸溶液的密度(浓度)来判断电池充放电的程度。

充电时，特别是充电后期，会电解水生成氢气和氧气；电极上发生的电化学反映如下：



因此在电压升高时，电能主要消耗在电解水方面，而且对极板活性物质很不利，所以在系统运行过程中要对蓄电池进行过充电保护。

2.4.2 铅酸蓄电池的充放电特性^{[30][31][32]}

在铅酸蓄电池充放电过程中，电池端电压的可以表示如下：

$$\text{充电: } U = E + \Delta\varphi_+ + \Delta\varphi_- + IR \quad (2-22)$$

$$\text{放电: } U = E - \Delta\varphi_+ - \Delta\varphi_- - IR \quad (2-23)$$

其中 U 为充放电时电池的端电压 (V)； $\Delta\phi_+$ 为正极板的超电势 (V)； $\Delta\phi_-$ 为负极板的超电势 (V)； I 为充、放电电流 (A)； R 为电池的内阻 (Ω)。充放电时电池的电压变化曲线如图 2-13 所示^[30]，

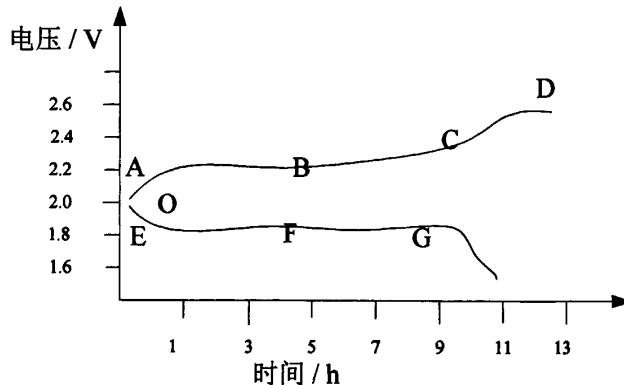


图 2-12 铅酸蓄电池充放电时电压变化

从图 2-12 可以看出，在充电开始时，首先在 OA 处电压急剧上升，其次沿 ABC 线电压缓慢上升，延续较长时间，到达 C 点之后电压很快上升，水被电解，负极析出氧气，正极析出氢气，此时 D 点电压约为 2.6V。放电时，开始电压下降较快，到 E 点后电压缓慢下降。过了 F 点后在 1.8V 附近 (G 点) 电压又急剧下降。形成这一现象的原因，首先由于放电的进行，酸浓度降低，引起电池电动势降低；其次是由于活性物质的不断消耗，反映面积减小，从而极化不断增加；此外还由于生成物硫酸铅的不断增加，硫酸铅的导电性能很差，酸浓度的降低，导致电池内阻不断增加。

2.5 控制器及负载部分

小型风光互补发电系统的负载部分一般有交流负载和直流负载，给交流负载供电，需要先通过一个逆变器逆变成需要的交流电，由于篇幅有限，这里就不过多的介绍了。

控制器担任着小型风光互补发电系统的电能变换功能，是系统的控制核心，也是本论文的设计的重点，将在论文的后面章节进行重点介绍。

本章小结：

本章首先介绍小型风光互补发电系统的结构，然后分析系统各个组成部分的工作原理及其运行特性。

第三章 小型风光互补发电系统控制策略

3.1 风力发电控制策略

3.1.1 风力发电的基本控制策略

前文已经提到，风力机从自然中所能索取的能量是有限的，不可能 100% 将风的动能利用，风力机的有用功率输出是 $P = \frac{1}{2} \rho v^3 S C_p$ [24]，其中 C_p 为风力机的实际风能利用系数，根据贝兹（Betz）极限理论得知 $C_p < 0.593$ 。

风能的利用系数 C_p 与风力机的叶尖速比有关，叶尖速比一般用 λ 来表示，定义为风力机叶尖旋转的圆周速度与风速之比， $\lambda = \frac{2\pi R n}{60v}$ ，其中 n 为风力机转速（转/分）， v 为风速（m/s）。

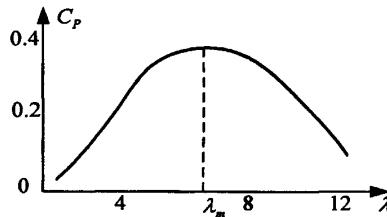


图 3-1 叶尖速比 λ 与 C_p 关系

C_p 与 λ 的关系曲线是风力机的基本特性之一，如图 3-1 所示。对于定桨矩风机来说，对于某一定值 λ_m 时， C_p 达到最大值，风力机输出最大机械功率， λ_m 称为最佳叶尖速比。提高风能的利用系数也就是要控制风机工作在最佳叶尖速比 λ_m 附近。由于风的随机性，风速经常变化，使得 C_p 经常不能工作在最大点上，风机常常处于低效状态。可以控制风机，使其变速运行，在很大的风速范围内，让 C_p 处于或接近于最大值运行，使得叶尖速比 λ 处于 λ_m 附近，实现最大程度的利用风能，也就是常说的最大功率点跟踪（MPPT）控制。

当风速达到启动风速后，风机转速由零增加到发电机的切入风速， C_p 值不断上升，风力发电机组开始发电运行。通过对发电机转速进行控制，使风力发电机进入 C_p 恒定区，保持 C_p 处于最大值，这时机组处于最佳运行状态。随着风速的增大，转速也随之增大，最终达到一个允许的最大值，这时只要功率低于允许的最大功率，转速便保持恒定即风力发电机组进入恒转速区。在恒转速区，随着风速的增大，减小 C_p 的值，保持风速不变，但功率仍然增大。达到功率极限后，风力发电机组进入恒功率区，这时随风速的增大，转速必须降低，

使叶尖速比减小的速度大于在恒转速区减小的速度，从而使得风力发电机组在更小的 C_p 值下恒功率运行^[24]。

如何获得最大能量，使风力发电系统获得最大功率成为近年来研究热点。本论文将风力发电机组运行分为两个阶段：风速低于额定风速时，为了使发电系统获得最大能量，跟踪最大 C_p （跟踪最大功率点）；风速高于额定风速时，跟踪功率曲线，保持输出稳定^[24]。

3.1.2 风力发电最大功率点跟踪控制^{[34][35][36][39]}

风力发电的最大功率点跟踪（MPPT）控制方法可以大致分为三类：叶尖速比控制、最大负载功率曲线控制、最大功率点搜索控制。

1) 叶尖速比控制

上文已经提到，叶尖速比 λ 与风能利用系数 C_p 的关系。叶尖速比控制是通过测量风速以及风机的转速，控制保持风机的叶尖速比 λ 为最优值 λ_m ，使得在任何风速下都能获得最大的风能利用系数 C_p 。这种控制方法需要测量风速和风机的转速，并作为控制系统的输入信号， λ_m 可以通过计算或实验获得。其控制框图如图 3-2 所示。

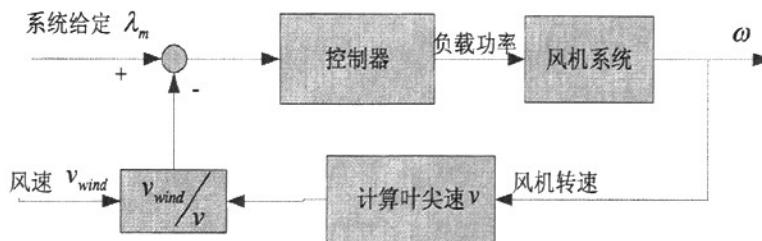


图 3-2 叶尖速比控制框图

叶尖速比控制比较简单，只要一个 PI 控制器就可以实现无静差控制，但是这种控制方法需要精确测量到达风机叶轮上的风速。由于风速在时间和空间上的随机变化，很难测得与到达风机上的风速一致的结果。若将风速计安装在风机附近，风机的转动会影响气流的运动，直接影响风速计的测量结果，若将风速计安装在相对较远的地方，准确度难以实现。测量风速的困难使得叶尖速比控制算法难于精确实现。另外，叶尖速比控制的 λ_m 在不同的系统中也不相同，它与风机及发电机的特性相关，算法的移植比较困难。因此叶尖速比控制方法在小型风力发电系统中较少采用。

2) 最大负载功率曲线控制

最大负载功率曲线控制的控制思想是已知风机输出的最大负载功率特性曲线，通过控制方法使得风机工作在最大负载功率曲线上。风机的最大负载功率曲线如图 3-3 中的实线所示，图中的虚线表示不同风速下风机的转速与风机功

率的曲线关系曲线。

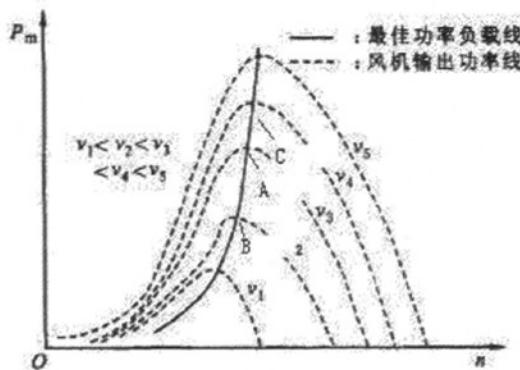


图 3-3 风机的最大负载功率曲线

最大负载功率曲线控制的软件编程更容易实现，只需将最大功率曲线以列表的方式放入系统，运用查表法很容易实现。图 3-3 中 A 点的转速为 n_A ，输出功率为 p_A ，B 点的转速为 n_B ，输出功率为 p_B 。假设当前的风速为 v_3 ，这时如果风机工作在 A 点，则风机工作在最佳状态。若风机的工作在 B 点，则 $n_B < n_A$ 即转速小于最佳转速，只需控制风机输出负载功率为 p_B ，因为 $p_B < p_A$ ，所以在风的作用下，风机的转速会逐渐增大，同时相应的改变输出负载功率，直至风机工作在 A 的最佳状态。相反，若风机工作在 C 点，同理可以得到相同的结果。最大负载功率曲线控制方法的控制框图如图 3-4 所示。

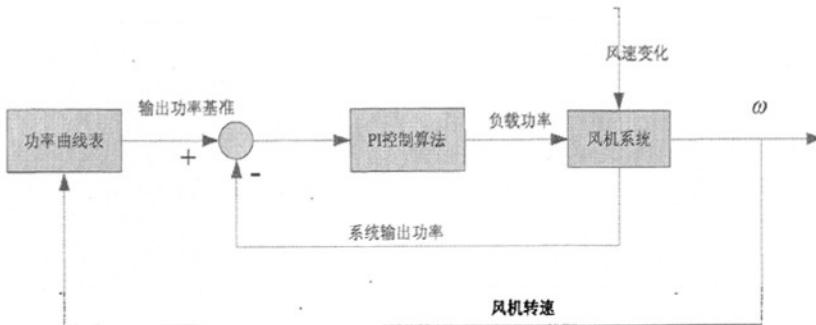


图 3-4 最大负载功率曲线控制框图

最大负载功率曲线控制要求事先测得风机转速和最大负载功率之间的关系曲线。由于不同的风机的最大负载功率曲线不同，所以算法的移植性较差，而且很难找到风机转速和最大功率之间的准确关系，这样就直接影响控制精度，但控制算法比较简单。

3) 最大功率点搜索控制^[37]

最大功率点搜索控制法又称作爬山搜索法，在某一特定风速下，风机转速与输出功率曲线如图 3-3 中的虚线所示。从图中可以看出风机的输出功率与风机转速的关系曲线是一个凸函数。在某一个风机转速下，风机输出功率达到最大值，也就是最大功率点。最大功率点搜索控制法的基本控制思想是通过搜索控制找到这个最大功率点。

本文设计的小型风光互补发电系统控制器的风力发电控制部分，在已往最大功率点搜索法控制基础上，加以改进，增加了控制精度，采用了变步长扰动的最大功率点搜索法。设在某一风速下，风机的功率输出曲线如图 3-5 所示，从图中可以看出，风机的转速 n_C 点对应这风机最大输出功率 P_{MAX} 。若风机未工作在最佳点，假设工作在 A 点。这时用步长 d_1 对风机转速进行扰动，扰动后风机的输出功率为 P_2 ，进行比较。若 $P_2 > P_A$ ，则说明扰动方向正确，继续向该方向扰动；若 $P_2 < P_A$ ，则说明扰动方向不正确，用同样的步长 d_1 ，向相反方向扰动，进行比较；若向两个方向扰动均得到 $P_2 \leq P_A$ ，则改变步长，用步长 d_2 ($d_2 < d_1$) 重复上述步骤，步长 d_2 的大小可以视实际情况而定。风机的由工作点 A 逐渐逼近最佳工作点 C 点。当步长 d 的值小于 d_{min} ($|d| < d_{min}$) 时，停止扰动，此时风机近似工作在最大功率点附近。其控制框图如图 3-6 所示。

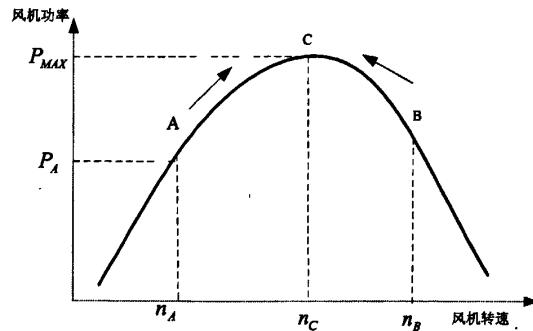


图 3-5 风机的功率输出曲线

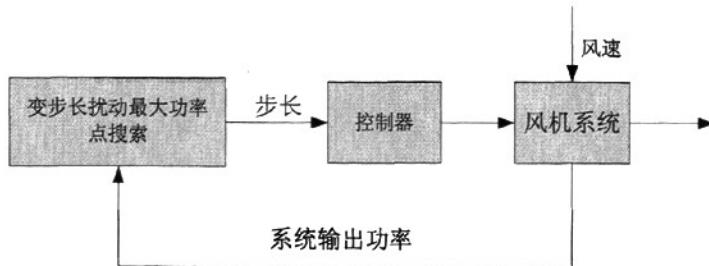


图 3-6 最大功率点搜索控制框图

最大功率点搜索控制法不需要测风速的设备，也不知道风机的准确功率特性曲线，系统有自动跟随与自适应的能力。在这种控制方案控制下，即使风速稳定，发电机最终的功率输出也会有小幅度的波动，这种波动是系统调节上的需要，不可消除的，也是这个控制算法的一个缺点，但是，与一般的闭环控制系统不同，风力发电系统由于受风速的随机性与波动性的影响，其输出一般不需要十分高的精度与稳定，所以在允许范围内的小幅度波动是可以接受的。本文采用变步长扰动法，在一定程度上降低了这种波动幅度。

3.2 光伏发电的最大功率点跟踪控制策略

由前面介绍的光伏电池的工作特性可知，光伏电池板的输出是非线性的，而且输出受光照强度、温度和负载特性的影响。实时控制调节光伏电池的输出电压，使其工作在最大功率点电压处，从而保证太阳能光伏电池板的输出功率保持最大值，这种控制方法就是最大功率点跟踪法。下面将介绍两种光伏发电常用的最大功率点跟踪控制策略：恒压控制法(Constant Voltage Tracking - CVT) 和扰动观察法(Perturb and Observe methods, P&O)，然后介绍本文光伏充电采用的方法。

1) 恒压控制法

在一定温度下，光伏电池板在不同光照强度下的最大功率点总是近似的处于某一恒定的电压值 V_M 附近，在这一点电池板输出的功率为 P_M 。因此，只需要通过负载阻抗的匹配，使得在光伏电池板的输出电压稳定在 V_M 附近，就可以实现最大功率点控制。但是在同样的光照强度下，最大功率点还受到温度的影响，也就是说，在不同温度下， V_M 的值不是一个定值，尤其是在温度变化比较大的情况下，这种影响更为明显，这也是这种控制方法的缺陷所在。由于这种方法控制比较简单，容易实现，因此在温度变化不是很明显的情况下，经常采用。其基本控制框图如图 3-7 所示。

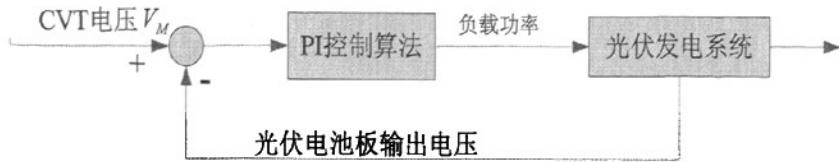


图 3-7 恒压控制法框图

2) 扰动观察法^[29]

光伏发电扰动观察法和上文风力发电控制中提到的最大功率点搜索法相似，是目前常用的 MPPT 控制方法之一。其原理是每隔一定的时间增加或者减少光伏电池端电压，并观测其后的功率变化方向，来决定下一步的控制信号。控制方程可以简述如下：

$$\begin{cases} P: U_{dc}(n) = U_{dc}(n-1) + s |\Delta U_{dc}| \\ O: \Delta P = P(n) - P(n-1) = I_{sp}(n)U_{dc}(n) - P(n-1) \end{cases} \quad (3-1)$$

式 3-1 中， $U_{dc}(n)$ —当前电压采样， $I_{sp}(n)$ —当前电流采样， s —扰动方向， $|\Delta U_{dc}|$ —电压扰动步长， $U_{dc}(n-1)$ —前一次电压值， $P(n)$ —当前计算功率， $P(n-1)$ —前一次计算功率， ΔP —功率之差。

扰动观察法的控制方程可以分为两个方程：P 方程（扰动方程）和 O 方程（观察方程）。P&O 法先扰动光伏电池输出电压值，再对扰动后的光伏电池输出功率进行观测，与扰动之前功率值相比，若扰动后的功率值增加，则扰动方向 s 不变；若扰动后的功率值减小，则改变扰动方向 s 。其控制框图如图 3-8 所示。

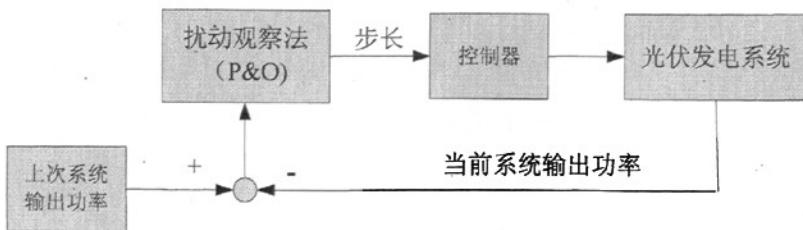


图 3-8 扰动观察法控制框图

这种控制方法的最大优点在于其结构简单，被测参数少。其缺点是由于始终有“扰动”的存在，其输出会有一定的微小波动，在最大功率跟踪过程中将导致些微功率损失，同样为了增加控制的精度，可以采用变步长扰动观察法。

2) 本文采用的控制方法

上述两种控制方法各有优缺点，前者控制简单，但受温度影响较大，后者

可以跟踪不同温度下的最大功率点，但是存在波动，不利于系统的稳定。根据实际需要，本文将二者结合起来，控制思想如下：首先根据经验值 V_M ，采用 CVT 启动，因为 CVT 法有良好的启动特性，然后采用扰动观察法，取得最大功率点，这样的便获得一个最大功率点处的 V_M ，由于温度不可能突变，因此在一定时间内，光伏发电系统的 V_M 基本保持不变；然后采用 CVT 法，将系统的输出电压控制在测得的 V_M 附近。过一段时间后，重复上述步骤，实现光伏发电系统最大功率输出控制。

3.3 蓄电池充电控制策略

蓄电池的寿命直接影响发电系统的使用成本。影响蓄电池寿命的因素很多，研究发现：电池充电过程对电池寿命影响最大，放电过程的影响较少。也就是说，绝大多数的蓄电池不是用坏的，而是“充坏”的。由此可见，对蓄电池的充放电控制很重要，采用正确的充放电方式，能有效延长蓄电池的使用寿命，降低使用成本。

3.3.1 蓄电池的充电方法^{[30][31][39]}

蓄电池的充电方法一般可以分为三种：恒流充电、恒压充电和分段式充电。

1) 恒流充电

蓄电池恒流充电就是控制蓄电池的充电电流，使其保持在一个恒定值附近。这种充电方法开始充电阶段电流过小，而在充电后期充电电流又过大，整个充电时间较长，这种方法已经很少采用了。可以对这种方法进行改进，即分段式恒流充电，就是为了避免后期充电电流过大，在充电后期时，将充电电流减小。

2) 恒压充电

恒压充电就是对蓄电池以某一恒定电压进行充电，因此这种方法的初期充电电流相当大，随着充电过程的进行，电流逐渐减小，在充电的终期只有很小的充电电流，在充电过程中不要调整电流，充电电流自动减小。这种方法在蓄电池的充电初期，电流很大，可能会损坏蓄电池。

在这种方法的基础上，产生了改进的恒压限流充电方法。即在充电回路串联一个电阻，称为限流电阻。当充电电流大时，限流电阻的压降会增大，这样就降低了蓄电池两端的充电电压，当电流小时，限流电阻上的压降变小，从而增加蓄电池两端的充电电压，自动调整充电电流，也称作准恒压充电法。

3) 分段式充电

分段式充电方法就是将整个充电过程进行分段控制，每一段采用一种充电方法。根据蓄电池的特性可知，在蓄电池电压较低时，其接受电流的能力较强，允许充电电流较大；随着蓄电池电压的上升，其接受电流的能力逐渐减弱。为了保护蓄电池，必须降低充电电流，其理想充电电压电流曲线如图 3-9 所示。

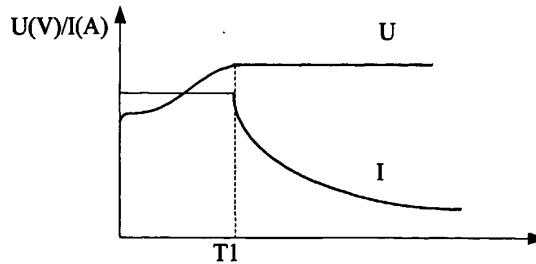


图 3-9 蓄电池理想充电曲线

T1（一般可以通过蓄电池电压来确定，表示蓄电池当前的荷电状态）时刻之前，蓄电池接受电流能力较强，采用恒流充电，也就是使用大电流给蓄电池充电；到达 T1 时刻后，蓄电池电压较高，接受电流能力下降，此时采用恒压给蓄电池充电。这种充电方法考虑了蓄电池的特性，能够合理快速地给蓄电池充电，是目前较多采用的蓄电池充电方法，控制器采用该方法对蓄电池进行充电。

3.3.2 蓄电池的运行方式^[30]

要想实现对蓄电池的合理快速充电，必须首先弄清楚蓄电池的运行方式。蓄电池组一般有三种运行方式：充放电制（循环制）、连续浮充制和半浮充制。

1) 充放电制

充放电制也称循环制，蓄电池的工作方式是：完全放电，然后充电，再完全放电、再完全充电如此循环。这种工作方式多用于移动型、小容量的便携蓄电池，如蓄电池车、手提式工具等。

2) 连续浮充制

连续浮充制就是昼夜就将蓄电池组和整流设备相连，并且安装在负载回路上。平时负载用电由整流设备提供，蓄电池保持少量的充电电流。当整流设备出故障时，蓄电池来给负载供电，保证负载供电不中断，一般在 UPS 电源中使用较多。

3) 半浮充制

半浮充制就是负载一段时间由蓄电池供电，另一段时间由整流设备供电，并且这段时间给蓄电池补给电量。

本文的小型风光互补发电系统中的蓄电池近似的工作在这种半浮充运行方式。

3.4 本文设计的小型风光互补总体控制方案

风能的随机性较强，不可能随时都保持较高的输出电压，有时输出电压过高，有时没有风，输出电压为零。光照强度也存在一定的不确定性，例如阴雨

天，很难达到理想的光照强度，因此很难实现蓄电池的理想充电方案。结合上述的风力发电控制方法、光伏发电控制方法以及蓄电池分段式充电方法的各自特点，可以对充电控制策略进行改进，使其满足小型风光互补发电系统的要求。

本文设计的小型风光互补发电系统，风力发电充电电路与光伏发电充电电路是两个独立的充电模块，二者互不影响，可以进行单独充电控制。由于光伏发电相对比较稳定，而风力发电波动性比较强，因此将光伏发电的充电电流 I_{SOLAR} 作为蓄电池充电电流的基础部分，所谓的基础部分不是说光伏发电占发电总量的绝大多数，恰恰相反，本系统以风力发电的供电为主，也就是说，在充电过程中优先选用光伏充电（因为它稳定），在光伏充电电流 I_{SOLAR} 的基础上，控制风力发电充电电流 I_{wind} ，使得满足蓄电池充电的要求，蓄电池的充电电流 $I_{battery}$ 满足： $I_{battery} = I_{SOLAR} + I_{wind}$ 。

结合蓄电池充电策略，将蓄电池充电过程分为三个阶段，如图 3-10 所示，具体的充电过程如下：

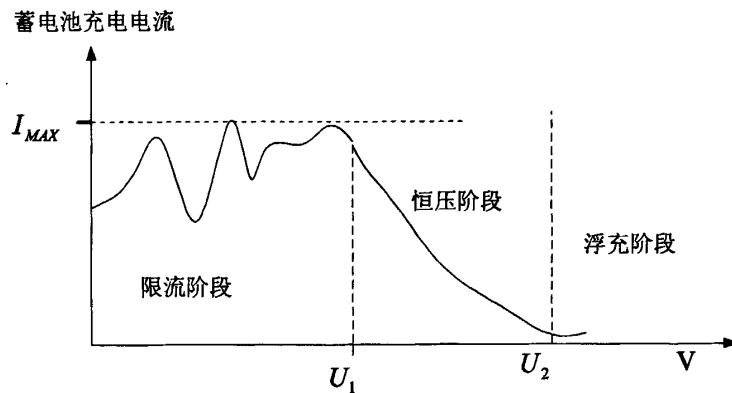


图 3-10 蓄电池实际的充电电流曲线

1) 限流充电阶段：就是蓄电池理想充电的恒流充电阶段。由于风能、太阳能的不确定性，很难实现理想的恒流充电方式，所以充电电流是一个不确定的波动过程，采用限流充电的电流最大上限 I_{MAX} 可以设定为理想充电的恒流值，或略高一点。这时光伏发电采用 MPPT 控制，使光伏太阳能电池板工作在最大功率点附近，最大程度利用太阳能；风力发电部分在满足 $I_{battery} = (I_{SOLAR} + I_{wind}) \leq I_{MAX}$ 的情况下采用最大功率点跟踪控制方式，尽可能多的利用风能发电，当

$I_{battery} > I_{MAX}$ 时，放弃风力发电的 MPPT 控制，必须舍弃一部分风机功率，维持充电电流小于等于限定值 I_{MAX} 。

2) 恒压充电阶段：一般当蓄电池容量达到 95% 时，就要采取恒压充电。在这个阶段，要控制保持蓄电池的充电电压为一个恒定值。可以分别控制风力发电和光伏发电使其给蓄电池充电的电压满足这个要求，控制比较简单，只需一个 PI 控制即可。当蓄电池充电电流减小到 $C/100$ (C 为蓄电池容量) 时，表明蓄电池充满。

3) 浮充阶段：在蓄电池充满后，蓄电池进入了浮充阶段，在这个充电阶段，为了弥补由于蓄电池自放电造成的储能损失，蓄电池电压保持浮充电压。充电控制器为了保证蓄电池在浮充电压上，通过调节电流使之维持在这个电压水平。

本文设计的小型风光互补发电系统也可以做智能充电器来使用。即当蓄电池充满后，若风能和太阳能资源丰富，仅采用浮充，浪费了大量的能量，这时可以更换备用蓄电池，充分存储电能以作备用。

蓄电池电池的过充和过放都会影响其寿命，当蓄电池放电严重，电压过低时，同样会损坏蓄电池，这时本系统采取的策略是通过继电器断开放电回路，当电压回复时，再重新打开放电回路。为了保持系统稳定工作，本系统还采用一个蓄电池放电电压滞环控制，从而防止了蓄电池过放。

本章小结：

本章主要介绍风力发电、光伏发电以及蓄电池充电的控制策略，并在此基础上，根据实际小型风光互补发电系统的要求，设计一套整体的控制方案。

第四章 小型风光互补控制器的设计

4.1 控制器的框图

本文设计的小型风光互补发电控制器用于图 4-1 所示的小型风光互补发电系统，框图如图 4-2 所示，可以分为：电源、DC/DC 变换器、开关管驱动电路、检测电路、单片机控制电路、状态显示以及卸载电路等。

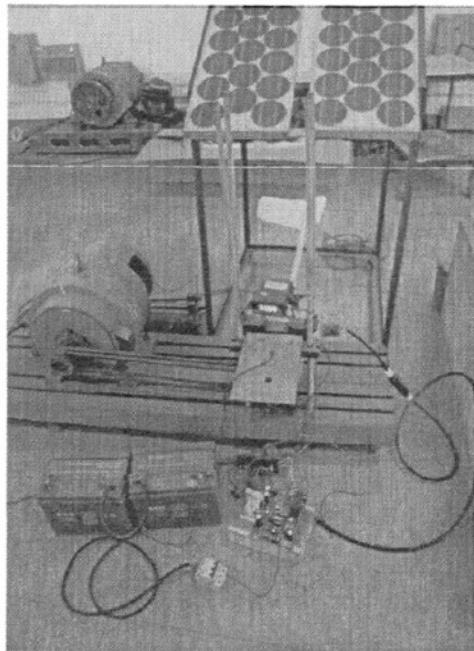


图 4-1 小型风光互补发电系统

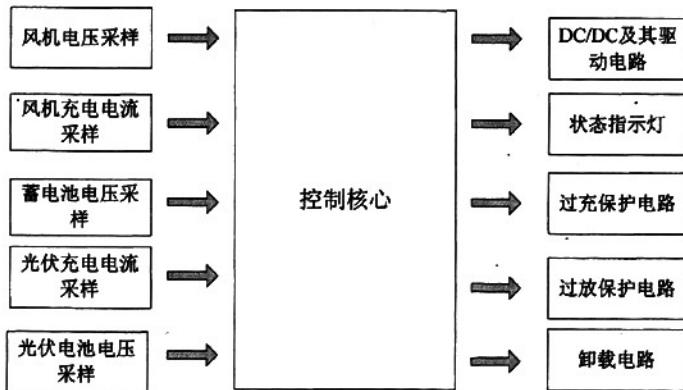


图 4-2 小型风光互补发电控制器框图

4.2 控制器硬件电路设计

4.2.1 单片机及其外围控制电路

采用 Microchip 公司的 dsPIC30F2010 单片机作为主控芯片。该单片机是 28 引脚增强型 16 位闪存数字信号控制器，CPU 是改进哈佛结构，最大工作速度支持 30MIPS，带有 6 个 10 位模数转换器（ADC）和电机控制 PWM 模块^{[43][44]}。图 4-3 所示为是单片机及其外围电路。

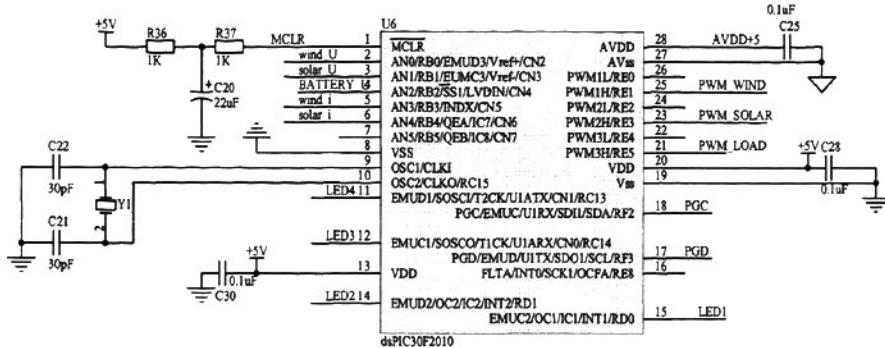


图 4-3 单片机及其外围电路

4.1.2 电源

控制器中不同模块电路的供电电压等级不同，主要有 5V、15V、17V 等几个电压等级，而且要求相互隔离。小型风光互补发电系统是一个独立供电系统，因此需要设计一个开关电源来满足整个控制器的供电需求。

本文设计的是以 UC3844 为核心的反激式开关电源。下面先简要介绍一下 UC3844 芯片，其内部结构图如图 4-4 所示^[45]。

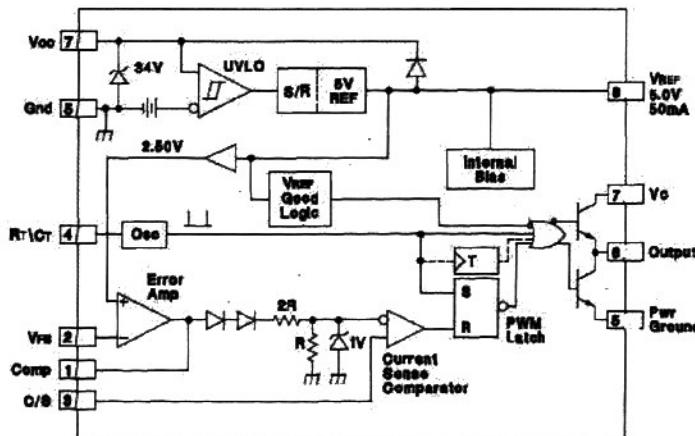


图 4-4 UC3844 内部结构图

UC3844 作为一个单端输出控制电流型脉宽调制器，它输出的 PWM 信号的占空比最大为 50%。从图中可以看出，它共有 8 个引脚，1 和 2 脚和内部误差放大器构成电压闭环。3 脚利用电流测定比较器构成电流闭环，当 3 脚的输入

电压高于 1V，封锁芯片的输出，这样可以起到保护的作用。6 脚为输出引脚，输出 PWM 信号。4 脚的电阻电容匹配主要来控制 PWM 的频率，频率 f 计算方法：

当 $R_T > 5K$ 时， $f \approx \frac{1.72}{R_T C_T}$ 。8 引脚为 5V 的基准电压输出，5 引脚为地^[44]。

本文设计的反激式开关电源如图 4-5 所示。输入采用蓄电池的 24V 输入，根据需要共设有四路隔离输出。其中第一路输出为 15V，这一路输出共有三个作用：1. 为开关电源的电压闭环提供反馈电压；2. 为 78M05 提供输入电压；3. 为放大芯片 LM324 供电。剩下三路输出为 17V，分别为光伏发电、风力发电和卸载电路的开关驱动电路供电（至于为什么采用 17V，将在下面驱动电路小节详细介绍）。R9 和 E4 构成了启动电路，7 脚电压超过 16V 时 UC3844 开始起振，即开关电源开始工作。R10、R7、D7 构成了尖峰吸收电路，保护 MOSFET 的不受到冲击。开关电源是一个干扰很大的模块，会影响 AD 采样的精度，图中的磁珠的作用就是吸收高频干扰，保证 AD 采样的不受干扰。

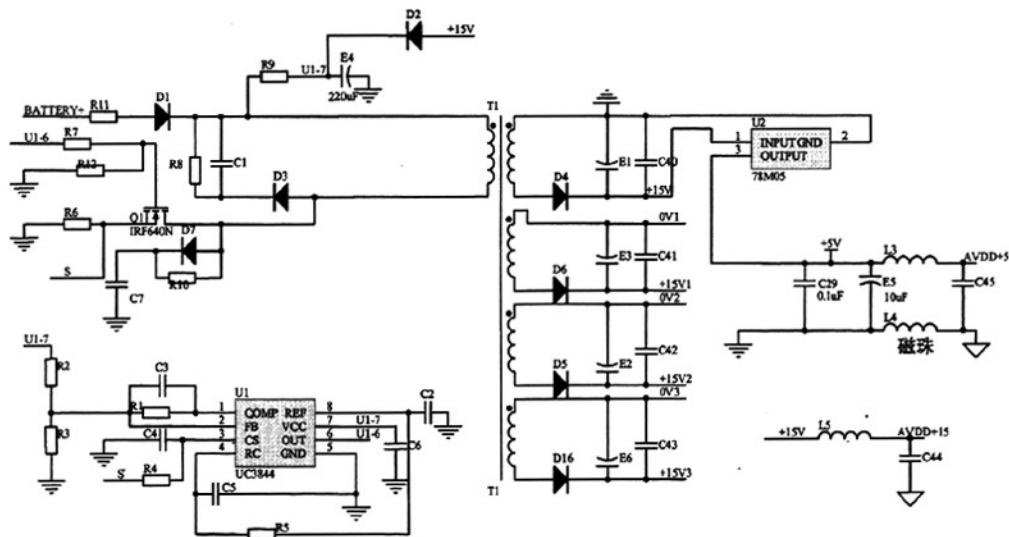


图 4-5 反激式开关电源

利用 UC3844 设计的反激式开关电源，原边电压出现波动时，电压闭环起作用，保证了输出的稳定。当出现过流时，UC3844 会立即封锁输出，有过流保护的作用。UC3844 芯片的开启阈值为 16V，关闭阈值为 10V。开启阈值和关闭阈值之间有 6V 的差值，可以避免芯片在工作点产生振荡。

4.1.3 DC/DC 变换器

本文设计的 DC/DC 直流变换器采用具有缓冲电路的 Buck 变换器。下面首

先介绍缓冲电路。

缓冲电路又称吸收电路，其作用是抑制电力电子器件因过电压、 du/dt 或者过电流和 di/dt ，产生的开关损耗。缓冲电路可分为关断缓冲电路和开通缓冲电路。关断缓冲电路又称为 du/dt 抑制电路，用于吸收器件关断过电压和换相过电压，抑制 du/dt ，减小关断损耗。开通缓冲电路又称为 di/dt 抑制电路，用于抑制器件开通时的电流过冲和 di/dt ，减小器件的开通损耗。一般情况下缓冲电路专指关断缓冲电路，开通缓冲电路称作 di/dt 抑制电路^[42]。

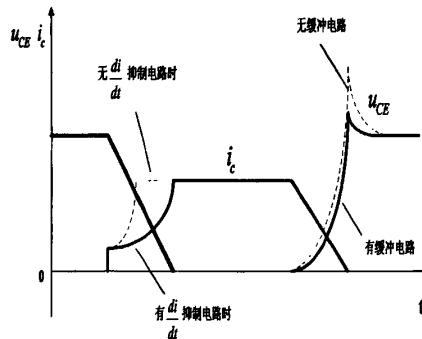


图 4-6 di/dt RCD 缓冲电路的波形

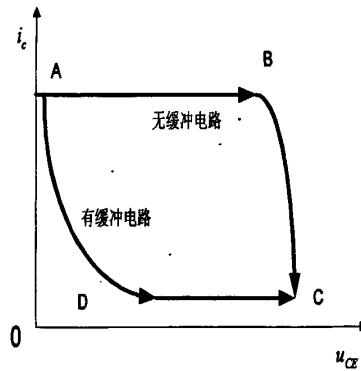


图 4-7 关断时的负载曲线

从图 4-6 中可以看出，为了减少开关器件的冲击及损耗，系统可以设计缓冲电路。图 4-7 给出了关断时的负载曲线，若无缓冲电路，开关器件关断时的负载曲线由工作点 B 突然下降至 C 点，当有缓冲电路时，负载延 ADC 缓慢减小。

本文设计的控制器采用带有 RCD 型关断缓冲电路的 Buck 变换器，如图 4-8

所示。它的工作原理如下：通过在功率开关管的控制端施加周期一定、占空比可调的 PWM 驱动信号，使其工作在开关状态。当开关管 Q2 导通时，二极管 D9 截止，给蓄电池充电，同时使电感 L1 能量增加；当开关管截止时，电感释放能量使续流二极管 D9 导通，在此阶段，电感 L1 把前一段的能量向负载释放，使输出电压极性不变且比较平直。滤波电容 C12 使输出电压的纹波进一步减小。显然，开关管在一个周期内导通时间越长，传递的能量越多，输出电压越高。其中 R42、C31 和一个二极管构成了 RCD 缓冲电路，对 MOSFET 的冲击起到缓冲作用。

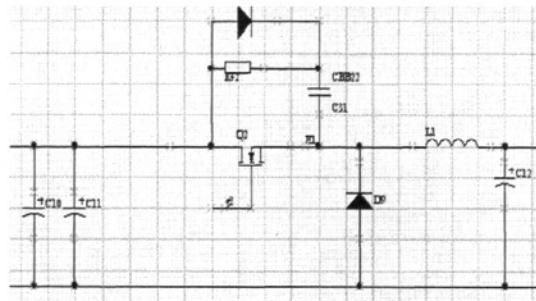


图 4-8 带缓冲电路 BUCK 变换器

4.1.4 开关管驱动电路

控制器中有三个 MOSFET，分别作为风力发电 DC/DC 电路、光伏发电 DC/DC 电路和卸载电路的功率开关管使用，它分别拥有一个驱动电路，其结构相同，驱动电路如图 4-9 所示。

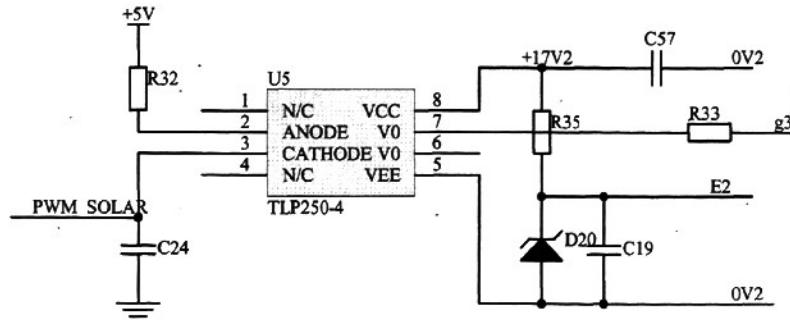


图 4-9 MOSFET 驱动电路

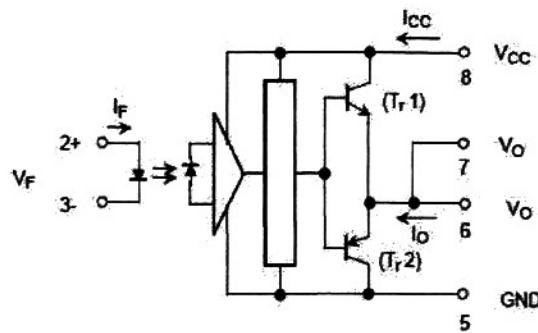


图 4-10 TLP250 内部结构

由图 4-9 中可以看到, 驱动电路采用 TLP250 光耦来隔离单片机的 PWM 信号和开关管驱动信号; +17V 为光耦的供电的正端 17V, 0V 为供电的负端 0V, 采用电压 17V 供电也是为了保证输出有足够的驱动能力; D20 为一个 5V 稳压管; 驱动信号的输出 g3 接开关管的栅极 g, E2 接开关管的源极 s。TLP250 的内部结构如图 4-10 所示^[49]。

该驱动电路的工作原理叙述如下：光耦的 2 引脚接上拉电阻，3 引脚输入单片机的 PWM 信号。当光耦输入为低电平时，光耦内部发光二极管点亮，这时 T_1 导通 T_2 关断，因此 g3 点的电位为 +17V,E2 点的电位是 +5V，g3 与 E2 的电位差是 +12V，+12V 为开光管导通提供驱动信号。当光耦输入为高电平时，这时 T_1 关断 T_2 导通，因此 g3 点的电位为 0V,E2 点的电位是 +5V，g3 与 E2 的电位差是 -5V，开光管栅源极提供负电压，开关管截止，实际 MOSFET 栅源极在低于 2V 就可以截止，这里采用负电压，是为了更有效的防止开关管误导通。图 4-11 为驱动信号的实测波形。

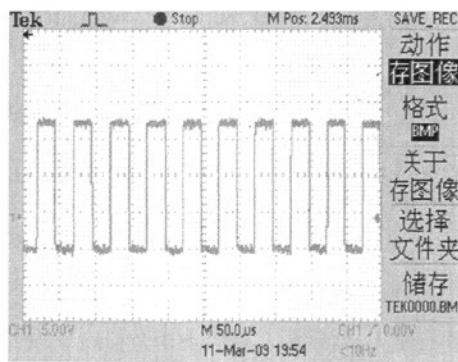


图 4-11 MOSFET 驱动信号波形

4.1.5 检测电路

控制器要对光伏电池板输出电压、风力发电整流输出电压、蓄电池电压、光伏充电电流和风力发电充电电流等量进行实时检测，从而实现控制功能。本

文设计了电压检测和电流检测两种电路。

图 4-12 所示为电压检测电路，采样点电压由 R_1 和 R_2 分压后，经过一个电压跟随器输出，然后将输出送到单片机的 AD 采样引脚。

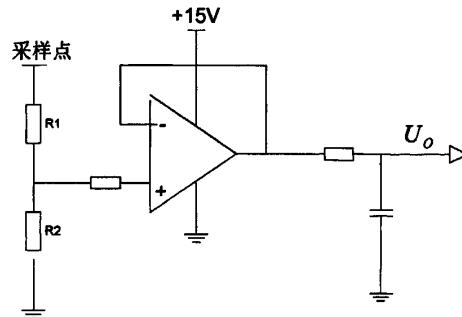


图 4-12 电压检测电路

电流采样使用了 ACS706ELC-20A 的电流传感器，其输出特性如图 4-13 所示^[48]，由图可知该芯片的输出电压与输入的电流有很好的线性关系。当电流在 -20A 至 20A 之间时，输出电压为 0.5V-4.5V，当电流为零时，芯片输出 2.5V 电压。将电流传感器的输出送到单片机的 AD 采样即可实现电流检测。

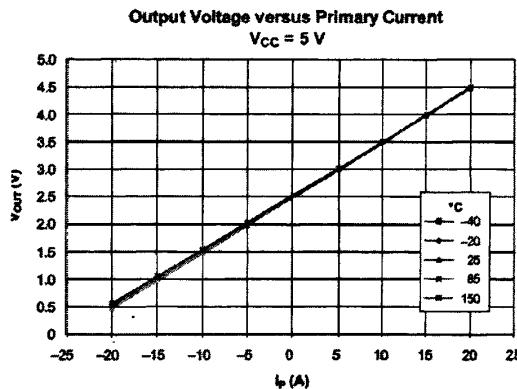


图 4-13 ACS706ELC-20A 的输出特性

图 4-14 所示为控制器启动时，电流采样的实验波形，其中信号 4 为电流波形，信号 1 为电流采样输出波形。从波形可以看出，电流为 0A 时采样电压是 2.5V，随着电流到达 5A 时，采样值为 3V，之后电流维持在 5A 左右，电流采样输出为 3V 左右。可见该采样芯片采样电流值满足预期要求。

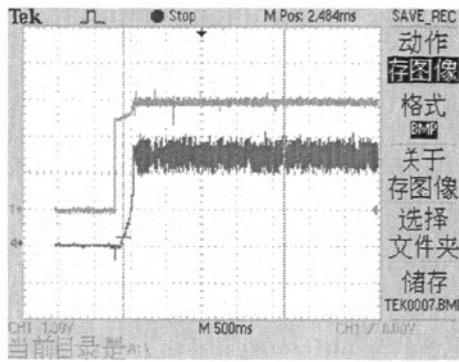


图 4-14 所示是电流采样实验波形

4.1.6 其它

本文设计的控制器除了上述的一些模块电路以外，还有卸载电路、状态显示及温控风扇等。

1) 卸载电路

卸载电路的作用是当风力很大，但没有到过速保护限值时，风机仍需要对蓄电池或负载进行供电，这是由于风机输出功率比较大，会对控制器造成很大的冲击，我们可以利用卸载电路，卸载一部分功率，从而减小由于风大对控制器造成的冲击。如图 4-15 为卸载电路，其中 R44 为消耗电阻，将卸载的功率转化成热量。

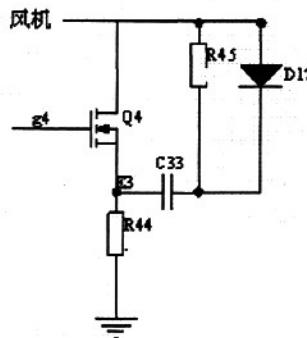


图 4-15 卸载电路

2) 状态显示

本为设计的小型风光互补发电控制器带有充电状态显示功能，采用红绿色 LED 显示。显示的状态有：控制器供电状态、风机充电、光伏充电、限流充电以及恒压充电显示等。

3) 温控风扇

控制器采用一个 24V 直流风扇和一个热控开关的结构。当控制器温度达到

规定上限时，热控开关会自动打开，风扇开始工作；当温度回落时，热控开关自动断开，风扇停止工作；从而保证控制器不会因过热导致不能正常工作。

4.2 控制器软件设计

控制器的软件设计使用 Microchip 公司的 MPLAB IDE v8.10 开发环境，MPLAB ICD2 仿真器，采用 C 语言来编写软件程序，主程序流程图如图 4-16 所示。

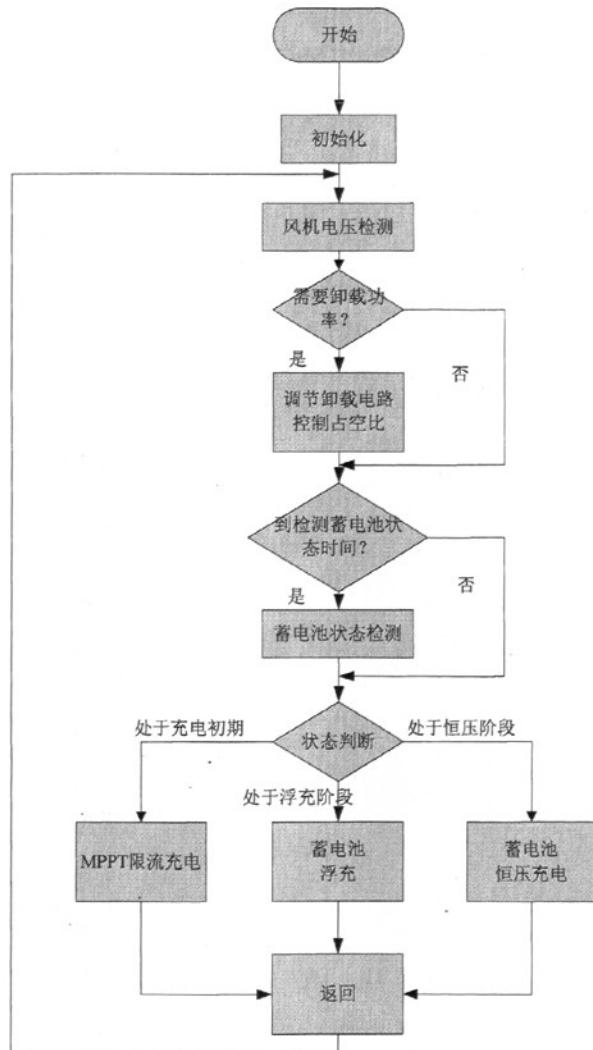


图 4-16 主程序流程图

本文的软件是结合前文的总体控制方案设计的。在主程序的开始，首先初始化电机控制 PWM 模块、AD 采样模块以及定时器等。然后，检测风机空载输出电压，当电压超过卸载限定值时，根据风机整流输出电压的值来调节卸载电

路开关管驱动信号 PWM 占空比，开启卸载电路。由于蓄电池的荷电状态是一个缓慢变化的过程，不会突变，因此可以隔一段时间检测一次蓄电池状态。当需要检测蓄电池状态时，进行 AD 采样检测，根据蓄电池状态来选择进入限流充电模式、恒压压充电模式或是浮充模式。下面分别介绍各个功能子程序。

1) 蓄电池状态判断

当检测蓄电池状态时，为了保证蓄电池稳定的工作，使其不在各状态的临界点来回波动，本文采取一个滞环控制，即进入某一状态和退出该状态的两个临界值不同，之间有一个差值。进入蓄电池状态判断子程序后，根据上次蓄电池的状态来确定状态变化的临界值，然后判断蓄电池状态是否改变。滞环控制如图 4-17 所示。

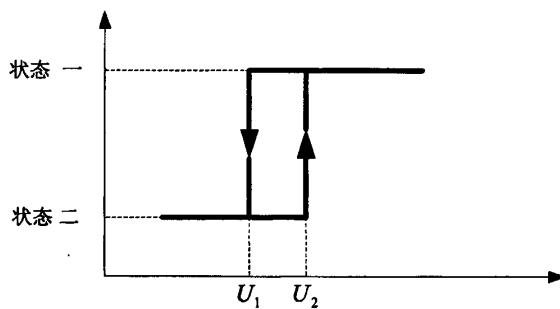


图 4-17 滞环控制图

2) 限流充电

蓄电池进入限流充电模式，光伏充电采用 MPPT 充电方法，首先使用经验值 CVT 启动光伏充电，然后进行扰动观察法获得 CVT 恒压充电的 V_M ，采用防积分饱和的 PI 控制，使得光伏电池板输出电压在 V_M 。风机充电采用限流 MPPT 控制，当充电电流未达到上限时，风机采用最大功率搜索法，获得在最大电流输出，当充电电流达到上限时，停止搜索最大功率，调节 PWM 占空比，舍弃一部分功率，实现蓄电池恒流充电。

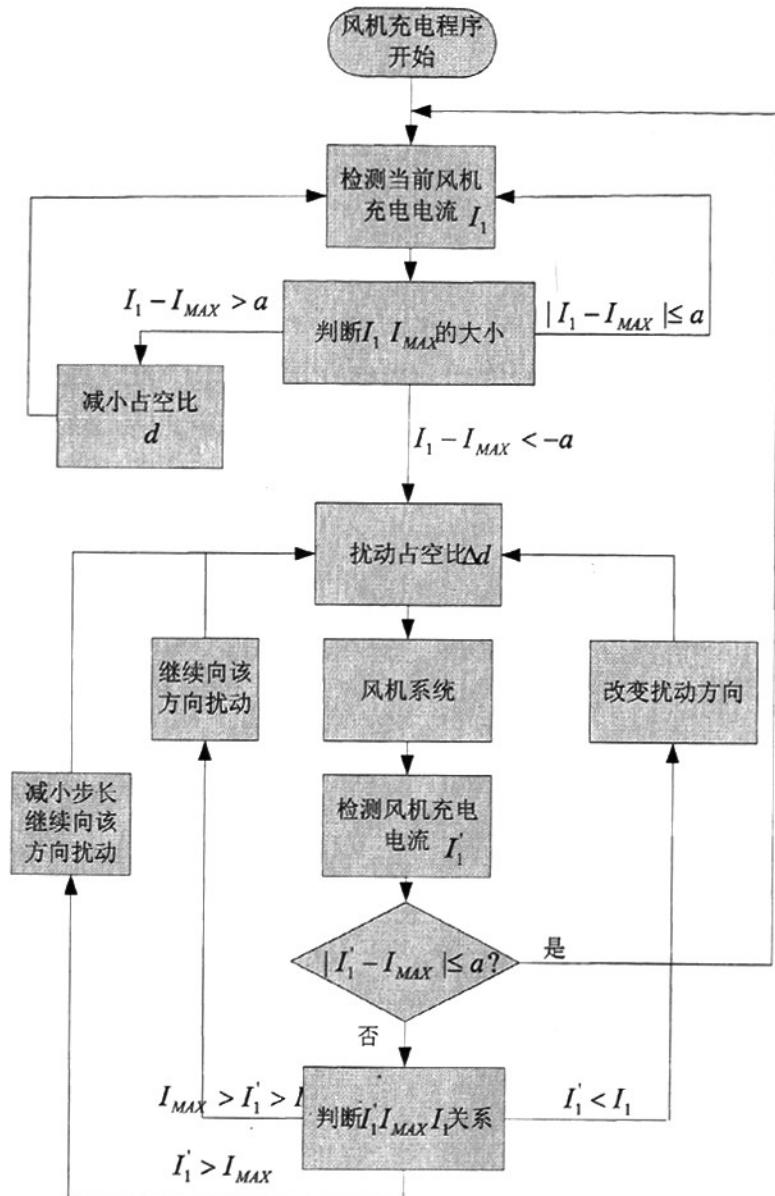


图 4-18 风机充电程序框图

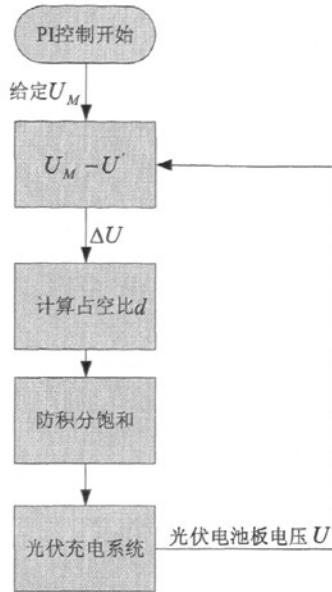


图 4-19 光伏充电 PI 控制程序流程图

图 4-18 所示为风机充电程序框图，图 4-19 所示为光伏充电中 PI 控制流程图。

3) 恒压充电

蓄电池进入恒压充电模式，控制器的恒压充电指示灯点亮。检测风机整流输出电压和光伏电压，加入 PI 环，实现风机和光伏的恒压充电。由于恒压充电电压很低，若它们的输出电压低于这个电压时，基本上蓄电池也就不充电了，所以，恒压充电实际上就是断续的恒压充电。

4) 浮充

蓄电池进入了浮充阶段，控制器的恒压充电指示灯闪烁，表明已经进入浮充阶段，这时蓄电池基本已经充满，在这个充电阶段，主要是为了弥补由于蓄电池自放电造成的储能损失，蓄电池电压保持浮充电压。

4.3 实验结果

控制器实物图如图 4-20 所示。

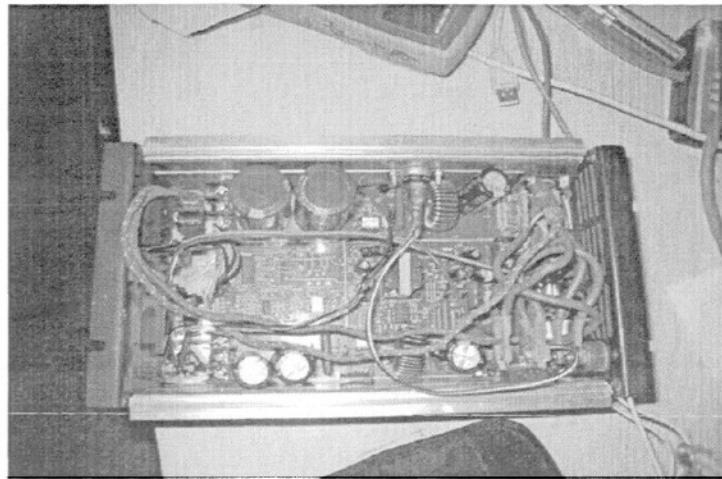
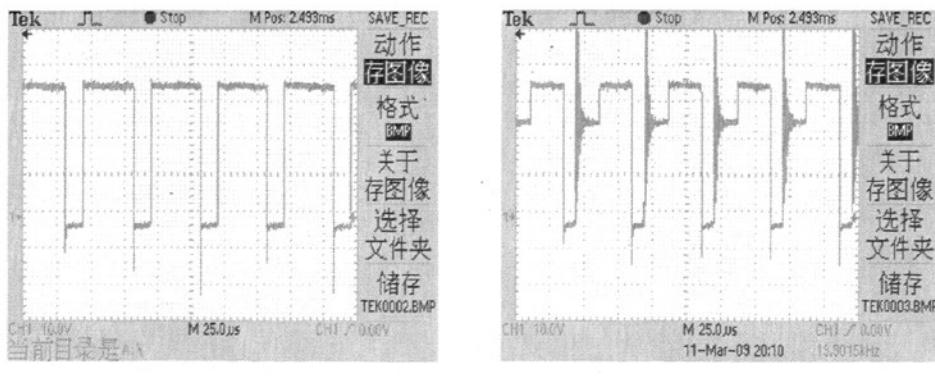


图 4-20 控制器实物图

图 4-21 为蓄电池充电时，BUCK 电路续流二极管两端的电压波形。其中图 a 为充电电流连续时续流二极管两端的电压波形，高电位为 MOSFET 导通，二极管截止的时段；低电位为 MOSFET 关断，二极管续流的时段。

当 MOSFET 的驱动 PWM 信号的占空比小于一定后，MOSFET 导通时间短，电感中储存电量不够，续流二极管两端的电压波形就会不连续，如图 4-21b 所示。与波形 a 相比，b 波形多了一个阶梯部分（该部分为电流断续部分），分析波形可得，MOSFET 导通时，续流二极管两端电压为光伏电压或风机电压，图中所示约为 35V 左右；MOSFET 关断后，二极管续流，因此二极管两端电压为二极管压降，近似为零；然后但由于电感中储存电量不够，电流出现断续，即这时电流为零，二极管两端电压为蓄电池电压约为 24V。



a) 充电电流连续时

b) 充电电流不连续时

图 4-21 BUCK 电路续流二极管两端的电压波形

图 4-22 为风机充电时风机输出电压及蓄电池充电电流波形，图中所示波形

1 为风机端电压波形，4 为蓄电池充电电流波形。在开始阶段，充电电流为零，风机空载输出电压约为 50V 左右，当充电电流增加，负载增加，风机输出端电压开始降低，当蓄电池充电电流约为 5A 时，风机输出端电压为 35V 左右。

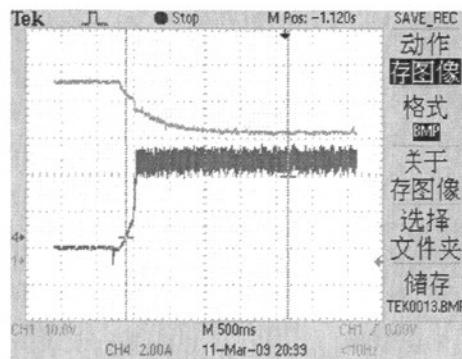


图 4-22 风机充电时风机输出电压及蓄电池充电电流波形

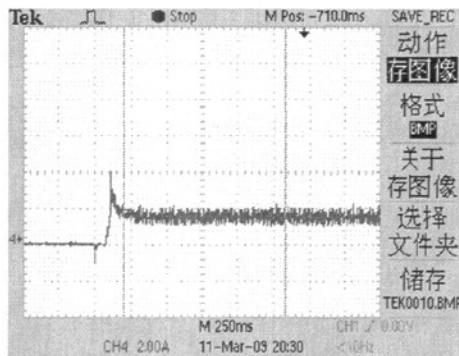


图 4-23 光伏充电启动电流波形

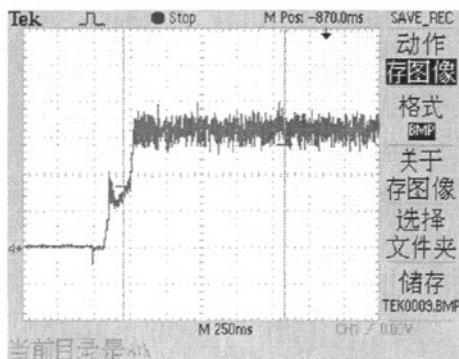


图 4-24 风机与光伏电池同时给蓄电池充电电流波形

图 4-23 为光伏充电启动电流波形，由图可以看出，启动时电流有超调，但

是由于本文设计的小型风光互补发电控制器中光伏电池板功率较小，其充电电流比重也较小，因此这点超调对蓄电池充电来说，基本没有影响。图 4-24 风机和光伏电池板同时给蓄电池充电时的电流波形，图中可以看到电流在上升阶段的尖峰部分为光伏充电的超调电流，对整个充电过程基本没有影响。

综上所述，设计的小型风光互补发电控制器，能够实现风机和光伏的互补发电。控制器具有良好的启动特性，蓄电池的充电过程能够达到预期要求，当蓄电池电压过低时能够自动启动继电器断开放电回路，实现蓄电池的过放保护。

第五章 总结与展望

5.1 总结

本文从小型风光互补发电系统的结构出发，分析了小型风力发电、光伏发电以及蓄电池充电的特点，根据实际要求，设计了一个小型风光互补发电系统控制器，达到了预期的效果。

该小型风光互补发电系统控制器主要有以下特点：

1) 控制器中风力发电和光伏发电的硬件电路相互独立，可以分别进行控制，易于实现各自的控制策略。

2) 在对风力发电、光伏发电最大功率点跟踪控制策略进行分析的基础上，根据实际情况，对控制策略进行了改进，实现了自然能源的最大程度利用。

3) 考虑到蓄电池的寿命问题，优化了蓄电池的充电控制方法。

但是由于时间有限，控制器虽然已经基本完成，但是仍有许多不足之处：

1) 控制器的实验情况仅限于实验室水平，由于条件有限，控制器未经过长时间的户外测试，仍有许多未考虑到的因素。

2) 控制器着重研究了给蓄电池充电的过程，在小型风光互补发电系统负载方面考虑得较少，这也是很重要的一点，也是控制器需要加以改进的一点。

3) 风力发电及光伏发电的最大功率点跟踪控制虽初步实现，但仍还有很大的优化空间。

4) 控制器稳定性还有待提高。

5.2 展望

风力发电、光伏发电技术受到了国内外科研工作者和应用技术人员的关注，与此同时，小型风光互补发电的应用也越来越广泛，但其中仍有很多技术问题需要进行深入的研究，主要有以下几个方面：

1、小型风光互补发电系统的风机功率、光伏电池板功率和负载功率配合问题。

2、风力发电和光伏发电的互补利用控制策略可以进一步的改进和优化。

3、蓄电池的充放电控制策略还需要深入的研究

4、系统的稳定性问题。

相信，随着科研人员的不断努力，小型风力发电、光伏发电技术的提高，控制策略的进一步改进和优化，这些问题一定能够得到解决。本论文的研究为小型风光互补发电系统的实际应用提供了基础。

参考文献

- [1] 李俊峰, 时丽, 马玲娟, 国内外可再生能源发展综述, 国际石油经济,2006, 2:35-37
- [2] 宋昭峥,丁宏霞等, 国外可再生能源发展与展望,现代化工, 2007, 5:61-64
- [3] Heather Timmons. Energy From the Restless Sea, A Renewable Source, and Clean, But Not Without Its Critics [N/OL]. <http://select.nytimes.com/gst/abstract.html?res=F30B13F63B5B0C708CDDA10894DE404482>
- [4] 王如竹, 可再生能源概论, 上海交通大学机械与动力学院, 2008
- [5] 李俊峰, 中国可再生能源政策与发展形势展望, 北京大学, 2008
- [6] 国家发展改革委员会, 可再生能源发展“十一五”规划,
- [7] 张永源, 风力发电理论与技术, 工业技术研究院(中国台湾), 2007.11
- [8] P.W.Carlin A.S. Laxson E.B.Muljadi.The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology. NREL/TP-500-28607. 2001, 1-15.
- [9] EWEA —Greenpeace. Wind Force12. Brussels, 2003
- [10] Dr. Eric Martinot. Renewables 2007 Global Status Report. A report of the REN21 Renewable Energy Policy Network (www.ren21.net).2007.11
- [11] Angela Merkel .Founding an International Renewable Energy Agency (IRENA). Germany. October 2008
- [12] IEA (2007): Renewables Information (2007 edition), Paris, 3-5
- [13] 第一情报.风力发电, 上海情报服务台 www.istis.sh.cn, 第 53 期, 2008.11.4
- [14] 可再生能源中长期发展规划, 2007.9
- [15] 赵晶 赵争鸣 周德佳, 太阳能光伏发电技术现状及其发展, 电气应用, 2007 年第 26 卷第 10 期
- [16] 沃野,我国太阳能产业现状分析及政策建议,当代经济, 2008.第四期(下)
- [17] 张伯泉, 杨宜民, 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势, 中国电力, 第 39 卷第 6 期,2006.6
- [18] 朱瑞兆, 祝昌汉, 薛衍, 中国太阳能、风能资源及其利用, 气象出版社, 1988, 168 ~ 169
- [19] 李忠实, 风光互补发电控制系统不同负载对蓄电池控制电压的影响[硕士学位论文], 天津大学, 2005
- [20] 茹美琴, 余世杰等, 风光复合发电系统交结构仿真建模研究, 系统仿真学报, 2003, 15(3), 361~364
- [21] 杨萍, 杨金明等, 新型太阳能一风能混合发电系统的研制, 华北电力技术, 2004(1), 12~15
- [22] 尹环英, 独立风光互补系统中智能交流负载管理的研究[硕士论文], 中国

科学院电工研究所, 2005

- [23] 茹美琴等, 风光柴蓄复合发电及智能控制系统实验装置, 太阳能学报, 2003.2
- [24] 叶航治, 风力发电机组的控制技术, 机械工业出版社, 2005.9
- [25] 倪受元, 风力发电讲座, <http://www.cnki.net>
- [26] 风力发电科普知识(图文版)
- [27] 沈辉, 曾祖勤, 太阳能光伏发电技术, 化学工业出版社, 2005.9
- [28] 王长贵, 王斯成, 太阳能光伏发电实用技术, 化学工业出版社, 2005.9
- [29] 汪海宁, 光伏并网功率调节系统及其控制的研究[博士学位论文], 合肥工业大学, 2005
- [30] 朱松然, 铅酸蓄电池技术(第二版), 北京: 机械工业出版社, 2002
- [31] 朱松然, 铅酸蓄手册, 天津: 天津大学出版社, 2002
- [32] 徐昌第, 柳厚田, 铅酸蓄电池-基础理论和工艺原理, 上海: 科学文献出版社 1996
- [33] Mukund R P. Wind and solar power system . Boca Raton: CRC Press ,1999.
- [34] I.K . Buehring and L.L.Freris. Control Policies for Wind Energy Conversion Systems. IEE PROC.Vol.128,Pt.C,No.5,September 1981
- [35] R. Chedid, F. Mrad and M. Basma. Intelligent Control for Wind EnergyConversion Systems, Wind Engineering, Vol.22, No.1,1998,1-16
- [36] 宋平岗,变速风力发电系统变流与优化控制研究[博士学位论文], 西南交通大学,2006
- [37] 王生铁, 张润和, 田立欣, 小型风力发电系统最大功率控制扰动法及状态平均建模与分析, 太阳能学报, 2006. 第 27 期, 第 8 卷, 829-834
- [38] 彭国平,李帅, 鱼振民,易萍虎小型风电系统最大功率跟踪的研究, 西安交通大学学报, 第 38 卷, 第 4 期, 2004 年, 357-360
- [39] 茹美琴, 风光柴蓄复合发电及其智能控制系统研究[博士学位论文], 合肥工业大学 2004
- [40] 钟勇, 风光互补发电系统中蓄电池充放电控制器的研究[硕士学位论文], 合肥工业大学 2006
- [41] 王宇, 风光互补发电控制系统的研究与开发[硕士学位论文], 天津大学 2004
- [42] 王兆安, 黄俊, 电力电子技术(第四版), 西安交通大学, 机械工业出版社, 2000.1.
- [43] Microchip 公司 dsPIC30F2010datasheet, <http://www.microchip.com/>
- [44] Microchip 公司 dsPIC30F 系列参考手册, <http://www.microchip.com/>
- [45] UC3844 datasheet, <http://WWW.ALLDATASHEET.COM/>

- [46] LM324 datasheet, <http://WWW.ALLDATASHEET.COM/>
- [47] TLP250 datasheet, <http://WWW.ALLDATASHEET.COM/>
- [48] ACS706ELC-20A datasheet, <http://WWW.ALLDATASHEET.COM/>
- [49] TLP250 datasheet, <http://WWW.ALLDATASHEET.COM/>

攻读硕士学位期间发表的论文

王群京、王涛、李国丽. 小型风光互补 MPPT 控制的研究. 电气传动.