

摘 要

随着传统能源消费的增长、生态环境的日益恶化和人类可持续发展的要求,世界各国都在积极开发无污染可再生的新能源。太阳能资源丰富、分布广泛、可以再生、不污染环境,使得太阳能光伏发电成为新能源开发中的主流。太阳能作为一种可再生能源它洁净无污染,并可持续利用,光伏发电技术也越来越受到人们的关注,随着光伏组件价格的不断降低和光伏技术的发展,太阳能光伏发电系统将逐渐由现在的补充能源向替代能源过渡。本论文以太阳能光伏发电系统为研究对象,以最大限度利用太阳能为主要目标,开展了太阳能光伏发电系统最大功率点跟踪控制的理论和试验研究。

论文首先分析了太阳能电池的模型及输出特性,针对光伏阵列提出了一种新的最大功率点跟踪法。取代传统的跟踪方法,本文采用变步长自适应算法来实现最大功率跟踪技术。根据太阳能电池的特点,在对太阳能独立发电系统及其控制策略进行深入分析的基础上,设计了一套基于 DSP 的系统控制方案。系统采用两级控制,实现了对太阳能电池最大功率点的追踪。同时对太阳能光伏系统及其控制方案进行了仿真。

针对上述分析与研究,对系统进行了设计。根据光伏系统的整体控制方案,给出了系统主电路结构及参数选择的设计思想。以 TI 公司的数字信号处理器芯片 DSP56F8032 为主控单元设计了控制电路并给出了驱动电路、保护电路的设计。

研究表明:该系统很好的实现了本文提出的控制方案所应完成的各项功能。采用此种太阳能最大功率点跟踪技术能够快速、准确、高效地进行最大功率点跟踪,抑制了太阳能电池板工作点偏移,减小了功率波动,最大限度的从太阳能电池板汲取能量。

最后给出了实验结果,证明系统的控制方法和策略具有实用性。

关键词: 太阳能电池; 光伏发电系统; 最大功率点跟踪

Abstract

With the increasing consuming of energy, the worsening of the environmental condition and the growing demand of sustainable development, many countries through out the world are eagerly searching for a new kind of regenerative and non-pollution energy. Solar resource is abundant, regenerative, non-pollution and widely distributed. At present, the solar photovoltaic(PV) power generation becomes the main form of the new energy exploitation. Photovoltaic source as renewable energy is pollution-free and inexhaustible. So photovoltaic generation technology was got more and more attention. With price reduction of PV modules and development of PV technology, the role of PV generation systems is gradually changed from supplemental energy to substitute energy. In order to promote the development of the solar power generation techniques, the research on the basal theory and the experiments on solar power generation should be carried out.

In the paper, by analyzing photovoltaic array model and its output characteristics, a new approach for tracking the maximum power point of photovoltaic arrays is presented. The maximum power point tracker are used variety step adaptive algorithm for control, rather than tradition method. Based on the characteristic of independence photovoltaic array and further research on photovoltaic system and its control strategy, a control scheme based on DSP is designed. There are two stages in the control system that can realize Max Power Point Tracking (MPPT). At the same time, the simulation result for the photovoltaic system and it's solving scheme is given in the paper.

By deep analysis and research, the system is designed. Based on the scheme of the control system, the design thought of the system's main circuit and its parameters are introduced. This paper also includes the control circuits whose core cell is TI's digital signal proecessor

DSP56F8032. The design of drive and protection circuit are introduced in detail.

The experiment results demonstrate that the system can implement the control scheme proposed in this paper perfectly. It has been proved that the control strategy presented in this paper can rapidly, accurately and efficiently track the maximum power point, restrain the diversions of the solar panel's working point, reduce the power fluctuations of control processing and get maximum power from the solar panel.

Finally, the proposed control methods are proved practicable by the results of experiments.

KEYWORDS: photovoltaic array; photovoltaic Generation system; Max Power Point Tracking

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 刘宏伟
2008年6月5日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解我校有关保留、使用学位论文的规定，即：我校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅。本人授权武汉工程大学研究生处可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ☐， 在_____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 ☒

(请在以上方框内打“v”)

学位论文作者签名： 刘宏伟
2008年6月5日

指导教师签名： 杨帆
2008年6月5日

第1章 引言

1.1 课题研究的背景

目前世界上的能源消耗几乎全靠“初级能源”或“常规能源”来供应，它包括：煤炭、石油、天然气和核裂变等。由于地球上的初级能源的资源有限、矿产开采费用越来越高、人类能源需求激增的趋势以及环境污染严重等原因，以常规能源为基础的能源结构随着资源的不断耗用将愈来愈不适应可持续发展的需要。所以新能源和可再生能源既是近期急需的补充能源，又是将来能源结构的基础。在能源领域中，加速开发利用以太阳能为主体的可再生能源已成为人们的共识。近年来，国际上太阳能光伏发电技术在许多方面取得突破。太阳能电池性能和可靠性有了很大提高，成本和售价不断下降，有经济效益的应用范围不断扩大，市场迅速发展，产业已达到规模化、自动化阶段。光伏发电的竞争力越来越强。预计不久就可以成为火力发电的主要竞争者，前景十分广阔。

1.1.1 能源及环境污染问题

能源是社会经济和人民生活的主要物质基础，对于社会经济的发展和生活水平的提高极为重要。然而，随着人类对能源需求的日益增加，化石能源的储量正日趋枯竭。全世界对能源的消耗在 1970 年约为 83 亿吨标准煤，而在 1995 年，这种消耗达到了 140 亿吨标准煤，即 25 年间增长了 69.7%，并预计，到 2020 年全世界对能源的消耗将达到 195 亿吨标准煤。根据公认的估算，如果人类对能源的需求以目前的速度增长，全世界的石油将在今后 40 年间被耗尽，而天然气和煤也最多分别能维持 60 年和 200 年左右。在我国，这一情况也不容乐观，据官方统计，仅在 2004 年一年，我国就进口原油约 1.5 亿吨。按目前的消耗速度，我国的现有能源储量至多可以使用 50 年。可见，矿物燃料并不是取之不尽的^[1]。

同时，化石能源在开采、运输和使用过程中都会对空气和人类生

存环境造成严重的污染。根据相关资料显示,目前,大量使用化石燃料已经为人类生存环境带来了污染,由于大量使用化石能源,全世界每天产生约 1 亿吨温室效应气体,使得地球表面气温逐年升高。近若干年来全球 CO_2 排放量迅速增长,如果不加控制,温室效应将使南、北两极的冰山融化,这可能会使四分之一的人类生活空间将由此受到极大威胁^[2]。

因此,环境污染问题成为人们普遍关注的焦点。环境污染对人类以及其他生物的生存和发展会产生不利影响。例如,由于化石燃料的燃烧,大气中的颗粒物和二氧化硫浓度增高,危及人类和其他生物的健康,同时还会腐蚀材料,给人类社会造成损失;工业废水和生活污水的排放,危及水生生物的生存,给生态系统造成直接的破坏和影响。除此之外,污染物的积累和迁移转化还会引起多种衍生的环境效应,给生态系统和人类社会造成间接的危害,有时这种间接的环境效应的危害比直接危害更大,更难消除。环境污染所带来的最直接、最容易被人们所感受的后果就是使人类环境的质量下降,影响人类的生活质量、身体健康和生产活动。严重的环境污染还会造成社会问题。随着污染的加剧和人们环境意识的提高,由污染引起的人群纠纷和冲突日益增加。随着经济和贸易的全球化,环境污染也日益呈现国际化趋势,近年来出现的危险废物越境转移问题就是这方面的突出表现。

1.1.2 太阳能及光伏发电的特点与优势

太阳能可以不分地域地辐射到地球的每一个角落,从而成为二十一世纪最具大规模开发潜力的新能源之一。太阳是个巨大的能源,地球上绝大部分能源归根究底是来自太阳的。煤炭,石油都是古时候由动物或植物存储下来的太阳能。太阳每秒钟发出的能量有 $3.865 \times 10^{26} \text{J}$, 相当于每秒钟燃烧 $1.32 \times 10^{16} \text{t}$ 标准煤所发出的能量。全世界人们一年所用的各种能量之和也只有到达地球表面的太阳能的数万分之一。太阳能作为一种巨量可再生能源,利用太阳能的潜力是十分巨大的^[3]。

和常规能源相比较,太阳能资源具有如下 5 个优越性^[4]:

(1) 取之不尽，用之不竭

太阳内部由于氢核的聚变热核反应，从而释放出巨大的光和热，这就是太阳能的来源。根据氢核聚变的反应理论计算，如果太阳象目前这样，稳定地每秒钟向其周围空间发射 $3.286 \times 10^{28} \text{J}$ 的辐射能，在氢核聚变产能区中，氢核稳定燃烧的时间，可在 60 亿年以上。也就是说太阳能至少还可象现在这样有 60 亿年可以稳定地被利用。

(2) 就地可取，不需运输

矿物能源中的煤炭和石油资源在地理分布上的不均匀，以及全世界工业布局的不均衡造成了煤炭和石油运输的不均衡。这些矿物能源必须经过开采后长途运送，才能到达目的地，给交通运输造成压力。

(3) 分布广泛，分散使用

太阳能年辐射总量一般大于 $5.04 \times 10^6 \text{kJ/m}^2$ ，就有实际利用价值，若每年辐射量大于 $6.3 \times 10^6 \text{kJ/m}^2$ ，则为利用较高的地区。世界上约有二分之一的地区可以达到这个数值。虽然太阳能分布也具有一定的局限性，但与矿物能、水能和地热能等相比仍可视为分布较广的一种能源，称得上具有分布较广、到处都有的优点。

(4) 不污染环境，不破坏生态

人类在利用矿物燃料的过程中，必然释放出大量有害物质，如 SO_2 、 CO_2 等，使人类赖以生存的环境受到了破坏和污染。此外，其他新能源中水电、核能、地热能等，在开发利用的过程中，也都存在着一些不能忽视的环境问题。但太阳能在利用中不会给空气带来污染，也不破坏生态，是一种清洁安全的能源。

(5) 周而复始，可以再生

在自然界可以不断生成并有规律地得到补充的能源，称为可再生能源。太阳能属于可再生能源。煤炭、石油和天然气等矿物能源经过几十亿年才形成，而且短期内无法恢复。当今世界消耗石油、天然气和煤炭的速度比大自然生成它们的速度要快一百万倍，如果按照这个消耗速度，在几十亿年时间里所生成的矿物能源将在几个世纪内就被消耗掉。

太阳能的利用主要有光热利用、光伏利用、光化学利用等三种

形式。光热利用是将太阳能转换为热能储存起来,其中太阳能热水器是光热利用最成功的领域,此外还有太阳房、太阳灶、太阳能温室、太阳能干燥系统、太阳能土壤消毒杀菌技术等,这些技术尤其在我国的北方和西部应用较广,成效显著。太阳能的光化学利用主要是指太阳能光合作用、太阳能化学储存、太阳能催化光解水制氢、太阳能光电化学转换等方面的新技术,其中令人看好的太阳能制氢技术将可能是促进人类大规模利用太阳能的关键技术之一。以太阳能电池技术为核心的太阳能光伏利用成为太阳能开发利用中最重要的应用领域,利用太阳能发电,具有明显的优点^[5]:

(1) 结构简单,体积小且轻。独立供电的太阳能电池组件结构都比较简单。

(2) 容易安装运输,建设周期短。只要将太阳能电池支撑并面向太阳即可发电,宜于制成小功率移动电源。

(3) 维护简单,使用方便。如遇风雨天,只需检查太阳能电池表面是否被沾污、接线是否可靠、蓄电池电压是否正常即可。

(4) 清洁、安全、无噪声。光伏发电本身不向外界排放废物,没有机械噪声,是一种理想的能源。

(5) 可靠性高,寿命长,并且应用范围广。

太阳能光伏发电虽受昼夜、晴雨、季节的影响,但可以分散地进行,所以它适用于各家各户分别进行发电,而且可以连接到供电网络上,使得各个家庭在电力富裕时可将其卖给电力公司,不足时又可以从电力公司买入。

光伏发电有更加激动人心的计划。一是利用地面上的沙漠和海洋面积进行发电,并通过超导电缆将全球太阳能发电站连成统一电网以便全球供电。据测算,到 2050 年,即使全部太阳能发电供给全球用电,占地也不过全部海洋面积的 2.3%或全部沙漠的 51.4%。另一方案是天上发电,早在 1980 年美国宇航局和能源部就提出在空间建设太阳能发电站的设想,准备在同步轨道上放一个长 10 公里、宽 5 公里的大平板,上面布满光伏电池,这样便可以提供 $5 \times 10^6 \text{kW}$ 电力^[6]。

1.2 光伏发电的现状 & 前景

二十一世纪是世界能源结构发生巨大变革的世纪。由于传统能源（如煤、石油、天然气等）的供给已出现短缺局面，人类开始将目光转向可再生能源。大规模地开发利用可再生洁净能源，以资源无限、清洁干净的可再生能源为主的多样性的能源结构代替以资源有限、污染严重的化石能源为主的能源结构已成为人们关注的焦点。作为无污染的清洁能源之一太阳能越来越受到大家的关注，尤其在解决偏远地区的用电问题，发挥着重要的作用。

1.2.1 国外光伏发电的现状 & 前景

光伏发电技术的应用在当今世界，特别是在非洲、南美、澳洲及亚洲等各国，普遍受到重视。太阳能的利用上，欧共体、美国、日本等处于世界先进水平。国外在 90 年代前后对独立运行系统研究比较多，也基本上形成了比较成熟的思路。

（1）德国政府是世界上最早和最积极倡导鼓励光伏应用的国家之一。1990 年，德国政府率先推出“1000 太阳能屋顶计划”，1993 年，德国首先开始实施由政府投资支持，被电力公司承认的 1000 屋顶计划，继而扩展为 2000 屋顶计划，1998 年德国政府进一步提出了 10 万光伏屋顶计划，同时研究开发与建筑相结合的专用光伏组件等。1999 年 1 月起开始实施“十万太阳能屋顶计划”。德国政府颁布的“可再生能源法”于 2000 年 4 月 1 日正式生效。

（2）1996 年，在美国能源部的支持下，美国政府开始了一项“光伏建筑物计划”，投资 20 亿美元，1997 年美国政府在全世界率先宣布发起“百万太阳能屋顶计划”，2002 年，美国的光伏电池生产总量达到 112.9MW，计划到 2010 年要求发电成本降到 7.7 美分/千瓦时。

（3）日本政府早在 1974 年就公布了“阳光计划”，1993 年又提出“新阳光计划”，旨在推动太阳能研究计划全面、长期地发展。日本相继颁布了一系列鼓励包括太阳能在内的可再生绿色能源研究与应用的法规，极大地推动了日本光伏产业的发展与应用。2002 年，日本的光伏电池生产总量已达到 254.5MW，并且以世界最快的增长

速度——48.6%增长，计划到 2010 年一半以上的新居屋顶将安装光伏太阳能系统^[7]。

此外，意大利、印度、瑞士、法国、荷兰、西班牙都有类似的计划，并投巨资进行技术开发和加速产业化进程。从世界范围来讲，光伏发电已经完成了初期开发和规模应用发展，其应用范围几乎遍及所有的用电领域。

1.2.2 我国光伏发电的现状与前景

我国的太阳能光伏发电系统起步较晚，但是发展速度很快。我国太阳能光伏发电技术开始于 20 世纪 70 年代，开始时主要用于空间。70 年代中期后，光伏发电应用逐渐扩大到地面并形成了我国的光伏产业。光伏发电在改善人民生活条件方面已发挥着重要作用，并将在 21 世纪可持续发展中发挥更大作用。技术方面，经过十多年的努力，我国光伏发电技术有了很大的发展，光伏电池技术不断进步，与发达国家相比有差距，但差距在不断缩小。

在我国，随着国民经济的稳步发展、综合国力的不断提高和科技的进步，特别是“西部开发”战略的实施，利用西部地区丰富的太阳能、风能资源解决几千万人口的用电问题这一伟大构想已经逐步成为现实。我国西部幅员辽阔、地广人稀、负荷密度小，不利于常规电网的延伸。但是日照时间长，日射强度大，为光伏发电提供了得天独厚的优势。通过在人口相对集中的地区建立设备容量 100kVA 以下的独立光伏电站，解决乡村一级基本生产、办公、生活用电需要是提高用电普及率的有效途径；同时独立光伏电站还可为小型农场、畜牧养殖中心提供电源，有利于提高当地的农牧业机械化、自动化水平^[8]。

近期我国光伏发电市场仍将是为无电地区供电为主，有一定的市场潜力，但也有局限性。目前，国内光电池硅片的生产能力已达 4.5MW，在西藏 7 个无水无电县中已全部建成了光伏发电，其中功率最大的 100kW。2002 年光伏系统累计装机容量仅 40MW，而 2004 年深圳市已建成 870kW 光伏发电系统，是目前我国最大的城市光伏景观工程。2003 年国内光伏电池的生产能力约 20MW，但实际生产量仅仅为 4MW 左右，占世界光伏电池实际生产量的 1%左右。在

2002~2003 年国家实施的总装机容量 20MW 的“光明工程”项目中，国内生产的光伏电池的应用量不足 10%。北京申办 2008 年奥运会，提出了“绿色奥运、人文奥运、科技奥运”的指导思想。要把 2008 年奥运会办成最成功的一届奥运会，光伏发电应用必然要担当一个重要的角色，在奥运村和运动场馆规划中，太阳能利用及光伏发电站的建设均占主要的地位。2008 年北京奥运会将建成多个 50kW~150kW 的光伏发电系统，场馆周围 80% 的路灯以及部分场馆的照明与空调将利用太阳能电池供电。上海 2010 年世界博览会已在规划总量达 1MW~10MW 的城市光伏发电系统，还有旨在解决 8000 万边远地区居民无电缺电问题的国家光明工程、家用太阳能光伏电源系统、乡村太阳能光伏电站、青藏铁路工程光伏电源系统、通信用光伏电源系统等。

综上所述，我国的光伏市场和光伏企业面临严峻的挑战，世界光伏产业每年以 31% 的速度发展，而我国每年只有 15% 的增长率，光伏企业的发展靠市场，光伏市场的发展靠政策。光伏发电成本高，无法与常规能源竞争，所以更需要政府制定强有力的法规和政策支持以驱动我国光伏产业的商业化发展。我国的光伏企业虽然弱小，但经过努力已经有了一定的基础，当前，对光伏企业的发展来说机遇和挑战并存^{[9][10]}。

1.3 光伏发电系统的分类及组成

1.3.1 光伏发电系统的分类

光伏发电系统可以分为下面三大类：

(1) 独立运行光伏发电系统

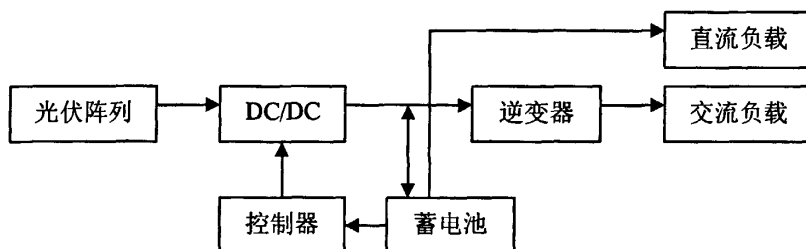


图 1-1 独立运行光伏发电系统结构

独立运行系统中，电能唯一来源于太阳能电池阵列。为保证稳定性和运行效率，系统必须配备储能蓄电池来储存和调节电能，当在夜晚或日光不强等外在条件影响下，太阳能电池不能为负载提供足够的能量时，蓄电池向负载提供能量以保证电能稳定。另一方面，当日光充足使得系统能提供多于负载所需要的能量时，蓄电池将贮存多余的电能。独立运行光伏发电系统总结构如图 1-1 所示，一般由光伏阵列、控制器、变换器、蓄电池和逆变器等组成^[11]。

(2) 并网光伏发电系统

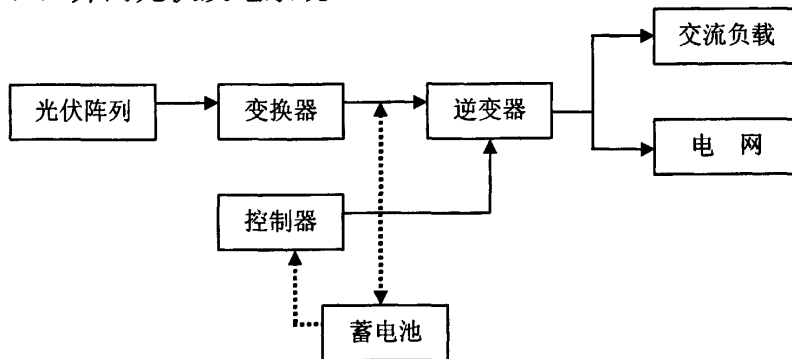


图 1-2 并网光伏发电系统结构

并网光伏发电系统如图 1-2 所示，光伏发电系统直接与电网连接，其中逆变器起很重要的作用，要求具有与电网连接的功能。目前常用的并网光伏发电系统具有两种结构形式，其不同处在于是否带有蓄电池作为储能环节。带有蓄电池储能环节的并网光伏发电系统称为可调度式并网光伏发电系统，由于此系统中逆变器配有主开关和重要负载开关，使得系统具有不间断电源的作用。这对于一些重要负荷甚至某些家庭用户来说具有重要意义。此外，该系统还可以充当功率调节器的作用，稳定电网电压、抵消有害的高次谐波分量从而提高电能质量。

不带有蓄电池环节的并网光伏发电系统称为不可调度式并网光伏发电系统，在此系统中，并网逆变器将太阳能电池阵列产生的直流电能转化为和电网电压同频、同相的交流电能，当主电网断电时，系统自动停止向电网供电。当有日照，光伏系统所产生的交流电能超过负载所需时，多余的部分将送往电网；夜间当负载所需电能超过光伏系统产生的交流电能时，电网自动向负载补充电能^[12]。

(3) 混合型光伏发电系统

图 1-3 为混合型光伏发电系统，它区别于以上两个系统之处是增加了一台备用发电机组，当光伏阵列发电不足或蓄电池储量不足时，可以启动备用发电机组，它既可以给交流负载供电，又可以经整流器后给蓄电池充电，所以称为混合型光伏发电系统。混合型发电一般有风光互补发电、光柴混合发电和风光柴混合发电等^[13]。

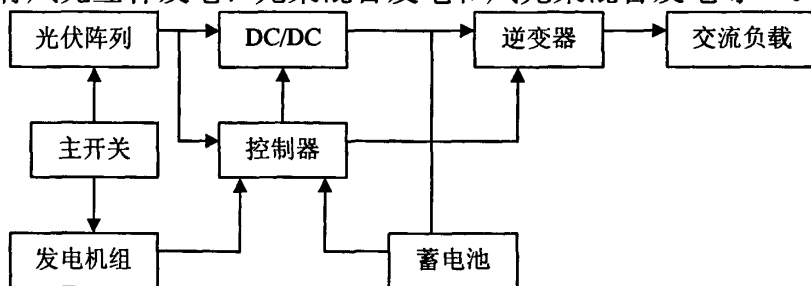


图 1-3 混合型光伏发电系统结构

1.3.2 独立式光伏发电系统的组成

本文讨论的范围是独立式光伏发电系统，其结构框图如下^{[14][15]}：

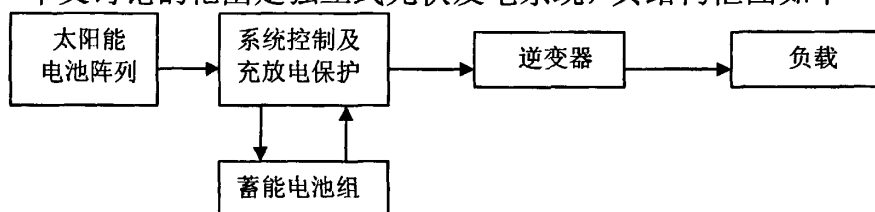


图 1-4 独立式光伏发电系统结构图

1. 太阳能电池阵列

太阳能电池阵列一般由多块太阳能电池组件串并联而成，每个支路通过防反充二极管、充电控制器并联向蓄电池充电。太阳能电池阵列分为若干个子阵列，每个阵列由一个电子开关控制。当蓄电池的充电电压达到设定的最电高压时，自动依次切断一个或数个子阵列，以限制蓄电池的充电电压继续增长确保蓄电池的寿命，并最大限度地利用和储存太阳能电池发出的电能。

2. 蓄电池组

蓄电池组是太阳能电池方阵的储能装置，其作用是将方阵在有日照时发出的多余电能储存起来，在晚间或阴雨天时供负载使用。蓄电池组由若干蓄电池串并联而成。一般容量要能在无太阳辐射的日子里，满足用户要求的供电时间和供电量。目前常用的是铅酸蓄电池，

重要的场合也有用镉镍蓄电池，但价格较高，相对来说应用没有前一种广泛。

在光伏发电系统中，蓄电池处于浮充放电状态，夏天日照量大，方阵除了供给负载用电外，还要给蓄电池充电；冬天日照量小，这部分储存的电能逐步放出。在这种季节性循环的基础上还要加上小得多的日循环：白天方阵给蓄电池充电（同时方阵还要给负载供电），晚上负载用电则全部由蓄电池供给。因此要求蓄电池的自放电要小，耐过充放，而且充放电效率要高，当然还要考虑价格低廉，使用方便等因素。

当蓄电池端电压达到设定的最高值时，由电压检测电路得到信号电压，通过控制电路进行开关切换，使系统进入稳压闭环控制，既保持对蓄电池充电，又不致使蓄电池过充，造成电解液中水的大量分解和过热而导致极板损坏，从而使蓄电池得到合理的保护和利用。如果过充保护失灵导致蓄电池端电压过高时，系统发出报警指令。当蓄电池端电压下降至过放值时，系统也会发出报警指示，同时逆变器自动关闭，以保证蓄电池不再继续放电。

3. 控制器

在不同的光伏发电系统中控制器各不相同，其功能的多少和复杂程度差别很大，需要根据发电系统的要求及重要程度来确定。控制器一般由各种电子元器件、仪表、继电器、开关等组成。最简单的系统也可以不用控制器，有些要求有过充放、稳压等功能，而一些复杂的系统，如并网发电的光伏电站（并网发电不在本文的讨论范围内），则要求有自动检测、控制、转换等多种功能。

4. 逆变器

逆变器将太阳能电池方阵输出和蓄电池放出的直流电转换成负载所需的交流电。逆变器主电路由大功率晶体管构成，采用正弦脉宽调制工作制，抗干扰能力强，还有很强的过载及限流保护功能。

5. 阻塞二极管

阻塞二极管也称防反充二极管或隔离二极管，其作用是利用二极管的单向导通特性防止无日照时蓄电池通过太阳能电池方阵放电。对于阻塞二极管的要求是工作电流必须大于方阵的最大输出电流，反向

耐压要高于蓄电池组的电压，在方阵工作时，阻塞二极管两端有一定的电压降，对硅二极管通常为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ ，对肖特基或锗管为 0.3V 左右。

1.4 本文所做的工作

本文对独立光伏发电系统中的核心问题进行了较为深入的理论研究。从不同的角度对系统进行了分析，并在光伏阵列输出特性和独立运行光伏发电系统组成及各部分性能的基础上建立了仿真模型；基于该仿真模型对独立发电系统中变步长自适应给定控制算法进行仿真研究，并在此基础上设计和实现了一套独立发电试验系统，分别侧重于进行控制算法的实施验证和实验研究。本文的工作重点可以总结如下：

1、在深入分析太阳能电池工作原理和外特性的基础上，分别提出了应用于电路仿真的基于外特性的光伏阵列仿真模型，为实现仿真、指导理论研究和系统设计提供了基础保证。并配合 Psim 和 Matlab 等仿真软件搭建主电路模型和控制系统模型，从而组成完整的仿真平台，为具体的理论分析和控制方法研究提供了仿真研究的基础。

2、MPPT 方法是光伏发电系统中提高系统效率的重要手段。本文在分析常见 MPPT 方法的基础上，重点对定步长电导微增法存在的稳定性问题进行了讨论，并提出了一种具有功率前馈控制的变步长自适应给定控制 MPPT 方法。验证了其在太阳辐照度快速扰动下的跟踪控制效果。

3、基于变步长自适应给定算法，本文采用两级结构光伏系统控制方案，对整个系统进行了设计和实现，包括主电路、控制电路、驱动及保护电路的设计和实现，最大功率点跟踪技术的 DSP 实现，并得到了该 MPPT 方法给出的跟踪实验结果。

4、最后总结整个系统研制过程中遇到的问题、实现的程度和一些仍需解决的问题，以便独立光伏发电系统及其系统控制方案的进一步完善。

第 2 章 光伏电池的原理及其特征

光伏电池是利用半导体材料的电子特性把阳光直接转换成电能的一种固态器件。它的种类很多,大致可分为硅光伏电池、化合物半导体光伏电池。其中硅光伏电池包括单晶硅、多晶硅、非晶硅电池;化合物半导体光伏电池包括砷化镓光伏电池等。目前大规模使用的主要是单晶硅和多晶硅电池,因为其资源丰富、转换效率较高(澳大利亚新南威尔士大学的格林教授已将单晶硅电池的转换效率提高到 24%),所以现在开发得也最快。

2.1 光伏电池的原理及模型

2.1.1 光伏电池的光伏效应

当适当波长的光照到到半导体系统上时,系统吸收光能后两端产生电动势,这种现象称为光伏效应。例如,当光照射到由 P 型和 N 型两种不同导电类型的同质半导体材料构成的 P-N 结上时,在一定条件下,光能被半导体吸收后,在导带和价带中产生非平衡载流子——电子和空穴。由于 P-N 结势垒区存在着较强的内建静电场,因而产生在势垒区中的非平衡电子和空穴,或者产生在势垒区外但扩散进势垒区的非平衡电子和空穴,在内建静电场的作用下,各向相反方向运动,离开势垒区,结果使 P 区电势升高, N 区电势降低, P-N 结两端形成光生电动势,这就是 P-N 结的光伏效应。由于光照产生的非平衡载流子各向相反方向漂移,从而在内部构成自 N 区流向 P 区的光生电流,在 P-N 结短路情况下构成短路电流 I_{sc} 。在 P-N 结开路情况下, P-N 结两端建立起光生电势 V_{oc} , 这就是开路电压。如将 P-N 结与外电路接通,只要光照不停止,就会不断地有电流流过电路, P-N 结起了电源的作用,这就是光伏电池的基本工作原理。显然,光伏电池之所以能在光照下形成短路电流 I_{sc} , 开路电压 V_{oc} , 都是由于材料内部存在内建静电场的缘故。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载,则负载中就有“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^[16]。

图 2-1 为光伏电池的单元模型。电池单元是光电转换的最小单元，一般不单独作为电源使用。将每个单元进行串、并联并封装后就成为光伏电池组件，功率一般为几瓦、几十瓦甚至数百瓦，众多光伏电池组件需要再进行串、并联后形成光伏电池阵列，就构成了“太阳能发电机(Solar Generator)”^[17]。这与传统的发电方式是完全不同的：既没有旋转的转动部分，也不排出气体，是清洁的、无噪声的发电机。

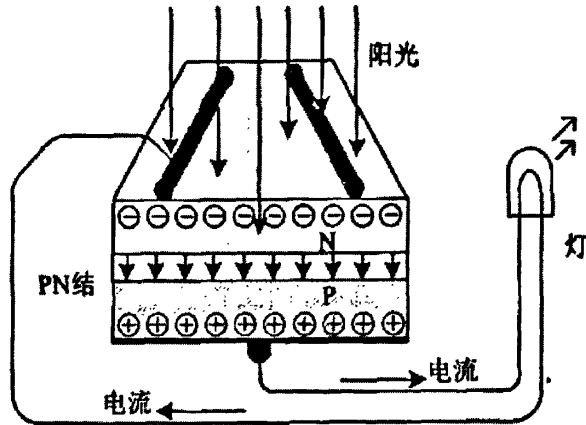


图 2-1 单个太阳能电池的模型

2.1.2 光伏电池的物理模型

光伏电池受光的照射便产生电流。这个电流随着光强的增加而增大，当接受的光强度一定时，可以将光伏电池看作恒流电源。目前使用的光伏电池可看作 P-N 结型二极管，因为在光的照射下产生正向偏压，所以在 P-N 结为理想状态的情况下，可根据图 2-2 表示的理想状态的太阳能电池等效电路图来考虑。

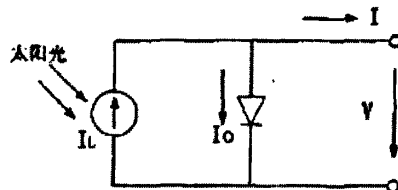


图 2-2 理想状态的太阳能电池等效电路图

在这种等效电路中，加给负荷的电压 v 和流过负荷的电流 I 之间的关系式，可由下式给出：

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qv}{nKT} \right] - 1 \right\} \quad (2-1)$$

其中 I 为电池单元输出电流(A); I_L 为 PN 结电流(A); I_0 为二极管的反向饱和电流(A); v 为外加电压(V); q 是电子电荷($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$); K 是玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$); T 是绝对温度(K); n 为二极管指数。

但是在实际的光伏电池中, 由于电池表面和背面的电极和接触, 以及材料本身具有一定的电阻率, 流经负载的电流经过它们时, 必然引起损耗, 在等效电路中可将它们的总效果用一个串联电阻 R_s 来表示; 同时, 由于电池边沿的漏电, 在电池的微裂痕、划痕等处形成的金属桥漏电等, 使一部分本该通过负载的电流短路, 这种作用可用一个并联电阻 R_{sh} 来等效表示。此时的等效电路可根据图 2-3 来描述, 其伏安特性可由 2-2 式给出。

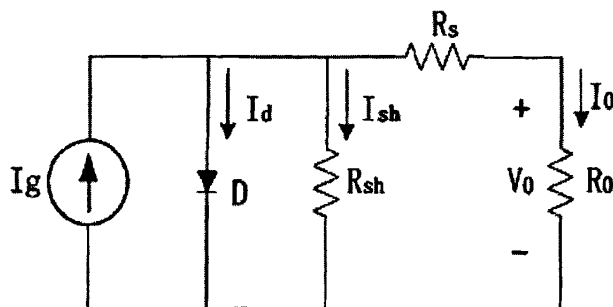


图 2-3 实际太阳能电池等效电路

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2-2)$$

此式叫做光伏电池的超越方程式^[18]。

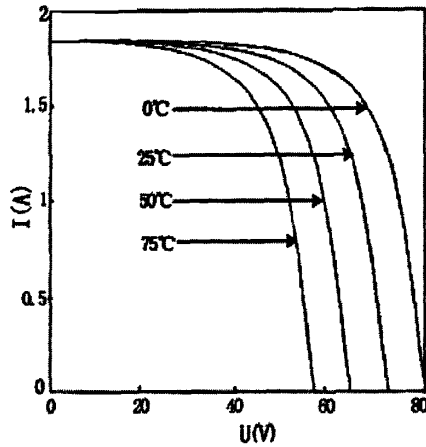
2.2 光伏电池的输出特性及其影响因素

光伏电池的输出特性包括伏安特性、温度特性和光谱特性, 其中伏安特性和温度特性主要通过 I - V 和 P - V 特性曲线来加以体现。而光谱特性主要研究光伏电池与入射光谱的关系, 所以本文不对其进行讨论。本节将着重探讨前两种特性及其相关参数。

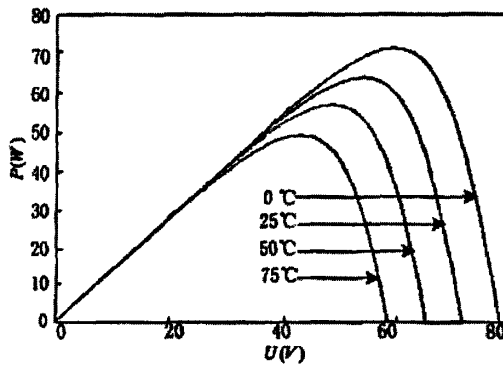
2.2.1 光伏电池的 I - V 和 P - V 特性曲线

光伏电池的伏安特性是一定光强、一定温度下, 电池的负载外特性, 直接反映出电池输出功率。在一定的光强的照射下, 特性曲线完全由电池的 P - N 结特性和电阻分散参数确定。对应不同的光照强度

时, 电池有不同的输出特性曲线, 曲线上任何一点都可以作为工作点, 工作点所对应的纵和横坐标分别为工作电流和工作电压, 两者之积即为电池的输出功率 P , 即 $P=VI$ 。如图 2-4 所示。



(a) 光伏电池的 I-V 特性曲线



(b) 光伏电池的 P-V 特性曲线

图 2-4 光伏电池的 I-V 和 P-V 特性曲线

可以看出, 此 I-V 曲线具有高度的非线性特征, 这样就存在一个最大功率输出问题, 在第三章中将对此问题进行研究。在 P-V 特性曲线中, 可以看出随着端电压由零逐渐增长输出功率先上升然后下降, 说明存在一个端电压值, 在其附近可获得最大功率输出, 跟 I-V 曲线说明了同一个问题^{[19][20]}。

2.2.2 光伏电池的主要参数

光伏电池的几个重要技术参数:

1. 短路电流 I_{sc} : 在给定日照强度和温度下的最大输出电流。
2. 开路电压 V_{oc} : 在给定日照强度和温度下的最大输出电压。

- 3.最大功率点电流(I_M):在给定日照强度和温度下相应于最大功率点的电流。
- 4.最大功率点电压(V_M):在给定日照和温度下相应于最大功率点的电压。
- 5.最大输出功率(P_M):在给定日照和温度下光伏电池可能输出的最大功率。
- 6.填充因子:

$$FF = \frac{P_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2-3)$$

- 7.光伏电池的转换效率:输出功率 P_O 与阳光投射到电池表面上的功率 P_s 之比,其值取决于工作点。通常采用光伏电池的最大效率值作为其效率 η ,

$$\eta = \eta_{MPP} = \frac{P_M}{P_s} \quad (2-4)$$

以上各个参数可以在图 2-5 中表示如下:

图 2-5 中,在曲线上总可以找到一工作点,此点处的输出功率最大,此点就是最大功率点(Max Power Point, MPP),即图中 M 点。M 点所对应的电流 I_M 为最佳工作电流, V_M 为最佳工作电压, P_M 为最大输出功率,由图和公式还可以看出,光伏电池不工作于最大功率点时,其效率都低于按此定义的效率值,甚至会低到零^[21]。

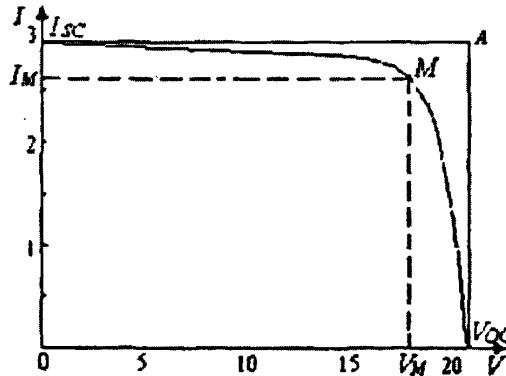


图 2-5 光伏电池的特性

2.2.3 太阳的光照强度对光伏电池转换效率的影响

图 2-4 中的伏安特性曲线是在一定的光照强度和环境温度下得

到的,在实际运用中,光伏电池的开路电压和短路电流都会随着两者的变化而变化。为了得知太阳的光照强度对光伏电池转换效率的影响程度,在环境温度为 25℃时,我们采用型号为 E6M 的单晶硅光伏电池,对其最大输出电压和最大输出电流受光强影响的程度做了测试,得到的数据见表 2-1 和图 2-6。

表 2-1 光伏电池在光强变化时参数

Intensity	V_{mpp}	I_{mpp}
1000w/m ²	0%	0%
800w/m ²	0%	-23%
700w/m ²	-1%	-25%
620w/m ²	-1%	-39%
490w/m ²	-2%	-51%
360w/m ²	-4%	-64%
230w/m ²	-5%	-77%
100w/m ²	-10%	-90%

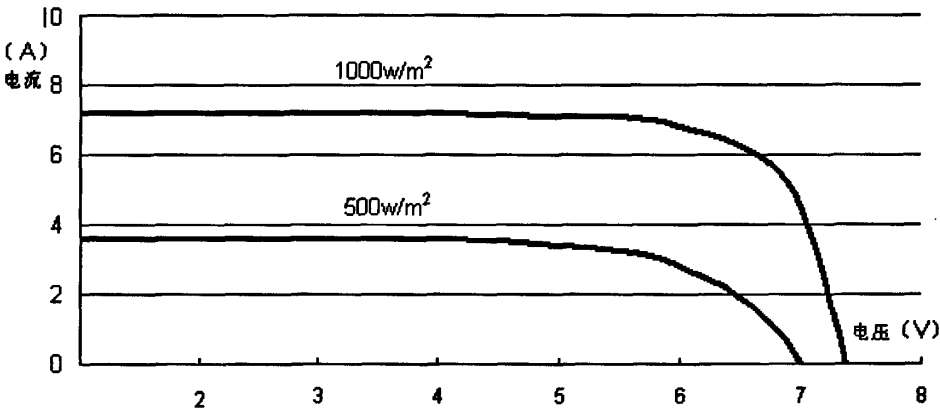


图 2-6 不同光强下的光伏电池的光照特性曲线

从该实验中可知, 电池的开路电压近似的与光强的对数成正比。光强从 200~1000W/m² 时开路电压变化比较平稳。在实验中也发现, 当早晨光线不强和中午烈日当空时, 所测量的开路电压相差不大; 当天空光线极差时, 开路电压会直线下降, 几乎为 0。而短路电流是随光强的增加而成正比的增加。

所以, 在温度恒定的情况下, 电池的转换效率会随光强的增加而增加。对于一个给定的功率输出, 电池的转换效率决定了所需的电池板的数量。提高转换效率从而减少光伏电池的使用, 降低光伏发电系统的成本, 所以电池达到尽可能高的转换效率是极其重要的^[22]。

2.2.4 温度对光伏电池输出特性的影响

温度上升将使光伏电池开路电压下降,短路电流则略微增大,如图 2-4 所示。随着光伏电池结温的上升,其最大输出功率不断下降,其效率随着温度的上升而下降,即光伏电池具有负的温度系数。对于常用的单晶硅和多晶硅来说,随着温度的增加其电压、填充因子 FF 和效率都有不同程度的下降。整体而言当温度升高时光伏电池的额定输出功率会略微下降,工作环境温度的高低对光伏电池的最大输出功率也会有直接影响。

第3章 最大功率点跟踪的控制策略研究

最大功率就是使光伏电池始终保持最大功率输出。由于光伏电池的光电转换效率比较低,光伏电池的输出功率受日照强度以及温度影响,系统工作点会因此飘忽不定,这必然导致系统效率的降低。为了在限定的条件下有效利用光伏电池,必须实现最大功率点跟踪(Max Power Point Tracking, MPPT)控制,以便光伏电池阵列在任何当前日照下不断获得最大功率输出。

3.1 MPPT 研究的必要性

光伏发电系统中,光伏电池在不同太阳辐照度下输出最大功率时,其两端电压值并不固定,而且当工作温度发生变化时,相应于同一辐照度的最大功率,电压值也将发生变化。

由上一章的图 2-4 光伏电池 I - V 和 P - V 特性曲线,它表示了在特定的太阳辐照度和温度下,电池传送的电流 I (功率 P)与电压 V 的关系,曲线表明电池具有明显的非线性特征。

图 2-4 中,功率曲线类似为一个抛物线,即光伏电池在输出最大功率 $P_M(=I_M V_M)$ 时,最大功率点电压(最大工作电压) V_M 小于开路电压 V_{oc} ,最大功率点电流(最大工作电流) I_M 小于短路电流 I_{sc} 。并且电池电压在 $0 \sim V_M$ 间变化时,功率曲线为递增函数,当电池电压在 $V_M \sim V_{oc}$ 间变化时,功率曲线为递减函数。研究表明,光伏电池的输出功率取决于太阳辐照度和其工作温度。随着工作温度的升高,短路电流 I_{sc} 稍微升高,开路电压 V_{oc} 和最大功率点电压 V_M 下降,光伏电池输出最大功率 P_M 下降。同一块光伏电池 I_{sc} 值与太阳的辐照度成正比,输出最大功率 P_M 也随着辐照度的增加而增加。

为了实现在任何外部条件下太阳能电池阵列输出当前日照下最多的能量,理论和实践上提出了光伏电池阵列的 MPPT 问题。随着光伏发电系统的日益普及,光伏发电系统较高的造价和仍处在较低的转换效率使得 MPPT 技术的研究愈发重要^[23]。

3.2 MPPT 原理

图 3-1 为太阳能电池阵列的输出功率特性曲线, 由图可知当阵列工作电压小于最大功率点电压 V_{MAX} 时, 阵列输出功率随太阳能电池端电压 V_{PV} 上升而增加。当阵列工作电压大于最大功率点电压 V_{MAX} 时, 阵列输出功率随 V_{PV} 上升而减少。MPPT 的实现实质上是一个自寻优过程, 即通过控制阵列端电压 V_{PV} , 使阵列能在各种不同的日照和环境温度下智能化地输出最大功率^[24]。

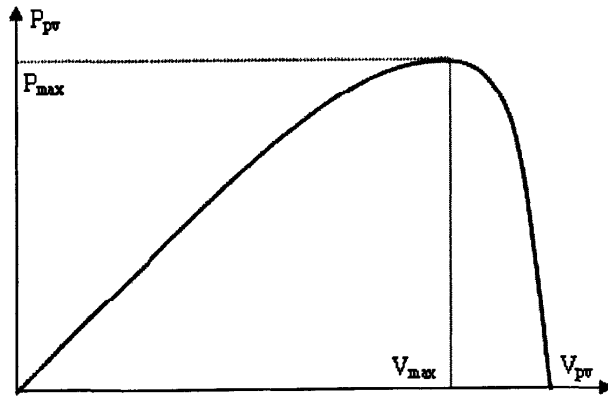


图 3-1 太阳能电池阵列的输出功率曲线

3.3 MPPT 的算法

由第二章太阳能电池的输出特性可知, 太阳能电池的电压与电流是非线性的关系, 由于环境温度与日照强度的不同工作曲线有所不同, 但是每一条工作曲线只有一个最大功率点, 此最大功率点即为太阳能电池的最佳工作点。因此为了提高太阳能电池阵列的工作效率, 需要控制太阳能电池阵列的输出, 使太阳能电池阵列随时都工作在最大功率点。关于太阳能电池阵列的最大功率跟踪法有许多文献都有这方面的讨论, 而且最大功率点跟踪的算法有很多种, 常用的有: 电压回授法、功率回授法、滞环比较法、电导微增法、微扰观察法等。在实现的过程中, 进行调节时所依据的变量也不同, 有依据电压的, 也有依据功率的。

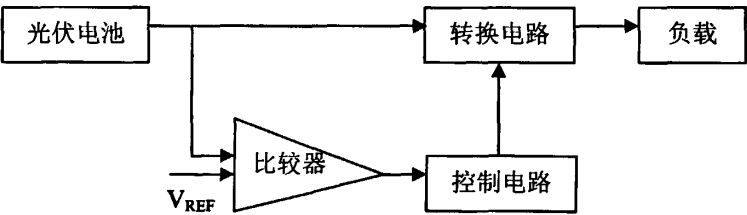
所谓依据电压是指: 在调节的过程中, 不断地测量太阳能电池的

输出特性, 计算出太阳能电池的最大功率点, 然后调节太阳能电池的工作点, 使工作点电压尽量接近最大功率点电压, 并且随着最大功率点电压的变化而变化^[25]。这样做较为复杂, 而且计算最大功率点需要时间。如果在天气情况变化较快时, 计算出来的最大功率点可能与当时的最大功率已经相差较大了, 因此这种方法用的较少。

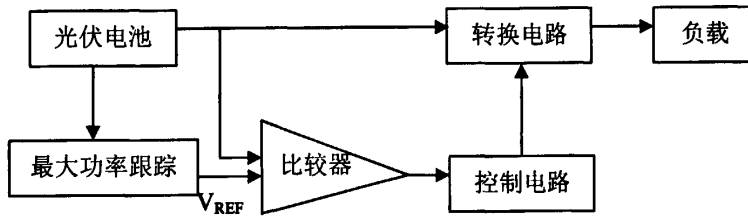
依据功率调节是指在调节的过程中, 测量蓄电池的充电功率, 依据它来调节太阳能电池的工作点, 使蓄电池能够保持最大的充电功率。但是, 这样做似乎并不能保证太阳能电池有最大功率输出, 而只是保证蓄电池有最大功率输入。这里可以从实际应用的角度考虑, 对太阳能电池经最大功率跟踪的目的是希望负载获得最大功率。假如仅仅实现太阳能电池的最大功率输出, 而蓄电池不能获得最大功率充电, 那么这样做也没什么意义; 另外如果 DC/DC 转换电路的效率足够高, 可以近似地认为蓄电池获得最大功率充电时, 太阳能电池输出的功率也是最大的^[26]。

3.3.1 电压回授法

电压回授法是最简单的一种最大功率跟踪法, 经由事先的测试, 得知光伏阵列在某一日照信号和温度下至最大功率点的电压大小, 再调整光伏阵列的端电压, 使其能与实现测试的电压相符, 来达到最大功率点跟踪的效果。电压回授法可分为固定参考电压法和可变参考电压法, 如图 3-2(a)和(b)。此控制方法的最大缺点是当环境条件大幅度改变时, 系统不能自动的跟踪到光伏电池的另一最大功率点, 因此造成能量的浪费^[27]。



(a)固定参考电压法方块图



(b)可变参考电压法方块图
图 3-2 电压回授法方块图

3.3.2 功率回授法

由于电压回授法无法随环境条件的改变自动跟踪到最大功率点，因此功率回授法加入了输出功率对电压变化率的判断，以便能适应天气的变化而达到最大功率点跟踪，也就是改变输出功率判断此时是否 $dP/dV=0$ ，当 $dP/dV=0$ 时即为工作在最大功率点。配合控制流程即可动态地追踪光伏电池阵列在不同光照强度及温度下的最大功率点。相对于电压回授法而言，此方法虽然较为复杂且需较多的运算过程，但其在减少能量损耗以及提升整体效率上却是非常显著的^[28]。

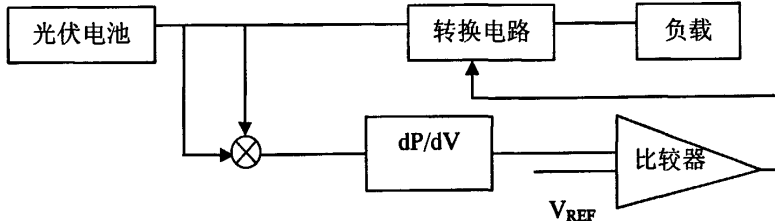


图 3-3 功率回授法方块图

3.3.3 滞环比较法

在外界环境并不是时常快速变化的系统，常用滞环比较法代替电压回授法实现太阳能电池的 MPPT，它能避免一旦外界环境快速变化时，电压回授法可能会引起控制器的“误判”现象。滞环比较法控制原理在于使系统的工作点不随外界环境快速改变而变化，而是等其变化缓慢后再跟踪太阳能电池的最大功率。滞环比较法原理详述如下：

从太阳能电池的输出功率 P 与 DC/DC 变换器占空比 D 的关系中可知，如果在曲线最大功率点处任意选取三个不同的位置 A,B,C(对应占空比依次增大)，则曲线段可分为五种形式，如图 3-4 所示。在

分析如何改变 DC/DC 变换器占空比变化的方向以实现太阳能电池的 MPPT 之前, 程序设定了一个符号运算变量 F , 其初始值为 0。 F 赋值原则为: 当 A 点输出功率小于 B 点的时, $F=F+1$, 否则 $F=F-1$; 同时当 C 点输出功率小于 B 点的时, $F=F-1$, 否则 $F=F+1$ 。比较完毕后, 如果 $F=2$, 则判断 DC/DC 变换器的占空比 D 需增加一个增量 a ; $F=-2$ 则认为 D 需减小一个 a ; $F=0$, 则认为系统当前工作在最大工作点而保持当前 D 不变。在 A, B, C 三点功率检测上, 控制器先默认当前工作点为 B 点并读取其输出功率, 然后控制 D 增加一倍 a 以读取 C 点的功率, 最后再减小两倍 a 以读取 A 点的功率。连续检测三点功率后再比较计算出变量 F 的值来判断占空比改变的方向^[29]。

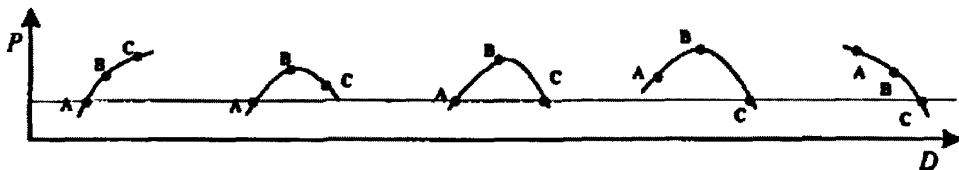


图 3-4 最大功率点附近 P-D 曲线的五种形式

以上分析是基于系统外界环境缓慢变化的场合, 当由于一些因素使得外界环境快速变化时, 最大功率点附近的 P-D 曲线除图 3-4 所示的五种形式外还存在三种形式, 如图 3-5 所示。而根据以上的滞环比较法原理, 图 3-5 中的三种形式中 F 均为 0, 系统并不跟随外界环境的变化而变化 DC/DC 变换器的占空比, 这避免了电压回授法带来的“误判”现象。

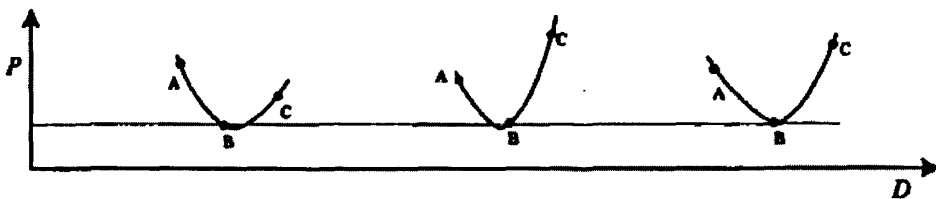


图 3-5 外界环境快速变化时工作点附近 P-D 曲线

滞环比较法消除了电压回授法的“误判”问题, 但在外界环境快速变化过程中, 无法实现 MPPT 而导致能量损失, 因此此种方法只适应于外界环境并不快速变化的系统中。另外, 滞环比较法面临占空比增量 a 和采样时间选取的问题^[30]。

3.3.4 电导微增法

电导微增法也是一种最基本的 MPPT 算法之一,它通过太阳能电池 P-V 曲线(图 2-4)的斜率 dP/dY 与输出电压、电流间的关系来达到判断 MPPT 的目的。由公式 $P=VI$ 可得:

$$\partial P/\partial V=I+V \cdot \partial I/\partial V \quad (3-3)$$

在最大功率点处: $\partial P_{\max}/\partial V=I+V \cdot \partial I/\partial V=0$ 。所以有:

$$\partial I/\partial V=-I/V \quad (3-4)$$

上式为判断最大功率点的条件,即当输出电导的变化量和输出电导的负值相等时,便可认为当前太阳能电池工作在最大功率点处。该方法的控制流程如图 3-6 所示:图中 $V(k)$, $I(k)$ 为检测到的当前太阳能电池输出电压、电流值; $V(k-1)$, $I(k-1)$ 为前一控制周期太阳能电池输出电压、电流值; $D(k)$, $D(k-1)$ 为下一个 DC/DC 变换器占空比和当前周期的占空比; a 为占空比增量。由于有除法操作,故在执行相应操作前需判断分母 ∂V 是否为零。当控制器判断 ∂V 为零后,便进入判断 ∂I 是否为零阶段,此对应于判断外界环境是否快速变化的情况。当 $\partial I=0$ 时表明外界环境没有发生快速变化,相反则认为环境发生了改变,需要相应改变 DC/DC 变换器的占空比 D ,使太阳能电池输出功率与环境变化的方向一致,即如果 $\partial I>0$ 则表明需要使 D 增大以提高太阳能电池输出功率,否则减小 D 以减小太阳能电池输出功率。而当程序判别分母 ∂V 不为零后,便进入判断 $\partial I/\partial V$ 是否等于 $-I/V$ 阶段,这是电导微增法的重点,如果判别了 $\partial I/\partial V > -I/V$ 时表明太阳能电池 P-V 曲线的斜率大于零,需要减小 D 以提高太阳能电池输出功率,反之则相反^[31]。

下图所示的电导微增法控制精确,响应速度比较快,在稳态时可以较好的跟踪到光伏阵列输出的最大功率点。适宜用于外界环境变化较快的场合,但系统对硬件特别是传感器的精度要求较高,同时对单片机 A/D 转换的速度要求也较高,且仍然没有解决采样时间和 a 选取的问题。

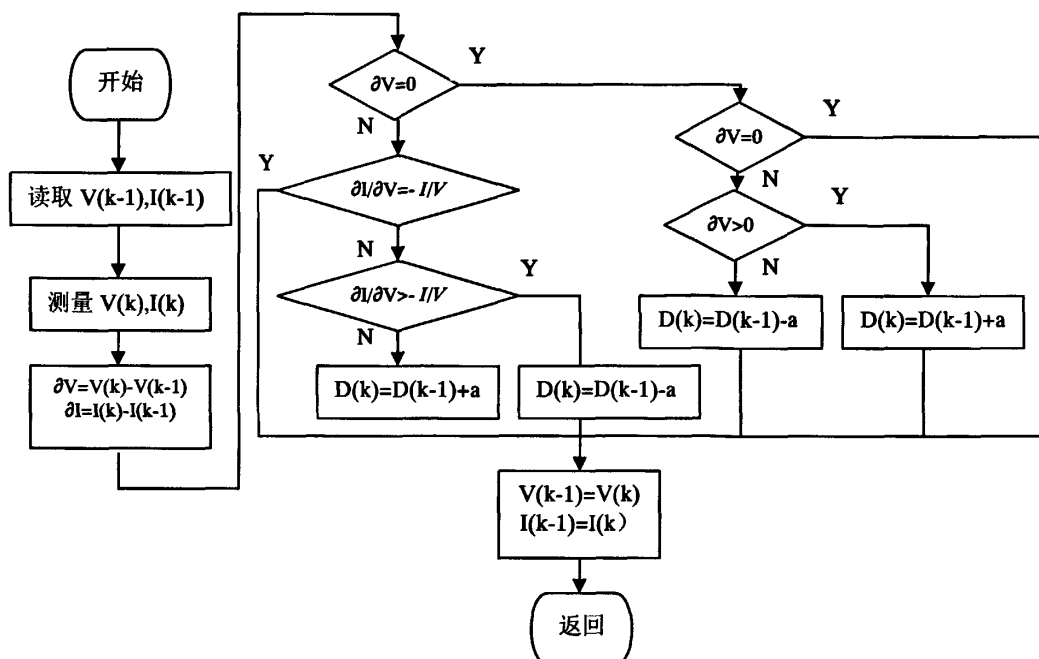


图 3-6 控制流程图

3.3.5 微扰观察法

微扰观察法(Perturbation and Observation Method, 简称 P&O 法)由于其结构简单, 且需测量的参数较少, 所以它被普遍应用在光伏电池阵列的最大功率点跟踪技术中。微扰观察法要引入一个小的变化, 然后进行观察, 并与前一个状态进行比较, 根据比较的结果调节光伏电池的工作点。通过改变光伏电池的输出电压, 并实时地采样光伏电池的输出电压和电流, 计算出功率, 然后于上一次计算的功率进行比较, 如果小于上一次的值, 则说明本次控制使功率输出降低了, 则应控制使光伏电池输出电压按原来相反的方向变化, 如果大于则维持原来增大或减小的方向, 这样就保证了光伏电池输出向增大的方向变化。如此反复的扰动、观察与比较, 使光伏电池达到其最大功率点, 实现最大功率的输出。但是在达到最大功率点附近后, 其扰动并不停止, 而会在最大功率点左右振荡, 而造成能量损失并降低光伏电池的使用效率。在此引入一个参考电压 V_{REF} , 在得出比较的结果后, 调节参考电压, 使它逐渐接近最大功率点电压, 在调节光伏电池工作点时, 应根据这个参考电压来进行调节^[32]。

微扰观察法方块图如图 3-7 所示:

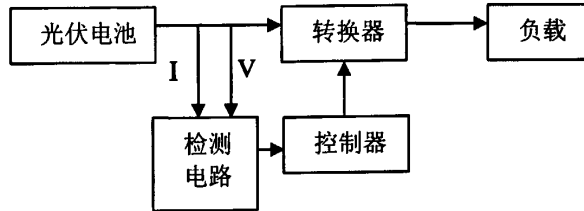


图 3-7 微扰观察法方块图

微扰观察法流程图如图 3-8 所示:

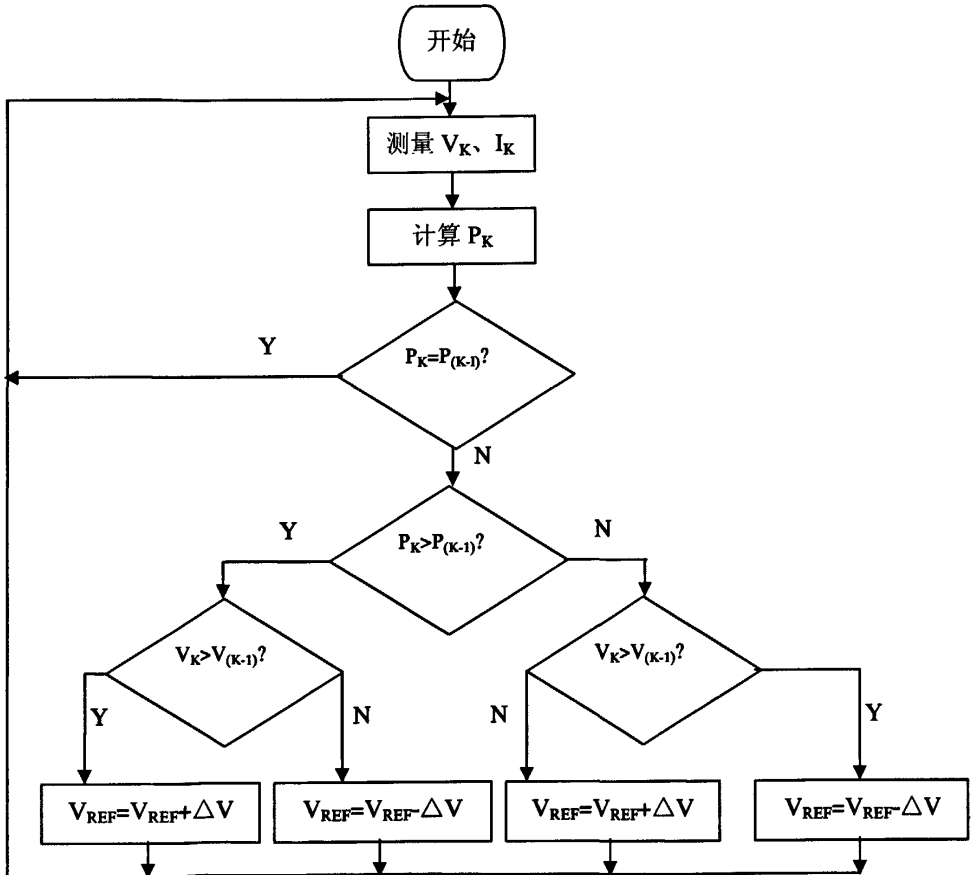


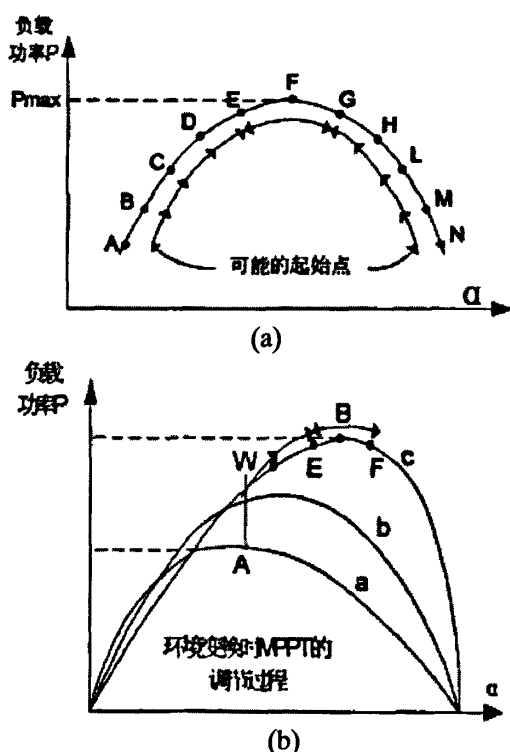
图 3-8 微扰观察法流程图

图中 V_K , I_K , P_K 是上一次测量和计算出的值。

从图中可以看出:在功率比较之后,经过判断电压的变化,对参考电压 V_{REF} 减一个调整电压 ΔV ,然后再进行测量、比较,进入下一个循环。这就是微扰观察法。这种方法简单易懂,实现起来比较容易,只要进行简单的运算和比较即可,因此是一种较为常用的方法。

MPPT 调节过程如图 3-9 所示。前文已提到光伏电池的输出与日照、温度有关。日照强度和环境温度不变时的调节过程如图 3-9 (a)

所示。假设系统开始时运行于 A 点, 有小扰动使得在下一个固定时间间隔中检测到负载功率比这一次有变化, 系统判断后将占空比 a 向功率增加的方向移动, 系统的运行点移动到了 B 点。这样, 电路的占空比一直增加, 直到运行于 E-F-G 区间。如果系统开始时运行于 M 点, 跟踪控制过程与上面类似^{[33][34]}。



(a)环境不变时 MPPT 调节过程示意图; (b)环境变化时 MPPT 调节过程示意图
图 3-9 调节过程示意图

图 3-9(b)所示为系统到达最大功率点后日照强度或环境温度变化后的调节过程。环境变化时光伏电池的功率输出如图 3-9(b)上从曲线 a 变为曲线 c, 此时系统从运行于点 A 变为运行于其占空比与曲线 c 的交点 W, 与上面相似的调节过程, 使得光伏电池运行于 E-B-F 区间。

电压的变化量 ΔU 的选择影响到跟踪的速度与准确度, 以及能否准确的实现 MPPT 功能。 ΔU 设置偏大, 跟踪速度快, 会导致跟踪的精度不够, 在最大功率点附近功率输出摆动大; ΔU 设置偏小则跟踪速度慢, 浪费电能, 但输出能更好地靠近最大功率点。这种方法简

单易懂,实现起来也比较容易。但是此种方法较盲目,如果 U_{REF} 的初始值设置离最大功率点电压相差较大,加上 ΔU 设置的不合理,可能会花费很长的时间才到达最大功率点,甚至会导致远离最大功率点。本文 ΔU 的确定是采用变化的 ΔU ,根据每次测量和计算的结果不断调整它。当工作点离最大功率点较远时,增大 ΔU ,使工作点电压变化的快一些;当工作点离最大功率点较近时,减小 ΔU ,使工作点不会跨过最大功率点而远离它^[35]。

3.3.6 定步长电导微增法所存在的问题

扰动观察法结构简单、被测参数少,而电导微增法在外界环境发生迅速变化时,其动态性能和跟踪特性方面比扰动观察法好。但是这两种方法都存在着一个共同的缺点,即步长固定。如果步长过小,就会导致光伏阵列长时间地滞留在低功率输出区;如果步长过大,就会导致系统振荡加剧。针对这一缺点本文给出了一种自适应变步长扰动法。当距离最大功率点较远时,步长取大,速度加快;当距离最大功率点较近时,步长取小,慢慢接近最大功率点;当非常逼近最大功率点时,系统稳定在该点工作^[36]。

在一定的太阳辐照度下,太阳能电池的输出功率只与环境温度和端电压有关,因此在独立式光伏发电系统中,改变太阳能电池的工作点只能通过调整母线电容上的电压进行,即改变逆变电路的输出有功功率来进行调节。在这里讨论的范围内,定步长 MPPT 方法就是以固定步长修改逆变电路输出有功设定值 (P_{REF}) 从而跟踪太阳能电池最大功率点的,这里选用的 MPPT 方法是跟踪性能较好的电导微增法。其算法控制流程图在图 3-6 中已经给出。该算法在功率环的每个控制周期检测和计算光伏阵列输出电压、电流和功率,根据电导增量判断方法决定最大功率点的跟踪方向。确定跟踪方向后,算法以固定步长值修改逆变电路输出有功设定值 (P_{REF}),再将该功率设定值转换成逆变器输出电流幅值,通过脉宽调制方法生成 PWM 信号驱动开关器件,产生设定的输出电流。

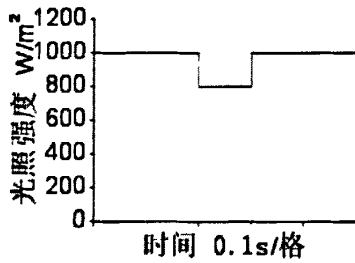
独立式光伏发电系统中定步长电导微增法虽然具有较好的稳态特性,但是在太阳辐照度出现扰动的动态过程中往往会失效,甚至出

现母线电压崩溃现象。逆变输出有功的调整步长选取得不合适时也可能引起同样的问题。

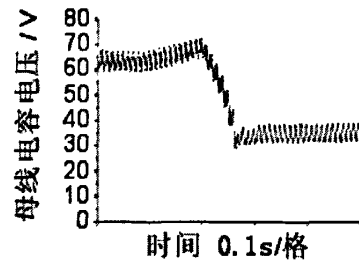
跟踪太阳能电池最大功率点的过程,就是不断调整逆变电路有功输出,从而使太阳能电池实际工作电压在最大功率点左右反复跟踪、调整的过程。当太阳能电池工作电压大于最大功率点电压时,通过增加逆变电路输出功率使其降低;当太阳能电池工作电压小于最大功率点电压时,通过减小逆变电路输出功率使其增加。但是,在后一种情况下,如果光照减弱,减小后的逆变输出功率仍大于太阳能电池的输出功率,就会导致母线电容电压即太阳能电池的工作电压进一步降低。工作点由最大功率点向左移动时,太阳能电池输出功率进一步减小,又导致母线电压下降,直到无法维持控制器设定的逆变输出电流,这就是母线电压崩溃过程^[37]。

图 3-10 就是仿真得到的当光强扰动时,导致的独立光伏发电系统母线电压崩溃过程波形。从图中可以看到,太阳辐照度在某一时刻发生 20% 的阶跃下降, 0.1s 后恢复。该扰动发生后,虽然根据电导微增法,系统通过判断得到了正确的跟踪方向,但由于功率环的控制周期较长,而且每个控制周期调整输出功率的步长有限(步长太大可能导致系统振荡,并影响稳态下的跟踪精度),短时间内输出功率参考值会偏离并超出太阳能电池当前最大功率,引起母线电容电压持续下降^[38]。工作点由最大功率点向左移动时,太阳能电池输出功率进一步减小,又导致母线电压下降,直到无法维持控制器设定的逆变输出电流直至输出电流畸变。母线电容输入和输出电流平衡后,母线电压才能达到稳定并再次缓慢跟踪上最大功率点。

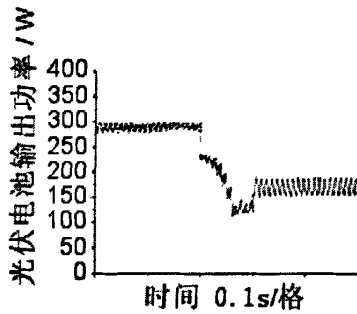
太阳辐照度扰动引起的 MPPT 控制失效会严重影响光伏系统的效率和可靠性。因此,必须在控制算法中加以考虑以防止这种情况的发生。



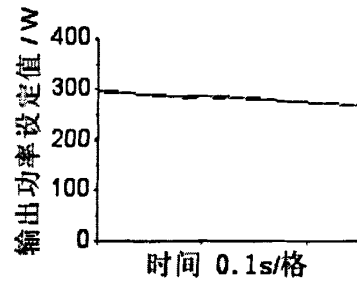
(a) 光照强度



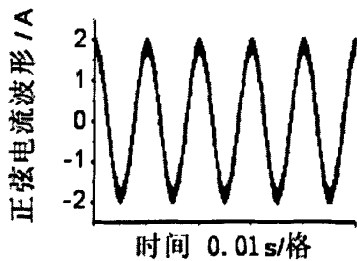
(b) 母线电容电压



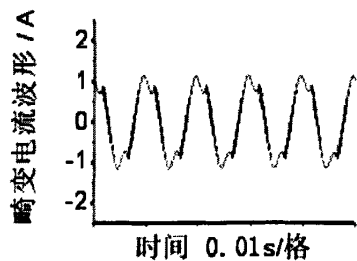
(c) 光伏电池输出功率



(d) 输出功率设定值



(e) 正弦电流波形



(f) 畸变电流波形

图 3-10 母线电压崩溃过程仿真波形

3.4 变步长自适应给定的最大功率点跟踪控制

针对独立式光伏发电系统中的母线电压崩溃现象,本文提出了一种新颖的改进 MPPT 方法,称为具有功率前馈控制的变步长自适应法。这种算法的改进主要在于功率环的控制,改进后的算法实现了系统的高效、稳定运行。

3.4.1 变步长自适应给定算法

在扰动过程中，如果扰动步长大，跟踪最大电流点速度快，但有可能不能准确跟踪或者在最大功率点稳态附近有振荡情况，而这些振荡将减少光伏阵列能量转换效率。如果步长变小，减小在最大点附近振荡，同时增大光伏阵列能量转换效率，则会导致响应速度变慢，当环境条件变化快时有可能偏离最大功率点。因此，合理设置扰动步长对于跟踪最大功率点的快速、准确性有决定性作用。为了避免上述情况，这里采用变步长自适应法。在电流扰动过程中，电流扰动步长为 ΔI ，在每次循环时加到参考值上

$$I_{ref}(k) = I_{ref}(k-1) + \alpha \cdot \Delta I \quad (3-4)$$

式中， α 为增加或减少敏感度的系数； ΔI 由下式确定

$$\Delta I = K \cdot \frac{|\Delta P_{pv}|}{P_{pv}} \quad (3-5)$$

$$\Delta P_{pv} = P_{pv(k)} - P_{pv(k-1)} \quad (3-6)$$

式中， P_{pv} 和 $P_{pv(k-1)}$ 分别为当前和前一时刻光伏阵列的功率；扰动方向由 K 来决定， K 的符号与 P - W 曲线斜率符号相反^{[39][40]}。

ΔI 是基于光伏阵列功率变化 ΔP_{pv} 的，根据功率变化随时被自动调节。扰动步长由 ΔI 和 α 来确定， α 根据 ΔP_{pv} 的不同取不同的值，

$$\alpha = \begin{cases} 0.15 & |\Delta P_{pv}| > \Delta P_m \\ 0.03 & e < |\Delta P_{pv}| \leq \Delta P_m \\ 0.2 & |\Delta P_{pv}| \leq e \end{cases}$$

式中， ΔP_m 为设定的最大误差值， e 为设定的较小误差值。在稳态时， $\Delta P_{pv} \rightarrow 0$ ，则 $\Delta I \rightarrow 0$ ，因此电流参考值 $I_{ref(k)}$ 保持在前一时刻的值，且有很小的变化。因此系统稳定运行时，在功率最大点附近振荡是很小的^[41]。

3.4.2 控制结构及原理

本课题设计的系统中采用 DC/DC 变换器、蓄电池和逆变器的并联结构，由于蓄电池的钳位作用，DC/DC 变换器的输出电压变化不

大，姑且认为是恒定量，故调节 DC/DC 变换器的输出电流 I 即是调节光伏发电系统的输出功率 P 。自适应给定的最大功率点跟踪控制的结构原理如图 3-11 所示。

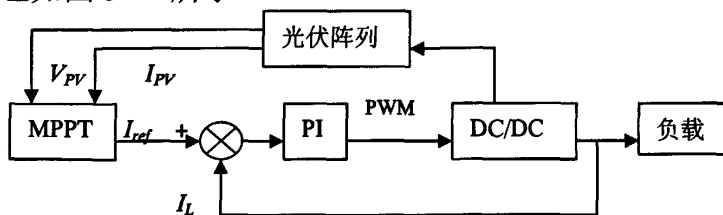


图 3-11 MPPT 控制结构图

MPPT 控制过程中，首先施加给定电流 I_{ref} 的扰动量，然后检测 I_{pv}, V_{pv} 的值，根据功率变化情况确定扰动方向，产生下一步的 I_{ref} ，实现对给定电流的跟踪，如此循环往复，进而实现最大功率点的跟踪控制^[42]。

变步长自适应的控制算法中，在每个控制周期里， P_{REF} 的设定流程如图 3-12 所示。其中 ΔP 为设定的太阳能电池输出功率跌落阈值， PI 为输出功率设定值的修改步长， K 为变步长系数，根据仿真结果，其值在 2 到 4 之间时可以使系统同时获得较好的稳态精度和动态性能。

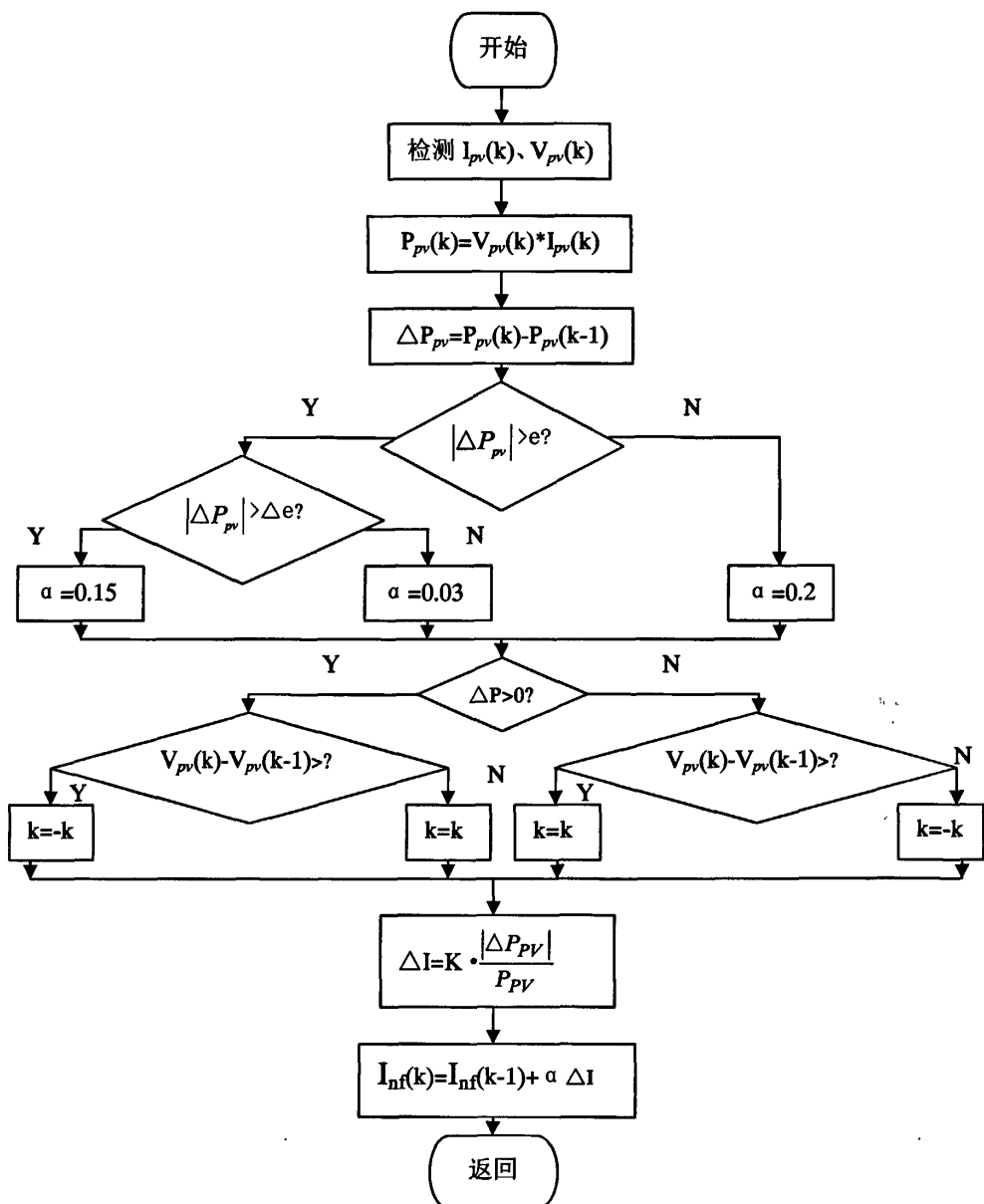
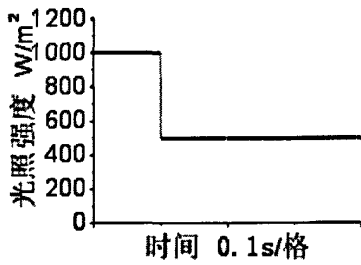


图 3-12 算法流程图

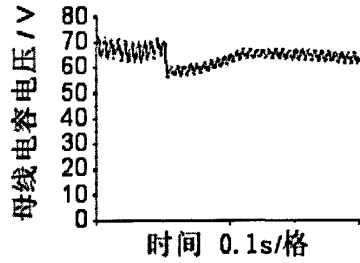
在太阳辐照度比较稳定或者只有较小扰动时，变步长的 MPPT 方法与定步长算法相似，都是通过增加或减少逆变电路的输出有功功率达到跟踪太阳能电池最大工作点的目的。不同的是，变步长算法中增加或减少 P_{REF} 时采用了不同的步长值。增加情况下的步长小，减小情况下的步长大。这样，当 P_{REF} 超出当前太阳能电池最大功率时，系统能较快减小其值以保证母线电压不至于跌落太多，使光伏阵列始终工作在最大功率点附近，从而达到系统的稳定。

但是,在太阳辐照度发生较大扰动或者阶跃变化时,用较大的步长减小 P_{REF} 仍不能保证系统的稳定。在新的算法中,系统在前端实时检测太阳能电池输出电压 U_{PV} 和电流 I_{PV} , 计算得到其输出功率 P_{PV} 。当检测到太阳能电池输出功率突然变小的情况时,则认为太阳辐照度发生阶跃变化,系统跳出跟踪过程,参照这时的 P_{PV} 值来重新设定逆变输出功率 P_{REF} , 使母线电容上输入输出电流基本平衡,这样就避免了母线电压崩溃现象^[43]。

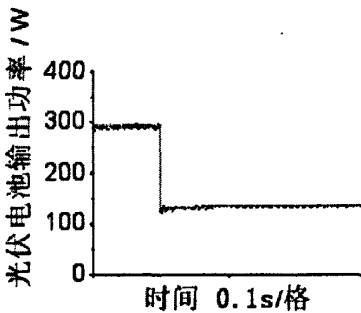
采用与图 3-10 中相同的仿真参数设置,应用新算法对独立光伏发电系统进行了仿真。图 3-13 是光强发生下降阶跃情况下的仿真波形。由图可知,采用新的算法后,由于控制系统实现了对太阳辐照度阶跃变化的准确检测,并快速地修正减小了的逆变输出功率参考值,从而避免了母线电压崩溃现象。仿真表明,在太阳辐照度下降阶跃达到 50% 的情况下,系统变步长自适应算法仍具有较好的稳定性。



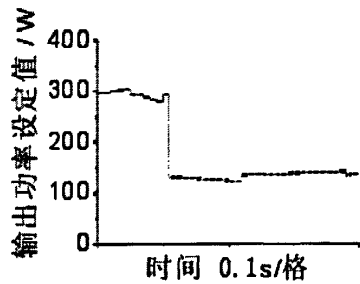
(a) 光照强度



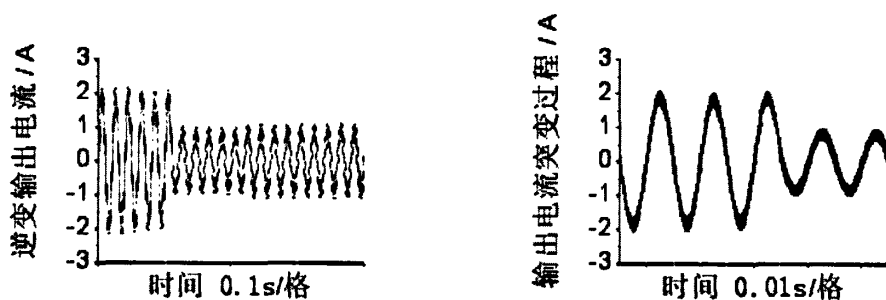
(b) 母线电容电压



(c) 光伏电池输出功率



(d) 输出功率设定值



(e) 逆变输出电流

(f) 输出电流突变过程

图 3-13 MPPT 方法在光强下降阶跃情况的仿真波形

在研究经典的控制算法基础上,提出了一种具有功率前馈控制的变步长自适应 MPPT 方法。实验结果表明,在变步长自适应算法的控制下,独立式光伏发电系统可以稳定、高效地追踪光伏阵列最大功率点。同时,在太阳辐照度、环境温度等系统参数扰动情况下,能快速寻找新的工作点,保持系统稳定,表现出很好的动态特性。

第4章 最大功率点跟踪控制仿真研究

4.1 光伏电池模型

根据光伏电池的物理模型和超越方程式,利用 SIMULINK 的模块库,搭建光伏电池的仿真模型,如图 4-1 所示。其中, $V_{OC}=42V$ 、 $I_{SC}=18.9A$ 、 $V_m=35V$ 、 $I_m=16.1A$ 、 $R_s=0.1\Omega$ 等,在实现仿真过程中,将此模型封装成子系统的形式,便于仿真研究。

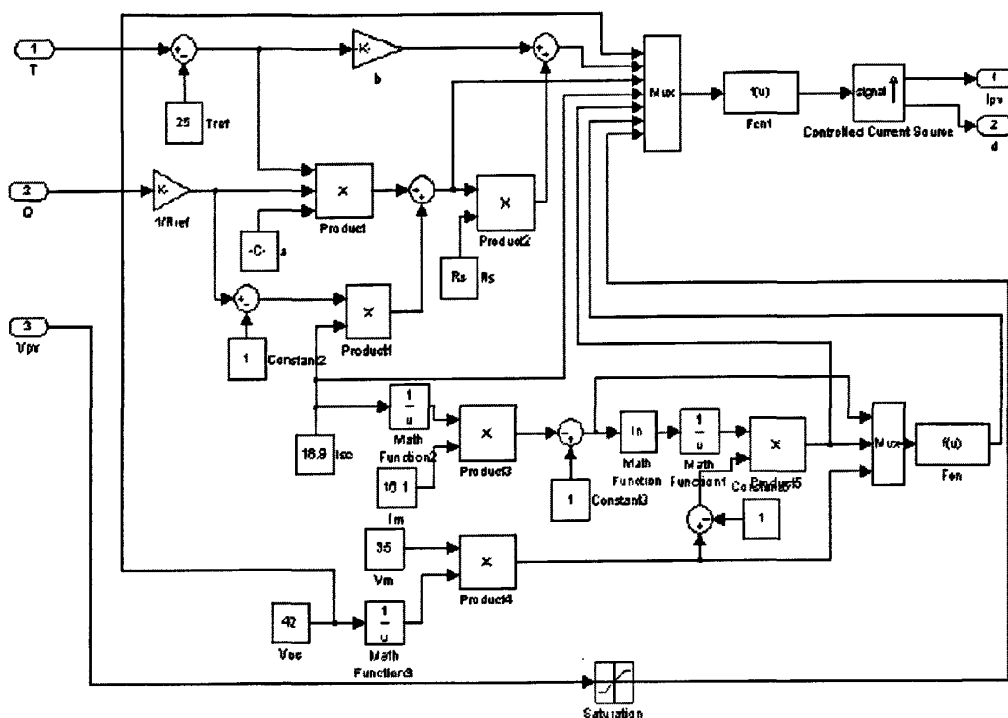


图 4-1 光伏电池仿真模型

4.2 系统仿真模型

基于图 1-4 独立光伏发电系统结构图,在 MATLAB/Sim Power Systems 环境下,构造系统仿真模型。光伏阵列模块采用前面建立的仿真模型,MPPT 控制选用 MATLAB Function,编写程序实现,蓄电池采用等效电压源和内阻串联的结构,Buck 电路及其他元件选用模块库中的元件^{[44] [45]}。仿真原理图如图 4-2 所示,仿真过程中的参数

见表 4-1。

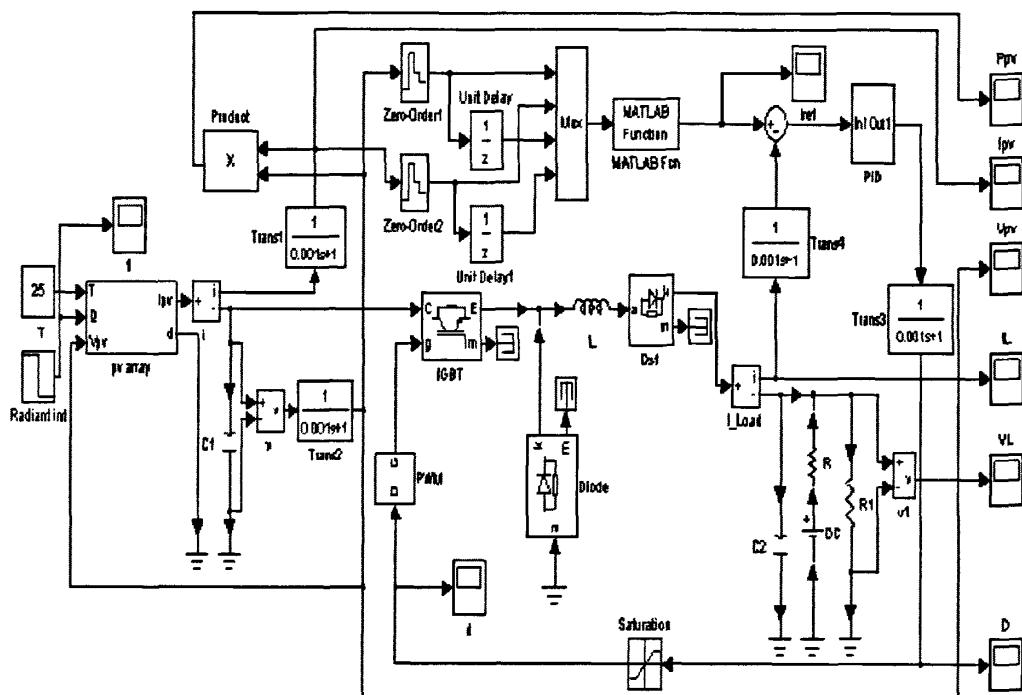


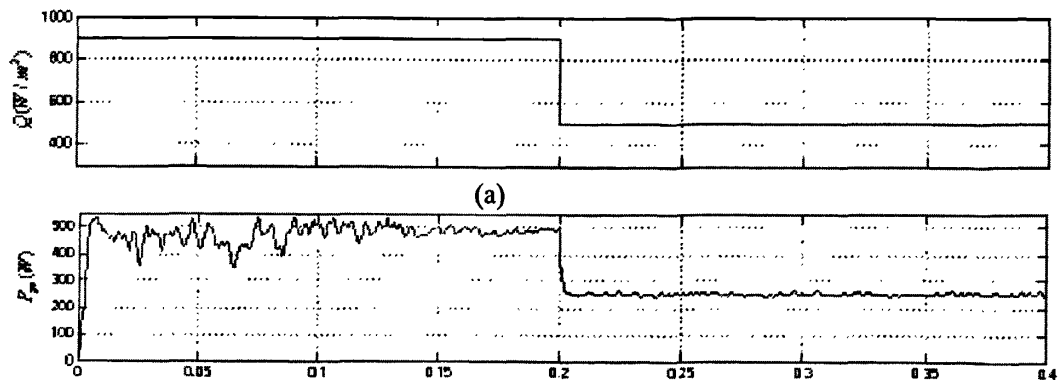
图 4-2 系统仿真原理图

表 4-1 仿真参数

温度 T	250 °C	频率 f	20KHz
滤波电容 C ₁ 、C ₂	2200 μ F	蓄电池电压 U	24V
采样时间 T	0.001S	蓄电池内阻 R	0.2 Ω
电感 L	0.2mH	负载 R ₁	5 Ω

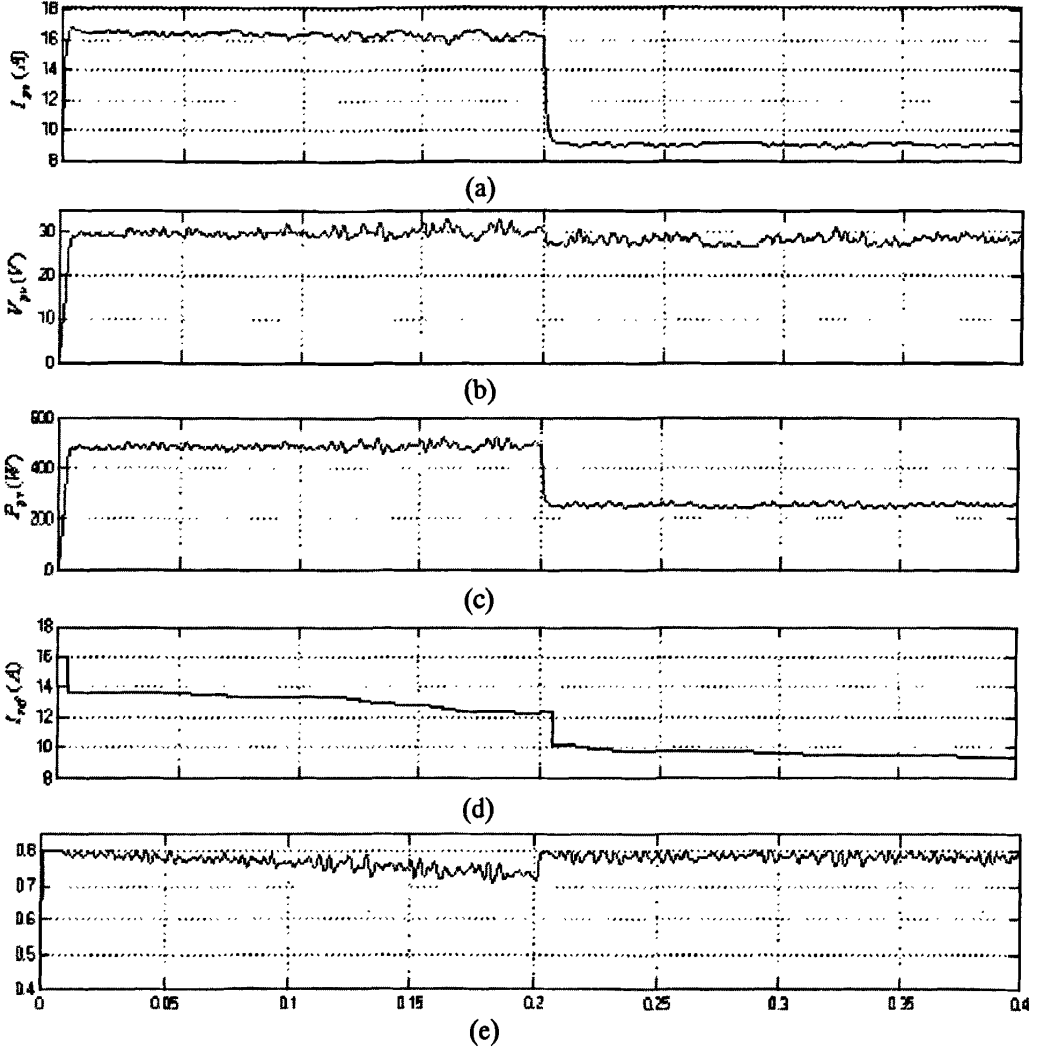
4.3 仿真结果

当温度为 250 °C、光强从 900W/m² 变到 500W/m² 时, 进行了固定步长扰动方法的仿真研究, 仿真结果如图 4-3 所示。



(b)
(a)光强变化; (b)输出功率
图 4-3 固定步长扰动时的输出曲线 ($\Delta I=0.6A$)

同样光强变化条件下, 进行自适应扰动算法的仿真, 仿真结果如图 4-4 所示。



(a)输出电流; (b)输出电压; (c)输出功率; (d)参考电流; (e)占空比
图 4-4 自适应扰动算法仿真结果

从仿真图可以看出, 自适应给定的最大功率跟踪算法的响应较快, 而且在稳定点附近振荡很小, 减小了稳定运行时的输出功率损耗。采用自适应变步长扰动方法, 电流扰动步长根据功率变化随时被自动调节, 可避免固定步长扰动的一些弊端, 能满足最大功率跟踪控制的快速性和准确性要求^[46]。

4.4 基于变步长自适应扰动法的独立光伏发电系统

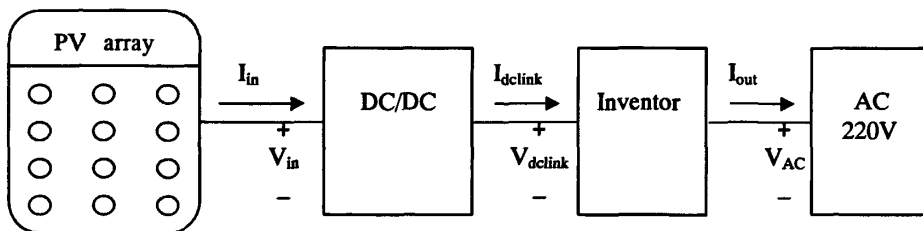


图 4-5 独立光伏发电系统组成示意图

图 4-5 为独立光伏发电系统组成示意图，主电路采用 DC/DC 和 DC/AC 两级变换实现逆变。显然控制电路需要保证中间母线电压 V_{dclink} 恒定，为后级逆变器提供稳定的输入电压。可见，此独立系统的后级部分相当于直流变换器的电压源性负载，且有：

$$P_{in} = P_{dclink} = P_{out} \quad (4-1)$$

$$P_{in} = I_{dclink} \cdot V_{dclink} = I_{out} \cdot V_{out} \quad (4-2)$$

鉴于输出电压基本维持在市电，且母线电压 V_{dclink} 经控制也恒定在固定电压值，故控制输出电流 I_{out} ，同时也控制了输入功率 P_{in} ^[47]。由仿真结果可以看出，仿真的结果与理论分析的结果是一致的，从而验证了基于变步长自适应扰动法 MPPT 控制策略的可行性和正确性。

第5章 系统设计与实现

通过对第3章和第4章所提出的控制方案的研究和分析,为确认方案的可行性,建立了一套模拟实验系统。样机由主电路和控制电路两部分组成,主电路采用两级DC/DC变换实现最大功率点的跟踪。其中前级的DC/DC拓扑结构采用一个BOOST电路;后级的DC/DC拓扑结构采用一个BUCK电路代替实际独立发电状态下的单相逆变器。BUCK电路的控制部分采用SG3525作为控制芯片,BOOST电路采用TI公司的数字信号处理器芯片DSP56F803(该芯片国内用的少)为主控单元设计了控制电路,同时设计了系统的保护电路。本章将主要介绍该系统的软件和硬件设计及其实现过程,包括主电路结构及参数选择、控制电路、驱动和保护电路设计。

5.1 主回路的实现

最大功率转换将光伏电池所产生的电能转变成高压或低压的形式输出,以供给各种类型的负载使用。系统因使用不同的DC/DC转换器,其转换的形式和转换的效率也有所不同。DC/DC转换电路主要由功率电子元件组成,在本设计中选用MOSFET。

升降压式转换电路输出电压的范围较宽,输出电压既可以高于它的输入电压也可以低于它的输入电压,输出电压的极性与输入电压的极性相反。本设计中采用Buck-Boost电路实现MPPT功能,光伏电池组的输出连接Buck-Boost变换器的输入端,Buck-Boost变换器的输出受MPPT算法的控制,且要给负载供电、蓄电池充电。图5-1为主回路电路。

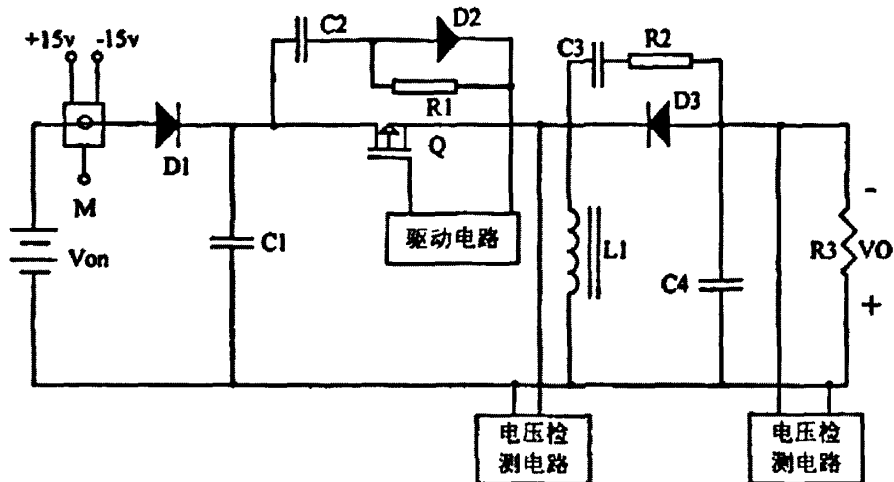


图 5-1 主回路电路

已知光伏电池（型号为 E6M 的单晶硅光伏电池）组件的额定功率为 12.2W，额定电压为 17.2V，4 块光伏电池串联电压为 68.8V，我们直接用一个模拟的直流可调电源模拟 4 块光伏电池的串联组件，蓄电池的浮充电压为 55.2V，要求 Buck-Boost 变换电路工作在连续状态。开关管 Q 的开关频率选为 45KHz，主电路中的电感 L、电容 C 以及开关管 Q(用 MOSFET)的参数确定如下：

电感电流连续时，

$$M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D} = \frac{55.2}{68.8} = 0.8 \quad (5-1)$$

$$D = \frac{M}{1+M} = 0.44 \quad (5-2)$$

蓄电池充电电流取 5A，最小负载电流 I_{omin} 为 5A，令最小负载电流大于临界负载电流 I_{OB} 。

由 $I_{omin} \geq I_{OB} = \frac{V_o(1-D)^2}{2Lf_s}$ 可得： $L \geq \frac{V_o(1-D)^2}{2I_{OB}f_s} = 38.5 \times 10^{-6}H$ ，取

$$L = 45 \times 10^{-6}H \quad (5-3)$$

验算： $L = 45 \times 10^{-6}H$ ， $D = 0.44$ 时，临界的负载电流为：

$$I_{OB} = \frac{V_o(1-D)^2}{2Lf_s} = \frac{55.2(1-0.44)^2}{2 \times 45 \times 10^{-6} \times 45 \times 10^3} = 4.28A \quad (5-4)$$

确保了电感电流连续， $M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1-D}$

纹波电压为 ΔV ，取 $\frac{\Delta V}{V} \leq 1\%$ ；

由 $\Delta v = \frac{V_s D_I T_s^2}{8CL}$ 可得,

$$C = \frac{V_s D_I T_s^2}{8C \Delta L} = 1.98 \mu F, \text{ 取 } C = 2.2 \mu F \quad (5-5)$$

开关管通过的最大峰值电流是 26.23A, 开关管承受的最大正向电压为 68.8V。若电流的过载安全系数为 2.5 倍, 取电压的过载安全系数为 2 倍, 则可选择功率开关管 IRFP264(46A/200V, 250W, MOSFET)两只并联^{[48][49]}。

5.2 驱动电路的实现

电力 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属氧化物半导体场效晶体管)是靠 MOS 电容器引起沟道反型及恢复来实现开、关的器件。

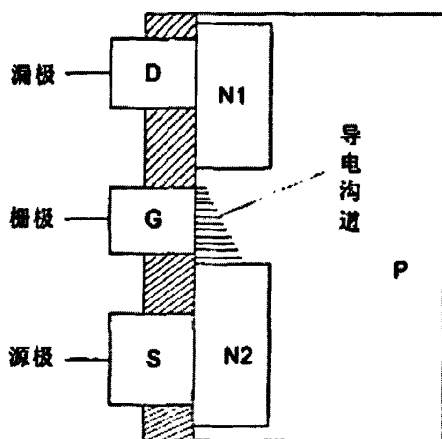


图 5-2 MOSFET 的结构图

如图 5-2 所示 MOSFET 的结构和等效电路。MOSFET 是以重掺杂硅衬底作为漏极 D, 在衬底上外延生长一层轻掺杂的 N⁻型区。通过扩展在外延层上再形成 p 型区, 在 P 型区形成重掺杂的 N⁺区作为源极 S。在沟道表面制成 SiO₂ 绝缘层, 外面覆盖金属膜做栅极 G。结构上源极金属板均将 N⁺区和 P 区连接在一起, 因此在源极和漏极之间寄生了一个二极管, 称之为体内二极管。

MOSFET 是利用多数载流子导电, 不存在少子导电和多余载流子复合表现出来的存储时间, 因此动作快、频率高, 不存在二次击穿。由于具有正温度系数, 将他们直接并联时可自动均流。MOSFET 属

于电压型驱动功率器件，驱动平均功率小，易驱动。

电力场效应晶体管的输入电容在 MOSFET 导通和关断时要充电和放电，充电和放电电流对 MOSFET 的开关速度影响很大，充电和放电的电流越多，开关的速度越快。基本的驱动方法有晶闸管驱动、脉冲变压器驱动、专用的集成电路驱动等。晶闸管实现的驱动没有隔离功能，脉冲变压器存在一定的漏感，这样使输出脉冲陡度受到限制，同时其绕组的寄生电感和电容使脉冲前后沿出现振荡，对功率管不利。并且脉冲变压器在传输脉冲时容易出现铁心饱和，其共模抑制比低。高性能的光耦原副边采用法拉第屏蔽进行去耦，因此抗共模干扰能力强，可以有效地抑制来自功率电路的干扰信号。但是光耦的驱动电流较小，不能满足本设计的要求。因此本设计我们采用 M57962L 作为脉冲的隔离驱动电路^[50]。

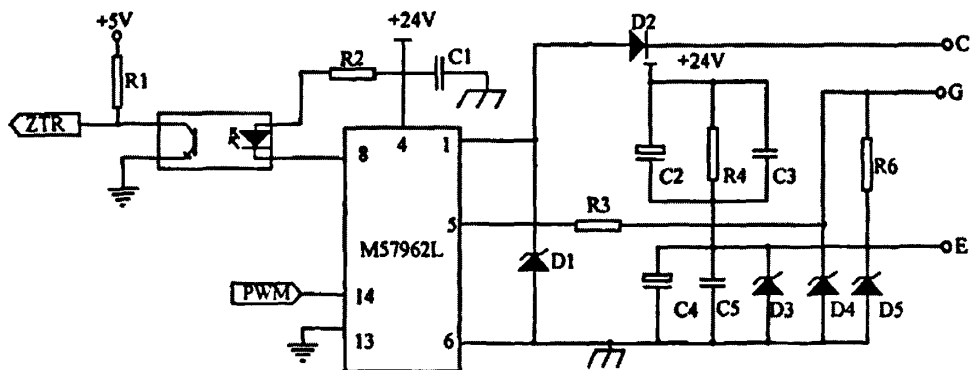


图 5-3 M57962L 构成的 MOSFET 驱动电路

用 M57962L 驱动 IGBT 模块的实际应用电路如图 5-3 所示。当 IGBT 模块过载(过流、过压)时，以及其集电极电压上升大于 15V 时，隔离二极管 D1 截止，①脚为 15V 高电平，则驱动器将⑤脚置低电平，使 IGBT 截止，同时⑧脚置低电平，使光耦工作，以驱动外接电路将输入端⑩脚置高电平，M57962L 复位至初始状态。稳压二极管用于防止 D1 击穿而损坏 M57962L，R1 为限流电阻。C2, C3 组成限幅器，以确保 IGBT 基极不被击穿^[51]。

5.3 控制系统硬件电路的设计

DSP56F8032 是 TI 公司推出的最先进、功能最强大的 32 位定点数字信号处理器，它既有数字信号处理能力，又具有强大的事件管理

能力,为控制系统应用提供了一个理想的解决方案。56F8032DSP 采用高性能的静态 CMOS 技术,低功耗设计,Flash 编程电压为 3.3V,主频高达 150MHz。其主要的资源配置有:

(1)CPU 内核:包括 32 位中央算术逻辑单元,16 位 $\times$ 16 位和 32 位 $\times$ 32 位乘且累加操作,8 个辅助寄存器;哈佛总线结构,四级流水线;快速中断响应和处理能力;统一寻址模式,4MB 的程序/数据寻址空间;高效的代码转换功能,支持 C/C++以及汇编语言;

(2)片内外设:内置振荡电路和 PLL 电路;看门狗/实时中断模块;事件管理器模块 EVA 和 EVB,每个事件管理器模块包括定时器、比较器、捕捉单元、PWM 逻辑电路、正交编码脉冲电路以及中断电路等;12 位的模/数转换模块,模/数转换模块单路转换时间 60ns,单个的转换时间 200ns;串行通信模块,包括串行外设接口(SPI)、两个 UART 接口模块(SCI)、增强的 Ecan2.0B 接口模块、多通道缓冲模块;丰富的片内存储器,包括 5K $\times$ 16 位的 Flash 存储器、1K $\times$ 16 位的只读存储器、两块 4K $\times$ 16 位的单口随机存储器(L_0 和 L_1)、一块 5K $\times$ 16 位的单口随机存储器(H_0)、两块 1K $\times$ 16 位单口随机存储器(M_0 和 M_1);4K $\times$ 16 位只读存储器(BOOTROM);功能强大的外部中断扩展模块,可支持 96 个外部中断^[52]。

56F8032DSP 是整个控制系统的核心,其在独立光伏发电系统的控制中主要实现以下功能:

(1)转换采样电路的模拟信号,计算出太阳能电池阵列的输出电压、输出电流以及输出功率,再将数据输出给显示电路。

(2)根据太阳能电池阵列的输出电压调整太阳能电池阵列的工作状态使其稳定工作在最大功率点。

(3)根据采样到的蓄电池的电压和充电电流,对其实现恒压限流充电以及实现过充过放保护。

(4)实现系统工作状态的切换。即当有日照时,使太阳能电池阵列向负载供电,多余的电能传输给蓄电池,将能量储存起来;如果太阳能电池阵列不足以向负载供电时,使蓄电池和太阳能电池阵列同时向负载供电^[53]。

基于 56F8032DSP 的控制系统框图如图 5-4 所示。控制系统包括

DSP 芯片、辅助电路、检测电路、驱动电路和扩展接口。

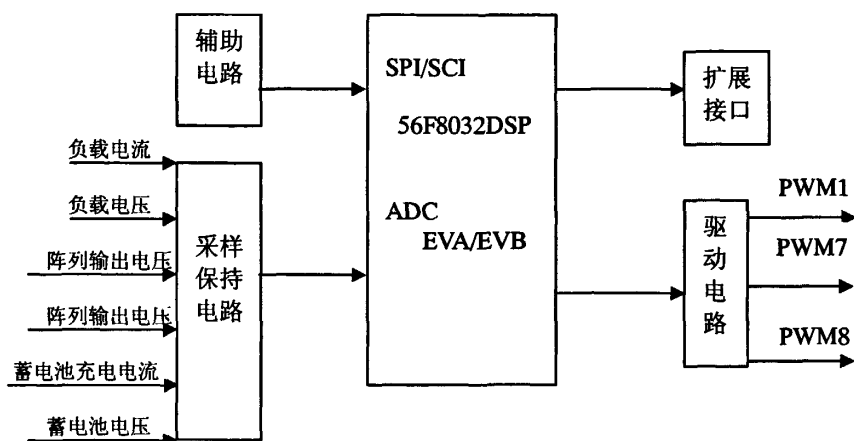


图 5-4 基于 56F8032DSP 的控制系统框图

(一)辅助电路

辅助电路主要包括 DSP 电源电路和时钟源电路。DSP 电源电路采用 TI 公司的电源管理芯片 TPS767D318。TPS767D318 电源芯片属于线性低压降型电压调节器，其可以由 5V 电压产生 3.3V 和 1.8V 的电压输出，其最大输出电流为 1A，可以满足一片 DSP 和小量外围器件的供电需要。时钟源电路是采用高精密石英晶体振荡器，为系统提供稳定的时钟振荡输入^[54]。

(二)采样电路

56F8032DSP 的模数转换模块能分辨的最高电压为 3.3V，因此采样电路输入到 A/D 模块的最高输入电压不得超过 3.3V。本系统电压采样信号经高阻值精密电阻分压得到，避免分压电阻流过的电流对主电路和采样电路的影响。电流采样电路是利用霍尔电流传感器将电流信号转换为电压信号。另外，为了减少后级电路对前级电路的影响，实现控制系统与主电路的隔离，需在采样信号后加入射极跟随器，射极跟随器的输入阻抗大，可减小前级被检测电路对控制电路的影响。

(三)驱动电路

系统功能的实现需要由控制电路生成主电路功率开关管所需要的 PWM 波，使主电路功率开关管实现开关动作来完成。但控制电路属于弱电信号，DSP 产生的 PWM 波信号峰值电压为 3.3 伏，输出电流在毫安级。主电路为通过功率电路控制电路得到的信号对于直接驱动功率器件无能为力，而且为了系统能安全、可靠的运行，控制电路

还必须和主电路实现良好的电气隔离。在有弱电信号和强电信号的电路中,为防止强电信号对弱电信号的影响,通常采用隔离技术实现电路信号的转换^{[55][56]}。

隔离技术可分为电磁隔离和光电隔离两种方式。光电隔离具有体积小、结构简单等优点,但存在共模抑制能力差、速度传输慢的缺点,而且快速光耦的速度也仅几十 kHz。电磁隔离用脉冲变压器作为隔离元件,具有响应速度快,原副边绝缘度高, dV/dt 共模干扰抑制能力强。考虑到主电路的工作频率本驱动系统采用电磁隔离驱动方式,如图 5-5 所示^[57]。

图中三极管 Q1 和 Q3 组成图腾柱输出,对输入电流有放大作用;二极管 D1 和 D2 在感性负载时起续流作用;C1 为原边隔直电容,阻止直流分量通过,避免变压器直流磁化而饱和;C2 为副边电容,复现原边隔直电容的电压;Z1 为稳压二极管,它使驱动电路在正向导通时间内,输出正幅值限制在 12V(稳压管两端的电压不能超过其稳压值,以免使其长期处于击穿工作状态,损耗太大)内;在反向导通时间内给副边电容 C2 充电。电阻 R2 为阻尼电阻,可阻止 MOSFET 的输入电容与电路分布电感一起产生的高频寄生振荡^[58]。

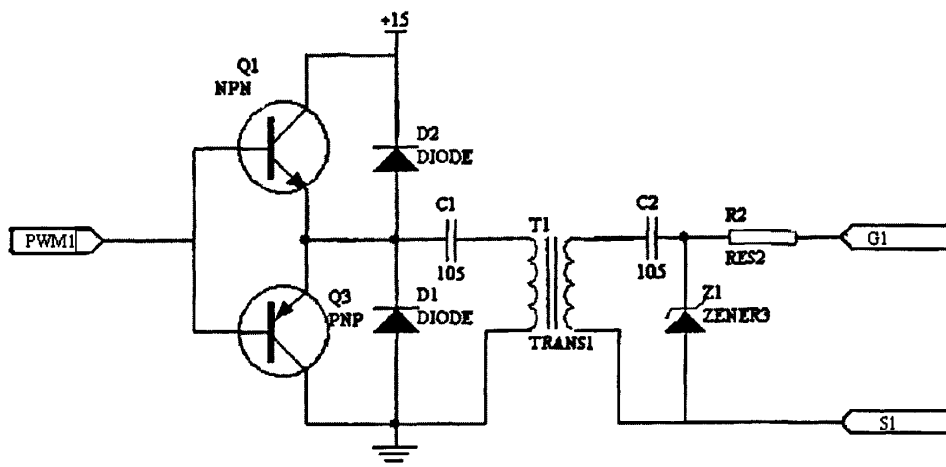


图 5-5 功率开关管驱动电路

5.4 控制系统软件的设计

TI 公司的 DSP 集成开发环境 CCS(Code Composer Studio)是基于 windows 的软件开发平台,是目前最流行的 DSP 开发软件之一,它

支持 TI 公司目前所有的 DSP 产品。CCS 可以简化和加速程序员创建和测试实时嵌入式信号处理系统的开发过程,从而缩短产品开发时间。CCS 主要包括了以下功能:

(1)集成可视化代码编辑界面,可直接编写 C/C++、汇编 h 文件和 cmd 文件等;

(2)集成代码生成工具,包括汇编器、优化 C/C++编译器、连接器;

(3)基本调试工具,如装入执行代码,查看寄存器、存储器等,支持 C/C++源代码系统调试;

(4)断点工具,包括硬件断点、数据空间读/写断点、条件断点等;

(5)数据的图形显示工具,可绘制时域/频域波形、眼图、图象等,并可自动刷新;

(6)支持多 DSP 共同调试,CCS 具有实时、多任务、可视化的软件开发特点,已经成为 TI 公司 DSP 家族程序设计、编程、调试、优化的利器^[59]。

控制系统根据太阳能电池阵列、蓄电池以及负载的工作状态分为两种运行模式:充电工作模式和放电工作模式,控制系统根据太阳能电池阵列、蓄电池以及负载的工作状态自动切换运行模式。充电工作模式:当控制系统运行于充电工作模式时,此时 DSP 有两路 PWM 波输出,即 PWM1 和 PWM7,分别用于控制功率开关管 Q1 和 Q3。当系统工作于充电模式时又有下列两种可能:(1)太阳能电池阵列输出功率大于负载功率,多余的电能供给蓄电池充电并实现太阳能电池阵列的最大功率点跟踪;(2)负载断开,太阳能电池阵列仅给蓄电池充电^[60]。

当系统工作于放电模式时又有下列两种可能:(1)太阳能电池阵列输出功率小于负载功率,多余的电能由蓄电池补充,并利用最大功率点跟踪技术实现太阳能电池阵列的最大功率点跟踪,同时使蓄电池放电电流最小;(2)太阳能电池阵列无功率输出,仅由蓄电池向负载供电。

由于两种模式的运行逻辑较为复杂,并且为了使程序结构逻辑清晰、可读性强、可移植性好,软件的程序设计采用 C 语言。主程序大致思路如下:开机上电后,初始化 DSP 的系统寄存器及外设寄存器,根据太阳能电池阵列、蓄电池以及负载的工作状态决定系统的运行模式,并按一定的采样周期(本试验为 10ms)读入采样电压和采样电流,

根据采样信息和控制算法改变输出控制信号的脉宽以达到预期的控制目标。在运行过程中若系统发生故障，则及时封锁控制信号输出。系统中 DSP 控制器外部时钟基准为 30MHz，产生的开关管控制信号频率为 20kHz。将 DSP 控制器事件管理器模块中的通用定时寄存器的记数方式设置为一般连续递增模式，并设置周期寄存器，使其周期为 50 微秒，通过控制算法改变比较寄存器的值以改变 PWM 输出波形占空比。控制系统主程序流程图以及蓄电池充电子程序流程图如图 5-6 所示。在实现蓄电池恒流充电和恒压限流充电时，本系统选用数字增量式 PID 算法^[61]。

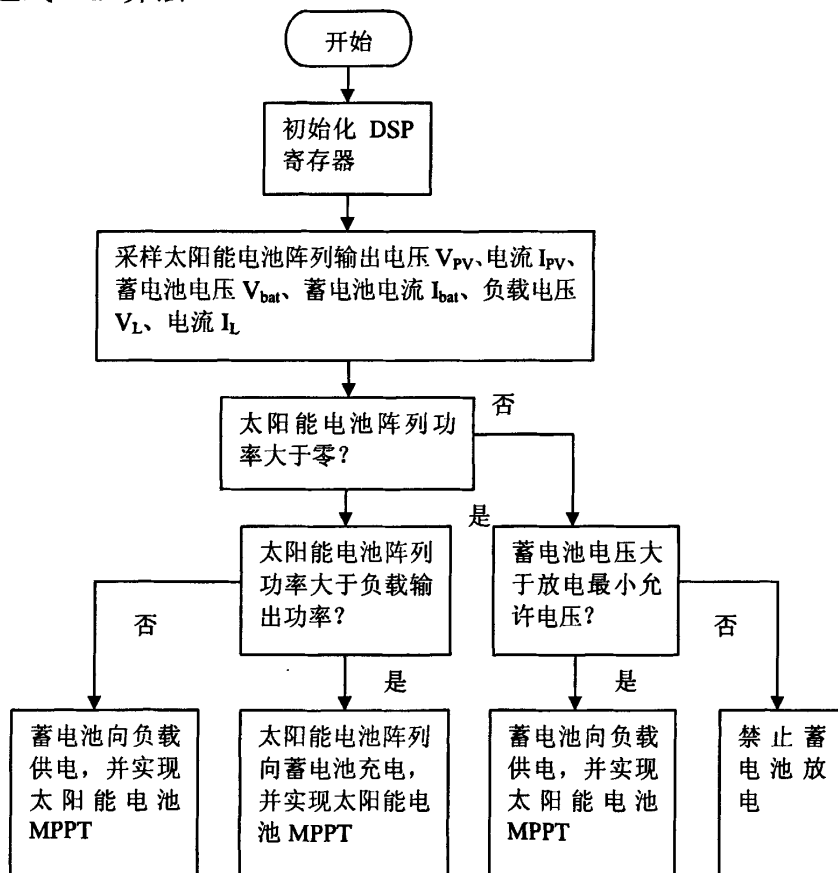
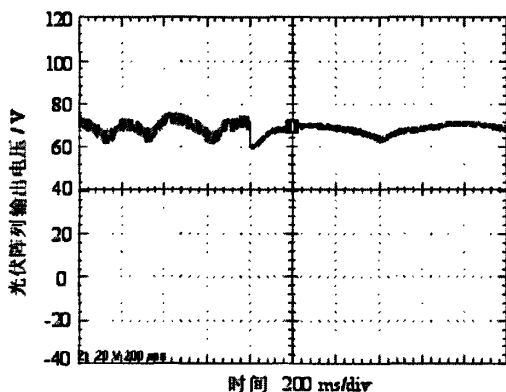


图 5-6 控制系统主程序流程图

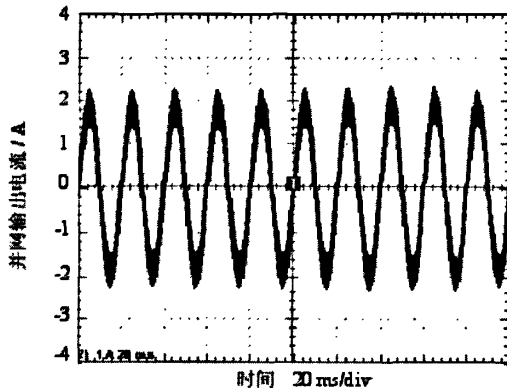
第 6 章 实验结果分析与总结

6.1 最大功率试验结果

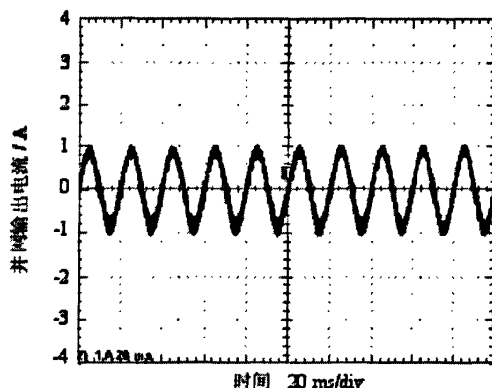
本文基于变步长自适应给定算法对独立光伏发电系统进行了 MPPT 控制实验,得到了比较理想的控制效果。图 6-1 是在试验系统上应用变步长自适应算法得到的实验波形。其中图 6-1 (a) 为实验记录的太阳辐照度发生下降阶跃情况下的母线电压波形,图 6-1 (b)、(c) 是太阳辐照度变化前后的逆变器输出电流。测试结果为:光伏系统的输入电压(即太阳能电池阵列的输出电压)为 58V,输入电流为 2.8A,输入功率为 162.4W。



(a) 太阳辐照度下降阶跃前后的母线电压波形



(b) 光照较强时的逆变器输出电流



(c) 光照较弱时的逆变器输出电流

图 6-1 独立系统实验波形图

系统输出采用 $60\ \Omega/200\text{W}$ 的功率电阻作为负载, 输出负载电压为 84V, 故输出功率为:

$$P_{out} = \frac{84^2}{60} = 117.6\text{W} \quad (6-1)$$

光伏系统效率:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{117.6}{162} = 0.73 \quad (6-2)$$

系统运行过程中, 前后级电路的开关管均处于实时快速的动态调节中, 前级调节实现 MPPT 控制, 后级调节保证直流母线电压的稳定, 从上述示波器中我们只能观测到系统处于稳定的运行状态, 鉴于通过普通示波器无法观测到占空比的调节变化过程, 但为了观测到太阳能输出功率的变化过程, 本文在硬件上增加了电池板输入电流采样部分, 为了核实 MPPT 的控制效果, 证明此时控制的功率稳定值确实为当前光强、温度下太阳能电池的最大功率点, 本文在运行程序中调用主动扫描模块。

实验原理如下: 在主动扫描程序模块中, 为了避免后级电路干扰, 首先控制后级 BUCK 电路的 PWM 脉冲, 使其开关管完全导通(只需将 PI 调解器的给定置零, 则 SG3525 的输出脉冲占空比为 1), 则太阳能电池相当于通过前级 BOOST 电路直接与负载连接。此时控制 BOOST 的占空比就相当于调节太阳能电池的可变负载, 也即调节其输出功率。按照图 2-5 所示光伏电池的特性曲线, 首先通过给定占空比令电池阵列电压从当前 56V 稳定值上升至 69V, 用时 10S 左右, 然后控制电池阵列电压以 0.1V 的步长逐点减小至 28V 左右(共用时近

3min), 等价于间接控制占空比以非线性方式逐步增大, 从而得到每一点对应的电池阵列输出数据。随着电池阵列电压的逐步减小, 由输出特性可知, 其输出电流将逐步增大, 输出功率随电压变化呈现均匀变化, 而在变化过程中必定会经过某一点, 使其能够达到当前环境下的最大功率。整个扫描过程的数据都被记录下来, 绘制的曲线由图 6-6 所示, 功率曲线中呈山坡状的波动部分反映了整个扫描过程的功率变化, 可以看到, 在中间某一点上, 输出功率曾经经过了最大值, 如此, 我们找到了当前环境下太阳能电池阵列的最大输出功率值。当控制程序跳出扫描模块, 恢复到 MPPT 的控制程序, 此时可以清楚的看到, 控制曲线再次恢复到稳定状态, 输出功率前后稳定值与刚才检测过程中经历的最大功率点处于同一水平线上。

由此可知, 采用变步长自适应 MPPT 的控制方法, 光伏系统确实能够稳定工作于当前固有环境下太阳能电池的最佳工作点, 从而最大限度地利用了能源。

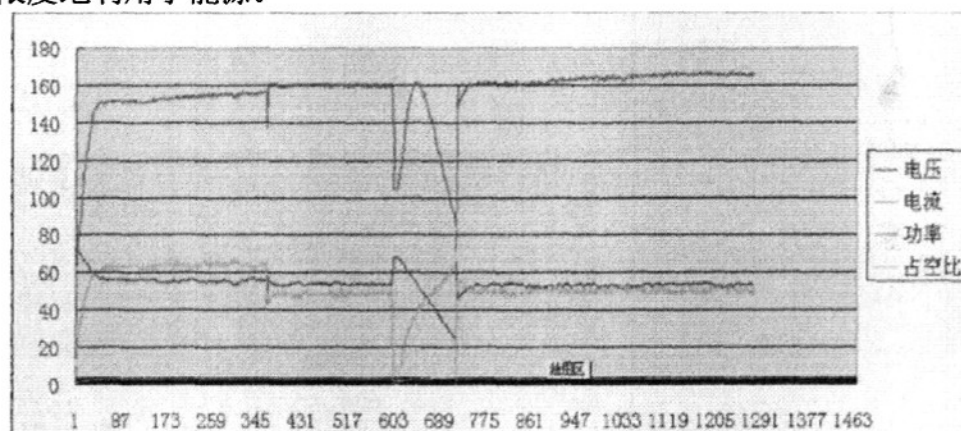


图 6-6 MPPT 控制的太阳能电池参数变化过程

6.2 全文总结

太阳能作为一种无污染的可再生能源将是下世纪人类能源利用的重要来源。结合前人的研究, 查阅大量的资料, 详细论述了带有最大功率跟踪的独立光伏发电系统的研制过程。本文对 MPPT 的原理作了较为详细的论述, 详细介绍了光伏电池阵列, 主回路参数的确定方法, 以及控制系统, 驱动电路和保护电路的设计。并采用 MATLAB 开发工具进行仿真, 利用变步长自适应给定算法进行了最大功率跟

踪。

通过对独立光伏发电系统中的功率跟踪这一核心问题进行理论分析和实验研究的基础上,开发研制了一套独立光伏发电系统的简化模拟系统,而且编写出了系统运行的程序。并通过监控软件进行了具体的实验研究。实验结果显示,本文提出的最大功率跟踪方法是可行的,并达到了预期的目的和标准。

6.3 后期工作

由于时间所限,本论文设计出独立光伏发电系统的简化模拟模型,即采用 BUCK 直流变换器代替实际应用中的单相逆变器,旨在研究测试此种基于变步长自适应给定的最大功率点跟踪技术,而对于光伏系统实际运行中存在的几大问题没有予以深入研究,例如控制输出电流与电网电压同频同相的问题以及逆变器反孤岛效应检测控制的实现,在实际独立光伏发电系统中,这两个核心问题显然不容忽视,有待后期进一步的研究工作。

参考文献

- [1] 赵玉文.我国太阳能光伏产业发展形势和思考.世界科技研究和发
展,2003,25(4):31-38.
- [2] 孔力.太阳能光伏发电.机械工业出版社,2000:186~188.
- [3] 赵争鸣等.太阳能光伏发电及其应用.科学出版社,2005:97~98.
- [4] 许洪华.风光互补混合发电系统优化设计[D].中国科学院:硕士学位论文
文.2001.
- [5] 定世攀.独立运行风/光互补发电站控制检测系统的研究[D].中国科学院研究
生院:硕士学位论文.2002.
- [6] S.R.Wenham,C.B.Honsberg,J.E.Cotter,R.Largent,A.G.Aberle,M.A.Green.Australi
an Educational and Research Opportunities arising through Rapid Growth in the
Photovoltaic industry. Solar Energy Materials&Solar Cells,2001,67(1):647-654.
- [7] B.Bhargava.Overview of Photovoltaic Technologies in India.Fuel and Energy,
2002,43(3):3.
- [8] Weidong Xiao,William G.Dunford.A Modified Adaptive Hill Climbing MPPT
Method for Photovoltaic Power Systems[C].IEEE Power Electronics Specialists
Conference,Gremany. 2004:1957-1963.
- [9] Chih-Chiang Hua,Pi-Kuang Ku.Implementation of a Stand-Alone Photovoltaic
Lighting System with MPPT,Battery Charger and High Brightness LEDS[J]:IEEE
PEDS.2005,1601-1605.
- [10] T.Kawamura,K.Harada,Y.Ishihara.Analysis of MPPT Characteristics in
Photovoltaic Power System[J]:Solar Energy Materials and Solar Cells. 1997,44:
155-165.
- [11] J.Riatsch,H.Stemmler,and R.Schmidt.Single Cell Module Integrated Converter
System for Photovoltaic Energy Proc.EPE'97,Trondheim,Norway,1997,1:71~77.
- [12] E.Bezzel,H.Lauritzen,S.Wedel.The Photo Electro Chemical Solar Cell.Danish
Technological Institute,2004,www.solarcell.com.
- [13] L.E.de Graaf,T.C.J.vander Weiden.Characteristics and Performance of a
PV-system Consisting of 20 AC Modules.Photovoltaic Energy Conversion,1994,IEEE

World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1994:921~924.

[14] Michihiko Nagao, Hideo Horikawa, Kousuke Harada. Photovoltaic System using Buck-Boost PWM Power Inverter. Trans. On IEE of Japan, 1994, 114-D(9):885~892.

[15] C. Hua, J. Lin, and C. Chen. Implementation of a DSP-controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking. IEEE Trans. Ind. Electron. 1998, 45(1):99~107.

[16] 何冠英. 电子逆变技术及交流电动机调速系统. 机械工业出版社. 1985:103~104.

[17] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术. 第3版. 机械工业出版社. 1999:213~217.

[18] 首福俊, 黄念慈, 窦伟. 一种新型的光伏逆变器控制方法[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2):66-68.

[19] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[J]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.

[20] Busos, Fasolos, Malesani L, et al. A dead beat adaptive hysteresis current control. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(4):1174-1180.

[21] Kang B J, Liaw C M. Robust hysteretic current controlled PWM scheme with fixed switching frequency. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 20(1), 148(6):503-512.

[22] 顾和荣, 杨子龙, 邵伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9):108-112.

[23] Tatsuya tano, Miki hiko Matsui, Dehong Xu. Power sensorless MPPT Control Scheme Utilizing Power Balance at DC Link (System Design to Ensure Stability and Response of CI). USA: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001:1309-1314.

[24] 陈伯时等. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:59-71.

[25] 杨宝清等. 实用电路手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002:162-169.

[26] 杨旭东, 刘行景, 杨兴瑶. 实用电子电路精选[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999:142-147.

[27] 江思敏等. TMS320LF240x DSP 硬件开发教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003:21-25.

[28] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:12-16.

- [29] Xinbo Ruan, Linqun Zhou, Yangguang Yan. A novel zero-voltage and zero-current-switching PWM three-level converter. IEEE PESC'2001, pp1075-1079.
- [30] 欧阳名三, 余世杰, 沈玉梁. 一种太阳能电池 MPPT 控制器实现及测试方法的研究, 电子测量与仪器学报[J], Vol. 18 No.2 2004, 5.
- [31] 杨海柱, 金新民. 最大功率点跟踪的光伏并网逆变器研究, 北方交通大学学报[J], Vol. 28 No.2, 2004, 4.
- [32] Chihchiang Hua, Jongrong Lin, Chihming Shen. Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No.1, Feb, 1998, pp99-107.
- [33] Youngseok Jung, Junghun So, Gwonjong Yu, Jaeho Choi. Improved Perturbation and Observation Method (Ip&O) of MPPT Control for Photovoltaic Power Systems. Photovoltaic Specialists Conference, 2005, pp 1788-1791.
- [34] 郑诗程, 苏建徽, 余世杰, 沈玉梁. 具有 TMPPT 功能的数字式光伏水泵系统的设计[J], Vol. 18 No.9 2006, 5.
- [35] 雷元超, 陈春根, 沈骏, 黄跃杰, 程国程. 光伏电源最大功率点跟踪控制方法研究, 电工电能新技术[J], Vol. 23, No.3, 2004, 7.
- [36] 王环, 金新民. 光伏并网逆变器最大功率点的跟踪控制. 电子产品世界, 2004, 2 月下半月.
- [37] Yeong-Chau Kuo, Tsorng-Juu Liang, Jiann-Fuh Chen. Novel. Maximum-Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 48, No.3, June 2001, pp594-601.
- [38] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, Nicholas C. Voulgaris. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No.1, Jan 2001, pp46-54.
- [39] R. Janarthanan M. Sundar Raghavan S. Suresh Kumar. Development of Low Cost, Efficient Residential Utility Interface for Modular Pv System with Improved Power Quality. TENCON 2004, Vol. 4, 2004, pp 179-182.
- [40] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. Optimizing Sampling Rate of P&O MPPT Technique. 2004 3 5th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany, Vol. 3, 2004, pp 1945-1949.
- [41] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Massimo

- Vitelli.Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method.IEEE Transactions on Power Electronics,Vol.20,No.4,July 2005,pp963-973.
- [42] Xuejun Liu ,Luiz A. C. Lopes. An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays. 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol.3, 2004,pp 2005-2010.
- [43] Weidong Xiao, William G. Dunford.A Modified Adaptive Hill Climbing MPPT Method for Photovoltaic Power Systems. 2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004,pp1597-1963.
- [44] Toshihiko Noguchi ,Shigenori Togashi, and Ryo Nakamoto. Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System. IEEE Transactions on Industrial Electronics .Vol.49,No.1 2002,pp217-223.
- [45] Noppadol Khaehintung, Krisada Pramotung, Phaophak Sirisuk. RISC Microcontroller Built-in Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Point Tracking in Solar-Powered for Battery Charger. TENCON 2004, Vol.4,2004,pp637-640.
- [46] 欧健昌等编著.电子设备的电磁兼容性设计[M], 电子工业出版社, 2003 年 9 月.
- [47] 钱照明, 程肇基编著.电力电子系统电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M], 浙江大学出版社, 2000 年 12 月.
- [48] J.J.M.Halls,R.H.Friend.Photoconversion of Solar Energy.Clean Electricity fromPhotovoltaics,2001,1:377-432.
- [49] M.A.Green.Photovoltaics:Coming of Age.IEEE Photovoltaic Specialists Conference,1999:1-7.
- [50] W.Hoffman.PV Solar Electricity:One Among the New Millennium Industries.17thEuropean Photovoltaic Solar Energy Conference,2001:851-861.
- [51] M.A.Green.Recent Developments in Photovoltaics.Solar Energy,2004,76(1):3-8
- [52] News.PV Manufacturing Jump sin2002.Renewable World,Mar-Apr,2003:12.
- [53] P.Maycock.The World PV Market-Production Increases 36%.Renewable Energy World,July-Aug,2002:147.
- [54] 杨克俊编著.电磁兼容原理与设计技术[M], 人民邮电出版社, 2004 年 8 月.
- [55] 周旭编著.电子设备防干扰原理与技术[M], 国防工业出版社, 2005 年 1 月.

- [56] 李建泉.隔离式 DC/DC 变换器电磁兼容性设计, 电源网, 2004 年 8 月.
- [57] 赵修科主编, 磁性元器件分册[M], 辽宁科学技术出版社, 2002 年, 第一版.
- [58] 杨淑霞, 胡映.开关电源的抗干扰设计, 现代电子技术, 2003 年 8 月.
- [59] 邹丽霞, 谢毅聪, 熊蕊.开关电源基于补偿原理的无源共模干扰抑制技术, 电源技术应用, 2004 年 5 月.
- [60] 罗卫华, 陈昌旺, 张斌.解析几种有效的开关电源电磁干扰的抑制措施, 21 IC 中国电子网, 2004 年 6 月.
- [61] Phase Shift Resonant Controller UC1879/2879/3879, Product&Applications Hand Book,1999, Unitrode Integrated Circuit.

致 谢

本论文的全部研究工作是在导师杨帆教授和胡为兵老师的具体指导和悉心关怀下完成的。在研究生的学习、课题研究以及论文写作过程中，杨老师忘我的工作热情、扎实的理论功底、严谨的治学作风使我受益匪浅。胡老师在本课题研究和实验过程中给予很多悉心的照顾，您专业技能扎实、实践经验丰富，从论文选题、课题研究到论文撰写无不凝聚了您的心血和汗水。胡老师严谨的治学态度，忘我的工作精神，诲人不倦的精神作风，使我终身难忘！

在即将结束研究生学习之际，特向两位老师表示最诚挚的感谢与崇高的敬意！

在本文研究工作的过程中，电气信息学院的赵党军老师对我给予了耐心的指导，还有李国平老师求真的学术风范和无私的奉献精神，将一直鞭策我进步。在此一并表示衷心的感谢！

最后，谨向一直在精神上和经济上支持我的家人和所有曾经关心和帮助过我的朋友表示最真诚的谢意！