

山东大学

硕士学位论文

光伏并网逆变器的研究及可靠性分析

姓名：尹静

申请学位级别：硕士

专业：电力电子与电力传动

指导教师：张庆范

20090430

摘 要

随着环境污染和能源短缺问题的日趋严重，寻找一种储备大、无污染的新能源已经上升到世界各国的议事日程。太阳能作为当今最理想环保的能源之一，已经得到了人类越来越广泛的应用。本文以光伏（Photovoltaic-PV）并网发电系统为研究对象，以最大限度利用太阳能、无污染回馈电网为主要目标，开展了光伏并网发电系统的理论研究和仿真，具有重要的现实意义。光伏并网逆变器是光伏并网发电系统中必不可少的设备之一，其效率的高低、可靠性的好坏将直接影响整个光伏发电系统的性能和投资。本文主要研究适用于并网型光伏发电系统的逆变器。

本文以一个完整的光伏并网发电系统为研究对象，重点对单相光伏并网系统进行了全面的分析，并从并网系统的主电路拓扑、控制策略、孤岛效应以及系统的可靠性分析几个方面做了详细的分析和仿真实验。

首先，介绍了国内外光伏并网发电产业的现状，并对光伏并网发电系统的组成结构、优缺点、发展趋势及光伏并网发电系统对逆变器的要求做了简单介绍，对光伏并网发电系统建立了总体认识。

其次，讨论研究了逆变器主电路的拓扑形式，并根据实际情况，选择了无变压器的两级结构，即前级 DC/DC 变换器和后级 DC/AC 逆变器，两部分通过 DClink 连接。前级的 DC/DC 模块采用 Boost 拓扑结构，后级的 DC/AC 逆变器采用逆变全桥实现逆变，向电网输送功率。讨论确定了逆变器输出电流的控制方式，并最终确定了光伏并网发电系统的总体方案。高性能的数字信号处理器芯片（Digital Signal Processor-DSP）的出现，使得一些先进的控制策略应用于光伏并网的控制成为可能。本文以 TI 公司的数字信号处理器芯片 TMS320F2812 为核心，设计了控制电路并给出了驱动电路、保护电路的设计以及系统的电磁兼容设计思想。应用 MATLAB/Simulink 中的工具箱搭建了整个电路模型，进行了仿真实验研究。

再次，我们已经知道孤岛效应问题关系到光伏并网发电系统的安全问题。本文分析了孤岛效应产生的原因、对电网的危害和目前各种常用的被动和主动及外部孤岛效应的检测方法。根据本文涉及的光伏并网发电系统的特点，采用了电压前馈正反馈检测孤岛的方法，然后详细介绍了该方法的原理和实现过程，

并给出了逆变器的反孤岛效应模型和仿真实验结果。仿真结果证明，该方法是可行的，并且达到了 IEEE Std.2000-929 标准的规定。

光伏系统的可靠性研究对整个系统的经济运行乃至投资决策产生了重要影响。本论文以光伏并网发电系统的基本组成为线索，对各部分进行可靠性分析，对满足一定可靠性水平的光伏并网发电系统进行分析，从而对其的推广使用起到了理论指导作用。

关键词：光伏并网发电系统；逆变器；孤岛效应；DSP；可靠性分析

ABSTRACT

With an increasingly serious problem of environmental pollution and energy shortages, looking for a large reserve, clean new energy has risen to the world's agenda. As one of the best environmentally-friendly energy sources, solar energy has been applied more and more widely by human. This paper deeply researches the grid-connected photovoltaic (PV) system, and does simulations with the main objection of transforming the solar energy into electrical energy maximum and no pollution. It has realistic significance to do researches and experiments on the grid-connected PV system. And the grid-connected PV inverter is one of the necessary equipments of the grid-connected PV system. The efficiency and reliability of inverter will influence the performance of the whole system. So an effective inverter suited to the grid-connected PV system is presented in this thesis.

This paper bases on grid-connected PV system as research object and focuses on single-phase grid-connected PV systems to conduct a comprehensive analysis, and then does a detail analysis and simulation from the main circuit topology of grid-connected system, control strategies, system parameters, anti-island effect as well as reliability analysis.

Firstly, the status of PV system home and abroad is introduced. The basic structure and types of the PV source, advantages and disadvantages, development trend, requirements on inverter are also presented. An overall understanding of the system is set up naturally.

Secondly, this paper discusses the topology of the main circuit of the inverter. In accordance with the actual situation, it is better to choose two stages transform structure, DC/DC converter with Boost topology structure and DC/AC inverter with full-bridge inverter, this two parts are connected by DClk. This paper discusses control mode of output current of the inverter and then determines the overall program of grid-connected PV system. With the development of digital signal processors (DSP), it is possible that some advanced control strategies can be applied to the grid-connected PV system. This paper takes digital signal processor

TMS320F2812 from TI Company as core cell of control circuits. The design of driver and protection circuits and system's EMC are introduced in detail. MATLAB/Simulink toolboxes are used to build the whole circuit model and the simulation study.

Then as we know islanding effect relates to the security issues of the grid-connected PV system. The paper analyzes the causes and effects as well as detection methods used now, such as passive and active and external islanding detection methods. According to the features of the system designed this paper, the voltage feed forward position feedback disturbance method is used to solve the problem, and then this paper builds the MATLAB model based on the method and carries out the simulation. The simulation result shows that the method is feasible and up to the demand of IEEE Std.2000-929.

Reliability study of PV system has an important impact on the economic operation and making investment decision to the entire system. This paper does reliability analysis of the grid-connected PV system according to the basal components. Doing analysis on the grid-connected PV system meeting a certain level reliability has played a guiding role to its use.

Key words: Grid-connected PV System; Inverter; Islanding Effect; DSP; Reliability Analysis

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 于静 日期： 2009.4.30

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学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、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 于静 导师签名： 张庆范 日期： 2009.4.30

第 1 章 绪论

1.1 课题背景

能源是人类经济及文化活动的动力来源。世界文明史上，人类不断的从自然界索取、探求适合生存和发展所需的各种能源，能源的利用水平折射出人类文明的进步步伐。从原始社会开始，化石能源逐步成为人类所用能源的主要来源，这种状况一直延续到科技发达的现代社会。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。全球资源专家们呼吁：煤炭、石油等可贵的化石资源应该是留给子孙后代的“化工原料”，而不该在我们这代人手中仅仅把它们作为燃料而消耗殆尽。此外，大量使用化石燃料已经给人类生存环境带来了严重的后果。目前由于大量使用矿物能源，全世界每天产生约 1 亿吨温室效应气体，已经造成极为严重的大气污染。如果不加控制，温室效应会将融化两极的冰山，这可能会使海平面上升几米，四分之一的人类生活空间将由此受极大威胁。当前人类文明的高度发展与地球生存环境的快速恶化已经形成一对十分突出的矛盾，它向全世界能源工作者提出了严峻的命题和挑战，在有限资源和环保严格要求的双重制约下发展经济已成为全球热点问题，而能源问题将更为突出。因此，人类要解决上述能源问题，实现可持续发展，只能依靠科技进步，大规模的开发利用可再生洁净能源。

太阳能具有储量的“无限性”、存在普遍性、开发利用清洁性及逐渐显露的经济性等优势，它的开发利用是最终解决常规能源，特别是化石能源带来的能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径，是人类理想的替代能源^[1]。在可再生能源中，太阳能光伏发电产业是全球发展最快的新兴产业之一，从 1996 年到 2006 年最近十年的平均年增长率为 40%，从 2001 年到 2006 年最近 5 年的平均年增长率为 45%，2006 年世界太阳能电池产量达到了 2790MW，总装机容量达到了 8GW。太阳能开发利用必将在 21 世纪得到长足的发展，并将在世界能源结构转移中担当重任，成为 21 世纪后期的主导能源^[2]。

太阳能的利用主要包括热利用、化学利用和光伏利用。热利用的主要形式是太阳能热水器、太阳能建筑以及太阳能热发电。太阳能热水器是利用太阳能热利用中商业化程度最高、应用最普遍的技术产品。太阳能热发电随着技术的

发展,成本逐渐降低,变得越来越可行。光化学利用主要指:太阳能光合作用、太阳能化学存储、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。光伏利用的主要形式是光伏发电,有独立供电和并网两种工作方式。过去光伏发电大多采用独立供电方式,用于偏远无电地区,而且用于户用和中小系统偏多,易受时间和季节等因素的影响。随着电力电子技术的进步和控制理论的发展,光伏产业发生了巨大的变化,已经转向并网发电^[3]。

1.2 光伏发电产业的现状

1.2.1 国外光伏发电产业的现状

光伏并网发电开始于上个世纪 80 年代初,美国、日本、德国、意大利都为此做出了努力^[4]。按照当时认识,建造的都是较大型的光伏并网电站,而且都是政府投资的试验性电站。试验结果在发展相应的技术方面都是成功的,但在经济性方面却并不十分令人鼓舞,主要是由于太阳能电池成本过高,虽然具有明显环境效益,但其发电成本却很难让电力公司接受。

通过改进工艺、扩大规模和开拓市场等措施,大幅度的降低了太阳能电池成本。最近 30 年,光伏组件的成本降低了 2 个数量级,2007 年世界重要厂商的成本为 2~2.3 美元/Wp,售价为 2.5~3 美元/Wp,而且这种降低的趋势还在继续。

90 年代以来,国外发达国家重新掀起了发展光伏并网系统的研发高潮,这次的重点并未放在建造大型并网光伏电站方面,而是侧重发展“屋顶光伏并网系统”。人们认为,屋顶光伏并网系统不单独占地,将太阳能电池安装在现成的屋顶上,非常适合太阳能能量密度较低的特点,其灵活性和经济性都大大优于大型并网光伏电站,有利于普及,有利于战备和能源安全。而且由于功率比较小,并网逆变器的体积也可以做的很小,因而可以直接安装在太阳能电池板的背面,使并网发电系统的安装和使用更加简易。

在各国的屋顶光伏并网系统发展中,德国的屋顶光伏并网系统发展速度始终是位于世界前列的。1993 年,德国首先开始实施由政府补贴支持的“1000 个光伏屋顶计划”^[5,6],同时制定了“可再生能源电力供应法”,规定光伏发电的上网电价为每度 0.99 马克,极大的刺激了光伏发电市场。由此为契机,德国

在 1995 年安装了太阳能发电系统容量 5MW，1996 年增加了一倍，达到了 10MW，1999 年扩大为 15.6MW。1997 年在慕尼黑贸易展览中心安装了世界上最大的屋顶太阳能并网发电系统，容量为 1.016MW。1999 年 1 月德国开始实施“十万屋顶计划”。2000 年安装太阳能发电系统容量超过 40MW。现在德国的太阳能发电市场已由探索阶段发展为繁荣的专业市场。

在技术方面，专用逆变设备和相关系统已经比较成熟，在欧洲光伏专用逆变器就有 SMA, Fronius, Sputnik, Sun Pwer 和西门子等众多的公司具有市场化的产品，其中 SMA 在欧洲市场中占有 50% 的份额。除欧洲外，美国、加拿大、澳大利亚、新西兰以及亚洲的日本在并网型逆变器方面也都已经产品化。这些都表明光伏并网发电产业已经是世界范围内一个蓬勃发展的高新技术产业，它和光伏器件（主要是太阳能电池）同时并列为光伏产业的两大支柱。

在光伏并网发电的行业标准方面，虽然现在还没有 IEC（国际电工委员会）标准，但各国都颁布了相应的试行标准，如美国 SANDIA 国家实验室的光伏并网发电系统标准等。

总之，从能源利用的国际发展趋势来看，光伏发电最终将以替代常规能源的角色进入电力市场，而并网发电将是光伏发电进入电力市场的必由之路。

1.2.2 国内光伏发电产业的现状

我国正处在经济转轨和蓬勃发展时期，但能源问题严峻，由于城市中大量使用化石能源，环境持续恶化。2000 年世界卫生组织公布的世界上污染最严重的十大城市中，中国占了 8 个。另一方面，我国具有丰富的太阳能资源，日照时数大于 2000h、太阳能总辐射量高于 $5016\text{MJ}/(\text{m}^2\text{a})$ 的地方约占全国总面积的三分之二以上，尤其是西部地区有很大的潜力。在这些地方发展并网发电计划，对于缓解当地的能源贫乏情况，提高当地人们生活水平有着极其重要的意义^[7]。

我国在 20 世纪 50 年代开始研究太阳能电池，于 1971 年首次成功应用于我国发射的东方红二号卫星。我国光伏产业发展经历了 2 个重要时期，第一个是在 20 世纪 80 年代中期，引进 4 条总计 5MW 的光伏电池生产线，光伏产业初步形成。第二个发展时期是在新世纪初，国家发改委在 2002 年启动了“送电到乡工程”，该工程光伏系统容量为 20MW，极大的拉动了我国光伏市场的需求。

尽管我国研制太阳能电池始于 1958 年，中国的光伏技术经过了 50 年的努

力,已经具有一定的水平和基础,但是与世界先进国家相比仍有不小的差距。近几年来,我国的光伏发电技术已经具有了一定的市场潜力和市场吸引力,但光伏并网发电的关键技术和设备主要依靠进口,光伏并网发电的技术更是刚刚起步,因此导致并网型光伏系统的造价高,依赖性强,制约了并网型光伏发电系统在国内的发展和推广。因此,掌握并网型光伏系统的核心——并网逆变技术对发展并网型光伏发电系统具有至关重要的作用^[8]。

国内光伏系统主要采用单位功率因数并网,不具备电能质量控制功能。因此,研究具有电能质量调节功能的光伏并网系统有重要意义,其研究主要放在并网逆变器的控制方法上,相同的拓扑电路,采用不同的控制方法能够产生不同的控制效果。对逆变器建立模型并进行分析,采用先进的控制策略对于光伏并网系统的性能是必不可少的。同时采用先进的控制算法是提高逆变器效率的方法之一^[9]。

1.3 光伏并网发电系统简介

1.3.1 光伏并网发电系统的组成

光伏并网发电系统是将太阳能电池发出的直流电转化为与电网电压同频同相的交流电,并且实现既向负载供电,又向电网发电的系统。光伏并网发电系统主要由光伏阵列、并网逆变器、控制器和继电保护装置组成。

光伏阵列是光伏并网发电系统的主要部件,由其将接收到的太阳光能直接转换为电能。目前工程上应用的光伏阵列一般是由一定数量的晶体硅太阳能电池组件按照系统需要的电压的要求串、并联组成的。

并网逆变器是整个光伏并网发电系统的核心,它将光伏阵列发出的电能逆变成 220V/50Hz 的正弦波电流并入电网。电压型逆变器主要由电力电子开关器件组成,以脉宽调制的形式向电网提供电能。

控制器一般由单片机或 DSP 芯片作为核心器件,控制光伏阵列的最大功率点的跟踪、控制逆变器并网电流的功率和波形。

继电保护装置可以保证光伏并网发电系统和电网的安全性。

光伏并网发电系统按照系统的设计要求不同可以分为两种^[10]:一种是不可调度式光伏并网发电系统,这种系统不含有储能环节;另一种是可调度式光伏

并网发电系统，这种系统含有储能环节。在不可调度式光伏并网发电系统中，并网逆变器将光伏阵列产生的直流电直接转化为和电网电压同频同相的交流电，完全由日照和环境温度等因素来决定并网的时间和并网的功率大小。它的优点是系统可以省去蓄电池而将电网作为自己的储能单元。当日照强烈时，光伏并网发电系统将发出的多余电能回馈电网，当需要电能时可以由电网输出电能。可调度式光伏并网发电系统增加了储能环节，系统首先对储能环节进行充电，然后根据需要可将光伏并网发电系统用作并网或者经逆变后独立使用，系统的工作时间和并网功率的大小可人为设定。当电网发生断电或者其它故障时，逆变器自动切除和电网的电气连接，同时可以根据需要选择是否进行独立逆变，用于对本地负载继续供电。

可调度式光伏并网发电系统在本论文中不做深入讨论。

1.3.2 光伏并网发电系统的优缺点

光伏发电是利用太阳能电池这种半导体电子器件有效的吸收太阳光辐射能，并使之转变成电能的直接发电方式。光伏发电具有以下明显的优点^[11,12,13]：

- 1) 无污染：零排放，无任何物质及声、光、电、磁、机械噪音等“排放”；
- 2) 可再生：资源无限，可直接输出高品质电能，有理想的可持续发展属性；
- 3) 资源的普遍性：基本不受地域限制，只是地区之间有丰富与欠丰富之别；
- 4) 机动灵活：发电系统可按需要以模块方式集成，可大可小，扩容方便；
- 5) 通用性、可存储型：电能可以方便的通过输电线路传输、使用和存储；
- 6) 分布式电力系统：将提高整个能源系统的安全性和可靠性，特别是从抗御自然灾害和战备的角度看，它更具有明显的意义；
- 7) 资源、发电、用电同一地域：可大幅度节省远程输变电设备的投资费用；
- 8) 太阳能发电系统建设周期短，由于是模块化安装，因此可用于小到几个毫瓦的太阳能计算器，大到数十兆瓦的光伏电站；
- 9) 光伏建筑集成：节省发电基地使用的土地面积和费用，是目前国际上研究及发展的前沿，也是相关领域科技界最热门的话题之一^[14,15]。

但目前光伏发电系统也存在以下几个问题：

- 1) 光伏阵列发电效率低；
- 2) 系统的造价成本高；

3) 发电运行受气候环境因素影响大。

4) 光伏并网发电系统作为一种分散式发电系统,对传统的集中供电系统的电网会产生不良的影响,如谐波污染、孤岛效应等。

1.3.3 光伏并网发电系统对逆变器的要求

作为光伏阵列和交流电网系统间进行能量交换的逆变器,其安全性、可靠性、逆变效率、制造成本等因素对光伏并网发电系统的整体投资和收益具有举足轻重的作用。因此,光伏并网发电系统对并网逆变器有如下要求^[16]:

1) 实现高质量的电能转换。并网逆变器输出的电流频率和相位与电网的必须严格一致,以使输出功率因数尽可能的达到1。

2) 实现系统的安全保护要求。如输出过载保护、输出短路保护、输入反接保护、直流过压保护、交流过压和欠压保护、孤岛保护及装置自身保护等,从而确保系统的安全性和可靠性。

3) 具有较高的可靠性。目前光伏并网发电系统主要在一些自然条件恶劣的地区,所以逆变器应在长时间的工作条件下保证低故障率,并具有较强的自我诊断能力,因此所设计的逆变器应具有合理的电路结构、严格的元器件筛选。

4) 最大功率的跟踪。最大限度的利用光伏阵列,提高逆变器的效率。

1.3.4 光伏并网逆变器的发展趋势

随着大规模集成电路 ASIC、现场可编程逻辑器件 FPGA 及数字信号处理器 DSP 技术的发展,以及先进的控制方法的提出,光伏并网逆变器的控制逐渐转向数字化和智能化。

首先,元器件正向着导通性好、快速化、智能化、封装合理化等几个方向发展,控制电路的元器件数量明显减少,从而缩小了控制板面积,提高了系统的抗干扰能力。

其次,数字信号处理技术的应用有助于减少并网逆变器输出的直流成分,提高开关频率,减小滤波器体积,改善输出波形,提高总谐波失真 (THD),快速响应电网瞬态变化。

再次,可以采用更先进、更复杂的控制方法,提高系统的动态响应性能,提高输出电能质量,可靠性高,便于实现智能控制。

最后，由于控制方法灵活，可以采用并机控制方法，实现多台光伏并网逆变器组成分布式发电系统。

1.4 本文的主要研究内容

本文在学习光伏并网发电系统逆变器工作原理及前人研究的基础上，比较了光伏并网逆变器的控制策略，进一步研究了光伏并网发电系统的孤岛检测，并进行了较为深入的理论分析和研究。

第 1 章绪论，简要介绍了国内外光伏并网发电的现状，通过对光伏并网发电系统及其逆变器的介绍，对光伏并网发电系统有了初步认识。

第 2 章，对逆变器主回路的拓扑结构进行了研究，设计了两级并网逆变器，同时对逆变器主回路的工作原理进行了分析。

第 3 章，研究了光伏并网逆变系统的特点和光伏并网逆变器的工作原理，对各种控制策略进行了比较，选择改进固定频率 SPWM 电流跟踪控制策略，较好的实现了并网逆变器的单位功率因数正弦电流输出控制。研究设计了控制电路及其它重要电路，并利用 MATLAB 仿真软件进行了仿真实验研究。

第 4 章，分析了孤岛效应产生的原因、危害，详细的阐述了常用的孤岛效应的检测方法，并指出它们的优缺点及使用范围。对光伏并网发电系统所存在的孤岛效应进行研究和验证，采用有效的孤岛效应的检测方法，并给出了光伏并网逆变器的反孤岛效应模型和仿真实验结果。

第 5 章，陈述了可靠性的基本概念，并且以光伏并网发电系统的基本组成作为线索，对各部分进行可靠性分析，分析了光伏系统可靠性指标较低的主要因素及各因素之间的相互作用。

第 6 章总结与展望，对全文做出总结，指出本课题需要进一步研究的方向。

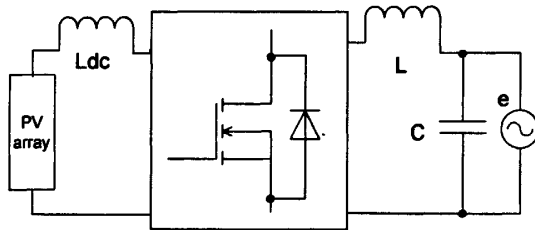
第 2 章 并网逆变器的设计及系统的工作原理

2.1 并网逆变器的选择

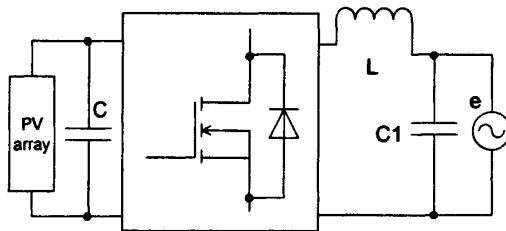
2.1.1 并网逆变器结构的选择

光伏并网逆变器按控制方式分类，可分为电压源电压控制、电压源电流控制、电流源电压控制、电流源电流控制四种方式。以电流源为输入的逆变器，直流侧需要串联一大电感提供较稳定的直流电流输入，但由于此大电感往往会导致系统动态响应差，因此当前并网逆变器普遍采用以电压源输入为主的方式。

按照输入直流电源的性质，可以将逆变器分为电流型逆变器和电压型逆变器^[17]，结构如图 2-1 所示。



(a) 电流型逆变器



(b) 电压型逆变器

图 2-1 电流型、电压型并网逆变器结构图

市电网可视为容量无穷大的定值交流电压源，光伏并网逆变器的输出可以控制为电压源或电流源。如果光伏并网逆变器的输出采用电压控制，则光伏并网系统和电网实际上就是两个交流电压源的并联运行，这种情况下要保证光伏并网发电系统稳定运行，则必须采用锁相控制技术实现与市电网同步。在稳定运行的基础上，可通过调整并网逆变器输出电压的幅值与相位来控制系统

的有功输出与无功输出。但由于锁相回路的响应较慢，并网逆变器输出电压值不易精确控制，系统可能出现环流等问题，同样功率等级的电压源并联运行方式不易获得优异性能。因此光伏并网逆变器的输出常采用电流控制，此时光伏并网系统和电网实际上是交流电流源和电压源的并联，只需控制逆变器的输出电流以跟踪电网电压，即可达到并联运行的目的。这种控制方式相对简单，使用比较广泛。

综上所述，本文设计的光伏并网逆变器采用电压源输入、电流源输出的控制方式，即电压型逆变器。采用电压型逆变主电路，可以同时实现有源滤波和无功补偿的控制，在实际中已经得到了广泛的研究和应用，可以有效的进行光伏发电、提高供电质量和减少功率损耗，而且可以节省相应设备的投资。

2.1.2 并网逆变器回路方式的选择

逆变器的主电路结构按照输出的绝缘形式分为：工频变压器绝缘方式、高频变压器绝缘方式、无变压器方式 3 种^[18]。

1) 工频变压器绝缘方式采用一级 DC/AC 主电路，在输出端接工频变压器并网。这种方式既可与电网隔离，同时又可以将逆变器输出波形中的直流分量滤去，从而减少对电网的污染，并且具有良好的抗雷击和消除尖波的性能，电路简单。缺点是工频变压器体积大，重量重，效率较低。这种方式的逆变器主要用于独立型光伏发电系统。

2) 高频变压器绝缘方式是通过两级变换实现并网逆变。前级将直流电压斩波为高频脉冲，通过高频变压器升压后整流，最后通过逆变器并网。这种方式的优点是高频变压器体积小，重量轻，大大减小了逆变器的体积和重量。缺点是经过了两级结构，效率比较低，且电路和控制方式复杂。由于高频电磁干扰严重，需要采用滤波和屏蔽等抑制措施。

3) 无变压器方式是只采用一级 DC/AC 变换直接并网。这种方式对逆变器输出波形要求较高，直流电压范围比较小，但是逆变器整机的效率却比较高，并进一步降低了成本。

由以上的讨论得出，逆变器无变压器无绝缘方式主电路比工频变压器绝缘方式复杂一些，比高频变压器绝缘方式简单，效率高。此外这种方式没有变压器，体积小、重量轻、成本较低，是到目前为止比较好的一种主电路方式。并

且对于小功率的光伏并网发电系统，光伏电池阵列的输出电压比较低，适合采用无变压器方式。

2.1.3 并网逆变器控制策略的选择

要成功实现并网，使光伏并网逆变器在工作时的功率因数接近于 1，即要求输出电流为正弦波且与电网电压同频同相，输出电流的控制方式一般有两种：电流滞环瞬时控制方式和固定开关频率控制方式^[19,20,21]。

1) 电流滞环瞬时控制方式^[22,23]

电流滞环瞬时控制方式示意图如图 2-2 所示的双闭环结构，其外环是电压反馈控制环，内环是电流控制环。将电压 PI 调节器输出电流幅值指令乘以表示网压的单位正弦信号后，得到交流的电流指令，将它与实际检测到的电流信号进行比较，当电流误差大于指定的环宽时，滞环比较器产生相应的开关信号来控制逆变器增大或减小输出电流，使其重新回到滞环内。这样，使实际电流围绕着指令电流曲线上下变化，并且始终保持在一个滞环带中。

这种方式中，滞环的宽度对电流的跟踪性能有较大的影响。当滞环宽度较大时，开关频率较低，对开关器件的开关频率要求不高，但跟踪误差较大，输出电流中的高次谐波含量较大；当滞环宽度较小时，跟踪误差较小，器件的开关频率提高，对器件的开关频率要求较高。

电流滞环瞬时控制方式有以下特点^[24]：

- (1) 控制方法简单，实时控制，电流响应快；
- (2) 没有斩波，输出电压中不含特定频率的谐波分量；
- (3) 若滞环的宽度固定，电流跟踪的误差范围就会固定，但电力开关器件的开关频率是变化的，这将导致电流频谱较宽，增加了滤波器设计的难度，可能会引起间接的谐波干扰。

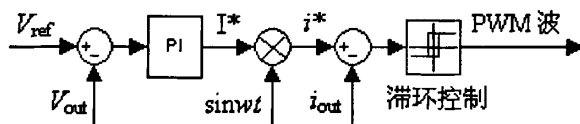


图 2-2 电流滞环瞬时控制方式示意图

2) 固定开关频率控制方式^[25]

固定开关频率控制方式在保留电流跟踪的动态性能好的基础上，克服了滞

环控制的开关频率不固定的缺点，控制框图如图 2-3 所示。这种控制方法与电流滞环控制的区别在于从电流误差信号得到最终控制逆变器的 PWM 信号的方式不同。该控制技术的基本思想是：对给定参考电压和逆变器输出电压反馈误差信号经电压调节器后得到逆变器输出电流参考控制信号，然后根据电流参考信号和逆变器反馈电流的误差经过比例放大和三角波进行交截可得到正弦脉宽调制（SPWM）信号，控制功率器件的导通或关断。由此可知，该方法中逆变器开关器件的工作频率等于三角波载波频率，因此它的工作频率是固定的。由于载波频率固定，因此逆变器输出谐波是固定的，滤波器设计相对于电流滞环瞬时控制方式控制简单，控制效果较好。

固定开关频率控制方式的特点^[26]：

- (1) 跟随误差较大；
- (2) 硬件实现相对复杂；
- (3) 输出电压中谐波量较少，含有与三角波相同频率的谐波；
- (4) 开关器件的开关频率固定的等于三角载波的频率；
- (5) 电流响应相对于电流滞环瞬时控制方式较慢。

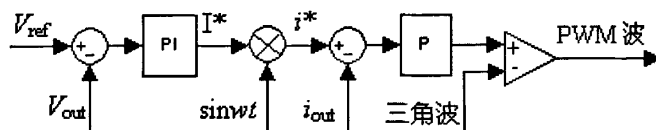


图 2-3 固定开关频率电流控制示意图

3) 改进型固定开关频率控制方式^[26]

改进型固定开关频率电流控制方式的控制框图如图 2-4 所示。此方法保留了原来控制策略的优点，同时电流的跟踪误差显著减小。通过调整电源电压的比例系数来减小直至消除电源电压对电流跟踪偏差的影响，从而显著改善了逆变器中电流跟踪控制的性能。

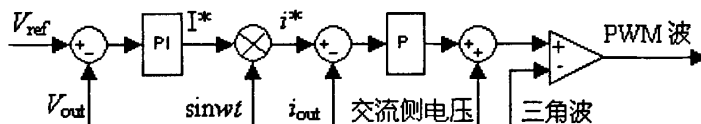


图 2-4 改进型固定开关频率控制示意图

2.1.4 系统的总体方案

经过方案的比较论证，本论文决定采用无变压器的两级结构，即前级的

DC/DC 变换器和后级的 DC/AC 逆变器，两部分通过 DClink 连接。系统的控制部分由以 TMS320F2812 为核心的控制单元完成，另外系统设计了辅助电源为控制电路提供电源，辅助电源采用 HV9120 芯片。光伏并网发电系统的结构图如图 2-5 所示。

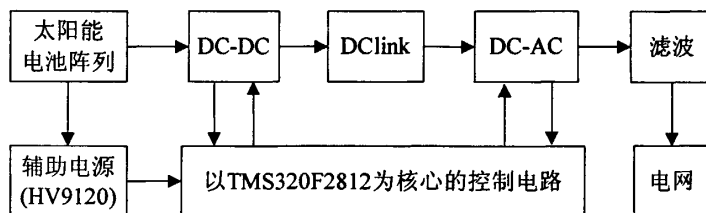


图 2-5 光伏并网发电系统的结构图

前级 DC/DC 变换器，可选择的形式有降压式变换电路 (Buck Converter)，升压式变换电路 (Boost Converter)，升降压式变换电路 (Boost-Buck Converter)，库克式变换电路 (Cuk Converter) 等。

由于 Buck 电路的输入工作在断续状态下，若不加入储能电容，光伏阵列的工作时断时续，不能工作在最佳工作状态，加入了储能电容后，Buck 电路功率开关断开时光伏阵列对储能电容充电，使太阳能电池始终处于发电状态，此时调节 Buck 电路占空比才能有效跟踪最大功率点，因此储能电容对于利用 Buck 电路实现 MPPT 功能是必不可少的，然而在大负荷情况下，储能电容始终处于大电流充放电的状态，对其可靠工作不利，同时由于储能电容通常为电解电容，增大了 MPPT 装置的体积，使整个系统变得笨重。此外，后级 DC/AC 电路为了能得到正常的输入工作电压，前级的输出电压不能太低，而光伏阵列的电压随着日照等因素变动较大，其输出电压低时若通过 Buck 电路降压，则逆变器无法工作，所以不采用 Buck 电路。

相比之下，Boost 变换器可以始终工作在输入电流连续的状态下，只要输入电感足够大，电感上的纹波电流小到接近平滑的直流电流，因此只需加入通量较小的无感电容甚至不加电容，避免了加电容带来的弊端。Boost 电路简单，功率开关器件的驱动设计方便，因此，选用 Boost 升压电路^[18]。

光伏并网发电系统主电路的拓扑结构图如图 2-6 所示。光伏阵列输出的额定直流电压为 50~80V 之间，通过 DC/DC 变换器转换为 DClink 的直流电。后级的 DC/AC 逆变器，采用逆变全桥，作用是将 DClink 直流电转换为 220V/50Hz

的正弦交流电，实现逆变向电网输送功率。DClink 的作用除了连接 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器，还实现了功率的传递。

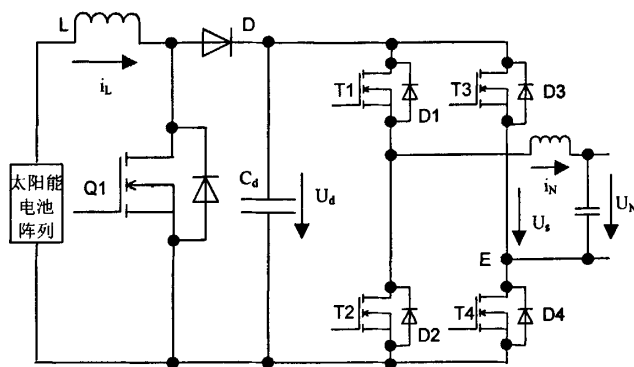


图 2-6 系统主电路的拓扑结构

2.2 光伏并网发电系统的工作原理

2.2.1 前级电路的工作原理

1) 电路原理图

Boost 电路的原理图如图 2-7 所示。Boost 电路由开关管 Q1，二极管 D，电感 L，电容 C 组成。Boost 电路的作用是将电压 U_{pv} 升压到 U_{dc} ，其中， U_{pv} 是光伏阵列的输出电压， U_{dc} 是 Boost 电路的输出电压。

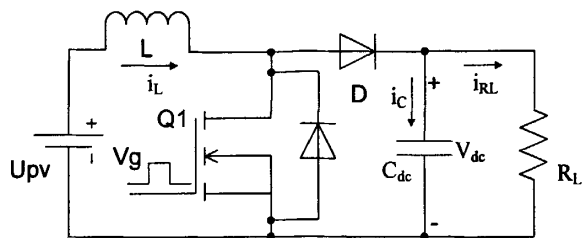


图 2-7 Boost 电路原理图

2) 工作过程

在每个斩波周期内，开关管 Q1 导通、关断各一次。开关管 Q1 导通时，等效电路如图 2-8(a)所示，流过电感 L 的电流为 i_L ，在电感未饱和前，电流线性

增加, 电能以磁能的形式储存在电感 L 中。此时, 由于二极管阳极接在电源负极, 二极管关断, 电容 C 只能向电阻 RL 放电, 提供电阻电流 i_{RL} 。当二极管关断时, 其等效电路如图 2-8(b)所示, 由于流过电感的电流不能突变, 电感 L 两端的电压极性改变, 此时, 电源和电感串联, 向电容和电阻供电。简言之, 开关管 Q1 导通时, 二极管反偏, 输出级隔离, 由输入端向电感提供能量; 开关管 Q1 断开时, 输出级吸收来自电感和输入端的能量。

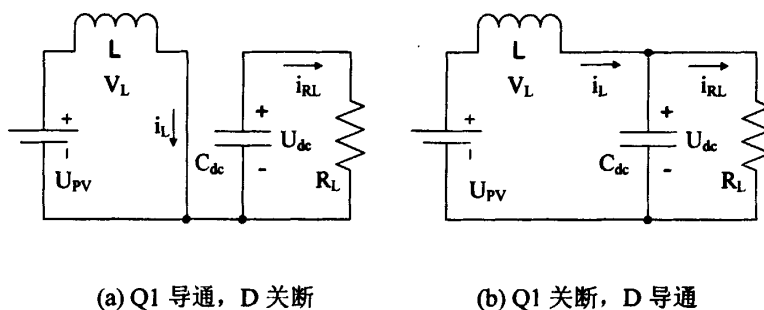


图 2-8 Boost 电路的工作过程

根据上述分析, 列出工作过程中的关系表达式如下:

$$U_{PV} * DT_s + (U_{PV} - U_{dc}) * (1 - DT_s) = 0 \quad (2-1)$$

式中, T_s 为开关管的开关周期; D 为占空比; DT_s 为开关管的导通时间;

$1 - DT_s$ 为开关管的截止时间。整理后得

$$U_{dc} = \frac{1}{1 - D} U_{PV} \quad (2-2)$$

3) 工作原理

根据电感电流在周期开始是否从零开始, 是否连续, 可分为连续的工作状态或不连续的工作状态两种模式。由于电路在断续工作时, 电感电流的不连续意味着光伏阵列输出的电能每个周期内都有一部分被浪费了, 而且纹波也会大些。因此一般把 Boost 电路设计为连续导通的工作状态。

2.2.2 后级电路的工作原理

1) 电路原理图

光伏并网发电系统的逆变器采用单相全桥逆变器结构, 其拓扑结构图如图 2-9 所示。

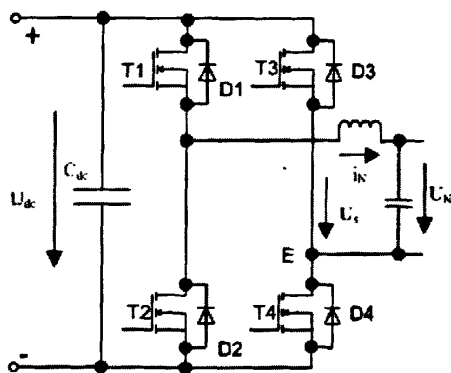


图 2-9 单相全桥逆变器的拓扑结构

2) 工作原理

如图 2-9 所示是单相全桥并网逆变器主电路结构图，其中 $u_N(t)$ 是电网电压， U_{dc} 是输入的恒定的直流电压， $u_s(t)$ 是逆变器的输出电压， $i_N(t)$ 是从逆变器输出到电网的电流。 L_N 为交流输出电感， C_{dc} 为直流侧支撑电容，即前级 Boost 电路的输出电容，T1~T4 是主开关管，D1~D4 是其反并联二极管。对四个开关管进行适当的 PWM 控制，就可以调节电流 $i_N(t)$ 为正弦波，并且与电网电压 $u_N(t)$ 保持同相位。

光伏并网发电系统要求在并网逆变器的输出侧实现功率因数为 1，波形为正弦波，输出电流与网压同频同相，其控制策略与一般独立的电压型逆变器的控制策略有所不同，如图 2-9 中，每个开关器件上都反并联一个二极管，起着续流的作用。交流侧电感的作用在于：

- (1) 有效抑制输出电流的过分波动；
- (2) 将开关动作所产生的高频电流成分滤除；
- (3) 由于输出电感的存在，输出电流 i_s 的基波分量 i_{N1} 在其上产生一个电压

降 $j\omega L_{L_{N1}}$ ，这样，变换器的输出电压 u_s 的基波 u_{s1} 和电网电压 u_N 之间将产生一个位移量 φ ，通过 PWM 控制开关器件使变换器的输出电压 u_s 满足上述的矢量关系，这样在理论上可以实现输出电流与电网电压同频同相。

本论文采用脉宽调制方式，通过控制开关器件 T1~T4 的导通和关断时间，实现能量从并网逆变器向电网传递，达到输出功率因数为 1 的目的。

第 3 章 光伏并网发电系统的设计

逆变部分是整个光伏并网发电系统的重要组成部分，逆变部分包括：主电路、控制电路和保护电路、驱动电路及输出滤波电路四部分。其中主电路主要完成能量变换，吸收电路软化开关器件的开关曲线；控制电路完成对输出电流的控制以满足并网的要求；保护电路主要对各种故障进行保护；驱动电路是功率主电路和控制电路的接口电路；输出滤波电路主要滤除高次谐波，提高输出波形的质量。

系统的设计参数是：输入电压范围为 50V~80V，额定输出电流为 5A，额定功率为 1.1kW。

3.1 主电路的设计

并网逆变器的主电路采用单相全桥主电路，通过对逆变器进行适当的控制，可使交流侧电流接近于正弦波，功率因数可为单位功率因数。开关管 IGBT 的选择主要考虑以下几个方面：

1) 电压容量：在 IGBT 工作过程中，C、E 两端的电压峰值不应超过 IGBT 的最高耐压值，否则，器件将被过压击穿而损坏；

2) 电流容量：在 IGBT 工作时，集电极峰值电流必须处在 IGBT 开关安全工作区以内（小于 2 到 3 倍额定电流）；

3) 散热要求：IGBT 在开关过程中会产生大量的开关损耗而使器件发热，因而在考虑选择器件时必须综合考虑装置的散热条件。

分别从以上三个方面考虑，在本系统中，IGBT 的 C、E 两端承受的电压为直流 400V，考虑到器件开关过程中电压峰值的影响，选取一定的电压裕量，因而选取 IGBT 的耐压值为 600V；电流方面，单相全桥的额定工作电流为 5A，最大为 7.1A，因而为了保护系统的工作安全，对开关管电流选取了较大的裕量，取额定电流为 20A；散热方面，为了保证开关管的充分散热，采用添加散热器的措施。

总之，本论文中的系统采用的是 IR 公司型号为 IRG4PC40UD 的 IGBT 作为主电路桥臂的开关管，其主要参数为：耐压 600V，额定电流 20A。

3.2 控制电路及保护电路的设计

3.2.1 电流采样电路

电流采样方法有电流互感器、霍尔元件和直接电阻采样。采用霍尔元件采样，控制和主功率电路有隔离，可以检测出直流信号，信号还原性好，但有延迟，并且价格比较贵；电流互感器具有能耗小、频带宽、信号还原性好、价格便宜、控制和主功率电路隔离等诸多优点，但是磁芯容易饱和；采用电阻采样价格非常便宜，还原性好，在小功率的情况下，由于检测电阻小，功耗也就比较小。图 3-1 为电流采样电路图， R_s 上的电压经过一个同相比较放大器，得到了检测出的电压信号的表达式：

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot R_s \cdot i_s \quad (3-1)$$

式 (3-1) 中， i_s 为需要检测的电流， V_s 为检测出的电压信号。

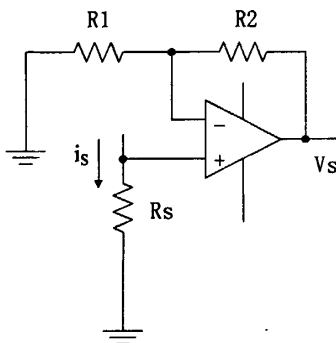


图 3-1 电流采样电路图

3.2.2 并网同步的实现

根据电流控制型并网逆变器原理，为使光伏并网发电系统的有功功率输出达到最大，必须控制输出电流的频率和相位，使它们与电网电压严格同步。所以电网相位的跟踪是必须解决的问题，一般采用锁相环 (PLL) 实现。

1) 锁相环的原理与实现

锁相环是指能够自动跟踪输入信号频率与相位的闭环反馈控制系统。目前传统的模拟锁相环 (Analog PLL-APLL) 主要由鉴相器 (PD)、环路滤波器 (LF) 和压控振荡器 (VCO) 组成^[27]。鉴相器的输入是电网电压的采样信号 V_{ac} 和压

控振荡器的输出 V_{out} ，鉴相器的输出为误差信号 V_e ，该信号为 V_{ac} 和 V_{out} 相位差的线性函数。环路滤波器滤除 V_e 中的高频信号后得到 V_c ，再由 V_c 来控制压控振荡器来改变输出信号 V_{out} 的频率和相位来逼近 V_{ac} 的频率和相位。当环路锁定时，输出信号和输入信号同频同相。锁相环原理框图如图 3-2 所示。

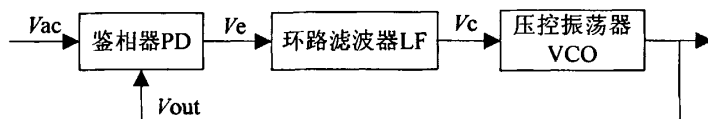


图 3-2 锁相环原理框图

随着大规模集成电路的发展和应用，出现了数字式锁相环（Digital PLL-DPLL）和将鉴相器、压控振荡器、可编程计数器等集成于一个集成电路（Integrated Circuit-IC）的混合锁相环（Hybrid PLL-HPLL）。APLL、DPLL、HPLL 都是以硬件电路方式实现锁相功能的，有着较为复杂的硬件电路，因此在使用过程中会遇到硬件电路不可避免的问题：直流零点漂移、器件饱和等。随着 DSP 技术的发展，逐渐采用软件锁相环（Soft PLL-SPLL）避免了 APLL 方式的缺点，得到了广泛的应用^[28]。软件锁相环的基本组成如图 3-3 所示。

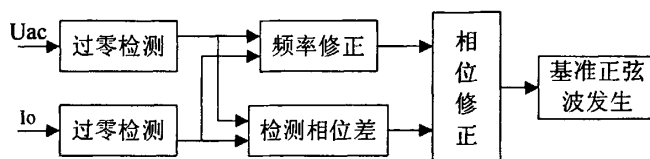


图 3-3 软件锁相环的基本组成

本论文中，并网电流的频率和相位与电网电压严格同步是通过软件锁相实现的，即由输入信号的硬件整形电路和锁相软件配合完成。软件锁相环是将典型的锁相电路中由硬件来完成的功能改用软件编程的方式来实现。电网电压信号通过硬件电路整形后产生与其同步的 TTL 方波信号，将该方波信号送入到 TMS320F2812 芯片的 CAP1 引脚，TMS320F2812 内部软件为 CAP1 分配了一个计数时基，同时设定该时基为递增计数模式，只捕捉 TTL 信号的上升沿，并记录下此时定时器的值，这样相邻两次定时器值的差即为所测电网电压的周期，用该周期作为正弦调制波的周期，即输出并网电流的周期。同时，通过判断电网电压过零时正弦表格指针所在的位置来判断二者之间的相位差，相应的调整

给定并网电流的正弦表格的指针，最后实现二者的同频同相。此系统的锁相是由捕获中断和定时中断共同完成的，定时中断用来输出 SPWM 波，捕获中断用来完成并网电流的周期计算和相位调整，具体是利用电网电压的周期来实现计算 T1PR 值作为给定并网电流周期，实现与电网电压的同频；通过调整正弦表指针 PTR 来实现和电网电压同相。其中，正弦表格为 200 个点，载波频率为 10kHz，具体的锁相环软件流程如图 3-4 所示。

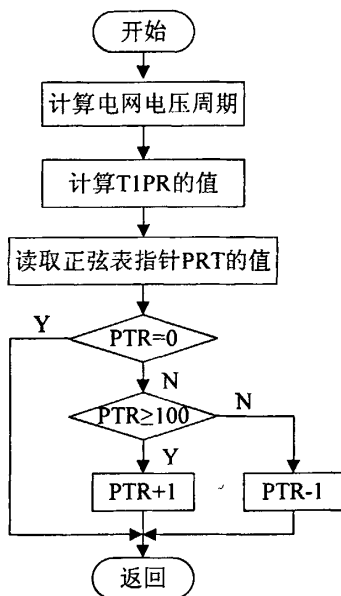


图 3-4 软件锁相程序流程图

2) 同步信号检测电路设计^[29]

在进行逆变器输出电流和电网电压同步的过程中，DSP 需要采集电网电压信号的相位，由于 TMS320F2812 芯片只能采集 TTL 电平信号，所以需要辅助的硬件电路将电网的正弦波电压信号转换为幅值为 3.3V 的方波信号，该方波信号和正弦波电压信号具有相同的过零点，即在电网电压上升过零点处，方波信号变成高电平。本论文采用的硬件电路如图 3-5 所示。

图 3-5 中的电压传感器将电网电压变成同相位的弱电信号，该信号经过比较器，即可得到与电网电压同相位的 TTL 方波信号，如图 3-5 所示。得到的方波信号经过光电隔离和电平转换后，将幅值为 3.3V 的方波信号送到 DSP 芯片的捕获引脚 CAP4 上，捕获单元在检测到上升沿时触发中断，进行锁相。实验波形图如图 3-6 所示。

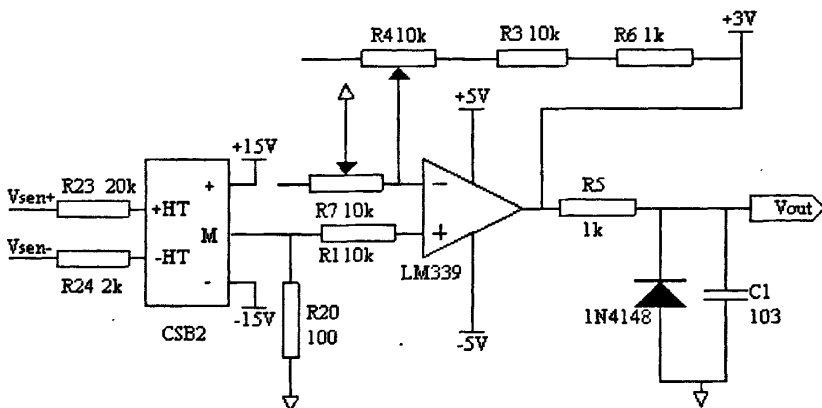


图 3-5 电网电压转换成 TTL 脉冲信号的硬件电路

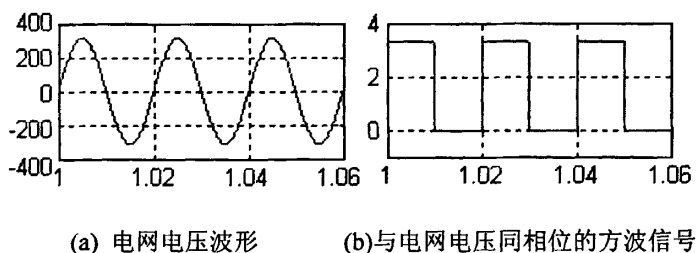


图 3-6 电网电压及 TTL 脉冲信号波形

3) TMS320F2812 芯片事件管理器模块和捕获单元介绍^[30,31]

TMS320F2812 芯片有两个事件管理器，EVA 和 EVB，是数字电机控制应用的重要外设，能够实现机电设备控制的多种必要的功能。每个事件管理器模块包括：定时器、比较器、捕获单元、PWM 逻辑电路、正交编码脉冲电路以及中断逻辑电路等。

捕获单元可以捕捉到捕获单元外部引脚的跳变，捕获单元的外部引脚一旦出现跳变，就会使能触发。每个事件管理器有 3 个捕获单元，每一个捕获单元都有一个相应的捕获输入引脚。捕获单元被使能后，输入引脚上的跳变将使所选择的通用定时器的计数值装入到相应的 FIFO 堆栈，同时如果有一个或几个有效的捕获值存到 FIFO 堆栈（CAPxFIFO 位不等于 0），将会使相应的中断标志位置位。如果中断标志未被屏蔽，将产生一个外设中断请求。每次捕获到新的计数值存入到 FIFO 堆栈时，捕获 FIFO 状态寄存器 CAPFIFOx 相应的位就进行调整，实时的反映 FIFO 堆栈的状态。从捕获单元输入引脚发生跳变到所选通用定时器的计数值被锁存需要 2 个 CPU 时钟周期的延时。复位时，所有捕获单元的寄存器都被清零。

3.2.3 SPWM 波的产生

1) SPWM 波生成的流程图

SPWM 波的产生可以通过硬件电路生成或通过软件编程生成。通过硬件电路实现 SPWM 波的方法往往电路复杂,控制精度难以保证。而用软件编程的方法由于是采用数字控制方式,可以获得调节灵活、稳定可靠、性能优越的控制效果,但是要求中央处理器的运算速度快,运算能力强。TMS320F2812 芯片具有高速优异的运算功能和功能强大的 PWM 波发生模块,本论文采用软件编程的方法生成 SPWM 波。SPWM 调制信号生成说明如图 3-7 所示。

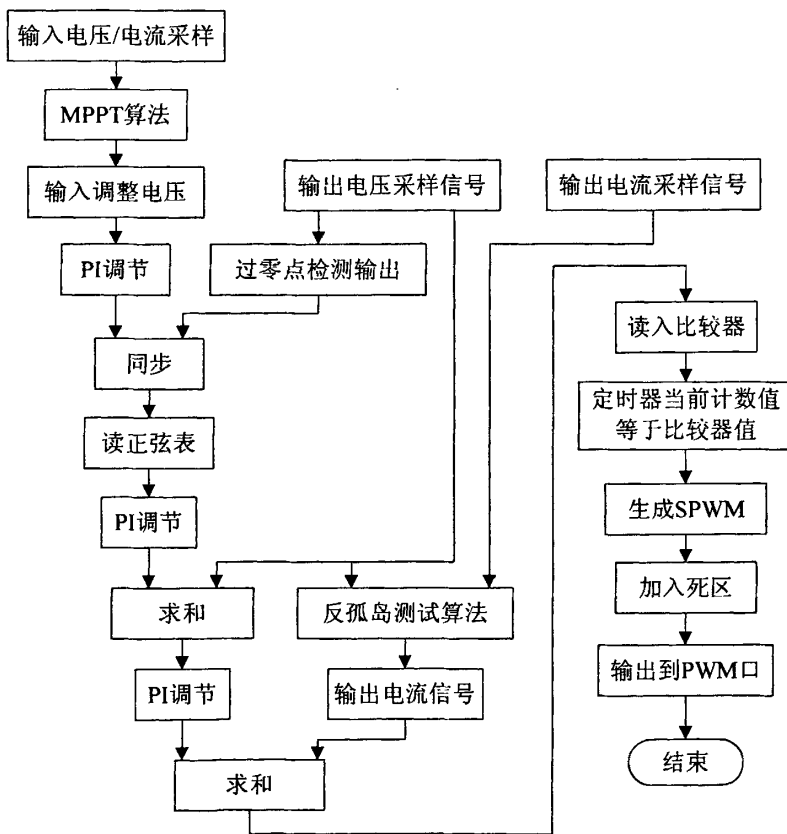


图 3-7 SPWM 调制信号生成说明

通过软件编程的方法来生成 SPWM 波,其原理是基于正弦控制波和三角载波相交以确定开关通断时刻。用软件生成 SPWM 波一般有两种方法:查表法和算法。查表法,即离线计算出对应的脉宽数据,写入 EPROM,实际控制时,由 DSP 通过查表和加减运算得到脉宽和间隔时间,以此控制功率器件的开通时间。算法,即根据理论推导出脉宽函数表达式,由 DSP 在实际控制时实时在

线计算，以获得相应的脉宽和间隔时间。一般来说，前者将占用大量存储空间，而后者则需大量的运算时间^[32]。本论文采用的是查表法来生成 SPWM 波。

2) 死区的概念及生成

在电机控制和功率电子应用场合中，两个功率器件（上臂和下臂）被串联放在一个功率转换支路中，为避免直通，两器件的开通周期必须不能重叠，这就需要一对非重叠的 PWM 输出来正确的控制这两个器件。在一个开关管的关断和另一个开关管导通之间要插入一个时间间隔，即死区时间。这段延迟是由开关管的开关特性和负载特性决定的。

设计死区单元的目的是在任何情况下，确保上臂器件和下臂器件的开通时间没有重叠。对每一个输入信号 PHx，会产生两个输出信号 DTPHx 和 DTPHx₋，波形图如图 3-8 所示。当比较单元和相关输出的死区未被使能时，这两个信号是相同的。当死区被允许用于比较单元时，这两个信号的转换边沿被一个称为死区的时间间隔分开，这个时间间隔称为死区时间，大小由死区控制寄存器 DBTCON 中的相应位设定。

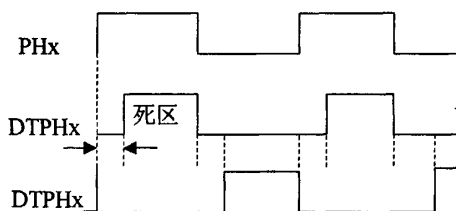


图 3-8 死区功能波形图

3.2.4 保护电路

1) 过热保护

通过功率开关器件的电流虽没有超过其额定电流，但若散热条件变差，其结温同样会急剧上升。若结温超过其额定结温，功率开关器件也会烧坏。因此有必要设置结温保护。一方面给开关管加散热片和给系统加装风扇，以降低开关管和系统温度。另一方面，在散热片靠近功率器件的地方加装一个常闭继电器，当散热片温度超过允许温度时，继电器触点断开，控制电路检测到触点断开就使主电路停止工作。由于温度变化比较慢，故可以在主程序中采用查询方式进行处理。

2) 短路电流保护

有关资料证明，当出现短路电流故障时，如果保护 IGBT 栅极上的驱动电压 V_{GE} 为 15V 不变，50A 的 IGBT 能承受 250A 短路电流冲击时间仅为 $5\mu s$ ^[33]。所以当出现短路电流时，要求系统能快速保护。本论文中对大于 3 倍额定电流的大电流采用硬件过流保护，对于小于 3 倍额定电流的电流在软件中做过载保护处理。

图 3-9 为短路保护的硬件原理图。电流采样信号来自电流采样电路。7400 的 11 脚输出与驱动封锁端口直接相连，并且接到 CPU 的非屏蔽外部中断口。电流信号采样转化成的电压值与给定电压相比较，该电压值一旦大于给定电压值（通过电阻 R24 进行调节），则经过由 7400 两个双与非门组成的自锁电路发出封锁信号，封锁主电路工作，于是过流保护电路动作。同时，DSP 芯片非屏蔽端口接受中断信号封锁驱动信号。只有进行 CPU 复位，才能重新启动逆变器工作。

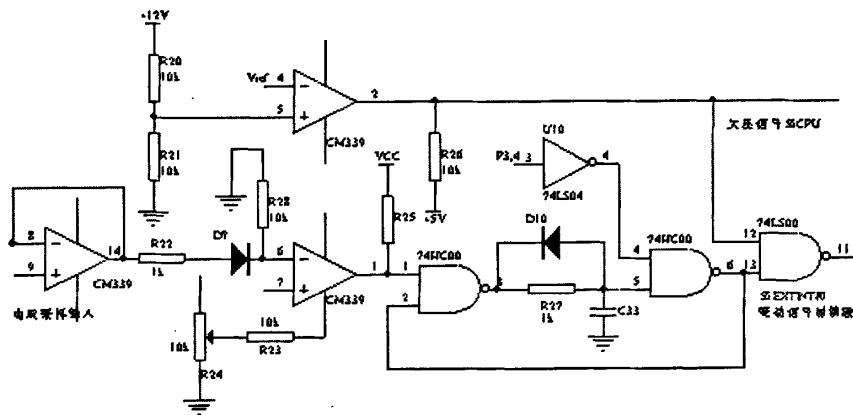


图 3-9 短路电流保护电路图

3.3 驱动电路

驱动电路是指将 DSP 输出的 PWM 进行放大、隔离，从而可以安全驱动开关器件的电路。驱动电路采用 IR 公司的专用驱动芯片 IR2110。IR2110 是一款高电压、高速的功率 MOSFET 和 IGBT 驱动芯片，逻辑输入与标准 CMOS 或 LSTTL 集成电路兼容。

IR2110 芯片具有以下特点^[34]：

- 1) 具有电压自举特性, 电压可以达到 500V~600V, 能承受暂时负电压 $\frac{dv}{dt}$ 的冲击;
- 2) 门极驱动电压范围在 10V~20V 之间, 驱动能力强;
- 3) 当门极驱动电压欠压时, 脉冲封锁;
- 4) 响应速度快 (典型 $\frac{t_{on}}{t_{off}} = 120/94 \text{ ns}$);
- 5) 适合于 MOSFET 管和 IGBT 管提供脉冲, 集成度高, 可驱动同一桥臂的开关管;
- 6) 成本低、易于调试, 并设有外部保护封锁断口;
- 7) 上管驱动采用外部自举电容上电, 驱动电路数目较其它 IC 驱动减少。

图 3-10 为用 IR2110 设计的驱动电路原理图。电容 C2 为自举电容, D1 为自举二极管。D1、D2 和 D3 都必须选用超快恢复二极管。由于逆变全桥电路共有四个功率开关器件, 所以需要两片 IR2110 驱动芯片。

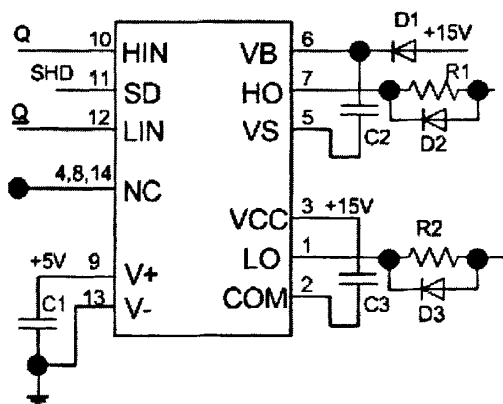


图 3-10 IR2110 典型连接图

在实际电路中, 驱动部分的控制框图如图 3-11 所示, 反相器 1 采用 4049, 反相器 2 采用 7406, 使用反相器是为了增大驱动能力, 光耦采用 6N137, 主要起隔离作用, 将主回路与控制回路隔离开来。

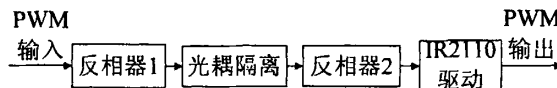


图 3-11 驱动部分控制框图

3.4 输出滤波电路

输出滤波器采用 LC 电路，作用是滤除逆变桥输出 SPWM 波中的高次谐波分量。表面看起来好像 LC 滤波参数越大，系统输出波形越好，实际上，滤波时间常数越大，不仅滤波电路的体积和重量过大，而且滤波电路引起的相位滞后变大，采用闭环波形反馈控制时，整个系统的稳定性越差。相反，滤波参数选的过小，系统中的高频分量反而起不到很好的抑制，输出电压不能满足波形失真度的要求。因此，选择滤波器参数时，要综合考虑这两方面的因素，分别确定滤波电感和滤波电容的值。

如果电感选取过大，可以减小流过电感的电流纹波，相应减小了流过功率管的峰值电流，减小了开关器件的功率损耗，此外还会影响输出电流的跟踪速度，使得系统动态响应过慢，降低稳态精度；而电感选取过小，则使得输出电流的开关纹波加大，必然增大磁滞损耗，同时也使波形变差，增大输出电流波

形的 THD。电感设计首先满足电流上升率的要求： $\frac{di_L}{dt} \geq \frac{di_g}{dt}$ ，其中 di_g/dt 为电

流输出的最大变化率；根据电流最大纹波的限制，可以得到电感量的最小值，通过这两个约束条件可得出最佳的电感量。

滤波电容选得大可以减小波形的 THD，但会相应增加电感中的纹波电流，而滤波电容太小则会影响输出波形的 THD。实际设计过程中，先根据上面提到的方法确定滤波电感值，再按照 LC 滤波器截止频率的 1/10 的原则，来确定滤波电容的值，并且在调试过程中再做调整，多凭经验和实验选取。

3.5 辅助电源设计

为了给光伏并网逆变器的控制电路、信号采集电路及开关管驱动电路等提供各种工作电源，需要设计一个与主逆变电路隔离的辅助电源。辅助电源的输入电压为光伏阵列输出的直流电，输出的电压分别为 +15V、-15V、+5V、-5V。

3.5.1 辅助电源的设计要求

- 1) 输入电压：50~170V
- 2) 输出电压：+15V、-15V、+5V、-5V
- 3) 输出电压波动小于 1%

根据上述的设计要求，本论文采用 HV9120 芯片进行辅助电源设计。

超科公司 (Supertex inc.) 开发的 HV9120^[35] 芯片是开关电源控制器子系统，可以启动和运行几乎所有的直接直流输入，例如由 240V 的交流电经过整流和滤波后得到的 12V 直流电。除了开关、磁组、输出整流和滤波器，HV9120 芯片包含了构造单管开关转换器所需的基本元件。HV9120 芯片主要用于控制具有任何拓扑结构和型号的单管开关转换器，这类转换器一般是低功耗，工作在不连续状态的回扫式转换器。

HV9120 芯片的特征是：

- 1) 输入电压范围：10-450Vdc；
- 2) 最大占空比 49%；
- 3) 固定开关频率 500KHz。

HV9120 主要的用途：

- 1) 离线高频电源；
- 2) 通用输入电源；
- 3) 高效率电源；
- 4) 高密度电源；
- 5) 超宽负载范围的电源。

3.5.2 辅助电源设计电路

辅助电源主电路的具体电路图如图 3-12 所示。

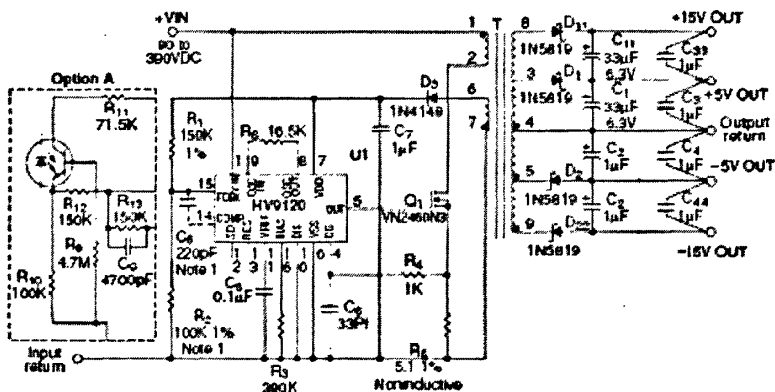


图 3-12 基于 HV9120 的辅助电源系统电路图

3.6 系统的电磁兼容设计

逆变器工作本身会产生很强的电磁干扰，这些干扰通过电磁场辐射形式或通过供电线路耦合至控制系统中，不仅会对周边的电子设备产生很大的影响，而且会造成输出的正弦波形畸变，使电能质量下降，给发电和供电设备及用户用电设备带来严重危害。因此，必须采取相应的抗干扰措施。

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility-EMC）是指电子设备和电源在一定的电磁干扰环境下正常可靠工作的能力，同时也是电子设备和电源限制自身产生电磁干扰和避免干扰周围其它电子设备的能力。

本论文从硬件和软件两方面考虑，采取措施来解决电磁干扰问题。

3.6.1 硬件方面考虑

综合来说，电子电路所受干扰的程度有以下三个方面决定^[36]：

- 1) 干扰源的强度；
- 2) 干扰传播途径的耦合因素；
- 3) 电子电路的抗干扰能力。

这给我们提供一个解决问题的指导思想：抑制干扰源；切断传播途径；提高电子电路的抗干扰能力。

首先，从干扰源的抑制开始。对于外界电气设备产生的干扰，我们无法抑制，只能减少自身产生的干扰。采取的措施有：

1) 选择较大的栅极驱动电阻，增加 MOSFET 和 IGBT 的开通和关断时间；MOSFET 和 IGBT 集电极、发射极之间接有吸收电路。这些措施大大降低了 MOSFET 和 IGBT 开通关断时的电压电流变化率，从而减少了干扰源的强度。

2) 在控制电路中使用了磁珠和磁环。磁珠和磁环专用于抑制信号线、电源线上的噪声和尖峰干扰。它们的吸收能力是用其阻抗特性来表征的。在低频段，它们呈现出非常低的感性阻抗值，不影响数据线或信号线上的有用信号的传输。在高频段，从 100MHz 左右开始，阻抗增大，其感抗分量仍保持很小，电阻分量却迅速增加，将高频段电磁干扰能量以热能形式吸收并耗散。

3) DC/DC 部分逆变得到的交流电，在经过变压器后，需要整为直流，整流二极管为快恢复二极管，但在开关的过程中，仍旧有电压尖峰的出现。因此，

在变压器的原边和副边加吸收电路，抑制了过电压的同时，也削弱了干扰源。

其次，在切断干扰途径方面，采取以下措施：

- 1) 控制电路电源输入加单相电源滤波器，切断交流电源通路上的干扰；
- 2) 取自同步变压器的电压同步信号使用光耦进行隔离；
- 3) DSP 发出的驱动信号经 6N137 光耦隔离；

4) 各种采样、保护信号反馈的是重要的系统控制量或者状态量，而且由于引线较长，常常受到干扰，有电压尖峰的出现，导致系统错误控制或者误保护，采用合适参数的吸收缓冲电路是必要的，根据时间常数的不同，这些信号都通过一级低通滤波环节，滤去非正常的噪声信号。

并且，系统的布局好坏对电磁兼容性影响很大。在逆变系统中，往往存在许多不同电路单元，如开关主电路、控制电路等，这些单元如果布置不合理，则会影响设备内电磁兼容性及整体的抗干扰能力。一般来讲要按系统各部分功能不同而将其化为不同的功能模块，使它们的相互影响最小。但由于成本及性能指标等多方面因素的影响，往往采用结构区分的方法处理。

结构区分设计的原则是：

- 1) 开关电源与数字电路、模拟电路分区；
- 2) 弱信号单元和强信号单元分区；
- 3) 数字单元和模拟单元分区；
- 4) 电路性质差异大的单元分区。

3.6.2 软件方面考虑

1) 在硬件的滤波措施存在的条件下，软件中采取逻辑判断措施对电压同步信号滤波；

2) 对于系统计算的中间变量和结果都进行范围限制，不允许关键数据出错，以保证整个系统的稳定性；

3) 系统开始正常工作后，在同步中断子程序中，对同步进行软件滤波，如果不满足条件，正弦表的偏移地址不允许复位；

4) 在读取 A/D 采样结果时，增加等待时间，并且查看采样状态寄存器的状态，以确保读取正确的采样结果。

3.7 光伏并网逆变器的仿真建模

经过第二章的分析，本文确定了光伏并网发电系统的逆变器控制采用固定开关频率的 PWM 控制方法，电压反馈信号与给定的电压参考信号比较产生误差信号，经过 PI 调节后作为给定电流参考信号，电流反馈信号与给定的电流参考信号比较产生误差信号，经 PI 调节后与固定频率的三角波比较产生 SPWM 控制脉冲后，经隔离、放大后作为开关管的门极脉冲。

光伏并网发电系统采用的双闭环方式，外环为电压环，内环为电流环，由电压环和电流环组成的双闭环控制系统有效的保证了对输出电压、电流波形和幅值的要求，具有控制的物理意义明确，易于软件实现，动态响应快等优点。

为了防止桥臂发生直通，在电路中设置了相应的死区。三角波的载波频率是 10kHz，而逆变器本身的输出频率比较低，因此在忽略开关延迟时间的前提下，逆变器本身可等效为一个比例环节。输出滤波器采用 LC 型滤波器，可以得到电路的等效模型，由此可推导出逆变控制系统的示意图如图 3-13 所示，作者根据系统的控制精度设计了控制参数。

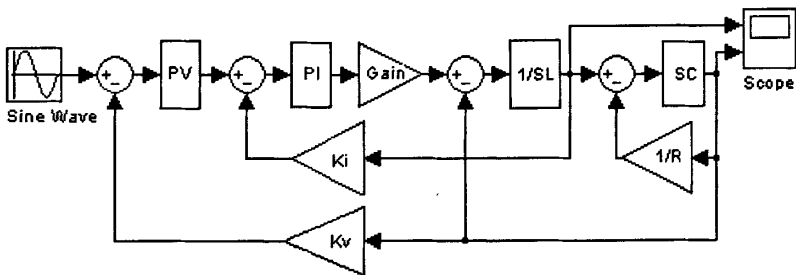


图 3-13 逆变器输出 MATLAB 仿真模型

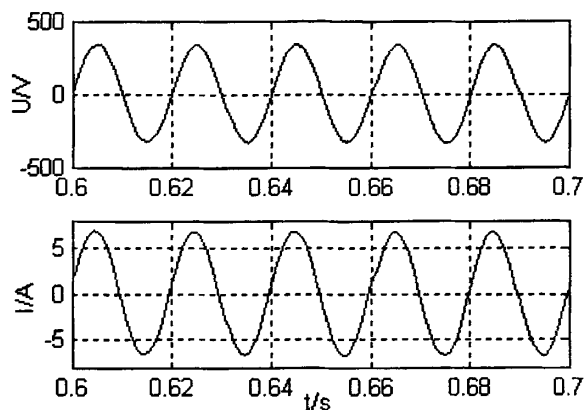


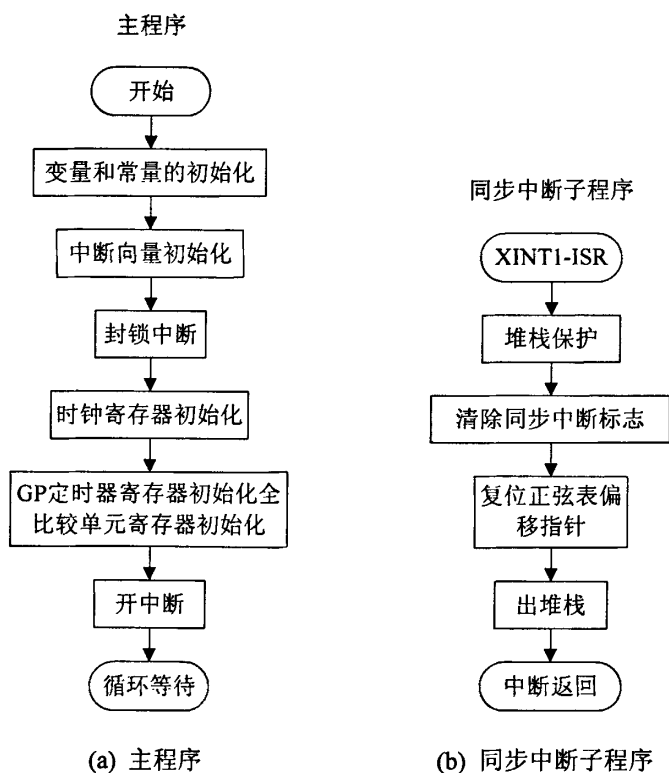
图 3-14 并网逆变器输出波形

由图 3-13 的 MATLAB 仿真模型得到了逆变器的输出电压和电流波形如图 3-14 所示。可以看出，逆变器输出的电压和电流同频同相，只要保证了并网同步的实现，就可以使逆变器的输出电流与电网电压严格的同频同相，达到输出功率因数为 1 的目的。

3.8 控制系统软件设计

TI 公司出品的 TMS320F2812 芯片，为光伏并网发电系统提供了高性能的解决方案。此芯片为内嵌式电机控制系统提供了明确完整的外围设备模块。包括：模/数转换器模块、PWM 输出模块、定时器模块、保护模块、串行通讯和其它功能的模块。这些适合电力电子控制的外设模块及其运行的高速性能使得完整的数字式光伏并网发电系统设计方案成为可能。

这部分软件设计主要由主程序、同步中断、定时器 T1 中断和定时器 T2 中断组成，流程图如图 3-15 所示。



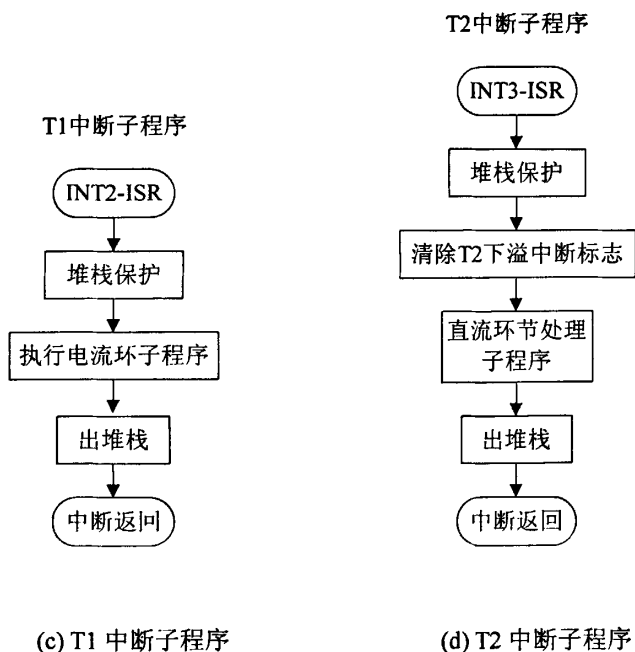


图 3-15 控制系统软件流程图

主程序主要完成特殊寄存器以及外部事件管理器中的寄存器的初始化，并对变量进行定义。在主循环里完成多个非中断的功能，一旦中断来临，程序就跳转到相应的中断服务子程序。

同步中断的主要功能是外部中断来临时，完成正弦表偏移地址的复位，它的中断周期为 20ms。

定时器 T1 中断主要完成交流电路的采集以及 PWM 波的输出，它的中断周期为 50us。

定时器 T2 中断主要完成电压环节的 PI 算法，得到电流指令值，它的中断周期为 10ms。

第 4 章 光伏并网发电系统的孤岛效应及防止策略

4.1 孤岛效应及其危害

所谓孤岛效应^[37]就是当电力公司的供电系统因事故故障或停电维修等原因而停止工作时，安装在各个用户端的光伏并网发电系统未能及时检测出停电状态而将自身脱离市电网络，因而形成了一个由光伏并网发电系统向周围负载供电的一个电力公司无法掌握的自给供电孤岛现象。

一般来说，孤岛效应可能对整个配电系统设备及用户端的设备造成不利的影 响，包括^[38]：

- 1) 危害电力公司输电线路维修人员的安全；
- 2) 影响配电系统上的保护开关动作程序；
- 3) 造成电力孤岛区域所发生的供电电压与频率的不稳定现象；
- 4) 当电力公司供电恢复时所造成的相位不同步问题；
- 5) 光伏并网发电系统因单项供电而造成系统三相负载的欠相供电问题。

当越来越多的光伏并网发电系统并联于交流电网时，发生孤岛效应的机率也就越高，所以必须寻求适当策略来应对日趋严重的孤岛效应问题。

4.2 国际通用标准

孤岛检测的基本点和关键点是对电网的检测。通常在电网的配电开关断开时，如果光伏并网发电系统的供电量和电网负载需求量不匹配，电网中的电压和频率会发生较大的变动，此时可以利用电网电压的过/欠电压保护和过/欠频率保护来检测电网是否断电，从而防止孤岛现象的发生。可是当光伏并网发电系统的供电量和电网负载需求量匹配或差距很小时，电网的配电开关跳开后，光伏并网发电系统附近电网的电压和频率的变动将不足以被保护电路检测到，孤岛现象就会发生。

根据专用标准 IEEE Std.2000-929 和 UL174 规定，所有的并网逆变器必须具有反孤岛效应的功能，同时这两个标准给出了并网逆变器在电网断电后检测到孤岛现象并将逆变器与电网断开的时间限制，如表 4.1^[37]：

表 4.1 IEEE Std.2000-929 和 UL174 对孤岛最大检测时间的限制

Voltage	Time to operate
$V < 50\%V_{norm}$	6
$50\%V_{norm} < V < 88\%V_{norm}$	120
$88\%V_{norm} < V < 110\%V_{norm}$	Normal operation
$110\%V_{norm} < V < 137\%V_{norm}$	120
$V > 137\%V_{norm}$	6
Frequency	Time to operate
$f_{norm} + 0.5 < f$	6
$f < f_{norm} - 0.7$	6

(1) V_{norm} 指电网电压幅值的额定值，对于我国单相市电为交流 220V（有效值）；

(2) f_{norm} 指电网电压频率的额定值，对于我国的单相市电为 50Hz。

4.3 等效模型

并网逆变器一般都是接在有一系列负载的公共耦合点上，经过变电站（变压器）接入电网，电力公司通过断路器 S 来实现对电网的通断控制。如图 4-1 为孤岛检测系统的等效模型^[39]，一般认为调整到工频谐振的并联 RLC 负载可以代表孤岛负载最坏的情况，产生的分歧主要集中在对 RLC 负载品质因数 Q 的选择上。高 Q 值使电路有朝着并保持于谐振频率处工作的趋势，在进行反孤岛测试时，太大或太小的 Q 值都是不可取的，IEEE P292 工作组成员和电网工程师们经过讨论认为选取 $Q = 2.5$ 符合电网的实际情况。

本文选取最有代表性的电阻 R 、电感 L 和电容 C 并联作为光伏并网发电系统的负载，此时负载阻抗为：

$$Z = |Z| \angle \varphi \tag{4-1}$$

式中

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}}, \tag{4-2}$$

$$\varphi = \arctan \left[R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right] \quad (4-3)$$

在图 4-1 中， ΔP 和 ΔQ 分别代表逆变器和负载之间的功率偏差， P 和 Q 分别代表逆变器发出的有功功率和无功功率，并且：

$$P = V^2 / R \quad (4-4)$$

$$Q = V^2 \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (4-5)$$

断路器闭合时，光伏并网发电系统向 a 点提供功率 $P + jQ$ ；负载得到功率 $P_{\text{load}} + jQ_{\text{load}}$ ，则电网提供功率为^[40]：

$$\Delta P = P_{\text{load}} - P \quad (4-6)$$

$$\Delta Q = Q_{\text{load}} - Q \quad (4-7)$$

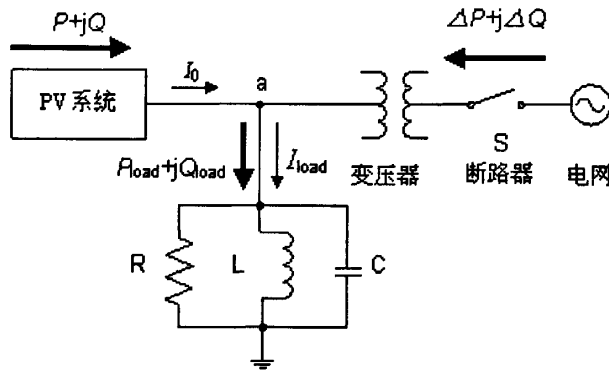


图 4-1 孤岛检测系统的等效模型

如图 4-1 所示，孤岛形成前瞬间，若 $\Delta P \neq 0$ ，则孤岛发生后，公共耦合点 a 点电压将发生变化。因此可利用过/欠压检测功能检测 a 点电压幅值变化来检测孤岛现象。但是，当光伏并网发电系统输出功率和负载功率相匹配，即 $\Delta P = \Delta Q = 0$ 时，即使电网断电，a 点电压也不会发生变化，因此无法检测到孤岛现象是否发生。但研究孤岛检测技术的目的是为了寻找一种能够检测任何负载情况下孤岛状态的技术，因此需要探讨孤岛效应的各种检测方法。

4.4 孤岛效应的检测方法

孤岛现象的检测方法根据技术特点，可以分为三大类：被动检测方法、主

动检测方法和外部检测方法^[41,42,43]。

4.4.1 被动检测方法

1) 过/欠电压和高/低频率检测法^[42,43,44] (OVP/UVP、OFP/UFP)

过/欠电压和高/低频率检测法是在公共耦合点的电压幅值和频率超过正常范围时，停止逆变器并网运行的一种检测方法。如果电压或频率偏移达到孤岛检测设定阈值，则可检测到孤岛发生。然而当逆变器所带的本地负荷与其输出功率接近于匹配时，则电压和频率的偏移将非常小甚至为零，因此该方法存在非检测区 (NDZ)。这种方法的经济性较好，但由于非检测区较大，所以单独使用 OVR/UVR 和 OFR/UFR 孤岛检测是不够的。

2) 电压谐波检测法^[42,44,45]

电压谐波检测法通过检测并网逆变器的输出电压的谐波含量来防止孤岛现象发生，这种方法依据工作分支电网功率变压器的非线性原理。对于通过功率变压器输出到电网的并网逆变器，当电网存在时，逆变器输出电压由于受电网控制因而不会有太大的谐波含量；当电网断开时，由于负载阻抗通常要比电网阻抗大得多，从光伏系统注入功率变压器的电流可能引入较大的电压谐波，通过检测电压谐波或谐波的变化就能有效的检测到孤岛效应的发生^[46]。但是在实际应用中，由于非线性负载等因素的存在，电网电压的谐波很大，谐波检测的动作阈值不容易确定，因此，该方法具有局限性。

3) 电压相位突变检测法^[40,42,44] (PJD)

电压相位突变检测法是通过检测光伏并网逆变器的输出电压与电流的相位差变化来检测孤岛现象的发生。光伏并网发电系统并网运行时通常工作在单位功率因数模式，即光伏并网发电系统输出电流 I_0 与 a 点电压（电网电压）同频同相。当电网断开后，出现了光伏并网发电系统单独给负载供电的孤岛现象，此时，a 点电压由 I_0 和负载阻抗 Z 所决定。由于锁相环的作用， I_0 与 a 点电压仅仅在过零点发生同步，在过零点之间， I_0 跟随系统内部的参考电流而不会发生突变，因此，对于非阻性负载，a 点电压的相位将会发生突变，从而可以采用相位突变检测方法来判断孤岛现象是否发生。相位突变检测算法简单，易于实现。但当负载阻抗角 φ 接近零，即负载近似呈阻性时，由于所设阈值的限制，

该方法失效。

被动检测法一般实现起来比较简单，然而当并网逆变器的输出功率与局部电网负载的功率基本接近导致局部电网的电压和频率变化很小时，被动检测法就会失效，即被动检测法通常都存在较大非检测区的问题。

4.4.2 主动检测方法

1) 频率偏移检测法^[41,42,46] (AFD)

应用微处理器的逆变器很容易实现 AFD^[39]。该方法的检测原理如图 4-2 所示。

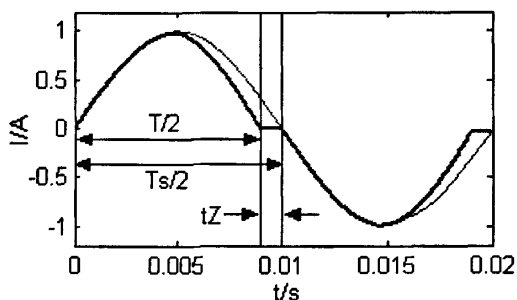


图 4-2 AFD 法逆变电源输出电流波形

图中 T_s 是系统电压周期， T 是逆变器输出电压周期。因逆变器的输出电流波形有少量畸变，前半周，逆变器输出电流的频率稍高于系统电压频率，逆变器输出电流先到零，并且在电压波形到达零之前的 t_z 时间里一直保持为零。后半周，逆变器输出电流又先到零，并且一直保持到系统电压到零。孤岛时，若此电流加到阻性负载上，其电压响应会跟随这种失真电流波形并且在更短的时间内 ($\frac{T_s}{2} - t_z$) 到达零点，从而引起输出电压和电流之间的相位误差。逆变器为消除相位误差会增加输出电流的频率，导致阻性负载电压响应的过零点与预期相比更提前了。逆变器会继续检测相位误差并再次增加电流频率，直到频率偏移足够大，能够被 OFR/UFR 检测到为止。频率偏移检测法会降低逆变器输出电能的质量。另外，当存在多个逆变器时，所有逆变器必须统一频率偏移的方向。如果频率偏移方向不一致，其输出会相互抵消，降低孤岛检测效率。

2) Sandia 频率偏移检测法^[41,42,47] (SFS)

Sandia 频率偏移检测方法是频率偏移方法的扩展，使斩波率 c_f 对 a 点电压

的频率引进正反馈, c_f 定义为

$$c_f = c_n + k(f_1 - f_0) \quad (4-7)$$

式中

c_n 为无频率误差时的斩波系数;

k 为加速增益;

f_1 为逆变器输出电压的测量频率;

f_0 为工频。

正常情况下, 电网的稳定性阻止频率的变化, 孤岛形成后 f_1 增加, 频率误差也随之增加, c_f 增加, 逆变器也增加其自身频率, 达到 OFR 的动作阈值为止。反之如果 f_1 减小, 根据正反馈, c_f 最后变为负数, 代表逆变器输出电流的周期大于输出电压周期。

此方法具有很小的 NDZ。但当逆变器与配电网相连时, 正反馈放大的频率变化会使逆变器输出的电能质量轻微下降。与弱电网连接时, 能影响系统的暂态响应。这些问题可以通过降低增益 k 来调节, 但同时会增加 NDZ。

3) 滑模频率漂移检测法^[41,42,48] (SMS)

滑模频率漂移检测方法是一种利用正反馈检测孤岛效应的方法。正常情况下, 逆变器相角响应曲线设计在系统频率附近范围内, 单位功率因数时逆变器相角比 RLC 负载增加的快。当逆变器与配电网并联运行时, 配电网通过提供固定的参考相角和频率, 使逆变器工作点稳定在工频。当孤岛形成后, 如果逆变器输出电压频率有微小波动, 根据正反馈原理, 逆变器的 S 型相位响应曲线会使相位误差增加, 到达一个新的稳定状态点。新状态点的频率必会超出 OFR/UFR 动作阈值, 逆变器因频率误差而关闭。

理论和实验都表明此检测方法具有很高的孤岛检测效率, NDZ 很小。但反馈环中有非常高的穿透率和高增益, 可能会影响系统电能质量和暂态响应。

4) Sandia 电压偏移检测法^[41,42] (SVS)

SVS 对逆变器输出电压的幅值变化应用正反馈。如果输出电压降低, 逆变器将减小输出电流和功率。正常情况时, 逆变器输出功率的减小对整个系统影

响很小或者没有。当孤岛发生后，逆变器输出电压下降时，输出功率也下降而引起电流减小。根据欧姆定律，此电流与 RLC 负载阻抗相乘得到的逆变器输出电压也将进一步减小，而输出电压的减小又将导致逆变器输出电流进一步减小，最终 UVR 可以检测到电压降低信号。反之，则将引起 OVR 的动作。

对于带有微控制器的逆变器，此方法易于实现。SVS 通常与 SFS 结合使用，具有很高的效率，NDZ 非常小。但 SVS 会使输出电能质量降低，影响系统暂态响应。

5) 频率突变检测法 (FJ)

频率突变检测法是对 AFD 的修改，与阻抗测量法相类似。FJ 检测在输出电流波形（不是每个周期）中加入死区，频率按照预先设置的模式振动。例如，在第四个周期加入死区，正常情况下，逆变器电流引起频率突变，但是电网阻止其波动。孤岛形成后，FJ 通过对频率加入偏差，检测逆变器输出电压频率的振动模式是否符合预先设定的振动模式来检测孤岛现象是否发生。这种检测方法的优点是：如果振动模式足够成熟，使用单台逆变器工作时，FJ 防止孤岛现象的发生是有效的，但是在多台逆变器运行的情况下，如果频率偏移不同相，会降低孤岛检测的效率和有效性。

4.4.3 外部检测方法

外部检测法是通过电网对逆变器进行控制，或者电网与逆变器之间的通信来控制逆变器在一定条件下停止并网运行的一类方法。外部方法都有很高的检测效率，但是由于需要在电网上安装附件，成本会相应提高。根据电网对逆变器的控制方式的不同，主要分为以下两种方法：

1) 自动投切阻抗法^[42,44]

自动投切阻抗法是在电网断电时，自动在电网侧插入低阻抗负载，插入的低阻抗负载能够打破逆变器与负载之间的原有的平衡，造成并网处公共耦合点电压的幅值或频率偏移，从而实现孤岛检测。

2) 运用远程通讯监控线路^[49]

电网端的发送器通过电力线路本身发送信号来传递信息，用户端的接收器检测电网上是否有发生器发送的信号，如果没有收到则认为电网已经断开。

外部检测法的特点：

- 1) 实时性强，检测速度快，稳定性高；
- 2) 对电网系统正常运行没有影响；
- 3) 需要额外安装监控或阻抗投切设备，成本比较昂贵；
- 4) 比较适合于大功率分布式电站的并网。

4.4.4 本论文采用的孤岛检测的方法

本文采用了一种新的孤岛检测方法-电压前馈正反馈扰动检测的方法。首先简单介绍一下电压反馈原理^[50]，其运行原理如图 4-3 所示。当逆变器输出电压增加时，AI 反馈将使逆变器有功功率输出增加，根据公式 (4-4)，有功功率的增加将带动电压的增加，电压的增加又使得逆变器输出有功功率增加，依次循环，直到电压增大到超过继电器的保护范围，孤岛现象就会被检测出来。逆变器输出电压降低时，电压正反馈的运行机制和电压升高时正好相反。

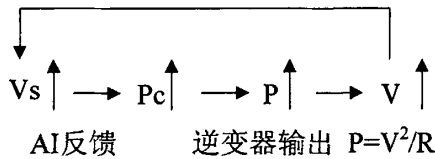


图 4-3 电压正反馈原理图

电压前馈正反馈扰动孤岛检测法的具体方法是：将 a 点电压前馈，加入周期扰动量，输出量作为电流幅值扰动量，然后作用在逆变器输出电流的给定上，从而改变逆变器输出有功功率，进一步影响输出电压的变化，电压将超出正常的范围，然后孤岛现象被检测到。电压前馈正反馈扰动孤岛检测法的系统图如图 4-4 所示。

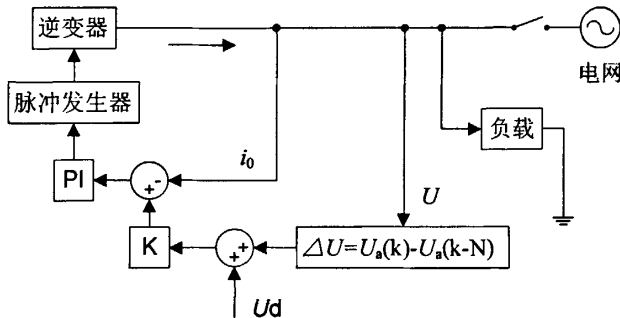


图 4-4 孤岛检测系统图

电压前馈正反馈扰动孤岛检测法的算法公式为：

$$I_d = K[U_a - U_m + U_d] \quad (4-8)$$

$$U_d = \begin{cases} K_d & U_a > U_m \\ -K_d & U_a \leq U_m \end{cases} \quad (4-9)$$

式 (4-8)、(4-9) 中

I_d 为电流幅值扰动量;

K 为系数;

U_a 为 a 点电压峰值;

U_m 为电网电压峰值;

U_d 为周期扰动量, 初值为 0, 每隔 1s 将其设置为预设值。

并网运行时, 光伏并网发电系统的输出电流为

$$I_o = \{I_m + K[U_a - U_m + U_d]\} \sin(2\pi f_0 t) \quad (4-10)$$

式中

I_m 为并网逆变器输出电流的给定值;

f_0 为电网频率。

但是只有在理想情况下 U_m 的值为 311V, 实际上电网电压存在波动, U_m 不是恒定值, 因此需要找到 U_m 合适的表示方法。理论上认为, 在较短时间内电网电压峰值保持恒定值, 由图 4-1 可以看到, 并网逆变器处于并网运行时 $U_a = U_m$, 基于上面的理论, 可以设定 $U_m(k) = U_a(k-N)$, 其中 N 为系统采集 a 点电压的采样周期, 换言之, 在较短时间内, 第 k 个周期电网电压峰值和第 $k-N$ 个周期 a 点电压峰值相等。假定第 k 个周期电网断电, 其后的一个周期 U_m 的值可以由并网逆变器正常运行时的 $U_a(k-N+1)$ 表示, 即 $U_m(k+1) = U_a(k-N+1)$ 。以此类推。此时输出电流表示为:

$$I_o = \{I_m + K[U_a(k) - U_a(k-N) + U_d]\} \sin(2\pi f_0 t) \quad (4-11)$$

从 a 点电压峰值 U_a 的角度考虑, 分为以下情况:

1) $U_a(k) > U_m(k)$ 设第 k 个周期发生孤岛现象, 此时 a 点电压峰值高于上次的采样值, 即 $U_a(k) > U_m(k) = U_a(k-N)$ 。由式 (4-11) 可知, 第 $k+1$ 个周期电流峰值增大。根据正反馈原理 a 点电压呈上升趋势。当电压上升超过预设阈值时, 系统将检测到孤岛现象的发生。周期扰动量 U_d 由 0 变为 K_d , 进一步使 a 点电压上升, 直到超出预设阈值。

2) $U_a(k) < U_m(k)$ 设第 k 个周期发生孤岛现象, 此时 a 点电压峰值低于上次的采样值, 即 $U_a(k) < U_m(k) = U_a(k-N)$ 。由式 (4-11) 可知, 第 $k+1$ 个周期电流峰值减小。根据正反馈原理 a 点电压呈下降趋势, 当电压下降超过预设阈值时, 系统将检测到孤岛现象的发生。周期扰动量 U_d 由 0 变 $-K_d$, 进一步使 a 点电压下降, 直到超出预设阈值。

3) $U_a(k) = U_m(k)$ 孤岛现象发生后, 周期扰动量 $U_d = -K_d$, 由于电压幅值没有变化, 系统无法检测到孤岛现象的发生。 U_d 每隔 1s 作用, 由式 (4-11) 可知, U_d 的引入使光伏并网发电系统输出电流减小, 使得 $U_a(k) < U_a(k-N)$, 此后的系统工作过程与 $U_a(k) < U_a(k-N)$ 的情况相同。

该方法的优点是多个并网逆变器进行孤岛检测时, 逆变器之间是相互支持的, 即当一个逆变器的扰动使扰动量上升, 其它的并网逆变器会检测到相同的变化方向, 控制的结果会使其进一步上升。

当电网不稳定或大负载突然投切时, 电网电压会出现较大的波动, 从而引起孤岛检测与保护系统误动作, 即出现虚假的孤岛保护现象。设额定电网电压的幅值是 U_n , 当 $U_a/U_n \leq 50\%$ 或 $U_a/U_n \geq 137\%$ 时, 可以确定真正孤岛现象发生, 应当采取相应的保护措施, 但是, 当 $50\% < U_a/U_n \leq 88\%$ 或 $110\% \leq U_a/U_n < 137\%$ 时, 可能是孤岛现象出现, 也可能是虚假孤岛现象。电压前馈正反馈的检测方法可以防止虚假孤岛保护现象的发生。

4.5 仿真实验

应用 MATLAB 建立仿真框图如图 4-5 所示。

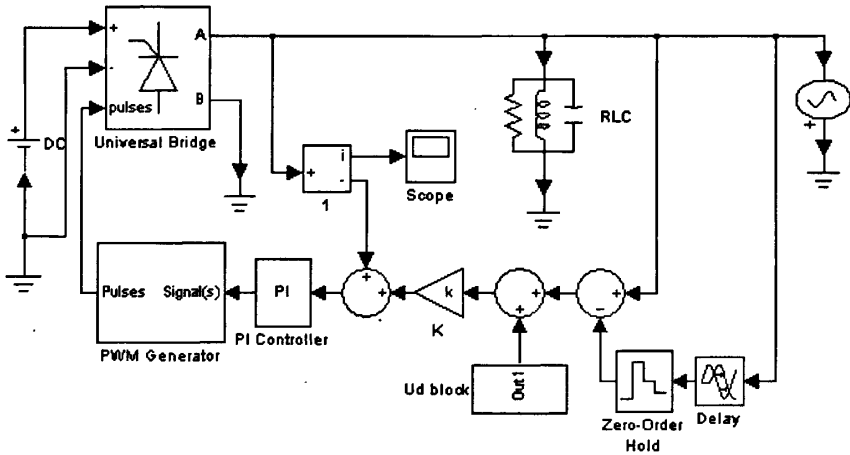


图 4-5 检测孤岛现象的仿真框图

仿真参数设置如下：电网电压 220V/50Hz；光伏并网发电系统额定功率输出为 1.1kW，输出电流峰值为 7.1A。在进行反孤岛测试时，太小或太大的 Q 值都是不可取的，根据国际通行标准，选择品质因数 $Q=2.5$ 。利用电压前馈正反馈的方法检测孤岛现象的流程图如图 4-6 所示。

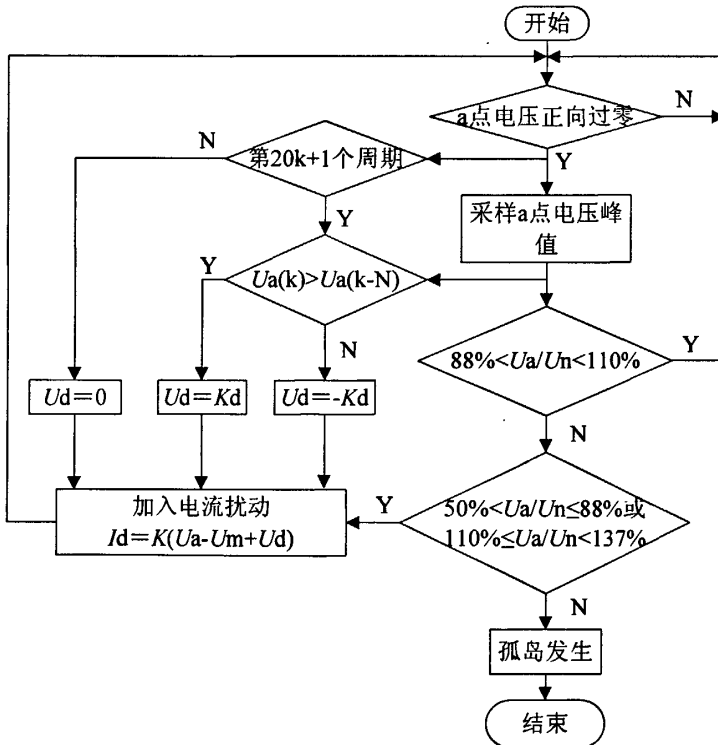
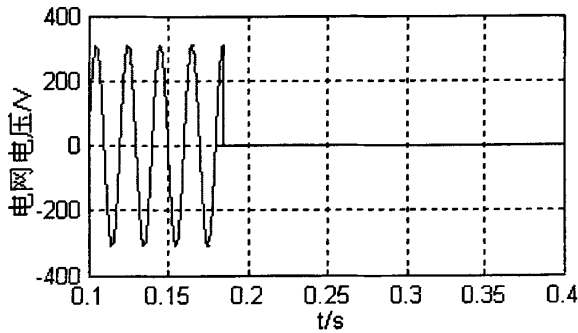


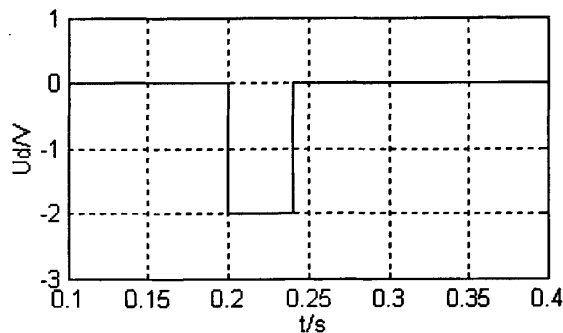
图 4-6 孤岛检测流程图

每隔 20 个工频周期，即 0.4s 进行一次孤岛检测。图 4-7 为基于电压前馈正反馈扰动孤岛检测方法的仿真结果。如图 4-7(a)所示，仿真中设置 0.185s 时电网断电，孤岛现象发生，光伏并网发电系统单独向负载供电。此时，由于光伏并网发电系统输出功率和负载功率平衡，a 点电压峰值保持不变，系统无法检测到孤岛现象的发生。如图 4-7(b)所示，设置 0.2s 时 U_d 作用， U_d 的引入打破了 a 点电压平衡状态，使得 a 点负载电压下降，并在正反馈的作用下，a 点负载电压继续下降。2 个工频周期后，即 0.24s 处，a 点负载电压超出了预设阈值，系统检测到孤岛现象并动作，如图 4-7(d)所示，光伏并网发电系统停止工作。由于负载是 RLC 并联，光伏并网发电系统停止工作时， RLC 负载会发生自身衰减振荡，最后逐渐衰减至 0。

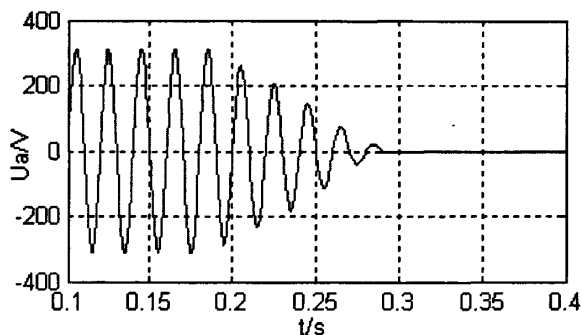
专用标准 IEEE Std.2000-929 对孤岛发生后最大跳闸时间的规定是 120 周期，本文设计的系统最多用 $50+2$ 个周期 ($1s+0.04s$) 即可检测到孤岛现象的发生。



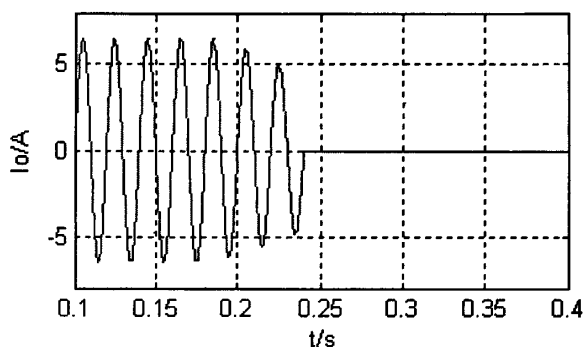
(a) 电网电压



(b) 扰动信号



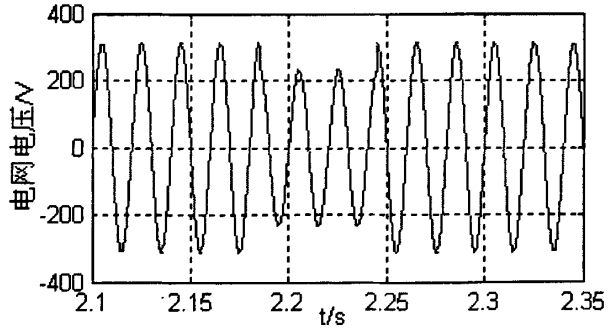
(c) a 点电压



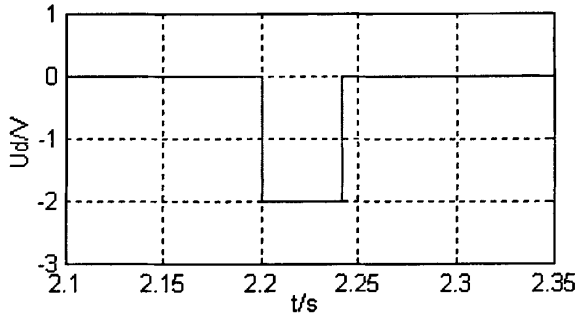
(d) 光伏并网发电系统输出电流波形

图 4-7 孤岛检测的仿真波形

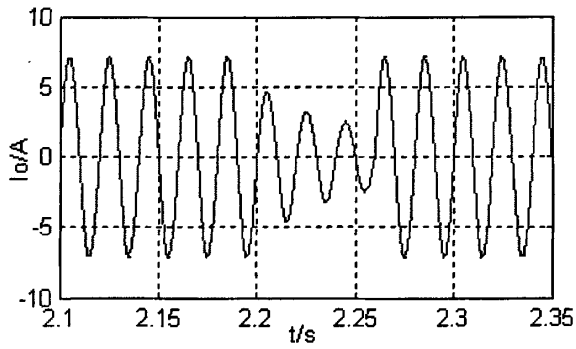
为了验证本论文中采用的孤岛检测方法可以预防虚假孤岛现象的发生，仿真中设定电网在 2.185s 发生电压跌落，如图 4-8(a)所示，电网电压降至 $0.75U_n$ ，持续 3 个工频周期后恢复正常。由于电网没有断电，因此 a 点电压即为电网电压。如图 4-8(b)所示，在 2.2s 时 U_d 作用，光伏并网发电系统输出电流加入电流扰动 I_d ，由于电网没有断电，a 点电压峰值不受光伏并网发电系统输出电流的影响，在 2.24s 时，系统检测到 a 点电压峰值仍然是 $0.75U_n$ ，大于 $0.5U_n$ ，说明是虚假孤岛现象发生，光伏并网发电系统正常工作，系统输出电流波形图如图 4-8(c)所示。仿真结果表明，此方法可以有效的避免由于大负载的投切引起的虚假孤岛保护现象，提高了孤岛检测的准确性和有效性。



(a) 电网电压



(b) 扰动信号



(c) 光伏并网发电系统输出电流波形

图 4-8 预防虚假孤岛保护仿真结果

第 5 章 光伏并网发电系统的可靠性分析

5.1 可靠性的基本概念

5.1.1 可靠性的定义

可靠性的定义是：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。它包含四个意思^[51]：

1) 产品的可靠性是与“规定的条件”分不开的。对于电子元器件“规定的条件”主要指使用的工作条件（如使用的电压、电流和功率等）、环境条件（如温度、湿度和气压等）或储存条件。“规定的条件”不同，产品的可靠性不同。

2) 产品的可靠性又与“规定的时间”密切相关。一般来说，元器件经过筛选之后，随着使用或储存时间越久，可靠性越低，失效率越大。因此，可靠性必须注明在多长时间内的可靠性，离开时间的可靠性是无意义的，因为同一器件规定的时间不同，可靠性也是不同的。

3) 产品的可靠性与“规定的功能”有着密切关系。所谓“功能”是指产品的技术指标、技术要求，也就是要求完成某一任务或起到某种作用。

4) 产品的可靠性是表示在规定时间内完成规定功能的可能性的的大小，从数学的观点来是表示一种概率。这是因为一个元器件究竟什么时候发生丧失规定功能而失效是不确定的，它可以借助于概率论和数理统计的方法，将其加以定量描述。显然，可靠性不是指一个元件的，而是对一批相同元件而言。对于一个元件谈不上可靠性，因为一个元件不是良品，就是失效品。所以可靠性是对群体或总体而言，不能用于产品的个体。

上述可靠性定义是狭义的定义，广义可靠性包括狭义可靠性和可维修性两方面。可维修性包括是否易于维修，维修后是否能“整旧如新”等。

5.1.2 可靠性分析的重要性和经济性

1) 重要性

电子产品的复杂程度在不断增加，其显著标志是所需元器件数量的增多。电子设备的可靠性决定于所用元器件的可靠性，因此电子设备的可靠性问题严重。并且，目前电子产品正在向着小型化、微型化方向发展，结果导致装置密度的不断增加，从而内部温升增高，散热条件恶化。长期以来，人们只用产品

的技术性能指标作为衡量电子元器件质量好坏的标志，这只是反映产品质量的一个方面，不能反映产品质量的全貌。因为，如果产品不可靠，即使技术性能再好也不能得到发挥。因此，要把可靠性作为产品的重要质量指标加以考核和检验。

2) 经济性

研究和提高产品的可靠性是要付出一定代价的，从生产角度看，要增加产品的研制和生产的成本。但是，从使用角度看，由于产品的可靠性提高了，大大减小了使用费和维修费，同时减少了产品寿命周期的成本。所以，从总体上看，研究可靠性是有经济效益的。

5.1.3 电子系统的可靠性设计基础

1) 硬件的可靠性设计^[52,53]

电子系统中的硬件故障，大部分直接以元器件的各种故障方式表现出来。其故障原因，并非都是元器件本身的缺陷，有不少是选用不当导致的，因此元器件的选用、产品的筛选设计都是电子系统的可靠性设计的重要环节之一；为了保证元器件的使用可靠度，合理的进行降额使用元器件，可以大幅度的降低元器件的失效率，因此降额设计已经成为电子系统可靠性保障设计的最有效的方法之一；任何元件、部件、分系统的参数都会有一定的误差，这些误差对系统必然产生各种影响，若影响超过一定的限制（容差），系统就会发生故障。因此容差设计也是电子系统可靠性设计的重要环节。

(1) 可靠性筛选

可靠性筛选是在一批产品中提出那些由于原材料、工艺制造等潜在的不良因素所造成的有缺陷而早期失效的产品，而把具有一定特性的产品挑选出来，在筛选之前，产品的参数性能一般都是合格的，只有对产品施加各种应力条件或采用特殊的检查手段后，才能发现有隐患的早期失效产品。对于电子元器件，可靠性筛选不能提高单个元件的可靠性，只有当一批产品的早期失效产品被剔除后，才能提高整批产品的可靠性水平。同时，在整批产品的特性上，可靠性筛选不该影响其失效机理、失效模式和正常工作，因此可靠性筛选实验对优良产品的损伤要尽可能的小。

(2) 降额设计

所谓降额就是使元器件在低于其额定值的应力条件下工作，降额设计就是合理的选择调整系数及应力水平，使大幅度的降低元器件的失效率，提高元器件的可靠性水平。但是并不是所有的元器件降额越多越可靠，有的元件降额过多反而会使失效率显著增大。因此，在降额设计时，必须保证元器件的失效机理和失效模型不变，掌握元器件的失效规律，合理的选择应力。

(3) 容差设计

任何元件、部件或分系统的参数计算会有一些的公差，公差的变化会使系统产生漂移失效。为了减小或克服这种失效的发生，有必要进行容差设计。容差设计是在设计上使参数漂移失效的影响降到最低点，是系统的性能及稳定性最佳、成本最低。容差设计是根据元器件的参数变化对系统的影响度来控制系统参数的变化范围，或者根据系统的功能要求来控制元器件参数的变化范围，从而选择适合的元器件，保证系统的可靠性水平。

2) 软件的可靠性设计^[54]

在规定条件和时间内，软件成功的完成规定功能的能力（概率）或不引起系统故障的能力（概率），称为软件的可靠性。软件可靠性设计的全部内容可归结为四个类型：避错设计、查错设计、改错设计和容错设计。避错设计是使软件产品在设计过程中，不发生错误或少发生错误的一种设计方法。由于软件的设计错误通常发生在各个变换的过程中，因此避错设计最关心的就是控制这些变换过程。避错设计适用于一切类型的软件，体现了以预防为主的思想，是软件可靠性设计的首要方法，应当贯穿于设计的全部过程中。查错设计是指在设计中赋予程序某些特殊的功能，使程序在运行中自动查找存在错误的设计方法。改错设计是指在设计中，赋予程序自我改正错误、减少错误危害程度的能力的设计方法。容错设计是指在设计中赋予程序某种特殊的功能，使程序在错误已被触发的情况下，系统仍然具有正常运行能力的一种设计方法。

3) 硬件和软件的可靠性特征的差异

软件和硬件有本质的区别，使得它们有不同的可靠性特征，两者在可靠性特征上的差异，只要有以下几点：

(1) 软件失效，是在程序运行过程中软件错误被触发所致。软件错误是设计原因造成的，如果不进行更新，则将经久不变，时间的长短对软件错误不起

作用。硬件失效则是由于物理和化学的作用，使物质的性质和结构发生变化，致使硬件发生了损耗性失效。

(2) 软件的失效性，将随使用时间的增加而下降。这是因为排错可以穿插在软件使用过程中进行。硬件在使用过程中，则呈现出可靠性衰减的趋势，因而硬件的失效率将随着时间增加而上升。

(3) 软件经过一段时间的使用之后，也会被废弃，但是软件和硬件被废弃的原因不同。软件报废的主要原因是软件版本的功能已不能满足用户新的需求，硬件报废的主要原因则是产品经过长时间的使用，已经进入损耗失效期，无法继续正常工作。

(4) 软件在设计完成之后，可以大量的复制，复制件和原版本完全一样，而同种型号和规格的硬件产品，尽管原材料完全相同，制造过程完全相同，但是每个产品的微观结构必然存在差异。

(5) 维护和维修方面，软件对普通用户是不可维护的，只能通过软件开发方的再设计和排错设计消除错误。硬件的一部分维修工作，可以由用户在使用现场进行。

(6) 环境因素方面，影响软件失效的环境因素是指软件开发环境与使用环境的差异，如操作系统、硬件配置等，外部的自然环境对软件的可靠性没有直接的影响。硬件失效与使用现场的自然环境或人为环境密切相关，因此硬件可靠性设计工作中的环境设计十分重要。

(7) 标准件的采用方面，硬件设计虽然千变万化，但多数可用标准零部件、标准电路搭配构成，这些标准件质量和可靠性有较好的保证，各种标准零部件的失效模式也有公认的分类方法。在软件领域可以通用的标准模块非常缺乏，多数程序需要设计人员独创构思。

对比硬件和软件的可靠性特征，得到的一个重要结论是：设计质量对于软件可靠性具有特殊的重要意义。硬件的可靠性，除了设计的影响以外，还受到物质老化过程的影响，产品的老化是无法避免的。相比之下，软件的可靠性对设计的依赖程度更大。

5.1.4 影响产品可靠性的因素

据美国海军电子实验室的统计，整机出故障由于设计的原因占 10%，元器

件质量不好占 30%，操作维护原因占 20%，制造工艺问题占 10%。造成设备失效的原因和影响是多方面的，归根结底是设备本身具有出故障的内因，在各种外因的作用下出现了故障。其中外因包括储存、运输和工作过程中的环境条件的影响。环境条件的影响因素^[55]如表 5.1 所示。

表 5.1 环境条件的影响因素

环境条件	影响因素
气候环境条件	温度、湿度、气压、风、雨、雪、霜冻、沙尘等
机械环境条件	振动、冲击、离心力、失重、摇摆、碰撞等
生物条件	昆虫、有害动物、霉菌、海洋生物等
化学条件	大气污染、臭氧、腐蚀性气体、烟雾等
电与电磁条件	电源不稳定、传导线系统的干扰、电磁干扰、雷电等
辐射条件	太阳辐射、原子效射辐射、紫外线辐射、宇宙射线等

不同的环境条件对电子设备的可靠性都会造成不同程度的影响。根据设备使用的用途不同和使用的环境不同，有些环境条件对设备的影响是主要的，有的是次要的。有些环境条件的影响很严酷，有些则是很微弱的，应该区别对待。

5.2 光伏并网发电系统的可靠性分析

光伏并网发电和常规能源发电不同，它具有随机不确定性，而这种时变性又增加了系统的不稳定因素。这使得人们希望对其一段时间内的工作状况有所把握。本节的重点是研究影响光伏并网发电系统工作可靠性的各种因素，并考虑各因素之间的相互作用。

目前，光伏并网电站一般并入低压配电网内，由光伏阵列产生的电能经逆变器后进入网络向负载供电。图 5-1 是光伏并网发电系统的示意图，根节点实际上是一个无穷大系统，有光照时光伏电站正常工作，电网和光伏电站共同向配电网内负载供电，无光照时则由电网单独供电。

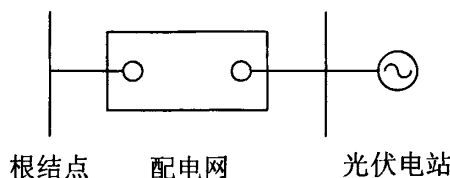


图 5-1 光伏并网发电系统示意图

5.2.1 系统中的元件故障分析^[56]

光伏并网发电系统实际上是一个包含了发电元件和输电元件的组合系统，其中配电网的主要元件有线路、断路器和继电保护等元件，在系统工作中，需要考虑这些元器件的运行、故障、检修，以及由此引起的网络运行方式的变化，同时还要考虑负载的实时变化。由于光伏电站的加入，使得配电网的保护进行了相应变化。这些变化对系统运行产生的影响也必须进行考虑。

在本论文中，我们对光伏并网发电系统中的元件进行分析。我们认为电站内部母线的工作状态始终正常，不会发生故障，因此主要对光伏组件、并网逆变器、光伏电站及线路进行分析。

1) 光伏组件

光伏并网发电系统根据其对电压和功率的需求配以一个光伏阵列。光伏阵列是由足够数量的光伏组件串并联而成的。人们按照所需的电压、电流将光伏组件按合适的方式联成阵列，可以是串联、并联或是串并联混联，光伏组件是由一定数量的太阳能电池组成的。

在分析组件故障处理前，必须对阵列内部相关的保护进行分析，这样才能准确判断故障动作模式。

当众多光伏阵列或组件由于外部扰动而被遮挡（或其中部分被损坏等），但阵列的其余部分却仍处于阳光暴晒之下的情况下，也有可能出现某一块太阳能电池部分被遮挡的情形，这样局部被遮挡的太阳能电池或光伏组件就必须由其余的未被遮挡的那部分太阳能电池或光伏组件来提供负载所需的全部或部分功率，这就使某些太阳能电池如同一个工作于反向电流下的二极管，其电阻及压降将很大，从而吸收功率而导致发热，这可能损害甚至损坏太阳能电池。由于出现高温，人们称之为“热斑”效应。图 5-2 中的旁路二极管可防止串联电路中个别太阳能电池由于被遮挡而导致损坏，同时也可避免由于光伏阵列通过被遮挡太阳能电池放电而造成的功率损失。它并列在组件的正、负极之间，主要用来保护太阳能电池组件。

当光伏阵列中某一并联支路由于被遮挡而导致与阵列解列时，由于旁路二极管的作用，这个故障组件被短路，该光伏阵列中其余状态良好的组件可以继续正常工作，而故障组件虽然停止了运行，但也不进入检修状态，换言之，此

组件被“闲置”了，直到该阵列组件退出阵列运行时，组件才开始检修。

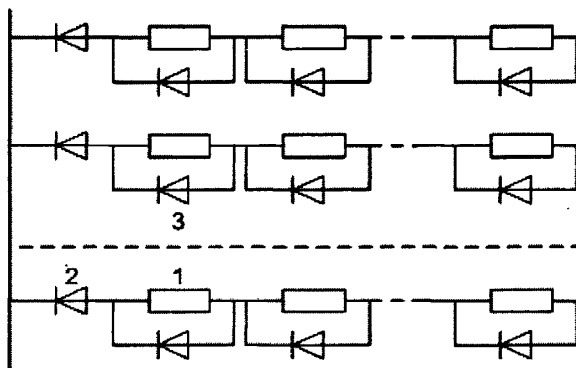


图 5-2 光伏阵列示意图

1、太阳能电池组件； 2、阻塞二极管； 3、旁路二极管

因此，太阳能电池组件故障和其他元件故障不同的是，它的故障状态有可能被保持。所谓保持是指元件故障后又不开始检修的这段时间，而该阵列电池组件在该阵列故障元件数达到影响整个阵列工作的情况下才退出运行。

2) 并网逆变器

逆变器是将直流电转换为交流电的电力电子器件，同时还具有自动稳压稳频的功能，可以保障光伏并网发电系统的供电质量，是光伏并网发电系统中必不可少的重要设备。本论文中我们主要涉及并网逆变器的研究。

逆变器的效率值表征自身功率损耗（包括导通损耗和开关损耗）的大小，通常以百分比表示。容量较大的逆变器还应给出满负荷效率值和低负荷效率值。千瓦级以下的逆变器满负荷效率应为 80%~85%，10kW 级的逆变器效率应为 85%~90%。逆变器效率的高低对光伏并网发电系统有效提高发电量和降低发电成本有着重要的影响。通常，逆变器作为一个模块考虑，通过这个模块将光伏阵列产生的直流电传递给电网或交流负载。

3) 光伏电站

光伏并网电站由于和电网发生了电气连接，对负载的供电不足可以由电网提供，因此没有蓄电池和控制器元件。同时，光伏电站所发出的电能可以被全部利用，这是和独立光伏电站不同的地方。需要注意的是，光伏组件的效率随时间、季节、天气、云层等因素变化而变化，光伏并网电站的运行方式也发生改变，即在日照时间段内，电站所发出的电量全部被电网消化，而在非日照时

间段内，电站完全不供电。

4) 线路

电力电路的故障概率一般比逆变器和电站要小得多，但在线路发生故障时，电力系统的运行方式、网络结构和潮流发布都将产生重大变化，直接影响系统的安全经济运行。

线路的故障有许多种，主要分为开路和短路。线路的开路故障主要会对网络的潮流发布产生影响，它不会影响到保护动作，但在配网中会影响到故障线路以下的负载断电。

线路的短路一般不区分瞬时性或永久性，这是因为配电网中的保护比较简单，没有安装重合闸，因此短路故障不考虑重合闸。如断路器动作，则故障线路切换，如断路器拒绝动作，则由后备保护动作切除故障。由于相关线路的切除改变了网络拓扑的结构，每次在线路故障或保护动作时应重新识别网络。

所谓线路的共模故障是一种由外部因素引起的、具有多种故障后果的事件，如同杆架设的两回或多回线路遭遇倒杆或雷击事故时，将引起多回线路同时故障。所谓线路的相关故障是指一条线路的故障与其他多条线路的故障存在相关关系。例如双回线，一条线路独立停运后，另一条线路由于过载而退出运行就是一种相关故障。由于光伏电站并入配电网内，配网线路的相关性较弱，因此可以不考虑这些故障。

5.2.2 影响系统可靠性的原因

可靠性设计是为了保证产品的可靠性采取的一系列分析与设计技术，是通过系统装置的电路设计与结构设计来实现的。光伏并网发电系统的可靠性，是指在满足光伏并网发电系统供电能力的同时，针对系统的具体使用环境和条件下有可能出现的故障模式，采取相应的设计技术，以最少的投资使光伏产品满足一定的可靠性要求。

光伏并网发电系统产品有的部件失效后经过维修后可再次使用，称为可维修部件；有的部件失效后无法修复或修复成本太高，这类部件称为不可修复部件。表 5.2 列举了光伏发电系统中的部分部件属性。

实际上，光伏并网发电系统由可维修部件和不可维修部件组件组成。诸如太阳能电池板等组件，一旦失效后很难修复，称为不可维修部件，不可维修部

件一般直接采用狭义可靠性指标处理，主要有可靠度、失效率、平均寿命 3 个指标，可靠度 $R(t)$ 是指产品（部件）在规定条件、规定时间内完成规定功能的概率；失效率 $\lambda(t)$ 是指已工作到时刻 t 尚未失效的产品，在时刻 t 后单位时间内发生失效的概率；平均寿命是指产品从使用开始直到发生失效所经历的时间。

表 5.2 光伏并网发电系统的部分部件属性

可维修部件	不可维修部件
逆变器	太阳能电池板
控制器	直流灯具
...	...

对于逆变器等可维修产品或部件，其主要指标有可靠度、故障率和平均故障间隔时间（MTBF）以及平均故障修复时间（MTTR）。对于由可维修部件和不可维修部件组成的光伏并网发电系统，总体来说应该理解为可维修产品。光伏并网发电系统的可靠性是可以设计出来的，表 5.3 是某公司生产的某种型号光伏发电系统专用逆变器的失效原因分析表。

表 5.3 光伏发电系统专用逆变器的失效原因分析

失效原因	占失效总数的比例
设计缺陷	60%
元器件质量低下	25%
使用与维护不当	14%

可见，设计缺陷仍是光伏发电系统失效的主要原因。实质上产品设计一旦完成，其固有可靠性就确定了，生产制造只能保证理论上固有可靠性得以实现，而使用和维护只能尽量维持已获得的固有可靠性。从表 5.3 中得知设计缺陷和元器件质量低下成为影响光伏并网发电系统可靠性的主要因素。

1) 设计缺陷是光伏发电系统可靠性较低的主要原因。由于光伏发电系统产品产业规模较小、产品标准化率极低，进行可靠性分析设计缺乏资源和样本。因此缺少足够的机会和时间修正产品的缺陷、减少早期失效率。

2) 使用、维护不当是光伏发电系统产品可靠性较低的重要原因。作为生产商来说，产品一旦完成，其平均无故障时间（MTBF）就已确定，使用阶段只能维持产品的可靠性，一旦出现故障，则要求出现故障后修复时间越短越好，

这就是平均修复时间 (MTTR)。虽然光伏发电系统属于可维修产品,但是光伏发电系统产品往往安装在偏远地区,维修力量薄弱,因此平均修复时间太长。除此之外还有违章使用等人为因素。

3) 元器件质量低下是光伏发电系统可靠性指标低的一大原因。生产光伏发电系统产品的厂家由于缺乏批量生产能力,生产企业规模小,质量管理体系不健全,导致零部件进厂检查、评估环节出现漏洞。再加上产品无规则式的恶性竞争,导致产品价格下跌,迫使生产商不顾元件的质量进行采购。

5.2.3 提高系统可靠性的措施

要提高光伏并网发电系统的可靠性,必须要根据光伏发电系统的特点,采用相应的可靠性设计方法^[57]。

对于不可维修的光伏发电系统产品,如太阳能电池板等,必须制定和贯彻可靠性设计准则,正确的选择与使用元器件,认真考虑元器件的降额设计、耐环境设计等,严格执行相关行业标准。

对于可维修的光伏发电系统产品,除了采用相关的可靠性准则,合理选用光伏零部件外,应采用冗余设计技术,可使系统的可靠性大大提高。所谓的冗余设计是在系统或设备完成任务起关键作用的地方,增设一套以上完成相同功能的通道、单元或元件,在该地方出现故障时,系统仍能正常工作,以减少系统或设备故障率,这种方法特别适合光伏并网发电系统。

5.3 建议

1) 光伏并网发电系统可靠性不高的主要原因是缺乏可靠性设计,建议同行、专家一起合作,建立完善准确的可靠性模型,并在相关的国家标准中对可靠性指标作出定量要求。

2) 光伏并网发电系统可靠性的提高,除了对各零部件可靠性有待提高外,对可维修部件及整个系统,采用冗余设计是提高平均无故障时间、降低平均故障修复时间的有效方法。

3) 建议光伏企业建立完善的质量管理体系,努力降低产品的早期失效率。

第6章 总结与展望

6.1 总结

随着能源危机的到来,人们开发利用可再生能源成为一个迫在眉睫的课题。而太阳能作为可再生能源中最洁净、储量最大的能源倍受人们的关注,光伏并网发电技术的研究内容包括太阳能-电能转换、最大功率跟踪控制、孤岛检测等几个方面。本论文的重点是并网逆变器的研究,主要有以下几个方面:

1) 研究光伏并网逆变器的工作原理及控制策略,分析逆变器系统的应用特点。针对所要设计的系统确定逆变器的拓扑结构,从光伏并网系统的结构简单、易于维护方面考虑,选择不可调度式并网逆变器,并从并网系统的主电路拓扑、控制策略等几个方面做了详细的分析和仿真实验。

2) 探讨了孤岛效应的国际通行标准、危害,以及目前孤岛检测的方法,采用了电压前馈正反馈扰动的检测方法,建立了光伏并网发电系统反孤岛检测的仿真模型并进行了仿真实验。仿真实验证明,该方法可以在电网断电后快速、准确的将光伏并网发电系统与电网隔离。

3) 分析了光伏并网发电系统可靠性指标较低的主要因素及各因素之间的相互关系。

6.2 展望

目前光伏并网发电系统在世界各国得到了广泛的推广和应用,对其的利用和控制还是比较前沿的课题。控制理论和电力电子技术的紧密结合使得该领域的研究博大精深。虽然光伏并网发电系统在国外已经有了一定规模的应用,但是这个领域仍然有很多技术问题有待解决,特别是在整个系统的核心—并网逆变器的拓扑结构、控制策略等方面。我们目前所作的研究工作仅仅是个开头,由于时间有限,作者深深感到本论文的设计中还存在一些尚需解决的问题,现将它们提出:

1) 系统的硬件设计还存在一些不合理的方面,系统参数需要进一步的优化,应当根据仿真结果进行相应的修正和改进。

2) 还应进一步进行系统联调,在联调过程中,发现系统不合理的方面,找

出系统设计上的缺陷，根据结果合理的调整。

3) 多台光伏发电系统的并网相对于电网的局部来说，对于电网和并网系统的正常运行不会有所影响；当光伏并网系统大规模使用时，如何进行多台并网系统工作状态的自动控制和调整成为亟待解决的问题。

虽然在理论上、技术和工艺水平上，我们与世界先进水平相比还有很大差距，相信在不懈的努力下，我们会很快完善系统技术、改善系统性能，将高质量和高性能的光伏并网发电系统产品推向市场。

参考文献

- [1] 狄丹.太阳能光伏发电是理想的可再生能源[J].华中电力,2008,21(5):59-62.
- [2] Juan Manuel Carrasco, Leopoldo Garcia Franquelo. Power electronic systems for the grid integration of renewable energy source[S]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2006,53 (4):1002-1016.
- [3] 昌金铭.国内外光伏发电的新进展[J].阳光能源,2007,(1):28-31.
- [4] 张晓霞,侯竞伟,殷攀攀等.太阳能发电系统现状及发展趋势[J].机电产品开发与创新,2007,20(5):14-16.
- [5] Green M. A. Green energy visions: personal views on the future of photovoltaic[J]. Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 1(1): 1-5.
- [6] Reichmuth M., Humnekes C.F.. Monitoring results of the German 100 000 roofs programmer[J]. Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 1(3): 2115-2119.
- [7] 傅仲文,吴丽萍,韩媛媛.我国光伏产业的发展现状及前景[J].中国能源,2006, 28(6):9-10.
- [8] 黄为一,王娟娟.投资我国太阳能光伏产业需要关注的几个问题[J].中国能源,2008,30(10):18-22.
- [9] 陆晓楠,黄立培,杨仲庆.中国光伏发电产业的现状及发展趋势[J].高科技与产业化,2009,2(34):86-88.
- [10] Gow J.A., Manning C.D.. Photovoltaic converter system suitable for use in small scale stand-alone or grid connected applications. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 2000, 147(6): 535-543.
- [11] 赵玉文.我国太阳能光伏产业发展形势和思考[J].世界科技研究与发展,2003, 25(4):31-38.
- [12] Michael Rogol. Refining benchmanrks and forecasts[J]. Photon International, 2008,(1):84-94.
- [13] 耿新华.光伏发电和光伏产业在本世界能源中的地位与发展趋势[J].科学中国人,2003,(9):24-25.
- [14] 李芳,沈辉.光伏建筑一体化的现状与发展[J].电源技术,2007,31(8):659-662.

- [15] 高纪庆.推进光伏并网发电与建筑结合的应用[J].能源研究与利用,2004,10(5): 35-36.
- [16] Laukatnp H., Leithold W., Rehg U.. Sclarzentnun Fwiburg Europe's first photovoltaic Structural glazing laced[C]. 12E C photovoltaic Energy, 1994, 928-931.
- [17] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,袁立强.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [18] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [19] 戴朝波,林海雪.电压型逆变器三角载波电流控制新方法[J].中国电机工程学报,2002,22(2):99-102.
- [20] Shi-cheng Zhang,Pei-zhen Wang,Lu-sheng Ge. Stugy on PWM control strategy of photovoltaic grid-connected generation system [C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006,3 (14):1-5.
- [21] 顾和荣,杨子龙,邬伟扬.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.
- [22] 首福俊,黄念慈,窦伟.一种新型的光伏逆变器的控制方法[J].电力电子技术.2004, 38(2): 66-68.
- [23] 赵为.太阳能光伏并网发电系统的研究[D].合肥:合肥工业大学,2003.2.
- [24] Dixon Juan W., Kullcami Ashok B., Nishimato Masahiro,et al. Characteristics of a controlled-current PWM rectifier-inverter link[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, IA-23(6): 1022-1028.
- [25] 陈东华,谢少军,周波.瞬时值电流控制逆变技术比较[J].南京航空航天大学学报,2004,36(3): 343-347.
- [26] 王兆安,董晓鹏.基于改进周期平均模型的 PWM 整流器控制[J].电力电子技术,1999,33(2): 11-14.
- [27] 吴丽娟.锁相环在 PWM 变频调速系统中的应用[J].电气开关,2000,(2):8-9.
- [28] 李永明等译.锁相环设计、仿真与应用[M].北京:清华大学出版社.2007.
- [29] 张雄伟.DSP 芯片的原理与开发应用[M].北京:电子工业出版社,2000.
- [30] TMS320 Fixed-point DSP Assembly Language Tools User's Guide [M]. Texas Instruments, 1991.

- [31] TMS320 Family Development Support Reference Guide[M]. Texas Instruments, 1990.
- [32] 赵为.基于 DSP 芯片的多功能光伏并网供电系统[D].合肥:合肥工业大学, 1999.6.
- [33] 周至敏,周纪海,纪爱华.逆变电源实用技术[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [34] 常海,李广东.IR2110 在 IGBT 交流调压控制电路中的应用[J].电子元器件应用,2008,10(2):28-32.
- [35] Designing high-performance flyback converters with the HV9110 and HV9120[M]. Supertex inc.,2001.
- [36] 马伟明.电力电子系统中的电磁兼容[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [37] IEEE Std.929-2000.IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic(PV) systems[S],2000.
- [38] John Stevens, Russell Bonn, Jerry Ginn, Sigifredo Gonzalez. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems[R]. Photovoltaic system applications department. Sandia National Laboratories. 2000.
- [39] Ropp M. E., Begovic M., Rohatgi A.. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1999, 14(3): 810-816.
- [40] Zhihong Ye, Kolwalker A, Yu Zhang. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004,19(5): 1171-1176.
- [41] Balaguer I.J.,Heung-Geun Kim,Peng F.Z.,et al.Survey of photovoltaic power systems islanding detection methods[C]. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008: 2247-2252.
- [42] 曲正伟,殷桂梁.逆变电源并网运行的孤岛检测方法综述[C].中国电工技术学会电力电子学会 2004 年第九届学术年会,2004:338-345.
- [43] Mahat P., Zhe Chen, Bak-Jensen B.. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]. Third International Conference on Electric

- Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies,2008: 2743-2748.
- [44] Kitamura A, Okamoto M, Yamamoto F, et al. Islanding phenomenon elimination study at Rokko test center [J]. IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994, (1): 759-762.
- [45] Kobayashi H., Takigawa K., Hashimoto E., et al. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems[C]. Conference Record of the Twenty Second IEEE on Photovoltaic Specialists,1991,1:695-700.
- [46] Woyte A., Belmans R., Njis J.. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2003, 18(1):157-162.
- [47] Ropp M. E., Begovic M., Rohatgi A.,et al. Determining the relative effectiveness of islanding prevention techniques using phase criteria and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 290-296.
- [48] Guo-Kiang Hung, Chih-Chang, Chern-Lin Chen. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 169-173.
- [49] Ropp M.E., Aaker K., et al. Using Power line carrier communications to prevent islanding of PV power systems[C]. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE on Photovoltaic Specialists,2000:1675-1678.
- [50] GA. Smith, P.A.Onion, D.G.Infield. Predictiong islanding operation of grid connected PV-inverters[J]. Electric Power Applications, IEE Proceeding, 2000, 147(1): 1-6.
- [51] 屈滋培.可靠性工程[M].北京:原子能出版社[M],2000.
- [52] 张训诰,肖德辉.可靠性及其应用[M].北京:兵器工业出版社,1991.
- [53] 于迎.提高电子元器件使用可靠性的方法[J].环境技术,2008,(4):19-22.
- [54] 黄锡滋.软件可靠性、安全性及质量保证[M].北京:电子工业出版社,2002.

- [55] 卢昆祥.电子产品可靠性管理[M].天津:天津科学技术出版社,1987.
- [56] 陈闵江.光伏发电系统的蒙特卡罗序贯仿真和可靠性分析[D].合肥:合肥工业大学,2004.3.
- [57] 曹仁贤.光伏系统的可靠性分析[J].太阳能,2001, (1): 30-31.

致 谢

首先我要由衷地感谢我的导师张庆范教授，本论文是在他的精心指导和亲切关怀下完成的。在硕士研究生阶段里，张老师一直在学习、科研、生活各个方面都给予我极大的关怀。在论文的选题、研究方向和研究方案的确立以及撰写的过程中，始终凝聚着张庆范教授的悉心指导和亲切教诲。在此，谨向导师张庆范教授表示衷心的感谢和崇高的敬意！

在课题准备和研究过程中，得到了师兄孔维涛、刘畅以及一起工作学习的同学们：高卓、刘祖全、李彦等的帮助，对你们给予的无私帮助表示深深的谢意。和你们分享的不仅仅是学习的进步，同时还有生活中的快乐。

最后，特别感谢我的家人，在这三年的时间里他们在生活中始终给予了我无微不至的关心、鼓励我专心完成学业。他们一直是我精神上不竭的动力。

感谢所有帮助过我的老师们、同学们和朋友们！

尹 静

2009.4

攻读硕士期间发表的学术论文

一、论文

- 1.尹静,张庆范。风光柴互补发电系统控制策略的研究。变频器世界, 2008.6:
P41-43.
- 2.尹静,张庆范。浅析风光互补发电系统。变频器世界, 2008.8: P43-45.

二、项目

- 1.光伏并网逆变器的研究与设计。济南精久科技有限公司。2007.7-2008.3

作者: [尹静](#)
学位授予单位: [山东大学](#)

相似文献(10条)

1. 学位论文 [张艳红](#) [3×20KW光伏并网发电系统的设计](#) 2008

随着光伏并网发电系统应用的日益广泛,人们对光伏并网发电系统供电要求不断提高,研究热点开始向数字控制技术发展。基于对光伏并网发电系统的理论依据的分析,这份学术论文是关于3×20KW光伏并网发电系统的设计,对系统布局、并网逆变器、三环控制结构以及基于DSP的控制进行了详细的设计。

此并网逆变器系统采用三个单相的全桥逆变器进行组合,开关元件选用IPM智能功率模块。硬件电路的设计包括元器件的选取,基于TMS320F240对光伏逆变器进行电流、电压、最大功率点控制。设计中提出了一种基于扰动观测法的MPPT控制策略,孤岛效应的检测采用主动加被动的双重控制方案。

通过对实验以及运行结果的分析,验证了以上所述设计方案的合理性与实用性。

2. 期刊论文 [董密](#)、[罗安](#)、[DONG Mi](#)、[LUO An](#) [光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法](#) - [电力系统自动化](#)

2006, 30(20)

针对光伏并网发电系统中关键部件—逆变器的结构设计与控制方法研究进行了详细分析和阐述。从电网、光伏阵列以及用户对逆变器的要求出发,分析了各种不同的逆变器拓扑结构与控制方法,比较其运行效率和控制效果。对于目前国内外光伏发电系统中并网逆变器的研究现状、亟待解决的问题进行了阐述,指出光伏发电系统中并网逆变器高效可靠运行的发展方向。

3. 会议论文 [徐政](#) [多重实验功能光伏并网发电系统的建设与运行](#) 2007

本文介绍一个具有多重实验功能的光伏并网发电系统。系统最多可分为6个子系统,适合于各种对比实验:太阳能电池阵列的电压和功率可以灵活组合,满足不同规格并网逆变器产品开发的需求;配备全自动高频检测系统,进行长期运行数据的采集与积累;采用3种不同类型的太阳能电池组件,比较其在南方湿地区的特性,为大规模系统电池组件的选型提供实验依据。

4. 学位论文 [许颜](#) [基于Z源型逆变器的光伏并网发电系统的研究](#) 2006

为了可再生能源的利用和社会的持续发展,在世界范围内,光伏并网发电技术正在蓬勃发展。并网逆变器为整个光伏并网发电系统的核心部件,为提高光伏并网系统的灵活性、可靠性和并网电能的质量,系统的并网逆变器单元可以采用一种全新的Z源型逆变器电路结构。本文在对Z源型逆变器深入分析的基础上,对整个光伏并网发电系统进行研究。其中主要研究内容有:

1. 对Z源型逆变器的拓扑及工作原理进行深入分析。根据其逆变母线侧输出特性的不同分为电压模式Z源型逆变器(VMZSI)和电流模式Z源型逆变器(CMZSI),分别分析两者的工作原理及波形特性,并运用拓扑分析中的对偶原理推导出两种工作模式具有对偶特性的结论。最后,通过与常规型逆变器的比较,得出它们之间的联系与区别,并对Z源型逆变器的优、缺点进行总结。

2. 对电压模式Z源型并网逆变器进行状态空间平均法进行建模分析。将功率变换开关电路的非线性时变方程逐步转化为线性时不变方程,并由此进行传递函数推导。

3. 重点分析了VMZSI应用于光伏并网发电系统的控制策略。通过电路结构和控制目标将变换器控制系统分为三个闭环结构:并网交流电流环、Z源电容电压环、光伏阵列输入电压环。在对各个闭环控制原理分析的基础上,采用经典控制理论中图解根轨迹法对调节器参数进行设计,并以系统的动、稳态特性进行验证,得出满足系统设计要求的调节器。

4. 对VMZSI系统的主电路参数进行设计。以满足快速电流跟踪和抑制电流谐波的原则设计交流电感;以抑制直流电压中二次电压波动量的原则设计Z源电容;以满足非谐振最小值和抑制纹波的原则设计Z源电感,以抑制电压纹波的条件设计光伏阵列滤波电容。

5. 对应用于光伏并网发电系统的最大功率跟踪(MPPT)方法和反孤岛保护进行分析和概述。MPPT方法主要介绍了扰动观测法和电导增量法,实现了功率寻优要求。反孤岛保护主要介绍了Sandia频移法的原理和工作过程,实现了可靠保护与稳定工作相结合。

6. 为了验证分析地正确性,以功率为3Kw的VMZSI光伏并网系统进行实验,实验结果与仿真吻合,说明了系统设计的合理性。

5. 会议论文 [王岩](#)、[李鹏](#)、[王洪磊](#) [单级式光伏并网发电系统逆变器控制方法的研究](#) 2007

随着全世界对能源、环保问题的重视,光伏并网发电系统成为光伏系统发展的趋势。目前光伏并网系统中的逆变器多采用工作在SPWM状态下的全桥式逆变方案,由于需要SPWM脉冲发生器、同步锁相等诸多环节,所以存在控制比较复杂,可靠性不高,硬件成本高等缺点。由于电流跟踪滞环控制具有控制简单,采用模拟器件容易实现等特点,因此,采用电流跟踪滞环控制并结合逆变器的消谐PWM控制实现了光伏系统的高功率因数的并网运行。仿真结果表明,该方案具有控制简单,输出功率因数高,工作可靠等优点,具有推广价值。

6. 学位论文 [陈雷](#) [光伏并网发电系统的实现](#) 2008

本文详细介绍了光伏并网发电系统的基本原理,并完成了并网发电系统中的关键环节——单相正弦波逆变器的硬件设计,编写了基于DSP2407A的SPWM调制程序,在MATLAB7.4环境下进行了光伏电池的特性与并网中孤岛效应的仿真研究。单相正弦波逆变器主回路前级采用推挽升压,MOSFET作为开关元件,具有驱动功率小、开关速率高的特点。SG3525A作为MOSFET的驱动IC。后级采用工频逆变,同样采用MOSFET作为开关元件,用单极性SPWM调制的U3990F5正弦IC作为驱动芯片。光伏电池的最大功率MPPT控制由DSP2407A编程实现。采用DSP2407A作为光伏并网控制器的主控IC,具有低成本、低功耗、高性能的特点,并且内存容量大,可以满足系统容量大的要求,同时大大简化了外围元件。

7. 期刊论文 [方廷](#)、[韩郁](#)、[张岚](#)、[FANG Ting](#)、[HAN Yu](#)、[ZHANG Lan](#) [一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法](#) - [电网与清洁能源](#)2009, 25(7)

对光伏发电系统中的光伏阵列-逆变器对进行轮番分组控制,在逆变器输入功率小于设定的下限阈值时,部分光伏阵列并联后连接到一台逆变器输出;在并网开关分闸过程中,一直保持光伏阵列以最大功率不间断输出;并且该方法对光照突变情况进行自适应判断,作为控制的预启动条件。此方法的优点是:能够同时提高逆变器和光伏阵列的转换效率,改善电能质量,降低并网开关和逆变器的动作次数,延长设备使用寿命,并且控制过程系统输出功率平稳。

8. 学位论文 [李春玲](#) [基于光伏并网发电系统的孤岛检测](#) 2008

光伏发电不仅是当今能源的一个重要补充,更具备成为未来主要能源的潜力,而光伏并网发电模式也越来越体现出它的价值。但是,并网运行模式所带来的孤岛现象对负载、逆变电源和人生安全构成了危险。所以,光伏并网逆变器都应具有检测出孤岛状态的功能。

随着光伏技术的推广应用,具有无功补偿功能的光伏并网系统对于减轻电网负担和改善供电质量具有重要意义。因此具有无功补偿功能的单级三相光伏并网逆变器受到越来越多的关注。

本文基于这种并网系统,提出了一种将逆变器的有功与无功分开独立控制,而将最大功率跟踪与有功扰动综合控制的孤岛检测方案。这种方法的提出,充分利用了孤岛检测逆变器内部有源与无源检测方法的优点,在确保准确进行孤岛检测的同时,大大降低由于扰动的加入给正常供电的电能质量带来的影响。

9. 会议论文 [张超](#)、[何湘宁](#) [无差拍控制在光伏并网发电系统中的应用](#) 2007

光伏发电系统输出功率的大小和质量易受外部环境的影响,为了使系统能够最大限度的输出高质量的电能,就需要一种快速的电流控制方法控制逆变器工作。本文在分析了无差拍电流控制方法工作原理的基础上,给出参考电流的获取及占空比的计算过程,并将无差拍电流控制应用到两级式单相光伏并网

发电系统逆变器的控制中. 实验结果表明:该方法具有良好的稳态特性和动态特性。

10. 学位论文 [张超 光伏并网发电系统MPPT及孤岛检测新技术的研究](#) 2006

随着经济全球化进程的加速和工业经济的迅猛发展,世界范围内的能源短缺和环境污染已成为制约人类社会可持续发展的两大重要因素。光伏发电因发电过程中无污染、无噪音、维护简单、无需生产原料等优点而逐步显示出其无比广阔的发展空间和应用前景。因此,大力发展光伏发电技术和产业已成为当务之急。

本文以光伏并网发电系统为研究对象,对光伏并网发电系统中的最大功率点跟踪控制、孤岛效应的检测、交流光伏模块系统新型拓扑等问题进行了深入研究。在此研究的基础上,分别提出了非对称模糊最大功率点跟踪控制和双模式最大功率点跟踪控制两种新的最大功率点跟踪控制方法、周期性扰动正反馈有源频率漂移孤岛检测方法和一种用于交流光伏模块系统的新型拓扑:BBHF逆变器。

针对光伏发电系统中光伏器件的输出功率易受外部环境影响而降低了光伏发电系统效率的问题,本文提出了两种新的最大功率点跟踪控制方法:非对称模糊最大功率点跟踪控制和双模式最大功率点跟踪控制。这两种方法均能使光伏发电系统输出功率快速跟踪外部环境的变化,同时可有效消除或减弱光伏器件在最大功率点附近的功率振荡现象,从而提高了光伏器件的利用率。上述两种方法均通过实验得到了验证。

光伏发电系统并网工作时,电网停电造成的孤岛效应会导致用电设备损坏和人身伤亡事故,因此必须及时检测出孤岛效应的发生并切断系统与电网的连接。针对孤岛效应检测中,有源频率漂移法检测盲区较大的缺陷,本文提出了周期扰动正反馈有源频率偏移法。通过仿真及实验验证,该方法在电网出现故障时,检测速度更快,具有更小的检测盲区,能够迅速切断电网与光伏发电系统的连接,从而避免孤岛效应造成的设备和人员损伤。

为了验证以上所提方法的有效性和优越性,本文基于DSP设计了一套单相两级式光伏并网发电系统。该电路由最大功率点跟踪电路、逆变器、滤波电路、保护和控制电路构成。其具有独立运行和并网运行两种工作模式,可以根据用户的需要进行切换。实验结果表明:该电路运行可靠,保护功能完善,并在实验过程中为后续的研究工作积累了大量的实验数据和经验。最后,针对交流无损耗逆变器和反激式交流光伏模块系统存在系统运行过程中光伏器件最大功率点易受电路运行干扰的缺点,本文提出了_种用于交流光伏模块系统的新型逆变器拓扑结构:BBHF逆变器。实验表明:该电路不仅实现了最大功率点控制电路与后级逆变器的解耦,确保了光伏器件稳定工作在最大功率点,且电路中部分功率器件工作频率为工频,能够减少开关损耗,部分提高系统效率。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1561833.aspx

下载时间: 2010年5月22日