

光伏发电系统的 MPPT 控制技术

摘 要

在绿色再生能源得到广泛应用的今天,太阳能因为其独特的优势而得到青睐。

但因为光伏电池的输出特性受外界环境因素影响大,而且,光伏电池的光电转换效率低且价格昂贵,光伏发电系统的初期投入较大,为有效利用太阳能,需要对光伏发电系统加以有效的控制。本文着重对光伏阵列的最大功率点跟踪控制技术进行了详细的理论分析,建立了 MATLAB 仿真模型,提出了相应的控制策略,并进行了实验验证。

首先,本文对光伏发电系统的组成进行了分析,光伏发电系统主要包括光伏阵列、电力电子变换器、储能系统和负载等。根据光伏发电系统和电网的关系,还可以把它分为独立发电系统和并网发电系统。然后,本文对光伏电池的电气特性进行了分析,并建立了光伏电池的仿真模型。同时,本文对常用的最大功率点跟踪(MPPT)方法:恒定电压法(CVT)、导纳增量法(Incremental Conductance)、扰动观测法(P&O)进行了仔细的分析,并提出了几种改进的方法:开路电压法(Open Circuit)、最优梯度法、三点重心比较法。这些方法各有千秋,在不同的应用场合各有所长。再者,对于不同形式的光伏发电系统,在最大功率点跟踪实现上采用了不同的控制策略。本文仔细分析了单级式系统和双级式系统的特点,对于不同形式的光伏发电系统分别提出了不同的最大功率点跟踪实现策略,并分别进行了仿真分析,仿真结果表明不同的控制策略都是可行的。

最后，根据双级式系统的方案设计了一套硬件系统，从实践上验证了控制方案的可行性，实验结果表明，所设计的系统能够较好的完成最大功率点跟踪。

关键词：太阳能、光伏发电系统、逆变器、单级式光伏发电系统、双级式光伏发电系统、最大功率点跟踪。

Abstract

With the green and renewable energy be widely used, solar energy is accepted commonly because of its unusual advantages. But the output of photovoltaic(PV) array is influenced by the environmental factors, and PV array have relatively low conversion efficiency and is expensive. In order to reduce the overall system cost and extract the maximum possible solar energy, we should control the PV system effectively. This paper focuses on MPPT control techniques of PV array, analyses the theory particularly, establishes simulation model with MATLAB software, presents control strategies relevantly, and validated by experimental results.

Firstly, this paper analyses the composing of the PV system. It is composed by PV array、power electronics converters、power storage system and loads. We can divide the PV system into two types: stand-alone PV system and grid-connected PV system by the relationship with the grid.

Secondly, this paper analyses the electrical characteristics of PV cell and establishes simulation model, and also analyses commonly used MPPT methods, such as CVT method、Incremental Conductance method、P&O method. And then presents three improved methods: Open Circuit method、Optimal Gradient

method、Three-Point Weight Comparison method. These methods each has his strong point and can be used in different field.

Thirdly, for different PV system, we can use different control strategies. This paper analyses the characteristics of single-stage system and double-stage system, and then presents different MPPT control strategies. Simulation results show that both strategies are feasible.

Finally, a hardware system is designed with double-stage to validate the feasibility of the control strategies. Experimental results show that the system can tract the maximum power point.

1.1 人类所面临的能源问题

1.1.1 全球能源问题

能源是人类社会生存和发展的动力源泉。从原始社会的钻木取火到近现代的化石能源以及核能、地热能、潮汐能、风能、太阳能等各种新能源的应用无不闪现着人类的智慧之光。

然而，随着人类文明的发展日益迅速，人类对能源的需求也日益增加，传统的化石能源正日趋枯竭，能源危机已展现在人类面前。在 21 世纪初进行的关于世界能源储量数据的调查显示：石油可开采量为 39.9 年，天然气可采量为 61 年，煤炭可采量为 227 年，可见，化石能源的可开采量已经是屈指可数了^[1]。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”，而不应该在我们这代人手中仅仅把它们作为燃料而消耗殆尽^[2]。

1.1.2 中国的能源问题

中国的能源资源储量情况更是危机逼人。按 2000 年底的统计，探明经济可开发能源总储量约占世界总量的 10.1%。中国能源剩余可开采总储量的结构为：原煤占 58.8%，原油占 3.4%，天然气占 1.3%，水资源占 36.5%。我国能源经济可开发剩余可采储量的资源保证程度仅为 129.7 年^[3]。同时，由于中国人口众多、人均能源资源严重不足，人均能源资源探明储量只有 135 吨标准煤，仅相当于世界人均拥有量（264 吨标准煤）的 51%。其中煤炭人均探明储量为 147 吨，为世界人均值（208 吨）的 70%；石油人均探明储量 2.9 吨，为世界人均值的 11%；天然气人均探明储量为世界人均值的 4%；即使是水资源，按人口平均，也低于世界人均值^[4]。

另外，由于近年来中国经济发展迅速，国内对能源的需求飞速增长。从 1993 年起，中国已成为石油净进口国；从 1996 年起，中国已成为原油净进口国，到 2000 年，原油进口量已达 6960 万吨，而且，这种趋势仍在逐年增大。预计到 2010 年，中国的石油进口依存度（净进口量占消费量的比重）将达到 30%，2020 年将进一步上升到 40%。预计到 2010 年和 2020 年，中国的天然气进口依存度将分别达到 15% 和 25%。因此，能源供应安全问题已成为国家安全的关键因素之一。

1.1.3 应用化石能源带来的环境问题

化石能源的大量开发利用是造成地球环境污染和生态破坏的主要原因之一。如

何在开发和利用能源的同时,保护好人类赖以生存的地球环境和生态,已经成为一个全球性的重要问题。

目前由于大量使用化石能源,全世界每天产生大约 1 亿吨温室效应气体,这导致全球气候变暖,两极冰川融化。观测资料表明,过去 100 年中,全球平均气温上升了 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$,全球海平面平均上升了 $10\sim 25\text{cm}$,如果不加以控制,温室效应将融化两极冰川,海平面将上升几米,人类的生活空间将受到极大威胁。另外,燃烧也会产生大量有害气体,这对人身健康造成威胁,还会造成酸雨问题。

针对以上情况,开发利用可再生能源和各种绿色能源以实现可持续发展是人类必须采取的措施。从能源供应的诸多因素考虑,太阳能无疑是符合可持续发展战略的理想绿色能源。全球能源专家们认定,太阳能将成为 21 世纪最重要的能源之一^[5]。

1.2 光伏发电的特点和优势

1.2.1 光伏发电的优点

跟传统的化石能源相比,光伏发电具有以下优点:

(1)无污染,安全,无噪声,即无任何物质及声、光、电、磁、机械噪音等“排放”。同时太阳能可再生且无限,可直接输出高品味电能,具有理想的可持续发展属性。

(2)资源普遍,太阳能无处不有,应用范围广,基本不受地域限制,只是地区之间有丰富与欠丰富之别。

(3)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;而且易安装,易运输,建设周期短。

(4)分布式电力系统:能提高整个能源系统的安全性和可靠性,特别是从抵御自然灾害和战备的角度看,它更具有明显的意义;

(5)光伏建筑集成(BIPV—Building Integrated Photovoltaic):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。

(6)由于光伏电池的主要原料——硅的储量十分丰富,随着光伏电池研究的快速进程和转换效率的不断提高以及与之相关的技术的进展,发电成本已经呈快速下降趋势。

1.2.2 光伏发电存在的问题

光伏发电目前主要存在四大问题^[6~9]：

(1) 光伏阵列发电效率低：

光伏发电的最基本元件是光伏电池，目前光电转化效率最高的单晶硅电池的效率为 20% 左右^[3]，同时由于对光电转化控制不当，真正太阳能的利用率只有 50%~70%。

(2) 系统造价成本高：

由于光伏发电效率低，要发出足够的电则需要许多光伏电池板。2003 年单、双晶硅光伏电池组件的价格为 36~40 元/W_p，光伏发电系统价格约为 60~80/W_p，相比于目前的火力和水力发电，光伏发电的成本约为后两者的 6~20 倍。成本高是当前制约光伏发电市场快速发展的主要原因。

(3) 发电运行受气候环境因素影响大：

光伏发电源直接来源于太阳照射，而地球表面上的太阳照射受气候的影响时有时无。另外，由于环境污染的影响，特别是空气中的颗粒物灰尘降落在光伏电池板上，从而阻挡了阳光的照射，减少了光线的射入量，进而减少了光电的转换。

(4) 制造单晶硅和多晶硅光伏电池需要消耗相当多的能源：

硅是地球上各种元素中含量仅次于氧的元素，主要存在形式是沙子（二氧化硅）。从沙子变成多晶硅和单晶硅要经过多道化学和物理工序，其间，要消耗相当多的能量，这也是它们生产成本高的原因。

1.3 光伏发电的广阔前景

1.3.1 光伏发电具有广阔的应用前景

由于太阳能光伏发电的诸多优点，其研究开发、产业化制造技术及市场开拓已经成为当今世界各国，特别是发达国家激烈竞争的主要热点。

世界实力大国都制定了雄心勃勃的光伏发电近期规划：到 2010 年日本计划累计装机容量将达到 5GW，德国为 2.7GW，欧盟为 3GW，美国为 4.7GW，澳大利亚为 0.75GW，印度、中国等发展中国家估计为 1.5~2GW。统计表明到 2010 年，世界光伏系统累计装机容量预计将达到 14~15GW^[10]。

据权威机构预测，2020 年光伏发电在世界电力生产中所占比例将达 1%，2050 年约占 25%。由此可见，光伏发电具有广阔的市场和发展前景。

1.3.2 国外光伏发电的发展和现状

世界光伏产业发展迅速,在 1997~2001 年中的平均年增长率达 35.5%。2002 年光伏电池及组件的产量达到 559.3MW_p,比 2001 年增长 39.3%,光伏发电的累计装机容量达到 2200MW_p。在产业化方面,光伏企业的生产规模从 1~5MW_p/年发展到 5~20MW_p/年,并在向 50MW_p/年的规模扩展。2000 年以来,世界光伏组件的生产成本降低 1/3 左右,为 2.5~3 美元/W_p。美国光伏发电系统的电价成本目标是:2005 年光伏系统安装成本为 3 美元/W_p,电价成本为 11 美分/(kWh);预计到 2010 年安装成本将下降为 1.5 美元/W_p,电价成本为 6 美分/(kWh) 以下。

自上个世纪 90 年代以来,国外发达国家掀起了发展“屋顶光伏发电系统”的研发高潮,屋顶光伏发电系统不单独占地,将太阳能电池安装在现成的屋顶上,非常适应太阳能能量密度较低的特点,而且其灵活性和经济性都大大优于大型光伏并网发电,有利于普及,有利于战备和能源安全,所以受到各国的重视。

技术方面,经过几十年的发展,澳大利亚新南威尔士大学研制的单晶硅光伏电池的效率已达 23.7%,多晶硅电池效率突破 19.8%。同时,研究人员正在探索用切薄硅片、扩大平面晶体或者使用聚光等方法,力争把硅片的成本降低到 0.8 美元/W_p。除了光伏电池以外,当前国际上最新的研发热点主要集中在低成本、高效率、高稳定性的光伏逆变器和光伏建筑集成应用系统等方面,专用逆变设备和相关系统的最佳配置涉及到多项技术。美国、德国、荷兰、日本、澳大利亚等国家在光伏屋顶计划的激励下,许多企业和研究机构成功的推出了多种不同的高性能逆变器。

1.3.3 我国迫切需要发展光伏发电技术

我国正处在经济转轨和蓬勃发展时期,但能源问题严峻,城市中由于大量使用化石能源,环境持续恶化。2000 年世界卫生组织(WHO)公布的世界上污染最严重的十个大城市中,中国占了八个,其中北京居于第七位。大力发展光伏发电将有助于尽早解决这一问题。

产业化方面,2000 年以后,我国光伏产业进入快速发展期,但整体发展水平仍然落后于国际先进水平,参与国际竞争有一定的难度。2003 年国内光伏电池的生产能力约 20MW,但光伏组件的封装能力约 50MW,远大于光伏电池的生产能力。虽然到 2002 年底,我国已有近 20MW 的光伏电池生产能力,但实际生产量仅为 4MW 左右,占世界光伏电池实际生产量的 1%左右。

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,但与发达国家相比仍有差距。光伏电池转换效率不断提高,目前单

晶硅电池实验室效率达 20%，批量生产效率为 14%，多晶硅实验室效率为 12%。另外，到目前为止，我国光伏并网发电的关键技术及设备仍主要来自进口，但面对如此巨大的国内需要，脚踏实地的发展具有自我知识产权的相关高技术，进而实现其产业化，已是刻不容缓的事。

1.4 本课题的目的

本课题来源于台达电力电子科教发展基金重点资助项目。因光伏电池的输出特性受外界环境因素影响大，另外，光伏电池的效率低且价格昂贵，光伏发电系统的初期投入较大，为有效利用太阳能，需要对光伏发电系统加以有效的控制。因此，本文着重对光伏阵列的最大功率点跟踪控制技术进行了详细的理论分析，建立了仿真模型，提出了相应的控制策略，并进行了实验验证。

2 光伏发电系统的组成

2.1 光伏发电系统的构成

典型的光伏发电系统主要是由光伏阵列、电力电子变换器，储能装置、负载等组成^[1]，其构成如图 2-1 所示。

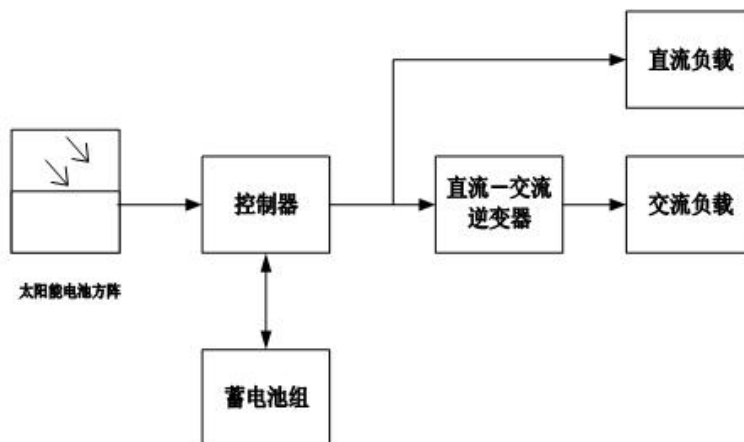


图 2-1 太阳能光伏发电系统的构成

2.2 光伏阵列

2.2.1 光伏阵列的结构

光伏发电系统，是利用以光生伏打效应原理制成的光伏电池将太阳能直接转化为电能。光伏电池单体是用于光电转换的最小单元，一个单体产生的电压大约为 0.45V，工作电流约为 $20 \sim 25 \text{mA}/\text{cm}^2$ ，将光伏电池单体进行串、并联封装后，就成为光伏电池组件。实际光伏发电系统可根据需要，将若干光伏电池组件经过串、并联，排列组成光伏阵列，满足光伏系统实际电压和电流的需要。光伏电池组件串联，要求所串联组件具有相同的电流容量，串联后的阵列输出电压为各光伏组件输出电压之和，相同电流容量光伏电池串联后其阵列输出电流不变；光伏电池组件并联，要求所并联的所有光伏电池组件具有相同的输出电压等级，并联后的阵列输出的电流为各个光伏电池输出电流之和，而电压保持不变。

2.2.2 光伏阵列的保护

在一定条件下，一串联支路中被遮蔽的光伏电池组件，将被当作负载消耗其他有光照的光伏电池组件所产生的能量。被遮蔽的光伏电池组件此时将会发热，这就是热斑效应。这种效应能严重破坏光伏电池，有光照的光伏电池所产生的部分或者全部能量，都可能被遮蔽的电池所消耗。为了防止光伏电池由于热斑效应而遭受破坏，需要在光伏电池组件的正、负极两端并联一个旁路二极管，实现电流的旁路，保护光伏阵列。

为了避免由于光伏电池方阵在阴雨天和夜晚不发电时或者出现短路故障时，蓄电池组通过光伏电池方阵放电，这就需要在方阵中加入防反充二极管，又称为阻塞二极管。阻塞二极管串联在方阵的电路中，起单向导通的作用，它必须能承受足够大的电流，而且正向压降要小，反向饱和电流要小。一般选用合适的整流二极管作为阻塞二极管。

除了电方面的保护，还要考虑机械方面的保护，如防风、防雨、防雷能力，另外，为了防止鸟粪沾污光伏电池表面引起热斑效应，还需要在方阵顶上特别安装驱鸟器。

光伏阵列的电气连接图如图 2-2 所示：

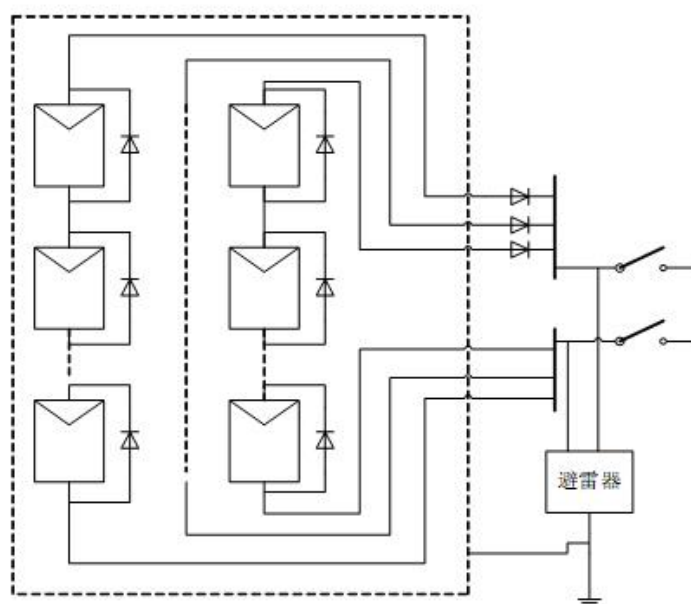


图 2-2 光伏阵列电气连接图

2.3 电力电子变换器

变换器是光伏发电系统的关键部件，变换器分直流变换器和交流变换器两种。光伏发电系统中的变换器一般要具备几种功能：最大功率点跟踪、蓄电池的充电、直流电的升压或者降压以及逆变。

最大功率点跟踪控制器。通过调节负载功率，改变光伏电池板的输出电压和电流，使光伏电池板输出功率最大化。

蓄电池充电控制器。通过调节控制器的输出电压和电流，实现对蓄电池不同策略的充电控制，有利于有效的利用太阳能以及对蓄电池的保护。

升降压变换器。因为光伏阵列实际的工作电压跟负载或者后端逆变器所需电压不匹配，所以需要调节光伏阵列的输出电压进行调节，或升或降，以满足负荷的使用要求。

逆变器。因为光伏电池发出来的电是直流电，如果光伏发电系统是并交流电网运行或者给交流负载供电，那么就需要逆变器进行直流/交流的变换。

2.4 储能装置^[12~13]

在独立运行的光伏发电系统中，储能装置是必不可少的。因为光伏电池的输出功率随光照强度在变化，当夜间或阴雨天时，光伏电池的输出功率为零或很小，不能满足负载的要求；而当白天阳光充足的时候，光伏电池发出的电相对于负载可能有多余的。因此，需要一个储能装置，既可以作为太阳能不足时候的补充，又可以作为多余太阳能的存储。

现在可选的储能方法有很多，如电容器储能、飞轮储能、超导储能等等，但从方便，可靠，价格等综合因素考虑，多数大中型的光伏发电系统都采用免维护式铅酸蓄电池作为储能元件。但选用铅酸蓄电池也有不足之处，铅酸蓄电池比较昂贵，初期投资能够占到整个发电系统的 1/4~1/2，而蓄电池又是整个系统中较薄弱的环节，因此如果管理不当，会使蓄电池提前失效，增加整个系统的运营成本。关于光伏发电系统中蓄电池的管理问题，已经有较多的文献作出了专门的阐述，本文在此就不作赘述。

2.5 光伏发电系统的类型

光伏发电系统按照与电网关系的分类，通常可以分为独立光伏发电系统（Stand-alone PV System）和并网光伏发电系统（Grid-connected PV System）。

2.5.1 独立光伏发电系统

独立光伏发电系统是指与常规的电力系统不发生任何连接独立运行的发电系统，通常建设在远离电网的偏远山区或者作为野外移动式便携电源。它由光伏阵列、控制器、蓄电池组和负载组成，系统配置框图如图 2-3 所示：

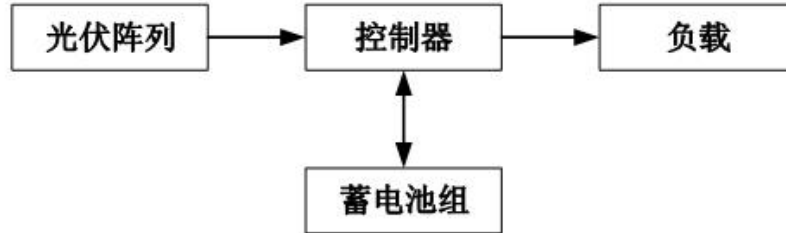


图 2-3 独立光伏发电系统的配置框图

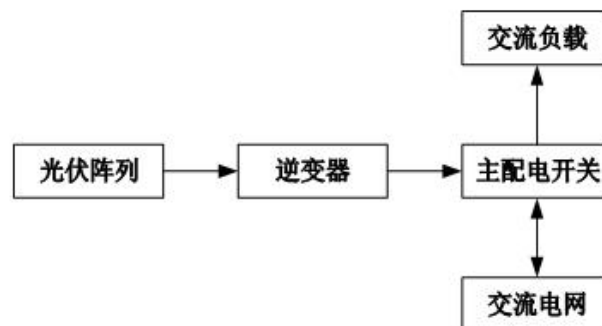
系统的工作原理是：光伏阵列接收太阳能并将其转化为电能，发出的电能通过控制器可以给蓄电池充电，也可以给负载供电，如果负载中有交流负载，那么控制器中应包含直流—交流逆变器。同时，为了发挥光伏电池的最大效用，控制器中还应包含最大功率点跟踪（MPPT）功能。

2.5.2 并网光伏发电系统

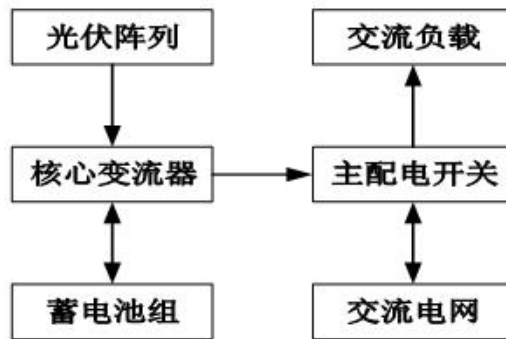
并网光伏发电系统是与电力系统连接在一起的发电系统。光伏发电发展的主流趋势是并网发电。

2.5.2.1 并网光伏发电系统的分类

目前常用的并网光伏发电系统可以按照系统功能分为两类，一种为不含蓄电池环节的“不可调度式并网光伏发电系统”；另一种为含有蓄电池组的“可调度式并网光伏发电系统”。二者相应的系统配置如图 2-4 所示。



(a) 不可调度式并网光伏发电系统



(b) 可调度式并网光伏发电系统

图 2-4 不同功能的并网光伏发电系统相应的配置框图

不可调度式并网光伏发电系统中，并网逆变器将光伏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。白天，当光伏系统产生的交流电能超过本地负载所需时，超过部分馈送给电网；其它时间，特别是夜间，当本地负载大于光伏系统产生的交流电能时，电网自动向负载提供补充电能。

可调度式并网光伏发电系统和前者相比，最大的不同处是系统中配有储能环节(目前通常采用蓄电池组)，蓄电池组的容量大小按具体需要配置。可调度式光伏并网发电系统在功能和性能方面较之不可调度式有若干扩展和提高，主要表现在：

(1) 核心变流器一般由并网逆变器和蓄电池充电器两部分组成。其功能不仅是将太阳能电池阵列产生的直流电能逆变后输向电网，同时还经 DC/DC 变换后向蓄电池充电；

(2) 可调度系统不仅能向电网馈送同频同相的正弦波电能，而且还可作为电网终端的有源功率调节器用于补偿电网终端缺乏的无功分量以稳定电网电压，同时亦可抵消有害的高次谐波分量，对提高电能质量极有裨益；

(3) 大功率可调度式并网光伏发电装置可以根据运行需要自由确定并网电流的大小，这有益于电网调峰。电网负荷增加时，可以调度增加并网光伏发电装置的上网电流，有助于电网的运行质量。

2.5.2.2 并网逆变器^[14~15]

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、电流源电压控制和电流源电流控制四种方法。以电流源为输入的逆变器，其直流侧需要串联一大电感提供较稳定的直流电流输入，但由于此一大电感往往会导致系统

动态响应差，因此当前世界范围内大部分并网逆变器均采用以电压源输入为主的方式。

逆变器与市电并联运行的输出控制可分为电压控制和电流控制。市电系统可视为容量无穷大的定值交流电压源，如果光伏并网逆变器的输出采用电压控制，则实际上就是一个电压源与电压源并联运行的系统，这种情况下要保证系统稳定运行，就必须采用锁相控制技术以实现与市电同步，在稳定运行的基础上，可通过调整逆变器输出电压的大小及相移以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、逆变器输出电压值不易精确控制、可能出现环流等问题。如果逆变器的输出采用电流控制，则只需控制逆变器的输出电流以跟踪市电电压，即可达到并联运行的目的。由于其控制方法相对简单，因此使用比较广泛。

综合以上所述原因，光伏并网逆变器一般都采用电压源输入、电流控制的方式。

采用电流控制的并网方式时，输出电流的控制分为以下几种类型^[2]：

(1) 电流瞬时值比较方式

图 2-5 为采用滞环比较器的瞬时值比较方式原理图。图中将指令电流 i_c^* 和实际并网电流 i_c 进行比较，两者的偏差 Δi_c 作为滞环比较器的输入，通过滞环比较器产生控制主电路中开关通断的 PWM 信号，该 PWM 信号经驱动电路控制功率器件的通断，从而控制电流并网电流 i_c 的变化。

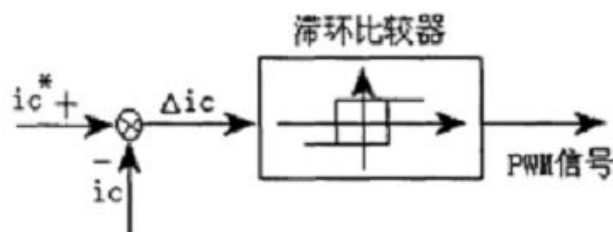


图 2-5 采用滞环比较器的瞬时值比较方式原理图

这种控制方案具有如下特点：

- ① 硬件电路简单易控；
- ② 实时控制，电流响应快；
- ③ 毋需斩波，输出电压中不含特定频率的谐波分量；
- ④ 若滞环的宽度固定，电流跟随的误差范围是固定的，但电力半导体器件的开关频率却是变化的，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。

(2) 定时控制的电流瞬时值比较控制方式

该控制方式原理如图 2-6 所示, 它使用由时钟定时控制的比较器代替滞环比较器。每个时钟周期对 Δi_c 判断一次, 使得 PWM 信号至少一个时钟周期才会变化一次。该方式可以避免器件开关频率过高的情况发生。不足之处在于: 补偿电流的跟随误差是不固定的。

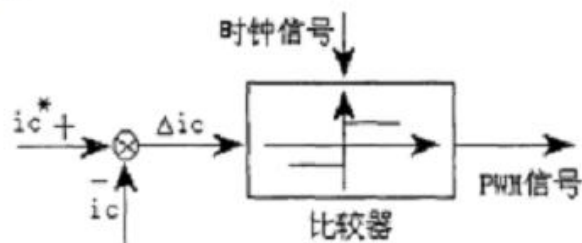


图 2-6 定时控制的电流瞬时值比较方式原理图

(3) 跟踪实时电流的三角波比较方式

该控制方式原理如图 2-7 所示, 它将指令电流 i_c^* 和并网电流 i_c 的实时值进行比较, 两者的偏差 Δi_c 经放大器 A 后与三角波进行比较, 以输出 PWM 信号。放大器 A 多采用比例或比例积分放大器。

这种电流控制方式具有如下特点:

- (1) 跟随误差较大;
- (2) 软硬件相对复杂;
- (3) 输出电压中含有主要与三角载波相同频率的谐波;
- (4) 放大器的增益有限;
- (5) 功率器件的开关频率固定地等于三角载波的频率;
- (6) 电流响应相对于瞬时值比较方式为慢。

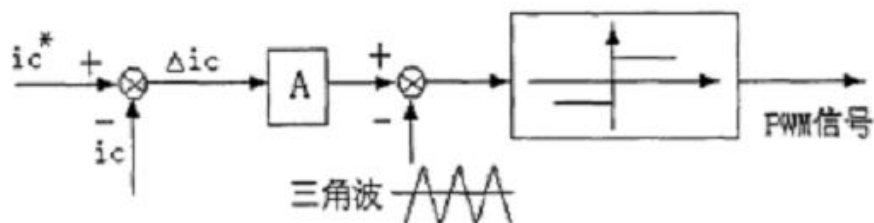


图 2-7 跟踪实时电流的三角波比较方式原理图

瞬时值比较方式和三角波比较方式各有优缺点, 不能孤立的评价孰优孰劣, 实

际应用中必须根据系统要求按需选择。

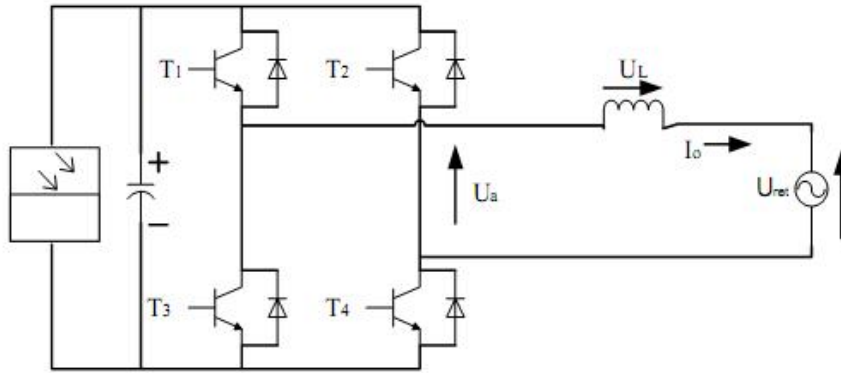
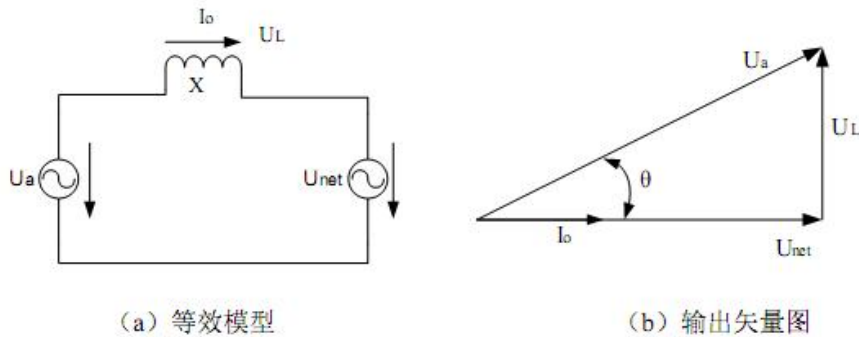


图 2-8 电流控制电压型并网逆变器的基本回路

图 2-8 即是电流控制电压型并网逆变器的基本回路。光伏并网装置白天向电网输送有功功率，其输出并网电流和电网电压同频同相，通过 MPPT 控制策略调节输出电流的大小，以控制输出的有功。同时，光伏并网装置也可以工作在无功补偿的模式。

图 2-9 所示即为并网逆变器的等效模型和输出矢量图，表示了逆变器的输出电压和电流同电网电压的关系（忽略电抗器和线路电阻）。



(a) 等效模型

(b) 输出矢量图

图 2-9 并网逆变器的等效模型和输出矢量图

图 2-8、2-9 中， U_a 表示逆变器输出端电压； U_L 表示并网电抗器上的压降； I_o 表示并网电流； U_{net} 表示电网电压； X 表示并网电抗器的感抗； θ 表示逆变器输出电压和电网电压的相位角。由矢量图可知：

$$\dot{U}_a = \dot{I}_o Xj + \dot{U}_{net} \tag{2-1}$$

以 \dot{U}_{net} 为相位参考, 则有:

$$\dot{U}_{net} = U_{net} + j0 \quad (2-2)$$

$$\dot{U}_a = U_a \cos \theta + U_a \sin \theta j \quad (2-3)$$

由此可得:

$$\dot{I}_o = \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_{net}}{Xj} = \frac{U_a \sin \theta}{X} - \frac{U_a \cos \theta - U_{net}}{X} j \quad (2-4)$$

逆变器向电网提供的复功率为:

$$S = \dot{U}_{net} * \dot{I}_o = \frac{U_a U_{net} \sin \theta}{X} + \frac{U_{net}^2 - U_a U_{net} \cos \theta}{X} j = P + Qj \quad (2-5)$$

即逆变器向电网输送的有功、无功功率分别为

$$P = \frac{U_a U_{net} \sin \theta}{X} \quad (2-5)$$

$$Q = \frac{U_{net}^2 - U_a U_{net} \cos \theta}{X} \quad (2-6)$$

若 $\theta < 5^\circ$ 时, 其有功功率和无功功率可近似表示为:

$$P = \frac{U_a U_{net} \theta}{X} \quad (2-7)$$

$$Q = \frac{U_{net}^2 - U_a U_{net}}{X} \quad (2-8)$$

由此可见调节逆变器电压和电网电压的相角即可改变逆变器输出有功功率的大小, 即通过调节并网电流就可改变有功功率大小。当电网电压滞后于逆变器电压, 即 $\theta > 0$, 此时 $P > 0$, 逆变装置向电网发送有功; 当电网电压超前于逆变器电压, 即 $\theta < 0$, 此时 $P < 0$, 逆变装置从电网吸收有功。同时, 从式 (2-6)、(2-8) 可以看出, 逆变器也发出无功功率, 无功功率的大小取决于电网电压与逆变器电压的幅值差和相角。

3 光伏发电系统的最大功率点跟踪问题研究

所有光伏系统都希望光伏电池阵列在同样日照、温度的条件下输出尽可能多的电能，这也就在理论上和实践上提出了太阳电池阵列的最大功率点跟踪 (MPPT—Maximum Power Point Tracking) 问题。太阳能光伏应用的日益普及、太阳电池的高度非线性和价格仍相对昂贵更加速了人们对这一问题的研究。

3.1 光伏电池的模型和特性

3.1.1 光伏电池的等效模型^[16]

如图 3-1 所示为光伏电池的等效电路。

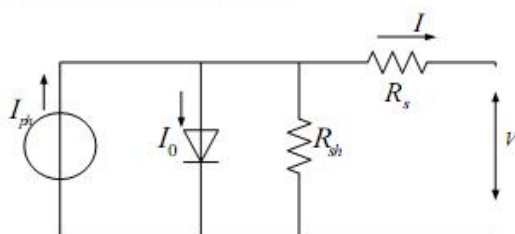


图 3-1 光伏电池等效电路

一个理想的光伏电池，其等效串联电阻 R_s 很小，而等效并联电阻 R_{sh} 很大，一般对单晶硅或者多晶硅光伏电池来说，在一般的工程应用中，它们都可以忽略不计。光伏电池的输出特性方程为：

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s \cdot I)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (3-1)$$

式中， I 为光伏电池输出电流（工作电流）； V 为光伏电池输出电压（工作电压）； I_{ph} 为光生电流； I_0 为反向饱和电流（对于光伏单元而言，其数量级为 $10^{-4}A$ ）； I_d ($I_0 \{ \exp[q(V + R_s \cdot I)/nkT] - 1 \}$) 为二极管结电流； q 为电子的电荷量 ($1.6 \times 10^{-19}C$)； R_s 为光伏电池的串联电阻（小于 1Ω ）； n 为二极管特性因子（当 $T=300K$ 时，约为 2.8）； k 为玻耳兹曼常数 ($1.38e-23 J/K$)； T 为光伏电池温度； R_{sh} 为光伏电池的并联电阻（数量级为 $k \Omega$ ）。

3.1.2 光伏电池的仿真模型^[17, 18]

为了建立光伏电池的工程应用模型，我们通常对表达式 (3-1) 进行简化：

- (1) 因为 R_{sh} 很大, $(V+R_s I)/R_{sh}$ 相对于光生电流很小, 因此忽略该项;
- (2) 忽略 R_s , 短路电流为 I_{ph} 。

因此我们可以依据文献 [17、18] 建立如下图的光伏电池仿真模型, 如图 3-2 所示, 封装模型如图 3-3 所示:

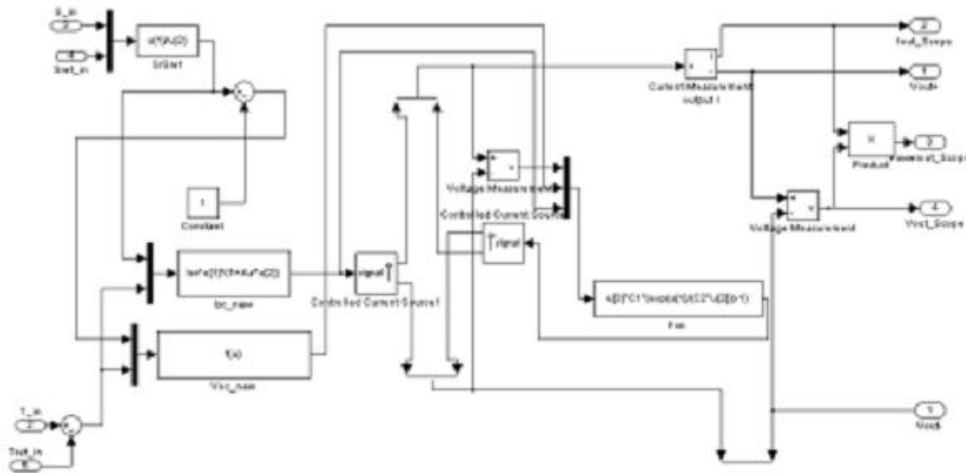


图 3-2 光伏电池的仿真模型

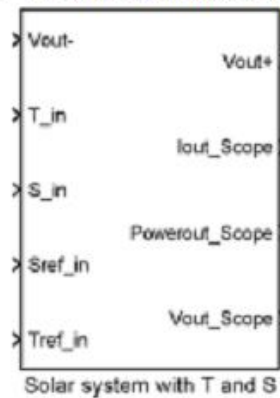


图 3-3 光伏阵列仿真模型封装

模型中, T_{ref} 和 S_{ref} 分别为光伏电池的参考温度和日照强度, 一般取标准条件, 即分别为 25°C , $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。T 和 S 分别为光伏阵列的实际温度、实际的日照强

度，这样，我们就可以对在任何温度和日照强度下的光伏阵列进行仿真。

3.1.3 光伏电池的电气特性^[9]

在日照强度和温度一定时，光伏电池的特性曲线可以表示为图 3-4 所示，它表明在某一确定的日照强度和温度下，光伏电池的输出电流、电压和功率之间的关系。从图 3-4 可以看出，伏安特性曲线具有强烈的非线性，它既非恒压源，也非恒流源，也不可能为负载提供任意大的功率，是一种非线性直流电源，其输出电流在大部分工作电压范围内近似恒定，在接近开路电压时，电流下降率很大。

光伏电池的输出功率取决于日照强度、太阳能光谱分布和光伏电池的温度，光伏电池在标准条件下，即“欧洲委员会”定义的 101 号标准，其条件是：日照强度 $S=1000\text{W}/\text{m}^2$ ，光谱 AM 1.5，电池温度 $T=25^\circ\text{C}$ ，在这种条件下，光伏电池所输出的最大功率被称为峰值功率，其单位为峰瓦 (W_p)。

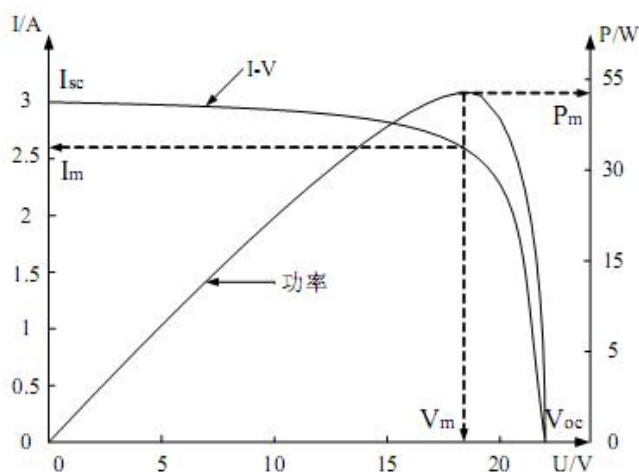


图 3-4 光伏电池的特性曲线

光伏电池几个重要的技术参数：

- (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)：在给定日照强度和温度下相应于最大功率点的电压
- (5) 最大功率点功率 (P_m)：在给定日照强度和温度下阵列可能输出的最大功率，表

示为： $P_m = I_m \cdot V_m$

由式 3-1 和等效电路可知，日照强度和电池温度是影响光伏电池阵列输出功

率的最重要因素，温度上升会使光伏电池开路电压 V_{oc} 下降，短路电流则轻微增大，但总体效果会造成光伏电池的输出功率下降，如图 3-5 所示。

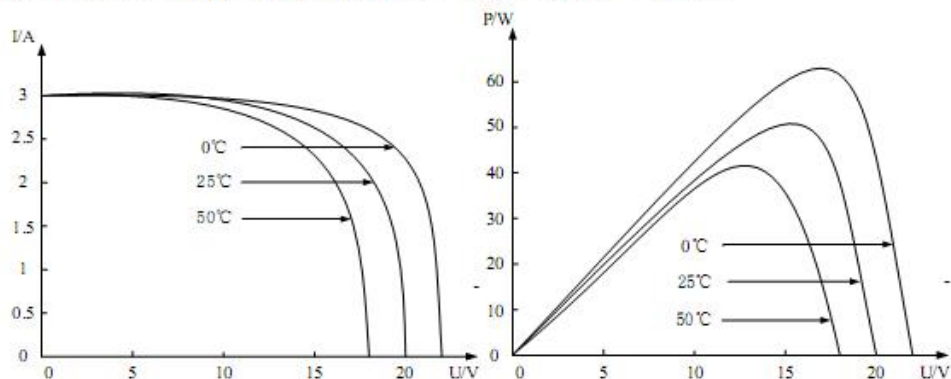


图 3-5 不同温度的 I-V 关系和 P-V 关系曲线图

温度在极大程度上影响开路电压，开路电压的下降可由下面的关系式表示：

$$V_i = \alpha(T - 25)V_a \quad (3-2)$$

式中， V_i 表示开路电压的下降； α 是光伏电池的温度系数，一般取 0.003~0.005； T 表示光伏电池的温度； V_a 表示光伏电池标称的工作电压。

日照强度在极大程度上影响光伏电池的输出电流。图 3-6 表示了在不同光照强度下的 I-V 和 P-V 关系曲线。

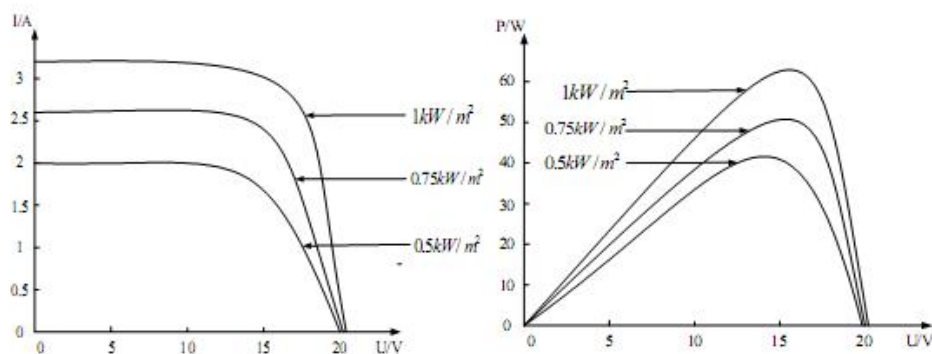


图 3-6 不同日照强度的 I-V 关系和 P-V 关系曲线图

3.2 光伏电池最大功率点跟踪方法

图 3-7 为光伏阵列的输出功率特性 P-V 曲线，由图可知当光伏阵列的工作电压小于最大功率点电压 V_{max} 时，光伏阵列的输出功率随阵列端电压上升而增加；当

阵列的工作电压大于最大功率点电压 V_{\max} 时, 阵列的输出功率随端电压上升而减小。MPPT 的实现实质上是一个自寻优过程^[20~22], 即通过控制端电压, 使光伏阵列能在各种不同的日照和温度环境下智能化的输出最大功率。

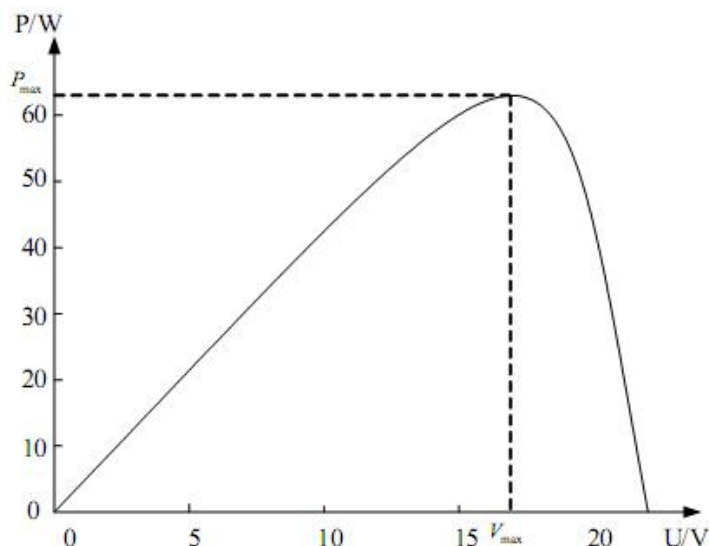


图 3-7 光伏阵列的输出功率特性 P-V 曲线

光伏阵列的开路电压和短路电流在很大程度上受日照强度和温度的影响, 系统工作点也会因此飘忽不定, 这必然导致系统效率的降低。为此, 光伏阵列必须实现最大功率点跟踪控制, 以便阵列在任何当前日照下不断获得最大功率输出。本文针对常用的 MPPT 实现方法: 定电压跟踪法、功率反馈法、扰动观测法、导纳增量法等进行了仔细的分析。

3.2.1 定电压跟踪 (Constant Voltage Tracking—CVT) 法

仔细观察图 3-6 的 P-V 关系曲线图, 发现在一定的温度下, 当日照强度较高时, 诸曲线的最大功率点几乎都分布在一条垂直线的两侧, 这说明光伏阵列的最大功率输出点大致对应于某一恒定电压, 这就大大简化了 MPPT 的控制设计, 即人们仅需从生产厂商处获得数据 V_{\max} , 并使阵列的输出电压钳位于 V_{\max} 值即可, 实际上是把 MPPT 控制简化为稳压控制, 这就构成了 CVT 式的 MPPT 控制。采用 CVT 较之不带 CVT 的直接耦合工作方式要有利得多, 对于一般光伏系统可望获得多至 20% 的电能^[23]。

基于恒定电压法的跟踪器制造比较简单,而且控制比较简单,初期投入也比较少。但这种控制方式忽略了温度对开路电压的影响,以常规的单晶硅光伏电池为例,当环境温度每升高 1°C 时,其开路电压下降约为 $0.35\sim 0.45\%$,具体较准确的值可以用实验测得,也可以按照光伏电池的数字模型计算得到^[24]。以某一位于新疆的光伏电站为例,在环境温度为 25°C 时光伏阵列的开路电压为 363.6V ,当环境温度为 60°C 时开路电压下降至 299V (均在日照强度相同情况下),其下降幅度达到 17.5% ,这是一个不容忽视的影响。

CVT 控制的优点是:

- 控制简单,易实现,可靠性高;
- 系统不会出现振荡,有很好的稳定性;
- 可以方便的通过硬件实现。

缺点是:

- 控制精度差,特别是对于早晚和四季温度变化剧烈的地区;
- 必须人工干预才能良好运行,更难预料风、沙等影响。

为了克服以上缺点,可以在 CVT 的基础上采用一些改进的办法:

- 手工调节方式:根据实际温度的情况,手动调节设置不同情况下的 V_{max} ,但这比较麻烦和粗糙。
- 微处理器查询数据表格方式:事先将不同温度下测得的 V_{max} 值存储于 EPROM 中,实际运行时,微处理器通过光伏阵列上的温度传感器获取阵列温度,通过查表确定当前的 V_{max} 值。

采用 CVT 以实现 MPPT 控制,由于其良好的可靠性和稳定性,目前在光伏系统中仍被较多的使用,特别是光伏水泵系统中。随着光伏系统控制技术的计算机及微处理器化,该方法逐渐被新方法所替代。

3.2.2 功率反馈 (Power Feedback) 法

功率反馈法的基本原理是通过采集太阳能电池阵列的直流电压值和直流电流值,采用硬件或者软件计算出当前的输出功率,由当前的输出功率 P 和上次记忆的输出功率 P' 来控制调整输出电压值。控制原理框图如图 3-8 所示^[25]:

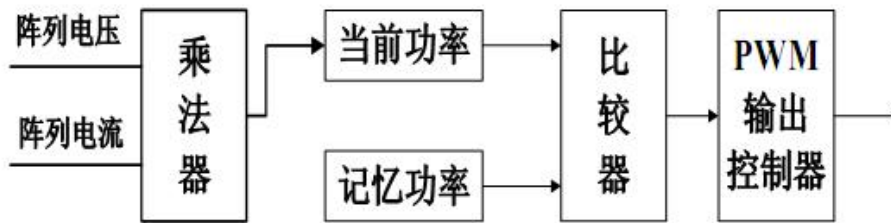


图 3-8 功率反馈法的控制原理框图

由图 3-7 可知，同一输出功率下，输出电压可能不唯一，因此控制器应设计为单值控制模式，即仅以 PV 曲线右侧为控制范围，当输出功率变大时减小输出电压，当输出功率变小时增大输出电压，最终在最大功率点附近振荡运行。这种方法实用方便，但可靠性和稳定性均不佳，所以在实际系统中，较少采用此方法。

3.2.3 扰动观测 (Perturbation and Observation—P&O) 法

扰动观测法是目前实现 MPPT 最常用的方法之一^[26~28]。原理是先让光伏电池按照某一电压值输出，测得它的输出功率，然后再在这个电压的基础上给一个电压扰动，再测量输出功率，比较测得的两个功率值，如果功率值增加了，则继续给相同方向的扰动，如果功率值减少了，则给反方向的扰动。算法流程图如图 3-9 所示：

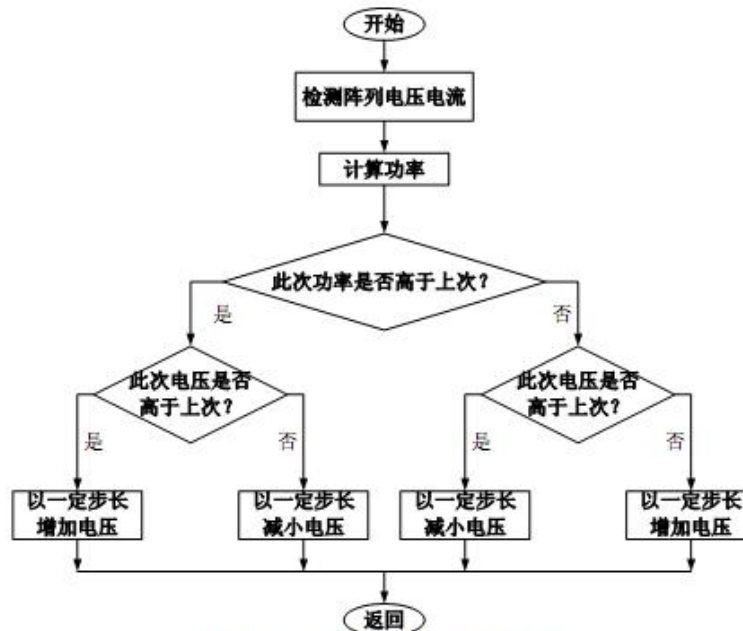


图 3-9 扰动观测法流程图

此法最大的优点在于其结构简单，被测参数少，能比较普遍的适用于光伏系统的最大功率跟踪。但是，在系统已经跟踪到最大功率点附近时，扰动仍然没有停止，这样系统在最大功率点附近振荡，会损失一部分功率，而且初始值和步长的选取对跟踪的速度和精度都有较大的影响。

扰动观测法的优点有：

- 控制回路简单；
- 跟踪算法简明，容易实现。

缺点是：

- 在阵列最大功率点附近振荡，导致部分功率损失；
- 初始值及跟踪步长的给定对跟踪精度和速度有较大影响；
- 有时会发生程序在运行中的“误判”现象。

扰动观测法可能产生“误判”的原因分析如图 3-10 所示：

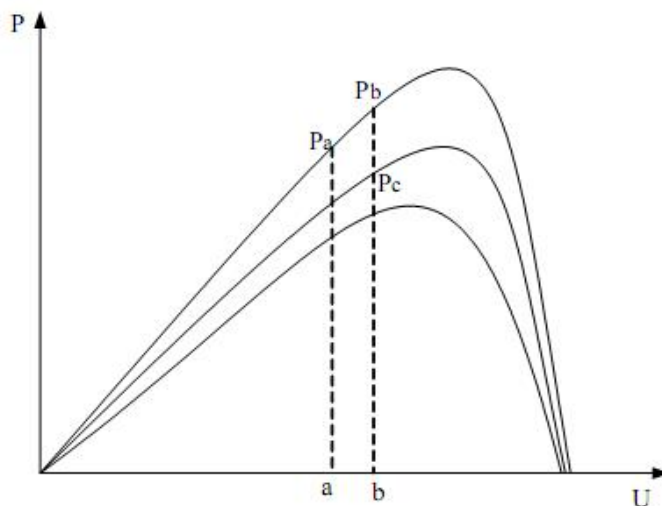


图 3-10 扰动观测法可能的误判示意图

由于在一天中日照是时刻变化的，特别是早晚和有云的天气。所以对于光伏电池阵列来说，其 P-V 曲线是不停变化的。当光伏系统用扰动观测法进行 MPPT 时，假设系统已经工作在 MPP 附近，如图 3-10 所示，当前工作点电压记为 V_a ，阵列输出功率记为 P_a 。当电压扰动方向往右移至 V_b ，如果日照没有变化，阵列输出功率为 $P_b > P_a$ ，控制系统工作正确。但如果日照强度下降，则对应 V_b 的输出功率可能为 $P_c < P_a$ ，系统会误判电压扰动方向错误，从而控制工作电压往左移回 V_a 点。如果日照持续下降，则有可能出现控制系统不断误判，使工作点电压在 V_a 和 V_b 之

间来回移动振荡，而无法跟踪到阵列的最大功率点。对于这种由于日照强度影响造成的系统误判，可以通过加大扰动频率和减小扰动的步长来尽可能的消除。

3.2.4 导纳增量 (Incremental Conductance) 法

导纳增量法也是光伏阵列 MPPT 常用方法之一^[29~31]。由光伏阵列的 P-V 曲线知，在最大功率点处其斜率为零，而 $P=VI$ ，因此在最大功率点处有：

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (3-3)$$

即：

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3-4)$$

式 (3-4) 即为达到最大功率点的条件。如果

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (3-5)$$

则光伏电池组件的工作点在最大功率点的右边，此时应减小输出电压；如果

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (3-6)$$

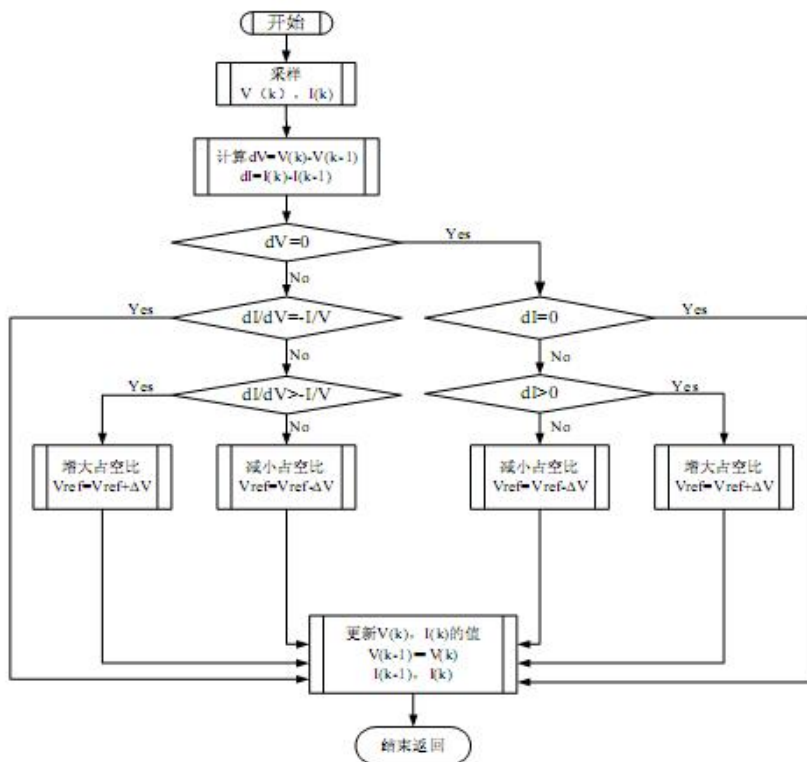


图 3-11 导纳增量法控制流程图

则光伏电池组件的工作点在最大功率点的左边，此时应增大输出电压。该控制算法的流程图如图 3—11 所示：

其中 $V(k)$ 和 $I(k)$ 分别为第 k 个采样点的光伏电池输出电压和电流， $V(k-1)$ 和 $I(k-1)$ 分别为前一个采样点的光伏电池输出电压和电流， V_{ref} 和 ΔV 分别为参考电压和电压增量步长。当光伏电池上的日照强度和温度变化时，其输出电压能平稳的追踪其变化，且与太阳能电池组件的特性及参数无关；但这种控制算法实现起来相对复杂，而且检测精度和速度在一定程度上会影响跟踪的精度和速度，同时，电压增量步长的选取也比较讲究，若步长太大，则跟踪的误差会比较大，若步长较小，则跟踪的速度会较慢。

4 光伏发电系统最大功率点跟踪的控制策略

4.1 单级式光伏发电系统的最大功率点跟踪

本节的单级式光伏发电系统是专门针对并网系统来讲的，是指光伏阵列发出的电能只经过一个能量变换环节进行并网运行。

4.1.1 单级式系统的结构

单级式光伏发电系统的结构框图如图 4-1 所示：



图 4-1 单级式系统结构框图

光伏阵列发出的直流电能，直接通过一级能量变换送至电网，在这一级能量变换装置中，通常要完成最大功率点跟踪和 DC/AC 逆变两个功能。

典型的单级式三相光伏并网系统采用电压型拓扑如下图 4-2：

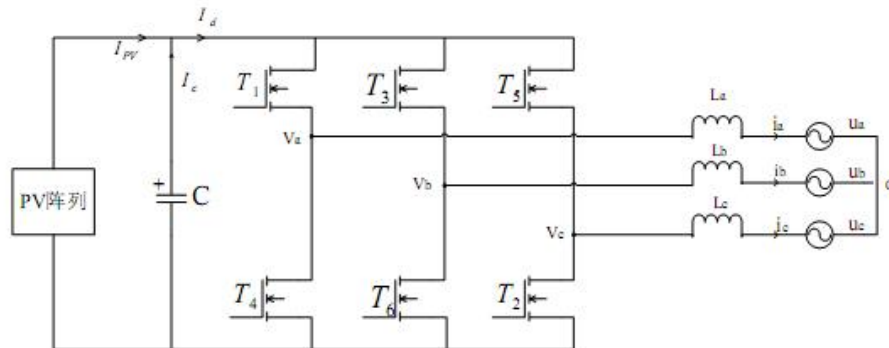


图 4-2 单级式三相并网系统电路拓扑

4.1.2 单级式系统的特点

单级式光伏发电系统有如下特点^[37]：

(1) 系统结构简单。相对于两级式甚至是多级式系统，单级式系统只有一个逆变环节，电路结构相对简单。简单的结构也能减小系统的体积和降低系统的重量。

(2)控制相对简单。对于多级式系统,存在控制复杂,相互直接的协调性差的问题,而单级式系统则不存在这些问题。

(3)效率高。多级式系统的总效率等于各个环节效率的乘积,这样效率会比较低;而单级式系统只有一个环节,效率相对较高,一般的逆变器的效率都可以做到90%以上。

(4)系统成本低。这个是显而易见的,能量变化环节成本的降低对于整个光伏发电系统总体造价的降低是有帮助的,这样也有利于光伏发电的推广应用。

4.1.3 单级式系统最大功率点跟踪的实现策略

在并网的运行模式下,并网逆变器一般都是工作在电流控制电压型模式,系统的控制目标是使逆变器输出的正弦波电流的频率和相位与电网电压的频率和相位相同,并网电流的大小取决于光伏阵列的输出功率。对逆变器来说,它的负载是交流电网,可以看成是恒压源,因此逆变器的输出电流决定了输出功率的大小。从能量守恒的角度看,并网电流体现了光伏阵列的输出功率的大小,控制并网电流实际上就控制了光伏阵列的输出功率^[38]。

4.1.3.1 系统的控制原理

系统控制原理框图如图4-3所示:

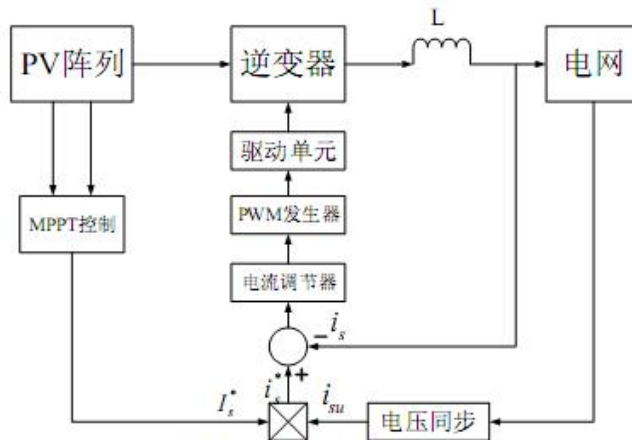


图 4-3 系统控制原理图

上图中 I_s^* 是电流幅值指令, i_{su} 是跟电网电压同步的单位正弦信号, i_s^* 是两路信号相乘的正弦电流指令, i_s 为实际并网电流。在如上图所示的单级并网系统中,采用的是双闭环控制。电压同步,交流电压、电流采样环节,PWM调制环节,驱动单元构成内环控制,控制直流到交流的逆变,保证系统输出品质较好的交流电能。

最大功率点跟踪(MPPT)控制构成外环,保证并网光伏系统工作在最大功率点,实现最大功率输出。因为内环为并网电流波形的控制,因此内环必须为实时控制,即在逆变桥的每个工作周期都进行控制,而外环为功率环,功率的变化相对较慢,因此,对于外环,可以在秒级的周期内进行控制。

4.1.4 仿真分析

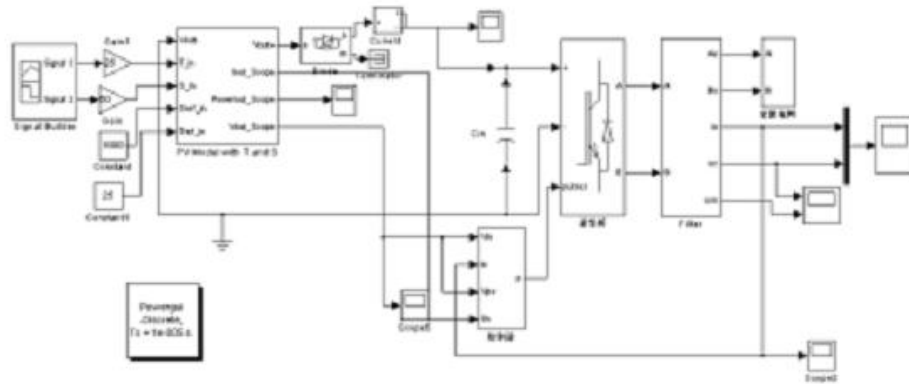


图 4-10 单级式光伏系统的仿真模型

在仿真中，0.2s 之前的日照强度设定为 $750\text{W}/\text{m}^2$ ，在 $0.2\text{s}\sim 0.4\text{s}$ 之间设定为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，在 0.4s 的时候日照强度改为 $500\text{W}/\text{m}^2$ 。从仿真中可以看出，当日照强度发生变化时，控制器能迅速检测到这种变化，重新调整并网电流。从能量守恒的角度来说，并网电流的大小代表了光伏阵列输出功率的大小。

4.2 双级式光伏系统的最大功率点跟踪

4.2.1 双级式系统的结构

典型的双级式光伏发电系统如图 4—15 所示。系统由光伏阵列、DC/DC 变换环节、DC/AC 逆变环节以及负载（电网）组成，有的系统还包含有蓄电池组。其中 DC/DC 变换环节一般要完成光伏阵列的最大功率点跟踪（MPPT）控制，而 DC/AC 环节要完成直流电到交流的逆变（对于并网系统，还要完成系统的并网运行）。

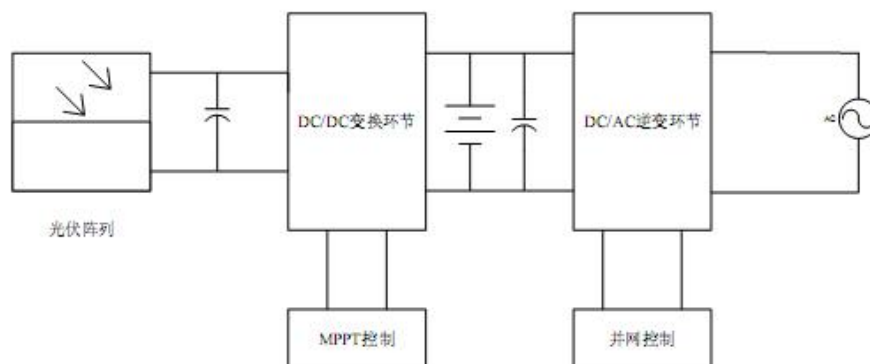


图 4—15 双级式系统的结构框图

4.2.2 双级式系统的特点

双级式光伏发电系统有如下特点：

(1) 由于直流和逆变环节可以分开设计，系统前后级之间耦合不紧密，因此系统的控制环节比较容易设计和实现；

(2) 由于单独具有一级最大功率点跟踪环节，系统中相当于设置了电压预调整单元，系统可以具有比较宽的输入范围；

(3) 同时，最大功率跟踪环节的设置可以使逆变环节的输入相对稳定，而且输入的电压较高，这样都有利于提高逆变环节的转换效率。

但双级式系统也有如下缺陷：

(1) 由于两级式系统具有两个独立的能量变换环节，因此整个系统的效率低、体积大、造价高；

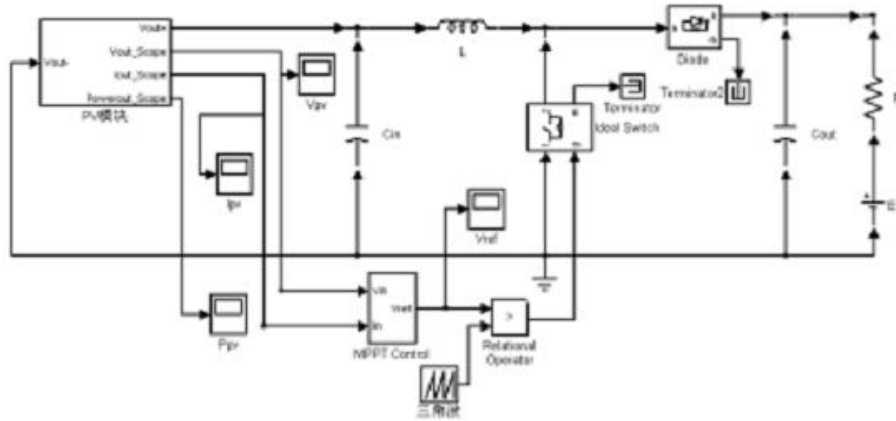
(2) 由于最大功率点跟踪和逆变由两个独立的环节完成，会导致整个系统的控制复杂，而且协调性差。

4.2.3 最大功率点跟踪的实现策略^[43~44]

从实现 MPPT 的 DC/DC 变换电路来看，常采用的基本电路有 Buck 型电路和 Boost 型电路，但 Buck 电路有一个最大的问题是：输入电流不连续。对于光伏发电系统来说，如果光伏阵列的输出电流不连续，那么将会损失一部分能量。同时，从方便扩容方面来说，多数光伏阵列的输出电压都比较低，而大多数负载都需要工作在更高电压等级上，因此具有电压提升功能和输入电流能连续工作的 Boost 电路更多的用来作为光伏系统的最大功率点跟踪器。图 4—16 为 Boost 变换器的基本电路。

4.2.4 仿真分析

运用第三章所建立的光电池仿真模型，可以建立如图 4-18 所示的最大功率点跟踪的仿真模型。



5 光伏发电系统最大功率点跟踪的实现

5.1 电路拓扑结构的选择

在光伏方阵的构成中，为了方便扩容，经常采用少量光伏组件串联然后再并联的结构方式，即光伏方阵的输出电压较低，输出电流较高。对后端的变换电路来说是低电压大电流的工作状况，在这种场合下，推挽电路比半桥或者全桥优越，因为相对于全桥电路来说，推挽结构只需要两个开关管，这样有利于节省系统成本，而且在任何时候最多只有一个开关元件工作，对于输出相同的功率，开关损耗较小；相对于半桥电路来说，推挽结构的开关管承受的电流峰值较小，有利于开关器件的选取而且损耗较小^[45]，所以本设计中的 DC/DC 变换器采用推挽电路的拓扑结构，如图 5-1 所示：

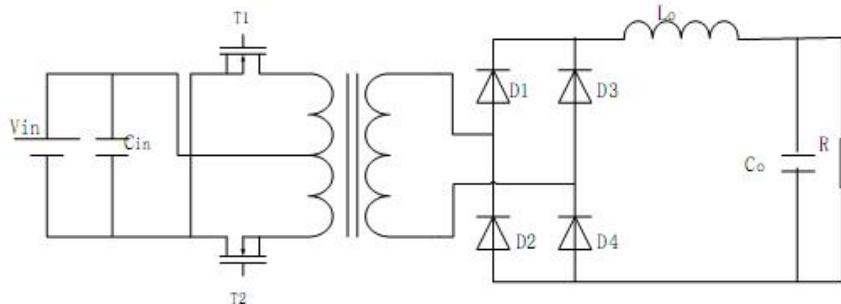


图 5-1 推挽电路拓扑结构

5.2 主电路的结构及参数的设计

电路的主要性能指标:

工作频率 f : 20kHz;

变换器输出额定功率 P_o : 10kW

变换器输入电压 U_i : DC42~48V;

变换器输出电压 U_o : DC400V;

变换器输出电流 I_o : 25A;

输出整流电路: 桥式整流;

5.2.1 主变压器的设计

变压器主要起原、副边电气隔离, 传输能量和升压的作用。

在传统的高频变压器设计中, 由于磁心材料的限制, 其工作频率较低。随着电源技术的不断发展, 电源系统的小型化, 高频化和高功率比已成为一个永恒的研究方向和发展趋势。因此, 研究使用频率更高的电源变压器是降低电源系统体积, 提高电源输出功率比的关键因素。由于工作频率提高到 20kHz 以上, 传统的铁芯材料硅钢已不能满足使用要求; 铁氧体虽高频损耗较低, 但因其饱和磁感应值 (B_s) 较低, 铁芯的体积和重量仍较大, 此外, 铁氧体的居里温度较低, 热稳定性差。超微晶材料具有优良的综合磁性能, 集硅钢、坡莫合金、铁氧体的优点于一身, 即高磁感、高导磁率、低损耗、及优异的温度稳定性, 迅速成为现代大功率电源变压器铁芯的最佳选择。

5.2.2 主功率管和整流管的选择

一、主功率管的选择

由于本设计系统具有低电压大电流的特点, 最大电流达 250A。MOSFET 的导通压降较小, 导通电阻也小, 但市面上普通的 MOS 管最大额定电流多数为 100A 左右, 对于大电流系统需并联使用, 这给系统的成本带来压力, 也给驱动控制带来了困难, 因此选用 IGBT 模块作为主功率管。因为电路的输入电流最大为 250A, 取 1.5 倍的裕量, 希望功率管的电流耐量达 400A, 而 IGBT 模块的电压等级较高, 电压耐量好做选择。综合各方面考虑, 选择日本三菱公司生产的 IGBT 模块 CM400HA-12H, 技术指标为 400A/600V, 可耐峰值电流 800A。其性能参数如下表 5-3:

表 5-3 CM400HA-12H 性能参数

V_{CES}	I_C	I_{CM}	$V_{CE(sat)}$	$t_{d(on)}$	t_r	$t_{d(off)}$	t_f	t_{rr}
600V	400A	800A	2.1V	350ns	600ns	350ns	300ns	110ns

二、输出整流二极管的选择

本设计主开关管的工作频率为 20kHz，对于副边的整流电路来说就有 40kHz 的工作频率，因此整流二极管应选用快恢复型二极管。对于全桥整流来说，二极管截止时承受的反向电压为 V_o ，为 400V，考虑 2 倍的裕量，可以选用额定电压为 800V 的整流管。副边电流的有效值为 22.4A，裕量取 2 倍。因此可以选择 IXYS 公司生产的 DSEI60-10A，规格为 60A/1000V。其性能参数如下表 5-4：

表 5-4 DSEI60-10A 性能参数

I_{FYM}	I_{FRMS}	V_{RRM}	V_F	t_{rr}
60A	100A	1000V	2.3V	35ns

5.2.4 缓冲电路的设计^[44]

半导体开关器件工作中有断态、开通、通态、关断四种工作情况。断态时可能承受电源高电压但漏电流小，通态时可能承受负载大电流但管压降小。而开通和关断过程中开关器件可能同时承受高电压、大电流、过大的 dv/dt 、 di/dt 以及过大的瞬时功率 $P_T = v_T i_T$ 。高电压和大电流可能使工作点超出安全工作区而损坏器件，因此半导体电力开关器件常设置开关过程的保护电路，称为缓冲器，以防止瞬时过压、过流，消除过大的电压、电流变化率，减小开关损耗，确保器件处于安全工作区。

常用的缓冲器有 LCRD 型复合缓冲器，简单的 RC 缓冲电路，限幅缓冲器等。为了提高安全可靠，减小开关过程中过大的电压、电流变化率所引起的电磁干扰，所以在本设计中，主开关管上采用简单的 RCD 缓冲电路，整流二极管上采用 RC 电路。

5.3 控制电路的设计

控制电路主要完成 IGBT 的驱动和系统中信号的检测与保护。

由于本系统是多种控制算法高速运行的系统,不仅要求执行指令快速性,还需要 AD 采样的快速性,同时要具有适合电力电子控制的各种外设模块。根据比较本文选取了 TI 公司的 TMS320LF2407A 芯片。TMS320LF2407A 芯片是 TI 公司推出的一款功能强大的数字信号处理器,具有以下一些特点:

- (1) 采用高性能静态 CMOS 技术,使得供电电压降为 3.3V,减小了控制器的功耗;40MHz 的执行速度使得指令周期缩短到 25ns,从而提高了控制器的实时控制能力。
- (2) 基于 TMS320C2XXDSP 的 CPU 内核,保证了 TMS320LF2407A DSP 代码核,与 TMS320 系列 DSP 代码兼容。
- (3) 有高达 32K 字的 FLASH 程序存储器,高达 1.5K 字的数据/程序 RAM,544 字的双口 RAM(DARAM)和 2K 字的单口 RAM (SARAM)。
- (4) 两个事件管理器模块 EVA 和 EVB,每个包括:两个 16 位通用定时器;8 个 16 位的脉冲宽度调制(PWM)通道。并且能够完成以下功能:三相反相器控制;PWM 的对称和非对称波形;当外部中断输入引脚出现低电平时快速关闭 PWM 通道;可编程的 PWM 死区控制可以防止上下桥臂同时输出触发脉冲;3 个捕获单元;片内光电编码器接口电路;16 通道 A/D 转换器。
- (5) 扩展的外部存储器(LF2407A)总共 192K 字空间:64K 字程序存储器空间;64K 字数据存储器空间;64K 字 I/O 寻址空间。
- (6) 看门狗定时器模块(WDT)。
- (7) 10 位 A/D 转换器最小转换时间 375ns,并且两个通道既可以工作于独立方式也可以工作于级连方式。可选择由两个事件管理器来触发。
- (8) 控制器局域网络(CAN)2.0 模块。
- (9) 串行通信接口(SCI)模块。
- (10) 16 位的串行外设接口(SPI)模块。
- (11) 基于锁相环的时钟发生器。
- (12) 高达 40 个可单独编程或复用的通用输入/输出引脚(GPIO)。
- (13) 5 个外部中断(两个电机驱动保护、复位和两个可屏蔽中断)。
- (14) 电源管理包括 3 种低功耗模式,能独立地将外设器件转入低功耗工作模式。

5.4 实验结果与分析

基于以上设计的硬件电路，我们研制出了实验样机。光伏电池板采用国内某公司生产的型号为 GFM-120 的产品，每块标称峰值功率 120W，开路电压 V_{oc} 为 21.6V，最佳工作点电压 V_m 为 17.3V。实验中，把 6 块电池板分成两组，每组三块串联，其中一组接入本文所设计的系统，另外一组直接接阻性负载。实验时，在不同的负载情况下，在一段时间之内，分别测量两组光伏电池的输出电压和电流，再计算其输出功率，每次测量 10 个点。实验中，MPPT 法采用的是 CVT 法。

6 全文总结及展望

6.1 本文总结

本文对光伏发电系统的最大功率点跟踪控制技术进行了较深入的研究,总的来说,本文的基本工作和主要创新点体现在如下几个方面:

一、光伏系统是一个较为复杂的系统,由多部分构成。本文分析了光伏发电系统的各个构成部分,并且对并网光伏发电系统的核心构成部分——并网逆变器的控制的方式、并网的原理和功率的调节进行了详细的分析。

二、光伏电池的最大功率点跟踪有很多种方法。本文首先根据光伏电池的电气特性运用 MATLAB 工具建立了光伏电池的模型,这种模型能够应用于变化的光照强度和变化的电池温度的系统仿真中,这为后文的研究打下了基础。接着,本文对常用的最大功率点跟踪(MPPT)方法进行了分析,如恒定电压法、导纳增量法和扰动观测法,对这几种方法的优点和缺点都进行了分析,同时还提出了改进的措施。在对这几种常用方法详细分析的基础上,本文又提出了几种改进方法:开路电压法、最优梯度法和三点重心比较法。但实际上,这些方法都有优点和缺点,对于不同的应用场所和环境都各有所长。

三、对于最大功率点跟踪的实现,有些系统是在 DC/DC 变换环节来完成的,至于后级电路如何实现能量的变换,这个要由负载来决定,对于不同的负载,后级再实行不同的变换,这类系统称为双级式或者多级式系统;但很多方案里只用了一级功率变换就把光伏电池发出的电能传送给电网,这样的系统称为单级式系统。本文陈述并比较了这两类系统的特点,并建立了各自的系统数学模型,分析了系统的工作原理,最后运用前文建立的光伏电池模型搭建了应用于单级式和双级式中的实现最大功率点跟踪的仿真模型,通过编写 S 函数,采用不同的控制算法来实现对电路的控制,仿真结果表明系统都能够较好的完成最大功率点跟踪。

四、本文设计了基于双级式系统的硬件电路,电路采用推挽的拓扑结构,这种电路结构在大功率低输入电压的场合要比全桥电路优越。根据系统的目标要求,本文还对开关管进行了精心的选择,并设计了合适的滤波电路、缓冲电路和驱动检测保护电路。最后的实验结果表明,系统能够进行最大功率点跟踪,在一定程度上能够提高光伏电池的输出功率。

6.2 工作展望

本文通过大量的理论分析、仿真和实验手段对光伏发电系统的最大功率点跟踪控制技术进行了深入的研究，这些研究成果是作者相关工作的阶段性总结，但所完成的工作只是对这项技术一定程度上的探讨，在此基础上展望后续的研究工作，可望在以下几个方面取得进一步的进展：

一、单级式系统的最大功率点跟踪仅完成了仿真方面的研究，并没有作实验验证，因此，今后的研究工作还应侧重于实验方面的验证。

二、本研究工作虽然是按照 10kW 的容量等级来设计硬件系统，但限于资金压力未购买足够的光伏电池以及工程进度的原因，本文只完成了 360W 光伏电池容量的系统实验。对于大容量系统，在完成各种功能的基础上怎样尽量提高系统的性能指标，这也是一个值得深入研究的课题。