

电子工程技术丛书

# 太阳能光伏发电 系统设计 与应用实例

● 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

# 太阳能光伏发电系统 设计与应用实例

周志敏 纪爱华 编著

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书结合我国“十一五”节能减排工程计划与国内外太阳能光伏发电技术的发展动态,以从事太阳能光伏发电系统设计人员为读者对象,系统、全面地讲解太阳能光伏技术基础知识、太阳能电池、阀控密封式铅酸(Valve-Regulated Lead Acid Battery, VRLA)蓄电池、太阳能光伏发电系统控制器、太阳能光伏发电系统逆变器、太阳能光伏发电系统设计实例、太阳能光伏发电系统防雷接地设计等内容,并介绍了国内外太阳能光伏发电系统的典型应用实例,以供读者在实际设计工作中参考。

本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值,是从事太阳能光伏发电技术研发、设计、生产、应用与维护的工程技术人员必备读物,也可供从事太阳能光伏发电设备的研发、生产、应用的管理人员及高等院校、职业技术学院相关专业的师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电系统设计与应用实例/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2010.7  
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-10937-9

I. ①太… II. ①周… ②纪… III. ①太阳能发电-系统工程 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第093824号

策划编辑:富 军

责任编辑:周宏敏 特约编辑:陈心中

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:432千字

印 次:2010年7月第1次印刷

印 数:4000册 定价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888

# 前 言

太阳能作为未来的能源是一种非常理想的清洁能源，近年来由于人们对能源、环境问题的日益关注，太阳能的应用与普及越来越受到人们的重视，应用领域也越来越广泛。我国的太阳能资源丰富，为太阳能的利用创造了有利条件。根据太阳能的特点和实际应用的需要，目前太阳能发电分为光热发电和光伏发电。通常说的太阳能发电是指太阳能光伏发电。光伏发电是利用半导体的光生伏特效应将光能直接转变为电能的一种发电技术。

我国政府一直把研究开发太阳能技术列入国家科技攻关计划，大大推动了我国太阳能产业的发展。进入 21 世纪，我国太阳能光伏技术在研究开发、商业化生产、市场开拓方面都获得了长足的发展，现已成为高速、稳定发展的新兴产业之一。太阳能光伏发电技术是具有广泛发展前景和影响力的一项高新技术，太阳能光伏发电技术的研发和光伏发电设备的生产，已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。

本书紧紧围绕我国“十一五”节能减排工程计划和新能源开发利用的方针和宗旨，将太阳能光伏技术的基础知识、光伏发电系统设备、设计方法和典型应用实例有机结合，在保证科学性的同时，尽量做到具有针对性和实用性，并注重通俗性。本书是从事太阳能光伏发电系统设计、开发和应用的工程技术人员的必备参考书，读者可结合书中的典型应用实例的设计思路和设计方法，灵活地将其应用到太阳能光伏发电系统的实际设计工作中。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬等。在本书编写过程中，无论从资料的收集还是技术信息的交流，都得到了国内有关专家学者和太阳能光伏发电设备制造商的大力支持。同时，本书还参考了大量的著作和文献，无法全部列出，谨向有关作者表示衷心的感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 太阳能光伏技术基础知识</b> .....	1
1.1 太阳能光伏发电系统 .....	1
1.1.1 太阳能及光伏技术 .....	1
1.1.2 太阳能光伏发电原理及优势 .....	3
1.2 太阳能光伏发电系统 .....	5
1.2.1 太阳能光伏发电系统的构成 .....	5
1.2.2 太阳能光伏发电的发展及应用 .....	10
<b>第 2 章 太阳能电池</b> .....	18
2.1 太阳能电池原理及发展 .....	18
2.1.1 太阳能电池原理 .....	18
2.1.2 晶体硅太阳能电池的发展历程 .....	24
2.2 太阳能电池的分类及组件 .....	30
2.2.1 太阳能电池的分类 .....	30
2.2.2 太阳能电池组件 .....	36
<b>第 3 章 VRLA 蓄电池</b> .....	44
3.1 蓄电池的分类及工作原理 .....	44
3.1.1 蓄电池的分类及技术指标 .....	44
3.1.2 蓄电池的工作原理 .....	50
3.1.3 蓄电池的特性 .....	53
3.2 VRLA 蓄电池组的均匀性及一致性 .....	56
3.2.1 VRLA 蓄电池组的均匀性 .....	56
3.2.2 VRLA 蓄电池容量的一致性 .....	60
3.3 两类 VRLA 蓄电池的比较 .....	62
3.4 VRLA 蓄电池的充放电特性 .....	65
3.4.1 VRLA 蓄电池的充电特性 .....	65
3.4.2 VRLA 蓄电池的放电特性 .....	69
3.4.3 VRLA 蓄电池充电器 .....	71
3.4.4 VRLA 蓄电池充电控制技术 .....	72
3.4.5 VRLA 蓄电池温度补偿技术 .....	74
3.4.6 基于 UC3906 的蓄电池充电器 .....	76
3.5 VRLA 蓄电池的使用与维护 .....	78
3.5.1 VRLA 蓄电池的安装 .....	79
3.5.2 VRLA 蓄电池的正确使用 .....	81
3.5.3 VRLA 蓄电池的维护 .....	84

<b>第 4 章 太阳能光伏发电系统控制器</b>	88
4.1 控制器工作原理及功能	88
4.1.1 控制器工作原理及控制策略	88
4.1.2 分组控制策略	95
4.1.3 光伏发电系统数据采集器	97
4.2 控制器结构及功能	99
4.2.1 太阳能 LED 路灯控制器	99
4.2.2 EPDC 型太阳能电源双路输出控制器	106
4.2.3 EPRC10-ST-MT 型太阳能电源控制器	110
<b>第 5 章 太阳能光伏发电系统逆变器</b>	114
5.1 光伏发电系统逆变器	114
5.1.1 光伏发电系统对逆变器的要求	114
5.1.2 逆变基本电路	121
5.2 逆变器控制方式	127
5.2.1 PWM 调制方式	127
5.2.2 空间矢量 PWM 逆变电路	129
5.2.3 电流型控制方式	132
5.2.4 逆变器的消谐控制技术	135
5.2.5 逆变器的功率因数校正	137
5.3 逆变器的并联运行技术	140
5.3.1 逆变器的并联运行方法	140
5.3.2 逆变器并联系统中基准信号同步	145
5.4 太阳能光伏发电逆变器设计	148
5.4.1 太阳能光伏发电用逆变器	148
5.4.2 小功率光伏并网逆变器设计实例	153
<b>第 6 章 太阳能光伏发电系统设计实例</b>	159
6.1 光伏发电系统的设计方案	159
6.1.1 光伏发电系统设计原则及方法	159
6.1.2 太阳能电池方阵设计	163
6.1.3 蓄电池组设计	168
6.1.4 太阳能光伏发电系统设计方法	172
6.1.5 太阳能电池方阵设计中必须注意的问题	174
6.1.6 控制器选择及太阳能电池组件支架的抗风设计	177
6.1.7 并网光伏发电系统设计	178
6.2 太阳能路灯工程设计与安装调试	190
6.2.1 太阳能路灯设计实例	190
6.2.2 LED 路灯工程设计	192
6.2.3 道路照明安装工程	196
6.2.4 太阳能灯具的调试	201

6.3	离网和并网太阳能光伏发电系统设计实例 .....	208
6.3.1	离网太阳能光伏发电系统设计实例 .....	208
6.3.2	并网太阳能光伏发电系统设计实例 .....	215
6.4	太阳能光伏发电系统典型配置方案 .....	220
<b>第7章</b>	<b>太阳能光伏发电系统防雷接地设计 .....</b>	<b>229</b>
7.1	太阳能光伏发电系统防雷设计 .....	229
7.1.1	防雷设计基础知识 .....	229
7.1.2	电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电 .....	232
7.2	雷击闪电的特性 .....	233
7.2.1	雷电流的特性 .....	233
7.2.2	雷电活动及雷击的选择性 .....	235
7.3	雷电防护技术 .....	237
7.3.1	防雷机理 .....	237
7.3.2	现代防雷技术 .....	239
7.3.3	光伏系统的避雷技术要求 .....	242
7.3.4	太阳能光伏系统防雷解决方案 .....	245
7.4	SPD 浪涌防护器及其应用 .....	248
7.4.1	SPD 的性能特点 .....	248
7.4.2	SPD 配置方案 .....	250
7.4.3	建筑物入口处 SPD 的选择 .....	252
7.5	太阳能光伏发电系统接地与等电位连接 .....	260
7.5.1	接地网的建设 .....	260
7.5.2	等电位连接 .....	267
<b>参考文献</b>	.....	<b>269</b>

# 第 1 章

## 太阳能光伏技术基础知识



### 1.1 太阳能光伏发电系统

#### 1.1.1 太阳能及光伏技术

##### 1. 太阳能

太阳的基本结构是一个由炽热气体构成的球体，主要由氢和氦组成，其中氢占 80%，氦占 19%。太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。据计算，太阳辐射每秒抵达地球表面的能量高达  $8.0 \times 10^{13} \text{ kW}$ ，相当于 550 万吨标准煤燃烧产生的能量。地球每年接收的太阳能相当于目前地球上每年燃烧的固、液、气体燃料产生的能量的 2000 倍左右，太阳能资源总量相当于现在人类所利用能源的 1 万多倍。

地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都来源于太阳；即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等），从根本上说也是自远古以来储存下来的太阳能。广义的太阳能所包括的范围非常广，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

我国太阳能资源十分丰富，全国有 2/3 以上的地区，年日照时数在 2000 h 以上。

太阳能既是一次能源，又是可再生能源。它资源丰富，既可免费使用，又无须运输，对环境无任何污染。虽然太阳能的总量很大，我国陆地表面每年接收的太阳能就相当于 1700 亿吨标准煤，但太阳能十分分散，能流密度较低，到达地面的太阳能每平方米只有 1000 W 左右。同时，地面上太阳能还受季节、昼夜、气候等影响时强时弱，具有不稳定性，限制了太阳能的有效利用。

人类对太阳能的利用有着悠久的历史。我国早在 2000 多年前的战国时期就知道利用钢制凹面镜聚焦太阳光来点火，利用太阳能来干燥农副产品。发展到现代，太阳能的利用已日益广泛，它包括太阳能的光热利用、太阳能的光电利用和太阳能的光化学利用等。太阳能作为一种新能源，它与常规能源相比有三大优点。

(1) 太阳能是人类可以利用的最丰富的能源。据估计，在过去漫长的 11 亿年中，太阳仅消耗了它本身能量的 2%，可以说是取之不尽，用之不竭。



(2) 地球上, 无论何处都有太阳能, 可以就地开发利用, 不存在运输问题, 尤其对交通不发达的农村、海岛和边远地区更具有利用的价值。

(3) 太阳能是一种洁净的能源, 在开发和利用时, 不会产生废渣、废水、废气, 也没有噪声, 更不会影响生态平衡。

我国西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古高原均属世界太阳能资源丰富地区; 四川盆地、两湖地区、秦巴山地是太阳能资源低值区; 我国东部、南部、及东北为太阳能资源中等区。各地区太阳能资源情况见表 1-1。

表 1-1 各地区太阳能资源情况

类 型	地 区	年日照时数/h	年辐射总量/( kcal/cm <sup>2</sup> · a)
1	西藏西部、新疆东南部、青海西部、甘肃西部	2800~3300	160~200
2	西藏东南部、新疆南部、青海东部、宁夏南部、甘肃中部、内蒙古、山西北部、河北西北部	3000~3200	140~160
3	新疆北部、甘肃东南部、山西南部、山西北部、河北东南部、山东、河南、吉林、辽宁、云南、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部	2200~3000	120~140
4	湖南、广西、江西、浙江、湖北、福建北部、广东北部、山西南部、江苏南部、安徽南部、黑龙江	1400~2200	100~120
5	四川、贵州	1000~1400	80~100

## 2. 太阳能光伏技术

在太阳能的有效利用中, 太阳能发电系统是近些年来发展最快, 也是最具活力的研究领域, 是其中最受瞩目的项目之一。太阳能是一种辐射能, 利用太阳能发电是将太阳光转换成电能。目前, 太阳能发电有两种方式: 一种是光—热—电转换方式, 另一种是光—电直接转换方式。为此, 人们研制和开发了太阳能电池, 设计和建设独立、并网的光—电直接转换太阳能发电系统, 有专家认为太阳能发电量最终将在电力供应中占 20%。

(1) 光—热—电转换方式。是通过利用太阳辐射产生的热能发电, 一般是由太阳能集热器将所吸收的太阳能转换成工质蒸汽的热能, 再驱动汽轮发电机发电。前一个过程是光—热转换过程, 后一个过程是热—电转换过程, 其发电工艺流程与普通的火力发电相似。太阳能热能发电的缺点是效率很低而成本很高, 估计它的投资至少要比普通火电站高 5~10 倍, 一座 1000 MW 的太阳能热电站需要投资 20 亿~25 亿美元, 平均 1kW 的投资为 2000~2500 美元。因此, 目前只能小规模地应用于特殊的场合, 而大规模利用在经济上很不合算。所以, 太阳能热能发电还不能与普通的火电站或核电站相竞争。

(2) 光—电直接转换方式。是利用光电效应将太阳辐射能直接转换成电能, 光—电转换的基本装置就是太阳能电池。太阳能电池是一种基于光生伏特效应将太阳光能直接转化为电能的器件, 是一个半导体光电二极管, 当太阳光照到光电二极管上时, 光电二极管就会把太

阳的光能转换成电能，在外电路上产生电流。将许多个太阳能电池串联或并联起来就可构成输出功率比较大的太阳能电池方阵。太阳能电池是一种大有前途的新型电源，具有永久性、清洁性和灵活性三大优点。太阳能光伏发电与火力发电、核能发电相比，太阳能电池不会引起环境污染；太阳能电池可以大中小并举，大到百万千瓦的中型电站，小到只供一户用电的独立太阳能发电系统，这些特点是其他电源无法比拟的。

太阳能电池也同晶体管一样，是由半导体构成的。它的主要材料是硅，也有一些其他合金材料。用于制造太阳能电池的高纯硅，要经过特殊的提纯处理制作。太阳能电池的工作原理是半导体 PN 结的光生伏打效应。所谓光生伏打效应就是当物体受光照时，物体内的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流。当太阳光或其他光照射到半导体的 PN 结时，产生光生电子—空穴对，在内建电场作用下，光生电子和空穴分离，太阳能电池两端出现异性电荷的积累，即产生“光生电压”，这就是“光生伏打效应”。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载，则负载就有“光生电流”流过，从而获得电功率输出。

太阳能电池只要受到阳光或灯光的照射，就能够把光能转变为电能，太阳能电池可发出相当于所接收光能的 10% ~ 20% 的电。一般来说，光线越强，发出的电能就越多。为了使太阳能电池板最大限度地减少光反射，将光能转变为电能，一般在太阳能电池板的上面都蒙有一层可防止光反射的膜，从而使太阳能电池板的表面呈紫色。

## 1.1.2 太阳能光伏发电原理及优势

### 1. 太阳能光伏发电原理

光生伏打效应在液体和固体物质中都会发生，但是只有固体（尤其是半导体 PN 结器件）在太阳光照射下的光电转换效率较高。利用光生伏打效应原理制成晶体硅太阳能电池，可将太阳的光能直接转换成为电能。太阳能光伏发电的能量转换器是太阳能电池，又称光伏电池，是太阳能光伏发电系统的基础和核心器件。太阳能转换成为电能的过程主要包括 3 个步骤：

(1) 太阳能电池吸收一定能量的光子后，半导体内产生电子—空穴对，称为“光生载流子”，两者的电极性相反，电子带负电，空穴带正电。

(2) 电极性相反的光生载流子被半导体 PN 结所产生的静电场分离开。

(3) 光生载流电子和空穴分别被太阳能电池的正、负极收集，并在外电路中产生电流，从而获得电能。

太阳能光伏发电原理如图 1-1 所示。当光线照射太阳能电池表面时，一部分光子被硅材料吸收，光子的能量传递给硅原子，使电子发生跃迁，成为自由电子，在 PN 结两侧集聚形成电位差。当外部电路接通时，在该电压的作用下，将会有电流流过外部电路产生一定的输出功率。这个过程的实质是光子能量转换成电能的过程。

在太阳能发电系统中，系统的总效率  $\eta$  由太阳能电池组件的光电转换效率、控制器效率、蓄电池效率、逆变器效率及负载的效率等决定。目前，太阳能电池的光电转换效率只有 17% 左右。因此，提高太阳能电池组件的光电转换效率、降低太阳能光伏发电系统的单位功率造价，是太阳能光伏发电产业化的重点和难点。自太阳能电池问

世以来，晶体硅作为主要材料保持着统治地位。目前对硅太阳能电池转换效率的研究，主要围绕着加大吸能面（如采用双面电池减小反射）、运用吸杂技术和钝化工艺提高硅太阳能电池的转换效率、电池超薄型化等方面。

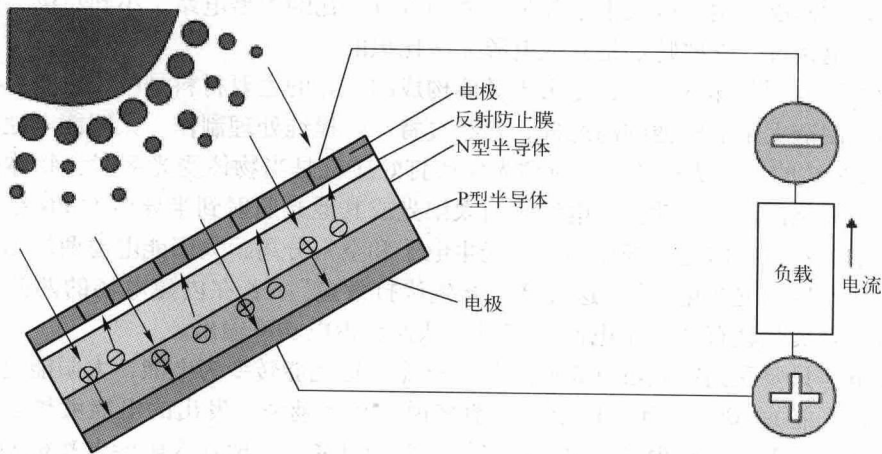


图 1-1 太阳能光伏发电原理

目前，太阳能光伏发电系统主要应用于以下 3 个方面。

- (1) 为无电场合提供电源，主要为广大无电地区居民生活生产提供电力，为微波中继站和移动电话基站提供电源等。
- (2) 太阳能日用电子产品，如各类太阳能充电器、太阳能路灯和太阳能草坪灯等。
- (3) 并网发电，在发达国家已经大面积推广实施，我国并网发电正在起步阶段。

## 2. 太阳能发电的优势

通过对生物质能、水能、风能和太阳能等几种常见新能源的对比分析，可以清晰地看出太阳能发电具有以下独特优势。

(1) 光伏发电具有经济优势。可以从两个方面看太阳能利用的经济性：一是太阳能取之不尽，用之不竭，而且在接收太阳能时不征收任何“税”，可以随地取用；二是在目前的技术发展水平下，有些太阳能的利用已具经济性。随着科技的发展以及人类开发利用太阳能技术的突破，太阳能利用的经济性将会更加明显。如果说 20 世纪是石油的世纪，那么 21 世纪则是可再生能源的世纪（太阳能的世纪）。

从太阳能光伏电站建设成本来看，随着太阳能光伏发电的大规模应用和推广，尤其是上游晶体硅产业和光伏发电技术的日趋成熟，建筑房顶、外墙等平台的复合开发利用，每千瓦太阳能光伏发电的建设成本在 2010 年可达到 7000 ~ 10000 元，相比其他可再生能源已具有同样的经济优势。

(2) 太阳能是取之不尽的可再生能源。根据计算，一年内到达地球表面的太阳能总量折合标准煤共约  $1.892 \times 10^{24}$  吨，是目前世界主要能源探明储量的 1 万倍。太阳的寿命至少尚有 40 亿年，相对于人类历史来说，太阳能可源源不断供给地球的时间可以说是无限的，这就决定了开发利用太阳能将是人类解决常规能源匮乏、枯竭的最有效途径。

(3) 对环境没有污染。太阳能像风能、潮汐能等洁净能源一样,其开发利用时几乎不产生任何污染,加之其储量的无限性,是人类理想的替代能源。由于传统化石燃料(煤、石油和天然气)在使用过程中排出大量的有毒有害物质,会对水、土壤和大气造成严重污染,形成温室效应和酸雨,严重危害人类的生存环境和身体健康,因此急需开发出新的比较清洁的替代能源,而太阳能作为一种比较理想的清洁能源,正受到世界各国的日益重视。

从目前各种发电方式的碳排放率( $\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ )来看,不计算其上游环节:煤发电为 $275\text{ g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,油发电为 $204\text{ g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,天然气发电为 $181\text{ g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,风力发电为 $20\text{ g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ,而太阳能光伏发电则接近零排放。并且,在发电过程中没有废渣、废料、废水、废气排出,没有噪声,不产生对人体有害的物质,不会污染环境。

(4) 能量转换环节最少。从能量转换环节来看,太阳能光伏发电是直接将太阳辐射能转换为电能,在所有可再生能源利用中,太阳能光伏发电的转换环节最少、利用最直接。一般来说,在整个生态环境的能量流动中,随着转换环节的增加、转换链条的拉长,能量的损失将呈几何级增加,并同时大大增加整个系统的建设、运行成本和不稳定性。目前,晶体硅太阳能电池的光电转换效率实用水平为 $15\%\sim 20\%$ ,实验室最高水平已达 $35\%$ 。

(5) 最经济、最环保。从资源条件尤其是土地占用来看,生物能、风能是较为苛刻的,而太阳能利用则很灵活。如果说太阳能光伏发电占用土地面积为1,风力则是太阳能的 $8\sim 10$ 倍,生物能则达到100倍。就水电而言,一个大型水坝的建成往往需要淹没数十平方公里到上百平方公里的土地。相比而言,太阳能发电不需要占用更多的土地,屋顶、墙面都可成为太阳能光伏发电利用的场所,还可利用我国广阔的沙漠,通过在沙漠上建造太阳能光伏发电基地,直接降低沙漠地带直射到地表的太阳辐射,有效降低地表温度,减小蒸发量,从而使植物的存活和生长在相当程度上成为可能,稳固并减少沙丘,又向大自然索取了所需的清洁可再生能源。

(6) 可免费使用且无须运输。人类可以通过专门的技术和设备将太阳能转化为热能或电能,就地加以利用,无须运输,为人类造福。而且人类利用太阳能这一取之不尽的能源也是免费的。虽然由于纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀,但相对于其他能源来说,太阳能对地球上绝大多数地区具有存在的普遍性,可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。



## 1.2 太阳能光伏发电系统

### 1.2.1 太阳能光伏发电系统的构成

太阳能光伏发电系统是利用太阳能电池组件和其他辅助设备将太阳能转换成电能的系统。一般将太阳能光伏发电系统分为独立系统、并网系统和混合系统。如果根据太阳能光伏发电系统的应用形式、应用规模和负载的类型,对太阳能光伏发电系统进行比较细致的划分,可将太阳能光伏发电系统分为如下几种类型:小型太阳能光伏发电系统,太阳能光伏发电简单直流系统,大型太阳能光伏发电系统,太阳能光伏发电交

流、直流供电系统，并网太阳能光伏发电系统，混合供电太阳能光伏发电系统，并网混合太阳能光伏发电系统。

独立太阳能光伏发电系统在自己的闭路系统内部形成电路，是通过太阳能电池组将接收来的太阳辐射能量直接转换成电能供给负载，并将多余能量经过充电控制器后以化学能的形式储存在蓄电池中。并网发电系统通过太阳能电池组将接收来的太阳辐射能量转换为电能，再经过高频直流转换后变成高压直流电，经过逆变器逆变后向电网输出与电网电压同频、同相的正弦交流电流。

### 1. 独立太阳能光伏系统的构成

太阳能光伏发电系统的规模和应用形式各异，如系统规模跨度很大，小到 0.3 ~ 2 W 的太阳能庭院灯，大到 MW 级的太阳能光伏电站；其应用形式也多种多样，在家用、交通、通信、空间等诸多领域都能得到广泛的应用。尽管光伏系统规模大小不一，但其组成结构和工作原理基本相同。独立的太阳能光伏系统由太阳能电池方阵、蓄电池组、控制器、DC/AC 变换器、用电负载构成。独立太阳能光伏系统构成如图 1-2 所示。

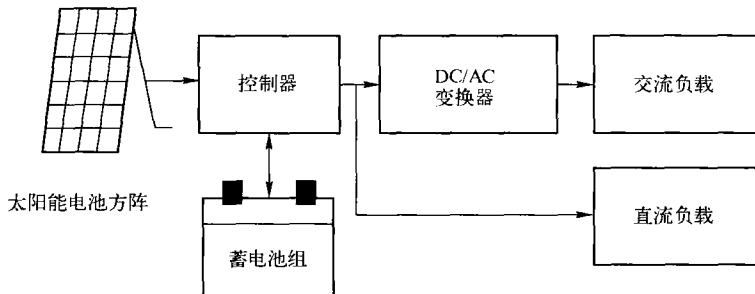


图 1-2 独立太阳能光伏系统构成

#### 1) 光伏组件方阵

在太阳能光伏发电系统中最重要的是太阳能电池，它是收集太阳光的核心组件。大量的太阳能电池组合在一起构成光伏组件方阵。太阳能电池主要分为晶体硅电池（包括单晶硅 Monoc-Si、多晶硅 Multi-Si、带状硅 Ribbon/Sheetc-Si）、非晶硅电池（a-Si）、非硅电池（包括硒化铜铟 CIS、碲化镉 CdTe）。太阳能电池的类型及特性见表 1-2。

表 1-2 太阳能电池的类型及特性

类 型	单 晶 硅	多 晶 硅	非 晶 硅
光电转换效率	12%~17%	10%~15%	6%~8%
使用寿命	15~20 年	15~20 年	5~10 年
平均价格	昂贵	较贵	较便宜
稳定性	好	好	差（会衰减）
颜色	黑色	深蓝	棕
主要优点	光电转换效率高、工作稳定，体积小	工作稳定，成本低。使用广泛	价低，弱光性好，多数用于计算器、电子表等
主要缺点	成本高	光电转换效率较低	光电转换效率最低，会衰减。相同功率的面积比晶体硅大 1 倍以上

出于技术和材料的原因,单一太阳能电池的发电量是十分有限的。实用中的太阳能电池是将若干单一电池经串联、并联组成的电池系统,称为电池组件。近年来,作为太阳能电池主流技术的晶体硅电池的原材料价格不断上涨,从而致使晶体硅电池的成本大幅攀升,这使得非晶硅电池成本优势更加明显。另外,薄膜电池(大大节约原材料使用,从而大幅降低成本)已成为太阳能电池的发展方向,但是其技术要求非常高。非晶硅薄膜电池作为目前技术最成熟的薄膜电池,是薄膜电池中最具有增长潜力的品种。

## 2) 蓄电池

蓄电池组是太阳能光伏发电系统中的储能装置,由它将太阳能电池方阵从太阳辐射能转换来的直流电转换为化学能储存起来,以供负载应用。由于太阳能光伏发电系统的输入能量极不稳定,所以一般需要配置蓄电池才能使负载正常工作。太阳能电池产生的电能以化学能的形式储存在蓄电池中,在负载需要供电时,蓄电池将化学能转换为电能供应给负载。蓄电池的特性直接影响太阳能光伏发电系统的工作效率、可靠性和价格。蓄电池容量的选择一般要遵循以下原则:首先在能够满足负载用电的前提下,把白天太阳能电池组件产生的电能尽量存储下来,同时还要能够存储预定的连续阴雨天时负载需要的电能。

蓄电池容量要受到末端负载需用电量 and 日照时间(发电时间)的影响。因此,蓄电池的安时容量由预定的负载需用电量和连续无日照时间决定。目前,太阳能光伏发电系统常用的是阀控密封铅酸蓄电池、深放电吸液式铅酸蓄电池等。

## 3) 控制器

控制器的作用是使太阳能电池和蓄电池高效、安全、可靠地工作,以获得最高效率并延长蓄电池的使用寿命。控制器对蓄电池的充、放电进行控制,并按照负载的电源需求控制太阳能电池组件和蓄电池对负载输出电能。控制器是整个太阳能发电系统的核心部分,通过控制器对蓄电池充放电条件加以限制,防止蓄电池反充电、过充电及过放电。另外,控制器还应具有电路短路保护、反接保护、雷电保护及温度补偿等功能。由于太阳能电池的输出能量极不稳定,对于太阳能发电系统的设计来说,控制器充、放电控制电路的质量至关重要。

控制器的主要功能是使太阳能发电系统始终处于发电的最大功率点附近,以获得最高效率。充电控制通常采用脉冲宽度调制技术(PWM控制方式),使整个系统始终运行于最大功率点 $P_m$ 附近区域。放电控制主要是指当蓄电池缺电、系统故障(如蓄电池开路或接反)时切断开关。目前研制出了既能跟踪调控点 $P_m$ ,又能跟踪太阳移动参数的“向日葵”式控制器,将固定太阳能电池组件的效率提高了50%左右。随着太阳能光伏产业的发展,控制器的功能越来越强大,有将传统的控制部分、变换器及监测系统集成的趋势,如AES公司的SPP和SMD系列的控制器就集成了上述三种功能。

## 4) DC/AC 变换器

在太阳能光伏发电系统中,如果含有交流负载,那么就要使用DC/AC变换器,将太阳能电池组件产生的直流电或蓄电池释放的直流电转化为负载需要的交流电。太阳能电池组件产生的直流电或蓄电池释放的直流电经逆变主电路的调制、滤波、升压后,得到与交流负载额定频率、额定电压相同的正弦交流电提供给系统负载使用。逆变器按激励方式,可分为自激式振荡逆变和他激式振荡逆变。逆变器具有电路短路保护、欠压保护、过流保护、反接保护及雷电保护等功能。逆变器种类及特点见表1-3。

表 1-3 逆变器种类及特点

种 类	方波逆变器	修正波逆变器	正弦波逆变器
交流电压波形	方波	阶梯波	正弦波
优点	线路简单, 价格便宜, 维修方便	比方波有明显改善, 高次谐波含量减少, 当阶梯达到 17 个以上时, 输出波形可实现准正弦波; 当采用无变压器输出时, 整机效率很高	输出波形好、失真度很低, 对收音机及通信设备的干扰小、噪声低, 此外还有保护功能齐全、整机性能高等优点
缺点	高次谐波多, 损耗大, 噪声大, 对收音机及通信设备干扰大	线路比较复杂, 对收音机和某些通信设备仍有一些高频干扰	线路相对复杂、对维修技术要求高、价格较昂贵

### 5) 用电负载

太阳能光伏发电系统按负载性质分为直流负载系统和交流负载系统, 其系统框图如图 1-3 所示。

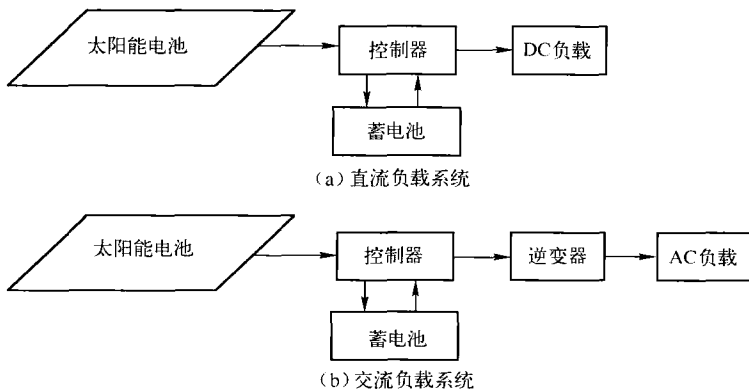


图 1-3 太阳能光伏发电直流和交流负载系统框图

独立光伏发电系统目前面临以下两个问题:

(1) 能量密度不大, 整体的利用效率较低, 前期的投资较大。

(2) 独立发电系统的储能装置一般以铅酸蓄电池为主, 蓄电池成本占太阳能光伏发电系统初始设备成本的 25% 左右, 若对蓄电池的充、放电控制比较简单, 容易导致蓄电池提前失效, 增加了系统的运行成本。蓄电池在 20 年的运行周期中占投资费用的 43%, 大多数蓄电池并不能达到设计的使用寿命, 除了蓄电池本身的缺陷和维护不到位外, 蓄电池运行管理不合理是导致蓄电池提前失效的重要原因。

因此对于独立太阳能光伏发电系统, 提高能量利用率, 研究科学的系统能量控制策略, 可以降低独立光伏系统的投资费用。

## 2. 并网太阳能光伏发电系统

并网太阳能光伏发电系统由光伏电池方阵、控制器、并网逆变器组成, 不经过蓄电池储

能,通过并网逆变器直接将电能输入公共电网。因直接将电能输入公共电网,故免除配置蓄电池,省掉蓄电池储能和释放的过程,减少能量损耗,节省其占用的空间及系统投资与维护,降低了成本;发电容量可以做得很大并可保障用电设备电源的可靠性。但是,由于逆变器输出与电网并联,所以必须保持两组电源电压、相位、频率等电气特性的一致性,否则会造成两组电源相互间的充、放电,引起整个电源系统的内耗和不稳定。

并网太阳能发电系统的主要组件是逆变器或电源调节器(PCU)。PCU把太阳能光伏发电系统产生的直流电转换为符合电力部门要求的标准交流电,当电力部门停止供电(如公共电网出现故障)时,PCU会自动切断电源。当太阳能光伏发电系统输出的电能超过系统负载实际所需的电量时,将多余的电能传输给公共电网。在阴雨天或夜晚,太阳能光伏发电系统输出的电能小于系统负载实际所需的电量时,可通过公共电网补充系统负载所需要的电量。同时也要保证在公共电网故障或维修时,太阳能光伏发电系统不会将电能馈送到公共电网上,以使系统运行稳定可靠。并网太阳能发电是太阳能光伏发电的发展方向,是21世纪极具潜力的能源利用技术。

并网运行的太阳能光伏发电系统,要求逆变器具有同公共电网连接的功能。并网太阳能光伏发电系统如图1-4所示。由于太阳能电池板安装的多样性,为了使太阳能的转换效率最高,要求并网逆变器具有多种组合运行方式,以实现最佳方式的太阳能转换。现在世界上比较通行的并网逆变器有:集中逆变器、组串逆变器、多组串逆变器和组件逆变器。

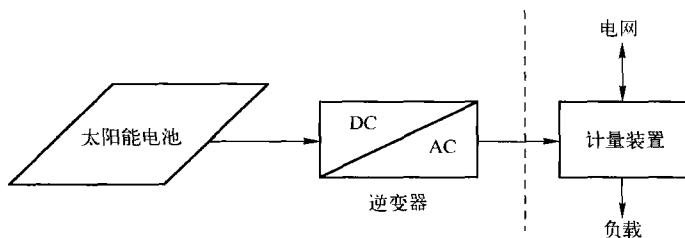


图1-4 并网太阳能光伏发电系统

### 1) 集中逆变器

集中逆变器一般用于大型太阳能光伏电站(大于10kW)中,很多并行的光伏组件被连到同一台集中逆变器的直流输入端,一般功率大的逆变器使用三相的IGBT功率模块,功率较小的逆变器使用场效应晶体管,同时使用具有DSP的控制器来控制逆变器输出电能的质量,使它非常接近于正弦波电流。集中逆变器的最大特点是系统的功率大、成本低。集中逆变式光伏发电系统受光伏组件的匹配和部分阴影的影响,使整个光伏发电系统的效率降低。同时,整个光伏发电系统的可靠性也受某一光伏单元组工作状态不良的影响。最新的研究方向是运用空间矢量调制控制技术,以及开发新的逆变器的拓扑连接,以获得集中逆变式光伏发电系统的高的效率。

Solar Max(索拉尔·马克斯)集中逆变器可以附加一个光伏阵列的接口箱,对每一光伏组件进行监控,如光伏阵列中有一光伏组件工作不正常,系统将会把这一信息传到远程控制器上,同时可以通过远程控制器让这一光伏组件停止工作,从而不会因为一光伏组件故障而降低和影响整个光伏系统的功率输出。



## 2) 组串逆变器

组串逆变器已成为现在国际市场上最流行的逆变器。组串逆变器以模块化为基础，每个光伏组串（1 ~ 5 kW）通过一个逆变器，在直流端具有最大功率峰值跟踪，在交流端与公共电网并网。许多大型太阳能光伏发电厂使用组串逆变器。组串逆变器的优点是不受组串间模块差异和遮影的影响，同时减少了光伏组件最佳工作点与逆变器不匹配的情况，从而增加了发电量。技术上的这些优势不仅降低了系统成本，也增加了系统的可靠性。同时，在组串间引入“主—从”概念，使系统在单组光伏组件不能满足单个逆变器工作的情况下，将几组光伏组件连在一起，让其中一个或几个组件工作，从而输出更多的电能。最新的概念为几个逆变器相互组成一个“团队”来代替“主—从”概念，进一步提高了系统的可靠性。目前，无变压器式组串逆变器已在太阳能光伏发电系统中占了主导地位。

## 3) 多组串逆变器

多组串逆变器利用集中逆变和组串逆变的优点，避免了其缺点，可应用于几千瓦的光伏发电站。在多组串逆变器中，包含了不同的单独的功率峰值跟踪和 DC/DC 转换器，这些直流电通过一个普通的逆变器转换成交流电与公共电网并网。光伏组串的不同额定值（如不同的额定功率、每个组串不同的组件数、组件的不同的生产厂家等）、不同的尺寸或不同技术的光伏组件、不同方向的组串（如东、南和西）、不同的倾角或遮影，都可以被连在一个共同的逆变器上，同时每一组串都工作在它们各自的最大功率峰值上。同时，可减小直流电缆的长度，将组串间的遮影影响和由于组串间的差异而引起的损失减到最小。

## 4) 组件逆变器

组件逆变器是将每个光伏组件与一个逆变器相连，同时每个组件有一个单独的最大功率峰值跟踪，使组件与逆变器的配合更好。通常用于 50 ~ 400 W 的光伏发电站，总效率低于组串逆变器。由于是在交流处并联，所以增加了逆变器交流侧接线的复杂性，使维护困难。另外，需要解决的是怎样更有效地与电网并网，简单的办法是直接通过普通的交流电插座进行并网，这样可以减少成本和设备的安装，但各地的电网的安全标准不允许这样做，电力公司禁止将发电装置直接和普通家庭用户的普通插座相连。

并网太阳能光伏发电系统的最大特点是，太阳能电池组件产生的直流电经过并网逆变器转换成符合市电网要求的交流电之后直接并入公共电网，不需配置蓄电池，可以充分利用光伏方阵所发的电能，从而减小能量的损耗，并降低系统的成本。但是，系统中需要专用的并网逆变器，以保证输出的电力满足电网对电压、频率等电性能指标的要求。因逆变器效率的问题，还是会有部分的能量损失。这种系统通常能够并行使用市电和太阳能光伏发电系统作为本地交流负载的电源，降低整个系统的负载缺电率，而且并网光伏系统可以对公用电网起到调峰作用。但并网太阳能光伏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一些不良的影响，如谐波污染、孤岛效应等。

# 1.2.2 太阳能光伏发电的发展及应用

## 1. 国际太阳能光伏发电技术的发展

早在 1839 年，法国科学家贝克雷尔（Becquerel）就发现，光照能使半导体材料的不同