

TAIYANGNENG GUANGFU XITONG SHEJI YU GONGCHENG SHILI

太阳能光伏系统设计 与工程实例

周志敏 纪爱华 等 编著



- 太阳能光伏技术的基础知识
- 光伏发电系统设备
- 光伏发电系统设计方法
- 典型工程设计实例



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TAIYANGNENG GUANGFU XITONG SHEJI YU GONGCHENG SHILI

太阳能光伏系统 设计与工程实例

周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合我国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,系统、全面地讲解了在太阳能光伏发电系统设计中,必备的基础知识和必须掌握的设计方法,书中选取了国内外太阳能光伏发电系统的典型应用实例,以供读者在实际的设计工作中参考。

全书共分7章,包括太阳能光伏技术基础知识、太阳能电池、光伏发电系统的蓄能装置、光伏发电系统控制器、光伏发电系统逆变器、光伏发电系统设计方法及实例、光伏发电系统雷电防护设计等内容。

本书内容丰富、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、应用的管理人员及相关专业高等院校、职业技术学院的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏系统设计与工程实例/周志敏等编著. —北京:
中国电力出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5123-9276-2

I. ①太… II. ①周… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 092065 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

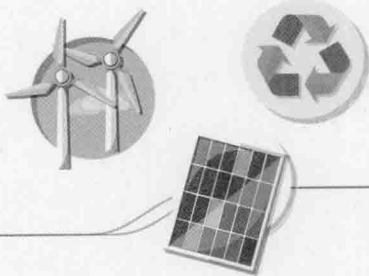
2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 12.5印张 320千字
印数 0001—2000册 定价 38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言



太阳能作为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,其应用领域已越来越广,普及率越来越高。据统计,我国有 2/3 以上国土面积的年日照时间在 2200h 以上,太阳能年辐射总量达 502 万 kJ/m^2 以上,这一丰富的资源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指的是太阳能光伏发电,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,这一举措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。

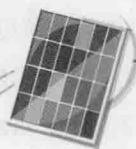
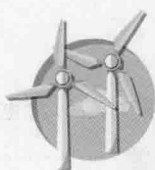
本书紧紧围绕我国节能减排工程计划和新能源开发利用的方针和宗旨,将太阳能光伏技术的基础知识,光伏发电系统设备,光伏发电系统设计方法和典型工程设计实例有机结合,在保证科学性的同时,尽量做到有针对性和实用性,并注重通俗性,是从事太阳能光伏发电系统设计、开发和应用的工程技术人员必备的参考书。读者可结合书中的典型应用实例的设计思路和设计方法,灵活地将其应用到太阳能光伏发电系统的实际设计工作中去。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平、陈爱华等。本书在写作过程中,无论从资料的收集和技术信息交流上,都得到了国内专业学者和太阳能光伏发电设备制造商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,作者水平有限,不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录



前言

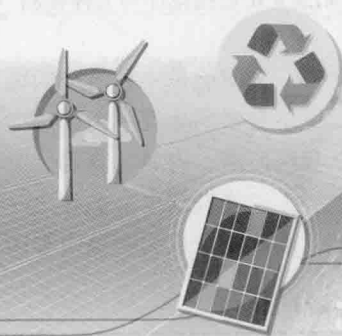
第1章 太阳能光伏技术基础知识	1
1.1 太阳能光伏发电系统	1
1.1.1 太阳能及光伏技术	1
1.1.2 太阳能光伏发电原理及优势	3
1.2 太阳能光伏发电系统构成及应用	5
1.2.1 太阳能光伏发电系统构成	5
1.2.2 太阳能光伏发电的发展及特点	10
第2章 太阳能电池	17
2.1 太阳能电池原理及发展	17
2.1.1 太阳能电池原理	17
2.1.2 晶体硅太阳能电池发展	23
2.2 太阳能电池的分类及组件	29
2.2.1 太阳能电池的分类	29
2.2.2 太阳能电池组件	35
第3章 光伏发电系统的蓄能装置	42
3.1 光伏发电蓄能技术及蓄电池	42
3.1.1 光伏发电系统中的蓄能技术	42
3.1.2 蓄电池	43
3.2 铅酸蓄电池分类及故障原理	45
3.2.1 铅酸蓄电池的分类及技术指标	45
3.2.2 铅酸蓄电池的工作原理	50
3.2.3 铅酸蓄电池的特性	53
3.3 VRLA 蓄电池的充放电特性	56
3.3.1 VRLA 蓄电池的充电特性	56

3.3.2 VRLA 蓄电池的放电特性	59
3.4 胶体铅酸蓄电池	61
3.4.1 胶体铅酸蓄电池的结构及优缺点	61
3.4.2 胶体铅酸蓄电池电解质的特征与特性	63
3.4.3 GFL-VRLA 蓄电池与 AGM-VRLA 蓄电池的比较	65
第 4 章 光伏发电系统控制器	69
4.1 光伏发电系统控制器工作原理及控制方式	69
4.1.1 光伏发电系统控制器工作原理及结构	69
4.1.2 光伏发电系统控制器的控制方式	73
4.2 光伏发电系统控制器选择及数据采集器	80
4.2.1 光伏发电系统控制器分类及选择	80
4.2.2 光伏发电系统数据采集器	82
第 5 章 光伏发电系统逆变器	84
5.1 光伏发电系统逆变器基本设计标准及选择	84
5.1.1 光伏逆变器的基本设计标准及主要指标	84
5.1.2 光伏发电系统逆变器选择	85
5.2 光伏发电系统对逆变器的要求及电路结构	87
5.2.1 离网光伏发电系统对逆变器的要求及电路结构	87
5.2.2 并网光伏发电系统对逆变器的要求及电路结构	95
5.3 光伏并网微逆变器设计要素及控制技术	101
5.3.1 微逆变器优点及设计要素	101
5.3.2 微逆变器拓扑及控制技术	102
5.3.3 BIPV 系统微逆变器解决方案	105
第 6 章 光伏发电系统设计方法及实例	107
6.1 光伏发电系统的设计要求及日照时数	107
6.1.1 光伏发电系统设计要求及影响设计的因素	107
6.1.2 全国各大城市标准日照时数及光伏发电系统设计要素	109
6.2 太阳能电池阵列及蓄电池组设计	111
6.2.1 太阳能电池阵列设计	111
6.2.2 蓄电池组设计	118

6.3 光伏发电系统设计方法	121
6.3.1 离网光伏发电系统设计方法	121
6.3.2 并网光伏发电系统设计方法	123
6.4 离网光伏发电系统工程设计实例	136
实例 1: 25W 离网光伏发电系统设计	136
实例 2: 25W 离网光伏发电系统设计	138
实例 3: 60W 离网光伏发电系统设计	138
实例 4: 90W 离网光伏发电系统设计	139
实例 5: 100W 离网光伏发电系统设计	140
实例 6: 25kW 离网光伏发电系统设计	140
6.5 并网光伏发电系统工程设计实例	142
实例 1: 10kW 并网光伏发电系统设计	142
实例 2: 50kW 并网光伏发电系统设计	144
实例 3: 60kW、100kW 并网光伏发电系统设计	148
实例 4: 300kW 并网光伏发电系统设计	150
实例 5: 1MW 并网光伏发电系统设计	158
实例 6: 2MW 并网光伏发电系统设计	165
实例 7: 10MW 并网光伏发电系统设计	170
第 7 章 光伏发电系统雷电防护设计	176
7.1 光伏发电系统雷电防护要求及工程设计	176
7.1.1 光伏系统雷电防护要求	176
7.1.2 光伏发电系统雷电防护工程设计	177
7.2 光伏发电系统防雷器	181
7.2.1 光伏发电系统防雷器特点及分类	181
7.2.2 光伏发电系统防雷器主要参数及安装	182
7.3 太阳能光伏系统防雷解决方案	183
7.3.1 光伏发电系统的浪涌过电压保护	183
7.3.2 建筑物中的光伏设备保护方案	185
参考文献	189

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。地球轨道上的平均太阳辐射强度为 $1367\text{kW}/\text{m}^2$ 。地球赤道的周长为 40000km ，从而可计算出，地球获得的能量可达 173000TW 。在海平面上的标准峰值强度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，地球表面某一点 24h 的年平均辐射强度为 $0.20\text{kW}/\text{m}^2$ ，相当于有 102000TW 的能量，人类依赖这些能量维持生存，其中包括所有其他形式的可再生能源（地热能资源除外）。虽然太阳能资源总量相当于现在人类所利用能源的一万 multiple 倍，但太阳能的能量密度低，而且它因地而异，因时而变，这是开发利用太阳能面临的主要问题。太阳能的这些特点会使它在整个综合能源体系中的作用受到一定的限制。

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是来源于太阳；即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等）从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能，所以广义的太阳能所包括的范围非常大，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，年辐照总量大于 $502\text{万 kJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数在 2000h 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，又无需运输，对环境无任何污染。太阳能的总量很大，我国陆地表面每年接受的太阳能就相当于 1700亿 t 标准煤，但十分分散，能流密度较低，到达地面的太阳能每平方米只有 1000W 左右。同时，地面上太阳能还受季节、昼夜、气候等影响，时阴时晴，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，我国早在两千多年前的战国时期就知道利用铜制四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以下三大优点：

(1) 它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、内蒙古高原的总辐射量和日照时数均为全国最高，属世界太阳能资源丰富地区之一；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、南部及东北为资源中等区。各地区太阳能资源概况见表 1-1。

表 1-1

各地区太阳能资源概况

类型	地区	年照时间数/h	年辐射总量/千卡（cm ² ·年）
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当中，大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，利用太阳能发电时将太阳光直接转换成电能，它必须借助于能量转换器才能转换成为电能。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，设计和建设独立和并网的光—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热能转换成工质蒸汽，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，其发电流程与普通的火力发电一样。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 1000MW 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，为此，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变成电能，在外电路上产生电流。当许多个电池串联或并联起来就可构成比较大输出功率的太阳能电池方阵。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。太阳能电池寿命长，只要太阳存在，太阳能电池就可以一次投资而长期使用；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。

太阳能电池是由半导体材料构成的。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,要经过特殊的提纯及处理。太阳能电池的工作原理是半导体 PN 结的光生伏特效应,所谓光生伏特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的一种效应。当太阳光或其他光照射半导体的 PN 结时,产生光生电子—空穴对,在太阳能电池内建电场作用下,光生电子和空穴分离,太阳能电池两端出现异号电荷的积累,即产生“光生电压”,这就是“光生伏特效应”。若在内建电场的两侧引出电极并接上负载,则负载就有了“光生电流”流过,从而获得功率输出。

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上一层可防止光反射的膜,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

光生伏特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。利用光生伏特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,光子的能量传递给了硅原子,使电子发生了越迁,成为自由电子在 P-N 结两侧集聚形成了电位差,当外部接通电路时,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。

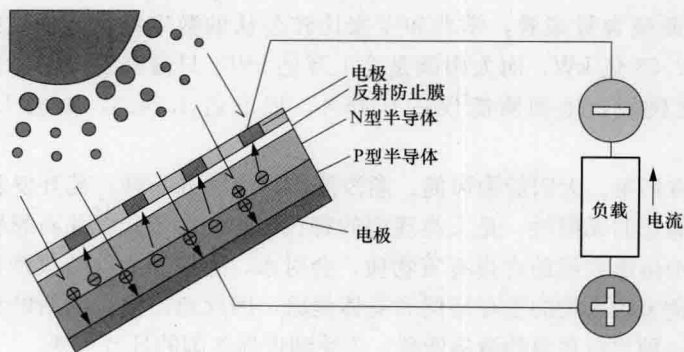


图 1-1 太阳能光伏发电原理

在太阳能光伏发电系统中,系统的总效率 η 由太阳能电池组件的光电转换率、控制器效率、

蓄电池效率、逆变器效率及负载的效率等组成。目前太阳能电池的光电转换率只有 17% 左右。因此提高太阳能电池组件的光电转换率,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。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。目前对硅电池转换率的研究,主要围绕着加大吸能面,如双面电池,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化效率;电池超薄型化等。目前,太阳能光伏发电系统主要应用于三大方面:

(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,还有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,我国太阳能光伏并网发电系统正在起步阶段。

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,可以清晰地得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的技术突破,太阳能利用的经济性将会更加明显。如果说 20 世纪是石油世纪的话,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 2015 年可达到 5000 元~1 万元,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,可利用量巨大。太阳每秒钟放射的能量大约是 $1.6 \times 10^{23} \text{ kW}$,其中到达地球的能量高达 $8 \times 10^{13} \text{ kW}$,相当于 $6 \times 10^9 \text{ t}$ 标准煤。按此计算,一年内到达地球表面的太阳能总量折合标准煤共约 1.892×10^{13} 千亿 t,是目前世界主要能源探明储量的一万倍。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。从我国可开发的资源蕴含量来看,学者和专家比较公认的数字是:生物质能 1 亿 kW,水电 3.78 亿 kW,风电 2.53 亿 kW,而太阳能是 2.1 万亿 kW,只需开发太阳能资源的 1% 即达到 210 亿 kW;从其比例看,生物质能仅占 0.46%,风电占 1.74%,水电 1.16%,而光电为 96.64%。

(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,严重危害到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来看,不计算其上游环节:煤电为 275g,油发电为 204g,天然气发电为 181g,风力发电为 20g,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,不产生对人体有害物质,不会污染环境。

(4) 转换环节最少最直接。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,是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和运行成本和不稳定性。目前,晶体硅太阳能电池的转换效率实用水平在15%~20%,实验室水平最高目前已达35%。

(5) 最经济、最清洁、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,而太阳能则很灵活和广泛的。如果说太阳能光伏发电要占用土地面积为1的话,风力则是太阳能的8~10倍,生物能则达到100倍。而水电,一个大型水坝的建成往往需要淹没数十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,减少蒸发量,进而使植物的存活和生长在相当程度上成为可能,稳固并减少了沙丘,又向自然索取了需要的清洁可再生能源。

(6) 可免费使用,且无需运输。人类可以通过专门的技术和设备将光能转化为热能或电能,就地加以利用,无需运输,为人类造福。而且人类利用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辐射的不均匀,但相对于其他能源来说,太阳能对于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构成及应用

1.2.1 太阳能光伏发电系统构成

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,太阳能光伏发电直流供电系统,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. 独立太阳能光伏发电系统构成

太阳能光伏发电系统的规模和应用形式各异,系统规模跨度很大,小到0.3~2W的太阳能庭院灯,大到兆瓦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。尽管光伏发电系统规模大小不一,但其组成结构和工作原理基本相同。独立的太阳能发电光伏系统由太阳能电池方阵;蓄电池;控制器;DC/AC变换器;用电负载构成。独立太阳能光伏发电系统构成如图1-2所示。

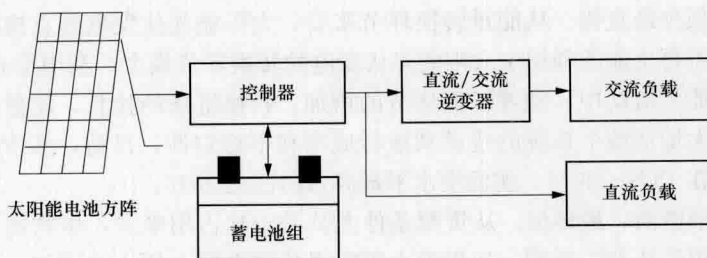


图 1-2 独立太阳能光伏发电系统构成

(1) 光伏组件方阵。在太阳能光伏发电系统最重要的是太阳能电池，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或太阳能电池光伏组件方阵。太阳能电池主要划分为：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（包括硒化铜钢 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
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	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	转换效率较低	转换效率最低，会衰减，相同功率的面积比晶体硅大一倍以上

由于技术和材料原因，单一太阳能电池的发电量是十分有限的，实用中是将单一太阳能电池经串、并联组成的太阳能电池组件。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，而非晶硅薄膜电池作为目前技术最成熟的薄膜电池，是目前薄膜电池中最富增长潜力的品种。

(2) 蓄电池。蓄电池组是离网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用电负载需要的电能。

蓄电池容量受到末端负载用电量，日照时间（发电时间）的影响。因此蓄电池瓦时容量和安时容量由预定的负载用电量和连续无日照时间决定，因此蓄电池的性能直接影响着太阳能光

光伏发电系统的工作特性。目前离网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，并按照负载的用电需求控制太阳能电池组件和蓄电池对负载输出电能，是整个太阳能光伏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，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，对于太阳能光伏发电系统的设计来说，控制器充放电控制电路的性能至关重要。

控制器的主要功能是使太阳能光伏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。而充电控制通常采用脉冲宽度调制技术，即 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、变换器以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用电负载使用。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。离网光伏发电系统目前面临以下两个问题：

1) 能量密度不高，整体的利用效率较低，前期的投资较大。

2) 离网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，若对于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。

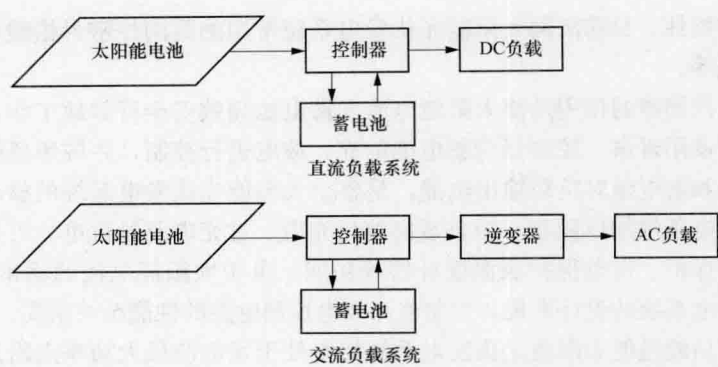


图 1-3 太阳能光伏发电直流和交流负载系统框图

因此对于离网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，可以降低离网光伏发电系统的投资费用。

2. 并网光伏发电系统

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馈入公共电网。因直接将电能输入电网，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费用，降低了成本；另一方面，发电容量可以做得很大并可保障用电设备电源的可靠性。但由于逆变器输出与电网并联，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。

太阳能并网光伏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时或公共电网故障时，PCU 会自动切断电源。在并网光伏发电系统交流输出与公共电网的并网点设置并网屏，当并网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。当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。太阳能并网发电是太阳能光伏发电的发展方向，代表 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，要求逆变器具有同电网连接功能，并网型光伏发电系统的优点是可以省去蓄电池，而将电网作为自己的储能单元，太阳能光伏发电并网系统如图 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太阳能逆变方式为：集中逆变器、组串逆变器，多组串逆变器和组件逆变。

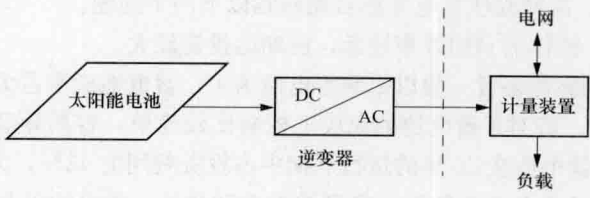


图 1-4 太阳能光伏发电并网系统

(1) 集中逆变器。集中逆变器一般用于大型太阳能光伏电站中 ($>10\text{kW}$)，很多并行的光伏组串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 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高，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遮影的影响，使整个光伏发电系统的效率下降。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，以及开发新的逆变器拓扑连接，以获得集中逆变式光伏发电系统的高效率。

Solar Max (索瑞·麦克) 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将这一光伏组件停止工作，从而不会因为这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，组串逆变器是基于模块化基础，每个光伏组串 ($1\sim5\text{kW}$) 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，使得系统在单组光伏组件不能满足单个逆变器工作的情况下，将几组光伏组件联在一起，让其中一个或几个组件工作，从而产出更多的电能。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，使得系统的可靠性又进了一步。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，包含了不同功率峰值跟踪的 DC/DC 转换器，转换后的直流通过一个普通的直流到交流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)、不同的倾角或遮影光伏组件，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。同时可减少直流电缆的长度、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，这样组件与逆变器的配合更好。通常用于 $50\sim400\text{W}$ 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，这就增加了逆变器交流侧接线的复杂性，维护困难。另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接入点进行并网，这样就可以减少成本和设备的安装，但各地的电网的安全标准也许不允许这样做，电力公司有可能反对发电装置直接和普通家庭用户的交流接入点相连。另一和安全有关的因素是是否需要使用隔离变压器 (高频或低频)，或允许使用无变压器式的逆变器。

并网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电网要求的交流电之后直接并入公共电网，在并网系统中，太阳能光伏电池方阵所产生电能除了供给系统内的交流负载外，多余的电力反馈给电网。在阴雨天或夜晚，太阳能电池组件没有产生电能或产生的电能不能满足负载需求时则由电网给系统内的负载供电。因为直接将电能输入电网，免除配置蓄电池，省掉了蓄电池储能和释放的过程，可以充分利用光伏电池方阵

所发的电能,从而减小了能量的损耗,并降低了系统的成本。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。因为逆变器效率的问题,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,降低了整个系统的负载缺电率。而且并网光伏发电系统可以对公用电网起到调峰作用。但并网光伏发电系统作为一种分布式发电系统,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特点

1. 太阳能光伏发电技术的发展

(1) 国外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部位之间产生电位差。这种现象后来被称为“光生伏特效应”,简称“光伏效应”。1954 年,美国科学家恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室首次制成了实用的单晶硅太阳能电池,诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。

20 世纪 70 年代后,随着现代工业的发展,全球能源危机和大气污染问题日益突出,传统的燃料能源正在一天天减少,对环境造成的危害日益突出,同时全球约有 20 亿人得不到正常的能源供应。这个时候,全世界都把目光投向了可再生能源,希望可再生能源能够改变人类的能源结构,维持长远的可持续发展,太阳能以其独有的优势而成为人们重视的焦点。丰富的太阳辐射能是重要的能源,是取之不尽、用之不竭的、无污染、廉价、人类能够自由利用的能源。太阳能每秒钟到达地面的能量高达 80 万 kW,假如把地球表面 0.1% 的太阳能转为电能,转变率 5%,每年发电量可达 5.6×10^{12} kWh。正是由于太阳能的这些独特优势,20 世纪 80 年代后,太阳能电池的种类不断增多、应用范围日益广阔、市场规模也逐步扩大。

20 世纪 90 年代后,光伏发电技术快速发展,到 2006 年,世界上已经建成了多座 MW 级光伏电站。美国是最早制定光伏发电发展规划的国家。1997 年又提出“百万屋顶”计划。日本于 1992 年就启动了新阳光计划,到 2003 年日本光伏组件生产占世界的 50%,世界前 10 大厂商有 4 家在日本。而德国新的可再生能源法规定了光伏发电上网电价,大大推动了光伏市场和产业发展,使德国成为继日本之后世界光伏发电发展最快的国家。瑞士、法国、意大利、西班牙、芬兰等国,也纷纷制定光伏发电发展计划,并投巨资进行技术开发和加速工业化进程。

世界光伏组件在 1990~2005 年年平均增长率约 15%,20 世纪 90 年代后期,发展更加迅速,1999 年光伏组件生产达到 200MW。商品化太阳能电池效率从 10%~13% 提高到 13%~15%,生产规模从 1~5MW/年发展到 5~25MW/年,并正在向 50MW 甚至 100MW 扩大,光伏组件的生产成本降到 3 美元/W 以下。

国际上目前很难确定那一种太阳能电池是最佳选择,虽然目前晶体硅电池销量最大,但大家公认今后薄膜电池最具有潜力。另外,不同太阳能电池的特性各不相同,在光伏市场中各有其不同的应用领域,例如非晶硅电池主要应用在商用电子方面,多晶硅电池主要用于光伏屋顶,单晶硅电池主要应用在高功率领域。最近几年国际上对多晶硅薄膜电池的研究较活跃,但采用哪种工艺方案较佳,尚难断定。近几年有机纳米太阳能电池的效率有较大提高,受到一定的关注。

光伏产品在国际上的四个主要市场是:消费性产品(14%);离网的居民供电系统(35%);离网的工业供电系统(33%);并网光伏系统(18%)。发达国家近几年来主要开拓的市场是屋顶式并网发电系统。其原因是发达国家的电网分布已很密集,并网发电不用蓄电池,电网峰值