

光伏发电系统设计与应用

丁男菊 朱 芳 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

光伏发电系统设计与应用

主 编 丁男菊 朱 芳
副主编 钱 颖 杜 亮
蒋 鹏 李 伟



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书根据光伏发电应用系统的构成,展开章节内容,主要内容包括:太阳能光伏发电的基础知识;太阳能光伏发电系统的工作原理;太阳能电池的原理、测量、使用;蓄电池的原理、使用;光伏控制器与逆变器的原理、制作、分类、使用;光伏发电系统的设计与维护。

本书可作为光伏发电、新能源类专业的高职学生的专业教材,也可作为光伏系统及电站的设计、应用及维护技术人员的参考、培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电系统设计与应用/丁男菊,朱芳主编. —

上海:上海交通大学出版社,2018

ISBN 978-7-313-20763-0

I. ①光… II. ①丁… ②朱… III. ①太阳能光伏发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 289796 号

光伏发电系统设计与应用

主 编:丁男菊 朱 芳

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:上海盛通时代印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:189 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-20763-0/TM

定 价:39.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:8.5

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-37910000

前 言

能源对当今社会的发展是一个极其敏感的话题,21世纪世界能源的枯竭将成为人类发展的巨大障碍,而太阳能则是可以解决问题的首选。无污染、无噪声、无运输、无成本,取之不尽,用之不竭,太阳能是真正安全、清洁、廉价、和平的可再生能源。人类对太阳能的早期利用主要是光和热。光伏发电技术的出现为太阳能利用开辟了广阔的领域。

光伏发电系统通过太阳能电池将太阳辐射能转换为电能,太阳能光伏发电系统的应用形式多种多样,应用规模跨度也很大,从太阳能草坪灯到大型光伏电站,其组成结构和工作原理基本相同。它的主要部件是太阳能电池、蓄电池、控制器和逆变器,其特点是可靠性高、使用寿命长、不污染环境、能独立发电又能并网运行,受到各国企业和组织的青睐,具有广阔的发展前景。

太阳能发电的利用通常有两种方式,一种是将太阳能发电系统所发出的电力输送到电网中供给其他负载使用,而在需要用电的时候从电网中获取电能,称为并网光伏发电方式。另一种是依靠蓄电池来进行能量存储的所谓离网独立发电方式,它主要用于因架设线路困难市电无法到达的场合,应用十分广泛。

白天,在光照条件下,太阳能电池组件产生一定的电动势,通过组件的串并联形成太阳能电池方阵,使得方阵电压达到系统输入电压的要求。再通过充放电控制器对蓄电池进行充电,将由光能转换而来的电能贮存起来。晚上,蓄电池组为逆变器提供输入电,通过逆变器的作用将直流电转换成交流电,输送到配电柜,由配电柜的切换作用进行供电。蓄电池组的放电情况由控制器进行控制,保证蓄电池的正常使用。光伏电站系统还配有限荷保护和防雷装置,以保护系统设备的过载运行及免遭雷击,维护系统设备的安全使用。

本书根据光伏发电应用系统的构成展开章节内容,主要包括太阳辐射和光伏发电系统基础知识,太阳能电池检测及应用,光伏控制器的制作及应用,光伏逆变器的制作及应用,光伏发电系统设计及维护等内容。

太阳能发电作为洁净的和未来最有希望的发电方式之一,越来越受到人们的重视,光伏技术发展潜力十分巨大,新的教学理念和教学方法也需要不断发展和创新。由于编者水平有限,本书存在的不足之处,敬请读者批评指正。

丁男菊

2018. 7. 19

目 录

绪论 太阳辐射和光伏发电系统基础知识	(1)
0.1 太阳能与太阳辐射	(1)
0.1.1 太阳能	(1)
0.1.2 太阳辐射	(2)
0.1.3 我国丰富的太阳能辐射资源	(4)
0.1.4 太阳能的利用	(4)
0.2 光伏发电技术	(5)
0.2.1 光伏产业发展现状及前景	(6)
0.2.2 中国光伏市场和产业发展状况	(8)
0.2.3 光伏在农村电气化和并网发电上的市场潜力	(10)
0.3 太阳能光伏发电系统的工作原理	(12)
0.4 太阳能光伏发电系统的运行方式	(13)
0.5 太阳能光伏发电系统的组成	(14)
0.5.1 独立太阳能光伏发电系统的组成	(14)
0.5.2 并网太阳能光伏发电系统的组成	(17)
0.5.3 安全保护及“孤岛效应”防护手段	(20)
项目1 太阳能电池检测及应用	(23)
1.1 项目任务	(23)
1.1.1 电路构成	(23)
1.1.2 组装	(24)
1.1.3 应用实验	(25)
1.1.4 光伏片测量	(26)
1.2 知识链接	(26)
1.2.1 太阳能电池	(26)
1.2.2 太阳能电池的分类	(32)
1.2.3 太阳能电池组件	(37)
1.3 知识拓展	(40)
1.3.1 太阳能电池方阵组合的计算	(40)
1.3.2 太阳能电池组件规格及参数	(41)
1.3.3 太阳能电池方阵的组成	(43)
项目2 光伏控制器的制作及应用	(46)
2.1 项目任务	(46)

2.1.1	电路功能	(46)
2.1.2	硬件电路设计	(47)
2.1.3	软件设计	(49)
2.1.4	制作与调试	(49)
2.1.5	参考程序	(52)
2.2	知识链接	(56)
2.2.1	光伏控制器的工作原理	(56)
2.2.2	控制器的分类	(58)
2.2.3	控制器的技术参数	(62)
2.3	知识拓展	(64)
2.3.1	控制器的参数检测	(64)
2.3.2	光伏控制器的配置选型	(66)
2.3.3	SR-2L 系列太阳能光伏智能控制器	(67)
2.3.4	蓄电池的选型	(69)
2.3.5	VRLA 蓄电池的充电特性	(75)
2.3.6	蓄电池的使用和维护	(77)
项目 3	光伏逆变器的制作及应用	(84)
3.1	项目任务	(84)
3.1.1	电路工作原理	(84)
3.1.2	元器件选择	(87)
3.1.3	安装与调试	(88)
3.1.4	逆变器的主要参数测试	(89)
3.2	知识链接	(89)
3.2.1	逆变器概述	(89)
3.2.2	逆变器的工作原理	(90)
3.2.3	逆变器的分类	(93)
3.2.4	光伏逆变器重要技术指标及技术参数	(94)
3.3	知识拓展	(97)
3.3.1	逆变器的选型	(97)
3.3.2	逆变器的操作要点	(104)
项目 4	光伏发电系统设计及维护	(105)
4.1	项目任务	(105)
4.1.1	光伏发电系统设计概述	(105)
4.1.2	光伏系统容量设计	(106)
4.2	知识拓展	(120)
4.2.1	太阳能光伏发电系统的检查测试	(120)
4.2.2	太阳能光伏发电系统的运行维护	(123)
4.2.3	太阳能光伏发电系统的故障排除	(125)
参考文献	(128)

绪论 太阳辐射和光伏发电系统基础知识



知识要求

- (1)了解太阳能的基本性质及相关概念。
- (2)熟悉太阳能光伏技术的发展情况。
- (3)熟悉太阳能光伏系统的工作原理、分类和组成。

0.1 太阳能与太阳辐射

对于人类而言,太阳是非常重要的一颗恒星,为人类提供了光和热。太阳高温、高压,蕴藏着巨大的能量,不断地向宇宙发射光线和热量,太阳是人类重要的无污染新型能源。当太阳光线到达地球时,一小部分被大气吸收,绝大部分可以直接照射到地球的表面。地球的自转、季节、气候条件和大气层成分等因素,都对地球上接收到的太阳能产生影响,也就是说在地球上不同地区受到的光照是不同的,我国的西藏自治区是地球上太阳能最丰富的地区之一。

0.1.1 太阳能

太阳是距离地球最近的恒星,直径约为 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$,是地球直径的 109 倍,而它的体积和质量分别是地球的 130 万倍和 33 万倍。它是由炽热气体构成的一个巨大球体,中心温度约 10^7 K ,表面温度接近 5800 K ,主要由氢和氦组成,其中氢占 80%,氦占 19%。

太阳内部处于高温、高压状态,不停地进行着热核反应,由氢聚变成氦。据测算,每秒约有 $6 \times 10^{11} \text{ kg}$ 的氢转变为氦,净质量亏损约为 $4 \times 10^3 \text{ kg}$,根据爱因斯坦相对论,通过热核反应,质量可以转化为能量,其公式为

$$E=mc^2 \quad (0-1)$$

式中: m 为物质的质量; c 为真空中的光速($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

在进行热核反应时,生成大量的能量,由式(0-1)可知,1g 物质可转化为约 $9 \times 10^3 \text{ J}$ 的能量。巨大的能量不断从太阳向宇宙辐射,达到 $3.6 \times 18^{20} \text{ MW/s}$,其中约

22 亿分之一投射到地球上,经过大气层的反射、散射和吸收,约有 70% 的能量辐射到地面。尽管太阳能只有很少的一部分辐射到地面,但数量仍然是巨大的,每年辐射到地球表面的太阳能约为 $1.8 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 等于 1.3×10^6 亿吨标准煤,是地球年耗能量的几万倍。按照目前太阳质量损耗的速率,太阳的热核反应可进行 6×10^{10} 年。

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。但太阳能也有两个主要缺点:一是能流密度低;二是其强度受各种因素(季节、地点、气候等)的影响而不能维持常量。这两大缺点大大限制了太阳能的有效利用。

人类早已利用铜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。总之,严格地说,除了地热能和原子核能以外,地球上的所有其他能源全部来自太阳能。这也称为“广义太阳能”,以便与仅指太阳辐射能的“狭义太阳能”相区别。

“狭义太阳能”是各种可再生能源中最重要的基本能源,也是人类可利用的最丰富的能源。按目前太阳的质量消耗速率计,可维持 6×10^{10} 年,所以可以说它是“取之不尽,用之不竭”的能源。但如何合理利用太阳能,降低其开发和转化的成本,是新能源开发中面临的重要问题。

0.1.2 太阳辐射

当太阳光照射到地球时,一部分光线被反射或散射,一部分光线被吸收,只有约 70% 的光线能透过大气层,以直射光或散射光的形式到达地球表面。到达地球表面的太阳光一部分被表面物体所吸收,另外一部分又被反射回大气层。

在地球大气层之外,地球与太阳平均距离处,垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射能基本上为一个常数。这个辐射强度称为太阳常数,或称此辐射是大气质量为零(AM 0)的辐射,取值 $(1.367 \pm 0.007) \text{ kW/m}^2$ 。

阳光穿过地球大气层时,至少衰减了 30%。造成衰减的原因如下。

(1)瑞利散射或大气中的分子散射。这种散射对所有波长的太阳光都有衰减作用,但对短波长的光衰减最大。

(2)悬浮微粒和灰尘引起的散射。

(3)大气,特别是其组成气体——氧气、臭氧、水蒸气和二氧化碳的吸收。

晴天,决定总入射功率的最重要的参数是光线通过大气层的路程。太阳在头顶正上方时,路程最短。光线通过大气层的实际路程和此最短路程之比称为光学大气质量。用 AM 表示,定义为

$$AM = \frac{b}{b_0} = \sec Z \quad (0-2)$$

式中： b_0 为大气厚度； b 为太阳光以天顶角 Z 斜入射时通过大气的距离； Z 为太阳天顶角。

太阳光入射地球表面如图 0-1 所示。

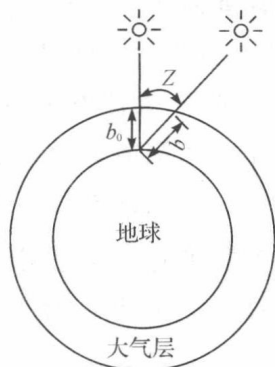


图 0-1 太阳光入射地球表面示意图

当 $Z=0$ 时, $AM=1$, 称大气质量为 1, 用 AM 1 表示。当 $Z=48.2^\circ$, $AM=1.5$; $Z=60^\circ$, $AM=2$; 分别用 AM 1.5 和 AM 2 表示大气质量为 1.5 和 2。AM 1.5 是指典型晴天时太阳光照射到一般地面的情况, 其辐射总量为 $1\text{kW}/\text{m}^2$, 常用于太阳能电池和组件效率测试时的标准。

如图 0-2 所示中, 最下面的线表示到达地球表面的阳光的典型光谱分布, 同时表示与分子吸收有关的吸收带。图中显示出 AM 0 和 AM 1.5 辐射的光谱分布, 还显示出假定太阳是 6 000K 的黑体时所预期的太阳辐射的光谱分布。

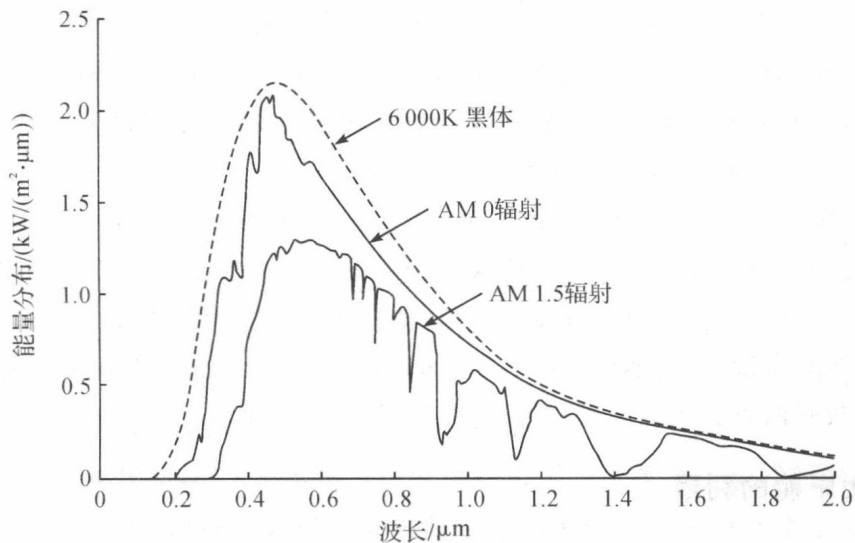


图 0-2 太阳光谱分布图

0.1.3 我国丰富的太阳能辐射资源

气候学家根据太阳辐射在纬度间的差异,将世界划分为4个气候带,其名称和范围是:赤道带位于北纬 $10^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 和南纬 $0^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 之间,热带位于纬度 10° 至回归线(23.5°),温带位于回归线至极圈($23.5^{\circ}\sim 66.5^{\circ}$),寒带位于极圈以内($66.5^{\circ}\sim 90^{\circ}$)。在中国,气象部门将热带气候进一步分为南热带、中热带、北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带。

世界太阳能资源分布情况如下。太阳能资源丰富程度最高地区为:印度与巴基斯坦、中东、北非、澳大利亚和新西兰;而太阳能资源丰富程度中高地区为美国、中美和南美地区;太阳能资源丰富程度中等地区为:西南欧洲、巴西、东南亚、大洋洲、中国、朝鲜和中非;太阳能资源丰富程度中低地区为:东欧和日本;太阳能资源丰富程度最低地区为加拿大与西北欧洲。

我国是世界上太阳能最丰富的地区之一,特别是西部地区,年日照时间达3 000h以上。太阳能分布最丰富的是青藏高原地区,可与地球上最好的印巴地区相媲美。全国2/3以上地区的年日照大于2 000h,年均辐射量约为 $5\,900\text{MJ}/\text{m}^2$ 。青藏高原、内蒙古、宁夏、陕西等西部地区光照资源尤为丰富,而我国无电地区大多集中于此。我国各地区的太阳能资源分布如下。

(1)资源丰富带:全年辐射量在 $6\,700\sim 8\,370\text{MJ}/\text{m}^2$ (约等于 $1\,861\sim 2\,325\text{kWh}/\text{m}^2$),相当于230kg标准煤燃烧所发出的热量。主要包括青藏高原、甘肃北部、宁夏北部、新疆南部、河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部等地。

(2)资源较富带:全年辐射量在 $5\,400\sim 6\,700\text{MJ}/\text{m}^2$ (约等于 $1\,500\sim 1\,860\text{kWh}/\text{m}^2$),相当于180~230kg标准煤燃烧所发出的热量。主要包括山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏中北部和安徽北部等地。

(3)资源一般带:全年辐射量在 $4\,200\sim 5\,400\text{MJ}/\text{m}^2$ (约等于 $1\,167\sim 1\,500\text{kWh}/\text{m}^2$)。相当于140~180kg标准煤燃烧所发出的热量。主要是长江中下游、福建、浙江和广东的一部分地区,春夏多阴雨,秋冬季太阳能资源还可以。

(4)资源贫乏带:全年辐射量在 $4\,200\text{MJ}/\text{m}^2$ (约等于 $1\,167\text{kWh}/\text{m}^2$)以下。主要包括四川、贵州两省。该地区是我国太阳能资源最少的地区。

0.1.4 太阳能的利用

太阳能利用的基本方式可以分为以下四大类。

1. 光热利用

它的基本原理是将太阳辐射能收集起来,通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。目前使用最多的太阳能收集装置,主要有平板型集热器、真空管集热器和聚

焦型集热器等三种。通常根据所达到的温度和用途的不同,而把太阳能光热利用分为低温利用($<200^{\circ}\text{C}$)、中温利用($200\sim 800^{\circ}\text{C}$)和高温利用($>800^{\circ}\text{C}$)。目前低温利用主要有太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能蒸馏器、太阳房、太阳能温室、太阳能空调制冷系统等,中温利用主要有太阳灶、太阳能热发电聚光集热装置等,高温利用主要有高温太阳炉等。

2. 太阳能发电

未来会大规模利用太阳能发电。利用太阳能发电有多种方式,目前已实际利用的主要有以下两种:一是光-热-电转换。即利用太阳辐射所产生的热能发电。一般是用太阳能集热器将所吸收的热能转换为工质的蒸汽,然后由蒸汽驱动汽轮机带动发电机发电。前一个过程是光-热转换,后一个过程是热-电转换。二是光-电转换。其基本原理是利用光生伏特效应将太阳辐射能直接转换为电能,它的基本装置是太阳能电池。

3. 光化学利用

这是一种利用太阳辐射能直接分解水制氢的光-化学转换方式。

4. 光生物利用

通过植物的光合作用来实现将太阳能转换为生物质能的过程。目前主要有速生植物(如薪炭林)、油料作物和巨型海藻等。本书主要介绍太阳能发电中的光伏利用。

0.2 光伏发电技术

从 1839 年法国科学家贝克勒尔(E. Becquerel)发现液体的光生伏特效应算起,太阳能电池已经经历了 160 多年漫长的发展。从总的发展来看,基础研究和科技进步都起到了积极推进的作用。对太阳能电池的实际应用起到决定性作用的是 1954 年美国贝尔实验室的 3 位科学家关于单晶硅太阳能电池的研制成功,这在太阳能电池发展史上具有里程碑的作用,因为它是第一个能以适当效率将光能转化为电能的光伏装置,所以它的出现标志着太阳能电池研制工作的重大进展。早在 1958 年,这种电池就用作宇宙飞船的电源。到 20 世纪 60 年代初,供空间应用的电池的设计已经成熟,此后十多年,太阳能电池主要用于空间技术。

20 世纪 70 年代初,硅太阳能电池的发展经历了一个革新阶段,能量转换效率得到明显提高。大约与此同时,人们对太阳能电池的地面应用重新产生了兴趣。到了 20 世纪 70 年代末,地面应用的太阳能电池的数量已超过了空间应用的数量,成本也随着生产量的增加而明显下降。20 世纪 80 年代初出现了一些新的工艺,这些工艺正通过试生产进行评价,这就为后十年进一步降低成本做好准备。随着成本的不断降低,这种通过光伏效应利用太阳能的方法,其商业应用范围会越来越大。

0.2.1 光伏产业发展现状及前景

1. 高速兴起的光伏产业

光伏产业兴起于世纪之交,是各种可再生能源产业中最受人瞩目的明星。迄今为止,人类所取得的文明和成就均是建立在大规模利用化石能源的基础之上。然而,化石能源的储量有限,终将被开采殆尽;同时,在现有的技术条件下,使用化石能源不可避免地带来污染物的排放,特别是温室气体的排放,直接威胁到地球这个人类现在唯一的生存空间。因此,大力发展可再生能源,实现人与自然的可持续发展已经成为人类关注的焦点。

早在 20 世纪 70 年代石油危机引发西方国家的经济危机开始,西方国家便加强了对新能源的研究和探索;特别是随着人类文明的发展,传统化石燃料面临枯竭的危机更加快了新能源技术研究的步伐。光伏发电技术由于它独有的优势,在各种新能源技术的竞争中脱颖而出,成为全球最受关注并竞相追捧的新能源产业。从 20 世纪 90 年代初开始,光伏产业在政府的推动下稳步发展。

技术进步是降低光伏发电成本、促进光伏产业和市场发展的重要因素。几十年来围绕着降低成本的各种研究开发工作取得了辉煌成就,表现在电池效率不断提高、硅片厚度持续降低和产业化技术不断改进等方面,对降低光伏发电成本起到了决定性的作用。

单晶硅电池的实验室效率已经从 20 世纪 50 年代的 6% 提高到目前的 24.7%,多晶硅电池的实验室效率达到了 20.3%。薄膜电池的研究工作也获得了很大成功,非晶硅薄膜电池实验室稳定效率达到了 13%,碲化镉(CdTe)薄膜电池实验室稳定效率达到 16.4%,铜铟硒(CIS)薄膜电池的实验室效率达到 19.5%,如表 0-1 所示。其他新型电池,如多晶体硅薄膜电池、染料敏化电池、有机电池等不断取得进展,更高效率的新概念电池也受到广泛重视。

表 0-1 太阳能电池实验室效率

电池种类	转换效率/%	研制单位	备注
单晶硅太阳能电池	24.7±0.5	澳大利亚新南威尔士大学	4cm ² 面积
背接触聚光单晶硅电池	26.8±0.8	美国 SunPower 公司	96 倍聚光
GaAs 多结电池	42.7	德国的斯派克(Spectro)Lab (德国 Fraunhofer 研究所)	聚光电池
多晶硅太阳能电池	20.3±0.5	德国弗朗霍夫(Fraunhofer)研究所	1.002cm ² 面积
InGaP/GaAs	30.28±1.2	日本能源公司	4cm ² 面积
非晶硅太阳能电池	14.5(初始)±0.7	美国 USSC 公司	0.27cm ² 面积
	12.8(稳定)±0.7		
CIGS 电池	19.5±0.6	美国国家可再生能源实验室	0.41cm ² 面积
CdTe 电池	16.5±0.5	美国国家可再生能源实验室	1.032cm ² 面积
多晶硅薄膜电池	16.6±0.4	德国斯图加特大学	4.017cm ² 面积
纳米硅太阳能电池	10.1±0.2	日本钟渊公司	2 微米薄膜
染料敏化电池	11.0±0.5	瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)	0.25cm ² 面积
HIT	21.5	日本三洋公司	

先进技术不断向产业注入,使商业化电池技术得到不断提升。目前商业化晶体硅电池的效率达到 14%~20%(单晶硅电池效率达 16%~20%,多晶硅电池效率达 14%~16%);与此同时,光伏产业技术和光伏系统集成技术与时俱进,共同促使光伏发电成本不断降低和光伏市场及产业的持续扩大发展。

2. 光伏产业的发展趋势

为实现能源和环境的可持续发展,世界各国都将光伏发电作为发展的重点。在各国政府的大力支持下,光伏产业发展迅速。

世界光伏发电市场的增长,主要得益于德国、日本和美国的鼓励政策。已知 70% 以上的太阳能电池用于并网发电系统。美国、日本和欧洲都制定了各自的光伏发展路线,表 0-2 和表 0-3 分别列出了一些国家和地区的光伏发电成本预算和光伏发电装机预测。从长远看,太阳能光伏发电在不远的将来会占据世界能源消费的重要地位,不但要替代部分常规能源,而且将成为世界能源供应的主体。

表 0-2 光伏发电成本预算

年份	2004	2010	2020
日本(日元/kW·h)	30	23	14
欧洲(欧元/kW·h)	0.25	0.18	0.10
美国(美元/kW·h)	0.182	0.136	0.10
中国(元/kW·h)	5.0	3.0	1.4

表 0-3 光伏发电装机预测(GWp)

年份	2004	2010	2020
日本	1.2	4.8	30
欧洲	1.2	3.0	41
美国	0.36	2.1	36
中国	0.065	0.3	1.8
其他	1.195	3.8	91.2
世界	4.0	14	200

光伏产业作为正在兴起的高技术能源产业,其发展势头方兴未艾,发展的特点可简要概括为:规模化、规范化、高技术化。

(1)规模化:尽管已经得到了长足的发展,但光伏发电在全球电网中的份额几乎可忽略不计。以光伏发电应用最为发达的德国为例。自 2004 年推行光伏电力并购补贴法案以来,德国成为全球最大的光伏市场,每年全球 50% 左右的装机容量均在德国;即便是如此迅猛的增长,光伏发电在德国电网中的比例目前也不到 0.5%。根据欧盟联合研究中心预测,光伏发电将在 21 世纪中叶成为全球电网的主要能源之一;而在 21 世纪末,光伏在全球电网中的份额将超过 50%,如图 0-3 所示。显然,现有光伏企业生产规模远远不能满足预测中的需求。因此,为了在未来的竞争中占据主动,继续保持快速扩张是当前每个光伏企业的不二选择。

目前,全球主要光伏企业均在向 GW 甚至 TW 级产能迈进。即每个企业的产能

要达到 GW 级规模 (1GW = 1 000MW), 全球光伏产业的总产能要超过 1TW (1 000GW)。2008 年 9 月, 江西赛维 LDK 太阳能高科技有限公司成为全球第一个产能突破 1GW 的光伏生产企业, 这意味着光伏产业的扩张之路才刚刚起步。

(2) 规范化: 由于光伏产业的爆炸式发展, 一些相关产品的技术法规, 特别是产业的标准化体系建设明显滞后。近年来, 这一问题已经引起了西方国家的重视, 光伏产业的规范化、标准化建设已经在紧锣密鼓地进行。

(3) 高技术化: 技术是企业的核心竞争力, 尤其对高科技产业更是如此, 为了在未来的竞争中立于不败之地, 斥巨资进行技术研发工作是每个光伏企业都必须面对的。未来的光伏产业竞争, 事实上就是企业的规模之争和技术之争。

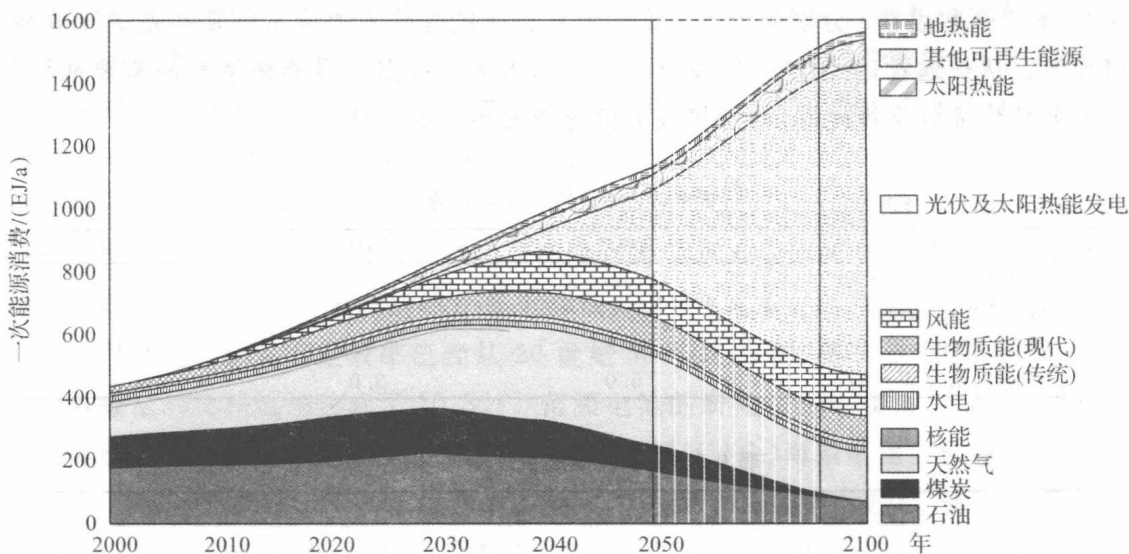


图 0-3 欧盟联合研究中心 21 世纪能源变革预测

0.2.2 中国光伏市场和产业发展状况

目前, 中国的光伏发电市场, 主要用于边远地区农村电气化、通信和工业应用及太阳能光伏商品, 包括太阳能路灯、草坪灯、太阳能交通信号灯和太阳能景观照明等。由于成本很高, 并网光伏发电目前还处于示范阶段。光伏产业包括多晶硅原材料制造、硅锭/硅片生产、太阳能电池制造、组件封装和光伏系统应用等, 还有一些与整个产业链相关联的产业, 如各环节的专用材料制造、专用设备制造、专用检测设备制造和光伏系统平衡部件制造等。

1. 领先世界的中国光伏产业发展速度

得益于全球光伏产业的高速发展, 我国光伏产业近年来开始腾飞。2005 年, 我国的光伏电池总产量仅 150MW; 而到 2006 年, 这个数字已经上升到 450MW 左右, 增长率达到 200%, 2007 年总产量突破 1 000MW, 增长势头持续强劲。目前, 我国已经超越美国、日本和欧洲, 成为全球最大的光伏产业基地。

更令人欣喜的是,伴随着产业规模的膨胀,中国光伏产业涌现出了一批具有世界级竞争力的明星企业。目前,已有多达9家中国光伏企业成功在国外上市,他们是中国光伏企业走出国门、竞逐国际资本市场的尖兵力量。其中,江西赛维 LDK 太阳能高科有限公司已经是亚洲规模最大的太阳能多晶硅片生产商,无锡尚德太阳能电力有限公司是全球第三大光伏电池生产商,他们是中国光伏企业中的佼佼者,是光伏产业的领军力量。

2. 中国面临把握未来能源命脉的机遇及挑战

纵观国内其他高科技产业发展的历史,大多是在苦苦追赶西方国家的领先技术,挑战国外企业的市场垄断地位。然而,光伏产业给了国人一个惊喜,仅仅用了两三年时间,中国光伏产业便由默默无闻一跃成为世界第一大产业基地,涌现出了一批国际性的大型生产企业。这些企业不惜投入巨资,引进世界第一流的先进设备和技术人才,正是在这样的大背景下,国内领先的光伏企业在产业规模及制造成本上与国际先进水平没有差别,而在技术上的差距也正在快速缩小。我国的光伏产业需抓住这个机遇,积极消化、吸收国际先进技术,推动自主技术创新、产品创新,并以此进一步推进光伏产业的技术进步,使我国由产业大国升级为技术强国,把握新能源开发利用的技术命脉。这对我国 21 世纪的能源和发展战略有着极为深远的影响,面对光伏产业快速发展机遇的同时,我们也面临着一些艰巨的挑战,主要表现如下。

(1)我国光伏产业的发展急需由数量型向效益型转变。我国发展成为光伏产业大国,其过程仅仅用了约5年的时间。基于我国传统发展模式的特点,在这期间,虽然涌现出了一批大型的国际性企业,但也不可避免地出现一大批规模有限的小企业。由于光伏产业在我国长期未能得到足够的重视,专业人才数量稀缺,且光伏产业初期投资较大。小企业普遍存在专业技术人才缺乏、工艺设备及生产技术水平低下、技术创新能力弱、产品质量档次低、管理较差等一系列问题。

所以,目前国内光伏产业发展极端不平衡。一方面,以 LDK、尚德为代表的大型企业已经成为全球光伏产业的领军企业和形象代表;另一方面,大批小企业的存在造成了我国光伏产品良莠不齐、鱼龙混杂的市场现状。由于光伏产品的主要市场均集中在西方发达国家,我国95%以上的产品均外销出口,目前西方国家对我国光伏产品的质量颇有微词,连带影响了整个中国光伏产业的国际形象和声誉。在这样的背景下,我国光伏产业迫切需要一个强有力的支撑整个产业科技进步和产品创新的平台。通过提高工艺水平、管理水平、人员素质,打造产品的国际竞争力,树立中国光伏产业的国际形象和品牌,实现数量向效益的转变。

(2)我国光伏产业的发展急需工艺技术设备的科技进步作为支撑。设备国产化程度低,是制约我国光伏产业发展的一个关键问题。经过几年的高速发展,我国已大大缩短了和西方发达国家之间的技术差距,产业化规模甚至超过了西方国家;但工艺设备的国产化道路依然任重而道远。由于发展较晚,同时受限于我国基础工业设计的条件,国内的工艺设备制造企业仍然处于学习、仿制、提高的阶段,产品技术水平

低,且多为单机,缺少整条工艺生产线的设计、生产能力;更缺乏与先进工艺技术结合的集成装备技术、自动化生产技术等。一些核心设备,如大型多晶铸锭炉、多线切割机、全自动丝网印刷机等,尚处于摸索和技术攻关阶段。一方面,国内光伏产业飞速发展,急需大批先进设备;另一方面,国产设备无论在性能还是稳定性方面同国际先进水平有着巨大的差距,主要设备仍然大量依赖进口,改变这种落后状况刻不容缓。

(3)我国光伏产业的发展需要完善的产业链作为支撑。我国光伏产业的发展是典型的两头小、中间大模式,上游关键原材料高纯多晶硅的规模化生产技术至今仍未完全掌握,光伏产业最重要的原材料——高纯硅材料 95% 依赖进口;而终端市场集中在西方国家,产品 95% 以上依赖出口外销,其风险不言自明。因此,打破国外多晶硅厂家的技术壁垒、掌握高纯多晶硅规模化生产技术、建设国内光伏应用市场、完善产业链建设是中国光伏产业发展的当务之急。

(4)我国光伏产业的发展缺乏先进、合理的标准体系。在国际市场上,技术法规、标准是商品进入国际市场的技术依据。技术法规、标准水平的高低,决定了产品的市场竞争力和市场份额。另一方面,完善的市场法规、标准化建设是沟通国际经济合作的桥梁,也是保证国际贸易公平竞争、维护国际市场正常秩序的基本要求和准则。只有制定出先进的法规、标准体系,才能形成完善的产品质量保证机制,才可能在国际贸易中立足于不败之地。由于近年来全球光伏产业的高速发展出乎大多数人的意料,与之相对应的产业标准体系建设工作相对滞后,各个企业的产品标准不一,缺乏一个国际通用的标准体系。我国光伏企业必须抓住这个难得的机遇,积极研究,制定出具有国际先进水平的中国光伏产业标准体系,并以此为基础参与国际标准的制订,为我国的光伏产业发展争取最大的利益。

(5)我国光伏产业的发展缺乏大量高素质的专业人才。光伏产业是一门新兴的高科技产业,对于人才的需求,相比于传统行业,显得更加迫切。由于受我国光伏技术发展历史背景的制约,目前我国光伏产业极度缺乏高素质的技术人才和管理人才。加强人才培养力度,建立完善的人才培训体系,为我国光伏产业的持续发展打造人才储备库,是一项着眼于未来的战略举措。

0.2.3 光伏在农村电气化和并网发电上的市场潜力

1. 农村电气化

据统计,截至 2005 年年底,全国大约还有 270 万无电户,1 100 万无电人口,其中有 200 万户、大约 800 万人将采用电网延伸、小水电和移民搬迁的办法解决他们的用电问题,其余 70 万无电户需要在 2006—2015 年间采用光伏和风光互补发电系统解决。如果按照脱贫标准(每户装机 200W,每年每户用电 200kW·h),预计总装机容量 140MW_p,投资大约 100 亿元;如果要达到边远地区城市用电标准(每年每户用电 1 000kW·h),则装机容量为 700MW_p。

2. 城市建筑并网光伏发电系统的应用

现在,全世界大约 60% 太阳能电池用于并网发电系统,主要是用于城市建筑并网光伏发电系统。中国的建筑并网光伏发电系统尚处于示范阶段。2010 年以前中国将会实施“屋顶计划”,安装太阳能电池 50MW_p,2020 年以前将会有更大规模的建筑并网光伏发电系统项目,累计装机容量将达到 700MW_p。到 2010 年建筑并网光伏发电系统的市场份额可占到 17.6%,到 2020 年将占到 39%。中国现有大约 $400 \times 10^9 \text{m}^2$ 的建筑面积,屋顶面积 $40 \times 10^9 \text{m}^2$,加上南立面,可利用面积大约为 $50 \times 10^9 \text{m}^2$,如果 20% 用来安装太阳能电池,可以装 100GW_p。地方城市和企业也开始了建筑光伏发电并网技术的尝试,深圳市建成了当时亚洲最大的光伏并网发电站,总容量 1MW_p。

上海、北京、南京、无锡、保定、德州等城市也都启动了城市太阳能示范计划和行动。中国出现了城市光伏并网发电的雏形。按照可再生能源法的实施原则,建筑并网光伏发电系统的初投资由项目开发商投入,其成本和合理利润将通过向电网公司出售光伏电力获得,上网电价应当按照发电成本加合理利润的原则确定。为了达到建筑并网光伏发电系统的预定目标,上网电价政策是关键,只有实施这一政策和法规才能有效消除光伏发电高成本的障碍,进一步扩大这一市场。

3. 大规模光伏(LS-PV)荒漠电站

光伏发电应用最具发展前景的市场是大规模的荒漠电站。中国拥有沙漠、沙化和潜在沙化的土地接近 $250 \times 10^5 \text{km}^2$,约占国土面积的 1/4。在现有的技术条件下,利用其中的 1%,即可安装 $25 \times 10^9 \text{kW}_p$ 的光伏发电站,年发电 3 000 TW·h,相当于目前中国总发电量。

2010 年以前,先开展沙漠或戈壁大型光伏电站试验,所选择的沙漠或戈壁试验地点应当具备如下条件:不要离主干电网太远(最好在 50km 以内),以减少新增输电线路的投资;主干电网的线径具有足够的承载能力,在不改造的情况下有能力输送光伏电站的电力;距离电力负荷中心不能太远(100km 以内),以减少输电损失;如果附近没有电力负荷中心,则最好有大型水电站,可以将光伏电站的电力通过抽水蓄能消耗。根据中华人民共和国国家发展和改革委员会的《可再生能源中长期发展规划》,在 2010 年以前建立 3~5 座 1~10MW_p 的沙漠试验电站(总装机 20MW_p),以考察其技术和经济的可行性。2010—2020 年期间将进一步推广荒漠电站,到 2020 年底累计沙漠(戈壁)光伏电站装机达到 200MW_p。

中国的开阔地(荒漠)资源主要分布在光照资源丰富的西北地区,其年总辐射在 $1\ 600 \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 以上;东北和华北地区的开阔地(荒漠)年总辐射甚至在 $2\ 300 \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 以上,在全球也属富集区。几乎无须水资源的光伏发电有无限的发展空间。有不少开阔地(荒漠)靠近电力线路和电力负荷中心,还有很好的旅游资源,可以作为大型并网光伏项目的起步建议区域。随着电力输送技术和储能技术的发展,大规模开