



太阳能光伏系统 建模、仿真与优化

◎白建波 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

本书主要介绍太阳能光伏系统建模、仿真与优化的理论与方法。全书共分8章。第1章介绍太阳能光伏系统的基本概念；第2章介绍太阳能光伏系统的建模方法；第3章介绍太阳能光伏系统的仿真方法；第4章介绍太阳能光伏系统的优化方法；第5章介绍太阳能光伏系统的控制方法；第6章介绍太阳能光伏系统的并网技术；第7章介绍太阳能光伏系统的储能技术；第8章介绍太阳能光伏系统的其他应用。本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事太阳能光伏系统工作的工程技术人员参考。

太阳能光伏系统 建模、仿真与优化

白建波 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书结合作者所开发的并网光伏电站仿真建模与优化软件 SIMUPV 2.0, 详细描述了光伏系统建模的主要过程, 包括组件斜面太阳能辐照量, 光伏组件的光电转换, 逆变器的直交流逆变, 直、交流侧线路损耗等关键环节的数学模型; 本书还对阴影遮挡、失配和积灰等影响光伏电站输出性能的因素进行了深入研究; 另外, 本书还详细介绍了 SIMUPV 2.0 软件的开发以及相关功能的使用。

本书具有较强的理论和实践价值, 可作为高级光伏系统工程技术人员参考资料, 还可作为太阳能光伏发电方向的研究生、高年级本科生教材。

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

太阳能光伏系统建模、仿真与优化/白建波著. —北京: 电子工业出版社, 2014.11

ISBN 978-7-121-24555-8

I. ①太… II. ①白… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 243684 号

策划编辑: 徐蔷薇

责任编辑: 桑 昀

印 刷: 北京京科印刷有限公司

装 订: 北京京科印刷有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 14 字数: 358.4 千字

版 次: 2014 年 11 月第 1 版

印 次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

近十年来,世界光伏产业出现了井喷式的发展态势。光伏发电的应用由早期边远农村、海岛、边防和特殊应用(如航天)向更为民用化的并网发电以及与建筑相结合的分布式供电方向发展。与此同时,光伏技术快速进步,伴随着产量的增加,光伏设备成本迅速下降,光伏发电开始逐渐从补充能源向替代能源过渡。

光伏发电系统的发电性能受天气、当地经纬度和海拔影响非常大,因此在项目建设之前对系统进行设计及动态模拟是十分必要的,这样可以提前获得项目的可行性结论并在此基础上进行系统的进一步优化。针对光伏系统的设计、仿真和模拟软件已经成为光伏系统工程师不可或缺的重要工具,它能够快捷、方便和准确地模拟出光伏系统的各种参数,并可对光伏系统的未来发电性能做出评估和预测,同时还能对光伏系统的经济性及环保性能进行综合分析。目前,国外已经开发出功能强大的光伏系统的仿真软件,如PVSYST、RETScreen和PVSol等,能够对光伏系统进行较全面的性能模拟,为工程开发提供非常有价值的参考,因此已经被我国光伏行业的工程师广泛采用。

目前,我国已经成为光伏产业的强国,但国内尚不具备功能较全面的光伏系统设计及仿真模拟软件,国内光伏系统及技术的快速发展需要我国具备完全知识产权的光伏仿真软件。

在我国光伏科学与技术国家重点实验室的支持下,我们独立开发出功能全面的光伏系统仿真软件SIMUPV 2.0。本书主要针对项目开发过程中所涉及的光伏系统及其关键部件建模过程,同时也包括发电量的预测、SIMUPV 2.0的具体功能及仿真实例进行了较详细的介绍。此外,本书还包含了作者所在的研究小组近年来在光伏组件热电耦合模型方面最新的研究工作。

本书在写作过程中得到了曹阳、张宇、李洋、王孟、苏治北等研究生的协助,另外,张臻博士提供了光伏产业方面的资料,在此一并表示感谢。

目前针对光伏仿真技术的研究发展迅速,鉴于本人水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足,敬请专家和读者批评指正。

白建波

2014年8月于河海大学常州校区

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

CONTENTS

第 1 章 概论	1
1.1 光伏技术的基本原理	1
1.2 光伏技术的国内外发展历程	3
1.2.1 光伏技术的几个主要发展阶段	4
1.2.2 光伏技术在我国的发展	4
1.2.3 光伏技术未来的发展趋势	5
1.3 光伏发电系统	6
1.3.1 独立光伏发电系统	6
1.3.2 并网光伏发电系统	7
1.4 太阳能光伏发电系统仿真技术的发展	7
1.4.1 PVSS	8
1.4.2 Solcel	8
1.4.3 PVForm	8
1.4.4 PVSIM	9
1.4.5 PVDesignPro	9
1.4.6 Solar Advisor Model (SAM)	10
1.4.7 PVWatts	11
1.4.8 PVSYS	11
1.4.9 PV F-Chart	13
1.4.10 RetScreen 光伏项目模型	13
1.4.11 PVSol	14
1.4.12 其他光伏仿真软件	16
参考文献	16
第 2 章 太阳能辐射	18
2.1 太阳的概况	18
2.1.1 太阳	18
2.1.2 和太阳相关的重要天文参数	21

2.2 天体运行规律及太阳与地球的关系	24
2.2.1 天球与天球坐标系	24
2.2.2 太阳角的计算	26
2.2.3 树木或者烟囱在屋顶组件表面产生阴影面积的计算方法	27
2.3 光伏组件倾斜面上太阳能辐照量的计算方法	31
2.3.1 辐照量计算重要的角度参数及进一步说明	31
2.3.2 大气层外的水平面太阳能辐照	32
2.3.3 晴朗指数系数	33
2.3.4 水平面逐时太阳能辐照量计算方法	33
2.3.5 光伏组件倾斜面逐时太阳能直射、散射和反射辐照量计算方法	34
2.3.6 组件任意朝向及倾斜角度逐时太阳能总辐照量的计算方法	35
2.3.7 光伏组件倾斜表面月均太阳能总辐照量的计算方法	37
参考文献	40
第3章 太阳能光伏电池、组件及阵列的数学建模	42
3.1 太阳能光伏电池的分类及结构	42
3.1.1 按结构分类	43
3.1.2 按材料分类	43
3.1.3 按构造分类	44
3.2 光伏电池基本结构	44
3.3 光伏电池、组件建模的基本理论	47
3.3.1 光伏电池、组件铭牌参数	47
3.3.2 光伏电池、组件等效电路及其数学模型	48
3.3.3 光伏电池、组件的性能曲线	49
3.3.4 光伏电池、阵列的数学模型的求解方法	51
3.4 四参数模型的求解方法	52
3.4.1 一般解理论	52
3.4.2 根据组件铭牌求四参数	53
3.4.3 光伏组件铭牌求解电池片参数实例	54
3.5 光伏电池、组件五参数模型的求解方法	56
3.5.1 解析解的求解方法	56
3.5.2 计算结果分析	58
3.5.3 迭代解法	60

3.6 任意辐照度和环境温度下的光伏电池、组件的数学模型	62
3.6.1 理论模型基础	62
3.6.2 光伏阵列工作运行方式	65
3.7 模型实验验证	66
3.8 小结	69
参考文献	70
第4章 光伏逆变器原理及其数学建模	72
4.1 光伏逆变器概况	72
4.2 逆变器的发展及其分类	73
4.2.1 逆变器的发展历程	73
4.2.2 逆变器的分类	74
4.2.3 并网型光伏逆变器	74
4.2.4 离网型光伏逆变器	76
4.3 光伏逆变器主要性能参数	79
4.3.1 逆变器输入端性能参数	79
4.3.2 逆变器输出端性能参数	79
4.3.3 逆变器转换效率	80
4.4 光伏逆变器的数学建模及其仿真实例	81
4.4.1 SANDIA 逆变器建模法	82
4.4.2 Driesse 逆变器建模法	83
参考文献	84
第5章 光伏系统辅助设备及其损耗估算	85
5.1 光伏系统中直、交流侧线缆电量损耗计算	85
5.1.1 线缆损失的计算方法	85
5.1.2 线损计算方法验证	87
5.2 光伏系统中变压器的损耗估算	89
5.2.1 双绕组变压器损耗电能的计算	89
5.2.2 三绕组变压器损耗电能的计算	90
5.3 蓄电池的性能估算方法	91
5.3.1 蓄电池性能及主要状态参数	91
5.3.2 蓄电池动力学数学模型	92
参考文献	95

第 6 章 阴影或失配情况下光伏系统输出性能建模与仿真	97
6.1 阴影遮挡或者失配状况下光伏系统研究	97
6.1.1 阴影或失配情况下光伏阵列输出特性的研究现状	99
6.1.2 光伏组件热斑效应的研究	100
6.1.3 失配情况下光伏系统 MPPT 方法研究	101
6.2 阴影及失配对光伏系统输出性能的影响	102
6.2.1 单二极管五参数等效电路模型	102
6.2.2 阴影及失配情况下组件输出性能的理论模型	103
6.2.3 不同阴影遮挡下光伏组件输出性能的模拟及验证	105
6.3 失配情况下光伏阵列输出特性建模与仿真	109
6.3.1 失配情况理论建模	109
6.3.2 失配情况下光伏阵列输出性能仿真及实验验证	110
6.4 复杂阴影条件下光伏电池、组件或者阵列输出特性	111
6.4.1 阴影对单电池片输出特性的影响	111
6.4.2 阴影对光伏组件输出特性的影响	112
6.4.3 阴影对光伏阵列输出特性的影响	116
6.5 小结	117
参考文献	117
第 7 章 光伏系统的优化设计方法及寿命预测	120
7.1 概述	120
7.2 逆变器串并联组件优化设计模型	123
7.2.1 光伏组件串并联优化计算方法	123
7.2.2 直流端串联数优化设计模型	124
7.3 最优倾角理论模型	125
7.3.1 最优倾角的计算方法	125
7.3.2 不同安装角度及朝向情况下辐照度的分析	128
7.3.3 最优倾角结果计算分析	129
7.4 最优阵列间距模型	131
7.4.1 前后排光伏阵列阴影理论模型	132
7.4.2 两排方阵之间的最佳间距	133
7.5 光伏组件寿命预测方法	135
7.5.1 组件寿命评估的高斯函数模型	135
7.5.2 估算法求解	136
7.6 小结	136
参考文献	137

第 8 章 光伏组件热电耦合建模及阴影遮挡的温升效应	139
8.1 光伏电池组件的组成与传热分析	139
8.1.1 光伏电池组件主要组成	139
8.1.2 光伏电池组件传热分析	143
8.2 均匀辐照度下光伏电池组件的温度计算模型	144
8.2.1 NOCT 模型	144
8.2.2 SANDIA 温度模型	145
8.2.3 光伏组件热电耦合模型	146
8.2.4 光伏组件热电耦合模型的实验验证	150
8.3 辐照度分布不均匀条件下光伏组件传热模型及其温度分布	153
8.3.1 辐照度不均匀或阴影遮挡情况下光伏组件的传热模型	154
8.3.2 并联电阻对组件温度的影响分析	156
8.3.3 单片电池遮挡比例变化对组件温度的影响	157
8.3.4 改善光伏组件热斑现象的方法	158
参考文献	158
第 9 章 光伏发电系统经济性及环保分析	160
9.1 太阳能光伏发电经济性分析方法	160
9.1.1 太阳能光伏工程经济性分析准则	161
9.1.2 太阳能光伏工程经济性分析方法	161
9.2 光伏发电系统的经济性分析与典型实例	162
9.2.1 成本分析	162
9.2.2 财务收益分析	165
9.2.3 项目现金流分析	168
9.2.4 项目可行性分析	171
9.3 光伏发电系统环保性能评估方法与实例	172
9.3.1 光伏发电系统的环保性能分析	172
9.3.2 光伏发电系统的环保性能评估方法	173
参考文献	175
第 10 章 并网光伏仿真软件系统建模与发电量预测	177
10.1 太阳能并网光伏发电系统建模	178
10.1.1 光伏组件表面太阳能辐照数学模型	178
10.1.2 光伏组件光电转换数学模型	180

10.1.3	逆变器直流逆交数学模型	182
10.1.4	直流线路部分损失数学模型	183
10.1.5	并网变压器损耗数学模型	184
10.2	并网光伏系统仿真软件的开发	184
10.2.1	流程设计	184
10.2.2	功能设计	184
10.2.3	决策与优化功能	185
10.3	光伏系统发电量的预测及优化	186
10.3.1	基于 TMY (典型气象年) 数据的发电量的预测及系统优化	186
10.3.2	实际电站发电量预测	188
10.4	积灰对发电量预测的影响	189
10.5	光伏组件性能衰减对光伏系统发电性能影响评估	192
10.6	小结	192
	参考文献	192
第 11 章 光伏仿真设计软件 SIMUPV 2.0 功能及实例		194
11.1	光伏系统设计	194
11.1.1	项目管理	194
11.1.2	项目初步信息输入	194
11.1.3	光伏组件选型	196
11.1.4	光伏逆变器选型	197
11.1.5	光伏阵列串并联配置	198
11.1.6	直、交流侧线缆的选型	199
11.1.7	其他损耗的设置	200
11.2	光伏电站系统产能报告及分析	201
11.2.1	产能输出	201
11.2.2	不同环境温度和辐照度下 $I-V$ 曲线性能输出	203
11.2.3	光伏电站环保性能的分析	204
11.2.4	参数变化时光伏电站发电性能的比较	205
11.2.5	光伏发电系统各个环节的损耗估算	207
11.3	屋顶光伏工程的遮阴计算	208
11.3.1	平面屋顶式光伏电站的遮阴仿真	208
11.3.2	斜面屋顶式光伏电站的遮阴仿真	209
	参考文献	211

第 1 章 概 论

随着全球环境污染的日益加重、人类环保意识的逐渐增强以及煤、石油等传统能源的急剧紧缺,太阳能、风能、水能等新型可再生清洁能源越来越被人们所青睐。在我国,太阳能光伏发电系统每发电 $1\text{kW}\cdot\text{h}$,扣除在生产太阳能光伏电池及设备的过程中所消耗的电力,可至少相当于减少 CO_2 排放量 $1.14\text{kg}^{[1]}$,有着巨大的环境效益。加之太阳能取之不尽、用之不竭、无地域限制、无污染、无噪声等优点,利用洁净的太阳能是未来世界能源领域的主要发展趋势。

太阳能光伏电池是一种能将太阳光直接转换为电力的一种半导体器件,它的突出优点是能够实现光能到电能的直接转换,而且没有任何中间转换过程;此外,还具备寿命长(使用寿命 20 年以上),结构简单且紧凑,比功率(功率与装置质量之比)高和运行方便、可靠等优点^[2]。因此,太阳能光伏电池发电技术有着十分广阔的应用前景。

进入 21 世纪,光伏产业得到了突飞猛进的发展,在近 40 年中,光伏组件的成本降至原来的 $1/100$,从 1977 年的 76.67 美元/ W 下降到 2013 年的 0.74 美元/ $\text{W}^{[3]}$ 。此外,截止到 2012 年,全球的光伏装机容量超过 100GW ,成为全球可再生能源领域光伏应用的重要里程碑^[4]。

1.1 光伏技术的基本原理

太阳能是一种辐照能,它必须借助于能量转换器才能转换成电能。这种把光能转换成电能的能量转换器,即太阳能光伏电池(光伏电池)。光伏电池工作原理的基础是半导体 P-N 结的光生伏特效应。即当物体受到光照时,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 P-N 结时,就会产生光生电压,使 P-N 结外电路导通,就会产生电流。

光电效应包括光电子发射、光电导效应和光生伏特效应。光照射在物体上,物体内的电子逸出物体表面的现象称为光电子发射,也叫外光电效应。光照在物体上,物体的电导率发生变化的现象称为光电导效应,物体产生光生电动势的现象称为光生伏特效应。光电导效应和光生伏特效应发生在物体内部,统称为内光电效应。光生伏特效应又包括势垒效应、丹倍效应、光电磁效应和贝克勒耳效应等几种不同的形式。

光伏电池还具备一个很重要的效应——势垒效应，即当光照射在 P-N 结上时，如果入射光子的能量大于 P-N 结的光学带隙，将在 P-N 结两侧产生大量的电子-空穴对，在内电场作用下，电子、空穴分别向 N 区和 P 区移动，从而在 P-N 结两侧产生光生电动势的现象。

21 世纪以前，光伏电池的生产成本高、效率低成为制约其推广应用的瓶颈。目前光伏电池的成本已经得到很大程度的下降，但如何在单位面积内使光伏电池获得最大的发电量，提高光伏电池的发电效率将是光伏领域永久的主题。

1. 硅材料半导体中的电子与空穴

物质由原子组成，物质的原子是由原子核和电子组成。原子核带正电，电子带负电。电子就像行星围绕太阳转动一样，按照一定的轨道围绕原子核旋转。单晶硅的原子是按照一定规律排列的，硅原子的最外层电子层中有 4 个电子。每个原子的外层电子都有固定的位置，并受原子核约束。它们在外来能量的激发下，如受到太阳光辐照时，就会摆脱原子核的束缚而成为自由电子，同时在它原来的地方留出一个空位，即半导体物理学中所谓的“空穴”。由于电子带负电，空穴就表现为带正电。所以电子和空穴就是单晶硅中可以运动的电荷（见图 1.1）。

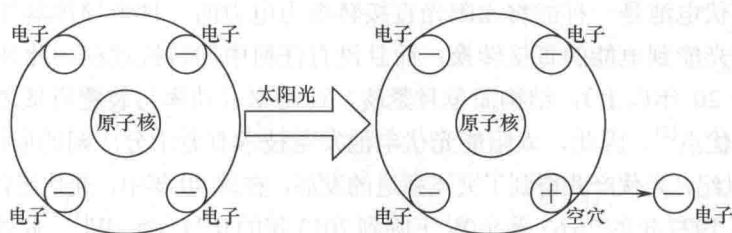


图 1.1 电子和空穴产生示意图

2. P 型、N 型半导体及 P-N 结

在纯净的硅晶体中，自由电子和空穴的数目是相等的。如果在硅晶体中掺入能够俘获电子的硼、铝、镓或铟杂质元素，那么就构成空穴型半导体，简称 P 型半导体。如果在硅晶体中掺入能够释放电子的磷、砷或锑杂质元素，那么就构成电子型半导体，简称 N 型半导体。

若把以上两种半导体结合在一起，由于电子和空穴的扩散，在界面处便会形成 P-N 结，并在结的两边形成内建电场，又称势垒电场。P 型半导体和 N 型半导体的界面附近的过渡区称为 P-N 结。P-N 结有同质结和异质结两种，用同一种半导体材料制成的 P-N 叫做同质结，由禁带宽度不同的两种半导体材料制成的 P-N 结叫做异质结。

3. 能带

能带是固定量子理论中用来描述晶体中电子状态的重要的物理概念。在孤立的原子

中, 电子只能在一些特定的轨道上运动, 不同轨道上的电子能量不同。所以, 原子中的电子只能取一些特定的能量值, 其中每个能量称为一个能量级。晶体是由大量规则排列的原子组成, 其中各个原子的相同能量能级由于相互作用, 在晶体中变成能量略有差异的能级, 看上去像一条带子, 称为能带。原子的外层电子在晶体中处于较高能带, 内层电子则处于较低能带。能带中的电子已不是围绕着各自的原子核做闭合轨道运动, 而是为各原子所共有, 在整个晶体中运动。

在光照条件下, 当有太阳光辐照在电池片上时, 特定波长的太阳辐照被 P-N 结吸收, 如果光子的能量大于材料的光学能隙带 (禁带宽度), 价带电子吸收光子能量而在价带间跃迁, 产生大量的空穴-电子对亦即非平衡载流子 (光生载流子)。P-N 结特征是其内部的电子从 N 区向 P 区扩散和空穴从 P 区向 N 区扩散, 这种流动约束特点产生了 P-N 结自身的内建电场。由于内建电场的作用, 将电子驱向 N 区, 空穴驱向 P 区, 使得 N 区有过剩的电子, P 区有过剩的空穴, 从而产生一个与平衡 P-N 结内建电场方向相反的光生电场, 在其两端形成光生电动势, 电池片两端也就存在电势差。若分别在两端连接金属引线, 并在外电路中接通负载形成闭合回路, 在持续光照下, 外电路就会有持续电流通过, 负载就能工作 (见图 1.2) [5]。

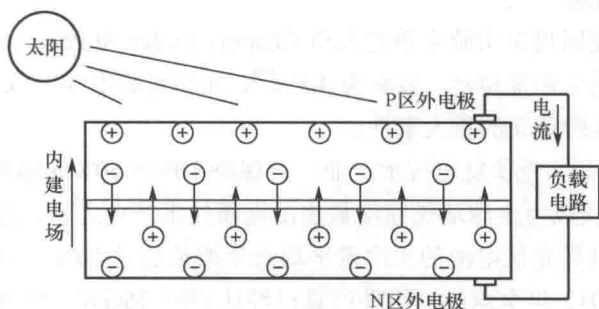


图 1.2 光伏电池工作原理

在无光照的暗条件下, 半导体 P-N 结虽有内建电场却不会输出电流, 也不会对外呈现电压, 电池片的内建电场只起到驱动载流子漂移, 以平衡抵消 P-N 结两侧载流子互扩散的作用, 正是它使得电流处处为零。内建电场区 (也称空间电荷区、载流子耗尽层或势垒区) 的宽度仅有 $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$, 而且集中在掺杂较轻的一侧。

1.2 光伏技术的国内外发展历程

光伏电池从原理的发现到目前的技术广泛应用已经有 170 多年的发展历史。它先后经历了光生伏打效应的发现、美国贝尔实验室第一片实用性晶体硅光伏电池的发明以及光伏技术的不断创新发展, 直到今天包括光伏材料、器材、系统及各种技术在内的成熟

应用,整个光伏发电产业链体系的形成经历了漫长的历程。

如今的光伏电池无论在结构设计,还是在工艺技术上已有无数革新创造,性能之高与成本之低已远非当初可比。

1.2.1 光伏技术的几个主要发展阶段

1839年,法国实验物理学家贝克勒尔研究光对电解液中的金属盐和电池的作用,首次观察到插在电解液中两电极间的电压随光照强度变化的现象。后人将此现象称为“光伏效应”,即光产生电流效应。

1900年,德国人普朗克建立黑体辐照理论,解释了地磁波辐照与吸收过程中能量子与波长之间的关系。

1905年,在普朗克黑体辐照理论的基础上,爱因斯坦在瑞士伯尔尼专利事务所工作期间发表题为《关于光的产生与转化的一个试探性观点》的文章,首次提出光子理论,成功地解释了光电效应现象,该成果于1921年获得诺贝尔物理学奖。

1948年,美国贝尔实验室科学家OHL申报了光敏硅器件专利,随后进一步深入研究得出了硅材料光电性能^[6, 7]。

1954年4月,美国贝尔实验室研究人员Chapin、Fuller和Pearson共同发明了第一块实用的单晶硅P-N结太阳能电池,效率为4.5%^[8],几个月后电池的效率被提高到6%。这是光伏领域具有里程碑意义的重大事件。

20世纪90年代后,光伏发电技术产业一直保持10%~50%的递增大发展速度。尤其是进入21世纪,光伏成为全球增长速度最快的高新技术产业之一,最为惊人的数据是在2005—2011年,全世界光伏电池的生产量平均每年增长超过50%。2011年全球电池组件产量超过30GW,2012年全球电池组件产量已经达到约36GW,全球光伏系统装机容量超过100GW。

2013年,科学家发明了一种新型光伏电池——钙钛矿电池。研究发现,以钙钛矿(CaTiO_3)为原料的光伏电池的转化效率可高达50%,为目前市场上光伏电池转化效率的2倍。此外,该技术还能大幅降低光伏电池的使用成本。

1.2.2 光伏技术在我国的发展^[9]

我国于1958年开始研究光伏电池,于1971年首次将其成功应用于自主发射的“东方红二号”卫星上,从1973年开始光伏电池开始逐渐用于我国的地面工程。

我国的光伏工业在20世纪80年代以前尚处于雏形阶段,光伏电池的年产量一直徘徊在10kW以下,价格也非常昂贵。80年代以后,国家开始对光伏工业和光伏市场的发展给予支持,中央和地方政府在光伏领域投入了一定资金,使得我国十分弱小的光伏电

池工业得到了巩固并在许多应用领域建立了示范,如微波中继站、部队通信系统、水闸和石油管道的阴极保护系统、农村载波电话系统、小型户用系统和村庄供电系统以及并网发电系统等。

进入 21 世纪,我国光伏发电技术得到了突飞猛进的发展,先后开展了晶体硅高效电池、非晶硅薄膜电池、碲化镉和铜铟硒薄膜电池、多晶硅薄膜电池及应用系统关键技术的研究。尤其是“十五”和“十一五”期间,国家通过科技攻关和 863 计划支持了一批增强现有装备生产能力的项目,大幅度提高了光伏发电技术和产业的水平,缩短了光伏发电制造业与国际水平的差距。目前,我国已经成为光伏组件的最大生产国。

在光伏系统的应用技术方面,我国在“十五”和“十一五”期间进行了屋顶并网发电技术和高压并网发电的技术科技攻关,建成了一批 10~50kW 的屋顶系统,其中,在深圳建成了兆瓦级低压并网光伏电站一座;另外,在拉萨建成了 100kW 的高压并网发电站一座,为我国屋顶光伏并网发电和沙漠电站技术的规模化发展积累了经验。

我国有着丰富的太阳能资源,全国 2/3 以上的地区年日照时间大于 2000h,年均辐照量约为 $5900\text{MJ}/\text{m}^2$,非常适合开展太阳能光伏发电。太阳能光伏发电产业近年来在我国得到迅猛发展,成为可再生能源产业的重要组成部分。2013 年,全球光伏新增装机市场已达 36GW,我国以装机容量 11.3GW 居世界首位。而受欧债危机等影响,欧洲市场新增光伏装机容量仅为 10.2GW,同比 2012 年大幅下降 40%。

目前,我国虽然已经发展成为光伏组件的产业大国,但在独立系统的蓄电池、大功率逆变器等方面的研发水平与发达国家相比还有不小的差距。

可以确信的是,未来我国光伏产业将具备广阔的发展空间,在国际光伏领域起着越来越重要的作用。

1.2.3 光伏技术未来的发展趋势

综观世界光伏发电技术几十年来的发展历程,呈现如下发展趋势^[10~13]:

(1) 随着技术的不断进步,光伏系统设备的成本大幅降低,尤其是系统关键设备光伏组件与逆变器。例如,晶体硅光伏电池的硅片厚度将不断降低,从而使硅材料消耗不断减小;大容量和更高效率逆变器的出现也将进一步降低逆变器的成本。

(2) 晶体硅光伏电池光电转换效率和生产技术水平仍将持续提高,其可靠性将进一步增强。

(3) 薄膜光伏电池技术不断进步,薄膜光伏电池的市场份额将得到快速增长;此外,碲化镉电池(CdTe)、铜铟硒薄膜电池(CiS)等非晶硅电池逐步进入市场。

(4) 多晶硅薄膜光伏电池的光电转换效率不断接近晶体硅光伏电池,成本远低于晶体硅光伏电池,发展前景广阔。

(5) 叠层、量子点、多能带、热光伏、多载流子、钙钛矿光伏电池等方兴未艾的新一代光伏电池将克服第一代硅光伏电池成本高、第二代薄膜等非晶硅光伏电池光电转换效率低的局限, 且具有原材料丰富等优点。

(6) 并网型光伏发电系统的应用比例不断增加, 逐步成为光伏发电的主流, 此外, 光伏系统与建筑相结合的太阳能光伏建筑将进入快速商品化生产时期。

(7) 光伏技术与光热技术的结合使得太阳能一次能源效率的利用率持续提高^[14], PV/T 组件技术成为光伏领域一项重要的应用。

总而言之, 经过这几年光伏行业的突飞猛进式发展, 光伏发电的成本已经显著的下降, 但仍然高于传统发电方式, 因此继续降低光伏系统中设备的成本, 尤其是光伏组件与逆变器的成本仍然是未来光伏技术领域的发展重点。此外, 随着光伏系统的日益普及, 如何提高光伏系统的效率和可靠性将成为未来光伏技术发展的主要目标^[15]。

近年来, 在我国产业政策和财政倾斜的支持下, 光伏系统的应用已经开始逐渐具备大规模商业开发的条件。可以预见, 我国光伏系统发电的成本将不断下降直至逼近传统发电的成本, 那时以太阳能为主体的新能源将成为我国 21 世纪能源供应的主体, 从而成为极具竞争能力的可再生能源。

1.3 光伏发电系统

光伏发电系统是由光伏电池板、控制器和电能储存及变换环节构成的发电与电能变换系统^[16]。太阳光辐照能量经由光伏电池板直接转换为电能, 并通过电缆、控制器、储能等环节进行储存和转换, 提供负载使用。

控制器一般由单片机或数字信号处理芯片作为核心器件构成, 用以实现光伏电池最大功率点跟踪及控制逆变器并网电流的频率、波形和功率, 使向电网输送的功率与光伏阵列所产生的(所发出的)最大功率电能平衡。

光伏发电系统按与电力系统的关系可分为独立光伏发电系统和并网光伏发电系统。

1.3.1 独立光伏发电系统

独立光伏发电系统是不与常规电力系统相连而孤立运行的发电系统, 通常建设在远离电网的边远地区或作为野外移动式便携电源, 其建设的主要目的是解决无电问题。由于太阳能发电的特点是白天发电, 而负荷用电特性往往是全天候的, 因此在独立光伏发电系统中储能元件必不可少。通常, 系统在白天把太阳光转化为电能, 通过充电器和蓄电池将电能储存起来, 晚上再通过放电器把储存在蓄电池里的电能释放出来使用。