



智能电网系列书

地面光伏发电 系统及应用



李瑞生 周逢权 李燕斌 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



智能电网系列书

地面光伏发电 系统及应用

李瑞生 周逢权 李燕斌 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是《智能电网系列书》之一。

目前,我国光伏发电产业发展十分迅速。为进一步推广光伏发电技术,指导光伏发电工程建设,编著者结合现场工作经验和体会编写了本书。全书共12章,内容主要包括光伏发电系统概述,光伏电池,储能技术,控制器,逆变器,辅助设备,光伏发电监控系统,光伏发电系统设计,光伏发电系统安装施工,光伏发电系统测试及维护,光伏发电相关政策、标准及规范,以及光伏发电系统工程实例。

本书内容全面、资料翔实、图文并茂、通俗易懂,对普及地面光伏发电技术将起到很好的推动作用。本书旨在为广大光伏发电技术人员及相关专业学生提供参考,为本领域的同行提供可借鉴的相关理论和经验,共同探索光伏发电系统理论研究、工程应用等一些实际问题。

图书在版编目(CIP)数据

地面光伏发电系统及应用 / 李瑞生, 周逢权, 李燕斌编著. —北京: 中国电力出版社, 2011.5

(智能电网系列书)

ISBN 978-7-5123-1679-9

I. ①地… II. ①李…②周…③李… III. ①太阳能发电—研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 087093 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011年9月第一版 2011年9月北京第一次印刷
710毫米×980毫米 16开本 13.5印张 178千字
印数0001—4000册 定价32.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

随着以煤炭、石油为代表的化石能源面临枯竭，能源短缺日益成为制约社会经济发展的瓶颈。为了摆脱能源短缺的困扰，保护人类赖以生存的环境，开发清洁可再生能源，已成为世界各国经济和社会可持续发展的重要战略。

目前，地球上的可再生能源包括太阳能、风能、水能、地热能、生物质能、海洋能等，这其中的大部分又是由太阳能直接或间接转化而来的。太阳能资源充足、分布广泛、安全、清洁，而且太阳能转换技术已日渐成熟，因此太阳能被认为是人类在 21 世纪替代传统化石能源的最佳选择之一。目前太阳能应用比较广泛，包括温室大棚、太阳灶、太阳能热水器和物品干燥等。经过多年的研发，太阳能发电也得到了长足的发展。目前太阳能发电可分为光发电和热发电两种，其中光发电是不通过热转换直接将太阳光转换成电的方式，也称为光伏发电。

各国政府通过立法或政策倾斜来支持光伏发电产业的发展，通过提供研发经费、示范补贴、减免税款、租税优惠、电价补助等一系列政策鼓励投资生产。日本、德国和美国先后实施了百万屋顶计划。我国太阳能资源丰富，政府也在积极鼓励和支持光伏发电。在政策的扶持下，我国光伏发电产业发展十分迅速，目前我国已建成的光伏并网示范项目达 30 多个，而且建设和规划项目呈跳跃式上升，光伏发电建设前景广阔。

为了进一步推广光伏发电技术，指导光伏发电工程建设，作者根据工作中的体会编写了《地面光伏发电系统及应用》。本书在编写过程中，理论性和实用性并重，不仅全面系统地介绍了地面光伏发电系统的基本原理、实用技术及实用设计方法和原则，还重点介绍了光伏发电的并网技术，给出了光伏发电试验系统设计案例，旨在为广大光伏发电系统的技术人员及学生提供设计参考，为本领域的同行提供可借鉴的相关理论和经验，共同探索光伏发电在智能电网建设中遇到的一些问题。

本书共 12 章。第 1 章为光伏发电系统概述，主要介绍光伏发电系统的发展历史及现状；第 2 章为光伏电池，主要介绍光伏电池的结构、工作原理及其发展趋势；第 3 章为储能技术，主要介绍储能技术的种类、原理及光伏发电系统的蓄电池设计；第 4 章为控制器，主要介绍光伏发电系统中控制器的功能、工作原理及参数选型；第 5 章为逆变器，主要介绍光伏发电系统中逆变器的基本功能和工作原理，并重点介绍了相关的并网技术；第 6 章是辅助设备，主要对光伏发电系统的辅助设备进行阐述和说明；第 7 章是光伏发电监控系统，主要介绍光伏发电监控系统的功能、构成以及设计原则；第 8 章是光伏发电系统设计，主要介绍光伏发电系统整体及各组成部分的设计、配置及选型；第 9 章是光伏发电系统安装施工，主要介绍光伏发电系统的安装施工及注意事项；第 10 章是光伏发电系统测试及维护，主要介绍光伏发电系统检查、测试过程及维护管理；第 11 章是光伏发电相关政策、标准及规范，主要介绍光伏发电系统的政策及标准体系，通过与国际标准的对比分析，总结了目前中国光伏发电政策和标准现状及存在的问题和差距；第 12 章是光伏发电系统工程实例，介绍光伏发电试验系统及在微电网中的工程案例。

本书由李瑞生教授级高工、周逢权博士和李燕斌博士编著，许继智能电网中心的李献伟、唐云龙、张志伟、王慧娟、路进升、田盈等做了大量整理绘图工作。本书编写过程中得到了中国电子科技集团公司第十八研究所（天津电源研究所）周立新教授级高工、孙彦铮教授级高工以及中原工学院王晓雷教授的帮助，西安交通大学索南加乐教授、哈尔滨工业大学郭志忠教授在百忙之中审阅了本书稿，在此一并对他们表示衷心的感谢！在本书的编写过程中，参阅了大量的论著文献，在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者水平和编写时间，书中难免存在疏漏和错误，恳请广大读者批评指正。

编著者

2011 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 光伏发电系统概述	1
1.1 光伏发电技术的发展历程	1
1.2 光伏发电系统分类	2
1.3 全球光伏发电现状及分析	3
1.3.1 全球光伏发电现状	3
1.3.2 全球光伏发电装机分析	4
1.4 光伏发电现状及趋势分析	7
1.4.1 国内光伏发电发展历程及现状	7
1.4.2 国内光伏发电产业现状分析及未来趋势	8
1.4.3 全球光伏发电产业的展望	9
第 2 章 光伏电池	10
2.1 光伏电池概述	10
2.2 光伏电池的基本结构及工作原理	11
2.2.1 光伏电池的基本结构	11
2.2.2 光伏电池的工作原理	11
2.3 光伏电池的基本特性	12
2.3.1 短路电流	13
2.3.2 开路电压	13
2.3.3 输出功率	14
2.3.4 填充因子	14
2.3.5 光电转换效率	15
2.3.6 光谱特性	15

2.3.7	温度特性	15
2.3.8	光照特性	16
2.3.9	光伏电池的等效电路图	16
2.4	光伏电池的分类	18
2.5	不同种类光伏电池的制造技术现状	19
2.5.1	单晶硅光伏电池	19
2.5.2	多晶硅光伏电池	19
2.5.3	非晶硅薄膜光伏电池	19
2.5.4	多元化合物薄膜光伏电池	20
2.6	光伏电池应用发展历程及产业发展趋势	21
2.6.1	全球光伏电池及其产业发展现状	21
2.6.2	我国光伏电池发展现状	21
第3章 储能技术		23
3.1	储能设备种类及原理	23
3.1.1	抽水储能	23
3.1.2	飞轮储能	24
3.1.3	压缩空气储能	25
3.1.4	超导磁储能	25
3.1.5	超级电容器储能	27
3.1.6	蓄电池储能	29
3.2	铅酸蓄电池	30
3.2.1	铅酸蓄电池分类	31
3.2.2	铅酸蓄电池命名	31
3.2.3	铅酸蓄电池主要性能参数	33
3.3	光伏发电系统蓄电池设计	40
3.3.1	并网型光伏发电系统蓄电池设计	40
3.3.2	离网(独立)型光伏发电系统蓄电池设计	41

第4章 控制器	45
4.1 控制器的基本功能	45
4.2 蓄电池充放电控制方法	46
4.2.1 充电过程	46
4.2.2 充电控制	47
4.2.3 停充控制	47
4.2.4 放电控制	48
4.3 充放电控制器电路及其工作原理	49
4.3.1 并联型控制器	49
4.3.2 串联型控制器	50
4.3.3 脉宽调制型控制器	51
4.3.4 多路控制器	52
4.3.5 智能型控制器	53
4.4 最大功率点跟踪型控制器	54
4.5 控制器参数及选型	55
4.5.1 控制器的主要技术参数	55
4.5.2 控制器的选型	56
第5章 逆变器	58
5.1 逆变器的分类	58
5.2 逆变器的主要功能	59
5.2.1 离网逆变器的主要功能	59
5.2.2 并网逆变器的主要功能	60
5.3 逆变器的技术要求与性能指标	62
5.3.1 技术要求	62
5.3.2 性能指标	62
5.4 并网逆变器的结构及工作原理	65
5.4.1 两级式逆变器的结构及原理	65

5.4.2	单级并网型逆变器	71
5.5	最大功率点跟踪算法	71
5.6	孤岛检测技术	75
5.6.1	光伏并网逆变器的孤岛原理与基本要求	75
5.6.2	常用的光伏并网逆变器孤岛检测技术	77
5.6.3	孤岛检测试验方法	80
5.7	并网逆变器低电压穿越	83
5.7.1	光伏电站接入电网技术规定	84
5.7.2	并网逆变器低电压穿越能力的评估	85
第6章	辅助设备	86
6.1	防雷汇流箱	86
6.1.1	直流熔断器	87
6.1.2	直流断路器	88
6.1.3	直流防雷保护器	88
6.1.4	监测模块	90
6.2	交流配电柜	90
6.2.1	交流断路器	91
6.2.2	交流表计	92
6.2.3	电能表	92
6.2.4	电能质量分析仪	92
6.2.5	交流防雷保护器	93
第7章	光伏发电监控系统	94
7.1	监控系统功能	94
7.2	监控系统构成	98
7.2.1	物理结构	98
7.2.2	网络结构	99
7.2.3	硬件构成	100

7.2.4	软件构成	101
7.3	监控系统设计原则	102
7.3.1	监控系统构成原则	102
7.3.2	功能配置原则	102
第8章	光伏发电系统设计	104
8.1	光伏发电系统设计原则	104
8.1.1	设计需考虑的因素及地理气象条件	104
8.1.2	离网型光伏发电系统的容量设计	109
8.1.3	并网型光伏发电系统的设计	110
8.2	光伏发电系统配置	112
8.2.1	离网型光伏发电系统配置	112
8.2.2	并网型光伏发电系统配置	113
8.3	光伏发电系统设计选型	113
8.3.1	离网型光伏发电系统设计选型	114
8.3.2	并网型光伏发电系统设计选型	115
8.4	光伏发电系统支架及基础部分设计	118
8.4.1	光伏发电系统支架的设计	118
8.4.2	光伏发电系统基础设计	121
8.5	光伏发电系统防雷与接地设计	123
8.5.1	雷电的形成	123
8.5.2	光伏发电系统的防雷设计	124
8.5.3	光伏发电系统的接地设计	129
第9章	光伏发电系统安装施工	130
9.1	光伏发电系统安装准备	131
9.1.1	安装条件准备	131
9.1.2	土建施工要求	131
9.1.3	安全准备	134

9.2	光伏电池组件及光伏阵列安装	134
9.2.1	确定安装位置	134
9.2.2	光伏阵列基础及支架安装	135
9.2.3	光伏电池组件安装	136
9.3	控制器和逆变器安装	136
9.3.1	控制器的安装	136
9.3.2	逆变器的安装	137
9.4	防雷与接地系统安装	138
9.4.1	防雷器的安装	138
9.4.2	接地系统的安装	140
9.5	蓄电池组安装	141
9.6	光伏发电系统布线	142
9.6.1	导线连接	142
9.6.2	安装插座与开关	143
9.6.3	配线安装清单	143
第 10 章	光伏发电系统测试及维护	145
10.1	光伏发电系统的检查	145
10.1.1	光伏发电系统的一般性检查	145
10.1.2	光伏发电系统的日常检查	146
10.1.3	光伏发电系统的定期检查	146
10.2	光伏发电系统的测试	147
10.2.1	光伏阵列的测试	147
10.2.2	绝缘电阻的测试	148
10.2.3	绝缘耐压的测试	150
10.2.4	接地电阻的测试	150
10.2.5	控制器的测试	151
10.3	光伏发电系统的维护	151

10.3.1	光伏阵列的维护	151
10.3.2	蓄电池的储存使用及维护	152
10.3.3	光伏控制器和逆变器的维护	156
10.3.4	配电柜和输电线路的维护	156
10.3.5	防雷装置的维护	157
第 11 章	光伏发电相关政策、标准及规范	158
11.1	光伏发电相关政策	158
11.2	光伏发电相关标准及认证机构	161
11.3	光伏发电标准现状	163
11.4	光伏并网发电标准现状	167
11.5	目前国内光伏发电标准体系存在问题及发展趋势	170
11.6	光伏发电标准体系	172
第 12 章	光伏发电系统工程实例	175
12.1	云电科技园 15kW 光伏并网测试系统	175
12.1.1	项目建设背景	175
12.1.2	项目概述	175
12.1.3	光伏发电系统设计方案	176
12.1.4	测试平台系统设计方案	178
12.1.5	监控系统	181
12.2	西安世界园艺博览会智能电网展示项目	184
12.2.1	项目背景	184
12.2.2	系统总体描述	184
12.2.3	光伏发电系统设计方案	186
12.2.4	微电网系统控制方案	193
	参考文献	202

光伏发电系统概述

光伏发电系统是利用光伏电池半导体材料光生伏打效应，将太阳光辐射能直接转换为电能的一种新型发电系统。光伏发电系统的主要部件是光伏电池、蓄电池、控制器和逆变器。光伏发电系统的特点是可靠性高、使用寿命长、不污染环境、能独立发电又能并网运行。作为一种环境友好的新型发电方式，光伏发电受到各国政府的重视和企业组织的青睐，具有广阔的发展前景。

1.1 光伏发电技术的发展历程

1893 年，法国科学家贝克勒尔（A.E.Becquerel）发现“光生伏打效应”，即“光伏效应”。

1930 年，德国科学家肖特基（Walter Schottky）提出 Cu_2O 势垒的“光伏效应”理论。同年，德国科学家朗格首次提出用“光伏效应”制造“太阳电池”，将太阳能转换成电能。

1941 年，奥尔（Aall）在硅上发现光伏效应。

1954 年，美国科学家恰宾（Charbin）和皮尔松（Pirson）在美国贝尔实验室，首次制成了实用的单晶硅光伏电池，效率为 6%。同年，美国科学家韦克尔（Weichel）首次发现了砷化镓有光伏效应，并在玻璃上沉积硫化镉薄膜，制成了第一块薄膜太阳电池。

1957 年，硅光伏电池效率达 8%。1958 年，光伏电池首次在空间应用，装备美国先锋 1 号卫星电源。

1959年，第一个多晶硅光伏电池问世，效率达5%。1960年，硅光伏电池首次实现并网运行。

在光伏发电技术开发之初的20世纪70年代，由于制造成本高，光伏发电仅用于人造卫星、海岛灯塔等场所，1976年全球光伏电池年产量仅几十万峰瓦(Wp)^①。

20世纪80年代以来，随着光伏电池技术的不断进步、成本不断降低，光伏产业迅猛发展。近年来，世界光伏产业以每年超过30%的速度递增，成为发展速度最快的行业之一。

1.2 光伏发电系统分类

光伏发电系统按其使用场所不同，可分为空间应用和地面应用两大类。空间应用主要用于卫星、航天器、空间站等；在地面可以作为独立的电源使用，也可以与风力发电机或柴油机等组成混合发电系统，还可以与电网连接，向电网输送电力。目前应用比较广泛的光伏发电系统主要是作为地面独立电源使用。今天我们所提到的光伏发电系统，通常也是指地面光伏发电系统。

光伏发电系统将光伏电池通过串并联组成光伏电池阵列（简称光伏阵列），输出的直流电能通过功率变换装置给负荷供电（交流或直流）或者接入电网。光伏发电系统可分为两类：离网（独立）型光伏发电系统和并网型光伏发电系统。离网型光伏发电系统中光伏电池发出的直流电可以直接为直流负荷供电，也可以通过逆变器为交流负荷供电。为了向负荷持续供电，系统必须配置储能设备，目前多为蓄电池，其配置如图1-1所示。并网型光伏发电系统是与电网相连并向电网输送电力的光伏发电系统。根据其是否含有储能设备可以分为两类，含有储能设备的称为可调度式并网型光伏发电系统，不含储能设备的称为不可调度式并

^① 峰瓦（Watts peak, Wp）指太阳能电池组件方阵，在标准测试条件下的额定最大输出功率。（GB 2297—1989.917）

网型光伏发电系统。两者的系统配置如图 1-2 所示。

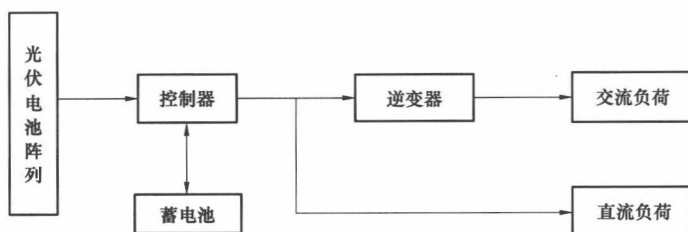


图 1-1 离网（独立）型光伏发电系统配置框图

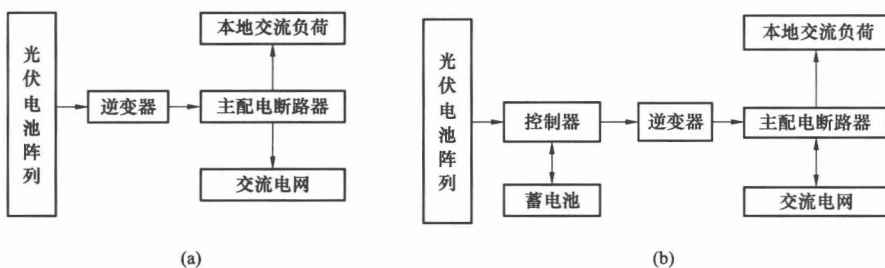


图 1-2 并网型光伏发电系统配置框图

(a) 不可调度式并网型光伏发电系统；(b) 可调度式并网型光伏发电系统

并网型光伏发电系统，要求逆变器具有连接电网的功能，其优点是可以省去蓄電池，降低系统运行成本，提高系统运行和供电的稳定性。离网（独立）型光伏发电系统需要有蓄電池作为储能设备，通常建设在远离电网的偏远地区或作为移动式便携电源，包括村庄供电系统、太阳能用户电源系统、通信信号电源、太阳能路灯等各种带有蓄電池可以独立运行的光伏发电系统。

1.3 全球光伏发电现状及分析

1.3.1 全球光伏发电现状

从 1998 年开始，世界光伏发电市场出现了供不应求的局面，年增长率

保持在 30%~40%。2004 年更是创造历史的新高, 增长率达到 67%, 年产量达到 1253MW。2009 年全球装机猛增, 见表 1-1。

表 1-1 2008~2010 年全球主要国家新增光伏发电装机容量

地区	新增装机容量 (MW)			增长率	
	2008 年	2009 年	2010 年	2008~2009 年	2009~2010 年
全球	6090	7203	12 798	18.28%	77.68%
德国	1500	3200	2500	113.3%	-21.8%
意大利	338	711	1200	110.36%	68.78%
捷克	51	411	1000	705.88%	143.31%
日本	230	400	950	73.9%	137.5%
美国	342	450	1100	31.58%	144.4%
中国	45	160	400	255.56%	150.00%
法国	46	185	600	302.17%	224.32%
西班牙	2605	69	625	-97.35%	805.80%

注 数据来源: 国海证券研究所整理。2009 年全球光伏发展回顾, 2010 年统计。

表 1-1 显示, 2009 年德国新增装机容量达 3200MW, 超过全球总装机容量的 40%。中国新增装机容量仅为 160MW, 与世界领先国家相比还有非常大的差距。2010 年全球新增装机容量预计将达到 12.7GW, 同比增速超过 77%。增长动力主要来源于德国、意大利、捷克、日本、美国、中国、法国等国家。

1.3.2 全球光伏发电装机分析

光伏发电产业的发展离不开政策的支持。从近些年各国经验来看, 当一个国家采取补贴政策时, 该国的光伏发电产业就迎来投资热潮。德国在 2004 年修正了《可再生能源法》, 实施上网电价补贴政策, 当年德国装机容量达到 600MW, 而 2003 年仅为 150MW, 同比增长 300%。日本于 2005 年 10 月取消了“阳光屋顶计划”, 2006 年装机容量为 287MW, 同比出现负增长, 2007 年装机容量继续降为 210MW。

从全球光伏发电需求的地区结构上看,对光伏发电产业需求较大的仍然是发达国家,特别是德国、意大利等欧洲国家,其次是美国和日本这些经济强国。

一、德国

强制上网电价补贴对德国光伏发电产业影响深远。2004年,德国修正《可再生能源法》并开始实行强制上网电价补贴措施,这一措施的出台刺激了德国光伏发电装机容量的快速发展,从2003年底的410MW发展到2007年底的1100MW。

2008年德国全年装机容量更是达到1500MW,为全球最大的光伏发电市场。2009年,虽然德国补贴电价年下降幅度由之前的5%~6.5%变成8%~10%,政府补贴力度有所减弱,但是德国屋顶光伏项目较多,且由于下半年金融危机影响的逐渐转弱,全年德国市场增速强劲,超过市场预期,全年新增装机容量达到3200MW,同比增速达到113%,仍是全球第一大光伏消费市场。

2010年1月21日,德国发布了下调光伏上网电价的草案,受到这个调整草案的短期影响,2010年德国光伏发电产业装机容量减少至2500MW,同比下降了21.8%。不过从长期看,这个政策对于德国光伏发电产业的影响十分有限,光伏发电产业需求仍然看好,如图1-3所示。

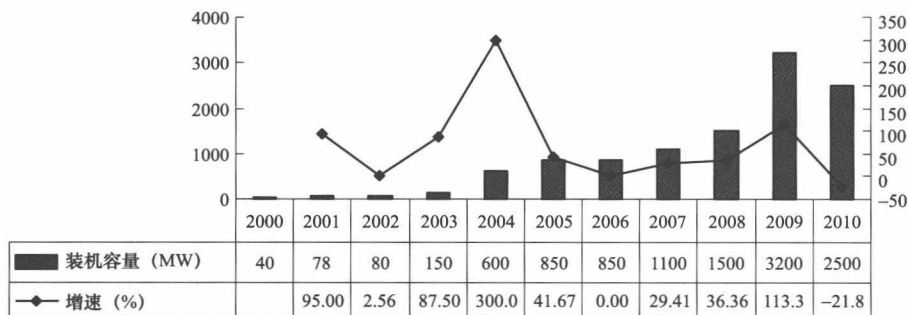


图 1-3 德国光伏装机容量及增速变化

注:数据来源:北京世经未来投资咨询有限公司整理,2010年统计。