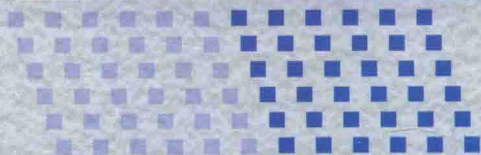
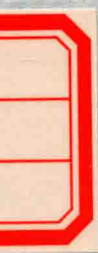


光伏发电技术与应用设计

罗晓曙 廖志贤 韦笃取 蒋品群 著



科学出版社

光伏发电技术与应用设计

罗晓曙 廖志贤 韦笃取 蒋品群 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光伏发电技术为太阳能发电的大规模应用提供了技术条件,随着太阳能应用技术的不断提高和各国政府的大力扶持,太阳能光伏发电技术将会得到更广泛的应用。本书是关于光伏发电技术及设计方法研究的一部专著,是作者及其课题组历时十年,在这一研究领域所做工作的总结和深化。书中系统地阐述了光伏发电系统的建模、非线性动力学行为分析与控制方法,全面深入地研究了光伏并网发电的同步、孤岛检测、最大功率点跟踪方法,给出了作者及其合作者一系列理论研究和实验研究成果,并介绍了当前国内外在该领域的研究动态与趋势。

本书可供电子、通信、电力与自动化等专业的高年级本科生、研究生和相关科研人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电技术与应用设计 / 罗晓曙等著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050608-5

I. ①光… II. ①罗… III. ①太阳能发电—系统设计—研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271142 号

责任编辑: 陈 静 赵薇薇 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 15 3/4 插页: 2

字数: 300 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

世界能源危机的不断加剧和人类环境保护意识的不断加强,使可再生能源开发利用技术备受世界各国的重视。太阳能是一种储备巨大、分布广泛、清洁的可再生能源,近年来,太阳能利用技术已经得到了较大的发展,太阳能光伏发电是太阳能利用的重要方式。光伏发电技术为太阳能发电的大规模应用提供了技术条件,随着太阳能应用技术的不断提高和各国政府的大力扶持,太阳能光伏发电技术将会得到更广泛的应用。因此,研究光伏发电技术及设计方法,对保证光伏发电系统的稳定运行具有极其重要的理论探索价值和应用参考价值。

根据目前国内外光伏发电技术的研究现状与发展动态,本书对光伏发电系统的稳定性、分岔、混沌等非线性动力学行为进行了深入的研究,并将非线性系统的混沌控制、混沌检测理论与方法发展完善,应用于光伏发电系统中逆变器的控制与孤岛检测中。在此基础上,根据光伏并网系统的实际情况,结合复杂网络的理论和方法,深入研究、探索多逆变器并网系统的非线性动力学和同步控制方法,研究成果有望为新能源接入主电网构成新型能源互联网提供新思路与解决方法。研究成果不仅具有较重要的理论探索价值,而且对光伏并网发电系统的设计并确保其稳定运行具有重要的应用参考价值。

本书主要介绍作者近年来研究光伏发电系统的非线性动力学、同步以及相关的软硬件设计成果,同时适当参考了国内外的一些相关资料和研究报告。全书共8章,第1章涉及光伏发电发展概述与基本技术简介,为后续各章内容的理论分析打下基础。第2章阐述光伏发电最大功率点跟踪技术,主要为后续各章研究光伏发电逆变器的直流侧电路控制提供基础。第3章主要研究单相光伏离网逆变器的工作原理与控制方法。首先简要介绍光伏离网逆变器的电路拓扑结构与分析方法,然后分析单相光伏离网逆变器的控制策略,介绍了几种离网逆变器的控制方法,并给出了实验结果。第4章主要研究光伏并网逆变器的同步控制方法。首先介绍国内外有关光伏并网逆变器同步控制研究的现状,然后阐述电流滞环同步控制、基于PI控制器及改进方法的光伏并网逆变器的同步、基于预测控制的光伏并网电流跟踪同步改进算法、基于滤波反步法的单相光伏并网逆变器控制系统等光伏并网逆变器同步方法。第5章主要介绍光伏并网逆变器的动力学建模及其非线性动力学行为。第6章主要研究光伏并网发电系统的孤岛现象与检测方法,为光伏并网系统孤岛检测提供了新的方法与途径。第7章主要研究光伏微网发电技术,首先阐述微网及微网研究进展;然后研究微网逆变器的结构和控制方法;最后深入研究基于小世界网络模型的光伏微网同步方法和面向对等结构孤岛光伏微网的相互耦合同步方法,给出了相关的实验结果。第8章以前面各个章节所讨论的理论

和方法为基础,进行 1kW 单相并网光伏发电系统的软硬件设计,给出了软硬件设计方案以及相关的实验结果。

最后,感谢国家自然科学基金项目(批准号:11262004,11562004)、广西科学研究与技术开发计划项目(批准号:桂科攻 1348017-2)和广西高校科学技术研究项目(批准号:KY2015YB031)的资助。

由于作者水平有限,本书难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 光伏发电发展概述与基本技术简介	1
1.1 光伏发电发展概述	1
1.1.1 光伏发电的发展与优势	1
1.1.2 国外光伏发电的发展现状与趋势	2
1.1.3 国内光伏发电产业的发展现状	4
1.2 光伏发电基本概念与技术简介	5
1.2.1 光伏离网发电技术	5
1.2.2 光伏并网发电技术	6
1.2.3 光伏并网逆变器的结构与种类	8
1.2.4 最大功率点跟踪控制技术	10
1.2.5 光伏并网发电的孤岛现象与检测技术	10
1.2.6 光伏并网发电的同步控制技术	11
参考文献	11
第 2 章 光伏发电最大功率点跟踪算法与功率优化	13
2.1 光伏电池的建模与特性仿真研究	13
2.1.1 光伏电池的等效模型和输出特性	13
2.1.2 光伏阵列的 MATLAB 建模与特性仿真	14
2.2 光伏电池最大功率点跟踪算法	16
2.2.1 最大功率点跟踪原理	16
2.2.2 DC/DC 变换电路	16
2.2.3 典型 MPPT 控制方法简介	18
2.2.4 改进型变步长扰动观察 MPPT 算法	22
2.2.5 基于 Boost 电路改进型扰动观察的 MPPT 算法的 MATLAB/Simulink 建模与仿真	23
2.3 光伏充电控制器的设计	24
2.3.1 光伏充电控制器的主体设计方案	24
2.3.2 蓄电池的充电特性及充电方法	25
2.3.3 蓄电池充电控制程序设计及 PWM 控制信号测试	26
2.3.4 光伏充电控制器的 MPPT 效率测试及分析	28

2.4 本章小结	29
参考文献	30
第3章 单相光伏离网逆变器的的工作原理与控制方法	32
3.1 单相光伏离网逆变器的结构与工作状态分析	32
3.1.1 单相光伏离网逆变器的主回路拓扑结构	32
3.1.2 单相全桥光伏离网逆变器工作状态分析	33
3.2 单相光伏离网逆变器的控制策略分析	35
3.2.1 SPWM 控制的基本原理	35
3.2.2 等面积中心算法	38
3.2.3 双闭环 PI 稳压控制方法	39
3.2.4 电压、电流双闭环 PI 稳压控制方法仿真	40
3.3 本章小结	41
参考文献	41
第4章 光伏并网逆变器的同步控制方法	42
4.1 光伏并网逆变器同步控制方法研究进展简介	42
4.2 光伏并网逆变器的电流滞环同步控制方法及仿真结果	44
4.2.1 电流滞环同步控制方法	44
4.2.2 电流滞环同步控制仿真结果	45
4.3 基于 PI 控制器及改进方法的光伏并网逆变器的同步及仿真结果	47
4.3.1 基于 PI 控制器的电流同步控制方法及其改进	48
4.3.2 基于改进 PI 控制器的电流同步控制方法的控制结果	51
4.4 基于预测控制的光伏并网电流跟踪同步改进算法	52
4.4.1 单相光伏并网逆变器输出回路方程建立及其离散化	52
4.4.2 控制算法设计及其改进	55
4.5 基于滤波反步法的单相光伏并网逆变器控制系统	59
4.5.1 基于传统反步法的单相光伏并网逆变器控制系统	59
4.5.2 滤波反步法设计	61
4.5.3 滤波反步法稳定性分析	62
4.5.4 仿真实验结果与分析	64
4.6 自适应滤波器和 PID 控制器相结合的光伏并网发电系统的同步方法与装置	70
4.6.1 技术背景	70
4.6.2 自适应滤波器和 PID 控制器相结合的光伏并网发电系统同步装置	70
4.6.3 自适应滤波器和 PID 控制器相结合的光伏并网发电系统同步方法	71

4.6.4 仿真实验结果与分析	75
参考文献	80
第 5 章 光伏并网逆变器的非线性动力学特性	82
5.1 概述	82
5.2 基于 Buck DC/DC 降压变换的两级式单相全桥光伏并网逆变器	83
5.2.1 逆变器的电路组成与结构	83
5.2.2 逆变器的工作原理分析	84
5.2.3 逆变器的分段光滑状态方程建立	84
5.2.4 逆变器的分段光滑状态方程的非线性动力学行为	88
5.2.5 结论与讨论	90
5.3 基于 Boost DC/DC 升压变换的两级式单相全桥光伏并网逆变器	90
5.3.1 逆变器电路与工作原理分析	90
5.3.2 逆变器的分段光滑状态方程的建立	92
5.3.3 逆变器分段光滑状态方程动力学行为	98
5.3.4 内参数对两级式光伏并网逆变器非线性动力学行为的影响	102
5.3.5 结论与讨论	103
参考文献	104
第 6 章 光伏并网发电系统的孤岛现象与检测方法	106
6.1 孤岛效应的概念与研究意义	106
6.2 孤岛检测技术的研究现状与发展动态	107
6.3 孤岛效应的概念与检测原理	109
6.3.1 孤岛效应的基本概念	109
6.3.2 孤岛检测的基本原理	110
6.4 孤岛检测的标准与检测盲区	112
6.4.1 孤岛检测的标准	112
6.4.2 检测盲区	113
6.5 常用的孤岛检测方法简介	117
6.5.1 基于电网侧的远程孤岛检测方法	117
6.5.2 基于并网逆变器侧的本地孤岛检测方法	118
6.6 基于频率偏移的主动式孤岛检测方法及其改进	123
6.6.1 AFD 孤岛检测法	123
6.6.2 AFDPF 孤岛检测法	127
6.7 改进的 AFDPF 孤岛检测法	129
6.7.1 改进的 AFDPF 孤岛检测法的原理介绍	129
6.7.2 改进的 AFDPF 孤岛检测法的盲区分析	130

6.8	AFD、AFDPF 以及改进的 AFDPF 孤岛检测方法的仿真模型建立及仿真结果	130
6.8.1	仿真模型建立及仿真参数设定	130
6.8.2	AFD 孤岛检测法的仿真结果及分析	131
6.8.3	AFDPF 孤岛检测法的仿真结果及分析	137
6.8.4	改进的 AFDPF 孤岛检测法的仿真结果及分析	146
6.9	基于模糊控制的 APS 孤岛检测新方法	151
6.9.1	APS 孤岛检测方法	151
6.9.2	改进的 APS 孤岛检测方法	152
6.9.3	改进的 APS 孤岛检测方法 NDZ 分析	155
6.9.4	模糊控制系统的构建	156
6.9.5	基于改进的 APS 孤岛检测方法的建模与仿真分析	161
6.9.6	小结	164
6.10	基于 Morlet 复小波变换的孤岛检测方法	165
6.10.1	Morlet 复小波变换	165
6.10.2	基于 Morlet 复小波变换的孤岛检测方法	166
6.10.3	基于 Morlet 复小波变换的孤岛检测方法的建模与仿真结果分析	168
6.11	复小波与实小波变换在孤岛检测中的对比研究	173
6.11.1	有关参数设置和 Morlet 复小波与 db10 实小波的小波函数	173
6.11.2	仿真结果与分析	174
6.12	电力系统故障影响下孤岛检测新方法的有效性研究	178
6.12.1	电力系统故障概述	178
6.12.2	电力系统故障影响下孤岛检测的有效性分析	179
6.13	基于一维离散非线性映射的李雅普诺夫指数变化的光伏发电孤岛检测方法	181
6.13.1	基于一维离散非线性映射的李雅普诺夫指数变化的孤岛检测的系统组成及检测原理概述	181
6.13.2	有关参数的计算	186
6.13.3	孤岛检测流程与检测结果	187
6.13.4	孤岛检测特性分析	188
	参考文献	189
第 7 章	光伏微网发电技术	194
7.1	概述	194
7.2	微网及微网研究进展	195
7.2.1	微网定义	195

7.2.2 光伏微网技术研究进展	196
7.3 基于小世界网络模型的光伏微网系统非线性动力学行为及其同步方法研究	202
7.3.1 模型与方法	203
7.3.2 数值计算和分析	206
7.3.3 结论	210
7.4 面向对等结构孤岛光伏微网的相互耦合同步方法	210
7.4.1 相互耦合混沌系统同步方法	211
7.4.2 面向对等结构孤岛光伏微网的相互耦合同步模型与方法	211
7.4.3 相互耦合同步方法同步稳定性证明	212
7.4.4 相互耦合同步方法的仿真验证与评价	214
参考文献	215
第 8 章 1kW 单相并网光伏发电系统的软硬件设计	220
8.1 系统总体结构	220
8.1.1 硬件设计	221
8.1.2 DSP 核心电路设计	221
8.1.3 驱动电路设计	223
8.1.4 信号采集电路设计	224
8.1.5 辅助电源电路设计	225
8.2 系统软件设计	226
8.2.1 系统软件总体结构	226
8.2.2 相位同步控制的软件设计	228
8.2.3 电流预测同步控制的软件设计	229
8.3 实验结果	232
8.3.1 驱动信号测试实验	232
8.3.2 电网同步信号测试实验	233
8.3.3 并网电流及电网电压测试实验	234
8.4 本章小结	236
参考文献	237
附录 1 符号对照表	238
附录 2 缩略词表	239
彩图	

第 1 章 光伏发电发展概述与基本技术简介

1.1 光伏发电发展概述

1.1.1 光伏发电的发展与优势

全世界范围内的环境、能源问题日益凸显，低碳和可持续发展近年来已成为全球经济发展的重要导航标，包括太阳能在内的可再生能源成为各主要经济体的重点发展方向。太阳能是人类得以生存发展的最基础的能源形式，人类赖以生存的自然资源几乎都与太阳能息息相关，对太阳能的利用历史更是可以追溯到人类起源时代。从现代科技的发展来看，太阳能开发利用技术的进步有可能决定着人类未来的生活方式。近年来，随着世界能源危机的不断加剧和人类环境保护意识的日益加强，可再生能源的开发利用技术备受世界各国的重视^[1-4]。太阳能是一种分布广泛、清洁的可再生能源，有着巨大的开发应用潜力，近年来，太阳能利用技术已经得到了长足的发展，太阳能光伏发电是利用太阳能的重要方式^[5,6]。太阳能光伏产业从 20 世纪 90 年代后期开始得到快速发展，世界太阳能电池产量在近十年年均增长率超过 38%，目前发展速度已经超过 IT 产业，成为世界上发展最快的新兴产业之一。值得一提的是，2008 年世界太阳能电池产量高达 7.9GW，年增长率 98%。2007 年我国太阳能电池产量居世界第一；2008 年产量约 2.6GW，占全球市场的 30% 以上；2009 年产量超过 4GW，占同年全球太阳能电池总产量 10GW 的 40% 以上。在光伏发电方面，到 2013 年年底，全球太阳能光伏发电装机容量达到 136.7GW，可见，全球光伏产业和市场保持着高速的发展，如图 1.1 所示。

在当前的可再生能源如核能、风能、太阳能、生物质能等发电技术中，太阳能光伏发电被世界各国政府及企业认为是未来更实用、更具发展潜力的新能源发电技术^[7,8]。太阳能光伏发电是把太阳能电池用做能量转换元件，利用半导体的光生伏特效应将太阳的辐射能直接转换成电能的发电技术，其特有的优势如下。

(1) 免费：能量的来源即太阳辐射是免费获取的，一旦能量转换装置设计完成，就可以长期免费使用光能，系统成本主要集中在能量转换装置上。

(2) 丰富：太阳辐射广泛地分布在地球上，可以认为是一种取之不尽、用之不竭的能量来源。据统计，地球可以获得的太阳辐射能量达 173000TW，即每秒钟地球获得的太阳辐射能量相当于 500 万吨的煤燃烧所产生的热量。同时，作为太阳能电池主要原料的硅材料在地壳上储量丰富，不会出现资源耗尽的现象。

(3) 清洁：能量转换过程不需要发生燃烧，不排放二氧化碳或其他废气、废水，

同时由于没有机械传动部件,不存在机械磨损问题,更不会产生噪声污染,与自然环境关系和谐。

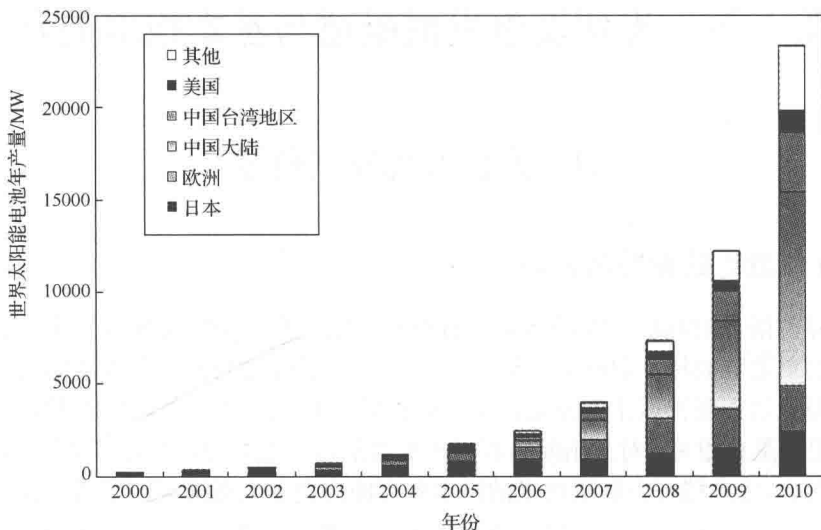


图 1.1 世界太阳能电池的历年产量（见彩图）

（4）耐用：近十年来的研究和实践表明，太阳能电池性能稳定可靠，其使用寿命可以超过 30 年，这使光伏发电系统实现高使用寿命、免维护成为可能。

（5）高效：一方面，太阳能电池直接把光子转换成电能，过程简单，虽然目前光伏转换效率只能达到 25% 左右，但是理论上光能到电能的转换效率可以超过 80%，将来一旦材料及工艺水平提高，将会使光伏发电成为一种非常高效的发电技术；另一方面，太阳能电池及各种电能变换器如 DC/DC、DC/AC 等均可以轻易实现模块化设计，因此发电系统易于建造安装、扩大容量，并且易于实现分布式发电。

1.1.2 国外光伏发电的发展现状与趋势

在光伏发电技术不断革新和各国政府的全力支持下，全球的太阳能光伏产业自 20 世纪 90 年代以来持续高速发展，其中以德国、美国、日本等发达国家的光伏产业发展最为突出。在欧洲光伏产业协会（european photovoltaic industry association, EPIA）的“目标 2020”预测中，到 2020 年欧洲联盟（简称欧盟）12% 的电力将由光伏供应。2012 年，全球光伏新增装机量达到 29.7GW，同比增长 3.6%。从装机分布看，德国以 7.6GW 的装机容量重回全球首位，但同比增长 2%；而中国则以 4.5GW 的装机容量上升至全球第二，同比增长 66.7%；美国以 3.3GW 的装机容量位居全球第三，同比增长 78.6%；意大利则由 2011 年的全球第一滑落至全球第四，装机量 3.0GW。到 2012 年年底，全球光伏累计装机容量突破 100GW；至 2013 年年底，全球光伏装机量达到 136.7GW。按照目前已知的美国、欧洲和日本制定的光伏发展中长期规划，到 2020 年全球累计装

机容量将超 200GW, 2030 年将达到 1850GW。德国政府是全球最早倡导、鼓励光伏发电应用的国家之一。1990 年, 德国政府率先推出“1000 太阳能屋顶计划”, 并且在 1999 年 1 月起开始实施“十万太阳能屋顶计划”, 这项计划已于 2004 年完成, 德国政府共兴建了 10 万个太阳能发电屋顶, 每个屋顶容量约 3~5kWp。到 2010 年为止, 德国光伏组件安装容量达 17GWp, 约占全球光伏发电总安装量的 50.4%^[9]。

同样, 在 1996 年, 美国政府推出了一项“光伏建筑物计划”, 投资额超过 20 亿美元; 1997 年美国在全球率先发起“百万太阳能屋顶计划”, 该计划已提前完成。2005 年, 美国政府对购买和使用光伏发电装置的用户给予一定的奖励。2010 年, 美国政府批准了“布莱斯太阳能发电项目”, 在加利福尼亚州建立一座 1000MW 容量的太阳能发电厂, 是美国目前最大的光伏发电厂, 并于 2012 年投入使用^[6]。

作为能源短缺大国的日本, 对太阳能光伏发电的发展和推广极为重视。日本政府早在 1974 年就公布了“阳光计划”, 1993 年又提出“新阳光计划”, 旨在推动太阳能研究计划全面、长期地发展, 并相继颁布了一系列鼓励太阳能研发和应用的相关法规, 这一系列措施极大地推动了日本光伏产业的发展与应用。2002 年, 日本的光伏电池生产总量已达到 254.5MW, 并且以世界最快的速度——4.86% 增长, 到 2010 年一半以上的新居屋顶已安装光伏太阳能系统。目前, 已取得了令人难以置信的成效, 有将近 50 万户安装了太阳能屋顶系统, 同时太阳能成本大幅度降低。到 2020 年, 日本计划在现有太阳能发电规模的基础上扩大 20 倍, 达到世界第一^[10]。

纵观全球, 光伏发电产业的初期研发和示范应用阶段已经完成, 如今光伏发电已经遍及各个用电领域。今后, 光伏发电系统将朝着高效率、低成本、长寿命、实用、美观的方向发展。

根据 EU JRC (欧洲联合研究中心) 对世界未来能源发展的预测, 到 2020 年世界太阳能发电量占世界能源需求总量的 1%, 到 2050 年和 2100 年分别占 20% 和 50%, 如图 1.2 所示。

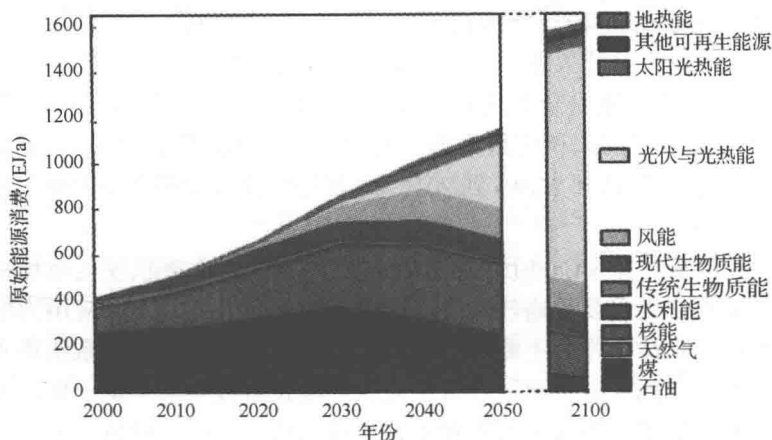


图 1.2 世界能源发展预测 (数据来自 EU JRC) (见彩图)

1.1.3 国内光伏发电产业的发展现状

我国的光伏发电产业起步比较晚,初期发展速度较慢,到2008年国内的装机容量才占世界总容量的1%左右^[11]。2008年,我国开始启动屋顶和大型地面并网光伏发电示范项目;2009年年初完成了甘肃敦煌10MWp级大型荒漠并网光伏电站的招标工作;同年3月,推出了“太阳能屋顶计划”与“金太阳工程”,这一系列的政策措施给我国未来的太阳能光伏产业提供了一个广阔的发展空间^[12]。目前我国光伏产业的发展已经拥有一定的规模,但同国外相比,还相差甚远^[13]。首先我国光伏产业大而不强,产能高消费低,光伏产业主要依赖国外市场,严重阻碍我国光伏技术的发展;其次,在技术层面,研发和创新能力薄弱,光伏系统效率低,部分关键生产设备仍依赖进口;最后,光伏发电成本一直高居不下,生产效率低,这一直以来都是我国光伏产业在国内难以普遍推广的瓶颈。

近几年来,我国光伏组件生产能力不断增强,成本逐渐降低,市场不断扩大,装机容量也逐年增加。在国务院文件《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中,已经把太阳能光伏产业定为国家未来发展战略性的重要产业。着力加快我国太阳能光伏并网发电技术,推动光伏产业的发展,对于实现我国工业转型、发展国家经济、推进节能减排、优化能源结构等具有非常重要的意义。

2012年7月9日,国务院发布了《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》,其中拟定了太阳能产业的发展规划:以提高太阳能电池转化效率、器件使用寿命和降低光伏发电系统成本为目标,大力发展太阳能光伏电池的生产制造新工艺和新装备;积极推动多元化太阳能光伏光热发电技术新设备、新材料的产业化及其商业化发电示范;建立大型并网光伏电站,推进建筑一体化光伏发电(buliding integrated photovoltaic, BIPV)应用,建立具有国际先进水平的太阳能发电产业体系。建立促进光伏发电分布式应用的市场环境,推进以太阳能应用为主、综合利用各种可再生能源的新能源城市建设。2012年,为了保证光伏产业健康发展,我国加大了对光伏应用的支持力度,先后启动两批“金太阳”示范工程,上调《太阳能发电发展“十二五”规划》中光伏装机规划目标至20GW,建设分布式光伏发电规模化应用示范区等,再加上光伏系统投资成本不断下降,我国光伏应用市场一片繁荣,当年新增装机量达4.5GW,同比增长66.7%,累计装机量达到8GW,到2015年,我国已建成太阳能发电装机容量21GW以上。

在我国“十二五”太阳能光伏产业发展规划中,把扩大光伏发电市场特别是分布式光伏并网发电等作为重要战略任务,其中加强相应的产品研发和应用力度;把推动和完善光伏发电技术体系作为主要任务之一。掌握太阳能光伏发电系统集成技术、光伏并网逆变器关键性技术,全面提升本土光伏发电设备技术水平是一项重要内容。

目前,随着太阳能应用技术的不断提高和各国政府的大力扶持,太阳能发电技术将会得到更广泛的应用。可以相信,随着原料工艺水平的不断提高和科学技术的进步、

光伏并网发电技术的日益成熟，在不久的将来，太阳能光伏发电将是主流的能源利用方式。

1.2 光伏发电基本概念与技术简介

光伏发电技术主要分为光伏离网发电技术和光伏并网发电技术两大类，另外风光互补发电技术是一种复合发电技术，也包括了光伏发电的技术和原理，如图 1.3 所示。光伏离网发电系统也称为独立型光伏发电系统，是由光伏阵列、蓄电池组、充放电控制器和逆变器等部件构成。光伏离网发电系统多用于边远地区如村庄供电系统、岛屿供电系统、通信基站供电、公共事业单位供电等。由于在光伏离网发电系统中含有的蓄电池是一种损耗快、维护频繁的组件，因此增加了系统的建设成本，系统寿命较短。光伏并网发电技术主要应用于建筑一体化光伏发电系统、建筑附加型光伏发电（building attached photovoltaic, BAPV）系统和大型荒漠/开阔地发电系统。

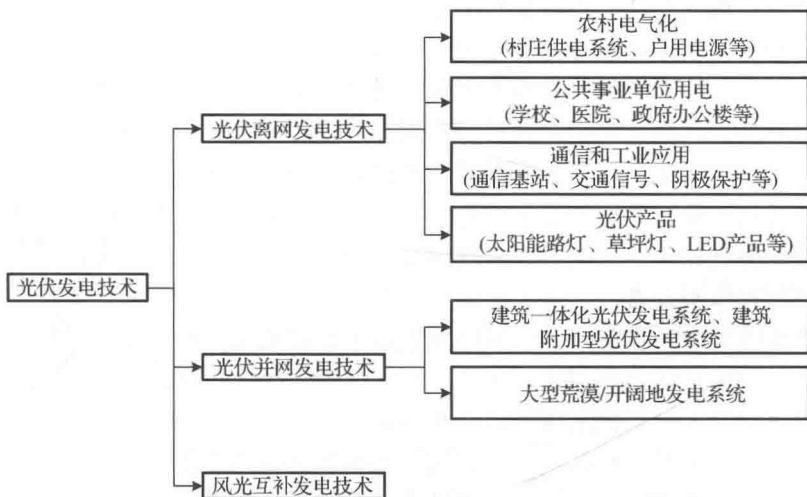


图 1.3 光伏发电技术的应用

1.2.1 光伏离网发电技术

如果逆变器输出端不与公共电网（utility grid）相连接，而是直接给负载供电，则光伏发电系统称为离网发电技术或称独立式离网发电系统^[4]。光伏离网发电系统一般包括光伏阵列、DC/DC 变换器及最大功率点跟踪（maximum power point tracking, MPPT）控制器、蓄电池、逆变器和负载。其中储能环节是必不可少的，在光照充足时将剩余电能储存到储能设备中，供日照不足的时候或晚间使用。但该环节（蓄电池）极大提高了光伏离网发电技术的设备成本和维护成本，一般只适用于小功率用电场合，如单个家庭供电，其原理框图如图 1.4 所示。

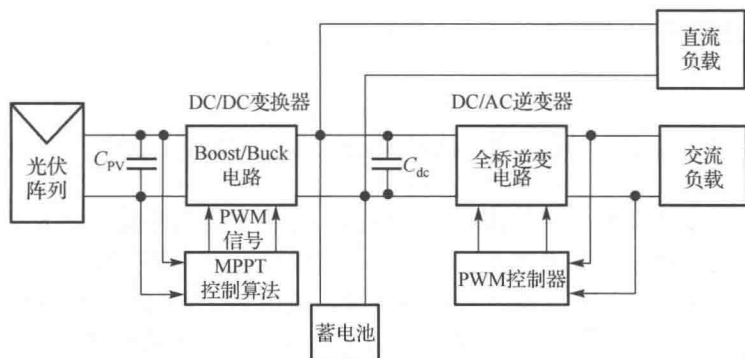


图 1.4 光伏离网发电系统

1.2.2 光伏并网发电技术

将逆变器输出端与公共电网连接的光伏发电系统称为光伏并网发电系统。当有阳光时，逆变器将光伏系统所发的直流电逆变成正弦交流电，产生的交流电可以直接供给交流负载，然后将剩余的电能输入电网，或者直接将产生的全部电能并入电网。在没有阳光时，负载用电全部由电网供给。因为直接将电能输入电网，所以免除配置蓄电池，省掉了蓄电池蓄能和释放的过程，可以充分利用光伏阵列所发的电力，从而减小了能量的损耗，降低了系统成本。光伏并网发电系统包括光伏阵列、DC/DC 变换器以及逆变器。但是在并网系统中，并网逆变器将电能直接送入公共电网，因此蓄电池作为储能环节可以不设置，这就大大降低了光伏发电的设备成本和维护成本，提高了光伏发电系统的寿命。目前，光伏并网发电技术已经成为光伏发电技术应用的主流，占全球光伏发电市场的 80% 以上，市场巨大，前景广阔。据统计，2007—2010 年，光伏并网发电市场占全球光伏发电市场的 90% 以上。

与光伏离网发电系统相比，光伏并网发电系统具有以下优点。

(1) 所发电能直接馈入电网，以电网为储能装置，省掉了蓄电池，比光伏离网系统的建设投资减少 25%~45%，从而使发电成本大为降低。省掉蓄电池也可提高系统的平均无故障时间和降低蓄电池的二次污染。

(2) 可以将光伏阵列与建筑物完美结合起来，既能发电又能作为建筑材料和装饰材料，使物质资源充分利用并发挥多种功能，不但有利于降低建设费用，还能提高建筑物的科技含量，有利于绿色建筑智慧建筑的发展。

(3) 发电的分布式结构，有利于就地分散供电，充分利用各种闲散空间，节省土地资源，进入和退出电网灵活，既有利于增强电力系统抵御战争和灾害的能力，又有利于改善电力系统的负荷平衡，并可降低线路损耗。

(4) 可起电网调峰作用。

单相光伏并网发电的原理如图 1.5 所示。

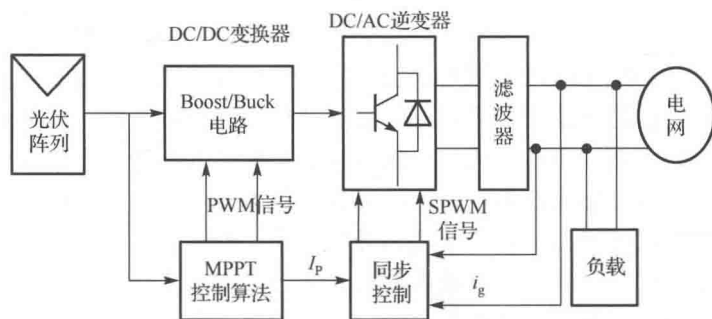


图 1.5 单相太阳能并网发电系统结构图

在光伏并网发电系统中，光伏并网逆变器是系统的关键设备之一，近年来已成为一个十分热门的研究领域^[15-17]，而光伏并网逆变器的同步控制方法是其中的关键技术^[18]。因此，研究光伏并网逆变器的同步控制方法，并探索新的理论方法和控制策略，对提高其各种性能指标如工作范围、稳定性、效率及电能输出质量等具有十分重要的现实意义。

按照与电网接入点的不同，光伏并网发电系统通常分为配电侧的光伏并网发电系统和输出侧的光伏并网发电系统。其中，接入点为低压 400V 以下的称为配电侧光伏并网发电系统，接入点为高压 10kV 以上的称为输出侧光伏并网发电系统。目前，国际上采用最多的是配电侧光伏并网发电系统，而输出侧光伏并网发电系统只占光伏并网发电市场的 10% 以下。配电侧光伏并网发电系统包括户用型（residential）光伏并网发电系统和非户用型（non-residential，即安装在商业公共建筑上）光伏并网发电系统。输出侧光伏并网发电系统通常安装在阳光资源非常丰富的地区（如我国西部地区）。光伏并网发电系统如图 1.6 所示。



图 1.6 大型光伏并网发电站

经历了近十年来的研究和开发，光伏并网逆变器技术已经得到了很大的发展，特别是在电力电子技术发达的国家如德国、美国、日本、加拿大等，已有较为成熟的产