

大规模分布式光伏电源 接入配电网运行与控制

赵 波 著

非
外
借



科学出版社

大规模分布式光伏电源 接入配电网运行与控制

赵波 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较为全面地介绍了大规模分布式光伏电源接入配电网运行与控制所涉及的内容,阐述了相关理论、模型和方法,并结合实际配电网,对运行与控制问题进行了详细讨论。全书共9章,第1章介绍国内外光伏发展情况及并网技术研究现状;第2章介绍分布式光伏电源的技术基础;第3章对含分布式光伏电源的配电网负荷特性进行分析;第4章分析基于渗透率的区域配电网分布式光伏电源并网消纳能力;第5~8章介绍含高渗透率分布式光伏电源的配电网潮流分析、电压控制、短路电流分析与计算和电能质量分析方法;第9章对含高渗透率分布式光伏电源的配电网综合措施展开介绍。

本书可供从事配电网规划调度、分布式光伏电源研究及工程设计的人员参考,也可作为电力相关专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大规模分布式光伏电源接入配电网运行与控制/赵波著. —北京:科学出版社,2017. 11

ISBN 978-7-03-055148-1

I. ①大… II. ①赵… III. ①太阳能光伏发电-配电系统-电力系统运行-研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269386 号

责任编辑:张海娜 姚庆爽 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年11月第一次印刷 印张:17 3/4

字数:350 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

目前,我国正在积极转变能源生产和消费方式、优化能源结构、加大可再生能源的开发力度。国家高度重视光伏产业发展,出台了关于促进光伏产业健康发展的若干意见,有力推动了光伏产业的快速发展。

分布式光伏电源一般采用就近发电、就近并网、就近转换、就近使用的原则,系统安装灵活,可实现就地发电、就地消纳,能够减少或延缓输配电设施投资,在一定程度上缓解局部用电紧张状况,有利于提高用户供电的可靠性。分布式光伏电源规模化多点接入配电网,会对配电网的运行控制产生较大的影响。为保证配电系统的安全经济运行以及最大化消纳分布式光伏电源,需解决一系列技术问题。因此,探索适应分布式光伏电源规模化应用的技术,充分发挥分布式光伏电源的经济效益,深入研究分布式光伏电源的运行与控制具有重要的理论意义和工程实践意义。

赵波博士及研究团队在分布式光伏技术领域开展了长期扎实有效的工作,近几年承担了一系列国家级或国网公司级的相关重大科研项目及示范工程,积累了较为丰富的研究成果和宝贵的工程经验。在理论研究方面,开展了含高渗透率分布式光伏并网的配电网规划设计方法、运行控制与能量优化方法、电能质量调节与治理技术研究等,为提高配电网对分布式光伏电源的接纳能力提供充分的技术保证。并基于上述研究成果在浙江嘉兴秀洲光伏产业园区、海宁尖山新区以及宁波杭州湾新区等大型园区开展了大量的工程实践,为支持、服务大量分布式光伏电源的顺利并网提供了技术支撑,取得了一系列的创新性研究成果。该书是赵波团队多年研究工作成果的结晶,系统地阐述了分布式光伏电源相关的理论和技术问题,具有较高的学术性和实用性。

相信该书的出版可对分布式光伏电源领域的技术研究、工程应用和人才培养起到积极的推动作用。



合肥工业大学教授 丁明

2017年6月

前 言

我国积极大力发展风、光等清洁能源,当前风机和光伏的装机容量均列世界首位,其发展速度令世界侧目,作为应对国际气候变化和履行低碳减排承诺的重要手段,获得了国际上普遍的赞誉和认可。

近年,国家适时提出大力发展可再生能源战略,制定“集中式与分布式”并举的发展方针,尤其是对分布式光伏电源的建设与发展高度重视,从政策、管理、机制和商业模式上保障了分布式光伏电源多方位政策落地。与此同时,电力体制的深化改革以及能源互联网的兴起对于分布式光伏电源的发展具有重要的导向作用,使得分布式光伏电源与智能电网以及用户侧服务有机融合。随着一系列政策的出台以及先进技术理念的支撑,可以预见分布式光伏电源在我国将呈现出井喷式发展。

大规模分布式光伏电源接入中低压配电网,将彻底改变传统配电网单向潮流的特点,对区域电网的安全运行以及分布式光伏电源的就地消纳造成较大影响。现有电力系统控制方法均是“被动地改变配电系统自身”去适应分布式光伏电源的发展,并没有充分发挥分布式光伏电源自身调节能力来主动支撑配电网。分布式光伏电源发展的目标是其具备像常规火电机组一样可控可调的特性,从不同的时间尺度上挖掘其在稳态上的可调度性及暂态上对配电系统的动态支撑能力,实现分布式光伏电源从“安装即不管理(fit and forget)”到“适应并支撑(fit and rely upon)”的转变。因此,分析分布式光伏电源之间及其与配电网的相互影响和作用机理、探究大规模分布式光伏电源接入配电网的运行与控制已成为电力公司和光伏运营商需要共同面对的重要课题。通过深入研究分析以及制定相关措施,不仅可以有效降低安全稳定运行风险,减少配电网管理成本,而且可以有效提升分布式光伏电源的经济效益,从而可以促进分布式光伏电源整体的可持续发展。

作者及所在团队长期从事分布式光伏电源的相关理论研究及示范工程建设工作,具有扎实的理论基础和实践经验。在2009年,作者承担了国家电网公司重点科技项目“分布式光伏电源接入配电网的规划设计和运行控制技术研究”,并出版了《分布式光伏电源并网关键技术》一书。由于当时分布式光伏电源的发展刚刚起步,很多技术尚处于初级阶段,主要针对单个分布式光伏电源并网影响开展分析,对于大规模分布式光伏电源接入配电网运行与控制仍有很多问题需要不断地深入研究。

通过近几年的发展,作者在分布式光伏电源接入配电网的规划设计和运行控制技术、分布式光伏规模化接入配电网就地消纳关键技术、实现高比例光伏发电就

地消纳的多层级配电网电压协同控制技术、含光伏的智能微电网关键技术等方面开展了大量深入的理论研究和工程实践,取得了一些突破性的成果,其涵盖的内容主要包括光伏发电渗透率的计算与分析、含大规模分布式光伏的配电网电压分析及调节抑制措施、短路电流以及电能质量的分析与计算等。本书是上述研究成果的系统性归纳、提炼与总结,期望本书的出版在推动大规模分布式光伏电源的进一步发展能够发挥积极的作用。

本书第1章由冯恽彬、徐珂撰写,第2章由张雪松、汪科撰写,第3章由周金辉、张永明撰写,第5章由徐琛、王子凌撰写,第7章由林达、葛晓慧撰写,第8章由李鹏、朱承治撰写,第4、6、9章由赵波撰写,全书由赵波负责统稿。在本书编写过程中,得到了合肥工业大学丁明教授的热心帮助,在此表示衷心的感谢。最后,对合作培养的研究生表示感谢,他们是很多项目的实际参与者,提出了很多宝贵的意见,他们是汪湘晋、肖传亮、顾益娜、韦立坤、徐志成、邱海峰。

本书得到国家自然科学基金项目(51207140)、国家电网公司科技项目(5211DS150015)和中国博士后科学基金项目的资助。

在编写过程中,虽对体系的安排、素材的取舍、文字的叙述尽了最大努力,但由于作者学识有限,书中疏漏之处在所难免,恳切期望读者批评指正。

作者联系方式:zhaoboju@163.com。

作者

2017年6月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 国内外光伏发电的现状与趋势	1
1.1.1 美国	3
1.1.2 日本	4
1.1.3 德国	5
1.1.4 中国	6
1.2 光伏电源并网技术研究现状	8
1.2.1 并网光伏电源技术特点	8
1.2.2 分布式光伏电源大规模并网对配电网的影响	9
1.2.3 分布式光伏电源大规模并网带来的研究需求	10
1.3 小结	12
参考文献	13
第 2 章 分布式光伏电源技术基础	15
2.1 分布式光伏电源概述	15
2.1.1 分布式电源定义与优势	15
2.1.2 分布式光伏电源原理与结构	16
2.2 光伏电池	17
2.2.1 光伏电池的分类	18
2.2.2 光伏电池的发展进程	19
2.2.3 硅光伏电池模型	21
2.3 逆变器	24
2.3.1 逆变器与光伏组件连接的拓扑结构	25
2.3.2 逆变器的分类与特点	27
2.3.3 对并网光伏逆变器的要求	30
2.4 最大功率点跟踪控制	32
2.4.1 爬山法/扰动观测法	32
2.4.2 电导增量法	33
2.4.3 开路电压法	35

2.4.4	短路电流法	35
2.4.5	纹波相关控制法	36
2.4.6	负载电流/负载电压最大化法	37
2.4.7	dP/dV 或 dP/dI 反馈控制	38
2.4.8	MPPT 效率	38
2.5	小结	39
	参考文献	40
第3章	含分布式光伏电源的配电网负荷特性分析	42
3.1	配电网负荷特性	42
3.1.1	负荷类型与指标体系	42
3.1.2	典型负荷时序特性	44
3.1.3	实例分析	46
3.2	光伏电源出力特性	48
3.2.1	光伏电源并网规范	48
3.2.2	典型光伏电源时序特性	49
3.2.3	实例分析	51
3.3	分布式光伏电源接入后的配电网净负荷特性	53
3.3.1	分布式光伏电源接入对系统负荷水平的影响	54
3.3.2	分布式光伏电源接入对系统负荷波动的影响	57
3.4	分布式光伏电源电力电量分析	58
3.4.1	分布式光伏电源有效出力及等效发电量	58
3.4.2	分布式光伏电源有效出力修正系数的计算方法	59
3.5	小结	62
	参考文献	62
第4章	基于渗透率的区域配电网分布式光伏电源并网消纳能力分析	64
4.1	引言	64
4.2	分布式光伏电源经济效益分析	65
4.2.1	分布式光伏电源并网成本/效益分析	65
4.2.2	市电平价	68
4.3	大规模分布式光伏电源并网渗透率分析	69
4.3.1	一些概念的进一步解释	69
4.3.2	光伏渗透率的基本概念和基本假设	71
4.3.3	光伏渗透率分析	72
4.3.4	不同负荷类型下光伏渗透率分析	79
4.4	配电网中分布式光伏电源最大准入容量计算	84

4.4.1 静特性约束法	84
4.4.2 带约束的最优化方法	88
4.4.3 数字仿真法	88
4.5 基于随机场景法的分布式光伏电源最大准入容量分析	89
4.5.1 方法介绍	90
4.5.2 案例分析	92
4.6 提高光伏渗透率的措施	94
4.7 小结	96
参考文献	96
第5章 含高渗透率分布式光伏电源的配电网潮流分析	99
5.1 引言	99
5.2 含分布式光伏电源的配电网潮流计算	99
5.2.1 常用的配电网潮流算法比较	99
5.2.2 分布式光伏潮流计算模型	100
5.2.3 含分布式光伏电源的配电网潮流算法	102
5.3 分布式光伏电源对配电网电压影响分析	102
5.3.1 数学模型	102
5.3.2 仿真分析	105
5.4 分布式光伏电源对线损影响分析	111
5.4.1 数学模型	111
5.4.2 仿真分析	114
5.5 实际案例分析	116
5.5.1 分布式光伏电源并网接入方式	116
5.5.2 馈线级分析	118
5.5.3 变电站级分析	122
5.6 小结	128
参考文献	129
第6章 含高渗透率分布式光伏电源的配电网电压控制	130
6.1 引言	130
6.2 分布式光伏电源对配电网电压影响的机理分析	131
6.3 电压控制措施	134
6.3.1 AVC 系统	134
6.3.2 馈线级调压	135
6.3.3 光伏电源逆变器	135
6.4 光伏电源逆变器控制策略	136

6.4.1	一般控制原理	136
6.4.2	恒功率因数控制策略	137
6.4.3	变功率因数控制策略	137
6.4.4	电压自适应控制策略	138
6.5	仿真建模	141
6.5.1	研究方法	141
6.5.2	OpenDSS 简介	142
6.5.3	仿真模型	143
6.6	仿真分析	148
6.6.1	仿真基础数据准备	148
6.6.2	仅考虑 AVC 控制的极端场景潮流及电压分析	152
6.6.3	光伏逆变器参与调压	155
6.7	小结	166
	参考文献	167
第 7 章	分布式光伏电源短路电流分析与计算	169
7.1	引言	169
7.2	分布式光伏电源的短路特性分析	169
7.2.1	电网电压对称跌落时的短路特性分析	170
7.2.2	电网电压不对称跌落时的短路特性分析	171
7.3	光伏电源的低电压穿越技术	172
7.3.1	低电压穿越标准	173
7.3.2	光伏电源低电压穿越控制策略	174
7.4	光伏电源的故障电流特性仿真	177
7.4.1	不具备低电压穿越功能的光伏电源故障仿真	177
7.4.2	具备低电压穿越功能的光伏并网逆变器故障仿真	177
7.5	含分布式光伏电源的配电网短路电流计算方法	182
7.5.1	配电网模型	182
7.5.2	传统配电网短路电流计算方法	183
7.5.3	含分布式光伏电源的配电网短路电流计算方法	184
7.5.4	含分布式光伏电源的配电网故障仿真	188
7.6	小结	194
	参考文献	194
第 8 章	分布式光伏电源并网电能质量分析	196
8.1	引言	196
8.2	电能质量标准条款和应用	196

8.2.1 光伏并网相关电能质量标准	196
8.2.2 光伏并网技术标准中电能质量允许值	197
8.3 分布式光伏电源电压波动与闪变评估分析方法	206
8.3.1 评估程序	207
8.3.2 评估计算	208
8.4 分布式光伏电源谐波分析方法	210
8.4.1 谐波分析基础	211
8.4.2 分布式光伏电源接入典型馈线谐波分析	218
8.4.3 实际案例分析	223
8.5 小结	224
参考文献	224
第9章 含高渗透率分布式光伏的配电网综合措施分析	226
9.1 引言	226
9.2 储能技术	226
9.2.1 储能技术分类	226
9.2.2 电化学储能	228
9.2.3 电化学储能模型	231
9.3 储能系统在提高配电网消纳分布式光伏电源的分析	233
9.3.1 储能系统的定址定容方法	234
9.3.2 案例仿真	236
9.4 需求侧响应	239
9.4.1 需求侧响应概念	239
9.4.2 需求侧响应的负荷特性	241
9.5 需求侧响应在含高渗透率分布式光伏电源的配电网中应用	243
9.5.1 激励型需求侧响应优化模型	243
9.5.2 激励型需求响应求解方法	245
9.5.3 案例仿真	247
9.6 集群分区控制	249
9.7 含高渗透率分布式光伏电源的配电网集群电压控制	251
9.7.1 基于无功/有功电压灵敏度解耦分区方法	251
9.7.2 无功/有功电压分区内控制策略	255
9.7.3 案例分析	257
9.8 小结	267
参考文献	267

第 1 章 概 述

1.1 国内外光伏发电的现状与趋势

在当前全球化石能源日益耗尽、气候变暖和生态环境恶化的大环境下,人类对于可再生能源的关注也与日俱增,其中光伏发电技术已逐渐成为可再生能源领域的一支主力军。自 1998 年起,全球光伏发电装机容量以每年 35% 的速度增长,全球光伏发电市场正经历一个快速增长的过程。相比于 2000 年的 1200MW 累计装机容量,到 2014 年底全世界并网光伏发电累计装机容量已超过 188GW,预计到 2020 年将达到 490GW^[1]。随着光伏产业的发展,光伏发电市场竞争也日益激烈,特别是欧洲、美国、中国和日本等国家和地区在光伏领域的投资增长迅速,截至 2014 年底全球光伏组件产量大约是 50GW,其中中国产量 35GW,同比增长 27.2%^[2]。2017 年,全球新增太阳能装机容量预计将超过 85GW,继续保持高速增长^[3]。

为了进一步推动可再生能源发展,近年来世界各国先后出台了多项推进光伏产业的政策^[4-5]。美国环保署(US Environmental Protection Agency, EPA)于 2014 年 6 月 2 日公布了其“清洁能源计划”,承诺十年内将使包括太阳能在内的可再生能源使用增加一倍。同时,美国能源部将出资 1500 万美元帮助家庭、企业和社区发展太阳能项目^[6]。日本政府陆续出台了《关于促进新能源利用等特别措施法》《可再生能源配额制法》等一系列政策法规,明确了日本新能源的发展目标和各方责任^[7]。中国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》《国家“十一五”科学技术发展规划》《可再生能源“十二五”规划》中均部署了与发展光伏发电技术相关的重点及重大示范工程项目^[4-8]。

需要注意的是,目前美国和日本均制定了“2030 年及之后的光伏发电路线图”。日本希望未来的光伏研发能从“政府指引研发以创建初期光伏系统市场”转变为“基于学术界、产业界和政府间的任务共担与合作的研发模式以创建成熟的光伏系统市场”,设定了 2030 年累积装机容量达 100GW 的发展目标。美国希望由以出口带动光伏产业发展转变为投资国内技术和市场,扩大内需,带动产业显著增长,设定了每年新增装机容量 19GW,2030 年累积装机容量达 200GW 的宏大目标,届时,光伏发电成本价将降到 0.06 美元/(kW·h),光伏发电将占据电力市场较大份额,并成为电力的主要来源。

相比较而言,中国光伏产业的发展从现状和总体趋势看,《可再生能源中长期发展规划(2007)》中设定的 2010 年光伏装机容量 300MW、2020 年 1.8GW、2030 年 10GW 以及 2050 年 100GW 等发展目标明显偏低,与当前世界光伏产业发展势头相比显得滞后。同时,中国目前在涉及光伏产业发展的核心技术、核心装备等多个方面所需攻克的关键技术、突破方向、发展路径等尚未提出明确目标;在涉及光伏并网发电问题,并网及运行管理行业标准、并网价格以及系统维护等方面缺乏相对完整、系统的管理办法和政策细则。因此,积极推进中国光伏发电领域的相关研究和工程实际应用,顺应世界光伏产业发展势头,必将具有深远的意义。

目前,在光伏电池的研究与开发领域具有国际领先地位的主要是德国、日本、美国和澳大利亚等发达国家。澳大利亚以新南威尔士大学(The University of New South Wales,UNSW)的马丁格林教授(Martin A. Green)为代表,在单晶硅光伏电池研究上居世界领先地位,近年来首次提出了第三代光伏电池的概念,对光伏电池的发展做出了巨大的贡献^[9]。从光伏电池产业和利用来看,日本、德国、英国、美国和西班牙等国起步较早且发展较快。中国的太阳能光伏产业起步相对较晚,但是发展十分迅猛,特别是 2004 年后,在欧洲市场的大力拉动下,其光伏产业更是得到了飞速发展,连续 5 年增长率超过 100%,并于 2007 年一跃成为太阳能电池第一生产大国。到了 2010 年,中国光伏电池产量已超过全球总产量的 50%。中国在光伏产业上逐渐形成较为完整的产业链,包括从硅材料、电池组件到光伏系统应用等方面^[10-11]。截至 2014 年底,世界十大光伏电池生产厂家排名已经发生了重大变化,具体如表 1.1 所示。中国的太阳能电池厂商具有优势地位,在前十名中占据了六席,其中排名前五的均为中国厂商,天合光能凭借 3.66GW 的产量高居榜首,英利绿色能源紧随其后,阿特斯阳光电力排第三^[2]。

表 1.1 2014 年世界十大光伏电池生产厂家

生产厂	国家	排名	产量/GW	比例/%
天合光能(Trina Solar)	中国	1	3.66	14.6
英利绿色能源(Yingli Green Energy)	中国	2	3.36	13.4
阿特斯阳光电力(Canadian Solar)	中国	3	3.11	12.4
晶科能源(Jinko Solar)	中国	4	2.94	11.7
晶澳太阳能(JA Solar)	中国	5	2	8.0
夏普太阳能(Sharp)	日本	5	2	8.0
昱辉阳光能源(ReneSola)	中国	7	1.97	7.8
第一太阳能(First Solar)	美国	8	1.85	7.4
韩华新能源(Hanwha SolarOne)	韩国	9	1.45	5.8
太阳电力(SunPower)	美国	10	1.4	5.6
京瓷(Kyocera)	日本	10	1.4	5.6

2014 年,全球太阳能光伏系统安装增长了 17%,总装机容量达到了 47GW。图 1.1 为 2014 年世界前 10 光伏市场占全球安装量比例分配图。排名前十的国家依次为中国、日本、美国、英国、德国、法国、南非、澳大利亚、印度和加拿大,其新增装机容量之和达 38.3GW,占全球新增装机容量的 81.5%^[12]。从区域分布来看,亚洲作为新兴市场,已然成为全球最主要的光伏市场,其 2014 年新增装机容量占比达到 59%,中国继续保持全球最大光伏市场地位,但增速已明显放缓,日本继续保持着强劲的增长态势;美洲超越欧洲成为全球第二大光伏市场,2014 年新增装机容量占比达到 19.3%;2014 年欧洲光伏市场继续萎缩,新增装机容量占比仅为 16.8%。在可再生能源法案的刺激下,2014 年英国光伏市场蓬勃发展,并首次超越德国成为欧洲新增装机容量最大的国家^[2]。

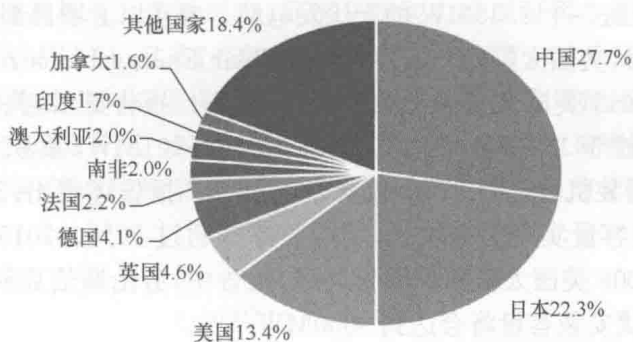


图 1.1 2014 年世界前 10 光伏市场占全球安装量比例

1.1.1 美国

美国总统克林顿在 1997 年 6 月 26 日宣布了太阳能“百万屋顶计划”,计划 2010 年以前,在 100 万座建筑物上安装光伏系统,主要是光伏发电系统和光伏热利用系统。这项计划的提出是由社会发展的趋势所决定的,也是美国致力于光伏发电开发、研究的工作人员长期努力的结果。其直接原因有两个:

(1) 由于温室效应气体 CO_2 的大量排放,地球逐年变暖,这就要求人们减少常规能源的使用。如果太阳能“百万屋顶计划”顺利实施,那么到 2010 年 CO_2 年排放量约可减少 300 多万吨。

(2) 美国太阳能光伏发电与热利用技术已经比较成熟,开始进入大规模生产阶段。

目前,太阳能“百万屋顶计划”已经在美国某些地区大力开展起来,如图森地区的 Civano 工程。在夏威夷,由于资源条件的优越,太阳能已经成为当地能源供给的主要形式,并已成为经济发展的重要组成部分。

2001 年,美国加利福尼亚州政府提出了世界闻名的“加州太阳能计划”,计划

由州政府做出总预算 32 亿美金,在 10 年内安装一百万个太阳能发电系统。

2004 年 9 月,美国能源部等发布了《我们的太阳能未来——2030 及以后的美国光伏工业路线图》,雄心勃勃地提出了美国的光伏产业发展计划。

2006 年,美国通过了“总统太阳能美国计划”,由美国总统下令增加研发费用至 1.48 亿美金,该项目的目的在于培养美国太阳能光伏技术的竞争力。

2008 年 4 月,费城市长宣布将在宾夕法尼亚海军园区建立一个兆瓦级的光伏发电站。

2008 年 5 月,杜克能源宣布计划全部收购位于卡罗莱纳州夏洛特的 16MW 光伏电站发出的电力。

2009 年 6 月中旬,佩克能源服务公司签署合同,将在新泽西州的亚特兰大城会议中心屋顶建造一个 2.36MW 的光伏发电站。现在以上项目都已完成。

2015 年 4 月,美国太阳能工业协会(US Solar Energy Industries Association, SEIA)发布了《2014 美国太阳能工业年回顾》报告。报告显示,美国 2014 年太阳能安装容量相较于 2013 年增加了 30%,达到 6201MW,累积光伏安装容量 18.3GW,占新增装机容量的 32%,仅次于天然气。报告还指出,2012~2014 年,住宅区光伏安装容量实现大幅增长,年增长率都超过 50%。2010 年 4 月 15 日,SEIA 发布的《2009 美国太阳能工业年回顾》报告中,劳伦斯伯克利国家实验室预估到 2025 年光伏安装容量将会达到 9000MW^[13-14]。

隶属美国能源部的国家可更新能源实验室(The National Renewable Energy Laboratory, NREL)在 1977 年成立之初就是一个太阳能研究机构,直到 1991 年才更名为 NREL。现在美国有越来越多的机构开展太阳能方面的研究。美国对新能源发电采取了财政刺激政策,如回购电价政策、投资补贴和可再生能源证书等。

1.1.2 日本

日本光伏发电发展初期开始于日本通产省 1974 年制订的以发展太阳能为主的可再生能源代替石油的技术研究开发中长期规划,即有名的“阳光计划”。随后,日本政府成立了日本新能源综合开发机构(Japan's New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)专门负责光电产业化的一条龙管理,在政府加大资金投入的条件下,加速了光伏电池的产业化,使得光伏电池的生产成本大幅下降,生产技术有很大进步。例如,其多晶硅铸造基板的光电转换效率由 1984 年的 12.7%提高到 1988 年的 15.7%,非晶硅的转化效率亦由 1985 年的 8.25%提高到 1988 年的 10.1%。

在 1992 年世界环保大会后,民众对降低 CO₂ 等问题重视程度加大。日本通产省决定从 1994 年开始,在日本实施住宅用光电系统的优惠政策,即对每户居民住宅用光电系统(含逆变器、蓄电池和电网连接系统)补助总造价(含施工费)的 1/2,

对建设商亦采取同样补助,从而极大地促进了住宅用光电项目的推广。尽管当时日本处于泡沫经济破灭的不景气时期,居民申请上光电项目仍十分踊跃,如1994~1999年累计实施3.3万件,共121MW。2000年申请达2.6万件,合计96MW,达到前5年合计水平。

自2000年开始,日本制定了引人瞩目的《面向2030年的光伏发电路线图》,设定了2030年累积装机容量达100GW的发展目标。届时,其光伏发电可以满足约50%的日本居民电力消费(约占总电力消费的10%)。在2009年6月28日NEDO宣布对路线图做出更新,目的是加快光伏发电的发展,预定到2020年将光伏发电的成本价降到0.14美元/(kW·h),到2030年将成本价降到0.07美元/(kW·h)^[15]。

受2011年福岛核电站事故影响,日本开始大力发展可再生能源(主要是光伏发电)。2012年7月1日,日本《光伏补贴法案》正式实施。按照这一法案规定,未来20年内,该国电力公司必须保证收购家庭和企业利用太阳能所生产的电力,其上网补贴电价定为42日元/(kW·h),约合人民币3.36元/(kW·h)^[16]。尽管在2013年和2014年,该光伏补贴电价持续下调,日本仍然是目前全球光伏补贴最优惠的地区。

1.1.3 德国

德国是世界上光伏装机规模最大的国家,其在推动光伏发展方面的政策、管理、技术等方面的经验为世界上多个国家效仿。德国政府在2000年首先颁布《可再生能源法》,2003年圆满完成了“十万屋顶发电计划”。2004年德国光伏安装总量首次超过日本,走在世界的前列,其光伏安装量在2008年新增1.5GW,2009年新增了3.2GW,并于2010~2012年间到达峰值约7.5GW。德国原定到2020年总共安装并网光伏10GW在2012年已经提前实现。自2013年起,德国的光伏发展出现了电网运行压力过大、新能源补贴导致电价上涨过快等问题。2014年8月1日,德国通过了新的《可再生能源法》修订案,严格限制可再生能源新增规模,减少新建项目资助额度。2014年德国光伏新增装机容量约为1.9GW,同比下降41.3%,连续两年保持下降趋势^[2]。截至2014年底,德国光伏电站的总装机容量达到38GW,光伏已成为德国装机容量最大的电源。当年德国光伏发电量占到总发电量的6.3%。

德国政府在推广光伏发电方面采取了一系列有力的措施,主要是银行贷款和上网电价补贴等。在德国,若在自家屋顶上安装一套光伏发电设备相当于办一个小型发电厂,发出的电输入到公共电网,2004年国家最高给予57.4欧分/(kW·h)的补贴。目前,德国光伏产业已经成为一个非常活跃的经济产业。随着欧债危机的蔓延以及光伏组件价格的下跌,2009年开始德国多次下调光伏补贴额度。其中

2010年7月1日、10月1日两次下调补贴,宣布2011年的光伏上网电价比2009年下调达33%~35%^[17]。根据新的《可再生能源法》,德国最晚自2017年起,将通过招标确定可再生能源的补贴额度。

德国在大力发展国内光伏发电产业的同时,也积极依靠自身先进的技术去拓展海外市场,如2009年,德国Solon SE中标西班牙一处11MW的光伏电站项目,项目由西班牙可再生能源及光伏有限公司(REPS)投资,该公司为挪威能源企业Statkraft AS的子公司。目前在光伏逆变器行业领域内市场占有率最高的厂家SMA就来自德国。

1.1.4 中国

中国具有利用太阳能的良好自然条件,其国土总面积的2/3属于接受太阳总辐射量较佳的一、二、三类地区。除四川盆地、贵州省资源稍差外,西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏和内蒙古等地均为太阳能资源丰富地区,东部、南部及东北等其他地区都是太阳能资源较丰富和中等区。

在20世纪80年代后期,通过引进国外关键设备、成套生产线及太阳能光伏电池生产技术,中国的光伏电池生产能力达到4.5MW,光伏电池产业初步形成。2008年底,中国太阳能光伏电池年产量已达2GW,占全球市场的30%以上。2009年中国光伏电池年产量达到7.5GW,占全球市场的44%。2008年之前,由于国内光伏应用匮乏,90%的光伏电池出口国外。2009年,国家相继出台了“金太阳”示范工程、“屋顶工程”等一系列支持光伏产业发展的政策,有效拉动了国内市场的光伏应用需求,由此带动了中国光伏发电的大规模应用。太阳能电池生产线和部分多晶硅生产用关键设备已立足于国内自主研发和生产,上下游产业链本土化进程正在日益加快^[18]。表1.1中,2014年世界十大光伏电池生产厂家中,中国太阳能电池厂商在前十名中占据了六席。

按照国家发展和改革委员会编制的《可再生能源中长期发展规划》,到2010年太阳能光伏发电总容量300MW,其中偏远农牧区应用150MW,建筑物和公共设施应用80~100MW,大型并网光伏电站20MW,其他商业应用30MW。2020年光伏发电总容量1.8GW,其中偏远农牧区应用500MW,建筑物和公共设施应用1GW,大型并网光伏电站200WM,其他商业应用100MW。光伏发电总容量1.8GW的目标在2011年已经提前实现。

2009年中国的光伏产业迎来了大发展的有利契机,《太阳能屋顶计划》《“金太阳”示范工程》和《关于做好“金太阳”示范工程实施工作的通知》文件相继发布^[19-20]。一年之中,三大扶持光伏产业的利好政策文件出台,足以显示政府在推广光伏产业以及启动国内光伏行业的决心。当年就相继有中节能杭州能源与环境产业园开发建设光伏并网发电项目(规划容量20MW,一期安装2MW)、中国第一