



分布式光伏发电并网 与 运维管理

张中青 主编

FENBUSHI GUANGFUFADIAN BINGWANG
YU YUNWEI GUANLI



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

FENBUSHI GUANGFUFADIAN BINGWANG
YU YUNWEI GUANLI

分布式光伏发电并网 与运维管理

张中青 主编



中国电力出版社

内 容 提 要

本书共分7章,第1~2章介绍光伏发展及分布式光伏并网技术。第3章重点分析分布式光伏并网对配电网的影响。第4章主要研究含分布式光伏的配电网运行管理技术。第5章研究含分布式光伏的配电网可靠检修技术。第6章对分布式光伏电站工程质量及关键电气部件现场快速检测等技术进行了全面介绍。第7章选取分布式光伏10kV、380V接入以及多点接入的工程实例进行分析,并给出了典型实例。

本书可供分布式光伏发电系统规划、设计、运行维护人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

分布式光伏发电并网与运维管理/张中青主编. —北京:中国电力出版社,2014.12

ISBN 978-7-5123-5284-1

I. ①分… II. ①张… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第304402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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年12月第一版 2014年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 10.5印张 175千字

印数0001—3000册 定价45.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

编 委 会

主 编 张中青

副 主 编 王正刚 周凤珍 邱武斌

编写组成员 宋宁希 张景超 李朝晖 杨海晶

孙 芊 王 倩 余晓鹏 周 宁

石 光 李 强 张振安 王 伟

陈上吉 王忠强 安 庆 梅林常

秦福祥 郝文杰 丁同奎 李晓蕾

李会涛 郭剑黎 余彦杰 张喻喆

张源超 邹广宇 林小进 吴蓓蓓

前 言



进入新世纪后，大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显，建立在化石能源基础上的工业文明逐步陷入困境，以新能源大规模开发利用为特征的能源变革在世界范围内广泛开展。新能源技术、智能技术、信息技术、网络技术不断突破，与智能电网全面融合，正在承载并推动第三次工业革命。为实现国家保障能源安全、保护生态环境、提高能源效率的能源战略目标，构建具有中国特色安全、经济、高效、绿色的现代能源体系，实现对传统电网的有益补充，国家出台了多项分布式电源扶持政策，鼓励新能源发展。

以分布式光伏发电为代表的可再生能源发电技术凭借其投资成本低、发电方式灵活、对环境友好等优点得到了快速发展，但与此同时也带来了许多问题，如电网双向潮流、保护重新配置、运行检修安全性等。目前研究方向大多针对光伏发电系统本体，对于大量分布式光伏发电接入后电网如何安全运维和可靠检修方面的研究涉及不多。本书从分布式光伏发电并网对电网的影响入手，系统分析分布式光伏接入引起的安全运维管理、可靠检修、试验检测等问题，研究含分布式光伏发电的配电网运行管理、可靠检修和试验检测技术，制定相应的控制策略和指导流程，完善分布式光伏接入技术应用，并针对不同分布式光伏发电并网类型给出了工程实例。

本书共分7章：第1~2章介绍光伏发展及分布式光伏并网技术。主要包括光伏发电原理及国内外发展状况，微电网、储能及逆变等技术。第3章重点分析分布式光伏并网对配电网的影响。通过对典型分布式光伏接入电网系统进行仿真，从配电网稳定性、电能质量、可靠性等角度详细分析分布式光伏接入产生的影响。第4章主要研究含分布式光伏的配电网运行管理技术。针对光伏并网调度、运行及故障处理等诸多运行管理问题进行介绍，研

究传统配电网、含配电自动化的智能配电网接入分布式光伏运维管理策略。第5章研究含分布式光伏的配电网可靠检修技术。为确保分布式光伏发电并网后配电网安全可靠运行,在安全措施、工作流程等方面研究采取一系列措施。第6章对分布式光伏电站工程质量及关键电气部件现场快速检测等技术进行了全面介绍。第7章选取分布式光伏10kV、380V接入以及多点接入的工程实例进行分析,并给出了典型实例。

由于编者水平有限、编写时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编者

2014年10月

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳能及光伏发电	1
1.2 国内外光伏发展状况	2
1.2.1 美国光伏发展状况	2
1.2.2 德国光伏发展状况	4
1.2.3 日本光伏发展状况	5
1.2.4 中国光伏发展状况	6
1.3 光伏发电系统概述	8
1.3.1 光伏发电基本原理	8
1.3.2 光伏发电系统类型	9
第 2 章 分布式光伏并网技术	13
2.1 并网逆变系统	13
2.1.1 光伏逆变器	13
2.1.2 最大功率跟踪	15
2.1.3 孤岛效应与防孤岛保护	16
2.1.4 低电压穿越	17
2.1.5 最大渗透率	18
2.2 储能与微电网技术	18
2.2.1 储能技术	18
2.2.2 微电网的定义	22
2.2.3 微电网的典型结构	23
2.2.4 微电网的特点	24
2.3 分布式光伏发电并网方式	25
2.3.1 技术原则和主要设备配置	25
2.3.2 10kV 并网接入方式	26
2.3.3 380V 并网接入方式	27

第3章 分布式光伏并网对配电网的影响	29
3.1 国内配电网现状	29
3.1.1 接线方式及运行情况	29
3.1.2 配电自动化应用	31
3.2 分布式光伏发电并网对配电网稳定运行的影响	33
3.2.1 对潮流分布的影响	33
3.2.2 对电压分布的影响	37
3.2.3 对负荷特性的影响	40
3.3 分布式光伏并网对配电网系统保护的影响	44
3.3.1 单电源辐射状馈线保护	46
3.3.2 方向性过电流保护	48
3.3.3 纵联方向比较式保护	49
3.3.4 纵联电流差动保护	50
3.3.5 防非正常孤岛保护	51
3.3.6 自动重合闸	53
3.4 分布式光伏并网对配电网电能质量的影响	58
3.4.1 电压偏差	58
3.4.2 电压波动和闪变	59
3.4.3 谐波	63
3.4.4 三相不平衡	65
3.5 分布式光伏并网对配电网可靠性的影响	65
3.5.1 光伏发电对可靠性的影响	65
3.5.2 提高光伏并网后配电网可靠性的方法	66
第4章 含分布式光伏的配电网运行管理技术	67
4.1 传统配电网光伏并网运行管理技术	67
4.1.1 光伏并网的潮流管理策略	67
4.1.2 光伏并网的配电调度策略	69
4.1.3 光伏并网的计量管理规定	75
4.2 智能配电网光伏并网运行管理技术	78
4.2.1 智能配电网运行管理技术	78
4.2.2 光伏接入智能配电网运行管理	79
4.3 配电网故障处理	83

4.3.1	配电网故障处理模式	83
4.3.2	光伏并网后的故障处理	86
4.4	分布式光伏发电并网接口装置及应用	91
4.4.1	并网接口装置及功能	91
4.4.2	并网接口装置的应用	93
第5章	含分布式光伏的配电网可靠检修	95
5.1	分布式光伏并网对配电网检修的影响	95
5.2	检修管理及安全防护	96
5.2.1	传统配电网检修及防护措施	96
5.2.2	含分布式光伏接入配电网的检修及安全防护	100
5.3	检修管理流程	103
5.3.1	负荷转移原则	103
5.3.2	检修管理原则	103
5.4	设备巡视	109
5.4.1	配电网常规设备的巡视	109
5.4.2	光伏设备的检修巡视	110
第6章	分布式光伏并网试验检测技术	112
6.1	分布式光伏电站工程质量验收方法	112
6.2	分布式光伏发电并网性能检测技术	114
6.2.1	光伏发电电能质量检测技术	114
6.2.2	光伏发电防孤岛检测技术	121
6.2.3	光伏发电电网适应性检测技术	126
6.2.4	光伏发电功率特性检测技术	128
6.2.5	光伏发电站低电压穿越检测技术	129
6.3	分布式光伏发电并网性能评价	133
6.3.1	电能质量评价	133
6.3.2	防孤岛评价	135
6.3.3	电网适应性评价	135
6.3.4	功率特性评价	135
第7章	分布式光伏并网工程实例	136
7.1	分布式光伏并网 10kV 接入工程实例	136
7.1.1	典型接入方案	136

7.1.2	接入工程实例	136
7.1.3	并网后的运维管理	137
7.2	分布式光伏并网 380V 接入工程实例	141
7.2.1	典型接入方案	141
7.2.2	接入工程实例	141
7.2.3	并网后的运维管理	142
7.3	分布式光伏并网多点接入工程实例	146
7.3.1	接入工程实例	146
7.3.2	并网后的运维管理	147
附录 A	分布式光伏发电并网流程	150
附录 B	专业名词解释	151
附录 C	索引	153
参考文献	155

绪 论

1.1 太阳能及光伏发电

随着煤炭、石油等传统化石能源的逐渐枯竭和环境恶化问题日益严峻，世界各国纷纷把目光投向可再生能源，期望通过开发利用可再生能源，替代目前的能源发展利用模式，实现经济的可持续健康发展。在众多可再生能源中，太阳能以其独有的优势成为人们关注的焦点。

太阳能每秒钟到达地球的能量为 1.7×10^{14} kW，若到达地球表面 0.1% 的太阳能转为电能，转变率按 5% 计算，则每年发电量可达 7.4×10^{13} kWh，相当于目前全世界能耗的 40 倍。太阳能资源取之不尽，用之不竭，是人类能够自由利用的重要能源，又是减少二氧化碳等有害物质排放的可再生能源之一，因此，其发展利用受到各国的普遍重视。

太阳能的利用形式主要有光热利用、光化学转换和光伏发电三种形式。光热利用成本低、安装便捷、利用效率较高，目前主要就地使用，如太阳能热水器、太阳能灶等，光化学转换在自然界中以光合作用的形式普遍存在，但相关技术发展尚未成熟；光伏发电将太阳能直接转换成电能，对太阳能辐照要求较低，适宜集中和分布式布置，便于大面积推广。且由于太阳能电池的原料——硅的储量较丰富，太阳能电池转换效率的不断提高以及生产成本的不断下降，太阳能光伏发电将在能源、环境和人类社会未来发展中占据重要地位。

与传统的火力、水力、柴油发电相比，光伏发电具有许多优点，如安全可靠、无噪声、无污染，能量随处可得、不受地域限制，无需消耗燃料、无机械转动部件、故障率低、维护简便，可以无人值守、建站周期短、规模大小不受限制，方便与建筑物相结合等。因此，从能源环境角度、边远地区及特殊应用领域需求等方面考虑，光伏发电都极具吸引力。

截至 2013 年底，光伏发电在发电总装机容量中所占比重并不大，随着光伏发电效率的不断提高和成本的不断降低，在光照充分地区，分布式光伏发电将会得到人们越来越多的青睐。据国际能源协会预测，光伏发电 2030 年之后将会有较稳定和可观的增长率。近些年，越来越多的国家开始实行“阳光计

划”，开发太阳能资源，如美国的“光伏建筑计划”、欧洲的“百万屋顶光伏计划”、日本的“朝日计划”以及我国已开展的“金太阳工程”等。欧盟计划到2030年，光伏发电装机容量将达到200GW左右，届时全世界光伏发电将会达到1000GW。依据《国家能源局“十二五”规划》，到2015年底，我国太阳能发电装机容量将达到2100万kW以上，年发电量将达到25亿kWh；到2020年，太阳能发电总装机容量将达到5000万kW，届时我国太阳能发电产业将达到国际先进水平。预计到2030年，光伏发电将会在全世界发展中国家的乡村大规模普及，对广大人民的生活产生积极影响。

1.2 国内外光伏发展状况

1.2.1 美国光伏发展状况

来自美国太阳能协会的数据显示（见图1-1、图1-2），在过去十年中，美国光伏市场平均以每年32%~46%的速度增长，装机总量全球排名第四，预计到2015年，美国新增装机容量将达到5.5GW_p^①。

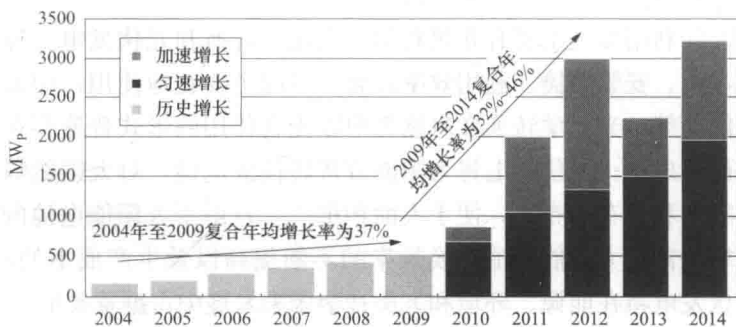


图 1-1 美国光伏市场 2004~2014 年的需求量

为了进一步支持光伏产业发展，美国出台了一系列支持政策及发展计划。

1. 奥巴马能源计划

(1) 为美国家庭提供短期退税，应对日益上涨的能源价格。

^① 峰瓦 (W_p) 为太阳能装置容量计算单位，是装设太阳能电池模板于标准状况（模板温度 25℃，AM1.5，1000W/m² 太阳光照射）下最大发电量的总和。

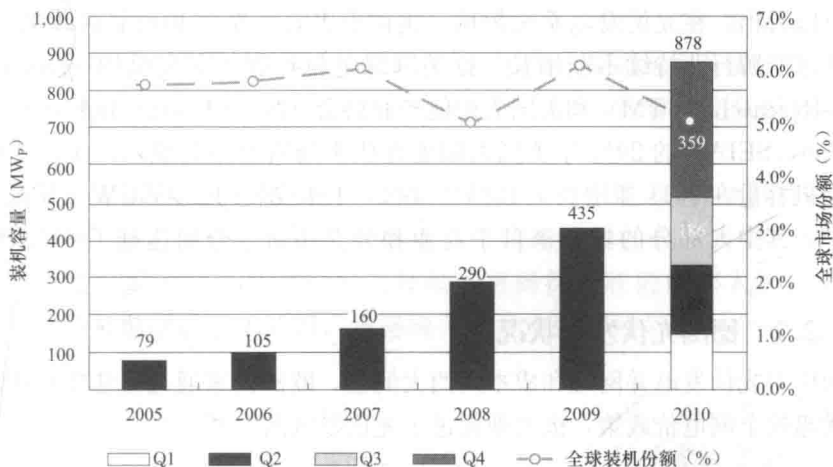


图 1-2 2005~2010 年美国光伏发电装置全球市场份额

(2) 未来十年投入 1500 亿美元资助替代能源研究，并为相关公司提供税务优惠。

(3) 未来十年大幅减少对中东和委内瑞拉的石油进口依赖。

(4) 以 7000 美元的抵税额度鼓励消费者购买节能型汽车，动用 40 亿美元联邦政府资金支持汽车制造商，目标到 2015 年美国的混合动力汽车销量达到 100 万辆。

(5) 可再生能源发电量配额的限定，2012 年达到发电量的 10%，2025 年达到 25%。

(6) 支持强制性的“总量管制与排放交易”制度，力争在 2050 年前实现二氧化碳减排 80%，低于 1990 年水平。

2. 一揽子减税计划

美国参议院于 2008 年达成共识，将延续光伏行业的减税 30% 政策 (ITC)，具体条款包括：

- (1) 对于商用光伏项目的投资税减免延长 8 年；
- (2) 住宅光伏项目的投资税减免政策延长 2 年；
- (3) 取消每户居民光伏项目 2000 美元的减税上限。

3. 美国光伏投资税减免政策 (ITC)

居民或企业法人在住宅和商用建筑屋顶安装光伏系统，发电所获收益享受投资税减免，减免额相当于系统安装成本的 30%。

可以看出，在光伏发电系统领域，美国有良好的基础和可靠的政策支持，能保证该能源行业持续不断增长。据美国绿色科技媒体研究机构（Greentech Media Research, GTM）和美国太阳能产业协会（Solar Energy Industries Association, SEIA）的 2011 年美国太阳能光伏市场研究报告显示，美国太阳能光伏装机容量在 2011 年增长了 109%。在 2011 年安装的 1.855GW 太阳能光伏项目中，其中大部分的增长来自于商业和公共项目，分别达到了 800MW 和 758MW。

1.2.2 德国光伏发展状况

为应对光伏发电并网难和成本高两大问题，欧洲国家通过立法实行强制并网和优惠的上网电价政策，极大地促进了光伏发电的发展。

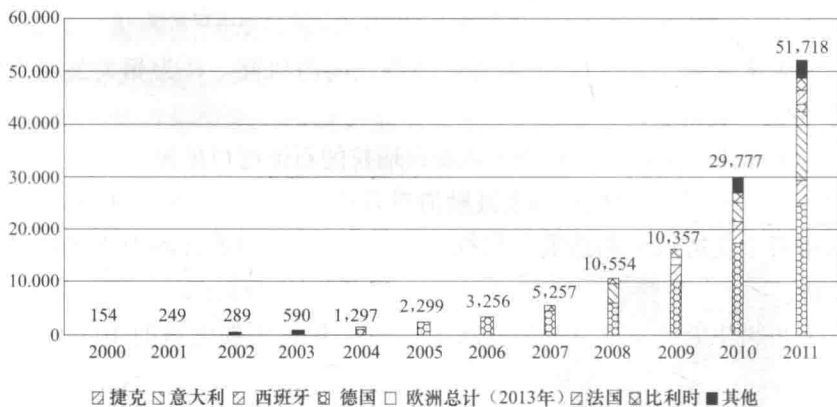


图 1-3 欧洲光伏发展预测

早在 1991 年，德国就通过了《强制购电法》，要求电网企业按规定的电价全额收购可再生能源发电量。2000 年，德国颁布了世界上第一部《可再生能源法》（Eneubare Energie Gesetz, EEG），解决了光伏系统的并网难问题。EEG 规定：光伏发电在固定时间内（20 年）享受固定的上网电价，并设置价格递减调整机制，上网电价每年按 5% 的比例递减。2004 年，德国修订了 EEG，规定对不同容量、不同形式的光伏发电实行 46~62 欧分/kWh 的区别上网电价。2009 年，德国采取了更加灵活的上网电价政策，将其每年递减的比例由固定值改为与容量挂钩，以更好地利用电价杠杆，调节新增的装机容量。

2010 年,德国新增光伏装机容量 13.4GW,其中 81%是容量不超过 1MW 的系统,58%是容量不超过 100kW 的屋顶分布式光伏系统。截至 2012 年 8 月,德国的光伏装机容量超过 30GW,其中 80%的容量是从低压电网接入的。

当然,德国的这场能源革命并非免费的,可再生能源上网电价补贴由电力用户分摊,因此有人对德国光伏发电政策的可持续性表示质疑。2010 年,德国政府提出要大幅降低光伏发电补贴,遭到执政联盟内部人员的强烈反对,最终就补贴政策达成共识,将德国光伏发电能够维持在一个适当的发展速度上。

欧洲能源交易公司调查结果显示,2012 年 5 月 25 日,德国全国光伏发电功率达到 21GW,约占当时全国负荷功率的 40%,当日的光伏发电量达 2240 万 kWh,满足了电力总需求量的 30%,相当于 20 座大型传统火力发电厂或核电站的发电量。考虑到分布式风电、生物质发电的贡献,德国已经出现来自分布式电源的发电功率超过总需求功率一半的情况。除就地用电外,德国光伏系统大部分剩余电力需要外送,其配电网已经成为一个名符其实的功率双向流动的有源网络。

由于现有配电网在最初设计时并没有考虑分布式电源的接入,大量分布式电源接入配电网后将会给运行管理及电能质量带来问题。为此,欧盟以及欧洲各国制定了一系列技术标准与规范,明确分布式电源并网的技术要求,为光伏发电并网提供了法律和技术上的保障。

1.2.3 日本光伏发展状况

20 世纪 70 年代第一次石油危机以后,为改善能源结构,减轻对石油的依赖,日本开始寻找替代能源。凭借其在半导体方面的技术优势和强大的经济实力,辅以一系列法律法规、政策和措施,加上企业和民众的积极参与,日本有力地促进了太阳能光伏技术的发展。

随着光伏产业的迅速发展,涌现出一大批龙头企业,开始形成完备的生产、销售和使用体系,逐步向商业化阶段发展。在日本经济产业省的推动下,光伏系统在居民区的应用逐渐形成比较成熟的市场,在此基础上,光伏系统在工业和公共设施上的应用市场正在形成,规模也在不断扩大。

截至 2006 年底,日本光伏发电累计装机容量达到 1760MW,其中居民光伏系统的安装量达到 36 万户,累计装机容量达到 1254MW。日本政府的光伏发展目标如表 1-1 所示。

表 1-1 日本对光伏发电的发展目标

项目 (年份)	2010	2020	2030
光伏年装机容量 (MW)	1800	5700	10000
光伏累计装机容量 (MW)	4820	28700	82800
太阳能电池组件成本 (日元/W _p)	100	75	<50
使用寿命 (年)	25	30	—

1.2.4 中国光伏发展状况

中国高度重视可再生能源的开发利用，近年来在国家科技资金投入、政府工程及优惠政策制定等方面加大了对可再生能源发展的支持力度。政府颁布的《中华人民共和国可再生能源法》对加快推动我国可再生能源开发利用产生了非常重要的作用。预计在未来几年内将有大量的光伏电站并网运行。

中国太阳能资源较丰富，其分布情况如图 1-4 所示，按接受太阳能辐射量的大小，中国大致上可分为四类地区。

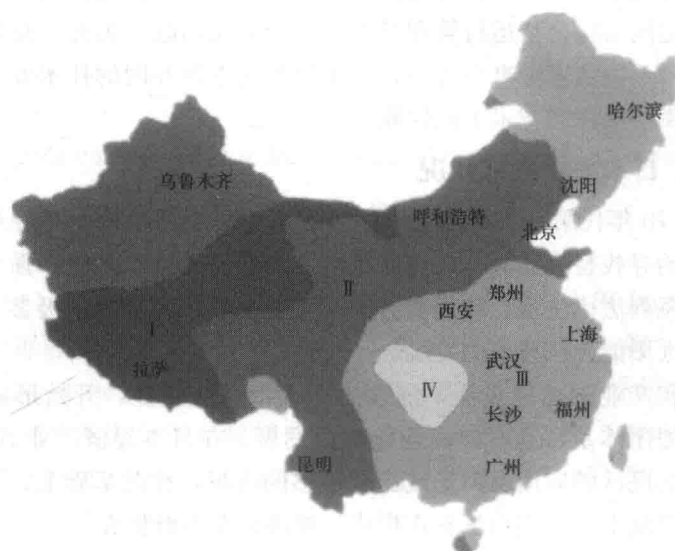


图 1-4 中国太阳能资源分布

一类地区全年日照时数为 3200~3300h, 年辐射量在 6700~8370MJ/m²。主要包括青藏高原、甘肃北部、宁夏北部和新疆南部等地。

二类地区全年日照时数为 3000~3200h, 辐射量在 5860~6700MJ/m²。主要包括京津地区、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、西藏东南部和新疆南部等地。此地区为中国太阳能资源较丰富区。

三类地区全年日照时数为 2200~3000h, 辐射量在 5020~5860MJ/m²。主要包括山东、河南、湖北、湖南、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、江苏北部和安徽北部等地。

四类地区全年日照时数为 1400~2200h, 辐射量在 4190~5020MJ/m²。主要是四川和重庆, 福建、浙江和广东的一部分地区, 春夏多阴雨, 秋冬季太阳能资源尚可利用。

可以看出, 中国绝大多数地区的太阳能资源较丰富, 具有发展太阳能光伏发电的先决条件。为推动光伏产业发展, 政府出台了一系列政策, 采取财政补助、科技支持和市场拉动方式促进光伏产业的发展。2013 年国务院最新颁布的《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》(以下简称《意见》)中指出, 2013~2015 年, 中国年均新增光伏发电装机容量 1000 万 kW 左右, 到 2015 年, 总装机容量将达到 3500 万 kW 以上。另外, 《意见》出台了六大产业扶持政策, 提出把扩大国内市场、提高技术水平、加快产业转型升级作为促进光伏产业持续健康发展的根本出路和基本立足点。

中国光伏发电工程已初具规模, 在光伏资源发达地区进行集中式光伏发电项目规模建设。截至 2013 年底, 张北地区建设了 40MW 风光储输联合示范工程, 累计发电超过 1.5 亿 kWh, 青海已并网 2100MW 光伏电站, 累计上网电量达到 24 亿 kWh。

根据国际半导体设备与材料产业协会 (Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI) 发布的《2013 中国光伏产业发展报告》, 2011 年底全球光伏制造产能突破 79GW, 产量 40GW, 而 2011 年的装机容量仅为 27.7GW, 供需的严重偏离导致 2012 年光伏组件价格延续 2011 年的下跌趋势, 从年初的 0.9 美元/W 下降到年底的 0.65 美元/W; 2012 年, 全球的光伏产能已降至 70GW, 产量 39GW, 但仍然高于 31GW 的新增装机容量。这标志着光伏制造整合大幕的拉开, 也预示着随着整合的不断深入, 光伏装机容量仍有很大拓展空间。