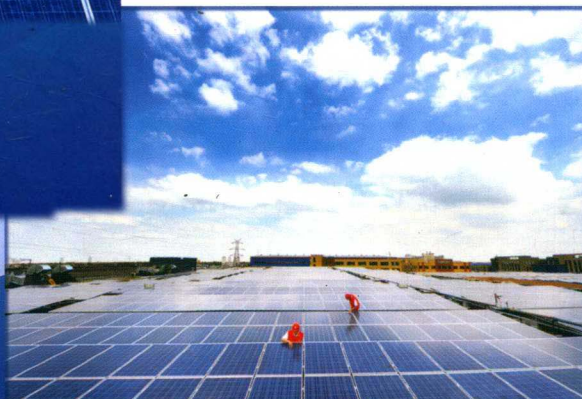




国家电网公司
电力科技著作出版项目

大规模集中式 光伏发电与调度运行

主编 全生明



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

大规模集中式 光伏发电与调度运行

主 编 全生明

副主编 祁太元 韩 悌 张洪平 刘 纯 李玉林
王东方 李雪明 孙宏斌 徐夕芳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

光伏发电并网和消纳在新能源发展中备受关注,如何在保证电网安全稳定运行的前提下,提高电网消纳光伏发电的能力,使光伏发电与电网协调、安全运行成为一项重大课题。青海省作为位居我国第二位的太阳能资源富集省份,近五年来,集中式规模化光伏发电率先取得了快速发展,青海光伏发电调度运行体系构建与实践连续三年入围国家电网公司典型经验。本书由国网青海省电力公司牵头组织编写,主要是对近年来的科研成果和工作实践的提炼和总结。

本书共分为三篇,即基础篇、运行篇、并网篇。其内容包括光伏发电基本原理与电站配置、光伏发电功率预测、光伏发电稳定分析、光伏发电调度计划、光伏发电功率控制、光伏电站继电保护及安全自动装置、光伏电站调度自动化及通信、光伏电站并网投运、光伏电站并网检测、光伏发电运行安全管理、光伏电站运行评价等十二章内容。

本书适合于从事大规模集中式光伏发电并网调度和电站运行的技术人员和生产管理人员阅读,也可作为从事光伏并网调度、光伏电站运行的专业人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

大规模集中式光伏发电与调度运行 / 全生明主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5123-9033-1

I. ①大… II. ①全… III. ①太阳能发电-发电调度
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 046364 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 3 月第一版 2016 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 549 千字

印数 0001—2000 册 定价 115.00 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

《大规模集中式光伏发电与调度运行》

编 委 会

主 编 全生明

副 主 编 祁太元 韩 悌 张洪平 刘 纯 李玉林

王东方 李雪明 孙宏斌 徐夕芳

编 审 胡泽春 张节潭

编写人员 董 凌 张桂红 张节潭 方保民 王亦婷

俞海国 王光辉 李永斌 徐有蕊 李红志

杨 继 黄越辉 汤 磊 李 威 田海青

成 静 许振山 侯玉强 卢 静 张鹏征

鲜文军 石 千 李延和 孔祥鹏 陈春萌

张海宁 姜 纯 张 勋 冶莉娟 杨 兴

牟军涛 苏生平 思晓兰 周文芸 王茂春

李春来 赵世昌 王 轩 周 野 宋晓芳

董希建 张舒捷 孟昭军 高宝荣 郭庆来

贾 昆 彭 磊 王宁霞 刘立敏 杨国生

张惠芳 梁建龙 刘 祥 曹振峰

前 言

自 1954 年世界上第一块实用光伏电池问世以来,太阳能光伏发电取得了长足进步。1973 年世界石油危机和 20 世纪 90 年代的环境污染问题大大促进了光伏发电的发展,而我国的光伏发电转折年则是在 2011 年,当年 12 月 15 日国家能源局公布了中国可再生能源发展“十二五”规划目标。2012 年 7 月 7 日,国家能源局组织编制印发了《太阳能发展“十二五”规划》,明确了我国“十二五”期间太阳能发电的发展目标、开发利用布局和建设重点。自此,我国太阳能发电的大规模快速发展拉开了序幕。

光伏发电并网和消纳在新能源发展中备受关注。而在保证电网安全稳定运行的前提下,提高电网消纳光伏发电的能力,使光伏发电与电网协调、安全运行,实现电网和光伏的互惠双赢与共同发展,不仅需要建设友好型光伏电站,还要强化网源协调控制。青海作为我国第二大太阳能资源富集省份,是我国重要的太阳能发电基地。近五年来,集中式规模化光伏发电在青海率先取得了快速发展,2011 年即实现了世界上首个百万千瓦级集中式光伏发电基地的建设投运。为积极适应集中式光伏并网的新形势,国网青海省电力公司联合中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、清华大学、西安交通大学等国内科研院所和高校,在相关光伏发电公司的配合下,开展了大规模集中式光伏发电与调度运行技术的研究,同时在光伏并网管理上也进行了有效的探索和实践。所取得的研究成果多次获得省部级科技进步奖和管理创新奖,并全部应用于电网运行控制,从而构建了光伏发电智能调度与运行技术体系和管理体系,实现了电网安全稳定运行和光伏最大化消纳的目标。青海光伏发电调度运行体系构建与实践连续三年入围国家电网公司典型经验,是参与工作的各单位共同孜孜不倦地探索和实践的结晶,也是难能可贵的实践财富。

本书所阐述的内容,主要是近年来的科研成果和工作实践的汇集提炼,部分内容取自于参考文献和国家颁布的标准规定。因此,本书的主要内容来自于工程实际的应用和电网运行实践的验证。

本书共分为三篇,即基础篇、运行篇、并网篇。其内容包括 12 章,第一章介绍了全球太阳能资源分布情况以及光伏发电发展历程和现状,并分析了太阳能发电的特点和对电网运行的影响;第二章对光伏发电的基本原理进行了阐述;第三章论述了光伏发电功率预测技术的基础理论、基本方法和建模过程;第四章研究了集中式光伏电站接入对电网稳定特性的影响,提出了提高光伏接纳能力的电网安全稳定协调控制策略;第五章阐述了光伏接纳能力评估模型和求解算法,介绍了光伏发电日前、日内发电计划的编制原则和具体流程;第六章对光伏电站有功控制、无功控制、水光互补联合控制进行了必要性分析和理论介绍,并给出了各种控制方式的实际案例;第七章介绍了光伏电站继电保护及安全自动装置,包括光伏电站继电保护典型配置、基本原理、整定计算、运行与管理等;第八章论述了光伏电站调度技术支持

系统、光伏电站自动化系统、通信及网络系统的组成结构及功能；第九章从光伏电站并网技术要求、入网管理和投运管理三方面论述了光伏电站并网验收的全过程；第十章介绍了光伏电站并网检测规范、要求以及并网检测技术原理等，并对并网检测进行了实例分析；第十一章从生产运行管理、生产技术管理、安全管理、设备管理、接地管理、消防管理、应急管理等方面阐述了光伏电站安全运行全过程管理的具体要求；第十二章介绍了光伏电站并网运行评价的各类指标，并对由此衍生出的光伏电站优先调度工作进行了阐述。

本书适合于从事大规模集中式光伏发电并网调度和电站运行的技术人员和生产管理人员阅读，也可作为从事光伏并网调度、光伏电站运行的专业人员的培训教材。

本书由国家电网公司青海省电力公司牵头组织编写，由全生明担任主编，祁太元、韩悌、张洪平、刘纯、李玉林、王东方、李雪明、孙宏斌、徐夕芳等担任副主编，主编和副主编是近几年大规模集中式光伏发电与调度运行技术和管理体系相关课题研究与应用决策者、组织者和工作牵头人。编写组成员是近几年直接参与科技项目研究和工程实施应用、负责光伏并网管理工作的专家及工作人员。本书由清华大学胡泽春副教授和青海电力调度控制中心张节潭博士负责统稿和编审。本书在编写过程中，得到了中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、清华大学、国网青海省电力公司电力科学研究院、国家电网青海电力公司信息通信公司、中国华能集团公司青海分公司等单位领导专家的热忱帮助和指导，在此对他们的辛勤工作表示诚挚的感谢。同时，还要衷心感谢中国电力出版社，是他们的积极鼓励和大力帮助，才使本书得以与读者见面。

本书在编写过程中，借鉴了大量的资料，可能存在参考文献引用的遗漏。若出现这种情况，请及时联系我们，以便再版时予以补正。大规模集中式光伏发电与调度运行技术理论和实践经验仍有待提高和积累，限于作者水平，书中难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

目 录

前言

第一篇 基础篇

第一章 概述 3

 第一节 太阳能资源概述 3

 第二节 光伏发电的历史与现状 6

 第三节 光伏发电特点及影响 16

 第四节 小结 20

 参考文献 20

第二章 光伏发电基本原理与电站配置 22

 第一节 光伏发电 22

 第二节 光伏电站基本组件 33

 第三节 集中式并网光伏电站典型结构及发电过程 39

 第四节 小结 43

 参考文献 44

第二篇 运行篇

第三章 光伏发电功率预测 47

 第一节 光伏发电功率输出的影响因素 47

 第二节 光伏发电功率预测方法及特点 51

 第三节 光伏发电功率预测系统设计 62

 第四节 光伏发电功率预测技术应用实例 66

 第五节 小结 71

 参考文献 71

第四章 光伏发电稳定分析 72

 第一节 并网光伏电站等值建模 72

第二节	大规模光伏发电接入后对电力系统稳定性的影响	79
第三节	适应光伏并网特性的安全稳定控制技术	86
第四节	百万千瓦级光伏电站集中并网安全稳定控制工程应用	87
第五节	小结	101
	参考文献	101

第五章	光伏发电调度计划	103
第一节	光伏发电计划编制	103
第二节	光伏发电接纳能力评估	111
第三节	光伏电站限电分配	112
第四节	光伏发电调度计划系统	113
第五节	小结	119
	参考文献	120

第六章	光伏发电功率控制	121
第一节	有功功率控制	121
第二节	无功功率控制	135
第三节	水光互补运行控制	154
第四节	小结	163
	参考文献	163

第七章	光伏电站继电保护及安全自动装置	165
第一节	继电保护的基本原理	165
第二节	集中式光伏电站继电保护典型配置	173
第三节	继电保护整定计算	181
第四节	光伏电站典型安全自动装置	199
第五节	光伏电站继电保护专业管理	205
第六节	小结	215
	参考文献	216

第八章	光伏电站调度自动化及通信	217
第一节	光伏发电调度技术支持系统	217
第二节	光伏电站自动化系统	225
第三节	通信及网络系统	234
第四节	二次安全防护	251
第五节	小结	255
	参考文献	255

第三篇 并 网 篇

第九章 光伏电站并网投运	259
第一节 光伏电站技术要求	259
第二节 光伏电站入网管理	265
第三节 光伏电站并网管理	266
第四节 小结	279
第十章 光伏电站并网检测	280
第一节 并网检测必要性及特点	280
第二节 光伏电站并网检测规范及要求	283
第三节 光伏电站并网检测技术原理	286
第四节 光伏电站并网检测实例分析	290
第五节 小结	307
第十一章 光伏发电运行安全管理	308
第一节 光伏电站安全管理	308
第二节 光伏电站生产运行管理	317
第三节 光伏电站设备管理	321
第四节 光伏电站接地管理	326
第五节 光伏电站生产技术管理	331
第六节 小结	334
第十二章 光伏电站运行评价	335
第一节 光功率预测准确率评估	335
第二节 光伏电站利用小时数评估	340
第三节 光伏消纳能力评估	342
第四节 光伏电站调度运行评价	350
第五节 小结	354
参考文献	354
索引	355

大规模集中式光伏发电与调度运行

第一篇 基础篇



第一章

概述



按照目前的热核反应速度,太阳还能够存在 50 亿年。从这个意义上说,太阳能资源是一种取之不尽、用之不竭的一次能源。它分布广泛、可再生、无污染,是国际上公认的、理想的化石燃料的替代能源。从 1954 年全球第一块单晶硅太阳能电池的诞生,到如今百万千瓦级光伏电站的并网运行,世界光伏产业已经走过了半个多世纪,光伏发电技术正在全球范围内得到普及应用。光伏发电作为一种新的发电形式,虽然存在间歇性、随机性等特点,给电网安全运行和光伏发电消纳带来了许多新的课题,但这不会改变光伏发电推广和应用的光明前景。

本章介绍了全球和我国的太阳能资源分布情况,阐述了光伏发电的发展历程,以及当前世界主要国家的光伏发电政策、发展现状,分析了光伏发电的优点和局限性,并剖析了光伏发电对电网运行的影响。

第一节 太阳能资源概述

太阳是一个巨大、炽热的气体星球,其内部不断进行着热核反应,因而释放出巨大的能量。太阳的直径约为 139 万 km,比地球的直径大 109.3 倍。太阳的体积约为 $1.4122 \times 10^{18} \text{ km}^3$,比地球的体积大 130 万倍。太阳与地球的平均距离约为 1.5 亿 km。

太阳每秒钟释放出的能量是 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$,相当于每秒钟燃烧 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤所发出的能量。太阳每秒钟发出的能量大约只有 1/22 亿到达地球,约为 481 亿 kWh。其中约被大气吸收 19%,被大气和尘粒反射回宇宙空间 30%,穿过大气到达地球表面的太阳辐射能约占 51% (225 亿 kWh)。由于地球表面大部分被海洋覆盖,到达陆地表面的能量大约只有 47 亿 kWh,只占到地球范围内太阳辐射能的 10%。太阳一年辐射到地球表面的能量约为 116 万亿 t 标准煤,相当于 2014 年世界一次能源消费总量 (183.6 亿 t 标准煤) 的 6300 倍。

一、全球太阳能资源分布

根据国际太阳能热利用区域分类,全世界太阳能辐射强度和日照时间最佳的区域包括北非、中东地区、美国西南部、墨西哥、南欧、澳大利亚、南非、南美洲东、西海岸和中国西部地区等,全球陆地太阳能资源分布如图 1-1 所示。

北非地区是世界太阳能辐照最强烈的地区之一。摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、利比亚

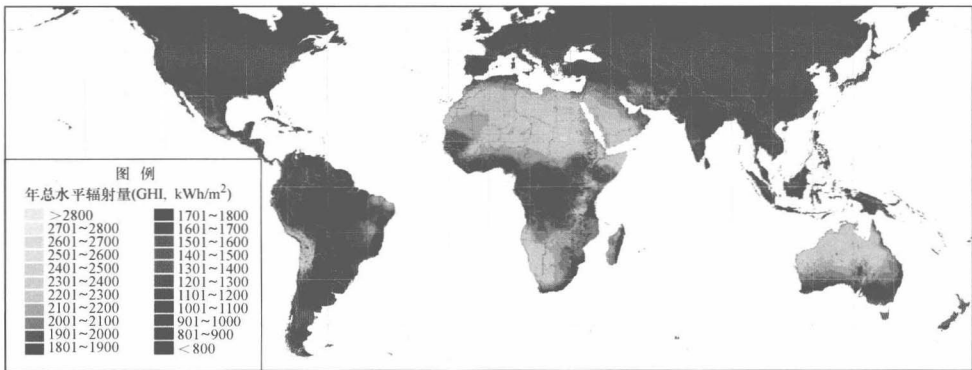


图 1-1 全球陆地太阳能资源分布图

和埃及的太阳能发电潜能很大。阿尔及利亚的太阳年辐照总量 $9720\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 $169\,440\text{TWh}$ ^①。摩洛哥的太阳年辐照总量为 $9360\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 $20\,151\text{TWh}$ 。埃及的太阳年辐照总量为 $10\,080\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 $73\,656\text{TWh}$ 。太阳年辐照总量大于 $8280\text{MJ}/\text{m}^2$ 的国家还有突尼斯、利比亚等国。阿尔及利亚有 2381.7km^2 的陆地区域，其沿海地区太阳年辐照总量为 $6120\text{MJ}/\text{m}^2$ ，高地和撒哈拉地区太阳年辐照总量为 $6840\sim 9540\text{MJ}/\text{m}^2$ ，全国总土地的 82% 适用于太阳能发电站的建设。

南欧的太阳年辐照总量超过 $7200\text{MJ}/\text{m}^2$ ，这些国家包括葡萄牙、西班牙、意大利、希腊和土耳其等。西班牙太阳年辐照总量为 $8100\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约 1646TWh 。意大利太阳年辐照总量为 $7200\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 88TWh 。希腊太阳年辐照总量约 $6840\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约 44TWh 。葡萄牙太阳年辐照总量为 $7560\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 436TWh 。土耳其的技术开发量每年约为 400TWh 。西班牙的南方地区是最适合于建设太阳能发电站地区之一，该国也是太阳能发电技术水平最先进、太阳能电站建设最多的国家之一。

中东几乎所有地区的太阳能辐射能量都非常高。以色列、约旦和沙特阿拉伯等国的太阳年辐照总量为 $8640\text{MJ}/\text{m}^2$ 。阿联酋的太阳年辐照总量为 $7920\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 2708TWh 。以色列的太阳年辐照总量为 $8640\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 318TWh 。伊朗的太阳年辐照总量为 $7920\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 $20\,000\text{TWh}$ 。约旦的太阳年辐照总量为 $9720\text{MJ}/\text{m}^2$ ，技术开发量每年约为 6434TWh 。以色列的总陆地区域是 $20\,330\text{km}^2$ ，内盖夫沙漠覆盖了全国土地的一半，也是太阳能利用的最佳地区之一，以色列的太阳能利用技术处于世界最高水平之列。

美国也是世界太阳能资源最丰富的地区之一。根据美国 239 个观测站 1961~1990 年 30 年的统计数据，全国一类地区太阳年辐照总量为 $9198\sim 10\,512\text{MJ}/\text{m}^2$ ，包括亚利桑那和新墨西哥州的全部，加利福尼亚、内华达、犹他、科罗拉多和德克萨斯州的南部，占总面积的 9.36% 。二类地区太阳年辐照总量为 $7884\sim 9198\text{MJ}/\text{m}^2$ ，除了包括一类地区所列州的其余部分外，还包括犹他、怀俄明、堪萨斯、俄克拉荷马、佛罗里达、佐治亚和南卡罗来纳州等，占总面积

① $1\text{TWh}=1\,000\,000\,000\text{kWh}=10\text{亿 kWh}$ ； $1\text{kWh}=3.6\text{MJ}$ ； $1\text{calIT}=4.1868\text{J}=1.162\,78\text{MWh}$ ； $1\text{MJ}/\text{m}^2=23.889\text{calIT}/\text{cm}^2=27.8\text{MWh}/\text{cm}^2$ ； $1\text{kWh}/\text{m}^2=85.98\text{calIT}/\text{cm}^2=3.6\text{MJ}/\text{m}^2=100\text{MWh}/\text{cm}^2$ 。

的 35.67%。三类地区太阳年辐照总量为 6570~7884MJ/m²，包括美国北部和东部大部分地区，占总面积的 41.81%。四类地区太阳年辐照总量为 5256~6570MJ/m²，包括阿拉斯加州大部地区，占总面积的 9.94%。五类地区太阳年辐照总量为 3942~5256MJ/m²，仅包括阿拉斯加州最北端的少部分地区，占总面积的 3.22%。美国的外岛如夏威夷等均属于二类地区。美国的西南部地区全年平均温度较高，有一定的水源，冬季没有严寒，虽属丘陵山地区，但地势平坦的区域也很多，只要避开大风地区，是非常好的太阳能发电地区。

澳大利亚的太阳能资源也很丰富。全国一类地区太阳年辐照总量为 7621~8672MJ/m²，主要在澳大利亚北部地区，占总面积的 54.18%。二类地区太阳年辐照总量为 6570~7621MJ/m²，包括澳大利亚中部地区，占全国面积的 35.44%。三类地区太阳年辐照总量为 5389~6570MJ/m²，在澳大利亚南部地区，占全国面积的 7.9%。太阳年辐照总量低于 6570MJ/m² 的四类地区仅占 2.48%。澳大利亚中部的广大地区人烟稀少，土地荒漠，适合大规模太阳能开发利用。

二、中国太阳能资源分布

我国幅员辽阔，有着十分丰富的太阳能资源。每年到达陆地表面的太阳辐射总能量约为 1.47×10¹⁶kWh，是我国 2014 年全年能源消费总量（42.6 亿 t 标准煤）的 420 倍。采用太阳总辐射年曝辐量作为分级指标，可以将太阳能资源划分为极丰富（A）、很丰富（B）、丰富（C）以及一般（D）四个等级，见表 1-1。

表 1-1 我国太阳能资源分级

级别名称	级别符号	分级阈值 R_s [kWh/ (m ² · a)]	区 域
极丰富	A	≥ 1750	新疆东南边缘、西藏大部、青海中西部、甘肃河西走廊西部、内蒙古阿拉善高原及其以西地区
很丰富	B	$1400 \leq R_s < 1750$	新疆大部、西藏东部、云南大部、青海东部、四川盆地以西、甘肃中东部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北西北部、内蒙古中东部至锡林浩特和赤峰一带
丰富	C	$1050 \leq R_s < 1400$	中东部和东北的大部分地区
一般	D	< 1050	四川东部、重庆、贵州大部、湖南西北部

注 1. 极丰富带。新疆东南边缘、西藏大部、青海中西部、甘肃河西走廊西部、内蒙古阿拉善高原及其以西地区，该区域太阳能资源非常丰富，年平均总辐射辐照度超过 200W/m²，其中西藏南部和青海格尔木地区年平均总辐射辐照度近 250W/m²。被人们称为“日光城”的拉萨市，1961~1970 年的年平均日照时间为 3005.7h，相对日照为 68%，年平均晴天为 108.5 天，阴天为 98.8 天，年平均云量为 4.8，太阳总辐射为 816kJ/ (cm² · a)，比全国其他省区和同纬度的地区都高。

2. 很丰富带。在极丰富带的西北和以东地区，即新疆大部、西藏东部、云南大部、青海东部、四川盆地以西、甘肃中东部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北西北部、内蒙古中东部至锡林浩特和赤峰一带，年平均总辐射辐照度为 160~200W/m²。

3. 较丰富带。中国中东部和东北的大部分地区年平均总辐射辐照度为 120~160W/m²。

4. 一般带。以四川盆地为中心，四川东部、重庆、贵州大部、湖南西北部等地太阳能资源较差，年平均总辐射辐照度不足 120W/m²。四川盆地资源最差，那里雨多、雾多，晴天较少。例如素有“雾都”之称的成都市，年平均日照时数仅为 1152.2h，相对日照为 26%，年平均晴天为 24.7 天，阴天达 244.6 天，年平均云量高达 8.4。

中国太阳能资源分布的主要特点是：太阳能的高值中心和低值中心都处在北纬 22°~35°，青藏高原是高值中心，四川盆地是低值中心；太阳年辐射总量，西部地区高于东部地

区，而且除西藏和新疆两个自治区外，基本上是南部低于北部；由于南方多数地区云雾雨多，在北纬 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 地区，太阳能的分布情况与一般的太阳能随纬度而变化的规律相反，太阳能不随着纬度的增加而减少，而是随着纬度的增加而增长。2014 年我国陆地表面水平面总辐射年总量如图 1-2 所示。

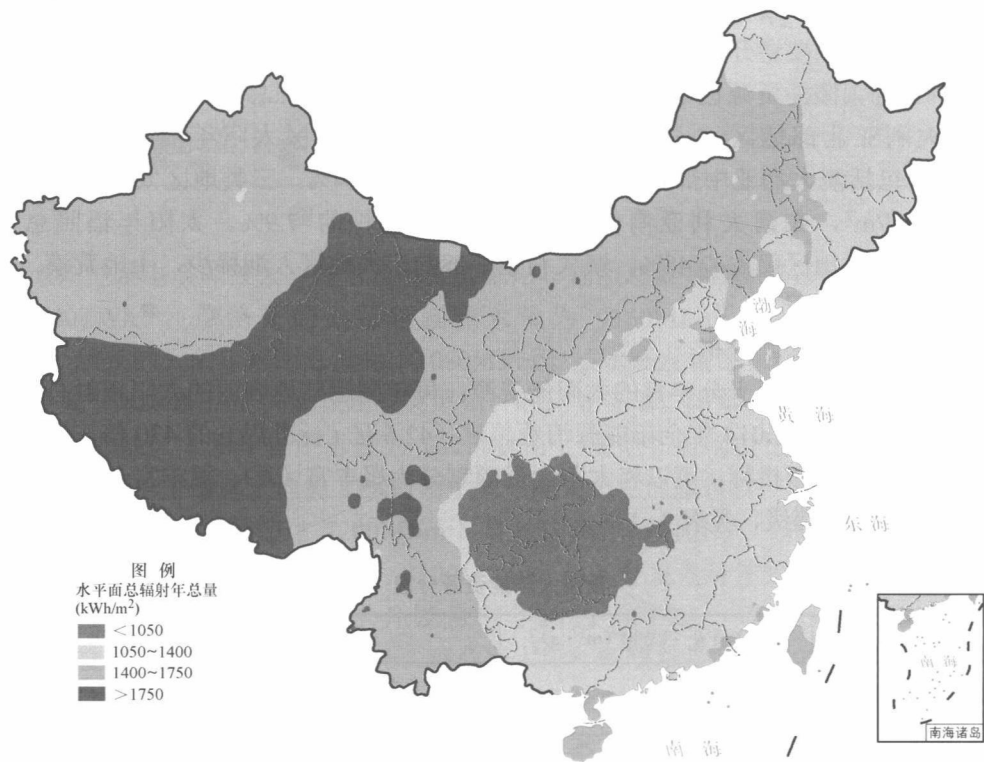


图 1-2 2014 年我国陆地表面水平面总辐射年总量

第二节 光伏发电的历史与现状

一、光伏发电发展历程

光伏发电的历史可追溯到 1893 年法国科学家贝克勒尔发现的“光伏效应”。此后经过各国科学家不断探索，1954 年恰宾和皮尔松成功研制出全球第一块实用的单晶硅太阳能电池，这不仅标志着太阳能光伏发电步入了产业化发展道路，更开启了人类太阳能利用实现可持续发展的新纪元。

纵观全球太阳能光伏发电产业化的历史，大致可分为四个时期：孕育期（19 世纪 90 年代~20 世纪 50 年代），完成光伏发电理论积累，并在实验室完成光伏电池实物制造，为实用化奠定了基础；萌芽期（20 世纪 50~80 年代），光伏电池转换效率较低，价格昂贵，主要用作卫星、灯塔和电子计算器等设备的电源；成长期（1990~2000 年），转换效率逐步提高，应用领域进入家庭和大楼；壮大期（2000 年至今），太阳能电池的种类不断增多，应用范围日益广阔，市场规模逐步扩大，光伏发电成为一种重要的可再生能源。

(一) 孕育期

孕育期发展历程如下:

1893 年, 法国科学家贝克勒尔发现“光生伏特效应”, 即“光伏效应”。

1876 年, 亚当斯等在金属和硒片上发现固态光伏效应。

1883 年, 制成第一个“硒光电池”, 用作敏感器件。

1930 年, 肖特基提出 Cu_2O 势垒的“光伏效应”理论。同年, 朗格首次提出用“光伏效应”制造“太阳能电池”, 使太阳能变成电能。

1931 年, 布鲁诺将铜化合物和硒银电极浸入电解液, 在阳光下启动了一台电动机。

1932 年, 奥杜博特和斯托拉制成第一块“硫化镉”太阳能电池。

1941 年, 奥尔在硅上发现光伏效应。

(二) 萌芽期

萌芽期发展历程如下:

1954 年, 恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室, 首次制成了实用的单晶太阳能电池, 效率为 6%。同年, 韦克尔首次发现了砷化镓存在光伏效应, 并在玻璃上沉积硫化镉薄膜, 制成了第一块薄膜太阳能电池。

1955 年, 吉尼和罗非斯基进行材料的光电转换效率优化设计。同年, 第一个光电航标灯问世。美国无线电公司研制成砷化镓太阳能电池。

1957 年, 单晶硅太阳能电池效率达 8%。

1958 年, 太阳能电池首次在外太空应用, 装备美国先锋 1 号卫星电源。中国研制出了首块硅单晶。

1959 年, 第一块多晶硅太阳能电池问世, 效率达 5%。

1960 年, 硅太阳能电池首次实现并网运行。单晶硅电池效率达到 14%。

1962 年, 砷化镓太阳能电池光电转换效率达 13%。

1969 年, 薄膜硫化镉太阳能电池效率达 8%。世界上第一座光伏电站在法国建成。

1972 年, 罗非斯基研制出紫光电池, 效率达 16%。美国宇航公司背场电池问世。

1973 年, 砷化镓太阳能电池效率达 15%。美国特拉华大学建成世界第一个光伏住宅。

1974 年, COMSAT 研究所提出无反射绒面电池, 硅太阳能电池效率达 18%。日本推出光伏发电的“阳光计划”。

1975 年, 非晶硅太阳能电池问世。

1976 年, 多晶硅太阳能电池效率达 10%。

1978 年, 美国建成 100kW_p 太阳地面光伏电站。

1980 年, 单晶硅太阳能电池效率达 20%, 砷化镓电池达 22.5%, 多晶硅电池达 14.5%, 硫化镉电池达 9.15%。

1983 年, 美国建成 1MW_p 光伏电站。冶金硅(外延)电池效率达 11.8%。

1986 年, 美国建成 6.5MW_p 光伏电站。

(三) 成长期

成长期发展历程如下:

1990 年, 德国提出“2000 个光伏屋顶计划”, 每个家庭的屋顶装 $3\sim 5\text{kW}_p$ 光伏电池。

1995 年, 高效聚光砷化镓太阳能电池效率达 32%。

1997 年, 美国提出“克林顿总统百万太阳能屋顶计划”, 在 2010 年前为 100 万用户每户安装 3~5kW_p 光伏电池。日本“新阳光计划”提出到 2010 年生产 43 亿 W_p 光伏电池。欧洲联盟计划到 2010 年生产 37 亿 W_p 光伏电池。

1998 年, 单晶硅光伏电池效率达 25%。世界太阳能电池年产量超过 151.7MW; 多晶硅太阳能电池产量首次超过单晶硅太阳能电池。荷兰政府提出“荷兰百万个太阳光伏屋顶计划”, 计划 2020 年完成。

1999 年, 德国政府开始实施“十万屋顶计划”, 并从 2000 年开始, 给予太阳能发电每千瓦时约 0.5 欧元的补贴。

2001 年, 中国推出“光明工程计划”。

2002 年, 中国无锡尚德第一条 10MW 太阳能电池生产线正式投产, 产能相当于此前四年中国太阳能电池产量的总和, 一举将中国与国际光伏产业的差距缩短了 15 年。

(四) 壮大型

壮大型发展历程如下:

2004 年, 德国修正《可再生能源法》并实行光伏发电强制上网电价补贴。

2005 年, 美国开始实施光伏投资税减免政策。

2006 年, 中国正式发布实施《可再生能源法》, 承诺 2010 年太阳能光伏累计装机容量达到 450MW。

2007 年, NTT 网络运营商发布了世界首款使用太阳能电池供电的手机。中国出台《可再生能源中长期发展规划》, 提出到 2020 年光伏总装机容量达到 2000MW。中国太阳能电池产量从 2006 年的 400MW 一跃达到 1088MW, 超过日本的 920MW 和欧洲的 1062.8MW, 成为“世界第一大太阳能电池生产国”。

2008 年 1 月 23 日, 欧盟发布《促进可再生能源使用的欧洲议会和理事会指令议案》。

2008 年, 中国《可再生能源法》修订案提出可再生能源补贴标准, 即用户每使用 1kWh 的电需要支付 1 厘钱, 并推出“太阳光伏屋顶计划”。

2009 年, 美国 Spectrolab 公司最新研制的砷化镓多结聚光太阳能电池转换效率达到了 41.6%, 这是迄今为止所有类型太阳能电池最高的实验室效率。中国开始实施“金太阳”工程, 对并网光伏发电项目给予 50% 或以上的投资补助。

2011 年, 世界上第一个有机薄膜太阳能电池在日本诞生, 美国德克萨斯大学发明制造了一种有机塑料半导体材料, 能够让光电太阳能效率倍增。美国发起对中国光伏产品“双反”(反倾销、反补贴)。

2012 年, 中国出台光伏产业十二五规划。中国青海柴达木盆地建成并安全并网大规模光伏电站超过 1GW, 成为世界上太阳能光伏装机容量最集中的地区。欧盟发起对中国光伏产品“双反”, 中国发起对欧盟、美国、韩国的多晶硅“双反”。

2013 年, 中国出台《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》, 提出 2015 年光伏总装机容量达到 3500 万 kW 以上。中国超越德国, 首次成为全球第一大光伏市场。

2014 年, 英国、德国、日本、澳大利亚等消减 2015 年光伏补助计划。印度提出五年安装 20~100GW 太阳能的目标。