



长江设计文库

GAOXIAOGUANGFUFAJIANGONGCHENGSHIJIJISHU

高效光伏发电工程设计技术

程卫民 刘海波 赵鑫 主编



长江出版社

GAOXIAOGUANGFUFIADIANGONGCHENGSHESHEJISHU

高效光伏发电工程设计技术

程卫民 刘海波 赵鑫 主编
苏毅 喻飞 潘霄 副主编



长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

高效光伏发电工程设计技术 / 程卫民, 刘海波,
赵鑫主编. — 武汉: 长江出版社, 2018.12
ISBN 978-7-5492-6192-5

I. ①高… II. ①程… ②刘… ③赵… III. ①太阳能
光伏发电—工程设计 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 290740 号

高效光伏发电工程设计技术

程卫民 刘海波 赵鑫 主编

责任编辑: 贾茜

装帧设计: 王聪

出版发行: 长江出版社

地 址: 武汉市解放大道 1863 号

邮 编: 430010

网 址: <http://www.cjpress.com.cn>

电 话: (027)82926557(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销: 各地新华书店

印 刷: 武汉市首壹印务有限公司

规 格: 787mm×1092mm

1/16

14.75 印张

310 千字

版 次: 2018 年 12 月第 1 版

2018 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5492-6192-5

定 价: 58.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

《高效光伏发电工程设计技术》

各章编写人员名单

第一章

程卫民 赵鑫 金乾 潘霄 陈卫鹏 鱼维娜 张铭 张旭

第二章

程卫民 赵鑫 袁博 喻飞 刘凯 汪建

第三章

苏毅 程卫民 何杰 袁博 汪建 曹龙 刘一亮

第四章

赵鑫 金乾 刘海波 刘凯 李成子 张铭

第五章

刘海波 赵鑫 李德 苏毅 张顺

第六章

刘海波 苏毅 张鹏 刘爽 荣雪宁

第七章

潘霄 苏毅 叶任时 鱼维娜

第八章

喻飞 潘霄 张顺 甘乐 邹尤 张旭

第九章

苏毅 叶任时 潘霄 张涛 甘乐

第十章

赵鑫 张涛 张鹏 何杰 李成子 邹尤

第十一章

程卫民 刘海波 喻飞 陈卫鹏 曹龙

第十二章

刘海波 刘爽 喻飞 金乾 张涛 段斐

前 言

光伏发电作为一种新兴能源形式,具有安全可靠、清洁卫生、建设周期短、维护简单等特点,被广泛地应用于光伏电站、通讯、通信、石油、海洋、气象、用户太阳能电源等领域,近年来得到了长足的发展。“十二五”期间,我国光伏发电产能居世界前列,成为世界新能源并网规模最大、发展最快的国家;预计 2020 年光伏发电装机将达到 2.5 亿 kW 以上。光伏产业通过近十年的快速发展,在规模上、技术上、成本上、民生意义上均取得了较大成绩,大力推广光伏发电,对我国能源转型及节能减排具有重要意义,也是国家能源安全的重要选择。

目前,太阳能在全球已初步具备成为主力能源的成本条件,国际能源署《世界能源展望 2017 中国特别报告》指出,光伏发电将成为中国最经济的发电方式。近年,光伏发电补贴标准逐渐下调,平价上网是必然趋势,降低成本是保持光伏企业核心竞争力、促进光伏行业可持续发展的关键。太阳能能量密度低、收集成本高,这一特点决定了降低光伏发电成本的最主要方式,就是提高光伏发电系统转换效率。中国电机工程学会推出的“十三五”电力科技二十项重点关注技术中,高效低成本光伏发电技术就是其中之一。

在这样的行业背景下,作者组建了研发团队,在吸收现有前沿技术的基础上,结合作者多项发明专利技术及多年光伏发电工程的研究、设计、建设经验,对高效光伏发电工程设计的核心技术进行系统性研究,并撰写此书。其目的是从设计角度系统论述高效光伏发电技术并指导工程实践,促进光伏行业的进一步发展。

本书主要从光伏组件、逆变器及光伏阵列运行方式的选择、组件倾角和阵列间距的综合计算、光伏发电单元发电量最大化设计、直流汇流电缆差异化配置、光伏阵列支架基础、光伏电站接地设计、工程典型案例等方面系统地介绍了高效光伏发电工程设计的核心技术。针对本书提出的多项提高系统发电效率的工程设计技术进行了较系统的分析,所提技术在实际工程中已得到大量应用。最后一章对漂浮式水面光伏的研究现状、浮体和支架材料、浮体成型工艺、锚固技术等方面进行了初步的分析与探讨。希望本书对高效光伏发电技术的后续研究及工程实践提供有益的借鉴。

本书是许多同志长期集体劳动的成果,由程卫民、刘海波、赵鑫牵头进行了全书的编著,并完成对全书的统编和审定。其中第一章、第二章由程卫民、赵鑫等编写,第三章由苏毅、程卫民等编写,第四章由赵鑫、金乾等编写,第五章由刘海波、赵鑫等编写,第六章由刘海波、苏毅等编写,第七章由潘霄、苏毅等编写,第八章由喻飞、潘霄等编写,第九章由苏毅、叶任时等编写,第十章由赵鑫、张涛等编写,第十一章由程卫民、刘海波等编写,第十二章由刘海波、刘爽等编写。长江出版社为本书的出版付出了辛勤的劳动,张哲原、肖固城、孙仕达、段偲默等参与了本书的图表处理工作,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免会有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2018年10月

目 录

1 绪 论	1
1.1 概述	1
1.2 发展现状与政策	6
1.3 发展趋势	19
2 光伏组件	31
2.1 单晶硅组件	31
2.2 多晶硅组件	35
2.3 薄膜组件	37
2.4 光伏组件选型	41
3 逆变器	43
3.1 概述	43
3.2 逆变器基本拓扑	47
3.3 光伏逆变器型式	60
3.4 逆变器功率跟踪	70
3.5 逆变器选型	77
4 光伏阵列运行方式	79
4.1 太阳角计算	79
4.2 固定运行方式	83

4.3	单轴跟踪运行方式	85
4.4	双轴跟踪运行方式	88
4.5	聚光运行方式	91
4.6	运行方式选择	96
5	组件倾角和阵列间距综合计算技术	102
5.1	组件倾角常规计算	102
5.2	阵列间距常规计算	103
5.3	组件倾角和阵列间距交叉反馈多因素综合计算技术	107
5.4	工程实践分析	108
5.5	小结	112
6	光伏发电单元发电量最大化设计	113
6.1	概述	113
6.2	组件排布方式	113
6.3	组件连接方式	119
6.4	光伏发电单元布置	122
6.5	逆变小室布置	122
6.6	光伏发电单元容量	124
6.7	光伏组件与逆变器容量配比	126
6.8	小结	127
7	大距离差直流汇流电缆差异化配置技术	128
7.1	电缆选型常规方法	128
7.2	直流汇流电缆差异化配置	130
7.3	仿真与实验	132
7.4	工程实践对比	134
7.5	小结	136

8 光伏阵列支架基础	137
8.1 设计及施工	137
8.2 扩展式独立基础	145
8.3 条形基础	147
8.4 灌注桩基础	149
8.5 预成孔地锚桩基础	151
8.6 螺旋桩基础	152
8.7 预应力混凝土基础	155
8.8 小结	157
9 防雷与接地	158
9.1 基本概念与标准	158
9.2 总体要求	159
9.3 一般要求	159
9.4 设计要点	164
9.5 注意事项	166
9.6 小结	167
10 光伏电站运营与维护	168
10.1 概述	168
10.2 运维要求	169
10.3 运维资料管理	176
10.4 运维团队建设	178
10.5 规章制度	179
11 工程典型案例	183
11.1 多运行方式联合发电工程	183

11.2	薄膜组件光伏并网发电工程	187
11.3	山地光伏发电工程	190
11.4	渔光互补光伏发电工程	193
12	漂浮式光伏	195
12.1	概述	195
12.2	浮式基础	199
12.3	锚固	214
12.4	典型工程案例	216
12.5	小结	222
	参考文献	223

1 绪 论

1.1 概述

1.1.1 太阳能资源

太阳能是一种清洁的、环保的可再生能源。太阳能来自太阳内部持续不断进行的热核聚变反应。太阳每秒释放出的能量约为 4×10^{26} J, 相当于燃烧 1.28 亿吨标准煤所放出的能量。太阳能不断以电磁波的形式向宇宙空间辐射, 统称为太阳辐射。太阳辐射到地球的能量仅为太阳总辐射能的 22 亿分之一, 约为每秒 7.28×10^{17} J。当太阳辐射到大气层时, 约有 23% 的能量被大气层中的臭氧、水蒸气、二氧化碳和尘埃吸收掉; 有 30% 左右的能量被云层中尘埃、微小水珠及各种气体分子等反射、折射和散射后直接返回宇宙, 直接辐射到地球表面的能量只占 47%, 这个数量相当于全世界发电总量的几十万倍。据估计, 太阳的寿命有 50 亿年之久, 因此对于人类来说, 太阳能是一种取之不尽、用之不竭的能源。

我国属太阳能资源丰富的国家之一, 全国总面积 2/3 以上地区年日照时数大于 2000 小时, 年辐射量在 5000 MJ/m^2 以上。据统计资料分析, 中国陆地面积每年接收的太阳辐射总量为 $3300 \sim 8400 \text{ MJ/m}^2$, 相当于 2.4×10^4 亿吨标准煤的储量。因此, 研究和利用太阳能资源对我国的能源和电力发展有着重要的意义。

我国太阳能总辐射资源总体呈“高原大于平原、西部干燥区大于东部湿润区”的分布特点。尤其是青藏高原地区最大, 年总辐射量超过 6480 MJ/m^2 , 部分地区甚至超过 7200 MJ/m^2 。那里平均海拔高度在 4000m 以上, 大气层稀薄而清洁, 透明度好, 纬度低, 日照时间长, 例如被人们称为“日光城”的拉萨市, 年平均日照时间为 3021.6 小时, 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 48%。全国以四川和贵州两省的太阳年辐射总量最小, 其中尤以四川盆地最为, 存在低于 3600 MJ/m^2 的区域, 那里雨多、雾多, 晴天较少, 例如素有“雾都”之称的重庆市, 年平均日照时数仅为 1152.2 小时, 相对日照为 26%, 年平均晴天为 24.7 天, 阴天达 244.6 天。

根据国家气象局风能太阳能评估中心划分标准, 我国太阳能资源地区分为以下四类:

一类地区(资源丰富带): 全年日照时数为 $3200 \sim 3300 \text{ h}$, 辐射量在 $6700 \sim 8370 \text{ MJ/m}^2$, 每平方米面积接收的能量相当于 $230 \sim 285 \text{ kg}$ 标准煤燃烧所发出的热量。主要包括青藏高原、甘肃北部、宁夏北部、新疆南部、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、西藏东南部等地。尤其是西藏地区, 地势高, 太阳光的透明度好, 太阳辐射总量最高值达 9210 MJ/m^2 , 仅次于撒哈拉大沙漠, 居世界第二位。

二类地区(资源较富带):全年辐射量为 $5400\sim 6700\text{MJ}/\text{m}^2$,每平方米面积接收的能量相当于 $180\sim 230\text{kg}$ 标准煤燃烧所发出的热量。主要包括山东、河南、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、江苏中北部和安徽北部等地。

三类地区(资源一般带):全年辐射量在 $4200\sim 5400\text{MJ}/\text{m}^2$ 。每平方米面积接收的能量相当于 $140\sim 180\text{kg}$ 标准煤燃烧所发出的热量。主要是长江中下游、福建、浙江和广东的一部分地区,春夏多阴雨,秋冬季太阳能资源较好。

四类地区:全年辐射量在 $4200\text{MJ}/\text{m}^2$ 以下。主要包括四川、贵州两省。此区是我国太阳能资源最少的地区。

一、二类地区,年日照时数不小于 2200 小时,是我国太阳能资源丰富或较丰富的地区,面积较大,约占全国总面积的 $2/3$ 以上,具有利用太阳能的良好资源条件。

图 1-1 是国家气象局风能太阳能资源评估中心提供的总辐射年总量空间分布模拟结果。图 1-2 是国家气象局风能太阳能资源评估中心提供的平均的总日照时数空间分布图。由图 1-1 和图 1-2 可看出高值区位于青藏高原、甘肃北部、宁夏北部、新疆南部等地,低值区主要位于四川、贵州等地。

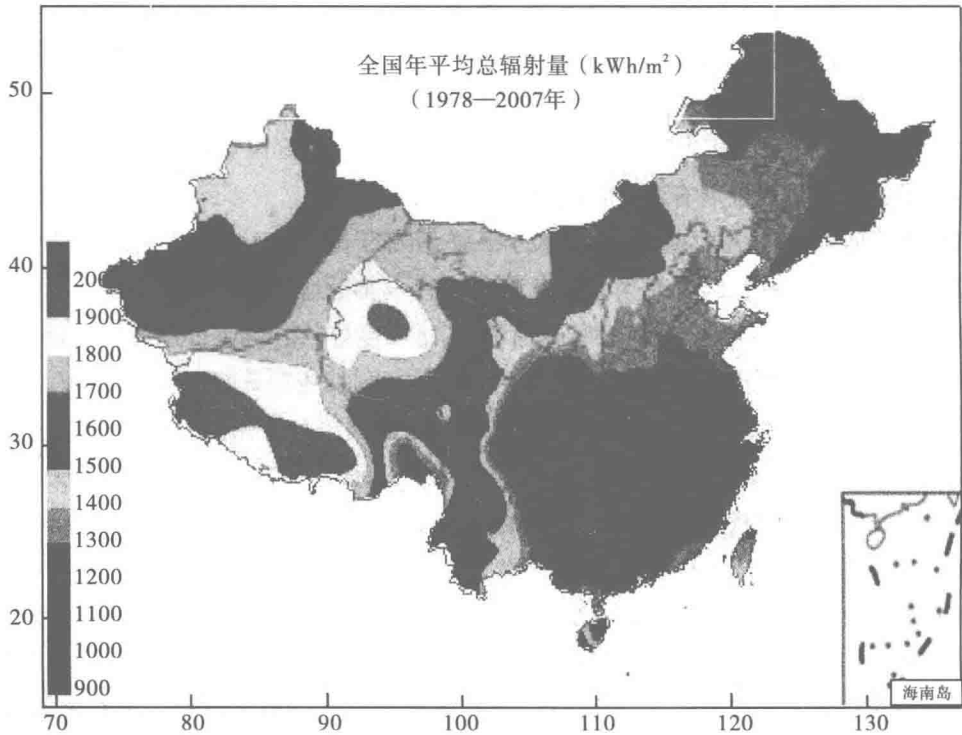


图 1-1 国家气象局风能太阳能资源评估中心提供的中国 1978—2007 年平均的总辐射年总量空间分布($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$)

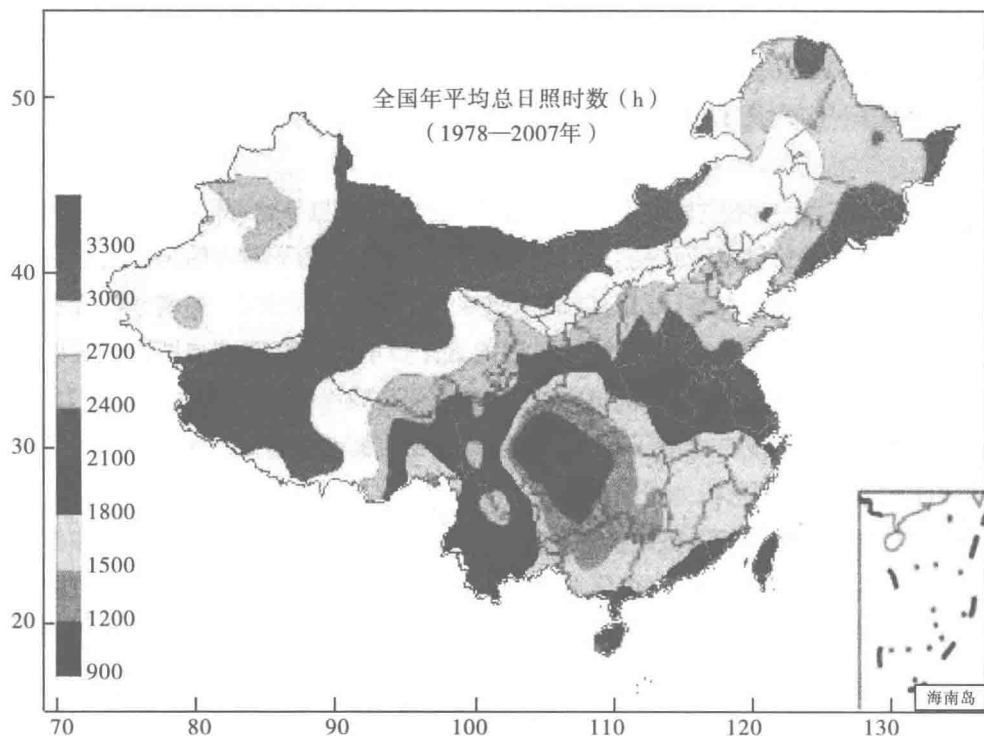


图 1-2 国家气象局风能太阳能资源评估中心提供的中国
1978—2007 年平均的总日照时数空间分布 (h)

整体上,我国属于太阳能资源丰富的大国,全国有 2/3 的地区年辐射量在 $5000\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上。合理有效开发太阳能资源成为现阶段我国解决能源危机、缓解气候变化的重要途径。

1.1.2 光伏发电原理与构成

光伏发电是指利用半导体材料的光生伏特效应,将太阳辐射能直接转换成电能的一种发电形式。光生伏特效应是指物体在吸收光能后,其内部能传导电流的载流子分布状态和浓度发生变化,由此产生电流和电动势的效应。气体、液体和固体中均可产生这种效应。由太阳能转换而来的电能可直接存储在储能设备中以备需要时使用,也可以根据用电实际情况与电网连接,使太阳能发电系统与大电网系统进行并网运行。

电阻率在 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 的材料称为半导体,半导体材料的特点在于其导电能力和电阻率对掺入微量杂质的种类和浓度十分敏感,具有对温度和光照等外部条件变化的热敏、光敏等特性。常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等,化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等,以及掺杂或制成其他化合物的半导体材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等,其中硅是最常用的一种半导体材料。半导体的禁带宽度比较小,价带中的价电子只要获得超过禁带宽度的较大能量即可跃迁到导带成为自由电子,与此同时在价带中就留下一个空能级位,价带中其余被束缚的价电子就会来占据这个空能级位,由此出现空穴位置的

移动,其移动方向与价电子的移动方向正好相反。导带中的电子和价带中的空穴成为半导体中两种载流子,它们的带电极性是相反的,电子带负电,空穴带正电。在纯净半导体晶体中被激发的电子—空穴是成对产生的,称为“本征”激发,纯净半导体晶体又称为“本征半导体”。

在常温下,本征半导体中只有极少数的电子—空穴对参与导电,部分自由电子遇到空穴会迅速恢复成为共价键电子结构,所以从外特性来看它们是不导电的。掺杂和缺陷均可提高导带中的电子浓度。在硅(或锗)的晶体中掺入微量的五价元素(如磷、砷、锑等)后,杂质原子就替代了晶格中某些硅原子的位置,它的五个价电子中有四个与周围的硅原子结成共价键,多余的一个价电子处在共价键之外,杂质原子对这个多余的价电子束缚力较弱,在室温下它就可以被激发成自由电子。由于杂质原子可以提供电子,故称为施主原子。这种杂质半导体称为 N 型半导体。

在硅(或锗)的晶体中掺入微量的三价元素(如硼、铝、镓等)后,杂质原子就替代了晶格中某些硅原子的位置,它的三个价电子与周围的硅原子结成共价键时,形成一个空穴,在室温下这些空穴能吸引临近的价电子来填充,使杂质原子变成带负电的离子。这些杂质原子因能吸收电子被称为受主原子。这种杂质半导体称为 P 型半导体。

不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然掺杂浓度极低,但它们的半导体导电能力却比本征半导体大得多。

在一块完整的硅片上,用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,我们称两种半导体的交界面附近的区域为 PN 结。P 型半导体和 N 型半导体结合后,在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差。由于自由电子和空穴浓度差的原因,有一些电子从 N 型区向 P 型区扩散,也有一些空穴要从 P 型区向 N 型区扩散。它们扩散的结果就使 P 区一边失去空穴,留下了带负电的杂质离子,N 区一边失去电子,留下了带正电的杂质离子。开路半导体中的离子不能任意移动,因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子在 P 和 N 区交界面附近,形成了一个空间电荷区,空间电荷区的薄厚和掺杂物浓度有关。

在空间电荷区形成后,由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区形成了内电场,其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。显然,这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反,阻止扩散。另一方面,这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移,使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴,从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子,这就使空间电荷减少,内电场减弱。因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄,扩散运动加强。在 P 型半导体和 N 型半导体的结合面两侧,留下离子薄层,这个离子薄层形成的空间电荷区称为 PN 结。PN 结的内电场方向由 N 区指向 P 区。太阳能电池正是利用了光激发少数载流子通过 PN 结而发电的。

当光线照射太阳能电池表面时,一部分光子被硅材料吸收,光子的能量传递给硅原子,

使电子发生跃迁,成为自由电子,在PN结两侧集聚形成电位差。当外部电路接通时,在该电压的作用下,将会有电流流过外部电路产生一定的输出功率。这个过程的实质是光子能量转换成电能的过程。太阳能电池只要受到阳光或灯光的照射,就能够把光能转变为电能,太阳能电池可发出相当于所接收光能的10%~20%的电,一般来说,光线越强发出的电能就越多。在太阳能发电系统中,系统的总效率由光伏组件的光电转换效率、控制器效率、储能设备效率、逆变器效率、变压器效率、电缆线损及负载的效率等决定。目前,规模化量产的太阳能电池的光电转换效率只有17%~19%,因此提高光伏组件的光电转换效率、降低光伏发电系统的单位功率造价,是光伏发电继续发展的重点和难点。

光伏发电系统的基本工作原理就是在太阳光的照射下,将光伏组件产生的电能给储能设备充电或者在满足负载需求的情况下直接给负载供电,如果日照不足或者在夜间则由储能设备在换流器的控制下给直流负载供电,对于含有交流负载的光伏系统,还需要增加逆变器将直流电转换成交流电。光伏系统的应用具有多种形式,但是其基本原理大同小异。其他类型的光伏系统只是在控制机理和系统部件上根据实际的需要有所不同。

光伏发电系统主要由光伏组件、逆变器、汇流箱、汇流电缆、箱变及配套设备组成,其他设备包括防雷系统、配电柜、储能设备、储能换流器、环境监测系统、监控系统及太阳能跟踪系统等。

(1)光伏组件:在有光照(太阳光或其他发光体产生的光照)情况下,电池吸收光能,电池两端出现异号电荷的积累,即产生“光生电压”,这就是“光生伏特效应”。在光生伏特效应的作用下,太阳能电池的两端产生电动势,将光能转换成电能,是能量转换的器件。太阳能电池一般为硅电池,分为单晶硅光伏组件、多晶硅光伏组件、非晶硅光伏组件等。

(2)逆变器:将直流电转换成交流电的设备。太阳能电池和储能设备是直流电源,而负载是交流负载时,逆变器是必不可少的。逆变器按运行方式,可分为独立运行逆变器和并网逆变器,独立运行逆变器用于独立运行的光伏发电系统,为独立负载供电,并网逆变器用于并网运行的光伏发电系统。根据逆变器输出波形,可将逆变器分为方波逆变器和正弦波逆变器,方波逆变器电路简单,造价低,但谐波分量较大,一般用于几百瓦以下和对谐波要求不高的系统。正弦波逆变器成本高,但可适用于各种负载。逆变器的保护功能包括:过载保护、短路保护、接反保护、欠压保护、过压保护、过热保护等。

(3)配电柜:光伏电站配电柜是用来接受和分配电能的电力设备。它主要由控制电器(断路器、隔离开关、负荷开关等)、保护电器(熔断器、继电器、避雷器等)、测量电器(电流互感器、电压互感器、电压表、电流表、电度表、功率因数表等)以及载流导体等组成。配电柜按照设备所处场所,可分为户内配电柜和户外配电柜;按照电压等级,可分为高压配电柜和低压配电柜;按照结构形式,可分为装配式配电柜和成套式配电柜。中小型光伏电站一般供电范围较小,采用低压交流供电基本可以满足用电需要。因此,低压配电柜系统在光伏电站中就成为连接逆变器和交流负载的接受和分配电能的电力设备。

(4) 储能设备:其作用是贮存光伏组件受光照时发出的电能并可随时向负载供电。光伏发电对所用电池类储能设备的基本要求是:自放电率低、使用寿命长、深放电能力强、充电效率高、少维护或免维护、工作温度范围宽、价格低廉。目前我国与太阳能发电系统配套使用的蓄电池主要有铅酸蓄电池、镉镍蓄电池和锂电池等。配套 200Ah 以上的铅酸蓄电池,一般选用固定式或工业密封式免维护铅酸蓄电池,每只蓄电池的额定电压为 2V DC;配套 200Ah 以下的铅酸蓄电池,一般选用小型密封免维护铅酸蓄电池,每只蓄电池的额定电压为 12V DC。

(5) 储能换流器:它对储能设备的充、放电条件加以规定和控制,并按照负载的电源需求控制光伏组件储能设备对负载的电能输出,是储能系统的核心控制部分。

(6) 太阳能跟踪系统:太阳能跟踪系统是能够保证光伏组件随时正对太阳,从而使太阳光线垂直照射光伏组件的动力装置,能够显著提高光伏发电系统的发电效率。其结构主要包括:电机(直流、步进、伺服、行星减速电机、推杆电机等)、蜗轮蜗杆、传感器系统等。

1.1.3 光伏发电主要类型

光伏发电系统按是否接入公共电网可分为并网光伏发电系统和独立光伏发电系统。

独立光伏发电系统主要由光伏组件、逆变器、储能设备、储能换流器等组成。具体工作原理:光伏组件将在白天太阳照射产生的直流电能通过控制器一部分传送到逆变器转化成交流电能,一部分对储能设备进行充电;当阳光不足时,储能设备通过换流器向交流负载供电。独立光伏电站包括边远地区的村庄供电系统、太阳能户用电源系统、通信信号电源、阴极保护、太阳能路灯等各种带有储能设备的可以独立运行的光伏发电系统。

并网光伏发电系统最大的特点就是光伏组件产生的直流电经过并网逆变器转换成符合公共电网要求的交流电之后直接接入公共电网,并网系统中光伏组件产生的电力除了供给交流负载外,多余的电力反馈给电网。并网光伏发电系统直接将电能输入电网,无需配置储能设备,省掉了储能设备储能和释放的过程,可以充分利用光伏组件所发的电力从而减小能量损耗,降低系统的成本。但是系统中需要专用的并网逆变器,以保证输出的电力满足电网对电压、频率等电能质量指标的要求。这种系统通常能够并行使用市电和光伏组件作为本地交流负载的电源,降低了整个系统的负载缺电率。此外,并网光伏系统还可以对公用电网起到调峰作用。但是,并网光伏发电系统作为一种分散式发电系统,对传统的基于集中供电系统的电网会产生一些不良的影响,如谐波污染、孤岛效应等。

1.2 发展现状与政策

1.2.1 发展历史与现状

1839 年,法国科学家贝克勒尔首次发现了光生伏特效应,1954 年,贝尔实验室的科学家

皮尔森和恰宾等人成功研制出转换效率为6%的单晶硅太阳能电池,此为第一个具有实用价值的太阳能电池。这一成果,标志着光伏发电为人类提供服务时代的开始,为光伏发电产业的出现和发展奠定了材料和技术上的基础。1958年,美国制造的单晶硅太阳能电池转换效率达到了8%,并第一次在宇宙空间应用,美国的“先锋一号”人造卫星成为世界上第一个使用太阳能电池供电的人造宇宙飞行器。作为空间电源的优良产品,太阳能电池成为尖端高科技产品而身价倍增。1960年,利用晶硅光伏组件的光伏发电站首先在美国西部实现并网。

20世纪70年代到2000年前,光伏发电产业的发展经历了快速发展期。70年代初,全球能源危机和大气污染问题日益突出,促使能源需求旺盛的发达国家加强了对新能源的开发,地面光伏电站开始应用。同时随着科技的进步,晶体硅电池的成本大幅度降低,以美国为首的发达国家掀起了对光伏发电的开发和利用热潮。80年代,世界石油价格大幅回落,相比之下光伏产品价格仍然高高在上,缺乏竞争优势,同时核能发电开始迅速发展,这些对光伏发电的开发利用都产生了一定的抑制作用,但光伏发电产业也一直保持以10%~15%的递增速度在发展。90年代,随着光伏成本逐年下降及各国政府对环境问题的日益关注,光伏发电再次受到青睐,其发展更为迅速,成为全球增长速度最快的高新技术产业之一。

1996年,联合国召开会议讨论了《世界太阳能战略规划》《国际太阳能公约》《世界太阳能10年(1996—2005)行动计划》等重要文件,发表了《哈拉雷太阳能与持续发展宣言》。这次会议进一步表明了联合国和世界各国对开发利用太阳能的坚定信念,同时要求全球共同行动,广泛利用太阳能。

世界各国也纷纷制订出各种光伏发展规划,大力推进光伏发电产业的发展。美国是最早制订光伏发电发展规划的国家,1997年又提出“百万屋顶”计划。日本政府于1993年制定了新阳光计划,该计划的目标是将新能源作为国家的重要能源供应方式加以支持。德国是最早和最积极倡导鼓励光伏发电研究与应用的国家之一,其光伏发电的研究与应用也走在世界前列。早在1990年,德国就率先推出“1000太阳能屋顶计划”,政府为每位安装太阳能屋顶的住户提供补贴,该计划意在获取安装太阳能设备的经验,使新住房与可再生能源发电需求兼容,并鼓励民众消费太阳能。因发展迅猛,该计划在1993年被扩展为“2000屋顶计划”,至1997年完成近万套屋顶光伏发电系统,累计装机容量达33MW。在此基础上,1998年又进一步提出了“10万光伏屋顶计划”,于2000年开始实施该计划,大量安装光伏发电系统。瑞士、法国、意大利、西班牙、芬兰等国也纷纷制订光伏发电发展计划,并投巨资进行技术开发和加速工业化进程。

全球光伏发电产业在经历了十几年的高速发展后,从2011年开始遭遇了寒冬,多国家国外大型光伏企业宣布破产,主要国家纷纷削弱光伏发电产业扶持力度,国际光伏市场持续低迷。严重依赖国际市场的中国光伏发电产业面临严峻挑战,产能过剩,产品滞销,大量企业亏损严重,欧美国国家接连发起的“双反”调查,更使我国光伏发电产业陷入了一段时间的