

New
Energy
Generation
and
Converter
Technology

新能源 发电变流技术

张兴◎主编



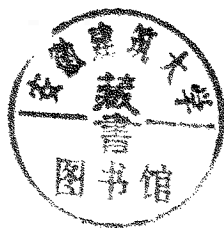
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源发电变流技术

主编 张 兴

参编 杨淑英 刘 芳 李 飞

刘胜永 王付胜 刘 淳



机械工业出版社

由于当今经济社会可持续发展的需要,人们迫切呼吁建立以清洁、可再生能源为主的新能源结构逐渐取代以污染严重、资源有限的化石能源为主的传统能源结构。大规模开发和利用以太阳能、风能为代表的新能源对于我国能源结构调整和绿色可持续发展具有重要意义,而新能源发电交流技术则是新能源发电系统不可或缺的核心关键技术。本书面向具有一定电力电子技术基础的高年级本科生或研究生,以典型新能源发电技术为切入点,深入浅出地阐述和讨论新能源发电概述、并网逆变器及其控制、并网光伏发电及逆变器技术、风电变流器及其控制、微网逆变器及其控制、储能功率变换系统及其控制、新能源发电中的孤岛效应、新能源发电并网导则及故障穿越等内容。

本书旨在培养电气工程或自动化等专业本科生、研究生了解和掌握新能源发电系统中的电力电子技术理论,并提高学生针对新能源发电中相关交流技术的研究及应用能力。另外,本教材也可作为新能源发电交流技术开发和应用工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电交流技术/张兴主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-111-60026-8

I. ①新… II. ①张… III. ①新能源-发电-变流技术-研究
IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第109287号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:江婧婧 责任编辑:翟天睿

责任校对:肖琳 封面设计:鞠杨

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·21.5印张·468千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60026-8

定价:69.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

随着现代社会经济的快速发展，气候变化问题已经成为当今国际政治经济和环境领域的热点问题之一，化石能源造成的环境和气候变化问题也越来越受到广泛的关注。2015年12月巴黎气候变化大会所达成的《巴黎协定》主要目标是将本世纪全球平均气温上升幅度控制在 2°C 以内，并将全球气温上升控制在工业化时期水平之上 1.5°C 以内。为实现《巴黎协定》所提出的目标，开发和利用可再生能源是全球能源应用的大势所趋。

可再生能源作为一种更加清洁的能源，在能源供应多元化发展中扮演着越来越重要的角色，根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）预测到2021年，可再生能源在全球能源消费结构中的占比将增至42%，可再生能源发电在电力能源中的占比将达到28%，到2035年可再生能源发电（包括水电）占全球发电量增长的50%，并且在全球发电总量中的占比将增加至31%，从而成为电力行业最主要的燃料。按照IEA的推荐，将可再生能源分为三类，第一类为大型水电站，第二类为生物质能，第三类为新的可再生能源，即新能源，包括太阳能、风能、小水电、海洋能等。此外，新能源除了包含太阳能、风能、小水电、海洋能等一次能源外，通常还包含燃料电池等二次能源。

新能源发电及其产业的快速崛起，与世界各国日益重视环境保护，倡导节能减排密切相关。风电、光伏作为清洁能源，受到全球各国的普遍重视，各国纷纷出台了鼓励新能源发展的措施，促进了风电、光伏等新能源的发展。同时，由于技术的进步，新能源发电的成本也快速下降，这是其崛起的另一重要推动力。在1997~2016年这二十年间，全球新能源发展迅猛。风电装机容量从7.64GW增长到468.99GW，光伏装机容量从0.23GW增长到301.47GW，分别增长了60倍和1310倍。与此同时，风电和光伏发电量也快速增长，分别从1997年的12TWh和0.8TWh增长到2016年的959.5TWh和331.1TWh，风电发电量增长了79倍，光伏发电量增长了413倍。显然，以风电、光伏为代表的新能源发电已经成为电力供应中不可忽视的成分。另外，据彭博新能源财经发布的预测报告《2016年新能源展望》指出，到2040年，欧洲70%的电力将来自风能、太阳能、水力发电和其他可再生能源，而2015年这一占比仅为32%。美国可再生能源发电的份额将从2015年的14%跃升至2040年的44%。

随着我国现代化进程的加速和国力的增强，近20年来新能源发电在我国得以快速发展，但无论是从装机容量还是从发电量来看，新能源占比仍然有较大的提升空间。从装机容量来看，截止到2017年三季度末，我国煤电装机10.81亿kW，水电3.39亿kW，

核电 3582 万 kW, 风电 1.57 亿 kW, 光伏 1.2 亿 kW, 生物质 1423 万 kW; 煤电装机占全部装机容量的 61.87%, 水电装机占 19.4%, 核电占 2.05%, 风电占 9.0%, 光伏占 6.87%, 生物质占 0.81%。从发电量来看, 2017 年前三季度, 我国煤电发电 3.45 万亿 kWh, 水电 8147 亿 kWh, 核电 1834 亿 kWh, 风电 2128 亿 kWh, 光伏 857 亿 kWh, 生物质 568 亿 kWh。煤电发电量占比高达 71.84%, 水电占 16.95%, 核电占 3.82%, 风电占 4.43%, 光伏占 1.78%, 生物质占 1.18%。

可见, 在我国, 煤电无论是装机容量还是发电量均占绝对优势, 风电、光伏的发电量合计仅占全部发电量的 5.21%, 而煤电发电量则占全部发电量的 71.84%, 风电、光伏等新能源替代煤电的空间巨大, 同时也迫切需要加强政策和技术创新, 在提升新能源发电综合效率的同时进一步降低新能源发电成本。

由于当今经济社会可持续发展的需要, 人们迫切呼吁建立以清洁、可再生能源为主的新能源结构来逐渐取代以污染严重、资源有限的化石能源为主的传统能源结构。大规模开发和利用以太阳能、风能为代表的新能源对于我国能源结构调整具有重要意义。随着我国社会经济与科技创新能力的快速进步与发展, 我国新能源开发和利用成果显著, 技术创新水平不断提高, 涌现出多个世界一流的新能源发电企业, 新能源产业发展势头良好, 因此对新能源发电相关专业技术人才的需求量也随之大增。

面对如此巨大的国内外需求, 国内诸多高等院校、研究院所以及相关企业都已投入了大量的资金和人员积极开展新能源发电相关研究和产业化工作, 在大力发展新能源发电技术的形势下, 国内一些学者、专家及时编写了多部有关新能源发电技术的论著和教材, 这些论著和教材在推动新能源发电技术的研究和产业技术进步方面起到了积极的作用。然而, 这些论著和教材大都是从系统层面或从单一新能源发电技术层面论述新能源发电技术的相关理论基础和系统应用技术, 更是鲜有系统介绍新能源发电系统中电力电子变流技术且适用于电气和自动化等相关专业本科生及研究生的教材问世。编者长期从事电力电子技术课程的本科和研究生教学工作, 并依托合肥工业大学电力电子与电气传动国家重点学科以及教育部光伏系统工程研究中心, 与阳光电源股份有限公司开展了长期的产学研合作, 在光伏、风电、微电网以及储能等新能源发电中的电力电子变流技术研究方面有了一定的理论与应用技术积累, 也相继出版了有关光伏并网和风电变流器技术的相关学术专著。在此基础上, 总结和编写一本系统论述新能源发电变流技术的本科教材已显得十分必要和迫切。然而, 如何能编写好一本介绍新能源发电中的电力电子变流技术, 且适用于具有一定电力电子技术基础的高年级本科生或研究生的电力电子后续课程教材, 对编者而言一直是一件非常困难的事。首先, 新能源发电及其变流技术的发展日新月异, 新思想、新概念、新内容等层出不穷, 要系统论述则编者水平远不能及; 其次, 教材的主要内容应能体现新能源发电变流技术的应用特点和理论体系, 并且要与已有电力电子技术课程相衔接, 既要有一定的深度又要有一定的广度, 这对于需要兼顾教和学两方面的教材编撰而言无疑具有相当的挑战。好在已有多部介绍新能

源发电的论著和教材相继出版,可以提供较为丰富的教学参考资料和文献。本教材的编撰也只是想探索热点领域电力电子应用技术的教学,拓展和延伸现有电力电子技术课程体系,并在电力电子技术后续系列课程的建设上做初步的尝试,希望能在得到各位专家和同行批评指正的同时,共同推进新能源发电变流技术的教学,不断完善电力电子技术教学的课程体系。

本书以“电力电子技术”课程内容为基础,从新能源发电中的电力电子变流器及其控制角度出发,深入浅出地讨论新能源发电概述、并网逆变器及其控制、并网光伏发电及逆变器技术、风电变流器及其控制、微网逆变器及其控制、储能功率变换系统及其控制、新能源发电中的孤岛效应、新能源发电并网导则及故障穿越等内容,为新能源发电系统中电力电子变流技术的应用与研究提供了一定的理论基础。

本书由合肥工业大学张兴教授主编,合肥工业大学杨淑英教授、刘芳博士、李飞博士以及广西科技大学刘胜永教授等参编,具体编写分工如下:其中张兴教授编写了全书大纲、前言以及第2章、第3章(除3.2.1.2节外)、第7章,合肥工业大学杨淑英教授编写了第4章、第8章的8.1~8.3节,合肥工业大学刘芳博士编写了第5章,合肥工业大学李飞博士编写了第1章,广西科技大学刘胜永教授编写了第6章,另外,合肥工业大学王付胜副教授和合肥学院刘淳博士分别编写了第3章的3.2.1.2节和第8章的8.4、8.5节,全书由合肥工业大学张兴教授统稿。

在本书的编写过程中,得到了合肥工业大学丁明教授、苏建徽教授、茆美琴教授和黄海宏教授的关心与支持,同时也得到了台湾联合大学江炫璋教授,合肥工业大学谢震教授、马铭遥教授、张国荣教授、杜燕副教授、王佳宁副教授、杨向真副教授、赖继东副教授,安徽大学郑常宝教授、胡存刚教授,安徽理工大学祝龙记教授,合肥学院王庆龙教授、余畅舟博士、徐海珍博士,安徽工业大学刘晓东教授、郑诗诚教授,广西科技大学罗广文教授,安徽建筑大学李善寿副教授,铜陵学院谢东副教授以及固纬电子(苏州)有限公司郭国栋经理、庄曜全博士,合肥汇联电子有限公司蔡先保经理等人的大力协助,他们以读者的视角,从教与学以及实验等方面提出了很多宝贵的意见和建议。另外,研究生李明、王宝基、宋超、陈巧地、高帅、王明达、胡玉华、江文超、刘晓玺、高泽宇、张杰、王梦、张喆、邓金鑫、吴凡、王艺潮、黄耀等参与了相关章节的文献整理、文档修订与绘图等工作,在此一并向他们表示衷心的感谢。另外,在本书的编写过程中,编者参阅了大量的论著与文献,主要部分已列入了参考文献中,在此也对参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书的出版是机械工业出版社多方联系与努力的结果,也得到了阳光电源股份有限公司董事长曹仁贤教授以及赵为博士、屠运武博士、顾亦磊博士等人的大力支持,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,故疏漏甚至谬误在所难免,敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 新能源发电概述 1

1.1 光伏发电	3
1.1.1 光伏发电概述	3
1.1.2 光伏发电的原理及分类	4
1.2 风力发电	10
1.2.1 风力发电概述	10
1.2.2 风力发电的原理及分类	12
1.3 小水力发电	18
1.3.1 小水力发电概述	18
1.3.2 小水力发电的原理及分类	18
1.4 海洋能发电	22
1.4.1 海洋能发电概述	22
1.4.2 海洋能发电的原理及分类	22
1.5 燃料电池发电	29
1.5.1 燃料电池发电概述	29
1.5.2 燃料电池发电的原理及分类	30
思考题	32
参考文献	33

第 2 章 并网逆变器及其控制 34

2.1 并网逆变器概述	34
2.2 同步坐标系下并网逆变器的数学模型	37
2.3 基于电网电压定向的直接电流控制策略	39
2.4 基于 LCL 滤波的并网逆变器控制	41
2.4.1 概述	41
2.4.2 无源阻尼法	43
2.4.3 有源阻尼法	47
2.4.4 LCL 滤波器参数设计	56

2.5 并网逆变器控制中的锁相环技术	60
2.5.1 锁相环概述	60
2.5.2 锁相环的基本实现方法	60
2.5.3 三相软件锁相环技术	67
2.5.4 单相软件锁相环技术	71
2.5.5 锁相环控制参数整定	74
思考题	77
参考文献	77
第3章 并网光伏发电及逆变器技术	79
3.1 并网光伏发电系统的体系结构	79
3.1.1 集中式结构	80
3.1.2 组串式结构	81
3.1.3 集散式结构	82
3.1.4 交流组件式结构	83
3.1.5 直流组件式结构	83
3.1.6 协同式结构	84
3.2 并网光伏逆变器	84
3.2.1 隔离型并网光伏逆变器结构	85
3.2.2 非隔离型并网光伏逆变器	101
3.2.3 微型逆变器	113
3.3 光伏系统的 MPPT 技术	124
3.3.1 概述	124
3.3.2 基于输出特性曲线的开环 MPPT 方法	126
3.3.3 扰动观测法	127
3.3.4 电导增量法	135
3.4 光伏系统 PID 效应及防护措施	139
3.4.1 PID 效应概述	139
3.4.2 PID 效应的防护	141
思考题	144
参考文献	144
第4章 风电变流器及其控制	146
4.1 风力发电系统概述	146
4.1.1 风力发电机的基本构成	146
4.1.2 风电机组的基本类型	147
4.2 双馈型风力发电机及其变流器控制	151
4.2.1 双馈型风力发电机及其变流系统	151
4.2.2 双馈电机数学模型	154

4.2.3 双馈电机的工作原理及工作状态	162
4.2.4 双馈型风电变流器的控制策略	166
4.3 全功率型风电变流器及其控制	175
4.3.1 永磁同步全功率型风力发电机及其变流器控制	175
4.3.2 异步全功率型风力发电机及其变流器控制	185
思考题	195
参考文献	195
第5章 微网逆变器及其控制	197
5.1 微网系统概述	197
5.1.1 微网的构成与定义	197
5.1.2 微网的分类与控制	204
5.2 微网逆变器及其控制	208
5.2.1 下垂控制	209
5.2.2 电压频率给定控制	216
5.2.3 有功、无功给定控制	217
5.2.4 微网逆变器的双模式控制及无缝切换	218
5.3 虚拟同步发电机控制	224
5.3.1 虚拟同步发电机思想的提出	224
5.3.2 同步发电机基本原理	225
5.3.3 虚拟同步发电机控制实现	229
5.3.4 虚拟同步发电机与同步发电机的区别	231
5.3.5 虚拟同步发电机的应用	232
本章小结	234
思考题	234
参考文献	235
第6章 储能功率变换系统及其控制	238
6.1 储能系统的概述	238
6.1.1 储能系统的基本类型	238
6.1.2 典型储能系统中的变流技术	245
6.2 储能功率变换系统控制策略	256
6.2.1 功率变换系统的控制要求	256
6.2.2 储能系统功率变换系统控制策略	257
思考题	262
参考文献	262
第7章 新能源并网发电中的孤岛效应	266
7.1 孤岛效应的基本问题	266

7.1.1 孤岛效应发生的机理	266
7.1.2 孤岛效应的检测	268
7.1.3 并网逆变器发生孤岛时的理论分析	269
7.2 基于并网逆变器的被动式反孤岛策略	273
7.2.1 过/欠电压、过/欠频率反孤岛策略	273
7.2.2 基于相位跳变的反孤岛策略	275
7.2.3 基于电压谐波检测的反孤岛策略	277
7.3 基于并网逆变器的主动式反孤岛策略	278
7.3.1 频移法	278
7.3.2 基于功率扰动的反孤岛策略	282
7.3.3 阻抗测量方案	284
7.4 不可检测区域与反孤岛策略的有效性评估	285
7.4.1 基于 $\Delta P \times \Delta Q$ 坐标系孤岛检测的有效性评估	285
7.4.2 基于 $L \times C_{\text{norm}}$ 坐标系孤岛检测的有效性评估	290
思考题	295
参考文献	295
第8章 新能源发电并网导则及故障穿越	297
8.1 新能源发电并网导则	297
8.2 电网电压跌落故障的分类	303
8.3 风力发电机的低电压穿越及控制	307
8.3.1 双馈型风力发电机的低电压穿越及控制	307
8.3.2 全功率型风力发电机的低电压穿越及控制	316
8.4 光伏发电系统的低电压穿越及控制	320
8.5 并网系统的低电压穿越测试	324
8.5.1 电网模拟器	325
8.5.2 新能源发电系统的低电压穿越测试	325
思考题	329
参考文献	330

第 1 章

新能源发电概述

在全球经济高速发展的今天，能源安全关乎国家安危，作为经济发展的原动力，能源不仅影响着当今的世界格局，还关系到世界的安宁。能源是国民经济发展不可或缺的重要基础，是现代化生产的主要动力来源，现代工业与农业都离不开能源动力。但随着化石能源的快速消耗，能源短缺的问题日益突出，如果能源的供应出现严重短缺或中断，那么与能源息息相关的社会经济民生将受到剧烈的冲击并造成巨大的混乱。

气候变化问题已经成为当今国际政治经济和环境领域的热点问题之一，化石能源造成的环境问题也越来越受到广泛的关注。化石燃料燃烧产生的大量以二氧化碳为代表的温室气体引发了全球天气异常，随之而来的粮食减产和沙漠化等问题对人类的生存和发展造成了极大的威胁；机动车燃烧化石燃料与煤炭燃烧所产生的颗粒性污染物造成大面积雾霾，危害人们的身体健康。这些污染与危害已经远远超出一个国家和地域的范畴，成为世界范围的公害，研发和应用新能源技术、建立高效能源利用体系已刻不容缓。

“新能源”是 1978 年 12 月 20 日第三十三届联合国大会第 148 号决议首次使用的一个专业化名称。1981 年 8 月联合国召开的新能源和可再生能源会议上正式界定了其基本含义，即新能源以新技术和新材料为基础，使传统的可再生能源得到现代化的开发利用，用取之不尽、用之不竭的可再生能源来不断取代资源有限、对环境有污染的化石能源。新能源的“新”不仅有别于传统化石能源为主的“旧”能源的能源利用形式，而且有别于旧式的只强调转换效率，不注重能源需求侧的综合利用效率，只强调经济，不注重资源、环境代价的传统能源利用理念。新能源的“新”不仅在于它的形式，更在于它在如今对于环境和资源利用的新意义。

按照国际能源署（International Energy Agency, IEA）的推荐，可再生能源分为三类，第一类为大型水电站，第二类为生物质能，第三类为新的可再生能源，即新能源，包括太阳能、风能、小水电、海洋能等。此外，按目前国际惯例，新能源除了包含太阳能、风能、小水电、海洋能等一次能源外，还包含燃料电池等二次能源。

太阳能是指太阳所发出的能量，一般以阳光照射到地面的辐射总量来计算，太阳能的转换和利用有光-热转换、光-电转换和光化学转换，并以光-电转换为主要利用形式。太阳能能量巨大，具有典型的可再生性，并决定了几乎所有可再生能源的可再生性。虽然太阳辐射能巨大，但其能量密度较低，分布不均匀，并具有典型的间隙性和随机性。

风能是由于太阳辐射造成地球表面温度不均匀引起各地温度和气压的不同，导致空

气运动而产生的能量，具有总量大、分布广、无污染等诸多特点，但在利用上也存在能量密度低、随机性大、难以存储等诸多问题。

小水电是指装置容量较小的水力发电系统，与大水电相比具有淹没土地少、对生态环境影响小、造价低、工期短等优点，但其发电季节波动性强、负载适应性差。

海洋能是指蕴藏在大海中的能源，主要产生于太阳的辐射以及其他星球的引力。海洋能包括潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能和海水盐差能等不同的能源形态。海洋能在海洋总体水体中蕴藏量巨大，但单体能量较小，有稳定海洋能和不稳定海洋能之分。

燃料电池是一种主要使用氢气为燃料进行化学反应产生电力的装置，是继水力、火力、原子能发电方式之后的“第四种发电方式”，燃料电池发电属于二次能源。燃料电池具有节能、转换效率高、对人体无化学危害、对环境无污染、几乎零排放等优点。燃料电池发电的主要不足在于燃料种类单一、密封要求高、比功率低、造价高等。

发展新能源是当今世界能源应用的大势所趋。首先，发展新能源是必要的，是经济、社会和环境的协调发展所要求的。就我国国情来讲，虽然能源总量丰富但人均不足，当前正处在经济飞速发展的阶段，对能源需求量不断增大，发展新能源具有强烈的紧迫性。其次，发展新能源有利于社会经济环境相协调，有利于促进国内能源结构调整，有利于促进环境保护与自然恢复，有利于经济转型升级并扩大就业，实现可持续发展。

在国际上早已将新能源认作可以替代化石燃料的常规能源。2015年初，就已有至少164个国家拥有可再生能源发展目标，约145个国家颁布了可再生能源支持政策。从目前世界各国的既定战略和发展规划上来看，大规模开发利用新能源已经成为世界各国能源发展战略的重要组成部分，世界新能源利用总量将会不断增加，在总体能源供应中也将占据越来越重要的地位。据预测，到2070年，世界上80%的能源将依靠新能源进行供给，前景广阔。

新能源资源丰富、分布广泛，可以就地开发就地消纳，有着化石能源不能比拟的安全性和灵活性；新能源是清洁能源，又能够循环利用；新能源应用技术不断成熟，成本不断降低，经济可行性不断改善。新能源在拥有环境友好、可持续利用与分布广泛等优点的同时，也有着能量密度低、随机性和间歇性等缺点，需要在应用中不断探索和研究，使新能源成为好用的绿色能源。

新能源发电离不开电力电子技术。无论是独立发电还是并网发电，无论是大规模发电还是分布式发电，都需要利用电力电子变换器进行电能变换和控制。电力电子技术是实现新能源安全、稳定、高效、灵活和经济的高性能发电的技术保障。

可以预见，新能源发电领域及市场投资将越来越大，并将创造巨大的社会价值、经济价值和就业机会。新能源是21世纪最具发展前景的能源，随着经济、技术的不断发展，新能源必将成为人类的主流能源。以下简要介绍几种典型的新能源及其应用。

1.1 光伏发电

1.1.1 光伏发电概述

光伏发电是利用太阳能电池将光能直接转变为电能的发电方式。光伏发电是大规模利用太阳能的主要形式和发展方向,是未来世界上发展最快、最有前途的新能源技术之一。

根据德国太阳能协会的统计数据,截至2016年底,全球太阳能光伏装机容量累计超过300GW,如图1-1所示。2016年全球光伏新增装机容量76.6GW,比2015年增长大约52.9%。2016年我国光伏新增装机容量为34.54GW,超过了分列2~5位的美国(14.7GW)、日本(8.6GW)、印度(4GW)、英国(2GW)新增装机容量的总和,显示出全球特别是我国太阳能光伏强劲的发展势头,预计2018年全球光伏装机总量将达到522GW。

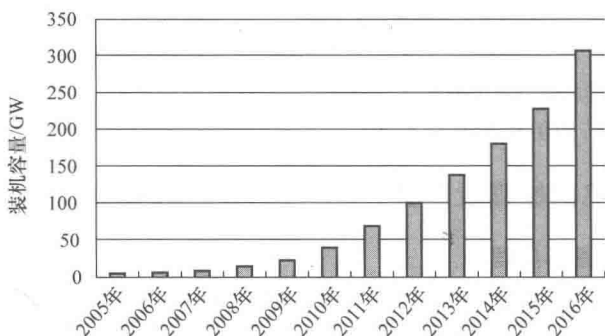


图 1-1 全球光伏年度累计装机容量

我国的光伏发电产业呈现快速发展态势,已逐步形成产业化、规模化、竞争化的局面,对于我国能源结构的改善以及清洁能源体系的建设发挥了一定的积极作用。光伏产业发展初期,我国的光伏市场发展缓慢;2002年“送电到乡”工程的启动推动了我国光伏市场的起步发展,光伏装机容量从每年几十千瓦,逐步进入到兆瓦级别;2009年我国开始实施“金太阳示范工程”,国家能源局开始实行特许权招标制度,自此我国的光伏发电市场进入快速发展通道,规模化发展开始起步;2011年国家上网电价政策出台,进一步推动了我国光伏市场的发展,当年新增并网装机容量达到2.07GW,跻身全球光伏新增装机容量第三位;2017年,我国光伏发电光伏新增装机再度刷新历史,达到53.06GW,同比增长53.62%,累计装机容量已达到130.25GW,如图1-2所示。自2012年以来,我国光伏发展迅猛,其中光伏新增装机容量已连续5年位居全球首位,累计装机容量也连续3年位居全球第一。

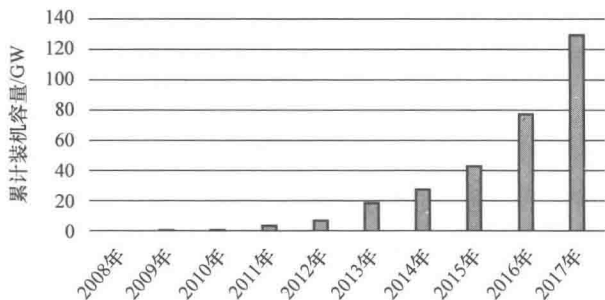


图 1-2 我国光伏年度累计装机容量

随着《巴黎协定》的生效，将会进一步推动我国光伏行业的发展，同时光伏产业的研发力度不断加深、生产工艺不断进步，光伏产品的能耗将持续降低，效率逐渐提高，成本也将继续下降，国内光伏市场仍然会有较大的发展空间。目前，我国已经将新能源产业上升为国家战略产业，未来将会继续加大对新能源产业的投资。此外，我国光伏行业的市场将会产生一些新的变化，光伏市场将会从西部向中东部地区转移，光伏电站将会由大型地面电站转向分布式光伏电站，尤其是户用光伏、建筑光伏以及光伏综合应用等，将会成为新的关注点和成长点。

1.1.2 光伏发电的原理及分类

1.1.2.1 光伏发电基本原理

光伏发电凭借太阳能电池将太阳的辐射能转换为电能，而太阳能电池转换能量的能力是基于半导体的光伏效应。光伏效应也称为光生伏特效应，是指半导体在受到光照射时产生电动势的现象。

典型的晶体硅太阳能电池结构如图 1-3 所示。在制备晶体硅太阳能电池的过程中，先向晶体硅里掺入 3 价的硼原子，构成 P 型硅片，之后在其表面掺入 5 价的磷原子，得到一层比较薄的 N 型硅片。由于 P 型硅片空穴较多，N 型硅片内的电子较多，因此在 P 型硅片和 N 型硅片的交界面就会形成一个带有内电场的空间电荷区，即 PN 结。从电池上部引出的电极称为上电极，下部引出的电极称为下电极。两电极通过欧姆接触的方式分别与 N 型硅片（N 区）和 P 型硅片（P 区）相连。

当太阳光照射太阳能电池表面时，一部分太阳光被太阳能电池的上表面反射掉，另一部分则被太阳能电池吸收，还有少量透过太阳能电池。在被吸收的光子中，能量大于半导体禁带宽度的光子会激发半导体材料中原子的价电子，产生光生电子-空穴对，又称光生载流子。如果光生载流子产生于空间电荷区中，则会立即被内电场分离，电子进入 N 区，空穴进入 P 区。如果空穴产生于 N 区，那么空穴便开始向 PN 结边界扩散，一旦到达 PN 结边界，便立刻受到内电场的作用，越过空间电荷区进入 P 区。如果电子产生于 P

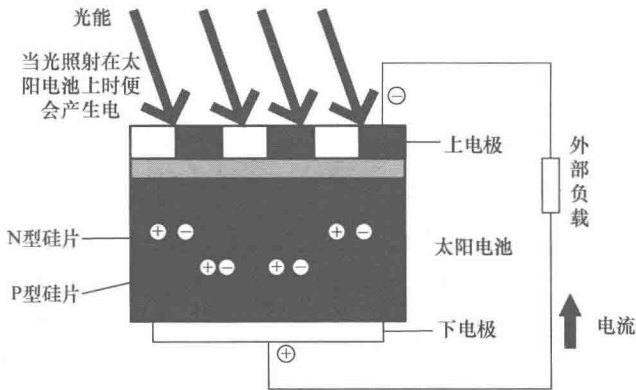


图 1-3 典型的晶体硅太阳能电池结构

区，则电子向PN结边界扩散，并在到达PN结边界后被内电场推入N区。因此，上述过程便会在PN结两侧产生正、负电荷的累积，从而形成与内电场方向相反的光生电场。光生电场不仅抵消了内电场的作用，还产生了光生电动势，这就是太阳能电池光伏效应的基本过程。

太阳能电池实际上就是一个大面积的平面二极管，其工作原理可进一步由图1-4所示的等效电路来描述。图1-4中 R_L 是太阳能电池的外接负载，太阳能电池的输出电压即负载电压为 U_L ，太阳能电池的输出电流即负载电流为 I_L 。

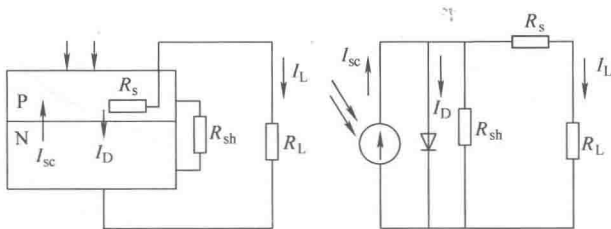


图 1-4 太阳能电池的等效电路

图1-4中， I_{sc} 为光子在太阳能电池中激发的电流，其大小取决于光照强度，即辐照度、电池面积和本体温度 T ； I_D 为通过PN结的总扩散电流（即二极管电流），其方向与 I_{sc} 相反， I_D 可定量描述为

$$I_D = I_{D0} \left(e^{\frac{qE}{AKT}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中 q ——电子的电荷，且 $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

K ——玻耳兹曼常数，且 $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

A ——常数因子，且正偏电压大时 $A = 1$ ，正偏电压小时 $A = 2$ ；

I_{D0} ——太阳能电池在无光照时的饱和电流，且满足

$$I_{\text{D0}} = AqN_{\text{c}}N_{\text{v}} \left[\frac{1}{N_{\text{A}}} \left(\frac{D_{\text{n}}}{\tau_{\text{n}}} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_{\text{D}}} \left(\frac{D_{\text{p}}}{\tau_{\text{p}}} \right)^{1/2} \right] e^{-\frac{E_{\text{g}}}{kT}} \quad (1-2)$$

式中 A ——PN 结面积；

$N_{\text{c}}, N_{\text{v}}$ ——导带和价带的有效态密度；

$N_{\text{A}}, N_{\text{D}}$ ——受主杂质和施主杂质的浓度；

$D_{\text{n}}, D_{\text{p}}$ ——电子和空穴的扩散系数；

$\tau_{\text{n}}, \tau_{\text{p}}$ ——电子和空穴的少数寿命；

E_{g} ——半导体材料的带隙。

由式 (1-1) 可知, I_{D0} 大小与太阳电池的电动势 E 和温度 T 等有关。

图 1-4 中, R_{s} 为串联电阻, 主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接触电阻组成; R_{sh} 为并联电阻, 又称为旁漏电阻, 主要是由硅片的边缘不清洁或体内的缺陷引起的。一般太阳电池的串联电阻 R_{s} 很小且并联电阻 R_{sh} 很大, 因此, 在进行等效电路计算时, 通常可以忽略 R_{sh} 、 R_{s} 的影响, 故可得到理想的太阳电池特性方程为

$$I_{\text{L}} = I_{\text{sc}} - I_{\text{D0}} \left(e^{\frac{qU_{\text{L}}}{AKT}} - 1 \right) \quad (1-3)$$

求解式 (1-3) 可得

$$U_{\text{L}} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{\text{sc}} - I_{\text{L}}}{I_{\text{D0}}} + 1 \right) \quad (1-4)$$

上述基于 $I_{\text{L}} - U_{\text{L}}$ 的定量关系描述了太阳电池的外特性, 也称为输出特性, 这是光伏发电系统设计的重要基础。辐照度和温度是确定太阳电池输出特性的两个重要参数, 固定温度并改变辐照度, 或者固定辐照度并改变温度, 可得到太阳电池的输出随负载变化的两个重要的输出特性曲线簇, 如图 1-5 所示。

从图 1-5 所示特性曲线可以看出太阳电池的输出随辐照度和温度的变化趋势, 且可以看出太阳电池既非恒流源, 也非恒压源, 而是一个非线性直流电源。太阳电池提供的功率取决于阳光所提供的能量, 因此无法为负载提供无限大的功率。在固定的温度和辐照度下, 当太阳电池的电压随着负载电阻值的增加而从 0 (短路条件下) 开始增加时, 电池的输出功率也从 0 开始增加; 当电压达到一定值时, 功率可达到最大, 这时若负载电阻值继续增加, 则功率将跃过最大点并逐渐减少至 0, 即电压达到开路电压 U_{oc} 。太阳电池输出功率达到最大的点称为最大功率点, 如何能在不同的环境参数下使太阳电池始终工作在最大功率点, 从而最大限度地提高太阳能光伏发电系统的输出功率, 这就是在理论和实践中需要研究的太阳电池最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 技术, 通常太阳电池通过电力电子变换器实现 MPPT 控制。常见的太阳电池 MPPT 方法有功率匹配电路、扰动与观察法、滞环比较法、实际测量法和二次插值法等。

1.1.2.2 光伏发电系统的分类

将一系列单体太阳电池进行串联形成串联电池组可以获得较高的输出电压; 将一系列单体太阳电池进行并联可以获得较大的输出电流; 将多组串联电池组进行并联可以获

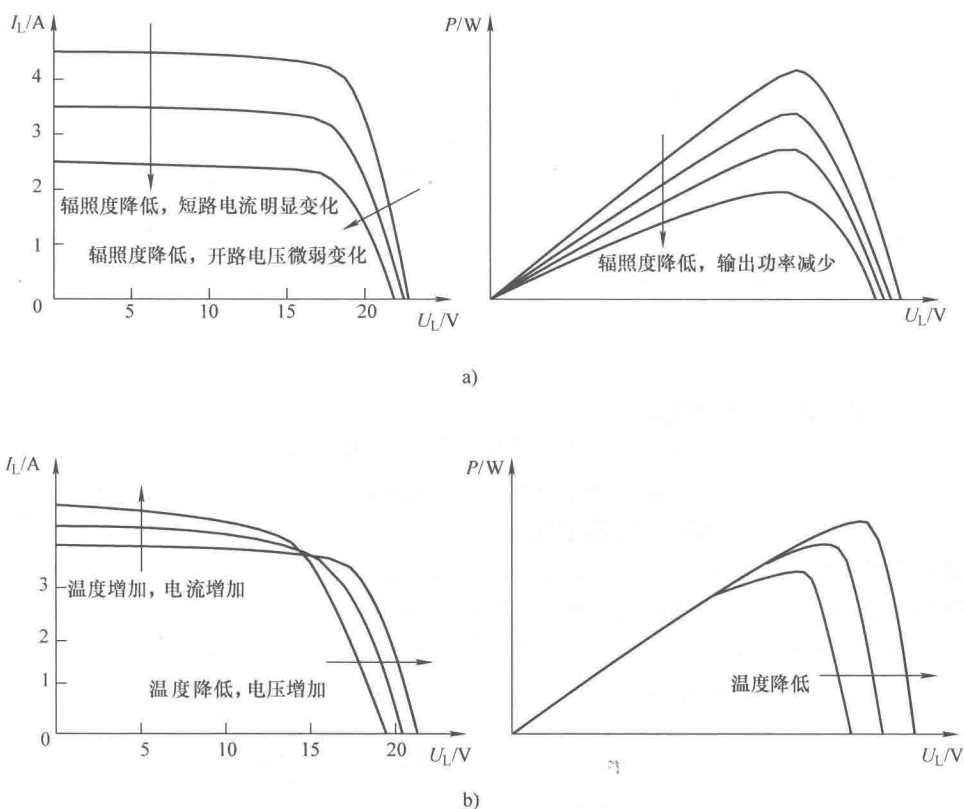


图 1-5 辐照度、温度变化时的太阳电池输出特性曲线簇

- a) 同一温度不同辐照度下的太阳电池输出特性曲线簇
 b) 同一辐照度不同温度下的太阳电池输出特性曲线簇

得较高的输出电压与较高的输出电流。太阳电池经过串并联并且封装后，就可以组成大面积的光伏组件，多个光伏组件构成光伏阵列后，配合功率变换器、连接和汇流线缆、配电开关和保护装置等就形成了光伏发电系统。

光伏发电系统的分类如图 1-6 所示。

在图 1-6 中，按照是否与电网连接，可将光伏发电系统分成与电网相连的并网光伏系统和独立运行的离网光伏系统。其中，并网光伏系统按照其并网电压等级、规模和安装特征等，还可以分为集中式并网光伏系统和分布式并网光伏系统两类。目前，全球光伏发电系统的主流应用方式是并网光伏发电，即太阳电池通过并网逆变器与电网相连，并通过电网将光伏系统所发电能进行再分配。离网光伏系统不与电力系统相连，主要用于为边远无电地区供电，或作为备用电源使用。以下简要介绍几种典型的光伏发电系统。