



天津市科协资助出版

# 光伏发电 并网逆变技术

GUANGFU FADIAN  
BINGWANG NIBIAN JISHU

李练兵 著



化学工业出版社



天津市科协资助出版

# 光伏发电 并网逆变技术

李练兵 著



化学工业出版社

·北京·

研究光伏发电技术,推动光伏发电产业的发展,对于缓解常规能源的短缺和减少环境污染具有重要作用。并网逆变技术是光伏发电系统的核心技术。本书围绕光伏发电并网逆变技术,系统地介绍了单相和三相并网逆变器设计方法、光伏电池最大功率跟踪控制技术、并网逆变系统孤岛检测与低电压穿越方法的分析、光伏并网发电监控系统、光伏发电系统的优化设计、光伏发电系统功率预测与能量管理分布式发电与微电网技术等内容。

本书理论与实践紧密结合,涵盖了光伏并网逆变系统设计方面的诸多先进技术,可供光伏发电并网技术领域的工程技术人员、研发人员、管理等相关人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光伏发电并网逆变技术/李练兵著. —北京:化学工业出版社,2016.3  
ISBN 978-7-122-26090-1

I. ①光… II. ①李… III. ①太阳能发电-逆变器  
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第013107号

---

责任编辑:廉静

装帧设计:关飞

责任校对:程晓彤

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数331千字 2016年5月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

2005年开始,随着中国光伏产业的迅猛发展,光伏发电并网逆变技术的研究得到了巨大推动,正是在这种背景下笔者开始了这一技术领域的科研工作。光伏逆变技术以电力电子技术为基础,融合了电力系统、光伏电池、微控制器、储能电池等相关技术,并网逆变装置的研发需要深厚的经典控制理论和电力电子技术基础,更需要熟练的DSP、FPGA软硬件驾驭能力。其控制管理策略涉及线性控制理论和智能控制理论、数值天气预报、电网调度等各个领域,并需要大量经验的积累和较长时间的成熟过程。

我国的光伏并网逆变技术发展经历了一个从简单到复杂,从故障频出到成熟稳定,从入门者要求到领跑者标准的一个进步过程。在这期间涌现出大量优秀的技术型专业公司,他们推动了我国光伏并网逆变技术的进步。笔者的技术研究历程也正是伴随着这样一个逐渐发展的过程,经历了从单相到三相,从两电平到三电平,从组串式到集中式再到微逆,从独立显示到系统监控,从随发随用到功率预测和储能管理,从单机运行到多机联携的发展过程。同时也见证了从光伏并网逆变技术研发到科林电气光伏逆变产品量产化的过程,并协助科林电气建立了河北省分布式光伏发电监控系统工程实验室,形成了坚实的光伏发电技术研发平台。

在这个过程中,笔者带领一批有才华的年轻研究者共同开展了一系列研究工作。本书按照上述发展路线进行了系统整理,吸收了大量共同进行的研究工作成果,这些研究者包括赵治国、马强、张立强、孙立宁、崔志强、刘炳山、赵国伟、刘哲、王同广、莫红影、张雷、张航、张秀云、张鹏、张晓娜、王增喜、郭向尚。参与本书编辑整理工作的有马欲晓、李漫、王泽伟、孙鲁滨、郗丽忠、侯荣立、安子腾、田永嘉等同学。屈国旺、张虎祥、陈洪雨、陈贺、张文宝、王浩军参与了本书的编写工作。

本书由天津市科学技术协会资助出版。

由于笔者理论水平和技术能力有限,本书难免有一些不足和疏漏之处,敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

2015年12月

# 目 录

## 第 1 章 绪论 / 1

1.1 光伏发电技术研究的意义 .....	1
1.1.1 光伏发电的发展前景 .....	1
1.1.2 国外光伏发电的研究现状及发展 .....	2
1.1.3 我国光伏发电的现状与发展 .....	3
1.1.4 光伏并网逆变技术的发展 .....	6
1.1.5 分布式发电 .....	6
1.2 光伏并网逆变技术的研究热点 .....	8
1.2.1 新型逆变器拓扑结构 .....	8
1.2.2 逆变器开关器件的驱动方式 .....	8
1.2.3 电能质量控制方法 .....	9
1.2.4 MPPT .....	9
1.2.5 孤岛效应 .....	9

## 第 2 章 光伏并网逆变技术 / 10

2.1 光伏并网逆变器概述 .....	10
2.1.1 光伏发电系统构成 .....	10
2.1.2 光伏并网逆变器分类 .....	11
2.2 并网逆变器的拓扑结构 .....	13
2.2.1 组串式逆变器的拓扑 .....	13
2.2.2 集中式逆变器的拓扑 .....	14
2.2.3 微型逆变器的拓扑 .....	14
2.3 组串式单相逆变器的设计 .....	16
2.3.1 组串式单相逆变器软件设计 .....	16
2.3.2 单相逆变器的硬件设计 .....	20
2.4 组串式三相逆变器的设计 .....	26
2.4.1 组串式三相逆变器软件设计 .....	26
2.4.2 三相光伏并网逆变控制系统 .....	28
2.4.3 三电平电路的调制方法 .....	32
2.4.4 三相逆变器的硬件设计 .....	42

2.5	集中式三相逆变器的硬件设计	44
2.5.1	EMC 滤波器参数的选取	45
2.5.2	直流支撑电容的设计	46
2.5.3	IGBT 电路的设计	46
2.5.4	吸收电容的选择	47
2.5.5	网侧滤波器的设计	47
2.5.6	参数设计总结	48
2.6	微型并网逆变器	49
2.6.1	微型并网逆变器设计	49
2.6.2	微型并离网逆变器设计	52

### 第 3 章 光伏电池最大功率跟踪控制技术 / 54

3.1	光伏电池与光伏阵列的原理与特性	54
3.1.1	太阳能电池单体的数学模型	54
3.1.2	光伏组件与阵列模型	56
3.1.3	太阳能电池结温和日照强度对太阳能电池输出特性的影响	57
3.1.4	太阳能光伏阵列输出功率最大点	58
3.1.5	光伏电池升压控制	60
3.1.6	光伏电池仿真	60
3.2	光伏电池 MPPT 装置的设计	62
3.2.1	光伏电池 MPPT 装置结构	62
3.2.2	MPPT 装置	63
3.3	光伏电池 MPPT 算法	65
3.3.1	最大功率跟踪常用方法	65
3.3.2	其他非线性控制策略的 MPPT 控制方法	68
3.3.3	具有稳定性和快速性的 MPPT 算法研究	70

### 第 4 章 并网逆变系统孤岛检测、绝缘检测与低电压穿越 / 75

4.1	孤岛效应的概念和国际标准	75
4.2	孤岛检测原理	77
4.3	孤岛检测方法	78
4.3.1	逆变器外部孤岛检测方法	79
4.3.2	逆变器内部孤岛检测方法	80
4.3.3	孤岛检测实验	84
4.4	漏电和绝缘保护	85
4.4.1	光伏阵列绝缘检测	85
4.4.2	光伏阵列残余电流检测	85

4.5 低电压穿越 .....	87
-----------------	----

## 第 5 章 光伏并网发电监控系统 / 90

5.1 光伏并网发电监控系统 .....	90
5.1.1 光伏并网监控系统的背景和意义 .....	90
5.1.2 光伏网络监控系统的发展 .....	90
5.1.3 光伏发电监控系统的相关标准 .....	91
5.2 光伏并网发电系统的组成 .....	92
5.2.1 太阳能电池组件 .....	92
5.2.2 汇流箱 .....	92
5.2.3 自动发电控制 .....	94
5.2.4 自动电压控制 .....	95
5.3 光伏并网监控系统的原理与设计 .....	95
5.3.1 光伏并网监控系统的结构设计 .....	95
5.3.2 光伏并网监控系统的功能设计 .....	97
5.4 现场监控设计 .....	99
5.4.1 现场监控的设计 .....	99
5.4.2 MCGS 组态软件 .....	99
5.5 本地和远程监控方案设计 .....	100
5.5.1 监控解决方案 .....	100
5.5.2 本地和远程监控软件结构设计 .....	101
5.5.3 多线程的应用 .....	103
5.5.4 NET 及相关技术 .....	104
5.5.5 数据库技术 .....	107
5.5.6 本地监控界面显示 .....	108
5.6 基于 Web 服务器的远程调度 .....	110
5.6.1 远程监控 .....	110
5.6.2 104 规约简介 .....	111
5.6.3 数据通信的实现 .....	111
5.6.4 调度中心界面显示 .....	119

## 第 6 章 光伏发电系统的优化设计 / 123

6.1 光伏发电系统优化设计的概述 .....	123
6.2 分布式光伏发电系统效率优化设计 .....	124
6.2.1 光伏组件安装倾角优化 .....	124
6.2.2 太阳能电池组件的串并联设计 .....	126
6.2.3 太阳能电池组件的排列方式 .....	127
6.2.4 自动跟踪系统的研究 .....	127

6.2.5	逆变器优化 .....	129
6.3	系统成本优化 .....	130
6.3.1	分布式光伏发电成本计算模型 .....	130
6.3.2	光伏发电成本及其影响因素分析 .....	131
6.3.3	成本计算软件 .....	133
6.4	系统的可靠性分析 .....	135
6.4.1	系统的可靠性模型及指标体系 .....	135
6.4.2	供电可靠性方面 .....	135
6.4.3	电能质量要求 .....	136
6.4.4	孤岛引起的安全问题 .....	136
6.4.5	站址选择 .....	136
6.4.6	系统防雷装置设计 .....	136

## 第 7 章 光伏发电系统功率预测与能量管理 / 138

7.1	储能蓄电池的系统特性 .....	138
7.1.1	蓄电池的种类 .....	138
7.1.2	铅酸蓄电池的特性 .....	138
7.1.3	蓄电池的容量匹配 .....	139
7.1.4	PV-BESS 系统的能流模型 .....	140
7.2	光伏发电功率短期预测 .....	140
7.2.1	样本数据预处理 .....	141
7.2.2	光伏发电的功率特性分析研究 .....	143
7.2.3	Elman 神经网络 .....	145
7.2.4	Elman 神经网络短期预测模型 .....	147
7.2.5	Elman 神经网络与 NSET 建模对比分析研究 .....	152
7.2.6	Elman 神经网络与 BP 神经网络建模对比分析研究 .....	153
7.2.7	预测模型结果评估 .....	154
7.3	并网光伏电站的能量管理研究 .....	154
7.3.1	电站实时能量管理策略研究 .....	155
7.3.2	系统能量调度模型的建立 .....	156
7.3.3	系统运行的目标函数与约束条件分析研究 .....	161
7.3.4	算例分析 .....	162

## 第 8 章 分布式发电与微电网 / 167

8.1	分布式发电系统 .....	167
8.1.1	分布式发电概述 .....	167
8.1.2	分布式光伏发电系统概述 .....	168
8.2	微电网基本概述 .....	169



8.2.1	微电网的定义与应用 .....	169
8.2.2	微电网的拓扑结构 .....	169
8.2.3	微电网的分布式电源 .....	171
8.3	蓄电池储能系统控制 .....	172
8.3.1	蓄电池原理 .....	172
8.3.2	蓄电池数学模型 .....	173
8.3.3	蓄电池充放电控制 .....	173
8.3.4	蓄电池仿真模型 .....	174
8.4	逆变器的控制方法 .....	175
8.4.1	恒功率控制 .....	175
8.4.2	恒压/恒频控制 .....	176
8.4.3	下垂控制 .....	177
8.4.4	内环控制器 .....	178
8.5	微电网工作模式与模式间切换 .....	179
8.5.1	微电网运行模式 .....	179
8.5.2	微电网控制模式 .....	179
8.5.3	平滑切换的研究 .....	182
8.6	微电网设计仿真 .....	187
8.6.1	仿真结构模型 .....	188
8.6.2	微电网控制系统仿真模块 .....	189
8.6.3	光伏并网/孤岛仿真 .....	192
8.6.4	微电网系统仿真结果和分析 .....	192
8.7	微电网平台搭建实例 .....	200
8.7.1	微电网系统设计方案 .....	200
8.7.2	微电网逆变实验 .....	202
8.7.3	微电网实验 .....	203

结束语 / 205

参考文献 / 206

# 第1章

## 绪 论

### 1.1 光伏发电技术研究的意义

#### 1.1.1 光伏发电的发展前景

能源是国民经济发展和人民生活所必需的重要物质基础，也是推动社会经济发展和提高人们生活水平的动力。从原始社会的钻木取火到近代的化石能源以及核能、地热能、潮汐能、风能、太阳能等各种新能源的应用无不闪现着人类的智慧之光。能源的变革往往由社会生产发展的需求所驱动，能源生产和消费的革命又反过来推动社会生产力的飞跃。随着全球工业化的全面发展，各个国家各个行业对能源的需求急剧扩大，能源需求的质与量已经成为衡量一个国家或地区经济发展状况的标准。

然而，随着人类对能源需求的日益增加，化石能源的储量正日趋枯竭。瑞士银行近期发布报告指出，世界已证实石油储量有 1.8 万亿桶，按现有的石油消费水平，世界石油还可开采 46 年，半个世纪以后，地球上的石油、天然气将开采殆尽，200 年后将无煤可采。在中国，这一情况也不容乐观，据统计，2014 年石油消费量达 5.19 亿吨，其中进口原油 3.08 亿吨，对外依存度达到 60%。根据专家预测，到 2020 年，中国石油消费量将突破 7 亿吨，69% 以上将依赖进口。我国煤炭消费量在 2014 年出现本世纪以来的首次下降，降幅约为 2.8%，但消费量仍然达到 35.1 亿吨，超过全球总消费量的 50%。根据中国能源研究会等业界机构的相关研究预测，中国煤炭消费量的峰值将在 2020 年左右到来，天然气的需求量将达到 4000 亿立方米，而全世界的需求量将达到 4 万亿立方米。化石能源在开采、运输和使用过程中都会对空气和人类生存环境造成严重的污染，同时大规模温室气体的排放使得地球表面气温逐年升高。如果全球不控制 CO<sub>2</sub> 排放量，温室效应将使南、北两极的冰山融化，这可能会使海平面上升几米，四分之一的人类生活空间将由此受到极大威胁。

针对以上情况，开发利用可再生能源和各种绿色能源以实现可持续发展已经成为人类社会必须采取的措施。环境保护早已经提到联合国和各级政府的议事日程上来，并规定每年的 6 月 5 日成为世界环境保护日，“世界只有一个地球”“地球是你我共同的家”“让地球充满生机”等环保口号充分反映了全人类的共同心声。

可再生能源主要有水能、太阳能、风能、地热能、生物质能等能源形式，它们最大的特点是具有自我恢复能力。人们在使用过程中，可再生能源可以从自然界中源源不断地得到补充，它们是取之不尽，用之不竭的能源。水能是目前应用最广泛的可再生能源，但是它受地理条件、天气气候的影响很大，利用范围有限。

根据世界各国的可再生能源发展目标和目前的实际进展情况，专家们预测，到2050年，可再生能源占总一次能源的比例约为54%，其中太阳能在一次能源中的比例约为13%~15%，到2100年，可再生能源将占86%，太阳能占67%，其中太阳能发电占64%。

经过学者的研究与论证，人们普遍认为太阳能和风能是解决能源危机和环境污染的最有效和可行的能源类型，是新世纪最重要的能源类型。尤其是太阳能及其光伏发电的应用，它以其独特的优点越来越受到人们的关注：

- ① 太阳能取之不尽、用之不竭，足以供给地球人类使用几十亿年；
- ② 太阳能应用地域广阔，农村、海岛及偏远地区利用价值更高；
- ③ 太阳能清洁，开发利用过程中无污染；
- ④ 太阳能光伏电站勘察设计简单，建设安装周期短；
- ⑤ 太阳能光伏发电没有运动部件，没有噪声，不易损坏，维护简单。

### 1.1.2 国外光伏发电的研究现状及发展

化石能源的有限性和环境保护压力的增加，使世界上许多国家加强了对绿色能源和可再生能源技术研究的支持。光伏发电产业发展的初期主要是依靠各国政府在政策及资金方面的大力扶持，现在它已逐步商业化，进入了一个新的发展阶段。许多大公司的介入，使产业化进程大大加快。自20世纪90年代以来，国外发达国家掀起了发展“屋顶光伏发电系统”的研发高潮，屋顶光伏发电系统不单独占地，将太阳能电池安装在现成的屋顶上，非常适合太阳能能量密度较低的特点，而且其灵活性和经济性都大大优于大型光伏并网发电，有利于普及，有利于战备和能源安全，所以受到了各国的重视。1997年6月，美国前总统克林顿宣布实施“百万个太阳能屋顶计划”，计划到2010年安装100万套太阳能屋顶。其他一些发达国家也都有类似的光伏屋顶发电项目或计划，如荷兰、瑞士、芬兰、奥地利、英国、加拿大等。属于发展中国家的印度也在1997年12月宣布到2020年将建成50万套太阳能屋顶发电系统。

2006年，美国提出“太阳能先导计划”意在降低太阳能光伏发电的成本，使其2015年达到商业化竞争的水平；日本也提出了在2020年达到28GW的光伏发电总量；欧洲光伏协会提出了“setfor2020”规划，规划在2020年让光伏发电做到商业化竞争。

日本在光伏发电与建筑相结合的市场方面已经做了十几年的努力。由于国土面积狭小，日本主要采用光伏屋顶发电系统，即太阳能电池组件和房屋建筑材料形成一体，如“太阳能电池瓦”和“太阳能电池玻璃幕墙”等，这样太阳能电池就可以很容易地被安装在建筑物上，也很容易被建筑公司所接受。2011年“311大地震”以后核电站相继关停，政府对清洁能源高额补贴的推出使得光伏发电得到进一步的迅速发展，发电规模从1000万千瓦猛增到6800万千瓦。

近几年，随着光伏组件价格的下降和建设需求的增加，世界光伏发电产业发展非常迅猛。2014年，全球新增太阳能光伏发电38.7GW，累计安装量达到177GW。2014年累计光伏装机容量约为2008年光伏累计装机容量的10倍，光伏年发电量占全球电力消费总量的

1%。其中 19 个国家的光伏发电量占该国电力消费总量比例超过 1%。光伏发电量占比最高的 3 个国家分别是，意大利占比 7.9%，希腊占比 7.6%，德国占比 7.0%。各国光伏发电占总发电量的百分比如图 1-1 所示。预计今后 10 年光伏组件的生产将以每年增长 20%~30% 甚至更高的递增速度发展，预计到 2050 年左右，太阳能光伏发电将达到世界总发电量 10%~20%，成为人类的基本能源之一。

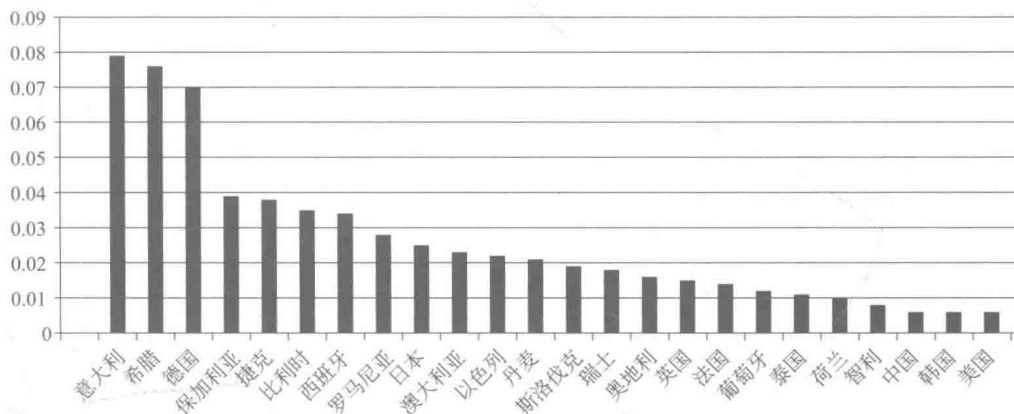


图 1-1 世界各国光伏发电占总发电量的百分比

对于光伏发电技术，当前国际上最新的研发热点主要集中在低成本、高效率的光伏电池板与高效率、高稳定性的逆变设备以及光伏建筑集成应用系统等方面。光伏电池板与逆变设备以及监控管理系统间的最佳配置也是光伏系统研究的关键，它涉及多项技术。美国、德国、荷兰、日本、澳大利亚等国家在光伏屋顶计划的激励下，许多企业和研究机构成功地推出了多种不同的高性能逆变器。

太阳能电池的发电效率在不断提高。图 1-2 是各种材质和类型的光伏电池板发电效率的研发进展，聚光型多结光伏电池的实验室效率达到了 44.7%（四结聚光电池），普通单晶硅光伏电池的发电效率也达到了 25%。

随着技术进步和产量的扩大，光伏发电系统的成本也在不断下降。过去 8 年，光伏组件价格下降 89%，系统价格下降 87%，光伏电价下降 80%。如图 1-3 所示。

光伏逆变装置是光伏发电系统的另一个关键设备，国际上著名的光伏逆变器公司主要有德国的 SMA，美国的 Power-ONE，Emerson，德国的 KACO，REFUsoI，奥地利的 Fronius，德国的 Siemens，丹麦的 Danfoss 等，他们在市场份额、逆变效率、可靠性等方面仍然占据一定优势。

### 1.1.3 我国光伏发电的现状与发展

我国的太阳能资源非常丰富，据统计，太阳能年辐照总量大于 502 万千焦/平方米，年日照时数在 2200 小时以上的地区约占国土面积的 2/3 以上，具体分布见表 1-1。因此，我国具备开发利用太阳能资源的天然有利条件。

近年来，我国的光伏发电产业发展非常迅速。在政策方面，2009 年国家相继推出了《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》、金太阳示范工程等鼓励光伏发电产业发展的政策；2010 年国务院颁布的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》明确提出要“开拓多元化的太阳能光伏光热发电市场”；2011 年国家发改委、国家能源局、国家财政

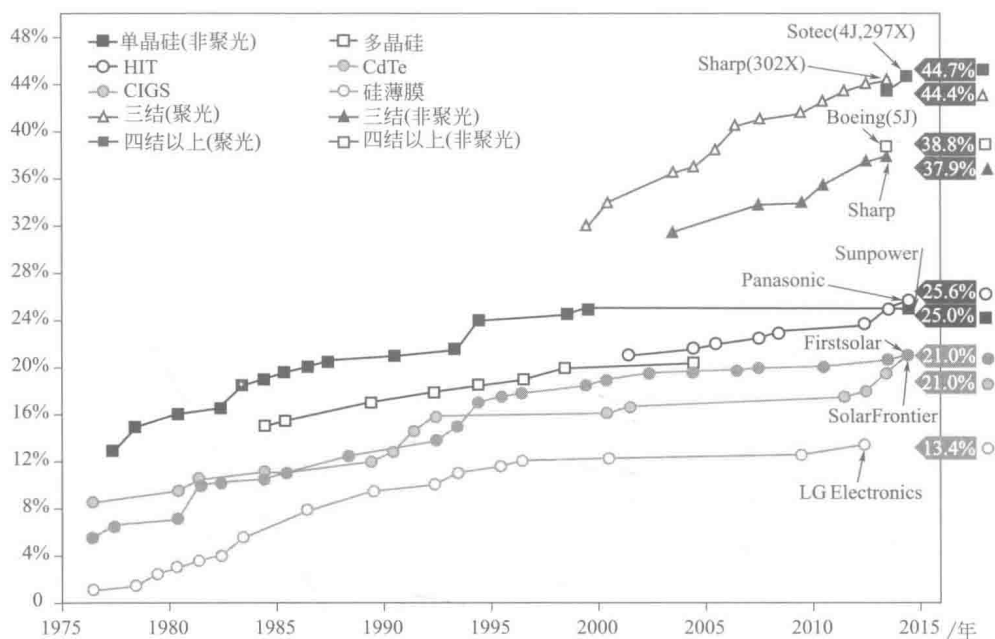


图 1-2 各种材质和类型的光伏电池板发电效率研发进展

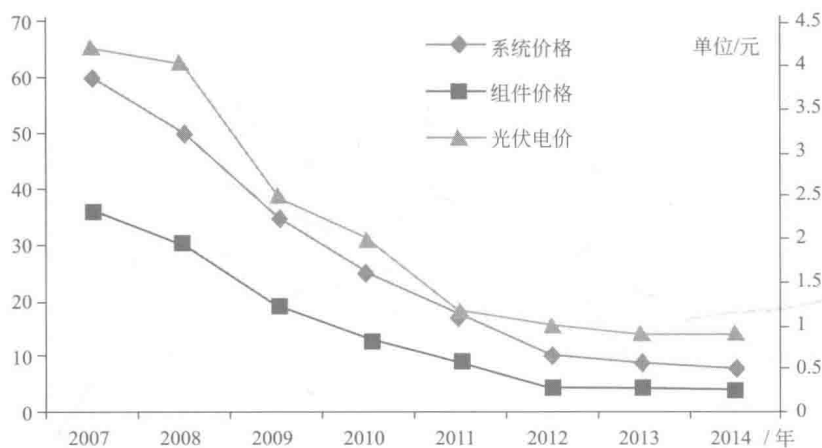


图 1-3 近年来光伏发电系统成本和光伏电价的变化

表 1-1 太阳能年辐射的地区分类

地区分类	全年日照时数/h	太阳年辐射总量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ )	地区
I	3200~3300	6700~8400	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部和西藏西部
II	3000~3200	5900~6700	河北北部、山西北部、内蒙古和宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部
III	2800~3000	5000~5900	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、广东和福建南部、北京
IV	1400~2200	4200~5000	江苏、安徽、湖北、湖南、江西、浙江、广西及广东北部、陕西南部、黑龙江
V	1000~1400	3400~4200	四川、贵州

部相继出台一系列支持、鼓励太阳能光伏发电的政策，鼓励屋顶光伏发电，自发自用，余量上网。这些优惠政策对太阳能光伏发电企业补贴力度较大，例如，家庭屋顶太阳能光伏电站每生产一度电就可以获得国家 0.42 元的补贴，使得普通家庭建设太阳能光伏电站的投资在短期内得到回收。2012 年工业和信息化部制定了《太阳能光伏产业“十二五”发展规划》，并制定了分布式光伏并网便利化措施。当年底，中国首个居民用户分布式光伏电源在青岛实现并网发电，从申请安装到并网发电，整个过程用了 18 天就全部完成。2013 年 7 月 2 日，攀枝花学院 2.1MW 太阳能屋顶光伏发电项目建成投运，该项目是国家示范工程第一批项目，装机容量为 2.1MW，年发电量达  $261.01 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，每年可节约标煤 886t，减少二氧化碳排放量 1933.12t，减少二氧化硫排放量 13.10t。这些范例表明，公共服务领域建设分布式光伏电站具有很强的节能减排效应。

我国分布式光伏发电的渗透率与欧洲日本相比还比较低，尚处于起步状态，但发展速度非常快。截至 2014 年底，我国光伏发电累计装机达到  $2805 \times 10^4 \text{ kW}$ ，当年新增装机  $1060 \times 10^4 \text{ kW}$ ，位居世界第一，如图 1-4 所示。

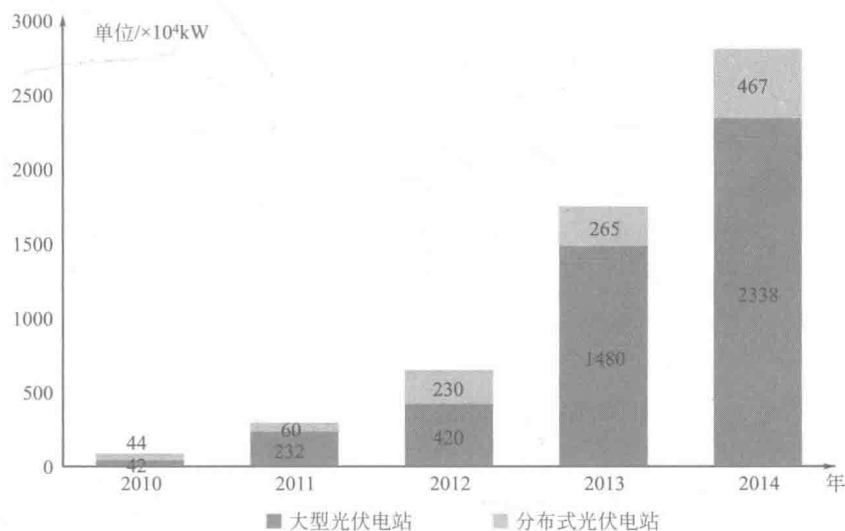


图 1-4 近年来我国光伏发电累计装机容量

技术方面，经过十多年的努力，我国光伏发电技术有了很大的发展，与发达国家相比有差距，但差距在不断缩小。

光伏产业方面，2000 年以后，我国光伏产业进入快速发展期，但整体发展水平仍然落后于国际先进水平，参与国际竞争有一定的难度。2002 年，光明工程项目使市场年销售量猛增到 20MW，光伏系统保有量达到 40MW 左右。当时的光伏发电市场主要是为无电地区供电为主。2003 年，在全球市场的拉动下，我国光伏电池产业开始了跨越式的发展进程。当年，我国太阳能电池产量是 12MW，2004 年为 50MW。而到 2005 年，产量猛增到 139MW，2006 年达到 400MW。2007 年，中国太阳能电池产量达到 1088MW，超过日本 (920MW) 和欧洲 (1062.8MW)，一跃成为世界太阳能电池的第一大生产国。同年，我国光伏组件产量也达到世界第一。2014 年，多晶硅、硅片、电池片与组件产量分别达到 13.2 万吨、38GW、33GW 与 35GW，均保持 25% 以上的增长率，占全球比重均超过 40%，硅片在全球市场占有率达到 73%，我国光伏产业规模全球首位的地位进一步巩固。

## 1.1.4 光伏并网逆变技术的发展

并网逆变器作为光伏电池与电网的接口装置，将光伏电池的电能转换成交流电能并传输到电网上，在光伏并网发电系统中起着至关重要的作用。现代逆变技术为光伏并网发电的发展提供了强有力的技术和理论支持。并网逆变器性能的改进对于提高系统的效率、可靠性，延长寿命、降低成本至关重要。

逆变器技术的发展始终与功率器件及其控制技术的发展紧密结合，从开始发展至今经历了五个阶段。第一阶段：20世纪50~60年代，晶闸管SCR的诞生为正弦波逆变器的发展创造了条件；第二阶段：20世纪70年代，可关断晶闸管GTO及双极型晶体管BJT的问世，使得逆变技术得到发展和应用；第三阶段：20世纪80年代，功率场效应管、绝缘栅型晶体管、MOS控制晶闸管等功率器件的诞生为逆变器向大容量方向发展奠定了基础；第四阶段：20世纪90年代，微电子技术的发展使新近的控制技术如矢量控制技术、多电平变换技术、重复控制、模糊控制等技术在逆变领域得到了较好的应用，极大地促进了逆变器技术的发展；第五阶段：21世纪初，随着电力电子技术、微电子技术和现代控制理论的进步不断改进，逆变技术正朝着高频化、高效率、高功率密度、高可靠性、智能化的方向发展。

包括光伏并网逆变器在内，我国光伏电池发电产业链也比较完善。但与发达国家相比，我国光伏产业在技术上还相差太远。从20世纪80年代起开始对光伏逆变器进行研究和开发，有专门的公司研究和开发生产并网逆变器。由于终端市场启动时间比较晚，国内光伏逆变器厂商普遍规模较小，结构、工艺、做工、转换效率、智能化程度、稳定性等指标与国外一流企业有一定的差距。近年来，在国外光伏市场和国内金太阳示范工程的带动下，以一度占据国内市场超过60%的龙头企业合肥阳光电源公司为代表的一批光伏并网逆变器企业迅速发展起来，并已进入到欧洲市场及国外其他大功率市场。除合肥阳光外，在大功率电站型逆变器市场，主要还有北京科诺科技有限公司、特变电工股份有限公司等企业，这些企业的光伏逆变器技术和产量已经呈现逐年上升趋势。在中小功率组串型逆变器市场，华为公司凭借优势的技术资源和实力后来居上。成本高、交货周期长成为国外厂商进入国内市场的主要障碍，相反成本低，交货期短是国内企业抢占国际市场的优势。未来光伏市场的巨大空间将会给国内企业带来历史机遇。表1-2是国内主要的光伏并网逆变器企业排名情况。

表 1-2 国内光伏并网逆变器企业综合排名

排名	综合排名	电站型逆变器排名	组串型逆变器排名	排名	综合排名	电站型逆变器排名	组串型逆变器排名
1	阳光电源	阳光电源	华为	6	科士达	华为	阳光电源
2	变特电工	变特电工	山亿	7	科诺伟业	科诺伟业	变特电工
3	华为	南车	晶福源	8	正泰	正泰	固德威
4	南车	易事特	古瑞瓦特	9	山亿	高能	易事特
5	易事特	科士达	欧姆尼克	10	高能	山亿	中兴昆腾

## 1.1.5 分布式发电

光伏并网发电系统按其发电方式可分为：

① 集中式并网光伏系统，系统所发电力直接进入电网，但这种方式显然不能发挥太阳能分布广泛、地域广阔等特点。

② 分布式并网光伏系统，即户用型光伏并网系统，它可与建筑物结合形成屋顶光伏系统，通过设计可以降低建筑造价和光伏发电系统的造价。在分布式并网光伏系统中，白天不用的电量可以通过逆变器将这些电能出售给当地的公用电力网，夜晚需要用电时，再从电力网中购回。典型的户用型光伏并网发电系统如图 1-5 所示。

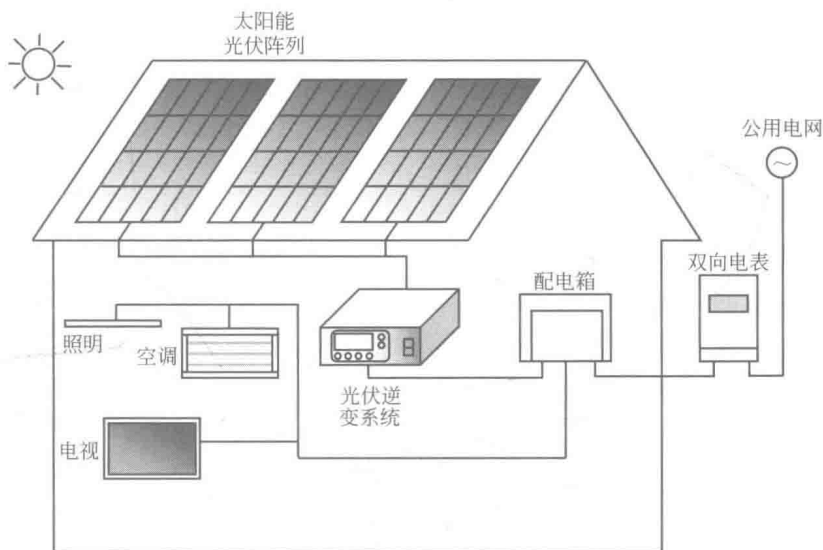


图 1-5 典型的户用型光伏并网发电系统

分布式发电 (Distributed Generation, DG)，又称分散式发电或分布式供能，至今对分布式发电没有统一的定义。一般是指将相对小型的发电装置（一般 50MW 以下）分散布置在用户负荷现场或用户附近的发电/供能方式。现代分布式发电系统除分散与小型化的特征以外，还具有实施热（冷）电联供、环境友好、燃料多元化以及网络化、智能化控制和信息化管理等特点。

不同的专家对分布式发电有不同的描述，但有两点是一致的，即小型与就地布置。按此“定义”，显然我国的“小机组”、“小火电”、“小热电”也可以属于分布式发电的范畴，但与现代分布式发电技术不在同一层面上，由于技术经济性能与环境性能不好，将逐渐被淘汰。由此可见，如果分布式光伏并网发电系统能够普遍地应用到用户家中，不但充分利用了太阳能资源分布广泛的特点，还可以达到改善电网质量、加强电网的调峰能力、抗灾害能力和延伸能力等目的。目前，对于分布式光伏并网发电系统的研究一方面是太阳能电池的研究，使电池每发出一瓦电的造价降低至可以实用的阶段；另一方面就是针对并网发电的逆变系统的研究，如提高系统的效率和稳定性，太阳能电池最大功率点的控制，系统对电网调峰作用等，最后组成分布式电站系统。

通过分布式发电和集中供电系统的配合应用有以下优点：

① 分布式发电系统中各电站相互独立，用户由于可以自行控制，不会发生大规模停电事故，所以安全可靠比较高；

② 分布式发电可以弥补大电网安全稳定性的不足，在意外灾害发生时继续供电，已成为集中供电方式不可缺少的重要补充；



③ 可对区域电力的质量和性能进行实时监控,非常适合向农村、牧区、山区,发展中的中、小城市或商业区的居民供电,可大大减小环保压力;

④ 分布式发电的输配电损耗很低,甚至没有,无需建配电站,可降低或避免附加的输配电成本,同时土建和安装成本低;

⑤ 可以满足特殊场合的需求,如用于重要集会或庆典的(处于热备用状态的)移动分散式发电车;

⑥ 调峰性能好,操作简单,由于参与运行的系统少,启停快速,便于实现全自动。

太阳能光伏发电技术是基于可再生能源的分布式发电技术,它是利用半导体材料的光电效应直接将太阳能转换为电能。光伏发电具有不消耗燃料、不受地域限制、规模灵活、无污染、安全可靠、维护简单等优点。但是此种分布式发电技术的成本非常高,所以现阶段太阳能发电技术还需要进行技术改进,以降低成本而适合于用户的广泛应用。

分布式光伏并网发电系统装置除太阳能电池外,主要有以下几个研究重点及方向:

① 太阳能电池最大功率点跟踪问题,理论方法,控制实现;

② DC/DC 装置的研究,电路拓扑,控制方案;

③ DC/AC 逆变装置的研究,它包括逆变器电路拓扑的选择,相关的控制方式,控制方法的研究,是整个系统研究的核心;

④ 孤岛效应的检测方法和防治策略;

⑤ 双向电能测量装置的研制。

## 1.2 光伏并网逆变技术的研究热点

通常情况下并网逆变器按输出相数分为单相和三相两类,单相并网逆变器输出的功率小,一般不会超过 15kW,因此,适合中小功率并网发电系统,而三相方式则大多应用于大功率能量转换场合。若是按输出功率值来分,主要有微型逆变器、小功率逆变器、中功率逆变器和大功率逆变器这四类。目前技术最为成熟发展最快的是中功率并网逆变器,现已实现广泛应用。微型逆变器和大功率并网逆变器将获得更为广阔的市场前景。微逆变器多用于民用电器充电系统,而大功率光伏并网逆变器由于其具有大容量的电能输出,因此,非常适合光伏电站系统。随着光伏产业的快速发展,大容量、高效率、强可靠性的电网友好型逆变器将成为研究重点。

实现高效率低电流畸变率的逆变器,需要从以下的几个方面进行分析和研究。

### 1.2.1 新型逆变器拓扑结构

光伏并网逆变器根据功率级数可分为单级和两级式结构两种类型。单级式虽然结构简单,但是因为其控制对象多,并且这些对象之间相互耦合,所以造成了设计难度大的复杂情况,通过一个功率环节来实现最大功率点跟踪(MPPT)控制和逆变并网控制,所以效率高。两级式相比单级式效率较低,能够实现 MPPT 与并网单独控制,适用于光伏发电系统。

### 1.2.2 逆变器开关器件的驱动方式

通过控制逆变电路开关器件的通断,输出幅值相等而宽度不相等的连续脉冲的方式称为