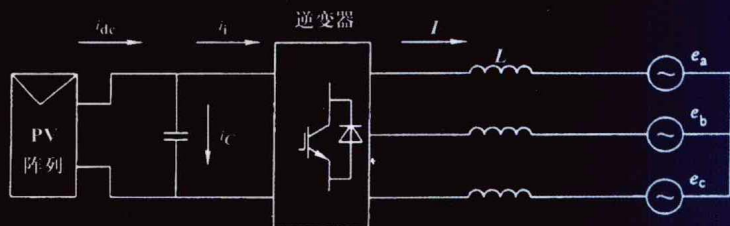


电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



张兴 曹仁贤 等编著

太阳能 光伏并网发电 及其逆变控制

TAIYANGNENG
GUANGFU BINGWANG FADIAN
JIQI NIBIAN KONGZHI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

太阳能光伏并网发电及其 逆变控制

张兴 曹仁贤 等编著

机械工业出版社

本书是编者在长期从事太阳能光伏发电及并网逆变技术研究 with 产业化基础上,通过学习和研究大量国内外相关参考文献编写而成的,是对相关本科教材的深入与完善。本书以“太阳能光伏发电技术”以及“电力电子技术”理论为基础,从光伏并网发电系统与并网逆变控制角度出发,深入浅出地讨论了太阳电池技术、光伏并网系统的体系结构、光伏并网逆变器的电路拓扑、光伏并网逆变器控制策略、最大功率点跟踪技术、并网光伏发电系统的孤岛效应及反孤岛策略、阳光跟踪聚集技术、电能质量问题与对策及相关标准等内容,为光伏并网发电技术的应用与研究提供了理论基础。

本书可为从事光伏并网发电技术以及并网逆变器技术相关研究与应用的工程技术人员提供参考,也可作为高等院校本科生、研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏并网发电及其逆变控制/张兴,曹仁贤等编著. —北京:机械工业出版社,2010.9

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-31800-2

I. ①太… II. ①张…②曹… III. ①太阳能发电-高等学校-教材
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第174421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:孙流芳 责任编辑:罗莉 版式设计:张世琴

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2011年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·23.5印张·458千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-31800-2

定价:58.00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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书 编辑委员会

主任：王兆安

副主任：白继彬 牛新国 徐德鸿 杨 耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈 坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康 勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨 耕	杨 旭	余岳辉	张 波
张承慧	张为佐	张卫平	张 兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周 波	周维维	查晓明

秘书组：陈守良 刘进军 孙流芳 罗 莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。
2. 理论联系实际，以应用技术为主。
3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

众所周知，在追求低碳社会的今天，太阳能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。在各国政府的大力支持下，全球的太阳能光伏产业得到了快速的发展：2006~2009年，全球太阳能光伏电池产量的年均增长率为60%；虽然受到2008年金融危机的影响，但2009年全年的太阳电池产量达到了10431MW，比2008年增长42.5%。世界太阳电池的年增长率已经连续10年超过30%。2009年德国光伏组件安装容量高达3200MW，占全球总安装量的50.4%。除德国、意大利、捷克、法国等欧洲地区国家之外，美国及日本、中国、印度等新兴市场的需求增加，也带动全球市场规模扩大。目前，美国参议院能源委员会已投票通过了美国千万太阳能屋顶计划，即预计从2012年开始，将投资2.5亿美元用于该项计划，2013~2021年，每年将投资5亿美元用于太阳能屋顶计划。该项立法的补助资金可以补贴40GW的新安装容量，加上地面光伏电站、各州联邦政府补贴，美国光伏发电市场总容量必将超过100GW，显然，美国将取代德国成为未来太阳能发电市场的发动机。据光伏发电市场权威研究机构Solarbuzz发布的报告显示，2010年全球光伏发电市场规模将达到15GW，全球将有9个国家光伏发电市场规模超过250MW，其中德国将继续领跑全球光伏发电市场。未来10年，在各国新能源政策的支持下，光伏发电市场将通过降低成本、提高转化效率等手段迅速扩张，各类光伏材料市场也将加快发展，其中欧洲、美国和亚太地区将成为增长核心区。若各国政府像目前一样持续推动太阳能支持计划，至2014年全球的太阳能市场将可望达到30GW规模。

我国太阳能资源非常丰富，理论储量达每年17000亿t标准煤。太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。我国光伏发电产业于20世纪70年代起步，90年代中期进入稳步发展时期。太阳电池及组件产量逐年稳步增加。经过30多年的努力，已迎来了快速发展的新阶段。在“光明工程”先导项目和“送电到乡”工程等国家项目及世界光伏发电市场的有力拉动下，尤其是《可再生能源中长期发展规划》以及“太阳能屋顶计划”、“金太阳工程”的出台，我国的光伏发电产业获得了迅猛发展：2007年我国的太阳电池产量超过欧洲和日本，成为世界第一；2008年全球太阳电池的产量约7GW，同年我国的太阳电池产量约2.6GW，所占份额超过30%；2009年全球太阳电池的产量约10GW，而同年我国产量超过4GW，所占份额超过40%。2009年我国的太阳能市场安装容量为228MW，年增长率高达552%。在我国政府对新能源产业发展的大力推动下，到

2020年,我国光伏产业规模将超过20GW。

由于全球太阳能光伏产业的突飞猛进,太阳能电池的价格已有了较大幅度的下降,即从2008年每瓦3.85美元下跌至2009年的每瓦1.79美元,预估2014年可调整至每瓦1.04美元。随着我国总装机容量达280MW的光伏并网发电特许项目的启动,我国光伏发电市场又进入了新一轮的高速发展期。而根据此前国家初步规划,到2015年光伏发电装机容量要达到5GW,电价水平达1元/kW·h以内,这意味着在未来的5年内,我国的光伏发电市场必将呈现飞跃式的增长!随着扶持政策陆续出台,我国的光伏发电市场也将逐步实现从生产型到消费型的转变。预计到2020年,太阳能光伏发电的电价将达到与燃煤发电同等水平,预计可达到0.6~0.8元/kW·h。

在全球蓬勃发展的太阳能产业中,光伏逆变器市场也不例外,根据全球太阳能市场研究专家IMS Research最新的全球光伏逆变器市场研究报告,2009年是光伏逆变器市场创造纪录的一年,全球光伏逆变器销售量达到8.3GW,销售收入达到28亿美元。2009年欧洲的光伏逆变器销售量首次超过了100万台,同比增长达到35%。这么高的增长主要是由德国的需求驱动的,德国安装了4.2GW逆变器,产生了14亿美元的市场销售额。预测认为:2011年全球光伏逆变器的新装机量将和2010年持平,即销售额可达45亿美元。随着我国政策的推动,预计我国到2020年光伏逆变器总需求量至少达18.6GW,市场规模超过500亿元,而2008年我国光伏逆变器产量约为25MW,市场发展空间巨大。国际巨头从2009年开始集中在国内抢滩布局,国内竞争将日趋激烈。

太阳能光伏发电有离网型和并网型两种工作方式。过去,由于太阳能电池的生产成本居高不下,光伏发电多数被用于偏远的无电地区,而且以户用及村庄用的中小系统居多,都属于离网型用户。但是近年来,光伏发电产业及其市场发生了极大的变化,开始由边远农村地区逐步向城市并网发电、光伏建筑集成以及大型荒漠光伏并网发电的方向快速迈进,太阳能已经全球性地由“补充能源”向下一代“替代能源”过渡。统计资料表明,近几年世界光伏并网发电市场发展迅速,光伏并网发电在光伏行业中的市场比例也从1996年的10%上升到2009年的90%以上。据不完全统计,截止到2009年底,我国建成装机容量超过200kW光伏并网电站项目近20个(总装机容量约为17MW);而未来几年内,我国10MW以上级特大型光伏电站建设计划项目约有30项,其中百兆瓦以上级特大型光伏电站建设计划项目约有12项,总装机容量接近4GW。随着光伏并网发电系统技术的不断完善和经济性的提高,其市场占有率将始终保持在80%以上。

在技术方面,与光伏离网发电系统技术相比,光伏并网发电系统技术相对复杂,其涉及以电力电子技术为核心的并网逆变技术和相关的系统控制与优化等多项技术。光伏并网发电系统产业已经是世界范围内一个蓬勃发展的高新技术产

业，它和光伏组件（主要是太阳电池）同时并列为光伏发电产业的两大支柱。总之，从能源利用的国际发展趋势来看，光伏发电最终将以替代能源的角色进入电力市场，而并网发电将是光伏发电进入电力市场的必由之路。

到目前为止，我国光伏并网发电的关键技术及设备与世界先进水平相比仍有一定差距，国内光伏逆变器厂商普遍规模小，结构工艺、制造水平、性能稳定性等指标跟国外一流水平有一定差距，但占据国内光伏并网逆变器市场份额超过60%的龙头企业合肥阳光电源有限公司已取得长足进步，并开始进军欧洲大功率光伏发电市场，2009年合肥阳光电源有限公司的光伏并网逆变器市场份额已超过全球的3%，并有望在未来几年内突破10%的市场份额。

面对如此巨大的国内外需要，国内诸多高等院校、研究院所以及相关企业已投入了大量的资金和人员积极开展相关研究和产业化工作。在大兴太阳能光伏发电技术的形势下，国内一些学者、专家即时地编写了有关太阳能光伏发电技术的论著，这些论著在推动太阳能光伏发电技术的研究和产业技术进步方面起到了积极作用。然而，这些论著大多从系统层面论述了太阳能光伏发电相关技术，而对并网型太阳能光伏发电以及相关的并网逆变器只作了粗略的介绍。作者自1998年开展光伏并网发电逆变技术的研究，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，与合肥阳光电源有限公司开展了长期的产学研合作，并进行了产品技术研究与示范系统的建设，在此基础上，总结和编写一本较为系统论述并网型太阳能光伏发电及逆变控制技术的技术论著已显得十分必要和迫切。然而，如何能编好一本适用于从事并网型太阳能光伏发电及逆变控制技术的论著对笔者而言一直感到是一件非常困难之事：首先，太阳能光伏发电技术发展日新月异，新内容、新思想、新概念层出不穷，要系统阐述则笔者水平远不能及；其次，论著的主要内容应能体现并网型太阳能光伏发电技术特点，并涉及电力电子技术，既要有一定的深度又要有一定的广度，这对于不同的读者需求不能不说是一件难以两全之事。好在已有多部介绍太阳能光伏发电的论著相继出版，满足了不同的读者需求，本论著的撰写也只起到抛砖引玉，并希望能在得到同行批评指正的同时，共同推进我国并网型太阳能光伏发电及逆变技术的发展。

本书以“太阳能光伏发电技术”以及“电力电子技术”理论为基础，从光伏并网发电系统与并网逆变控制角度出发，深入浅出地讨论了太阳电池技术、光伏并网系统的体系结构、光伏并网逆变器的电路拓扑、光伏并网逆变器控制策略、最大功率点跟踪技术、光伏并网发电系统的孤岛效应及反孤岛策略、阳光跟踪聚集技术、电能质量问题与对策及相关标准简介等内容，为并网型太阳能光伏发电及逆变技术的应用与研究提供了理论基础。

本书由合肥工业大学张兴教授与阳光电源股份有限公司总经理、合肥工业大学兼职博导曹仁贤研究员任主编，合肥工业大学张崇巍教授、国家发展和改革委员会

员会能源研究所王斯成研究员、安徽大学李令冬教授等参编。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4章、第5章、第6章（除6.7.3节外），曹仁贤研究员编写了第3章、第6章的6.7.3节，并和姚丹硕士合作编写了第7章和附录，张崇巍教授编写了第2章、第8章，王斯成研究员编写了第1章，李令冬教授、段小波高工、陈权博士、叶金根硕士合作编写了第9章，全书由张兴教授、曹仁贤研究员统稿。

在本书的编写过程中，得到了合肥工业大学丁明教授、阳光电源股份有限公司赵为博士和屠运武博士的关心与指导，同时也得到了合肥工业大学李维华副教授、杨淑英副教授、谢震副教授和刘芳博士、王付胜博士，以及阳光股份电源有限公司张友权高级工程师、姚丹硕士、陈威硕士、孙龙林硕士的大力协助，他们以读者的视角提出了很多宝贵意见和建议，并提供了大量有价值的参考文献和相关资料。另外，研究生查乐、李飞、谭理华、丁杰、陈欢、王莹、江涛、李善寿、顾军、谢东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，我们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，也得到了清华大学赵争鸣教授、华中科技大学段善旭教授、新疆新能源研究所前所长吕绍勤研究员的支持，在此一并表示诚挚的感谢。

与本书有关的研究工作得到了以下课题的支持：

(1) 新疆维吾尔自治区国际光点援助项目 (GN99050.ZL)：太阳能、风能双向并网逆变装置的研制开发

(2) 新疆维吾尔自治区科技攻关和重点科技项目 (200232114)：新疆清洁能源示范工程——100kW 柔性衬底非晶硅并网发电光伏电站示范

(3) 科技部西部新能源行动专项 (030403B2)：大功率太阳能光伏并网发电系统

(4) 科技部十五科技攻关 (2004BA410A18)：并网光伏发电用系列逆变器的产业化开发

(5) 安徽省科技攻关 (0601202020A)：大型光伏并网发电系统及关键技术

(6) 国家自然科学基金重点项目 (50837001)：分布式发电微网系统运行控制与保护关键技术研究

(7) 国家863高技术基金项目 (2007AA05Z240)：多能互补微型电网的并网、控制和能量管理技术

由于作者水平有限，疏漏甚至谬误在所难免，敬请读者不吝指教。

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 太阳能及其光伏产业 1

1.2 光伏并网发电技术的发展 4

1.2.1 国内外光伏并网发电技术的发展 5

1.2.2 国内外光伏并网发电的激励政策 14

1.2.3 我国光伏发电中长期发展规划 17

1.3 国内外大型光伏发电系统简介 19

1.3.1 Springerville Generating Station (SGS) 大型荒漠光伏电站 19

1.3.2 APS Star Center 调峰电站 21

1.3.3 Prescott 的荒漠电站 24

1.3.4 国外 10MW 以上大型光伏电站 24

1.3.5 我国大型光伏并网电站 (超过 200kW) 现状 26

第 2 章 光伏电池与光伏阵列 29

2.1 光伏电池的物理基础 29

2.1.1 光伏效应的量子物理基础 29

2.1.2 pn 结的形成 33

2.1.3 光生伏特效应 35

2.2 光伏电池的制作 36

2.2.1 单晶硅电池的制作流程 36

2.2.2 光伏电池组件及其封装 38

2.2.3 光伏电池组件的出厂

检测 40

2.3 光伏阵列的建模与工程计算

方法 41

2.3.1 光伏电池的数学模型 41

2.3.2 光伏电池输出特性的工程计算方法 44

2.4 光伏电池的应用设计 47

2.4.1 光伏阵列使用前的测试 47

2.4.2 光伏系统的一般设计方法 48

2.5 光伏电池新技术与新品种 50

2.5.1 新型 pn 结结构 50

2.5.2 多晶硅电池和非晶硅光伏电池 52

2.5.3 非硅材料光伏电池 53

2.5.4 有机光伏电池 54

2.6 第三代光伏电池技术 55

2.7 光伏电池研究的最新成果 57

参考文献 59

第 3 章 光伏并网系统的体系

结构 61

3.1 集中式结构 61

3.2 交流模块式结构 62

3.3 串型结构 63

3.4 多支路结构 64

3.5 主从结构 65

3.6 直流模块式结构 66

3.7 小结 67

参考文献 67

第 4 章 光伏并网逆变器的电路

拓扑 68

4.1 光伏并网逆变器的分类 68

4.1.1 隔离型光伏并网逆变器 结构	68	5.3.2 基于电压定向的直接功率 控制 (V-DPC)	130
4.1.2 非隔离型并网逆变器 结构	69	5.3.3 基于虚拟磁链定向的直接 功率控制 (VF-DPC)	140
4.2 隔离型光伏并网逆变器	70	5.4 基于 <i>LCL</i> 滤波的并网光伏 逆变器控制	146
4.2.1 工频隔离型光伏并网 逆变器	70	5.4.1 概述	146
4.2.2 高频隔离型光伏并网 逆变器	73	5.4.2 无源阻尼法	148
4.3 非隔离型光伏并网逆变器	80	5.4.3 有源阻尼法	152
4.3.1 单级非隔离型光伏并网 逆变器	80	5.4.4 基于 <i>LCL</i> 滤波的并网光伏 逆变器滤波器设计	162
4.3.2 多级非隔离型光伏并网 逆变器	85	5.5 单相并网逆变器的控制	172
4.3.3 非隔离型光伏并网逆变器 问题研究	91	5.5.1 静止坐标系中单相并网 逆变器的控制	173
4.4 多支路光伏并网逆变器	102	5.5.2 同步旋转坐标系中单相并 网逆变器的控制	176
4.4.1 隔离型多支路光伏并网 逆变器	103	参考文献	178
4.4.2 非隔离型多支路光伏并网 逆变器	104	第 6 章 光伏发电的最大功率点 跟踪 (MPPT) 技术	181
4.4.3 非隔离级联型光伏并网 逆变器	106	6.1 概述	181
参考文献	110	6.2 基于输出特性曲线的开环 MPPT 方法	184
第 5 章 光伏并网逆变器控制 策略	113	6.2.1 定电压跟踪法	184
5.1 光伏并网逆变器控制策略 概述	113	6.2.2 短路电流比例系数法	185
5.2 基于电流闭环的矢量控制 策略	116	6.2.3 插值算法	185
5.2.1 同步坐标系下并网逆变器 的数学模型	117	6.3 扰动观测法	187
5.2.2 基于电网电压定向的矢量 控制 (VOC)	119	6.3.1 扰动观测法的基本原理	188
5.2.3 基于虚拟磁链定向的矢量 控制 (VFOC)	121	6.3.2 扰动观测法的振荡与误判 问题	189
5.3 直接功率控制 (DPC)	126	6.3.3 扰动观测法的改进	193
5.3.1 瞬时功率的计算	127	6.4 电导增量法 (INC)	199
		6.4.1 电导增量法的基本原理	200
		6.4.2 电导增量法的振荡与误判 问题	202
		6.4.3 电导增量法的改进	209
		6.5 智能 MPPT 方法	214
		6.5.1 基于模糊理论的 MPPT 控制	214

6.5.2 基于人工神经网络的 MPPT 控制	217	7.3.1 频移法	285
6.5.3 基于智能方法的 MPPT 复合控制	220	7.3.2 基于功率扰动的反孤岛策略	289
6.6 两类基本拓扑结构的 MPPT 控制	223	7.3.3 阻抗测量方案	291
6.6.1 两级式并网光伏逆变器的 MPPT 控制	223	7.4 不可检测区域 (NDZ) 与反孤岛策略的有效性评估	292
6.6.2 单级式并网光伏逆变器的 MPPT 控制	226	7.4.1 基于 $\Delta P \times \Delta Q$ 坐标系孤岛检测的有效性评估	293
6.7 MPPT 的其他问题	229	7.4.2 基于 $L \times C_{\text{norm}}$ 坐标系孤岛检测的有效性评估	298
6.7.1 局部最大功率点问题	229	7.4.3 基于负载特征参数 $Q_r \times f_0$ 坐标系的有效性评估	303
6.7.2 MPPT 的能量损耗	243	7.4.4 基于负载特征参数 $Q_0 \times C_{\text{norm}}$ 坐标系的有效性评估	307
6.7.3 最大功率点跟踪的效率与测试	247	7.4.5 多逆变器并联运行时的孤岛检测分析	314
参考文献	258	参考文献	320
第 7 章 并网光伏发电系统的孤岛效应及反孤岛策略	261	第 8 章 阳光的跟踪与聚集	324
7.1 孤岛效应的基本问题	261	8.1 阳光跟踪与聚集的意义	324
7.1.1 孤岛效应的发生与检测	262	8.1.1 阳光跟踪的意义	324
7.1.2 孤岛效应发生的可能性与危险性	265	8.1.2 阳光聚集的意义	325
7.1.3 并网逆变器发生孤岛效应时的理论分析	269	8.2 阳光跟踪系统的设计	326
7.1.4 孤岛效应的检测标准与研究状况	273	8.2.1 阳光跟踪伺服机构	326
7.1.5 并网光伏系统的反孤岛测试	277	8.2.2 阳光跟踪控制系统	328
7.2 基于并网逆变器的被动式反孤岛策略	279	8.3 阳光聚集系统设计	330
7.2.1 过/欠电压、过/欠频率反孤岛策略	280	8.3.1 聚光光伏电池及其应用中 的技术要求	330
7.2.2 基于相位跳变的反孤岛策略	282	8.3.2 阳光聚集装置	331
7.2.3 基于电压谐波检测的反孤岛策略	283	参考文献	335
7.3 基于并网逆变器的主动式反孤岛策略	284	第 9 章 光伏发电并网的电能质量仿真计算	336
		9.1 概述	336
		9.2 光伏发电等值电路和计算模型	338
		9.2.1 光伏发电并网系统的等值电路	338
		9.2.2 电路功率传输计算	339
		9.2.3 基本计算方程	341

9.3 光伏发电并网系统运行特性 仿真分析	345		
9.3.1 系统运行特性仿真概述	345		
9.3.2 电压稳定性仿真分析	346		
9.3.3 基波功率潮流仿真分析	350		
9.3.4 谐波潮流仿真分析	353		
9.4 配电网接纳光伏发电能力的 讨论	356		
参考文献	359		
附录 光伏并网发电标准简介	360		
A.1 国内标准简介	360		
A.1.1 GB/T 19939—2005 《光伏 系统并网技术要求》	360		
A.1.2 GB/Z 19964—2005 《光伏 发电站接入电力系统技术 规定》	360		
A.1.3 GB/T 20046—2006 《光伏 (PV) 系统电网接口 特性》	361		
A.1.4 GB/T 20514—2006 《光伏 系统功率调节器效率测量 程序》	361		
A.1.5 正在报批中的国内标准	362		
A.2 国外标准简介	362		
A.2.1 IEEE 1547 系列标准	362		
A.2.2 IEEE 929—2000 《IEEE Recommended Practice for UtilityInterface of Photovoltaic (PV) Systems》 用于光伏发电系统的电网 接口设备的 IEEE 推荐 惯例	363		
A.2.3 UL 1741; 2005 《Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources》 用于分布式发电系统的逆变器、 变流器、控制器以及互联 装置的规定	363		
A.2.4 IEC 61683; 1999 《PV system-power conditioners- procedures for measuring efficiency》光伏系统功率 调节器效率测量程序	363		
A.2.5 IEC 61727; 2004 《Photovoltaic (PV) systems-Characteristics of the utility interface》光伏 系统电网接口特性	364		
A.2.6 IEC 62116; 2008 《Testing procedure of islanding prevention measures for power conditions use in grid connected photovoltaic (PV) power generation systems》 分布式电源与电力系统的 接口设备的测试程序	364		
A.2.7 IEC 62109-1; 2007 (Committee Draft) 《SAFETY OF POWER CONVERSION EQUIPMENT FOR USE IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS—PART 1—GENERAL REQUIREMENTS》 光伏发电系统中能量转换 装置的安全 第一部分： 通用要求	364		
A.2.8 IEC 62109-2; 2009 《(Committee Draft) Safety of power converters for use in photovoltaic power systems— Part 2: Particular requirements for inverters》光伏发电系统 中能量转换装置的安全 第二部分：逆变器的特殊 要求	364		

第 1 章 绪 论

1.1 太阳能及其光伏产业

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。地球轨道上的平均太阳辐射强度为 $1367\text{kW}/\text{m}^2$ 。地球赤道的周长为 40000km ，从而可计算出，地球获得的能量可达 173000TW 。在海平面上的标准峰值强度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，地球表面某一点 24h 的年平均辐射强度为 $0.20\text{kW}/\text{m}^2$ ，相当于有 102000TW 的能量，人类依赖这些能量维持生存。太阳是一个巨大、久远、无尽的能源。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量（约为 $3.75 \times 10^{26}\text{W}$ ）的 22 亿分之一，但已高达 173000TW ，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万 t 煤。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳；即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等）从根本上来讲，也是远古以来贮存下来的太阳能，所以广义的太阳能所包括的范围非常大，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳能光伏发电是太阳能利用的一种重要形式，是采用太阳电池将光能转换为电能的发电方式，而且随着技术不断进步，光伏发电有可能是最具发展前景的发电技术之一。太阳电池的基本原理为半导体的光伏效应，即在太阳光照射下产生光电压现象。1954 年美国贝尔实验室首次发明了以 pn 结为基本结构的具有实用价值的晶体硅太阳电池，从此太阳电池首先在太空技术中得到广泛应用，现在开始逐步在地面得到推广应用。

与化石能源、核能、风能和生物质能发电技术相比，光伏发电具有一系列特有的优势，主要可归纳如下：

1) 发电原理具有先进性：即直接从光子到电子转换，没有中间过程（如热能-机械能、机械能-电磁能转换等）和机械运动，发电形式极为简洁。因此，从理论上分析，可得到极高的发电效率，最高可达 80% 以上。由于材料与工艺的限制，实验室研究的单个 pn 结单晶硅电池效率最高已经接近 25%；而多个 pn 结的化合物半导体电池已经超过 40%。从原理分析计算与技术发展潜力来看，通过 10 ~ 20 年的努力，太阳电池转换效率达到 30% ~ 50% 是可以实现的。

2) 太阳能资源的无限和分布特性：太阳能辐射取之不尽、用之不竭，可再生并洁净环保；阳光普照大地，无处不在，无需运输，最重要的是绝无任何国家

实施垄断和控制的可能。

3) 没有资源短缺和耗尽问题：所用的主要硅材料储量丰富，为地壳上除氧之外排列第二的元素，达到 26% 之多。

4) 光伏发电与自然的关系：没有燃烧过程，不排放温室气体和其他废气，不排放废水，环境友好，做到真正的绿色发电。

5) 没有机械旋转部件：不存在机械磨损，无噪声。

6) 建造和拆卸特性：采用模块化结构易于建造安装、拆卸迁移，规模大小随意，而且易于随时扩大发电容量。

7) 使用性能和寿命问题：经数十年应用实践证明：光伏发电性能稳定、可靠，使用寿命长（30 年以上）。

8) 维护管理问题：可实现无人值守，维护成本低。

由于太阳光伏发电目前的成本较高，近期在国内的大规模推广应用还存在一定的困难，但是，从长期来看，随着技术的进步，以及其他能源利用形式的逐渐饱和，到 2050 年前后，太阳能将成为主流能源利用形式，有着不可估量的发展潜能。

太阳光伏发电由于不受能源资源、原材料和应用环境的限制，具有最广阔的发展前景，是各国最着力发展的可再生能源技术之一。欧洲联合研究中心（JRC）对光伏发电的未来发展作出如下预测：2020 年世界太阳能发电的发电量占世界总能源需求的 1%，2050 年占到 20%，2100 年则将超过 50%（见图 1-1）。

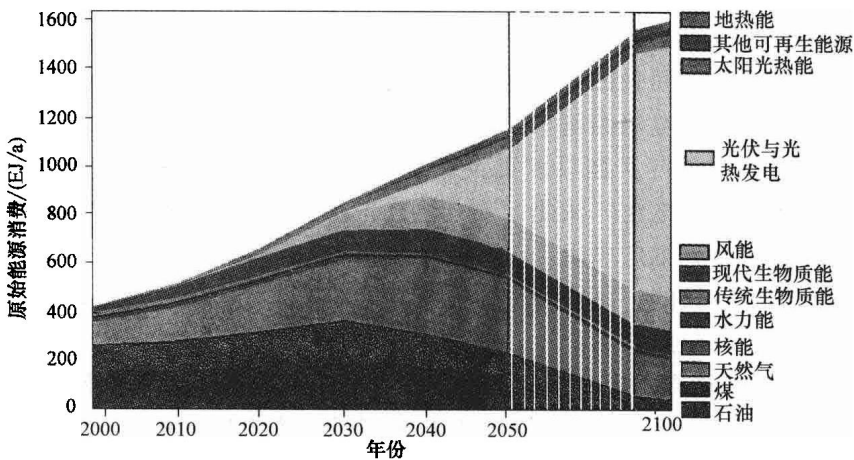


图 1-1 世界能源发展预测

注：取自 EU JRC PV Roadmap 2004。

由此可以得出结论：光伏发电是未来世界能源和电力的主要来源，要坚定不移地发展。

世界光伏产业和市场在严峻的能源形势和人类生态环境（地球变暖）形势

压力下，自 20 世纪 90 年代后半期起进入了快速发展时期，世界太阳能电池产量逐年增长，过去 10 年的平均年增长率达到 38%，超过了信息技术（IT）产业，已经成为世界上发展最快的产业之一。2008 年世界太阳能电池的产量更是高达 7.9GW，比 2007 年增长 98%，世界太阳能电池的年增长率已经连续 10 年超过 30%。2007 年我国的太阳能电池产量超过欧洲和日本，成为世界第一。2008 年我国的太阳能电池产量约为 2.6GW，市场份额超过 30%。2009 年全球太阳能电池的产量约为 10GW，而同年我国产量超过 4GW，市场份额超过 40%。可见，全球和我国的太阳能电池产量保持了高速的增长，如图 1-2、图 1-3 及表 1-1、表 1-2 所示。

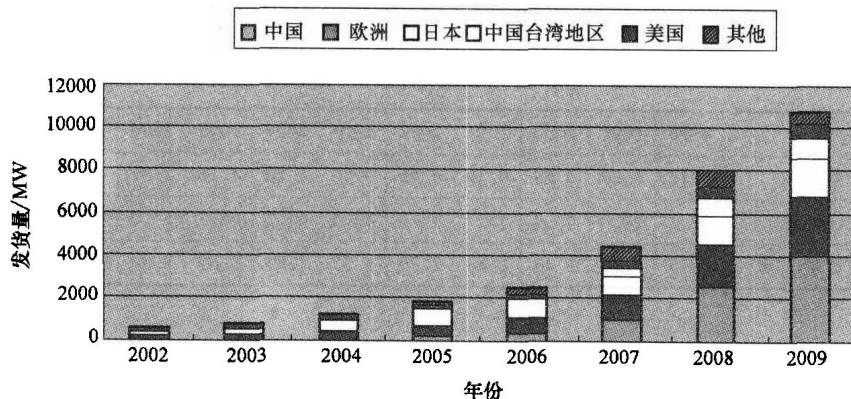


图 1-2 2002 ~ 2009 年世界太阳能电池产量

注：取自 PV News, 2002 ~ 2009。

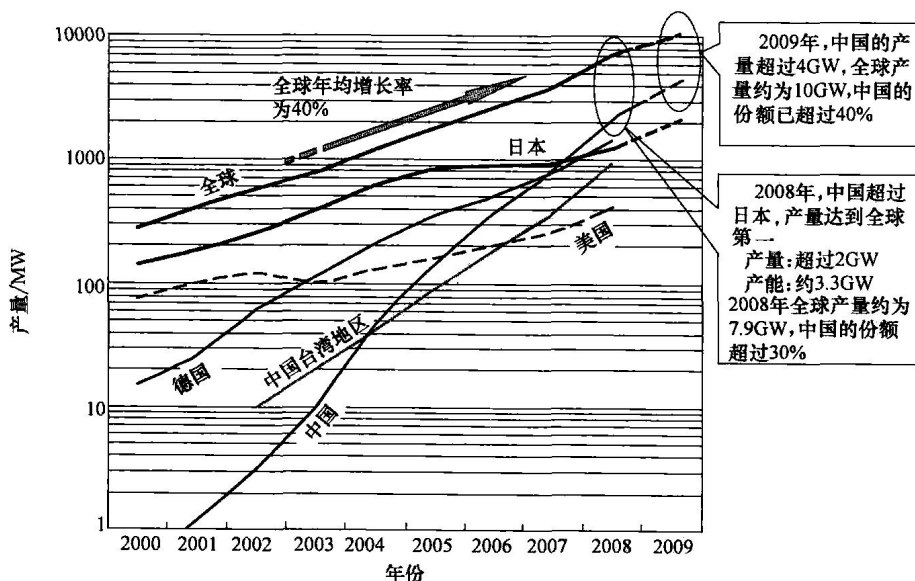


图 1-3 2000 ~ 2009 年世界太阳能电池产量

注：数据来源于 <http://www.globepv.com/a/market/shichangfenxi/2010/0415/1453.html>。

表 1-1 世界太阳电池的历年产量

(单位: MW)

年份	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
中国	10	10	50	200	400	1088.0	2600.0	4000.0
欧洲	135	193.35	314	470	657	1062.8	2000.0	2800.0
日本	251	363.91	602	833	928	920.0	1300.0	1800.0
中国台湾地区						450.0	900.0	1000.0
美国	120	103.2	140	154	202	266.1	432.0	600.0
其他	45	73.8	89	102	314	663.1	668.0	500.0
合计	561	744.26	1195	1759	2500	4000.0	7900.0	10700.0

注: 我国太阳电池的产量已经连续 3 年 (2007、2008、2009) 位居世界第一。

表 1-2 世界太阳电池的历年产量和年增长率

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
年产量/GW	0.16	0.20	0.29	0.39	0.56	0.74	1.20	1.76	2.71	4.37	7.93	10.70
年增长率(%)	23.1	30.0	42.9	35.7	44.0	32.6	61.3	46.7	54.0	61.3	81.5	34.9
累计发货量/GW	0.95	1.15	1.44	1.83	2.39	3.13	4.33	6.09	8.80	13.17	21.10	31.80

1.2 光伏并网发电技术的发展

光伏发电系统可以分为光伏离网发电系统和光伏并网发电系统, 如图 1-4 所示。

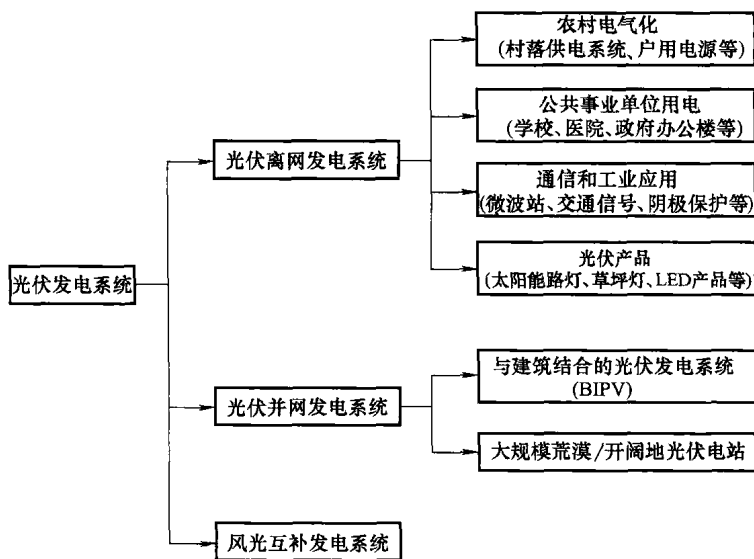


图 1-4 光伏发电应用分类