

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

电力电子新技术系列图书 New Technology Series in Power Electronics

能源革命与绿色发展丛书

第2版

太阳能光伏并网发电及其逆变控制

TAIYANGNENG GUANGFU BINGWANG FADIAN JIQI NIBIAN KONGZHI

◎张兴 曹仁贤 等编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
电力电子新技术系列图书
能源革命与绿色发展丛书

太阳能光伏并网发电及其逆变控制

第 2 版

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与产业化基础上，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、光伏并网系统的低电压穿越及相关标准等内容，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/张兴等编著. —2 版. —北京：机械工业出版社，2018.1

（电力电子新技术系列图书. 能源革命与绿色发展丛书）

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-58551-0

Ⅰ.①太… Ⅱ.①张… Ⅲ.①太阳能发电 Ⅳ.①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 289829 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：罗 莉 责任编辑：罗 莉 责任校对：张 薇

封面设计：马精明 责任印制：孙 炜

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 25.25 印张 · 500 千字

0001—4000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58551-0

定价：79.00 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

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

金 书 网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

第 2 届
电力电子新技术系列图书
编 辑 委 员 会

主　任：徐德鸿

副主任：白继彬　牛新国　康　勇　李崇坚　杨　耕

委　员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬　陈　坚　陈道炼　陈守良　陈治明

高艳霞　郭　宏　郭世明　康　勇　李崇坚

李永东　刘进军　吕征宇　牛新国　潘三博

阮新波　孙流芳　孙玉坤　王旭东　王兆安

肖湘宁　徐德鸿　徐殿国　杨　耕　杨　旭

查晓明　张　波　张　兴　张承慧　张卫平

赵善麒　赵争鸣　钟彦儒　周　波　周雒维

秘书组：陈守良　孙流芳　杨　旭　罗　莉

电力电子新技术系列图书

序言

1974 年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义，电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用，以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术，几乎应用于科技、生产、生活各个领域：电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪，电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用，它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电，已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来，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，电力半导体器件性能不断提高，并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件，新的技术和应用不断涌现，其应用范围也在不断扩展。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。与之相应，从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书，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，促进电力电子技术及应用知识的普及。

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，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：

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。

理论联系实际，以应用技术为主。

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：2009 年开始我国太阳能电池产量基本保持在全球总产量的 40%以上，是全球最大的太阳电池生产国，2014 年全球光伏发电市场规模达到 38.7GW，2015 年已经超过 50GW。2015 年初，世界总光伏装机容量增长到了 200GW，中国、日本和美国成为了当年市场增长最快的国家，其中，中国取代欧洲成为年度安装量增长最快的地区。未来，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，其中亚太地区、美国和欧洲将成为增长核心区。经过分析，各项非化石能源对应的 2020 年和 2030 年发电量目标总和低于《中美气候变化联合声明》中的要求，考虑到风电和光伏的建设周期相对较短，因此用于填补发电量缺口的可能性更大。以 2020 年为例，非化石能源发电量测算缺口 659 亿 kW·h，如果全部用光伏填补缺口，相当于光伏并网从 100GW 增加到 155GW。与其他可再生能源发电相比，光伏发电更清洁，更有优势。由此可见，光伏发电的发展空间仍相当可观，未来发展十分有前景。为了达到“十三五”规划预期的 155GW 新增并网光伏装机容量目标，“十三五”期间，光伏年均新增装机容量至少达到 20GW。

我国太阳能资源非常丰富，理论储量达 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。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，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，份额超过 40%。2009 年我国的太阳能市场安装量为 228MW，年增长率高达 552%。2009 年全球太阳电池的产量约 10GW，我国产量超过 4GW，所占份额

超过 40%。根据产业信息网发布的《2016—2022 年中国太阳能电池产业调研现状及投资咨询战略研究报告》显示，2009～2014 年，我国太阳电池产量逐年上升，其中 2010 年我国太阳电池产量同比增长 117.04%，为近年来最大增幅；2012 年，我国太阳电池产量增幅有所下滑，仅为 14.11%；2013 年我国电池片生产规模进一步扩大，产能为 42GW，产量达到 25.1GW。与 2012 年相比，增长率约为 20%，产量约占全球总产量的 62%，位居全球首位。2014 年我国太阳电池产量 33.5GW，同比增 33.5%。我国占据了全球近 80%的份额。虽然 2014 年我国太阳电池的生产量约占世界产量的 60%，但是光伏市场应用仍然主要集中在欧洲，其次为美国和日本等发达国家，我国的光伏市场应用份额不到 30%，即光伏产业仍未改变出口为主的局面，因此仍然需要进一步扩大国内光伏应用规模。

由于全球太阳能光伏产业的发展突飞猛进，太阳电池的价格已有了较大幅度的下降，即从 2008 年 3.85 美元/W 下跌至 2009 年的 1.79 美元/W，之后每年均持续下跌，至 2015 年太阳电池的价格已跌至为 0.4～0.5 美元/W。随着我国光伏并网发总装机容量在 2014 年达到 26.52GW，我国光伏发电市场又进入了新一轮的高速发展时期。“十二五”期间，我国太阳能发电装机规模增长 168 倍，超越所有可再生能源发展速度，提前半年完成“十二五”规划提出的 35GW 装机目标。在此基础上，根据 2015 年国家能源局下发的《太阳能利用“十三五”发展规划（征求意见稿)》，预计到 2020 年我国光伏装机容量累计将达到 150GW，也就是说，未来 5 年，我国年新增光伏装机容量平均为 20GW，年均复合增长率超过 25%。根据测算，到 2020 年我国可在发电侧实现平价上网。

在全球蓬勃发展的太阳能产业中，光伏逆变器市场也不意外，根据全球太阳能市场 IMS Research 2015 年的全球光逆变器市场研究报告，2014 年是光伏逆变器市场创造纪录的一年，全球光伏逆变器出货量达到 38.7GW，销售收入达到 61.2 亿美元。2008 年我国光伏逆变器出货量仅为 25MW，而 2014 年我国光伏逆变器出货量则达到了 13.3GW，市场销售额为 45.4 亿元，发展速度惊人。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为 18.6GW，市场规模超过 500 亿元，而 2015 年我国光伏逆变器市场规模约为 57.58 亿元，市场发展空间巨大。

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巨大的变化，开始有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 2015 年的 90%以上。在 2015 年初国家能源局下发了《2015 年全国光伏发电年度计划新增并网规模表（讨论稿）》，2015 年度全国光伏年度计划新增并网规模 15GW。2015 年新增并网量同

比增幅将达到50%。据不完全统计，截至2015年年底，我国建成并网的装机容量超过100MW光伏并网电站项目将近60个；而未来几年内，我国还有数十项100MW以上特大型光伏电站建设计划项目。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。根据国家发展和改革委员会能源研究所等机构联合发布的《中国可再生能源发展路线图2050》的预测，到2020年、2030年和2050年，我国光伏发电装机容量将分别达到100GW、400GW和1000GW，届时太阳能将从目前的补充能源过渡为替代能源，并逐步成为我国能源体系的主力能源之一。

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，并且和光伏组件同时并列为光伏发电产业的两大支柱。随着我国光伏产业和应用的快速发展，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差距不断缩小，诸多产品技术已处于世界领先水平。特别是以阳光电源、华为为代表的大型光伏逆变器厂商近年来发展迅速，并使我国在集中型和组串型光伏逆变器技术领域走在了世界前列。这些骨干逆变器企业借助主导产品性价比、质量、品牌的优势，进一步拓展国内外市场，使得公司经营规模和经济效益得以快速增加。其中阳光电源逆变器发货量已经在中国市场超过三成市场份额，在国际市场的地位也越来越高，2015年合肥阳光电源股份有限公司凭借8.2GW的出货量，力压德国SMA公司成为全球光伏逆变器行业出货量排名第一的中国企业，这预示中国光伏逆变器产业在技术方面上了一个新台阶。

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、专家及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的作用。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做了粗略的介绍。作者自1998年开展光伏并网发电逆变器技术的研究，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，与阳关电源股份有限公司开展了长期的科研合作，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论著已显得十分必要迫切。然而，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，一直认为是一件非常困难的事：首先，太阳能光伏发电技术发展日新月异，新内容、新思想、新概念等层出不穷，要系统论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发电技术的特点，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

的事。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，本论著的撰写也只是起到抛砖引玉的作用，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器技术的发展。

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器控制角度出发，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、低电压穿越等内容，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担任主要编写任务，合肥工业大学张崇巍教授、国家发展和改革委员会能源研究所王斯成研究员等参与编写。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，并和姚丹工程师合作编写了第 7 章和附录（光伏并网发电标准简介），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，刘淳博士和清华大学耿华副教授合作编写了第 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，得到了阳光电源股份有限公司赵为博士、屠运武博士、顾亦磊博士、陶磊经理，合肥工业大学丁明教授、苏建徽教授，安徽大学李令冬教授的关心与指导，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、王付胜副教授、刘芳博士、李飞博士以及阳光电源股份有限公司张友权高级工程师和倪华、余勇、陈威、孙龙林、张显立等工程师们的大力协助，他们以读者的视角提出了很多宝贵的意见和建议，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、郝木凯、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。

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。

作　者

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 …… 7
1.2.1　国内外光伏并网发电技术的发展 …… 7
1.2.2　国内外光伏并网发电的激励政策 …… 17
1.2.3　我国光伏发电中长期发展规划 …… 19
1.2.4　光伏发电成本变化趋势及预测 …… 20
1.3　国内外大型光伏发电系统简介 …… 22
1.3.1　Springerville Generating Station（SGS）大型荒漠光伏电站 …… 22
1.3.2　APS Star Center 调峰电站 …… 25
1.3.3　Prescott 的荒漠电站 …… 26
1.3.4　国内外百兆瓦以上大型光伏电站 …… 27
1.3.5　特色光伏电站 …… 29
1.3.6　我国大型光伏电站（100MW 及以上容量） …… 30
第 2 章　光伏电池与光伏阵列 …… 33
2.1　光伏电池的物理基础 …… 33
2.1.1　光伏效应的量子物理基础 …… 33
2.1.2　pn 结的形成 …… 37
2.1.3　光生伏特效应 …… 39
2.2　光伏电池的制作 …… 40
2.2.1　单晶硅电池的制作流程 …… 40
2.2.2　光伏电池组件及其封装 …… 42
2.2.3　光伏电池组件的出厂检测 …… 44
2.3　光伏阵列的建模与工程计算方法 …… 44

2.3.1 光伏电池的数学模型 …… 44
2.3.2 光伏电池输出特性的工程计算方法 …… 48
2.4 光伏电池的应用设计 …… 50
2.4.1 光伏阵列使用前的测试 …… 50
2.4.2 光伏系统的一般设计方法 …… 51
2.5 光伏电池新技术与新品种 …… 53
2.5.1 新型 pn 结结构 …… 53
2.5.2 多晶硅电池和非晶硅电池 …… 55
2.5.3 非硅材料光伏电池 …… 56
2.5.4 有机光伏电池 …… 56
2.6 第三代光伏电池技术 …… 58
2.7 光伏电池研究的最新成果 …… 60
参考文献 …… 63
第 3 章 光伏并网系统的体系结构 …… 65
3.1 集中式结构 …… 65
3.2 交流模块式结构 …… 66
3.3 串型结构 …… 67
3.4 多支路结构 …… 68
3.5 主从结构 …… 69
3.6 直流模块式结构 …… 70
3.7 小结 …… 71
参考文献 …… 71
第 4 章 光伏并网逆变器的电路拓扑 …… 72
4.1 光伏并网逆变器的分类 …… 72
4.1.1 隔离型光伏并网逆变器结构 …… 72
4.1.2 非隔离型并网逆变器结构 …… 73
4.2 隔离型光伏并网逆变器 …… 74
4.2.1 工频隔离型光伏并网逆变器 …… 74
4.2.2 高频隔离型光伏并网逆变器 …… 77
4.3 非隔离型光伏并网逆变器 …… 84
4.3.1 单级非隔离型光伏并网逆变器 …… 84
4.3.2 多级非隔离型光伏并网逆变器 …… 88
4.3.3 非隔离型光伏并网逆变器问题研究 …… 94
4.4 多支路光伏并网逆变器 …… 105
4.4.1 隔离型多支路光伏并网逆变器 …… 105
4.4.2 非隔离型多支路光伏并网逆变器 …… 107

4.4.3　非隔离级联型光伏并网逆变器 …… 108
4.5　微型光伏并网逆变器 …… 112
4.5.1　微型光伏并网逆变器概述 …… 112
4.5.2　微型逆变器的基本拓扑结构 …… 117
4.6　NPC 三电平光伏逆变器 …… 126
4.6.1　NPC 三电平逆变器拓扑结构 …… 126
4.6.2　NPC 三电平逆变器 PWM 调制策略 …… 128
参考文献 …… 135
第 5 章　光伏并网逆变器控制策略 …… 138
5.1　光伏并网逆变器控制策略概述 …… 138
5.2　基于电流闭环的矢量控制策略 …… 141
5.2.1　同步坐标系下并网逆变器的数学模型 …… 142
5.2.2　基于电网电压定向的矢量控制（VOC） …… 143
5.2.3　基于虚拟磁链定向的矢量控制（VFOC） …… 146
5.3　直接功率控制（DPC） …… 151
5.3.1　瞬时功率的计算 …… 152
5.3.2　基于电压定向的直接功率控制（V-DPC） …… 154
5.3.3　基于虚拟磁链定向的直接功率控制（VF-DPC） …… 164
5.4　基于 *LCL* 滤波的并网光伏逆变器控制 …… 170
5.4.1　概述 …… 170
5.4.2　无源阻尼法 …… 172
5.4.3　有源阻尼法 …… 176
5.4.4　基于 *LCL* 滤波的并网光伏逆变器滤波器设计 …… 186
5.5　单相并网逆变器的控制 …… 195
5.5.1　静止坐标系中单相并网逆变器的控制 …… 196
5.5.2　同步旋转坐标系中单相并网逆变器的控制 …… 199
参考文献 …… 201
第 6 章　光伏发电的最大功率点跟踪（MPPT）技术 …… 204
6.1　概述 …… 204
6.2　基于输出特性曲线的开环 MPPT 方法 …… 207
6.2.1　定电压跟踪法 …… 207
6.2.2　短路电流比例系数法 …… 208
6.2.3　插值计算法 …… 208
6.3　扰动观测法 …… 210
6.3.1　扰动观测法的基本原理 …… 211
6.3.2　扰动观测法的振荡与误判问题 …… 213

6.3.3 扰动观测法的改进 …… 215
6.4 电导增量法（INC） …… 222
6.4.1 电导增量法的基本原理 …… 223
6.4.2 电导增量法的振荡与误判问题 …… 225
6.4.3 电导增量法的改进 …… 232
6.5 智能 MPPT 方法 …… 237
6.5.1 基于模糊理论的 MPPT 控制 …… 237
6.5.2 基于人工神经网络的 MPPT 控制 …… 240
6.5.3 基于智能方法的 MPPT 复合控制 …… 242
6.6 两类基本拓扑结构的 MPPT 控制 …… 245
6.6.1 两级式并网光伏逆变器的 MPPT 控制 …… 245
6.6.2 单级式并网光伏逆变器的 MPPT 控制 …… 249
6.7 MPPT 的其他问题 …… 250
6.7.1 局部最大功率点问题 …… 250
6.7.2 MPPT 的能量损耗 …… 264
6.7.3 最大功率点跟踪的效率与测试 …… 268
参考文献 …… 278
第 7 章 并网光伏发电系统的孤岛效应及反孤岛策略 …… 281
7.1 孤岛效应的基本问题 …… 281
7.1.1 孤岛效应的发生与检测 …… 282
7.1.2 孤岛效应发生的可能性与危险性 …… 285
7.1.3 并网逆变器发生孤岛效应时的理论分析 …… 288
7.1.4 孤岛效应的检测标准与研究状况 …… 293
7.1.5 并网光伏系统的反孤岛测试 …… 296
7.2 基于并网逆变器的被动式反孤岛策略 …… 298
7.2.1 过/欠电压、过/欠频率反孤岛策略 …… 299
7.2.2 基于相位跳变的反孤岛策略 …… 301
7.2.3 基于电压谐波检测的反孤岛策略 …… 303
7.3 基于并网逆变器的主动式反孤岛策略 …… 304
7.3.1 频移法 …… 304
7.3.2 基于功率扰动的反孤岛策略 …… 308
7.3.3 阻抗测量方案 …… 310
7.4 不可检测区域（NDZ）与反孤岛策略的有效性评估 …… 311
7.4.1 基于 $\Delta P \times \Delta Q$ 坐标系孤岛检测的有效性评估 …… 312
7.4.2 基于 $L \times C_{\text{norm}}$ 坐标系孤岛检测的有效性评估 …… 317
7.4.3 基于负载特征参数 $Q_{\text{f}} \times f_0$ 坐标系的有效性评估 …… 322

7.4.4　基于负载特征参数 $Q_{f0}\times C_{norm}$ 坐标系的有效性评估 …… 326
7.5　多逆变器并联运行时的孤岛检测分析 …… 332
7.5.1　部分逆变器使用被动式反孤岛方案 …… 333
7.5.2　系统中同时使用主动频移法和滑模频移法 …… 334
7.5.3　系统中同时使用主动频移法和基于正反馈的主动频移法 …… 335
7.5.4　系统中两台并网逆变器均使用基于正反馈的主动频移法 …… 336
7.5.5　系统中两台并网逆变器均使用滑模频移法 …… 337
参考文献 …… 338
第 8 章　阳光的跟踪与聚集 …… 342
8.1　阳光跟踪与聚集的意义 …… 342
8.1.1　阳光跟踪的意义 …… 342
8.1.2　阳光聚集的意义 …… 343
8.2　阳光跟踪系统的设计 …… 344
8.2.1　阳光跟踪伺服机构 …… 344
8.2.2　阳光跟踪控制系统 …… 346
8.3　阳光聚集系统设计 …… 348
8.3.1　聚光光伏电池及其应用中的技术要求 …… 348
8.3.2　阳光聚集装置 …… 349
参考文献 …… 353
第 9 章　光伏并网系统的低电压穿越 …… 354
9.1　电网故障的特征 …… 355
9.1.1　对称跌落故障 …… 356
9.1.2　不对称跌落故障 …… 356
9.2　光伏发电系统并网导则 …… 361
9.2.1　并网导则概述 …… 361
9.2.2　光伏发电系统并网导则 …… 363
9.3　光伏并网系统 LVRT 控制策略 …… 366
9.3.1　光伏并网系统电网故障时动态特性 …… 367
9.3.2　光伏并网系统 LVRT 控制策略 …… 369
9.3.3　光伏并网系统 LVRT 动态仿真 …… 372
9.4　光伏并网系统 LVRT 测试规程 …… 374
9.4.1　新能源并网系统测试规程 …… 374
9.4.2　光伏并网系统 LVRT 测试规程 …… 376
9.4.3　光伏并网系统仿真模型的 LVRT 测试 …… 377
9.5　小结 …… 379
参考文献 …… 379

附录　光伏并网发电标准简介 …… 381
A.1　国内标准简介 …… 381
A.1.1　GB/T 19964—2012 光伏发电站接入电力系统技术规定 …… 381
A.1.2　GB/T 29319—2012 光伏发电系统接入配电网技术规定 …… 382
A.1.3　GB/T 30427—2013 并网光伏发电逆变器技术要求和试验方法 …… 382
A.1.4　CNCA/CTS 0002—2014 光伏并网逆变器中国效率技术条件 …… 382
A.2　国外标准简介 …… 383
A.2.1　IEEE 1547 系列标准 …… 383
A.2.2　UL 1741：2010《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 …… 384
A.2.3　IEC 62109-1：2010（Final Draft）safety of power converters for use in the photovoltaic power systems—Part1：General requirements 光伏发电系统中功率变流器的安全　第一部分：通用要求 …… 385
A.2.4　IEC 62109-2：2011（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 …… 385