新能源应用技术丛书

分布式发电系统中的光伏发电技术

第2版

王立乔 孙孝峰◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源应用技术丛书

分布式发电系统中的光伏发电技术

第 2 版

王立乔　孙孝峰　编著

机械工业出版社

本书从系统的角度对分布式发电系统中的光伏发电技术进行了全面的介绍。全书共分10章。第1~3章主要介绍了光伏发电技术的发展现状、基本原理及电力电子技术；第4~5章主要介绍了直流母线分布式光伏发电系统的网络结构及控制策略、交流母线分布式光伏发电系统的网络结构及逆变器的并网、并联及控制策略等；第6~8章主要介绍了分布式光伏发电系统中的最大功率点跟踪、储能与后备系统及综合管理策略；第9章主要针对光伏产业及分布式发电系统新出现的一些关键问题，比如分布式光伏发电系统的稳定性分析、直接并网光伏发电系统的直流分量及对地漏电流问题和孤岛现象及其检测技术等进行了论述。

本书可作为电气工程、能源工程等相关专业科研人员及从业人员的参考书，也可以作为高等院校相关专业研究生的教材。

图书在版编目（CIP）数据

分布式发电系统中的光伏发电技术/王立乔，孙孝峰编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2014.9

（新能源应用技术丛书）

ISBN 978-7-111-47389-3

Ⅰ.①分… Ⅱ.①王…②孙… Ⅲ.①太阳能发电 Ⅳ.①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第159915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：付承桂 责任编辑：付承桂 责任校对：张 征

封面设计：陈 沛 责任印制：李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014年9月第2版第1次印刷

169mm×239mm·18印张·337千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-47389-3

定价：48.00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	教材网：	http://www.cmpedu.com
销售一部：	（010）68326294	机工官网：	http://www.cmpbook.com
销售二部：	（010）88379649	机工官博：	http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：	（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**	

第 2 版前言

《分布式发电系统中的光伏发电技术》第 1 版出版到现在，已经四年了。这四年间光伏发电和分布式发电系统的研究和应用都取得了重大进展。一方面，太阳电池的能量转换效率大幅度提高，使得光伏发电的成本迅速下降，大规模光伏利用已经成为可能。另一方面，随着能源危机和环境污染日益加重，特别是近几年集中出现的大气和 PM2. 5 污染，使得传统化石能源的使用受到越来越多限制，而以光伏发电技术为代表的清洁可再生能源作为替代能源已经成为必然选择。分布式发电系统作为对主干电力系统的补充，特别是在保障电力系统可靠性、安全性等方面的积极作用也被越来越多地重视。为此，应广大读者的要求，推出了本书的第 2 版。

考虑到四年以来，在光伏发电和分布式发电系统中取得的很多新研究成果，因此本书第 2 版在第 1 版的基础上修改和增补了部分内容。这些内容主要包含单级可升降压光伏逆变器拓扑结构、计及阴影的光伏阵列特性及其最大功率跟踪、光伏发电系统集成以及光伏逆变器漏电流抑制等方面。

本书第 2 版仍由燕山大学王立乔教授和孙孝峰教授编著。第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 5 章和第 9 章的 1、2 节由王立乔完成。第 4 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章的第 3 节由孙孝峰完成。全书由王立乔统稿。在本书的修订过程中，得到了研究生王欣、仇雷、鲍利斌、桑霖霖、吴明高等人的大力协助，在此表示感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中内容不可能做到尽善尽美，难免存在不足和错误之处，热诚希望广大读者批评指正。

王立乔

第 1 版前言

随着化石能源的逐渐枯竭，发展可再生能源已成为解决世界能源问题的必经之路。考虑到能源利用中的环境因素和开发潜力，太阳能、风能成为了诸多可再生能源中最具发展前景的两种能源。因此太阳能光伏发电技术和风能发电技术也日益受到重视和关注。由于可再生能源的分散性、多样性和随机性，分布式发电系统成为可再生能源发电的必然网络结构。光伏发电是分布式发电系统中重要的组成部分。

含有光伏发电的分布式发电系统主要有两种结构。一种是直流母线分布式光伏发电系统。直流母线分布式光伏发电系统的特点是各发电单元、储能设备和用电负载都并联在公共直流母线上。直流母线分布式光伏发电系统可以自成网络、独立运行，也可以与城市主电网并联运行。直流母线分布式光伏发电系统主要用于偏远地区供电，也可用于独立小区供电。对于用电需求很小的用户，仅用光伏阵列和储能设备就可以构成直流母线分布式光伏发电系统，这种系统也可称为独立光伏系统。对于用电需要较大的用户，由于光伏阵列的输出容易受到气候和气象条件的影响，不能实现稳定的功率输出，这时发电系统往往需要与其他小型发电设备（如风力发电设备或柴油发电机）等构成联合发电系统，同时还应配置储能单元（如蓄电池或扬水水泵等）。直流母线分布式光伏发电系统与传统的交流母线发电系统和高压直流输电系统有明显的区别，其控制和管理也有一些独特的特点。含有光伏发电的分布式发电系统的另一种结构就是交流母线分布式光伏发电系统。交流母线分布式光伏发电系统的特点就是各发电单元、用电负载都与主干电网并联。具体的连接方式又有两种：一种是单纯交流母线并网方式，也就是所有发电单元都直接与交流电网并联，有公共的交流母线，无公共的直流母线；另一种是交直流混合母线并网方式，也就是发电单元与公共直流母线并联，直流母线与交流母线间通过并网逆变器连接，这样既有公共的交流母线，也有公共的直流母线。这两种连接方式各有特点，但不论哪种方式，都需要有并网逆变器。因此，并网逆变器的控制成为交流母线分布式光伏发电系统中重要的研究内容。在并网逆变器的研究中，功率调节问题是首先需要注意的。同时，考虑到分布式光伏发电系统的特点，发电单元与本地负载的关系更密切（距离短），这种情况下，各并网逆变器具有并联运行的性质；而分布式发电系统工作在孤岛运行状态时，各并网逆变器就是并联运行。为此，并网逆变器的并联问题也是重要的研究内容。并网逆变器为达到并网标准的技术要求，需要采取各种控制策略，这

也是交流母线分布式发电系统的主要研究内容。

为了更多更有效地应用光伏等可再生能源，了解并掌握光伏最大效率点跟踪技术和能量的存储释放技术成为分布式光伏发电系统中最重要的环节。光伏阵列的输出与气候、气象条件密切相关。为达到充分利用资源的目的，光伏发电系统需要实现最大功率点跟踪控制。光伏发电系统最大功率点跟踪控制的关键点在于最大功率点的搜索。最大功率点的搜索算法层出不穷，以扰动观察法（即所谓爬山法）为基础的各种改进算法就不胜枚举。此外，还有其他一些算法不断涌现。能量储备单元包含储能元件和后备元件。当前，分布式发电及光伏发电系统中最常用的储能元件就是蓄电池。由于光伏阵列输出能量的不稳定性和随机性，使得光伏发电系统中的蓄电池与常规蓄电池的工作状态也会有所不同。因此必须在深入了解蓄电池基本充、放电特性的基础上，设计合理的蓄电池控制策略，以保证发电系统有稳定的能量输出，同时提高蓄电池的使用寿命和效率。超级电容是另一种新型储能元件，其应用与发展得到了广泛的关注。虽然超级电容与蓄电池在光伏发电系统中的角色相似，但不论是其制造原理还是工作特性都与蓄电池有显著区别。因此研究超级电容在分布式发电及光伏发电系统中的应用具有重要的理论意义和实践价值。储能元件只能缓冲光伏阵列多余的能量，为发电系统提供补充能量的能力有限。因此，为了保证分布式发电系统的稳定工作，还应该设置后备单元。燃料电池可以作为一种稳定的后备单元，在系统中配合光伏阵列工作，提供稳定的补充能量，满足负载需求，并且改善系统的动态性能，维持发电系统的安全运行。

分布式发电系统是一种新生事物，在能量管理、稳定性、连接模式等许多方面与常规的集中式发电系统不同，分布式发电系统目前并没有标准的综合管理策略。但作为一个发电系统，分布式发电系统应该具有能量优化调节、生产调度、安全预警及故障诊断等综合管理功能。在这方面虽然有一些成功的应用，但也只是工程个案，这方面的研究必将成为分布式发电系统研究的热点之一。随着光伏发电系统装机容量的不断增加，其他一些关键问题逐渐为人们所关注，比如分布式光伏发电系统的稳定性分析、直接并网光伏发电系统的直流分量及对地漏电流问题和孤岛现象及其检测技术等，这些问题的解决有助于光伏系统的稳定运行与健康发展。基于可再生能源的分布式发电系统与传统发电系统的一个重大区别就是大量电力电子设备的应用。电力电子变流器是分布式发电系统能量优化控制的载体，如最大功率点跟踪控制、并网波形控制等都需要通过电力电子变流器实现。无论是电力电子变流器，还是分布式发电系统中不同层次间的接口，对分布式发电系统的安全稳定运行都起着重要的作用。除了传统的电力电子变流器拓扑结构、调制及控制策略外，适应于可再生能源发电系统特别是光伏发电系统的新型电力电子变流器拓扑结构也不断出现。

分布式发电系统及光伏发电技术是目前发展极为迅速的高新技术，本书试图从系统的角度对其中的关键问题和研究热点进行全面地介绍。本书以光伏发电技术为基础，对分布式发电系统中的电力电子技术、网络拓扑结构、并网逆变器控制、储备单元、综合管理策略及其他热点问题进行了综合性的介绍，内容丰富，覆盖面大。

本书由燕山大学王立乔副教授和孙孝峰教授等编著。第1～3章、第5章和第9章的1、2节由王立乔完成。第4章、第6～8章、第9章的第3节和第10章由孙孝峰完成。全书由王立乔统稿。郭小强博士和研究生姜旭东、齐飞、廉志珍等承担了部分文字录入、计算机绘图等工作。本书的写作得到以下项目的支持资助：国家自然科学基金项目：“基于波形库的电力电子波形控制技术”；国家自然科学基金项目：“基于波形评估的可调载波脉宽调制研究”；国家自然科学基金重点项目：“可再生能源的分布式发电系统能量变换、控制与并网运行研究”；河北省自然科学基金项目：“独立运行微电网能量优化控制研究”。

由于作者水平有限，书中内容不可能做到尽善尽美，难免存在不足和错漏之处，热诚希望广大读者批评指正。

王立乔

目　　录

第 2 版前言
第 1 版前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　分布式发电系统的研究概况 …… 1
1.1.1　分布式发电系统的基本概念 …… 1
1.1.2　分布式发电系统的发展现状 …… 2
1.2　分布式发电系统中的光伏发电技术 …… 3
1.2.1　我国太阳能资源及光伏发展潜力 …… 3
1.2.2　分布式发电系统中光伏发电的关键技术 …… 5
1.3　本书的主要内容 …… 6
第 2 章　光伏发电基础 …… 8
2.1　光伏电池的基本原理和等效电路 …… 8
2.1.1　光伏效应 …… 8
2.1.2　单体光伏电池的等效电路和电量方程 …… 8
2.1.3　光伏电池阵列 …… 10
2.2　光伏电池的数学物理模型和伏安特性曲线 …… 11
2.2.1　光伏电池的数学物理模型 …… 11
2.2.2　光伏电池的伏安特性曲线和填充因数 …… 12
2.3　光伏电池的转换效率及其影响因素 …… 13
2.3.1　光伏电池的转换效率 …… 13
2.3.2　光谱响应 …… 13
2.3.3　光照特性 …… 14
2.3.4　温度特性 …… 15
2.3.5　环境因素对光伏电池数学物理模型的修正 …… 15
2.4　阴影条件下光伏阵列的输出特性 …… 16
2.4.1　热斑现象分析 …… 17
2.4.2　多峰现象分析 …… 18
2.4.3　引起光伏阵列多峰输出特性的因素 …… 19
2.5　光伏电池的分类 …… 22
2.5.1　按结构分类 …… 23
2.5.2　按材料分类 …… 23
2.6　光伏系统的组成 …… 24

2.6.1 独立光伏系统 …… 24
2.6.2 并网光伏系统 …… 25
2.6.3 光伏系统与分布式发电系统 …… 28
第3章 光伏发电技术中的电力电子技术 …… 30
3.1 DC-DC变换电路的拓扑结构及控制策略 …… 30
3.1.1 单象限直接DC-DC变换电路 …… 30
3.1.2 多象限直接DC-DC变换电路 …… 34
3.1.3 隔离型DC-DC变换电路 …… 38
3.1.4 DC-DC变换电路的控制技术 …… 43
3.2 DC-AC变换电路的拓扑结构 …… 46
3.2.1 逆变电路基本结构 …… 47
3.2.2 高频链逆变器 …… 48
3.2.3 多电平逆变器 …… 55
3.2.4 逆变器的串联与并联 …… 61
3.3 逆变器的调制技术 …… 62
3.3.1 SPWM技术 …… 63
3.3.2 空间矢量调制（SVM）技术 …… 72
3.3.3 谐波注入PWM技术 …… 77
3.3.4 优化PWM技术 …… 80
3.3.5 多电平变流器和多重化变流器的PWM技术 …… 89
3.4 并网光伏逆变器拓扑结构的新进展 …… 92
3.4.1 并网光伏逆变器拓扑结构的发展现状 …… 92
3.4.2 *Z*源逆变器 …… 93
3.4.3 组合型逆变器 …… 98
第4章 直流母线分布式光伏发电技术 …… 105
4.1 直流母线分布式光伏发电系统的网络结构 …… 105
4.1.1 微型直流光伏系统 …… 105
4.1.2 独立直流光伏母线供电系统 …… 106
4.1.3 并网混合系统 …… 107
4.2 直流母线分布式光伏发电系统与交流电网的接口 …… 107
4.3 直流母线分布式光伏发电系统的控制方法 …… 108
4.3.1 下垂特性控制 …… 108
4.3.2 电压水平信号法 …… 110
4.3.3 直流母线信号法 …… 111
第5章 交流母线分布式光伏发电技术 …… 113
5.1 交流母线分布式光伏发电系统的网络结构 …… 113
5.2 逆变器并网技术 …… 115
5.2.1 光伏逆变器并网相关的国际标准 …… 115

5.2.2 光伏并网逆变器的交流侧滤波器结构 …… 117
5.2.3 光伏并网逆变器的控制模式 …… 118
5.2.4 分布式光伏并网逆变器的功率调节技术 …… 121
5.3 逆变器并联技术 …… 125
5.3.1 逆变器并联的控制方法 …… 125
5.3.2 逆变器并联的环流及其抑制 …… 131
5.3.3 功率计算方法 …… 135
5.4 逆变器控制策略 …… 138
5.4.1 控制策略概述 …… 138
5.4.2 坐标变换法线性控制 …… 139
5.4.3 非坐标变换法线性控制 …… 145
5.4.4 非线性控制 …… 154
5.4.5 并网逆变器直流侧控制 …… 165
第6章 光伏发电系统的最大功率点跟踪 …… 170
6.1 光伏发电系统最大功率点跟踪技术的基本原理 …… 170
6.2 恒定电压控制 …… 171
6.3 最大功率点跟踪算法 …… 172
6.3.1 扰动观察法 …… 172
6.3.2 三点比较法 …… 175
6.3.3 电导增量法 …… 177
6.3.4 二次插值法 …… 179
6.3.5 自适应模糊控制法 …… 181
6.4 计及阴影的最大功率点跟踪方法 …… 182
6.4.1 传统方法改进的 MPPT 技术 …… 183
6.4.2 添加硬件电路实现的 MPPT 技术 …… 184
6.4.3 智能算法 …… 185
第7章 分布式光伏发电系统的储能后备元件及系统集成 …… 188
7.1 蓄电池储能系统 …… 188
7.1.1 铅酸蓄电池特性分析 …… 189
7.1.2 蓄电池充放电控制方法 …… 191
7.1.3 光伏系统中的充放电技术 …… 194
7.2 超级电容储能系统 …… 196
7.3 燃料电池后备系统 …… 197
7.3.1 燃料电池的基本原理 …… 198
7.3.2 燃料电池的输出特性 …… 198
7.3.3 燃料电池的数学模型 …… 199
7.3.4 燃料电池的控制实现 …… 200
7.4 光伏发电系统集成 …… 202

7.4.1 光伏发电系统集成概况 …… 202
7.4.2 多端口 DC-DC 变换器 …… 204
7.4.3 SST 单元介绍 …… 213
第 8 章 分布式发电系统的综合管理 …… 217
8.1 直流母线分布式发电系统的能量优化管理 …… 217
8.1.1 DBS 能量优化管理 …… 217
8.1.2 变换器控制结构 …… 218
8.1.3 控制实现 …… 220
8.2 含光伏直流微电网系统综合管理 …… 221
8.2.1 系统控制 …… 223
8.2.2 独立运行模式与模式切换 …… 224
8.2.3 变流器单元控制 …… 225
8.3 直流混合网络能量的优化管理 …… 227
8.3.1 数据中心电力系统能量优化管理 …… 227
8.3.2 中心直流微电网的操作方式 …… 229
8.3.3 自适应控制系统的设计 …… 232
第 9 章 分布式光伏发电系统的其他关键技术 …… 235
9.1 光伏并网逆变器的直流分量及共模漏电流问题 …… 235
9.1.1 直流分量注入的危害、成因及其解决方法 …… 235
9.1.2 共模漏电流的危害、成因及其解决方法 …… 240
9.2 孤岛效应及其检测技术 …… 248
9.2.1 并网逆变系统孤岛检测分析 …… 249
9.2.2 无源检测方法 …… 250
9.2.3 有源检测方法 …… 253
9.2.4 混合孤岛检测方法 …… 256
9.3 分布式发电系统的稳定性分析 …… 260
9.3.1 阻抗分析研究 …… 261
9.3.2 影响阻抗的因素 …… 262
9.3.3 系统稳定性测量 …… 265
参考文献 …… 268

第1章 绪 论

能源是人类生产、生活的物质基础，能源的利用推动了社会经济的进步和人民生活水平的提高。传统的能源结构以化石燃料为主。随着经济的迅猛发展，化石燃料的储量日益萎缩，面临枯竭的危险。有报告预测，现有的石油和天然气储量将在50年内耗尽，煤的使用也只能维持120年。同时，化石燃料也对环境质量产生了重要影响，是环境污染和气候恶化的元凶。

伴随着我国经济和社会的持续发展，我国能源发展也面临能源供需缺口的加大、石油后备资源不足、环境污染严重等问题。为了实现能源与社会经济、环境的可持续发展，除了积极实现常规能源的高效化、优质化利用，提高能源利用效率外，还应对环境不产生或很少产生危害的新能源和可再生能源进行大规模的利用。新能源与可再生能源既是近期重要的补充能源，又是未来能源结构的基础。开发利用太阳能、风能、地热能、海洋能等可再生能源是解决能源危机的重要途径之一。

由于可再生能源的分散性、多样性和随机性，分布式发电系统成为可再生能源发电的必然网络结构，尤其是对于单机容量较低的光伏发电系统。基于可再生能源的分布式发电系统是国民经济可持续发展战略和环境保护战略的重要组成部分。

1.1 分布式发电系统的研究概况

1.1.1 分布式发电系统的基本概念

分布式发电（Distributed Generation，DG）作为电力行业的第二次物质革命展现在世人面前。应该说，目前国内外对分布式发电的具体含义仍没有准确的定义，甚至各国的叫法也大不相同：在英国，称为嵌入式发电（Embedded Generation）；在北美，称为分散式发电（Dispersed Generation）；在欧洲和亚洲的部分国家，叫做非集中式发电（Decentralized Generation）。

就一般而言，分布式发电是指发电功率在数千瓦至几十兆瓦的小型模块化、分散式、布置在用户附近的高效、可靠的发电单元。分布式发电可以用来满足电力系统和用户特定的要求，如调峰、为边远用户或商业区和居民区供电，其特点是电力就地产生、就地消化，也可与大电网并网运行，具有节省输变电投资、易

于实现电网安全经济高效优质运行等优点。

分布式发电系统电源位置灵活、分散的特点极好地适应了分散的电力需求和资源分布，延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资，同时它与大电网互为备用，也使供电可靠性得以改善。目前，欧美等发达国家已开始广泛研究能源多样化的、高效的和经济的分布式发电系统。无疑，分布式发电系统将成为未来大型电网的有力补充和有效支撑。

分布式发电系统与电力系统之间存在如下的四种方式：方式1为分布式发电系统独立运行向附近的用户供电；方式2是分布式发电系统独立运行，但在分布式发电系统与当地电网之间有自动转换装置；方式3是分布式发电系统与电网系统并联运行，但分布式发电系统对当地电网无电能输出；方式4为分布式发电系统与电网系统并联运行，且向当地电网输出电能。不同的运行方式具有不同的特点。

分布式发电从系统观点看问题，将发电机、负载、储能装置及控制装置等结合，形成一个单一可控的单元，同时向用户供给电能。分布式发电方式中的电源多为微电源，即含有电力电子接口的小型发电设备，包括风力发电机、微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池（也称太阳电池）以及超级电容、飞轮、蓄电池等储能装置。它们接在用户侧，具有低成本、低电压、低污染等特点。分布式发电方式中的微电源既可与大电网联网运行，也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。在接入问题上，入网标准只针对其与大电网的公共连接点（PCC），而不针对各个具体的微电源。这不仅解决了分散电源的大规模接入问题，充分发挥了分散电源的各项优势，还为用户带来了其他多方面的效益。

由分布式供能的结构分析可看出，如此灵活的运行方式与高质量的供电服务离不开完善的控制系统。控制问题也正是分布式供能研究中的一个难点问题。其中一个基本的技术难点在于如果微电源数量太多，很难要求一个中心控制点对整个系统做出快速响应并进行相应控制，往往一旦系统中某一控制元器件故障或软件出错，就可能导致整个系统瘫痪。因此，分布式供能的控制应该做到能够基于本地信息对网络中的事件做出自主响应，例如，对于电压跌落、故障、停电等，发电机应当利用本地信息自动转换到独立运行方式，而不是像传统方式中由电网调度统一协调。具体来讲，分布式供能的控制应当保证：任何一个微电源的接入不对系统造成影响，自主选择运行点，平滑地与电网并列、分离，对有功、无功进行独立控制，具有校正电压跌落和系统不平衡的能力。

1.1.2 分布式发电系统的发展现状

随着我国经济建设的飞速发展，我国集中式供电网规模迅速膨胀。这种发展所带来的安全性问题不容忽视，2008年初雪灾中出现的电力系统事故充分暴露

了集中式供电网潜在的安全隐患。另外，由于各地经济发展不平衡，对于广大经济欠发达的农村地区来说，特别是农牧地区和偏远山区，要形成一定规模的、强大的集中式供配电网需要巨额的投资和较长的时间周期。因此，能源供应严重制约着这些地区的经济发展，而分布式发电技术则刚好可以弥补集中式发电的这些局限性。在我国西北部广大农村地区风力资源十分丰富，风力发电应用速度迅猛，除自用外，还可送往其他地区，这种无污染的绿色能源还可以减轻当地的环境污染。分布式发电系统中的可再生能源除风力发电外，太阳能光伏电池、中小型水力发电等都是解决我国偏远地区缺电的良好方法。在我国城镇，分布式发电技术作为集中供电方式技术不可缺少的重要补充，将成为我国未来能源领域的一个重要发展方向。

就全世界范围来看，能源利用效率越高、环境保护越好的国家，对于发展分布式发电技术的推广应用就越热衷，鼓励支持政策越明确。全球范围内，已安装的兆瓦级分布式发电装置超过300万台，并且每年以超过80000MW的速度递增。美国电力科学研究院研究表明，至2010年，全球25%的电能由小于2MW的DG装置提供，并且DG所占市场份额将达到20%。欧盟发展委员会也提出到2010年，欧盟发电量中“热电联产”所占的比例将由目前的9%增加到18%。印度到2012年利用再生能源发电比例也将超过10%。与欧洲国家相比，在美国辐射状电网的应用很广泛，这给技术上提出了挑战。这种辐射电网并不适合电力潮流的反向流动，特别是对小型输电单位，很难处理分布式发电入网问题。当有大量分布式发电上网时，需要有高额投资来升级配电网。

1.2 分布式发电系统中的光伏发电技术

1.2.1 我国太阳能资源及光伏发展潜力

太阳能是最重要的可再生能源之一，光伏发电技术也是分布式发电系统中不可或缺的重要组成部分。我国是太阳能资源丰富的国家，因此光伏发电技术在我国有着广阔的市场前景。

太阳能光伏发电系统在不同的地区有不同的利用形式。总的来说，有以下三种：①在荒漠地区，可以构建大型光伏电站；②在发展较好的地区，可以发展太阳能光伏建筑；③在偏远地区，可以构建独立光伏微电网。

1.2.1.1 荒漠光伏电站

我国沙漠和沙漠化土地主要分布于内蒙古和新疆地区，沙漠面积约为85万km^2，其中主要有塔克拉玛干沙漠（面积为33.76万km^2），古尔班通古特沙漠（面积为4.88万km^2），巴丹吉林沙漠（面积为4.43万km^2），柴达木盆地沙漠（面积

为3.49万km^2）、腾格里沙漠（面积为4.27万km^2）和库布齐沙漠（面积为1.61万km^2）等。这些荒漠地区年总辐射量超过1600kW·h/m^2。平均下来，1km^2可实现100MWp的产能（Wp是太阳电池输出功率单位，是标准太阳光照条件下，即欧洲委员会定义的101标准，在辐射强度为1000W/m^2，大气质量为AM1.5，电池温度为25℃条件下，太阳电池的输出功率）。照此推算，1000km^2安装荒漠光伏电站可达到100GWp，而这只占我国荒漠地区总面积的0.1%。可见，我国发展超大规模荒漠电站的潜力非常大。

荒漠光伏电站已经成为我国能源发展战略中非常重要的部分。我国规划在2010年以前建立2或3座10~20MWp的荒漠先导示范电站，总装机容量达到30MWp，以实验其技术和经济的可行性。2010~2020年正式启动我国开阔地（荒漠）光伏电站计划，争取2010~2020年新增光伏电站装机容量达到11970MWp，到2020年底累计开阔地（荒漠）光伏电站装机容量达到12GWp。

从目前我国的国力和政策看，荒漠光伏电站应靠近主干电网（最好在50km以内），以减少新增输电线路的投资。主干电网具有足够的承载能力，在不改造的情况下，有能力输送光伏电站的电力。还应靠近距离用电负荷中心在100km以内，以减少输电损耗；如果附近没有用电负荷中心，则最好有大型水电站，可以将光伏电站的电力通过抽水蓄能进行转换。

1.2.1.2 太阳能光伏建筑

太阳能光伏发电在发达地区推广利用的最佳形式就是与公共电网并网，并且与建筑结合，即光伏建筑一体化。光伏发电系统与建筑结合的早期形式主要就是所谓的“屋顶计划”，这是德国率先提出的方案并进行具体实施。目前，光伏建筑已经从单纯地将光伏组件安装在屋顶上，发展成为将光伏组件作为建筑材料的一部分。现在通常将光伏组件构造成平板状结构，经过特殊设计和加工满足建筑材料的基本要求。

我国房屋总建筑面积已经达到400亿m^2（城市：81亿m^2，屋顶面积约为8亿m^2；农村：160亿m^2，屋顶面积约为32亿m^2）。若在上述面积的1/5上安装光伏发电，总安装容量可达到80GWp（约占2004年我国电力总量的1/5，年发电量约120TW·h，占全国总发电量的7.3%）。国家规划到2010年累计安装50MWp，到2020年达到1GWp。目前，已经完成MWp级电站3座。

1.2.1.3 偏远地区独立光伏微电网

偏远地区远离城市电网，可构建独立光伏微电网。我国还有大约28000个村庄、700万户、3000万人口无电。这些无电人口大都分布在我国西部地区和一些海岛，其中一些无电村庄使用柴油发电机发电，每日供电2~3h。有些连柴油发电机也没有，只能点酥油灯、煤油灯和蜡烛照明。这些无电地区有很丰富的太阳能资源，光伏发电在这样的地区有广阔的市场前景。

如果每个无电村按照10kWp，每个无电户按照400Wp规划，再考虑到已建电站的扩容，则潜在市场大约是3000MWp。按规划，2010年以前争取全部解决西部50户以上的无电村和15%的散居无电户的用电问题，新增光伏发电量为265MWp，累计用于农村电气化的太阳电池达到300MWp。

考虑到光伏发电的低能量密度和随机性，光伏发电系统对边远地区供电，当容量较小时需配以储能单元才能独立运行，或者是几种能源组成联合发电系统，如风/光联合发电系统、光伏/小型水电站联合发电系统等。

1.2.2 分布式发电系统中光伏发电的关键技术

对于以上各种光伏发电结构，不论是需要与主干电网并联运行的荒漠电站和光伏一体建筑，还是与储能设备和其他能源联合发电的独立光伏电网，都具有分布式发电的特点。

在分布式发电系统中，与光伏发电相关的关键技术和研究热点有：

1. 适应光伏发电的电力电子变换器

目前常用的并网光伏逆变器大多采用DC-DC-AC的双级结构。这是因为光伏阵列提供的直流电压普遍低于要求的交流输出电压，而DC-AC变换电路中，应用最广泛的全桥逆变器和半桥逆变器均属于Buck型，瞬时输出电压总低于输入电压，只能实现降压变换。为此，一般在桥式逆变电路前增加一级可升压变换的DC-DC变换器，将输入直流电压升高。并且，由于光伏阵列的直流电压典型值比交流电压峰值低很多，DC-DC变换器应具有高的电压增益。可以用有高频隔离的间接DC-DC变换器达到上述要求，这也同时可以满足电气隔离要求。当然，也可以在桥式逆变电路后增加工频升压变压器，在提供电气隔离的同时，提高电压等级。双级结构的光伏并网逆变器虽然能够灵活适应各种输入输出电压指标，还具有更高的自由度等级（即有更多的可控变量），可同时实现多种功能（例如电气隔离、最大功率点跟踪、无功功率补偿、有源滤波等），但功率级的数量增多，将降低整体的效率、可靠性和简洁程度，增加系统开销。为此，目前逆变器研究的一大发展趋势，就是直接将多功率级的系统架构整合为单级系统，即所谓单级逆变器。

储能元件是光伏系统重要的组成部分。针对各种储能元件的特点，找到合适的电力电子变换器结构，也是光伏发电中重要的研究热点。

研究适应光伏发电的电力电子变换器的重点是使光伏系统在整个工作范围内均能实现高效率、高功率密度和高可靠性的运行。

2. 网络拓扑结构及其优化配置

由于包括太阳能在内的可再生能源的能量密度低、随机性强，所以由其构成的分布式发电系统的网络拓扑结构与传统的集中式发电系统的网络拓扑结构有显

著的区别。此时，应根据对当地可再生能源的分布预测、随机性与可用性评估和负荷水平评估，提出基于可再生能源的分布式发电系统的网络拓扑；研究分布式发电系统中母线电压的形式（交流或直流）、大小、频率（对于交流形式）等物理量的选择方法；提出该分布式发电系统中对太阳能光伏发电单元、风力发电单元、多元复合储能单元（含飞轮、超级电容和蓄电池）的容量配置方法，以降低系统成本；研究分布式发电系统中各种电力电子变换器的配置及其输入输出电压、功率等级的选择。

3. 分布式发电系统并网控制

由于分布式发电系统具有多能量来源、多变流器（主要是逆变器）并网的特点，因此必须对其并网控制进行研究。这方面包括针对具有多能源多并网逆变器的分布式发电系统，研究其并网运行时相互耦合影响的机理和并网协调控制问题；研究独立运行时多个逆变器的电压和频率的协调控制，以实现动态和稳态负荷的合理分配；研究合适的并网、独立控制模式和协调一致的切换控制策略；研究柔性并网、暂态过程以及分布式发电系统对电网或本地负荷的冲击影响等问题；针对具有多能源多并网逆变器的分布式发电系统的特点，开展适合并网逆变器的无盲区孤岛检测方法和防伪孤岛技术研究。

4. 分布式发电系统的能量管理

针对分布式能源（DR）的随机性、分布式发电单元的投切、负载变化、敏感负载对供电可靠性和电能质量高要求、分布式发电系统附近配电线路拥塞、分布式发电系统与电网之间的供购电计划等问题，应研究分布式发电系统各种运行方式下分布式发电单元、储能单元与负载之间的能量优化，满足经济运行的要求；针对分布式发电系统并网和故障解列时的能量变化，应研究分布式发电系统运行方式变化时的能量调度策略，满足分布式发电系统运行方式切换的要求。

5. 光伏发电系统的安全性和可靠性问题

在分布式发电系统的相关并网规范中，对各发电单元的端口特性提出了具体的要求。为此，需要分析分布式发电系统的稳态及动态特性，包括不同分布式发电单元以及分布式发电系统并网端口特性，稳态情况下主要包括：有功功率、无功功率、电压、频率和谐波等特性。考虑到分布式发电高度随机性，还要研究这些特性随时间变化的规律。具体到光伏发电系统，目前遇到的安全性和可靠性问题包含以下几个方面：并网逆变器的直流分量注入问题、光伏并网单元的对地漏电流问题和孤岛及其检测技术问题。

1.3 本书的主要内容

光伏发电技术虽然起源很早，但真正得到发展不过是近十几年的事情，尤其