

光伏并网技术 及其应用

国网河南省电力公司经济技术研究院 组 编
王 璟 主 编
杨红旗 田春笋 副主编

GUANG
BING
JISHU
JIQI
YINGYONG



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

光伏并网技术 及其应用

国网河南省电力公司经济技术研究院

组 编

王 璟

主 编

杨红旗

田春笋

副主编

李秋燕

王利利

张 林

李小明

秦开明

李 鹏

李 锰

编 写

蒋小亮

李 科

郭 勇

全少理

李 璞

罗德俊

孙义豪

主 审

丁 岩

关朝杰

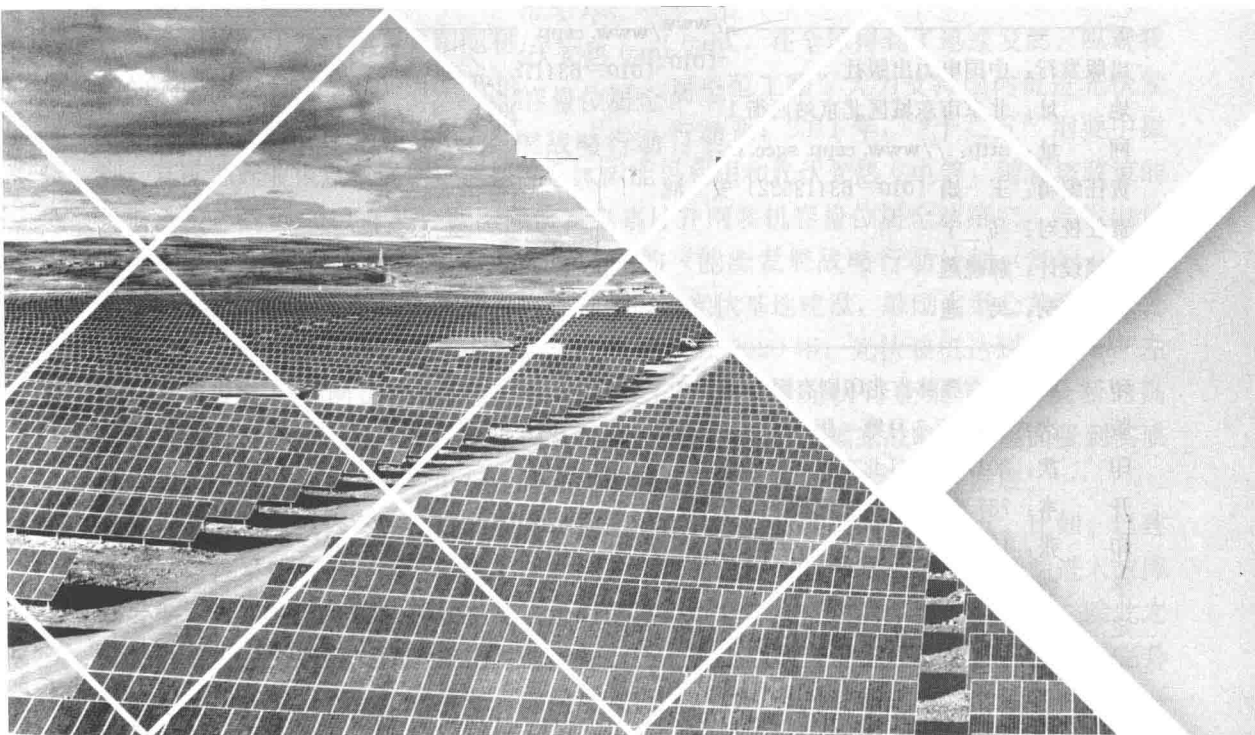
杨 卓

郭 璞

陈江涛

胡 钊

主 审



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面、系统地论述了光伏并网技术及应用的相关内容。

全书共分 11 章,内容包括光伏并网意义及发展现状、光伏市场、光伏并网系统、光伏并网系统建模、光伏并网接入方式、光伏并网系统无功补偿装置、光伏并网逆变器无功与电压控制及稳定性分析、光伏并网对配电网的影响、对光伏并网影响的综合评价、河南某区域电网光伏接入方案综合评价、光伏发电项目综合效益评价。

本书叙述清晰、层次分明、通俗易懂,可供从事新能源发电与并网相关工作的技术人员学习参考,也可作为分布式光伏发电学习与研究用书,还可作为高等院校电气工程及其自动化和相关专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

光伏并网技术及其应用/王璟主编;国网河南省电力公司经济技术研究院组编. —北京:中国电力出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5123-9803-0

I. ①光… II. ①王… ②国… III. ①光伏电站—研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 226824 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王 娟 (010-63412522) 安 鸿

责任校对: 马 宁

装帧设计: 郝晓燕

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 7 月第一版

印 次: 2017 年 7 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 10.75

字 数: 235 千字

定 价: 35.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

近年来,我国部分地区频频出现雾霾天气,大气污染问题逐渐引起人们的广泛关注。与此同时,面对全球气候变暖的问题,2015年巴黎气候大会凝聚了各方共识,推动各国积极参与节能减排。

随着我国电力工业的迅速发展,不合理、不科学的电源结构阻碍了我国电力工业的可持续发展。中国长期以煤为主的能源生产结构和消费结构决定了以煤电为主导的电源结构,这种结构虽然曾对国家经济发展起到了重要的支撑作用,但也产生了严重的负面影响。煤炭在开采和使用的过程中会排放大量的二氧化碳、烟尘、有害气体和灰渣,是造成全球气候问题和大气污染问题的重要因素之一。这种不合理的能源结构使得我国电力发展与环境保护方面的矛盾越来越突出。同时,煤炭是不可再生能源,长期依赖火电的能源结构不利于我国能源的可持续发展。因此,积极发展低碳清洁的可再生能源应该摆在我国能源发展的突出位置。

太阳能是具有发展前景的新能源和可再生能源。照射在地球上的太阳能能量非常大,照射在地球上大约40分钟的太阳能,足以供全球人类一年能量的消耗。可以说,太阳能是真正取之不尽、用之不竭的能源。而且太阳能发电绝对干净,无公害,所以太阳能被誉为是理想的能源。

太阳能光伏发电作为太阳能利用的一种有效方式,在全球得到了迅速发展。纵观我国的太阳能发展史:2009年,我国实施“金太阳示范工程”大力支持国内促进光伏发电产业技术进步和规模化发展,培育战略性新兴产业;2011年,“十二五”纲要中提到,新能源产业重点发展新一代核能、太阳能热利用和光伏光热发电等,随着该政策的贯彻落实,截至2014年底,我国光伏发电累计并网装机容量位居全球第二,年发电量约250亿kWh;2014年国务院办公厅印发的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》提出,要加快发展太阳能发电,有序推进光伏基地建设,鼓励大型公共建筑及公用设施、工业园区等建设屋顶分布式光伏发电,到2020年,光伏装机达到1亿kW左右,光伏发电与电网销售电价相当;“十三五”规划将光伏行业推至一个全新的高度——光伏发电被单独列出并重点提及,这表明该行业已在国家战略宏观层面受到实质性重视,也意味着,光伏发电行业将在“十三五”期间获得重要跨越性发展。

在光伏行业取得飞速发展的同时,它还存在着许多亟待解决的技术难点。比如,已建成电站监控系统缺失,运营情况无法掌握,尤其是运行一定年限后,电站开始进入故障高发期,设备的老化和故障如果无法及时获悉,则会存在极大的系统安全隐患。除此之外,面对大量分布的太阳能光伏发电设备而言,细化到各台设备部件的局部监测,完善局部把控也非常重要。发现故障,如何做到迅速应对?针对分布式电站,如何做到统一管理,面面俱到?这对系统部件的及时更新,对故障的及时响应并根据监测分析结果进

行及时维护提出很高要求。此情况下，光伏系统需要通过软硬件整合方案有机结合，并实现投资收益率最大化。

虽然这些技术难点目前还仍然存在，但是科学技术的发展往往是在对一个个技术难点的克服过程中实现的。无疑，利用太阳能发电的光伏发电技术前景广阔。太阳能资源近乎无限，光伏发电也不产生任何环境污染，是满足未来社会需求的理想能源。随着光伏发电技术的深入发展，转换效率的逐步提高，系统成本的日趋合理，以及相关的分布式发电技术、智能电网等的完善，光伏发电这种绿色能源将成为未来社会的重要能源。

为了顺应我国光伏行业的发展趋势，为我国的光伏事业培养更多的人才，编者在参考大量书籍和文献的基础上，融合自己的研究成果，编写了本书。

本书在简明介绍一些较为成熟的基本理论和方法的基础上，系统全面地论述了光伏电站建模、仿真、并网的理论与方法，并对光伏并网的方案选取和经济效益进行评价，主要包括：光伏并网系统无功补偿，光伏并网逆变器无功与电压控制及稳定性分析，光伏并网对配电网的影响，光伏电站接入对配电网频率和有功平衡的影响，光伏并网与电网安全约束机组组合，光伏并网影响的综合评价等。

全书共 11 章，由王璟主编，杨红旗、田春笋任副主编，参加编写的还有李秋燕、王利利、张林、李小明、秦开明、李锰、蒋小亮、李科、郭勇、全少理、李鹏、孙义豪、丁岩、关朝杰、杨卓、罗德俊、陈江涛等。本书由武汉大学电气工程学院胡钊教授主审，提出了一些宝贵意见，在此表示衷心感谢，同时对本书所列参考书目的各位作者表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免存在不妥与疏漏之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

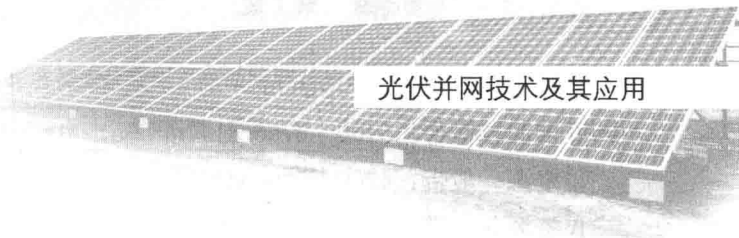
2017 年 4 月

目 录

前言

第 1 章	光伏并网意义及发展现状	1
1.1	光伏并网的意义	1
1.2	国内光伏产业发展情况	1
1.3	国外光伏产业发展情况	5
1.4	光伏并网技术研究现状	7
第 2 章	光伏市场	12
2.1	中国光伏市场	12
2.2	光伏发电成本分析及上网电价的确定过程	16
2.3	中国光伏产业发展对策	16
第 3 章	光伏并网系统	19
3.1	光伏发电系统并网模式	19
3.2	可调度式光伏并网发电系统	20
3.3	不可调度式光伏并网发电系统	22
第 4 章	光伏并网系统建模	25
4.1	光伏发电系统的仿真建模	25
4.2	光伏发电系统的整体建模	39
4.3	多天气情景下的光伏电站仿真模型	51
第 5 章	光伏并网接入方式	54
5.1	光伏并网原则	54
5.2	接入方式分类	54
5.3	光伏电站接入电网技术规定	57
第 6 章	光伏并网系统无功补偿装置	65
6.1	SVG 的主要特点及优势	65
6.2	SVG 的基本原理与工作特性	66

6.3	SVG的数学模型建立与分析	70
6.4	无功电流检测方法分析与研究	74
6.5	SVG控制的研究与分析	79
第7章	光伏并网逆变器无功与电压控制及稳定性分析	87
7.1	大型光伏电站并网电压稳定性分析	87
7.2	无功与电压协调控制策略的研究	92
7.3	电网阻抗影响并网逆变器建模	98
7.4	并网稳定性分析	103
第8章	光伏并网对配电网的影响.....	107
8.1	光伏电站接入对配电网电压的影响	107
8.2	光伏电站接入对配电网潮流的影响	116
8.3	光伏电站接入对配电网谐波含量的影响	116
8.4	光伏电站接入对配电网网损的影响	119
8.5	光伏电站接入对配电网频率和有功平衡的影响	120
8.6	光伏并网与电网安全约束机组组合	126
第9章	对光伏并网影响的综合评价.....	135
9.1	评价指标	136
9.2	指标权重计算方法.....	139
9.3	评价方法	142
第10章	河南某区域电网光伏接入方案综合评价.....	144
10.1	河南省某区域配电网简介	144
10.2	算例仿真结果	144
第11章	光伏发电项目综合效益评价.....	149
11.1	光伏发电项目综合效益评价指标体系	149
11.2	分布式光伏发电项目综合效益评价指标权重.....	153
11.3	光伏发电项目模糊综合评价模型	154
11.4	光伏发电项目综合效益模糊综合评价等级.....	155
11.5	模糊综合评价方法	157
11.6	河南省安阳市内黄县 100MW 光伏项目综合效益评价实证研究	159
	参考文献	165



第 1 章

光伏并网意义及发展现状

1.1 光伏并网的意义

随着人类对化石类能源消耗的日益增加,以及化石类能源对环境造成的不利影响日益增大,能源在社会经济发展中表现出越来越显著的制约性。因此,积极开发利用可再生新能源已成为各国的基本能源政策。在众多新能源里面,太阳能的广泛性、清洁性、可再生性及其技术发展的充分性,博得了许多国家的青睐。太阳能的主要利用形式就是光伏(Photovoltaic, PV)发电。随着光伏发电技术和并网技术的发展,许多国家已经开始大力发展光伏项目。资料表明,一年内地球表面所接收到的太阳能总量是世界已探明能源储量的一万多倍,而我国总面积三分之二以上的区域每年日照时数不低于2000h,是太阳能资源较为丰富的地区之一,所以我国非常适合开发利用太阳能资源,开展光伏并网项目。但是光伏电源以不同的接入方式并网会对配电网造成不同程度的影响,该影响集中表现在配电网的网络损耗和电能质量上,因此对光伏并网的研究具有十分重要的意义。

1.2 国内光伏产业发展情况

我国太阳能电池的研究始于20世纪50年代末期。1959年,研制成功第一个有实用价值的太阳能电池,为中国太阳能电池产业的起步打下了基础。

目前,我国正处在经济转轨和蓬勃发展时期,但能源问题严峻,由于城市中大量使用化石能源,环境持续恶化。2013年世界卫生组织(WHO)公布的世界上污染最严重的十大城市中,中国占了八个,其中北京居于第七位,大力发展光伏并网发电将有助于尽早解决这一问题。国家领导及有关部门已经开始给予足够重视,国家科技部已规划有步骤地推进相关的科技创新研究、示范及其产业化进程。近些年来,在深圳和北京分别建成了100、17、7、5kW的光伏屋顶并网发电系统并成功地实现了并网发电。

我国光伏发电产业具有很大的发展前景。太阳能对人类是取之不尽,用之不竭、广泛存在、平等给予和可自由利用的能源,太阳能的利用将是21世纪的重大课题。我国太阳能辐射资源比较丰富,而太阳能辐射资源受气候、地理等环境条件的影响,因此其分布具有明显的地域性。根据过去测量太阳能年辐射总量的大小,我国可划分成以下4个太阳能辐射资源带。



- I 资源丰富带 $>6700\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- II 资源较富带： $5400\sim 6700\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- III 资源一般带： $4200\sim 5400\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- IV 资源贫乏带 $<4200\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

注： $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ——兆焦每（平方米·年）

按接受太阳能辐射量的大小，全国大致上可分为五类地区，如表 1-1 所示。

表 1-1 各类地区太阳能状况

地区类型	年日照时数 (h/a)	年辐射总量 [MJ/ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)]	等量热量所需 标准燃煤 (kg)	包括的主要地区	备 注
一类	3200~3300	6680~8400	225~285	宁夏北部，甘肃北部，新疆南部， 青海西部，西藏西部	太阳能资源 最丰富地区
二类	3000~3200	5852~6680	200~225	河北西北部，山西北部，内蒙古南 部，宁夏南部，甘肃中部，青海东部， 西藏东南部，新疆南部	较丰富地区
三类	2200~3000	5016~5852	170~200	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，广东南部	中等地区
四类	1400~2000	4180~5016	140~170	湖南，广西，江西，浙江，湖北， 福建北部，广东北部，陕西南部，安 徽南部	较差地区
五类	1000~1400	3344~4180	115~140	四川大部分地区，贵州	最差地区

光伏发电是目前太阳能发电最成熟、最经济的一种方式。我国光伏发电潜力巨大，装机容量以超过 100% 的增长率持续增长，截至 2014 年底，我国光伏发电累计装机容量已达 18GW 左右，预计 2020 年光伏装机容量将达到 50GW。

光伏电站未来将向大型化和并网化发展。光伏并网发电技术是当今世界光伏发电的趋势，是光伏技术步入大规模发电阶段，成为电力工业组成部分之一的重大技术步骤。2010 年以来，国内已开始成功建造 100kW 级的光伏并网示范系统，取得了宝贵的经验。2014 年，在中国深圳建造了一个 1000kW 的光伏发电站示范工程。2015 年 4 月已经有 30MW 的光伏电站并网运行。

在系统工程方面，由于受到技术、经济等多种因素的制约，许多具有市场潜力的应用领域，如大型（大于 1000kW）光伏或风—光—柴互补电站系统、光伏海水淡化系统、太阳能水泵滴灌工程、太阳能电动车、光伏制氢系统以及较大规模的光伏并网发电等都还没有真正开展起来。

我国 2000~2014 年各类光伏发电系统装机容量的分布如表 1-2 所示。

表 1-2

我国 2000~2014 年各类光伏发电系统装机容量的分布

MW

年份	农村电气化	电信工业	分布式发电	建筑光伏	大规模并网	全年总量	累计总量
2000	2.00	0.80	0.20	0.00	0.00	3.00	19.00
2001	2.50	1.50	0.50	0.01	0.00	4.50	23.50
2002	15.00	2.00	1.50	0.01	0.00	18.50	42.00
2003	6.00	3.00	1.00	0.07	0.00	10.00	52.00
2004	4.00	2.80	2.00	1.20	0.00	10.00	62.00
2005	2.00	2.90	1.50	1.30	0.20	8.00	70.00
2006	3.00	2.00	4.00	1.00	0.00	10.00	80.00
2007	8.50	3.30	6.00	2.00	0.20	20.00	100.00
2008	4.00	5.00	20.50	10.00	0.50	40.00	140.00
2009	9.80	2.00	6.00	34.20	108.00	160.00	300.00
2010	15.00	6.00	6.00	190.00	283.00	500.00	800.00
2011	10.00	5.00	5.00	480.00	2000.00	2500.00	3300.00
2012	20.00	7.00	9.00	600.00	2500.00	4000.00	4500.00
2013	30.00	8.00	8.00	900.00	3500.00	5000.00	7000.00
2014	50.00	10.00	12.00	1200.00	5000.00	8300.00	9000.00

由表 1-2 可见，在光伏发电总装机容量中并网型光伏发电占绝大多数，2011 年新增装机容量 2500MW 中并网光伏容量为 2485MW，占新增容量的 99.4%，而离网型光伏只有 15MW。为了推动光伏发电产业的持续发展，我国政府进一步提高了光伏发电累计装机容量的预期目标。根据国家发展和改革委员会制定的《新能源产业振兴发展规划》，我国光伏发电发展的预期目标为：到 2020 年累计光伏发电容量达到 50GW，如图 1-1 所示。

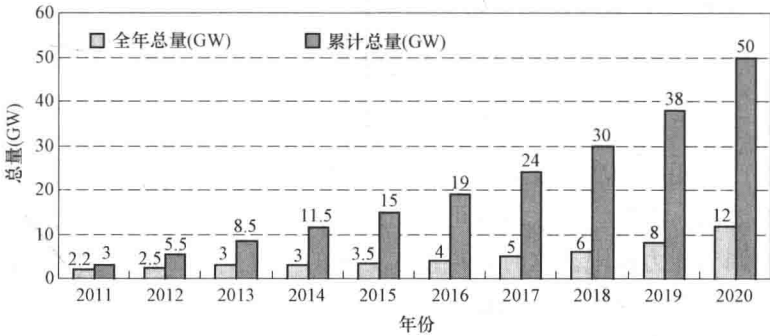


图 1-1 中国光伏发电的发展目标

光伏并网发电系统按照其发电方式一般可分为：集中式光伏并网发电系统与分布式光伏并网发电系统。集中式和分布式光伏并网发电系统同时存在。

集中式光伏并网发电系统，即光伏并网电站系统，系统所发电力直接进入电网，但这种方式不能完全发挥太阳能分布广泛、地域广阔等特点。



分布式光伏并网发电系统，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。在分布式光伏并网系统中，白天不用的电量可以通过逆变器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。

集中式和分布式光伏并网发电系统都有各自的优缺点，各自的应用场合，因此分布式和集中式光伏并网发电系统在我国的发展中并存。

光伏并网对我国电网产生越来越大的影响。随着越来越多的光伏发电并网运行，尤其是我国特有的大规模光伏发电集中接入电网的开发模式，将给电力系统的功率平衡、安全稳定与经济运行带来巨大挑战。在不具备良好间歇性电源消纳技术的条件下，从电力系统安全稳定与经济运行、可再生能源最大限度开发利用、光伏电站投资回报和光伏发电产业可持续发展等多个角度出发，面对大规模光伏发电并网问题，电网公司处于两难境地。如果要求电网接纳随机波动的大规模光伏发电，就需要系统提供与其容量相匹配的旋转备用去抑制光伏发电的出力波动，保证电力系统的功率平衡和频率稳定，但这会造成大量不必要的燃料消耗，产生更多的污染物排放，同时运行成本的增加会降低电力系统的经济运行水平，使得清洁能源电力利用的综合效益大大降低。如果因此拒绝规模化光伏发电的接入或将其出力限制在很低的水平上，则会导致光伏电站大规模弃光，不仅大大降低了清洁能源的利用效率，还会造成光伏发电投资建设的极大浪费，制约光伏发电产业的可持续发展。因此，如何在满足电网安全稳定和经济运行约束的前提下，最大限度地消纳这些间歇性的可再生能源，已经成为当前新能源电力系统领域的研究热点问题。准确的光伏发电功率预测不仅能够为电网的发电计划制订、调峰调频、潮流优化、设备检修等调度决策行为提供可靠依据，而且可以为风、光、水、火储存的多能互补、协调控制提供技术支撑，是提高电网接纳规模化间歇性电源能力的关键技术之一。

随着清洁能源的不断发展，光伏、风电等能源的互补配合也不断增多。从 2009 年到 2020 年，非水电清洁能源的装机容量将迅速增长。到 2020 年，风电、光伏发电与核电的装机容量占中国发电总装机的份额将超过 16%。

风能、太阳能等可再生能源本身具有间歇性和波动性的特征，因而可再生能源发电接入电网必然产生相应的功率波动。当可再生能源发电占比较小时，传统电源能够实时补偿这些功率波动。但是，当大规模可再生能源接入电网，其产生的功率波动有可能超出传统电源的调节能力极限。这时，再接入更多的可再生能源就可能因不能满足电网功率平衡，而导致供电可靠性和电网运行的稳定性降低。

因此，可再生能源接入电网最主要的问题仍然是保持电源与负荷需求之间的实时平衡。风电、太阳能发电和电网负荷等都具有波动性，而有的又具有互补性，有的还具有同时性，它们叠加在一起，就会增加电网规划与调度问题的复杂性，也会增加电网为维持功率平衡所付出的成本。

光伏发电必须和其他新能源发电及常规能源发电进行相互的配合，因为它们由一个强大的电网联系在一起。合理的配置各种能源比例是新一代中国智能电网的发展方向。



1.3 国外光伏产业发展情况

国外研究光伏发电技术始于一个多世纪前。19世纪30年代末,法国物理学家A. E. 贝克勒尔(Becquerel)在一次试验中发现,把两片金属插入溶液构成的伏打电池,在光照时就会产生额外的伏打电势,因此他把这种现象称为“光生伏打效应”。19世纪80年代查尔斯·弗里茨(Charles Fritz)研究出以硒为基础的光伏电池。从此以后人们就把能够产生光生伏打效应的器件称为“光伏器件”。半导体P-N结器件在光照下的光电转换效率最高,通常称这类光伏器件为“光伏电池”(solar cell)。在1954年,贝尔实验室首次做出了能够实用单晶硅光伏电池,开创了光伏发电的新纪元。

光伏并网发电开始于20世纪80年代初,美国、日本、德国、意大利都为此做出了努力。按照当时认知,建造的都是较大型的光伏并网电站,而且都是政府投资的试验性电站。试验结果在相应的技术方面都是成功的,但在经济性方面却并不令人鼓舞,主要是由于太阳能电池成本过高,虽然具有明显环境效益,但其发电成本却很难让电力公司接受。

通过改进工艺、扩大规模和开拓市场等措施,大幅度地降低了太阳能电池成本。最近30年,光伏组件的成本降低了2个数量级,2007年世界重要厂商的成本为每瓦2~2.3美元,售价为每瓦2.5~3美元,而且这种降低的趋势还在继续。

2000年以来,国外发达国家重新掀起了光伏并网系统的研发高潮,这次的重点并未放在建造大型光伏并网电站方面,而是侧重发展“屋顶光伏并网系统”。人们认为,屋顶光伏并网系统不单独占地,将太阳能电池安装在现成的屋顶上,非常符合太阳能能量密度较低的特点,其灵活性和经济性都大大优于大型光伏并网电站,有利于普及,有利于能源安全。而且由于功率比较小,并网逆变器的体积也可以做得很小,因而可以直接安装在太阳能电池板的背面,使并网发电系统的安装和使用更加简易。

在各国的屋顶光伏并网系统发展中,德国的屋顶光伏并网系统发展速度始终是位于世界前列的。2003年,德国首先开始实施由政府补贴支持的“1000个光伏屋顶计划”,同时制定了《可再生能源电力供应法》,规定光伏发电的上网电价为每千瓦时0.99马克,极大地刺激了光伏发电市场。由此为契机,德国在2005年安装的太阳能发电系统容量为5MW,2007年增加了一倍,达到了10MW,2009年扩大为15.6MW。2009年1月德国开始实施“十万屋顶计划”,2010年安装太阳能发电系统的容量超过40MW。现在德国的太阳能发电市场已由探索阶段发展为繁荣的专业市场。

日本在光伏发电与建筑相结合方面已经努力了十几年,2004年1月通产省宣布“朝日七年计划”,计划到2020年推广16.2万套太阳能屋顶住房,总功率达到185MW;2007年又宣布“七万屋顶计划”,日本政府的目标是到2020年光伏并网屋顶系统总容量达到7600MW。日本屋顶光伏并网发电系统的特点是: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被安装在建筑物上,也很容易被建筑公司所接受。

美国也是世界上最早进行光伏并网发电的国家之一,20世纪80年代初就开始实施



VUSA (PV Utility Scale Application) 计划, 即作为规模公共电力应用的光伏发电计划, 首批建造了 100kW 以上的大型光伏并网电站 4 座, 其中容量最大的为 6MW (原计划为 10MW); 1996 年, 美国能源部又开始了一项称为“光伏建筑计划 (PV-BONUS)”的项目, 共投资 20 亿美元, 专门用于开发新型光伏建筑集成材料、采光技术, 光伏调峰电力装置及光伏组件用并网发电模块等。2007 年 6 月, 前总统克林顿宣布实施“百万个太阳能屋顶计划”, 计划到 2020 年安装 100 万套太阳能屋顶, 总装机容量为 3025MW, 所产生的电力相当于 3~5 座大型燃煤电站所产电力, 每年可望减排二氧化碳 35 亿 t, 相当于减少 85 万辆汽车的尾气排放。同时, 通过该计划的实施将使光伏发电的成本由 2007 年的每千瓦时 22 美分下降到每千瓦时 7.7 美分。

许多其他发达国家也都有类似的光伏屋顶并网发电项目或计划, 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 2007 年 12 月宣布到 2020 年将建成 150 万套太阳能屋顶并网发电系统。

许多统计资料表明, 近几年世界光伏并网发电市场发展迅速, 光伏并网发电的装机容量从 1996 年的 7MW 已上升到 2014 年 240MW, 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 2014 年的 50%。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 50% 左右。

在技术方面, 专用逆变设备和相关系统已经比较成熟, 在欧洲光伏专用逆变器就有 SMA、Fronius、SPutnik、SunPwer 和西门子等众多的公司具有市场化的产品, 其中 SMA 在欧洲市场中占有 50% 的份额。除欧洲外, 美国、加拿大、澳大利亚、新西兰以及亚洲的日本在并网型逆变器方面也都已经产品化。这些都表明光伏并网发电产业已经是世界范围内一个蓬勃发展的高新技术产业, 它和光伏器件 (主要是太阳能电池) 并列为光伏产业的两大支柱。

在光伏并网发电的行业标准方面, 虽然现在还没有 IEC (国际电工委员会) 标准, 但各国都颁布了相应的试行标准, 如美国 SANDIA 国家实验室的光伏并网发电系统标准等。

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常规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。

21 世纪, 国外专家学者对光伏发电做出了大量卓有成效的研究, 并已经成为一个研究热点。光伏并网发电一直是光伏发电研究的热点之一。有专家提出了一种光伏并网发电系统模型结构, 基本的发电模型单元包括两块并行的光伏电池板和一个专业的 buck-boost (或者 fly-back) PWM 转换器。用一种新的基于小光伏电池板模块的 MPPT 算法来调节并行的光伏发电电池的电压。几个光伏发电模型都并联到一个装有标准有功率过滤器的直流母线上, 然后再连接到电网上, 并网的换流器来调节直流母线电压到一个最优值, 再把各个发电单元发出的功率注入公共电网上。每个发电单元都作为一个独立的转换器来工作, 这样各个单元之间或者单元与主滤波器之间就不需要信号连接了。针对光伏阵列的特点, 有专家提出了基于最大功率点跟踪 (Maximum Power



Point Tracking, MPPT) 的光伏阵列并网发电方案, 采用电网电压前馈和电流跟踪技术。也有其他专家提出了在与电网电压矢量同步旋转的 $d-q$ 坐标系下, 应用同步矢量电流 $P-I$ 调节器与电流前馈补偿的方法, 对公共节点并网电流进行闭环控制的同时又能快速稳定实现光伏阵列最大功率点跟踪 (MPPT), 使系统具有良好的动态与稳态性能。针对光伏并网发电系统处于孤岛运行状态时会出现的问题, 有专家分析了传统的无源孤岛检测方法和有源孤岛检测方法, 针对已有孤岛检测方法的不足, 提出了电压前馈正反馈扰动孤岛检测方法, 使公共耦合点电压趋于不稳定, 从而通过欠电压/过电压检测判断孤岛的发生。相关文献提出了一种包括新的功率变换器控制策略、最大功率点跟踪和孤岛检测方法的光伏并网发电系统。新的功率变换器配置包括新开发的 DC/DC 功率变换器和 DC/AC 功率变换器。为了简化传统的抑制扰动和观察 MPPT 方法的电路, 提出了一种新的用于光伏发电系统的 MPPT 方法, 并应用在 DC/DC 变换器的控制上。另外, 开发了一种基于电阻的并网光伏发电孤岛检测系统应用于 DC/AC 变换器的控制, 这样能及时有效地检测孤岛状态。

光伏发电控制是光伏发电研究的基础, 在此研究方向上众多专家学者做了深入的分析 and 研究。相关文献提出了基于模糊控制的风光互补能源系统, 在周密考虑了各项因素对蓄电池影响的基础上, 通过专家数据完善了模糊规则库, 建立合理的模糊充电控制结构; 同时, 在对系统直流输出的控制中采用模糊自适应 PID 控制器控制, 结合传统 PID 控制稳态响应特性好的优势, 稳定了直流输出电压。有专家提出了一种太阳能独立光伏发电系统, 由于双向变换器在该系统中承担了双向输送能量的任务, 因此实现系统能量管理的核心是对双向变换器的合理有效控制。通过系统的能量流动模型分析了其运行原理, 详细给出系统双向变换器的双向选通控制策略和延时同步整流控制策略。

光伏发电在微电网中的应用起步比较晚, 但已经有学者对这一问题进行了探讨和研究。通过仿真研究了不同分布式电源配置的微电网的动态行为, 重点研究了储能设备在微电网运行控制中的作用, 光伏发电系统采用单级逆变电路直接并网, 也没有考虑光伏电源输出功率的波动。分布式电源采用统一的电力电子接口和储能设备接入微电网, 并提出了蓄电池容量的选择方法, 但主要针对具有可调功率的微电源, 对具有随机波动性的光伏电源很难确定上升率和下降率。

综上所述, 目前国外的专家学者对光伏发电做了大量研究, 包括并网和离网运行的光伏发电系统, 以及光伏阵列的最大功率点跟踪 (MPPT)、孤岛检测和逆变器的控制策略等, 都各自具有一定的特点, 在很大程度上推动了光伏发电产业的发展。但是对于光伏发电在微电网中的应用现在研究的还很少, 更没有专门的文章探讨光伏发电在微电网中的接入所存在的问题和相对应的方法, 因此对于在微电网中的光伏发电还需要做进一步的研究。

1.4 光伏并网技术研究现状

1. 国内对于光伏并网技术的研究

一般来说, 光伏发电系统的建模首先是建立系统各个组成部分的模型, 然后构成整



个系统的整体模型。光伏发电并网系统由光伏阵列、光伏并网逆变器、变压器和集电线路等组成,目前国内针对各个组成部分都有比较详细的建模方法研究。现有对于光伏组件的建模研究多数基于组件的特性曲线随光照和温度变化的关系方程,并通过不断改进模型以适应不同的研究需要。设计了光伏电池组件的工程用数学模型,此种模型可以根据光伏组件供应商提供的几项重要技术参数来复现其特性曲线,并能够满足仿真研究对计算精度的要求。建立了局部阴影条件下的光伏阵列仿真模型,分析研究了光伏阵列被部分遮挡条件下的输出特性,为光伏发电系统的控制与设计提供了依据。

最大功率点跟踪的仿真研究是光伏发电技术研究中的重要组成部分,现今国内对于其研究致力于更高的精度和更快的追踪速度,不断有新的方法提出。国内的研究已经给出了多种 MPPT 实施方案,并提出了模糊参数自校准控制的方法以实现功能,提出了一种基于扰动观察法的变步长改进算法,经验证此种算法更具有实用价值但仍有改进空间。

光伏并网逆变器是光伏发电系统中的关键一环,承担着将光伏阵列所发直流电转换为交流电接入电网的重任,其研究可以大致分为两个部分,一是不同类型并网逆变器的建模;二是并网逆变器的控制策略设计。并网逆变器的建模相对简单,应用也比较成熟,如今国内研究的主要关注点集中在控制策略方面,对并网变流器的拓扑结构及控制策略都做了比较详细的研究,着重对于电压源型和电流源型变流器的控制及技术应用进行了论述。

光伏发电系统属于分布式电源的一种,同分布式电源特性相似,共有两种并网模式,一种是作为电压源并网,其控制策略以输出电压恒定为控制目标,另一种是作为电流源并网,目前光伏电站多采用此种形式并网,其控制策略以控制输出电流和减小电网波动对输出电流的影响为目标,有学者设计了基于电网电压前馈控制和滞环电流跟踪控制的控制策略。这两种控制策略的目标都是消除电网波动对输出电流的影响。另外,源逆变器由于自身具有多种优点而逐步受到重视,文献针对光伏并网发电系统建立了源逆变器的小信号模型。

我国的太阳能光伏发电采取“大规模集中开发、中高压接入”与“分散开发、低压就地接入”并举的发展模式,按其特点可分为大型地面光伏电站与多样分布式光伏电源。集中式并网的特点是光伏电站所发电能被直接输送至大电网,由大电网统一调配向用户供电,与电网之间的电力交换是单向的,此种并网模式适用于大型地面光伏电站,通常与负荷点距离较远。分布式并网的特点是光伏电源所发电能直接分配到用户,多余或不足的电能通过电网协调控制,其潮流是可逆的,与电网之间的电力交换是双向的,此种并网模式通常适用于小规模光伏发电系统,例如与建筑结合的光伏发电系统。

光伏发电系统并入电网后,由于其出力的随机波动性和缺少阻尼与惯性的暂态特性,必将会给电力系统带来新的影响与问题。目前的国内研究分析探讨了大规模光伏发电系统接入电网后可能给电力系统带来的各种影响,为后续研究提供了一定的思路。仿真研究了大规模光伏电站接入孤立电网后,在光伏电站出力变化和电网负荷变化两种情况下,光伏电站对电网稳定性产生的影响。给出了光伏电池组件的故障切除条件和光伏电站与常规机组联合运行的约束条件,以节点电网系统为例,通过潮流计算分析了光伏



电站对于电网的可靠性影响。有学者研究了光伏发电系统装机容量对电网电压分布的影响，并在振荡情况下对电网电压稳定性进行了分析。从研究光伏发电系统并网后给电网带来的影响和问题来说，稳定性分析是重中之重，即在天气变化、电网故障及其他波动给光伏电站带来冲击和光伏电站内部故障时，研究分析光伏发电系统和电网之间会如何相互影响。另外，文献采用了一种直接计算电网稳定性的方法，使用特征根值的方法分析了系统的动态稳定性。

综上所述，目前对光伏发电系统的并网研究主要是围绕其自身特点展开，包括光伏组件模型的改进、最大功率点跟踪、逆变器的拓扑结构和控制方式、滤波、功率因数控制等方面的设计及其相互之间的协调配合，研究侧重于以并网逆变器为核心的并网光伏发电系统设备设计与应用。与此同时，现有的光伏发电系统的建模研究工作主要集中在系统的阵列模型建立或相应的控制策略设计，更多关注的是光伏发电系统本身各个部分的具体特性，而针对光伏系统整体建模的方法研究较少，尤其缺少适用于稳定性分析的整体模型。对于光伏发电系统来说，尤其是大规模光伏并网发电系统的暂态稳定性研究，多数还是定性分析，只有少量的研究进行了并网后的潮流计算和简单的暂态仿真。

2. 国外对于光伏并网技术的研究

(1) 光伏电池组的研究现状。当今世界各国特别是发达国家对于光伏发电技术十分重视，针对其制订规划，增加投入并加以大力发展。20 世纪 80 年代以来，即使是在世界经济处于衰退和低谷的时期，光伏发电技术产业也一直保持以 10%~15% 的递增发展速度。90 年代后期，其发展更为迅速，并成为全球增长速度最快的高新技术产业之一。2007 年世界光伏电池组件的总产量达到 200MW，比 2006 年增长了 35%。各国一直在通过改进工艺、扩大生产规模、开拓新市场等手段来降低光伏电池的制造成本。

近几年，全世界太阳能电池的生产量平均每年增长近 40%，2014 年全世界生产总量达 1000MW。21 世纪以来，一些发达国家纷纷制订了发展包括太阳能电池在内的可再生能源计划。太阳能电池的研究和生产在欧洲、美洲、亚洲大规模展开。美国和日本为争夺世界光伏市场的霸主地位，争相出台太阳能技术的研究开发计划，如到 2020 年，美国计划累积安装 4600MW（含百万屋顶计划）；日本计划累计安装 5000MW（NEDO 日本新阳光计划）。《光伏》杂志 2013 年 3 月出版的 22 卷上发表的世界太阳能电池/组件产量汇总如表 1-3 所示。

表 1-3		世界太阳能电池/组件产量汇总						MW
国家	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
美国	34.75	38.85	51.0	53.7	60.8	74.97	100.32	100.6
日本	16.40	21.20	35.0	49.0	80.0	128.60	171.22	251.07
欧洲	20.10	18.80	30.4	33.5	40.0	60.66	66.38	112.75
其他	6.35	9.75	9.4	18.7	20.5	23.42	32.62	47.8
总计	77.60	88.60	125.8	154.9	201.3	287.65	390.54	512.22



从表 1-3 中可以清楚地看出：世界太阳能电池材料发展的趋势是非常迅猛的。世界太阳能电池组件（包括其基础性材料单晶硅）的发展增长尤为迅速。

(2) 光伏并网逆变器的研究现状。目前国外对并网发电系统的核心器件并网逆变器的研制发展很快，相关技术也较成熟，其中较复杂的大功率逆变装置仅有德国、美国、日本等几个发达国家开发出。在技术方面，由于欧美等国家在光伏发电技术上的长期研究与政策鼓励，目前欧美厂商在各个类型的光伏并网逆变器的研发上都已经比较成熟并已经高度市场化。

在国际光伏逆变器市场上占据大量市场份额的光伏逆变器生产企业均为欧美厂商。2014 年度按市场份额排名前五位为 SMA、Fronius、Kaco、Power One、Sputnik，这五家光伏逆变器厂商占据全球光伏逆变器市场份额的 70%。其中，德国的 SMA 是全球最早也是最大的光伏逆变器生产企业（德国市场占有率达 50% 以上），为全球光伏逆变器领军企业。SMA 之前一直专注于大型光伏逆变器的开发，随着太阳能市场的不断成长，为了占有小型户用光伏电源市场，SMA 已经从 OKE 购买了微逆变器技术，这使得 SMA 成为全球唯一一家包含各种现存逆变器技术产品线的厂商。2009 年 SMA 占据全球光伏逆变器 44% 的市场份额，受德国国内光伏补贴政策调整的影响，2010 年略微下降为 40%，2011 年由于全球经济衰弱和大量其他光伏逆变器厂商的崛起和参与市场竞争，SMA 的市场份额虽然下降为 35%，但在世界范围内仍然领先，在欧洲市场更占据绝大部分市场份额。SMA 在技术上的领先优势也将进一步加快它的国际化进程。

技术较简单的小功率逆变装置在国外推广应用也多。国外光伏发电并网逆变器研制主要集中在最大功率跟踪和逆变环节集成的单级能量变换上，控制电路主要采用数字控制，注重系统的安全性、可靠性和扩展性，均具有各种完善的保护电路。其中处于领先地位的仍然是德国 SMA 公司开发的并网逆变器，技术上比国内生产的同类产品要先进很多，最大效率达到 96%，输出功率谐波畸变小于 4%，内部损耗小于 7W。基于 DSP 实现最大功率点跟踪；具有冲击电压保护、极性混乱保护、过电压保护、欠电压保护等多种保护功能；远程监控可通过电力线传输数据，也可通过专用数据线传输数据；LCD 显示各种操作信息，包括当天产生的电能，当前的功率和电网电压及安装以来所产生的总电能和总的操作时间；根据电网情况调制工作状态，故障自诊断。

(3) 国外关于 MPPT 的研究现状。光伏器件是光伏发电系统电能的来源，能否充分发挥光伏器件的效用对整个光伏发电系统具有重要的作用。光伏发电系统的运行需要快速准确地进行最大功率点跟踪，是整个光伏发电系统运行的关键。目前，MPPT 的控制技术研究已经取得了很多的成果，国外已经提出了多种 MPPT 方法，主要包括扰动观察法、电导增量法、恒定电压法、短路电流法、实际测量法、直线近似法、间隙扫描法以及基于扰动观察法的改进方法。

扰动观察法是目前光伏系统中最为常用的 MPPT 方法，其实现简单，需要测量的参数少，但是该方法在系统达到最大功率点后，会在其左右振荡，造成能量损耗，且在环境快速变化时，易发生误判。电导增量法也是 MPPT 控制常用的算法之一，其控制精确、跟踪速度快，基本可以消除扰动观察法中因扰动而产生的最大功率点附近的功率