



国家电网公司
电力科技著作出版项目

分布式光伏电源并网

关键技术

杨勇 赵波 葛晓慧 张雪松 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

分布式光伏电源并网 关键技术

杨勇 赵波 葛晓慧 张雪松 等 编著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了分布式光伏电源并网关键技术的相关理论和应用,内容包括光伏发电发展概述、分布式发电技术与光伏电源、并网光伏渗透率、含光伏电源的配电网负荷特性分析、潮流和无功电压调整、短路电流计算与分析、电压稳定性分析、光伏并网电能质量、并网光伏电站监控与信息交互 9 章。本书对于推动分布式光伏电源并网发电技术具有非常高的实用价值。

本书适合从事新能源发电、光伏发电及其并网技术的科研人员和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业教师、研究生和高年级学生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式光伏电源并网关键技术/杨勇等编著. —北京:中国电力出版社, 2014.4

ISBN 978-7-5123-5170-7

I. ①分… II. ①杨… III. ①太阳能发电—系统工程
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第264100号



中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 11.5印张 258千字
印数0001—3000册 定价40.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

发展可再生能源是应对气候变化、优化能源结构、解决能源和环境问题的关键，是能源战略调整、转变电力发展方式的重要内容。自1998年起，全球光伏发电产业正经历一个快速增长的过程，德国、西班牙、意大利、日本和美国等国家先后出台了推进光伏发电的产业政策，光伏发电已成为可再生能源领域的一支生力军。我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》、《国家“十二五”科学技术发展规划》、《可再生能源发展“十二五”规划》中均已部署与发展光伏发电相关的重点及重大示范工程项目。在国家政策法规鼓励和支持光伏发电产业蓬勃发展的大背景下，未来将有越来越多的光伏电源接入电网中，对光伏电源并网相关技术的需求也越来越迫切。保证分布式光伏发电技术的健康发展，在促进新能源利用的同时保障电网的安全性和供电可靠性，已成为电力公司和光伏电站运营商需要共同面对的重要课题。

国家电网公司高度重视新能源发电并网接入，积极促进我国新能源的规模化发展，争取最大限度利用各种新能源。本书是对国家电网公司重点科技项目“分布式电源接入配电网的规划设计和运行控制技术研究”成果的总结和进一步深化，比较全面系统地介绍了分布式光伏电源并网关键技术的原理和应用，主要内容包括光伏发电发展概述、分布式发电技术与光伏电源、并网光伏渗透率、含光伏电源的配电网负荷特性分析、潮流和无功电压调整、短路电流计算与分析、电压稳定性分析、光伏并网电能质量、并网光伏电站监控与信息交互等，具有非常高的实用价值。相信本书的出版在推动分布式光伏电源并网发电技术、培养光伏并网发电领域人才等方面可以发挥积极的作用。

本书第1章由杨勇编写，第2、3章由赵波编写，第4章由高振宇、陈琳编写，第5章由周金辉、周丹编写，第6章由张雪松、朱承治编写，第7章由葛晓慧编写，第8章由李鹏、邓哲编写，第9章由王子凌、张雪松、汪科编写，全书由赵波、葛晓慧统稿。本书的编写注重理论与实践的结合、实用和最新研究成果的结合，注意理论和方法的应用。在本书编写过程中参阅了大量的论著文献，在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢！

分布式光伏电源并网技术的发展为时尚短，有很多技术处于研究阶段，本书仅是对现有研究和实践成果的总结。随着分布式光伏电源并网研究的不断深入，必将有大量的新技术不断涌现，今后我们将密切跟踪和深入研究以不断完善本书的内容。

编者

2013年12月

目 录

前言

| | |
|--------------------------------|----|
| 1 概述 | 1 |
| 1.1 国内外光伏发电的现状与趋势..... | 1 |
| 1.2 光伏电源并网技术研究现状..... | 7 |
| 2 分布式发电技术与光伏电源 | 12 |
| 2.1 分布式发电技术概述..... | 12 |
| 2.2 分布式光伏电源的结构..... | 14 |
| 2.3 光伏电池..... | 15 |
| 2.4 光伏逆变器..... | 22 |
| 2.5 最大功率点跟踪控制..... | 29 |
| 3 并网光伏渗透率 | 36 |
| 3.1 光伏接入对电力系统净负荷的影响..... | 36 |
| 3.2 光伏容量渗透率的计算与分析..... | 38 |
| 3.3 光伏能量渗透率的计算与分析..... | 43 |
| 4 含光伏电源的配电网负荷特性分析 | 50 |
| 4.1 配电网负荷特性分析..... | 50 |
| 4.2 光伏电源出力特性分析..... | 51 |
| 4.3 光伏电源接入后的配电网等效负荷特性..... | 54 |
| 4.4 光伏电源电力电量的分析..... | 56 |
| 5 潮流和无功电压调整 | 61 |
| 5.1 并网光伏电源稳态分析基础..... | 61 |
| 5.2 光伏电源接入容量和位置对配电网潮流的影响..... | 64 |

| | | |
|----------|----------------------------|------------|
| 5.3 | 光伏电源输出功率变化对配电网潮流的影响 | 79 |
| 6 | 短路电流计算与分析 | 89 |
| 6.1 | 并网光伏电源短路模型 | 89 |
| 6.2 | 光伏电源短路电流计算与分析 | 99 |
| 6.3 | 光伏电源对配电网短路电流的影响 | 104 |
| 7 | 电压稳定性分析 | 113 |
| 7.1 | 并网光伏电源暂态模型 | 113 |
| 7.2 | 含光伏电源的配电网静态电压稳定性分析 | 128 |
| 7.3 | 含光伏电源的配电网暂态电压稳定性分析 | 133 |
| 8 | 光伏并网电能质量 | 146 |
| 8.1 | 电能质量标准条款和应用 | 146 |
| 8.2 | 光伏并网对电能质量影响的评估 | 155 |
| 9 | 并网光伏电站监控与信息交互 | 168 |
| 9.1 | 光伏电站监控系统 | 168 |
| 9.2 | 并网光伏电站信息交互技术 | 170 |
| | 附录 分布式光伏电源接入配电网典型网架 | 174 |
| | 参考文献 | 176 |

概 述

1.1 国内外光伏发电的现状与趋势

在全球资源消费日益紧张、气候变暖、生态环境恶化和人们环保意识日益增强的大环境下，光伏发电必将成为可再生能源领域的一支主力军。自 1998 年起，全世界光伏发电装机容量以每年 35% 的速度增长，全世界光伏发电市场正经历一个快速增长的过程。相比于 2000 年 1200MW 的累计装机容量，截至 2011 年底全世界并网光伏发电累计装机容量已超过 70GW，预计 2017 年将达到 230GW。随着光伏产业的发展，光伏发电市场竞争也日益激烈，特别是欧洲、美国、中国和日本等国家和地区在光伏领域的投资增长迅速，截至 2011 年底全世界光伏发电组件产量大约是 35GW，其中中国产量 21GW，同比增长 100%。2013 年，全球组件产量预计为 36~40GW，基本与 2012 年持平，其中中国组件产量为 23~28GW。德国、西班牙、意大利、韩国和美国等国先后出台了推进光伏发电的产业政策。美国希望由以出口带动光伏产业发展转变为投资国内技术和市场，扩大内需，带动产业显著增长，设定了每年新增装机容量 19GW，2030 年累计装机容量达 200GW 的宏大目标，届时，光伏发电成本价降到 0.06 美元/(千瓦·时)，光伏发电将占据电力市场较大份额，并成为电力的主要来源之一。

我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》、《国家“十二五”科学技术发展规划》、《可再生能源“十二五”规划》中均部署了与发展光伏发电技术相关的重点及重大示范工程项目。从当前我国光伏产业发展现状和总体趋势看，《可再生能源中长期发展规划》提出的光伏装机容量 2010 年的 300MW、2020 年的 1.8GW、2030 年的 10GW 以及 2050 年的 100GW 等发展目标明显偏低，相比当前世界光伏产业发展势头显得滞后。2012 年，在美国和欧洲对我国光伏产品掀起“反倾销、反补贴”调查之后，《中国新能源政策（2012）》白皮书提出：到 2015 年，中国建成光伏发电装机容量 2100 万 kW 以上。目前，我国在涉及制约光伏产业发展的核心技术、装备等方面，对所需攻克的关键技术、突破方向、发展路径等尚未提出明确目标；在涉及光伏并网发电问题方面，并网及运行管理行业标准、并网价格及系统维护等缺乏相对系统的管理办法和政策细则。

进入 21 世纪以来，中国光伏产业的发展十分迅猛，特别是 2004 年后，在欧洲市场的大力拉动下，中国光伏产业更是得到了飞速发展，2007 年中国已经成为太阳能电池（光伏电池）生产第一大国。自 2004 年后，中国光伏产业连续 5 年增长率超过 100%。2010

年我国光伏电池产量已超过全球总产量的 50%，我国在光伏产业上有较为完整的产业链，包括硅材料、电池组件、光伏系统应用等方面。2011 年世界十大光伏电池生产厂家见表 1-1。

表 1-1 2011 年全球十大光伏电池生产厂家

| 生产厂家 | 市场份额 | 生产厂家 | 市场份额 |
|-------------|------|----------------|------|
| First Solar | 34% | 茂迪 | 5% |
| 晶澳 | 17% | 昱晶 | 4% |
| 尚德 | 10% | 新日光 | 4% |
| 英利 | 7% | Canadian Solar | 4% |
| 天合光能 | 5% | Sun Power | 3% |

在光伏电池的研究与开发方面，具有国际领先地位的主要是德国、日本、美国和澳大利亚等发达国家。澳大利亚以新南威尔士大学的马丁格林教授为代表，在单晶硅光伏电池研究方面居世界领先地位，首次提出了第三代光伏电池的概念，对光伏电池的发展做出了巨大的贡献。

2011 年全世界太阳能光伏系统安装增长了 24%，总装机容量达到了 24GW。图 1-1 为 2011 年各国光伏发电装机总量比例分配图。受德国和捷克共和国安装量增长缓慢的影响，欧洲光伏发电安装量仅增长 3%，欧洲光伏系统安装量在全球安装总量中所占的份额从 2010 年 82% 骤降至 2011 年的 68%。2011 年意大利的新增光伏安装量为 6.8GW，尽管政府削减了光伏补贴，意大利仍取代德国成为世界最大的光伏系统安装市场。美国成为世界第三大太阳能市场，中国紧随其后成为世界第四大市场，较新的太阳能安装地区诠释 2011 年 85% 的全球增长，多样化的客户群为太阳能产业创造了“长远的稳定”，平衡了各国补贴的增加和削减。

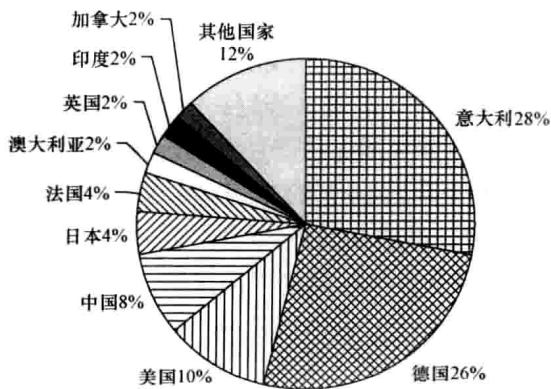


图 1-1 2011 年各国光伏发电装机总量比例分配图

1.1.1 美国

美国总统克林顿在 1997 年 6 月 26 日宣布了太阳能“百万屋顶计划”，计划 2010 年以前，在 100 万座建筑物上安装光伏系统，主要是光伏发电系统和热利用系统。这项计

划的提出是由社会发展的趋势所决定的，也是美国致力于光伏发电开发、研究的工作人员长期努力的结果。其直接原因有两个：

(1) 由于温室气体 CO₂ 的大量排放，全球气候逐年变暖，这就要求人们减少常规能源的使用。如果太阳能“百万屋顶计划”顺利实施，那么到 2010 年 CO₂ 年排放量约减少 300 多万 t。

(2) 美国太阳能光伏发电与热利用技术已经比较成熟，开始进入大规模生产阶段。

目前，太阳能“百万屋顶计划”已经在美国某些地区大力开展起来，如图森 (Tucson) 地区的 Civano 工程。在夏威夷，由于资源条件的优越，太阳能已经成为当地能源供给的主要形式，并已成为经济发展的重要组成部分。

2001 年，美国加利福尼亚州政府提出了世界闻名的“加利福尼亚州太阳能计划”，计划由州政府做出总预算 32 亿美元，在 10 年内安装 100 万个太阳能发电系统。

2004 年 9 月，美国能源部等发布了《我们的太阳能未来——2030 年及以后的美国光伏工业路线图》，雄心勃勃地提出了美国的光伏产业发展计划。

2006 年，美国通过了《总统太阳能美国计划》，由美国总统下令增加研发费用至 1.48 亿美元，该项目意在培养美国太阳能光伏技术的竞争力。

2008 年 4 月，费城市长宣布将在宾夕法尼亚海军园区建立一个兆瓦级的光伏电站。

2008 年 5 月，杜克能源宣布计划全部收购位于卡罗莱纳州夏洛特的 16MW 光伏电站发出的电力。

2009 年 6 月中旬，佩克能源服务公司签署合同，将在新泽西州的亚特兰大城会议中心屋顶建造一个 2.36MW 的光伏发电站。

以上项目都已完成。

2009 年 3 月 19 日，美国太阳能工业协会 (Solar Energy Industries Association, SEIA) 发布了《2008 美国太阳能工业年度回顾》报告。该报告显示美国 2008 年太阳能峰值容量增长超过 17%，总峰值容量 8775MW。该报告认为，到 2025 年太阳能生产的电力可以满足到全国 10% 的电力需求，其中光伏发电占 8% 以上；相当于 50 000MW。

美国对新能源发电采取了财政刺激政策，如回购电价政策 (Feed-in Tariffs)、投资补贴 (Investment Subsidies) 和可再生能源证书 (Renewable Energy Certificates)。

1.1.2 日本

日本光伏发电的发展大致分为四个阶段，介绍如下。

1.1.2.1 第一阶段 (1974~1988 年)

光伏发电在日本发展的第一阶段是第一次石油危机之后，日本通产省于 1974 年制定了以发展太阳能为主的可再生能源代替石油的技术研究开发中长期规划，即“阳光计划”，在光伏电池方面的目标是将用于宇航的技术移植到地面。该计划初期进展不快，仅把技术成熟的单晶硅、多晶硅电池用于家用计算器、灯标和孤岛柴油发电的补充电源等处。随后发生的第二次石油危机加剧了其开发的紧迫感，于是成立了日本新能源开发机构 (Japan's New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)。该机构负责光电产业化的一条龙管理，在政府增加开发资金的条件下，加速了光伏电池的产业化，主要措

施有：

(1) 继续开发光电转换效率较高的新材料、新工艺；

(2) 大力进行较低造价的新材料、新工艺开发，为加速产业化创造基本条件；

(3) 积极开发配套用的蓄电池、逆变器和电网连接的技术；

(4) 在上述条件基本过关后，建设大量多种类示范工程以在长期运行中发现问题并加以改进。如十大电力公司均参与了重点电源工程建设，最大的户装容量达 300kW。

在上述方针措施的推动下，光伏电池的生产成本大幅下降，生产技术有很大进步。如 1988 年，以京瓷、夏普和三洋电机为主的光伏电池产业产量达到了 12.8MW，超过美国的 11.7MW 而居世界第一。每瓦的售价亦由 1979 年的 2 万~3 万日元下降到 800 日元。各种光伏电池的光电转换效率均有所提高，如多晶硅铸造基板光电转换效率由 1984 年的 12.7% 提高到 1988 年的 15.7%，非晶硅亦由 1985 年的 8.25% 提高到 1988 年的 10.1%。

1.1.2.2 第二阶段（1988~1994 年）

第二阶段 NEDO 要求光伏电池售价在 1988 年的基础上再降 20%，以便广泛用作通信、路灯和室外立柱钟等小型电源。由于社会环保意识的提高，在电力公司独立电源示范项目成功的基础上，清洁电源的应用范围扩大到公园、学校、医院、展览馆等公用设施的示范工程上。此外，还及时建设了市场庞大的民用示范工程，证明了技术上已基本达到了国际先进水平。

1.1.2.3 第三阶段（1994~2000 年）

第三阶段以 1993 年制定的“阳光计划”为标志，此阶段仍把光伏发电作为重点项目。初步的结论是光伏发电技术已达普遍应用水平，但售价过高是影响推广应用的关键因素。为此，开发重点应放在降低光电器件成本的价格和高效材料的开发上，同时认为扩大生产规模是降低成本的主要条件。鉴于 1992 年世界环保大会后，民众对降低 CO₂ 排放等问题的重视，日本通产省决定从 1994 年开始，在日本实施住宅用光伏发电系统的优惠政策，即对居民住宅用光伏发电系统（含逆变器、蓄电池和电网连接系统）每户补助其总造价（含施工费）的 1/2，对建设商亦采取同样补助，从而极大地促进了住宅用光伏项目的推广。尽管日本处于泡沫经济破灭的不景气时期，居民申请光伏项目仍十分踊跃，1994~1999 年累计实施 3.3 万件，共 121MW。2000 年申请达 2.6 万件，合计 96MW，达到前 5 年的累计水平。

1.1.2.4 第四阶段（2000 年~ ）

2004 年 6 月 NEDO 发表引人注目的《面向 2030 年的光伏发电路线图的综述》，目的是使未来的光伏研发从“政府指引研发以创建初期光伏系统市场”转变为“基于学术界、产业界和政府间的任务共担与合作的研发模式以创建成熟的光伏系统市场”，设定了 2030 年累积装机容量达 100GW 的发展目标。到 2030 年，光伏发电可以为约 50% 的日本居民提供电力消费（约占总电力消费的 10%）。2009 年 6 月 28 日，NEDO 为加快光伏发电的发展宣布对路线图做出更新，预定到 2020 年将光伏发电的成本价降到 0.14 美元/（千瓦·时），到 2030 年将成本价降到 0.07 美元/（千瓦·时）。

2012 年 7 月 1 日，日本《光伏补贴法案》正式实施。按照这一法案规定，未来 20 年内，该国的电力公司必须保证收购家庭和企业利用太阳能所生产的电力，其上网补贴电价

定为 42 日元/(千瓦·时), 约合人民币 3.36 元/(千瓦·时)。

1.1.3 德国

德国政府在 2000 年首先颁布《可再生能源法》，2003 年完成了“10 万屋顶发电计划”。2004 年德国光伏发电设备安装总量首次超过日本，走在世界的前列。光伏装机容量在 2008 年新增 1.5GW，2009 年新增了 3.2GW。2010 年，德国光伏装机容量约 8GW，累计安装光伏发电峰值容量超过 17GW，已提前完成 2020 年总共安装并网光伏容量 10GW 的目标。2012 年德国新装光伏发电装机容量达到 7.63GW；光伏电站的总装机容量已经达到 32GW。当天气晴好时相当于德国所有的 23 座核电站的发电量，光伏发电量已占德国总发电量的 5%。

德国政府在推广光伏发电方面采取了一系列有力的措施，主要是银行贷款和上网电价补贴等。在德国，若在自家屋顶上安装一套光伏发电设备相当于办一个小型发电厂，发出的电输入到公共电网，2004 年国家最高给予 57.4 欧分/(千瓦·时)的补贴。目前，德国光伏产业已经成为一个非常活跃的经济产业。随着欧债危机的蔓延以及光伏组件价格的下跌，2009 年开始，德国多次下调光伏上网补贴额度。2011 年的补贴额度比 2009 年下调 33%~35%。

德国在大力发展国内光伏发电产业的同时，也依靠自身先进的技术去拓展海外市场，如 2009 年，德国 Solon SE 公司中标西班牙一处 11MW 的光伏电站项目，项目由西班牙可再生能源及光伏有限公司 (REPS) 投资，该公司为挪威能源企业 Statkraft AS 的子公司。目前在光伏逆变器行业领域内市场占有率最高的厂家 SMA 就来自德国。

1.1.4 中国

我国具有利用太阳能的良好自然条件，国土总面积的 2/3 属于接受太阳总辐射量较佳的一、二、三类地区。除四川盆地、贵州省资源稍差外，西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏和内蒙古等地均为太阳能资源丰富地区，东部、南部及东北等地区都是太阳能资源较丰富和中等区。

在 20 世纪 80 年代后期，通过引进国外关键设备、成套生产线及光伏电池生产技术，我国的光伏电池生产能力达到 4.5MW，光伏电池产业初步形成。2008 年底，我国光伏电池年产量已达 2GW，占全球市场的 30%以上。2008 年之前，由于国内光伏应用匮乏，90% 的光伏电池出口国外。2009 年，国家相继出台了《太阳能屋顶计划》、《“金太阳”示范工程》和《关于做好“金太阳”示范工程实施工作的通知》等政策文件，有效拉动了国内市场的光伏应用需求，由此带动了光伏发电的大规模应用。当年相继有杭州能源与环境产业园开发建设光伏并网发电项目（规划容量 20MW，一期安装 2MW）、中国第一个 10MW 级太阳能光伏发电项目——石嘴山 50MW 太阳能光伏电站一期 10MW 项目、云南玉林 66MW 光伏电站等大型光伏电站投产发电。我国促进光伏发电的财政政策有上网电价优惠和投资补贴，可以两者选其一。光伏电池生产线和部分多晶硅生产用关键设备已立足于国内自主研发和生产，上下游产业链本土化进程正在日益加快。

按照国家发展和改革委员会编制的《可再生能源中长期发展规划》，到 2010 年太阳能光伏发电总容量 300MW，其中偏远农牧区应用 20MW，建筑物和公共设施应用 8~10MW，

大型并网光伏电站 2MW，其他商业应用 3MW。2020 年光伏发电总容量 1.8GW，其中偏远农牧区应用 50MW，建筑物和公共设施应用 1GW，大型并网光伏电站 20MW，其他商业应用 10MW。光伏发电总容量 1.8GW 的目标在 2011 年已经提前实现。

近年来我国光伏发电应用增长迅速，“十一五”期间 863 计划重点项目兆瓦级并网光伏电站系统、与城市景观和建筑相结合兆瓦级并网光伏电站、大型荒漠并网光伏电站已相继建成。大型光伏电站的成功建成，标志着我国已掌握兆瓦级光伏电站设计集成技术，具备相应的电站建设能力；攻克了光伏阵列自动跟踪技术、电网低压和高压并网以及系列化并网逆变控制技术。

在今后的十几年中，中国光伏发电的市场将会由独立发电系统转向并网发电系统，包括沙漠电站和城市屋顶发电系统。中国光伏发电发展潜力巨大，配合积极稳定的政策扶持，2012 年，光伏发电总容量已经达到 7GW。预计到 2020 年，光伏发电的总装机容量将达到 50GW，相当于少建 50 多个大型煤电厂。

表 1-2 为我国主要的光伏发电示范工程项目。图 1-2 为青海柴达木盆地百万千瓦太阳能示范基地，2011 年 12 月，该基地 100.3 万 kW 光伏发电容量成功接入青海电网。这是青海电网第一次大规模接入百万千瓦级光伏发电容量，创造了“世界上太阳能光伏装机最集中的地区、世界上最大的光伏电站群、世界上同一地区短期内最大光伏发电安装量、世界上规模最大的光伏并网系统工程、世界范围内首个实现百万千瓦级光伏电站并网发电”五项世界之最。



图 1-2 青海柴达木盆地百万千瓦太阳能示范基地

表 1-2 我国主要光伏发电示范工程项目

| 项目名称 | 招标或确定时间 | 实施地点 | 工程性质 | 初始投资 (万元/千瓦) | 初投资补贴或中标上网电价 |
|----------|--------------|---------|---------------|--------------|------------------------------|
| 国家“送电到乡” | 2002 年 4~7 月 | 西部 8 省区 | 10~150kW 独立电站 | 8~10 | 国家全额投资，部分地区后期运行费每年 3000 元/千瓦 |
| 国家“送电到乡” | 2002 年 4~7 月 | 西藏 | 10~100kW 独立电站 | 10~12 | 国家全额投资 |

续表

| 项目名称 | 招标或确定时间 | 实施地点 | 工程性质 | 初始投资(万元/千瓦) | 初投资补贴或中标上网电价 |
|------------|-----------|--------|-----------------------------|-------------|--------------------------|
| 崇明岛等4个项目 | 2008年5月 | 上海、内蒙古 | 100~1000kW 并网系统 | 不详 | 4元/(千瓦·时) |
| 敦煌特许权招标 | 2009年3~5月 | 甘肃敦煌 | 2个10MW 荒漠并网电站 | 约1.9~2.1 | 1.0928元/(千瓦·时) |
| 第二批特许权招标 | 2010年6~9月 | 西部6省区 | 2个30MW和11个20MW 荒漠并网电站 | 约2 | 0.7288~0.9791元/(千瓦·时) |
| 试点项目 | 2009年 | 宁夏等 | 5、10MW 荒漠并网电站 | 发电企业自建 | 1.15元/(千瓦·时) |
| 光电建筑 | 2009年3月始 | 各省区 | 公布111个共91MW | 自行核算, 评审确定 | 补15~20元/瓦 |
| 金太阳工程 | 2009年8月始 | 各省区 | 公布275个共632MW(目前取消39个, 54MW) | 自行核算, 评审确定 | 补初投资50%~70% |
| 第二批金太阳工程项目 | 2010年11月始 | 各省区 | 370MW(含部分第一批项目) | 主要设备供应商统一招标 | 补主要设备投资50%~70%, 其他4~6元/瓦 |

2012年10月, 国家电网公司发布《关于做好分布式光伏发电并网服务工作的意见》, 在提高分布式光伏发电项目并网服务效率、免收相关费用等方面做出15条承诺, 各级电网企业认真履行各项承诺, 确保并网服务工作实施有序、服务畅通。截至2013年1月底, 已受理与分布式光伏发电并网有关的咨询业务850项, 受理并网申请业务119项, 总装机容量达到33.8万kW。

1.2 光伏电源并网技术研究现状

1.2.1 并网光伏电源的技术特点

光伏并网系统作为分布式发电的一种, 其工作特点是将太阳能电池组件产生的直流电经逆变器转换成符合电网要求的交流电之后, 直接进入公共电网。光资源分布及太阳光辐射所具有的不均衡性、随机性、波动性、间歇性等特点导致光伏电站可调可控性弱, 因此, 不同容量、不同并网方式的光伏电源接入不同配电网的要求是不同的。就电网角度而言, 由于光伏并网发电特性有别于常规发电方式, 常规电站的并网技术条件和接入计算方法就不再适用; 另一方面, 目前对光伏电源并网和电网之间的相互影响还没有系统深入的研究, 没有形成全面、明确、可操作的管理标准和技术规范, 电力公司难以从电能质量、可靠性、稳定性、安全性和规范管理的角度对并网光伏电源进行全面可信的评估, 从而增加了光伏电源并网的复杂性和困难性。

并网光伏电源根据设计容量的大小, 可以选择35、10(20)kV和400V等多种电压等级并网。实际运行的并网光伏电源有以下特点:

(1) 现有主要的光伏并网逆变器的控制方式为电压源电流控制, 即输入侧为电压源,

输出为电流源控制，通过控制输出电流以跟踪并网点电压达到并网的目的。目前输出一般为纯有功功率，功率因数为 1，但随着相关标准和规定的颁布，越来越多的产品已经具备无功控制功能。

(2) 为有效利用太阳能，并网逆变器输出功率常见的控制策略为最大功率点跟踪控制(MPPT)。

(3) 光伏发电输出受天气影响很大，尤其在多云天气时发电功率会出现快速剧烈的变化。

(4) 由于光伏电站发电功率的快速随机波动特性，当大容量并网时等效负荷峰谷差增大的概率非常大，就需要常规发电机组的旋转备用容量进行功率调整补偿，增加了常规发电机组的发电成本。

(5) 逆变器输出轻载时，谐波会明显变大。

(6) 并网逆变器的防孤岛保护功能与负荷状况的相关性：由于现有的光伏电源容量相对于负荷比例小，市电消失后电压、频率会快速衰减，防孤岛可以准确检测；随着光伏电源并网容量和数量不断增加，会有多种类型的并网光伏逆变器（不同保护原理）接入同一并网点，导致互相干扰。当出现发电功率与负荷基本平衡的状况时，防孤岛检测的时间会明显增加，甚至可能出现检测失败。

由以上可知，现有光伏并网控制技术不具备电网友好型特征。随着光伏电源接入容量和数量的增加，现有并网逆变器的控制保护功能与技术将不能满足输配电网安全稳定运行的需要，会成为制约光伏电源并网的重要因素，因此有必要研究大规模并网光伏电源接入对输配电网的影响。

1.2.2 光伏电源大规模并网对配电网的影响

光伏并网发电系统一般是直接并入配电网或经中低压配电网接入互联特/超高压电网，其功率输出受环境因素影响很大，具有能量密度低、稳定性差、调节能力差的特点。光伏电源大规模并网发电将给配电网带来深刻影响，主要表现在以下几个方面。

(1) 潮流的双向流动。与传统辐射型配电网中单向潮流不同，光伏发电系统的接入会导致线路中潮流的双向流动，尤其是在大规模光伏电源接入的情况下，光伏发电产生的剩余能量将馈入大电网中，对原有保护设备之间的协调配合以及电压调节器的动作情况产生影响。

(2) 对系统电压的影响。光伏发电输出功率受环境因素影响较大，具有一定的不稳定性，同时逆变器的使用会带来一定的谐波电流。因此，大规模的光伏电源接入会对电能质量指标中的谐波含量、三相电压不平衡度、电压波动和闪变等产生较大的影响；而且配电网在接入光伏电源后，由于馈线上的传输功率减少，使沿馈线各负荷节点处的电压被抬高，可能导致一些负荷节点的电压偏移超标，负荷点电压被抬高的幅度与接入光伏电源的位置及总容量大小密切相关。

(3) 对系统保护的影响。在配电网中，短路保护一般采用过流保护加熔断器保护的方式。对于光伏渗透率高的网络，当馈电线路上发生短路故障时，可能由于光伏电源提供绝大部分的短路电流而导致馈电线路无法检测出短路故障，同时短路瞬间的电流峰值跟光

伏电源逆变器自身的控制性能有关。而且，一旦保护因故障动作跳闸，在光伏系统未从线路解列的情况下，可能形成由光伏系统供电的电力孤岛，将对自动重合闸产生非同期合闸和故障点电弧重燃等潜在威胁。

(4) 对电网运行控制的影响。光伏发电的不确定性使电网短期负荷预测准确性降低，增加了传统发电和运行计划编制的难度，断面交换功率的控制难度加大。光伏发电系统接入公共电网，使电网中电源点数量显著增加，且布点分散、单点规模小，大大增加了电源协调控制的难度。常规的无功调度及电压控制策略难以适应，可能在电网调峰、安全备用、电压稳定和频率安全稳定等方面产生一定影响，增加了电网运行控制的难度。因此，光伏发电大规模接入公共电网后，原有常规电源对电网运行的调整与控制能力被削弱，给电网安全稳定运行控制带来新问题。

(5) 对配电网设计、规划和营运的影响。随着越来越多的分布式电源接入配电网中，集中式发电所占比例将有所下降，电力网络的结构和控制方式可能会发生很大的改变，这种改变带来的挑战和机遇要求电力网络从设计、规划、营运和控制等方面进行升级换代。在可以预见的将来，大量被消费的电能将来自于低压配电网，提前对配电网的结构进行升级换代和优化显得尤为重要。另外，大量分布式光伏电源接入到配电网中后，用户侧可以主动参与能量管理和运营，使传统配电网运营计费模式不再适用。

1.2.3 光伏电源大规模并网带来的研究需求

随着光伏发电技术水平的提高和发电成本的不断降低，未来将有越来越多的分布式光伏电源接入到电网中。光伏电源的大规模并网带来了许多新的问题和研究需求，因此全面地开展光伏电源并网关键技术研究，对保障电网安全稳定运行、光伏电源安全可靠并网以及最大程度地利用太阳能发电资源具有重要意义。

1. 光伏发电系统实验环境的构建

为了能够准确地研究光伏电源接入对电网安全稳定和电能质量等带来的影响，有必要针对光伏发电系统建立相应的实验环境。通过研究光伏发电的特性，构建相应的光伏发电系统及其控制系统模型，完善现有的电力系统仿真平台，使其具备含光伏的电网分析计算能力。在此基础上，建立光伏发电系统并网的典型案例，包括典型的光伏发电系统运行方式、典型的控制策略等，并建立光伏发电系统并网的典型案例数据库，从而为研究光伏发电系统与电网间的相互影响提供良好的实验环境。

2. 光伏发电系统与电网相互作用机理的研究

大规模光伏电源接入电网后，将对电网的规划、运行、保护等方面带来深刻的影响。开展光伏发电系统与电网相互作用的研究，对揭示二者相互影响的作用规律及机理，进而提出相应的改进措施具有重要的意义，能够为新型电网系统进行技术升级和改造提供有力的理论依据。基于上述目的所建立的仿真平台，针对光伏电源输出随机、含有电力电子变换装置等特点，主要探讨以下问题：①电能质量扰动产生机理和分布规律；②光伏电源与电网的控制系统及故障过程相互作用机理；③光伏电源对电网的电压、功角和频率稳定运行的作用机理。研究目的就是要揭示出二者相互作用的本质，发展相关的理论与方法，为含大规模光伏发电系统的电网的稳定性分析和控制奠定理论基础。

3. 新型配电系统的协同规划与方法研究

当光伏发电系统接入配电系统后，配电系统将由原来单一电能分配的角色转变为集电能收集、电能传输和电能分配于一体的新型电力交换系统。光伏发电等分布式电源的接入对配电网的供电经济性和母线电压、潮流、短路电流、网络供电可靠性、电能质量等都产生影响，由此也对规划设计提出了新的要求。主要的问题和有待研究的内容包括：①大规模光伏电源的接入使得配电系统的负荷预测更加困难，而且传统的电网电源规划是根据预测的负荷水平和分布情况进行布点和容量选择以满足电力平衡，光伏电源接入后配电网变成了有源网络，因而传统电网的常规电源规划已不能满足要求。②传统的配电网网架结构主要包括放射式接线、树干式接线和环网式接线方式，其形式主要取决于对供电可靠性的要求。由于大规模光伏电源的接入，配电网中将会产生大量的随机性潮流，为满足这种随机功率的传输，需要研究现有的配电网能够承载多大的随机功率。③光伏发电输出功率随太阳辐照度变化，给电网的无功优化带来了许多不确定因素。

4. 含光伏发电系统的电网运行控制理论与技术研究

光伏电源接入电网后，由于其具有很强的随机性，与电网之间双向的功率交换导致潮流流向的不确定性，这些因素将会对电网的安全稳定运行产生影响。光伏的接入具有降低线路损耗、改善能源利用结构、提高能源利用率等优点，因此如何通过合理的经济调度来实现这些优势，也是亟待解决的问题。同时大量电力电子设备的使用会对电网造成谐波污染，单相光伏电源将加剧电网的三相不平衡水平，需要对电网运行中的电能质量问题进行深入的研究。反之，电网扰动也可能引起光伏发电系统的非正常运行，加剧电网受到的冲击。综上所述，对光伏电源接入的电网运行控制进行研究，可以从以下几个方面开展：光伏电源并网后的能量优化管理方法研究；含光伏电源的电网运行安全经济调度及优化控制方法研究；含光伏电源的电网无功调度和电压控制策略研究；含光伏电源的负荷预测研究；光伏电源接入对配电网安全稳定运行影响的研究；电网扰动下光伏发电系统运行特性的研究。

5. 含光伏发电系统的大电网协调保护系统研究

继电保护是保证电力系统安全稳定运行的重要基础，光伏电源接入电网后，改变了电网的网架拓扑结构，使系统故障后的电气特征发生了变化，从而对传统的故障检测和继电保护模式产生了一定的影响。针对含有高渗透率光伏电源的电网保护在实际应用中面临的理论和技术问题，需要开展的研究主要集中在以下几个方面：①并网光伏电源短路电流特性的研究与仿真计算模型的建立，需要提出相应的电源简化数学模型，正确反映短路电流外部故障特征；②含光伏电源电网继电保护系统的构建及整定计算原则的研究，针对不同的保护原理和配置模式提出相应的整定原则和方法；③保护设备之间的协调配合机制的研究等关键性问题研究，确保在光伏电源接入的情况下保护设备的正确动作。

6. 相关监测、保护与控制设备研发

通过分析研究光伏电源接入对电网的影响以及相互作用机理可知，有必要进行相关配套的检测、保护与控制设备开发，其中主要有以下几方面：①含光伏发电系统的保护设备的开发。由于光伏电源的接入，故障后的电气量变化复杂，需要开发相应的新的保护方法

与设备。②孤岛检测系统。出于用电安全和用电质量的考虑，需要迅速检测出孤岛，对分离系统部分和孤岛采取相应的调控措施。③实时监测控制系统。由于光伏电源的接入，需要监测的信息类型和范围以及协调控制的对象有所增加。④计量设施。光伏发电系统并网后，导致个别配电网区域内的潮流的双向流通，因此需要将已有的电能计量模式由单向改为双向计量模式。同时，由于光伏发电系统的发电成本仍然相对较高，如何在计量系统中合理地反映电价差别，也是个必须要研究的问题。

7. 光伏发电接入公共电网的技术标准与规范的健全

目前，由于包括光伏发电在内的分布式发电在我国的发展仍处于起步阶段，很多技术尚处于发展中，有关其设计、与公共电网接入的相关标准十分缺乏且远未成熟。健全光伏发电接入公共电网的技术标准与规范，研究并网光伏发电系统的技术参数、控制特性及承受电网扰动能力的技术要求与标准，研究光伏发电系统并网规模、接入电压等级、无功配置和电能质量等方面的技术标准，研究电网接纳光伏发电系统应具备的条件等技术标准与规范，将有利于引导与规范光伏发电等新能源分布式发电系统有序接入电网，确保这些新型发电系统及其控制设备不会对电网的安全稳定运行造成危害。