



国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国分布式电源 与微电网发展前景 及实现路径

ZHONGGUO FENBUSHI DIANYUAN
YU WEIDIANWANG FAZHAN QIANJING
JI SHIXIAN LUJING

蒋莉萍 李琼慧 黄碧斌 等 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

中国分布式电源 与微电网发展前景 及实现路径

ZHONGGUO FENBUSHI DIANYUAN
YU WEIDIANWANG FAZHAN QIANJING
JI SHIXIAN LUJING

蒋莉萍 李琼慧 黄碧斌 等 著

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从分布式电源与微电网的定义和特征的研究入手,在分析全球及中国分布式电源和微电网的发展现状和趋势的基础上,结合分布式电源与微电网发展定位和发展前景,对推动中国分布式电源与微电网发展六个关键问题,包括分布式电源的准许渗透率、并网成本、并网案例库、发展目标分解及分布式电源和配电网的协同规划等进行了系统研究,并从分布式电源的运营模式、并网运行管理、激励政策三方面研究了中国分布式能源与微电网发展的实现路径。

本书可供政府相关部门、能源电力相关行业从业者、高等院校相关专业的教师、学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国分布式电源与微电网发展前景及实现路径 / 蒋莉萍等著. —北京: 中国电力出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5198-1673-5

I. ①中… II. ①蒋… III. ①电源—研究②电网—研究 IV. ①TM91②TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 323799 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: 刘汝青 (010-63412382)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 王英磊 赵姗姗

责任印制: 藺义舟

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2017 年 12 月第一版

印 次: 2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 15.5

字 数: 256 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 88.00 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

项目组名单

蒋莉萍 李琼慧 黄碧斌 洪博文 胡 静

冯凯辉 王彩霞 闫 湖 汪晓露 戈 狄

谢国辉 樊 昊 王皓宇 周 倩 朱 元

雷雪姣 李梓仟 刘佳宁 时智勇 李娜娜

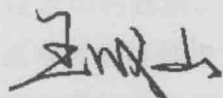
肖婉婷

序

分布式电源靠近用户侧向用户直接供电，便于实现多种能源形式的互补，有利于提高能源利用效率，扩大可再生能源利用规模，将成为未来电力系统的重要组成部分。微电网作为分布式电源接入电网的一种有效方式，有利于提高分布式电源利用效率和电网接纳能力，其关键技术正逐步应用在综合能源系统和增量配电网。随着我国能源转型和电力体制改革的快速推进，分布式电源和微电网发展已成为各方关注的热点问题。

本书结合国外实践、定性论证和定量支撑，从概念特点、发展基础、现状和前景、发展关键问题到实现路径，对我国分布式电源和微电网的发展进行了全景介绍。本书既有广度又有深度，既有宏观又有微观，既有理论又有应用。我相信本书的出版，将对分布式电源和微电网更快更好地发展起到积极的推动作用。

本书作者来自国网能源研究院有限公司分布式能源与储能规划运营创新研发团队，长期从事分布式电源与微电网领域的研究工作，曾主持了国家发展和改革委员会、国家能源局、国家电网公司等委托的数十项相关课题研究，成果为国家主管部门和国家电网公司提供了重要的决策参考。本书是由创新团队在其近年研究成果总结的基础上著作而成的，对于关注分布式电源与微电网发展的政府部门工作人员、科技人员，能源电力行业从业人员及其他读者都有重要的参考价值。



2017.12.7

前 言

分布式开发利用是能源电力发展的重要方向,发展分布式电源与微电网是扩大可再生能源利用规模、提高传统能源利用效率的有效途径,也是推进能源生产和消费革命、开放能源市场的重要途径。分布式电源与微电网是未来电力系统的重要组成部分,大力发展分布式电源与微电网对推动电力系统的转型发展具有深远意义。

国网能源研究院有限公司是从事软科学研究及重大决策咨询服务的综合性能源研究机构,长期从事能源电力发展战略和政策研究。2009年以来,国网能源研究院有限公司参与了国家发展和改革委员会以及国家能源局组织的分布式能源及微电网相关政策研究,受政府部门和企业委托进行了大量相关课题研究,积累了丰富的经验,形成了一系列成果。编写本书的目的,是希望与关注分布式电源和微电网发展的社会各界分享研究成果,并为相关政府部门、电力及相关行业从事分布式电源及微电网研究工作的有关人员、高等院校相关专业师生提供参考。

本书为“国家电网公司电力科技著作出版项目”,主要内容分成5篇,包括17章。第一篇为“概念与特征篇”,分析了分布式电源和微电网的发展历程,从定义的方法论出发,分析了分布式电源和微电网的定义和特征,并研究了分布式电源和微电网的自身技术特性和并网特性,包括3章;第二篇为“现状与基础篇”,分析了全球分布式电源和微电网的发展现状和趋势,并对中国分布式电源和微电网发展现状进行了梳理,从资源条件及开发潜力、技术装备水平和经济性等方面研究了发展基础,包括3章;第三篇为“发展篇”,是本书的重点,分析了中国分布式电源和微电网发展的定位和目标,并对分布式电源的准许渗透率、并网成本、并网案例库、发展目标分解及分布式电源和配电网的协同规划等关键问题开展了量化研究,包括6章;第四篇为“实现路径篇”,重点从分布式电源的运营模式、并网运行管理、激励政策等方面开展了深入研究,包括3

章；第五篇为“研究支撑篇”，给出了书中主要研究结论，以及政策实施效果评价指标测算等，包括 2 章。

在本书的编写过程中，得到了包括国家发展和改革委员会、国家能源局、国家电网公司、中国可再生能源学会、中国循环经济协会、中国光伏行业协会、美国国家可再生能源实验室等主管部门、业界机构及相关领导和专家的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢！

限于作者水平，虽然对书稿进行了反复研究推敲，但难免仍会存在疏漏与不足之处，恳请读者谅解并批评指正。

作 者
2017.11.18

目 录

中国分布式电源与微电网发展前景及实现路径

序
前言

第一篇 概念与特征篇

1	分布式电源与微电网的发展历程和定义特征	2
1.1	发展分布式电源与微电网的重要意义	2
1.2	分布式电源与微电网的发展历程	4
1.3	分布式电源与微电网的定义和特征	7
2	分布式电源与微电网的主要类型和技术特点	11
2.1	分布式电源的主要类型和技术特点	11
2.2	微电网的主要类型和技术特点	14
3	分布式电源并网特性及微电网功能	19
3.1	分布式电源并网特性	19
3.2	微电网的功能及适用性	27

第二篇 现状与基础篇

4	全球分布式电源与微电网的发展现状和趋势	32
4.1	全球分布式电源的发展现状及趋势	32
4.2	全球微电网的发展现状和趋势	37
5	中国分布式电源与微电网发展现状	43
5.1	中国分布式电源的发展现状	43

5.2 中国微电网研究与实践	47
----------------------	----

6 中国分布式电源与微电网发展基础	52
--------------------------------	-----------

6.1 资源条件及开发潜力	52
6.2 技术装备水平	55
6.3 经济性 & 社会承受能力	57
6.4 电网条件	60

第三篇 发 展 篇

7 中国分布式电源与微电网发展定位及发展目标	62
-------------------------------------	-----------

7.1 对分布式电源与微电网发展问题的几点认识	62
7.2 中国分布式电源与微电网的发展思路 & 原则	66
7.3 中国分布式电源与微电网发展规模预测	68
7.4 中国分布式电源与微电网发展路径	71

8 分布式电源准许渗透率	73
---------------------------	-----------

8.1 已开展的准许渗透率研究	73
8.2 基于电压 & 短路电流约束的准许渗透率计算方法	77
8.3 适应高渗透率分布式电源接入的技术措施评估	83

9 分布式电源并网成本	88
--------------------------	-----------

9.1 并网成本特点	88
9.2 并网成本构成	89
9.3 并网成本影响因素	91
9.4 典型分布式电源并网成本测算案例	96

10 分布式电源并网案例库	100
----------------------------	------------

10.1 典型并网运行方式	100
10.2 并网运行方式的影响因素	104

10.3 并网运行方式优化思路和案例库确定	106
-----------------------------	-----

11 分布式电源发展目标分解	111
-----------------------------	------------

11.1 影响分布式电源开发布局的关键因素	111
-----------------------------	-----

11.2 基于多因素权重优化的发展目标分解方法	113
-------------------------------	-----

11.3 实证研究：2020 年中国分布式光伏发展目标分解	119
-------------------------------------	-----

12 分布式电源和配电网的协同规划	125
--------------------------------	------------

12.1 大规模分布式电源接入对协同规划的要求	125
-------------------------------	-----

12.2 基于连续时间序列仿真的分布式电源和配电网协同规划方法	128
---------------------------------------	-----

12.3 各电压等级配电网实际案例	136
-------------------------	-----

12.4 基于我国典型实际案例的协同规划方法实证研究	140
----------------------------------	-----

第四篇 实现路径篇

13 分布式电源运营模式	146
---------------------------	------------

13.1 我国分布式电源运营模式实践探索	146
----------------------------	-----

13.2 新一轮电改对分布式电源运营创新的驱动	149
-------------------------------	-----

13.3 我国分布式电源典型运营模式及需要关注重点	150
---------------------------------	-----

14 分布式电源并网运行管理	157
-----------------------------	------------

14.1 典型分布式电源并网运行管理模式	157
----------------------------	-----

14.2 中国分布式电源并网运行管理现状	163
----------------------------	-----

14.3 中国分布式电源并网运行管理完善重点	168
------------------------------	-----

15 分布式电源激励政策	170
---------------------------	------------

15.1 分布式电源激励政策的特点	170
-------------------------	-----

15.2 国际分布式电源激励政策	171
------------------------	-----

15.3 我国分布式电源激励政策	178
------------------------	-----

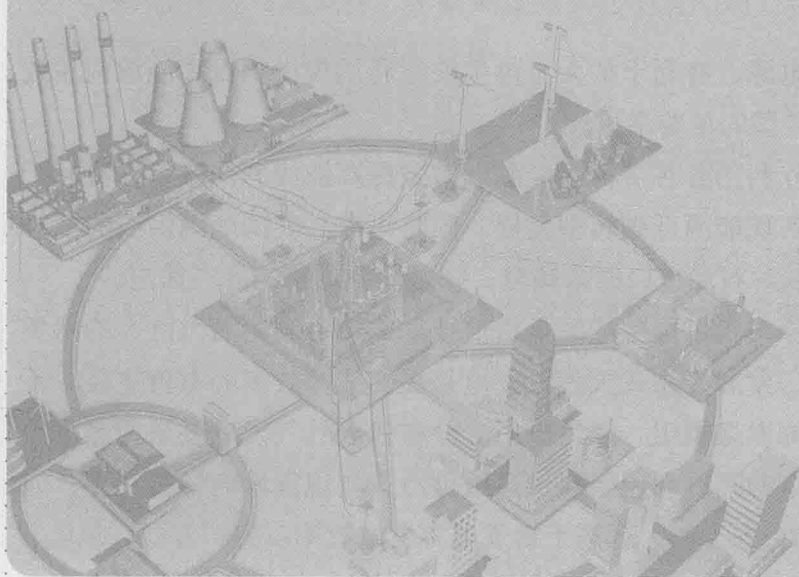
15.4 我国分布式光伏政策实施效果评价实证研究	187
--------------------------------	-----

第五篇 研究支撑篇

16	国外分布式电源接入电网适应性相关研究成果	198
16.1	欧盟相关研究	198
16.2	欧洲光伏协会的研究	202
16.3	德国能源署的研究	207
16.4	德国电网监管报告	209
17	我国分布式光伏政策实施效果评价指标测算	211
	附录	220
	参考文献	232

第一篇

概念与特征篇



分布式电源与微电网的发展历程 和定义特征

1.1 发展分布式电源与微电网的重要意义

近年来,随着能源技术的创新发展,能源发展呈现三大新趋势:一是世界能源低碳化进程进一步加快,天然气和非化石能源成为世界能源发展的主要方向;二是以智能化为特征的能源生产消费新模式开始涌现,分布式智能供能系统在工业园区、城镇社区、公用建筑和私人住宅开始应用;三是能源发展正在由主要依靠资源投入向主要依靠技术创新驱动转变,随着低风速风电、太阳能新材料、智能电网等技术的突破和商业化应用,能源系统形态正在发生深刻变化。

分布式电源作为能源低碳化转型、能源系统智能化及电力系统转型发展的载体,迎来了巨大发展机遇。大力发展分布式电源,加快可再生能源开发利用,提高能源系统效率,是落实“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的必然要求,对于加快推进能源转型发展,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系具有重要意义。

(1) 发展分布式电源,有利于扩大可再生能源利用规模和提高能源利用效率,是实现能源低碳转型的重要举措。

分布式电源可充分利用各种可再生能源、有效提高能源利用效率,有利于改善我国能源结构,实现能源低碳转型发展。同时可提高我国能源供应的多样性,在一定程度上降低对石油进口的依赖度,降低能源供给的潜在风险。

分布式天然气和分布式可再生能源是目前技术成熟、利用潜力巨大的两类分布式能源。一方面,发展分布式天然气发电是提高能源效率的有效途径。不同于传统的单一发电的燃煤机组、燃气电厂,分布式天然气发电多采用热电冷联供技术,可以在发电的同时利用余热供热或供冷,实现能源的梯级利用,能源综合利用效率可达70%~90%,远高于常规电源发电效率。另一方面,风电、

光伏发电等能量密度低,适合分布式开发利用。大力发展分布式可再生能源有利于扩大可再生能源利用规模,开辟可再生能源发展的新局面,有助于提高可再生能源在能源消费中的比重。

(2) 发展分布式电源,将使传统的发电、传输和配用方式发生重大变革,推动电力系统的转型发展。

随着近年来分布式电源技术(如风电、光伏发电、微型燃气轮机技术等)的逐步成熟和经济性的提高,分布式电源在提高能源利用率、改善安全性与解决环境污染方面的优势日益显现,可望成为集中供电方式的有益补充,并逐步成为未来电力系统的重要组成部分。

分布式电源大量接入驱动大电网向更加智能、更大互联方向发展。分布式电源改变了传统电力输送模式,必然要求主网网架结构更加坚强、功能更加完善,不仅能够应对分布式电源大量接入对大电网安全稳定的影响,还进一步要求主网与配电网建立起更加紧密的联系。德国、丹麦等分布式电源发展较快的国家,目前正积极推进大电网建设,增强骨干电网的网架结构和智能化调度控制水平,以提升适应大量分布式电源接入带来的挑战。

为适应分布式电源快速发展的新要求,电力行业自身也在主动求新求变,推出了微电网、智能电网、能源互联网等新概念、新思路,提高电力输配的自动化、智能化和信息化水平,提升电网优先接纳和优化配置分布式电源的水平。

(3) 发展分布式电源,是解决我国农村用能问题,特别是远离大电网的偏远地区 and 海岛用能问题的重要选择。

随着技术发展,“因地制宜、就地取材”的分布式供能系统将越来越多地满足新增用能需求,风能、太阳能、生物质能和地热能在新城镇、新农村能源供应体系中的作用将更加凸显。

在我国偏远地区 and 海岛,由于人口稀少且远离主干电网,采用传统供电模式存在较大的技术和资金困难,因地制宜地利用分布式电源,以户/村为单元组建不同形式和规模的离网型微电网,可以有效解决当地无电和缺电人口的用电难问题。

(4) 发展分布式电源,有利于体现“平等参与、自由分享”的现代社会文明和互联网理念。

发展分布式电源和微电网是满足民众自主参与能源活动意愿的需要。随着

社会的进步，发展和使用可再生能源已上升为一种新文化，成为公民社会建设的一个重要组成部分。在发达国家，民众投资建设分布式电源与经济性的关系越来越弱，更多的是出于一种公民的公共责任意识，作为一种私人拥有的消耗品，借此投资获利已成为第二位的目的。发展分布式电源已成为满足企业和民众参与节能减排和增加清洁能源供应意愿的途径，将成为解决世界各国环境问题、实现能源变革的有力推手，同时是一种权利的象征，营造的是节能减排的氛围，是实现普通人的“能源梦”，体现“平等参与、自由分享”的现代社会文明和互联网理念的重要能源形式。

1.2 分布式电源与微电网的发展历程

1.2.1 分布式电源发展历程

分布式电源从 20 世纪 70 年代开始发展，初期一直没有得到重视。随着经济的发展，以及实现能源高效、清洁、安全利用的需要，特别是对热、电、冷负荷需求的逐步普遍化，分布式电源的应用逐渐得到关注。分布式电源发展历程如图 1-1 所示，早期分布式电源以热电联产为主，近年来，随着新能源发电技术的成熟，风电、光伏发电也成为分布式电源的重要组成部分。

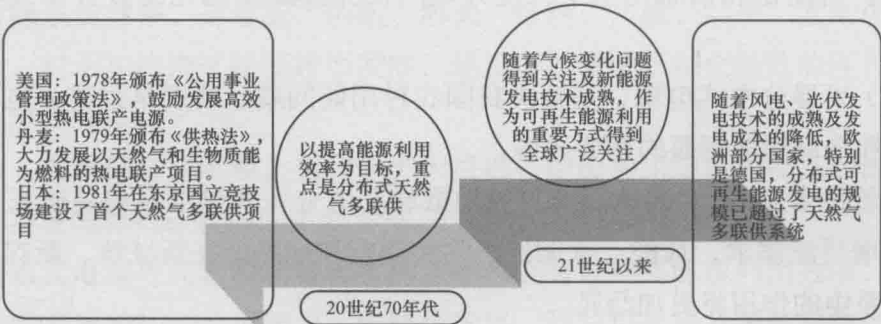


图 1-1 分布式电源发展历程

早期分布式电源的发展主要以提高能源利用效率为目标，发展的重点是分布式天然气多联供。1973 年和 1978 年的两次石油危机促使欧美等发达国家日益关注能源利用效率，作为天然气的高效利用方式，天然气热电联供系统受到高度重视。美国在 1978 年颁布了《公共事业管理政策法》Public Utilities Regulatory

Policies Act, PURPA), 鼓励发展包括天然气热电联供在内的高效小型热电联产电源, 并要求电力公司为符合能效标准的小型电源提供并网服务, 收购其上网电量。在 PURPA 及配套优惠政策的激励下, 美国的天然气多联供系统得到了快速发展, 通用电气公司等设备制造商也根据市场需求, 陆续推出了一系列小型燃气轮机和内燃机产品。丹麦在 1979 年颁布了供热法, 大力发展以天然气和生物质能为燃料的热电联产项目。日本于 1981 年在东京国立竞技场建设了首个天然气多联供项目。

随着气候变化问题得到关注及新能源发电技术的成熟, 分布式电源作为可再生能源利用的一种重要方式再次得到全球广泛关注。进入 21 世纪, 大力发展可再生能源是各国应对气候变化问题、减少温室气体排放的重要措施。欧盟提出了到 2020 年可再生能源占比达到 20% 的发展目标, 并以可再生能源的发展推动能源转型, 分布式电源作为可再生能源利用的一种重要方式再次得到重视。同时, 随着风电、光伏发电技术的成熟, 以及发电成本的降低, 欧洲部分国家, 特别是德国, 分布式可再生能源发电的发展规模已超过了天然气热电联供系统。

就我国情况来看, 20 世纪末和 21 世纪初, 我国处于经济快速增长阶段, 电力供需矛盾突出, 电力工业重点是加快电网互联和大机组建设。同时, 受限于资源禀赋条件, 我国天然气产量不足, 燃气轮机和内燃机设备国产化程度低, 难以有效支撑分布式天然气发电快速发展, 分布式光伏发电发展也面临成本制约。近年来, 随着光伏发电、风电等可再生能源发电成本的大幅降低, 以及天然气供应紧张局面的缓解和成本降低, 分布式电源逐步起步和发展。

1.2.2 微电网概念的提出

微电网最早是由美国在 20 世纪 90 年代提出的。微电网发展与经济社会发展阶段、电力系统与电网技术水平等相关。

美国最早提出微电网是为了解决供电可靠性问题。20 世纪美国的几次大停电事故引起了美国对输电系统可靠性的高度关注。进入后工业化时代, 美国电力需求趋于饱和, 同时受到征地、环评等因素制约, 美国输电线路建设困难, 难以通过加强输电网提高供电可靠性。与此同时, 分布式电源技术以其靠近负荷、运行灵活的特点, 在大电网发生故障时可紧急为用户供电, 很好地适应了负荷需求增长缓慢、输电网建设困难情况下提高电网供电可靠性的需要。为

充分挖掘分布式电源为电网和用户带来的价值与效益,美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)于1999年首次提出通过发展“微电网”提高供电可靠性的技术实现方案。随后,围绕微电网的相关技术研究和示范工程建设开始在全球范围内陆续开展。

欧盟和日本则将微电网作为高渗透率分布式可再生能源并网的一种解决方案。由于分布式可再生能源发电具有不可控和随机波动性,按照国际上通行的分布式电源并网技术标准要求,当电力系统发生故障时,分布式电源必须马上退出运行。为满足高渗透率分布式可再生能源并网的需要,欧盟和日本将发展微电网作为一种新型分布式能源网络化供应与管理的技术解决方案。伴随智能电网概念的提出,欧盟和日本已将微电网融入智能电网框架体系。

1.2.3 分布式电源与微电网的关系

(1) 微电网的概念是随着分布式电源的发展而提出的。

随着光伏发电、微型燃气轮机发电和分散风电等分布式电源快速发展,高渗透分布式电源的接入给传统电网带来很大的冲击和挑战。譬如,分布式可再生能源出力具有随机性和间歇性,可控性差;分布式电源的接入将改变传统配电网络不同电压等级之间潮流单向流动的基本特征,并可能严重影响正常电压水平、短路电流和供电可靠性。作为一种重要的技术解决方案,微电网被提出用于解决分布式电源接入带来的并网运行技术问题。微电网使得分布式电源不再是彼此孤立的单元,而成为通过多能互补和协调控制、以唯一的公共连接点(PCC)与电网相联的整体,实现分布式电源更安全、更友好和更可靠的接入。

(2) 微电网是分布式电源并网的一种高级技术形式。

为了解决分布式电源大规模并网带来的问题,通过把分布式电源、负荷、储能等设备融合形成微电网,可以有效降低分布式电源带来的不利影响,同时发挥其积极作用。微电网作为分布式电源的有效组织形式,除了能实现多种分布式电源的协调互补和安全经济运行外,还可为分布式电源和大电网提供友好的能量流和信息流窗口。微电网集成了保护与控制、测量与通信、预测与调度等多种技术,实现了分布式电源和负荷的就地平衡和自治运行,可充分发挥分布式电源价值,同时大大降低电网直接监控管理分布式电源的压力,为分布式电源友好接入电网提供了一种行之有效的解决方案。