

分布式发电与微电网 技术及应用

主 编 余建华

副主编 孟碧波 李瑞生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

分布式发电与微电网 技术及应用

主 编 余建华

副主编 孟碧波 李瑞生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书围绕国内外分布式发电与微电网发展实际,由浅入深地阐述了分布式发电与微电网技术,并结合案例说明了分布式发电、微电网技术在实践中的应用。

本书共分两篇 8 章,主要介绍了分布式发电概述、典型分布式电源、储能设备、分布式电源并网技术、分布式电源应用实例、微电网概述、微电网技术、微电网应用实例。

本书可供从事电力营销、电网规划、配电网运维、分布式发电安装与维护的广大工程技术人员参考,也可供高校电力类专业相关人员借鉴学习。

图书在版编目(CIP)数据

分布式发电与微电网技术及应用 / 余建华主编. —北京: 中国电力出版社, 2018.5
ISBN 978-7-5198-1951-4

I. ①分… II. ①余… III. ①发电—研究②电网—研究 IV. ①TM6②TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 076701 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: 翟巧珍 (010-63412351)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018 年 5 月第一版

印 次: 2018 年 5 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×1000 毫米 16 开本

印 张: 13.25

印 数: 202 千字

印 数: 0001—3000 册

定 价: 68.00 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

编委会

主任 詹学磊

副主任 李瑞生 孟碧波

委员 汪祥兵 余建华 蔡勇 秦昌平 王冬云

编写组

主编 余建华

副主编 孟碧波 李瑞生

参编 蔡勇 郑秀玉 舒欣 王盼 黄娜

陈伟 邹炜 文钰 雷亮 王冠



前言

当前，全球范围的能源危机和环境污染问题日显突出，新能源的开发和利用，已经成为人们生活的一种迫切需要。分布式发电采用清洁可再生能源，投资小，可实现多种资源及地域间的互补，在提高供电可靠性和运行灵活性等方面具有显著优势，受到了人们的广泛关注。目前，将分布式发电与大电网有机结合、良好互补，成为新世纪电力工业和能源产业的重要发展方向，分布式发电也是全球能源互联网的一个有机组成部分。

分布式发电具有“自发自用、余电上网”，局部实现“有功功率的就地平衡”，从而可以减少电网总容量，改善电网的峰谷性能、提高供电可靠性，是大电网的有力补充和有效支撑。分布式发电成为电力系统重要的发展趋势之一。随着分布式发电渗透率不断增加，其本身存在的一些问题也显现出来，分布式电源单机接入控制困难、成本高：

一方面，分布式电源相对大电网来说是一个不可控源，因此大系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源，以期减小其对大电网的冲击。2001年，美国颁布了 IEEE—P1547/D08《关于分布式电源与电力系统互联的标准草案》，并通过了有关法令让部分分布式发电系统上网运行，其中对分布式能源的并网标准作了规定：当电力系统发生故障时，分布式电源必须马上退出运行，这极大限制了分布式能源效能的充分发挥。

另一方面，目前配电网所具有无源辐射状的运行结构以及能量流动的单向、单路径特征，使得分布式发电必须以负荷形式并入和运行，即发电量必须小于安装地用户负荷，导致分布式发电能力在结构上就受到极大限制。

随着新技术的应用，尤其是电力电子技术和现代控制理论的发展，在 21 世纪初，美国学者提出了微电网的概念，微电网技术开始在美国、欧洲和日本得到广泛的研究。微电网解决了分布式电源并网的问题，并且由于所采用的先进的电力电子技术是灵活可控的，因此微电网可以利用分布式电源对微电网的潮

流流动进行有效调节。微电网作为对单一大电网的有益补充，其广泛应用的潜力巨大。目前，世界上一些主要发达国家和地区，如美国、欧盟、日本和加拿大等，都开展了对微电网的研究，并建设了一些实验示范工程；中国也高度重视对微电网的研究，并已建成了广东珠海市东澳岛兆瓦级智能微电网、浙江南麂岛微电网等微电网典型建设项目，实验示范工程是微电网相关技术及研究成果的集中验证和展示，对微电网的研究和应用均具有重要意义。

本书在编写过程中，得到了国网湖北省电力有限公司、许继电气股份有限公司、湖北东贝新能源有限公司等单位的大力支持，并参阅了相关书籍、文献及技术报告，在此，向相关单位和个人表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，加之很多新技术还在逐步成熟之中，书中难免存有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者
2018年3月



第一篇 分布式发电

➔ 1	分布式发电概述	3
1.1	分布式发电概念及特征	3
1.2	分布式发电种类	4
1.3	分布式发电现状	8
1.4	分布式发电发展趋势	11
➔ 2	典型分布式电源	13
2.1	风力发电	13
2.2	太阳能光伏发电	25
2.3	太阳能热发电	40
2.4	燃料电池	44
2.5	微型燃气轮机	47
➔ 3	储能设备	49
3.1	储能设备的作用	49
3.2	储能设备的种类与特性	50
3.3	分布式发电系统中储能装置的选择与配置	56
➔ 4	分布式电源并网技术	61
4.1	分布式电源并网控制	61
4.2	分布式电源的营销管理	78

4.3 光伏电源并网设备	92
--------------------	----

5 分布式电源应用实例	121
--------------------------	------------

5.1 系统设计	121
----------------	-----

5.2 设备采购	130
----------------	-----

5.3 设备安装	133
----------------	-----

第二篇 微 电 网

6 微电网概述	137
----------------------	------------

6.1 微电网的提出	137
------------------	-----

6.2 微电网构成及分类	139
--------------------	-----

6.3 微电网的现状	144
------------------	-----

6.4 微电网的发展	150
------------------	-----

7 微电网技术	157
----------------------	------------

7.1 微电网控制与运行技术	157
----------------------	-----

7.2 微电网保护技术	168
-------------------	-----

7.3 微电网监控及管理技术	172
----------------------	-----

7.4 微电网其他相关技术	179
---------------------	-----

7.5 微电网设备	183
-----------------	-----

7.6 微电网对配电网的影响	185
----------------------	-----

8 微电网应用实例	188
------------------------	------------

8.1 概述	188
--------------	-----

8.2 系统设计方案	189
------------------	-----

8.3 微电网运行	193
-----------------	-----

8.4 微电网试验	197
-----------------	-----

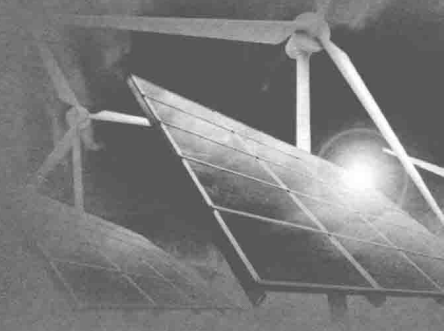
参考文献	202
-------------------	------------

1

分布式发电概述

第一篇

分布式发电



1.1 分布式发电的定义及分类

1.1.1 分布式发电

1.1.1.1 分布式发电的定义

1.1.1.2 分布式发电的分类

1.1.1.3 分布式发电的特点

1.1.1.4 分布式发电的优势

1.1.1.5 分布式发电的挑战

1.1.1.6 分布式发电的发展

1.1.1.7 分布式发电的未来

1.1.1.8 分布式发电的展望

1.1.1.9 分布式发电的总结

1.1.1.10 分布式发电的参考文献

1.1.1.11 分布式发电的致谢

1

分布式发电概述



当前,我国的电力系统多是以大机组、大电网、高电压为主要特征的集中式单一供电系统。然而,随着电网规模的日益扩大及经济发展需求,负荷对供电可靠性、电能质量要求越来越高。世界范围内的几次大面积停电事故已暴露出大规模集中供电方式存在的不足。与之同时,全球范围的能源危机和环境污染问题,也促使新能源的开发和利用成为一种迫切的需要。于是,为了弥补和完善大规模集中式电力系统运行难度大、环境污染严重等弊端,分布式发电(Distributed Generation, DG),因其投资小、多采用清洁可再生能源、可实现多种资源及地域间的互补并可提高供电可靠性和灵活性等优点,受到了人们的广泛关注。目前,将分布式发电与大电网有机结合、良好互补,已成为新世纪电力工业和能源产业的重要发展方向。

1.1 分布式发电概念及特征

到目前为止,国内外还没有分布式发电(DG)统一的、严格的定义。由于各国的政策不同以及理解差异,叫法也各不相同。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、布置在用户附近的发电单元。Q/GDW 11147—2013《分布式电源接入配电网设计规范》中对分布式发电的定义如下:分布式发电(分布式电源 DG)指在用户所在场地或附近建设安装、运行方式以用户端自发自用为主、多余电量上网,且在配电网系统平衡调节为特征的发电设施或有电力输出的能量综合梯级利用多联供设施。其中对具体接入容量的规定分两类(不含小水电):第一类为10kV及以下电压等级接入,且单个并网点总装机容量不超过6MW的发电项目;第二类为35kV电压等级接入,或10kV电压等级接入单个并网点总装机容量超过6MW,且年自发自用电量大于50%的发电项目。

与常规的集中式大电网供电相比，分布式发电系统具有如下特点：

(1) 装机规模小。分布式发电系统单机容量和发电规模一般都不大，通常在 50MW 以下。因而无须建设大规模的发电厂、变电站和配电站，其建设工期短、占地面积小、初始投资少。不过，分布式发电系统往往缺乏规模性效益，单位容量的造价要比集中式大机组发电高出很多。

(2) 靠近用户，就地利用。分布式发电系统通常靠近电力用户侧安装，直接接入中低压配电网，就近向负荷供电。故不需要长距离的输电线路，减少了输配电损耗，也无须为此占用大量的土地和空间建设输电走廊，建设也简单廉价。其产生的电磁辐射也远远低于常规的集中发电方式。

(3) 发电类型主要为可再生能源发电、资源综合利用发电等。分布式发电系统多采用清洁可再生能源，如风能、太阳能、生物质能、地热能等。相比于化石能源，可有效减少二氧化碳排放量，供电同时实现环保效益。另外这些能源因其能量密度较低且分散，常规的集中供电方式难以利用。分布式发电方式为可再生能源利用开辟了新方向。另外，分布式发电可以结合冷热电联产，因地制宜利用余热、余压以及可燃性废弃气体发电，或将发电的废热回收用于供热和制冷，通过不同循环的有机整合，满足用户多种需求的同时，实现能源的综合梯级利用，节能效应良好，其能源利用率可达到 80% 以上。

(4) 运行灵活，可满足特殊场合的需求。对于一些偏远的农牧地区、山区或岛屿，要形成一定规模、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。这些地区可采用分布式发电独立工作方式为用户供电，解决缺电问题。对于重要负荷，可采用分布式发电与大电网联合供电方式，在电网崩溃和意外灾害（如暴风雪、地震、战争、人为破坏）情况下，维持重要用户的供电，大大提高供电可靠性。另外，对于电力高峰期，还可通过分布式发电提供一部分电力，减轻电网供电压力。此外分布式发电系统还可以减少或缓解大型发电厂和电网的建设及改造，节约经济投资。

1.2 分布式发电种类

分布式发电系统利用各种可用的资源进行小规模分散式发电，其分类方式有多种。从使用的能源角度分类，主要可分为利用可再生能源、燃用化石能源

和燃用二次能源及垃圾燃料等。其中，利用的可再生能源主要有风能、太阳能、生物质、水能、海洋能、地热能等；燃用的化石能源有天然气、甲烷、汽油、柴油等，其燃烧动力装置有微型燃气轮机、燃气轮机、内燃机、常规的柴油发电机、燃料电池等；燃用的二次能源如氢能。从用户需求分类，可分为单纯供电方式、热电联产和热电冷三联产等方式。表 1.2-1 罗列了常见的分布式发电技术类型。

表 1.2-1 常见的分布式发电技术类型

发电形式	一次能源	输出方式	与系统的接口
风力发电	可再生能源	AC	变流器
水力发电	可再生能源	AC	直接连接
光伏发电	可再生能源	DC	逆变器
微型燃气轮机	化石燃料	AC	直接连接
生物质能发电	可再生能源或废弃物	AC	直接连接
燃料电池	化石燃料	DC	逆变器
太阳能热发电	可再生能源	AC	直接连接

1.2.1 风力发电

风力发电资源分布广泛，技术成熟，是近年来发展最迅速、应用最广泛的发电技术。风吹动叶轮，风力机转动，通过传动轴带动发电机发出电能。风力发电一般采用异步发电机，但也可采用同步发电机。对于风力发电系统，输出的有功功率由风速决定，会随风速的变化而变化，发电机吸收的无功功率也会变化。为使输出功率稳定，风力发电系统可采用定桨距失速控制或变桨距控制，使风机可在较宽的风速范围内输出稳定的功率。目前，在各种可再生能源发电中，风电的成本最低，在不远的将来即可与常规能源发电相竞争。

1.2.2 太阳能发电

太阳能发电技术主要包括两大类型，即太阳能热发电和太阳能光伏发电。太阳能热发电技术是指利用大规模镜面收集太阳光辐射出的热能，通过换热装置提供蒸汽，结合传统汽轮发电机工艺，从而达到发电的目的，主要适用于集

中式发电。太阳能光伏发电技术的能量转换器件则是太阳能电池，又叫光伏电池，由半导体材料构成。太阳能电池通过半导体的光生伏特效应直接将光能转化为电能。光伏发电基本不受地域限制，建设规模和场地选择灵活，安装便捷、维护简单、绿色环保。不过，其能量密度较低，受气象条件的影响较大，初期建设成本较高。近年来，太阳能光伏发电技术发展极其迅速，其应用也非常广泛，上至航天器下至家用电源，大到兆瓦级电站小到玩具，光伏电源无处不在。

1.2.3 微型燃气轮机发电

微型燃气轮机发电系统主要由微型燃气轮机、发电机和数字电力控制器等部分组成，以汽油、柴油、天然气、甲烷等为燃料。其中微型燃气轮机中设置了回热循环，使其能源利用效率大大提高。该系统具有质量轻、体积小、多燃料、低噪声、低油耗、污染少、高可靠、长寿命等一系列优点，是目前应用较为广泛的一种分布式电源。

1.2.4 生物质能发电

生物质能是太阳能的一种表现形式，其直接或间接来源于绿色植物的光合作用。生物质能发电利用生物质所具有的生物质能进行发电，主要以农业、林业和工业废弃物、垃圾为原料，如薪材、农林作物、生活垃圾污水等，将其转化为可驱动发电机的能量形式，如燃气、燃油、酒精等，再按照通用的发电技术发电。其发电形式主要有农林废弃物直接燃烧发电、农林废弃物气化发电、沼气发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气化发电等。由于生物质能的分布广泛、总量丰富、取之不尽、用之不竭，并且可变废为宝，故近几年生物质能发电在国内外受到了广泛的关注，其推广应用也比较成功。

1.2.5 燃料电池

燃料电池并不需要燃烧，而是一种将化学能转化为直流电能的电化学装置，可直接将燃料（天然气、煤气、石油等）中的氢气借助电解质与空气中的氧气发生化学反应。其中氢气释放电子携带正电荷，氧气从氢气中获得电子携

带负电荷，两者结合成为中性的水。电子的转移，加到外部连接的负载上，实现对负载供电。其过程简单，效率高、无噪声且清洁环保。目前，燃料电池的成本还比较高，暂时尚未广泛地商业化应用。

1.2.6 海洋能发电

海洋能指依附在海水中的可再生能源，主要有潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能、海水盐差能等多种能源形态，均可用于发电。海洋能分布广泛、蕴藏丰富、清洁无污染，但能量密度低、地域性强，因而开发困难并有一定的局限。整体而言，海洋能发电仍处于发展的初级阶段，目前已经实用化的主要有潮汐发电和小型波浪发电技术。其中潮汐发电技术较成熟、应用规模也比较大。波浪能发电则是将海面波浪上下运动的动能转化为电能，规模较小，技术有待提高。

1.2.7 地热发电

地热发电是利用地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术。其原理与火力发电类似，首先把地热能转换为机械能，再把机械能转换为电能，只是不需要燃料和锅炉。相对于太阳能和风能的波动性，地热能发电的输出功率更加稳定可靠。相比于水电、火电、核电，其建设投资少、运行成本低、设备的利用时间长且可大大减少环境污染。

1.2.8 小型水力发电

小型水力发电是指小的水电站及与其相配套的小电网。从形式上分小型水力发电有引水式、堤坝式、混合式和抽水蓄能式四种基本形式。

不同种类的分布式电源，由于发电原理不同，设备差异较大，各自具备独特的技术特征。第2章将对主要风电和光伏发电进行介绍。通常在实际应用中，基于系统稳定性和用电需求，分布式发电系统中还需要加入一些储能装置，如蓄电池储能、抽水储能、超级电容储能、超导磁储能、飞轮储能以及压缩空气储能等，存储一定数量的电能，以应对突发事件或负荷变化。具体技术将在本书第3章展开讨论。

1.3 分布式发电现状

在能源危机与环境恶化的双重压力下，分布式发电作为传统供电方式的一种补充，逐渐得到广泛应用并扮演着越来越重要的角色。

1.3.1 国外分布式发电研究现状

美国是世界上最早研究分布式发电的国家之一，自 20 世纪 70 年代以来，从小型热电联产系统到如今广泛使用的冷、热、电三联供系统，分布式发电得到了快速的发展。美国为推动分布式发电的发展，制定了很多成效显著的政策。1978 年，美国颁布了《公用设备管理政策法案》以及相关的税收优惠政策，促进了热电联产的快速发展，提高了能源利用效率。2001 年，美国颁布了《关于分布式电源与电力系统互联的标准草案》，正式允许分布式电源并网运行，用户可以向大电网出售多余电力；2007~2009 年期间，美国又颁布了一系列的新能源政策，大力发展可再生能源。2008 年，美国的风电装机容量达到世界第一。综合而言，美国的分布式发电主要经历了三个不同的发展阶段，即从独立、小型的热电联产到可以并网售电的分布式发电系统，再到与可再生能源相结合的分布式电源系统。

美国油气资源丰富，管道分布广泛，分布式发电项目主要以天然气热电联产为主。截至 2016 年，美国已建设了超过 6000 座分布式能源站，分布式电源市场高达 10 多亿美元。计划到 2020 年，其分布式发电装机总量达到 1.87 亿 kW，占总装机量的 29%。由于美国电力行业发生过几次较大的停电事故，因此美国分布式电源的发展特别注重供电的安全可靠性。

日本是高度发达的工业化国家，其能源需求量很大。同时，日本又是资源极其匮乏的国家，本国能源供应严重不足，发电所需要的能源主要依赖于进口。因此日本非常重视可再生资源的开发，很早就开始利用以太阳能、风能为代表的可再生能源，大力推广太阳能光伏发电、风力发电技术等。同时，日本也特别注重提高能源利用效率，颁布了一系列相关政策。1974 年，日本出台了居民屋顶光伏发电系统补贴政策；1986 年，日本发布了《并网技术要求指导方

针》，为分布式电源的并网提供了依据；1995年，日本修订了《电力法》和《并网技术要求指导方针》，允许分布式电源业主将多余的电力卖给供电公司，并享受政府的补贴、融资等优惠政策；2005~2008年，日本又制订了京都议定书目标计划，确立热电联产的有效作用，将分布式热电联产确定为能源高度利用技术革新，并在医院、宾馆、钢铁、石油化工等领域大力推广；2010年，日本提出建设低碳社会方针，出台促进天然气热电联产系统引进的规划。2011年，东京发生大地震后，更加注重分布式电源的发展。这些政策均极大地促进了日本分布式发电的发展。截至2015年，日本的分布式能源发电量占比已达到14%。

欧洲电力的发展与美国、日本有所不同，在发展电力时更强调电力系统对环境的影响。近年来，欧洲发电装机量的增加主要依靠新能源或可再生能源，其能源发展的最终目标是分布式发电而不是大规模的集中式发电。德国是全球分布式发电装机容量最多的国家，已经超过4000万kW，其光伏电站90%通过分布式系统建立起来。德国充分利用居民和公用设施的屋顶建立分布式系统，风电也多是分布式形式。分布式系统成为德国近年来发展可再生能源的主要方式。德国分布式能源装机容量占总装机量的20%。丹麦是分布式发电技术最为成熟的国家之一，1990年以来，丹麦的大型发电厂装机容量几乎没有增加，新增的装机容量主要是安装在用户侧或是区域化的分布式能源电站和可再生能源电站。截至目前，丹麦分布式装机容量超过全国总装机量的53%。丹麦的分布式电站一般只为本地负荷供电，将太阳能光伏电池板或小型燃气轮机安装在能源消耗地区，用来补充或取代大电网集中式供电。丹麦政府为鼓励发展分布式发电制定了一系列有效的法律、政策，先后制定了《供热法》《电力供应法》《全国天然气供应法》等，明确制定了支持分布式发电的相关法律法规。荷兰政府大力扶持分布式发电的发展，启动了热电联产激励计划，重点鼓励热电联产形式的分布式发电。荷兰的大部分分布式发电项目都是与工业企业联合投资建设的，这一特点也使得分布式发电在荷兰得到快速发展。荷兰政府规定，其热电联产分布式发电可连接到电网，电力部门必须接受此类项目的电力。英国的分布式发电主要着眼于环境保护和温室气体减排，发展分布式发电是英国调整治理国内碳排放的重点途径之一。英国政府制定了相关政策，降低分布式电能上网费用，鼓励家庭用户建设拥有小型的分布式发电设备，在供给家庭自发自用