

继升借

分布式能源与微电网

刘学岗 主编

分布式能源与微电网

刘学岗 主编



九州出版社
JIUZHOU PRESS

图书在版编目(CIP)数据

分布式能源与微电网 / 刘学岗主编. -- 北京 : 九州出版社, 2017.10

ISBN 978-7-5108-6296-0

I. ①分… II. ①刘… III. ①电网—电力工程—研究
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 261570 号

分布式能源与微电网

作 者: 刘学岗 主编

出版发行: 九州出版社

地 址: 北京市西城区阜外大街甲 35 号(100037)

发行电话: (010)68992190/3/5/6

网 址: www.jiuzhoupress.com

电子信箱: jiuzhou@jiuzhoupress.com

印 刷: 北京朗翔印刷有限公司

开 本: 710 毫米×1000 毫米 16 开

印 张: 17.5

字 数: 260 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5108-6296-0

定 价: 59.00 元

★ 版权所有 侵权必究 ★

前言

近年来,以可再生能源为主的分布式发电技术得到了快速发展,成为大系统电能供应不可缺少的有益补充,集中式与分布式电源的有机结合将是 21 世纪电力工业和能源产业的重要发展方向。分布式发电以其优良的环保性能和与大电网良好的互补性,成为世界能源系统发展的热点之一,也为可再生能源的利用开辟了新的方向。分布式电源易于实现模块化设计生产和灵活控制,启动和停运方便快捷,在以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征的智能电网中可以发挥相当重要的作用。

与常规的集中式大电源相比,用分布式发电系统提供电能具有很多特点:分布式发电技术靠近用户,损耗小;能源利用效率高;建设容易,投资少;污染少,环境相容性好。分布式发电还可以实现多种资源及地域之间的互补,而且运行灵活,安全可靠有保障。2008 年初,中国南方发生了严重的冰灾,大量集中式大电源停运,但是一些地方的小火电厂、小水电厂没有停运,发挥了一定的作用。

电力企业信息化是指信息技术在电力企业中的应用,是电力企业的生产、调度、设计、计划、基建等环节应用信息技术全过程的统称,是电力企业在信息技术的驱动下由传统工业向高度集约化、高度知识化、高度技术化工业转变的过程,是电力企业规范管理、提高效率、赢得竞争优势、树立良好形象的有效手段。电力企业信息化实现的障碍不在于技术,而在于企业管理者的观念,在于企业管理者和信息技术工作者之间的有效沟通。

节能环保和安全运行是智能电网的两个重要任务。为了人类社会的可持续发展,必须大量节约不可再生能源,必须大幅度减少二氧化碳排放;为了确保电网的安全稳定,负荷中心必须拥有一定比例的电源,形成电能就地平衡的运行模式。这样的背景下,集负荷、电源及其调节手段为一体的微电网应运而生。

本书合计十五万余字。由来自兴泰发电有限责任公司的刘学岗编写,在编写过程中参考借鉴了一些专家学者的相关资料和研究成果,在此特向他们表示感谢。由于编写时间仓促,编写水平有限,不足之处在所难免,恳请专家和广大读者提出宝贵意见,予以批评改正,以便改进。

目 录

第一章 概述.....	1
第一节 分布式电源的基本概念及种类.....	2
第二节 分布式电源在国内外的发展状况.....	8
第三节 分布式电源发展对配电网的作用与影响.....	9
第四节 智能配电网与分布式电源.....	14
第五节 分布式电源控制与运行技术基础.....	17
第二章 分布式电源中的功率变换技术基础.....	18
第一节 电力电子器件特性及其发展.....	19
第二节 电力电子变换电路及其控制基础.....	23
第三节 PWM 原理及其控制方法.....	32
第四节 电力电子技术在分布式发电中的应用.....	41
二、分布式电源并网逆变器的主要拓扑结构.....	47
第三章 风力发电控制与运行.....	53
第一节 风力发电基本原理与特性.....	53
第二节 风力发电稳态运行.....	58
第三节 风力发电的并网、解列与故障运行.....	67
第四章 分布式光伏发电控制与运行.....	82
第一节 光伏发电基本原理与特性.....	82
第二节 分布式光伏发电稳态运行.....	86
第三节 分布式光伏发电的并网、解列与故障运行.....	97
第五章 其他类型分布式电源.....	107
第一节 微型燃气轮机.....	107
第二节 生物质能发电.....	113
第三节 燃料电池.....	123
第六章 分布式发电系统中的储能技术.....	131

第一节 储能设备在分布式发电系统中的作用.....	131
第二节 储能系统的种类与特性.....	134
第三节 储能系统的数学模型.....	141
第四节 分布式发电系统中的储能配置.....	154
第七章 分布式电源与电能质量控制.....	160
第一节 电能质量问题概述.....	160
第二节 分布式电源对电网电能质量的作用机理.....	169
第三节 电能质量的控制和改善措施.....	177
第四节 利用分布式电源改善电能质量.....	185
第八章 电力企业信息化管理.....	188
第一节 信息及信息化管理.....	188
第二节 集散控制系统.....	190
第三节 电厂管理信息系统.....	192
第四节 电厂厂级监控信息系统.....	201
第九章 微电网概述.....	209
第一节 微电网的发展历程.....	209
第二节 国外微电网现状及分析.....	212
第三节 国内微电网现状及分析.....	215
第四节 微电网的展望.....	217
第十章 微电网的构成与分类.....	218
第一节 微电网的构成.....	218
第二节 微电网的体系结构.....	220
第三节 微电网的运行模式.....	223
第四节 微电网的控制模式.....	225
第五节 微电网的分类.....	230
第十一章 微电网的控制及运行.....	234
第一节 独立微电网三态控制.....	234
第二节 微电网的逆变器控制.....	238
第三节 微电网的并离网控制.....	241

第四节 微电网的运行.....	249
第十二章 微电网的保护.....	253
第一节 DG 特殊的故障特性.....	253
第二节 微电网接入对配电网继电保护的影响.....	254
第三节 微电网运行保护策略.....	256
第四节 微电网接入配电网保护方案.....	258
第十三章 微电网的监控与能量管理.....	260
第一节 微电网的监控.....	260
第二节 微电网能量管理.....	264
第三节 微电网的优化控制.....	268

第一章 概述

当今世界的电力系统大都是以大机组、大电网、高电压为主要特征的单一供电系统，世界范围内的能源危机、电力危机与大面积停电事故已暴露“集中发电”的电力系统存在的不足之处，集中发电的电力系统已经不能完全满足对电力供应质量与安全可靠性的要求。分布式电源（Distributed Generation/Generator, DG）以其投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点日益成为人们研究的热点。

大电网系统与分布式电源系统相结合是节省投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性的有效方法，也是电力系统发展的方向。从 20 世纪 80 年代末开始，世界电力工业已呈现出由传统的集中供电模式向集中和分散相结合的供电模式过渡的趋势。在常规能源供应渐趋紧张、环境问题日益严峻的今天，分布式电源相关技术得以加速发展，总装机容量不断提升。英国、美国、日本等发达国家在进行能源结构调整过程中，已经把 DG 技术放在了相当重要的位置上。随着我国燃料结构的变化，高峰期电力负荷越来越大，也需要加快分布式电源的发展，以进一步优化供电模式，降低环境污染，保障供电安全。

分布式发电技术涉及能源、材料、机械、环保、控制等诸多领域，是一个典型的多学科交叉的系统性工程，其应用与能源、技术发展、环保和电力市场等都有关系，大规模并网后对传统的电力系统分析、控制及保护等也有深远的影响，还将引发电力市场、用户管理等方面的变革。

第一节 分布式电源的基本概念及种类

分布式电源这个概念是从 1978 年美国《公共事业管理政策法》(PURRA) 公布后先正式在美国推广, 然后被其他国家接受的。由于各国政策的不同, 不同国家对其理解也有所差异, 因此到目前为止并没有一个统一的、严格的定义, 许多文献中也称之为分散电源 (Dispersed Generation) 或嵌入式发电 (Embedded Generation)。一般而言, 分布式电源是指将发电系统以小规模 (发电功率为数千瓦至 50 Mw 小型模块式)、分散式的方式置在用户附近, 可独立输出电能的系统。这些电源由电力部门、电力用户或第三方所有, 用以满足电力系统和用户特定的要求, 其主要特点包括以下几个方面。

- (1) 规模不大且分布在负荷附近;
- (2) 满足一些特殊用户的需求、支持已有配电网的经济运行;
- (3) 未经规划的或非中心调度控制的电力生产方式;
- (4) 能源利用效率较高或利用可再生能源发电等。

分布式电源一般采取与配电系统并联运行或采用独立小电网的运行方式, 其本身并非一种全新的发电形式。实际上, 一些工厂或大型电力用户, 他们自备的一些发电机组在系统电源停供时, 作为一种临时电源, 使用以提高自身的供电可靠性, 可视为分布式电源发展的初期阶段, 这种方式在国外发达国家已得到很大程度上的利用。类似作为紧急备用电源使用的小型柴油发电机组以及我国早期的燃煤自备小热电厂, 虽属于分布式发电的范畴, 但由于其技术性能差、效率低下, 或对环保有影响, 已逐渐被淘汰或取代。目前, 所谓的分布式电源通常并非指上述采用柴油发电机组的紧急备用电源或燃煤自备小热电厂, 更多的是指微型燃气轮机、燃料电池或是包括风力、太阳能、生物质能等在内的可再生能源发电系统, 如表 1-1 所示。实际应用时, 分布式发电系统中往往还加入有各种储能装置, 如蓄电池储能、超导储能、超级电容器储能、飞轮储能和压缩空气储能等。

表 1-1 分布式能源的主要类型

技术类型	一次能源	输出方式	与系统的接口	小型 (< 100kW)	中型 (100~1000kW)	大型 (> 1MW)
微型燃气轮机	化石燃料	AC	直接连接			√
地热发电	可再生能源	AC	直接连接		√	√
水力发电	可再生能源	AC	直接连接		√	√
风力发电	可再生能源	DC	逆变器	√	√	√
光伏系统	可再生能源	DC	逆变器	√	√	
燃料电池	化石燃料	DC	逆变器	√	√	√
太阳能发电	可再生能源	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	√	√	√
具有同步感应发电机的往复 式引擎	化学燃料	AC	直接连接	√	√	√

不同种类的分布式电源由于发电原理不同，成本差异较大，具备各自独特的技术特点，应用中需要全面考虑各方面因素。

表 1-2 分布式电源的造价及特点

造价及特点	风力发电机	微型燃气轮机	燃料电池	光伏电池
功率范围 (kW)	50~2000	30~75	5~2000	1~100
工程造价 (\$/kW)	1000~1500	1000~1500	3000~4000	1500~6500
发电成本 (¢/kWh)	5.5~15	7.5~10	10~15	15~20
环境影响	无废气排放、有 噪声、景观影响	有废气排放，但比常 规发电机组污染轻	无污染	无污染
输出功率特点	不平稳、受风力 影响	功率平稳、调节性好	功率平稳	不平稳、功 率密度低

微型燃气轮机是以天然气、甲烷、汽油、柴油为燃料的超小型燃气轮机，具有体积小、质量轻、效率高、污染小、运行维护简单等特点，是目前最成熟、最具商业竞争力的分布式电源，目前已有美国、欧洲、日本的多家公司将多个系列的微型燃气轮机产品投入了国际市场。

此类发电机组由微型燃气轮机、燃气轮机直接驱动的内置式高速逆变发电机和数字电力控制器等部分组成，通过从离心式压气机出来的高压空气先在回热器内由涡轮排气预热，然后进入燃烧室与燃料混合、燃烧，高温燃气送入向心式涡轮做功，直接带动高速发电机发电。

发电机首先发出高频交流电，然后转换成高压直流电，再转换为交流电供用户使用。

燃料电池是一种在等温状态下直接将化学能转变为直流电能的电化学装置，由阳极、阴极和夹在这两个电极中间的固态或液态电解质组成。

燃料电池工作时，并不需要燃烧，而是直接将燃料（天然气、煤制气、石油等）中的氢气借助于电解质与空气中的氧气发生化学反应，在生成水的同时进行发电，相当于电解水的逆过程，即通过氢和氧的化合释放出电能。

这一过程中的副产品主要是水蒸气，因而对环境无任何污染。由于工作

时需要连续地向其供给燃料和氧化剂，才称之为燃料电池。

自世界首只燃料电池于 1940 年诞生以来，作为一种清洁、高效的新型发电技术，燃料电池正受到越来越多的重视和广泛的研究应用。

就发电能力和运行可靠性而言，目前来看磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池和固体氧化物燃料电池最有可能作为分布式电源用于区域性供电。

风能是指太阳辐射造成地球各部分受热不均匀，引起各地温差和气压不同，导致空气运动而产生的能量。风力发电是将风能转化为电能的一种发电技术，也是目前新能源开发技术中最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式。

风力发电系统由一台或多台电机上并联运行的风力发电机组组成，主要通过原动机（风力机）捕获风能，并将其转化为机械能，然后再由发电机将机械能转化为电能，最后并网运行。

风力发电机一般分为鼠笼式异步发电机、转差可调的绕线式异步发电机、双馈异步发电机、低速同步发电机等，可直接并网运行或通过逆变器并网运行。

太阳能发电分为热能发电和光伏发电两类。热能发电是通过聚集太阳能，将某种物质加热，直接或间接地产生蒸汽，驱动汽轮发电机产生电能；光伏发电主要由太阳能电池板（组件）、控制器和逆变器三大部分组成，依据半导体界面的光生伏特效应原理，利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能，具有不消耗燃料、不受地域限制、规模灵活、无污染、安全可靠、维护简单等优点，是目前太阳能发电的主要形式。

光伏发电系统分为独立光伏系统和并网光伏系统，并网型光伏发电系统是光伏发电系统的主流趋势，又可分为住宅用并网光伏发电系统和集中式并网光伏发电系统。前者特点是光伏发电系统的电直接分配给用户负载，多余或不足的电力通过电网来调节；后者特点是光伏发电系统的电被直接输送到电网上，由电网把电力统一分配给各用户。

生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，是以生物质为载体的能量，它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，是取之不尽、用之不竭的能源资源。

生物质能发电主要利用农业、林业和工业废弃物，甚至城市垃圾为原料，首先将生物质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进行发电，主要包括生物质直燃发电、生物质气化发电和沼气发电等几类。

生物质能发电起源于 20 世纪 70 年代，近年来，国内外能源、电力供求日趋紧张，生物智能发电受到更为广泛的关注且其推广应用得以持续加速。

基于系统稳定性和经济性的考虑，分布式发电系统要存储一定数量的电能，用以应付突发事件和负荷变化，因此分布式发电总是与储能装置紧密联系在一起。

概括而言，储能装置在分布式发电中的作用主要有以下四个方面。

- (1) 平衡发电量和用电量。
- (2) 充当备用或应急电源。
- (3) 改善电能质量，维持系统稳定。
- (4) 改善分布式系统的可控性。

目前存在多种储能方式，具体可分为化学储能和物理储能两类。化学储能方式主要有蓄电池储能和电容器储能；物理储能方式主要有飞轮储能、抽水蓄能、超导储能和压缩空气储能。

蓄电池是目前在电力系统中应用最有前途的储能装置之一，在分布式发电系统中应用最为广泛。由于技术的限制，蓄电池也存在投资高、寿命短、环境污染等诸多问题。但就目前的状况而言，蓄电池仍会在一段时间内得到广泛应用。

超级电容器存储容量是普通电容器的 20~1000 倍。与传统的蓄电池比较，超级电容器能量密度高，充放电循环寿命和能量储存寿命长，同时在工作过程中没有运动部件，维护工作少、可靠性高，应用于小型的分布式发电装置具有一定优势。

飞轮储能是一种新型的机械储能方式，它将能量以动能的形式存储在高速旋转的飞轮质量中。具有效率高、建设周期短、寿命长、高储能量、充电快捷、充放次数高的特点，在分布式发电中应用前景广阔。

超导储能系统将能量存储在由电流超导线圈的直流电流产生的磁场中。

超导储能系统的超导线圈需放置在温度极低的环境下，这是目前利用超导储能的瓶颈。在分布式发电系统中，超导储能单元常用于孤岛型的风力发电系统和光伏发电系统。

随着风力发电向规模化、产业化发展，以及装置成本的降低，超导储能系统也将在并网型分布式发电系统中大量应用。

压缩空气储能可通过电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气，将空气高压密封在报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井中，而在电网负荷高峰期释放压缩的空气推动汽轮机发电，虽然建设投资和发电成本低于抽水蓄能方式，但相对能量密度低，且由于地形条件限制，尚处于产业化初期，技术及经济性还有待进一步观察。

第二节 分布式电源在国内外的的发展状况

在能源需求与环境保护的双重压力下，国际能源界已将更多目光投向了既可提高传统能源利用率又能充分利用各种可再生能源的分布式发电供能技术的相关研究领域。在分布式发电技术应用最早的欧洲，丹麦、芬兰、挪威等国家现有的分布式电源装机容量已接近或超过其总装机容量的 50%，为保持和加强在可再生能源和分布式发电供能技术上的优势地位。

欧盟自 2001 年开始资助实施的“可再生能源和分布式发电在欧洲电网中的集成应用（IRED）”项目，在世界范围内，吸引了超过 100 家各类研究机构参加；美国政府也组织包括加州大学伯克利分校、威斯康星大学、EPRI、ABB 在内的 40 多家高校、研究机构和企业开展了与分布式发电供能技术相关的工作，预计 2020 年分布式电源装机容量将达到 25%；日本则很早就开展了分布式发电供能技术的理论和实用化研究，并在超级电容器、燃料电池、潮汐发电、光伏发电等技术上处于领先地位。

目前，全球范围内太阳能光伏发电技术和风力发电技术等已经较为成熟。有资料表明，太阳能电池的总产量正以每年 30%~40% 的速度持续增长，风力发电总装机容量正以 30% 以上的年平均增长率增加。德国、美国、荷兰等国先后提出“光伏屋顶计划”，德国、丹麦等国家还在规划大规模的海上风力场项目。在世界范围内对未来电力市场的预测表明，世界市场预期的分布式发电容量将会达到每年 20 GW，新增分布式电源总容量将会占新增电源总容量的 20%。到 2050 年，一些发达国家利用新能源发电可能占到本国电力市场的 30%~50%。

分布式发电是集中供电方式技术不可缺少的重要补充，将成为未来能源领域的一个重要发展方向。虽然目前国内对分布式电源的研究与应用尚处于起步阶段，但发展很快，尤其是小水电和风力发电，预计到 2020 年，水电总装机容量将达到 3 亿千瓦以上，生物质发电达到 2000 万千瓦，风电达到 3000 万千瓦、太阳能发电达到 200 万千瓦，力争使可再生能源发电装机占总电力装机容量的 30% 以上。

第三节 分布式电源发展对配电网的作用与影响

一、分布式电源并网运行的优点

分布式电源通常接入中压或低压配电系统,可有效弥补大规模集中发电、输电的不足,近年来得到各国的普遍重视与长足发展,其优点主要包括以下几点。

1.节能效果好

分布式电源与传统的大电网供电有两个明显的区别:①传统大电网电源和用电负荷距离非常远,一般都要通过远距离输送给用户,而分布式电源则靠近用户现场,因而网损明显降低;②传统大电网供电模式下能量形式单一,而分布式电源则能够提供多种形式的能量,是典型的“冷、热、电”三联产,能实现能量的梯级利用,符合“温度对口、梯级利用”的原则,从而大大提高了能源的总体利用效率。

2.环境污染少

分布式电源以天然气、轻油等清洁能源和风力、水力、潮汐、地热等可再生能源为发电原料,能够减少二氧化碳、一氧化碳、硫化物和氮化物等有害气体的排放。同时,出于分布式能源系统发电的电压等级比较低,电磁污染比传统的集中式发电要小得多。

3.可靠性高

在建设大型火电厂的趋势有增无减之时,电网的快速发展对供电的安全与稳定带来很大威胁,一旦电厂和输电通道发生故障,将可能导致大面积停电。分布式电源采用性能先进的控制设备,开停机方便、操作简单、负荷调节灵活,与大电网配合可大大提高供电可靠性,弥补其安全稳定性方面的不足,在电网崩溃和意外灾害(地震、暴风雪、人为破坏、战争)情况下可维持重要用户的供电。

4.改善供电质量

分布式电源内部通常都设有就地电压调整和无功补偿功能,同时并网后

由于有大系统作为支撑，用户的用电质量可以得到较大改善。

5.其他优点

分布式电源的投资相对大电厂而言非常小，风险也较小，并且建设周期短，有利于短时间内解决电力短缺问题。

分布式电源尽管具备诸多优点，但考虑到其分散、随机变动等特点，大量并网后将使配电网从辐射型的网络变为遍布中小电源和用户的互联网络，从单纯的“配电系统”转化成为一个“电力交换系统”，从而对配电系统的安全稳定运行产生较大的影响。

二、分布式电源对配网规划的影响

配电系统规划主要是根据某地区今后若干年内电力负荷发展的预测以及现有网络基本情况，对该地区的配电系统做出发展规划。要求在满足负荷增长和电力系统安全运行的前提下，确定规划区内变电站布点和网络接线方式、投产水平及投资时间安排，使得建设资金和运行费用为最小。

分布式电源的接入及其比例的不断扩大，将增大配电系统的复杂性和不确定性，给传统的电网规划带来实质性的挑战，其影响主要包括以下几个方面。

(1) 加大了规划区电力负荷的预测难度。由于规划区内用户可根据自身实际需要安装和使用分布式电源，为自身及规划区其他用户提供电源，这些分布式电源与电力负荷相抵消，从而对规划区负荷增长的模型产生影响。

同时分布式电源安装点存在不确定性，而利用可再生能源发电的分布式电源的输出电能又常受到气候等自然条件的影响，其输出电能有明显的随机特性，因此规划部门很难准确预测电力负荷的增长和空间负荷分布情况。

(2) 虽然分布式电源能减少或推迟配电系统的建设投资，但位置和规模不合理的分布式电源可能导致配电网的某些设备利用率低和网损增加，导致网络中某些节点电压的下降或出现过电压，改变故障电流的大小、持续时间及其方向，还可能影响到系统的可靠性。

(3) 配电网规划是一个动态多目标的非线性整数规划问题，其动态属性与其维数相关联，通常需同时考虑几千个节点，若规划区内再出现许多分布式