

APQI ASIA
POWER
QUALITY
INITIATIVE

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代电能质量技术丛书

分布式电源接入电网 的电能质量

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
朱永强 朱凌志 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代电能质量技术丛书

分布式电源接入电网 的电能质量

亚洲电能质量联盟中国合作组 组编
朱永强 朱凌志 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

分布式发电具有节能环保、供电可靠、发电方式灵活等诸多优点，其发展具有重要的战略意义。分布式电源接入电网后，会与公共电网发生相互作用。分布式电源输出的电力往往不能维持理想供电系统对电压和电流的要求，因而会对电能质量有一定的影响。目前尚无专门书籍系统论述分布式电源接入电网的电能质量问题。本书在广泛调研的基础上，结合作者和研究团队的实际教学和科研经验，给出了针对性的解决方案，希望能为相关领域的广大师生和从业人员提供参考。

图书在版编目（CIP）数据

分布式电源接入电网的电能质量 / 亚洲电能质量联盟中国合作组组编；朱永强，朱凌志编著. —北京：中国电力出版社，2015.12

（现代电能质量技术丛书）

ISBN 978-7-5123-5784-6

I. ①分… II. ①朱… ②朱… ③朱… III. ①电源-电能-质量-研究 IV. ①TM910.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 075298 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>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷


710 毫米×980 毫米 16 开本 13.25 印张 172 千字

印数 0001—3000 册 定价 55.00 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



本书前言

分布式发电技术是能源领域的新兴重点发展方向。分布式发电具有投资小、节能环保、供电可靠和发电方式灵活等诸多优点,大力发展分布式发电技术和产业具有非常重要的战略意义。发展分布式发电,可以充分利用可再生能源,解决能源与环保问题,解决缺电地区的用电问题,还能为大电网提供补充和支撑。大电网极易受到自然灾害、战争或恐怖势力的破坏,严重时将危害国家的安全。“911 事件”后,许多专家提出了战争或恐怖势力对电力安全威胁的问题,而发展分布式发电是解决这一问题的有效手段。

分布式电源并网运行是分布式发电的重要发展方向。分布式电源接入电网后,就会与公共电网发生相互作用,难免会对公共电网产生某种形式和一定程度的影响。例如,微型燃气轮机、风电机组、光伏电池、生物质发电装置、燃料电池等分布式电源所发出的电力,在电压表现形式上往往不能直接实现或维持理想供电系统对电压和电流的要求,因而会对电能质量有一定的影响。有学者认为用于分布式发电的储能也是分布式电源的组成部分,由其运行性能和并网方式可知,储能装置对电网电能质量的影响方式和程度不会超出上述分布式电源并网的影响,因而书中不再做专门论述。

分布式电源接入电网引起的电能质量问题,既有传统结论,又有其独特之处。随着世界能源形势的日趋紧张,新能源与分布式发电技术越来越受到重视,相关的科研、生产活动也即将得到更快的发展。但是,目前这方面的实用教材还很少,尤其是关于分布式电源接入电网的电能

质量问题，尚无专门的书籍作系统的介绍。

即将展现在读者面前的这本《分布式电源接入电网的电能质量》，在广泛调研、充分收集素材的基础上，结合作者和研究团队的实际教学和科研经验，精心编撰，希望能为相关领域的广大师生和从业人员提供参考。

全书共 10 章。第 1 章简要介绍了分布式电源和电能质量的概念。第 2 章介绍了各种常见的分布式电源及其工作原理。第 3 章分析了各种分布式电源的运行特性和并网方式。第 4 章至第 8 章分别阐述了与分布式电源接入电网有关的各种电能质量问题产生的机理和改善措施，涉及的电能质量指标包括电压偏差、电压波动、三相不平衡、谐波，以及直流偏磁现象。第 9 章探讨了多种分布式电源的互补运行方式，以及用分布式电源改善电能质量的潜力。第 10 章介绍了分布式电源接入电网的有关规范。

本书由华北电力大学朱永强、中国电力科学研究院新能源研究所朱凌志编著，华北电力大学韩民晓教授审校。参加本书编写工作的还有南方电网科学研究院丁泽俊、北京交通大学谢桦等合作单位的同志，以及华北电力大学王腾飞、刘艳章、张曰强、段春明、付春鹏、王治宇、齐琳、叶青、贾利虎、倪一峰、孙小燕、李传栋等研究生。在本书素材收集整理工作中，许郁、高领军、沈文涛、赵正奎等研究生做出了很大贡献。本书还得到了国家电力监管委员会杨名舟同志、华北电力大学肖湘宁教授、徐永海教授、国网北京经济技术研究院戚庆茹工程师的关心和支持。在此对所有参与和支持本书编写工作的同志一并表示衷心的感谢。

编 者

2015 年 1 月

目 录

丛书前言

本书前言

1	概述	1
1.1	分布式电源及其特点	1
1.2	发展分布式电源的意义和状况	6
1.3	与分布式电源有关的电能质量问题	9
1.4	本章小结	13
2	常见的分布式电源及其工作原理	14
2.1	微型燃气轮机	14
2.2	风力发电	17
2.3	太阳能光伏发电	23
2.4	太阳能热发电	29
2.5	生物质发电	32
2.6	燃料电池	37
2.7	本章小结	42
3	分布式电源的运行特性和并网方式	43
3.1	微型燃气轮机	43
3.2	风电机组	45
3.3	太阳能光伏发电	53
3.4	太阳能热发电	61

3.5	生物质发电	62
3.6	燃料电池	63
3.7	本章小结	66
4	分布式电源接入与电网电压偏差	67
4.1	电压偏差的有关概念	67
4.2	电压偏差的形成机理	70
4.3	分布式电源接入对电压偏差的影响	73
4.4	电压偏差的抑制措施	81
4.5	本章小结	90
5	分布式电源接入与电网电压波动	91
5.1	电压波动的有关概念	91
5.2	电压波动的形成机理	93
5.3	分布式电源引起的电压波动	95
5.4	电压波动的抑制措施	100
5.5	本章小结	119
6	分布式电源接入与三相不平衡	120
6.1	三相不平衡的有关概念	120
6.2	三相不平衡的产生原因	124
6.3	分布式电源接入对电压平衡度的影响	125
6.4	三相不平衡的应对措施	126
6.5	本章小结	129
7	分布式电源接入的谐波问题	130
7.1	谐波的有关概念	130
7.2	谐波源	139
7.3	分布式电源并网带来的谐波	145
7.4	谐波的抑制措施	147

7.5	本章小结	154
8	分布式电源接入与直流偏磁	155
8.1	直流偏磁的概念	155
8.2	直流偏磁的危害和限制	157
8.3	造成直流偏磁的常见原因	165
8.4	分布式电源接入对直流偏磁的影响	167
8.5	直流偏磁的抑制措施	171
8.6	本章小结	176
9	分布式电源的互补运行与电能质量改善	177
9.1	分布式电源互补运行	177
9.2	互补发电的常见类型	179
9.3	利用分布式电源改善电能质量	187
9.4	本章小结	189
10	分布式电源并网的电能质量规范	190
10.1	国外分布式电源并网标准	190
10.2	国内分布式电源并网标准	195
10.3	分布式电源与配电网连接的若干原则探讨	196
10.4	本章小结	200
	参考文献	201

1.1 分布式电源及其特点

1.1.1 分布式电源的概念

传统的电力系统大多是以大机组、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，暴露出现有集中发电的电力系统存在的不足之处。传统的大电网已经不能完全满足对电力供应质量与安全可靠性日益提高的要求。分布式发电以其投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点日渐成为人们研究的热点。

分布式发电（Distributed Generation, DG）是指在一定的地域范围内，由多个甚至多种形式的发电设备共同产生电能，以就地满足较大规模的用电要求。

“分布”二字，相对于集中发电的大型机组而言，是指其总的发电能力由分布在不同位置的多个中小型电源来实现；相对于过去的小型独立电源而言，是指其容量分配和布置有一定的规律，其分布可能要满足特定的整体要求。图 1-1 所示为分布式发电系统的示意。

分布式电源（Distributed Generator, DG）通常独立于公共电网而靠近用电负荷，可以包括任何安装在用户附近的发电设施，且不论其规模大小和一次能源种类。一般来说，分布式电源往往是集成或单独使用的、靠近用户的小型发电设备，多为容量在 50 兆瓦以下的小型发电机组。



图 1-1 分布式发电系统示意

美国于 1978 年在《公共事业管理政策法》中将分布式电源定义为：为满足特定用户需要或支持现有配电网的经济运行，以分散方式布置在用户附近，发电功率为几千瓦至 50MW 的小型模块式且与环境兼容的独立电源。

分布式电源这个概念首先在美国得到推广，后来被其他先进国家广泛接受。由于各国政策的不同，不同国家对其理解也有所差异。

1.1.2 分布式电源的种类

分布式电源本身并非一种全新的发电形式。一些大型电力用户自备发电机组，节省电费或者在系统电源停电时临时供电，可视为分布式电源发展的初级阶段。这种方式在某些发达国家已经得到广泛应用。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，虽属分布式发电的范畴，但由于其技术性能差、效率低下，或对环境有明显影响，已逐渐被淘汰。目前，分布式电源通常并非指这些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。

(1) 微型燃气轮机。

燃气轮机是一种以燃料（燃气或燃油）和空气为介质的旋转式热力

发动机。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。从离心式压气机出来的高压空气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。

(2) 燃料电池。

燃料电池是一种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，即通过氢和氧的化合释放出电能，相当于电解水的逆过程。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。燃料电池工作时需要连续地向其供给燃料和氧化剂，是一种发电装置，而不是电能存储装置。

(3) 风力发电。

风力发电是将风能（空气运动而产生的能量）转化为电能的一种发电技术，也是目前可再生能源利用技术中最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式。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。

(4) 太阳能发电。

太阳能发电主要包括热动力发电和光伏发电两类。

热动力发电是通过聚集太阳能，将某种工作介质（例如水）加热，直接或间接地产生蒸汽，驱动汽轮机做功，带动发电机组产生电能。

光伏发电利用半导体材料的光生伏打效应，将太阳光能直接转化为电能，其核心部件是光伏电池板，是目前太阳能发电的主要形式。

(5) 生物质能发电。

生物质能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。

1.1.3 分布式电源的特点

分布式电源由电力部门、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。与常规的集中式大电源或大电网供电相比，用分布式发电系统提供电能具有很多特点。

（1）建设容易，投资少。

分布式发电多采用风能、太阳能、生物质能等可再生能源或微型燃气轮机，单机容量和发电规模都不大，因而不需要建设大规模的发电厂和变电站、配电站，土建和安装成本低，建设工期短，投资规模小而且不会有大的风险。

不过，由于分布式供能系统缺乏规模性效益，单位容量的造价可能比集中式大机组发电高。

（2）靠近用户，输配电简单，损耗小。

分布式电源大多容量较小，而且靠近电力用户，一般可以直接就近向负荷供电，而不需要修建长距离的高压输电线路，输配电损耗较小，建设也简单廉价。

（3）能源利用效率高。

分布式发电可以结合冷热电联产，将发电的废热回收用于供热和制冷，科学合理地实现能源的梯级利用。由于分布式电源距离用电负荷较近，输配电过程中的电能损失和供暖、供热管道的热量损失也相当小。因而，分布式发电系统具有很高的能源利用效率，综合利用率可达70%~90%。

（4）污染少，环境相容性好。

除了微型燃气轮机等小型化石燃料发电机组外，分布式电源可以广

泛采用各种可再生能源发电技术，例如太阳能光伏发电、风力发电等，发电过程很少有污染物排放，噪声也不大。同时，分布式发电系统的电源等级较低（多为 400V），而且没有大容量远距离高压输电线路，产生的电磁辐射也远远低于常规的集中发电方式，更不会因为高压输电线路的建设而大量占用土地和砍伐树木。因而，分布式发电系统与环境的相容性较好，可以减轻能源供应的环保压力。

（5）运行灵活，安全可靠有保障。

分布式发电系统中的电源，单机容量小，机组数目多，彼此之间有一定的独立性，同时发生故障的概率很小，不容易发生大规模的停电事故，供电的连续可靠性有保障。用户具有可自行控制的分布式供电系统，在其他用户经历电力事故时能免受停电的困扰。发展分布式供电比通过改造电网加强供电安全更加简便快捷。

分布式发电系统还有很好的灵活性。多个小型的发电机组，便于分别操作和智能化控制；机组的启动和停运，快速、灵活。分布式电源可作为备用电源为要求不间断供电的用户提供电能。不过，分布式电源的功率波动明显，系统容量不容易互为备用。

案例：2008 年初在南方发生了严重的雪灾，大量输电线路倒塌，但是在四川、贵州等地一些小火电厂却没有停运，还发挥了一定的作用。这给人们一个启示，分散建设的中小型电源（例如各种分布式电源），可能对电网的运行安全和供电服务有独特的作用。

（6）联网运行，有提供辅助性服务的能力。

分布式发电系统可与大电网联合运行，互为补充，既能够提高分布式系统本身的供电可靠性，还能为大电网提供一些辅助性的服务。例如，在用电高峰期的夏季和冬季，采用冷热电联供等手段，可满足季节供热或制冷的需要，同时节省一部分电力，从而减轻供电压力。

案例：美加大停电事故发生后，有专家估计，改造并完善美国东北部电网需投资 500 亿美元，但这也只能是减少事故的发生或减轻事故的影响。如果把这些投资用于建设分布式供电系统，至少可以解决 1 亿 kW 的发电容量，若再考虑供热、制冷及减少的输变电损耗，则可相当于增加 2 亿~3 亿 kW 的发电装机容量。

1.2 发展分布式电源的意义和状况

1.2.1 发展分布式发电的意义

由于分布式发电具有诸多优点，大力发展分布式发电具有重要的战略意义。

(1) 充分利用可再生能源，解决能源与环保问题。

在目前的经济技术条件下，除风电以外的各种可再生能源，还不容易做到集中的大规模利用。即使是技术最为成熟的风力发电，也只有少数风资源极为丰富的地区的才能达到和常规发电相比的规模。于是，分布式发电就成为大量利用可再生能源发电的重要手段，不但能实现能源利用的可持续发展，还可以解决环境污染和温室气体排放问题。

与传统集中式大容量发电相比，分布式发电系统规模较小，可用于发电的一次能源种类多，对场地要求低，因而建设灵活，而且可以靠近用户，常可直接向其附近的负荷供电或根据需要向电网输出电能。分布式电源是学校、工厂、医院等企事业单位以及住宅小区提供独立供能的理想装置。在许多欧洲国家，分布式能源供电已经成为满足电能与热能需求的最重要来源。

(2) 提高能源利用效率。

分布式发电系统，通过就近供能、冷热电联产等方式，可以减少利用过程的能量损耗，提高能源的利用效率。燃料能源燃烧所产生的热能，在发电厂只有 1/3 左右能转化为电能，而有将近一半的能量白白流失

(除非也采用热电联产),在传输环节也有 10%左右的损耗。而分布式发电系统的能量损失要少很多。

而且,有 20%左右的发电装机容量只用于满足用电高峰期的需求,其运行时间只占全部机组运行时间的 5%,发电量只占发电总量的 1%。建设这么多的长期“闲置”机组,在经济上显得很浪费。此外,大量的电力传输只靠若干主要的高压长距离输电线路,集中供电系统的供电线路拥堵问题日益凸显。

(3) 解决缺电地区的用电问题。

有时由于自然条件太恶劣,现有电力系统到用户的输电线路根本无法架设或建成后会出现故障;或者负荷距离现有电力系统太远,输配电系统的投资将会过于巨大。所以,大电网的建设往往不会普及到那些偏远或孤立地区。采用小水电、风力发电、太阳能光伏发电和生物质能发电等分布式发电电源是解决边远乡村、牧区、山区、发展中区域用电问题的最佳途径。

(4) 为大电网提供补充和支撑。

电力系统已经成为当今世界最大的人造动态系统。其规模不断扩大,结构日益复杂,这种发展所带来的安全性问题不容忽视。

电力系统发生大面积停电事故后造成的损失与合理可行的恢复供电方案有很大关系。分布式发电中的水轮发电机和燃气轮机等很容易自行启动、恢复速度很快,可作为恢复供电的启动电源。可利用能够自启动的分布式电源在短时间内逐步恢复附近电网的重要负荷,提高对重要用户的供电可靠性。

其次,电力安全是国家安全的重要组成部分。大电网极易受到战争或恐怖势力的破坏,严重时将危害国家的安全。“911 事件”后许多专家提出了战争或恐怖势力对电力安全威胁的问题,而发展分布式发电是解决这一问题的有效手段。

1.2.2 分布式电源的发展状况

早在 20 世纪 70 年代,分布式电源的概念就已出现,最初应用于通

信电源中。1978 年美国《公共事业管理政策法》公布后，分布式发电技术正式得以推广，并很快被其他国家接受。

经过了几十年的发展，分布式发电系统在很多国家已经颇具规模。尤其是“9·11 事件”发生后，出于对供电安全的考虑，美国加快了分布式供电系统研究和建设的步伐。目前，美国已有 6000 多座分布式电源站；英国有 1000 多座分布式电源站；日本的分布式供电系统有近 5000 家，总容量超过 600 万 kW。2006 年欧盟国家的微型分布式供电系统达到 1.5 万个左右。美国计划到 2010 年和 2020 年分别有 20%和 50%以上的新建商用或办公建筑使用分布式供电系统，并且在 2020 年将 15%的现有建筑改由分布式电源供电。

大电网与分布式电网的结合，被世界许多能源和电力专家公认为是节省投资、降低能耗、提高电力系统稳定性和灵活性的主要方式，是 21 世纪电力工业的发展方向。从 20 世纪 80 年代末开始，世界电力工业即已展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。很多发达国家在进行能源结构调整过程中，已经把分布式发电技术放在了相当重要的位置上。2004 年，美国分布式发电总容量为 67GW，约占美国国内总发电量的 7%，达世界平均水平；欧洲分布式电源的发展处于世界领先水平；丹麦、荷兰、芬兰的分布式发电总量分别占国内总发电量的 52%、38%和 36%。

我国能源利用水平距世界发达国家还有很大的差距，日益增长的电力需求远未得到满足，“大机组、大电厂、大电网”的大规模、集中式电网供电系统将依然是我国目前能源工业的主要发展方向，但大电网快速发展所带来的安全性问题是不容忽视的。必须合理调整供电结构，将分布式供电和集中式供电有效地结合起来，建设更加安全稳定的电力系统。

上海、北京、广州等大城市，10 多年前就尝试实施分布式供电系统，如今已有成功的范例（上海的浦东国际机场、中野良子健康中心、

北京的中燃大厦以及广州大学城等)。2005年夏季,我国首个分布式电力技术集成工程中心落户广州,标志着我国分布式供电技术进入实质性发展阶段。冷热电三联供(CCHP)技术在分布式供电技术中应用最为广泛,发展前景较好,我国大部分地区的住宅、商业大楼、医院、公用建筑、工厂等,都有供电、供暖及制冷需求,而且很多地方配有自备发电设备,这些都为冷热电三联供提供了市场。

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。虽然在相当长的一段时间内,分布式供电系统不会成为我国主要供电、供热形式,但可以预见,20年内将逐步成为我国电力供应系统的一个重要补充,2020年其规模有可能达到1000万kW。

1.3 与分布式电源有关的电能质量问题

1.3.1 电能质量的概念

为保证电能安全经济地输送、分配和使用,理想供电系统应满足如下基本要求:

(1) 以单一恒定的电网标称频率(我国采用50Hz)、规定的若干电压等级(如配电系统一般为110、35、10kV,380V/220V)和以正弦函数波形变化的交流电向用户供电,并且这些运行参数不受用电负荷特性的影响。

(2) 始终保持三相交流电压和负荷电流平衡。

(3) 电能的连续充足供应,即向电力用户的供电不中断。

实际上,由于多种因素的作用,实际供电系统运行状态可能会偏离理想状态,供电系统的频率和电压幅值不再保持恒定不变,三相电力出现不平衡,电压和电流的正弦波形发生畸变。

电能质量描述的就是供电品质与理想情况的偏离程度。目前多数专