

普通高等教育“十二五”规划教材

分布式发电 及储能技术基础

主 编 杨 秀

副主编 李宏仲 赵晶晶



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

分布式发电 及储能技术基础

主 编 杨 秀
副主编 李宏仲 赵晶晶



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对智能电网条件下分布式发电技术、储能技术及相关设备的发展情况进行了介绍。全书共分为9章。第1章介绍分布式发电的定义和发展情况,并比较了传统集中式发电与分布式发电的异同之处;为了便于后续章节的内容讲解,第2章简要介绍了电力电子技术的相关基础理论和典型电路;第3~7章分别介绍了风力发电、太阳能光伏发电、微型燃气轮机发电、生物质能发电和燃料电池发电的相关基础理论和主要的技术设备;第8章介绍了分布式发电发展过程中的关键问题—储能环节的相关理论;第9章则介绍了所谓微电网的定义和相关的基础理论。

本书可作为电气工程专业本科生和研究生教材,也可供供电企业相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式发电及储能技术基础 / 杨秀主编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2012.8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0124-9

I. ①分… II. ①杨… III. ①发电—高等学校—教材
②储能—高等学校—教材 IV. ①TM61②TK02

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第206987号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 分布式发电及储能技术基础
作 者	主编 杨秀 副主编 李宏仲 赵晶晶
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 255千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	21.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

分布式发电是充分利用新型的可再生能源来进行发电，目前主要的分布式方式有微型燃气轮机发电、风力发电、太阳能光伏发电、燃料电池和生物质能发电等。分布式发电最主要的特征是环保、节能、高效。近几年来，电力电子技术的飞速发展使得分布式发电的大规模实际应用成为可能，任何一种形式的分布式发电都要解决分布式电源与电网、用户、储能系统之间的接口能量转换问题。用于分布式发电中的电力电子接口现大体分为以下四类：DC-DC 转换器、逆变器、输出过滤器、处理器。分布式发电是未来电力系统的发展方向，但是并不意味着现在就将传统的集中式大电网淘汰，在一段时间内这两种发电模式共存，互为补充。结合传统电网和分布式发电的优势，将其合理的整合在一起，这才是最为明智的选择。此外，储能问题是制约分布式发电应用的一个瓶颈。现在较有前途的储能技术有蓄电池储能、超级电容器储能、飞轮储能以及超导储能。这些储能技术在工业领域中已经有所应用，而且取得了较好的效果，但是如果将它们应用到分布式发电中，还需在存储容量、可靠性和经济性上作进一步的改进。

本书主要介绍了分布式发电的主要形式和相关的入网控制手段，以及当前储能技术和设备的发展情况。本书可以作为电气工程专业本科生和研究生的教材，也可以作为供电企业相关技术人员的参考资料。

本书由杨秀主编，李宏仲和赵晶晶副主编。本书在编写过程中参阅了不少前辈的工作成果，在此表示感谢。在编写过程中，上海电力学院的众多领导、专家给予了深切的关怀，编者的许多同事、朋友与家人均为本书的编写提供了众多的帮助，在此一并向他们致以衷心的感谢。

本书受到上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金（编号：sdl10019）的资助，特此感谢！

限于编者水平，错漏之处难免，欢迎读者对书中不妥之处予以批评指正。

编者

2012年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 集中式发电的定义和分类.....	1
1.2 集中式发电的缺点.....	3
1.3 中国发电行业格局.....	4
1.4 分布式发电的定义与起源.....	5
1.5 分布式发电的起源和意义.....	6
1.6 分布式发电系统的主要类型.....	6
1.7 分布式发电的优缺点.....	8
1.8 国内外分布式发电发展现状与前景.....	11
第 2 章 电力电子技术基础知识	15
2.1 电力电子器件.....	15
2.2 整流电路.....	30
2.3 逆变电路.....	34
2.4 直流—直流变流电路.....	39
2.5 交流—交流变流电路.....	44
第 3 章 风力发电	46
3.1 风的特性及风能资源.....	46
3.2 风力发电技术.....	52
3.3 风力发电系统.....	58
3.4 并网运行的风力发电系统.....	62
第 4 章 太阳能光伏发电	70
4.1 太阳能发电的定义和形式.....	70
4.2 太阳能热发电基本形式.....	70
4.3 太阳能光伏电池.....	73
4.4 光伏电池的电特性.....	75
4.5 光伏电池阵列设计原则.....	78

4.6	MPPT 基本算法	81
4.7	光伏发电系统基本结构	84
4.8	光伏发电系统并网方式	85
4.9	光伏发电应用现状	86
第 5 章	微型燃气轮机发电	90
5.1	微型燃气轮机	90
5.2	燃气轮机发电的主要形式	93
5.3	微型燃气轮机发电的关键技术	94
5.4	微型燃气轮机发电控制	95
5.5	基于微型燃气轮机的冷热电联供系统	99
5.6	冷热电联供系统的应用现状	100
第 6 章	生物质能发电	103
6.1	生物质能的定义	103
6.2	生物质能的存在形式	104
6.3	生物质能的发电及应用	105
6.4	生物质能发电的技术性评价	112
第 7 章	燃料电池发电	114
7.1	燃料电池的基本原理	114
7.2	燃料电池的分类	116
第 8 章	储能装置	122
8.1	储能的形式	122
8.2	储能装置在电力系统中的应用	126
第 9 章	微网技术基础	133
9.1	微电网的定义	133
9.2	微电网的基本结构	134
9.3	微电网的控制	136
9.4	微电网的保护	143
9.5	微电网的通信技术	145
9.6	微电网的能量管理系统	150
9.7	世界主要发达国家微网研究现状及典型示范工程（国内外微网建设实例）	151
9.8	中国的微电网建设现状及实例	160
9.9	微网及分布式发电的发展前景	161
参考文献	163

第 1 章 绪 论

1.1 集中式发电的定义和分类

集中式发电指的是传统的规模化、大容量的发电方式，所发出的功率通过高压交流或者直流输电线路输送到负荷中心，然后依次经过变电、配电等环节为所有用户提供电力能源。集中式发电按所用能源的种类分为火电、水电、核电等。

1.1.1 火电

火电是利用煤、石油、天然气等作为燃料进行发电的统称，其中包括热电联产的热电厂。根据电力系统的需要，火电厂可以担任基本负荷，也可以按要求担任腰荷及峰荷，运行灵活、使用广泛，在电力系统中起着重要作用。

我国火电厂所使用的能源主要是煤，且主力电厂是凝汽式发电厂。下面就以采用煤粉炉的凝汽式火电厂为例，介绍火力发电厂的生产过程。

火电厂的生产过程概括地说是把煤中含有的化学能转变为电能的过程（见图 1-1）。整个生产过程可分为三个系统：①燃料的化学能在锅炉燃烧中转变为热能，加热锅炉中的水使之变成蒸汽，称为燃烧系统；②锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，冲动汽轮机的转子旋转，将热能转变为机械能，称为汽水系统；③由汽轮机转子旋转的机械能带动发电机旋转，把机械能变成电能，称为电气系统。

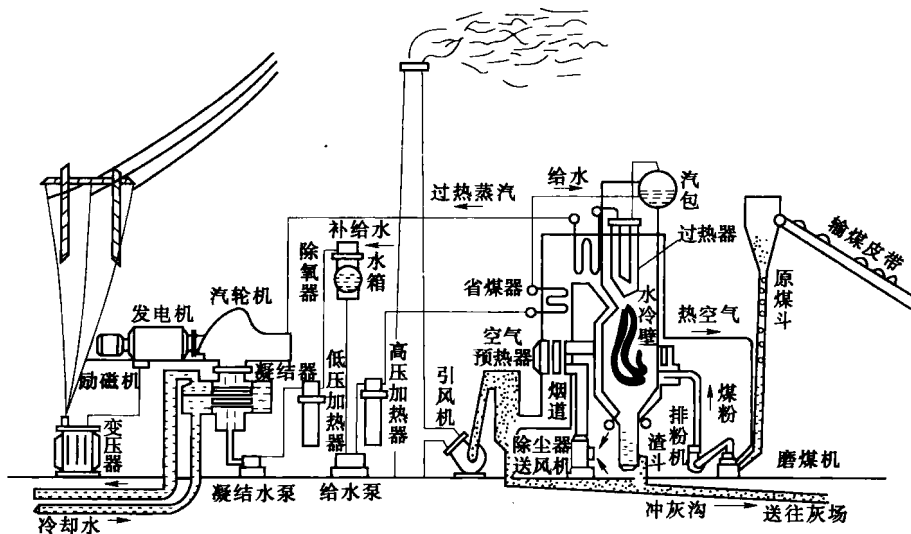


图 1-1 凝汽式火电厂电能生产过程示意图

火电厂与水力发电厂和其他类型的发电厂相比，具有以下特点：

(1) 火电厂布局灵活，装机容量的大小可按需要决定。

(2) 火电厂的一次性建造投资少，仅为同容量水电厂的一半左右。火电厂建造工期短， $2 \times 300\text{MW}$ 机组，工期为 3~4 年。发电设备年利用小时数较高，约为水电厂的 1.5 倍左右。

(3) 火电厂耗煤量大，目前发电用煤约占全国煤炭总产量的 50% 左右，加上运煤费用和大量用水，其单位电量发电成本比水电厂要高出 3~4 倍。

(4) 火电厂动力设备繁多，发电机组控制操作复杂，厂用电量和运行人员都多于水电厂，运行费用高。

(5) 大型发电机组由停机到开机并带满负荷需要几小时到十几小时乃至几十小时，并附加耗用大量燃料。例如，一台 12 万 kW 发电机组启停一次耗煤可达 84t 之多。

(6) 火电厂担负急剧升降的负荷时，必须付出附加燃料消耗的代价。例如，据统计某电力系统火电平均煤耗约 $0.4\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，而参与调峰煤耗将增至 $468 \sim 511\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，平均增加 22%~29%。

(7) 火电厂担负调峰、调频或事故备用，相应事故增多，强迫停运率增高，厂用电率增高。据此，从经济性和供电可靠性考虑，火电厂应当尽可能担负较均匀的负荷。

(8) 火电厂对空气和环境的污染大。

1.1.2 水电

水电利用河流径流及落差进行发电。其基本生产过程是：从河流较高处或水库内引水，利用水的压力或流速冲动水轮机旋转，将水能转变成机械能，然后由水轮机带动发电机旋转，将机械能转换成电能。按集中落差的方式分为堤坝式水电厂、引水式水电厂和混合式水电厂；按水库调节能力的大小可以分为无调节能力的径流式和有调节能力的日调节、周调节、年调节及多年调节式。此外还有抽水蓄能式。

抽水蓄能电厂是以一定水量作为能量载体，通过能量转换向电力系统提供电能。为此，其上、下游均需有水库以容蓄能量转换所需要的水量。

在抽水蓄能电厂中，必须兼备抽水 and 发电两类设施。在电力负荷低谷时（或丰水时期），利用电力系统待供的富余电能（或季节性电能），将下游水库中的水抽到上游水库，以位能形式储存起来；待到电力系统负荷高峰时（或枯水时期），再将上游水库中的水放下，驱动水轮发电机组发电，并送往电力系统，这时，用以发电的水又回到下游水库。其示意图见图 1-2。

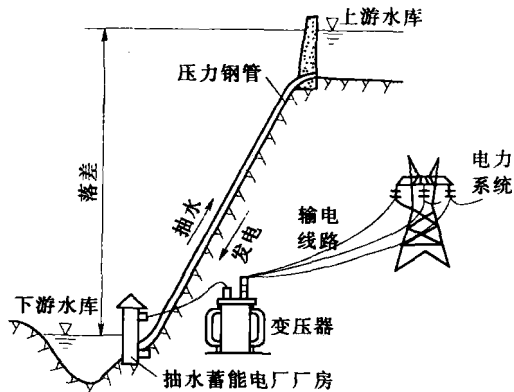


图 1-2 抽水蓄能电厂示意图

显而易见，抽水蓄能电厂既是一个吸收低谷电能的电力用户（抽水工况），又是一个提供峰荷电力的发电厂（发电工况）。由此可得，抽水蓄能电厂在电力系统中具有调

峰、填谷、备用、调频和调相的作用。

水电厂与火力发电厂和其他类型的发电厂相比，具有以下特点：

(1) 水电是清洁和可再生能源。

(2) 出力与河川的天然流量有关，而流量在不同年份及不同季节都有变化。

(3) 运行灵活。由于水电厂设备简单，易于实现自动化，机组启动快，水电机组从静止状态到带满负荷运行只需 4~5min，紧急情况可只用 1min。水电厂能适应负荷的急剧变化，适合于承担系统的调峰、调频和作为事故备用。

(4) 可综合利用水能资源。水电厂除发电以外，还有防洪、灌溉、航运、供水、养殖及旅游等多方面综合效益；并且可以因地制宜，将一条河流分为若干河段，分别修建水利枢纽，实行梯级开发。

(5) 水能可储蓄和调节。电能的发、输、用是同时完成的，不能大量储存，而水能资源则可借助水库进行调节和储蓄，而且可兴建抽水蓄能电厂，扩大利用水的能源。

(6) 水电厂建设投资较大，工期较长。

(7) 由于水库的兴建，淹没土地，移民搬迁，给农业生产带来一些不利，还可能在一定程度破坏自然界的生态平衡。

1.1.3 核电

核电是以可控的核反应堆为动力的电厂。其基本生产过程是利用反应堆中核燃料裂变链式反应所产生的热能，再按火电厂的发电方式，将热能转换为机械能，在转换为电能。目前世界上使用最多的是轻水堆核电站，即压水堆核电站和沸水堆核电站。

核电站与火力发电厂和其他类型的发电厂相比，具有以下特点：

(1) 燃料运输量极小，仅为以煤炭为动力相同容量火电厂的十万分之一。不排放灰渣及烟尘，可减轻交通运输及环境保护的压力。

(2) 核电站适宜担任基本负荷，此时，一般应配套建设抽水蓄能式电厂，以解决系统的调峰问题。

(3) 核电站的投资高，建设周期长，但运行成本低。

1.2 集中式发电的缺点

集中发电、远距离输电和大电网互联的电力系统是目前电能生产、输送和分配的主要方式，正在为全世界 90% 以上的电力负荷供电。这种容量越来越大的电网虽有其优点，但它也存在一些弊端。随着负荷峰谷差的不断增大，电网的负荷率正逐年下降，发电输电设施的利用率都有下降的趋势。电力系统越庞大，事故发生的概率越高，大型互联电力系统中，局部事故极易扩散，导致大面积的停电。集中式发电的缺点主要表现为：

(1) 市场环境加大了负荷波动、发电厂投资等因素随机变化程度，而大型电力系统不能灵活跟踪负荷变化，造成发输电设备投资容量浪费。

(2) 集中式大电网结构对偏远地区供电造成输电费用过高。

(3) 互联大电网系统局部事故容易导致大面积停电，严重威胁了系统安全性，并

由于电力中断造成经济损失。

1.3 中国发电行业格局

进入 21 世纪以来,在国民经济快速发展和技术进步推动下,我国电力工业发展迅速。截至 2009 年底,全国发电设备容量 87407 万 kW,同比增长 10.23%。其中,水电 19679 万 kW,占总容量 22.51%,同比增长 14.01%;火电 65205 万 kW,占总容量 74.60%,同比增长 8.16%;水、火电占总容量的比例同比分别上升 0.74 个百分点和下降 1.45 个百分点;风电并网总容量 1613 万 kW,同比增长 92.26%。一直以来,我国风电装机量都在以 100% 的增速增加,但风电并网容量却远远落后于装机量,造成极大的浪费,而这也是制约我国风电产业发展的瓶颈之一。

自《中华人民共和国可再生能源法》实施以来,我国可再生能源发电装机容量和发电量逐年增长。截至 2008 年年底,含水电、风电、核电等清洁能源与新能源发电装机容量达到 1.8984 亿 kW,约占全国总装机容量的 24%,其中水电装机容量 1.726 亿 kW,核电装机容量 908 万 kW,太阳能发电装机容量 14 万 kW,生物质能发电装机容量超过 300 万 kW。根据规划,到 2020 年,全国范围内坚强智能电网将基本建成。届时,我国清洁能源装机容量将达到 6 亿 kW,占全国总装机容量的 35% 左右,发电量将占总发电量的 27% 左右。

现在,我国最大的火电单机容量 100 万 kW (华能玉环电厂),最大的水电单机容量 70 万 kW (三峡工程),最大的核电机组容量 100 万 kW (岭澳核电厂);最大的火力发电厂容量 500 万 kW (北仑港电厂, $5 \times 600\text{MW}$);最大的水力发电厂 330 万 kW (二滩水电厂, $6 \times 550\text{MW}$);最大的核能发电厂 200 万 kW (岭澳核电厂, $2 \times 1000\text{MW}$);最大抽水蓄能电厂 240 万 kW (广东抽水蓄能电厂, $8 \times 300\text{MW}$),这也是目前世界上最大的抽水蓄能电厂。

三峡水电站(图 1-3),装机容量 1820 万 kW,单机容量 70 万 kW,年均发电量 847 亿 kW·h,是世界上最大的发电厂。

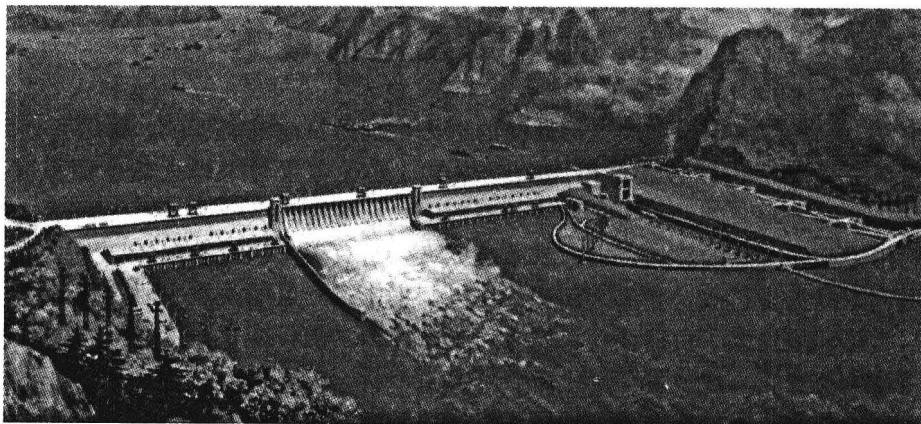


图 1-3 三峡水电站

我国核电力工业起步较晚，自行设计、制造、安装、调试的 $30 \times 10^4 \text{ kW}$ 浙江秦山核电厂于 1991 年 12 月首次并网发电，实现了核电厂零的突破。大亚湾核电厂引进 $2 \times 90 \times 10^4 \text{ kW}$ 压水堆核电机组，1994 年投入运营，其安装、调试和运行管理等方面都达到了世界先进水平。岭澳核电站（ $2 \times 1000 \text{ MW}$ ）是我国目前最大的核能发电厂，标志着我国的核电迈入了一个新的发展阶段，标志着我国电力工业在技术上向现代化方向迈进。图 1-4 是岭澳核电站二期 1 号机组。

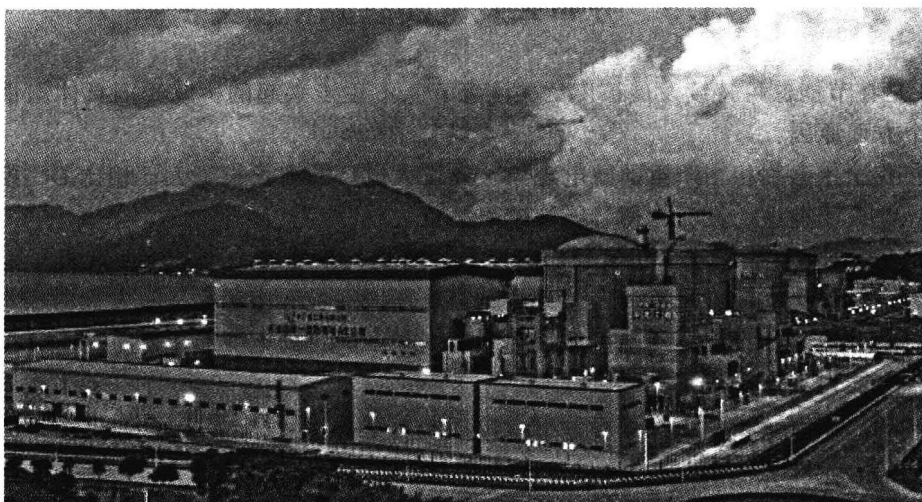


图 1-4 岭澳核电站二期 1 号机组

1.4 分布式发电的定义与起源

分布式发电（Distributed Generation, DG）一般指为满足终端用户的特殊需求，接在用户侧附近的小型发电系统，而分布式电源（Distributed Resource, DR）是指分布式发电（DG）与储能装置（Energy Storage, ES）的联合系统，即 $DR = DG + ES$ 。它们的规模一般不大，通常为几十千瓦至几十兆瓦。DG 所用的能源包括天然气（以及煤层气、沼气等）、太阳能、生物质能、氢能、风能等洁净能源或可再生能源；而 ES 主要为蓄电池，还可能采用超级电容器、飞轮储能等。因此，这种发电技术是一种可利用多种能源并对环境友好的发电技术。此外，为了提高能源的利用效率和降低成本，这种发电技术往往采用冷、热、电联供（Combined Cooling、Heat and Power, CCHP）的方式，或仅采用热电联产（Combined Heat and Power, CHP 或 Co-generation）的形式。因此国内外也常常将这种冷、热、电等各种能源一起供应的系统称为分布式能源电力系统。该系统能大大提高能源利用率、节能和多样化地利用各种清洁和可再生能源，未来分布式能源系统将会越来越广泛地应用在各种场合和被普遍接受，因而是极有发展前途的。

目前较为多见的是 DG 直接接入配电系统（380V 或 10kV 配电系统，一般低于 66kV 电压等级）并网运行，也有直接向负荷供电而不与电力系统相连，形成独立供电吸入（Stand-alone System），或形成所谓的孤岛运行的方式（Islanding Operation Mode）。有

些电源容量较大（如 50MW 以上的燃气轮机发电机组），尽管它接在负荷附近，若它直接接入高压网（如 110kV 及以上），并接受电力系统调度部门的统一调度，仍属中央发电范畴，一般不再称为分布式发电（电源）。当 DG 采用并网的方式运行时，一般不需要储能系统，但采取独立（孤岛）运行的方式时，为保持小型供电系统的频率和电压的稳定，储能系统往往是必不可少的。

1.5 分布式发电的起源和意义

DG 是在节能、可持续发展被广泛关注等背景下逐步兴起的。就我国具体国情而言有如下几个方面原因：

(1) 我国正面临相当严重的缺电现象，建设大电厂周期长投资大；相比 DG 模块化整体安装，建设周期短，灵活方便，能解燃眉之急。

(2) 我国环境污染加剧，DG 采用新能源或清洁高效能源，增加 DG 装机是一种逐步降低电力产业对大气污染比重的有效方法，符合环境保护和能源可持续发展的根本要求。

(3) 电力短缺导致用户用电可靠性和质量水平下降，高电能质量水平的 DG 可以保证用户的生产能力和产品质量控制。

(4) 用户用电选择性小，不符合电力市场的发展要求，DG 则可以提供综合能源满足用户个性化、多样化的能源需求。

(5) 科技尤其是应用技术的迅速发展确保建立 DG 商业示范工程成为可能。当然，还有 2008 年北京“绿色奥运”政治任务以及“西气东输”油气市场开发的特殊商业因素。不难看出，用户对 DG 潜在的经济利益和高供电可靠性、高电能质量水平的追求是主要的原因。

从外部条件和内部需求上，我国均具备了大力发展 DG 的有利条件。合理稳步发展 DG，除了能适当缓解我国缺电形势并加强环境保护外，还能提高能源综合利用效率，符合节能的基本国策。在紧急情况下，DG 就地提供能量支持可以保障城市和重要用户用电连续性和可靠性。发展 DG 可以减少或推迟常规电源、输配电线路建设的步伐，减少电力传输线路损耗，保障电力产业可持续发展。DG 作为电力工业新的组成部分，是对常规火电、水电、核电的重要补充。总之，推广 DG 于国、于民有利，合理发展并妥善管理能营造社会、电力公司、用户、相关产业的多赢局面。

1.6 分布式发电系统的主要类型

按照 DG 的一次能源或原动机的不同，分布式发电系统可分为：小型或微型燃气轮机（MT，Micro/Mini Turbine，又称微透平或微燃机）发电系统、燃气发动机发电系统、风力发电系统、太阳光伏发电系统、燃料电池发电系统等。

1.6.1 小型燃气发动机发电系统

燃气发动机发电系统将可燃物燃烧后膨胀做功带动曲轴连杆运动实现发电机转子旋

转。燃气发动机具有发电效率较高，发电容量范围较宽，运行受外界温度和大气压力变化影响小等优势。但它也有着明显缺点：运行产生较多氮化物易造成环境污染，同时运行噪音也较大；由于直线往复运动部件较多，系统需要经常维护。20世纪80年代它们常作为工业或商业的自用电源。它们过去主要以油为燃料，现在发展到使用燃气，因天然气较油要贵许多，实际仍较多使用油或油气混合使用。

1.6.2 风力发电系统

风力发电是将风能转化为电能的发电技术。风电的主要优点是：

- (1) 风能资源丰富。
- (2) 风能是可再生能源。
- (3) 清洁无污染。
- (4) 施工周期短。
- (5) 投资少，投资灵活回收快。
- (6) 设施占地少，对土地要求低。
- (7) 风电场运行维护简单。
- (8) 风电技术比较成熟。
- (9) 风电具有较高的经济性，单位发电成本低。

其局限性主要表现在：

- (1) 风能的能量密度小。
- (2) 风速不稳定。
- (3) 风能不能大量储存。
- (4) 风轮机的效率较低。
- (5) 对生态环境有一些影响。
- (6) 产生较大机械和电磁噪声。
- (7) 接入电网时，对电网有不利的影晌。

目前先进的变转速风力发电系统具备效率可调整 and 可优化的特点，能够最大限度地利用风能。大中型风电机组并网发电，已经成为世界风能利用的主要形式。所发电力经整流、逆变或与电网直接相连。随着风电并网机组需求量增长，机组更新换代加快，单机容量提高，机组性能优化，生产成本下降，风电已经逐步具备与常规能源竞争的能力。出于可持续发展要求以及能源危机的压力，欧美主要发达国家对风力等可再生能源发电系统非常推崇，各国相继制定了各种风电计划。我国也出台了著名的“乘风计划”。这些都说明世界进入了风力发电复兴时期，风电发展正驶入了快车道。

1.6.3 太阳光伏发电系统

太阳能发电一般均指光伏发电，少数国家也曾尝试采用太阳能高温集热发电。光伏发电技术利用半导体材料的光电效应直接将太阳能转换为直流电。1999年我国累计只有15MW的光伏发电装机容量。自从实用性硅电池问世以来，世界上很快就开始了光伏发电的应用。它具有不消耗化石能源、规模灵活、无污染、安全可靠、维护简单等优点。主

要缺点是单位容量的光伏电池成本仍高于采用燃气等高效清洁化石能源发电形式。光伏发电受制于日光，具有发电持续性差、可靠性差等缺点，基本上不能单独完成全日发电。提高光伏转换效率，开发高效储能技术、与其他 DG 配合使用等是太阳光伏发电研究的重要课题。

1.6.4 燃料电池发电系统

燃料电池是一种在恒定的温度下，直接将存储在燃料和氧化剂中的化学能高效、环境友好地转化为电能的发电装置，理论上几乎不存在废弃物排放，是很有潜力的发电技术。它们本质上就是电池，但与普通电池相比其燃料几乎是无穷无尽的。因为它们以氢为原料，而氢可以从天然气、丙烷和其他碳水化合物中提取。氢与空气中的氧气产生化学反应并产生电压。目前进入商业试验运行的基于燃料电池的 DG 系统容量从 5kW 到 2MW 不等。它们也使用可燃气体，但与 GT 发电技术相比，从碳水化合物中分解氢气的代价很不经济，而且燃料电池电站目前的建设成本过于昂贵，容量的突破也有一定困难，所以燃料电池目前在燃气型分布式发电技术中应用并不广阔。

1.6.5 生物质能发电系统

生物质能发电系统采用农业、林业、城市垃圾和工业废弃物为原料的发电形式。人类使用生物质能由来已久，约 15% 的能源来自生物质能。它是一种理想的可再生能源，来源广泛，每年都有大量的工业、农业及森林废弃物产出。即使不被用于生产能源，这些废弃物的处理也是令人头疼的事情。目前采用固态垃圾填埋产生沼气发电、固态垃圾直接焚烧发电以及液态污水沉淀物分解产生沼气发电在发达国家人口密集的大中城市里应用广泛。1999 年我国生物质能发电的容量约为 800MW。

1.6.6 微型/小型燃气轮机发电系统

GT 发电是将燃料燃烧时释放出来的热量转变为电能的发电设施。按容量划分：大于 20MW 的属于大中型 GT 发电系统，1000~2000kW 的属于小型 GT 发电系统，而小于 1000kW 的则为微型 GT 发电系统。大中型 GT 发电用于热电站和联合循环电站，采用常规同步发电机以恒速方式运行，升压到 110kV 以上直接接入输电网。因 GT 发电机组起停快速，发达国家往往将它们作为调峰、调频机组，在整个电力产业中保持着 8%~12% 的比例。我国因燃气和石油资源匮乏，大中型 GT 发电机组很少。近年“西气东输”捆绑项目在东南沿海经济发达地区规划了十余座 GT 电站，目前部分项目已在建设中。

1.7 分布式发电的优缺点

与传统集中式发电比较，尽管集中式发电因为容量大，燃料费用便宜而具有规模效益。但是，随着分布式发电技术水平不断提高，这种优势在可预见的未来将逐渐减少，并且对以传统化石燃料为主要燃料的集中式发电机污染控制费用也极大减少了其相对分布式发电机的经济效益。此外，电力改革引起电力工业所有参与者，无论是买方，还是卖方对

市场力都更加敏感。通过安装 DG 可以避免传统集中式发电带来的“搁浅费用”。将 DG 引入电力系统主要应用优势如下：

(1) 在偏远地区、负荷突然增长地区，安装 DG 可以避免大量的输配电设备扩容费用。

(2) 通过合理优化分布式电源在电网位置和容量，可以明显降低电网线路损耗。

(3) 对于一些对可靠性要求较高的工业和商业用户，一些受到输配电网潮流约束的地区，或者对于一些旋转备用边界正在减小，电力短缺的国家，DG 机组可以作为后备机组或者紧急备用机组提高系统供电可靠性，减少停电损失。

(4) 发电系统在将燃料能量转化为电能的过程会产生大量热能，常规发电厂经常废弃了这些热能。分布式发电通过建立热电联产装置，可在居民区或商业区发挥供电供热双重作用，提高燃料利用效率并减少污染。

(5) 在峰值负荷或者峰值电价时，允许用户自行安装的 DG 机组卖电给电网公司，可以发挥削峰和抑制电价作用，具有较好的经济效益，并为用户安装 DG 提供了经济动机。

(6) 应用可再生能源或燃料电池等无污染或少污染的 DG 技术，满足了世界环保用电，节能及可持续发展要求。

(7) DG 容量小，体积小的特征使其安装便捷，投资时间短，降低了安装费用和投资风险。

然而，DG 的引入使配电网中各支路的潮流不再是单方向地流动，因此将会给整个电网带来深刻的影响。其影响主要表现在下面几个方面。

1. 对系统潮流和网络损耗的影响

在配电网中的负荷近旁接入分布式发电系统，整个配电系统的功率流向将发生变化。分布式发电可能增大也可能减小系统损耗，这取决于分布式电源的位置、其与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。

如果配电网中含有风力发电或光伏 (PV) 发电系统，由于它们的输出受天气的影响很大，具有随机变化的特性，使系统的潮流具有随机性，传统的潮流算法将不再适用。

2. 对电压的影响

分布式电源主要接入配电网，在接入 DG 之后，配电系统从放射状结构变为多电源结构，潮流的大小和方向有可能发生巨大改变，使配电网的稳态电压也发生变化，原有的调压方案不一定能满足接入分布式电源后的配电网电压要求。

以上讨论的都是分布式电源对配电网的影响。当风电场接入电网后，由于风电场输入风能变化的随机性，并且风力发电大多采用异步发电机，需从电网吸收大量无功功率，故很容易引起整个电网的电压稳定问题，甚至会导致整个电力系统的电压崩溃，而并不局限于所在配电系统。例如美国加利福尼亚州 Bakersfield 的 Seawest 风电场就经常出现电压稳定问题导致电网无法接受风电，强迫风电场停机。

3. 对电能质量的影响

分布式发电是建立在电力电子技术基础之上的，大量的电力电子转换器增加了大量的非线性负载，将会引起电网电流、电压波形发生畸变，引起电网的谐波污染，但是分布式

发电也存在改善电能质量的潜力，当电网关联负载较大时，分布式发电可以快速投入使用，使系统尽可能减少故障，提高整个电网的稳定性，从而保证了电能质量。

4. 对系统保护的影响

配电网中大量的继电保护装置早已存在，不可能为了新增的 DG 而做大量改动，因此 DG 必须与之配合并适应它。当配电网中接入了分布式电源之后，放射状网络将变成遍布电源和用户互联的网络，潮流也不再单向地从变电站母线流向各负荷，因此，分布式发电将对配电网原有的继电保护产生较大的影响：

(1) DG 运行时可能会引起继电保护的失效。DG 产生的故障电流可能会减小流过馈线继电器的电流，从而使继电保护失效。

(2) DG 接入配电网后可能会使继电保护误动作。相邻馈线的故障有可能会使原本没有故障的馈线跳闸。

(3) 改变了配电网的故障水平。故障水平提高还是降低取决于运行的分布式电源数量和种类，故障水平的提高要求开关设备的升级，故障水平的降低可能会给过电流保护带来问题。因此，若某配电区域的分布式电源容量很大，而使故障电流产生大幅度的变化，则必须提高其断路器的容量和升级保护装置。

5. 对可靠性的影响

如果 DG 仅作为备用电源则可以提高系统供电的可靠性，但如果 DG 与电网并联运行，就可能降低系统的可靠性，例如对于含有大量 DG 的系统，如果 DG 间相互协调不好，DG 就会降低系统的可靠性。另外，在系统中出现扰动时，由于 DG 的高度不确定性（如受太阳辐射强度影响的光伏电池），也可能降低系统的可靠性。

6. 对故障电流的影响

虽然在许多情况下 DG 接入配电网侧装有逆功率继电器，正常运行时不会向电网注入功率，但当配电系统发生故障时，短路瞬间会有 DG 的电流注入电网，增加了配电网开关

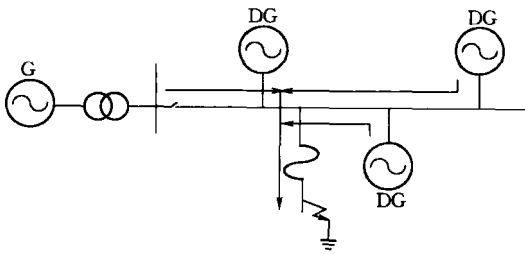


图 1-5 DG 对故障电流的助增作用

的短路电流水平，可能使配电网的开关短路电流超标。如图 1-5 所示，当配电网发生短路故障时，多个 DG 都会提供短路电流。目前配电网的短路电流水平已经接近了开关设备的额定电流，所以故障等级的提高要求电力系统增加投资成本改进开关设备。

7. 引起非计划孤岛

在某些情况下（如跳闸、断线等），一部分电网突然与大系统断开，这部分小电网内的 DG 将临时向负荷独立供电，这种状态就是非计划的孤岛运行，如图 1-6 所示。

由于非计划孤岛的出现具有不可预知性，运行条件缺乏事先规划，因而绝大多数不能满足电力系统安全可靠性的要求，将会带来许多问题：

(1) 电能质量下降。孤岛小系统内功率不平衡，频率和电压都发生变化，很难保证电能质量。

(2) 威胁公众及运行人员的安全。由于非计划孤岛的范围不确定,不能明确系统元件、线路是否带电,造成了对维修人员、运行人员、公众的安全威胁。

(3) 影响自动重合闸。形成孤岛运行后,分布式电源可能仍对跳闸线路的另一端供电,造成检无压重合闸失败,或因孤岛与主系统失步,检同期合闸失败,从而引起不必要的停电。

8. 对配电系统的实时监视、控制和调节的影响

原先配电系统的实时监视、控制和调度是由供电部门统一来执行的,由于原配电网是一个无源的放射型电网,信息的采集、开关的操作、能源的调度等相应比较简单。DG 的接入使这些过程复杂化,需要增加哪些信息,这些信息是作为监视信息、还是作为控制信息,由谁来执行等,均需要依据 DG 并网规程重新予以审定,并通过具体 DG 的并网协议最终确定。

9. 其他影响

由于 DG 安装在负荷中心,远离发电控制中心,为了保证 DG 高效可靠运行,必须增加大量分散控制设备,这样往往比安装输配电设备更复杂并增加了它的服务费用;对于应用燃料的分布式发电机,可能造成大量的燃料运输费用;一些新兴的 DG 技术如微汽轮机缺乏实际运行性能数据,投资者对它的运行可靠性、安全性缺乏了解而持谨慎态度,它们的推广应用仍然具有一定风险;联网费用计算、收取标准难以制定。DG 接入系统可能会带来备用等辅助服务需求,它自由接入或者退出网络特点使配电公司对 DG 投资商收费比传统发电机复杂,而且联网收费设置太高容易导致 DG 和 T&D 系统投资水平不高。

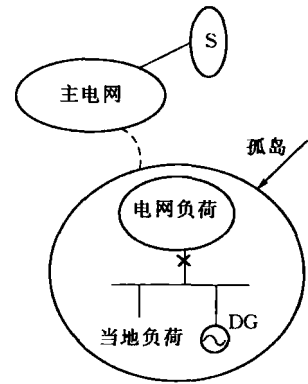


图 1-6 非计划孤岛运行

1.8 国内外分布式发电发展现状与前景

1.8.1 国外发展现状与前景

近年来,世界各国特别是美国、日本、欧盟各国分布式发电技术的研究和应用均得到了快速的发展。

美国是最早发展分布式发电的国家之一,特别是很早就开始发展以天然气为能源的燃气轮机、内燃机和微燃机发电的热电联产系统。自 20 世纪 70 年代开始开发以来,美国已有 6000 多座分布式能源站,仅大学校园就有 200 多个采用了分布式能源站供能。美国的分布式发电的总容量占世界第一位,据世界分散式能源联盟(World Alliance for Decentralized Energy, WADE)统计,截至 2004 年底,美国分布式发电容量已达 80GW,主要为热电联产项目,大多用于造纸、化学、炼油和食品四大工业。美国分布式发电的市场早已达 10 多亿美元,全球许多商用分布式发电设备是由美国提供的。美国在 2003 年颁布了 IEEE Std. 1547-2003《关于分布式电源与电力系统互联的标准》,并通过了有关的法令,