



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 分布式发电技术

殷桂梁 杨丽君 王 珺 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 分布式发电技术

殷桂梁 杨丽君 王珺 编著



机械工业出版社

本书系统深入地论述了分布式发电系统的基本理论、热电联产的基本原理、基于市场价格模型的有功-频率控制以及分布式发电系统的孤岛检测方法,较全面地反映了分布式发电的最新科技成果。主要内容有:微型涡轮发电机系统、光伏发电系统、燃料电池、小型风力发电和能量存储系统等分布式电源的基本运行原理和设计方法;分布式发电与热电联产的关系、经济效益分析和热电联产系统的性能优化;分布式发电系统的动态模型和基于市场价格信号的分布式发电系统频率稳定性分析;分布式发电系统的孤岛检测理论、方法和检测标准等。本书的特点是:层次分明、重点突出,概念阐述准确、清楚,公式推演全面、易于讲授,便于自学,注重与工程实际结合,实用性强。

本书主要作为普通高等学校电气工程自动化、电力系统及其自动化及相关专业的本科或研究生教材,也可作为从事新能源开发、分布式发电和配电网自动化等相关工作的工程技术人员的参考书。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)下载或发邮件到[Edmondyan@hotmail.com](mailto:Edmondyan@hotmail.com)索取。

### 图书在版编目(CIP)数据

分布式发电技术/殷桂梁,杨丽君,王珺编著. —北京:机械工业出版社, 2008.9

21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-25072-2

I. 分… II. ①殷…②杨…③王… III. 发电-技术-教材 IV. TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第137818号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明

责任校对:张媛 封面设计:王伟光 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(北京樱花印刷厂装订)

2008年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·290千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25072-2

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

# 21 世纪电力系统及其自动化规划教材

## 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先（兼秘书）

委 员：（以姓氏笔画排序）

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 尹项根 | 毛承雄 | 车仁飞 | 文明浩 | 文劲宇 |
| 叶俊杰 | 刘学东 | 刘宪林 | 孙丰奇 | 许 珉 |
| 李 扬 | 李庚银 | 吴耀武 | 陆继明 | 张 利 |
| 张 波 | 杨国旺 | 杨宛辉 | 杨淑英 | 杨德先 |
| 陈 卫 | 陈少华 | 罗 毅 | 房俊龙 | 易长松 |
| 赵书强 | 赵玉林 | 赵丽平 | 娄素华 | 栗 然 |
| 盛四清 | 常鲜戎 | 梁振光 | 韩学山 | 游志成 |
| 熊信银 | 魏 萍 |     |     |     |

# 前言

以燃料的多元化,设备的小型、微型化,电热联产化,网络化,智能化控制和信息化管理,高标准的环保水平为特点的第二代新能源系统正以不可阻挡的速度在世界范围内迅速发展,在电力系统配电网中形成新的电能供需模式——分布式发电模式,它已开始打破一个世纪以来以中央系统集中发电的模式,这是完全区别于20世纪大电厂、大电网发展能源产业的全新理念。为了深入了解分布式发电技术及分布式电源并网后对电力系统可能产生的正面或负面的影响,指导从事电力系统研究、开发的工程技术人员、电气工程专业的大学教师及研究生和本科生,使他们充分掌握分布式发电技术的基本原理、理论和方法,本书作者根据近几年在分布式发电技术方面的研究心得,特编写了本书。

本书第1章简要论述了电力系统的发展,分布式发电的起源,分布式发电的经济性能和环境所起的积极作用以及分布式发电系统中可能采用的先进的控制和通信技术。第2章主要介绍目前常用的分布式电源如微型涡轮发电机、光伏电源、燃料电池和风力发电等的工作原理和设计方法。由于某些分布式电源如太阳能光伏发电、小型风力发电等输出电能为间歇性的,且分布式电源通常不具备很大的旋转动能,为保证供电的连续性和维持供用电之间的动态平衡,能量存储系统是分布式发电系统中不可缺少的部分,因此本章对应用于分布式发电系统中的主要能量存储系统如蓄电池、超导电磁储能系统、超级电容储能系统以及高速飞轮储能系统作了详细的介绍。目前分布式发电的电能价格还远高于常规的发电,为提高能源的利用率,热电联产是分布式发电的一个重要的发展方向,因此第3章主要介绍分布式发电的热电联产技术,分析了分布式发电的热电联产的主要性能以及热电联产系统的经济效益和燃料的优化。第4章主要论述了分布式发电系统的频率动态特性,并采用基于市场价格的分布式发电模型对分布式发电系统的有功-频率控制的动态性能进行了详细的分析。分布式发电的一个主要的优点是可以提高供电的可靠性。然而当分布式发电系统孤岛运行时将对电力系统和用户造成潜在的危害。若由于某些人为的因素或故障造成分布式发电系统孤立运行,必须采取一定的措施将可能的危险降低到最小。因此分布式发电系统的孤岛检测是分布式发电系统的研究中一个重要的方面。第5章主要介绍目前常用的孤岛检测方法及其优缺点,并简要介绍孤岛检测的标准。

本书由殷桂梁、杨丽君和王珺合作撰写。殷桂梁拟订了本书的大纲并撰写了第1、2、5章,杨丽君撰写第3章,王珺撰写第4章。全书由殷桂梁统稿。在

本书的撰写过程中得到了田杰的大力帮助，在此表示谢意。

本书能够顺利出版，得到了机械工业出版社的大力支持和帮助。另外，本书的部分研究工作是在国家自然科学基金委员会的资助下完成的，谨致衷心的感谢。

限于作者水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

作 者 言 明

2008年7月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 前言                         | 1   |
| 第1章 绪论                     | 1   |
| 1.1 分布式发电的起源               | 1   |
| 1.2 分布式发电与经济和环境的关系         | 5   |
| 1.3 分布式发电系统中的控制和通信技术       | 8   |
| 第2章 分布式电源                  | 11  |
| 2.1 微型涡轮发电机                | 11  |
| 2.2 光伏电源                   | 27  |
| 2.3 燃料电池                   | 41  |
| 2.4 风力发电                   | 54  |
| 2.5 能量存储系统                 | 69  |
| 第3章 分布式发电系统的热电联产           | 88  |
| 3.1 概述                     | 88  |
| 3.2 热电联产系统                 | 88  |
| 3.3 热电联产系统的典型应用            | 95  |
| 3.4 热电联产系统的经济性分析           | 98  |
| 3.5 热电联产系统的效益分析            | 101 |
| 3.6 热电联产系统的性能和燃料优化         | 102 |
| 第4章 分布式发电系统的控制             | 108 |
| 4.1 概述                     | 108 |
| 4.2 电力系统发展                 | 108 |
| 4.3 系统频率性能与分布式发电           | 111 |
| 4.4 分布式电源模型                | 113 |
| 4.5 分布式发电系统模型及频率调节         | 115 |
| 4.6 分布式发电与市场结构集成时的控制       | 126 |
| 第5章 分布式发电系统的孤岛检测           | 143 |
| 5.1 反孤岛保护的基本原理             | 143 |
| 5.2 远程孤岛检测                 | 148 |
| 5.3 分布式同步发电机孤岛的本地检测        | 150 |
| 5.4 基于逆变器的分布式发电系统的本地孤岛检测方法 | 155 |
| 5.5 孤岛检测标准和测试技术            | 172 |
| 参考文献                       | 176 |

# 第1章 绪论

## 1.1 分布式发电的起源

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。但它也存在一些弊端，主要有：①不能灵活跟踪负荷的变化。如夏季空调负荷的激增会导致电力供应短时不足，而为这种短时的峰荷建造发输电设施是得不偿失的，因为其利用率极低。随着负荷峰谷差的不断增大，电网负荷率正逐年下降，发输电设施的利用率都有下降的趋势。②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；而电力系统越庞大，事故（如雷击）发生的概率越高。因此可以说，现有的电力系统是既“笨拙”而又“脆弱”的。目前，大电网与分布式发电（Distributed Generation）相结合被世界许多能源、电力专家公认为是能够节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式，是 21 世纪电力工业的发展方向<sup>[1]</sup>。分布式发电指的是通过规模不大（几十千瓦~几兆瓦）、分布在负荷附近的发电设施实现经济、高效、可靠地发电。

### 1.1.1 从集中发电到分布式发电

分布式发电并不是一个全新的概念，直到电能可以完全商业化取代蒸汽、水力、直接燃烧等能量驱动负载之前，所有电能的产生都分布于需要能源的设备或设施附近，以分布式发电方式对负载供电。

从电力工业的初期阶段开始，电能就一直在与燃油争夺消费者。19 世纪中叶，位于用户居住地的独立的系统——电弧灯，即开始试图取代挥发性的由氢和一氧化碳的混合物作为燃料的较便宜的瓦斯灯。在现代能源工业中，汽油的生产和输送是第一个集中生产的产品。汽油最初由用户自己生产，后来发展到大的炼油厂。到 19 世纪 70 年代，汽油实际上已通过管道在美国和欧洲的每一个主要城市流通。

燃料油的规模经济使得大范围的市政照明成为可能，然而规模经济并不能对油灯的诸如光线昏暗、燃烧产生的烟雾使得房间烟雾弥漫以及燃烧产生的热能使得房间闷热等缺点起任何作用，因此当油灯被更清洁、更清凉的电灯取代时，汽油燃烧产生的有害元素便离开了人们的房间。爱迪生建立了第一个电力系统，该系统仿照燃油照明工业，但是其能量的输送是通过虚拟的管道给灯丝而不是给油灯提供能量。就像汽油供应一样，为减少生产单位功率电能费用，电能不可避免地采用了集中生产、分配和系统管理的方式。

最初，电力系统建立在空旷的区域，没有任何服务设施，系统是孤立的，不与任何其他系统连接。然而，到了 20 世纪 20 年代末期，电力网络一个又一个相互连接，并带来了明显的优点，如共享峰值负荷、能量互为备用等，使得系统的规模不断的增大。但是，电力系统规模的扩大并没有限制技术的进步，最初为太空飞船开发的燃料电池，为喷气式飞机提供动力的涡轮发动机、太阳能发动机、光伏发电系统和风力发电系统等绿色能源在电力和能源市

场上找到了自己的位置。迅速发展的通信技术和微处理器技术为新的发电方式提供了所需要的监测、传输和分配结构,所有这些意味着集中发电和配电系统一统天下的时代将受到新的发电方式——分布式发电系统的挑战。

### 1.1.2 分布式发电概述

分布式发电可与配电网络并网运行,也可直接向用户设备供电。在未来 20 年内,分布式发电具有占新增发电容量 20% 的潜力。据美国的电力研究所估计,到 2010 年,分布式发电可能将达到每年 2.5 ~ 5GW<sup>[2]</sup>。分布式发电技术包含小型燃烧涡轮发电机、往复式内燃发电机、光伏电池阵列和燃料电池等,其他技术如太阳热能转换发电、斯特林发动机发电和生物燃料发电技术等也可认为是分布式发电技术。分布式发电机的单机容量一般在 10MW 以下。

分布式发电对电力系统和用户来说是多用途的,可以作为备用发电容量、削峰容量,也可承担系统的基本负荷,还可实现热电联产同时为用户提供电能和热能。对于电力系统的运行,分布式发电还可起到电压自动调节、电压稳定、系统稳定、电气设备的热启动和旋转动能贮备等作用。

分布式发电技术的应用对环境污染的减少也起着重要的作用,某些分布式发电技术采用纯绿色能源(如光伏发电),显著地减轻了燃煤电厂产生的污染。烧天然气的分布式涡轮发电机比许多最新的燃煤热电厂减小四分之一的二氧化硫、百分之一的氧化氮以及百分之四十的二氧化碳排量。因此分布式发电是非常清洁的发电方式,可以建立在居民区和商业中心。

在市场经济的推动下,电力结构的调整激励人们考虑分布式发电技术。在电力结构的重组中,中枢电力设施遭受着非常繁重的费用负担。当然有可能通过临时性的固定投入来缓解所承受的负担,而采用分布式发电技术可避免这些费用。在旋转动能贮备容量较小、工业和商业用户的用电和输配电受到潮流限制的地区,可优先发展分布式发电。推动分布式发电技术发展的另外一个因素是日益紧张的能源。由于经济的发展,人均用电量的不断增长,在用电高峰期如炎热的夏天,越来越多的地区受到短时停电的威胁。大型工矿企业和商业中心往往考虑采用先进的分布式发电技术来保证自身的不间断供电。

尽管分布式发电技术是在上述合理的理由下发展起来的,但应注意:分布式发电技术是一个具有一定破坏性的技术,如果采用陈旧的技术,则可能使得其经济或技术性能比传统的集中发电技术还差。因此必须采用先进的发电技术并商业化,才能使分布式发电的性能迅速改善,并占有越来越大的市场。与传统的发电系统相比,分布式发电趋向于更小、更简单,因此在不久的将来,用户便能够以承受得起的价格拥有和运行分布式发电。表 1-1 为可实用化的分布式发电技术<sup>[3]</sup>。

表 1-1 可实用化的分布式发电技术

| 技术参数               | 内燃发电机      | 微型涡轮发电机     | 光伏电池阵列    | 燃料电池        |
|--------------------|------------|-------------|-----------|-------------|
| 功率调度能力             | 有          | 有           | 无         | 有           |
| 容量                 | 50kW ~ 5MW | 25kW ~ 25MW | 1kW ~ 1MW | 200kW ~ 2MW |
| 效率 (%)             | 35         | 29 ~ 42     | 6 ~ 19    | 40 ~ 57     |
| 安装费用 / ( \$ / kW ) | 200 ~ 350  | 450 ~ 1000  | 6600      | 3750 ~ 5000 |

(续)

| 技术参数                        |     | 内燃发电机 | 微型涡轮发电机      | 光伏电池阵列      | 燃料电池         |
|-----------------------------|-----|-------|--------------|-------------|--------------|
| 运行维护费用/ ( \$ /kW · h )      |     | 0.01  | 0.005-0.0065 | 0.001-0.004 | 0.0017       |
| NO <sub>x</sub> / ( kg/kJ ) | 天然气 | 0.3   | 0.1          | —           | 0.003 ~ 0.02 |
|                             | 油   | 3.7   | 0.17         | —           | —            |
| 技术状态                        |     | 商业化   | 大容量商业化       | 商业化         | 商业化          |

1. 内燃发电机组 往复式内燃发电机组是作为紧急备用电源所采用的最常用的技术,柴油机和四冲程汽油发动机具有最丰富的实际运行经验,其单机价格在所有分布式发电技术中是最低的,但其运行和维护费用最高。此外,柴油和汽油发动机产生的废气污染很严重,但若采用天然气作燃料,其废气污染可大为降低。

采用内燃发动机的主要缺点如下:

- 1) 维护费用在所有的分布式发电技术中为最高,因为内燃发动机具有大量的运动部件。
- 2) 氧化氮的排量在所有分布式发电技术中最高。
- 3) 噪声太大,主要为低频噪声,比其他分布式发电更难控制,采用适当的技术减小是可能的。

内燃发电机组的优点是:

- 1) 安装费用最少。
- 2) 效率比较高,可达 32% ~ 36%。
- 3) 在建筑物中可实现热电联产。
- 4) 模块化设计非常好,具有几乎可以与任何建筑物内的负荷匹配的机组 (千瓦 ~ 兆瓦级),带部分负荷时的效率高。

2. 微型涡轮发电机组 微型涡轮发动机是布雷顿发动机,采用空气和天然气产生轴向的机械功率,图 1-1 为双轴微型涡轮发动机的基本组成示意图。图中涡轮发动机采用双轴结构,也可采用单轴结构,即在一个加长的轴上同时带有压缩机和负荷。微型涡轮发动机的双轴设计可提供更好的控制,但需增加一个旋转部件以及两个以上的高速轴承。电能可由安装在微型涡轮发动机输出轴上的永磁发电机或通过减速齿轮机构传动的同步发电机产生。

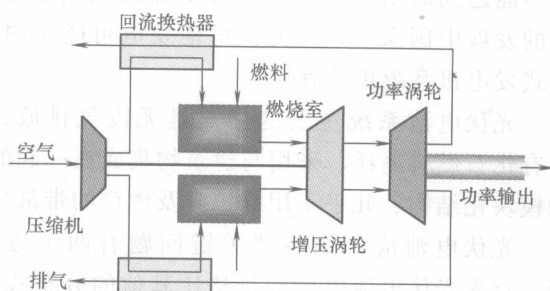


图 1-1 双轴微型涡轮发动机的基本组成示意图

图 1-2 为 10kW 微型涡轮发电机,图中没有包含回流换热器。在大部分涡轮发电机组中都采用回流换热器,因为大约一半的工作流体的热能可从燃烧气体的排气中转换回来。没有回流换热器时,微型涡轮发电机的总效率只有 15% ~ 17%,而当采用 85% 的回流换热器时,微型涡轮发电机的总效率可达 33%。不带回流换热器的微型涡轮发电机其燃烧室只能产生较小的电能,其热能可供给热力系统,组成热电联产系统。

在美国,少数微型涡轮发电机组生产厂家已生产出 25 ~ 150kW 的产品,大部分产品的

额定容量在 100kW 以内。到 2000 年初, 美国大约已安装了近 1000 台微型涡轮发电机组。微型涡轮发电机组吸引人的性能为安装费用低、效率高 (30% ~ 33%)、废气排量适中、在工业和建筑物中可实现热电联产以及优良的模块化结构 (几乎任何负荷均可采用多台小到中型容量的微型涡轮发电机组供电)。

微型涡轮发电机组应用的关键问题为以下几个方面: 首先, 其维护费用较高; 其次, 带部分负荷时的效率还不明确, 因为生产厂家给出的参数都不同; 第三, 缺乏现场运行经验; 第四, 为减小维护工作量可采用空气轴承, 但对空气的过滤要求很严格; 最后, 微型涡轮发电机组将产生高频噪声。

3. 光伏电池阵列 光伏电池直接有效地将太阳光中充满能量的光子转换为电能。由于太阳光为漫散射的能源, 为产生足够的电功率, 一般需要很大的光伏电池阵列, 但光伏电池本身不消耗燃料。当今, 全球的光伏电池市场可达每年 100MW, 一个典型的平板光伏电池阵列如图 1-3 所示。

光伏电池阵列的价格在过去的 30 年中至少下降了两个数量级, 但在某些地方要取代传统的发电技术, 其价格还是太高。但是在电力网络不能达到的山区, 或者电力基础设施从未建设的发展中国家, 采用光伏电池发电可能比内燃式发电机系统更便宜。

光伏电池系统主要的优点是无废气排放、没有化石燃料消耗、采用与建筑物集成在一起的模块可联合生产低温热能为房间供暖、优良的模块化结构、几乎不用维护以及优良的带部分负荷效率等。

光伏电池应用的主要关键问题有两个方面, 首先光伏电池电能的价格比其他的分布式发电系统高; 其次是输出的功率是断续的, 不能与负荷完全匹配, 因此常常需要蓄电池或其他辅助系统。

4. 燃料电池 燃料电池是将氢和氧不经燃烧, 而是通过催化剂直接产生电能的装置, 图 1-4 为燃料电池的工作原理图。

目前燃料电池的种类有: 磷酸燃料电池, 其运行温度为 150℃; 质子交换膜燃料电池, 运行温度为 94℃; 熔融碳酸盐燃料电池, 运行

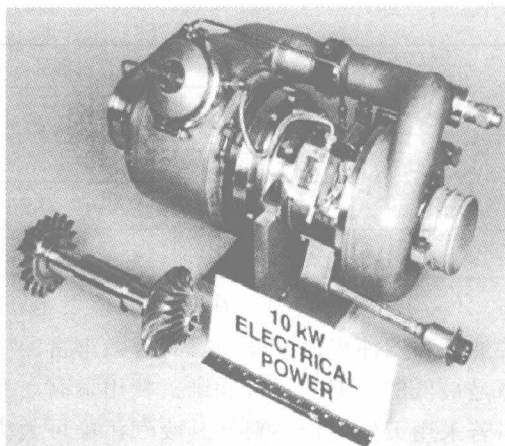


图 1-2 10kW 的微型涡轮发电机

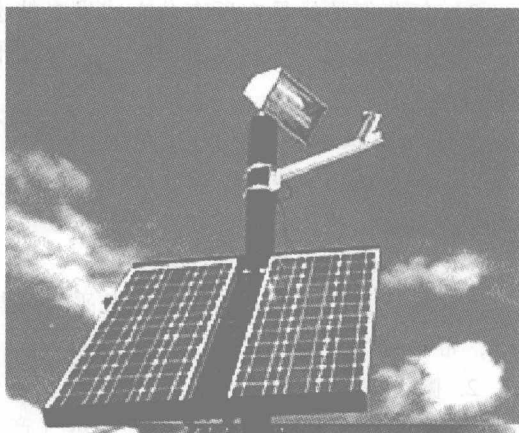


图 1-3 平板光伏电池阵列

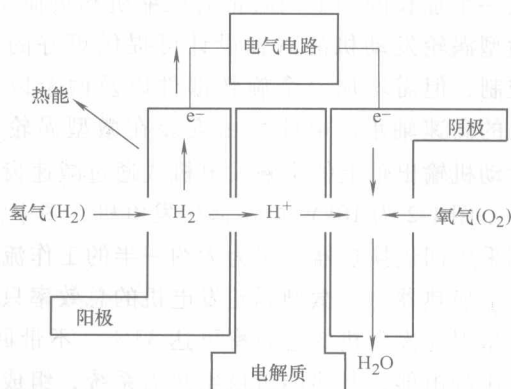


图 1-4 燃料电池的工作原理图

温度为  $650^{\circ}\text{C}$ ；固体氧化物燃料电池，运行温度为  $700^{\circ}\text{C}$ 。由表 1-1 可知，目前燃料电池生产电能的费用太高，根本不能与常规发电系统生产的电能竞争，但专家们指出，随着批量生产的实现，价格将下降很多。安装费用并不总是决定选择分布式发电技术的决定因素，当受到环境和规章制度的严格制约时，燃料电池是除了可更新能源外唯一真正清洁的生产电能的方式。

制约燃料电池应用的关键问题是价格太高、氢气的大规模生产、不确定的维护费用以及某些燃料电池不能承受建筑物内负荷变化的暂态响应等因素。

燃料电池主要的优点有：副产品是水，氧化氮的排量非常低，效率非常高，可达 50% ~ 60%，以及优良的模块化结构等。

## 1.2 分布式发电与经济和环境的关系

### 1.2.1 分布式发电的经济性

将新涌现的分布式发电技术集成到已存在的、常规的、低廉的、性能已证实的电力系统中可能是很困难的。根据总的费用和利益，分布式发电系统的拥有者将决定赢利是否超过所花的费用。由于所考虑的费用和利益的数目很多，且互相之间相差很大，例如资金和能量、运行和维护以及保险费和环境方面的利益等，需要采用统一的方法对它们作出公平的对比。

经济性是分布式发电设计评估和系统运行应重点考虑的问题，因为它是回答下述最基本问题的工具：

- 1) 分布式发电系统到底应该多大，它是否能够承担所有的电气负荷，还是只承担平均负荷。
- 2) 分布式发电生产的电能价格如何，能否与其他能量资源竞争。
- 3) 拥有分布式发电系统的经济利益如何，是否值得投资。
- 4) 对于一栋建筑物所需电力和燃油消耗率，是否值得安装一套分布式发电系统。若在一定的时间内能够在其他地方买到电能的话，自己发电可能是没有意义的，因此必须作出一年中每个小时能否买到电能的判断。

所有这些问题都可采用微观经济学的相同原理以不同的方式解答。分布式发电系统的费用基本为下述两种类型：

- 1) 初期投资——建立一个分布式发电系统的费用是多少，例如建立一套微型涡轮发电机系统的一次性投资。
- 2) 运行费用——维持和运行一套系统的费用，例如一套微型涡轮发电机系统的年维护和运行费用。

因此应该在一个统一的结构下，计算出一次性投资和运行费用，并将之折算为每年的总费用，因为大部分公司是以财政年度来考虑的。

同样，系统的赢利应根据分布式发电系统的经济寿命来累计。例如分布式发电系统的赢利可通过拥有者所减少的用电量账单计算。简单地说，分布式发电系统的投资者希望其赢利大于其所投资的费用。

假设一个 100kW 的分布式发电系统以额定容量运行一年（8760h）之中的 8000h，如果

电力系统的电价为  $0.05 \text{ \$}/\text{kW} \cdot \text{h}$ ，则此分布式发电系统的年赢利为

$$B = (100\text{kW} \times 8000\text{h}/\text{年}) \times 0.05 \text{ \$}/\text{kW} \cdot \text{h} = 40000 \text{ \$}/\text{年}$$

而安装该系统的费用为  $1200 \text{ \$}/\text{kW}$ ，或总费用为  $120000 \text{ \$}$ 。如果所有费用按 8 年来支付，则年付款（不考虑利息）为

$$A = 120000 \text{ \$}/8 = 15000 \text{ \$}/\text{年}$$

从表面上来看，采用该分布式发电系统的年赢利为  $25000 \text{ \$}$ 。上述粗略的计算当然不是很正确，因为忽略了下述一些关键的因素：

1) 现金的花费，如果 8 年的年利率为 8%，则将增加年费用  $6000 \text{ \$}$ 。

2) 设备的维护费用取决于采用的技术，可能每年要增加  $7000 \text{ \$}$ 。

3) 燃料费用取决于当地的燃料价格，可能每年要增加  $3000 \sim 4000 \text{ \$}$ 。

因此考虑了所有的费用后，本来是切实可行的项目就达到了差不多投资和赢利平衡的边缘。另外，如果分布式发电系统产生的热能可就地利用的话，将减少电能生产相关的燃料费用三分之二左右；如果政府支持分布式发电系统，投资的贷款利率可能降低。结合上述这些有利的因素，分布式发电的经济性还是很有吸引力的。总之，要在分布式发电上投资，在经济上必须仔细分析收支平衡。

对分布式发电系统的评价可采用三个重要的指标。第一个为偿还周期，例如上述例子中，系统的投资运行费用为  $120000 \text{ \$}$ ，每年的收入为  $40000 \text{ \$}$ ，则偿还周期  $P$  为

$$P = 120000 \text{ \$}/(40000 \text{ \$}/\text{年}) = 3 \text{ 年}$$

由于忽略了上述一些关键的费用，采用偿还周期来评估项目是非常不完善的。

第二个并且更好的指标为内部回报率，定义为分布式发电系统为其拥有者产生的收入率。分布式发电系统的拥有者投资并从所卖出的电能（和热能）中赚钱类似于人们在股票上的投资并从所投资的股票的红利中赚钱。内部返回率的计算更困难，但是很值得，因为内部回报率可正确地评价投资。

可用于分布式发电系统收支平衡的第三个指标是生存周期费用，该方法也可正确地对分布式发电系统进行评估。在生存周期费用和内部回报率中考虑的费用主要有现金的花费、分布式发电系统投资费用、维护费用、保险费用、运行费用、燃料费用和税。而收入主要为电费、热能费、电能质量改善相关赢利、分布式发电系统能够提供的其他辅助服务以及环境方面的收益等。

应该注意的是，偿还周期仅仅包含上述列出的关键参数中的少数，谁拥有分布式发电设备、支付能源费用、从分布式发电系统中赢利，取决于分布式发电系统的所有关系，如租借、由电力公司建立或由物业拥有者所有等。

最后应讨论的是分布式发电系统生产电能的费用的计算方法，当上述所有因素都确定后，费用的计算就比较简单。电价可用分布式发电系统生产的电能除以拥有和运行分布式发电系统的年费用来得到，例如假设分布式发电系统年发电量为  $100000\text{MW} \cdot \text{h}$ ，花费为  $7200000 \text{ \$}/\text{年}$ ，则电价  $C_e$  为

$$C_e = 7200000 \text{ \$}/(100000\text{MW} \cdot \text{h}/\text{年} \times 1000\text{kW} \cdot \text{h}/\text{MW} \cdot \text{h}) = 0.072 \text{ \$}/\text{kW} \cdot \text{h}$$

### 1.2.2 能源与环境的关系

根据上述经济性分析，分布式发电技术要进入现存的电力市场是比较困难的，然而分布

式发电技术具有的潜在的环境方面的优势可能是其进入受保护的电力市场的关键因素。众所周知,传统的电力工业是空气污染的主要根源,占67%发电量的化石燃料电厂释放的气体包含的直接对人类健康有害的成分有二氧化硫、氧化氮、灰尘、挥发性的有机成分、一氧化碳以及包括铅和水银的各种重金属等<sup>[3]</sup>。另外,在太阳的光和热的作用下,挥发性的有机成分与氧化氮化合将形成臭氧。其他气体可能对环境存在间接的影响,如二氧化碳对全球气温变暖的影响。电力的生产将分别占二氧化硫、氧化氮和二氧化碳排放的66%、29%和35%。

在化石燃料电厂中,燃煤电厂的空气污染占非常大的比例,燃煤电厂占化石燃料电厂的大约84%,而产生的空气污染占90%以上。

除燃料对环境的影响外,电厂的厂址对空气污染的影响也非常大,当考虑电厂厂址周围环境时,厂址的选择是非常重要的,因为处于下风的地区将存在大范围的空气污染。例如,如果空气的流动主要为从西向东时,位于燃煤电厂东部地区空气中的臭氧污染标准直接与西部的电厂所排放的氧化氮有关。

经过许多年按计划经济的市场结构的运行,电力工业面临巨大的变革,包括新的发电和输电技术以及与竞争和规章有关的政策的转变。在理论上目前已提出新的电力工业的政策方针,即应该用市场经济取代目前按计划经济运行的结构,因为按计划经济运行的结构自然形成了垄断的电力公司。通过按市场经济运行中获得益处的公平交易、电力工业的阶段化和区域化以及特定的行为,电力工业的重组可减小和转变政府在该行业的作用,总的意图是促进经济的发展,因为电力工业的重组可能将导致总的电价的降低。

但是单纯从经济效益方面的考虑可能将导致在其他方面付出更大的代价,而在传统的计划经济的电力工业中,其他因素与经济效益已取得了平衡,例如与电力工业重组相关的环境方面,竞争的电力市场可能导致令人讨厌的污染排放的增加。如果更低的基本负荷电价使电力需求增加,则除了发电量的增加外,还将伴随着污染排放的增加。另外,也可能导致重新启用陈旧的、污染非常严重的发电设备。

电力工业的重组与因而产生的环境影响之间的关系不是简单的关系,最终产生的环境方面的效果取决于对下述两个方面的动态过程的平衡所作出的决定:第一个方面是电力需求的平衡。为了向新的建筑物或当前供电区域中不断增加的负荷供电,是对正在运行的发电设备进行增容还是开发和采用新涌现的发电技术如分布式发电技术;第二个方面是或者采用当前使用的环境保护规章制度,或者促进将来的环境保护规章制度的颁发的决定。电力工业的重组将不同程度地影响上述每个方面,可能促进某些方面,如现存设备的增容,但对某些方面可能是挑战,如现在所使用的环境保护标准。

### 1.2.3 分布式发电技术的环境属性

在与分布式发电技术有关的气体、液体和固体物质的排放中,分布式发电系统的空气质量在允许的环境保护标准下,可能是影响项目实施的最主要的因素。氧化氮和二氧化碳是常规发电技术中比较严重的排放类型,而二氧化硫也是传统的发电设备中一个重要的排放类型,但对于分布式发电技术,二氧化硫的排放可以忽略。

几种分布式发电技术和常规的发电设备的空气污染排放如表1-2所示<sup>[3]</sup>。分布式发电设备的排放数值是通过理论计算或实验室测试得到的,每一种分布式发电技术实际的空气污染

排放流量取决于分布式发电设备最终的设计特性和终端用户的特点。由表 1-2 可知, 不同分布式发电技术的空气污染排放相差很大, 燃料电池是最清洁的, 然后是微型涡轮发电机组和内燃发电机组。对所有污染种类, 燃料电池的空气排放非常低。除了二氧化碳排量比较大之外, 微型涡轮发动机也有很低的空气污染排放。与常规的发电技术相比, 分布式发电设备的每千瓦小时的空气污染排量减小了很多。

表 1-2 不同发电技术的空气污染排放特点

| 采用的技术      | 污 染 物                        |                              |                |                              |
|------------|------------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
|            | NO <sub>x</sub> / (g/kW · h) | CO <sub>2</sub> / (g/kW · h) | CO/ (g/kW · h) | SO <sub>2</sub> / (g/kW · h) |
| 常规发电       |                              |                              |                |                              |
| 煤          | 0.1 ~ 2                      | 55.9                         |                | 0.07 ~ 2.55                  |
| 天然气        | 0.005 ~ 1                    | 31.7                         |                | 0.3                          |
| 残余燃料油      | 0.05 ~ 1                     | 46.8                         |                |                              |
| 分布式发电      |                              |                              |                |                              |
| 微型涡轮发电机    | 0.4                          | 119                          | 0.11           | 0.0006                       |
| 内燃发电机 (汽油) | 3.1                          | 119                          | 0.79           | 0.0015                       |
| 内燃发电机 (柴油) | 2.8                          | 150                          | 1.5            | 0.3                          |
| 燃料电池       | 0.003                        |                              |                | 0.0204                       |

### 1.3 分布式发电系统中的控制和通信技术

从过去的观点来看, 引起人们很大兴趣的分布式电源并不需要集中管理和控制, 但是, 对于优化的市场运行, 即在一个公开的市场中, 可从不同分布式电源买电和卖电这种新涌现的能源竞争环境来说, 分布式电源的集中管理和控制则是必不可少的。对于分布式发电技术来说, 虽然新的产品需要生产, 新的商业模型需要开发, 但要推动分布式发电市场的开放, 并没有多少技术上的障碍。然而能够在开放的市场中有效地运行的技术还没有在高度集中的、分层控制的电力系统的监控和数据采集系统 (SCADA) 中得到广泛的应用。

电力公司拥有的发电设备和变电站一般都装配了可对整个系统实现中央集中控制的 SCADA 系统, 这些系统是专门设计的, 已经在系统中运行了很长的时间。这些系统不是为动态的分布式发电市场而设计的。在动态的分布式发电市场中, 拥有发电资产的用户可频繁地加入或退出电力网, 电能的买卖为实时的, 并且不同市场的参与者可以控制不同的分布式发电的潮流。

最终能够使得开放的分布式发电市场正常运转的是能源消费者, 他们能够使用适当的工具作出合理的市场选择。管理分布式发电的通信和控制技术必须解决多个供应商、动态用户、市场产生的容量以及变化的发电资源等方面带来的问题。一个运行良好的分布式发电市场更有可能更多地采用通常的相互交易的电子商务, 而较少采用常规的电力公司的 SCADA 系统。这样的系统将具有对不同分布式发电技术产生实时价格的机制, 以及为能源消费者提供全部的消费方案建立动态价值链的机制, 能够满足这样柔性的、可升级的通信和控制系统需要的是分布式智能控制。

### 1.3.1 分布式智能控制

分布式发电将起到当前计算机工业中分散的台式和笔记本计算机相同的作用。在计算机系统中,大型计算机给小型的、在地理上分散的台式和笔记本计算机提供了一个完全集成的、极端柔性的网络。在当今的电力工业中,中央电厂仍将继续起到非常重要的作用,但对更小型的、清洁的分布式发电的需求在不断地增加,如燃烧涡轮发电机、燃料电池、风力发电机、光伏电池阵列等,所有这些发电技术都需要能量存储系统的支持。这样的系统基本上需要采用先进的电力电子控制技术,因为分布式发电系统复杂的连接关系将带来大量的信息和功率交换,因此采用先进的电力电子控制技术来处理这些信息是绝对基本的需要。

从信息处理的方面来看,用作系统协调的单一的中央控制系统不能有效地满足分布式发电系统的控制要求,应设计能与分布式、多用户和动态分布式电源管理特性匹配的通信和控制系统。随着互联网的普及应用,最小型的嵌入式控制器都已具有很强的通信能力。目前大部分卖主通过建立网络服务器将他们的产品在互联网上销售,网络服务器为个人的资产提供了远距离监视和控制接口的能力,这是走向分布式智能控制的第一步。将许许多多不同的卖主组成的系统实现集中和协调的运行控制为分布式智能控制的第二步,在此需要进一步开发分布式计算、嵌入式控制和广域通信寻址等技术。最后一步是开发普遍适应的平台,将用户所需的服务送到用户的手中,而互联网提供了最广泛有效和增长最快速的平台。

分布式智能控制应采用自底向上的设计方法,即基于将智能决策能力扩展到系统中每一个相关部分的高度可升级的控制方法。为使分布式发电系统发挥出所有的潜力,其通信和控制系统的设计必须打破自顶向下的设计模式,而是采用基于分布式系统智能的自底向上的设计方法。

### 1.3.2 分布式发电通信和控制系统可采用的技术

在一个开发的市场环境中,实现分布式发电的有效控制、调整和优化需要将下面4个各具特色的能力集成在一起:分布式控制、分布式计算、广域通信和基于微处理器的嵌入式控制。

1. 分布式控制 传统的分布式控制是指用于解决由很多很小的互相关联的子问题组成的复杂控制问题的概念和技术,在问题的解中,子问题涉及到一定程度的协同过程。分布式控制系统适合于具有上百个变量的大规模系统,通常这样的大规模系统采用中央控制是不可行的,分布式控制的典型应用是设计故障容错系统,在这样的系统中,单个子系统的故障不会导致整个系统的灾难性崩溃。

另外一个相关的控制是智能控制,其主要目的是在一个复杂的系统中,增强控制器的能力和适应性,使系统从具有随动功能转变为具有过程管理和过程调整等功能。在智能控制中,将专家系统、神经网络和遗传算法等与最新的通信、分布式处理和运行研究方法结合使用,扩充了控制器的操作性能和工作范围。目前有多种分布式控制方法,特定的分布式控制方法的选取取决于特定的应用场合。

2. 分布式计算 区分软件代理和其他计算过程的一个最基本的特性就是软件代理具有自主的概念。目前,当用户在计算机中执行一条指令时,则激活了单个过程的执行,直到该过程终止。很多复杂的软件等待用户输入指令,然后执行一些或一系列的动作,并给用户返

回一些结果。这是一个被动的计算观点，计算的方向和动机来自用户。

在基于代理的分布式计算中，放弃了这种被动的观点，而是采用自激励的计算过程（软件代理）。基于代理的分布式计算可在最小的人为干预下，自动使系统满足某些内部的目标。当一个任务委托下来后，自主的软件代理可通过推理得到如何完成该任务的方法。选择的方法取决于许多因素。自主的代理具有为求解病态问题选择合适方法的能力，不需要用户在每一步提供智能决策。

软件代理的另一个重要特性是能够带着它们的数据和执行状态在网络中迁移。在计算机网络中，有三个主要的方法接收信息：

- 1) 客户软件（如网络浏览器）可直接通过固定的标准通信协议接收信息。
- 2) 客户和信息源之间的中介软件可提供信息的摘要。
- 3) 具有特定目的的软件可以通过网络迁移并寻找远处的相关数据。

上述三种方法中的最后一种减轻了维持客户和服务端间对稳定的通信通道的需要，以及在任何过程执行出来前将数据传送到客户端的需要。在理想的情况下，移动代理可在有数据的地方完成大部分计算并将结果带回来。

软件代理适合于解决分布式问题。对于分布式问题，采用自顶向下的方法来解决是非常困难的。集中问题解决的成功取决于与整个系统状态有关的全局信息是否能不断地送到中央决策者手中，随着问题涉及的区域越来越大，这个条件很难得到满足。另外，某些问题的基本特性使得完整和精确地得到系统的信息是不可能的，且在现实世界中大部分问题是这种类型，从而使得软件代理成为求解分布式问题的非常有前途的方法。

3. 嵌入式硬件 有两种方法可实现分布式发电系统的远距离通信，最常用的方法是采用简单的数据采集装置如远动单元（RTU）来实现数据采集和通信。后台应用程序周期地与远程数据采集系统连接，并发送命令信号启动某些操作。该方法对于分层控制结构设计的很完善的静态系统可取得很好的控制效果，系统的智能决策位于中央系统，远动单元仅仅为变换器的接口。

第二种方法是使得远动单元具有相当大的决策能力，允许它们根据从系统不同部分得到的信息作出本地的动作决策。很显然，这需要有丰富的硬件和软件的嵌入式微处理机系统支持，简单的数据采集系统是不行的。微处理器价格的下降非常迅速，而其性能每一两年将增加一倍，使得将其作为发电机接口的远动硬件单元成为可能，也使得开发应用于开放市场的管理分布式发电供需平衡的软件成为可能。

嵌入式处理器必须作为分布式资源和远距离应用之间的接口，且必须具有足够的智能，当远距离通信失败或本地出现不正常现象时能够管理这些设备。