



新能源及高效节能应用技术丛书

分布式发电 与微电网技术



徐青山 编著



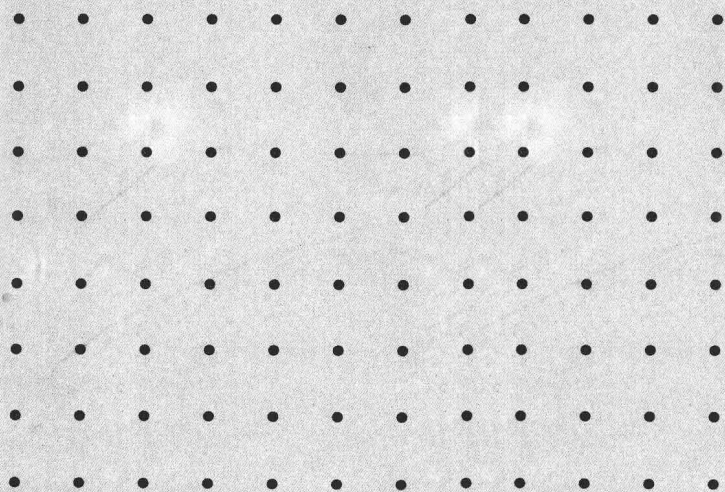
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 丛 书

分布式发电 与微电网技术

徐青山 编著



人 民 邮 电 出 版 社

北 京

本书的出版得到东南大学科技出版基金资助

作者简介



徐青山，1979 年出生，江苏泰州人。日本爱知工业大学访问学者，东南大学智能配电网研究所副所长，博士生导师，现主要从事新能源发电及微电网运行与控制方面的研究。主持的项目包括国家自然科学基金、教育部博士点基金、国家能源局项目等，近 3 年在 IEEE Transactions、IEEJ Transactions、Electrical Engineering、《中国电机工程学报》等国内外一流期刊上发表 SCI/EI 检索论文 20 余篇。国家自然科学基金、教育部博士点基金、北京市自然科学基金评审专家，IEEE Transactions、《中国电机工程学报》等国内外杂志审稿专家。

前言

现代电力系统是以“大机组、大电厂和大电网”为主要特征的集中式单一供电系统，但随着经济的发展和进步，人们对电能的需求量越来越大，对供电质量和供电的可靠性提出了越来越高的要求，它的不足也就逐渐显现了出来。另一方面，随着能源的消耗和环境的污染，未来火电必定会被替代，而核电由于存在安全隐患，发展程度受限。所以，未来电力系统的发展面临着两大问题：一个是电力的来源，即能源问题；另一个是电力的传输，即电网模式问题。

近年来，以可再生能源为主的分布式发电技术凭借其投资节省、发电方式灵活、与环境兼容等优点而得到了快速发展，主要包括太阳能光伏发电和风力发电，还包括燃料电池发电、微型燃气轮机发电、生物质能发电、小水电等。分布式发电尽管优点突出，但其接入电网所引起的众多问题往往限制了分布式发电的广泛应用。为协调大电网和分布式电源的矛盾，充分挖掘分布式发电为电网和用户带来的价值与效益，微电网的概念应运而生。作为“网中网”，微电网既可以并网运行，也可以在主网发生故障或其他情况下与主网断开而孤岛运行。

本书从未来电力系统发展所面临的两大问题出发，内容由两部分组成。第一部分介绍分布式发电，以解决能源问题；第二部分介绍微电网，以解决电网模式问题。

第一部分共4章（第2~5章），主要介绍典型分布式电源、分布式电源的并网及控制、含分布式电源的配网潮流计算和分布式电源的定址、定容问题。第2章介绍了典型分布式电源的发电原理、数学模型及运行特性，主要是光伏发电、风力发电、燃料电池发电和微型燃气轮机发电。第3章介绍了这些分布式电源的并网形式及控制策略。第4章首先介绍了传统配电网的数学模型及其计算方法，然后讨论了不同分布式电源在不同并网形式及控制策略下在潮流计算中的数学建模问题，最后以牛顿法为基础，给出了含分布式电源的配电网潮流计算方法。第5章用基于图示的方法和基于功率圆的方法讨论了分布式电源的定址和定容问题，给出了在不同目标函数及约束条件下确定分布式电源的地址和容量的准则。

第二部分（第6~9章）共4章，主要介绍微电网概况及其在国内外的发展现状、微电网管理系统、微电网中的孤岛检测问题和微电网下的市场竞价问题。第6章介绍了微电网的典型结构及其特点，并对微电网在国内外的发展现状进行对比，指出我国发展微电网的迫切性。第7章介绍了微电网管理系统的两个方面：一是各种控制策略及辅助服务；二是支持这些功能的硬件设备——中央控制器和微电源控制器。第8章介绍了孤岛检测的方法，包括被动式检测和主动式检测。第9章介绍了在电力市场下的竞价机制，即只有发电侧参与的单边竞价

分布式发电与微电网技术

机制和发电侧、用户侧同时参与的双边竞价机制。

本书在编写过程中，得到了很多的支持和帮助。感谢同门唐小波博士在分布式发电定容与选址方面的内容组织，感谢 Chowdhury 博士在微电网管理控制与电力市场方面的理论支持。感谢研究生朱永利、荆江平、宋菁、陈家静、王锦秀、臧海祥、钱磊、郭杨、刘瑜俊、朱秋琦、王伟等在书稿录入和校对工作方面的大量的辛苦劳动。

由于编者水平有限、编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者

2011 年 6 月

目 录

第 1 章 从分布式发电到微电网	1
1.1 分布式发电	1
1.1.1 分布式发电的概念	1
1.1.2 分布式发电技术	2
1.1.3 分布式发电并网技术	3
1.1.4 分布式发电的研究与发展	4
1.2 微电网	5
1.2.1 微电网的概念	5
1.2.2 微电网技术	6
1.2.3 微电网的研究与发展	7

第一部分 分布式发电

第 2 章 典型分布式电源	11
2.1 概述	11
2.2 太阳能光伏发电	11
2.2.1 光伏发电基本原理	11
2.2.2 光伏电池数学模型	12
2.2.3 光伏发电功率特性	15
2.2.4 光伏发电运行失配现象及机理	17
2.3 风力发电	21
2.3.1 风力发电基本原理	21
2.3.2 风力发电机分类	22
2.3.3 感应发电机型风电机组	23
2.3.4 双馈恒频型风电机组	25
2.3.5 直驱型风电机组	30
2.4 燃料电池发电	34

2.4.1	燃料电池发电基本原理	34
2.4.2	PEMFC 数学模型	38
2.4.3	PEMFC 运行特性	40
2.5	微型燃气轮机发电	40
2.5.1	微型燃气轮机发电系统	41
2.5.2	微型燃气轮机动态数学模型	44
2.5.3	微型燃气轮机运行特性	45
2.5.4	不同结构 MT 运行特点比较	46
第 3 章 分布式电源并网及控制		48
3.1	概述	48
3.2	光伏发电并网及控制	48
3.2.1	并网系统描述	48
3.2.2	并网方式	49
3.2.3	并网控制策略	52
3.3	风力发电并网及控制	54
3.3.1	并网方式	54
3.3.2	控制系统	61
3.4	燃料电池发电并网及控制	70
3.4.1	并网系统结构	71
3.4.2	并网控制策略	72
3.5	微型燃气轮机发电并网及控制	74
3.5.1	并网系统结构	74
3.5.2	系统建模	74
3.5.3	控制方式	76
第 4 章 含分布式发电的配电网潮流计算		78
4.1	概述	78
4.2	传统配电网数学模型	78
4.3	传统配电网潮流计算方法	79
4.3.1	牛顿类潮流计算方法	79
4.3.2	母线类潮流计算方法	80
4.3.3	支路类潮流计算方法	81
4.3.4	3 类潮流算法的比较	83
4.4	分布式电源在潮流计算中的节点处理方法	84
4.5	含分布式发电的配电网潮流计算方法	87
4.6	算例分析	88

第 5 章 分布式电源在配电网中的优化配置	93
5.1 概述	93
5.2 分布式电源的选址和定容	94
5.2.1 目标函数	94
5.2.2 约束条件	95
5.3 基于图示的优化配置方法	95
5.3.1 功率分布	95
5.3.2 馈线电压分布	97
5.3.3 目标函数与约束条件	99
5.4 基于“功率圆”的优化配置方法	101
5.4.1 假设条件与目标函数	101
5.4.2 功率圆	102
5.4.3 DG 最佳接入位置	103
5.4.4 算例分析	106

第二部分 微 电 网

第 6 章 微电网概况	112
6.1 概述	112
6.1.1 微电网产生的背景	112
6.1.2 微电网的定义	112
6.1.3 微电网的典型结构	113
6.1.4 微电网的特点	114
6.1.5 储能技术	116
6.2 国内外发展现状	118
6.2.1 国外微电网的发展现状	118
6.2.2 国内微电网的发展形势	122
第 7 章 微电网管理与控制	125
7.1 微源接口类型	125
7.2 微电网基本控制策略	127
7.2.1 微电网控制的特殊性	127
7.2.2 主从控制法	129
7.2.3 对等控制法	129
7.3 典型主从控制法介绍	131
7.3.1 微电源控制器	131
7.3.2 中央控制器	135

第 8 章 孤岛型微电网	143
8.1 孤岛效应	143
8.2 孤岛检测的基本问题	144
8.2.1 注意事项	144
8.2.2 检测标准	144
8.2.3 测试电路	145
8.2.4 基本原理	145
8.2.5 检测盲区	147
8.3 孤岛检测方法	148
8.3.1 基于通信的孤岛检测方法	148
8.3.2 基于同步发电机的本地孤岛检测方法	149
8.3.3 基于逆变器的本地孤岛检测方法	150
8.3.4 各种孤岛检测方法的比较	156
第 9 章 市场环境下的微电网	157
9.1 微电网参与市场	157
9.2 竞价流程	158
9.3 MCP 规则	158
9.4 MCP 理论	158
9.4.1 单边竞价市场	159
9.4.2 双边竞价市场	160
9.5 案例分析	160
9.5.1 需求恒定时的线性供给竞价	161
9.5.2 需求线性变化时的线性供给竞价	162
9.6 对电力市场的影响	164
附录 1 分布式发电 IEEE1547 技术标准主要内容 (中英文对照)	165
附录 2 其他分布式发电相关技术标准	178
参考文献	182

第 1 章

从分布式发电到微电网

近年来，以电力为中心的新一轮能源革命的序幕已经拉开，其目的是实现以智能电网为核心的低碳能源。在此背景下，电网的形态和功能定位正在发生深刻的变化，电网的发展面临着前所未有的机遇与挑战：能源与环境问题、安全可靠与经济高效问题、电网开放与优质服务问题、技术创新与高效管理问题等。面对新形势、新挑战，必须大力开发低碳技术、推广高效节能技术、积极发展新能源和可再生能源，从而加强智能电网建设。

可再生能源与电网的有机结合是智能电网的重要标志之一，利用可再生能源发电的形式可以是分布式发电的形式，也可以是集中式发电的形式。集中式发电（如大规模风电场、大型光伏电站等）通常并入高压输电网，进行统一调度；分布式发电通常接入低压配电网（380V 或 10kV 配电网，一般低于 66kV 电压等级）。由于分布式发电技术具有投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点，它作为利用可再生能源的理想形式得到了快速发展。然而，随着分布式电源渗透率的提高，分布式电源对配电网的一些不利影响也逐渐显现出来。

为了最大限度地发掘分布式发电技术在经济、能源和环境中的优势，同时协调配电网与分布式电源之间的矛盾，有学者提出了三级电网的概念，即输电网、配电网和微电网，将密切相关的分布式电源、负荷、储能装置及控制装置结合起来作为一个微电网。通俗地讲，微电网就是“网中网”，可以孤岛运行，也可以并网运行。分布式发电技术和微电网技术的发展可以对大电网提供有力补充和有效支撑，是未来电力系统的重要发展趋势之一。

总而言之，分布式发电是解决未来能源短缺的必经之路，而微电网作为“网中网”的形式是解决分布式发电无缝接入大电网的发展趋势。

1.1 分布式发电

1.1.1 分布式发电的概念

目前，对“分布式发电”这一新的发电形式的正式称谓还不统一。在英属国家，习惯叫做“嵌入式发电”(Embedded Generation)；在北美，叫做“分散式发电”(Dispersed Generation)；在欧洲和亚洲的部分国家，叫做“非集中式发电”(Decentralized Generation)。另外，“分布式发电”的定义也尚未得到统一。一般认为：分布式发电(Distributed Generation, DG)指的是为满足用户特定的需要、支持现存配电网的经济运行或同时满足这两方面的要求，且在

分布式发电与微电网技术

用户现场或靠近用户现场配置功率为数千瓦到 50MW 的小型、与环境兼容的发电系统。现在新出现的很多分布式发电大部分采用的是天然气、沼气、太阳能、生物质能、风能（小风电）或者水能（小水电），通常采用热电联产或者热冷电联产的方式。

1.1.2 分布式发电技术

分布式发电技术主要包括光伏发电技术、风力发电技术、燃料电池发电技术、燃气轮机/内燃机/微型燃气轮机发电技术、生物质能发电技术以及分布式发电的储能技术等。

1. 光伏发电技术

光伏发电技术是一种将太阳辐射能通过光伏效应、经光伏电池直接转换为电能的发电技术，它向负荷直接提供直流电或经逆变器将直流电转换为交流电。光伏发电系统的建设成本至今仍然很高，发电效率也有待提高。目前商业化单晶硅和多晶硅的电池效率为 13%~17%，影响光伏发电技术的大规模应用。但由于光伏发电是在白天发电，与负荷的最大电力需求有很好的相关性，今后必将获得大量应用。目前用于发电系统的光伏发电技术大多为小规模、分散式独立发电系统或中小规模并网光伏发电系统，基本上属于分布式发电的范畴。

2. 风力发电技术

风力发电技术是一种将风能通过风力发电机转换为电能的发电技术。我国自 20 世纪 50 年代开始发展风力发电，最初是用于农村和牧区的家庭自用小风力发电机，之后在新疆、内蒙古、吉林、辽宁等地建立了一些容量在 10kW 以下的小型风电场，还在西藏、青海等地建立了一些由小型风力发电、光伏发电和柴油机发电共同构成的联合发电系统。在国外，也有在城市郊区建设少量（几台）大单机容量（1MW 以上）的风力发电机组，并入低压配电网。这些靠近负荷的小型风电场属于分布式发电的范畴。

3. 燃料电池发电技术

燃料电池是一种电化学设备，它直接、高效地将反应物的化学能转换为电能，燃料电池的分类可见 2.4.1 节。目前燃料电池在技术上尚未完全过关，电池寿命有限，材料价格也较高。尽管国外已有各种类型和容量的商品化燃料电池可供选择，但目前在国内基本上处于实验阶段，尚无大规模的国产化、商业化产品可用。燃料电池发电技术在电动汽车等领域中广泛应用，这种静止型发电技术的发电效率与容量大小几乎无关，因此在小规模分布式发电的应用中有一定的优势，是一种很有前途的发电技术。

4. 燃气轮机/内燃机/微型燃气轮机发电技术

燃气轮机/内燃机/微型燃气轮机发电技术是以天然气、煤层气或沼气等为常用燃料，以燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机为发电动力。燃气轮机由压缩机、燃烧室和涡轮发电机组组成，燃气轮机技术已经十分成熟，其性能也在逐步改善。内燃机的工作原理是将燃料与压缩空气混合、点火燃烧，使其推动活塞做功，通过气缸连杆和曲轴驱动发电机发电。目前，内燃机发电技术已广泛应用在燃气、电力、供水、制造、医院、教育以及通信等行业。微型燃气轮机是指发电功率在几百千瓦以内（通常为 200kW 以下），以天然气、甲烷、汽油、柴油为燃料的小功率燃气轮机。微型燃气轮机可长时间工作，且仅需很少的维护量，可满足用户基本负荷的需求。另外，微型燃气轮机体积小、重量轻、结构简单、安装方便、发电效率

高、燃料适应性强、燃料消耗率低、噪声低、振动小、环保性好、使用灵活、启动快、运行维护简单。基于以上这些优势，微型燃气轮机正在得到越来越多的应用，特别适合于微电网。

5. 生物质能发电技术

生物质能（Bio-Energy）是太阳能以化学能形式储存在生物质体内的一种能量形式，它以生物质为载体，直接或间接地来源于植物的光合作用：在太阳辐射能的作用下，吸收空气中的二氧化碳（ CO_2 ）和土壤中的水（ H_2O ），最终合成碳水化合物（ CH_2O ），转化为化学能而固定下来的一种自然资源。生物质能发电技术主要包括生物质直接燃烧发电、气化发电、沼气发电、垃圾焚烧发电、混合燃烧发电的技术和生物质能电池等。我国《可再生能源法》的颁布促进了各种生物质能发电的发展，大量的小型生物质能电厂在农村和中小城市接连投运。

6. 储能技术

分布式发电并网方式运行时，一般不需要储能系统，但在孤岛运行时，为保持小型供电系统的频率和电压稳定，储能系统往往是必不可少的。分布式发电的储能技术主要包括蓄电池储能、飞轮储能、超级电容储能、压缩空气储能和抽水蓄能等。

1.1.3 分布式发电并网技术

分布式电源接入配电网时，除基本要求外，还需满足一些其他要求，主要包括对配电网事故情况下的响应要求、电能质量方面的要求、控制和保护方面的要求等。

1. 分布式电源接入配电网的基本要求

（1）与配电网并网时，可按系统能接受的恒定功率因数或恒定无功功率输出的方式运行。公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）处的电压调节不应由分布式电源承担，该点的电压调节应由电网企业来负责，除非与电网企业达成专门的协议。

（2）采用同期或准同期装置与配电网并网时，不应造成电压过大的波动。

（3）分布式电源的接地方案及相应的保护应与配电网原有的接地方式相协调。

（4）容量达到一定大小（如几百千伏安至1MVA）的分布式电源，应将其连接处的有功功率、无功功率的输出量和连接状态等信息传送给配电网的控制调度中心。

（5）分布式发电应配备继电器，以使其能够检测何时应与电力系统解列，并在条件允许时以孤岛方式运行。

2. 分布式发电与电能质量

与分布式发电相关的电能质量问题主要应考虑以下几个方面。

（1）供电的短暂中断。当分布式电源作为主供电源的备用电源时，主供电电源向备用电源的转移往往不是一种无缝切换，所以可能仍存在极短时间的电力中断。

（2）电压调节。分布式电源可以提高配电馈线的电压调节能力，而且调节的速度可能比调节变压器分接头或投切电容器快。但是电网企业一般不希望分布式电源参与公共连接点的电压调节，因为分布式电源的启停往往受用户控制，若要承担PCC处的电压调节任务，一旦分布式电源停运，该点处的电压调节就成问题。

（3）谐波问题。采用晶闸管和线路换相逆变器并网的分布式电源会产生谐波问题，但随着绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）和电压源换相逆变器的增

多，谐波问题得到大大缓解。

(4) 电压暂降。分布式发电是否有助于减轻电压暂降，取决于其类型、安装位置以及容量的大小。

3. 分布式电源的并网标准

为了尽可能发挥分布式发电的优势，降低其并网带来的不利影响，同时也为保证分布式电源本身的正常运行，制定分布式发电的并网标准，使分布式电源按统一的并网标准并网发电显得尤为重要。为此，世界各国及标准化委员会纷纷制定相应的并网导则和规程。

国际标准中获得最广泛认可的是《分布式电源与电力系统互连标准》IEEE1547—2003，于2003年由电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)正式出版，并作为美国国家层面的标准。IEEE1547规定了10MVA及以下分布式电源的并网技术和测试要求，涉及所有有关分布式电源互连的主要问题，包括电能质量、系统可靠性、系统保护、通信、安全标准、计量等。美国除了IEEE标准外，许多州都有自己的互连准则，例如加州能源委员会规定了分布式电源与电网互连时，必须遵守加州电力法第21条的规定。

IEEE1547包含7个子标准：IEEE1547.1规定了分布式电源接入电力系统的测试程序，于2005年7月颁布；IEEE1547.2是IEEE1547的应用指南，提供了有助于理解IEEE1547的技术背景和实施细则，于2008年颁布；IEEE1547.3是分布式电源接入电力系统的检测、信息交流与控制方面的规范，于2007年颁布，该标准促进了一个或多个分布式电源接入电网的协同工作能力，提出了检测、信息交流以及控制功能、参数与方法方面的规范；IEEE1547.4规定了分布式电源独立运行系统设计、运行以及与电网连接的技术规范，该标准提供了分布式电源独立运行系统接入电网时的规范，包括与电网解列和重合闸的能力；IEEE1547.5规定了容量大于10MVA的分布式电源并网的技术规范，提供了设计、施工、调试、验收、测试以及维护方面的要求；IEEE1547.6是分布式电源接入配电二级网络时的技术规程，包括性能、运行、测试、安全以及维护方面的要求；IEEE1547.7是研究分布式电源接入对配电网影响的方法。IEEE1547.4~IEEE1547.7目前还是草案，尚未颁布实施。

加拿大在2003年7月制定了微电源的发展临时准则，这一准则着重基于逆变器的微电源，额定电压在600V以下。目前加拿大有两个主要的互连标准，包括C22.2 No. 257《基于逆变器的微电源配电网互连》和C22.3 No. 9《分布式电力供应系统互连》。澳大利亚商业理事会在2003年9月完成了全国电力市场微电源连接指南的编制，该指南提供了微电源连接到电网的过程和要求。日本于2001年制定了《分布式电源系统并网技术导则》JEAG9701—2001。欧洲机电标准化委员会讨论出台了公共低压配电网连接微小发电机的草案。英国已制定了连接新一代配电网络的技术指南，其贸易和工业部提出了在英国分布式发电连接到地方配网的指南。新西兰在2005年完成了基于逆变器的微电源标准AS 4777.1、AS 4777.2和AS 4777.3。

1.1.4 分布式发电的研究与发展

近年来，我国分布式发电工程项目发展较快，但相关技术的研究和开发显得有些滞后，因此应加大研发力度，研制出具有我国自主知识产权的产品和系统，并降低它们的成本。未来对于分布式发电的研究重点集中在以下几个方面：分布式发电系统的数学模型和仿真技术研究、规划研究、控制和保护技术研究、电力电子技术研究、分布式电源并网规程的研究与制定等。

随着分布式发电技术水平的不断提高，分布式发电的成本将会不断降低，应用范围也将不断扩大，可以覆盖到包括工业区、农业区、学校、楼宇等多种场所。目前，分布式发电在我国应用较少，但可以预计未来分布式电源不仅可以作为集中式发电的一种重要补充，而且将在能源综合利用上占有十分重要的地位。

1.2 微电网

1.2.1 微电网的概念

从系统的观点看，微电网是将分布式发电、负荷、储能装置及控制装置结合，形成一个单一可控的独立供电系统，也可以看成是管理局部能量关系的基于分布式发电装置的小电网。它采用了大量的现代电力电子技术，将微型电源和储能装置并在一起，直接接在用户侧。对于大电网来说，微电网可被视为一个可控单元，可以在数秒钟内动作以满足外部输配电网络的需求；对用户来说，微电网可以满足特定的需求，如降低馈线损耗、增加本地可靠性、保持本地电压稳定、通过余热提高能量利用的效率等。微电网与配电网之间通过 PCC 进行能量交换，双方互为备用，从而提高了供电可靠性。

在微电网中，为防止微电网与配电网解列时对微电网内负荷的冲击，微电网的配电结构需要重新设计。美国可靠性技术解决方案协会（CERTS）提出的微电网结构如图 1.1 所示，3 条馈线呈辐射状结构，将可中断负荷接在同一条馈线上（如馈线 C），重要负荷或敏感负荷接在另外的馈线上（如馈线 A 和馈线 B），并安装分布式电源、储能装置及相应的控制、调节和保护设备。安装在每个微电网出口处的功率和电压控制器可在能量管理系统或本地控制下调整各自的输配及馈线潮流控制。外部配电网故障时，微电网解列，并通过隔离装置甩去一些可中断负荷，保证重要负荷或敏感负荷的正常运行；故障消失后，微电网重新并网运行。

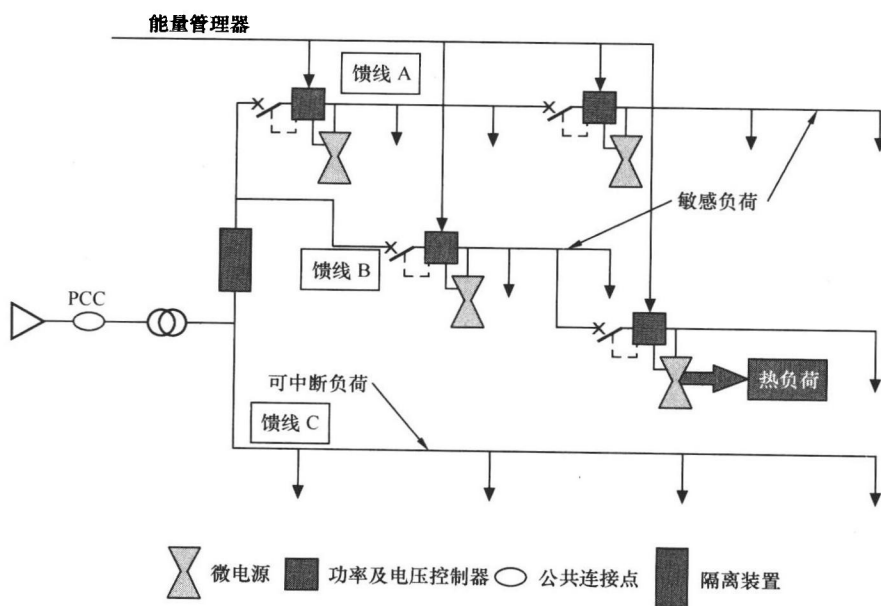


图 1.1 CERTS 提出的微电网结构

1.2.2 微电网技术

微电网或与配电网并网运行，或孤岛运行。微电网的灵活运行方式使其不但可以避免分布式发电并网所带来的负面影响，还能对配电网起到支撑作用。另外，也使得微电网的结构、模拟、控制、保护、能量管理系统和能量存储技术等与常规分布式发电技术有较大不同，需专门研究。

相对于电力系统而言，微电网类似于一个独立的控制单位，其中每一个微电源都具有简单的即插即拔功能。对每一个微电源，最关键的是它本身的接口、控制、保护以及对微电网的电压控制、潮流控制和维持其运行稳定性，其次是它的并网运行和孤岛运行方式的无缝切换控制。微电网的控制、保护、管理功能分别由微电源控制器、保护协调器、微电网管理系统来实现。

1. 微电网的控制技术

微电网主要依靠微电源控制器来调节馈线潮流、母线电压以及与配电网的解列或并网运行。由于微电源具有即插即拔功能，其控制主要依赖于就地信号，且响应是毫秒级的。微电网的控制功能包括如下几种。

(1) P-Q 控制。微电源大多通过逆变器并网，其有功功率和无功功率可以解耦控制。

(2) 电压控制。当微电网中接入大量分布式电源时，为防止微电源间出现大的无功环流，需要对各个微电源进行就地电压控制。根据微电源所发电流是容性的还是感性的来决定电压的整定值，发容性电流时电压整定值要低些，发感性电流时电压整定值要高些。

(3) 快速负荷跟踪和储能。由于微电网中发电机的惯性较小，有些微电源（如燃料电池）的响应时间常数又很长，因此当微电网与主网解列成孤岛运行时，必须提供储能设备，相当于增加了系统的惯性，使微电网维持正常运行。

(4) 频率调差控制。在微电网孤岛运行时，要采取频率调差控制，改变各个微电源承担负荷的比例，使其在调节中按一定的比例各自出力且都不超标。

2. 微电网的保护技术

分布式发电以微电网的形式并入配电网，会对配电网中原有的继电保护产生影响，影响的因素主要有以下几点：①辐射状的配电网在并入微电网之后，保护装置上流经的电流可能由单向变为双向；②微电网孤岛运行时，短路容量会有较大变化；③分布式发电构成微电网运行的目的之一是尽可能地维持一些重要负荷在电网故障时能正常运行，这些重要负荷往往对电压敏感，即不允许电压变动过大、时间过长，为此必须采用一些快速动作的开关代替原有的动作相对慢的开关。

微电网运行时，要根据对电压变化的敏感程度和控制标准来配置保护，而且微电网中保护装置的协调尤为重要。保护协调器既适用于主网的故障，也适用于微电网的故障。若故障发生在主网中，则要将微电网中的重要敏感性负荷尽快与故障隔离，一旦配电网恢复正常，就应将微电网重新并网运行。若故障发生在微电网中，该保护应使隔离的故障区尽可能小。由于微电网中的电源大多通过逆变器并网，短路电流较小，难以启动常规过电流保护装置，因此，保护装置和策略应相应修改。此外，微电网的接地系统必须仔细设计，以免微电网解列时继电保护误动作。还必须配置反孤岛保护装置，对于微电网内部的非计划孤岛运行，必须及时切除。

3. 微电网管理系统

能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 是以计算机为基础的现代电力系统的综合自动化系统, 主要针对发电和输电系统, 用于大区级电网和省级电网的调度中心。根据能量管理系统技术发展的配电管理系统 (Distribution Management System, DMS) 主要针对配电和用电系统。随着未来三级电网的划分, 有必要开发出微电网管理系统 (Microgrid Management System, MMS), 使它能向微电网中的器件提供统一的控制、保护和能量管理平台。

微电网管理系统是为整个微电网服务的, 它的功能首先应针对微电网内的需求, 如可靠性、优质性、经济性等, 但长远来看, 它还可以对配电网提供一些辅助服务。此外, 由于微电网本身位于用户侧, 这些用户可能是商业区、学校、工厂等, 它们本来就有供热、通风、空调等过程控制系统, 未来的 MMS 有可能成为这些系统以及当地发电、储能等的总调度系统。

1.2.3 微电网的研究与发展

微电网作为大电网的有益补充, 其应用潜力巨大。目前, 世界上一些主要发达国家和地区, 如美国、欧盟和日本等, 都开展了对微电网的研究。当前国内外关于微电网发展的前沿和热点问题主要是: ①分布式电源和储能单元的综合建模与仿真; ②分布式电源和储能单元的规划设计和优化配置; ③微电网的控制技术研究; ④微电网中多种能源系统的运行与调度。

美国近年来发生了几次较大的停电事故, 使美国电力工业十分关注电能质量和供电可靠性, 因此美国对微电网的研究着重于利用微电网提高电能质量和供电可靠性, 其次是降低成本和提高智能化等方面。

欧洲互联电网中的电源大体上靠近负荷, 比较容易形成多个微电网, 所以欧洲微电网的研究更多关注于多个微电网的互连问题, 保证欧洲电网的稳定性。欧洲所有的微电网计划都围绕着可靠性、可接入性和灵活性来考虑, 电网的智能化、能量利用的多元化将是欧洲未来电网的重要特点。

日本本土资源匮乏, 其对可再生能源的重视程度高于其他国家, 但很多新能源具有随机性, 穿透功率极限限制了新能源的应用, 所以日本在微电网方面的研究更强调控制与储能。

中国微电网的发展尚处在起步阶段, 在今后微电网的研究和发展中, 以下几个方面的问题需要给予更多的关注: ①微电源的响应时间; ②微电源间的协调控制; ③对微电网中电力电子设备的智能控制和最优控制; ④微电网与主网之间的协调控制; ⑤微电网在并网运行和孤岛运行下的稳定性分析; ⑥微电网的谐波问题; ⑦现有小发电机组并入微电网的可行性分析。