

# 微电网 运行仿真技术

王晓辉 著

Operation Simulation Technology of  
**Microgrid**

中国建筑工业出版社

# 微电网运行仿真技术

王晓辉 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

微电网运行仿真技术/王晓辉著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-112-22453-1

I. ①微… II. ①王… III. ①电网-电力系统运行  
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 158180 号

本书在分析微电网各部分工作原理的基础上, 建立了微电网仿真平台, 对微电网运行时的 P/Q 控制和 V/f 控制模型进行了理论和仿真分析; 建立了微电网系统优化配置和经济运行的数学模型, 利用粒子群算法对系统的优化配置和经济运行问题进行了仿真分析, 并进行了基于日前-短时的多时间尺度微电网优化调度设计。

本书可供从事微电网理论研究和工程设计的科研人员参考, 也可作为高等院校电力相关专业教师、研究生和高年级本科生的教材。

责任编辑: 曹丹丹

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

## 微电网运行仿真技术

王晓辉 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 8 $\frac{3}{4}$  字数: 174 千字

2018 年 7 月第一版 2018 年 7 月第一次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-22453-1

(32319)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 前 言

近年来,环境问题越来越突出,受能源危机日益加深的影响,以清洁能源为主的分布式发电技术得到了快速发展,微电网技术的研究成为当前的热点。微电网系统具有能源供给多样化、可再生能源利用率高、环境污染小、馈线损耗较少、控制方便、运行方式灵活以及供电可靠性高等优点。通过微电网将可再生能源并到大电网中,相比其直接并入,可以在很大程度上缓解对供电稳定性造成的冲击。微电网作为传统大电网的强力支撑,避免了很多因为大电网受到影响或者发生故障而产生的断电现象。微电网技术通过对分布式电源、储能设备以及区域负荷的协调调度,为提升电网可靠性、减少环境污染、充分利用可再生能源提供了很好的解决方案。因而,大力发展、研究与应用微电网技术是十分必要的。

作为一种新的供电网络形式,微电网的技术还不成熟,仍有许多问题亟待解决。对微电网技术进行研究的方法主要有三种:其一,可以对实际运行的微电网系统进行现场实测。从论证解决方案的角度而言,对微电网的运行特性进行实测是必不可少的。但是在实际运行的微电网中验证各种解决方案,无论从经济性、安全性还是可行性上都存在很大的困难。此外,对实际系统的测量必须在微电网建成后进行测试,起不到指导工程设计的作用。其二,作为现场实测的一种折中方案,可以在实验室进行模拟实验。虽然测试成本降低了,但是依然存在较大的难度,而且所测的结果往往不能真实地反映微电网的实际运行情况。其三,作为以上两种方案的替代,可以对微电网系统的运行特性进行仿真研究。通过对微电网按其各部分的原理及实际结构进行建模,搭建与实际系统相对应的仿真平台,便可以模拟实际微电网的运行状态,进而分析其各种动态特性。采用仿真的方式对微电网的运行特性进行研究,有其独特的优势。它可以避免对解决方案进行实际验证可能对系统产生的冲击危害,避免购置昂贵的测量设备,节约大量的资金,而且重复性很好,可以进行更加深入、细致的研究。

微电网的出现和发展产生了一系列新的研究方向和技术需求,如微电网的运行控制、微电网的继电保护、微电网接入后对大电网的影响等。通过微电网仿真平台的建立,可以对现运行系统的动态运行特性进行仿真分析,进而验证系统控制策略和技术路线的可行性。同时,仿真工作还可以在微电网未建成前即开始进行,从而为系统的设计提供必要的数据,直接为工程设计服务。

本书从微电网仿真平台开发及应用的角度出发,对微电网的动态运行特性和

控制进行了仿真,对微电网系统进行了优化配置和经济运行调度,从而为微电网解决方案的验证及微电网技术的发展提供强有力的依据,为我国节能减排、发展低碳经济服务。

全书共9章。

第1章介绍了微电网技术的研究背景,并且分析了世界各国对于微电网概念的定义和微电网关键技术的研究现状,探讨了微电网技术所产生的经济和社会效益及其未来应用的广阔前景。

第2章对比了不同类型的微电网,分析了微电网模型的总体结构,并对其现有的控制技术和保护技术进行了介绍。

第3章根据微电网的基本结构,研究了各分布式电源与储能装置的特性,配置了微电网中的各个设备单元,介绍了各个设备单元的工作原理,并结合其运行特性与重要参数,建立了各发电机组的输出功率模型,给出各个设备输出功率的数学模型和约束条件,为后期建立系统优化模型做准备。

第4章介绍了微电网仿真模型的整体结构,根据光伏电池数学模型建立了通用的光伏电池仿真模型,搭建了光伏电池的最大功率跟踪控制模型,对光伏电池的输出特性进行了仿真研究。设计了并网逆变器的P/Q控制模型和孤网运行时的V/f控制模型,搭建了微电网仿真平台,明确了仿真平台各参数的设计原则和方法,进行了光伏发电并网运行的仿真研究以及微电网系统由并网转孤网的仿真研究。

第5章针对目前微电网控制面临的问题,提出一种基于多代理技术的解决方案。对Agent的属性和MAS的体系结构进行了介绍,通过对FIPA标准的分析,选取了JADE作为MAS的开发平台。针对本课题研究的交直流混合微电网系统,设计了包括MGC Agent、PV Agent、Battery Agent和Load Agent的微电网代理功能。

第6章通过多代理平台JADE,将多代理控制技术应用于交直流混合微电网系统,利用Matlab/Simulink环境建立了交直流混合微电网的系统模型,通过设定微电网仿真模型不同环境下的参数值,模拟交直流混合系统在并网、离网状态下的运行情况,设计了基于MAS的交直流混合微电控制系统,实现了交直流混合微电网的协调控制。

第7章建立了微电网系统优化配置的数学模型,同时还提出了相应的系统性能评价指标,用以评价所建模型的合理性。基于微电网系统中各类发电机组具有不同使用年限的考虑,将初期购买设备的总投资成本折算到设备每年投资成本之中,再加上设备每年的维护费用作为系统优化配置的目标函数,结合系统的评价指标,建立了系统优化配置模型,并采用粒子群算法进行优化求解。

第8章充分考虑了微电网运行调度过程中风、光发电机组输出的不确定性与

间歇性,分别以机组运行、燃料消耗、供电惩罚、污染物处理以及与外部大电网进行的售电收益最小化为子目标,汇合得到综合成本,兼顾优化问题中的多种约束,对目标函数进行优化求解,实现了综合运行成本的最小化。

第9章构建了多时间尺度的优化框架,设计了日前-短时二级优化方案。选取负荷供给目标和费用目标为微电网日前优化的目标函数,并且设定各个分布式电源的功率约束。使用粒子群优化算法对系统进行优化,将日前优化结果作为短时优化的输入,进行二次优化。选取对日前计划变动最小和总运行费用最小为目标,通过粒子群算法优化,对微电网进行多时间尺度的能量优化调度研究。

本书集成了作者所在的北京建筑大学在微电网领域多年的研究成果,王晶、王冰杨、黄宜平、王竹颖、郑熠明等研究生深度参与了相关研究工作。本书还参考、引用了国内外众多微电网专家、学者的部分观点。本书的分析方法和仿真程序已在一些微电网示范工程优化设计中得到了应用,可供从事微电网理论研究和工程设计的科研人员参考。

由于作者水平有限,难免有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 微电网技术概述 .....	1
1.1 微电网研究的背景 .....	1
1.2 微电网的概念及研究现状 .....	2
1.2.1 美国 .....	2
1.2.2 日本 .....	4
1.2.3 欧盟 .....	5
1.2.4 中国 .....	5
1.3 微电网能量管理系统 .....	7
1.3.1 微电网能量管理系统的研究意义 .....	8
1.3.2 微电网能量管理系统的研究现状 .....	9
1.4 国内外多代理技术的研究现状 .....	10
1.5 微电网产生的效益 .....	11
第 2 章 微电网的基本结构 .....	14
2.1 微电网的分类 .....	14
2.1.1 交流微电网 .....	14
2.1.2 直流微电网 .....	14
2.1.3 交直流混合微电网 .....	16
2.2 微电网的典型结构 .....	17
2.2.1 分布式电源 (DG) .....	17
2.2.2 储能装置 .....	18
2.2.3 负荷 .....	19
2.2.4 控制装置 .....	19
2.3 微电网的运行方式 .....	20
2.3.1 并网运行 .....	20
2.3.2 孤网运行 .....	20
2.4 微电网的控制技术 .....	20
2.4.1 P/Q 控制 .....	21

2.4.2	V/f 控制 .....	22
2.5	微电网的保护技术 .....	23
<b>第3章 微电网仿真数学模型 .....</b>		<b>25</b>
3.1	风力发电机特性及模型 .....	25
3.1.1	风速的概率密度函数 .....	26
3.1.2	风力发电机输出功率模型 .....	26
3.2	光伏电池特性及模型 .....	28
3.2.1	光照强度的概率密度函数 .....	29
3.2.2	光伏电池输出功率模型 .....	29
3.3	微型燃气轮机特性及模型 .....	30
3.3.1	微型燃气轮机特性 .....	30
3.3.2	微型燃气轮机输出功率模型 .....	30
3.4	燃料电池特性及模型 .....	31
3.4.1	燃料电池特性 .....	31
3.4.2	燃料电池输出功率模型 .....	32
3.5	柴油发电机特性及模型 .....	33
3.5.1	柴油发电机特性 .....	33
3.5.2	柴油发电机模型 .....	33
3.6	蓄电池特性及模型 .....	34
3.6.1	蓄电池特性 .....	34
3.6.2	蓄电池模型 .....	36
<b>第4章 微电网仿真平台 .....</b>		<b>39</b>
4.1	仿真平台总体模型结构 .....	39
4.2	光伏电池的仿真 .....	40
4.2.1	光伏电池的仿真模型 .....	40
4.2.2	光伏电池的仿真分析 .....	41
4.3	最大功率跟踪模型 .....	42
4.3.1	最大功率跟踪方法 .....	42
4.3.2	最大功率跟踪算法模型 .....	44
4.3.3	仿真分析 .....	45
4.4	微电网控制系统设计 .....	48
4.4.1	P/Q 控制器设计 .....	48
4.4.2	V/f 控制器设计 .....	49

4.5	仿真平台参数设计	51
4.6	微电网并网运行仿真研究	55
4.7	微电网动态特性仿真分析	58
<b>第5章 基于MAS的微电网代理设计</b>		<b>61</b>
5.1	关于Agent	61
5.1.1	Agent的属性	61
5.1.2	Agent体系结构	62
5.2	Agent开发环境	63
5.2.1	FIPA标准	63
5.2.2	JADE平台	66
5.2.3	JADE界面	67
5.3	微电网中各代理功能设计	67
5.3.1	PV Agent	68
5.3.2	Battery Agent	68
5.3.3	Load Agent	69
5.3.4	MGC Agent	70
5.3.5	MAS结构设计	72
<b>第6章 基于MAS的交直流混合微电网控制系统设计</b>		<b>74</b>
6.1	交直流微电网整体结构设计	74
6.2	微电网MAS控制框架	76
6.3	JADE环境下Agent配置	76
6.4	交直流混合微电网MAS设计	77
6.5	交直流混合微电网运行仿真结果分析	79
<b>第7章 微电网系统优化配置</b>		<b>82</b>
7.1	微电网优化配置数学模型	82
7.1.1	目标函数	83
7.1.2	性能评价指标	84
7.2	基于粒子群算法的优化方法	85
7.2.1	粒子群算法的基本原理	86
7.2.2	粒子群优化算法基本流程	88
7.2.3	基于粒子群算法的多目标优化方法	89
7.3	微电网系统优化配置模型求解	90

7.4 案例分析	93
第8章 微电网系统经济运行研究	98
8.1 微电网系统经济运行数学模型	98
8.1.1 目标函数	98
8.1.2 经济评价指标	100
8.1.3 系统约束条件	101
8.2 微电网系统调度策略	102
8.3 微电网系统经济运行模型求解	104
8.4 案例分析	106
第9章 多时间尺度的微电网能量优化研究	108
9.1 多时间尺度优化框架	109
9.2 多时间尺度优化模型	110
9.3 日前状态下的微电网优化运行	110
9.4 短时状态下的微电网优化运行	118
参考文献	127

与此同时,随着电力需求的持续高速增长,以化石燃料为主的能源消耗量不断增加,由此带来的能源危机和环境问题越来越突出。以化石燃料为主的火力发电在消耗大量化石能源的同时,带来了环境污染、温室气体排放等问题。世界各国越来越重视环境与健康问题,纷纷采取政策调整能源结构,推出了可再生能源战略,世界各国也开发出了可再生能源发电技术以及相关的先进技术和设备,并大力开发、应用可再生能源。传统的以化石燃料为主的能源利用方式在广度和深度上都受到限制,可再生能源的今天将会受到更大的重视。

基于上述背景,世界各国对可再生能源能源的开发和研究利用,纷纷投入了相应的政府资金,为像分布式发电技术的进步提供了强有力的保障。分布式发电是指在一定负荷中心建设分布式电源,通过输电装置可以向大电网提供电能,在电网停电时还能保证重要负荷的供电,是近年来备受关注的一种发电形式。分布式发电具有低污染、安装地点灵活、靠近用户等优势。在实际应用中,微型用户设备可以进行削峰填谷、提供无功支持、削峰填谷和作为备用发电等。相关研究表明,与集中式电网相比,发展分布式发电可以节省输电线路建设成本和输电费用,能大大减少远距离输电线路造成的电能损耗,具有较好的经济效益。分布式发电与大电网相结合能优化传统的集中式发电网系统,提高电网运行

### 1.1 微电网研究的背景

近年来,随着经济的不断发展,电力需求迅速增长。传统电力系统的主要发展方向是建设火电、水电以及核电等大型集中式的发电站,同时打造高压、远距离的大型网络式的电网系统,目前这种以大规模电网为主的供电方式承担了世界范围内 90% 以上的负荷,是主要的供电方式。然而,随着大电网的容量越来越大,传统的集中式大电网自身的一些缺陷引起了很多学者的担忧,如基础建设成本高,运行维护费用高,无法保证一些对供电安全性和可靠性要求较高的用户的电能质量要求,不能针对不同电力用户制定多样化的电能质量等。

与此同时,随着电力需求的持续高速增长,以化石原料为主的能源的消耗量不断增加,由此导致的能源危机和环境污染问题越来越突出。当今以火电为主的电力结构在消耗大量可再生能源的同时,带来了环境污染、温室效应等严重问题。世界各国越来越重视环境与能源问题,我国政府高度重视清洁能源的利用,提出了可持续发展战略。世界各国也都出台了可再生能源发电补贴政策及相关的法律法规来促进新能源发电的发展。由此可见,传统的以化石原料为主的能源利用方式在广泛提倡绿色经济、低碳生活、可持续发展的今天将会受到更大的限制。

鉴于上述问题,世界各国越来越关注再生清洁能源的开发和研究利用,纷纷出台了相应的鼓励措施,为推动分布式发电技术的进步提供了强有力的保障。分布式发电是指在一些负荷中心建设分布式电源,通过储能装置可以向大电网提供电能,在电网停电时能保证重要负荷的供电,是近年来备受关注的发电形式。分布式发电具有低碳环保、安装地点灵活、靠近用户等优势,在实际应用中根据用户需求可以进行削峰填谷、提供无功支持、黑启动和作为备用发电等。相关研究数据表明,与集中式电网相比,发展分布式发电可以节省输变电的建设成本和费用,能大大减少远距离输电线路造成的电能损耗,具有较好的经济效益。分布式发电与大电网结合能够优化传统的集中式大电网系统,提高局部地区

用户的供电可靠性,具有广阔的发展前景和市场空间。

尽管分布式发电具有节能环保、投资小、运行方式灵活、结构多样化等优点,但是对于大电网来说,分布式电源属于不可控源,接入大电网存在一定的技术和政策方面的障碍,相关控制技术尚不成熟。目前,为了避免和减小分布式电源输出的不稳定性对大电网造成的扰动,一般严格限制分布式电源并网。IEEE1547 标准对分布式发电并网标准做了规定:当大电网出现故障时,应当立即将分布式电源与大电网隔离,这一规定大大降低了可再生能源的利用效率,分布式发电的优势被大大削弱。

为了解决分布式发电的接入问题,充分发挥分布式发电的效益,21 世纪初,微电网理论应运而生。随着电力电子技术的发展和世界各国对新能源发电技术的重视,微电网作为一种新的电网结构,受到了很多国家和地区越来越多的学者和研究机构的关注。微电网的发展,有利于大量引入可再生能源,使电力系统变得更加可靠、安全、清洁和经济。微电网与大电网的结合可以保障非常时期的供电,提高外部大电网的安全性。同时微电网还可以优化电网系统的运行方式,减小对环境造成的污染,符合我国对于充分开发和利用可再生能源、发展低碳经济的可持续发展战略要求。综上可知,发展微电网能带来可观的经济效益和环境效益,大电网与微电网的有机结合能大大提高系统供电可靠性,能有效地解决目前集中式电网规模不断扩大带来的弊端,是未来电力系统的重要发展方向。

## 1.2 微电网的概念及研究现状

微电网能有效地利用可再生能源,具有众多优点,受到了世界很多国家和地区的重视。在微电网技术研究方面,美国、日本和欧洲的一些国家和地区起步较早,在微电网技术领域具有一定的研究基础。目前基本完成了微电网的理论研究,在微电网模型及仿真平台开发、微电网控制、保护等方面取得了很多研究成果,并且通过了实验室和一些示范工程的验证。未来的研究主要集中在更加高级的控制策略,并通过实际项目来验证其在实际微电网中的运行效果,从而进一步完善微电网技术的相关标准。

### 1.2.1 美国

美国 CERTS (电气可靠性技术解决方案联合会) 开创了微电网的理念,该微电网的含义在全世界的认可度是比较高的,部分内容描述如下:“在微电网中,主要包含两部分,一部分是负荷端,另一部分是分布式电源端。微电网在能够实现供热、供电的同时,运行过程必须依赖于各类电力电子设备,实现微电网与主网的连接。以主网的视角进行分析,微电网能够被视为可控的电源或负载,并同

时对负载提供稳定安全的电能；当微电网在主网由于出现问题而独立运行时，微电网可以保证对其系统内用电负荷的供给，等问题解决后重新并网。”通过这个概念，美国 CERTS 合理地阐述了分布式电源与大电网的结合方式，解释了其对微电网并网的想法和理解。目前，美国的研究表明，分布式能源可以采用对等控制策略，强调即插即用的思想，具备较高的灵活性，并已经得到了初步验证。美国已经对微电网进行了深入的研究，包括模拟实际应用案例、协调管理系统和结合经济性的能量优化。

美国对微电网进行了建模仿真、控制保护并在实际应用中就对成本收益进行了经济分析。在国家的推动下，美国对于微电网的研究重点是致力于优化电能质量、保证重要负荷供电可靠性以及减少运行成本，另外把微电网结合到军事项目中，防止基地或者设施断电。美国在发展微电网方面侧重于供电可靠性和安全性的研究，提高电网的智能化程度。2005年，美国能源部首次提出了微电网技术研究发展的路线图，如图 1-1 所示。美国已经完成了在实验室验证微电网基础理论研究和实际工程示范运行阶段，现在已经进入了商业化发展阶段。



图 1-1 美国能源部提出的微电网研究发展的路线图

CERTS 定义下的微电网，具备如下主要优势：

1) 微电网同大电网之间，只存在一个 PCC (Point of Common Connect)。与大电网相比，就相当于是一个平常的负荷。微电网设立的目的主要是针对大电网中存在的供电压力以及管理负担，但是，微电网与大电网之间实际上是不进行电能间的相互输送的。

2) 微电网中的负荷主要有两种, 分别为重要负荷和普通负荷。

3) 设置的接口可实现“即插即用”, 在不做特殊处理的情况下就可使各类分布式电源接入大电网。

4) 科学合理地配置发电单元, 在保证供电电能质量的前提下, 尽量使用可再生能源发电, 这是应用微电网最大的优势, 故系统需要设置足够的协调管理能力。

### 1.2.2 日本

日本对各类资源的拥有量相对来说较为匮乏, 能源储量长期处于短缺状态, 相对于其他国家而言, 日本本国更加重视对新型、清洁能源的开发、研究和利用, 主要以研究海岛微电网为主。从 2003 年开始建立微电网应用试点工程, 根据风光发电单元的间歇性、随机性与不可控性等特征, 进行了大量的理论实践研究, 得到了许多具有现实意义的成果。比较著名的微电网示范工程包括八户微电网项目、爱知微电网项目、京都微电网项目和仙台微电网项目, 日本通过这些工程获得了非常多的成果, 特别是发电单元与大电网之间的协调配合、能量优化以及提高经济性等问题的研究。另外, 其新能源与工业技术发展组织 (NEDO) 与美国合作了一个微电网协作实验工程, 研究重点在于发电单元与配电系统之间的互联。

日本许多科研机构都对微电网进行了不同的定义, 其中的一种定义是: 微电网内部包含数个分布式电源, 其由 PCC 与大电网并网。考虑到负荷是时刻变化的, 微电网根据相应的运行情况来确定是否需要并网或者独立运行; 另一种定义是: 微电网中设有 DG (Distribution Generation), 可提供供能、供热的各类设备, 同时还存在多类负荷, 对大电网表现为可控的电源或负载, 这种定义方式涵盖了传统的独立供电方式, 其对微电网的概述领域要比 CERTS 广得多。

微电网的应用给用户用电带来了很多的好处, 一方面可以在大电网断电时, 为用户进行供电, 保证重要负荷的运行; 另一方面也可以对有不同用电要求的用户进行区分供电。通常来说, 发电单元中主要的发电模块是可再生的清洁能源, 另外也有许多利用化石燃料发电的设备。考虑到以风力和光伏为首的可再生能源具有很大的随机性, 使用化石燃料发电可以提高用电可靠性。目前日本微电网项目获得了很好的效果, 不但可再生能源的利用率越来越高, 而且其发电额定量也在不断提高, 真正做到了减少化石燃料浪费以及减少环境污染。

日本对分布式发电的研究以及对微电网试点工程的建立都要超前于其他国家, 其发展目的即尽量确保能源在供应时可具备多样化、低污染、零排放, 以便更好地满足各类电力用户对电能的不同需求。在 2011 年的日本核事故期间, 仙台市微电网独立为医护等重要设施持续供给多个小时。经历了这次事件, 日本越

来越注重微电网的研究,以提高当地突发断电的紧急应对性。

### 1.2.3 欧盟

欧盟一直非常重视可再生能源的发展和应用,于1998年就开始了微电网相关问题的探究,并对微电网项目实施与开展。欧盟目前的电网结构比较稳定,人们对于负荷需求的同步增长量也较为缓慢,主要是利用可再生能源替代传统能源以降低废气排放。微电网的发电单元主要是以小型清洁发电设备为主,并网后可以提高供电的可靠性和灵活性。微电网为当地电力系统带来的好处有很多,其中比较明显的几点是改善电能质量、增大可再生能源的使用率和减少CO<sub>2</sub>排放量及降低污染。目前,微电网的应用案例越来越多,经过大量的深入研究,其控制性和稳定性也在逐渐提高,大电网与微电网结合供电已经成为未来发电的必然趋势。在欧盟国家,对微电网项目的研究与分布式发电的研究紧密相连,目的是在电力市场上,能够真正地实现分布式与集中式供电模式的相互协调与配合。

欧盟对于微电网给出如下定义:微电网的构成主要分为三部分,分别为分布式电源、储能装置以及对负荷的调控设备,其经PCC接入高压大电网中,其规定的容量一般不超过2MW。欧盟对于微电网的评定指标更加侧重于其与主网的差别,与传统、常规的电力系统相比较,微电网是一种规模比较小的电网,它所需的所有电能均由其内部的微电源进行供给,微电源一方面负责供给电量,另一方面也有可能成为负载。

目前,欧盟设立了多个微电网科研部门(见表1-1),如University of Kassel太阳能技术研究所的Demotec微电网项目、University of Athens的NTUA微电网项目等,同时还设置了多个示范单位。另外,欧盟还在微电网的结构问题上提出了上下层区分管理:下层负责监控发电单元和负载,上层通过微电网对系统进行统一的优化管理。同时,欧盟在对微电网系统进行建设的过程中,还不断地推出许多附属的创新型产品,加快了微电网技术行业创新、发展的步伐。

欧盟部分微电网实验室研究对比

表 1-1

研究机构	建立时间	系统容量	电压等级	能源
希腊雅典工业大学	2002	80kW	400V	太阳能电池、燃料机
欧盟微电网实验室	2002	210kW	400V	燃料电池、燃料机
芬兰工业大学	2005	96kW	400V	太阳能电池、蓄电池
加拿大多伦多大学	2005	7.5MW	13.8kV/480V	柴油

### 1.2.4 中国

近年来,中国全民收入从低收入阶段迈向了中高收入阶段,高收入也意味着

高产出，导致用户耗电量逐年增大，目前石油等资源均需要进口，并且传统化石燃料的消耗会造成严重的环境污染，国家目前对于发电的研究重点都放在了微电网以及清洁能源的利用上面。微电网及可再生能源在中国的应用非常迅速，在我国有关部门的大力推动和支持下，目前有许多机构和大学都在进行微电网理论与实践方面的深入探究，同时各个区域还开发了许多微电网应用项目，各院校主要着手于微电网的能量优化研究、经济性研究、运行控制研究和电能质量研究等。与此同时，国家也出台了相关标准、法规，加速推进了大量建设国内微电网项目的计划，力争在最大程度上使用清洁的可再生能源。在向第三代电网过渡的过程中，电改方案已经明确表明，必须加强电力系统中新型能源范畴内的各项创新、发展，逐渐构建依赖于各分散形式下发电的创新体制，对现有不完善的能源体制进行改善。随着微电网融入人民群众的生活中，很大程度上提高了群众环保和节能的意识，在深入研究本专业技术的同时，也使相关产业的技术水平有了一定的提高。

结合我国电力系统的基本情况，可以将微电网定义为：由微电源、储能、负荷及相关电力电子装置集成的一个小型发配电系统，是能够实现自我控制、保护和管理的自治系统。微电网从系统观点出发将微型电源、储能装置以及一些控制装置等结合形成一个小型的可控单元。微电网通过公共连接点 PCC (Point of Common Coupling) 和大电网进行电能流通，可以与大电网联网运行，也可以在大电网出现故障或停电时或根据系统运行需要，通过分开 PCC 与电网断开形成孤岛单独运行，这就是微电网运行的两种基本方式：并网运行和孤岛运行。

目前，国内微电网应用项目主要有 3 种情况：

1) 边远地区微电网。目前边远地区通过传统电网输电成本过高，因此，依靠当地丰富的风、光等可再生资源，该类地区建设了大批依托当地光伏和风能的独立微电网项目。例如：国家新能源示范城市吐鲁番新能源城市微电网项目、西藏阿里塔尔钦光储电站等。

2) 海岛微电网。目前我国有 450 个岛屿上有人居住，为解决海岛人民的用电需求，该类地区建设了大批利用本地可再生能源的独立微电网。例如：浙江东福山岛风光储柴及海水淡化综合系统项目、南麂岛离网型微电网工程等。

3) 城市微电网。其目的在于节约传统能源，如：石油、煤炭、天然气等。更多的使用光伏和风能为负荷提供电量，不但可以缓解全球石油、煤炭等化石燃料的危机，而且可以减少  $\text{CO}_2$  排放，降低温室效应。例如：北京左安门微电网示范项目、中新天津生态城项目等。

微电网对电力系统的改革、可再生能源的利用、电力用户的电能质量及供电可靠性起着极为重要的作用：

1) 中国可再生能源储量巨大,微电网在我国研究和应用的空间也非常大。虽然我国幅员辽阔,但是人口分布却不均匀,很多偏远地区用电不稳定。可通过使用清洁的光伏和风力微电网解决这部分地区居民的用电问题。微电网的利用一方面可以促进能源配置的合理性、减少 CO<sub>2</sub> 排放、减少污染以及缓解化石燃料紧缺这个严峻的问题,另一方面能够满足偏远地区的用户用电以及充分利用清洁的可再生能源。所以,利用微电网对偏远地区用户进行供电,不但可以提高偏远地区的供电质量,而且可以提高其供电可靠性,具有很高的现实意义,也是未来偏远地区供电发展的重要方向。

2) 微电网并网相对于单一大电网,可以减少甚至杜绝断电情况的发生,又可以根据各个用户的需求有针对性地发电。微电网主要由数个发电单元、储能装置和负荷组成,建设过程需要充分考虑当地天气和地理环境等因素,科学配置微电网中各个发电单元,编制系统的管理方案等。这样能够提高供电的电能质量,并且降低大规模停电事故的发生概率,保证可靠供电。另外,孤岛微电网能够在电网受到影响或者断电的情况下独立运转,优先保证重要负荷的工作,可以通过这两个方面同时提高用户用电的满意度。

3) 随着微电网的良好应用,也使人们把目光聚焦在热电联产上面。其可以同时生产电能和热能,在很大程度上节约了燃料,低排放也有利于保护环境,所以具有大规模应用的前景。我国对于这项技术的主要研究是如何把热电联产更好地加入到微电网中。在中国尤其是中国的北方,热能的需求量也是不可忽视的,热电联产很适合对北方的供暖系统进行补充,所以把热电联产应用到微电网中是未来发展的必然趋势。

### 1.3 微电网能量管理系统

相较于大电网来说,微电网既能够当作大电网的负荷,从网内获取电能,又能够并网作为大电网的电源,与网内能量相互供给。然而,一方面由于可再生能源供给的电量会随着外界天气情况转换而受到极大的影响,具有较大的随机性和间歇性,这在一定程度上影响了系统的安全性,尤其是在微电网离网的情况下;另一方面系统内所需的总电量也是动态的,以上这些情况导致微电网与大电网的能量管理体系无法通用。

微电网能量管理系统(Energy Management System, EMS)收集系统内各个发电单元的输出电量情况、用户负荷曲线情况和天气情况,规划得到系统在最优模式下的各个设备单元的组合工作计划。所以,协调微电网内部各发电单元、储能单元与用户、上级电网之间的能量流向,对系统进行有效的运行控制与能量优化是整个系统需要研究的重点问题。图 1-2 为微电网能量管理系统分析图。