

吴红霞 著

微电网关键技术 及工程应用研究



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

武汉东湖学院 2016 年青年基金项目
“微电网系统的运行控制与能量管理研究”成果

微电网关键技术 及工程应用研究

吴红霞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书从实用化角度出发,对微电网涉及的相关技术进行了阐述,同时对典型工程应用实例进行了讲解和分析,主要内容涵盖了微电网与分布式发电技术,微电网控制与运行技术,微电网的保护技术,微电网的能量管理技术,微电网的信息建模、通信与监控技术,微电网的规划设计与工程应用实例等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

微电网关键技术及工程应用研究/吴红霞著. —北京:中国水利水电出版社,2019.3

ISBN 978-7-5170-7641-4

I. ①微… II. ①吴… III. ①电网—电力工程—研究
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 079692 号

书 名	微电网关键技术及工程应用研究 WEIDIANWANG GUANJIAN JISHU JI GONGCHENG YINGYONG YANJIU
作 者	吴红霞 著
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(营销中心)
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	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市华晨印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 13.25 印张 237 千字
版 次	2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	70.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

由于化石燃料的日益枯竭、地球环境的不断恶化以及人类社会对能源依赖性的增长,新能源的就地开发和分布式发电的利用已成为各国政府节能减排、发展绿色能源的重要手段。分布式发电具有污染少、能源利用率高、安装地点灵活等优点,并且与集中式发电相比,节省了输配电资源和运行费用,减少了集中输电的线路损耗。分布式发电可以减少电网总容量,改善电网峰谷性能,提高供电可靠性,是大电网的有力补充和有效支撑。无疑,分布式发电是电力系统的发展趋势之一。

为使分布式发电得到充分利用,一些学者提出了微型电网(Micro Grid,简称“微电网”)的概念。“微电网”也称为“智能电网的积木”,是一种新颖的配电网结构,它能充分发挥分布式能源的应用潜力,已成为未来智能电网的重要组成部分。微电网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等组成的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统。微电网技术的提出旨在实现分布式电源的灵活、高效应用,解决数量庞大、形式多样的分布式电源并网运行问题。

微电网虽然不是一个新概念,但是它可以作为一项新技术来消纳更多的可再生能源,并且可以联合电力电子装置的灵活性,形成更高效的发电方式。通过微电网实施对分布式电源的有效管理,可以使未来配电网运行调度人员不再直接面向各种分布式电源,既降低了分布式电源对配电系统安全运行的影响,又有助于实现分布式电源的“即插即用”,同时可以最大限度地利用可再生能源和清洁能源。配电系统中大量微电网的存在将改变电力系统中低压层面的结构与运行方式,实现分布式电源、微电网和配电系统的高度有效集成,充分发挥各自的技术优势,解决配电系统中大规模分布式可再生能源的有效接入问题,这也正是智能配电系统面临的主要任务之一。此外,为了促进微电网技术的发展,微电网领域正在形成新型产业,可为电网和分布式电源业主带来最大的效益。

微电网因其发电形式多样、供电方式灵活而成为大电网的有益补充,但微电网的很多基础运行问题都与传统大电网有所不同,需要专门加以研究。近年来,微电网的研究和发展获得了我国社会各方面的广泛关注。政府部门希望借助微电网技术为分布式可再生能源的发展探索出新的运营

和管理模式,电网公司拟通过微电网示范工程的建设解决大量分布式电源并网后的运行和管理问题,一些能源管理公司、发电商等希望利用微电网自我组织及自我管理的优势探索新的能源服务机制,而大学和研究机构则希望通过微电网技术的研究探索出新的理论和方法。总之,人们从各自不同的角度在关注微电网的建设和发展,期待微电网技术获得更加广泛的应用。

正是在微电网革新的背景下,作者撰写了本书,希望它的出版能为专业和非专业人士提供非常有价值的信息。本书既注重技术分析又注重工程应用,适合所有从事有源配电网分析、规划与设计、运行与控制的电气工程师、电网运维人员和电力系统研究者参考使用,也适合于微电网相关行业的供应商和制造商。本书共9章。第1章为引言,简单介绍了微电网的产生背景、定义、结构与分类、发展现状与发展前景等;第2章至第6章为关键技术分析,具体包括微电网与分布式发电技术、微电网控制与运行技术、微电网的保护技术、微电网的能量管理技术,以及微电网的信息建模、通信与监控技术;第7章对微电网的经济性与市场参与进行讨论;第8章分析微电网的规划设计,并列举了一些工程应用实例;第9章对全书作了总结。

在本书写作过程中,作者以自己在微电网系统方面的研究工作为基础,参考并引用了国内外专家学者的研究成果和论述,在此向相关内容的原作者表示诚挚的敬意和谢意。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2019年1月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 微电网的产生背景	1
1.2 微电网的定义	2
1.3 微电网的结构与分类	7
1.4 微电网的发展现状与发展前景	13
第 2 章 微电网与分布式发电技术	24
2.1 概 述	24
2.2 光伏发电系统	25
2.3 风力发电系统	30
2.4 燃料电池发电系统	36
2.5 微型燃气轮机发电系统	38
2.6 储能系统	40
第 3 章 微电网控制与运行技术	47
3.1 微电网控制模式	47
3.2 独立微电网三态控制	49
3.3 微电网的逆变器控制	53
3.4 微电网的并离网控制	58
3.5 微电网的优化控制	64
3.6 微电网的运行	80
第 4 章 微电网的保护技术	83
4.1 概述	83
4.2 分布式电源故障特性	85
4.3 微电网的接入对配电网保护的影响	86
4.4 微电网的自适应保护	87
4.5 微电网的接地保护	95
第 5 章 微电网的能量管理技术	102
5.1 概述	102

► 微电网关键技术及工程应用研究

5.2	分布式发电功率预测	108
5.3	负荷预测	112
5.4	微电网的功率平衡	114
5.5	微电网的能量优化管理	119
第6章	微电网的信息建模、通信与监控技术	123
6.1	微电网的信息建模	123
6.2	微电网的通信	137
6.3	微电网的监控	140
第7章	微电网的经济性与市场参与	145
7.1	微电网的经济性	145
7.2	微电网的市场参与	152
第8章	微电网的规划设计与工程应用实例	166
8.1	微电网的规划设计	166
8.2	微电网的工程应用实例	186
第9章	结语	199
参考文献	202

第 1 章 引 言

电力是重要的二次能源,是能源利用最有效的形式之一。通过电能的形式加以传输和利用是可再生能源开发的主要形式之一。分布式发电及其系统集成技术正日趋成熟,得到越来越广泛的应用。为充分发挥分布式电源的优势,进一步提升电力系统的运行性能,微电网(Micro Grid, MG)应运而生。

1.1 微电网的产生背景

以集中发电、远距离输电和大电网互连为主要特征的电力系统是目前世界上电力生产、输送和分配的主要方式,承担着世界上绝大部分用户的电能需求。近年来,伴随着全球经济和社会的持续发展,传统集中式供电网的弊端逐渐凸显,如在用电高峰期负荷跟踪能力有限,传统燃煤电厂能源利用效率较低,化石燃料造成环境污染等。而分布式发电技术恰恰可以弥补这些局限性,与远距离输配的传统电源相比,分布式发电一定程度上更适应分散的电力需求与资源分布。

分布式发电(Distributed Generation, DG)是指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,是存在于传统公共电网以外,任何能发电的系统。

分布式储能装置供电时具有电源特性,通常将分布式储能装置与分布式发电统称为分布式电源。分布式电源通常与配电网连接,发电功率一般小于数十兆瓦,它是大电网电源的补充,除了方便地实现分布式能源的就地利用,还可以对负荷供电起到备用作用,改善电网供电可靠性。因此,分布式发电越来越受重视,在促进社会和经济可持续发展中具有良好的发展前景。

各种分布式电源的并网发电对电力系统的安全稳定运行提出了新的挑战。当中低压配电系统中的分布式电源容量达到较高的比例(即高渗透率)时,要实现配电系统的功率平衡与安全运行,并保证用户的供电可靠性和电能质量也会有一定困难。独自并网的分布式电源易影响周边用户的

供电质量,分布式发电技术的多样性增加了并网运行的难度,同时实现能源的综合优化面临挑战,这些问题都制约着分布式发电技术的发展。阻碍分布式发电获得广泛应用的难点不仅仅是分布式发电本身的技术壁垒,现有的电网技术还不能完全适应高比例分布式发电系统的接入要求。

由于分布式发电的不可控及随机波动性,增加分布式发电的接入容量,同时也增加了对电网的影响,即提高分布式发电的渗透率带来对电网稳定的负面影响。分布式发电对电网来说是不可控电源,目前对分布式发电多采用限制、隔离的方式以减少对电网的冲击。

为了解决分布式发电直接并网运行对电网和用户造成的冲击,充分挖掘分布式发电为电网和用户带来的价值和效益,2001年美国威斯康星大学 Bob Lasster 等学者首次提出了一种更好地发挥分布式发电潜能的结构型式——微电网。自此微电网的概念为更多人所理解,微电网引起了世界各国的关注。

1.2 微电网的定义

微电网是由分布式发电、负荷、储能装置及控制装置构成的一个单一可控的独立发电系统。微电网中分布式发电和储能装置并在一起,直接接在用户侧。对大电网来说,微电网可视为大电网中的一个可控单元;对用户侧来说,微电网可满足用户侧的特定需求,如降低线损、增加本地供电可靠性。微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行。典型微电网示意如图 1-1 所示。

图 1-2 中给出了一个典型的非微电网示例,存在无电荷、无微源、无监控、碳排放不足等问题,通过该示例可知,明显应包括 3 个基本特征:就地负荷、就地微源和智能控制。许多国家还规定了应用可再生能源(RES)和小型的千瓦级的热电联产(CHP)技术的碳排放信用约束来激励环境保护,因此碳排放信用也应成为微电网的一个特征。如果缺乏一个或几个特征,那么不再是微电网的概念,而更适宜描述为分布式电网并网或者需求侧集成(Demand Side Integration, DSI)。

美国电力可靠性技术解决方案协会(The Consortium for Electric Reliability Technology Solution, CERTS)认为微电网组成一定包含负荷和微电源。即使发生故障,微电网也能够依靠自身电能进行工作,可同时满足用户用电控制和用电安全两方面的需求。美国 CERTS 针对智能微电网的定义,给出了相应的智能微电网的结构,如图 1-3 所示。

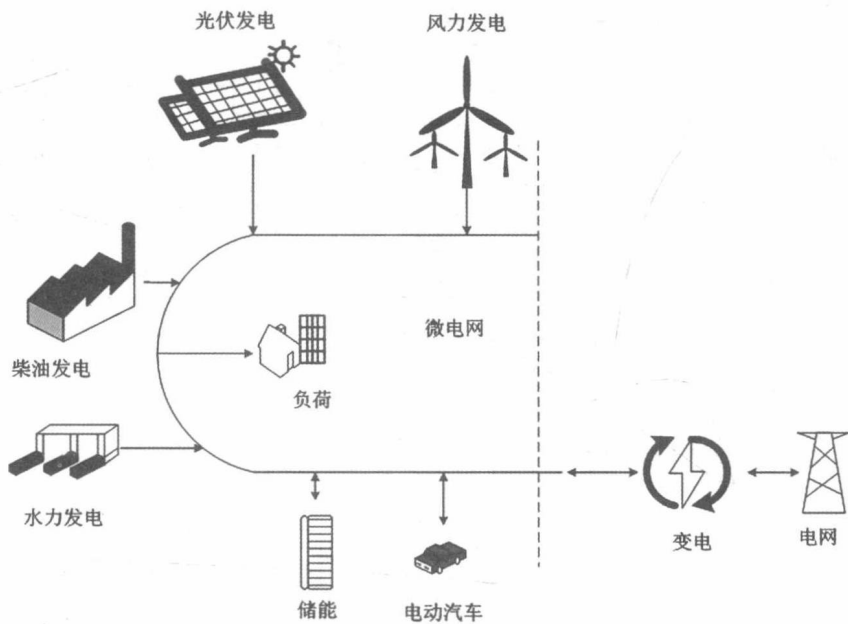


图 1-1 微电网按示意图

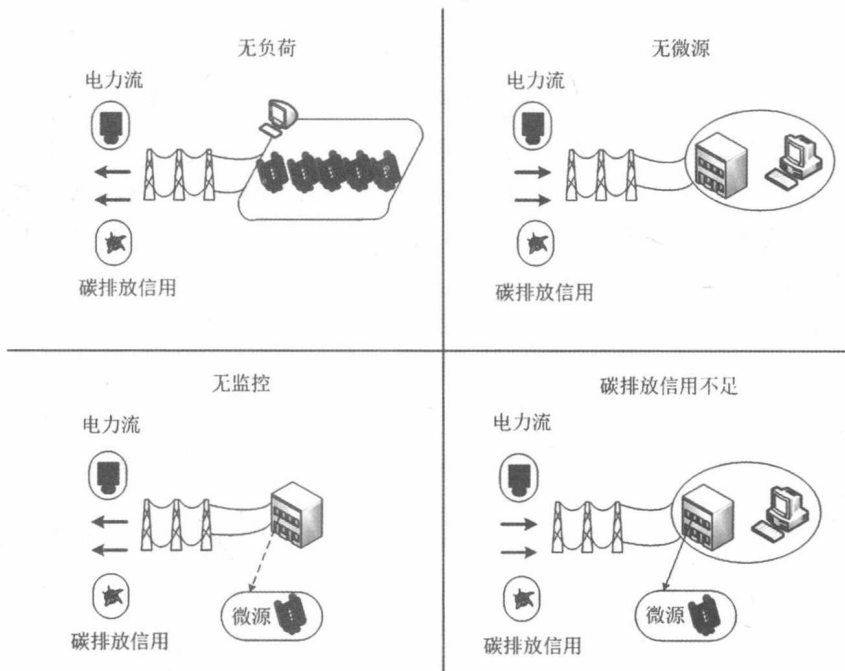


图 1-2 非微电网示例

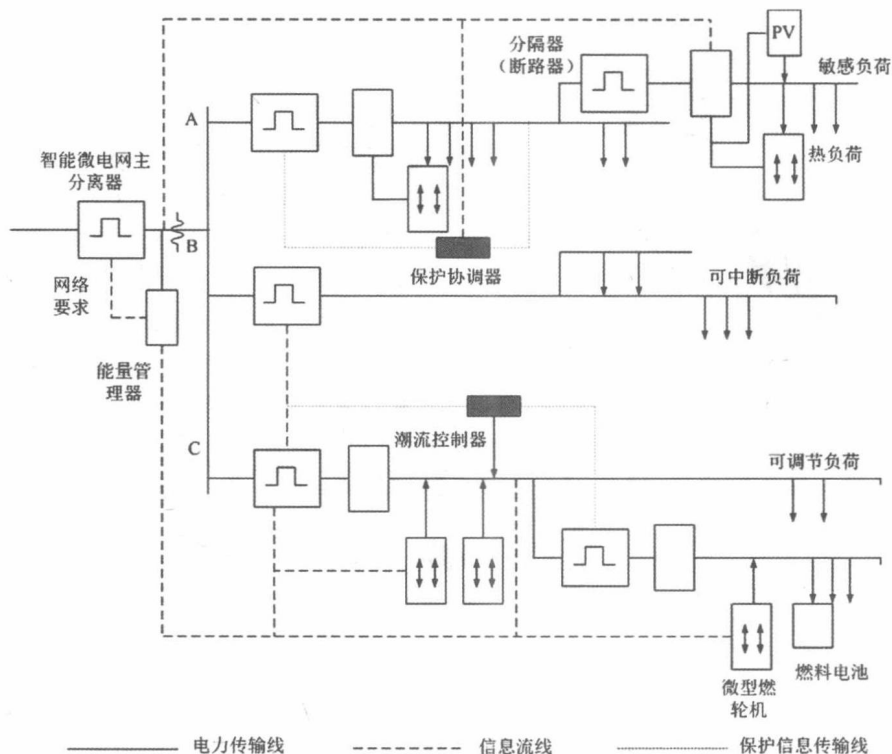


图 1-3 美国电力可靠性技术解决方案协会智能微电网结构

从智能微电网的定义中可以看出，智能微电网与单纯的分布发电并网络的主要区别在于智能微电网中拥有集中管理单元，使得各分布式单元、负荷与电网之间不仅存在电功率的交互，还存在通信信息、控制信息及其他信息的检测与交互，具体的区别如图 1-4 和图 1-5 所示。

微电网存在不同的规模：可以定义为一个低压电网、一条低压馈线或者是一栋低压配电的房子，如图 1-6 给出的一些案例所示。

微电网可以看作小型的电力系统，它具备完整的发、输、配电功能，可以实现局部的功率平衡与能量优化，又可以认为是配电网中的一个“虚拟”的电源或负荷。

虚拟发电厂(VPP)是由一个主体集中控制的共同运行的一组分布式电源。VPP 可代替传统的发电厂，并且可提高效率和灵活性。尽管微电网和 VPP 在概念上有些近似，但也存在一些显著的区别。

(1)就地性。微电网内的分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)位于当地同一个配电网内，它们的目标是基本上满足就地负荷的需求；而 VPP 的 DER 不要求在当地同一个配电网内，它们可以在较大的地

理范围内实现协调。

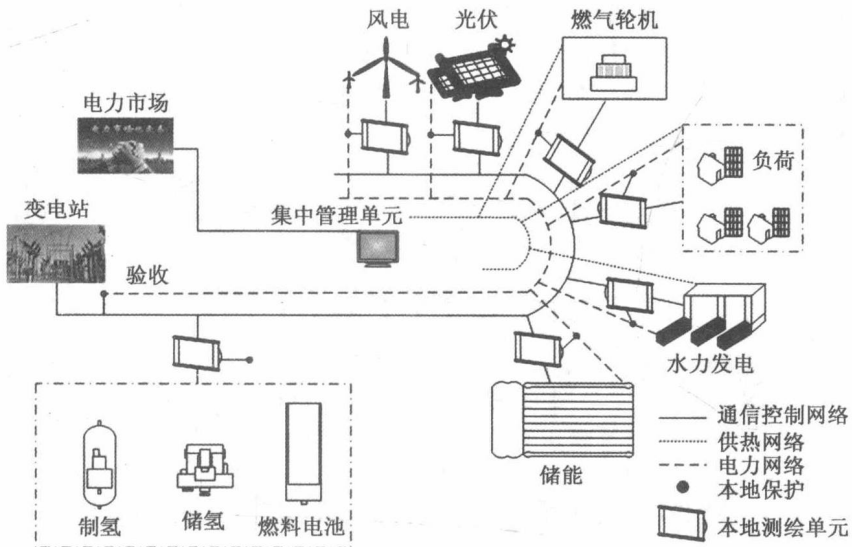


图 1-4 智能微电网中各单元间的信息交互图

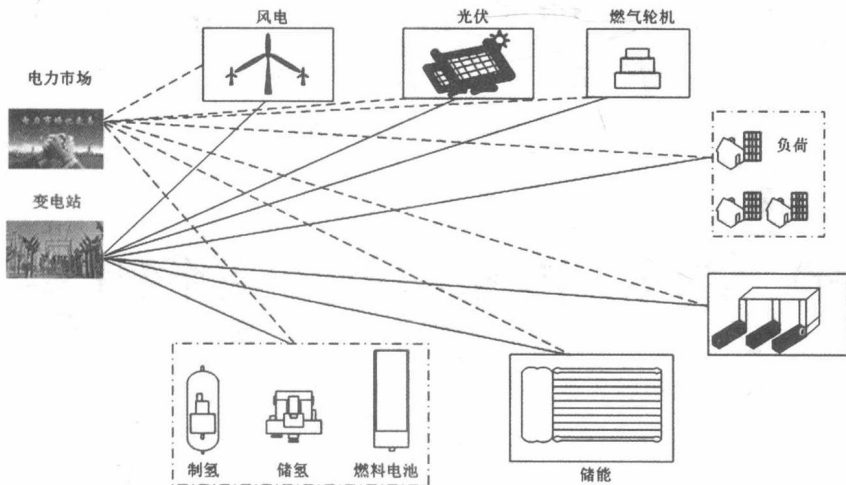


图 1-5 传统分布式发电网络中各单元间的信息交互图

(2)容量。微电网的安装容量一般相对较小(从几千瓦到几兆瓦),而 VPP 的额定功率更大。

(3)用户利益。微电网着重满足就地消费,而 VPP 凭借 DSI 酬金仅当作灵活的电源参与集成电力交易。

依从 VPP 的定义,如果作为一个商业实体,可集成不同分布式电源、储能和可控负荷,而不管它们的物理位置。若考虑就地电网的约束,建议采用技术虚拟发电厂(TVPP)。但无论怎样,VPP 作为一个虚拟的发电

► 微电网关键技术及工程应用研究

厂,除了应用于 DSI,均倾向于忽略就地消费。而微电网定位于就地电力消费,给终端用户提供就地购买或从上游电力市场购买电力的选择,这会将微电网导向更高的可控性。图 1-7 给出了微电网与发电集成的虚拟发电厂和技术虚拟发电厂的优势对比图示。微电网内的发电与用电资源同时得到优化,使 DG 获得更高的收益率。

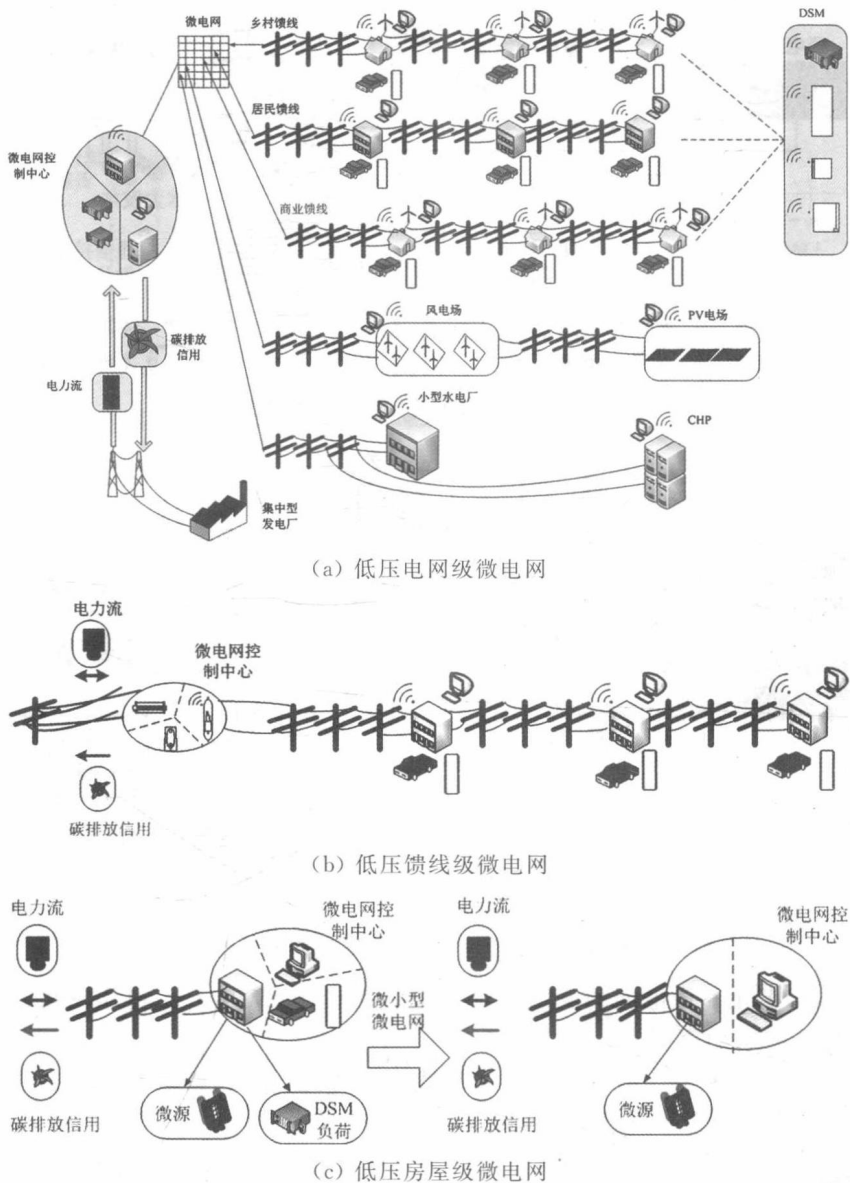


图 1-6 微电网示例(注:PSM 指需求侧管理)

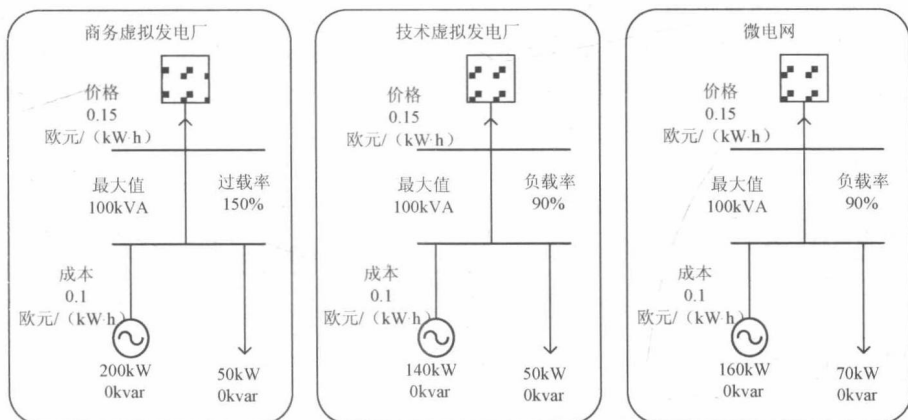


图 1-7 微电网与发电集成的商务虚拟发电厂和技术虚拟发电厂的优势对比

微电网的理想化目标是实现各种分布式电源的方便接入和高效利用,尽可能使用户感受不到网络中分布式电源运行状态改变(并网或退出运行)及输出功率的变化而引起的波动,表现为用户侧的电能质量完全满足用户要求。实现这一目标关系到微电网运行时的一系列复杂问题,包括:①微电网的规划设计;②微电网的保护与控制;③微电网能量优化管理;④微电网仿真分析等。这些技术问题目前大多处于研究示范阶段,也是当前能源领域的研究热点。

总结各国多个微电网试点工程,微电网具备微型、清洁、自治、友好的基本特征。综合国内外微电网的定义和基本特征,微电网一般可定义为:以分布式电源为主,利用储能和控制装置进行实时调节,实现网络内部电力电量平衡的供电网络,可并网运行也可离网运行。

我国微电网发展应用的定位主要有以下三个方面:①满足高渗透率分布式可再生能源的接入和消纳;②满足与大电网联系薄弱的偏远地区电力供应;③满足对电能质量和供电可靠性有特殊要求的用户用电需要。

1.3 微电网的结构与分类

1.3.1 微电网的结构

微电网中分布式发电靠近电力用户,输电距离相对较短,其负荷特性、分布式发电的布局以及电能质量要求等各种因素决定了微电网在结构模

式上有别于传统的电力系统。

微电网一次系统由分布式发电、储能、配电、电力电子装置、负荷等组成,二次系统由保护和自动化装置、微电网监控系统、微电网能量管理系统等组成。系统结构如图 1-8 所示。

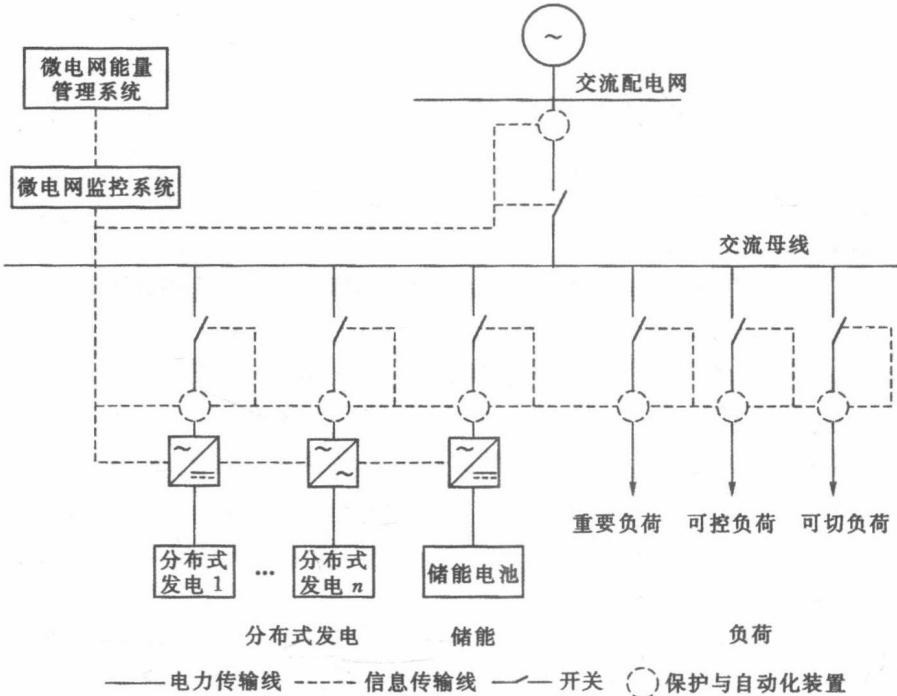


图 1-8 微电网系统结构图

(1) 分布式发电(DG)。分布式发电类型包括风能、太阳能、生物质能、水能、潮汐能、海洋能等可再生能源发电,微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池等非可再生能源发电,以及利用余热、余压和废气发电的冷热电多联供等。

(2) 储能装置。可采用各种储能方式,用于新能源发电的能量存储、负荷的削峰填谷,微电网的“黑启动”。从微电网的规模和特点等方面来看,适用于微电网的储能技术主要有电池储能、超级电容储能、飞轮储能等。

(3) 控制装置。微电网可由控制装置构成控制系统,用于实现并离网切换控制、分布式发电控制、微电网实时监控、储能控制、微电网能量管理等功能。

(4) 负荷。负荷包括各种一般负荷和重要负荷。

当多个 DG 局部就地向重要负荷提供电能和电压支撑时,可得到如

图 1-9 所示的微电网结构。微电网的这种结构可以在很大程度上减少直接从大电网买电和电力线传输的负担,同时也可以增强重要负荷抵御来自主网故障影响的能力。

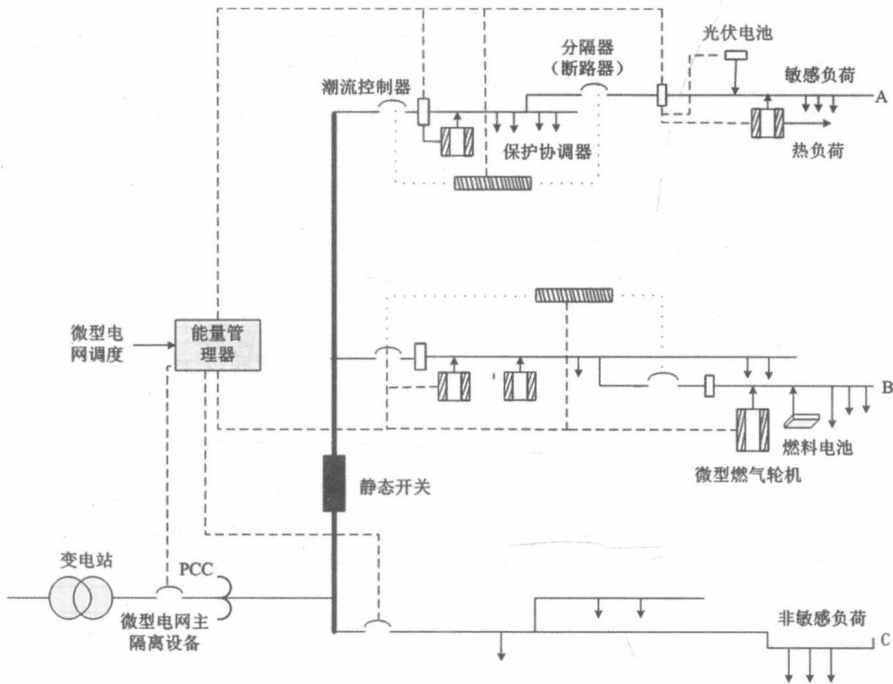


图 1-9 多个 DG 的微电网基本结构

1.3.2 微电网的分类

1.3.2.1 按功能需求分类

按功能需求划分,微电网可分为简单微电网、多种类设备微电网和公用微电网(图 1-10)。

1.3.2.2 按微电网电压等级及规模分类

从供应独立用户的小型微电网到供应千家万户的大型微电网,微电网的规模千差万别。按照接入配电系统的方式不同,微电网可分为用户级低压微电网、中压支线级微电网、中压馈线级微电网和变电站级微电网,其分类及布局如图 1-10~图 1-12 所示。

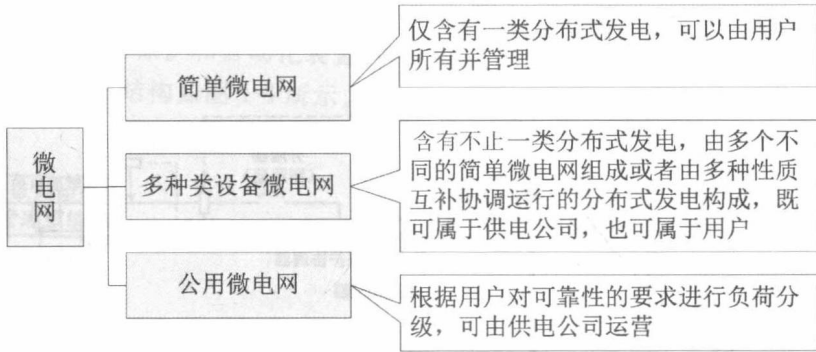


图 1-10 微电网按功能需求分类

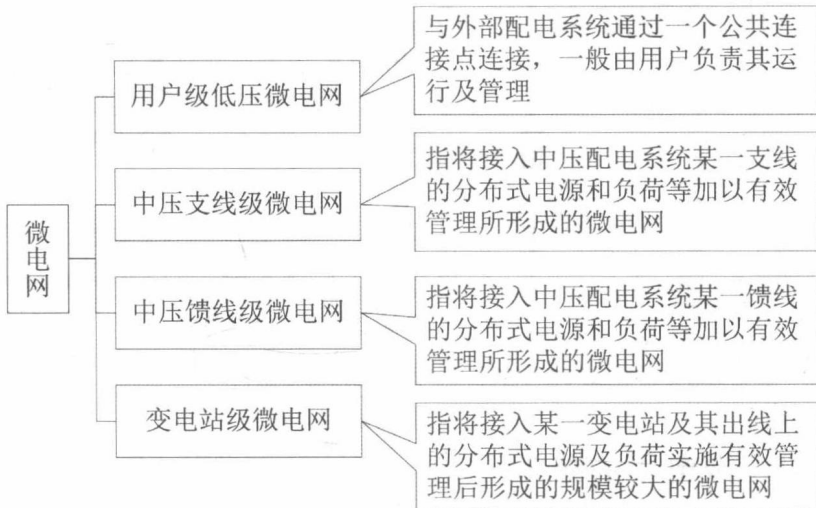


图 1-11 微电网按电压等级及规模分类

1.3.2.3 按交直流类型分类

(1) 直流微电网。采用直流母线构成，如图 1-13 所示。直流微电网可向直流负荷、交流负荷供电。

直流微电网拥有独特的直流输电线路，相对于传统交流系统不会产生大型故障。

(2) 交流微电网。采用交流母线构成，如图 1-14 所示。交流微电网是微电网的主要形式，采用交流母线与电网相连，可实现微电网并网运行与离网运行。