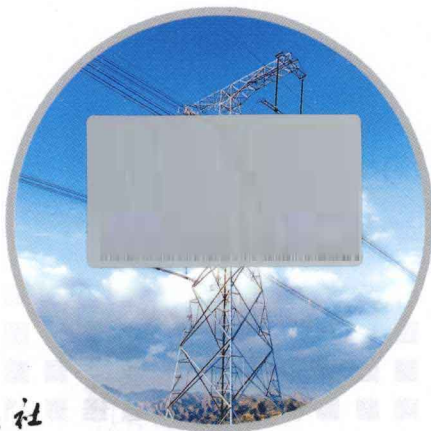




智能电网系列书

微电网技术 及工程应用

李富生 李瑞生 周逢权 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



智能电网系列书



微电网技术 及工程应用

李富生 李瑞生 周逢权 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是《智能电网系列书》之一。

随着智能电网的发展,微电网及其关键技术成为世界各国关注的热点。为了进一步推广微电网技术,指导微电网的工程建设,作者根据工作中的实践撰写了本书。本书全面系统地介绍了微电网的基本概念、关键技术、相关标准、实用设计方法和原则,同时对典型工程设计实例进行了讲解和分析。全书共11章,内容包括微电网概述、微电网的构成与分类、微电网与分布式发电、微电网的控制及运行、微电网的保护、微电网的监控与能量管理、微电网的通信、微电网的接地、微电网的谐波治理、微电网的相关标准及规范,以及微电网系统工程实例。

本书内容全面、通俗易懂,对普及微电网技术将起到很好的推动作用。本书旨在为本领域的同行提供可借鉴的相关理论和经验,共同探索微电网理论研究、技术发展及工程应用等实际问题。

图书在版编目(CIP)数据

微电网技术及工程应用 / 李富生, 李瑞生, 周逢权著. —北京: 中国电力出版社, 2012. 7
(智能电网系列书)
ISBN 978 - 7 - 5123 - 3358 - 1

I. ①微… II. ①李…②李…③周… III. ①电网 - 电力工程 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 172435 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月北京第一次印刷
710 毫米 × 980 毫米 16 开本 11.625 印张 153 千字
印数 0001—4000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

电力系统进入了智能电网时代。

节能环保和安全运行是智能电网的两个重要任务。为了人类社会的可持续发展，必须大量节约不可再生能源、必须大幅度减少二氧化碳排放；为了确保电网的安全稳定，负荷中心必须拥有一定比例的电源，形成电能就地平衡的运行模式。这样的背景下，集负荷、电源及其调节手段为一体的微电网应运而生。

微电网是分布式清洁能源接入电网的主要形式之一。光伏发电、风力发电以及储能装置等清洁能源以家居分布、楼宇分布或者小区/园区分布等方式接入到微电网，微电网可以采取诸如“虚拟电厂”等电源模式对所辖的分布式电源进行统一管理，以适应分布式清洁能源渗透率的不断提高，显著提高电网对分布式清洁能源的消纳能力。

微电网是电能供给就地平衡的主要形式之一。微电网运行控制的核心可以概括为“自治独立、协调互济”八个字。“自治独立”使微电网具备阻断电网故障影响的能力，使微电网的孤网运行具有不失负荷或少失负荷的特征；“协调互济”使微电网与主电网建立起相互支援的关系，不仅可以保证微电网的电能供给品质，而且可以减轻主电网的输电压力。

“实例着眼叙技术，技术落脚到工程”是本书之写作特色。目前，关于微电网的技术书籍颇多。本书没有按照传统的方法讲解微电网技术，而是从实例入手，通过分析微电网对传统配电网的影响，提出了存在的问题，从解决问题的角度讲述和剖析技术，最后从工程应用角度进行解读。

如此写法既有效地说明了问题，又可以指导工程实践。

本书包括 11 章内容，开篇于微电网的作用和意义，阐述了微电网的结构类别、分布式电源接入、运行方式、保护控制、能量管理、谐波治理、接地方式等内容，讨论了微电网通信平台，介绍了微电网标准，剖析了微电网的工程实施案例。本书不仅可以帮助读者清晰了解微电网的概念和技术，而且可以深刻认知微电网工程，是适合电力系统规划设计、装备制造、运行管理等人员以及高等学校相关专业师生阅读的一部好书。

阅读此书，收获颇丰。推荐此书，期望分享。

哈尔滨工业大学 郭志忠

2012 年 8 月

前言

随着能源问题和环境问题的日益突出，发展低碳经济、建设生态文明、实现可持续发展，成为人类社会的普遍共识，开发清洁的可再生能源已经成为世界各国经济和社会可持续发展的重要战略。为协调大电网与分布式发电间的矛盾，最大限度发掘分布式发电在经济、能源和环境中的优势，学者们提出了微电网的概念。微电网是将分布式发电、负荷、储能装置及控制装置等结合，形成的一个单一可控的供电系统。它可以降低馈线损耗、增加本地供电可靠性、提高能源利用的效率等。

随着智能电网的发展，微电网及其关键技术成为世界各国关注的热点。为进一步推广微电网技术，指导微电网的工程建设，作者根据工作中的实践，撰写了《微电网技术及工程应用》一书。本书全面系统地介绍了微电网的基本概念、关键技术、相关标准、实用设计方法和原则，同时给出典型微电网工程设计实例。

本书共 11 章。第 1 章微电网概述，主要介绍微电网的发展历史、现状及发展趋势；第 2 章微电网的构成与分类，主要介绍微电网的构成、运行及控制模式、接入电压等级以及分类；第 3 章微电网与分布式发电，主要介绍微电网中经常用到的分布式发电；第 4 章微电网的控制及运行，主要介绍了微电网的并离网控制技术、运行控制技术（三态控制、逆变器控制）以及并离网的运行过程；第 5 章微电网的保护，主要介绍了微电网接入对配电网继电保护的影响、微电网的保护策略以及微电网接入配电网的保护配置方案；第 6 章微电网的监控与能量管理，主要介绍了微电网监

控组成、能量管理以及优化控制方法；第7章微电网的通信，主要介绍了微电网通信的特殊要求、设计原则、微电网通信系统的设计方案；第8章微电网的接地，主要介绍了微电网的接地方案；第9章微电网的谐波治理，主要介绍了微电网的谐波治理相关技术；第10章微电网的相关标准及规范，主要介绍了国内外微电网相关的标准及规范；第11章微电网系统工程实例，主要通过具体项目介绍了微电网的工程设计方案和试验方案。

微电网技术的发展历史较短，有很多技术处于研究阶段，本书仅对现有的研究和实践结果进行总结。随着微电网研究的不断深入，必将有大量新的技术不断涌现，今后我们将根据微电网技术的发展对本书进一步修订。

本书由李富生研究员、李瑞生教授级高工、周逢权博士著，许继智能电网研究中心的李献伟、马红伟、杨恢宏、唐云龙、张志伟、王慧娟等做了大量的整理绘图工作。本书撰写过程中也得到了中原工学院宋晓炜博士的帮助，宋晓炜博士前期查找了大量的相关文献；合肥工业大学姚晴林教授详细审阅了第5章微电网的保护，并提出了宝贵的修改意见，在此一并对他们表示衷心感谢！在本书撰写过程中参阅了大量的论著文献，在此对这些论著文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者水平和撰写时间，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2012年8月

目 录

序

前言

第 1 章 微电网概述	1
1.1 微电网的发展历程	1
1.2 国外微电网现状及分析	3
1.3 国内微电网现状及分析	7
1.4 微电网的展望	10
第 2 章 微电网的构成与分类	12
2.1 微电网的构成	12
2.2 微电网的体系结构	13
2.3 微电网的运行模式	15
2.3.1 并网运行	16
2.3.2 离网运行	17
2.4 微电网的控制模式	17
2.4.1 微电网控制模式	17
2.4.2 微电网中逆变器控制模式	20
2.5 微电网接入电压等级	24
2.6 微电网的分类	25
2.6.1 按功能需求分类	25
2.6.2 按用电规模分类	26
2.6.3 按交直流类型分类	27

第3章 微电网与分布式发电	30
3.1 概念及特点	30
3.2 光伏发电	32
3.3 风力发电	35
3.4 微型轮机发电	38
3.5 其他分布式发电	43
3.6 储能	45
第4章 微电网的控制及运行	50
4.1 独立微电网三态控制	50
4.1.1 微电网稳态恒频恒压控制	52
4.1.2 微电网动态切机减载控制	54
4.1.3 微电网暂态故障保护控制	56
4.2 微电网的逆变器控制	57
4.2.1 DG 并网逆变器控制	57
4.2.2 储能变流器 (PCS) 控制	57
4.3 微电网的并离网控制	59
4.3.1 微电网的并网控制	60
4.3.2 微电网的离网控制	62
4.4 微电网的运行	66
4.4.1 微电网并网运行	67
4.4.2 微电网离网运行	68
第5章 微电网的保护	70
5.1 DG 特殊的故障特性	70
5.2 微电网接入对配电网继电保护的影响	72
5.2.1 常规配电网保护配置	72
5.2.2 常规低压配电保护配置	73
5.2.3 微电网对配电网继电保护的影响	73

5.2.4	微电网对常规低压配电线路保护的影响	75
5.3	微电网运行保护策略	79
5.4	微电网接入配电网保护方案	80
5.4.1	微电网对配电网一次设备及继电保护的要求	80
5.4.2	基于区域差动的配电网继电保护	80
5.4.3	基于正、反方向阻抗继电器的低压配电网继电保护	85
5.4.4	公共连接点 (PCC) 的保护	88
第6章	微电网的监控与能量管理	90
6.1	微电网的监控	90
6.1.1	微电网监控系统架构	90
6.1.2	微电网监控系统组成	91
6.1.3	微电网监控系统设计	97
6.2	微电网能量管理	100
6.2.1	分布式发电预测	100
6.2.2	负荷预测	101
6.2.3	分布式发电及负荷的频率响应特性	102
6.2.4	微电网的功率平衡	104
6.3	微电网的优化控制	110
6.3.1	微电网中光伏发电优化控制	110
6.3.2	微电网中风力发电优化控制	111
6.3.3	微电网多元复合储能优化控制	112
6.3.4	微电网优化调度策略	113
第7章	微电网的通信	114
7.1	微电网通信的特殊要求	114
7.2	微电网通信的设计原则	115
7.3	微电网的通信系统	116
7.3.1	微电网的通信技术	116

7.3.2	微电网的通信体系结构	118
7.3.3	微电网通信系统的设计	118
第8章	微电网的接地	124
8.1	低压配电网的安全接地	124
8.1.1	TN 接地系统	125
8.1.2	TT 接地系统	128
8.1.3	IT 接地系统	129
8.2	微电网系统接地	130
8.2.1	微电网接入的接地要求	130
8.2.2	TN、TT 系统 DG 接地方式	130
8.2.3	IT 接地系统 DG 接地方式	133
第9章	微电网的谐波治理	135
9.1	微电网的谐波治理技术	135
9.1.1	并网逆变器无源滤波技术	135
9.1.2	并网逆变器有源滤波技术	136
9.1.3	单独配置的滤波技术	136
9.2	微电网的无源滤波技术	136
9.2.1	无源滤波器基本原理	136
9.2.2	无源滤波器的设计	139
9.3	微电网的有源滤波技术	139
第10章	微电网的相关标准及规范	142
10.1	国外相关标准及规范	142
10.1.1	IEEE 相关标准	142
10.1.2	IEC 相关标准	144
10.1.3	其他微电网标准	146
10.2	我国微电网标准及规范	147
10.3	微电网标准发展趋势	148

10.4	微电网标准体系	149
第11章	微电网系统工程实例	152
11.1	项目背景	152
11.2	项目概述	152
11.3	系统设计方案	153
11.3.1	微电网三层控制体系	153
11.3.2	系统设计	155
11.3.3	微电网能量管理系统	157
11.3.4	配电网调度	159
11.4	微电网运行	159
11.4.1	微电网综合监控系统运行	159
11.4.2	光伏发电运行	159
11.4.3	储能运行监控	162
11.5	微电网试验	163
11.5.1	并网转离网试验	163
11.5.2	离网运行试验	165
11.5.3	离网转并网运行试验	165
11.5.4	并网恢复试验	167
11.5.5	储能充放电控制	167
11.5.6	交换功率控制	168
附录	名词术语中英文对照	169
参考文献		171

微电网概述

微电网 (Micro-Grid, MG) 是由分布式发电 (Distributed Generation, DG)、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 DG 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。

微电网可以看作是小型的电力系统, 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。微电网也可以由一个或者若干小型的虚拟电厂 (Virtual Power Plant, VPP) 组成, 它可以满足一片电力负荷聚集区的能量需要, 这种聚集区可以是重要的办公区和厂区, 也可以是传统电力系统供电成本较高的远郊的居民区等。相对传统的输配电网, 微电网的结构比较灵活。

1.1 微电网的发展历程

2001 年, 美国威斯康星大学—麦迪逊分校 (University of Wisconsin-Madison) 的 R. H. Lasseter 教授首先提出了微电网的概念, 随后美国电气可靠性技术解决方案协会 (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS) 和欧盟微电网项目组 (European Commission Project

Micro-Grid) 也相继对微电网给出了定义。

2002 年, 希腊国立工业大学建成了一个小规模的微电网实验测试项目 (NTUA Power System Laboratory Facility), 应用多代理技术进行分布式电源和负荷的控制。

2003 年, 威斯康星大学建成了一个小规模的微电网实验室 (NREL Laboratory Micro-Grid), 总容量约为 80kVA, 实验和测试了在微电网不同运行状态下的多种分布式电源控制; 美国俄亥俄州哥伦布市沃纳特测试基地 (Walnut test site, Columbus, Ohio) 建成 480V 微电网试验系统, 用于测试微电网各部分的动态特性。

同年, 世界各地相继建成了多个微电网示范化工程项目, 如: 美国在范特蒙特 (Mad River Park Vermont, US) 建成的 7.2kV 微电网工程; 希腊在基斯诺斯岛 (Kythnos Islands Micro-Grid, Greece) 建成 400V 微电网工程; 日本相继建成了爱知 (Aichi project)、京都 (Kyotango project)、八户 (Hachinohe project) 微电网工程。

2004 年, 意大利米兰建成了微电网测试项目 (CESI RICERCA test facility), 组成不同的拓扑结构, 进行稳态、暂态运行过程测试和电能质量分析。

2005 年, 英国伦敦建成了微电网测试项目 (Imperial College London control and power research center), 进行配电网试验原型和试验负荷。

同一时期, 世界各地又相继建成多个示范工程项目, 如: 日本相继建成了 Sendai system (2004)、Shimizu Micro-Grid (2005)、Tokyo Gas Micro-Grid (2006); 西班牙建成 Labein Micro-Grid (2005); 美国建成 Sandia National Laboratories (2005)、Palmdale's Clearwell Pumping Station (2006); 德国建成 Manheim Micro-Grid (2006)。

从 2006 年开始, 我国把微电网技术研究相继列入国家“863”计划、“973”计划。2006 年, 清华大学开始对微电网领域进行探索研究, 利用清华大学电机系电力系统和发电设备安全控制和仿真国家重点实验室的硬

件条件，建设包含可再生能源发电、储能设备和负荷的微电网试验平台。

2008 年，天津大学、合肥工业大学分别开展微电网实验测试研究。天津大学侧重试验研究不同形式能源的科学调度，以期达到能源高效利用、满足用户多种能源需求、提高供电可靠性；合肥工业大学侧重试验研究微电网的运行控制及微电网的能量管理系统。

2010 年，国家电网公司在郑州建成“分布式光储联合微电网运行控制综合研究及工程应用”的示范工程项目，在西安建成“分布式发电/储能及微电网控制技术研究”的示范工程项目。

2010 年，南方电网公司在佛山建成国家“863”计划“分布式供能课题冷电联供系统示范工程”。

1.2 国外微电网现状及分析

负荷的持续增长、环保问题、能源利用效率瓶颈以及用户对电能质量的高标准要求，已成为世界各国电力工业所面临的严峻挑战。微电网对分布式发电具备有效利用、灵活、智能的控制特点，在解决上述问题方面具有极大优势。目前一些国家已纷纷开展微电网研究，立足于本国电力系统的实际问题，提出了各自的微电网概念和发展目标。作为一个新的技术领域，微电网在各国的发展呈现不同特色。

一、美国

美国最早提出了微电网的概念，是众多提出微电网概念国家和地区中最权威的。美国电气可靠性技术解决方案协会（CERTS）提出的微电网构架，主要由基于电力电子技术且容量小于等于 500 kW 的小型微电源与负荷构成，并引入了基于电力电子技术的控制方法。电力电子技术是实现智能、灵活控制的重要支撑，基于此形成了“即插即用”（plug and play）与“对等”（peer to peer）的控制思想和设计理念。美国 CERTS 微电网的初步理论研究成果已在实验室微电网平台上得到了成功检验。美国的微电

网工程得到了美国能源部的高度重视。2003年，布什总统提出了“电网现代化”（grid modernization）的目标，指出要将信息技术、通信技术等广泛引入电力系统，实现电网的智能化。在随后出台的“Grid 2030”发展战略中，美国能源部制定了美国电力系统未来几十年的研究与发展规划，微电网是其重要组成之一。在2006年的美国微电网会议上，美国能源部对其今后的微电网发展计划进行了详细讨论。从美国电网现代化角度来看，提高重要负荷的供电可靠性、满足用户定制的多种电能质量需求、降低成本、实现智能化将是美国微电网的发展重点。

图1-1所示为美国 CERTS 微电网模型。该微电网的主要特点是所有微电源均具有电力电子接口，包括太阳能发电、风力发电、小型旋转机械发电、各种储能设备等。其关键设备是智能静态开关设备，用于控制电网和微电网连接和断开。对于每一微电源均使用数字式智能继电保护隔离故障保护区域，各个保护设备之间有专用的数字通信线路连接。

二、日本

日本立足于国内能源日益紧缺、负荷日益增长的现实背景，开展了微电网研究，但其发展目标主要定位于能源供给多样化、减少污染、满足用户的个性化电力需求。日本把以传统电源供电的独立电力系统也归入微电网研究范畴，大大扩展了美国 CERTS 对微电网的定义范围。基于该框架，日本已在国内建立了多个微电网工程。此外，日本学者还提出了灵活可靠和智能能量供给系统（Flexible Reliability and Intelligent Electrical Energy Delivery System, FRIENDS），其主要思想是在配电网中加入一些灵活交流输电系统（Flexible AC Transmission Systems, FACTS）装置，利用 FACTS 控制器快速、灵活的控制性能，实现对配电网能源结构的优化，并满足用户的多种电能质量需求。目前，日本已将该系统作为其微电网的重要实现形式之一，有关研究还将该思想与热电联供设计理念相结合，以期更好地实现环境友好和能源高效利用。多年来，新能源利用一直是日本的发展重点，日本还专门成立了新能源与工业技术发展组织（The New Energy and

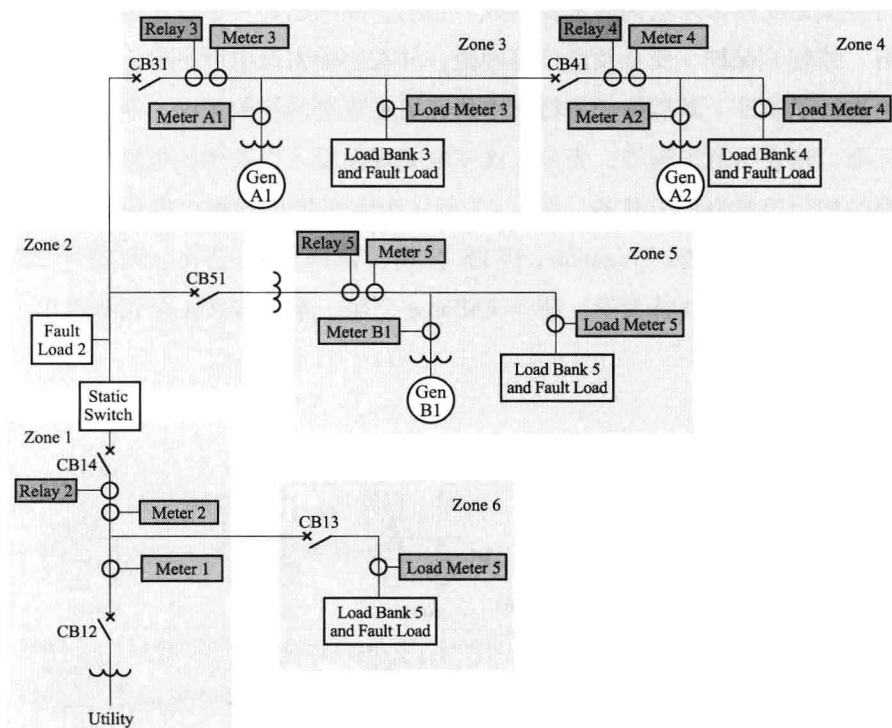


图 1-1 美国 CERTS 微电网模型

CB—断路器；Relay—继电器；Meter—表计；Fault Load—断裂负荷；
Load Meter—负荷表；Static Switch—静态开关

Industrial Technology Development Organization, NEDO) 统一协调国内高校、企业与国家重点实验室对新能源及其应用的研究。

三、欧盟

从电力市场需求、电能安全供给及环保等角度出发，欧洲于 2005 年提出“Smart Power Networks”计划，并在 2006 年出台该计划的技术实现方略。欧洲提出要充分利用分布式能源、智能技术、先进电力电子技术等实现集中供电与分布式发电的高效紧密结合，并积极鼓励社会各界广泛参与电力市场，共同推进电网发展。微电网以其智能性、能量利用多元化等