

微电网 运行控制与保护技术

WEIDIANWANG YUNXING KONGZHI YU BAOHU JISHU

张建华 黄伟 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

微电网运行 控制与保护技术

WEIDIANWANG YUNXING KONGZHI YU BAOHU JISHU

张建华 黄 伟 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书共分8章,主要包括微电网的基本概念、微电网的元件和结构、微电网模型与建模、微电网运行方式和控制方法、多Agent系统及其在微电网中的应用、微电网保护技术、微电网仿真实例分析、微电网未来发展方向等。

本书主要供电气工程技术人员研究、参考之用,也可作为高等院校电气工程及其自动化专业研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微电网运行、控制与保护技术/张建华,黄伟著. --北京:中国电力出版社,2010.7

ISBN 978-7-5083-9977-5

I. ①微… II. ①张… ②黄… III. ①智能控制--电力系统研究 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第002007号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年7月第一版 2010年7月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 7.375印张 195千字
印数0001—3000册 定价 32.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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



21 世纪将是人类大规模开发利用新能源的关键期。微电网能够充分发挥新能源的特点,是未来人类能源与环境的钥匙,我们可以预见,围绕新能源的利用,微电网的建设在 21 世纪会出现高速发展期。本书将以微电网为核心技术,围绕目前国际社会综合利用新能源的研究热点,对微电网的运行、控制与保护技术进行仿真研究。

鉴于我国在电力系统微电网研究方面的基础还比较薄弱,作者通过广泛地阅读国内外的文献资料,在主持国家高技术研究发展计划(863 计划)(2008AA05Z216)微电网的并网、控制和保护技术,Project supported by National Hi-Tech Research Development Program 和参与国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA05Z249)北方地区的 MW 级分布式热电冷三联供能系统集成技术与示范工程,Project supported by National Hi-Tech Research Development Program(2007AA05Z249)子项目的基础上完成本书的编写,并得到两项基金的资助。

本书阐述了微电网的发展历程以及建立微电网的必要性和可行性,从微电网的基本概念、结构和原理上构成体系结构,仿真试验结果等方面加以论述,力求概念清楚、层次分明,内容全面,紧密联系国内外的动态。本书在微电网的孤网运行和并网运行模式上,探讨了微电网的运行、控制与保护技术,主要研究内容涉及三个方面:①微电网并网技术的研究,内容包括微电网运行对接入配电网的影响研究;②微电网机组并网技术与方式、微电网协调、运行与控制技术的研究,内容包括计及分布式电源配电网随机潮流的稳态分析研究、微电网并网运行的暂态仿

真模型研究和微电网协调控制可行性研究；③微电网运行保护技术的研究。

本书由张建华教授、黄伟教授著。参与各章节编写和整理工作的还有杨琦博士、苏岭博士，王鑫硕士、郭佳欢硕士和谢清华硕士；此外，杨仁花、吴子平、赵炜炜、张国华、牛铭和苗维时等研究生参加了项目研究工作，在此一并向他们表示衷心的感谢！

华北电力大学微电网团队在这方面创建了微电网的仿真模型和控制策略，总结和借鉴国内外的科研成果，为微电网的应用提供理论基础。但由于微电网技术还不够成熟，还有很多问题需要解决，本书旨在抛砖引玉，书中错误在所难免，敬请读者和相关技术人员不吝赐教。

作 者

2009.10 于北京

前 言

第 1 章 引言	1
1.1 微电网的提出.....	1
1.2 微电网定义.....	5
1.3 微电网的重要意义.....	8
1.4 微电网国内外的的发展状况	13
1.5 微电网中的关键技术及相关研究	26
参考文献.....	31
第 2 章 微电网的元件和结构	33
2.1 微电网的总体结构	33
2.2 微电网的元件	35
2.3 微型电源及其特性	36
2.4 微电网接线形式	38
2.5 微电网的负荷	38
2.6 微电网的通信技术	39
参考文献.....	40
第 3 章 微电网模型与建模	41
3.1 微型电源的原理与建模	41
3.2 微电网并网技术	79
3.3 变换器特性及工作原理	80
3.4 微电网负荷模型和特性.....	106
参考文献	107
第 4 章 微电网运行方式和控制方法	110
4.1 微电网的运行方式.....	111

4.2	微电网控制方法·····	113
4.3	微型电源及储能的控制方法·····	116
4.4	微电网稳定性控制·····	122
4.5	微电网电能质量优化控制·····	124
4.6	微电网经济运行优化控制·····	126
	参考文献·····	130
第5章	多 Agent 系统及其在微电网中的应用·····	132
5.1	Agent 和 MAS 的基本知识·····	132
5.2	多 Agent 系统在微电网中的应用·····	136
	参考文献·····	153
第6章	微电网保护技术·····	156
6.1	微电网保护概述·····	156
6.2	短路故障分析·····	166
	参考文献·····	175
第7章	微电网仿真实例分析·····	178
7.1	微电网建模仿真与分析·····	178
7.2	微电网经济运行优化计算与分析·····	184
7.3	微电网运行与控制的仿真分析·····	192
7.4	多代理技术的仿真与分析·····	205
7.5	微电网保护仿真与分析·····	214
第8章	微电网未来发展方向·····	220
8.1	微电网的发展·····	220
8.2	微电网智能化·····	224
	参考文献·····	229

引言

1.1 微电网的提出

随着电力需求的不断增长，大电网（或称公用电网）在过去数十年里体现出来的优势使其得以快速地发展，成为主要的电力供应渠道。然而，集中式大电网也存在一些弊端：成本高，运行难度大，难以满足用户越来越高的安全性和可靠性要求。尤其是近几年来，世界范围内接连几次发生大面积停电事故以后，大电网的脆弱性充分地暴露出来，特别是在发生自然灾害、电网事故的紧急情况下，军工、医院、金融等系统突然断电造成的不仅仅是经济损失，还会危及社会的安全和稳定。因此，人们开始对电力系统的发展模式另辟蹊径。2003年北美大停电以后，国际上的专家们得出了一个结论——发展分布式电源比通过改造电网来加强安全更加简便、快捷。我国2008年1月南方雪灾的教训也说明在继续发展集中式大机组的同时，要注重在负荷中心建设足够的分布式电源，以在出现非常规灾害或者战时攻击情况下，保证居民最小能源供应和最基本生活条件，并将这种电源作为保障电网安全的重要设施和手段，其成本应纳入整个电网运营成本当中。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。近 20 年来，大部分国家已经把分布式发电提上了日程，人们开始对分布式发电系统的潜在效益展开认真研究。无疑，分布式发电是电力系统的发展趋势之一。

随着分布式发电渗透率的增加，其本身存在的问题也显现出来，分布式电源单机接入成本高、控制困难。一方面，分布式电源相对大电网来说是一个不可控源，因此大系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源，以期减小其对大电网的冲击。2001 年美国颁布了 IEEE _ P1547/D08 “关于分布式电源与电力系统互联的标准草案”，并通过了有关法令让部分分布式发电系统上网运行，其中对分布式能源的并网标准作了规定：当电力系统发生故障时，分布式电源必须马上退出运行，这就大大限制了分布式能源效能的充分发挥。另一方面，目前配电系统所具有的无源辐射状运行结构以及能量流动的单向、单路径特征，使得分布式发电必须以负荷形式并入和运行，即发电量必须小于安装地用户负荷，导致分布式发电能力在结构上就受到极大限制。

随着新型技术的应用，尤其是电力电子接口和现代控制理论的发展，微电网概念出现了。微电网将额定功率为几十千瓦的发电单元——微源（MS）、负荷、储能装置及控制装置等结合，形成一个单一可控的单元，同时向用户供给电能和热能。基于微电网结构的电网调整能够方便大规模的分布式能源（DER）互联并接入中低压配电系统，提供了一种充分利用 DER 发电单元的机制。

与传统的集中式能源系统相比，微电网接近负荷，不需要建设大电网进行远距离高压或超高压输电，可以减少线损，节省输配电建设投资和运行费用；由于兼具发电、供热、制冷等多种服务功能，分布式能源可以有效地实现能源的梯级利用，达到更高的能源综合利用效率。如分布式电源能在暂态情况下自主运行，

即在外部配电网上游部分出现扰动情况下，可以提高系统可靠性，同时可提高电网的安全性。另外其黑启动功能可以使停电时间最短并能帮助外部电网重新恢复正常运行。微电网能以非集中程度更高的方式协调分布式电源，因而可以减轻电网控制的负担并能够完全发挥分布式电源的优势。与大电网单独供电方式相比，微电网与大电网结合具有明显的优势。

(1) 微电网的并网标准只针对微电网和大电网的公共连接点(Point of Common Coupling)，而不针对具体的微源，解决了配电网中分布式电源的大规模接入问题，微电网可以灵活地处理分布式电源的连接和断开，体现了“即插即用”的特征，为充分发挥分布式电源的优势，提供了一个有效的途径。

(2) 可以使得各种分布式发电设备的能力得到充分的利用，减小主干电网在负荷峰值期的负担。

(3) 可以增强供电可靠性并提高系统稳定性。特别是近几年各种极端气候出现几率变大，我国由天气引发的事故频繁发生，如2008年1月南方地区发生的大范围长时间暴雪天气，致使电网严重受损，长时间、大面积的停电给国家带来了巨大的经济损失，给人民生活也造成了极大的不便。对某些特殊负荷，微电网与大电网结合可以保障非常时期的供电，提高外部大电网的安全性。

(4) 可以提高整个电网的运行效率，同时也能减小对环境的污染。

(5) 通过微电网可以实现更佳无功功率控制，减小谐波污染，提高电能质量，为用户提供“定制电力技术”服务。

(6) 投资方面，通过缩短发电厂与负载间的距离提高系统的无功供应能力，从而改善电压分布特征(profile)，消除配电和输电瓶颈，降低在上层高压网络中的损耗，减少或至少延迟对新的输电项目和大规模电厂系统的投资。

(7) 市场方面,广泛采用微电网可降低电价,优化分布式发电可把经济实惠最大限度地带给用户。例如峰电价格高、谷电价格低。峰电期,微电网可输送电能,以缓解电力紧张;在电网电力过剩时可直接从电网低价采购电能。

总之,微电网具有双重角色,对于电力企业,微电网可视为一个简单的可调度负荷,可以在数秒内作出响应以满足传输系统的需要;对于用户,微电网可以作为一个可定制的来源,以满足用户多样化的需求,例如增加局部供电可靠性,降低馈线损耗,通过微电网储能元件对当地电压和频率提供支撑,或作为不可中断电源,提高电压下陷的校正。紧紧围绕全系统的能量需求的设计理念 and 向用户提供多样化电能质量的供电理念是微电网的两个重要特征。有人预测未来的配电系统将是传统的配电系统和大量分布在配电系统供电区域内的微电网混合而成,形成互联网一样的模式。

微电网可以看成未来电力系统的一种结构,可作为输电网、配电网之后的第三级电网;相比目前的大电网,这种结构具有显著的经济和环境效益。通过建立微电网可以使得分布式发电应用于电力系统并发挥其最大的潜能。

微电网及分布式电源(Distributed Generation, DG)虽然主要与配电网联系,但对整个电力系统的影响却将是巨大而深远的。

(1) 对发电、输电系统的影响在于,对新建集中式发电厂和远距离输电线的的需求将减少。

(2) 对配电系统的影响在于,配电系统将发生根本性的变化,即配电系统将从一个辐射式的网络变为一个遍布电源和用户互联的网络,配电系统的控制和管理将变得更加复杂,配电变电站将成为“有源变电站”。

(3) 对整个电力行业的影响在于,微电网及DG的普及将对

电力市场的走向和最后格局产生深远的影响。

DG 和微电网的出现将产生一些新的研究方向,如微电网并网标准,微电网的运行控制、保护方法,微电网接入后对电网的影响,以及运用多代理技术来对多微电网技术的控制和优化决策等。本书编写的目的在于通过仿真验证这些方法的可行性,并为指导工程实践奠定基础。

1.2 微电网定义

由于世界各国发展微电网的侧重点有所不同,所以对微电网的定义也有所差别^[1-3]。

1.2.1 美国的定义

微电网作为未来美国电力系统发展的重要组成部分,得到了美国能源部(Department of Energy, DOE)的高度重视。目前主要由美国电力可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)、威斯康辛大学、通用电气公司等组织共同参与研究。

美国能源部给出的定义为:微电网由分布式电源和电力负荷构成,可以工作在并网与独立两种模式下,具有高度的可靠性和稳定性。此定义描述了微电网的典型特征,不失一般性。

美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)给出的定义为:微电网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统,它可同时提供电能和热量;微电网内部的电源主要由电力电子器件负责能量的转换,并提供必需的控制;微电网相对于外部大电网表现为单一的受控单元,并同时满足用户对电能质量和供电安全等要求。

美国威斯康辛大学的 R. H. Lasseter 教授给出的概念是:微电网是一个由负荷和微型电源组成的独立可控系统,就地提供电

能和热能。

1.2.2 日本的定义

日本的微电网研究在世界范围内处于领先地位。由于国内能源日益紧缺、负荷日益增长的原因，日本着重于新能源的开发利用。为此日本专门成立了新能源产业技术综合开发机构（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）以统一协调国内高校、企业与国家重点实验室对新能源及其应用的研究。其定义为：微电网是指在一定区域内利用可控的分布式电源，根据用户需求提供电能的小型系统。

东京大学给出的定义为：微电网是一种由分布式电源组成的独立系统，一般通过联络线与大系统相连，由于供电与需求的不平衡关系，微电网可以选择与主网之间互供或者独立运行。

三菱公司给出的定义为：微电网是一种包含电源和热能设备以及负荷的小型可控系统，对外表现为一整体单元并可以接入主网运行；并且将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 CERTS 对微电网的定义范围。

1.2.3 欧洲的定义

欧盟科技框架计划（Framework Programme, FP）给出的定义为：利用一次能源；使用微型电源，并可冷、热、电三联供；配有储能装置；使用电力电子装置进行能量调节；可在并网和独立两种方式下运行。

英国从可靠性出发，将微电网看成是系统中的一部分，它具有灵活的可调度性且可适时向大电网提供有力支撑等优点，其定义为：微电网是面向小型负荷提供电能的小规模系统，它与传统电力系统的区别在于其电力的主要提供者是可控的微型电源，而这些微型电源除了满足负荷需求和维持功率平衡外，也有可能成为负载。因此许多学者形象地将微电网称为“模范市民（model citizen）”。

1.2.4 加拿大及其他国家的定义

加拿大多伦多大学同样在微电网方面开展了诸多研究，其给出的定义为：微电网是一个含有分布式电源并可接入负荷的完整的电力系统。它可以运行在并网、独立两种模式下。微电网的主要优点在于它加强了供电可靠性和安全性等。将分布式电源统一控制，向负荷提供可靠用电，且在并网与独立运行的切换过程中保证微电网稳定。

新加坡南洋理工大学对微电网的研究在其国内颇具代表性，其给出的定义为：微电网是低压分布式电网的重要组成部分，它包含分布式电源（如燃料电池、风电及光伏发电等）、电力电子设备、储能设备和负荷等，可以运行在并网或独立两种模式下。

韩国的众多高校和科研机构对微电网也展开了多方面的研究，典型的是韩国明知大学成立的智能电网研究中心，其给出的定义为：微电网是由分布式电源、负荷、储能设备、热恢复设备等构成的系统，它主要有以下优点：①可并网运行；②可充分利用电能和热能；③可独立运行。

根据国外微电网定义的特点，结合我国电力系统发展现状及趋势，我国的微电网可定义为：微电网是通过本地分布式微型电源或中、小型传统发电方式的优化配置，向附近负荷提供电能和热能的特殊电网，是一种基于传统电源的较大规模的独立系统；在微电网内部通过电源和负荷的可控性，在充分满足用户对电能质量和供电安全要求的基础上，实现微电网的并网运行或独立自主运行；微电网对外表现为一个整体单元，并且可以平滑并入主网运行。

综上所述，每个国家都是根据本地区的实际需要和科研水平确定微电网的定义的。如美国和欧洲，各项产业发达，但能源紧缺，电力系统结构复杂并且老化，其稳定性及可靠性必然下降。

因此，引入微电网实际上可以理解为是对大型系统的拆分，或者是利用电力电子技术对微型电源加以控制，以实现就地供电、供热。而日本所面临的能源问题更加严重，面对日益增长的用电需求，将目标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。在日本，微电网作为大电网的一部分，其受控程度得到明显加强；而新能源的充分利用使很多偏远地区的供电需求得到满足。

根据以上国家对微电网的定义，可以总结出微电网具有以下特点。

(1) 独特性：微电网是由微型电源及负荷构成的小型电力系统，与大系统的主要区别在于其灵活的可调度性。

(2) 多样性：微型电源的组成多种多样，既有传统电源，又有可再生能源。同时，微电网中也包含储能设备，作为系统稳定运行的必要条件；而负荷的类型也有很多，如敏感型、非敏感型、可控型、非可控型等。

(3) 可控性：根据运行工况的不同，微电网可以选择不同的运行方式，完善的控制策略使得微电网的可靠性得到提高，安全性得到保障。

(4) 交互性：作为具备独立发电设备的微电网可以在必要时对主网提供有力支撑；同时主网也可以向微电网提供电能。

(5) 独立性：微电网在一定条件下可以独立运行，在一定基础上保障了本地的用电需求。

1.3 微电网的重要意义

我国具有特殊国情，不能完全照搬国外微电网的发展模式，但是我国进行微电网研究是十分必要的，也是非常迫切的。

(1) 微电网可以提高电力系统的安全性和可靠性，有利于电

力系统抗灾能力建设。

2008年我国南方地区大范围低温雨雪冰冻和汶川特大地震灾害中,电力设施遭受大面积损毁,给社会经济发展和人民群众生活造成严重影响。2008年6月,国务院批准了国家发展改革委、电监会制订的《关于加强电力系统抗灾能力建设的若干意见》(以下简称《若干意见》),要求各地和有关部门分析总结各种自然灾害对电力系统的影响,兼顾安全性和经济性,修订和完善适合中国国情的电力建设标准和规范。《若干意见》中规定,鼓励以清洁高效为前提,因地制宜、有序开发建设小型水力、风力、太阳能、生物质能等电站,适当加强分布式电站规划建设,提高就地供电能力。《若干意见》要求医院、矿山、广播电视、通信、交通枢纽、供水供气供热、金融机构等重要用户,应自备应急保安电源,妥善管理和保养相关设备,储备必要燃料,保障应急需要。

目前,我国电力工业发展已进入大电网、高电压、长距离、大容量阶段,六大区域电网已实现互联,网架结构日益复杂。实现区域间的交流互联,理论上可以发挥区域间事故支援和备用作用,实现电力资源的优化配置。但是,大范围交流同步电网存在大区间的低频振荡和不稳定性,其动态稳定事故难以控制,造成大面积停电的可能性大。另一方面,厂网分开后,市场利益主体多元化,厂网矛盾增多,厂网协调难度加大,特别是对电网设备的安全管理不到位,对电力系统安全稳定运行构成了威胁。与常规的集中供电电站相比,微电网可以和现有电力系统结合形成一个高效灵活的新系统,具有以下优势:无需建设配电站,可避免或延缓增加输配电成本,没有或很低的输配电损耗,可降低终端用户的费用;小型化,对建设场所要求不高,不占用输电走廊,施工周期短,高效性灵活,能够迅速应付短期激增的电力需求,供电可靠性高,同时还可以降低对环境的污染等。

2008年我国南方地区大范围低温雨雪冰冻和汶川特大地震灾害之所以对电力工业造成如此重大的损失，其中一个原因就是有的负荷中心没有电源点，使得电网在灾害面前大面积停电。而微电网可以提高负荷中心的就地供电能力，从受灾地内部提供电能供应，从而在一定程度上降低停电损失，而且在一定条件下还可以为大电网的黑启动提供电源。因此有必要在国家大电网格局下，积极发展微电网。

(2) 微电网可以促进可再生能源分布式发电的并网，有利于可再生能源在我国的发展。

2006年1月1日正式生效的《中华人民共和国可再生能源法》，其中特别将可再生能源综合利用的研究列为研究开发的重点领域。而且，可再生能源利用、节能和环保列入了国家中长期科技发展规划和“十一五”发展规划中，是当前国家重点支持的科技攻关和发展领域。然而处于电力系统管理边缘的大量分布式电源并网有可能造成电力系统不可控制、不安全和不稳定，从而影响电网运行和电力市场交易，所以分布式发电面临着许多技术障碍和质疑。微电网可以充分发挥分布式发电的优势、消除分布式发电对电网的冲击和负面影响，是一种新的分布式能源组织方式和结构。微电网通过建立一种全新的概念，使用系统的方法解决分布式发电并网带来的问题。通过将地域相近的一组微能源、储能装置与负荷结合起来进行协调控制，微电网对配电网表现为“电网友好型”的单个可控集合，可以与大电网进行能量交换，在大电网发生故障时可以独立运行。

(3) 微电网可以提高供电可靠性和电能质量，有利于提高电网企业的服务水平。

供电可靠性是电力可靠性管理的一项重要内容，直接体现了供电系统对用户的供电能力，是供电系统在规划、设计、基建、施工、设备选型、生产运行、供电服务等方面的质量和管理水平