



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
智能电网研究与应用丛书

# 微电网分析与仿真实论

Analysis and Simulation Theory of Microgrids

王成山 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
智能电网研究与应用丛书

# 微电网分析与仿真实论

Analysis and Simulation Theory of Microgrids

王成山 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

微电网的提出旨在实现分布式发电技术的灵活、高效应用,解决数量庞大、形式多样的分布式电源在并网运行时出现的一些问题,随着近年来智能电网的建设,其研究和发展日益受到广泛关注。由于微电网构成及运行方式复杂,针对传统电力系统发展的一些分析与仿真方法不再完全适用,需要发展更有针对性的理论和方法。本书旨在对微电网分析与仿真相关领域的研究工作进行系统性的总结,以期推动微电网的科学化发展。本书第1章概述微电网的概念及结构特征;第2章介绍各种分布式电源的建模方法;第3章给出微电网的一些典型控制策略;第4章介绍微电网的稳态分析方法;第5章和第6章分别总结微电网的电磁暂态和稳定性仿真实论;第7章介绍微电网小扰动稳定性分析方法。

本书适合从事微电网系统研究、设备研发、工程建设和运行管理等相关领域的科技工作者阅读,也可供高等院校电力系统及其自动化专业的教师、研究生和高年级本科学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

微电网分析与仿真理论=Analysis and Simulation Theory of Microgrids/  
王成山著. —北京:科学出版社,2013.11

(“十二五”国家重点图书出版规划项目:智能电网研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-039161-2

I. ①微… II. ①王… III. ①电网-电力工程-研究 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271325号

---

责任编辑:范运年 / 责任校对:张小霞  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2013年11月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:467 000

定价:96.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编:周孝信

编委:(按姓名拼音排序)

白晓民(中国电力科学研究院)

蔡旭(上海交通大学)

曹一家(湖南大学)

陈希(中国电力科学研究院)

程浩忠(上海交通大学)

程时杰(华中科技大学)

丁立健(国家自然科学基金委员会)

董新洲(清华大学)

董旭柱(南方电网科学研究院有  
限责任公司)

段献忠(华中科技大学)

郭剑波(中国电力科学研究院)

韩英铎(清华大学)

何湘宁(浙江大学)

胡学浩(中国电力科学研究院)

鞠平(河海大学)

李立涅(华南理工大学)

廖瑞金(重庆大学)

刘建明(国家电网公司)

卢强(清华大学)

梅生伟(清华大学)

穆刚(东北电力大学)

饶宏(南方电网科学研究院有限责  
任公司)

荣命哲(西安交通大学)

宋永华(浙江大学)

孙元章(武汉大学)

王成山(天津大学)

王锡凡(西安交通大学)

王益民(国家电网公司)

肖立业(中国科学院电工研究所)

薛禹胜(国家电网公司)

杨奇逊(华北电力大学)

杨勇平(华北电力大学)

余贻鑫(天津大学)

张保会(西安交通大学)

张伯明(清华大学)

赵争鸣(清华大学)

# 《智能电网研究与应用丛书》序

迄今为止,世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段;第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段;第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅度降低互联大电网的安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时,在新能源革命的条件下,电网的重要性日益突出,电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络,与传统电网相比,未来电网应具备如下四个明显特征:一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力;二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合,大幅度提高终端能源利用的效率;三是具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险,包括自然灾害的冲击;四是与通信信息系统广泛结合,实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

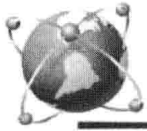
发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前,国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作,并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面,我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展,宣传智能电网领域的政策和规范,推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术,在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目,本丛书同时入选“十二五”国家重点出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术,以国家重大科研成就为基础,以奋斗在科研一线的专家、学者为依托,以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介,全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果,突出国内科研的自主创新性,扩大我国电力科学的国内外影响力,并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信,有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委的共同努力,本丛书将为发展智能电网,推广相关技术,增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助,感谢广大读者对丛书的厚爱;希望通过大家的共同努力,早日建成我国第三代电网,尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能!

周孝信



# 前 言

---

微电网是指由分布式电源、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。由于分布式电源数量多而分散,并且电源具有不同归属,无法保证调度指令能够被快速、准确、有效地执行,因此在配电系统中直接调度和管理大量的分布式电源会存在很大的困难,而微电网正是解决这一问题的关键。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。

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,包括各种蓄电池生产厂家在内的大批分布式能源设备制造企业希望微电网的建设能够为制造业带来新的商机,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。

面对微电网建设和发展的重大需求,本书从微电网建模、控制、稳态分析、电磁暂态仿真、稳定性仿真以及小扰动稳定性分析等方面系统地介绍了相关的理论和方法,帮助读者了解微电网的相关技术发展现状,认识微电网发展中面临的关键理论和技术问题,并期待能为发展先进的微电网运行与管理技术等奠定科学的理论和技术基础,进而促进微电网技术的发展和應用,以及为可再生能源的高效利用和智能电网的科学发展做出贡献。

本书所介绍的内容是作者所在研究组在微电网研究领域多年来科研工作成果的总结。研究组于2006年承担了教育部科学技术研究重大项目“分布式能源发电系统



并网运行关键技术”(编号:306004),开始了针对微电网技术的系统性研究工作;2009年本书作者作为首席科学家承担了国家重点基础研究发展计划(973)项目“分布式发电供能系统相关基础研究”(编号:2009CB219700),使得相关研究工作更加深入,系统化程度也获得了较大提高。研究组还获得了国家自然科学基金委员会杰出青年基金项目“分布式发电系统运行仿真与优化控制”(编号:50625722)以及一批国家高技术研究发展计划(863)项目的支持,主持或参与完成了数十项微电网示范工程的建设。在此期间,研究组获得了来自实际生产部门许多专家的大力帮助,从实际工作出发,这些专家提出了许多需要解决的难点问题,正是与他们的合作促成了本书中许多理论成果的取得以及成果的实用化。在此,对曾经给予本研究组大力帮助的专家表示衷心的感谢。

在微电网研究领域,作者所在的研究组已经培养了数十名博士和硕士研究生,其中一些人毕业后留在了研究组继续开展相关工作,另一些人则离开学校走向了实际工作岗位,正是他们的创新性工作,深化了微电网的基础理论,促进了相关技术的实际应用,本书的一些内容直接引自这些研究生的学位论文,在这里对为本书做出贡献的肖朝霞、马力、王丹、李鹏、黄碧斌、高毅、范孟华、杨占刚、彭克、高菲、于波、刘梦璇、洪博文、李琰、李霞林、丁承第、杨献莘、武震、于浩、陈健、孙充勃、富晓鹏、原凯、周越、焦冰琦、孙晓倩、宋关羽等同学表示衷心的感谢。对在本书写作过程中给予大力支持的研究组教师葛少云、贾宏杰、王守相、郭力、李鹏、曾沅、肖峻、魏炜、刘洪、孔祥玉、车延博、王继东、赵金利、罗凤章、徐弢、王议峰、杨挺、穆云飞等表示感谢。同时,特别感谢余贻鑫院士对本书相关研究工作的指导和支持。

本书共分7章,第1、2、3、4、6章由王成山教授执笔,第5章由李鹏博士执笔,第7章由李琰博士执笔,全书由王成山教授统稿。

本书的很多内容都在微电网实际示范工程中获得了应用或经历了实验验证,理论研究与生产实际相结合,始终是本书作者及所在研究组在研究工作中遵循的原则。作者希望本书能够达到抛砖引玉的效果,对广大微电网领域的工作者来说有一定的参考价值,能够为推动我国微电网的技术进步有所贡献。本书写作过程历时三年多,尽管作者把写好这本书视作一种责任,但也有很大的压力。在写作过程中虽然作者对体系的安排、素材的选取、文字的叙述试图精心构思和安排,但由于微电网相关的理论和技术很多尚处于探索和研究阶段,有些还很不成熟,而微电网涉及的技术领域又比较多,限于作者水平,文字中可能会有疏漏或不足,内容中可能还存在不妥之处,真诚地期待专家和读者批评指正。

作者

2013年6月于天津大学



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 微电网结构特征 .....	3
1.2.1 直流与交流微电网 .....	3
1.2.2 简单与复杂结构微电网 .....	5
1.2.3 微电网电压等级及规模 .....	6
1.3 微电网相关技术问题 .....	8
1.4 微电网与智能配电系统 .....	10
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 分布式发电系统模型</b> .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 光伏发电系统 .....	14
2.2.1 数学模型 .....	14
2.2.2 输出特性与最大功率点跟踪算法 .....	16
2.2.3 光伏并网发电系统 .....	20
2.3 燃料电池发电系统 .....	27
2.3.1 短期动态模型 .....	27
2.3.2 中期动态模型 .....	32
2.3.3 长期动态模型 .....	35
2.3.4 燃料电池并网系统 .....	37
2.3.5 模型适应性分析 .....	38
2.4 风力发电系统 .....	44
2.4.1 风力发电系统典型形式 .....	45
2.4.2 恒频/恒速风力发电系统模型 .....	48
2.4.3 双馈风力发电系统模型 .....	53
2.4.4 直驱风力发电系统模型 .....	62
2.5 微型燃气轮机发电系统 .....	66
2.5.1 单轴结构微型燃气轮机发电系统 .....	67





2.5.2	分轴结构微型燃气轮机发电系统 .....	75
2.6	飞轮储能系统 .....	77
2.6.1	飞轮储能系统结构 .....	77
2.6.2	飞轮储能系统储能量及工作模式 .....	78
2.6.3	飞轮储能控制系统 .....	82
2.7	超级电容器储能系统 .....	92
2.7.1	超级电容器工作原理 .....	92
2.7.2	超级电容器等效电路 .....	92
2.7.3	超级电容器控制系统 .....	95
2.8	蓄电池储能系统 .....	100
2.8.1	蓄电池基本概念 .....	101
2.8.2	蓄电池等效电路模型 .....	104
2.8.3	蓄电池储能控制系统 .....	109
	参考文献 .....	114
<b>第3章</b>	<b>微电网运行控制 .....</b>	<b>119</b>
3.1	微电网控制模式 .....	119
3.1.1	主从控制模式 .....	119
3.1.2	对等控制模式 .....	120
3.1.3	分层控制模式 .....	122
3.2	分布式电源并网逆变器控制 .....	123
3.2.1	并网逆变器及其拓扑结构 .....	124
3.2.2	并网逆变器主电路 .....	126
3.2.3	逆变器控制方法 .....	130
3.3	基于对等控制的微电网控制器设计举例 .....	141
3.3.1	PQ 控制器设计 .....	142
3.3.2	Droop 控制器设计 .....	142
3.3.3	算例系统 .....	145
3.4	基于主从控制的微电网运行模式平滑切换 .....	150
3.4.1	主从控制微电网系统结构 .....	150
3.4.2	微电网运行模式平滑切换控制策略 .....	150
3.4.3	算例分析 .....	156
	参考文献 .....	161
<b>第4章</b>	<b>微电网稳态分析 .....</b>	<b>165</b>
4.1	常规元件稳态模型 .....	165
4.1.1	变压器模型 .....	165
4.1.2	线路模型 .....	167



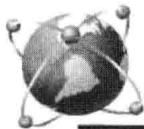
4.1.3 负荷模型 .....	168
4.2 配电网潮流算法 .....	169
4.2.1 $Z_{bus}$ 高斯算法 .....	169
4.2.2 牛顿法 .....	170
4.2.3 近似牛顿法 .....	172
4.2.4 前推回推法 .....	173
4.3 电力电子变换器稳态模型 .....	174
4.3.1 PWM 换流器稳态方程 .....	175
4.3.2 PWM 换流器节点类型 .....	177
4.3.3 DC/DC 变换器态模型 .....	178
4.4 微电网交直流混合潮流算法 .....	179
4.4.1 微电网节点电压方程 .....	179
4.4.2 微电网节点及支路编号 .....	181
4.4.3 分布式电源节点处理方法 .....	182
4.4.4 算法流程 .....	187
4.4.5 算例分析 .....	189
4.5 微电网短路电流计算 .....	192
4.5.1 分布式电源处理方法 .....	193
4.5.2 故障模拟 .....	197
4.5.3 短路冲击电流和短路容量值 .....	197
4.5.4 算例分析 .....	198
参考文献 .....	201
<b>第 5 章 微电网电磁暂态仿真 .....</b>	<b>203</b>
5.1 引言 .....	203
5.2 电磁暂态仿真基本方法 .....	204
5.2.1 方法概要 .....	204
5.2.2 仿真算法分析比较 .....	206
5.2.3 电磁暂态仿真的初始化 .....	211
5.3 电磁暂态仿真中的模型描述 .....	211
5.3.1 建模方法 .....	211
5.3.2 电气系统内置模型实现 .....	212
5.3.3 控制系统组合模型实现 .....	216
5.4 交流电机模型 .....	220
5.4.1 $dq0$ 坐标系下交流电机模型 .....	221
5.4.2 三相自然坐标系下交流电机模型 .....	228
5.5 微电网电磁暂态仿真方法 .....	233



5.5.1	基于增广改进节点方程的电气系统建模 .....	233
5.5.2	适于电力电子电路仿真的插值算法 .....	235
5.5.3	基于牛顿法的控制系统建模与改进 .....	239
5.5.4	基于自动微分的电磁暂态仿真建模方法 .....	241
5.5.5	电磁暂态仿真并行计算方法 .....	248
5.6	算例实现与仿真验证 .....	251
5.6.1	燃料电池发电算例系统 .....	251
5.6.2	微型燃气轮机发电算例系统 .....	252
5.6.3	光伏发电算例系统 .....	255
5.6.4	低压微电网算例 .....	259
5.7	电力电子装置典型模型适应性分析 .....	267
5.7.1	模型典型描述形式 .....	267
5.7.2	模型适应性分析 .....	271
	参考文献 .....	275
<b>第 6 章</b>	<b>微电网暂态稳定性仿真 .....</b>	<b>282</b>
6.1	引言 .....	282
6.2	并网元件与网络接口 .....	283
6.3	电力电子换流装置准稳态模型 .....	288
6.3.1	基本模型 .....	288
6.3.2	通用化模型设计 .....	290
6.4	暂态稳定性仿真基本算法 .....	296
6.4.1	显式交替求解算法 .....	297
6.4.2	隐式联立求解算法 .....	297
6.4.3	隐式交替求解算法 .....	298
6.5	基于数值微分求导的隐式求解算法 .....	299
6.5.1	数值微分算法及应用 .....	300
6.5.2	算法模型变结构适应性分析 .....	301
6.5.3	改进的隐式交替求解算法流程 .....	302
6.6	网式链表-双层算法结构及应用 .....	303
6.6.1	网式链表的基本原理 .....	304
6.6.2	双层算法描述 .....	309
6.7	显式-隐式混合积分算法 .....	314
6.8	仿真初值计算方法 .....	316
6.9	仿真算例分析 .....	322
	参考文献 .....	327



第 7 章 微电网小扰动稳定性分析 .....	330
7.1 微电网小扰动稳定性分析 .....	330
7.1.1 微电网状态矩阵形成 .....	330
7.1.2 微电网特征值和特征向量计算 .....	331
7.2 基于矩阵摄动理论的特征解分析 .....	331
7.3 微电网状态矩阵摄动分析 .....	335
7.3.1 状态矩阵参数摄动描述 .....	335
7.3.2 孤立特征值特征解灵敏度计算 .....	336
7.3.3 重特征值特征解灵敏度计算 .....	337
7.3.4 算例分析 .....	339
7.4 微电网并网逆变器 Droop 参数协调优化 .....	342
7.4.1 Droop 系数摄动矩阵分析 .....	343
7.4.2 协调优化目标函数及算法流程 .....	345
7.4.3 算例分析 .....	348
参考文献 .....	357
附录 A 变量坐标变换 .....	360
附录 B1 微电网算例系统 1 .....	365
参考文献 .....	366
附录 B2 微电网算例系统 2 .....	367
参考文献 .....	369
附录 C 算例参数 .....	370



# 第 1 章 绪 论

---

## 1.1 引 言

能源是人类赖以生存和发展的基础,电力作为最清洁便利的能源形式,是国民经济发展的命脉,而传统的煤炭、石油等一次能源是不可再生的,终归要走向枯竭。提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的利用,是解决各国经济和社会发展中日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间矛盾的必然选择。

当前,在能源需求与环境保护的双重压力下,国际上已将更多目光投向了既能提高传统能源利用效率又能充分利用各种可再生能源的分布式发电相关技术领域<sup>[1-3]</sup>。所谓分布式发电,是指利用各种分散存在的能源,包括可再生能源(太阳能、生物质能、小型风能、小型水能、波浪能等)和本地可方便获取的化石类燃料(天然气、煤制气、柴油等)进行发电供能的技术<sup>[4]</sup>。小型分布式电源(distributed generation, DG)的容量一般几百千瓦以内,大型分布式电源容量则可达到兆瓦级。采用分布式发电技术,有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生能源,向用户提供“绿色电力”,是实现“节能减排”的重要举措。灵活、经济与环保是分布式发电技术的主要特点。另一方面,一些可再生能源具有的间歇性和随机性,使得这些电源仅依靠自身的调节能力满足负荷的功率平衡比较困难,通常还需要其他电源(内部或外部)的配合。

作为集中式发电的有效补充,分布式发电技术正日趋走向成熟。随着电能生产价格的不断下降以及各国政府相关政策层面的有力支持,相关技术正得到越来越广泛的应用,而日益增多的各种分布式电源并网发电对电力系统的运行也提出了新的挑战<sup>[5,6]</sup>,大量分散的小容量分布式电源对于电力系统运行人员而言往往是“不可见”的,其中一些分布式电源通常又是“不可控”或“不易控”的。正像大容量风电场或大容量光伏电站的接入会对输电网的安全稳定运行带来诸多影响一样,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可靠运行,并保证用户的供电可靠性和电能质量,对运行人员而言也会有很大的困难,常规配电系统的结构及运行策略并不能很好地适应分布式电源大规模接入的要求。

微电网是指由分布式电源、能量转换装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的



小型发电系统,是一个能够实现自我控制和管理自治系统<sup>[7]</sup>。图 1.1 给出了一个微电网系统示意图<sup>[8]</sup>,其内部分布式电源包括微型燃气轮机、燃料电池以及风/光可再生能源发电系统,微电网内的负荷既包含有常规电力负荷,也包含家居或者商业建筑中的冷、热负荷。系统正常情况下工作在并网模式,通过联络点(point of common coupling,PCC)与外部电网连接,当 PCC 断开与主网联络时,系统能够运行在孤网模式下,持续对微电网内的重要负荷供电。系统中还包含若干较小规模的微电网,例如在商业大楼中通过光伏和储能设备发电供电的小型微电网,以及向居民负荷供电的由微型燃气轮机或者光伏加储能设备供电的小型微电网等。在必要的情况下,这些小型微电网也可以独立运行。

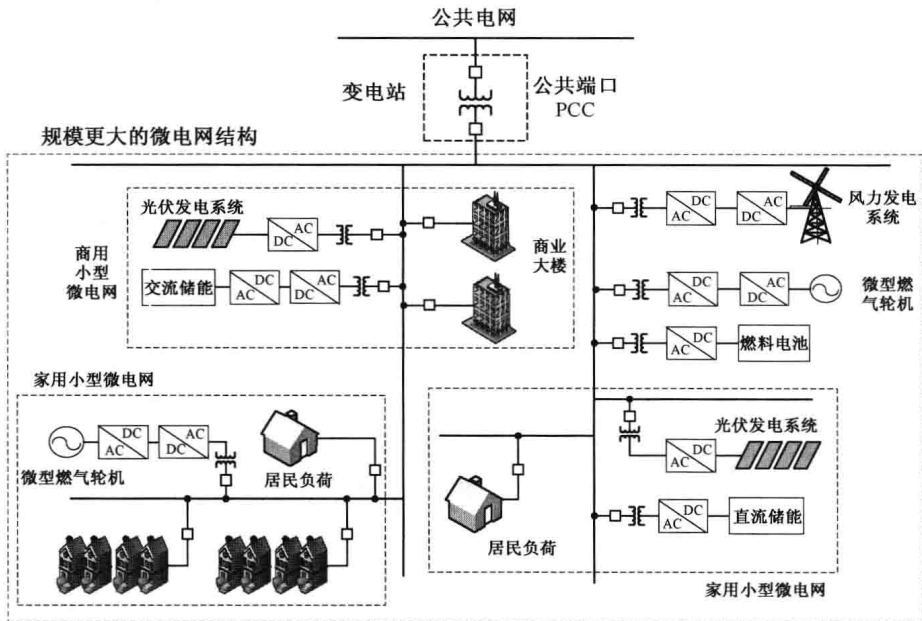


图 1.1 典型微电网系统示意图

微电网靠近用户侧,有时不仅可以向用户提供所需的电能,同时还可以向用户提供热能,满足用户供热和制冷的需要,这种情况下的微电网也被称为微网,此时的微电网实际上是一个综合能源系统。微电网一般具有能源利用效率高、供电可靠性高、污染物排放少、运行经济性好等优点。

一方面,微电网可以被看作小型的电力系统,由于其本身具备很好的能量管理功能,可以有效地维持能量在微电网内的优化分配与平衡,保证微电网的运行经济性;另一方面,微电网又可以被认为是配电系统中的一个“虚拟”的电源或负荷,通过网内分布式电源输出功率的协调控制,可以对电网发挥负荷移峰填谷的作用,也可实现微电网和外部配电网间功率交换量的定值或定范围控制,减少由于分布式可再生能源发电功率的波动对外部配电网及周边用户的影响,并有效降低系统运行人员的运行调度难度。



常规意义下的微电网一般指联网型微电网,这种微电网具有并网和独立两种运行模式。在并网工作模式下,微电网与中(低)压配电网并网运行,互为支撑,实现能量的双向交换。在外部电网故障情况下,微电网可转为独立运行模式,继续为网内重要负荷供电,提高重要负荷的供电可靠性。通过采取先进的控制策略和控制手段,可在保证微电网高电能质量供电的同时,实现微电网两种运行模式间的平滑切换。

作为常规微电网的一种特例,独立型微电网是微电网的一种特殊形式。这种微电网不和外部配电系统相连接,完全利用自身的分布式电源满足微电网内负荷的长期供电需求。当网内存在可再生能源分布式电源时,常常需要配置储能系统以抑制这类电源的功率波动,在充分利用可再生能源的基础上,满足不同时段负荷的需求。这类微电网一般应用于海岛、边远地区等常规配电系统接入比较困难的地方,满足用户对电能的基本需求。

现有研究和实践表明,将分布式发电系统与负荷等一起组织成微电网形式运行,是发挥分布式电源效能的有效方式,可以有效提高分布式电源的利用效率,有助于电网灾变时向重要负荷持续供电,避免间歇式电源对周围用户电能质量的直接影响,具有重要的经济意义和社会价值。此外,由于微电网所具有的自组织性,它可由电力用户自己建设并运营,或者由电力公司建设并运营,也可以由独立的第三方能源公司建设并运营,这种多方运营模式有助于调动社会各方参与可再生能源等发电设施建设的积极性,在更深层次实现能源领域的市场化改革<sup>[9]</sup>。

有关微电网的研究工作近年来已经成为电力系统的热点研究领域之一,国际上很多国家都投入了大量研究经费予以支持<sup>[10]</sup>,包括美国、日本、欧洲、中国在内的很多国家和地区都建设了一批实验示范工程<sup>[11-13]</sup>,以验证微电网技术层面和经济层面的可行性。

## 1.2 微电网结构特征

### 1.2.1 直流与交流微电网

#### 1. 直流微电网

直流微电网的特征是系统中的分布式电源、储能装置、负荷等均连接至直流母线,直流网络再通过电力电子逆变装置连接至外部交流电网,例如图 1.2 所示<sup>[14]</sup>的结构形式。直流微电网通过电力电子变换装置可以向不同电压等级的交流、直流负荷提供电能,分布式电源和负荷的波动可由储能装置在直流侧调节。

考虑到分布式电源的特点以及用户对不同等级电能质量的需求,两个或多个直流微电网也可以形成双回或多回路供电方式<sup>[15]</sup>,例如图 1.3 所示结构。图中,直流

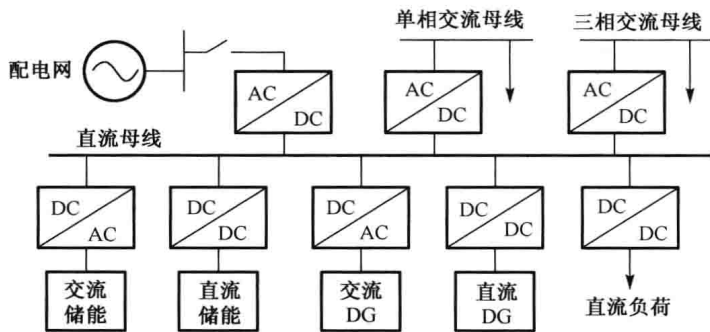


图 1.2 直流微电网结构

馈线 1 上接有间歇性特征比较明显的分布式电源,用于向普通负荷供电;直流馈线 2 连接运行特性比较平稳的分布式电源以及储能装置,向要求比较高的负荷供电。相较于交流微电网,直流微电网由于各分布式电源与直流母线之间仅存在一级电压变换装置,降低了系统建设成本,在控制上更易实现;同时由于无需考虑各分布式电源之间的同步问题,在不同分布式电源间的环流抑制方面更具优势。

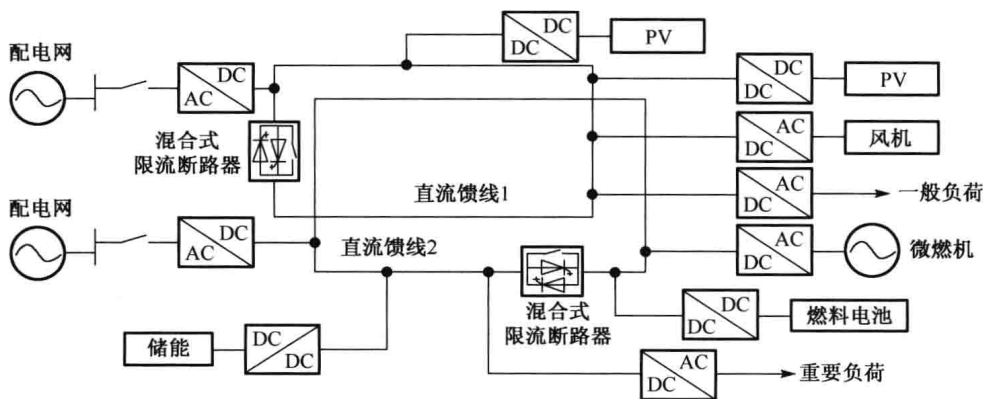


图 1.3 多直流馈线微电网结构

## 2. 交流微电网

目前,交流微电网仍然是微电网的主要形式。在交流微电网中,分布式电源、储能装置等均通过电力电子装置连接至交流母线,例如图 1.4 所示<sup>[16]</sup>系统。通过对 PCC 处开关的控制,可实现微电网并网运行与孤岛运行模式的转换。

## 3. 交直流混合微电网

交直流混合微电网结构如图 1.5 所示。在这一微电网中,既含有交流母线又含有直流母线,既可以直接向交流负荷供电又可以直接向直流负荷供电,因此称为交直流混合微电网<sup>[17]</sup>,但从整体结构分析,实际上仍可看作交流微电网,直流微电网可看作一个独特的电源通过电力电子逆变器接入交流母线。



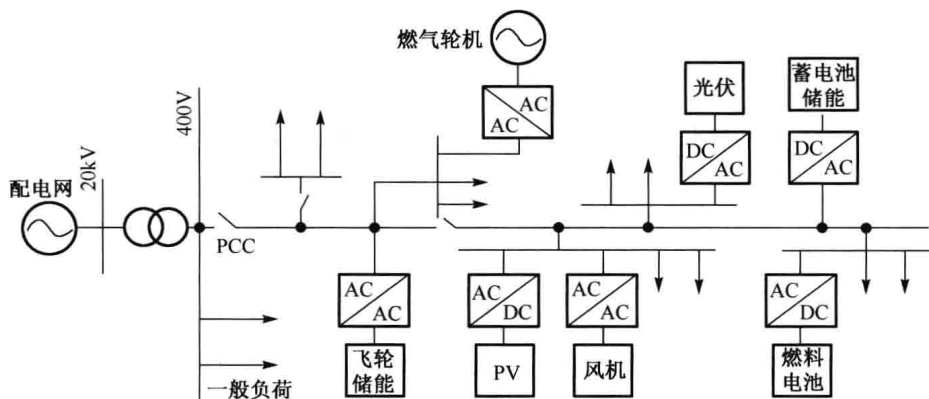


图 1.4 交流微电网结构

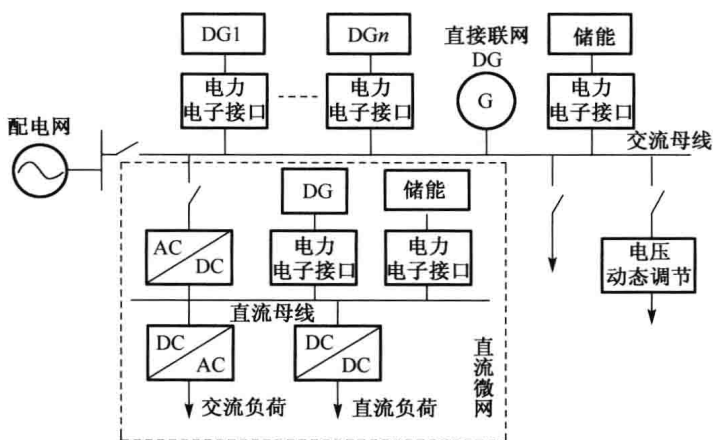


图 1.5 交直流混合微电网结构

### 1.2.2 简单与复杂结构微电网

#### 1. 简单结构微电网

所谓简单结构微电网是指系统中分布式电源的类型和数量较少,控制和运行比较简单的微电网<sup>[18]</sup>,例如图 1.6 所示系统。这种简单结构的微电网在实际中应用很多,例如分布式电源为微型燃气轮机的热电冷联产系统系统(combined cooling heating and power,CCHP),在向用户提供电能同时,还满足用户热和冷的需求。但与传统的 CCHP 系统不同,当形成微电网后,该系统具备并网和孤网运行两种模式,并可在两种模式间灵活切换,这可以在保证能源有效利用的同时,提高用户的供电可靠性。

#### 2. 复杂结构微电网

所谓复杂结构微电网是指系统中分布式电源类型多,分布式电源接入系统的形式多样,运行和控制相对复杂的微电网。图 1.7 给出了可称为复杂结构的德国 De-