

可再生能源发电技术丛书

微电网控制理论 及保护方法

Control Theory and Protective
Method of Microgrids

张继红 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

可再生能源发电技术丛书

微电网控制理论及保护方法

Control Theory and Protective Method of Microgrids

张继红 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

分布式发电及微电网控制与保护技术是近年来研究的热点内容之一。本书较为全面地阐述了微电网的相关理论、分布式电源模型、微电网的综合控制策略以及保护方法,并对独立型和并网型两类微电网的优化控制策略进行了探讨。全书共7章。第1章阐述可再生能源利用的价值以及微电网的基本概念;第2章介绍目前常见的分布式电源与储能系统的数学模型;第3章给出了典型微电网的控制方法;第4章、第5章分别介绍独立型和并网型微电网的优化控制策略;第6章介绍微电网的基本保护方法;第7章论述微电网孤岛状态的监测理论。

本书适合分布式发电及微电网系统研究、设计、管理及相关领域的科技工作者阅读,也可供高等院校电气信息类专业教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

微电网控制理论及保护方法/张继红编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5606-4960-3

I. ①微… II. ①张… III. ①电网—自动控制 ②电网—继电保护
IV. ①TM76 ②TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第150991号

策划编辑 刘玉芳
责任编辑 阎彬
出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)
电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071
网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com
经 销 新华书店
印刷单位 陕西天意印务有限责任公司
版 次 2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 9.875
字 数 193千字
印 数 1~1000册
定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-4960-3/TM

XDUP 5262001-1

如有印装问题可调换

前 言

针对化石能源日趋枯竭和环境污染问题加剧的现状，分布式发电及微电网技术得到快速发展。微电网指的是由分布式电源、储能系统、负荷及相关控制保护设备构成的小型电网系统，具有独立型和并网型两类灵活的运行模式和完备的发电及配电功能。微电网技术的提出旨在最大程度地利用可再生能源，加强能源综合管理，提升电力系统和用户的经济效益，增强电力系统运行的灵活性、可控性，满足用户负荷对电能质量的基本要求。作为一种国内流行的分布式电源组网技术，微电网与大电网、微电网与分布式电源、微电网与配电网均有着非常密切的关系。

微电网对大电网具有补充效应：当大电网出现电压或频率波动时，微电网系统作为备用电源可向大电网提供支撑，通过对微电网系统的灵活调度，可以实现对大电网的削峰填谷作用；当大电网出现故障时，微电网系统可以迅速与大电网解列而形成孤岛运行状态，保证重要用户的不间断供电，提高供电的连续性、可靠性；微电网对大电网的补充效应还表现在微电网系统能够解决偏远地区的供电困难问题，为重要用户不间断供电。

微电网系统是发挥分布式电源能效的助推器：微电网系统中的电源大多为可再生能源，并通过储能及控制装置实现系统稳定运行。因而，分布式电源的平滑接入，可以大量减少化石燃料消耗，达到节能减排的目标。目前，微电网技术已经成为世界各国在可再生能源领域中研究的核心问题。其中的关键之一为控制问题。在微电网系统中，分布式电源多数需要经过电力电子装置变换后接入系统，并网运行时，由大电网提供电压和频率支撑，系统能够稳定运行。相反，当微电网系统转入孤岛运行模式时，微电网的电压及频率由内部电源控制器进行调节。在这种情况下传统的并网逆变器控制方法难以满足微电网系统的稳定运行要求，因而需要深入研究适用于微电网系统的控制技术，并根据微电网内各分布式电源的容量调节有功和无功功率，进而输出稳定的电压和频率，以实现微电网系统的稳定运行要求。

微电网配电系统保护的复杂性：随着分布式发电并网技术的逐步成熟，大量分布式电源的接入运行将对配电网的结构和配电网中的短路电流大小及分布具有重要影响，由此给配电网的继电保护工作也带来较大的负面效应。例如，大量分布式电源的接入会改变潮流

方向,减小短路电流水平,干扰故障点的准确判断等,因而传统的配电网保护装置或方案将不再适用。为了保证在新情况下继电保护的動作正确性,有必要研究新型的保护方案,以消除分布式电源的接入对传统保护带来的影响,为分布式发电技术的广泛应用和微电网技术的推广扫除技术障碍。

本书较为全面地阐述了微电网的相关理论、分布式电源模型、微电网的综合控制策划以及保护方法,并对独立型和并网型两类微电网的优化控制策略进行了探讨。

本书的出版得到了内蒙古自治区自然科学基金项目“基于微电网的储能功率变换器拓扑理论及智能控制研究”(2016MS0515)的资助,在此表示感谢!

由于编者水平有限,撰写时间仓促,书中的不妥之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编者

2018年1月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 我国能源储量现状	1
1.1.2 开展分布式发电及微电网研究的意义	4
1.2 微电网的结构特征	6
1.2.1 微电网的定义与结构	6
1.2.2 微电网的电压等级	9
1.3 微电网关键技术及国内外研究现状	9
1.3.1 微电网稳定运行控制与保护的主要问题	9
1.3.2 微电网控制与保护的研究现状	10
第 2 章 分布式发电系统模型	13
2.1 光伏发电系统	14
2.1.1 光伏阵列数学模型	14
2.1.2 光伏阵列输出特性与功率跟踪	16
2.1.3 光伏阵列并网逆变器控制策略	18
2.2 风力发电系统	22
2.2.1 空气动力系统模型	22
2.2.2 永磁同步发电机模型	23
2.2.3 双馈风力发电机模型	25
2.3 超级电容器储能系统	28
2.3.1 超级电容器的特点	29
2.3.2 超级电容器的数学模型	29
2.3.3 超级电容器的控制策略	31
2.4 蓄电池储能系统	33
2.4.1 蓄电池的充放电数学模型	33
2.4.2 蓄电池的控制策略	34

第 3 章 微电网自适应协调下垂控制	38
3.1 协调下垂控制方法分析	38
3.2 分布式电源控制策略	41
3.2.1 无逆变器分布式电源的控制方法	41
3.2.2 含逆变器分布式电源的控制方法	42
3.3 微电网的控制策略	45
3.3.1 主从控制	45
3.3.2 对等控制	46
3.4 控制策略对微电网稳定性的影响	46
3.5 微电网结构设计	47
3.5.1 自适应协调下垂控制策略	49
3.5.2 微电网系统仿真算例	55
第 4 章 独立型微电网优化配置	63
4.1 系统构成与优化原则	64
4.1.1 独立型微电网构成与优化配置内容	64
4.1.2 独立型微电网优化配置原则	65
4.2 独立型微电网的优化方法	66
4.2.1 源-荷特性分析优化	67
4.2.2 经济效益分析与优化技术	68
4.2.3 建模方法	68
4.3 独立型微电网优化控制策略	69
4.3.1 策略分析	69
4.3.2 注意事项	72
4.4 独立型微电网的组网方式	72
4.4.1 多能互补式电源组网方案	73
4.4.2 储能系统组网	74
4.4.3 分布式电源与储能系统混合组网	76
4.5 独立型微电网组网控制策略	76
4.5.1 柴油发电机控制策略	77
4.5.2 蓄电池储能系统控制策略	80
4.6 独立型微电网优化配置综合模型	81
4.6.1 优化变量	81
4.6.2 优化目标	82

4.6.3 约束条件·····	83
第5章 并网型微电网的优化配置 ·····	85
5.1 并网型微电网评价指标·····	85
5.1.1 第一类指标·····	85
5.1.2 第二类指标·····	86
5.1.3 第三类指标·····	87
5.2 并网型微电网的运行特点·····	88
5.2.1 并网型微电网接入的基本要求·····	88
5.2.2 微电网的接入方式·····	89
5.3 并网型微电网的运行控制策略·····	89
5.3.1 母线功率控制·····	89
5.3.2 专家系统·····	90
5.4 微电网的综合运行控制·····	92
5.4.1 微电网的运行管理·····	92
5.4.2 微电网模式切换·····	93
5.5 微电网相关技术标准·····	93
5.5.1 IEEE 1547-2003 标准·····	95
5.5.2 孤岛模式规范·····	95
5.5.3 并网测试规范和要求·····	96
5.5.4 IEEE 1547 标准的基本内涵·····	96
第6章 双制动与方向检测的纵差保护 ·····	98
6.1 微电网故障及保护概述·····	98
6.1.1 分布式电源接入的保护特点·····	99
6.1.2 短路故障电流计算原理·····	100
6.2 短路故障时逆变电源的输出特性·····	105
6.2.1 PQ控制模式下逆变电源的输出特性·····	105
6.2.2 V/f控制模式下逆变电源的输出特性·····	107
6.3 微电网保护技术·····	107
6.3.1 微电网保护的基本要求·····	108
6.3.2 微电网保护的基本原理·····	109
6.4 双制动特性及功率方向检测的纵差保护·····	114
6.4.1 故障电流的方向确定方法·····	114
6.4.2 双制动特性的导引线电流环流原理·····	114

6.4.3	线路与负荷故障保护建模	115
6.4.4	微电网并网模式综合保护仿真	117
第7章 正反馈主动式孤岛监测技术		123
7.1	孤岛监测概述	123
7.1.1	孤岛的产生与危害	124
7.1.2	孤岛监测的基本问题	125
7.1.3	孤岛监测的类别	129
7.2	孤岛监测技术	130
7.2.1	被动式孤岛监测技术	130
7.2.2	主动式孤岛监测技术	132
7.3	电压幅值比较的正反馈孤岛监测方案	135
7.3.1	孤岛监测原理与算法	135
7.3.2	孤岛监测建模仿真	137
参考文献		140

第1章 概述

近年来,与人们生活息息相关的电力系统正面临着越来越多的挑战,全球气候变暖、能源压力、环境污染以及数字化社会对供电可靠性与电能质量的要求都是我们不得不面对的问题。因此节能减排、绿色供能以及可持续发展已经成为世界各国共同关注的焦点问题^[1-5]。能源的大规模开发与利用所面临的首要挑战是如何大幅降低传统化石能源利用占比,逐步以可再生能源替代现有传统化石能源,构建新型能源利用体系,以高科技和智能控制手段改变现有能源利用方式,降低能耗、减少排放,最大限度地提高可再生能源的利用效率。

本章首先介绍了微电网的背景及意义、国内外研究现状;其次阐述了微电网的基本结构和运行特征,分析了微电网稳定运行的控制理论与保护的关键技术,有针对性地提出了微电网的协调控制策略与综合保护方法,设计了解决问题的基本方案并采用实验与仿真手段进行验证。

1.1 引言

能源是社会进步与经济动力的基础,电力是能源的主要表现形式,是人类可以直接利用的清洁能源。曾经以化石燃料为基础的能源供给为人类文明的进步及生活质量的提高发挥了重要作用,然而这种进步是以高昂代价换取的。化石燃料的大规模开发利用,不仅导致了严重的环境问题(比如近年来全国性的雾霾天气),而且引起了不可逆转的植被破坏与全球变暖难题。作为后人进行科学研究的宝贵化工原料(煤炭、石油)不应该仅仅作为燃料在当代被消耗殆尽。因此,积极探索开发可再生能源利用方式已被全社会高度重视,可再生能源的有效利用是解决世界经济和社会发展中日益凸显的能源供需矛盾、能源利用与环境污染矛盾的必然选择^[6-8]。

1.1.1 我国能源储量现状

1. 石油

2013年年底,中国石油探明储量为25亿吨(合181亿桶),占世界石油探明储量的

1.1%，储采比为 11.9 年。2013 年我国石油(包括原油、致密油、油砂和天然气液)产量为 208.1 百万吨，比 2012 年增加 0.6%，占全球石油产量的 5.0%。2013 年我国石油消费量为 507.4 百万吨，比 2012 年增加 3.8%，占全球石油消费量的 12.1%。

2. 天然气

2013 年年底，中国天然气探明储量为 3.3 万亿立方米，占世界天然气探明储量的 1.8%，储采比为 28 年。2013 年我国天然气产量为 1171 亿立方米，比 2012 年增加 9.5%，占世界天然气产量的 3.4%。2013 年我国天然气消费量为 1616 亿立方米，比 2012 年增加 10.8%，占世界天然气消费量的 4.8%。

3. 煤炭

2013 年年底，中国煤炭探明储量为 1145 亿吨(无烟煤和烟煤为 622 亿吨，次烟煤和褐煤为 523 亿吨)，占世界煤炭探明储量的 12.8%，储采比为 31 年。2013 年我国煤炭产量为 36.8 亿吨，比 2012 年增加 1.2%，占世界煤炭产量的 47.4%。2013 年我国煤炭消费量为 1925.3 百万吨油当量，比 2012 年增加 4.0%，占世界煤炭消费量的 50.3%。

4. 核电

2013 年中国核电消费量为 1106 亿千瓦时，比 2012 年增加 13.9%，占世界核电消费量的 4.4%。

5. 水电

2013 年中国水电消费量为 9116 亿千瓦时，比 2012 年增加 4.8%，占世界水电消费量的 24.1%。

6. 太阳能发电

2013 年中国太阳能发电消费量为 119 亿千瓦时，比 2012 年增加 91.3%，占世界太阳能发电消费量的 9.5%。2013 年中国太阳能发电累计装机容量为 18 300 MW，比 2012 年增加 161.4%，占世界太阳能发电装机容量的 13.1%。

7. 风电

2013 年中国风电消费量为 1319 亿千瓦时，比 2012 年增加 37.8%，占世界风电消费量的 21.0%。2013 年中国风电累计装机容量为 91 460 MW，比 2012 年增加 21.3%，占世界风电装机容量的 28.6%。

8. 地热、生物质及其它能源

2013 年中国地热、生物质及其它形式发电消费量为 459 亿千瓦时，比 2012 年稍有下降(2012 年为 460 亿千瓦时)，占世界地热、生物质及其它形式发电消费量的 9.5%。2013 年

中国地热发电累计装机容量为 27 MW, 比 2012 年增加 12.5%, 占世界地热发电装机容量的 0.2%^[9-11]。

结合以上相关数据以及国际权威机构(英国石油集团 BP)统计年鉴中涉及中国的关键数据进行的汇总表明,(数据不包括港、澳、台地区)2015 年中国的一次能源消费量为 2852.4 百万吨油当量, 比 2014 年增加 4.7%, 占世界一次能源消费量的 22.4%; 发电量为 53 616 亿千瓦时, 比 2012 年增加 7.8%, 占世界发电量的 23.2%; CO₂ 排放量为 9524.3 百万吨, 比 2012 年增加 4.2%, 占世界 CO₂ 排放量的 27.1%。

图 1-1 分别给出了我国 2014 年、2015 年的一次能源消费量占比统计。由图 1-1 可知, 我国的能源供给主要依靠化石燃料, 其它能源尤其是可再生能源比例显然不足, 因此发展绿色的可再生能源市场较好, 研究该领域发电技术前景广阔。

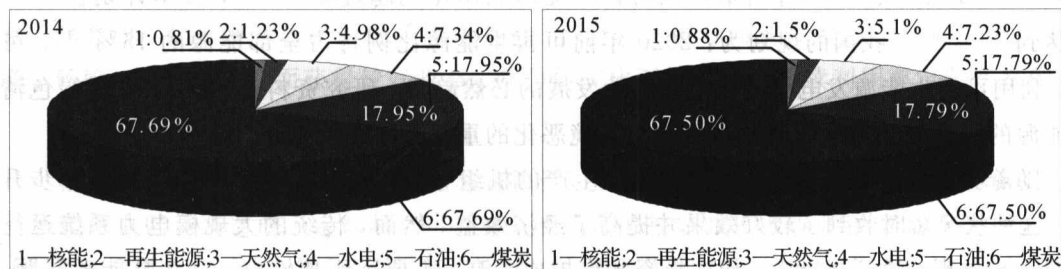


图 1-1 2014 年与 2015 年中国一次能源消费量占比统计

图 1-2 分别给出了我国 2011—2013 年能源消耗量、发电量与排放量对比关系。由图 1-2 可知, 随着工业经济的快速发展, 国内电量需求进一步增长, 一次能源消费总量与 CO₂ 排放量逐年提高, 因此节能减排任重而道远。

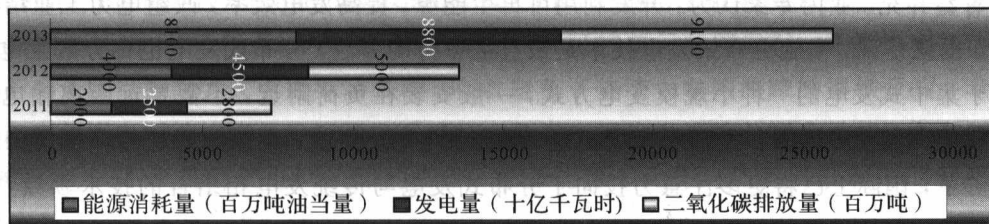


图 1-2 2011—2013 年中国能源消耗量、发电量与排放量对比图

国内外专家指出: 随着世界经济的复苏, 各国所需电力缺口明显增大, 为减轻一次化石能源过度开发利用, 并结合节能减排的目标, 必须调整能源结构, 充分挖掘清洁、无污染能源作为现有能源的替代产品。因而开发可再生能源已被世界所关注, 同时也成为电能生产的必然趋势。今后的电网将是传统大电网与新型微电网相结合而构成的混合电网。这种

互补的供电方式可以综合利用现有资源与设备,是一种可以为用户提供可靠、优质电能的理想方式,它不仅可以提高能源的综合利用效率,而且增强了传统电网抵御自然灾害的能力^[12-14]。

1.1.2 开展分布式发电及微电网研究的意义

1. 西方发达国家与我国的发展目标解析

近年来,在环境污染与化石能源日趋枯竭的严峻形势下,以太阳能、风能等作为可再生能源的分布式发电(Distributed Generation, DG)的大规模开发应用受到了世界各国的高度重视^[15-17]。美国要求未来5年内分布式发电装机容量占其新增容量的比例不少于20%^[18];欧盟规划2020年各成员国可再生能源利用比例超过20%^[19];日本计划在2030年达到30%^[20];我国的规划为:2020年前可再生能源比例将占全部能源的15%^[21]。可见,利用可再生能源发电已成为电力工业发展的必然趋势。研究资料表明^[22]:开展绿色清洁能源的研究被视为是缓解能源短缺与环境恶化的重要有效手段之一。

随着我国经济的快速发展,国内电力生产的机组容量进一步扩大,电压等级进一步提高,这种状况短时收到了较好效果并提高了经济效益。然而,传统的大规模电力系统运行弊端逐步显现:建厂规模大、初次投资和维护成本高、需要远距离输电、存在高能耗问题、难以保证供电的安全可靠。尤其在近几年世界范围内连续发生了多次大面积停电事故,大电网的脆弱性充分暴露。进入21世纪,各种分散布置的、小容量的发电技术成为人们研究的热点^[23]。

西方发达国家的实践与编者进行的理论研究表明:分布式发电技术是大规模集中式供电的有益补充。业内专家认为:开发利用可再生能源,提高发电效率,改组电力工业结构是关键,也就是说,实施分布式发电技术是最直接可行的方法。分布式发电也称分散发电,是相对于集中式发电的一种小规模发电方式,一般安装在负荷附近,不需要远距离输电,几乎无线损问题,常见的有太阳能光伏发电、风力发电等。当前,在能源紧缺与环境污染的严峻形势下,国际上已将更多注意力投向了分布式发电与传统发电相结合的技术领域^[24-25]。资料表明,发达国家较早就开展了分布式发电相关技术的研究工作。丹麦的可再生能源发电量约占总发电量的58%,德国为26%,美国约有8000多座可再生能源电站,占总装机容量的10%。中国政府对发展分布式发电也非常重视。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》再一次以文件的方式阐述了清洁的可再生能源利用和规模化发展的重大意义。近年来颁布的《可再生能源法》已明确将分布式发电供能技术列入重点发展与支持领域^[26-28]。可以预见,在国内大规模开发分布式发电技术已成必然趋势,其应用前景非常

看好。因此,进行分布式发电技术方面的研究工作符合国家重大战略需求,研究有关分布式发电的控制理论及保护方法意义重大。

2. 我国开展分布式发电的效益测算^[29]

按照“规划”要求,我国将在以下三方面获益:① 能源方面,若2020年的目标能够实现,则全国可显著减少传统的一次化石能源消耗,按照能源需求估算,利用清洁能源的发电量可以替代沼气约240亿立方米,煤炭约6亿吨,乙醇和生物柴油约1000万吨,可再生能源的开发利用对改善能源结构和节约化石资源将发挥重大作用;② 环境方面,可再生能源年利用量相当于减少二氧化硫排放量约800万吨,减少氮氧化物排放量约300万吨,减少烟尘排放量约400万吨,减少二氧化碳排放量约12亿吨,年节约用水约20亿立方米;③ 社会方面,到2020年,将利用可再生能源累计解决无电地区1000万人口的基本用电问题,改善约1亿户农村居民的生活用电条件。因此,开展分布式发电技术的研究可以在能源、环境、社会等多方面获得较好收益,并为传统化石能源的可持续利用奠定坚实基础。

3. 微电网的提出

由于可再生能源发电存在间歇性与随机性,加上分布式发电渗透率的逐年提高,势必对传统配电网系统造成一定影响,同时对电能质量的控制难度及保护的复杂程度也随之加大。美国颁布的分布式发电系统运行标准规定:当分布式电源并网时若出现大电网故障情况,则要求分布式电源立即退出运行;此外还要求分布式电源的容量不能超过就地负荷容量。这一规定势必会限制分布式电源的能效发挥。

为整合各类分布式发电资源优势,减弱大量分布式发电对电网的冲击和不利影响,充分挖掘其经济效益,国际权威组织——美国电力可靠性技术解决方案联合会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)提出了微电网的概念^[30],它能将各类分散的电源纳入同一个物理网络,既能作为一个可控单元并网运行,又能作为自治系统孤岛运行,所以控制方式更加灵活多样,有效避免了传统大电网故障的连锁反应。专家预测,未来的配电网结构将是传统配电系统与大量微电网配电系统的混合结构。微电网这一特殊供电方式不仅是传统电网故障的后备,也是能源多元化与能源高效利用的重要技术手段。

4. 大力发展微电网的优势

微电网是在大规模开发可再生能源基础上形成的小型智能电网。微电网技术作为传统电网可靠运行的后备支撑手段,对于增强传统电网抵御突发事件、保障重要负荷供电连续乃至国家安全等方面都具有重要的现实意义^[31]。微电网是将额定功率为几十千瓦的分散电源,与就地负荷、储能及控制设备等有机结合,形成一个可控单元,可以向用户提供冷、

热、电或三联供的一种新型供能体系^[32]。

与集中式发电方式相比,微电网建在用户附近,无需建立变电站进行远距离输电,从而节约输、配电初期的投资成本及运行费用,更不必考虑线损问题。由于微电网控制方式灵活,运行模式多样,有利于实现分布式能源的阶梯利用,大大提高了能源的综合利用效率。微电网与大电网相结合的优势主要体现在以下几方面^[33-34]:

(1) 分布式电源的并网问题。微电网可以协调控制网内分布式电源的运行,也就是将各分布式电源的并网问题转换为微电网与大电网公共点的连接问题,解决了高渗透率的分布式电源的接入受限问题。而微电网可以灵活地处理内部各电源的断开与连接,体现了微电源的“即插即用”功能,发挥了电源优势。

(2) 大电网运行的可靠问题。微电网的接入为大电网的稳定、可靠运行提供了重要的后备支撑作用。近年来,自然灾害与极端气候频发,致使局部地区电网受损严重,长时间停电可能使当地经济蒙受巨大损失,给民众生活带来极大不便。微电网可以保障非常时期的重要负荷供电需求,是一种大电网可靠运行的有益补充。

(3) 合理调节用电“峰谷”问题。交流电能不易储存,它的生产、输送、分配遵循功率平衡原则。而负荷用电具有明显的峰谷之别,微电网的接入可以使各分布式电源能力得以充分利用,减小大电网在负荷峰期的负担;相反,当负荷处于低谷时段,则可以将多余的电能整流存储,发挥了微电网的“削峰填谷”功能。

(4) 碳排放与环境保护问题。采用风能、太阳能发电可以提供全部绿色电能。比如,以天然气为燃料发电释放的 SO_2 是燃煤排放的 25%,而释放的 CO_2 则是燃煤排放的 40%;若采用太阳能与风力发电,则认为是纯绿色环保能源,碳排放几乎为零。

(5) 建厂投资与市场供求问题。微电网位于负荷附近,有利于提高系统的无功功率补偿能力,改善线路电压跌落,减少了新建电厂的投资,降低了电价,惠及民生。

可见,微电网具有双重角色:既可作为电力系统的可调负荷,又可作为用户的可定制电源。专家预测:未来的配电系统将是传统配电网与微电网的有益结合,微电网的接入对传统电力系统的影响将是巨大而深远的。

1.2 微电网的结构特征

1.2.1 微电网的定义与结构

21 世纪初,美国学者首先提出了微电网的概念^[23],即由分布式电源、储能设备、负荷及功率变换器等构成的具有独立或联网运行模式的小型发电系统,一般设置于负荷附近,

可以同时提供冷、热、电或三联供。微电网中的分布式电源一般由机械旋转设备或静止的电力电子器件组成，负责能量的转换与变送，并提供必要的控制功能^[35-36]。

1. 直流微电网

直流微电网的结构特征是网内分布式电源、储能设备及负荷均连于直流母线上，采用电力电子器件将直流母线与外部交流配网相连，通过电力电子变换可以将电能供给不同电压等级的交直流负荷。分布式电源与负荷投切引起的电压频率波动由储能装置自动调节功率进行平抑。直流微电网结构如图 1-3 所示。

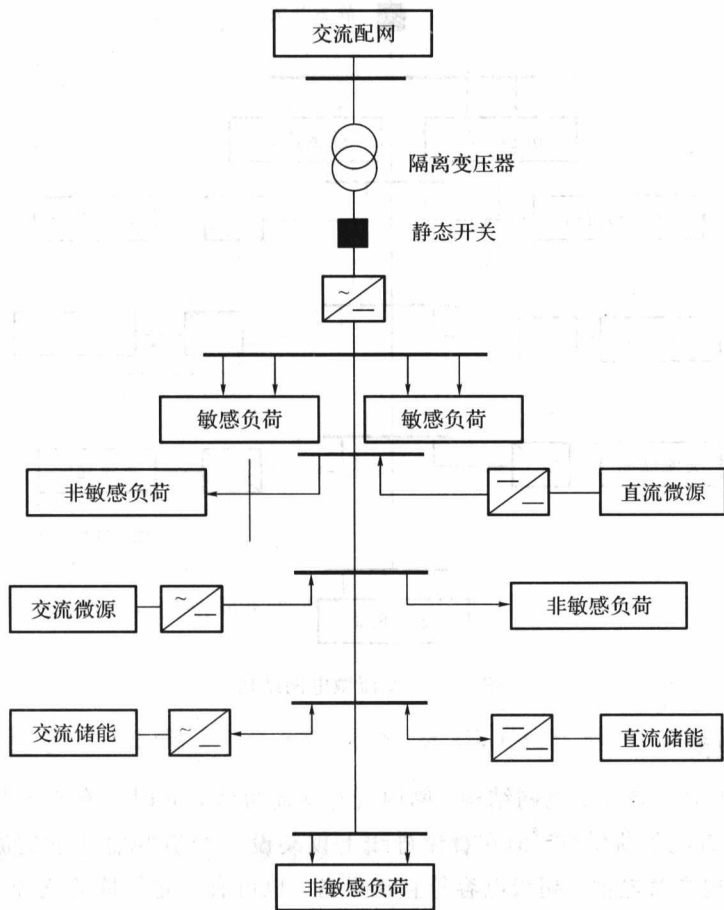


图 1-3 直流微电网结构

2. 交流微电网

交流微电网的结构特征是网内直流储能设备、分布式电源等交直流设备均通过电力电

子变换连接于公共母线，实现电能的逆变转换，然后经由静态开关将其连接于大电网。交流微电网结构如图 1-4 所示。

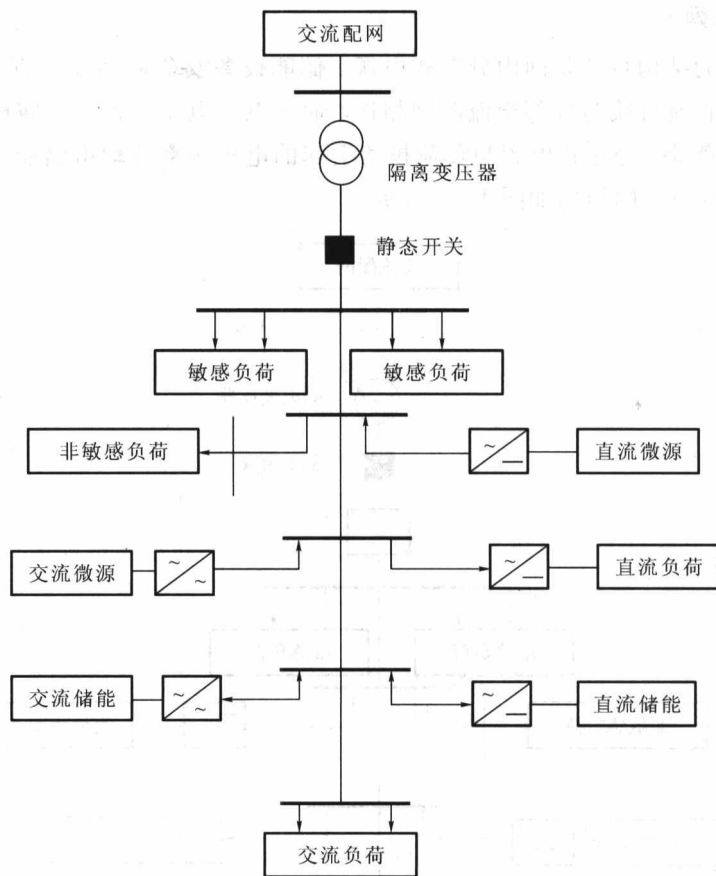


图 1-4 交流微电网结构

3. 混合微电网

如图 1-5 所示为混合微电网结构。网内既有交流母线，同时又有直流母线。微电网可以同时向交流或直流负荷供电，但在直流母线上仅装设一个逆变器连于交流母线。储能设备类型多样，既包含蓄电池、超级电容等直流设备，也可有飞轮储能等交流设备。

对于微电网的各类不同结构，若干分布式电源与储能装置均可按照预期控制方案向敏感负荷提供所需功率，尽可能地减少大电网的远距离传输，降低线损，保证电能质量。当大电网发生故障或有电能质量问题时，微电网可以孤岛运行，同样可保证重要负荷供电的连续性。因此，孤岛稳定运行的关键在于卓越的控制策略和有效的孤岛监测方法。