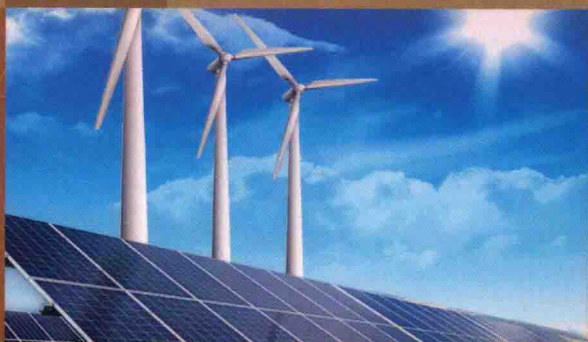


江苏高校品牌专业建设工程资助项目



普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程系列教材



智能风光微网技术

李天福 钱 斌 编著
张惠国 胡雷振



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程专业系列教材

智能风光微网技术

李天福 钱 斌 张惠国 胡雷振 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍风光微电网的储能、逆变器、控制与运行、监测四个关键技术，简要介绍风光互补发电中典型的风光储微电网结构、系统设计以及智能用电的知识。

本书可作为新能源科学与工程专业“风光互补与微电网”课程的教材，也可作为从事微电网技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

智能风光微网技术 / 李天福等编著. —北京: 科学出版社, 2019.8
普通高等教育“十三五”规划教材·新能源科学与工程系列教材
ISBN 978-7-03-061970-9

I. ①智… II. ①李… III. ①智能控制-电网-高等学校-教材
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 162852 号

责任编辑: 余 江 张丽花 梁晶晶 / 责任校对: 樊雅琼

责任印制: 张 伟/封面设计: 迷底书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 232 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着清洁能源、新能源的开发,微电网(Micro-grid,简称微网)成为电力系统的一个重要环节,国内外都在进行新能源微电网示范工程建设。随着微电网关键技术的深入研究,微电网技术日趋成熟。作为新能源科学与工程专业课程需要与时俱进,使学生了解微电网的关键技术及其最新发展状况。

本书是根据“风光互补与微电网”课程的教学材料整理编写的。全书共8章,第1章为微电网概述,介绍微电网的发展背景、基础知识和风光储微电网;第2章为光伏发电子系统,介绍太阳电池与光伏阵列、微电网中常用的电力设备,以及光伏的最大功率点跟踪控制方法;第3章为风力发电子系统,主要介绍常用的风力发电机的基本构成、模型、工作原理;第4章为储能子系统,主要介绍储能子系统结构和能量管理方法,以及蓄电池、储能逆变器的模型;第5章为微电网逆变器,主要分析逆变器的模型、控制方法,改进电能质量的常用措施;第6章为微电网控制与运行,主要介绍微电网的控制方法、运行状态、保护技术;第7章为微电网监测与用电,主要内容是微电网测控系统、通信技术、智能化技术,以及智能用电的一些方案;第8章为微电网系统设计初步,简要介绍微电网系统的设计内容和案例。每章附有少量思考题,供课后练习。

本书在内容上,既有模型、控制等关键技术,又有设备的要求、工程应用知识。在写作上,减少公式推导,增加图形表达,突出重点内容。

本书由李天福主要编写并统稿。钱斌编写第4章,张惠国编写第3章,苏州腾晖光伏技术有限公司胡雷振参与编写第8章,其余章节由李天福编写。

在本书的编写过程中,参阅了一些学位论文和网络资料,在此对这些文献资料的作者表示衷心的感谢。常熟理工学院的领导和教师对本书的写作提供了指导,科学出版社的编辑对本书的出版做了大量的工作,编者的家人提供了大量的无私帮助,在此一并表示感谢。

虽然编者已尽心编写和反复校核,但限于水平,疏漏之处在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者

2019年1月

目 录

前言

第 1 章 微电网概述	1
1.1 发展背景	1
1.2 微电网基础	2
1.2.1 微电网的主要设备	2
1.2.2 微电网的主要特点	5
1.2.3 微电网分类	6
1.2.4 微电网运行与控制模式	8
1.3 风光储微电网	9
1.3.1 风光储微电网的结构	9
1.3.2 光伏发电	9
1.3.3 风力发电	10
思考题	11
第 2 章 光伏发电子系统	13
2.1 太阳电池与光伏阵列	13
2.1.1 太阳电池模型	13
2.1.2 光伏阵列	14
2.1.3 光伏阵列排布	16
2.2 最大功率点跟踪	17
2.2.1 最大功率点跟踪原理	17
2.2.2 恒压跟踪法	17
2.2.3 扰动观测法	18
2.2.4 电导增量法	19
2.3 发电子系统设备	20
2.3.1 光伏发电系统专用设备	20
2.3.2 电力变换设备	22
2.3.3 通断设备	24
2.3.4 保护设备	27
2.3.5 无功补偿设备	28

思考题	32
第 3 章 风力发电子系统	33
3.1 风能	33
3.1.1 风能模型	33
3.1.2 风能评估	34
3.1.3 风能利用特性	35
3.2 机械系统	36
3.2.1 叶片与桨距角	36
3.2.2 安全保护系统	38
3.2.3 传动与辅助系统	38
3.3 发电机系统	40
3.3.1 发电机结构	40
3.3.2 发电机的工作原理	41
3.3.3 主流风力发电机型	44
3.4 风力发电机的控制	48
3.4.1 风力发电控制方法	48
3.4.2 恒速恒频风力发电机	52
3.4.3 变速恒频风力发电机	54
思考题	63
第 4 章 储能子系统	64
4.1 储能子系统结构	64
4.1.1 储能子系统接入电网	64
4.1.2 蓄电池组接入储能子系统	65
4.1.3 蓄电池的连接	66
4.2 蓄电池	66
4.2.1 锂离子蓄电池特性	66
4.2.2 锂离子蓄电池模型	67
4.2.3 蓄电池组设计的注意事项	69
4.3 储能变流器	70
4.3.1 储能变流器结构	70
4.3.2 双向 DC-DC 电路	71
4.3.3 工作模式	72
4.4 电池管理系统	74
4.4.1 功能与黑启动	74

4.4.2	蓄电池荷电状态估计	75
4.4.3	蓄电池的均衡	77
4.4.4	蓄电池充放电方法	80
4.4.5	安全管理	80
	思考题	81
第 5 章	微电网逆变器	82
5.1	逆变并网系统	82
5.1.1	分类	82
5.1.2	并网系统构成	83
5.2	网侧逆变器模型	84
5.2.1	坐标变换	84
5.2.2	锁相环	87
5.2.3	三相电压型逆变器模型	89
5.3	逆变器控制方法	92
5.3.1	信号的定向	92
5.3.2	恒功率 $P-Q$ 控制	96
5.3.3	恒压恒频 U/f 控制	99
5.3.4	下垂控制	102
5.4	电能质量	108
5.4.1	谐波	108
5.4.2	三相不平衡	111
	思考题	115
第 6 章	微电网控制与运行	116
6.1	微电网控制方式	116
6.1.1	主从控制	116
6.1.2	对等控制	117
6.1.3	分层控制	118
6.2	稳态运行	120
6.2.1	离网运行	120
6.2.2	并网运行	122
6.2.3	孤岛检测方法	123
6.3	运行切换技术	125
6.3.1	并网切换至离网	125
6.3.2	离网切换至并网	126

6.3.3	黑启动控制	128
6.3.4	工作模式无缝切换	129
6.4	运行保护	131
6.4.1	继电保护	131
6.4.2	防雷	134
6.4.3	接地	135
	思考题	138
第 7 章	微电网监测与用电	140
7.1	微电网测控系统	140
7.1.1	监控与数据采集系统	140
7.1.2	组态软件	142
7.1.3	集散控制系统	143
7.1.4	现场总线控制系统	144
7.2	智能微电网	146
7.2.1	特点与结构	146
7.2.2	就地控制层	147
7.2.3	集中控制层	149
7.2.4	调度管理层	149
7.3	通信技术	150
7.3.1	微电网的通信方案	150
7.3.2	基于 IEC60870 的微电网通信	152
7.3.3	IEC61850 的通信协议	154
7.3.4	基于 IEC61850-7-420 的微电网通信	155
7.4	智能用电	158
7.4.1	智能用电的体现	158
7.4.2	智能电能表	159
7.4.3	电动汽车储能	160
	思考题	163
第 8 章	微电网系统设计初步	164
8.1	微电网规划设计基础	164
8.1.1	发电子系统位置	164
8.1.2	规划设计的主要内容	164
8.1.3	微电网场站设计	165
8.1.4	微电网投资收益	166

8.2 仿真与案例	167
8.2.1 微电网仿真	167
8.2.2 示例	169
思考题	171
参考文献	172

第1章 微电网概述

1.1 发展背景

随着社会经济的快速发展,电力产业面临诸多新的需求。典型的需求包括:开发可再生能源、清洁能源,提升输电能力和输电距离,改造陈旧老化的电力设施,提高供电可靠性和电能质量等。为适应新的发展形势和解决电力产业出现的诸多问题,在2003年之后,以美国和欧盟为代表的国家、地区和一些组织提出了建设“智能电网(Smart Grid)”的计划,以期建设具有智能控制、智能管理、智能分析特征的电网。

2009年,国家电网有限公司提出了建设坚强智能电网(Strong and Smart Grid)的规划,发展目标是以特高压电网为骨干网架,构建“坚强”的基础,实现以信息化、数字化、自动化、互动化为“智能”技术特征,建设能充分发挥其功能和作用的电网。

坚强智能电网以坚强网架为基础,以通信信息平台为支撑,以智能控制为手段,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节,覆盖所有电压等级,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合,是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。

2015年,中国提出构建全球能源互联网(Internet of Energy),能源互联网是“互联网+”智慧能源的简称,全球能源互联网发展合作组织成为全球首个由中国发起并成立的能源国际组织。全球能源互联网的构建,有助于各种能源(包括电、天然气、石油、清洁能源等)的高效生产、调配和使用。

能源互联网是一种互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态,具有设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放等主要特征。能源互联网对提高可再生能源比重,促进化石能源清洁高效利用,提升能源综合效率,推动能源市场开放和产业升级,形成新的经济增长点,提升能源国际合作水平具有重要意义。

2016年,由中华人民共和国国家发展和改革委员会、国家能源局、工业和信息化部联合印发《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,将能源互联网建设近中期分为两个阶段推进:2016~2018年,开展试点示范;2019~2025年,将着力推进能源互联网多元化、规模化发展,初步建成能源互联网产业体系,

形成较为完备的技术及标准体系并推动实现国际化。

目前,中国正稳步推进能源互联网建设,同时开展的10项重点任务均涉及新能源,以下是与风力发电、光伏发电、微电网密切相关的一些任务。

(1)能源互联网的建设,鼓励建设智能风电场、智能光伏电站等设施及基于互联网的智慧运行云平台,实现可再生能源的智能化生产。

(2)不同能源网络接口设施的标准化、模块化建设,各种能源生产、消费设施的“即插即用”与“双向传输”,大幅提升可再生能源、分布式能源及多元化负载的接纳能力。

(3)能源互联网的关键技术。能源互联网的核心设备研发,为能源互联网设施自下而上的自治组网、分散式网络化协同控制提供硬件支撑,支持直流电网、先进储能、能源转换、需求侧能量管理等关键技术、产品及设备的研发和应用;信息物理系统的关键技术研发,研究多能融合能源系统的建模、分析与优化技术,研究集中式与分布式协同计算、控制、调度与自愈技术。

(4)发展储能和电动汽车应用新模式。充分利用风能、太阳能等可再生能源,在城市、景区、高速公路等区域因地制宜建设新能源充电站等基础设施,提供电动汽车充放电、换电等业务。

其他建设任务有:营造开放共享的能源互联网生态体系,建立灵活的能源市场交易模式、智慧用能新模式,能源大数据服务与应用(能源大数据的集成和安全共享、能源大数据的业务服务体系),建设能源互联网的标准体系。

1.2 微电网基础

1.2.1 微电网的主要设备

美国电气技术可靠性解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solution, CERTS)的微电网定义为:微电网是由分布式电源(Distributed Generation, DG)和负载共同构成的网络,该分布式电源既能产生电能又能提供热能。分布式电源通过电力电子装置进行能量的变换,同时可以灵活受控,微电网作为电力系统的一个集成受控单元运行,在此基础上达到用户对供电质量以及电能安全的要求。

欧洲的微电网定义为:以智能性、能量利用多元化为特点,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电网。

中国(国家电网中国电力科学研究院有限公司)对微电网的定义:以分布式发电技术为基础,以靠近分散型资源或用户的小型电站为主,结合终端用户质量管理和能源梯级利用技术形成的小型模块化、分散式的供能网络。

美国、欧洲、中国给出的微电网定义略有不同，而且美国、欧洲等国家和地区或不同机构提出的微电网的结构也略有不同，其中 CERTS 提出的微电网构成如图 1-1 所示。

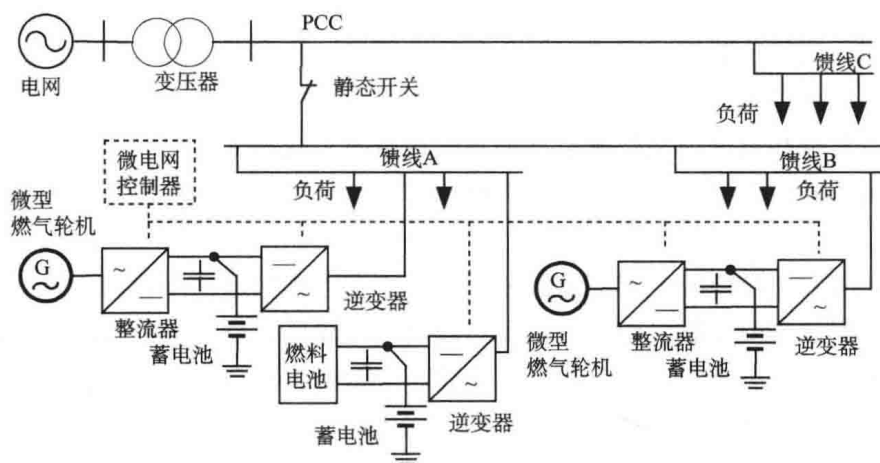


图 1-1 CERTS 提出的微电网构成

微电网定义的差异仅是侧重点不同，但可以归纳出微电网的公共特点是一种网络结构的小型发配电系统。这种小型发配电系统位于用户侧，既能并网运行，又能离网运行。各种定义微电网，基本上都包含了分布式电源、储能装置、负载、控制器、变流器和静态开关。

1. 分布式电源

分布式电源(或称为微电源、分布式发电)尚无统一定义，一般是指为了满足用户特定的需要、支持现存配电网的经济运行或同时满足这两个方面的要求，且在用户现场或靠近用户现场配置功率为千瓦级到 50MW 的小型、与环境兼容的发电系统。

在微电网离网运行时，分布式电源对负载起支撑作用，微电网中的调峰等作用可由储能装置或者微电网中的传统发电单元来完成。

在微电网并网运行时，分布式电源对负载的支撑作用转移到了电网。如果分布式电源的能量输出能够满足微电网中负载的需求，电网对负载的支撑作用只体现在电网对微电网进行稳定性调节和调峰上。

2. 储能装置

储能(Energy Storage, ES)方式有多种，大体可分为机械、电磁、电化学储能

三大类。微电网的储能方式主要为电化学储能，储能装置使用蓄电池。蓄电池种类较多，特性各异，在选用时要仔细比较权衡利弊。

3. 微电网的负载

根据不同的电能质量需求以及负载敏感程度，微电网中的负载分为三类：不可调节负载、可调节负载与不敏感负载（分别连接图 1-1 中馈线 A、B、C），其中不可调节负载和可调节负载属于重要负载。重要负载都采用电网与分布式电源双电源供电模式，不敏感负载仅由电网直接供电，负载的切除和接入由负载控制器执行。

当电网发生故障时，三类负载出现不同的接入和切除工作状态。静态开关会及时动作保证重要负载供电正常以及对故障进行隔离处理，可由本地分布式电源向重要负载供电。对于可调节负载，系统可根据微电网功率平衡的需求在必要时将其切除。不敏感负载的供电，并不加以重要保护。

4. 微电网控制器

典型的（分层控制）微电网控制器（Microgrid Controller）可以分成两部分：微电网协调控制器和底层的分布式电源控制器。

微电网协调控制器是微电网控制的核心设备，统一协调底层分布式电源控制器和负载控制器，可以进行编程设置。微电网协调控制器负责微电网发电（有功功率、频率）控制、电压稳定（无功功率）控制、负载投切控制；按照预设的控制程序运行，分析电能质量；形成微电网的数据分析报表、经济运行报表。

分布式电源控制器需要配置能量管理及潮流控制功能，实现对各种分布式电源和本地潮流的实时控制。当电网变化时，能量管理功能要根据电网的变化切换逆变器控制策略，改变逆变器的运行状态。当负载变化时，潮流控制功能要根据额定频率和电压信息进行潮流调节，控制分布式电源的功率输出与电网的需求功率保持平衡。有时，在实现时，可以将分布式电源控制器和负载控制器合在一起。

5. 变流器和静态开关

变流器（Converter）是多种电能变换设备的统称，要根据分布式电源或者储能装置等设备的输入输出需求装设变流器。在微电网中常用的变流器有：DC-AC 逆变器、AC-DC 整流器、DC-DC 斩波器、AC-DC-AC 变压变频器等。

静态开关（Static Transfer Switch, STS）是微电网与公共电网相连的关键设备，微电网与电网的连接点即静态开关的位置。微电网与电网的连接仅有一个公共连接点（Point of Common Connection, PCC），其通过静态开关接入电网，而分布式

电源和母线是使用断路器(Breaker)连接的。

静态开关一般是由两个反向并联的电力电子开关、微处理器、继电器及其他硬件等构成的,用于微电网的并网运行模式和离网运行模式的切换。静态开关除了具备开关功能,还应具备保护、测量及通信功能,还需要满足有关的连接标准。

1.2.2 微电网的主要特点

与传统电网比较,微电网具有灵活性高、可接入性强、可靠性高、经济性好的特点。

(1)灵活性高。微电网安装地点灵活,具有输配电资源和输电线路损耗少等特有优势,成为大型电网的有力补充和有效支撑。但是,具有高渗透的分布式电源构成的微电网接入电网时,会引起如稳定性、控制和保护等方面的一系列新问题。

(2)可接入性强。微电网可以接入多种分布式电源,如风力发电、光伏发电、燃料电池、热电联产等,这些分布式电源具有能源利用率高、发电多元化、污染少的优点。

(3)可靠性高。微电网与传统发电系统的主要区别在于微电网具有便利的可调度性,属于小型电力自治系统。微电网保障率高,对重要负载可以并网和离网两种运行模式供电,在主电网失电的情况下,保障了负载的用电。

(4)经济性好。与集中式能源相比,微电网更接近负载。微电网可以有效地降低线损,可以减少电能输送,减少设备和线路的投资以及维护费用。

通过对微电网的定义、构成、特性的分析,可以看出微电网与主动配电网(Active Distribution Network, ADN)、智能电网有一些相同之处,但侧重点不同,主要区别有以下几个方面。

(1)微电网和主动配电网都是智能电网的一部分。通常微电网作为主动配电网的智能子系统,主动配电网与微电网双向互动,主动配电网与电网双向互动。

(2)微电网、主动配电网、智能电网研究的主要方向不同。主动配电网的研究主要集中于分布式电源的优化规划、电压管理、需求侧管理、保护和故障定位等方面。微电网的研究集中在微电网并网后的控制方式、运行调度、协调控制等问题。智能电网主要研究宏观的网架、监测、规范等。

(3)控制层次和调度等级不同。微电网、主动配电网、智能电网的控制层次、调度等级、可靠性等级逐渐升高。分布式电源相对于电网来说是一个不可控电源,因此目前的国际规范和标准对分布式电源大多采取限制、隔离的方式来处理,以期减小其对电网的冲击。但是微电网中使用分布式电源,是通过微电网控制器将分布式电源变成受控源,因此微电网可作为可控电源接入主动配电网或智能电网。

1.2.3 微电网分类

微电网可以按照母线性质、接入方式、接入电压等级、用电规模等多种方式分类。

1. 按照母线性质划分

按照母线性质不同，微电网可以分为直流微电网、交流微电网、交直流混合微电网。

直流微电网结构如图 1-2 所示，其中风力发电、光伏发电是分布式电源的代表。在直流微电网结构中，分布式电源(输出变换为直流电)、储能装置、负载等连接至直流母线，直流母线再通过逆变器连接至外部交流电网。直流微电网通过电能变换装置(斩波器、逆变器)向不同电压等级的直流、交流负载提供电能，直流母线负荷的波动可以由储能装置调节。

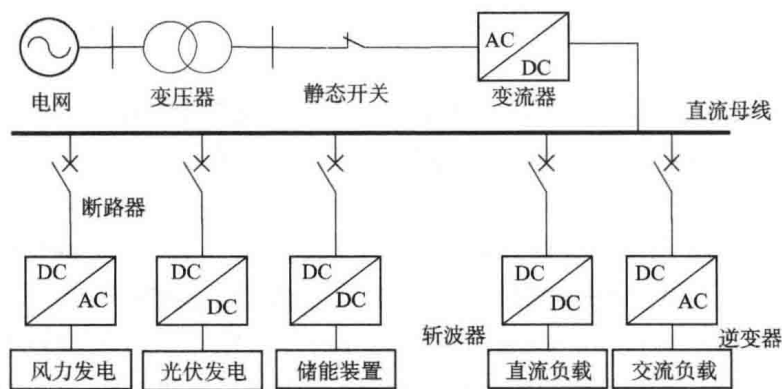


图 1-2 直流微电网结构

交流微电网结构如图 1-3 所示，光伏发电和储能装置通过逆变器与交流母线连接，风力发电通过变流器与交流母线连接。目前交流微电网仍然是微电网的主要形式，通过对并网点处静态开关的控制，微电网可以实现并网运行和离网运行的转换。

交直流混合微电网是既有交流母线又有直流母线的微电网。微电网既可以直接给交流负载供电又可以直接给直流负载供电，其结构如图 1-4 所示。

2. 按照接入方式划分

按照接入方式划分，微电网分为离网微电网(或独立微电网、孤岛微电网)和并网微电网。离网微电网常位于边远、无常规电网的地区，是以柴油发电机发电为主的独立运行的供配电网络；并网微电网是与常规电网相连的供配电网络。

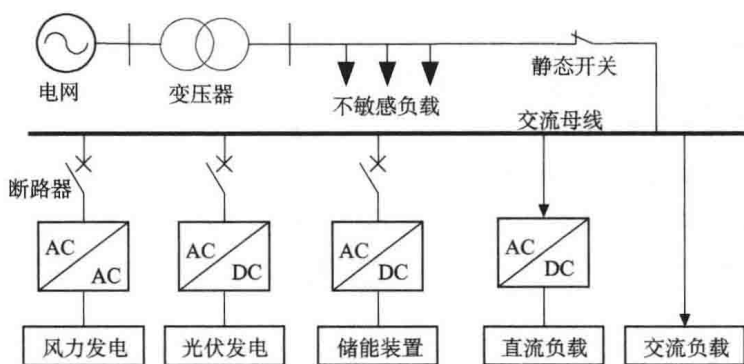


图 1-3 交流微电网结构

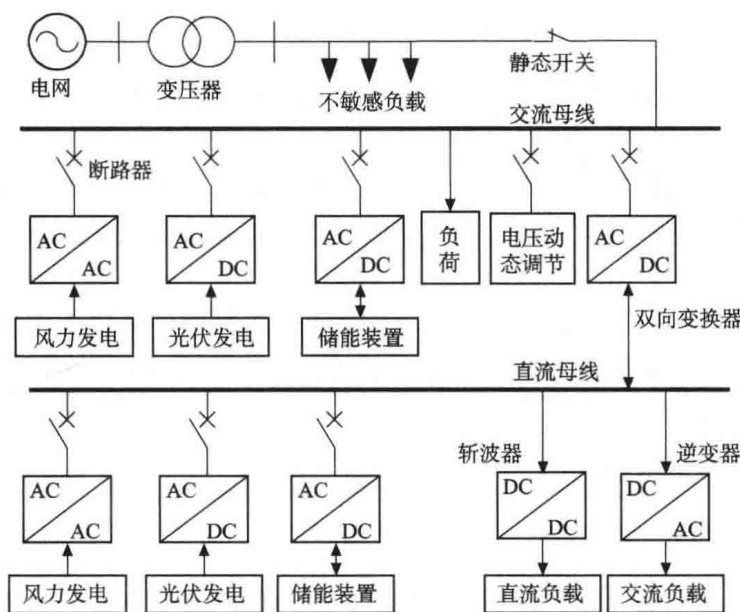


图 1-4 交直流混合微电网结构

3. 按照接入电压等级划分

微电网按照接入电压等级的不同划分为三个等级，即接入交流 380V/220V 电网的低压微电网、接入 6kV/10kV 馈线电网的中压微电网、接入高压配电变电站电网的高压微电网。高压微电网可以包含多个中压微电网，而中压微电网内可以包含多个低压微电网。

4. 其他分类

按照用电规模划分，常规电网可分为企业微电网和区域微电网。企业微电网供电给规模小的设施或机构，区域微电网为用电规模大的结构或区域供电。

微电网的结构较多,按照微电网结构特点分类,大体上可分为总线型结构、星型结构、环网结构。如低压总线型微电网、中压星型微电网,不同的拓扑结构决定着不同的控制策略和分布式电源的接入形式。

还可以按照微电网结构的复杂性分类,可以分为简单结构微电网和复杂结构微电网。简单结构微电网指分布式电源的类型和数量少,微电网的控制与运行比较简单。复杂结构微电网是指分布式电源的类型和数量多,微电网的控制与运行相对复杂。

1.2.4 微电网运行与控制模式

1. 运行模式

微电网是一个独立的可控的发电单元,运行模式有两种:与电网连在一起的并网运行模式、脱离电网的离网运行模式。

在微电网并网运行时,电网负责给微电网系统提供电压和频率支撑,微电网与电网是可以进行能量交换的,微电网既可以向电网输送电能,也可以从电网获取电能。

在微电网离网运行时,微电网与电网两者是不能进行能量交换的,电网不能为微电网提供电压和频率支撑。微电网要使逆变器输出的电压和频率稳定在一定范围内,同时保证关键性负载不间断供电,此时微电网作为一个独立系统,负责给区域内的所有负载供电。

2. 微电网控制方式

为了能在离网和并网两种模式下运行,微电网需要满足以下的控制要求:分布式电源的接入不影响当前微电网的正常工作,微电网能够实现无功功率和有功功率的独立解耦控制,微电网系统能够自主选择运行模式,并网运行时维持分布式电源与电网之间接口电压的稳定性,孤岛运行时控制分布式电源合理出力及保证负载供电的可靠性,微电网要保证切换过程的平滑性和稳定性。

根据微电网的控制方式不同,微电网可以分为三种:主从控制、对等控制及分层控制。

分布式电源类型很多,有基于柴油发电机的传统电源,也有基于储能系统的新型电源,还有基于新能源的电源。虽然电源类型不同,但都是通过变流器将分布式电源与微电网连接在一起的,所以变流器成为微电网系统中的关键装置,分布式电源发出的直流电需要通过逆变器变为交流电,交流电需要通过变压变频器后,才能满足用电标准。控制好微电网中的变流器成为微电网稳定运行的基