

“十三五”国家重点图书出版规划项目



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 主动配电网

## 规划与运行

刘广一 主编

ZHUDONG PEIDIANWANG  
GUIHUA YU YUNXING



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”国家重点图书出版规划项目



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 主动配电网 规划与运行

刘广一 主编

ZHUDONG PEIDIANWANG  
GUIHUA YU YUNXING

常州大学图书馆  
藏书章



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

如何处理大规模分散式能源的接入,在确保配电网安全、可靠运行的条件下促进清洁能源消纳,满足用户多元化需求,已成为智能电网领域关注的热点问题。近年来提出的主动配电网技术为解决这一问题提供了新的思路。相比传统配电网,主动配电网更突出各类能源的主动参与,更强调主动规划、主动控制、主动管理和主动服务,更倾向激励需求侧主动响应,即所谓的主动配电网六个主动的核心理念。主动配电网以一种新的能源系统形态出现,不可避免地带来了非传统的技术经济问题,需要一整套新技术、新理论、新方法予以支撑。本书旨在从规划和运行控制两个方面,总结主动配电网的关键技术。

本书共分为14章,第1章介绍配电网的发展与展望,第2章介绍主动配电网的定义与发展,第3章介绍主动配电网规划的思路与方法,第4章介绍主动配电网规划的数学模型,第5章为主动配电网规划系统,第6章为主动配电网运行调度管理系统,第7章为主动配电网状态估计技术,第8章为主动配电网的自愈控制与快速仿真,第9章为主动配电网的潮流计算,第10章为无功电压优化与负荷柔性控制,第11章为以主动配电网为核心的集群负荷需求响应,第12章为多能源系统优化运行,第13章为主动负荷及其特性辨识,第14章为分布式可再生能源发电技术。

本书可作为配电网规划运行和配电网研究人员的参考用书,也可作为高校教师和研究生的学习教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

主动配电网规划与运行 / 刘广一主编. —北京:中国电力出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5198-1614-8

I. ①刘… II. ①刘… III. ①配电系统—电力系统规划 ②配电系统—电力系统运行 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第324823号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:岳璐 张亮 马玲科

责任校对:郝军燕(010-63412339)

装帧设计:王英磊 赵姗姗

责任印制:邹树群

---

印 刷:北京雅昌艺术印刷有限公司

版 次:2017年12月第一版

印 次:2017年12月北京第一次印刷

开 本:889毫米×1194毫米 16开本

印 张:17.75

字 数:438千字

印 数:0001-2000册

定 价:98.00元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

## 编 委 会

前 言

主 编 刘广一

副主编 罗凤章 刘友波

编 委 程浩忠 王少芳 刘克文 陈乃仕 穆云飞

于 汀 王子安 王 丹 高 爽 唐 佳

戚野白 刘开欣 张 鹏 宋 岩 杨 洋

范士雄 谭 俊 陈 涛



## 前 言

传统配电网系统中很少存在用户侧电源。电能从发电厂“心脏”流出，途经输电网“主动脉”和配电网“毛细血管”流向末端用户，用户被动地接受供电服务和用电管理，电力公司被动响应和处理故障，通过改扩建来满足用户不断增长的负荷需求。

随着用户端分布式电源、分布式储能（电动汽车）和需求侧响应负荷如雨后春笋般涌现，在电网末端“造血”能力不断增强，出现了大量可以主动调节的可控资源，传统的配电网网架结构与自动化水平无法适应分布式电源分散性、间歇性的特点，因而阻碍了新造“血液”的作用发挥，迫切需要研发新的配电网规划与运行技术。

如何处理大规模分散式能源的接入，在确保配电网安全、可靠运行的条件下促进清洁能源消纳，满足用户多元化需求，已成为智能电网领域关注的热点问题。近年来提出的主动配电网技术为解决这一问题提供了新的思路。相比传统配电网，在电源层面，主动配电网更突出各类能源的主动参与；在电网层面，更强调主动规划、主动控制、主动管理和主动服务；在用户层面，更倾向激励需求侧主动响应，即所谓的主动配电网六个主动的核心理念。主动配电网的六个主动，可以分别从对发电、负荷和电网三个方面所带来的影响来解释：对于分布式可再生能源发电而言，主动配电网从规划和运行两个方面进行主动规划与主动管理，变被动处理为主动消纳，把分布式可再生能源发电看作是配电网运行过程中的积极因素，与电网供电互为备用，减少停电时间，缩小停电面积，当然，这里也需要分布式可再生能源发电积极参与主动配电网的运行调度过程；对广大用户而言，随着社会的发展和家用电器的增多，出现了众多可转移负荷，如果能更主动地参与到需求侧响应和电网运行中来，对于电网和用户都受益无穷。对于配电网而言，通过主动规划、主动控制、主动管理和主动服务，可以充分发挥分布式发电、分布式储能和需求侧响应负荷等可控资源在电网规划和运行过程中的积极作用，提升配电网对于可再生能源的接纳能力，提高配电网资产的利用率，延缓配电网的升级投资，提高电能传输效率，保证电网稳定可靠运行，并通过精确控制负荷，进行有效的移峰填谷，减少系统故障。主动配电网以一种新的能源系统形态出现，不可避免地带来了非传统的技术经济问题，需要一整套新技术、新理论、新方法予以支撑。本书旨在从规划和运行控制两个方面，总结主动配电网的关键技术。

我国对主动配电网技术的研发非常重视，中华人民共和国科技部于 2014 年组织实施了“主动配电网规划与运行关键技术与示范”高科技研发项目（863），本书作者有幸受科技部委托担任本项目的首席专家，参与了这一项目的研发全过程。本书正是依据这一项目研发过程中产生的部分成熟技术编写的，本书的编者也都是这一研发项目的技术骨干。本书第 1、2、6 章由刘广一编写，第 3

章由罗凤章编写，第4章由程浩忠编写，第5章由刘友波编写，第7章由王少芳编写，第8章由刘克文、陈乃仕、穆云飞编写，第9、10章由于汀、王子安、王丹、高爽、唐佳编写，第11章由王丹、戚野白、刘开欣编写，第12章由张鹏、王丹、宋岩、陈乃仕编写，第13章由杨洋编写，第14章由范士雄参与编写，谭俊博士和陈涛博士帮助绘制了部分插图，最后由罗凤章、刘友波参与统稿，全书由刘广一任主编，罗凤章、刘友波担任副主编。在本书编写过程中，得到了北京电力公司科技部李蕴主任、黄仁乐副主任，北京市电力经济技术研究院张凯副院长，福建省电力公司吴文宣主任、陈金祥处长、张逸博士、刘文亮总工，天津大学王成山教授、贾宏杰教授，四川大学刘俊勇教授，清华大学程林教授、林今博士，中国电力科学研究院蒲天骄主任、杨占勇博士等的大力鼓励和支持，在此一并致谢。

主动配电网作为一项正在不断发展的新兴研究课题，所涉及的技术领域非常广泛，各种新的理论算法和技术观点层出不穷。本书只是对其中规划和运行控制领域技术的初步总结，难免挂一漏万。恳请广大专家学者批评指正。

刘广一

2017年8月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 配电网的发展与展望</b> .....	1
1.1 配电网的发展历程 .....	1
1.2 发电方式变化对配电网的影响 .....	4
1.3 用电负荷特性变化对配电网的影响 .....	10
1.4 电动汽车对配电网的影响 .....	12
1.5 储能对配电网的影响 .....	13
1.6 本章小结 .....	14
<b>第 2 章 主动配电网的定义与发展</b> .....	15
2.1 主动配电网概念的发展 .....	15
2.2 主动配电网的核心理念 .....	16
2.3 主动配电网的技术指标 .....	18
2.4 主动配电网与微电网之间的关系 .....	19
2.5 主动配电网与能源互联网之间的关系 .....	20
2.6 本章小结 .....	23
<b>第 3 章 主动配电网规划的思路与方法</b> .....	24
3.1 引言 .....	24
3.2 可再生能源发电资源的主动评估 .....	25
3.3 曲线化的主动负荷预测 .....	32
3.4 考虑全要素接入的主动配电网综合规划 .....	39
3.5 主动配电网与配电通信网、配电自动化协同规划 .....	41
3.6 本章小结 .....	53
<b>第 4 章 主动配电网规划的数学模型</b> .....	54
4.1 引言 .....	54

4.2	分布式电源规划模型及算法	55
4.3	主动配电网架规划模型及算法	63
4.4	本章小结	69
<b>第 5 章</b>	<b>主动配电网规划系统</b>	<b>71</b>
5.1	引言	71
5.2	基于代理(智能体)技术的时序场景模拟仿真	71
5.3	主动配电网发展适应性分析	76
5.4	规划运行滚动校验与调整策略	81
5.5	主动配电网发展推演与互动展示技术	83
<b>第 6 章</b>	<b>主动配电网运行调度管理系统</b>	<b>92</b>
6.1	引言	92
6.2	主动配电网运行调度管理系统的构成	92
6.3	主动配电网运行控制系统	94
6.4	变电站区域自动化系统	99
6.5	基于集成商机制的分布式能源管理机制	102
6.6	本章小节	108
<b>第 7 章</b>	<b>主动配电网状态估计技术</b>	<b>109</b>
7.1	前言	109
7.2	主动配电网状态估计的常用算法	110
7.3	本章小结	116
<b>第 8 章</b>	<b>主动配电网的自愈控制与快速仿真</b>	<b>117</b>
8.1	引言	117
8.2	主动配电网的自愈控制	118
8.3	主动配电网的快速仿真	121
8.4	本章小结	138
<b>第 9 章</b>	<b>主动配电网的潮流计算</b>	<b>139</b>
9.1	引言	139
9.2	主动配电网的分布式电源和负荷模型	139
9.3	主动配电网潮流计算方法	142
9.4	主动配电网的连续时间序列仿真	156
9.5	本章小结	161



<b>第 10 章 无功电压优化与负荷柔性控制</b> .....	162
10.1 概述 .....	162
10.2 主动配电网电压特性 .....	162
10.3 有功与无功协调的电压优化及校正控制 .....	166
10.4 负荷柔性控制 .....	180
10.5 本章小结 .....	186
<b>第 11 章 以主动配电网为核心的集群负荷需求响应</b> .....	187
11.1 引言 .....	187
11.2 集群负荷建模 .....	189
11.3 集群负荷需求响应优化策略体系 .....	194
11.4 本章小结 .....	196
<b>第 12 章 多能源系统优化运行</b> .....	197
12.1 引言 .....	197
12.2 多种能源耦合互补与梯级利用原理 .....	198
12.3 多能源协同运行系统模型 .....	200
12.4 多能源系统优化调度算法 .....	204
12.5 本章小结 .....	210
<b>第 13 章 主动负荷及其特性辨识</b> .....	211
13.1 电网负荷的发展和演变 .....	211
13.2 主动负荷的定义特点及对电网的影响 .....	212
13.3 负荷特性评价方法 .....	212
13.4 负荷特性分割聚类方法研究 .....	216
13.5 用电行为分析的算法 .....	217
13.6 数据特征分析 .....	222
13.7 本章小结 .....	230
<b>第 14 章 分布式可再生能源发电技术</b> .....	232
14.1 分布式可再生能源发电系统 .....	232
14.2 分布式可再生能源接入分析 .....	237
14.3 分布式可再生能源功率平滑技术 .....	251
14.4 本章小结 .....	257
<b>参考文献</b> .....	258
<b>索引</b> .....	265

## 配电网的发展与展望

### 1.1 配电网的发展历程

#### 1.1.1 电网与电网技术的发展与展望

电力是当今社会的支柱能源，是国民经济发展的命脉。进入新世纪以来，为应对能源供应、环境保护以及气候变化带来的巨大挑战，能源结构将发生重大变化，而可再生能源、核能以及化石能源的清洁利用绝大部分要通过转化为电能而实现，因此电网的重要性日益突出。随着社会经济的发展，电力需求增加，电网规模不断扩大，电网形态逐渐变化。迎接能源革命的挑战，加快电网转型，发展新一代电网技术，成为当前电力系统发展的主要任务。自 1882 年爱迪生发明世界上第一个商业运营的电力系统以来，电气化技术的不断发展对人类社会的各个方面无不产生深刻的影响。2000 年，美国国家工程院将以电网技术为代表的电气化评为 20 世纪人类所取得的最伟大的科学成就。电网诞生一百多年来，根据电网的模式和技术经济特征可以把电网分成不同的阶段，彼此之间存在明显的代际差异以及传承和发展特性。20 世纪前半期的电网属于第一阶段，以小机组、低电压、小电网为特征，是电网发展的兴起阶段；20 世纪后半期的电网属于第二阶段，其大机组、超高电压、互联电网的特征，标志着电网进入规模化发展阶段；从 21 世纪初开始建设并预计到 2050 年后，电网将进入第三阶段，以非化石能源发电占较大份额（如达到 40%以上）和智能化为主要特征，是可持续发展和智能化的电网模式。

第一阶段电网的主要特点是交流输电占主导，输电电压较低，最高为 220kV 等级；电网规模小（属于城市电网、孤立电网和小型电网）；发电单机容量不超过 10 万~20 万 kW。

第二阶段电网从开始过渡到技术成熟的时间跨度大体上是从 20 世纪中期到 20 世纪末。在此期间，电网规模不断扩大，形成了大型互联电网；发电机组单机容量达到 30 万~100 万 kW；建立了 330kV 及以上电压等级的超高压交流、直流输电系统。

伴随电网的规模化发展，适应第二阶段电网发展的电网技术也发生了重大变化。除了装备和硬件技术的大型化和高参数化，在超高压远距离输电和互联电力系统关键问题解决的过程中，电力技术与同时代的数学理论、系统科学技术、计算机和信息科学技术、材料科学与技术广泛结合，极大地丰富和改变电力系统理论和技术的容貌，形成了电气装备、高压输电、系统运行与控制三个领域



的关键技术。

(1) 装备和硬件技术。高效大型发电机组技术包括超临界、超超临界燃煤机组(60万、100万kW), 100万kW核机组, 70万~80万kW水机组;超/特高压交直流输变电设备和线路技术(交流500、750、1000kV断路器、变压器、互感器,  $\pm 500$ 、 $\pm 660$ 、 $\pm 800$ kV直流换流阀、换流变压器);高速继电保护和安全稳定控制装置;光纤通信技术等。

(2) 超/特高压输电技术。在建设750kV及以下电压等级的超高压输变电工程,  $\pm 660$ kV及以下电压等级的高压直流输电工程, 以及1000、 $\pm 800$ kV特高压交直流输电工程的过程中, 借助材料科学技术和高压试验技术的进步, 提高了超/特高电压条件下空气及其他介质的绝缘强度特性, 促进了输电线路及输变电设备绝缘配合与绝缘水平的合理设计;借助科学试验和仿真计算, 提高了输电系统过电压(包括内部过电压和外部过电压)预测及防护水平;广泛采用线路并联电抗器补偿以及电抗器中性点小电抗补偿潜供电流的措施;各种运行方式下的调压和无功功率补偿提高了输电系统电压控制水平;对超/特高压输电线路引起的电磁环境干扰, 如电晕放电造成的无线电干扰、电视干扰、可听噪声干扰, 以及地面电场强度对人体影响等问题进行了大量研究并采取有效解决措施。

(3) 电力系统运行与控制技术。解决大型互联电网经济运行和系统安全问题的需求带动了电力系统运行优化和控制技术的研究, 包含状态估计技术、安全约束经济调度理论和方法、低频振荡(动态稳定)和暂态稳定控制的理论方法得到充分研究和广泛应用;采用先进计算机和计算方法的电力系统分析和仿真技术, 开发了大规模电力系统计算分析软件, 包括详细动态建模的大规模电力系统机电/电磁暂态计算分析、可靠性计算分析等;采用先进理论和技术开发并广泛应用了快速继电保护和安全稳定控制系统;基于电力系统远程测量[常规远程终端(remote terminal unit, RTU)、同步相量测量装置(phase measurement unit, PMU)]和光纤通信、离线和在线分析的调度自动化能量管理系统成为电网安全经济运行的重要保障。

到21世纪初, 结合超/特高压输电系统建设以及大区电网/全国联网实践, 中国通过研究开发和工程实践, 从一次设备和系统, 到二次控制、保护, 以及安全稳定运行技术、仿真分析技术都得到迅速地发展, 全面掌握了第二代电网技术, 总体达到国际先进水平, 部分技术(如特高压输电)水平居国际前列。

自20世纪末以来, 新能源革命在世界范围内悄然兴起, 世界各国能源和电力的发展都面临空前的应对和转型挑战。以接纳大规模可再生能源发电和智能化为主要特征的电网, 进入了第三阶段, 成为未来电网发展的趋势和方向。

适应国际能源和电力发展趋势, 中国以煤为主的能源结构和电源结构需要在今后几十年内逐步改变, 可再生能源和核能、天然气等清洁能源电力将逐步成为主力电源, 电网的发展将经历重大转型。

从20世纪80、90年代开始, 发达国家开始研究分布式发电、可再生能源发电、微电网、高速光纤通信和电力市场, 研究开发电力电子装置在电力系统中的应用[如灵活交流输电技术(FACTS)、定制电力技术(custom power)]等, 新一代电网的前景初步显现。当前世界范围内大规模展开可再生能源开发和智能电网建设, 拉开了电网第三阶段发展和建设的序幕。

第三阶段电网的主要特征是: ①电源组成方面, 以非化石能源为主的清洁能源发电应占较大份



额(如中国应力求达到50%以上),大型骨干电源与分布式电源相结合;②电网结构方面,国家级(或更大范围)主干输电网与地方电网、微电网协调发展;③采用大容量、低损耗、环境友好的输电方式(如特高压架空输电、超导电缆输电、气体绝缘管道输电等);④智能化的电网调度、控制和保护;⑤双向互动的智能化配用电系统等。

为了实现第三阶段电网发展的两大特征,即大规模可再生能源发电的集中和分散接入以及电网运行控制和用电的全面智能化,对电源和电力网发展模式、电网装备的创新、电网运行控制、仿真计算分析、智能用电以及用户与电网双向互动等多个方面,提出了前所未有的技术挑战,可概括为装备硬件技术和系统集成技术两个方面。

(1) 装备硬件技术。高效、节能、环保的硬件装备是新一代电网发展的基础。主要包括经济高效的可再生能源发电装备(风力、太阳能、生物质能等);新型高效的输配电技术和装备(特高压输电、超导输电、地下输电,智能化绿色电器);新型电力电子元器件、装备和技术;大容量和分布式储能技术和装备;各类传感器和信息网络。

(2) 系统集成技术。融合先进信息通信技术、电力电子技术、优化和控制理论和技术、新型电力市场理论和技术等的系统集成是未来新一代电网构建和安全经济运行的基础。具体包括:大容量集中式和分布式可再生能源发电接入技术;基于先进传感、通信、控制、计算、仿真技术,涵盖各类电源和负荷的智能化能量管理和控制;新一代电网的建模和分析技术;电网运行的能量流和信息流可靠性评估和安全防护;支持各类电源与用户广泛互动的电力市场理论、模式和运作方式;资产管理和综合服务系统;智能化的配用电系统,实现电力需求侧响应和分布式电源、电动汽车、储能装置灵活接入;覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

### 1.1.2 现代配电网的特点及发展趋势

分布式电源、分布式储能、电动汽车及可控负荷,是现代配电网的新型可控单元,其快速发展和大量接入促使电力系统尤其是中低压配电系统发生着重大改变。传统配电网通常闭环设计、开环运行,主要用于电力配送,配电自动化设备主要用于故障情况下的紧急处理。大量分布式能源的接入将改变传统配电网单向潮流的基本格局,并可能严重影响正常电压水平、短路电流和供电可靠性。同时,不同规模微电网的接入使配电网中存在许多规模和特性各异的自治运行区域,传统的配电网管理模式难以进行有效、优化的管理。

相比传统配电系统,现代配电系统具有如下特点:

(1) 灵活互动且类型多样的用户侧。现代配电系统中将会有大量分布式电源、分布式储能系统、电动汽车充电设施及各类可控智能电器设备接入。这些设施具有灵活可控的运行特性,并能够与配电系统进行双向互动,通过调整自身的运行计划和状态满足用户和电网双方面的需求。相比传统配电网中被动用电的用户侧,现代配电系统的用户侧同时具备发电、储电、用电的特性,能够作为一种可控资源主动参与智能配电系统的运行。

(2) 多层次的自治运行区域。不同于传统的辐射状配电网,现代配电系统可能包含多层次的自治运行区域,在局部可环网运行。具体地说,现代配电系统可以划分为多个独立运行的控制区域,可接有大量规模不同的虚拟发电厂和微电网等。这些自治运行区域规模各异,或相互独立,或相互嵌套;既具备一定的独立运行能力,又可以互相交换功率、在紧急情况下相互支援,既可以满足用



户多样化的电能质量要求，又可以提高供电可靠性。

(3) 交直流混合特性。由于分布式电源、储能设备和负荷中有大量直流设备，现代配电系统将传统单纯的交流配电网进化成交直流混合的配电系统。在微电网层面，根据实际需要，微电网可以是交流微电网，也可以是直流微电网，还可以是交直流混合微电网；在配电系统网架层面，中低压配电系统可以既有交流馈线，也有直流馈线，交直流线路间通过电力电子装置连接与控制。交直流混合配电系统能够根据实际需求决定采用交流或直流供电，有助提升系统效率和适应性。

(4) 灵活多样的控制方式和运行模式。智能配电系统采用分层协调控制方式，具备集中式控制与分散式控制的优点，在局部区域自治和相互协调的基础上，实现监测管理。局部区域自治中心以众多能量管理系统为依托，如用户侧的智能家居能量管理系统、商业楼宇能量管理系统、社区能量管理系统、微电网能量管理系统、单元控制系统、虚拟电厂控制系统等。这些区域自治控制中心除负责自身日常的控制之外，还可以在相互之间进行双向通信和协调互动；配电网管理系统与这些区域自治控制中心双向互动，实现对整个配电系统的主动、有效管理。通过对各自运行区域的灵活控制和网络重构，现代配电系统具有灵活多变的运行模式，既能提升配电系统正常运行期间的电能质量和运行经济性，又能在故障发生时迅速反应、降低故障造成的负面影响。

(5) 高级量测体系和智能配电信息系统。配电系统海量信息的量测采集、双向流动和管理处理是现代配电系统区别于传统配电系统最基本的特征之一，也是其发展的基础，需通过高级量测体系和智能配电信息系统实现。现代配电系统高级量测体系建立在先进的传感量测技术和信息通信技术的基础上，主要包含智能电表、双向通信网络、计量数据管理系统和用户室内网等，实现现代配电系统信息的采集、传输、存储与分析。现代配电信息系统实现对配电信息的整合与综合管理、设备管理、营销策略制定、业务管理及调度管理，为现代配电系统的规划设计、运行调度和综合管理提供数据支撑。

现代配电系统可以归结为一个高度融合的物理信息系统，其结构将具有多样化特征，可以是交直流混合的复杂配电网，可能接有各种分布式电源、分布式储能、可控负荷、微电网和虚拟电厂等，通过各层次的能量管理系统实现集中和分布式自治相结合的控制管理模式。图 1-1 给出了现代配电网的综合结构。值得指出的是，图 1-1 仅用于形象说明智能配电系统的网架/通信结构、组成和控制方式，实际智能配电系统形式多样，并不囿于图 1-1 所示的形式。此外，图 1-1 仅是一个远景概念图，实际智能配电系统须从传统的配电网逐步发展而来，考虑到实际情况、具体需求、建设和运维经济性等因素，智能配电系统在不同地点、不同发展阶段也会有不同的形式和特点。

## 1.2 发电方式变化对配电网的影响

在电网发展的第三个阶段中，发电方式发生了巨大改变，正在从第二阶段中，以化石能源为主的集中发电方式向以清洁能源发电应占较大份额（如中国应力求达到 50% 以上），大型骨干电源与分布式电源相结合的方式转变。在现代配电网中，直接接入中低压配电网的分布式电源的比例正在不断加大。

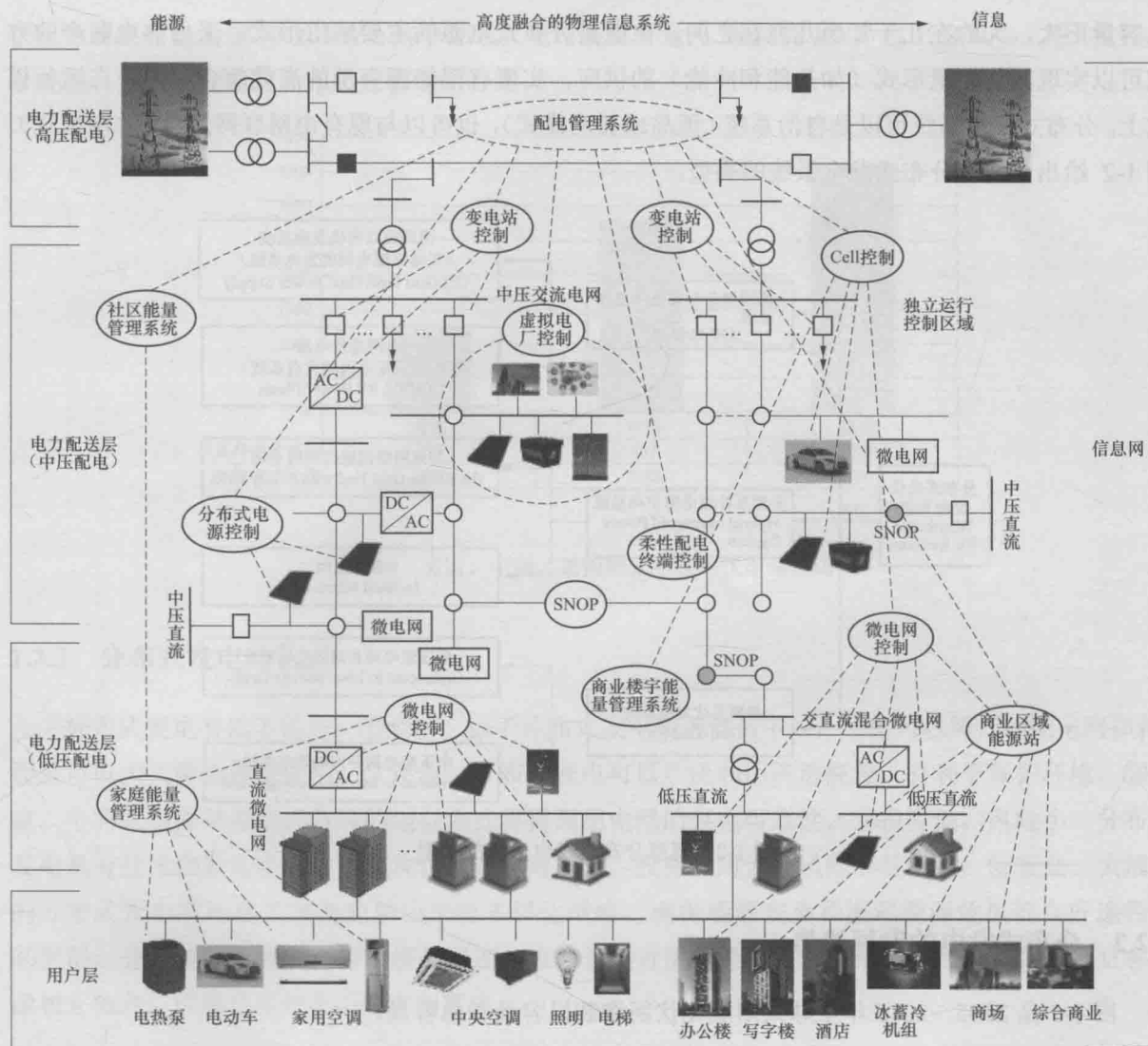


图 1-1 现代配电网的综合架构

### 1.2.1 分布式发电的类型

根据所采用的输入能源的不同,分布式发电可以分为可再生能源和不可再生能源两种类型。可再生能源发电有:①小型风电;②屋顶光伏发电;③小型水电;④生物质发电等。不可再生能源发电包括:①微型天然气发电;②燃料电池发电;③冷热电三联供发电等。

按照功率是否可以控制调节,分布式发电分为不可控和可控两种。小风电、屋顶光伏发电和径流式小水电可以说是靠天吃饭的发电形式,其输出功率是随机的、波动的、间歇性的,是不可控的;生物质发电、天然气发电和燃料电池发电是可控的。

按照原动机的不同,分布式发电技术类型分为旋转型和非旋转性两种。按照并网接口和功率变换的不同,分布式发电技术类型分为同步发电机、异步发电机和基于电力电子变换装置并网的分布式电源三种。

分布式电源一般直接接在低压配电网中或者用户处。与传统集中发电方式相比,分布式电源装



机容量不大，大约在几千瓦至几兆瓦之间。电能是分布式电源的主要输出形式，采用热电联产的方式可以实现其他能量形式（如热能和冷能）的供应，实现有限能源资源的高效综合利用。在运行模式上，分布式发电系统可以是自治系统（孤岛或孤网模式），也可以与现有电网联网运行（并网模式）。图 1-2 给出了现有分布式发电系统的类型。



图 1-2 现有分布式发电系统的类型

### 1.2.2 分布式发电的发展趋势

图 1-3 是 2005~2015 年全球太阳能光伏新增装机容量和总容量。

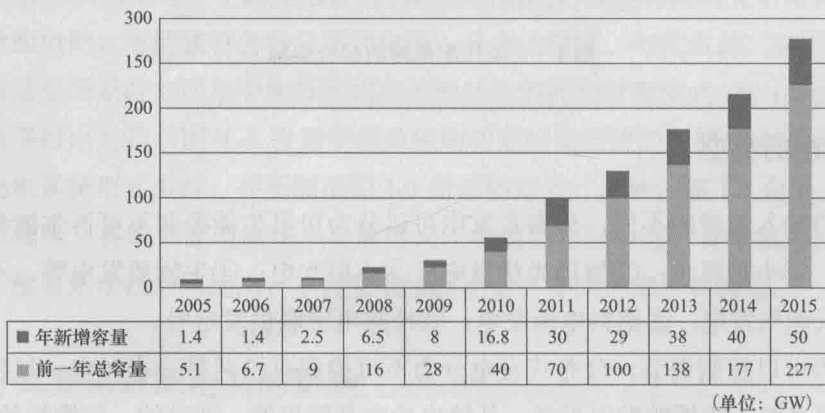


图 1-3 2005~2015 年全球太阳能光伏新增装机容量和总容量

截至 2014 年年底，全球光伏电站装机容量为 1.77 亿 kW，同比增长 28.2%，全年光伏新增装机容量为 3900 万 kW，同比增长 26.7%，其中一半以上是分布式光伏电站。截至 2014 年年底，美国的光伏发电装机容量为 1202 万 kW，其中分布式光伏并网装机容量为 625 万 kW，占比约 52%；中国光伏发电装机容量为 2805 万 kW，其中分布式光伏并网装机容量为 467 万 kW，占比约 16.0%；德国光



光伏电站装机容量为 3590 万 kW，其中分布式电站装机容量为 2800 万 kW，占比约 80%。图 1-4 给出了美国、中国、德国的分布式光伏电站占比。

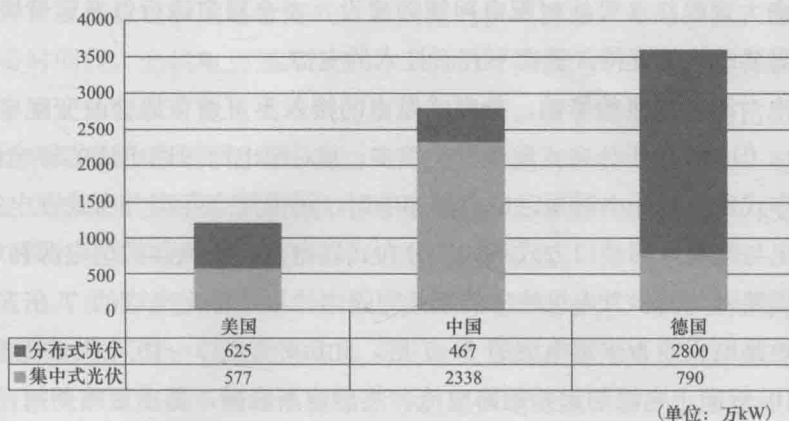


图 1-4 美国、中国、德国的分布式光伏电站占比

### 1.2.3 分布式发电的优点

分布式发电有以下优点：①经济。由于分布式发电接近负荷中心，不但可以降低输配电网损耗，而且可以大大降低投资费用。②环保。分布式发电可以广泛利用清洁能源，有利于保护环境。③可靠。分布式电源并网后，合理的运行方式将提高配电网的供电可靠性。④投资低，风险小。分布式发电具有技术和设备小型化、模块化、建设周期短、投资费用低、风险小等优点。⑤安全。大规模的分布式发电应用是实施能源供应来源多样化战略、确保能源安全和缓解能源危机的良好途径。⑥灵活。分布式发电系统开停机快捷迅速，维修管理方便，操作控制简单，负荷调节灵活，且各电源相互独立，可满足各种不同的定制需求。

### 1.2.4 分布式发电对配电网的影响

首先，与传统配电网负荷的单向潮流不同，分布式发电装置的接入将在配电网中形成双向潮流，另外，由于小风电、径流式小水电和屋顶光伏发电的不可控性和随机波动性，直接决定了这些分布式发电装置输出功率的可预测性和可调度性差。因此，这些分布式发电将对配电网的电压特性、继电保护、短路特性等产生影响，对配电网是一个潜在的不稳定因素。

其次，分布式光伏和小风电产生的电能，一般都需要利用电力电子装置进行电能变换后才能并入电网，而电力电子装置工作产生的谐波，可能对电网的电能质量产生不利影响。另外，电力电子装置在动态调节和控制惯性、过载能力、故障穿越能力等方面，与传统发电机有很大的差异，也被看作是电网稳定运行的潜在风险。当分布式光伏发电接入容量的比例较小时，这些特性差异对电网的影响可以忽略，而随着接入容量比例的不断增加，其对电网稳定性的威胁也越来越显著，并终将达到电网难以耐受的程度。

最后，分布式光伏发电在投资和产权主体，以及建设位置分布上更倾向于分散，应用环境以及客户的需求也更加多样化，调度和控制的要求更加简便灵活和多变。如果沿用传统电力系统相对集中的规划、设计、建设以及管控模式，将在很大程度上限制分布式光伏发电技术优势的发挥。因此，





分布式光伏发电的推广应用,给配电网运营管理以及相关行业技术标准和规范的制定与执行都提出了新的要求。为了充分发挥分布式光伏发电在新型可再生能源开发利用战略中的重要作用,就必须解决分布式光伏发电大规模接入可能对配电网规划建设、安全稳定运行以及运营管理等产生的各种不利影响,这不仅需要政策的支持,更离不开新技术的支撑。

(1) 分布式发电对短路电流的影响。分布式发电的接入不可避免地会改变配电网的短路电流水平和短路电流分布,但是,由于分布式发电种类很多,其对配电网短路电流的影响程度也不尽相同,因此在具体分析分布式发电对配电网短路电流的影响时,还需结合各类分布式发电的短路电流特性。

按照分布式发电与配电网的接口方式不同,分布式发电分为变流器类型电源和电机类型电源。

在并网节点发生短路时,同步发电机输出的起始短路电流可达额定电流的7倍左右,鼠笼式异步发电机提供的起始短路电流约为额定电流的5~7倍,此后经过约3~10个周波逐渐衰减到0。双馈发电机会产生8~10倍额定电流的起始短路电流,然后逐渐衰减,若在短路期间,双馈发电机的转子功率控制器仍维持有效,则双馈发电机会提供持续的短路电流,但其值会限制在略高于负荷电流,但若在发生短路时,撬棍(crowbar)电路起作用,将转子绕组短接,则双馈发电机的短路电流特性与鼠笼发电机类似,稳态短路电流趋于0。

接入到配电网运行的变流器类型电源基本上均采用三相电压源变流器,一般采用直接电流控制方式,在并网节点发生短路时,分布式发电向短路点提供的短路电流始终可以控制在设定的允许过电流范围(一般为1.2~1.5倍额定电流)之内。

通常认为在配电网侧发生短路时,接入到配电网中的光伏电源对短路电流贡献不大,稳态短路电流一般只比光伏电源额定输出电流大10%~20%,短路瞬间的电流峰值跟光伏电源逆变器自身的储能元件和输出控制性能有关。在配电网中,短路保护一般采用过流保护加熔断保护。对于高渗透率的光伏电源,馈电线路上发生短路故障时,可能由于光伏电源提供绝大部分的短路电流而导致馈电线路无法检测出短路故障。

传统的同步电机具有提供短路电流的能力,在与电网提供的短路电流叠加后可以确保线路保护在1~2个周波时间断开。然而,光伏逆变器由于能量密度有限,其中电力电子元件过流能力受到限制,并不能提供较高的短路电流。通过实验和动态仿真,一般认为光伏逆变器的短路电流只比额定电流大25%以内。即使在国际相关标准中,也只要求逆变器提供1倍额定的短路电流。这导致在大规模接入分布式光伏的情况下,传输线发生短路故障时,由于光伏逆变器短路电流能力不足,线路上的故障无法被检测并且使保护做出响应。尤其是在传统的三段式保护中,瞬时电流速断保护可能会不能被识别。根据光伏电站并网分析经验,并网节点的短路电流主要由接入的主网提供,并网节点连接的网络是否“坚强”整体决定了分布式的短路能力。光伏电站贡献短路电流造成中低压设备的改造问题,如对电流保护、中压开关和电流互感器等元器件的重新选型。因此,光伏发电系统的短路电流贡献应当在配电系统规划、分布式系统设计中被充分考虑。

(2) 分布式发电对配电网电压偏差的影响。集中供电的配电网一般呈辐射状。稳态运行状态下,电压沿馈线潮流方向逐渐降低。接入光伏电源后,由于馈线上的传输功率减少,使沿馈线各负荷节点处的电压被抬高,可能导致一些负荷节点的电压偏移超标,其电压被抬高多少与接入光伏电源的位置及总容量大小密切相关。通常情况下,可通过在中低压配电网中设置有载调压变压器和电压调节器等调压设备,将负荷节点的电压偏移控制在符合规定的范围内。对于配电网的电压调整,合