



国家电网公司
电力科技著作出版项目

分布式电源与微电网 并网技术

苏剑等著

FENBUSHI DIANYUAN YU WEIDIANWANG
BINGWANG JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

分布式电源与微电网 并网技术

苏 剑 刘海涛 吴 鸣
李 蕊 吕志鹏 季 宇 著
李 洋 于 辉 梁惠施



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是作者多年来在对国内外最新分布式电源与微电网并网技术全面整理的基础上,在相关研究工作和项目支撑下,结合工程实践和标准制修订经验形成的研究成果。全书围绕分布式电源接入配电网的影响、分布式电源并网运行控制、微电网技术三个核心方向,在全面介绍各种典型类型电源特性及接口组成的基础上,定性、定量分析了分布式电源接入后对配电网的电压分布、短路电流特性、电能质量控制、继电保护等方面的影响,重点论述了分布式电源单机及多机运行控制技术。在微电网技术中介绍了微电网内各个单元协调运行、微电网的能量优化管理、微电网的经济性评价等诸多内容。本书还对国内外分布式电源与微电网并网相关技术标准进行了总结,并列举了各具特色的微电网工程示范案例以供参考。

本书内容理论联系实际,既可作为分布式电源与微电网的科研工作者的学习用书,也可供电力企业相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布式电源与微电网并网技术/苏剑等著. —北京:中国电力出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5123-8271-8

I. ①分… II. ①苏… III. ①电源-研究 IV. ①TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 221408 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

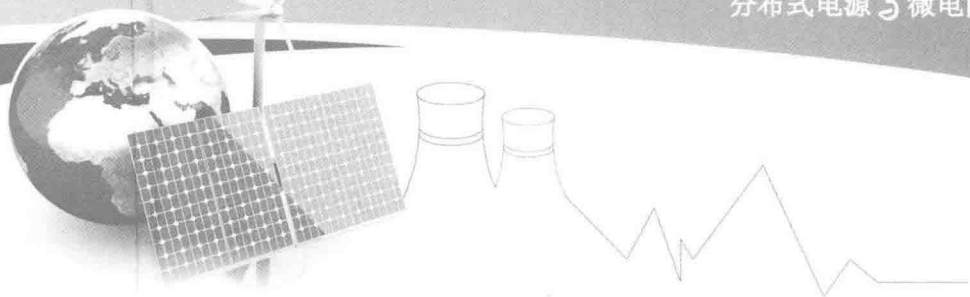
*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 282 千字
印数 0001—2000 册 定价 56.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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



序

伴随着新能源的发展，传统电网面临越来越多的挑战，不仅需要适应大量高渗透率的分布式能源和能量存储系统接入，并有效隔离新能源对电网的不利影响，更需要满足智能电网飞速发展的实际需求。因此，开发分布式能源并解决其接入电网的一系列问题受到了全社会的广泛关注。根据我国规划，到 2015 年，分布式光伏装机容量达到 2000 万 kW，建设 100 个分布式光伏发电规模化应用示范区，100 个光伏发电应用示范小镇及示范区。2020 年，分布式光伏装机容量将达到 6000 万 kW，其发展势不可挡。

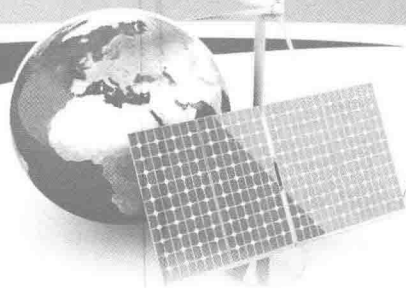
目前阶段，配电网主要面临分布式电源特性不稳定，准入规模不确定，配电网相应规划、运行、控制、保护、评估等配套技术不完善等发展瓶颈。为了规避分布式电源出力的不确定性对配电网的不良影响，微电网概念应运而生，但由于其设备种类繁多、控制方式和运行特性各异，同时也带来了微电网运行控制等诸多难题。

本书是一本定量分析分布式电源接入配电网影响、介绍分布式电源前沿控制技术及样机设计、以实际工程为案例介绍微电网运行控制的学术专著，书中汇聚了该领域最新发布的科研成果，有鲜明的行业特色，具有较高的学术价值和参考价值。

本书的作者苏剑长期从事该领域的科研工作，曾主持和主研参加了多项国家“863”计划及国家电网公司“十二五”科技规划中配电网与分布式供电技术领域相关课题的研究工作，取得了该领域的一系列学术成就。本书应广大电力系统规划运行相关人员的推荐和要求，由作者苏剑和其课题组研究人员总结近年来国家电网公司在分布式电源与微电网并网技术领域的重要研究成果和工程实践编纂而成，对于广大从事分布式电源与微电网领域工作的研究和工程技术人员有重要的参考价值。

2015 年 12 月

* 王成山为“长江学者奖励计划”特聘教授、天津大学教授。



前 言

进入 21 世纪,随着传统煤炭、石油等一次能源的日益枯竭,开发分布式可再生能源已成为全世界能源战略的重要方向。我国不仅面临传统一次能源的短缺问题,还面临环境污染这一严峻的现实问题。因此,开发分布式能源并解决其接入电网的一系列问题具有重要性和迫切性。按照国家新能源规划,分布式能源将以开发负荷中心附近的太阳能、风能、小水电等清洁能源为主,到 2020 年,分布式能源的装机容量将达到所有装机容量的 10%~15%,其发展势不可挡。

将分布式能源转化为电能并送电上网,技术上已无困难,伴随太阳能、风能、小水电发电等间歇性分布式电源装机容量的快速上升,传统的无源配电网逐渐变成有源网络,但相应的配套技术储备落后,仍面临分布式电源特性不稳定、准入规模不确定的难题,以及配电网规划、运行、控制、保护、评估等配套技术不完善等发展瓶颈。主要体现在:分布式电源对配电网带来了可靠性和稳定性等多个方面的新问题;目前的分布式电源并网技术由于没有充分考虑配电网时变问题,可靠性、鲁棒性较差。为了规避分布式电源出力的不确定性以及对配电网的不良影响,提高电力系统的供电可靠性,微电网概念应运而生,但由于其设备种类繁多、控制方式和运行特性各异,因此也带来了运行控制等诸多难题。

本书围绕分布式电源接入配电网的影响、分布式电源并网运行控制、微电网技术三个核心方向,在全面介绍各种典型类型电源特性及接口组成的基础上,定性、定量分析了分布式电源接入后对配电网的电压分布、短路电流特性、电能质量控制、继电保护等方面的影响,重点论述了分布式电源单机及多机运行控制技术,并在微电网相关技术中介绍了微电网内各个单元协调运行、微电网的能量管理、微电网的经济性评价等诸多内容。本书中,作者还根据多

年实际工作经验，介绍了蒙东微电网等案例，为读者深入了解微电网的运行与管理提供了宝贵的参考资料。

伴随第三次能源革命对电源、电网、储能和通信等领域的全新要求，未来分布式电源与微电网技术的创新点仍将集中在并网保护、运行控制和电能质量复合控制、分布式电源与微电网和配电网同步运行、大规模分布式电源接入的需求侧响应及“源网荷”互动、分布式电源与配电网的能量流与信息流交互、稳态孤岛及故障孤岛运行控制等方向，这些方向的创新都离不开对分布式电源接入配电网影响机理、分布式电源并网鲁棒控制技术以及以微电网为代表的分布式电源和负荷的局域管理技术的继续研究。能源互联网、主动配电网等框架的推动也需要上述方向的研究不断跟进和挖掘，从而使得分布式电源和微电网能够更好地以规范、标准、友好、互动、灵活的姿态融入智能电网。

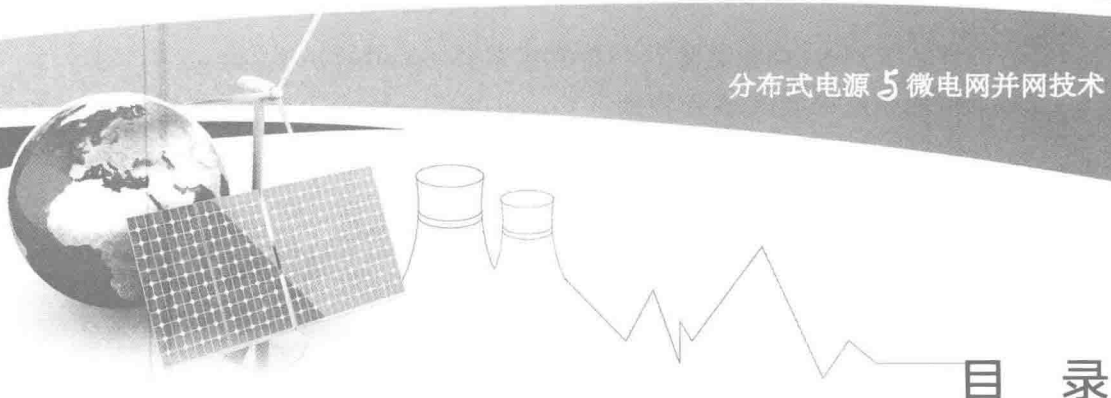
全书共分为七章：第1章概述了分布式电源和微电网的概念，介绍了近年来国内外分布式电源与微电网发展的现状；第2章描述了分布式光伏、风力发电、冷热电三联供这三种典型的分布式电源应用的运行特性，并将储能作为分布式供能系统中重要组成部分专门进行了介绍；第3章从对配电网潮流和电压分布的影响、对配电网短路电流和继电保护的影响、对配电自动化的影响、对配电网供电可靠性和电能质量的影响几方面分析了分布式电源接入对配电网的影响；第4章介绍了分布式电源并网运行控制技术，以电压源型分布式电源为例，在单机运行上重点介绍了虚拟同步发电机的设计和硬件实现，在多机运行控制上提出了改进下垂控制方法，并探讨了分布式电源孤岛检测和反孤岛防护措施；第5章阐述了分布式电源构成的微电网的典型结构、协调控制与优化运行、能量优化管理，并给出了经济性评价结论；第6章结合工程实践，介绍了几个具有特色的分布式电源及微电网示范工程；第7章介绍了分布式电源及微电网并网相关技术标准。

本书为国家电网公司电力科技著作出版项目。本书所论述的分布式电源与微电网并网技术相关内容，是基于作者多年来对大规模分布式电源与微电网接入配电网瓶颈问题的思考，总结多年以来标准的制修订工作以及多项工程实践经验，同时参考国内外一些专家学者和组织机构的研究思路形成的研究成果。在此，向众多参考文献的作者表示衷心的感谢！希望本书的出版能够对分布式电源与微电网技术方向的研究有所帮助。

由于知识水平有限，书中难免有不妥之处，希望读者能提出改进的宝贵意见，我们将不胜感激。

作者

2015年10月



目 录

序
前言

1	概述	1
1.1	分布式电源与微电网的概念	1
1.1.1	分布式电源的概念及分类	1
1.1.2	微电网概念及其典型种类	9
1.2	国内外分布式电源与微电网发展现状	15
1.2.1	国外分布式电源发展现状	15
1.2.2	国外微电网发展现状	15
1.2.3	国内分布式电源发展现状	16
1.2.4	国内微电网发展现状	17
2	典型分布式电源运行特性及系统组成	19
2.1	光伏系统功率特性及数学建模	19
2.1.1	光伏并网基本构成与类型	19
2.1.2	光伏发电基本原理	20
2.1.3	光伏发电数学模型	21
2.1.4	光伏发电控制策略	23
2.2	风力发电系统分类及其数学模型	25
2.2.1	风力发电系统基本特性	25
2.2.2	风力发电机的主要类型	28
2.2.3	典型风力发电系统模型及控制策略	30
2.3	冷热电三联供系统运行特性及数学模型	36
2.3.1	CCHP 系统构成	36

2.3.2	典型 CCHP 系统	36
2.4	储能系统分类及运行特性	39
2.4.1	储能技术原理及其分类应用	39
2.4.2	电池储能系统及其应用	45
3	分布式电源对配电网的影响	51
3.1	分布式电源对配电网潮流和电压分布的影响	51
3.1.1	分布式电源对配电网潮流的影响	51
3.1.2	分布式电源对配电网电压分布的影响	52
3.2	分布式电源对配电网短路电流及继电保护的影响	54
3.2.1	分布式电源对配电网短路电流的影响	54
3.2.2	分布式电源对继电保护的影响	56
3.3	分布式电源接入对配电自动化系统的影响	59
3.3.1	配电自动化系统传统故障定位策略	59
3.3.2	以专线方式接入时分布式电源对传统故障定位策略的影响	60
3.3.3	以馈线方式接入时分布式电源对传统故障定位策略的影响	60
3.3.4	分布式电源接入对配电网运行监控的影响	61
3.4	分布式电源对配电网供电可靠性的影响	63
3.4.1	分布式电源作为配电站	63
3.4.2	分布式电源等效成有额定容量的电源	63
3.4.3	分布式电源作为随机电源	63
3.5	分布式电源对配电网电能质量的影响	64
3.5.1	分布式电源并网对电能质量的不利影响	64
3.5.2	分布式电源并网对电能质量的有利影响	65
3.6	分布式电源的最大准入容量计算	66
3.6.1	稳态约束	66
3.6.2	暂态约束	68
4	分布式电源并网运行控制技术	70
4.1	并网逆变器控制技术概述	70
4.1.1	一般控制策略	70
4.1.2	前沿控制策略	74
4.2	并网逆变器的虚拟同步发电机控制	80
4.2.1	虚拟同步发电机技术	80
4.2.2	同步逆变器控制参数设计	86
4.2.3	独立中线模块控制参数设计	92
4.2.4	预同步控制策略	93

4.3	多个分布式电源运行及协调控制技术	96
4.3.1	分布式电源的协调控制技术概述	96
4.3.2	改进功率下垂控制器设计	97
4.4	分布式电源的孤岛检测	105
4.5	基于扰动负荷的反孤岛防护措施	110
4.5.1	扰动负荷基本原理	110
4.5.2	低压反孤岛装置的扰动负荷计算模型	110
5	微电网技术	114
5.1	微电网典型结构	114
5.1.1	交流微电网	114
5.1.2	直流微电网	117
5.1.3	交直流混合微电网	119
5.2	微电网的协调控制与优化运行	121
5.2.1	微电网协调控制概述	121
5.2.2	微电网多电源协调控制策略	122
5.2.3	分布式电源及微电网接入系统实时控制策略	126
5.3	微电网的能量优化管理	139
5.3.1	微电网能量优化管理方法	139
5.3.2	微电网能量管理系统	150
5.4	微电网的经济性评价	153
5.4.1	微电网经济性影响因素分析	153
5.4.2	微电网成本效益构成	154
5.4.3	微电网技术经济评价模型	155
5.4.4	微电网发展与定位	156
6	分布式电源及微电网工程实践	158
6.1	浙江嘉兴分布式光伏并网项目	158
6.1.1	嘉兴农村住宅小区光伏发电并网项目	158
6.1.2	“渔光互补”光伏发电项目	159
6.2	北京延庆分布式新能源并网项目	160
6.2.1	八达岭太阳能热发电站并网	161
6.2.2	德青源 2MW 沼气发电	161
6.3	蒙东陈旗微电网工程	162
6.4	厦门五缘湾微电网工程	163
6.5	海岛微电网工程	165

7 分布式电源及微电网并网相关技术标准	167
7.1 国外分布式电源及微电网并网标准现状	167
7.1.1 国际电工委员会制定的相关标准	167
7.1.2 美国电气与电子工程师协会制定的相关标准	168
7.1.3 世界上主要国家制定的相关标准	169
7.2 国内分布式电源及微电网并网标准现状	171
7.3 我国分布式电源及微电网并网标准体系	171
7.3.1 分布式电源并网标准体系	172
7.3.2 微电网并网标准体系	174
7.4 我国分布式电源并网标准和国际标准的比较	176
7.4.1 一般性要求和接入原则	176
7.4.2 分布式电源并网渗透率的规定	176
7.4.3 分布式电源并网电压等级选择	177
7.4.4 有功控制和频率响应	177
7.4.5 无功控制和电压调节	178
7.4.6 故障穿越能力	180
7.4.7 分布式电源并网电能质量要求	181
7.4.8 分布式电源并网继电保护要求	182
7.4.9 并网与同步	183
7.5 分布式电源并网标准的发展趋势分析	183
参考文献	185
索引	190



概 述

1.1 分布式电源与微电网的概念

1.1.1 分布式电源的概念及分类

1.1.1.1 分布式电源概念

随着常规能源的衰竭、环境污染的加剧和全球气候的变暖,各种自然灾害频繁发生,对人类的生存构成了挑战。各国能源专家开始不断地积极寻求合适的新能源来替代现有的对环境构成污染的能源。电力是一种清洁的二次能源,为了保障社会可持续发展,越来越多的新能源和新型的储能装置将应用到电力系统中。风能、太阳能、生物质能等新能源的应用,有很大部分是分散式的,且容量较小。这些分散布置在电力负荷附近的、容量在数千瓦至数十兆瓦之间的、为环境兼容的、节能的发电装置,如燃气轮机、内燃机、小型光伏电站、燃料电池、风力发电机等,称为分布式电源(distributed generation, DG)。

分布式电源的最大容量、接入方式、电压等级、电源性质等的界定标准,国际上还没有通用的权威定义。统计多个典型国家(组织)关于分布式电源的定义,具有代表性的如下:

(1) 国际能源署。国际能源署对于分布式电源的定义:服务于当地用户或当地电网的发电站,包括内燃机、小型或微型燃气轮机、燃料电池和光伏发电装置,以及能够进行能量控制及需求侧管理的能源综合利用系统。

(2) 美国电气与电子工程师协会。美国电气与电子工程师协会对于分布式电源的定义:通过公共连接点接入当地配电网的发电设备或储能装置,不直接接入输电网,总容量不超过 10MVA。

(3) 丹麦能源环境部。丹麦能源环境部对于分布式电源的定义:靠近用户,不连接到高压输电网,装机规模小于 1 万 kW 的能源系统。

(4) 我国。我国对分布式电源的定义目前也还未有统一公认的定论。综合国际上有关国家及组织的界定标准和我国电网特点,以下分别给出国家发展改革委员会、国家能源局和国家电网公司关于分布式电源的解释:

1) 2013 年 7 月 18 日,发改能源〔2013〕1381 号文《国家发展改革委关于印发〈分

布式发电管理暂行办法》的通知》中指出：分布式发电，是指在用户所在场地或附近建设安装，运行方式以用户侧自发自用为主、多余电量上网，且在配电网系统平衡调节为特征的发电设施或有电力输出的能量综合梯级利用多联供设施。本办法适用于以下分布式发电方式：①总装机容量5万kW及以下的小水电站；②以各个电压等级接入配电网的风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等新能源发电；③除煤炭直接燃烧以外的各种废弃物发电，多种能源互补发电，余热余压余气发电、煤矿瓦斯发电等资源综合利用发电；④总装机容量5万kW及以下的煤层气发电；⑤综合能源利用效率高于70%且电力就地消纳的天然气热电冷联供等。

2) 2013年7月20日，国能综新能〔2013〕267号《国家能源局综合司关于征求〈分布式光伏发电项目管理暂行办法〉意见的函》中指出：分布式光伏发电是指在用户所在场地或附近建设安装、运行方式以用户侧自发自用为主、多余电量上网，且在配电网系统平衡调节为特征的光伏发电设施。

3) 2013年11月29日，国家电网公司对分布式电源的适用范围定义：指在用户所在场地或附近建设安装、运行方式以用户侧自发自用为主、多余电量上网，且在配电网系统平衡调节为特征的发电设施或有电力输出的能量综合梯级利用多联供设施，包括太阳能、天然气、生物质能、风能、地热能、海洋能、资源综合利用发电（含煤矿瓦斯发电）等。

该定义适用于以下两种类型分布式电源（不含小水电）：

第一类：10kV及以下电压等级接入，且单个并网点总装机容量不超过6MW的分布式电源。

第二类：35kV电压等级接入，年自发自用电量大于50%的分布式电源；或10kV电压等级接入且单个并网点总装机容量超过6MW，年自发自用电量大于50%的分布式电源。

接入点为公共连接点、发电量全部上网的发电项目，以及小水电和除第一、二类以外的分布式电源项目。

归纳主要国家（组织）关于分布式电源的界定标准，分布式电源应具有如下四个基本特征。

特征一：靠近负荷，直接向用户供电。这是分布式电源的最本质特征，适应分散能源资源的就近利用，实现电能就地消纳，潮流一般不超越上一级变压器，各国定义均提及该特征。

特征二：装机规模小，一般为10MW及以下。18个典型国家（组织）中，13个为10MW及以下，3个为数十兆瓦级，2个为100MW级。美国、法国、丹麦、比利时等国家均将分布式电源的接入容量限制为10MW左右，瑞典的接入容量限制为1.5MW，新西兰为5MW。由于英国允许分布式电源的接入电压等级较高，相应的允许接入容量也较大，可达100MW，但从实际情况来看，接入66kV电压等级的大容量分布式电源所占比例很少。

特征三：通常接入中低压配电网。由于各国中低压配电网的定义存在差异，因此具体的接入电压等级也略有不同，一般为10（35）kV及以下。18个典型国家（组织）中，8个为10kV及以下，7个为35kV级，3个为110（66）kV级。德国、法国、澳大利亚等

国家均将分布式电源接入电压等级限制在中低压配电网，国外的中低压配电网上限约为 30kV。英国允许分布式电源接入 66kV 电压等级，这是由于 66kV 在英国仍属于中压配电网范畴。

特征四：节能环保。通常发电类型主要为可再生能源发电、资源综合利用发电、高效天然气多联供（能效一般达到 70% 以上）。

根据不同的利用形式，分布式电源还可分为可再生能源分布式电源、资源综合利用分布式电源和冷热电联供分布式电源。针对我国小水电发展历史悠久、非水电可再生能源起步较晚的情况，为便于对新能源技术的研究，通常我国将可再生能源分布式电源细分为小水电分布式电源和新能源分布式电源。上述几种利用形式的分布式电源具有不同特点，有必要对其进行分类研究。

1.1.1.2 分布式电源分类

常见的、比较受到关注的分布式发电技术有风力发电技术、太阳能光伏发电技术、微型燃气轮机发电技术和燃料电池发电技术等。

1. 风力发电技术

风力发电区别于传统发电模式的最大特点是：风能是随机的，风向和风速都是随时随机变化的，因其输入的不确定性导致功率输出的不确定性。风力发电的前景主要是用于无电网的地区，为边远山区和海岛居民提供生活和生产所需的电力。风力发电技术在新能源领域相对成熟，经济指标逐渐接近清洁煤发电。

风力发电按其规模可以分为两种：一种是大中型风电场（50MW 及以上），直接与输电网连接；另一种是单个风力发电机组或由此组成的小型风电场，以分布式电源形式分布在配电网中，称之为分布式风电源（distributed wind generation, DWG）。由于风能是随时随机变化的，其出力具有明显的间歇性和波动性，当大量 DWG 接入配电网时，会影响电力系统的正常运行。

2. 太阳能光伏发电技术

随着能源的枯竭和环保压力的增加，太阳能光伏发电技术越来越受到重视。光伏系统应用非常广泛，其基本发电模式可以分为两大类：独立发电系统和并网发电系统。其中，并网发电系统是光伏发电技术发展的趋势。太阳能光伏发电系统最大的特点是：太阳能电池组件产生的直流电通过逆变器逆变转换成符合电网要求的交流电后直接并入电网。由于将电能直接输入电网，可免除配置蓄电池，可以充分利用光伏方阵发出的电力，从而减小了能量的损耗，并降低了成本。光伏发电系统通常能够并行使用市电和太阳能电池方阵作为本地交流负载的电源，可以降低整个系统的负载缺电率，同时光伏发电系统还可以对配电网起到调峰的作用。

太阳能光伏发电系统的主要优点有：

(1) 结构简单，体积小。能够独立供电的太阳能电池组件和方阵都比较简单，输出 45~50W 的晶体硅太阳能电池组件，体积为 450mm×985mm×4.5mm，质量为 7kg。

(2) 易安装，易运输，建设周期短。只要用简单的支架把太阳能电池组件支撑起来，使之面向太阳，即可以发电，特别适宜于作为小功率移动电源。

(3) 容易启动，维护简单，随时使用，保证供应。在一套设计精良的太阳能光伏发



电系统中，蓄电池往往处于浮充状态，无论白天、晚上都可供电，其所消耗的电能由太阳能电池在晴天时自动补充，启动和维护都十分简单。一年中往往只需要在遇到连续阴雨天气最长的季节去检查太阳能电池组件表面是否被玷污、接线是否可靠、蓄电池电压是否正常等。

(4) 清洁，安全，无噪声。光伏发电系统本身并不消耗工质，不向外界排放废物，无转动部件、无噪声，是一种理想的清洁安全的能源。

3. 微型燃气轮机发电技术

微型燃气轮机是指功率为数百千瓦以下的，以天然气、甲烷、汽油和柴油等为燃料的超小型燃气轮机。其工作原理与普通的同步发电机相似，具备调速系统和励磁系统。调速系统可以根据负荷水平对有功功率进行调整。微型燃气轮机通过励磁和电力电子装置保持自身电压输出的稳定，在配电网潮流计算中，可以当做 PV 节点来考虑。微型燃气轮机是目前最成熟、最具有商业竞争力的分布式发电电源。与常规发电装置相比，微型燃气轮机具有以下几个方面的优点：

(1) 环保。微型燃气轮机的废气排放少，使用天然气或甲烷等燃料满负荷运行时，排放氮氧化物 NO_x 的体积分数小于 9×10^6 ；使用柴油或汽油燃料满负荷运行时，排放的 NO_x 体积分数小于 35×10^6 ；采用油井气做测试，排放的 NO_x 体积分数小于 1×10^6 。其他采用天然气作为燃料的往复式发电机产生的 NO_x 比微型燃气轮机多 10~100 倍，柴油发电机产生的 NO_x 是微型燃气轮机的数百倍。

(2) 维护少。微型燃气轮机采用独特的空气轴承技术，系统内部不需要任何润滑，节省了日常维护。每年的计划检修仅是在全年满负荷连续运行后更换空气过滤网。

(3) 效率高。微型燃气轮机发电效率可达 30%，联合发电和供热后整个系统能源利用率超过 70%。

(4) 运行灵活。微型燃气轮机既可并联在电网上运行，也可独立运行，并可在两种模式间自动切换运行。两种运行模式之间的自动切换由软件系统控制。

(5) 适用于多种燃料。微型燃气轮机适用于多种气体燃料和多种液体燃料，包括天然气、甲烷、丙烷、油井气、煤层气、沼气、汽油、柴油、煤油、酒精等。

(6) 系统配置灵活。可根据实际需要灵活配置微型燃气轮机的数量，并能够进行多单元成组控制，其中一台检修时不影响整个系统的运行。

(7) 安全可靠。微型燃气轮机是同类型产品中符合美国保险商实验所 (Underwriters Laboratories, UL) 严格标准 UL 2000 的唯一产品，它同时符合 IEEE 519、NFPA 规范、ANSI C84.1 和其他规范，保证了与电网互联的安全性。

4. 燃料电池发电技术

燃料电池是一种在等温状态下直接将化学能转变为直流电能的电化学装置。其发电原理：在催化剂的作用下，将燃料与空气或氧气之类的氧化剂相结合，发生化学反应，氢氧离子的定向移动在外电路形成电流，类似于电解水的逆过程。燃料电池发电效率高，排费量小，清洁无污染、噪声低、安装位置灵活，是分布式电源的极佳选择。

燃料电池输出的电能为直流，需要通过逆变器控制转化为交流后再进行并网。根据燃料电池自身的发电特性，得到其输出电压方程式，经逆变器逆变得其输入电网的有

功率及无功功率。通过逆变器控制参数控制有功功率和无功功率的输出，原理类似于常规发电机的调节功率，因此在潮流计算中，燃料电池可以作为 PV 节点来处理。但是逆变器的无功功率输出是有上限的，当出现无功越限时，则应当转化为 PQ 节点处理。

燃料电池具有巨大的潜在优势：

(1) 其副产品是热水和少量的二氧化碳，通过热电联产和联合循环综合利用热能，燃料电池的发电效率几乎是传统发电厂效率的 2 倍。

(2) 排费量小（几乎为零），清洁无污染，噪声低。

(3) 安装周期短，安装位置灵活，可以省去配电系统的建设。

5. 生物质能发电技术

生物质能来源于生物质。生物质能发电原理：首先将生物质能转化为可驱动发电机的能量形式（如燃气、燃油、酒精等），再按照通用的发电技术发电，然后直接提供给用户或并入电网提供给用户。

基于生物资源的自然特性，生物质能发电与大型发电厂相比，具有如下特点：

(1) 生物质能发电的重要配套技术是生物质能的转化技术，且转化设备必须安全可靠且维修保养方便。

(2) 所利用的当地生物资源发电的原料必须具有足够数量的储存，以保证持续供应。

(3) 所用发电设备的装机容量一般比较小，且多为独立运行的方式。

(4) 利用当地生物质能资源就地发电、就地利用，不需外运燃料和远距离输电，适用于居住分散、人口稀少、用电负荷较小的农牧业区及山区。

(5) 生物质能发电所用能源为可再生能源，污染小、清洁卫生，有利于环境保护。

6. 海洋能发电技术

海洋能包括潮汐能、波浪能、海流能、潮流能、海水温差能和海水盐差能等不同的能源形态。目前，海洋能发电多处处在实验阶段，比较成熟的是潮汐能发电技术。潮汐能发电原理和水力发电相似，就是利用海水涨落所造成的水位差来推动水轮机，再由水轮机带动发电机来发电。由于潮汐能发电是一项新的能源开发利用技术，因而其开发、利用技术尚需不断地加以完善、发展和提高。目前，尚需进一步发展和提高的主要技术问题，可归纳为如下几项：

(1) 泥沙淤积问题。潮汐能发电站建于海湾或河口，由于潮流和风浪的扰动，使海湾底部或外部的泥沙翻起，并带到海湾的库区里，在库区内淤积起来，从而使水库的容积逐渐缩小，水库使用寿命缩短，发电量减少，这对于潮汐能发电站是十分不利的。

(2) 海工结构物的腐蚀和海洋生物附着问题。潮汐能发电站的海工结构物长期浸泡在海水中，这对海工结构物中金属结构物部分的腐蚀是相当严重的，最终会导致结构物的损坏。同时，海水中的海洋生物会附着在金属结构物上，且难以被水流冲掉。海洋生物的附着会使结构物通流部分阻塞、转动部分失灵。因此，必须重视对于潮汐发电工程海工结构防腐蚀和防海洋生物附着问题的研究。

(3) 电力的补偿问题。潮汐能发电站在使用中有一个电站的发电功率随着潮汐的涨落而变化的问题。当潮位涨到顶峰或落到低谷时，潮位与水库内的水位差大，电站的发电功率较大；当潮位接近于水库内水位时，电站便停止发电，造成间断性的发电。这对

于用户来说，特别是对于不能中断用电的用户来说，矛盾十分突出，必须解决这一问题。

7. 地热能发电技术

地热能是来自地球深处的可再生热能。它来源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。地热能发电是以地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术。其发电的基本原理与火力发电是一样的，都是将蒸汽的热能经过汽轮机转变为机械能，然后带动发电机发电。所不同的是，地热能发电不像火力发电那样要具有庞大的锅炉，也不需要消耗燃料，它所用的能源就是地热能。地热能发电的过程就是把地下热能首先转变为机械能，然后再把机械能转变为电能的过程。

要利用地下热能，首先需要由载热体把地下的热能带到地面上来。目前能够被地热电站利用的载热体，主要是地下的天然蒸汽和热水。按照载体类型、温度、压力和其他特征的不同，可把地热能发电的方式划分为地热蒸汽发电和地下热水发电两大类。此外，还有正在研究试验的干热岩发电技术。

1.1.1.3 分布式电源接入

1. 分布式电源的接口类型

分布式电源的接口类型分为逆变器和旋转发电机两类。

(1) 逆变器类型。分布式电源经逆变器接入电网，主要包括光伏、全功率逆变器并网风机等。

(2) 旋转发电机类型。分布式电源分为同步发电机和感应发电机两类。同步发电机类型分布式电源主要包括天然气三联供、生物质能发电等，感应发电机类型分布式电源主要包括直接并网的感应式风机和双馈式风机等。

2. 分布式电源的接入电压等级

分布式电源应根据装机容量、技术经济分析结果和当地电网实际情况选择适当的接入电压等级。初步的参考标准如下：8kW 及以下可接入 220V；8~400kW 可接入 380V；400~6000kW 可接入 10kV。最终并网电压等级应根据电网条件，通过技术经济比选论证确定。分布式电源并网电压等级选择原则：若高低两级电压均具备接入条件，优先采用低电压等级接入。分布式电源并网电压等级一般可参照表 1-1 选择。

表 1-1 分布式电源并网电压等级

电源总容量范围	并网电压等级	电源总容量范围	并网电压等级
8kW 及以下	220V	400kW~6MW	10kV
8~400kW	380V	6~50MW	35、66、110kV

3. 分布式电源的并网方式

(1) 按照国家发展改革委对分布式电源的定义，分布式电源适用于总装机容量 5 万 kW 及以下的小水电站。按照分布式电源并网电压等级和并网方式，接入 10kV 及以下配电网的分布式电源主要有以下 7 种并网方式：

- 1) 分布式电源专线接入 10kV 配电网。
- 2) 分布式电源 T 接接入 10kV 配电网。
- 3) 分布式电源接入用户内部电网后专线接入 10kV 配电网。

- 4) 分布式电源接入用户内部电网后 T 接入 10kV 配电网。
- 5) 分布式电源专线接入 380V 配电网。
- 6) 分布式电源 T 接入 380V 配电网。
- 7) 分布式电源接入用户内部后 T 接入 220/380V 配电网。

(2) 按照国家电网公司对分布式电源的定义, 分布式电源适用于 35kV 及以下用户内部接入的各类分散电源。按照分布式电源并网电压等级和并网方式, 接入 10kV 及以下配电网的分布式电源主要有以下 3 种并网方式:

1) 分布式电源接入用户内部电网后专线接入 10kV 配电网 (接入容量一般应小于用户变压器容量), 如图 1-1 所示。

2) 分布式电源接入用户内部电网后 T 接入 10kV 配电网 (接入容量一般应小于用户变压器容量), 如图 1-2 所示。

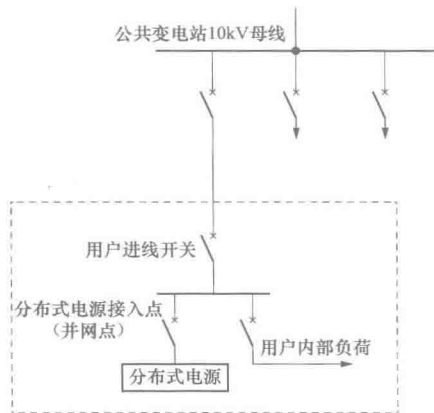


图 1-1 分布式电源接入用户内部电网后专线接入 10kV 配电网

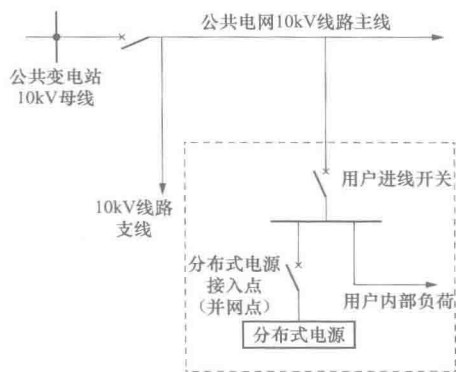


图 1-2 分布式电源接入用户内部电网后 T 接入 10kV 配电网

- 3) 分布式电源接入 220/380V 配电网 (一般接入容量小于 8kW), 如图 1-3 所示。专线接入和 T 接的含义如下:

专线接入, 是指分布式电源接入点处设置分布式电源专用的开关设备 (间隔), 如分布式电源直接接入变电站、开关站、配电室母线或环网柜等方式。

T 接, 是指分布式电源接入点处未设置专用的开关设备 (间隔), 如分布式电源直接接入架空或电缆线路方式。

1.1.1.4 分布式电源运营模式

运营模式概念最早出现在信息管理领域。20 世纪 90 年代互联网兴起以后, 运营模式成为企业界和理论界的热点话题, 其内涵也扩大到企业管理领域。运营模式意味着企业如何盈利的内容

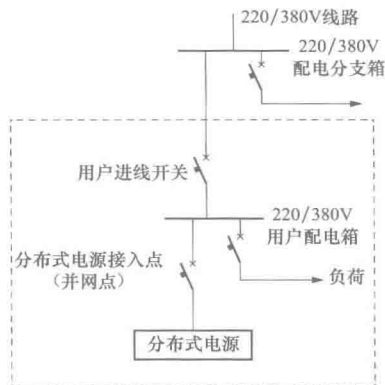


图 1-3 分布式电源接入 220/380V 配电网