



“十三五”普通高等教育本科规划教材

新能源发电系统控制

李大中 编著



“十三五”普通高等教育本科规划教材

新能源发电系统控制

编著 李大中
主审 张 欣



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书在参阅大量国内外新能源发电文献资料的基础上,较为系统、全面地介绍了生物质能、太阳能、风能、核能、地热能、海洋能、燃料电池等新能源发电系统的结构组成及控制技术,介绍了基于分布式新能源发电的特征和综合利用,以及分布式新能源发电与微电网技术等。全书共分为9章,主要内容包括新能源发电系统控制导论、生物质能发电、太阳能发电、风能发电、核能发电、地热能发电、海洋能发电、燃料电池发电、分布式新能源发电接入微电网控制技术。为帮助读者深入理解和掌握各部分内容,书中每章后面均附有思考题。

本书可作为高等院校电气信息类自动化、测控技术与仪器、热能动力工程、电气工程及自动化等专业的新能源发电与控制课程及相近课程的本科生、研究生教材或参考书。就本书的深度和广度而言,也适于控制工程类工程硕士等专业学生,以及成人高等教育工科专业学生学习,也可作为新能源发电技术领域教师、科研和工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电系统控制/李大中编著. —北京:中国电力出版社, 2016.9

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9624-1

I. ①新… II. ①李… III. ①新能源-发电-高等学校-教材 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 182276 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>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 9 月第一版 2016 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 366 千字

定价 36.00 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

前言

能源是一个国家发展的重要基础性产业，是人类生产和生活的必需基本物质保障。目前全世界的能源消耗主要依靠煤炭、石油和天然气等化石能源，而化石能源的有限性和化石能源开发利用过程中引发的一系列环境问题，对经济和社会的可持续发展产生了严重的制约。为了实现能源与社会经济、环境的可持续发展，除了积极实现常规能源的高效化、优质化利用、提高能源利用效率外，开发利用生物质能、太阳能、风能、地热能、海洋能等新能源也是重要途径之一。

我国已成为世界能源生产和消费大国，随着社会和经济的快速发展，如何改善能源结构、保障能源安全、减少环境污染、实现低碳经济、促进经济和社会可持续发展，是我国面临的一个重大战略问题。新能源不仅是资源丰富的可再生能源，而且不产生或很少产生污染物，它既是近期重要的补充能源，又是未来能源结构的基础，对能源的可持续发展起着重要的作用。从长远来看，人类必将逐步过渡到以可再生能源为主的可持续能源系统。

大电网与以新能源为主的分布式微电网的结合，被世界许多能源和电力专家公认是节省投资、降低能耗、提高电力系统稳定性和灵活性的主要方式，是 21 世纪电力工业的发展方向。此外，现在世界各国都在提倡“绿色环保”，采用以新能源为代表的分布式发电，充分利用各地丰富的“清洁能源”，这对于我国能源可持续发展的战略具有重大意义。分布式新能源发电及其应用是 21 世纪最受重视的高科技领域之一，是电力系统的一个新的发展方向。随着对环境及能源使用效率的进一步重视，分布式新能源发电在我国具有广阔的应用前景。

本书系统全面地介绍了生物质能、太阳能、风能、核能、地热能、海洋能、燃料电池发电原理及工程应用技术，以及分布式新能源发电接入微电网控制技术。

全书共分为 9 章，第 1 章新能源发电系统控制导论，主要介绍了新能源概念及分布式新能源发电的类型、现状，新能源发电发展前景及给经济和社会带来的效益；第 2 章生物质能发电，重点对生物质气化发电、燃烧发电、垃圾焚烧发电和沼气发电系统的特点、分类及工艺过程和控制技术做了介绍；第 3 章太阳能发电，对槽式太阳能热发电、塔式太阳能热发电及碟式太阳能热发电系统的结构组成、工作原理，以及聚光器、热能接收器和热循环工艺控制过程做了深入的分析；第 4 章风能发电，主要介绍了风能发电系统运行过程的三种典型控制方式，以及风能发电机组的变速恒频控制策略；风能发电系统的并网控制技术及并网系统的运行，以及并网安全运行与防护措施；第 5 章核能发电，主要介绍了核反应堆的工作原理，核电站核反应装置的堆型和典型工艺流程，核能发电的技术设备及发电功率的启停控制及核电站的运行与监控方式；第 6 章地热能发电，主要介绍了地热能发电系统的实现形式与工作原理，简要介绍了用地热能实现地热空调和地源热泵技术原理，分析了地热能发电中存在的主要问题及未来发展前景；第 7 章海洋能发电，主要介绍了利用海洋潮汐能、海流能、波浪能、海洋温差能和海洋盐差能发电原理和系统工艺流程及装置；对海洋能发电技术的可行性和社会经济效益做了综合评价，指出利用海洋能发电存在的主要问题和制约因素，以及

未来发展前景；第 8 章燃料电池发电，重点对几类典型燃料电池 PAFC、PEMFC、MCFC、SOFC 发电系统的组成及工作原理做了介绍，结合燃料电池发电系统的构成，对发电过程控制技术进行了分析；第 9 章分布式新能源发电接入微电网控制技术，介绍了微电网概念与微电网结构，以及微电网国内外研究动态；分析了微电网系统的关键控制技术，介绍了微电网储能技术及储能系统并网控制技术；介绍了分布式新能源发电系统接入微电网典型控制技术，以及含有微电网的智能配电网保护控制。

感谢河北大学张欣教授对书稿认真仔细的审阅，并在审稿过程中提出了很好的修改建议。感谢中国电力出版社对本书的支持。本书是作者在多年从事新能源发电教学和科研，并在系统查阅、参考大量国内外同行发表的最新文献、资料的基础上整理编写完成的，在此特对他们表示衷心感谢。

限于作者水平，书中难免存在疏漏与不足之处，敬请读者指正。

作 者
2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 新能源发电系统控制导论	1
1.1 能源与可持续发展	1
1.2 能源的分类与基本特征	3
1.3 新能源发电	7
1.4 新能源发电系统控制技术	10
1.5 新能源发电技术的未来发展及意义	18
本章小结	21
思考题	21
第 2 章 生物质能发电	22
2.1 生物质及其特性	22
2.2 生物质及其型煤压缩成型燃料	25
2.3 生物质气化发电系统控制技术	29
2.4 生物质燃烧发电系统控制技术	35
2.5 垃圾焚烧发电系统控制技术	42
2.6 沼气发电系统控制及综合利用	52
本章小结	60
思考题	60
第 3 章 太阳能发电	61
3.1 太阳能及太阳能利用	61
3.2 太阳能光伏发电系统组成及工作原理	65
3.3 光伏发电系统 MPPT 控制技术	71
3.4 独立式光伏发电系统控制技术	75
3.5 并网式光伏发电系统控制技术	79
3.6 太阳能热发电系统控制技术	85
本章小结	96
思考题	96
第 4 章 风能发电	97
4.1 风能发电的特点及国内外发展概况	97
4.2 风能发电系统及其工作原理	98
4.3 风能发电系统控制	110
4.4 风力机偏航系统调节与控制	114
4.5 风力发电机组的控制策略	115

4.6 风力发电机组的并网控制技术	123
4.7 风能发电的经济性评价	132
本章小结	135
思考题	135
第5章 核能发电	136
5.1 核能的性质、特点及其利用	136
5.2 核能发电相关基础知识	138
5.3 核能发电系统与设备	140
5.4 核电站的运行与监控	142
5.5 核能发电的经济技术性评价	146
本章小结	147
思考题	147
第6章 地热能发电	148
6.1 地热能类型及其利用	148
6.2 地热能发电系统原理及控制技术	151
6.3 地热空调	155
6.4 地源热泵	156
6.5 地热发电存在的主要问题	157
本章小结	157
思考题	157
第7章 海洋能发电	158
7.1 海洋能及其利用	158
7.2 海洋能发电原理及控制技术	162
7.3 海洋能发电的综合评价	180
7.4 我国海洋能发电存在的问题及前景展望	182
本章小结	184
思考题	184
第8章 燃料电池发电	186
8.1 燃料电池概述	186
8.2 燃料电池发电系统工作原理	191
8.3 燃料电池发电系统控制	196
8.4 燃料电池分布式发电技术	199
8.5 燃料电池发电系统应用分析	200
8.6 燃料电池资源评估及经济性分析	202
本章小结	205
思考题	205
第9章 分布式新能源发电接入微电网控制技术	206
9.1 分布式新能源发电技术	206
9.2 微电网概念	210

9.3 基于分布式电源的微电网技术 217

9.4 分布式新能源发电系统接入微电网控制技术 221

本章小结..... 224

思考题..... 224

参考文献..... 226

第 1 章 新能源发电系统控制导论

可再生能源（太阳能、风能、生物质能、水能、海洋能）是新能源重要的组成形式，是自然界中可以再生、持续利用、取之不尽、用之不竭的一次能源。科学、高效地利用可再生能源，提高能源的综合利用效率，是保障人类社会可持续发展的可靠途径。新能源发电与控制技术包括：①利用可再生能源和清洁能源发电，以便持续获得二次清洁能源——电能；②对电能通过变换与控制，满足高质量的终端能源消费需求和电力的高效管理。

1.1 能源与可持续发展

1.1.1 我国的能源结构与储备

近二三百年来，由于人类对化石能源的过度依赖，致使化石能源面临日益枯竭的危机。为了保证人类未来能源的可持续供应，必须进入利用新能源和节约能源的时代。我国是一个拥有超过 13 亿人口的国家，各种资源的人均占有率都远远低于世界平均水平。随着我国经济的高速发展和对外开放的进一步深入，在政治、经济、社会各个领域的发展与变化都会成为全世界关注的焦点。自 20 世纪 90 年代以来，我国的能源改革与发展，特别是能源的可持续供应问题，以及可能给世界能源形势带来的影响，一直是世界各国特别是发达国家争论的议题。深入研究和解决利用新能源带来的一系列科学技术问题和经济性问题，是我国能源储备与可持续发展战略的当务之急。

1. 我国的能源结构

我国是一个能源大国，在能源结构中煤炭储量最为丰富，已探明的煤炭保有储量超过 1 万亿 t，可采储量在 1800 亿 t 以上，仅次于俄罗斯、美国，位居世界第三。再加上地下 1500m 以内的深层资源，总量估计可达 5 万亿 t。因此，煤炭是我国分布最广、最为丰富的矿物资源。但是，我国又是一个能源匮乏国，我国的人均能源资源占有量为全世界人均水平的 1/2，仅为美国人均水平的 1/10。而且，在能源结构的组成中，75% 以上是煤，在常规化石能源中，煤炭资源占 90% 以上。

从传统的一次能源消费与开采情况看，我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，占世界煤炭产量的 1/4。虽然我国能源生产持续增长，且其增长速度大于能源消费的增长速度，但仍存在能源缺口。

我国是世界上少数几个以煤为主的能源消费国，这就决定了我国能源政策的制定与实施都必须优先考虑煤，以煤为能源消费主体的格局还将持续很长一段时间。从常规能源消费来看，我国的人均消费水平也在逐年增长。2007 年，我国煤、石油和天然气的人均消费分别为 1.92t 煤、0.28t 油和 57.51m³ 气，分别是 2001 年的 1.9、1.5 倍和 2.6 倍。尽管我国的能源消费中煤占主体，但人均消费量依然低于美国、德国等发达国家。以 2006 年为例，当年我国人均煤消费量仅为美国的 47.9%、德国的 90.9%。

通过以上数据可看出，我国的能源结构仍以煤为主，煤多油少是我国能源结构的基本特

点,今后 20 年,甚至到 21 世纪中叶,我国以煤为主的能源结构将不会改变,煤炭仍将是当前和今后我国能源的一个重要组成部分。

2. 我国的资源和能源储备

我国是世界上人口最多的国家,人口密度高于世界平均水平,也高于亚洲国家平均人口密度,与经济社会生产需求相比,人力资源相对过剩,但与新加坡、日本、德国、英国、法国、韩国等先进工业化国家相比,我国的人口密度并不算高。无论是土地面积、土地资源、林木资源、水力资源还是矿藏资源,我国的资源基础储量都比较丰富,但按人均占有量计算,我国大多数资源都低于世界平均水平。而从国土面积的资源禀赋量来看,我国各种资源丰度不等。我国人口约占世界总人口的 21%,国土面积占世界的 7.1%,耕地占世界的 7.1%,草地占世界的 9.3%,水资源占世界的 7%,森林面积占世界的 3.3%,石油占世界的 2.3%,天然气占世界的 1.2%,煤炭占世界的 12%。

我国能源短缺在很大程度上是能源利用结构同资源禀赋结构矛盾的表现。现在,我国已成为世界第二大能源消费国,依靠大量消费能源推动了我国经济的高速增长,但也使我国经济增长越来越接近资源和环境条件的约束边界,煤电油供需矛盾相当突出。随着国际石油紧张状况的影响和我国能源资源约束的日益突出,能源资源情况不容乐观。

综上所述,我国能源结构的核心问题表现在:①能源结构以煤为主,在我国一次能源生产与消费构成中,煤炭比例超过 2/3;②石油安全问题日趋显著,预计到 2020 年,石油的对外依存度将达到 69%,我国能源安全,尤其是石油安全问题越来越突出;③燃煤污染已给生态环境带来严重问题,而电力、建材、冶金、化工等能源消费密集的行业又是我国的支柱产业,它们占大气污染的 70%以上。

随着经济发展水平的不断提高,社会对资源和环境的关注越来越强、标准越来越高,继续大量耗费资源和污染环境,走粗放式工业增长的道路,已不可能支撑我国工业的持续发展。我国已出台一系列开发应用新能源的鼓励政策,积极发展煤制油产业,使我国油品供应和价格稳定建立在主要依靠国内生产的基础上;此外,高度重视和加快推广煤炭深加工和高效燃烧及先进火力发电技术、煤炭燃烧污染控制与废弃物处理等洁净煤先进技术,建立高度节约型的循环经济体制,深入研究、大力开发和利用新能源,是我国实现未来经济和社会可持续发展的唯一选择。

1.1.2 我国的可持续发展战略

我国的能源基础能否支撑经济到 2020 年比 2000 年再翻两番,在传统化石能源不断枯竭的严峻现实面前,建立资源节约型社会、大力开发利用可再生能源,扩大清洁、绿色能源在能源结构中的比重,已提上我国经济发展的重要战略位置。我国可再生能源分布广泛,无论是近期还是远期,因地制宜、就地就近开发可再生能源,将是调整能源结构、保护环境、增强能源安全、实现可持续发展的重要战略选择。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》要求,到 2020 年,我国可再生能源在能源结构中的比重,将从 2006 年的约 7%提高到 16%左右。我国具有使用可再生能源的条件和传统,近年来可再生能源的开发和利用取得长足发展,以年均超过 25%的增速成为世界能源领域增长最快的亮点。随着技术和管理水平的不断提高、产业规模的不断扩大,可再生能源在保障能源供应、实现可持续发展等方面将发挥越来越重要的作用。此外,2004 年制定的《中国能源中长期发展规划》也明确指出,要大力开发水电、积极推进核电

建设,鼓励发展风电和生物质能等可再生能源,在提供优质、经济、清洁的终端能源的同时,尽量减少能源开发与利用给生态环境造成的负面影响,促进人与自然的和谐发展。为此,我国将以水电、沼气发电、秸秆发电、太阳能供热等常规清洁能源转换成熟技术和风电、光伏发电、燃料电池、燃气机组热电联产分布供电等具有大规模发展潜力的新技术为重点,因地制宜、多能互补;不断提高可再生能源在我国能源结构中的比重,并使其在解决全国农村的生产、生活用能方面发挥重大作用。在2006年年初,我国正式颁布了《中华人民共和国可再生能源法》,陆续出台了一系列鼓励政策与配套措施,这标志着可再生能源的利用已进入法制化、规范化和可持续发展的新阶段。

1.2 能源的分类与基本特征

1.2.1 能源的分类

能源是可直接或通过转换提供给人类所需的有用能的资源。人类利用自己体力以外的能源是从用火开始的。世界上一切形式的能源的初始来源是核聚变、核裂变、放射线源及太阳系行星的运行。太阳的热核反应释放出极其巨大的能量,射到地球大气层的辐射能量为每年174000TW,这种辐射实际上为地球和太空提供了用之不竭的能源;太阳的热效应产生风能、水能和海洋能;煤炭、石油、天然气等化石燃料,也是间接来自太阳能;生物质能是植物通过光合作用吸收的太阳能;太阳系行星的运行产生潮汐能。

能源一般按其形态、特性或转换利用的层次进行分类,并给予每种或每类能源以专门名称。世界能源理事会(WEC, World Energy Council)推荐的能源分类如下:固体燃料、液体燃料、气体燃料、水力、核能、电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能、核聚变能。能源还可分为一次能源、二次能源和终端能源,可再生能源和非再生能源,新能源和常规能源,商品能源和非商品能源等。

1.2.2 能源的基本特征

一次能源是指直接取自自然界未经加工转换的各种能量和资源,它包括原煤、原油、天然气、油页岩、核能、太阳能、水能、风能、波浪能、潮汐能、地热、生物质能和海洋能等。一次能源又可进一步分为可再生能源和非再生能源两大类,可再生能源首先是清洁能源或绿色能源,它包括太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋能等,它们在自然界中是可循环再生利用的初级资源,对环境无害或危害甚微,且资源分布广泛,适宜就地开发利用。非再生能源包括原煤、原油、天然气、油页岩、核能等,它们是不可再生的资源。

由一次能源经过加工转换后得到的能源产品称为二次能源,如电力、蒸汽、煤气、汽油、柴油、重油、液化石油气、酒精、沼气、氢气和焦炭等。二次能源是联系一次能源和能源终端用户的中间纽带,二次能源又可分为“过程性能源”和“含能体能源”。当今电能是应用最为广泛的“过程性能源”;柴油、汽油则是应用最广的“含能体能源”。过程性能源和含能体能源不可互相替代,各有应用范围。作为二次能源的电能,可由各种一次能源生产出来,如煤炭、石油、天然气、太阳能、生物质能、风能、水能、潮汐能、地热能、核燃料等均可直接生产电能,而作为二次能源的汽油和柴油等则几乎完全依靠化石燃料能源。随着化石燃料能源耗量的日益增加,其储量日益减少,终有一天这些资源将要枯竭,这就迫切需要

寻找一种不依赖化石燃料,储量丰富的新含能体能源。

随着技术和经济的发展,氢能有可能成为替代柴油、汽油的理想新含能体能源。因为氢能是取之不尽、用之不竭的高密度能源,氢可从包括原油、天然气、沼气、农作物秸秆和有机废水等多种途径中获得,而氢的最大来源是水,氢燃料电池产生的排出物也是水,江河湖海就是最大的氢矿,氢能源的可再生性为人类提供了取之不尽、用之不竭的完美能源。此外,氢能的储运性能好,使用方便,可转化性优于其他各类能源,安全性也与汽油相当。太阳能、生物质能、风能、地热、核能等均可转化成氢加以储存、运输或直接应用,氢是一种理想的载能体、含能体能源。随着科技的进步,氢能的开发与利用很有发展前途。

终端能源指供给社会生产、非生产和生活中直接用于消费的各种能源。终端能源消费量是指一定时期内社会生产、非生产和生活消费的各种能源,是扣除了用于加工转换成二次能源的损耗及损失量后的数量,而能源消费总量包括终端能源消费量、能源加工转换过程的损耗和损失量三部分。

常规能源又称为传统能源。已经大规模开采和广泛利用的煤炭、石油、天然气、水能等均属于常规能源。商品能源是作为商品经流通环节大量消费的能源,目前,商品能源主要有煤炭、石油、天然气、水电和核电五种。非商品能源主要指薪柴、秸秆等农业废料、人畜粪便等可就地利用的能源。非商品能源在发展中国家农村地区的能源供应中占有很大比重。

1.2.3 新能源及其主要特征

新能源是指技术上可行、经济上合理、环境和社会可接受、能确保供应和替代常规化石能源的可持续发展的能源体系。对于“新能源”的定义长期以来存在着误区,人们对于“新能源”的认识有过于狭义化的趋势,所谓“新能源”包涵着狭义和广义两层定义,关键是对“新”字的界定和理解,“新”与传统的“旧”能源利用方式和能源系统相对立,“新”不仅区别于工业化时代以化石燃料为主的传统能源利用形态,而且区别于旧式的只强调转换端效率,不注重能源需求侧的综合利用效率,只强调经济效益,不注重资源、环境代价的传统能源利用理念。

目前对于新能源的狭义化定义,主要是将新能源局限在可再生能源技术之中。客观地说,仅仅谈可再生能源,而不强调“新”与“旧”的本质区别,会束缚人类的创造性和新能源自身的健康发展。严格地讲,可再生能源不是新的能源体系和能源利用形式,在人类进入工业化时代以前,是没有大规模利用化石能源的,我们的祖先自从开始利用火之后,数十万年来就一直在利用自然能(太阳能、生物质能、风能、水能、地热能),是可再生能源一直支撑着人类的文明进程。因此,可再生能源是最古老的能源利用方式,只是今天当人类无法承受化石能源所带来的环境和资源的巨额代价时,才重新赋予可再生能源以“新”的含义,它的新不在于它的形式,而在于它在今天对于环境和资源利用的新的意义。显然,对赋予环境和资源新的意义的能源利用方式,不应该仅仅局限于可再生能源的利用。

为了不断满足日益增强的能源需求,工业时代的基本法则是“规模效益”,生产形态同时强调社会分工的细化。在细化分工后,要想提高能源的转换效率,唯一的方法就是不断扩大生产规模。这种传统的能源生产利用形态,必然导致企业不断扩大能源转换装置的规模,不断大量消耗能流密度高的化石燃料资源,同时造成污染物的集中排放。在电力方面的主要表现是“大电网、大电厂、超高压”;在热力行业则是追求大型热力厂、大型管网系统等。

传统规模化的能源生产利用形态造成了一系列的问题:①人类面临严峻的化石能源短

缺,支撑能源生产规模效益的代价是对高密度化石燃料能源的大规模开采,导致化石燃料资源日益枯竭,国际石油价格不断升高;②终端能源利用效率无法提高,转换成本加大,输送能源的电网、热网、铁路、管网等都要加大,中间损失自然会增加;③必须大规模利用资源,一方面造成小规模的资源被忽略或浪费,另一方面被资源的规模所局限,造成利用资源供应瓶颈;④由于效率无法提高,导致环境污染加剧,特别是集中排放二氧化硫造成酸雨问题和大量排放温室气体导致全球变暖,造成极端气候变化频发,不是酷暑就是严寒,这又进一步加大了能源的消耗,使整个能源系统和生态系统同时陷入恶性循环。因此,人类需要在能源问题上寻找一条新的出路,需要有多种新的能源转换利用形态,建立多个新的能源供应系统,来解决人类文明的可持续发展问题,这就是广义化的“新能源”。

新的技术必然要替代落后的生产方式,这是不以人的意志为转移的。新的能源体系和由新技术支撑的能源利用方式,以及新的能源利用理念最终会代替传统的能源利用方式。所以,新能源的关键是针对传统能源利用方式的先进性和替代性。由此可知,广义化的新能源体系主要包含以下几个方面:高效利用能源、资源综合利用、可再生能源、替代能源、节能。

1.2.4 分布式能源及其主要特征

1. 分布式能源

国际分布式能源联盟(WADE, World Alliance for Decentralized Energy)对“分布式能源”给出的定义是:分布式能源是一种建在用户端的能源供应方式,既可独立运行,也可并网运行,而无论规模的大小、使用的燃料或应用的技术。其特征是:①高效利用发电产生的废能生产热和电;②现场端的可再生能源系统;③包括利用现场废气、废热及多余压差来发电的能源循环利用系统。这些系统就称为分布式能源系统,而不考虑这些项目的规模、燃料或技术,以及该系统是否连接电网等条件。

分布式能源高效、节能、环保,目前许多发达国家已可将分布式能源综合利用效率提高到90%以上,大大超过了传统能源的利用效率。由于这种能源利用方式正处于发展阶段,因此无论是国内还是国外,在概念、名词术语、表述和使用上都不太一致。

新能源利用技术的重要表现形式是分布式能源利用技术。分布式能源利用技术对能源的利用方式与传统的能源利用存在很大的区别,它不再追求规模效益,而是更加注重资源的合理配置,追求能源利用效率最大化和能效的最优化,充分利用各种资源,就近供电供热,将中间输送损耗降至最低。由于小型化和微型化,使能源需求者可根据自己对于多种能源的不同需求,设置自己的能源系统,调动了终端能源用户参与提高能源利用效率的积极性。分布式能源可与终端能源用户的能源需求系统进行协同优化,通过信息技术将供需系统有效衔接,进行多元化的优化整合,在燃气管网、低压电网、热力管网和冷源管网上,进行信息互联以实现网间的相互协作和平衡,构成一个多元化的能源网络,使能源供应与能源的实际需求更加匹配。许多发达国家认为,分布式能源是信息能源系统的核心环节,并称之为第二代能源系统。

所谓分布式发电(电源),并非指采用柴油发电机组的紧急备用电源或燃煤的自备小火电厂,而是指以天然气、煤层气或沼气为燃料的燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机发电,太阳能光伏(热)发电,生物质能发电,小型风力发电,以天然气、氢气为燃料的燃料电池发电等。由于这种发电技术在效率、能源多样化、环保、节能等多方面的优越性,再加上电力

市场化的快速发展进程,使其获得广泛的关注,并在某些方面获得巨大进展(燃气轮机、内燃机、微型燃气轮机发电等)。随着分布式能源水平的提高,各种分布式电源设备性能不断改进、效率不断提高,分布式发电的成本也在不断降低,分布式能源的应用范围将不断扩大,可覆盖到包括办公楼、宾馆、商店、饭店、住宅、学校、医院、福利院、疗养院、大学、体育场馆等多种场所。目前,这种能源利用方式在我国仅占较小比例,但可预计未来的若干年后,分布式发电不仅可作为集中式发电的一种重要补充,还将在能源综合利用上占据十分重要的地位。因此,分布式发电无论是在解决城市的供电,还是解决偏远和农村地区用电问题上,都存在巨大的潜在市场,一旦解决了主要的技术障碍和瓶颈,分布式能源系统将获得迅速发展。

目前,国际公认的两个具有发展前途、最重要的分布式能源利用形式是:①微型燃气发电机组,这是实现热电联产、高效利用能源和节能的最主要形式;②燃料电池技术,这也是未来最主要的分布式能源利用技术的方向之一。热电联产虽然是一种传统的能源技术,但在丹麦得到了广泛的应用和高度的重视,并赋予它可持续发展的新含义。目前我国的能源综合利用效率仅为35%左右,丹麦的能源综合利用效率超过60%,而且丹麦经过分析研究,认为能源综合利用效率至少可再提高20%。丹麦的热电联产利用多种燃料(秸秆、垃圾、天然气和煤炭等)资源,基本上是有什么烧什么,什么便宜烧什么,能源综合利用效率(60%)是依靠热电联产对能源实现梯级利用实现的,而从60%再往上增加则主要依靠可再生能源来实现。工业化国家在发展热电联产的同时,由于燃料结构向气体化和非矿物燃料转化,热电联产的规模也越来越小型化、多功能化。

微型燃气发电机组是理想的能源转换载体,它的优点是靠近需求侧,将输送损耗降至最低,并能充分利用低品位的热能,将燃料燃烧温度的利用空间进一步扩大,有效实现了“分配得当,各得其所,温度对口,梯级利用”。燃料电池的能源利用效率更高,污染更小(可在能源转换现场实现零排放)。理论上,燃料电池使用的是氢能,属于可再生能源,但自然界中可直接利用的氢根本不存在,氢能属于二次能源,制氢需要利用其他外部能源来实现。利用太阳能和风能制氢,或者利用生物细菌制氢,还仅仅停留在理论或试验阶段,缺乏广泛的经济性和可操作性。现实的技术发展方向还是如何利用天然气、煤气、甲醇、乙醇等能源,特别有前景的是利用废弃的地下煤炭资源进行地下可控汽化再制氢技术。燃料电池不仅可解决人类发展的电力难题,同时也可解决对石油的替代难题。虽然大多数燃料电池并不依赖可再生能源,但就燃料电池技术而言属于新能源。此类例子非常之多,它们都是立足于新技术、新工艺,或者新理念构架的新型能源利用技术,虽然不是可再生能源,但是针对传统大规模集中生产的能源系统而言,分布式能源可显著提高能源的综合利用效率,有效减少污染物的排放。

2. 分布式能源的主要特征

分布式能源可使用天然气、煤层气等清洁燃料,也可利用沼气、焦炉煤气等废弃资源,甚至利用风能、太阳能、水能等可再生能源。由于目前的分布式能源项目多建在城市,所以大部分分布式能源系统的燃料多为天然气或柴油。分布式能源的主要特征有:

(1) 高效性。由于可利用分布式能源发电后工质的余热来制热、制冷,因此能源得以合理地梯级利用,可根据用户所需向电网输电或馈电,从而提高能源的综合利用效率(可达60%~90%);由于其投资回报周期较短,因此投资回报率高,可降低一次性的投

资和成本费用。靠近用户侧的安装可就近供电,因此可降低网损(包括输电和配电网络的损耗)。

(2) 环保性。采用天然气或太阳能、风能为一次能源,可大大减少有害物质的排放总量,减轻环保压力;就近供电减少了大容量远距离高电压输电线的建设,由此减少了高压输电线路的电磁污染,以及输电线的线路走廊和相应的征地面积,减少了对线路区域树木的砍伐。分布式能源系统由于实现了优质能源梯级合理利用,能效可达80%以上,超过燃煤火力发电机组一倍, SO_2 和固体废弃物排放几乎为零,温室气体(CO_2)减少50%以上, NO_x 减少80%,TSP(大气中总悬浮物)减少95%,占地面积与耗水量减少60%以上。

(3) 能源利用多样性。由于分布式能源可利用多种能源,如天然气、生物质能、风能及太阳能等,并同时为用户提供电、热、冷等多种能源应用方式,因此是节约能源、解决能源短缺、能源互补和能源安全问题的有效途径。

(4) 调峰作用。夏季和冬季往往是电力负荷的高峰期,此时如采用以天然气为燃料的燃气轮机等热、冷、电三联供系统,不但可解决冬夏季的供热与供冷的需要,同时也提供了一部分电力,由此可降低电力负荷,起到电力调峰的作用。此外,由于将天然气作为一种恒定的燃料源用于发电,部分解决了天然气供应周期每日、不同季节峰谷差过大的问题,发挥了天然气与电力的互补作用。

(5) 安全性和可靠性。当电网出现大面积停电事故时,采用分布式发电系统仍能保持正常运行。虽然有些分布式发电系统由于燃料供应问题或辅机的供电问题,在电网故障时也会暂时停止运行,但由于其系统比较简单,易于再启动,有利于系统在崩溃后的再启动,由此可提高供电的安全性和可靠性。

(6) 解决边远地区供电。由于我国许多偏远及农村山区远离大电网,因此难以从大电网向其供电,采用太阳能光伏发电、小型风力发电和生物质能发电的独立发电系统不失为一种优选的方法。

1.3 新能源发电

1.3.1 传统能源发电及存在的主要问题

自第二次工业革命以来,电能已成为人类生活不可缺少的一部分。现在我们所用的电能从发电厂而来,是发电厂将其他能源转化为电能。而不同的能源,就存在不同的转化方式、转化率,以及对环境产生的不同影响。

目前,绝大多数发电厂主要利用煤炭进行发电,可谓是最原始传统的方式。火力发电厂简称火电厂,主要是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能,它的基本生产过程是燃料在锅炉中燃烧加热水使其成为高温高压的过热蒸汽,将燃料的化学能转变成热能,过热蒸汽推动汽轮机旋转,将热能转换成机械能,然后汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。然而,火力发电有很大的不足,如粉尘、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、噪声、粉煤灰是火电生产过程中产生的主要污染物,另外灰场排出的废水中含有大量的氟化物、硫酸盐等。由于煤炭、石油、天然气能源的不可再生性,所以对国家能源战略安全产生一定的影响,亟需寻找新能源来替代。

此外,煤炭、石油和天然气属于矿物燃料,开采中首先要破坏原有的生态环境,比如会

造成地表沉降、地面塌陷、地裂缝等，其次发电过程中，又会产生大量污染物进入大气，形成酸雨；而水能发电，则需要建筑巨型拦洪大坝蓄水，严重影响江河水系和地表水体的径流，同时，导致大坝附近土壤的盐渍化及边坡稳定等问题，并影响局部地区水循环；核能发电，主要是产生的核废料处理问题，若出现核泄漏辐射等情况，严重时可能会对周边环境及生态系统造成污染和影响。

1.3.2 新能源发电

1. 风力发电

风力发电经历了从独立发电系统到并网系统的发展过程，大规模风力发电系统的建设已成为发达国家风电发展的主要形式。当前国外风电市场上的主力机型功率是 $1\sim 3\text{MW}$ ，兆瓦级的风电机组占到总装机容量的 95.7% 。随着海上风电的迅速发展，单机容量为 $3\sim 6\text{MW}$ 的风电机组已进入商业化运行。美国 7MW 风电机组已研制成功，西班牙 8MW 风电机组已开始地面试验，英国 10MW 机组也正在设计中，在未来，更大规模的海上风电场建设必将到来。目前研发重点主要集中在提高大型风力发电场与现有电网联网的安全性；继续开发可靠的风力预报方法，开展与风能开发相配套的生态影响研究；大力发展海上风力发电等。目前，风力发电建设投资已低于核电投资，建设周期短，其成本与煤电成本接近，因而具有很大的竞争潜力。

2. 太阳能发电

太阳能光伏发电最早用于缺电地区，20 世纪 80 年代开始研究联网问题。目前，在世界范围内已建成多个兆瓦级的联网光伏电站。2004 年 9 月，总功率为 5MW 的世界最大的太阳能发电站在德国莱比锡附近落成；2009 年 8 月，总功率为 80.7MW 的世界最大的太阳能发电站——德国利伯罗瑟太阳能发电站落成。美国是世界上太阳能发电技术研究开发较早的国家，尤其是在太阳能槽式和碟式光热发电技术方面发展较快。

3. 生物质能发电

生物质能发电是利用生物质所具有的生物质能进行的发电，是可再生能源发电的一种。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，是取之不尽、用之不竭的能源资源，是太阳能的一种表现形式。生物质能发电主要利用农业、林业和工业废弃物，甚至以城市垃圾为原料，采取直接燃烧或气化等方式发电，包括直接燃烧发电、气化发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气发电、沼气发电等。近年来，国内外能源、电力供求日趋紧张，作为可再生能源的生物质能越来越凸显出其必要性。

4. 核能发电

2010 年 5 月，国际原子能机构在讨论《不扩散核武器条约》会议上指出，核能作为一种清洁、稳定且有助于减缓气候变化影响的能源正为越来越多的国家所接受。目前全世界共有 60 多个国家考虑发展核能发电，预计到 2030 年将有 $10\sim 25$ 个国家首建核电站。欧盟委员会交通和能源部门 2004 年起草的一份报告称，如果不修建新的核电站，欧盟将不能实现《京都议定书》规定的温室气体减排目标。报告认为，在今后 25 年内，欧盟需增加 100GW 核电，才能实现减少温室气体排放的目标，这意味着需修建 70 多座新的核电站。

5. 燃料电池发电

燃料电池是一种使用燃料进行化学反应产生电力的装置，由于其环保性和高效性，被誉为继火力发电、水力发电、核电之后的第四代发电技术，越来越多的国家和地区投入更多的

资金对其进行研究并使其产业化。最常见的是以氢氧为燃料的质子交换膜燃料电池,其优点是燃料价格便宜、对人体无化学危险、对环境无害、发电后产生纯水和热,但由于产生的电量太小,且无法瞬间提供大量电能,故只能用于平稳供电。

此外,还有诸如小水力发电、地热能发电、海洋能发电等新能源的利用。

1.3.3 我国新能源发电现状

进入21世纪后,我国新能源产业发展十分迅速。光伏产业在2005年之后进入高速发展阶段,连续5年年增长率超过100%。从2007年开始,我国光伏电池的产量已连续多年稳居世界首位。目前,已有数十家光伏公司分别在海内外上市,行业年产值超过3000亿元人民币,直接从业人数超过30万人。技术方面,光伏电池制造水平比较先进,实验室效率已达到21%,一般商业电池效率是10%~16%;掌握了包括多晶硅生产、光伏电池制造等关键技术,设备及主要原材料逐步实现国产化,产业规模快速扩张,产业链不断完善,制造成本持续下降,具备较强的国际竞争能力。

20世纪80年代中后期以来,我国风电场建设快速发展。截至2014年6月底,我国新增风电装机容量超过700万kW,同比增长30.37%,累计装机容量已接近1亿kW。近十年,我国风电场建设发生了重大战略转变,实现了从新疆、内蒙古为主的内陆过渡到沿海大型风电场的建设。2010年,首批海上风电项目上海东海大桥10万kW完成组装,安装了34台国产3MW风力发电机组。海上风电的装机容量预计将在2020年达到3280万kW。

到2020年,我国风电累计装机容量将达到2.3亿kW,相当于13个三峡电站,总发电量可达4649亿kWh,相当于替代200个火电厂。

2014年7月国家能源局统计数据表明,全球地热发电装机已达到1170万kW。我国地热发电站总装机容量约为2.78万kW,其中西藏羊八井、那曲、郎久三个地热电站规模较大,居我国首位,其地热资源发电潜力超过100万kW。据初步评价,我国浅层地温能资源量相当于95亿t标准煤,年可利用量约3.5亿t标准煤;常规地热能资源量相当于8530亿t标准煤,年可利用量约6.4亿t标准煤;增强型地热能理论资源量相当于860万亿t标准煤,约为2013年全国能源消费总量的20多万倍。

目前我国共有8座潮汐电站建成运行,容量为 5.4×10^4 MW,最大的是20世纪80年代建成的浙江江厦潮汐电站,装机容量为2MW。近年我国地源热泵工程应用每年扩展1800万~2200万 m^2 。

生物质能发电在我国尚处于起步阶段,蔗渣/稻壳燃烧发电、稻壳气化发电和沼气发电等技术已得到应用。《2013中国生物质发电建设统计报告》显示,截至2013年底,除青海省、宁夏回族自治区、西藏自治区外,全国已有28个省(市、自治区)开发了生物质能发电项目。全国累计核准容量达12226.21MW,其中并网容量7790.01MW,占核准容量的63.72%。深圳垃圾发电厂已运行近10年,为垃圾发电在我国的发展积累了一定的经验,为解决我国城市垃圾处理问题带来新的希望和契机。

自20世纪90年代中期以来,我国在燃料电池研究方面取得了较大的进展。燃料电池技术列入了国家应用研究与发展重大项目计划,其研究目标直指国际先进水平。

由于小水电站投资小、风险低、效益稳、运营成本较低,在国家各种惠农政策和优先水力设施建设的鼓励下,全国掀起了投资建设小水电站的热潮。尤其近年来,由于全国性缺水严重,民企投资小水电如雨后春笋,悄然兴起。从2003年开始,特大水电投资项目也开始