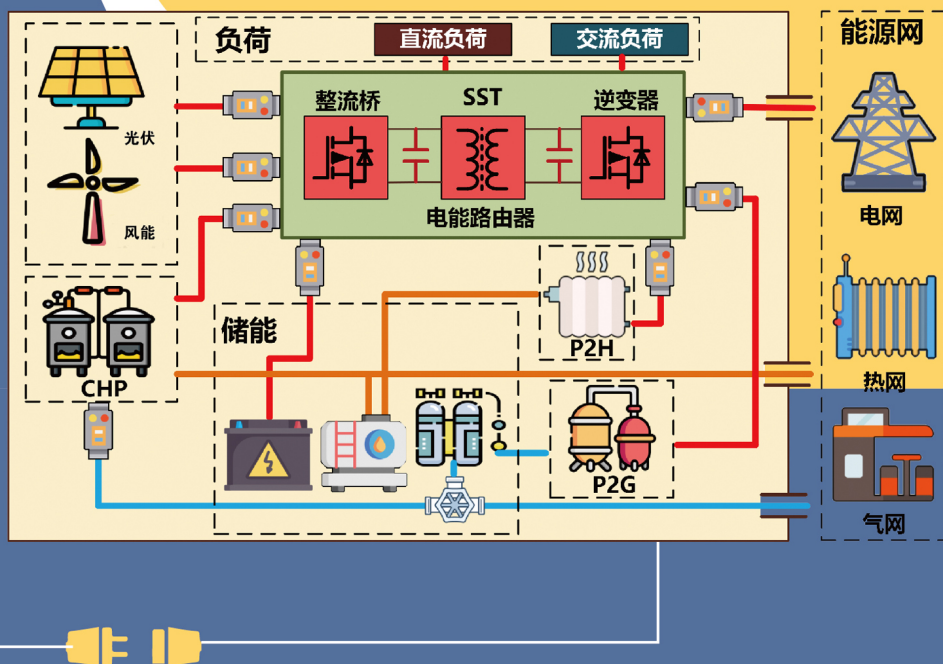


# 能源路由器 系统与amp;控制

## ENERGY ROUTER SYSTEM AND CONTROL

解大 王西田 顾承红◎著



# 能源路由器系统与控制

解 大 王西田 顾承红 著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书从能源路由器的结构入手,从物理层、控制层和服务层逐次介绍了能源路由器装备的物理结构、设备级控制以及网络级控制的理论和技术方法,综述了能源路由器技术的基本概念和理论,详细介绍了以端口、功率变换集、独立母线为基础结构,架构能源路由器物理层的构成方法。讲述了最小系统下的能源路由器结构,给出了其能量/功率流控制的基础策略,阐述了将能源路由器应用于能源互联网的服务层控制。

本书可以作为相关研究人员、电气工程专业研究生和高年级本科生的参考书,也可以作为对新能源技术有兴趣读者的阅读资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

能源路由器系统与控制/解大,王西田,顾承红著

.—上海:上海交通大学出版社,2022.6

ISBN 978-7-313-25637-9

I. ①能… II. ①解… ②王… ③顾… III. ①能源—  
互联网络—网络设备—研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 241616 号

## 能源路由器系统与控制

NENGYUAN LUYOUQI XITONG YU KONGZHI

著 者:解 大 王西田 顾承红

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:221 千字

版 次:2022 年 6 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-25637-9

定 价:128.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:13.25

印 次:2022 年 6 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-31011198

# 前 言

---

能源是社会发展的核心动力之一,合理规划能源结构、发展可再生能源是当今世界可持续发展的关键问题,研究报告称,温室气体尤其是二氧化碳的超量排放将带来严重的环境灾难,世界各国政府和科研人员为此进行了不懈的努力。能源互联网的概念就是在这样一个前提下提出的。

能源互联网的概念借助了信息技术的理念,想象能源可以如信息一样,在一个开放互通的能源网络中实现流动,能源的生产者如同信息的发起者,能源的消费者如同信息的接收者,多方在这个网络中进行能源生产、消费、交互、存储和转发。在能源互联网中,各方都可以进行能源的交易,任何形式的能量都可以借助于能源网络自由流动,每个人都可以在自己的屋顶建立一个小型的太阳能发电装置,在网上出售自己的产出,每个人也可以像在市场上购买商品那样,购买自己所需要的能源。能源世界变得平面化了,这显然是一个理想的能源世界。

不论能源互联网将来的发展形态,与能源互联网有关的技术与现有的技术形态将有所不同,尽管新技术实际上都是在现有技术手段上发展起来的,但是,在能源互联网的格局下,这些原有的技术必须有所发展和融合,进化为满足能源互联网的新技术,能源路由器就是其中之一。

能源路由器同样借助了信息技术中路由器的概念,与数据路由器的功能相比,能源路由器具有设定能量流向和路径的功能,将能量从生产者连接到消费者;能源路由器应具备存储转发功能,将能量存储为所需要的形式,并在合适的时候再发送出去;同样的,能源路由器也应具有各种通信能力,具有自动控制能

力,有助于构建能源互联网的网络层。由此可见,能源路由器负责协调能源互联网的运行,显然是能源互联网最为核心的装备。关于能源路由器的定义,其内涵和外延当前还有很多不同的表述和理解,甚至其名称在中英文当中都有一些歧义,Energy Router,学术界一些人士认为应该是能量路由器,因为路由的对象是能量而不是能源,Energy 本意也是能量的意思,这显然是正确的说法,但是由于能源路由器这个名称的翻译已经在国内约定俗成,所以本书还是采用能源路由器作为其名称。

能源路由器的概念最早来源于苏黎世联邦理工学院提出的能源集线器(Energy Hub)的概念,历经众多学者的完善和发展,已被人们广泛接受。在研究前期,能源集线器或能源路由器只是作为一种概念存在,研究者主要关注于理论研究,较多地集中于多能量的协调和优化。例如,针对一幢楼宇、一个园区,以能源路由器的概念将其协调控制并优化运行,很少涉及具体的装备,或者说,早期的研究者并没有将能源路由器作为一种实际的物理装备来看待,更多的是一种理念,一种虚拟的、不成形的结构。

随着技术的进步,人们发现,或许实际上构造出一种真实的物理装备更加有利于工程实践,能源路由器才开始受到工业界的关注。研究者和制造商根据各自对能源路由器的理解,目前已有大量的工业级产品问世并在现场得到了应用,这些极大地促进了能源路由器技术的进步。

通常的能源路由器装备,应具有路由、储能、能量变换、控制与通信等几个显著的功能,因此最简单的能源路由器结构至少应该具备三个端口、三个能量/功率变换器、以及一组内部母线,这也是当前最为常见的能源路由器产品结构。但是,如果追求能源路由器的本质特征,即为能源高效使用、开放互通、平面化的能源互联网提供服务,能源路由器仅具备最为基础的功能就有所欠缺了。

本书从能源路由器的结构入手,从物理层、控制层和服务层依次讨论了能源路由器装备的物理结构、设备级控制以及网络级控制的理论和技术方法,本书共有4章。第1章简要综述了能源路由器技术的基本概念和理论;第2章详细研究了以端口、功率变换集、独立母线为基础结构,架构能源路由器物理层的构成方法;第3章讲述了最小系统的能源路由器结构,给出了其能量/功率流控制的基础策略;第4章讨论了将能源路由器应用于能源互联网的服务层控制。

本书所述原理是作者所在科研组研究能源路由器技术的基础原理,对能源路由器装备设计具有一般指导性。本书可供相关研究人员、电气工程专业研究

生和高年级本科生参考,也可以作为有兴趣的读者关于新能源技术的阅读资料。

本书的许多研究成果是由作者所指导的上海交通大学的研究生共同工作所取得的,其中,研究生陈爱康、张露青、立梓辰、陈洋、王晨磊、陈东进行了大量的工作,本书写作过程中,上海交通大学电气工程系的领导和同事给予了大力支持,作者谨表示衷心感谢。特别感谢上海交通大学机动学院翁一武教授和上海电机学院张延迟教授对本项目和本书写作的大力支持及提出的宝贵建议。

本书的绪论由解大、王西田和顾承红共同撰写,第2章和第3章由解大撰写,4.1节由解大和顾承红撰写,4.2节和4.3节由解大撰写,全书由解大和顾承红进行统稿。

本书有关的研究工作得到了上海市科委科技创新计划“多能形式的能源路由器关键技术研究及示范”项目(项目编号:18DZ1203700)、上海市科委科技创新计划“老港固废综合利用基地能源互联网数据集成和网络应用技术”项目(项目编号:16DZ1202800)的资助,本书能源路由器装备的测试得到了费赖电气(上海)有限公司等生产单位的帮助,在此一并深表感谢。

在本书的编写过程中,作者虽然对体系的安排、素材的取舍、文字的描述尽了努力,但由于作者的水平所限,缺点在所难免,恳请读者给予批评和指正。

著者

2021年10月于上海交通大学

# 目 录

---

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 全面可持续发展的挑战	1
1.1.1 世界经济和能源发展现状	1
1.1.2 可持续发展面临的挑战	4
1.2 能源互联网	6
1.2.1 能源互联网的发展理念	6
1.2.2 能源互联网的发展历程	8
1.2.3 能源互联网的基本架构	11
1.3 能源路由器概述	13
1.3.1 能源路由器的概念	13
1.3.2 能源路由器的功能与结构	14
1.3.3 能源路由器的主要设备	19
<b>第 2 章 能源路由器的物理层架构</b>	<b>22</b>
2.1 以电能为核心的能源路由器的物理层架构	22
2.2 能源路由器的功率变换集	24
2.2.1 双向 DC/DC 功率变换电路	24
2.2.2 双向 AC/DC 功率变换电路	28

2.2.3	模块化多电平变换器	32
2.2.4	固态变压器	51
2.2.5	驱动电源	56
2.3	能源路由器的端口管理控制	61
2.3.1	能源路由器源侧端口	62
2.3.2	能源路由器负荷侧端口	70
2.3.3	能源路由器储能侧端口	71
2.4	能源路由器的独立母线系统	72
2.4.1	能源路由器内部独立母线	72
2.4.2	母线与母线间的关系	76
2.4.3	端口与母线的关系	79
2.4.4	基于可靠性评估的能源路由器拓扑设计	80
2.4.5	基于图论拓扑的能量路由策略	86

## 第3章 能源路由器的能量管理与控制层 89

3.1	能源路由器最小系统与广义能量	89
3.1.1	多能形式能源路由器的最小系统	89
3.1.2	能源路由器的广义能量	91
3.1.3	能源端口的能量流关系	91
3.1.4	能量转换模块的能量流	93
3.1.5	储能接入端口的能量流	96
3.1.6	输能设备	98
3.2	能源路由器运行工况集	99
3.2.1	运行工况划分标准	99
3.2.2	运行工况集	100
3.2.3	能流路径与基础运行模式	105
3.3	能源路由器运行控制策略	112
3.3.1	能源路由器能量流稳定判别	112
3.3.2	能源路由器控制算法流程	113
3.3.3	能源路由器能流运行模式控制	115

3.4	能源路由器信息能量协同控制	125
3.4.1	能源路由器的信息分层和交互	125
3.4.2	能源路由器的基本运行调度	127
3.4.3	能源路由器的经济运行	131
<b>第4章</b>	<b>能源路由器的服务层</b>	<b>134</b>
4.1	园区级能源路由器服务层设计	134
4.1.1	园区定位	135
4.1.2	园区级能源系统模型	139
4.1.3	园区级能源路由器服务层规划模型	144
4.1.4	固废基地的示例分析	148
4.2	区域能源广域网能源路由器服务层设计	157
4.2.1	虚拟能源路由器的概念	157
4.2.2	区域能源广域网能源路由器规划模型	158
4.2.3	多能源路由器的协同分析	165
4.3	城市物质-能源网络规划设计	171
4.3.1	可持续发展城市的物质-能量生态系统	171
4.3.2	评估指标体系	176
4.3.3	可持续发展分析	180
	<b>参考文献</b>	<b>188</b>

# 第 1 章

## 绪 论

可持续发展是当今世界人类文明发展进步的根本要求。人们需要安全充足的食物、洁净的空气和水、可持续的能源和生产资源；人们希望享有健康、优美的生活环境，接受优质公平的教育；人们要求消除贫困、歧视、不平等和暴力。可持续发展是经济、社会、环境协调发展，是开放、联动、包容发展，实现可持续发展目标是全球的事业。工业革命以来，人类经济社会发展过度依赖化石能源，而能源的大量消耗带来资源紧张、环境污染、气候变化、发展不平衡等突出问题，已经成为影响和制约人类可持续发展的重大挑战。

### 1.1 全面可持续发展的挑战

#### 1.1.1 世界经济和能源发展现状

##### 1. 世界人口持续增加

至 2020 年，全球人口总数已增长至约 77.9 亿人。2010—2020 年，全球人口年均增速约为 1.1%。亚洲人口基数最大，劳动力充足。2020 年，亚洲人口总数超过 46 亿人，占全球人口总数的 59.5%。全球 14 个人口超过 1 亿人的国家中有 7 个位于亚洲，分别是中国、印度、印度尼西亚、巴基斯坦、孟加拉国、日本和菲律宾。非洲人口众多且青年人口比例远超其他区域，2020 年 0~14 岁人口占总人口的 40.3%，远超其他地区，人口增长动力充足。预计到 2030 年，全球近 1/2 劳动力人口增长将来自撒哈拉以南非洲。全球各大洲人口情况如图 1-1 所示<sup>①</sup>。

<sup>①</sup> 数据来源：联合国。Population, Surface Area, Density. <http://data.un.org>[2020-09].

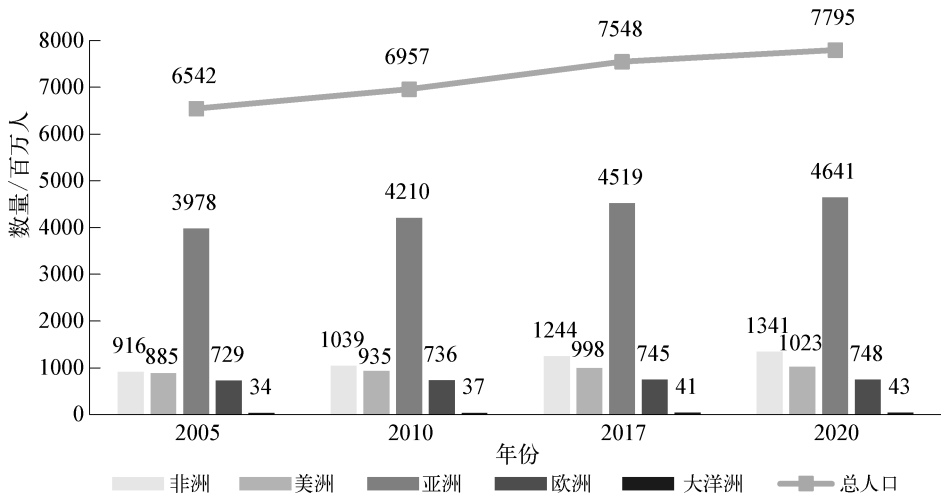


图 1-1 全球各大洲人口情况

## 2. 世界经济总体保持增长态势

2000—2019年，全球国内生产总值(gross domestic product, GDP)从33.6万亿美元增至87.7万亿美元，人均GDP从5500美元增至1.14万美元。全球金融危机、欧洲债务危机之后，全球经济继续深度调整，发达国家经济增长整体低迷，发展中国家经济呈现平稳增长态势，尽管新冠肺炎疫情对全球经济产生中长期深刻影响，但稳中向前的趋势仍不会改变。

截至2019年，亚洲GDP约为30万亿美元，约占世界经济总量的1/3，2000—2019年，年均增速达7.1%，远高于世界平均水平；其中，中国达到14.28万亿美元，其次是日本和印度，分别为5.8万亿美元、2.8万亿美元。欧洲经济增长缓慢，但发展程度较高，2019年，欧洲GDP为22万亿美元，人均GDP约为3.8万美元。非洲2019年GDP约为2.3万亿美元，占世界总量的2.7%。以美国为首的北美洲总体经济发展水平较高，2019年GDP约为23.1万亿美元，占世界总量的27%，人均GDP约为6.3万美元，是全球人均GDP最高的大洲<sup>①</sup>。

## 3. 能源发展

全球能源生产量持续增长。2000—2018年，全球的能源生产量从100亿吨标准煤增长到144亿吨标准煤，年均增长2.0%。2018年，煤炭、石油、天然气生产量分别达到38亿吨标准煤、45亿吨标准煤、33亿吨标准煤。2000—2018年

<sup>①</sup> 数据来源：The World Bank | Data[Online]. <https://data.worldbank.org>.

全球能源生产情况如图 1-2 所示<sup>①</sup>。

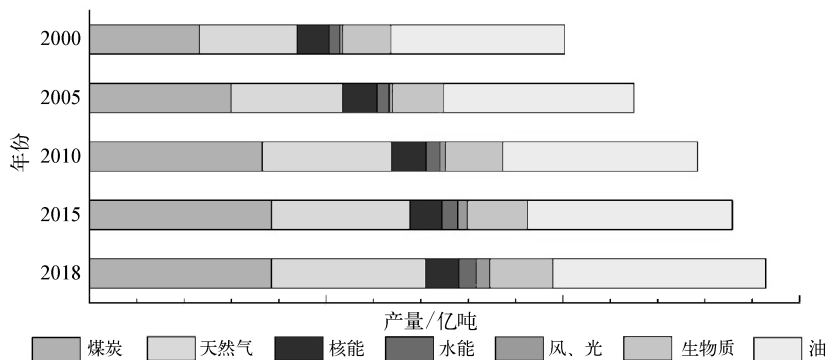


图 1-2 2000—2018 年全球能源生产情况

能源消费总量持续增长,各行业用能需求均有所上升。2000—2018年,受世界人口增长、工业化、城镇化等诸多因素拉动,全球一次能源消费量从 70 亿吨标准煤增长到 99 亿吨标准煤,年均增长 1.9%。各行业中,工业、运输业、商业和公共服务能源消费量增长最为迅速,分别上升 51.7%、47.3%和 45.7%。2018 年运输业、工业、居民能源消费量最大,分别达 28.9 亿吨标准煤、28.3 亿吨标准煤、21 亿吨标准煤<sup>②</sup>。

终端能源消费总量持续增长,终端电能比重不断上升,2000—2018年,终端能源中电能消费量增长最为迅速,增长幅度达 76%。石油在能源终端消费中所占比重最大,2000—2018年由 31 亿吨标准煤增长至 45 亿吨标准煤,年均增长 2.1%。

#### 4. 电力发展

电力需求持续稳步增长。2000—2018年,全球用电量由 14 万亿 kW·h 增长至 24.7 万亿 kW·h,年均增速为 3.2%;人均用电量由 2.3 MW·h 增长至 3.3 MW·h。亚太地区用电量占比由 2000 年的 27%提升至 2018 年的 47%,北美洲、欧洲用电量占比分别由 32%、24%降低至 20%、16%。亚太地区人均用电量由 2000 年的 1.1 MW·h 稳步增长至 2018 年的 2.8 MW·h,中国人均用电量从 2000 年的 1 MW·h 快速增长至 2018 年的 4.9 MW·h<sup>①</sup>。

<sup>①</sup> 数据来源: Statistical Review of World Energy (2020|69th edition). <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy>.

<sup>②</sup> 数据来源: IEA. World Energy Balances 2020 Edition. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances#energy-balances>.

电源装机容量持续增长,火电在电源结构中占主导地位。2000—2018年,全球总发电量不断上升,煤电由6万亿kW·h增长至10万亿kW·h,年均增长2.9%。可再生能源发电占比由16%增长至23%,增长最为显著;燃油机组发电比重不断减小,由8%降至3%,下降明显。风电、光伏发电在2018年分别达到1.2万亿kW·h和0.55万亿kW·h,较2000年分别增长约40倍和690倍<sup>①</sup>。

全球电网规模不断扩大,部分区域已实现互联大电网,20世纪中期以来,相继形成了北美互联电网、欧洲互联电网、俄罗斯-波罗的海互联电网等跨国互联大电网,建成了330kV及以上的超高压交直流输电系统。交直流电网电压等级不断提高,中国已建成世界上最高电压等级(±1100kV)的直流输电工程。亚洲电网包括海湾地区互联电网等区域性互联电网,以及中国、日本、韩国、印度等国家电网。欧洲电网包括欧洲大陆、北欧、波罗的海、英国、爱尔兰五个同步电网,此外还有冰岛和塞浦路斯等独立电网。北美洲已形成北美东部电网、北美西部电网、美国得克萨斯州电网、加拿大魁北克电网和墨西哥电网五大同步电网,其中北美东部电网电源装机容量超过8亿kW,是世界上最大的同步电网。

### 1.1.2 可持续发展面临的挑战

#### 1. 资源紧缺

不合理的资源生产和消费方式导致全球能源资源、水资源、土地资源紧缺。能源资源方面,过去50年,全球化石能源累计总产量近5500亿吨标准煤。按

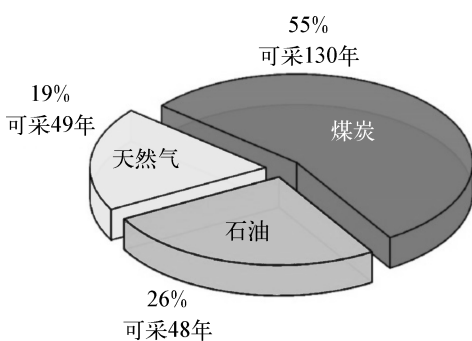


图 1-3 全球化石能源剩余可采储量<sup>②</sup>

目前开发强度,全球已探明剩余煤炭、石油和天然气储量分别只能开采130年、48年和49年,如图1-3所示。水资源方面,世界资源研究所发布的报告称,当前全球1/4的人口正面临“水资源极度紧缺”危机,并且气候变化导致的干旱情况正不断加剧。土地资源方面,由于工业化、城镇化、气候变化等因素的影响,全球土壤状

① 数据来源:中国国家统计局[Online]. <http://www.stats.gov.cn>.

② 数据来源:联合国粮农组织[Online]. <http://www.fao.org/statistics>.

况迅速恶化,具体表现为耕地面积普遍减少,森林面积逐年减少。

联合国粮食及农业组织 2020 年报告显示,目前世界大多数国家的土壤状况属于一般、较差或很差,并且许多地方的土壤状况正在恶化。过去 30 年间,由于人口增长和农业扩张,全球森林面积显著减少,森林覆盖率下降。全球森林面积占土地总面积的比例已经从 2000 年的 31.9% 降至 2020 年的 31.2%,现在全球森林面积约为 41 亿  $\text{hm}^2$ ,也意味着“全球森林面积净减少了近 1 亿  $\text{hm}^2$ ”。

## 2. 气候变化

自工业革命以来,大气温室气体浓度持续攀升,为近 80 万年以来的最高水平,2017 年全球平均气温已经比工业革命前高约  $11^\circ\text{C}$ 。国际灾害数据库统计显示,1980 年以来全球各类灾害发生频次不断增加,其中各类天气气候灾害频次显著增加。联合国政府间气候变化专门委员会报告进一步指出,1950 年以来,全球极端高温普遍升高,南欧、西非干旱程度加剧,许多区域呈现出“旱的越早,涝的越涝”趋势。气候变化导致全球灾害损失显著上升,近十年来全球每年由天气气候灾害造成的经济损失高达 500 亿美元,死亡人数达 22 万人,2017 年经济损失总额达到创纪录的 3 200 亿美元。

应对气候变化,亟须系统、可操作、可复制的全球性减排方案来增强各国减排力度。1971—2016 年,全球化石能源燃烧产生的二氧化碳排放量从 139 亿吨/年增长到 323 亿吨/年,年均增速为 1.9%。自 1992 年《联合国气候变化框架公约》签订实施以来,国际社会在气候变化的科学认知和政治共识上日益增强,先后达成了《京都议定书》《巴黎协定》等协议,在减缓、适应、资金、技术、能力建设、透明度等领域积极探索实施路径。截至 2020 年 8 月,197 个缔约方均签署或批准了《巴黎协定》,其中 190 个缔约方批准或接受了《巴黎协定》。但是,联合国有关研究显示,《巴黎协定》框架下国家自主贡献所承诺的全球 2030 年减排总和仅为实现《巴黎协定》 $2^\circ\text{C}$  目标所需减排量的 1/3 左右,各国政府仍需进一步提升政治决心,开展更加务实的行动。

## 3. 环境污染

全球生态环境受到人类活动的影响,自工业革命以来,全球空气污染、土地荒漠化、水资源短缺等问题层出不穷。空气方面,细颗粒物、氮氧化物等污染物的排放,造成酸雨、雾霾、臭氧层破坏等严重的空气污染问题,每年约有 700 万人因空气污染死亡,占全球总死亡人数的 1/9,是造成人类死亡的第四大原因。土地方面,全球荒漠化土地面积约为 3 600 万  $\text{km}^2$ ,占陆地总面积的 1/4,影响了全球 16% 的农业土地,每年农作物损失估计为 420 亿美元,造成可利用土地面积

大量减少,土壤生产力降低,严重威胁人类的生产和生活。水资源方面,全球可供人类使用的淡水资源仅占全球水量的 0.4%,约有 20 亿人口处于缺水状态<sup>①</sup>。

可持续发展面临着资源紧缺、气候变化、环境污染、发展不平衡等诸多挑战。这些问题相互交织、相互影响,能源发展方式的不合理是引发可持续发展问题的关键因素。需要统筹全球经济发展、资源开发和环境保护,建立稳定可靠、清洁低碳、经济高效的现代能源体系,形成全球联动、各国协调、成果共享、清洁绿色的发展格局,实现经济、社会、环境协调可持续发展。

## 1.2 能源互联网

应对可持续发展挑战,关键是要以清洁发展为核心,开辟一条以清洁能源发展推动可持续发展的科学道路。随着现代科学技术的发展,世界各国不断进行新能源的探索,电网内新能源的渗透率与利用率越来越高,但新能源的大规模发展和推广也受到了新能源(如风能、太阳能等)分布过于分散、随机性程度高、能量转化效率低和使用成本偏高等一系列问题的制约。为构建新能源大规模推广应用的理论体系,智能电网、坚强智能电网、智能配电网、微网、智能微电网等概念先后受到学者的广泛关注。

2008 年,美国国家科学基金(National Science Foundation, NSF)项目未来可再生电力能源传输与管理系統明确提出了能源互联网这一学术概念,指出能源互联网是一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构,是智能电网的发展方向。能源互联网是能源生产清洁化、配置广域化、消费电气化的重要平台,是新一代以“清洁能源为主导、电为中心、互联互通、共建共商”为宗旨的现代能源体系,为推动能源转型、加快清洁发展提供了重要依据,开辟了绿色、低碳、可持续发展的创新道路。

### 1.2.1 能源互联网的发展理念

2016 年 2 月,国家发改委、能源局、工信部印发了《关于推进“互联网+”智

<sup>①</sup> 数据来源: The World Bank | Data [Online]. <https://data.worldbank.org>; IEA. World Energy Balances 2020 Edition. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances#energy-balances>.

慧能源发展的指导意见》，指出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。能源互联网将互联网理念引入传统能源网，通过全球及区域电力互联与能源信息融合，实现不同区域多类型新能源的跨区消纳、能量控制及信息实时共享，提高能源综合开发利用效率，最大限度地消纳可再生能源。能源互联网的主要发展方向、核心要求及主要特征可概括如下。

### 1. 发展方向

(1) 清洁替代：能源开发实施清洁替代，水能、太阳能、风能等清洁能源替代化石能源；能源消费实施电能替代，以电代煤、以电代油、以电代气、以电代柴。

(2) 效率提高：提高电气化水平和能源效率，增大电能在终端能源消费中的比重，在保障用能需求的前提下降低能源消费量。

(3) 清洁转化：通过电力将二氧化碳、水等物质转化为氢气、甲醇等燃料和原材料，破解资源困局，满足人类永续发展需求。

### 2. 核心要求

(1) 以清洁能源为主导，以电能为中心：化石能源网络逐渐退出使用，未来的能源系统是以电力系统为中心的多能源系统。以电网为平台，将各类一次能源高效输送到各类终端用户。

(2) 互联互通：清洁能源的分布不均衡，决定了其能源开发布局需要优化配置。通过多能源的开放互联、能源市场与交易平台的开放互联、各类参与者的开放互联，实现能源生产、配置和贸易的互联互通。

(3) 共建共享：建设能源互联网对世界各国都具有积极的意义，也是一项宏大的系统工程，需要凝聚各方智慧和力量，通力合作，共同建设。还要通过共享机制，形成有效的能源市场和良好的创新创业环境，让所有人共享发展成果。

### 3. 主要特征

(1) 接入大量各类分布式可再生能源，支撑高渗透可再生能源的接入与消纳。

(2) 实现多种能源开发互联，优势互补，实现多种能源的综合开发利用，同时源网荷储高度协调，拥有开发自由的自组织网络架构。

(3) 发电、储能、负荷即插即用，自主接入，是对等、扁平、能量信息双向流动的能源共享网络。

(4) 能源信息深度融合,通过打破传统能源系统内部的信息壁垒,促进价值发现和高度市场化。

(5) 能源的生产、传输、消费智能化,万物互联,支撑能源互联网多源大数据分析,支撑能源互联网市场、金融及周边衍生品发展,是广泛创新、高速发展的系统。

### 1.2.2 能源互联网的发展历程

随着以新能源、分布式电源、储能技术等为核心的能源技术的快速发展,为了应对未来可再生能源的规模化利用,各国都在积极探索和实践能源互联网战略。

#### 1. 美国

##### 1) 智能电网

2001年,美国能源部提出了综合能源系统发展计划以促进多能源系统的发展应用;2007年12月,美国颁布了《能源独立和安全法》(Energy Independence and Security Act, EISA),明确提出了开展综合能源规划的必要性,同时,在2007—2012年追加了6.5亿美元的专项研究经费来支持综合能源系统的研究和实施。在美国前总统奥巴马的第一任期,将智能电网列入美国的国家战略,以智能电网建设为先导推动能源互联网建设,实现国家能源系统的根本性改造,提高综合能源利用效率。2008年8月,美国科罗拉多州的波尔得完成了智能电网的首期工程,波尔得的每户家庭通过智能电表与电力公司实现双向通信。消费者不仅可以直观地了解即时电价、错开用电时间和合理利用电价的峰谷不同阶段,还可以优先使用风电和太阳能等清洁能源。此外,许多美国大型企业也都积极加入美国智能电网建设中,IBM公司将自己的软件和服务器应用到智能电网系统之中,对区域智能电网建设提供服务,思科公司主攻连接计量器、转化器、数字化电站、发电厂之间的网络系统,通用公司生产计量器和部分相关软件等。

##### 2) FREEDM项目

2008年,美国政府开始资助由北卡罗来纳州立大学提出的未来可再生电力能源传输与管理系统(future renewable electric energy delivery and management systems, FREEDM)项目,每年仅官方资助经费就高达1800万美元,此外还联合了其他若干知名大学和跨国企业进行共同研究。FREEDM由美国提出并根据能源路由器的概念进行了原型实现。以固态变压器(solid state transformer, SST)作为能源路由器的核心,通过远程可控的快速智能开关,实现微电网和线路的智能通断,并加之能量管理系统保持能量的平衡。通信单元采用 ZigBee、Ethernet 和