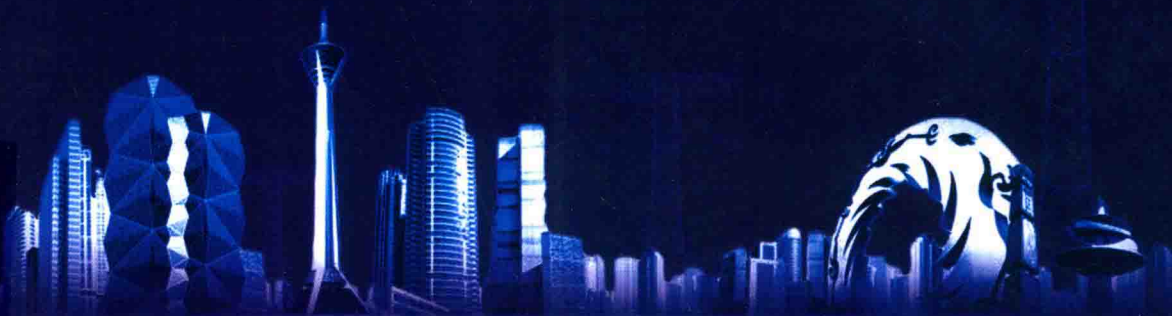


城市能源互联网

· 成都实践

Exploration and Practice in Chengdu:
Urban Energy Internet

褚艳芳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

城市能源互联网

· 成都实践

Exploration and Practice in Chengdu:
Urban Energy Internet

褚艳芳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依托全球能源观,深入分析了城市能源发展所存在的问题,总结了城市能源互联网的内涵和核心特征,在预测未来能源结构的基础上,提出了针对多种能源综合系统的“能源综合调控中心”,并对未来的主要能源分布式电源与微电网做了客观、深入的分析。同时,基于成都实践,阐述了城市能源互联网框架下的部分重要理论研究,为推动城市能源的优化配置提供了全新的解决方案。

全书共七章,分别为城市能源互联网概述、城市能源互联网现状分析、分布式电源与微电网、城市能源互联网构成研究、城市能源互联网创新技术研究、城市能源互联网应用探索、城市能源互联网带来的变革。

本书可供从事和关注城市规划建设及城市能源互联网发展的读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

城市能源互联网:成都实践/褚艳芳编著. —北京:中国电力出版社,2018.1
ISBN 978-7-5198-1434-2

I. ①城… II. ①褚… III. ①互联网络-应用-城市-能源发展-研究-成都 IV. ①F426.2-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第293098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:聂庆 闫姣姣(010-63412433)

责任校对:李楠

装帧设计:张俊霞 赵姗姗

责任印制:邹树群

印 刷:北京大学印刷厂

版 次:2018年1月第一版

印 次:2018年1月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:30.5

字 数:475千字

印 数:0001—3000册

定 价:92.00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

前 言

能源是城市发展的重要物质基础。人类对能源的利用方式经历了多次变革，每一次都牵动着社会的发展，甚至是人类文明的进步。从全球的角度，能源作为现代化进程的基础动力，关系国计民生、人类福祉；从城市的角度，更是建立现代化、国际化都市必不可少的因素。

近百年来，世界能源工业持续飞速发展，给予人类生存发展源源不断的动力。在此过程中，传统化石能源的开采与使用始终占据了很大的比例，从而带来了资源紧缺、环境污染、全球变暖等问题，严重威胁了人类的生存，不利于社会可持续发展。与此同时，全球能源互联网的新发展理念，是从能源输送、能源调度、能源供给三方面对能源领域的全面革新，有利于全人类共同应对日益严峻的资源和环境挑战。

当今，城市发展所需要的能源大部分来自城市以外的区域，能源的对外依存度不断地提高，城市能源问题愈发严峻。同时，大量的化石能源在城市范围内使用，对于空气、水源、土壤等造成的污染与破坏是巨大的。

成都是我国西部的经济中心、科技中心、金融中心、文创中心、对外交往中心和综合交通通信枢纽，总面积达 1.43 万平方千米，常住人口高达 1600 万，全市 GDP 突破 1.2 万亿元，已站上“新常态、万亿级、再出发”的新起点。作为内陆连接“一带一路”和“长江经济带”的天然交汇点，以及“一带一路”战略支点城市，随着国家全面改革创新、新一轮西部大开发、成渝城市群发展等战略的实施，成都正面临一系列重大历史机遇。特别是成为全国第二个被确定为国家中心城市的首省会城市，成都城市地位、竞争力、国际影响力和经济实力提升迎来了历史性的发展机遇。

“国家中心城市”是国家赋予一座城市的发展使命，体现的是国家战略布局，是中国城镇体系中的最高层级，也是综合实力最强的“塔尖城市”。成都作为充满发展潜力的国家中心城市，需要更科学的能源网络、更智能的控制系统以及更安全的供需体系来支撑发展。然而，成都市所处的盆地位置决定了其空气流动性不强，随着城市发展，空气质量问题日益突出，而化石能源的广泛应用将增大环境改善工作难度。并且，城市的发展建设需求与人们的环境友好需求共同决定了大量消耗化石能源的能源利用方式将难以为继。

综合解决能源利用与城市发展问题，打破可持续发展瓶颈的任务已经迫在眉睫。电能具有绿色、清洁、环保的特点，有能力成为世界主导能源；随着各种能源之间的转换技术不断取得突破性的进展，水能、风能、太阳能等清洁能源可转化为电能并得以高效利用，所产生电能的经济性与市场竞争力也在不断提高。从城市能源发展与实际需求来看，开展以电力系统为核心，互联网等前沿信息技术为基础，分布式清洁能源为主要一次能源，与天然气、交通、热/冷供应等其他系统网络紧密耦合而形成的复杂多网流城市能源系统研究，具有重要的理论价值和现实意义。

多能源系统的耦合交互打破了不同种类能源之间的自然界限，标志着传统能源生产消费方式和理念发生了根本性变革。这要求我们在树立全球能源观的基础上，以全球视野、历史视角、前瞻思维、系统方法，在全球能源互联网的框架内，建立城市能源互联网的体系结构，探索创新能源综合管理及运行方式、能源与信息融合及营销服务策略等。在能源开发上实施清洁替代，以分布式清洁能源替代传统化石能源，坚定不移地走低碳绿色发展道路；在能源消费上实施电能替代，扩大电能的使用范围，推广使用电炉锅、电暖器、电采冷以及电动交通工具等，提高电能在终端能源消费中的比重。

城市能源互联网作为城市能源优化配置、高效利用的重要平台，将带来城市能源发展策略、结构布局、产消方式以及能源技术方面的全方位转变。本书基于能源融合发展理念，深入分析了城市能源发展所存在的问题，总结了城市能源互联网的内涵与核心特征，在研究未来能源结构的基础上，提出了针对多种能源综合系统的“能源综合调控中心”，并对分布式电源与微电网作了客观、深入的分析。同时，围绕成都市的实际情况，开展了具有前瞻性、创新性的理论研究和实践，阐述了城市能源互联网框架下的部分重要理论，提出了

优化城市能源配置的解决方案。

全书共分为七章：第一章分析了城市能源互联网的内涵，全面总结了城市能源互联网发展基本原则、核心特征、发展阶段以及城市泛在智能电网的具体内容。第二章介绍城市能源互联网的发展现状，深入分析了国内外研究现状，并针对典型实践介绍了其建设情况。第三章以未来的分布式电源与微电网为重点，客观地评价了其发展概况、问题以及展望，指出分布式电源与微网是城市能源互联网不可分割的一部分。第四章构建了城市能源互联网的总体框架，提出了以能源转换中心、能源路由器为能量流、信息流的交互平台，共同组成城市能源综合调控中心的城市能源互联网架构；分析了城市能源互联网的核心载体、关键技术以及核心技术方向。第五章作为成都实践的理论部分，针对各项研究的具体实施过程，分析了理论现状、相关理论研究以及发展前景，提出了城市能源互联网发展、研究的新思路，并针对现状，做了进一步的理论展望。第六章是第五章理论部分的具体实践介绍，分析各个课题的现状和需求，阐述了成都实践具体内容和效果，并总结其实践的价值与前景。第七章从城市经济、社会发展、人类文明三个方面，阐述了城市能源互联网对于未来城市发展的重大变革与推动作用。

建设城市能源互联网是一个长期的过程，城市能源互联网的实现将有力支撑全球能源互联网的发展。在未来几十年内，城市能源互联网将处于快速发展的关键期，需要各级政府、能源企业以及社会公众的积极参与，加强理念推广、理论研究及建设实践，共同推进城市能源互联网建设，更好地实现城市能源的优化配置和高效利用。

本书基于作者多年来对能源战略问题的思考，结合成都市和成都电网的相关实际，并参考国内外同仁的研究成果，对城市能源互联网理念与发展思路进行了深入研究和实践，希望所取得的成果能够对城市能源互联网的发展有所帮助。

褚艳芳

2016年11月

目 录

前言

第一章 城市能源互联网概述	1
第一节 城市能源互联网的内涵	3
第二节 城市能源互联网发展基本原则	4
一、清洁可再生原则	4
二、综合配置原则	5
第三节 城市能源互联网核心特征	5
一、形式多样	5
二、能源对等	7
三、协同互联	9
四、高度智能	10
五、开放互动	11
第四节 发展阶段	12
第五节 城市泛在智能电网	14
一、城市网架建设	15
二、智能化发展	16
小结	20
第二章 城市能源互联网现状分析	23
第一节 城市能源互联网发展现状	25
第二节 城市能源互联网研究现状	25
一、国外概况	25
二、国内概况	27

第三节 城市能源互联网建设现状	28
一、国外概况	28
二、国内概况	31
小结	35

第三章 分布式电源与微电网

第一节 分布式电源发展概况	39
一、风力分布式电源发展概况	40
二、光伏分布式电源发展概况	47
三、其他分布式电源	50
第二节 微电网发展概况	50
一、全球微电网的发展	51
二、我国微电网的发展	52
第三节 问题与展望	53
一、分布式电源现存问题与展望	53
二、微电网现存问题与展望	56
小结	57

第四章 城市能源互联网构成研究

第一节 城市能源互联网总体构架	61
一、综合调控中心	62
二、能源转换中心	64
三、能源路由器	67
第二节 城市能源互联网的核心载体	68
一、电力系统	68
二、电气化交通系统	69
三、天然气系统	72
四、信息网络与工业控制系统	74
五、其他	76

第三节 城市能源互联网关键技术	76
一、电能替代	76
二、分布式电源并网技术	78
三、储能技术	79
四、主动配电网技术	80
五、多元协同调控技术	83
六、能源生产消费一体化技术	84
七、多元大数据信息融合技术	85
八、信息通信与信息安全技术	89
第四节 核心技术方向	90
第五节 成都实践概述	91
小结	93

第五章 城市能源互联网创新技术研究 95

第一节 城市能源综合管理研究	97
一、电能替代	97
二、城市电动汽车充换电设施建设运营	108
三、城市电能资源优化管理	120
四、城市能源互联网综合管廊	129
五、城市能源互联网应急处理	139
第二节 电网运行技术研究	154
一、城市能源互联网广域后备保护	154
二、城市能源互联网在线稳控决策	167
三、城市能源互联网智能调控	179
四、配电网接地故障处理	193
第三节 能源与信息深度融合研究	203
一、城市能源互联网信息技术应用及信息安全	203
二、城市能源互联网多制式大带宽柔性通信网络架构	217

第四节 新型营销服务策略研究	231
一、城市能源互联网智能小区电力营销技术	231
二、分布式能源与微电网接入下营销策略制定	243
小结	252

第六章 城市能源互联网应用探索 255

第一节 城市能源综合管理实践	257
一、电能替代	257
二、城市电动汽车充换电设施建设运营	273
三、城市电能资源优化管理	289
四、城市能源互联网综合管廊	298
五、城市能源互联网应急处理	322
第二节 电网运行技术实践	340
一、城市能源互联网广域后备保护	340
二、城市能源互联网在线稳控决策	351
三、城市能源互联网智能调控	365
四、配电网接地故障处理	382
第三节 能源与信息深度融合实践	394
一、城市能源互联网信息技术应用及信息安全	394
二、城市能源互联网多制式大带宽柔性通信网络架构	409
第四节 新型营销服务策略实践	423
一、城市能源互联网下智能小区电力营销技术	423
二、分布式能源与微电网接入下营销策略制定	434
小结	451

第七章 城市能源互联网带来的变革 453

第一节 对城市经济的影响	455
一、优化经济结构，实现生产方式变革	455

二、促进行业协同，推动水热电气融合	456
三、创新商业模式，带动新兴产业发展	456
第二节 对社会发展的影响	457
一、改变用户角色，实现能量双向流动	457
二、推进社会变革，构建新型智慧城市	458
三、控制环境污染，营造良好自然环境	459
第三节 对人类文明的影响	459
一、丰富人类物质文明，让生活更智能	459
二、提升人类精神文明，让思想更进步	460
三、促进生态文明发展，让环境更美好	461
小结	461

索引	463
-----------------	------------

参考文献	468
-------------------	------------

后记	476
-----------------	------------

第一章

城市能源互联网概述

能源是人类生存和发展的重要基石。近年来，随着化石能源枯竭与气候环境危机加重，未来人类发展与传统能源结构不可持续性之间的矛盾不断尖锐，世界范围内对能源供给与结构转变的需求也愈发高涨，催生新型能源结构与供给方式的提出。对未来能源结构的展望中，能源互联网



杰里米·里夫金

(Energy Internet, EI) 由杰里米·里夫金于 2012 年在《第三次工业革命》一书中首先提出，并得到了广泛关注，被认为是未来能源行业发展的方向。

在这种背景下，刘振亚所编著的《全球能源互联网》一书的出版，引起了业界同仁的广泛重视。国网成都供电公司积极响应号召，以保障城市能源安全、清洁、可靠供应，实现城市能源与环境、政治、经济、社会协调发展为目标，组织开展了城市能源互联网的基础探索。

第一节 城市能源互联网的内涵

城市能源互联网承接和融入全球能源互联网，在兼容传统电网的基础上，紧密耦合电力网络、天然气网络、热/冷供应网络、电气化交通网络等复杂网络，如图 1-1 所示。它是一种充分高效地利用多种可再生清洁能源以满足用户多样化能源需求的新型能源体系结构。

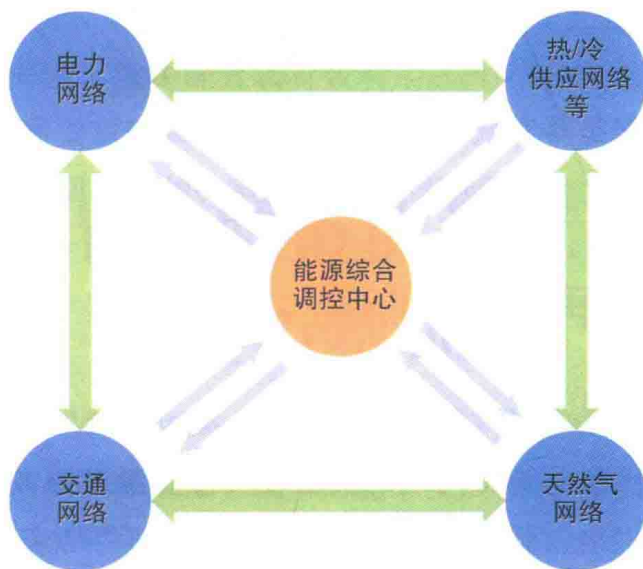


图 1-1 城市能源互联网的概念体系结构

能源互联网强调利用互联网思维实现能源之间的相互转化，以达到互补利用、优化配置的目标。相比其他的能源，电能具有瞬发、瞬供的特性，所以未来能源互联网必然将是以电能为主体形式、以智能电力系统为主要载体的能源生态系统。从功能体系的角度看，能源互联网将会涉及能源的生产、传输、转换和消费等各个环节。从具体实现的角度看，能源互联网的实现形式多种多样，既可以强调发、输环节，在宏观层面通过特高压、交直流输电技术实现能源的跨洲域互联，构建全球能源互联网；又能够关注配、用环节，通过能源转换、主动配电网技术构造城市能源互联网。而全球能源互联网和城市能源互联

网又可以联合互补，构造未来社会完整的能源生态体系。

城市能源互联网是以电力系统为核心，以互联网及其他前沿信息技术为基础，以分布式可再生清洁能源为主要一次能源，与天然气网络、电气化交通网络、热/冷供应网络等其他系统网络紧密耦合而形成的复杂多网流城市能源系统。

第二节 城市能源互联网 发展基本原则

城市能源互联网是落实城市能源可持续发展观的重要支撑，在其发展过程中，要坚持清洁可再生和综合配置两个最为核心的基本原则。

一、清洁可再生原则

清洁可再生原则是应对气候变化、实现人类可持续发展的根本要求。“两个替代”（清洁替代和电能替代）的提出，将使能源发展方式发生重大转变，在能源消费、能源供给、能源技术和能源体制方面都将带来巨大的变革。清洁替代是城市能源互联网发展的必然规律，也是能源结构由高碳向低碳转型的必然选择。

城市作为开展现代化建设的基本单位，应积极响应可持续发展的号召，围绕清洁可再生替代的发展目标，制定相应的能源发展战略规划，加快转变能源发展方式，提高清洁能源在整个能源消费中的比重，全面推进资源的清洁替代。在全球能源互联网的背景下，城市能源互联网围绕城市能源清洁、低碳发展这个目标，加快布局、加快建设，积极推动集中式、分布式清洁能源的高效开发利用，为能源发展方式从传统的化石能源主导向清洁能源的转变提供源源不断的动力。

二、综合配置原则

能源综合配置原则是由城市能源形式多样化与资源优化配置理念共同决定的。分布式清洁能源并网技术的不断提高与能源转换技术的不断进步，为城市资源的优化配置奠定了技术基础。清洁能源具有随机性、间歇性等特征，而具备大规模开发条件的清洁能源资源一般与负荷中心相隔较远。除了分布式清洁能源之外，城市中的其他能源系统网络也能为城市提供一定的资源。唯有站在全局的角度，综合各种能源的优势，统筹考虑城市政治、经济、社会、环境因素，构建能源转换基地、能源综合调控中心等资源优化配置平台，才能最终实现城市能源的高效开发、优化配置和有效利用。

第三节 城市能源互联网 核心特征

城市能源互联网是一种依托于城市的能源发展模式，旨在解决化石燃料枯竭及其造成的环境污染问题，也是一种以新能源技术和信息技术深入结合为特征的新的能源利用体系，强调多种能源形式之间的综合互补利用。作为一套完整的能源生态系统，包括能源供给、能源需求响应、传输、形式转换、数据应用、信息管理以及运行调度控制等，城市能源互联网的能源供给和消费的形式更为多样化，相互之间的转换也更为灵活多变，体现着深刻的变革。因此，城市能源互联网具有其特有的核心特征。

一、形式多样

随着分布式能源技术、新型能源开发技术以及能源转换技术的不断提高，人类可使用能源的种类越来越丰富，在能源网络中的渗透率也逐渐处于一个很

高的水平。

2015年相关调查报告显示,按照目前的开采速度,煤炭、天然气和石油资源大约分别可开采110年、53年和51年,能源转型迫在眉睫;但可喜的是,水能、风能、太阳能等清洁能源非常丰富,并且具有很大的潜力。另外,各种不同类型的能源也在不断地开发利用中,比如潮汐发电、核能发电、盐差发电^①以及巨蟒发电^②等,这些能源发电技术的不断开发和利用,使得能源的多元化和在电网中的渗透率不断提高。

2016年6月1日,21世纪可再生能源政策网络发布《2016年全球可再生能源现状报告》。报告指出,目前可再生能源在全球许多国家都树立了具有竞争力的主流能源地位。该报告通过容量、生产及投资等数据,按类别分析了2015年可再生能源发展现状和各国可再生能源政策。报告显示,可再生能源装机量在2015年创下新纪录,新增可再生能源发电装机容量为历年最高。同时,现代可再生能源容量保持增长态势,可再生能源在交通领域的应用也在扩大。分布式可再生能源的快速发展正在缩短能源富有群体和能源短缺群体之间的差距。报告还公布了可再生能源占全球生产发电量的比例,如图1-2所示。

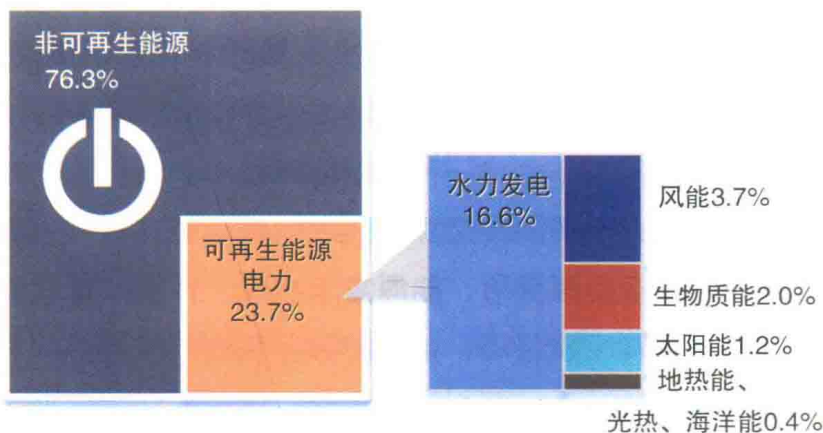


图 1-2 2015 年可再生能源占全球发电量比例

可再生能源等清洁能源的装机容量越来越多,至2015年,全球可再生能源的装机容量达1470吉瓦。同时,可再生能源入网国家的数量不断增加,人

① 指利用海水和淡水间盐度差所产生的势能进行发电的转换作业。

② 指利用海洋能来发电,由于设备装置像一条巨大的蟒蛇,因此被称为“巨蟒”发电。