

能源互联网与能源系统

ENERGY INTERNET
AND ENERGY SYSTEMS

曹军威 著
孙嘉平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

能源互联网与 能源系统

ENERGY INTERNET
AND ENERGY SYSTEMS

曹军威
孙嘉平 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面介绍了能源互联网和能源系统的基本概念和相关技术、产业等知识。全书共8章，主要内容包括能源可持续发展相关概念、能源系统的基本概念及其实现形式、能源系统与电力系统的关系、能源互联网发展状况及其总体架构、能源互联网关键技术及其组成、信息能源基础设施一体化以及能源系统应用产业发展等。

本书可供能源、电力行业的从业者从宏观角度了解行业的基本概念和发展趋势，尤其适用于关注能源互联网技术和发展的人士，为他们提供基础的背景、概念和相关技术知识。同时，本书还可供高等院校相关专业研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

能源互联网与能源系统 / 曹军威, 孙嘉平著. —北京: 中国电力出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5123-8443-9

I. ①能… II. ①曹…②孙… III. ①互联网络—应用—能源发展—研究—中国 IV. ①F426.2-39

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第243148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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年1月第一版 2016年1月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 10.75印张 141千字

定价 45.00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

能源可持续发展是人类面临的共同难题，传统化石能源消耗殆尽，除水力资源作为清洁的可再生能源被广泛用于发电之外，其他具有较大利用潜力的可再生能源，如太阳能、风能等都具有间歇性和不稳定性特点，至今尚未充分加以利用。我国现有的能源生产和利用结构具有资源逆向分布、利用效率低下、集中式电网调节能力有限等特点，因此，2014年我国明确提出了能源生产与消费革命的长期战略；同时，国际上提出第三次工业革命是能源与信息技术碰撞的结果，以能源互联网为主要标志。所有这些都是希望寻求能源可持续发展具有现实意义的可行途径。

本书重点介绍能源系统的概念。传统意义上理解能源系统，可根据能源品种划分成若干子系统，如煤炭系统、石油系统、核能系统、电力系统、热力系统等，更多体现的是一种概念层面的抽象含义，实际情况是不同领域的能源系统依然各自为政，并未实现各种能源之间的多层互动，从而也不能提高能源的整体利用率。本书重点讨论的能源系统特指以电力系统为核心的新一代能源系统。电能是能源系统构成的前提，它将各个分散的、各成系统的能源紧密地结合在一起，各种新能源通过转换为电能而融入整个能源系统。无论是全球能源转型，还是各国都在进行的能源改革创新，都是基于一个核心的发展逻辑：低碳环保和高效利用能源。归根结底，其核心意义是既要在能源消费整体框架中大大

提高电能的比例，又要在电力生产的来源中大大提高清洁能源所占的比例。

能源互联网是未来以电力系统为核心的新一代能源系统的具体实现形式。能源互联网是以互联网理念构建的新型信息—能源融合“广域网”。它以大电网为“主干网”，以微网、分布式能源、智能小区等为“局域网”，以开放对等的信息—能源一体化架构真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用，因此可以最大限度地适应新能源的接入。本书详细介绍了能源互联网的总体架构、技术体系、组成部分、应用和产业发展等。为实现信息能源基础设施层面的融合和一体化，能源互联网相关技术包括储能技术、电力电子控制技术、信息网络通信技术等。能源互联网是我国“互联网+”战略在能源领域的有力实践，结合我国电力体制改革，与分布式能源、新能源、需求侧响应与管理等的发展和推动密切配合，将促进我国能源电力基础设施和体制机制的重大变革。

本书相关的研究工作获得了以下项目的资助：国家自然科学基金委项目“能源互联网建模、分析与优化理论研究”（61472200）、“智能电网信息系统的体系结构和验证环境”（61233016）；科技部“973”基础研究计划课题“源—网—荷协同的智能电网EMS研制与示范应用”（2013CB228206）、“物联网运行支撑平台和实证研究”（2011CB302805），国家电网科技项目“能源互联网技术架构研究”“能源互联网信息通信体系架构研究”“全球视角下能源互联网的系统构建理论及情景分析”“电能质量高级分析关键技术研究及应用”，

南方电网科技项目“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”。本书的写作还得益于作者参与的中国能源互联网发展战略研究工作。2013年9月，国家能源局正式委托江苏现代低碳技术研究院组织开展中国能源互联网发展战略研究。2014年2月课题组在北京正式成立，同年11月研究报告在南京通过了专家评审。本书部分内容源于《中国能源互联网发展战略研究报告》。

在本书的写作过程中，多位院士专家提出了宝贵的意见，他们是清华大学电机系教授韩英铎院士、中国电力科学研究院名誉院长周孝信院士、清华大学计算机系林闯教授等。参与本书工作的研究人员还包括清华大学能源互联网研究小组成员杨明博博士、孟坤博士、明阳阳博士、袁仲达博士、谢涛博士、涂国煜博士、阳子婧博士、高田博士、许延祥博士、张帆博士、万宇鑫博士等。蔡世霞承担了本书的文字整理工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于本书所涉知识较新，加之写作时间仓促，书中疏漏和不妥之处在所难免，欢迎广大专家读者提出宝贵意见和建议。

曹军威 孙嘉平

2015年7月于北京

目 录

前言

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 能源可持续发展 | 1 |
| 1.1 背景介绍 | 2 |
| 1.2 我国能源发展现状 | 3 |
| 1.2.1 一次能源与二次能源 | 4 |
| 1.2.2 化石能源与可再生能源 | 6 |
| 1.2.3 集中式能源与分布式能源 | 7 |
| 1.3 我国能源生产与消费革命 | 8 |
| 1.3.1 能源生产与消费现状 | 10 |
| 1.3.2 能源生产与消费革命的必然性..... | 11 |
| 1.3.3 能源生产消费规划 | 12 |
| 1.4 第三次工业革命 | 14 |
| 1.5 能源、环境与信息 | 16 |
| 1.5.1 能源与环境 | 16 |
| 1.5.2 能源与信息 | 18 |
| 第 2 章 能源系统 | 21 |
| 2.1 背景介绍 | 22 |
| 2.2 能源系统与电力系统 | 23 |
| 2.2.1 电力系统的发展 | 23 |
| 2.2.2 电力在能源系统中的作用 | 26 |
| 2.2.3 电力对环境的影响 | 30 |

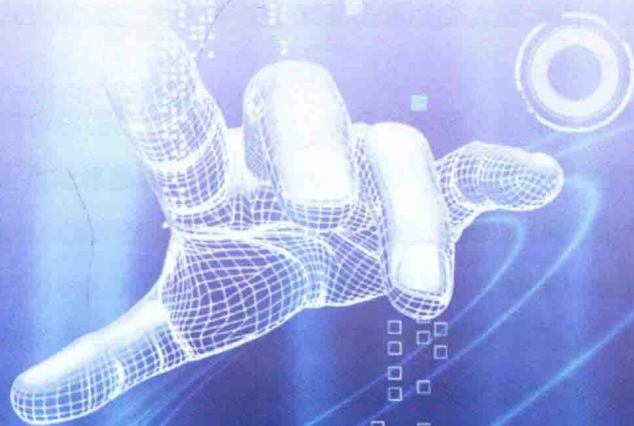
| | | |
|------------|------------------|-----------|
| 2.3 | 能源系统的概念 | 32 |
| 2.4 | 我国能源系统最新发展 | 34 |
| 2.4.1 | 智能能源网 | 34 |
| 2.4.2 | 分布式能源 | 37 |
| 2.4.3 | 能源微网 | 40 |
| 第3章 | 能源互联网 | 43 |
| 3.1 | 产生背景 | 44 |
| 3.1.1 | 互联网发展的启示 | 44 |
| 3.1.2 | 互联网对传统行业的影响 | 45 |
| 3.1.3 | 信息与能源技术发展的相互影响 | 47 |
| 3.2 | 能源互联网的概念 | 51 |
| 3.3 | 国内外能源互联网发展现状 | 53 |
| 3.3.1 | 国外发展现状 | 53 |
| 3.3.2 | 国内发展现状 | 58 |
| 3.4 | 智能电网 | 60 |
| 3.4.1 | 国外发展现状 | 60 |
| 3.4.2 | 国内发展现状 | 62 |
| 第4章 | 能源互联网总体架构 | 65 |
| 4.1 | 建设原则 | 66 |
| 4.1.1 | 信息物理融合 | 66 |
| 4.1.2 | 分布与集中结合 | 68 |
| 4.1.3 | 供给与消费平衡 | 68 |
| 4.2 | 本质特征 | 70 |
| 4.2.1 | 内涵 | 70 |

| | | |
|--------------|------------------|-----------|
| 4.2.2 | 外延 | 71 |
| 4.3 | 总体架构 | 71 |
| 4.3.1 | 能源局域网 | 72 |
| 4.3.2 | 能源广域网 | 73 |
| 4.3.3 | 能源主干网 | 74 |
| 4.4 | 标准体系 | 76 |
| 4.5 | 典型场景 | 79 |
| 4.5.1 | 场景组成 | 79 |
| 4.5.2 | 场景运行 | 80 |
| 4.5.3 | 场景分析 | 81 |
| 第 5 章 | 能源互联网关键技术 | 83 |
| 5.1 | 组网与互操作模型及技术 | 84 |
| 5.2 | 大规模储能系统技术 | 85 |
| 5.3 | 电力电子技术 | 86 |
| 5.4 | 建模、仿真与分析优化技术 | 87 |
| 5.5 | 能量路由器 | 88 |
| 5.6 | 能量管理与大数据分析 | 89 |
| 5.7 | 安全防护、质量监督与认证体系 | 90 |
| 5.8 | 规划、量测、评价与技术经济分析 | 90 |
| 第 6 章 | 能源互联网组成 | 91 |
| 6.1 | 信息系统 | 93 |
| 6.1.1 | 传感和组网 | 93 |
| 6.1.2 | 通信方式 | 95 |
| 6.1.3 | 监控系统 | 97 |

| | | |
|--------------|--------------------|------------|
| 6.1.4 | 数据存储和大数据 | 99 |
| 6.1.5 | 信息管控和云计算 | 104 |
| 6.2 | 能量系统 | 106 |
| 6.2.1 | 生产和输送 | 107 |
| 6.2.2 | 运行和保护 | 109 |
| 6.2.3 | 存储和调峰 | 114 |
| 6.2.4 | 用能和优化 | 118 |
| 6.3 | 业务系统 | 124 |
| 6.3.1 | 供需方管理 | 125 |
| 6.3.2 | 能量交易平台 | 126 |
| 6.3.3 | 能效服务平台 | 130 |
| 第 7 章 | 信息能源基础设施一体化 | 133 |
| 7.1 | 信息技术基础设施一体化进程 | 134 |
| 7.2 | 基于能量路由器的能源互联网 | 136 |
| 7.3 | 典型场景 | 136 |
| 第 8 章 | 能源系统应用产业发展 | 139 |
| 8.1 | 相关产业 | 140 |
| 8.2 | 产业发展现状 | 141 |
| 8.2.1 | 相关产业国际现状及我国发展水平 | 141 |
| 8.2.2 | 产业链及产业环境分析 | 144 |
| 8.2.3 | 产业发展问题 | 145 |
| 8.2.4 | 促进能源互联网产业发展的政策建议 | 148 |
| | 参考文献 | 152 |

第1章

能源可持续发展



1.1 背景介绍

人类生产的工业化和生活的现代化，都是以能源为基础的，现有的能源体系仍主要以化石能源为主，煤、石油等资源是提供动力的主要方式。然而，随着工业化和现代化的飞速发展，在迄今不到 300 年的时间里，地球所蕴藏的煤炭、石油和天然气等化石能源资源已被人类消耗近半，并且能耗的速率有增无减。根据国际能源署（international energy agency, IEA）的预测，煤、石油、天然气的剩余储量可支撑人类活动已不足百年。同时，伴随着煤、石油、天然气在燃用中所产生的二氧化碳等温室气体和各种烟尘污染物，引发了全球变暖、酸雨、雾霾等众多积重难返的气候问题。温室效应使得冰川融化，原本封存在冻土中的甲烷等温室气体进一步释放。地球生态环境将失去平衡，人类将失去生存的自然条件，像距今 7000 万年前的恐龙一样消失。而在此之前，化石能源燃烧产生的气溶胶颗粒造成的雾霾，也将以前所未见的形式严重威胁到人类的健康。气候变化、能源消耗的增加、现有架构局限和矛盾的突显、分布式能源和可再生能源的兴起、需求和理念更新等主客观推动因素的涌现，都预示着人类 200 多年来生产和消费能源的方式是不可持续的，能源革命势在必行。

开发和利用安全、清洁、经济、高效的可再生能源是能源可持续发展的必由之路，这在经过世纪之交的充分思辨和讨论后，成为越来越多人的共识。可再生能源包括水能、风能、太阳能、地热能、海洋能、空气能、生物质能等。可再生能源可再生永续利用，除生物质能外皆清洁无排放。可再生能源资源都源自于太阳，其分布广、总量多、清洁。其中，水能开发利用较早，已被列入传统能源范畴，其他可再生能源则统称为新能源。与传统能源相比，新能源的特征属性有：① 可分步实施，对基础要求不高；② 分布广而能量密度低，不适合远距离输送；③ 有对自然条件，如气象和光照依赖的间歇性和随

机性；④目前生产和利用成本与传统电价比还相对较高。相对于传统化石能源集中式、整体化、稳定程度高的能源生产消费方式，可再生新能源因其分布式、碎片化、间歇性的能源生产消费方式，一度被视为“垃圾能源”。确实，在生产、输配、消费等环节上，可再生新能源亟须借助于理念转变、政策引导、技术进步、习惯养成等，实现对传统能源的补充、替代、平滑衔接和无缝融合。近些年，受新技术突破、规模经济等因素的影响，可再生新能源的价格持续下降，使得其在与传统能源的竞争中更具优势。

人类解决能源危机的努力，可以说就是人类为自身的生存发展所做的努力。如何发展及利用可再生新能源，目前还处在思考、试验和探索之中。例如，对核能这一特殊能源的认识在“开发”和“放弃”中经历着急剧的震荡，各国决策、新材料和新技术的开发、聚变与裂变的进步、乏燃料循环再生、废料处置与辐射防护等处于尚未稳定的试探阶段。然而，随着可再生新能源利用技术的飞速发展，人类对化石能源的依赖程度正在逐步减小，欧盟、美国和中国相继提出到2050年实现可再生新能源利用效率达100%、80%和60%~70%的目标。特别是太阳能、风能、潮汐能及生物质能等，都是具有较大利用潜力的可再生新能源，但受自然条件和生产效率的限制，这些能源往往具有间歇性和不稳定性特点，难以直接为人们所利用^[1]。

1.2 我国能源发展现状

能源是指能够直接取得或者通过加工、转换产生各种能量（如热量、电能、光能和机械能等）的自然资源。能源的种类繁多，根据不同的划分方式，可以分为不同类型。主要分类有：一次能源和二次能源；常规能源和新能源；可再生新能源和不可再生新能源；清洁能源和非清洁能源等。

按能源的基本形态分类，有一次能源和二次能源。一次能源是指从自然界取得的未经改变或转变而直接利用的能源，如煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等。二次能源是由一次能源经过加

工直接或转换得到的能源，如电能、热能、煤气、蒸汽、激光、沼气及各种石油制品等。

一次能源按可再生性又可分为可再生能源（如生物质能、风能、水能、太阳能、海洋能、核能、地热能等）和不可再生能源（如原煤、原油、天然气等化石能源）。按能源性质分，有燃料型能源（煤炭、石油、天然气、泥炭、木材）和非燃料型能源（水能、风能、地热能、海洋能）。按能源使用的类型，又可分为常规能源和新型能源。常规能源包括一次能源中可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气等资源。新型能源是相对于常规能源而言的，包括太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能，以及用于核能发电的核燃料等能源。按能源部署方式，又可分为集中式能源和分布式能源。

我国现有的能源生产和利用结构具有资源逆向分布、利用效率低下、集中式电网调节能力有限等特点。常规能源资源缺乏及化石能源污染，迫使能源生产和利用向新能源和清洁能源转变；对太阳能、风能、水能等的利用，偏远西部地区可尽量采取大规模开发和集中式利用，在中东部的负荷中心更适合分布式开发和就地利用。

1.2.1 一次能源与二次能源

我国能源发展呈现多元重叠趋势，一是化石能源进入煤炭与油气并重的“双碳”时代，二是终端消费由一次能源更多向以电力为主的二次能源转变，三是绿色能源成为未来能源发展不可忽视的力量。

目前我国一次能源利用较多的是煤炭、石油、天然气、核能和水能这几种资源。由于煤炭在能源中的重要地位，今后一段时期内，煤炭仍将是我国主要的一次能源，在能源消费结构中占据主体地位。我国煤炭储量丰富，煤炭在一次能源生产和消费结构中的比重一直保持在 70% 左右；已探明煤炭储量 1145 亿 t，占世界总量的 13.3%，按照目前的开采速度，在未来的几十年，煤炭在能源结构中的比例会有所降低。我国缺油少气，石油和天然气探明储

量分别为 24 亿 t 和 3.1 万亿 m^3 ，仅为世界总量的 1.0% 和 1.7%，按照目前的开采速度，从石油和天然气的储采比来看，分别为 28.9 年和 33 年。因此，在平等互利和保证国家能源安全的前提下，应充分利用国外的能源资源。

我国一次能源中的水能、风能、太阳能等可再生资源较为丰富。其中，70% 的水能资源分布在西部地区，现已得到大量开发利用。2014 年底，水电装机容量突破 3 亿 kW，发电量占全国发电量的 20%。风能主要分布在东北、西北、华北及东南沿海区域。2014 年，我国并网风电达 9581 万 kW。我国幅员辽阔，太阳能资源丰富，主要分布在西藏、新疆、甘肃、青海等地区，太阳能利用技术也已成熟，太阳能发电呈加速发展的态势，每年新增装机容量 1000 多万 kW。2014 年，我国并网太阳能发电装机容量达 2652 万 kW。此外，核能作为一种清洁能源，近几年发展较快。2014 年，我国核电装机容量为 1988 万 kW，随着可再生能源的利用与核电的发展，我国的电气化水平逐年提高。

能源消费结构方面，在世界一次能源消费中：煤炭占 29.9%，石油占 33.1%，天然气占 23.9%，核电占 4.5%，水电占 6.7%，其他可再生能源占 1.9%^[3]。在我国一次能源消费中，石油和天然气分别占 18.4% 和 5.8%，低于世界平均水平；煤炭占 66.1%，远高于世界平均水平。原油消费在我国能源结构中所占的比例虽较小，但总量位居世界第二，仅次于美国，占世界原油消费总量的 9.3%。核能消费量较少，仅占世界核能消费总量的 2.3%，在一次能源消费中的比例为 0.8%，远低于世界平均水平（6.84%）。水能消费总量位居世界第一，占世界水能消费总量的 15.4%，在一次能源中的消费比例为 5.9%，略低于世界平均水平的 6.7%^[2]。截止到 2014 年，我国一次能源消费总量中，煤炭、石油、天然气分别为 24.8 亿、6.9 亿、2.2 亿 t。我国一次能源消费结构不合理，且能源分布不均匀，富煤、缺油、少气；同时，由于煤的结构和组成相对复杂，从而给大规模开发利用带来了诸多生态、环境问题。

目前，我国一次能源的转换形式多种多样，如电能、热能、蒸汽等二次能源，并都已形成方便使用的基础设施网络。电能是高品质的二次能源，其

转化效率远高于煤炭等一次能源。现有的能源体系还是主要以化石能源为主，煤炭、石油等资源是提供动力的主要方式，以电能驱动的各种应用设备的普及，使得电力传输网络较好地实现了能源的远距离配送，并已经达到了相当规模。随着越来越多的电动设备，如电动汽车等的成熟，电力资源将成为未来的主要能源形式。一次能源的结构决定了发电量的结构。从世界部分国家的能源结构可以看出，煤炭转换为电能的比重明显高于煤炭作为一次能源直接消费的比重。电力增长速度远高于一次能源增长速度，发电能源在一次能源消费中的比重和电力消费在终端能源消费中的比重持续增长。我国发电用能源和电力在终端能源消费中的比重也在逐年提高。2003 ~ 2013 年，我国发电用能源和电力在终端能源消费中的比重分别从 39.53% 和 16.72% 提高到 45.24% 和 22.56%，电力消费用煤由 49.42% 提高到 55.69%^[3]。

1.2.2 化石能源与可再生能源

我国拥有较为丰富的化石能源，其中煤炭占主导地位，可采储量占 94.4%；石油、天然气等优质传统化石能源相对不足，可采储量分别占 2.5%、3.1%；油页岩、煤层气等非常规化石能源储量潜力较大，但资源总量与我国经济社会发展需求之间存在较大差距。我国煤炭剩余储量居世界第三位，但开采量巨大，储产比仅为 35 年，相当于世界平均水平的 29.7%，石油、天然气储产比则相当于世界平均水平的 21.4% 和 49.5%。因此，我国传统化石能源资源储产比前三位分别为煤炭、天然气、石油。随着勘探技术、开采技术的发展，储采（产）比会不断增大，化石能源，尤其是传统化石能源支持人类社会发展的可持续性显而易见。随着化石能源逐渐枯竭，新能源（可再生资源、核能、可燃冰等）必将取代它们而发挥主要作用。

我国可再生能源资源（或可利用发电的主要可再生能源）潜力巨大，其中水力资源理论蕴藏量折合年发电量为 6.19 万亿 kW·h，经济可开发年发电量约 1.76 万亿 kW·h，相当于世界水力资源量的 12%，列世界首位。2013 年，

水电发电量为 8921 亿 kW·h。风能方面,我国拥有世界上最丰富的风力资源,10m 高度层的风能资源总储量为 32.26 亿 kW,其中实际可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿 kW。2013 年,风电发电量为 1383 亿 kW·h。太阳能方面,据估算,我国陆地表面每年接收的太阳辐射能约为 50×10^{18} kJ,全国各地太阳年辐射总量达 335 ~ 837 kJ/cm²,中值为 586 kJ/cm²,但对太阳能的开发利用却仅仅在近些年才提上日程。2013 年,太阳能发电量为 84 亿 kW·h。地热能方面,据不完全统计,我国仅 12 个主要沉积盆地的地热资源储量折合标准煤就高达 8532 亿 t,可采资源量折合标准煤 2560 亿 t。在现有技术经济条件下,我国每年可利用的地热量为 6.5 亿 t,相当于 6.5 亿 t 标准煤。潮汐能方面,可开发装机容量为 200kW 以上的潮汐资源,总装机容量为 2179 万 kW,年发电量约 624 亿 kW·h。除上述可再生能源外,核电发电量为 1115 kW·h,其他能源发电量为 2.8 亿 kW·h。

进入 21 世纪以来,“绿色化”“多元化”的发电特点较为明显,核电与各种新兴可再生能源(区别于水电)发展明显加快,火电装机容量比重逐步下降。到 2013 年底,我国水电装机容量为 28 044 万 kW,稳居世界第一;核电装机容量为 1466 万 kW;并网风电装机容量达到 7652 万 kW;并网太阳能发电装机容量达到 1589 万 kW;其他可再生能源发电,如生物质发电、地热发电等发展提速。

1.2.3 集中式能源与分布式能源

分布式能源是指分散存在且易于利用的各种类型的能源,包括可再生能源(如太阳能、生物质能、风能、水能、波浪能等)和可方便获取的化石类燃料(如天然气)。将这些能源转换为电能充分加以利用,实现对用户的分布式供电,有助于提升能源的利用效率,更好地满足用户的能源需求。

在分布式能源中,可再生能源不会对环境造成影响,可以被重复利用,具有可持续的特点,因此受到各国能源专家的重视,被视为替代传统能源的可靠途径。我国电网目前为高度集中的层级式电网,根据国情,只能走逐步