

能源互联网与 智慧能源

ENERGY INTERNET AND SMART ENERGY

冯庆东 编著



能源互联网与智慧能源

冯庆东 编著



机械工业出版社

本书分上下两篇。上篇主要从能源互联网的角度分析了其发展背景、定义、功能、特征和架构；详细阐述了建设能源互联网需要的关键技术，包括能源基础设施关键技术、信息和通信关键技术、电力电子技术和平台技术。下篇主要研究、介绍了以先进信息和通信技术为基础的智慧能源体系；分析了国际和国内能源产业的发展现状；然后给出了智慧能源的定义、功能、特征和体系结构；指出了智慧能源网络的特点是能源的多元化、集约化、清洁化、精益化、低碳化和智能化，其目标是推动能源生产智能化与能源消费的根本性变革，通过能量总量控制、能源生产与消费的智能配置，保证我国能源安全、清洁、高效。

图书在版编目 (CIP) 数据

能源互联网与智慧能源/冯庆东编著. —北京:
机械工业出版社, 2015.9
ISBN 978-7-111-51571-1
I. ①能… ②冯… III. ①新…源—互联网络—研
究 IV. ①DF407.2②TP393

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第 214317 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 王欢 责任编辑: 王欢
版式设计: 霍永明 责任校对: 陈秀丽 刘秀丽
封面设计: 路恩中 责任印制: 乔宇
北京京丰印刷厂印刷
2015 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·22.75 印张·2 插页·560 千字
0 001—4 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-51571-5
定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序

能源互联网是当前国内外关注的一个热点问题，也是一个正在探讨中发展的概念。

人类发展遭遇的资源、环境制约和应对气候变化的需求，注定了能源体系必须向绿色、低碳、高效转型。终端能源将日益电气化，而电力结构将经历一个化石能源与非化石能源并存的多元阶段，最终走向以非化石能源为主的局面。另一方面，以“大智移云”（大数据、智能化、移动互联网、云计算）为代表的信息技术的发展，也为能源体系的变革提供了新的手段和动力。在这样的背景下，“能源互联网”和“智慧能源”等概念应运而生。我理解，其基本思想是，运用互联网理念及信息技术与可再生能源的融合，构成一个新型的能源网络；同时，通过信息技术对能源体系的动态测控、互联互通，提高能源效率，降低能源成本，推动智能电网和分布式能源的发展，促进能源低碳化，以质的变革重塑能源。这和我国提出的“能源革命”的思想，在方向上是高度一致的。“能源互联网”的发展将推动能源（特别是电力）技术、管理、体制和商业模式的一系列变革与创新，而分布式的能源“产消者”（生产者与消费者合一）的出现，“智慧低碳社区/乡村”的建设，将带来社会“细胞”的进步和公民素质的提高，意义不可低估。

今年国务院颁布的《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》中，专门讲到了“互联网+智慧能源”，标志着我国“能源互联网”的构建已开始提上日程。在我国，“能源互联网”不仅引起了热烈的讨论，也存在着不同的理解。本书作者冯庆东先生基于他多年工作的实践，从我国国情和能源实际出发，全面阐述了他对“能源互联网”和“智慧能源”的理解，介绍了国内外的最新进展与发展趋势，供大家学习、参考和研讨。

作者把书的样稿寄给我，给了我一个先睹为快的学习机会。上面所写，算是初步的学习心得，也以此表示对他的感谢，并祝愿本书的出版将有助于学界深化共识，扎实推动我国能源革命的发展。

杜祥琬

2015年9月28日

前 言

我们正处在能源转型的大背景下，将带来以下变化：太阳能与风能大量接入将改变电力系统结构；电源侧基荷火电厂将逐步减少，可再生能源发电比例将逐步提高；电网侧将实现灵活扩容、灵活接线、灵活的拓扑结构，支撑区域能源优化与分布式能源的协调控制；负荷侧将提升用能优化及需求响应水平，实施能源总量控制，发展柔性负荷与主动负荷。

目前，我国的能源利用效率还低于国际平均水平，能源发展要从实际出发，因地制宜，走“开源与节流”并重的方针，开源的主要任务是尽可能多地接纳与使用可再生能源，节流的主要任务是节能与提高能源利用效率。

能源互联网与智慧能源将成为未来的发展趋势。期望通过能源互联网与智慧能源建设，能够为尽可能多地接纳可再生能源、提高能源利用效率、推动能源生产与能源消费实现根本性改变提供可行的解决方案。

能源互联网是以电力系统为核心，以智能电网为基础，以接入可再生能源为主，采用先进信息和通信技术及电力电子技术，通过分布式动态能量管理系统对分布式能源设备实施广域优化协调控制，实现冷、热、气、水、电等多种能源互补，提高用能效率的智慧能源管控系统。从系统科学的角度来说，能源互联网是智能电网的扩展和延伸，本质上也属于复杂交互式网络与系统（Complex Interactive Networks/Systems Initiative, CIN/SI）的范畴。

能源互联网是智能电网的丰富和发展，能源互联网与智能电网研究的内容高度交叉重叠。从系统科学的角度来说，能源互联网与智能电网，都是要通过能源互联、信息互联、能量信息融合、能量高效转换、集成能量及信息架构（Integrated Energy and Communication Systems Architecture, IECSA），来建设复杂交互式网络与系统。

我国的智慧能源体系建设要从我国实际出发，因地制宜、循序渐进，按照技术成熟度，以分布式能源、微网、需求侧管理、需求响应、储能、节能及提高能效为切入点，首先在终端用能层面实现全监测、全计量、全互动、选择性控制及数据可视化，然后采用先进信息和通信技术（Information Communication Technology, ICT）遵循开放性体系架构，融合模型、技术标准、通信协议，将电力网、热力网、天然气管网、交通网、及电动汽车充电站（桩）等互联，形成“智慧能源网”，实现智能协同控制，开展能量管理及能量交易。

本书的编写目的主要是为国家能源互联网与智慧能源建设提供参考与服务。

本书分上下两篇。上篇主要从能源互联网的角度分析了其发展背景、定义、功能、特征和架构；详细阐述了能源互联网需要的关键技术，包括能源基础设施关键技术、信息和通信关键技术、电力电子技术和平台技术。下篇主要研究、介绍了以先进信息和通信技术为基础的智慧能源体系；分析了国际和国内能源产业的发展现状；然后给出了智慧能源的定义、功能、特征和体系结构；指出了智慧能源网络的特点是能源的多元化、集约化、清洁化、精益化、低碳化和智能化；其目标是尽可能多地接入可再生能源，实现能源总量控制，提高能效，节约能源，推动能源生产与能源消费实现根本性改变。

本书在编写过程中得到了牛曙斌先生、冯东先生、杜升云先生、周治国先生、王林青先生、陈梦园博士等的大力支持，在此表示感谢。

本书的编写结合了作者多年从事电力科研项目、工程实践、调度运行工作积累的第一手资料、数据、案例，以及总结和体会。

原中国工程院副院长、中国工程院院士杜祥琬为本书做序，在此表示感谢。

由于作者编写水平有限，只能抛砖引玉，敬请读者不吝赐教，更希望听到读者的真知灼见。

作者

2015年10月

目 录

序 前言

上篇 能源互联网

第 1 章 能源互联网的定义与特征	3	第 4 章 能源互联网的技术框架	24
1.1 能源互联网的定义	3	4.1 能源基础设施	25
1.2 能源互联网的特征	5	4.2 信息和通信技术	26
1.3 发展目标和原则	6	4.3 开放互动平台	27
1.3.1 发展目标	6	4.4 架构	27
1.3.2 发展原则	7	第 5 章 能源互联网基础设施关键	
1.4 对我国能源战略的意义	8	技术	28
1.5 对能源生产与消费模式的影响	9	5.1 固态变压器与功率器件	28
第 2 章 国内外能源互联网的研究		5.1.1 固态变压器原理及其与传统变	
与进展	12	压器的区别	28
2.1 美国：“FREEDM”系统与能源		5.1.2 固态变压器的特征	28
互联网	12	5.1.3 固态变压器现状及未来对电力电	
2.2 美国：能源网络集成	13	子技术的要求	29
2.3 德国：能源的互联网	14	5.2 能量路由器	31
2.4 欧洲：智能电网标准体系	14	5.2.1 能量路由器的架构	31
2.5 欧洲：综合能源网络	15	5.2.2 能量路由器的概念	33
2.6 日本：以智能电网为核心的智		5.2.3 能量路由器的现状和未来发展	34
慧能源共同体	16	5.3 分布式能源设备	34
2.7 日本：数字电网	17	5.3.1 分布式能源设备的概念	34
2.8 我国：能源互联网	18	5.3.2 分布式能源设备的技术特	
第 3 章 能源互联网的功能定位与		征和经济性分析	35
技术需求	19	5.3.3 分布式能源设备的应用现状和	
3.1 可再生能源与清洁能源接入	19	未来发展	36
3.2 需求侧参与能源网络互动	19	5.3.4 分布式发电并网标准	39
3.3 基于分布式能源网络的优化管理	20	5.4 微网	44
3.4 能源的灵活转换与能源综合利用	21	5.4.1 微网的概念	44
3.5 能源交易与商业服务模式	21	5.4.2 微网的组成	44
3.6 输电网与配电网管理智能化	22	5.4.3 微网的应用现状和未来发展	50
		5.5 储能系统	55

5.5.1 储能技术在发电侧需求分析	56	挑战	135
5.5.2 储能技术在输电侧需求分析	60	7.2 复杂软件技术	136
5.5.3 储能技术在配电侧需求分析	62	7.2.1 能源互联网中复杂软件系统的定义和特点	136
5.5.4 储能技术在用户侧需求分析	64	7.2.2 能源互联网对软件技术提出的挑战及应对法则	137
5.5.5 储能技术在微网侧需求分析	65	7.2.3 应对法则对软件技术的要求	139
5.5.6 储能技术在应急电源侧需求分析	65	7.3 信息物理系统技术	142
5.5.7 储能技术国内外发展趋势	67	7.3.1 能源互联网中信息物理系统的定义与发展	142
5.5.8 储电相关技术	71	7.3.2 信息物理系统的架构	143
5.5.9 储热相关技术	73	7.3.3 信息物理系统的重要特性	145
5.5.10 储气相关技术	74	7.3.4 信息物理系统在能源互联网中的应用	146
5.5.11 储氢相关技术	75	7.3.5 能源互联网对信息物理系统的挑战和未来发展	147
5.5.12 储能配置方法与原则	83	7.4 信息和通信技术	150
5.5.13 储能产业技术路线图	86	7.4.1 能源互联网对信息和通信技术提出的挑战	150
5.6 主动配电网	88	7.4.2 信息和通信技术的未来发展	151
5.6.1 主动配电网的概念	88	7.5 大数据和云计算技术	153
5.6.2 主动配电网的技术特征	88	7.5.1 大数据分类及对应的处理系统	153
5.6.3 我国配电网的现状 & 主动配电网的发展前景	89	7.5.2 大数据分析与计算——云计算技术	155
5.6.4 IEC 61850 数据建模	90	7.5.3 大数据及云计算技术在能源互联网中的应用	156
5.6.5 主动配电网分布式控制系统	94	7.5.4 能源互联网对大数据及云计算技术提出的挑战	157
5.6.6 基于 μ PMU 的主动配电网广域量测与故障诊断技术	101	第 8 章 能源互联网应用与服务平台	158
第 6 章 能源互联网能量及故障管理技术	116	8.1 能源市场交易平台	158
6.1 智能能量管理技术	116	8.2 能源需求侧管理平台	159
6.1.1 能量设备即插即用管理技术	118	8.2.1 需求侧管理平台的结构层次	159
6.1.2 分布式能量管理与协同控制技术	119	8.2.2 需求侧管理平台的实现策略	161
6.1.3 基于可再生能源预测的控制策略优化技术	120	8.3 能源需求响应平台	162
6.1.4 储能管理技术	120	8.3.1 需求响应的措施	162
6.2 智能故障管理技术	130	8.3.2 需求响应平台技术	164
第 7 章 能源互联网信息和通信技术	132	8.4 能效分析平台	164
7.1 微电子技术	132	8.4.1 能效分析平台的结构层次	165
7.1.1 信息采集芯片对微电子技术的挑战	132		
7.1.2 通信芯片对微电子技术的			

8.4.2 能效分析平台的功能结构	167	10.3 对我国能源互联网标准化工作的 建议	183
8.4.3 能效分析平台的通信网络	167	10.4 我国能源互联网标准化路 线图	184
第9章 能源互联网架构设计	169	第11章 能源互联网的规划与发展 趋势	185
9.1 参考架构	169	11.1 重点任务	185
9.1.1 面向服务的架构	169	11.2 建设路径	191
9.1.2 分布式自治实时架构	170	11.3 保障措施	194
9.1.3 软件定义光网络架构	171	11.4 发展趋势	196
9.2 能源互联网架构	173		
第10章 能源互联网标准	175		
10.1 能源互联网标准化体系架构	175		
10.2 国内外标准化现状与最新进展	176		

下篇 智慧能源

第12章 智慧能源的定义与特征	201	13.1.1 技术基础	208
12.1 智慧能源的定义	201	13.1.2 实践基础	210
12.2 智慧能源的基本特征和基本内涵	201	13.2 发展智慧能源面临的重要机遇	213
12.2.1 基本特征	201	13.2.1 发展智慧能源的国际环境	213
12.2.2 基本内涵	202	13.2.2 当前是发展智慧能源的战略 机遇期	214
12.3 智慧能源的体系架构	203	13.2.3 发展智慧能源有助于我国实 现应对气候战略	214
12.4 智慧能源发展的战略目标	203	13.3 发展智慧能源面对的主要问题与 挑战	215
12.5 以智能电网及能源互联网为基础 发展智慧能源	204	13.3.1 发展智慧能源面对的主要 问题	215
12.5.1 智能电网和能源互联网将在 未来能源供消和输配体系中 发挥重大作用	204	13.3.2 发展智慧能源面对的主要 挑战	216
12.5.2 能源消费方式将转向基于能 效最优的多元化能源综合 利用	205	第14章 智慧能源发展的重点 领域	218
12.5.3 智能电网是实现能源转型的 重要载体	206	14.1 加快推进智能电网建设	218
12.5.4 智能电网是实现智慧能源网 络的关键设施	206	14.1.1 发展智能电网的重要意义	218
12.5.5 智能电网体系架构已经具备 成为智慧能源网络的良好 基础	207	14.1.2 我国关于促进智能电网发展 的重要文件	222
第13章 发展智慧能源的机遇与 挑战	208	14.1.3 促进智能电网发展的主要 工作	226
13.1 发展智慧能源的基础	208	14.2 推进能源网络智能化	228
		14.2.1 煤炭行业的清洁化、智能 化发展	228

14.2.2	石油行业的智能化发展	232	16.2	面向工商业的试点项目与案例 分析	276
14.3	智能电网支撑智慧能源公共服务 平台的发展	237	16.2.1	项目概况	276
14.3.1	公共服务通信信息平台服务 多网融合	237	16.2.2	设计依据	277
14.3.2	智能配电网支撑智能社区的 建设	238	16.2.3	设计目标	277
14.3.3	智能配电网支撑智慧城市的 发展	242	16.2.4	智能用电设计方案	278
第 15 章	智慧能源关键技术	246	16.2.5	需求响应技术方案	280
15.1	分布式能量管理系统	246	16.2.6	智慧能源管理方案	282
15.1.1	分布式能量管理系统概述	246	16.2.7	智慧能源管理系统与微网联 动设计方案	289
15.1.2	分布式能量管理系统架构	247	16.2.8	容量配置及模拟仿真	297
15.1.3	分布式能量管理系统功能	247	16.3	园区微能源网系统与智慧能源云 平台项目及案例分析	303
15.2	柔性能源协调控制技术	251	16.3.1	项目概要	303
15.2.1	冷热电联供技术	251	16.3.2	系统组成及功能介绍	305
15.2.2	冷热电联供地源热泵技术	253	16.3.3	光伏系统	306
15.2.3	相变储能技术	254	16.3.4	燃气内燃机冷热电联供 系统	307
15.2.4	区域能量管理优化技术	254	16.3.5	水储能空调系统	308
15.3	智慧能源标准化设计	255	16.3.6	磁悬浮立轴风力发电机组	308
15.3.1	物联网技术在智慧能源领 域的应用	255	16.3.7	燃气燃料电池	309
15.3.2	标准化的智慧能源设计	256	16.3.8	微能源网能量管理系统及 智慧能源云平台	309
15.4	物联网、大数据及云计算在智 慧能源中的应用	257	16.3.9	案例分析	312
15.4.1	基于 ZigBee 技术的企业智 慧能源云平台	261	16.4	能源互联网环境下数据中心能耗 优化管理案例分析	313
15.4.2	智慧能源云平台	265	16.4.1	专用数据中心能耗组成和 优化管理方案	313
15.4.3	基于智能用电需求响应的 云平台	267	16.4.2	案例分析	323
第 16 章	能源互联网与智慧能源 项目及案例分析	270	16.5	德国 E-Energy 项目及案例 分析	324
16.1	面向园区的试点项目与案例 分析	270	16.5.1	库克斯港 eTelligence 示范项 目及案例分析	324
16.1.1	项目概述	270	16.5.2	曼海姆示范城市项目及案例 分析	326
16.1.2	项目特点	270	16.5.3	莱茵鲁尔区示范项目及案例 分析	327
16.1.3	用电负荷估算与需求分析	271	16.5.4	哈尔茨地区 100% 可再生能 源发电项目及案例分析	328
16.1.4	项目实施方案	272			
16.1.5	案例分析	275			

16.6 日本综合能量管理系统项目及 案例分析.....	331	16.6.2 孤岛微网系统项目及案例 分析.....	340
16.6.1 综合能源与社会网络项目及 案例分析.....	331	参考文献	347

上 篇

能源互联网

第 1 章 能源互联网的定义与特征

目前，对于能源互联网还没有广泛认可的定义，能源互联网的理论体系、技术体系、标准体系、产业体系还没有形成，能源互联网建设不只是能源行业的任务，我们期待社会各界以开放的心态，从实际出发，调动全社会的资源，借助能源互联网与智慧能源的开放平台，采用科学方法，遵循客观规律，以创新为驱动力，以解决我国能源供应与消费实际问题为基本原则，以尽可能多地接纳可再生能源及提高能源利用效率作为切入点，采取科学合理的商业模式，让各参与方从能源市场交易中获利，从而促进我国的能源互联网健康发展。本章主要介绍国内外关于能源互联网的定义与特征、发展目标与原则、战略意义及对我国能源生产与消费模式的影响。

1.1 能源互联网的定义

“能源互联网”这一概念最早是由美国经济学家杰里米·里夫金在《第三次工业革命》一书中提出的。里夫金认为可以通过互联网技术与可再生能源相融合，将全球的电力网变为能源共享网络，使亿万人能够在家中、办公室、工厂生产可再生能源并与他人分享。这个共享网络的工作原理类似互联网，分散型可再生能源可以跨越国界自由流动，正如信息在互联网上自由流动一样，每个自行发电者都将成为遍布整个大陆的没有界限的绿色电力网络中的节点^[1]。能源互联网示意图如图 1-1 所示。

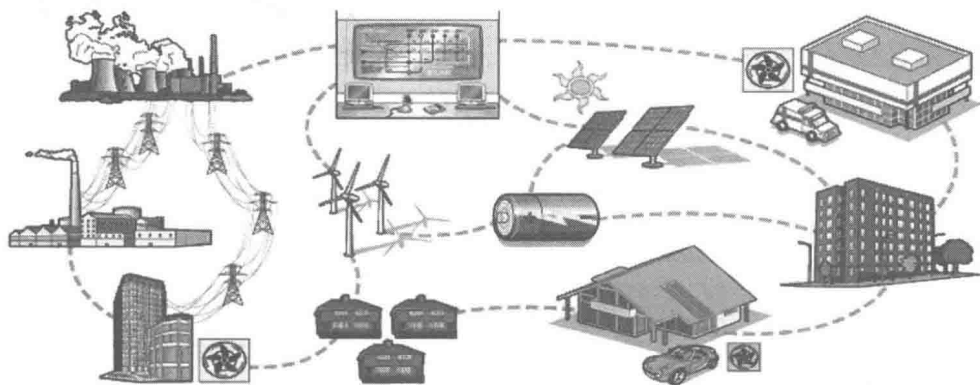


图 1-1 能源互联网示意图

我们认为，能源互联网不是一个虚无缥缈的概念，最终是要落地的。里夫金提出的能源互联网更多的是愿景，没有提出具体的实现方法。我们的任务是脚踏实地研究如何将美好的愿景变为现实。在我国建设能源互联网还需要走很长的路，需要从实际出发，开展理论研究、技术创新、科学实验、工程实践等一系列活动，需要研究建设能源互联网所需的关键技术及装备，带动能源产业发展，推动能源体制改革，探索出能够真正解决中国能源生产与消费中的实际问题的发展模式。

我国的能源互联网与智慧能源建设要从我国的实际出发，因地制宜，遵循基本的客观规律。目前，我国能源的实际是“富煤、贫油、少气”，已探明的天然气储量很少，页岩气开采技术储备不足，城市管网不发达，缺乏统筹规划与设计，能源品种之间耦合度与协调性不高，能源利用率低于国际平均水平，能源资源分布不均衡，地区之间差异较大，人均占有能源资源比例偏低。我国的电网是同步大电网，电源结构、电网结构、负荷结构与欧美国家也有许多不同之处，为了适应未来能源转型的需要，面向未来建设先进能源基础设施，我国的电源结构、电网结构、负荷结构均需进行长期的调整与变革。

能源互联网与智能电网不是对立的关系，也不是非此即彼的关系，而是高度协调与深度融合的关系，能源互联网与智能电网的技术标准及架构都在不断发展之中，能源互联网与智能电网的研究内容高度重叠。里夫金提出的能源互联网是愿景，如果在可再生能源高渗透率区域能源网络基本形成的情况下，可能在某些局部地区出现，但实际上短期内不具有普遍意义。开展我国能源互联网与智慧能源研究与建设，不能盲目照搬照抄别国模式，而需要从我国能源实际出发，兼顾战略性、必要性、技术可行性与经济可行性，以严谨务实的态度，脚踏实地的精神，在进行充分的科学合理论证的基础上，开展试点及相关实践活动。

我国学者吴安平认为里夫金的构想符合能源革命的方向，但其中存在着不可忽视的技术失误：由于能源共享网络（即电网）和互联网截然不同的特性，能源（电力）难以也没有必要像信息一眼在任意两个节点之间自由交互；里夫金提出的能源互联网构想仅能够在一个局部的区域（如一片社区或一座城市）内实现。吴安平进一步提出了能源互联网应该是智能电网和智慧能源网两种技术模式的外延。智能电网以电力系统为研究对象，以绿色化为主要目标；智慧能源网则重点研究各类能源的相互转换及各种能源网间的协同配合和优势互补等问题，主要目标是最大限度地提高能源的利用率及清洁能源的消费比例^[2]。

值得重视的是，国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）从智能电网建设的驱动力和本质属性出发，站在未来能源转型、能源发展战略和发展路径、自然环境与人类社会发展的高度，已经对未来智能电网的内涵和外延做了丰富和发展。

2011年10月国际电工委员会在墨尔本会议上决定把以电力系统智能化为基础的网架定义为智能电网的1.0版(Smart Grid 1.0);把以多种能源网络智能化为基础的多能源网架定义为智能电网的2.0版(Smart Grid 2.0),它更加注重集成多种能源网络和用能终端的协调因素,努力实现多种能源网络协调互补。

国际电工委员会把实现能源网络、社会网络、信息网络、环境网络及自然网络的整体融合定义为智能电网的3.0版(Smart Grid 3.0)。

这不是随便定义的,国际电工委员会后续在开放性平台、架构及标准方面将是有行动计划作为支撑的。我们已经注意到,除了已经发布的IEC 62357、IEC 61850、IEC 61970、IEC 61968、IEC 62351五个核心标准之外,国际电工委员会已经发布了如下能源互联标准:

- 新增能源服务供应商接口标准 NAESB REQ-21;
- 智能电表数据第三方访问标准 NAESB REQ-22;
- 宽带电力线载波共享技术标准 NISTIR 7862;
- 智慧能源规范协议 SEP 2.0 等;
- IEC 18880 社区智慧能源标准。

综合国内外学者的观点,我们认为能源互联网是以电力系统为核心,以智能电网为基础,以接入分布式可再生能源为主,采用先进信息和通信技术及电力电子技术,通过分布式智能能量管理系统(Intelligent EMS, IEMS)对分布式能源设备实施广域协调控制,实现冷、热、气、水、电等多种能源互补,提高用能效率的智慧能源系统。

智能电网是能源互联网的基础,能源互联网是智能电网的丰富和发展,从系统科学的角度来说,能源互联网与智能电网,都是要通过能源互联、信息互联、能量信息融合、能量高效转换、集成能量及信息架构(Integrated Energy and Communication Systems Architecture, IECSA),来建设复杂交互式网络与系统(Complex Interactive Networks/Systems Initiative, CIN/SI)。

1.2 能源互联网的特征

基于上述定义,能源互联网的主要特征如下^[3]:

(1) 可再生能源高渗透率

能源互联网中的能量供给主要是清洁的可再生能源。

(2) 非线性随机特性

能源互联网中能量来源和使用的复杂使其呈现出非线性的随机特性。能量来源主要是分布式可再生能源,相比传统能源,其不确定性和不可控性大;能量使用侧