

第 13 章

能源互联网

韩英铎 余贻鑫 黄其励 彭苏萍 曹军威 王成山 谢小荣

【内容提要】能源互联网代表着未来信息与能源-电力技术深度融合的必然趋势，是新一代工业革命大潮的重要标志，是智能电网的重要组成部分和未来的发展前沿。本章在介绍能源互联网的基本概念、内涵与外延的基础上，总结了其国内外发展现状，分析了能源互联网需要重点解决的关键技术问题，即能源互联网总体架构与标准体系，能源互联网组网与互操作模型与技术，能源互联网建模、仿真与分析技术，能源互联网运行与控制装备技术，能源互联网的安全防护、质量监督与认证体系，能源互联网量测、评价与技术经济分析。本章还在总结相关产业发展现状的基础上给出了促进能源互联网产业发展的政策建议。

13.1 能源互联网概念及范畴

各种一次能源的转换形式多种多样，如电、热、汽等二次能源，并且都已形成方便使用的基础设施网络。供热网等能源传输方式具有节约燃料、减少城市污染等优点，但存在长距离输送损耗大、动态调节周期长、输送管道建设和维护成本高等固有缺欠；而电能传输、调控、转换等方面则具有不可比拟的综合优势，因此未来能源基础设施在传输方面的主体必然还是电网，随着分布式可再生能源发电的发展，未来能源互联网基本上是以互联网式的电网为枢纽构成的能源—信息系统。

13.1.1 基本概念

能源互联网是以互联网思维与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、分布式能源等能量自治单元为“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^[1]。

能源互联网基本架构如图 13-1 所示。微网、分布式能源等能量自治单元可以作为能源互联网中的基本组成元素，通过新能源发电，微能源的采集、汇聚与分享，以及微网内的储能或用电消纳形成“局域网”。能源互联网是在此基础上的广域连接形式，作为分布式能源的接入形式，其是从分布式能源的大型、中型发展到了任意的小型、微型的“广域网”。大电网的形成有其必然性，其将来仍然是能源互联网中的“主干网”。微网或分布式能源接入、互联和调度灵活但存在供电可靠性问题，大电网供电可靠性较高但尚难以适应大量新能源的灵活接入和双向互动，能源互联网则可以起到衔接作用，综合两方面的优势。能源互联网采取自下而上、分散自治、协同管理的模式，与目前集中大电网模式相辅相成，符合电网发展集中与分布相结合的大趋势。

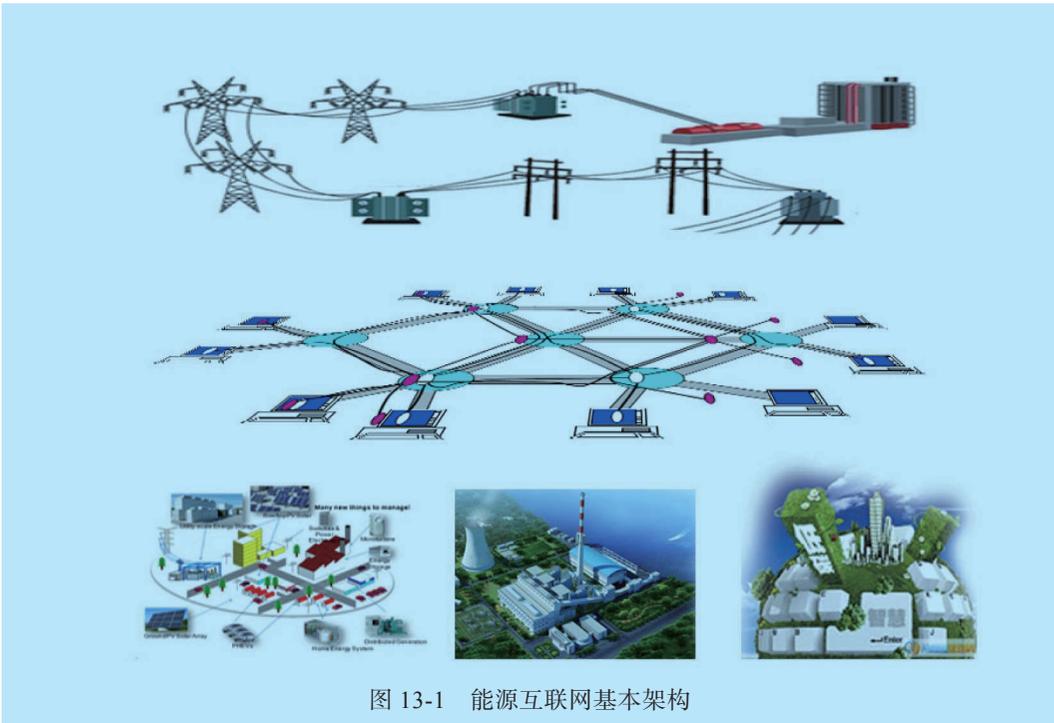


图 13-1 能源互联网基本架构

13.1.2 内涵与外延

能源互联网的内涵是以互联网思维和理念来变革能源基础设施。如果说智能电网

还是在现有电网架构上通过信息化和智能化的手段，解决设备利用率、安全可靠、电能质量等基本问题；而能源互联网的关键性拓展在于采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革，使得能源的开放互联与交换分享可以跟互联网信息分享一样便捷。能源互联网区别于传统能源基础设施的本质特征包括以下几点。

1. 开放

互联网实现信息的随时随地接入与获取，主要取决于开放式的体系结构。能源互联网要实现开放性，需要可再生能源与储能用能装置的“即插即用”。能源互联网的发展要借鉴互联网的发展方式，走标准先行、应用驱动、进一步带动产业和市场发展的道路。

2. 互联

“局域网”与“广域网”的本质不同在于“广域网”必须解决规模化开放互联的问题，这就需要简洁易行的标准协议作为基础。“局域网”内部可以进行多种能源形式的转换，可以进行风、光、储、用的平滑与协调，但“广域网”的互联必须建立在局域消纳的基础上，形成简捷的能量交换方式，才可能实现大规模互联。

3. 对等

同传统电网自顶向下的树状结构相比，能源互联网的形成是能量自治单元之间的对等互联。任意单元之间的连接是逻辑上的，其真正的实现必须建立在分散路由的基础之上。能量的传输应该是多次路由的结果，其间是解耦的，进而可以避免一系列安全稳定性问题；同时传输路由路径之间可以是动态、互为备用的，在保证冗余和可靠性的同时不降低系统的利用率。

4. 分享

分布、分散与分享也是能源互联网的主要特征，原来仅依赖于中心调度与管理的功能可以采用分散-协调的方式来更高效地实现，而“局域网”（如微网）的监控甚至可以采用没有“中心”的对等模式。借鉴互联网应用中社交网络的信息分享机制，能源互联网中各局域网之间的能量交换与路由也都是就近实时动态进行的，以分散式局部最优和高效的全局协调来实现电网整体能量管理的优化。

能源互联网的外延在于信息物理融合，真正实现信息能源基础设施的一体化。信息基础设施与能源基础设施发展的内在动因决定了信息-能源基础设施走向融合一体化的发展道路。未来信息基础设施以数据中心为核心，通过高速通信网络相连接，同时支持物联网和移动互联网的接入，其发展过程中遇到了明显的能源瓶颈；同时，智能电网与能源互联网的发展对信息化、智能化的要求也越来越高，迫切需要新一代信息技术的支撑。信息-能源基础设施之间的功能、性能等方面的互补性也为其融合一体化提供了经济可行性。

13.1.3 概念的演进

1. 分布式可再生能源

能源可持续发展是当前摆在人类面前最重要的难题。目前人类处于工业化社会，需要大量的能源，但使用的能源主要是化石能源，这种能源不具有可持续性，有着不可再生的局限，存储总量有限，且会对环境造成破坏，如碳排放、温室效应等。同时，由于经济的发展和社会的进步，能源的需求还在进一步加大，供需矛盾导致了化石能源价格的不断增长，这会对人类社会特别是发展中国家的发展带来很大阻碍。为了摆脱社会发展对化石能源的过度依赖，可再生能源的发展为人类提供了彻底解决能源可持续发展的希望。

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。由于以上特点，分布式可再生能源受到了各国能源专家的重视，被视为替代传统能源的可靠途径。

2. 智能电网和微网

尽管分布式可再生能源具有可持续、可再生的特点，但该种能源大多具有能量输出不稳定的特点，如太阳能受限于太阳光的强弱，风能受限于风力的大小。同时由于其分布式的特点，大量能源节点的无序接入将对电网的稳定运行产生很大的影响，会造成不必要的扰动，甚至导致整个电网的崩溃。因此，需要采用一定的设备和结构形式对分布式能源的接入进行处理，而智能电网和微网技术为解决这一问题提供了新的契机。微网为中小容量分布式能源接入提供了一种新的结构形式，可有效地解决分布式能源的接入和使用。而智能电网借助信息系统的支持，不但有助于分布式能源的灵活接入，而且能实现其间的双向互动。

3. 能源互联网

通过借助互联网的信息交互和传输共享的概念，作为智能电网的进一步发展的能源互联网概念被提了出来。通过能源互联网，能量能够以类似于互联网的方式，在电力线路网络中按需流动。同时，能源互联网能够对电力流动的路径进行优化和管理，类似于互联网中的路由。通过能源互联网实现了能量流在电力网络中的双向按需流动。

目前开展的智能电网基本上是现有电网架构下的信息化、智能化^[2]，能源互联网则是借鉴互联网思维与理念构架的新型电网，其中的开放互联、能量交换与路由等特征有别于目前一般意义上的智能电网，可以形象地称为智能电网的2.0版本^[3]。

总的来说，信息通信与能源电力结合发展分为三个阶段：第一个阶段为数字化、

信息化阶段。此时，信息通信为能源电力行业提供服务，带来方便、快捷等好处。第二个阶段为智能化阶段，即智能电网阶段。在该阶段，信息通信成为能源电力基础设施不可或缺的组成部分，以信息流与能量流的结合为特征。第三个阶段为信息物理融合阶段。其表现为信息通信基础设施与能源电力基础设施的一体化，也就是信息-能源基础设施一体化意义上的能源互联网阶段。

13.1.4 意义与作用

1. 能源互联网是现实意义上能源可持续发展切实可行的道路

能源可持续发展是当前摆在人类面前最重要的难题，可再生能源的发展虽然提供了彻底解决能源可持续发展的希望，但可再生能源的利用方面仍然存在问题。能源互联网在现实意义下提供了一条切实可行的发展道路。里夫金在《第三次工业革命》一书中做了这样的描述：“当数以百万计的建筑实时收集可再生能源，并通过智能互联网将电力与其他几百万人共享，由此产生的电力使集中式核电与火电站都相形见绌。”^[4]

2. 能源互联网天然支持分布式可再生能源的接入

欧盟、美国和中国相继分别提出到2050年实现可再生能源在能源供给中占比100%、80%和60%~70%的目标。而风、光等大部分可再生能源的间歇性和波动性决定了仅依赖现在的集中式电网运行架构是无法适应如此大规模的可再生分布式能源接入的。能源互联网通过局域自治消纳和广域对等互联，可最大限度地适应可再生能源接入的动态性，通过分散协同的管理和调度实现动态平衡。

3. 能源互联网在安全、可靠、稳定及利用率等方面技术优势明显

互联网体系架构决定了其安全稳定性较高，而其冗余方式可保证系统整体的可靠性；同时通过分散路由等方式实现设备和线路的动态备用，保持一定的利用率。能源互联网可以借鉴其中的机制，但能量与信息的交换和传输是有着本质不同的。相比现在集中式电网自上而下的紧耦合模式，能源互联网能实现局域自治，在广域互联中可通过储能缓冲、直流输电等方式实现解耦，同时局域不稳定问题可以通过广泛互联实现广域的动态相互备用，达到安全、稳定、可靠的目标，而不是依靠过大的安全裕度而降低了系统的利用率。

4. 能源互联网是源-用混合场景下对现有输配网的有益补充

能源互联网不是取代现有电网架构，而是着重在分布式可再生能源接入越来越广泛、源-用混合场景越来越普遍的形势下借鉴互联网理念提供的一种自下而上的新型组网方式。能源互联网通过局域自治和广域能量交换最大限度地适应源-用的动态随机性，减少了对大电网的影响，大大降低了大电网的安全稳定性风险，是对现有大电网的有益补充。

13.2 能源互联网技术发展现状

13.2.1 国外发展现状

国际上专门针对能源互联网进行的研究与开发始于2008年，一些国家如德国、日本等已经开始小范围实践能源互联网。下面对国际上的几个能源互联网相关项目进行介绍和分析。

1. 美国

2008年，美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理系统”（the future renewable electric energy delivery and management system, FREEDM系统）^[5, 6]，研究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，称之为能源互联网。效仿网络技术的核心路由器，他们提出了能源路由器的概念并进行了原型实现^[7, 8]，利用电力电子技术实现对变压器的控制，路由器之间利用通信技术实现对等交互。FREEDM系统是从电力电子技术的角度出发，希望以分布对等的系统控制与交互，实现能源互联网的理念。

美国加利福尼亚大学伯克利分校的研究团队更关注智能电网的底层信息架构，提出了“以信息为中心的能源网络”架构^[9]，以期在一个通用架构中将智能通信协议与电能传输相结合，能够实现分布式控制，以及对于价格信号或更详细可用电量的持续需求响应。以信息为中心的能源网络在配电系统之上覆盖了信息传输，遍布各种物理场所，如机房、楼宇、社区、发电孤岛和区域电网等。该研究团队构建的能源网络对电源、负荷或储能容量进行分组，构成能源子网；子网通过名为“智能电源开关”（intelligent power switch, IPS）的接口与该网络的其他部分进行交互。能源网络将其子网成员的总供需以可预测、可筹集、可调整的计划商品的形式表示，并在电源和负荷间不断进行电力交易时为双方提供通信服务。该能源网络是以互联网数据中心作为研究的案例，对深层需求响应和“随供电量调整负荷”进行研究，随后将这种智能负荷的概念扩展到数据中心之外，应用于整座楼宇乃至楼宇群。

美国麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）的《科技创业》（*Technology Review*）杂志报道了一个位于加利福尼亚州的叫做Stem的新兴能源公司^[10]，开发了一款用于商业建筑的智能电池，将精简型的汽车锂离子电池和电力电子设备相连接，这些电力电子设备在向楼宇供电和从电网中充电这两种状态之间快速切换，而大量的智能分析通过云计算来完成。这样的智能电池稍加拓展实现相互之间的通信与控制，就完全符合里夫金描述的以建筑楼宇为单元的能源互联网原型，这是从储能的角度实现能源互联网的典型例子。

2. 欧洲

E-Energy（即电子能源）是2008年德国联邦经济技术部与环境部在智能电网的基础上推出的一个技术创新促进计划，是基于信息与通信技术（information and communication technology, ICT）的未来能源系统^[11]。它提出打造新型能源网络，在整个能源供应体系中实现综合数字化互联以及计算机控制和监测的目标。E-Energy充分利用信息和通信技术开发新的解决方案，以满足未来以分布式能源供应结构为特点的电力系统的需求。它将实现电网基础设施与家用电器之间的相互通信和协调，进一步提高电网的智能化程度。换句话说，其目标不仅是通过供电系统的数字联网保证稳定高效供电，还要通过现代信息与通信技术优化能源供应系统。德国总理默克尔专门针对E-Energy表示：“应该为能量生产和消费提供智能IT支持，包括从电站中的发电机到客户的各个环节。”把信息通信技术和能源这两个领域综合起来是E-Energy项目的重点，在解决核心技术之后，德国准备从配电到循环电网打造一个全新的能源互联网。到2015年，E-Energy会引导德国由集中发电模式逐渐过渡到集中式大型发电厂和用户侧分布式可再生能源发电共存，最终在2020年实现在电力系统覆盖信息网络，能源网络中所有的元素通过互联网信息协调工作。

瑞士联邦理工学院研究团队开发的“Energy Hub”称为能量集线器^[12~15]，是由计算机科学中的集线器概念引申而来的，也叫能量控制中心。宏观上看，Energy Hub是一个信息中心，它通过超短期负荷预测以及实时在线监测分布式电源、配电网的潮流数据，对各发电侧及受控负荷侧进行优化控制。Energy Hub规模可以覆盖一个家庭甚至整个城市。Energy Hub在系统中是一个广义的多端口网络节点，它与配电网连接，对配电网上的能量起到补充、缓解、转换、调节、存储的作用。Energy Hub上的端口分为输入和输出两种，输入侧一部分为从配电网流入Hub的电量，另一部分为从各分布式电源中流入Hub的不同形式的能量；输出侧一部分为供给各种负荷（电/热/冷）用的不同形式的能量，另一部分为反馈回配电网中的冗余电量。

3. 日本

日本研制的数字电网路由器称为“电力路由器”，可以统筹管理一定范围的地区的电力，并可通过电力路由器调度地区电力^[16]。

日本数字电网建立在互联网的基础之上，通过逐步重组国家电力系统，逐渐把目前同步电网细分成异步自主但相互联系的不同大小的电网，把相应的IP地址分配给发电机、电源转换器、风力发电场、存储系统、屋顶太阳能电池及其他电网基础结构等。类似于互联网中信息的传递，该网中能源分配由电力路由器完成，旨在实现使电网的运转与互联网一样的目标。电力路由器与现有电网及能源局域网相连，可以根据相当于互联网地址的“IP地址”识别电源及基地，由此就可进行“将A地区的风力发电电力送往B地区的电力路由器”等控制。在电网因发生灾害而停止供电时，电力路由器之间可相互调度蓄电池存储的电力，从而防止造成地区停电。

2011年,日本成功展示了“马克一号”数字电网路由器(digital grid router, DGR)。DGR通过提供异步连接、协调局域网内部及不同局域网来管理和规范用电需求。多支路的DGR由固态AC/DC/AC变换器组成,能够根据不同需求并随着电网频率的变化适时提升或降低电压。2013年5月,日本的数字电网联盟设立项目公司,并在肯尼亚的未通电区域开展试验。

综上所述,目前对能源互联网的理解主要有以下三种。

(1)以互联网的开放对等理念和体系架构为指导,形成新型的能源网。以美国的FREEDM为典型代表,效仿网络技术的核心路由器,提出了能源路由器的概念并且进行了原型实现。届时能源互联网(Energy Internet)的本质是能源网。

(2)借助互联网收集能源相关信息,分析决策后指导能源网的运行调度。以欧洲的E-Energy为典型代表,打造一个基于信息和通信技术的能源供应系统,连接能源供应链各个环节业务流程,实现示范应用,形成能源需求和供给的互动。这时候能源互联网(Internet of Energy)的本质还是信息互联网。

(3)以上两种理解混合在一起,两种成分都有,以日本的数字电网、电力路由器为典型代表。

目前国际上提出的“第三次工业革命”^[4]概念也包含了融合互联网技术和可再生能源技术,构建新型能源供需架构的思路,由此,能源互联网的相关技术获得了广泛关注。

13.2.2 国内发展现状

从20世纪80年代清华大学前校长高景德院士提出“CCCP”概念[现代电力系统是计算机/(computer)、通信/(communication)、控制/(control)与电力系统/(power system)及电力电子/(power electronics)技术的深度融合],到90年代韩英铎院士等提出现代电力系统三项前沿课题[柔性输电技术、智能控制、基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的动态安全分析与监测系统]^[17],再到近年来智能电网强调信息流与能量流的结合,无不突出信息技术与现代电网的紧密结合。能源互联网同样是互联网技术、可再生能源技术与现代电力系统的结合。清华大学在国内较早开始开展能源互联网方面的研究工作^[18],提出了能源互联网基本架构、关键技术,并开展能源路由器等方面的研发工作。

虽然能源互联网技术目前在国内引起了广泛关注,但相关研究尚处于起步阶段。除了清华大学,目前国内开始从事能源互联网研究的单位还包括国防科技大学^[19]、天津大学^[20]、中国电力科学研究院、中科院电工研究所、中科院声学研究所^[21]等。2012年8月18日和2013年9月25日,由中科院主办的能源互联网论坛分别在长沙和北京举行,会议文集刊登在《中国科学:信息科学》2014年第44卷第6期的可再生能源互联网专题栏^[22]。

从2013年开始,北京市科学技术委员会组织了“第三次工业革命”和“能源互联网”专家研讨会,并启动了相关软课题研究,完成了《北京能源互联网技术及产业发展研究报告》,形成了详细的能源互联网调研报告和路线图,为进一步科技立项

提供了指南。2014年2月，国家能源局委托江苏现代低碳技术研究院开展中国能源互联网发展战略研究。2013年12月，国家电网公司在《科技日报》发文明确指出，未来的智能电网就是“能源互联网”^[23]。2014年2月和6月，国家电网公司于南京和北京召开“智能电网承载第三次工业革命”研讨会，中国电力科学研究院于2014年6月启动了“能源互联网技术架构”方面的基础性前瞻性项目研究。

13.3 能源互联网发展重点及重要技术

能源互联网的发展需要多方关键技术的支撑，目前技术创新发展方向和研究热点主要集中在总体架构与标准体系，组网与互操作模型，技术、建模、仿真与分析技术，运行与控制装备及技术，安全防护、质量监督与认证体系，量测、评价与技术经济分析等方面。

13.3.1 能源互联网总体架构与标准体系

在图13-1所示的能源互联网基本架构的基础之上，发展分层分级的能源互联网总体架构，大致分为以下三个层面。

1. 能源“局域网”

对应目前电网架构中的用户侧，如在微网或智能小区的内部，实现多种能源形式的转化和分享。例如，里夫金提到未来理想的能源互联网场景“在即将到来的时代，我们将需要创建一个能源互联网，让亿万人能够在自己的家中、办公室里和工厂里生产绿色可再生能源。多余的能源则可以与他人分享，就像我们现在在网络上分享信息一样”。这是典型的在需求侧实现能量的分享。

2. 能源“广域网”

对应目前电网架构中的配电网，在微网或者分布式能源等能量自治单元基础之上实现能量交换与路由。与美国FREEDM项目类似，在配电网层面上实现可再生能源接入、储能负荷的“即插即用”。

3. 能源“主干网”

对应目前电网架构中的输电网，把一个同步集中控制的大电网逐步转变成一个异步自治互联式电网，如可以大力发展高压直流输电技术连接区域交流电网，或者采用直流“背靠背”技术，将现有集中统一的交流大电网进行分隔，避免由于无法实现动态灵活的供需平衡而引发安全稳定性问题。

能源互联网的标准体系共分为四层。

(1) 第1层是能源互联网通用基础标准。

(2) 第2层是能源互联网的公共支撑性标准，包括术语与缩略语、方法学、用例分析、概念模型、体系架构和技术指导原则等。

(3) 第3层是能源互联网的专业基础标准。这是各专业的共性要求，可以分为八个专业，分别是组网、运行管理、测量、互操作、信息集成、安全、市场和技术支持系统。这八个专业是目前的分法，以后不排除增加新的专业，或者在专业领域增加新的个性标准。

(4) 第4层是针对各专业的个性标准。这样，通过将通用基础标准、公共支撑性标准和专业基础标准提取出来，既可以避免重复和不一致，也能使个性标准的专业针对性更强。

标准化工作是能源行业的重要基础，是推动技术进步，提高产品质量、工程质量和服务质量，促进国民经济和社会健康发展的重要技术基础。从技术发展角度看，互联网的成功经验显示，标准的引领作用显得非常重要。因此，能源互联网的发展也应该走标准引领进而推动市场和产业发展的道路。

13.3.2 能源互联网组网与互操作模型与技术

开放性是能源互联网区别于以往智能电网的一个关键，要实现类似互联网的开放对等与广泛互联，在能源互联网标准体系中开放的接口定义和互操作模型框架必不可少。互联网的标准模型协议的主要特点是开放、简洁、易行，这才使互联网得到大规模应用和迅速发展。例如，TCP/IP协议等奠定了互联网发展的基础，广域互联规避了局域网信息交换底层复杂协议和机制，与局域网协议有本质的不同，因此才能形成大规模的互联发展。

要实现能源互联网开放式的组网，相关单元如风、光、储、负荷、能量交换与路由装置等要实现“即插即用”，必须满足相应的互操作模型。不但信息模型与交换技术是必需的，相应的能量传输、交换乃至路由技术更加重要。组网与互操作模型是能源互联网能够以开放对等方式实现广泛互联的基础。虽然不同层级互联的对象不同，其相应的组网与互操作模型应该是一致的。

13.3.3 能源互联网建模、仿真与分析技术

基于现有的电网仿真环境，结合信息物理融合仿真技术，将信息和能源基础设施仿真紧密结合，开发适合能源互联网场景的软硬件结合的仿真和开发环境，为能源互联网的研究与发展奠定基础。

1. 开发信息物理多元模型

针对能源互联网涉及的通信、计算、储能、电力电子、可再生能源接入等开发相应的仿真模型。

2. 实现能源局域网、广域网和主干网的联合仿真

与互联网类似，能源互联网在局域网、广域网和主干网中的特点不同，相应的实现和管理方式也有着本质的不同，能量在局域网侧重多种形式的快速转化，在广域网传输侧重系统的开放性、可扩展性和标准协议的简约，在主干网强调大电网的异步自治解耦互联。而联合仿真意味着将现有的电网暂态和稳态仿真分析与计算机网络仿真技术相结合，得到信息物理融合意义下的电网运行和信息网络运行相互作用关系的分析结果。

3. 实现分散协同的能源路由调度、分析与优化

首先，能源互联网中需要的新型能源管理系统必须是分散协同式的，其充分考虑了可再生能源发电的特点，强化可再生能源发电系统和电网之间的链接和交互，使得可再生能源发电被充分利用，最大化了整个电网的收益。其次，在能源互联网系统中，传统电网用户不仅是电力使用者，也是电力生产者。他们可以将生产的电力无障碍地传输给电网，并获取相应的回报。通过电力生产控制、通信技术和能源存储装置的协调工作，能源互联网系统可以实现可靠的双向电力传输，同时为普通用户和工业用户提供高质量的电力供应。

另外，能源互联网发生故障时要求能源互联网各分布子系统可以自动实现孤岛运行与并网运行之间的平滑切换，整个网络的中枢系统可以基于本地信息对能源互联网中的事件做出快速独立的响应。传统的能量管理系统在消纳大规模可再生能源发电方面遇到瓶颈时，需要在能源互联网的基础上建立一个能源信息实时采集、处理、分析与决策的分散协同式的新一代能源管理系统。

基于物联网、云计算和大数据分析等先进通信信息技术的支撑，能源互联网主要包括电能信息采集控制系统、电能质量监测分析系统、电网能源管理系统、用户侧的能源管理系统等多个子系统。例如，负荷信息不全和参数不准一直是电力系统仿真分析和能源管理的重要问题，能源互联网与信息基础设施紧密结合，可以为实时动态地收集和海量负荷信息提供最强有力的技术支撑，同时提供智能信息处理和决策支持能力，实现电源和负荷的协调控制、电能质量控制以及其他高级能源管理功能和应用。如果能够根据能源需求、市场信息和运行约束等条件实时决策，则可以自由控制可再生能源发电与电网的能量交换；提供分级服务，通过延迟对弹性负荷的需求响应确保关键负荷的优质电力保证；对设备和负荷进行灵活调度确保系统的最优化运行；等等。

13.3.4 能源互联网的关键装备——能源路由器

能源路由器是能源互联网运行与控制的具体实施装置，其在实际应用中执行智能管理系统的调控指令，包括能源的高效传输装置、低损耗转换装置、高效能源自由路由装置等。通过这些装置实现能源远距离、高功率、低消耗的传输与调配，完

成不同地区上传能源的全网优化分配，实现不同地区用能需求的全网调配。优化的能源路由方式与低功耗能量传输装置的结合，是实现能源互联互通、共享能源生产与分配的核心环节。

能源互联网从根本上是对能源流的精细化管理控制，使传统能源流单项的流向改变为双向的流向，在能源网络中对电源、负荷或储能容量等进行分组，构成能源子网，分区域、分层次地实现能源的管理控制。因此，可以友好接入当前电网中的能源路由器，完成区域能源的管理控制，对覆盖于当前电网上的能源互联网来讲是核心的设备。任何不稳定的能源接入（如风能）都需要一个优秀的能源路由器。通过能源路由器可以管控能源互联网内的能源流，能源路由器提供多种接口以对应多种能源流类型的接入和输出，可以提供对不同结构电网的管理，实现多层次能源网络的开发式管理控制。

能源路由器是能源互联网实现的核心，它比信息路由器要复杂很多，是智能变压器的进一步发展，主要技术包括能源路由器的存储控制、能源互联与路由机制，在分布式能源的基础上实现能源的对等互联、缓存、交换和路由。能源路由器可以根据信息流完成对能量流的控制，是电磁技术、通信技术、控制技术、电力电子技术、计算机技术的高水平综合产物。

13.3.5 能源互联网的安全防护、质量监督与认证体系

当前基础设施部署广泛，已投入高额成本，且技术为人们所熟知，彻底更换现有基础设施的激进做法并不现实。但照搬互联网架构到能源领域的问题之一是安全性，现有互联网架构的最大问题是发展之初没有做好安全防护方面的顶层设计，导致大规模发展之后互联网安全问题成为制约因素。例如，传统网络强调机器的连接，而现在互联网是以内容为中心，借鉴内容中心架构、软件定义架构，可以更好地解决互联网安全问题。因此，要在能源互联网中实现信息流支撑能源流的安全防护和管理，可以借鉴未来网络体系架构研究的最新成果，从源头上避免安全方面的问题。

能源互联网的开放并不意味着没有监管，相反，由于能源互联网对安全可靠性的要求更高，而更需要加强监管和质量保障。需要通过调查研究相关领域的质量监督和认证体系，尝试建立能源互联网场景下的相关体系架构，其中包括能源互联网建设、组网、实施、运行、服务、运营等多个阶段的相关监督和认证体系。

13.3.6 能源互联网量测、评价与技术经济分析

借鉴互联网和电网的发展经验，量测和评价体系是必不可少的。这包括对能源互联网量测体系架构与一般要求、测量数据传输接口与管理规范、测量组件接入能源互联网的技术要求等内容。

能源互联网的评价指标体系将涉及多个维度：从基础设施到上层业务服务；从能源到信息增值服务；从网络性能到传输质量；从安全性到风险成长性；等等。这些都需要仔细梳理，形成对实践具有指导意义的评价体系。

能源互联网关键技术涉及储能、电力电子、数据中心等，许多技术仍然处于产业化前期，尚不具备大规模推广的市场前景。能源互联网发展的经济可行性如何是一个被广泛关注的问题，其中除了关键技术经济可行性之外，还需要考虑能源互联网作为整体架构的技术经济分析，并进行具体研究和详细核算。

13.4 能源互联网产业发展现状与问题分析

能源互联网采用互联网理念、方法和技术构建新型的信息能源融合网络，是跨越多学科领域的综合系统建设工程。能源互联网是对能源基础设施架构的重大变革，其影响范围不仅包括分布式能源、信息产业、电力行业，而且涵盖了先进制造业、系统工程科学、能源行业。更进一步的，能源互联网的发展将对新能源、新材料、先进装备制造业、信息通信行业、交通运输业、电力生产行业、电力输配行业、能源服务业等多个行业部门产生影响，促进这些产业的升级换代，促进生产力发展。

13.4.1 相关产业国际现状及我国发展水平

在能源互联网的相关产业中，其关键和重点的产业发展现状汇总如下。

1. 可再生能源发电产业

由于分布式能源生产装置是能源互联网架构的一个主要组成部分，因此，能源互联网的发展必将极大地促进新能源发电产业的逐步壮大。分布式可再生能源发电主要包括风力发电、水力发电、太阳能发电、生物质能发电、潮汐发电等多种方式，其中，水力发电等属于比较成熟的技术，而风力发电、太阳能发电、地热发电及潮汐发电等都属于相对新兴的发电技术。

我国新能源科技水平有了显著提高，但核心技术仍然落后于世界先进水平。这体现在关键技术和设备依赖国外，与发达国家相比，在能源安全、高效与清洁开发利用等技术领域存在较大差距。例如，风力发电技术的自主创新能力不强，控制系统、叶片设计及轴承等关键部件依赖进口；太阳能发电技术与国际先进水平相比仍具有一定差距。

2. 智能电网产业

2009年10月27日，美国总统奥巴马宣布政府将拨款34亿美元建立智能电网投资基金，以此带动美国智能电网建设。同时，美国政府的投资还将刺激美国民间配套投资47亿美元，使得总投资达到81亿美元。这是美国有史以来为能源网络现代化改造进行的最大的一次性投资。

据测算，到2020年我国电网投资将达4万亿元，其中智能化应用将达7600亿元，无论是投资规模还是应用广度和深度都将远超美国。在智能电网的投资构成上，如果不

考虑大规模储能装置，配电网自动化和用户侧系统将占 40%，智能变电站占 20%，智能调度占 15%，柔性输电系统（含清洁能源接入侧设备）占 10%，其他投资占 15%。

随着计算机、电力电子、数字控制器及高级传感测量等技术的不断进步，配电自动化设备的互动、自愈、兼容、优化等特征将更加突出，智能用电管理终端、配电自动化装置、遥控遥测装置、故障诊断装置、一体化测控保护终端等配电自动化智能化设备的市场前景将更加广阔。

3. 分布式储能产业

储能产业是风力发电、太阳能发电、电动汽车等能源互联网相关产业共同的基础性产业。近几十年来，储能技术的研究和发展一直受到各国能源、交通、电力、通信等部门的重视。储能技术已被视为电网运行过程中的重要组成部分。

近年来，国际电力储能产业得到了迅速发展，截至 2010 年年底，年均增长 9.0% 左右，远高于全球电力产业 2.5% 的增长率，储能产业已成为世界上主要发达国家重点发展的新兴产业。

我国储能产业发展总体落后于欧美发达国家，截至 2010 年年底，全球电力储能总装机为 125.52 吉瓦，约占世界电力装机总量的 3.0%。而我国电力储能总装机约为 16.345 吉瓦，仅约占全国电力装机总量的 1.7%。随着可再生能源和智能电网的蓬勃发展，我国对大规模发展储能产业的需求也越来越大。随着智能电网产业化逐步推进，预计到 2020 年，电力储能产业的价值规模将占到电力产业总规模的 15%。随着电力储能产业的大规模发展，相关的储能行业，尤其是新型储能和大规模储能方向，将会获得巨大的发展机会。

4. 电力电子产业

实现可再生新能源的有效利用要依靠电力电子技术，并网逆变器、光伏电池、风力发电机、燃料电池、储能元件等都需要通过电力电子变换器才能与能源局域网相连接。实现能源流的精细化管控也需要利用电力电子技术。例如，智能通用电力变压器是将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的电能变换技术相结合，实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能的静止电气设备。

2014 年 1 月 15 日，美国总统奥巴马在北卡罗来纳州立大学高调宣布，以该校为核心建立“下一代电力电子技术国家制造业创新研究所”。其作为规划中的国家先进制造业创新中心之一，以下一代电力电子技术和设备制造为研发对象的国家级制造业创新中心正式进入人们的视线。奥巴马政府认为，建立“电力电子技术创新中心”的目的是，使美国占领这个正在出现的规模最大、发展最快的新兴市场，这个市场将涵盖从家用电器到工业设备制造、从电信技术到清洁能源技术等众多领域，并且为美国创造出一大批高收入就业岗位。

我国电力电子产业经过五十多年的发展取得了长足进展，尤其是电力系统中的电力电子控制技术的应用与国外差距不大，能源互联网的发展对电力电子的控制要

求更高，必将促进电力电子产业的进一步发展。目前我国电力电子市场增长率达到每年 20%，电力电子产业是有着良好发展势头的国家战略性新兴产业。

5. 智能用电产业

欧美国家近几年开展的智能用电服务的研究和实践，主要是以自动抄表和用电信息采集、用电设备自动控制（需方响应）为主，并开始了分布式能源接入的研究实践。

我国电力公司的电能计量主要是为了完成电费计算，对客户计量数据的采集精细度不够，实时性不强，数据没有充分地深度利用，随着大数据技术普及和应用，在电能计量体系建设、规划、管理、数据挖掘等方面还有较大的提升空间。

6. 电力通信产业

能源互联网的数据获取、保护和控制、需求侧响应都依赖于高速通信系统的支持，因此，高速通信系统是迈向能源互联网的第一步。依赖智能、安全的信息网络，可以实现能源数据的实时获取、快速准确的保护与控制等功能。电力通信产业已成为能源互联网的重要一环，其在提高骨干通信传输网的承受能力，改善中低压通信网的接入特性，构建布局合理、安全传输的电力通信网络等方面具有重要的推动作用，其同时也推动着电网企业、设备制造业、通信运营商等领域的融合与革新。

能源互联网的信息网络更需要相应的措施来保障其数据通信安全，由此，各项针对能源网络安全的技术研究与产品开发将进入一个新的阶段。根据国际市场研究机构预测，该项产业的未来产值将超过百亿美元的规模。

13.4.2 能源互联网产业链及产业环境分析

能源互联网产业链的核心企业包括主产业链上的新能源发电设备制造企业、储能产品生产企业、接入设备生产企业、电力软件系统研发企业。直接为产业价值链核心企业提供技术、产品、服务的上游企业主要包括电力设计单位、电力试验研究单位、电力软件系统开发企业、电力关键设备生产企业、计算机及其外围设备供应商、通信设备及通信服务供应商等。电力软件系统开发企业也为电力设计单位、电力试验研究单位提供技术、产品或服务；电力关键设备生产企业也为电力试验研究单位提供技术、产品或服务。电力软件系统开发企业的上游企业包括商业软件（操作系统、开发工具、数据库等）供应商、地理信息系统及信息服务供应商、通信设备及通信服务供应商、计算机及其外围设备供应商等。电力关键设备生产企业主要包括一次设备和二次设备的生产企业。一次设备生产企业的上游企业包括：钢铁等原材料供应商，模具生产、机械加工企业，传感器、芯片、电力电子器件等供应商，以及二次设备生产企业，等等。二次设备生产企业的上游企业包括：模具生产、机械加工企业，传感器、芯片、电力电子器件等供应商，印刷电路加工商，计算机及其外围设备供应商，通信设备及通信服务供应商，等等。

能源互联网采用互联网的理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大

变革，构建新型的信息能源融合网络。这一行动是跨越多学科领域的综合系统建设工程，涉及众多行业、技术、研发的尖端变革。在我国2010年发布的七大战略性新兴产业中^[24]，能源互联网产业的发展将直接带动六大战略性新兴产业（即节能环保产业、新一代信息技术产业、高端装备制造产业、新能源产业、新材料产业、新能源汽车产业）的融合发展，并促进这些产业的快速升级。

能源互联网将催生一系列新的能源装备制造（如能量集线器、能量交换机、能源路由器）商、能源网络运营商（或虚拟运营商）、信息能源系统集成商、信息能源融合应用开发商等。能源互联网虽然类似于互联网，但附以能量内涵，因此具有巨大的产业规模和广阔的市场前景，必将孕育出全新的商业模式。

13.4.3 能源互联网产业发展的问题

在“十二五”期间，国务院、科技部、国家自然科学基金委员会等在相关领域支持了一批相关的重大和重点研发项目，使能源互联网相关产业的发展势头迅猛，在一些领域取得了新的突破，为其进一步的发展奠定了良好的基础。但是也要对其发展中出现的问题和面对的挑战进行反思和总结。针对我国的具体情况，当前能源互联网产业的发展仍然受技术创新、市场竞争环境、产业政策及政府支持方式等众多问题的制约。具体来说，有以下几个方面。

1. 技术创新

在技术创新层面：首先，大规模分布式能源的接纳及路由传输将对大电网带来严重的可控性等问题；其次，能源互联网产业涉及网络、通信、电力、储能、电力电子、新能源等多个领域技术的交叉融合，技术的突破需要科技方面的大量投入。我国在这些技术领域的原创性技术太少，尤其是在新材料、电力电子器件和电子元器件等关键领域，我国对外依赖度高达90%。与发达国家相比，我国仍然将资金、技术、市场等战略高点留在海外，而引入低门槛、低附加值的下游产品制造环节。发展能源互联网不能忽视基础技术，应围绕发展能源互联网的主要目标，开展基础关键技术的研发，鼓励原创技术，最终掌握支撑能源互联网产业的核心技术。

习近平主席于2014年8月18日主持召开了中央财经领导小组第七次会议，研究实施创新驱动发展战略。习近平在会议上发表重要讲话并强调，创新始终是推动一个国家、一个民族向前发展的重要力量。我国是一个发展中大国，正在大力推进经济发展方式转变和经济结构调整，必须把创新驱动发展战略实施好。实施创新驱动发展战略，就是要推动以科技创新为核心的全面创新，坚持需求导向和产业化方向，坚持企业在创新中的主体地位，发挥市场在资源配置中的决定性作用和社会主义制度优势，增强科技进步对经济增长的贡献度，形成新的增长动力源泉，推动经济持续健康发展。能源互联网产业的发展需要走创新驱动的道路。

2. 市场竞争环境

良好的市场竞争环境将更好地促进技术创新。虽然在“十二五”期间与能源互联网相关的一些产业在国家重点支持下获得了飞速发展，如光伏产业，但同时也造成了部分产业一哄而上产生的过剩危机问题。

能源互联网涉及开放组网，打破现有电网“发输配变用”的格局，但我国能源电力行业市场仍处于相对封闭垄断的状况，这些不利于发展能源互联网开放对等式的广泛互联。为能源互联网的发展创造良好的市场竞争环境，依赖于我国能源电力体制改革的进程。

3. 产业政策

能源互联网的出现将对能源供给关系、能源市场运行、技术研发和产业拉动等产生深远影响。而目前我国政府仍未将能源互联网产业本身纳入经济社会发展总体布局，整体上还没有对能源互联网形成深入广泛的社会认知。

2014年6月13日习近平主席主持召开中央财经领导小组第六次会议，研究我国能源安全战略。习近平发表重要讲话并强调，能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题，对国家繁荣发展、人民生活改善、社会长治久安至关重要。面对能源供需格局新变化、国际能源发展新趋势，保障国家能源安全，必须推动能源生产和消费革命。推动能源生产和消费革命是长期战略，必须从当前做起，加快实施重点任务和重大举措。从“能源革命”的内涵来讲，不仅是消费侧和供给侧革命，还包括技术革命、体制革命。尤其是体制革命，其意味着颠覆延续数十年的生产模式、市场格局、管理体制。这些都为能源互联网的产业发展奠定了基础。

4. 政府支持方式

能源问题与单纯的信息问题的不同之处在于其对于安全可靠性的要求更高，因此不能完全地放任其自发发展。我国目前缺少能源互联网、智能电网、智慧城市、物联网、云计算等技术发展和融合的统筹规划思路，应该由政府牵头和主导，站在国家整体利益最大化的角度，坚持战略引领、重点突破，明确能源互联网发展的战略重点方向，促进产学研紧密配合，尽快开展全方位的研究和思考，明确核心思路、发展目的和预期效果，避免各领域各自为战、互不关联和衔接、效率低下、浪费资源等问题。

展望未来，能源互联网产业是战略性和市场性同时兼备的产业，必将成为解决当前人类可持续发展困境的重要战略途径。因此，能源互联网产业不仅是未来五年应对能源、资源环境、生态建设、节能环保等方面的重要举措，更是我国相当长时间内抢占未来全球竞争战略制高点的重要举措。

13.5 促进能源互联网产业发展的政策建议

13.5.1 工作推进建议

1. 工作思路

能源互联网的未来建设是个庞大、复杂的系统工程，需要从系统架构、技术研发、标准制定、政策设计等多个方面和环节入手，建立能源互联网技术和产业发展体系。其方式应当是从小规模到大范围，从简单到复杂，从试验到示范再到成熟推广。

为稳步推进能源互联网的研究和建设，笔者建议采取硬技术攻关与软课题研究相结合，理论研究与实验研究相结合的方式；分步骤、分阶段地展开能源互联网建设所涉及的理论研究、基础研究、技术突破、项目示范、政策环境、机制设计、产业带动、规模推广等工作。改善我国能源结构，带动新材料、电力电子元器件、终端设备、电动汽车、新型储能设备、通信设备和软件等相关产业的发展。

2. 总体目标

能源互联网的研究和建设需要组建一支电力系统、信息技术、电力电子、储能跨学科研究的专家队伍，确定一批有深入研究价值的课题，形成一定的技术突破，建设一定规模的示范项目，带动一批相关产业发展。

近期工作目标以基础研究、战略规划、重点技术发展方向、政策机制等为主，从战略高度上把握能源互联网的发展。完成能源互联网技术和产业发展体系研究，理清思路，确定能源互联网未来十年的发展模式和技术路线。

中期工作目标为结合我国相关优势资源、组织知名科研院所和高新技术企业开展协同技术攻关，推进基础研究发展，建设试验性、示范性项目，支持对前沿基础技术攻关的突破性研究，支持技术体系与网络建设系统架构研究，将基础研究成果逐渐在实践中转化，建设能源互联网研发和示范基地以及高科技产业园区。

远期目标为根据研究发展状况适时调整能源互联网的建设工作，推广成熟稳定的能源互联网系统建设，在需求调研、机制设计、政策支持等方面完善软环境，全面带动新能源体系建设和先进制造业的发展，推动我国能源供给和消费革命。

13.5.2 政策措施建议

1. 产业规划政策

能源互联网的发展要处理好自发性和引导性之间的关系。能源互联网的研究与产业发展可能会存在力量分散、内容重复、各自利益影响研究方向等问题，不能集中有效资源解决问题。国家层面应该成立技术和产业联盟，推动国家能源行业能源

互联网标准化技术委员会的建设，建设跨学科的专家团队和人才队伍，参与方的技术攻关和研究重点应各有侧重、分工和明确定位，实现整体力量推进能源互联网技术和产业的有序发展。同时鼓励地方政府的积极投入，带动地方产业结构的调整。

2. 财税金融政策

能源互联网的发展需要科技金融政策的支持，应该大胆尝试互联网思维下的能源众筹等新模式。能源互联网产业发展将催生全新的能源互联网设备提供商、运营商、虚拟运营商、系统集成商及应用开发商等，具有巨大的市场空间。初期应该在国家税收、政策和能源补贴等方面给予支持，随着新能源、储能、电力电子等方面技术的产业化，进而走上市场驱动的良好发展轨道。

3. 科技创新政策

能源互联网技术的发展需要新能源、新材料技术和新一代信息技术的结合。在技术层面涉及网络、通信、电力、储能、电力电子、新能源等多个领域技术的交叉融合，技术的突破需要科技方面的大量投入。能源互联网是一个信息和能源技术发展的载体，它提供了一个蓝图和愿景，给信息和能源技术的发展提供了牵引和动力。

应该创新科技立项方式，鼓励多学科、多领域的交叉协作，鼓励能源互联网相关科技研发基地的创立，如协同创新中心、国际合作中心等。鼓励成立实体化、市场化运作的能源互联网研究院，发挥平台和资源聚合效益，推动能源互联网技术从科学研究、实验开发到推广应用的“三级跳”。

4. 人才培养政策

技术的发展离不开人才的培养。能源互联网的发展有其独特性，需要大量能源与信息的复合型人才。传统能源行业和体制相对封闭，人员较容易形成思维定势，信息技术的发展开放且日新月异，但从业人员很少能深刻理解我国能源行业的现状、特点和需求。因此，应该两方面紧密结合、深度融合，为复合型人才的成长提供广阔的空间。

5. 市场环境建设政策

虽然我国目前关于能源互联网的讨论逐渐增多，但还没有真正形成深入广泛的社会认知。首先，对能源互联网的理解还停留在对国外相关资料的参考和解读层面，还没有就我国如何发展能源互联网、如何在第三次工业革命浪潮中取得先机等问题形成深度共识。

其次，目前能源互联网的讨论还更多局限在专家学者和政府官员的小范围内，未在更广泛的社会群体层面形成广泛认同。能源互联网本质上借鉴了互联网的理念和模式，是要形成开放对等、自下而上的新能源体系架构，需要像互联网那样形成广泛的认知和社会参与。

我国目前正处于能源体系革命的关键机遇期，需要理念、技术、市场等多方面

因素的相互影响和共同促进。能源互联网的发展为能源体系变革提供了一个有力的抓手，在技术、管理、市场等多层面对传统能源体系形成冲击。同时变革应该是以安全可靠运行、节能增效减排为前提的，所以在这个过程中尤其要把握和处理好其中的关系。需要正确处理能源互联网发展与国家能源体制变革的关系。电网是集能源输送、市场交易、优化配置等功能于一体的基础设施，是现代能源体系的重要组成部分。能源互联网代表着未来能源体系的发展方向，与大电网、微网、分布式能源等的发展是相辅相成的。

6. 重点领域和关键环节改革政策

能源互联网与新能源的发展密不可分，我国近期发布了多项鼓励分布式能源和新能源并网的相关政策，随着分布式能源的不断发展和越来越多的小型、微型化新能源接入电网，现有电网的大一统的体系架构将无法安全、动态调度的需要，对类似能源互联网的新电网架构需求的迫切性将很快显现出来。可以预见，未来国家能源政策将在一定程度上改变过去偏重刚性的、行政指令性的调控，注重指导性和规划性调控，更多采用经济激励、市场机制的柔性政策，通过改革体制机制来释放制度红利。

目前我国发布的相关政策还主要是围绕智能电网的建设和发展，还没有发布任何直接针对能源互联网发展的相关政策，随着集中与分布相结合的新一代电网的不断发展，相关政策保障将越来越重要。能源互联网作为分散协同横向力量的典型代表、信息能源技术创新的载体，以互联网理念激发能源基础设施的根本变革，实现信息能源基础设施一体化融合，积极促进地方社会、经济、科技产业发展，为国家能源体制改革提供切入点，为绿色经济提供丰富的商业模式，为创新型高技术产业提供技术支撑。能源互联网的发展将对上层国家能源供给、消费、技术与体制革命产生深远影响，而能源革命也会给能源互联网的发展提供契机。

参考文献

- [1] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 714 ~ 727.
- [2] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究. 计算机学报, 2013, 36 (1): 143 ~ 167.
- [3] Cao J, Yang M. Energy Internet—towards smart grid 2.0. 4th International Conference on Networking and Distributed Computing, Hong Kong, China, 2013.
- [4] 里夫金 J. 第三次工业革命. 张体伟, 孙毅宁译. 北京: 中信出版社, 2012.
- [5] Huang A Q. FREEDM system—a vision for the future grid. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 ~ 4.
- [6] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the Energy Internet. Proceedings of the IEEE, 2011: 133 ~ 148.

- [7] Xu Y, Zhang J H, Wang W Y, et al. Energy router : architectures and functionalities toward Energy Internet. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011: 31 ~ 36.
- [8] Zhang J H, Wang W Y, Bhattacharya S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1 ~ 8.
- [9] Katz R H, Culler D E, Sanders S, et al. An information-centric energy infrastructure: the berkeley view. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 1 (1): 7 ~ 22.
- [10] LaMonica M. A startup' s smart batteries reduce buildings' electric bills. MIT Technology Review. <http://www.technologyreview.com/news/506776/a-startups-smart-batteries-reduce-buildings-electric-bills/>, 2012-11-06.
- [11] Vermesan O, Blystad L C, Zafalon R, et al. Internet of energy-connecting energy anywhere anytime// Meyer G, Valldorf J. Advanced Microsystems for Automotive Applications. Berlin : Springer-Verlag, 2011.
- [12] Perrod P F, Geidl M, Klokl B, et al. A vision of future energy networks. Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005: 13 ~ 17.
- [13] Geidl M, Klokl B, Koeppl G, et al. Energy hubs for the futures. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, (1): 24 ~ 30.
- [14] Ghasemi A, Hojiat M, Javidi M H. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs. 2nd Iranian Conference on Smart Grids, 2012: 1 ~ 7.
- [15] Schulze M, Friedrich L, Gautschi M. Modeling and optimization of renewables : applying the energy hub approach. International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008: 83 ~ 88.
- [16] Boyd J. An internet-inspired electricity grid. IEEE Spectrum, 2013: 12 ~ 14.
- [17] 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术、智能控制、基于 GPS 的动态安全分析与监测系统. 清华大学学报 (自然科学版), 1997, 37 (7): 1 ~ 6.
- [18] 高艳鹏. 能源互联网技术挑战与机遇——访清华大学信息技术研究院研究员曹军威. 科技日报, 2012-12-19, 第 9 版.
- [19] 查亚兵, 张涛, 谭树人, 等. 关于能源互联网的认识与思考. 国防科技, 2012, (5): 1 ~ 6.
- [20] 余贻鑫, 秦超. 智能电网基本理念阐释. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 694 ~ 701.
- [21] 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 762 ~ 773.
- [22] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 702 ~ 713.
- [23] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命. 科技日报, 2012-12-05, 第 1 版.
- [24] 国务院. 国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定, 2010.