

# 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化

曹军威<sup>1,2</sup>, 杨明博<sup>1</sup>, 张德华<sup>1</sup>, 明阳阳<sup>1</sup>, 孟坤<sup>3</sup>, 陈震<sup>1,2</sup>, 林闯<sup>2,3</sup>

(1. 清华大学信息技术研究院, 北京 100084; 2. 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;  
3. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘要:** 能源是人类生存发展的重要物质基础, 能源互联网作为未来可能的能源可持续发展解决方案正逐渐成为研究的热点和潮流。阐述了能源互联网的概念和特征, 提出其基本架构, 并从广域网, 局域网和基础设施三个层面讨论信息与能源的基础设施一体化建设。综述了国内外能源互联网技术的发展现状, 提出了能源路由器作为信息与能源的基础设施一体化的解决方案, 并对基于能源路由器的能源互联网应用场景给出了详细描述。

**关键词:** 能源互联网; 信息能源基础设施; 智能电网; 分布式能源; 云计算; 数据中心

## Energy Internet – an Infrastructure for Cyber-Energy Integration

CAO Junwei<sup>1,2</sup>, YANG Mingbo<sup>1</sup>, ZHANG Dehua<sup>1</sup>, MING Yangyang<sup>1</sup>, MENG Kun<sup>3</sup>,  
CHEN Zhen<sup>1,2</sup>, LIN Chuang<sup>2,3</sup>

(1. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;  
3. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Energy is the material basis of human development, Energy Internet, which is considered as a possible solution of energy sustainability, is becoming a hot research topic and mainstream technology. Describing the definition and features of energy internet, this paper proposes its basic architecture, and discusses the information and energy infrastructure development by introducing WAN, LAN and infrastructure. The domestic and world-wide development of energy internet is reviewed, and a solution of the infrastructure for cyber-energy integration is proposed with energy routers. The typical application scenario of the energy router is given to illustrate the cyber-energy fusion.

**Key words:** energy internet; cyber-energy infrastructure; smart grid; distributed energy resources; cloud computing; data centers

技术革新、工业革命的成果体现在社会新基础设施的形成。在 21 世纪网络时代, 新基础设施的特征必然离不开信息化、网络化两个信息时代的基本要素。能源领域, 随着消耗的增加, 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, 变革势在必行, 而基于信息能源基础设施一体化的能源互联网提供了一种可行的解决方案。

在人类经济生活的发展过程中, 基础设施为其不可缺少的部分。一方面, 基础设施为工业经济的发展起到了支撑作用; 另一方面, 技术的创新与发展最终归结为基础设施的提升。当进入 21 世纪, 知识经济的时代需要新的基础设施的支持, 将基础设施与信息技术深度融合, 由此产生了赛百平台 (cyberinfrastructure)<sup>[1]</sup>。

2007 年 7 月, 美国总统科学技术顾问委员会 (PCAST) 在题为《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了 8 大关键的信息

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61472200, 61233016)

Foundation item: A Project Supported by National Natural Science Foundation (61472200, 61233016).

技术,其中信息物理融合系统(cyber-physical system, CPS)位列首位<sup>[2]</sup>。2009年,中国推动物联网(internet of things)领域的国家战略<sup>[3]</sup>,信息技术使能下的基础设施变革成为大趋势。

从清华大学前校长高景德院士 20 世纪 80 年代提出的“CCCP”概念(现代电力系统是计算机、通信、控制与电力系统以及电力电子技术的深度融合),到 90 年代韩英铎院士提出的现代电力系统三项前沿课题(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)<sup>[4]</sup>,再到近年来智能电网强调的信息流与能量流的结合<sup>[5]</sup>,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。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”<sup>[6]</sup>。

目前国际上提出的“第三次工业革命”<sup>[7]</sup>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,能源互联网相关技术获得了广泛关注。《第三次工业革命》一书的作者杰瑞米·里夫金是美国著名经济学家、经济趋势基金会创始人和总裁。里夫金在书中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。”

本文在介绍能源互联网的基本概念、内涵与外延的基础上,总结了国内外发展现状,提出了信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网架构,并深入分析了典型应用场景。

## 1 能源互联网架构

### 1.1 基本概念

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,因此可以最大限度的适应新能源的接入<sup>[8]</sup>。虽然能源形式多种多样,电能源仅仅是能源的一种,但电能能源在能源传输效率等方面具有无法比拟的优势,未来能源基础设施在传输方面的主体必然还是电网,因此未来能源互联网基本上是互联网式的电网。

能源互联网总体架构如图 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”。能源互联网是此基础上的广域连接形式,作为分布式能源的接入形式,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”实现。大电网的形成有其必然性,在传输效率等方面仍然具有无法比拟的优势,将来仍然是能源互联网中的“主干网”。微网或分布式能源的接入、互联和调度比较灵活,但存在供电不稳定等问题;大电网供电稳定但无法适应大量新能源的灵活接入和动态调度。而能源互联网可以起到衔接作用,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。

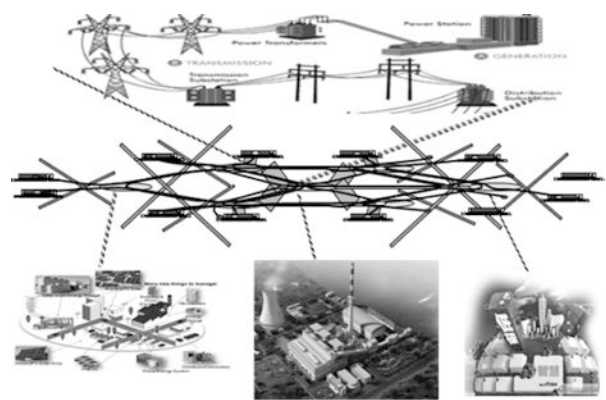


图 1 能源互联网架构

Fig. 1 Energy Internet Architecture

目前开展的智能电网基本是现有电网架构下的信息化、智能化<sup>[9-10]</sup>,能源互联网则是借鉴互联网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下的智能电网,也可以形象地称为智能电网的2.0版本<sup>[11]</sup>。

## 1.2 内涵与外延

能源互联网的内涵是以互联网理念和思维变革能源基础设施。如果说智能电网还是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,能源互联网的根本不同则在于其采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革,使得能量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如下所述的开放、互联、对等和分享。

### 1.2.1 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和储能、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。

### 1.2.2 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”的互联必须是建立在局域消纳的基础,形成简捷的能量交换方式,才可能实现大规模互联。

### 1.2.3 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,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,路由之间是解耦的,从而可以避免一系列安全稳定性问题;同时传输路由的路径之间可以

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。

### 1.2.4 分享

因此,分布、分散与分享也是能源互联网的主要特征。能源互联网没有中心化的调度与管理。借鉴互联网应用中借助社交网络的信息分享机制,能源互联网中各局域网间的能量交换与路由也都是就近实时动态进行的,以分散式的局部最优实现全局能量管理的调度优化。

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,这也是本文介绍的重点。

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发展的道路。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。

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,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,也就是智能电网阶段。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,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下的能源互联网阶段。

## 1.3 意义与作用

### 1.3.1 能源互联网为现实意义下能源可持续发展提

供切实可行的道路

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，并通过智能互联电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。”<sup>[7]</sup>

### 1.3.2 能源互联网适应和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 100%、80% 和 60% ~ 70% 的目标。而风、光等大部分可再生能源的间歇不稳定性决定了现在的集中式电网结构无法适应如此规模的可再生能源接入。能源互联网通过局域自治消纳和广域对等互联，最大程度的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。

### 1.3.3 能源互联网在安全、可靠、稳定以及利用率等方面技术优势明显

互联网体系架构决定了其鲜有安全稳定性问题，通过大量冗余等方式保证整体上的可靠性，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，但能量和信息的交换和传输有本质不同。相比现在集中式电网自上而下的紧耦合模式，能源互联网是局域自治，在广域互联中可以通过储能缓冲、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利用率。

### 1.3.4 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的消纳源用的动态性，减少对大电网的影响，大大降低大电网的安全稳定性风险，是对现有大电网的有益补充。这跟智能电网基于现有网架结构，通过提升信息通信以及控制能力来实现优化调度以提升安全稳定可靠性有本质的不同。

## 2 国内外能源互联网发展现状

### 2.1 国外发展现状

国际上针对能源互联网进行的基础性研究才刚刚起步，一些国家如德国、日本已经开始小范围实践能源互联网，下面对国际上几个能源互联网相关项目进行介绍和分析。

#### 2.1.1 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的”( the future renewable electric energy delivery and management system, FREEDM system )<sup>[12,13]</sup>，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 ( energy router ) 概念并进行了原型实现<sup>[14]</sup>，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 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。FREEDM 系统的目的是架设智能微电网，并实现智能微型电网的互通互联。FREEDM 系统的能源路由器是以电力电子变压器 ( 也称为固态变压器 ) 为核心<sup>[15]</sup>，通过远程可控制的快速智能开关实现微电网或者线路的智能

通断控制,并加之以能量管理系统。该能源路由器的功率部分实现了7.2 kV AC、10 kV DC和120 V AC、400 V DC的控制,通信模块则采用了Zigbee、Ethernet和WLAN三种模式实现能源路由器内部和能源路由器之间的通信。

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“以信息为中心的能源网络”架构<sup>[16]</sup>。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(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“随用电量调整负荷”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。需要提及的是,该课题组正在设计可扩展能源网络模型—LoCal。LoCal旨在研究信息传输怎样才能更好地支持能源系统,紧密集成发电、储能和用电,并开发各种规模的能源信息接口和传输协议,包括机房、楼宇设施、储能设施、楼宇和电网发电级等。通过信息交流,更好地感知可用电量 and 负荷状况,更准确地匹配电源与负荷,消纳可再生能源,实现更高水平的整体能效,并避免过度超量配置能源系统。

新兴能源公司Stem<sup>[17]</sup>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间快速切换,而大量的智能分析是通过云计算来完成。这样的智能电池只

要稍加拓展以实现相互间的通信与控制,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。

### 2.1.2 欧洲

E-Energy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ICT的未来能源系统<sup>[18]</sup>。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,还要通过现代信息和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年实现在电力系统中覆盖信息网络,并且能源网络中所有的元素可以通过互联网的信息协调工作。

瑞士联邦理工学院研究团队开发的“Energy Hub”称之为能量集线器<sup>[19,22]</sup>,是由计算机科学中集线器的概念引申而来,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网中的冗余电量。

### 2.1.3 日本

日本研制的数字电网络由器，称之为“电力路由器”，可以统筹管理一定范围区域的电力，并可通过电力路由器调度地区电力<sup>[23]</sup>。

日本数字电网是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、屋顶太阳能电池以及其他电网基础结构等。类似互联网中的信息传递，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 Internet 一样，其架构如图 2 所示。

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。

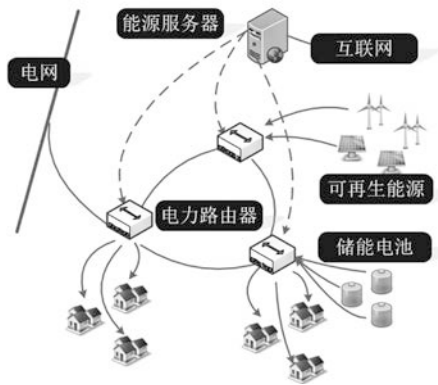


图 2 日本数字电网框架模型

Fig. 2 Digital Power Grid by Japan

2011 年，日本成功展示了“马克一号”数字电网

路由器（DGR）。DGR 通过提供异步连接、协调局域网内部以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，日本数字电网联盟设立项目公司，在肯尼亚的未通电区域开展实验。

此外，位于东京都港区的 VPEC 公司通过电力系统自身携带信息，而不需要通过互联网实现信息传递。该公司开发了电力供给系统“ECO 网络”，如图 3 所示。

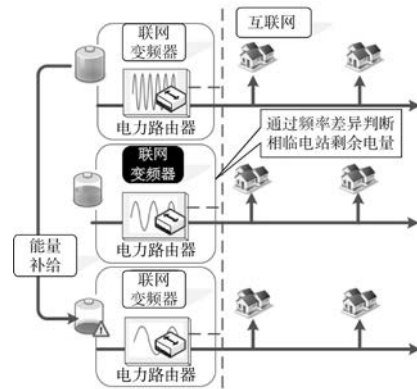


图 3 ECO 网络框架结构

Fig. 3 ECO Network Architecture

通过带有蓄电池的电力路由器，统筹含有发电设备以及需求侧的一定面积的区域。电力路由器能够根据蓄电池剩余电量改变输出电力的频率。电力路由器通过邻近电力路由器发来的频率信息来判断邻近发电站所具备的电量余量，再根据这一数值差异，形成站所间自律性电力流通的机制。由于 ECO 网络中信息由电力特性体现，减少了对信息基础设施的依赖，结构较为简洁，也更具备抗灾害的能力。

### 2.1.4 小结

总结以上项目，可以看出对能源互联网的理解主要有三种：

- 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。这时候能源互联网（energy internet）的本质是能源网。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。

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。这时候能源互联网(internet of energy)的本质还是信息互联网!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。

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。

## 2.2 国内发展现状

2012年8月18日和2013年9月25日,由中国科学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6月期的可再生能源互联网专题<sup>[24]</sup>。

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。从2013年开始,北京市科委组织了“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指南。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,中国电科院于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。2014年2月国家能源局也启动了“中国能源互联网发展战略研究”。

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<sup>[25]</sup>、天津大学<sup>[26]</sup>、中国电科院、中科院电工所、中科院声学所<sup>[27]</sup>等。

## 3 信息能源基础设施一体化

### 3.1 信息技术基础设施化进程

相比能源电力完整的基础设施,目前信息技术还处于基础设施形成的过程中,通信(尤其是无线移动通信)和网络(尤其是互联网)的发展使得计

算、存储、软件、应用的集中管理和按需使用逐渐成为可能,信息基础设施逐渐形成了以数据中心为核心,高速网络互联,并支持人(通过移动终端)和物(通过传感器和物联网)的随时随地接入的架构格局,见图4示意。

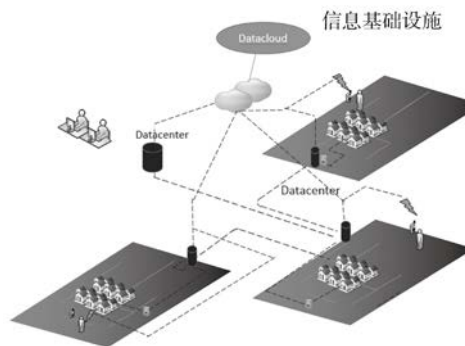


图4 信息基础设施示意图

Fig. 4 An Illustration of Cyberinfrastructure

从元计算(meta-computing)<sup>[28]</sup>、网格计算(grid computing)<sup>[29]</sup>、服务计算(services computing)<sup>[30]</sup>到如今的云计算(cloud computing)<sup>[31]</sup>,信息基础设施逐渐完善。云计算要求在资源、平台和软件应用层都能做到以服务形式提供<sup>[32]</sup>:基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)、软件即服务(SaaS),最终实现综合各方面因素的系统整体效益提高<sup>[33]</sup>。基于云计算技术构建的云数据中心是提供云计算IaaS、PaaS、SaaS服务的基础设施。随着云计算产业发展,传统的各类公共数据中心、企业私有数据中心或信息中心,都将逐步过渡到公有云和私有云以及混合云数据中心。可以确定的是,未来云数据中心将以公有云和私有云两种形态为主。资源大规模聚集的公有云数据中心,可为广大的企业用户以及个人用户提供服务;而由企业传统数据中心改造的绿色、可靠、高效运维的私有云数据中心,则可为企业内部用户提供服务;混合云数据中心则可满足部分企业用户和个人用户的特殊需求。

构建云基础设施的一个重要手段是虚拟化,资源设备的虚拟化可极大提高资源的利用效率,包括计算资源CPU的虚拟化<sup>[34]</sup>和网络资源的虚拟化,如



软件定义网络<sup>[35]</sup>。而如何选择合适的虚拟化实现技术进行云计算体系结构设计以及如何将基础设施向服务转型都将是未来的重要研究方向。另外，系统的安全、可靠、可扩展性能也是云计算能否顺利实施和应用的关键点。

### 3.2 信息能源基础设施一体化大趋势

随着计算机领域数据中心的建设和云计算模式的兴起，新一轮的信息技术本身的基础设施化也拉开了序幕。计算机作为计算、存储和网络化服务的核心开始以基础设施的形态，以前所未有的速度进行规模化扩展。到 2012 年，全球数据中心的电能消耗为 300 亿瓦，占全球电能消耗的 1.3%，关键的问题是平均仅 6%至 12%用于为服务器供电以执行计算任务。据估计，在美国 2011 年数据中心用电占全美用电电量的 3%，且用电量每 5 年增加一倍。能源消耗和浪费问题成为以数据中心为核心的信息基础设施可持续性发展的主要挑战。近年来，主要 IT 厂商均投入开发能源解决方案，包括 Google ,IBM , Microsoft 等，Google 耗电中，80%到 90%用于公司数据中心，谷歌拥有全球 3%的服务器，但耗电只占全球数据中心的 1%，好的能源解决方案成为信息技术发展的核心竞争力。

同时传统基础设施同样面临不断升级改造的压力，近年来最为典型的例子就是智能电网，智能电网是在传统电网架构的基础上构建起来的集传感、通信、计算、决策与控制为一体的综合数物复合系统，通过获取电网节点各层资源和设备的运行状态，进行分层次的控制管理和电力调配，实现能量流、信息流和业务流的高度一体化，呈现出越来越多的信息能源基础设施深度融合的趋势<sup>[6]</sup>。

能源互联网的分散协同调度与控制更加需要在线实时动态的信息采集、传输、分析与决策的支持，主要包括电能信息采集控制系统、电能质量监测分析系统、电网能量管理系统、用户侧能量管理系统等。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量管理的重要问题，能源互联网与

信息基础设施紧密结合，可以为实时动态的收集和处理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量管理功能和应用。如能够根据能源需求、市场信息和运行约束等条件实时决策，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。因此能源互联网的发展与信息基础设施的融合是必然趋势。

### 3.3 能源路由器

能源路由器作为构建能源互联网的核心部件，需承担能源单元互联、各分布式能源或微网单元互联、能源质量监控和调配、信息通信保障及维护管理机制部署等功能。能源路由器是信息与能源基础设施一体化理念的集中体现。如图 5 和图 6 所示。

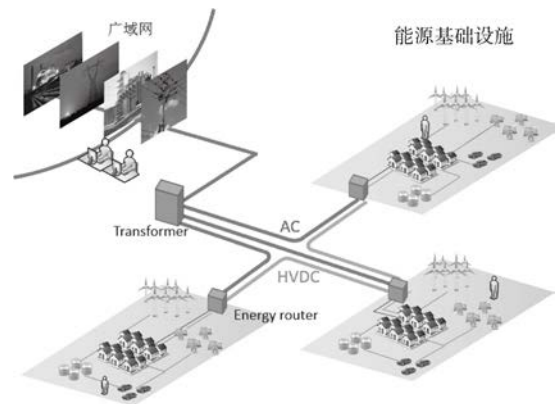


图 5 基于能源路由器的能源互联网示意图

Fig. 5 An Illustration of Energy Internet with Energy Routers

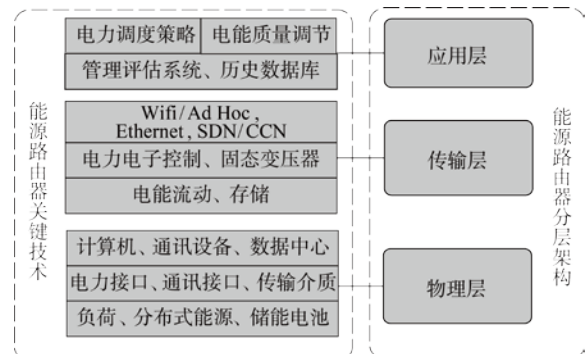




图6 能源路由器结构

Fig. 6 Energy Router Structure

基于能源路由器,可以实现多个能源局域网的互联,实现能量的交换和路由。局域网中可以由风光储与负荷协调消纳,互联可以通过交流和直流方式,也可以和传统大电网相联。

借鉴信息网络路由器实现的基本功能和结构,能源路由器实现的关键技术主要包括电力电子控制技术、大规模储能技术和柔性输电技术。

电力电子技术是实现能源互联网控制的主要手段,例如电力电子变压器和传统变压器相比仍然有效率、容量和可靠性等方面的瓶颈问题,需要材料等方面的技术突破,但在能源互联网场景下通过广域互联与优化调度,通过分布式能源的接入与分享等,可以在一定程度上提升应用效益,提高技术经济可行性。同时,电力电子变压器还具备供电电压稳定性好、电能质量高、不存在铁心磁饱和问题、体积小、重量轻、环保效果好、兼有断路器功能、可以高度自动化等优点。解决电力电子技术中的传输策略及控制问题,实现电力电子变换器等设备的研制,仍然是能源互联网技术创新的重要方面。

储能/用电缓冲是能源路由器实现的重要组件,以打破供电和用电间的同步性。储能装置既是负荷也是电源。电源是智能的,能够预计供电状况并发送相关信息;负荷也是智能的,能够根据接收到的供电信息调整自身工作。它们必须通过控制算法,根据电网和分布式发电的电量或电价,决定是充电以备将来使用,还是放电以供当前使用。大规模储能还存在成本高等问题,可以通过与数据中心电池备用共用提高经济性。

能源路由器之间的能量交换可以通过柔性输电技术来实现。例如柔性直流输电技术是基于自关断器件的新一代高压直流输电技术,与常规高压直流输电技术相比,具有运行灵活、可控性强、设备体积小、模块化程度高等显著优点,广泛分布于风电场接入、城市供电、异步电网互联、海上钻井平台

供电及电力市场交易等领域中。能源互联网涉及到多个区域自治电网或分布式能源的互联,柔性直流输电是可能的方式。

### 3.4 信息能源基础设施一体化典型场景

基于未来能源互联网与信息基础设施有着类似的互联结构,我们提出将信息基础设施整体嵌入能源互联网,实现信息能源基础设施一体化。国内外从电力电子技术、储能、信息采集决策支持、多种能源形式转换、直流输电等角度出发分别提出了能源互联网和能源路由器的概念和模型。我们提出的能源互联网着重借鉴互联网理念将信息基础设施(如数据中心、云计算平台)和能源基础设施(如储能、电力电子控制、电网等)彻底做一体化设计的思路,尚属首次。

图7基于这种思路设计了一个信息能源基础设施一体化的典型场景。

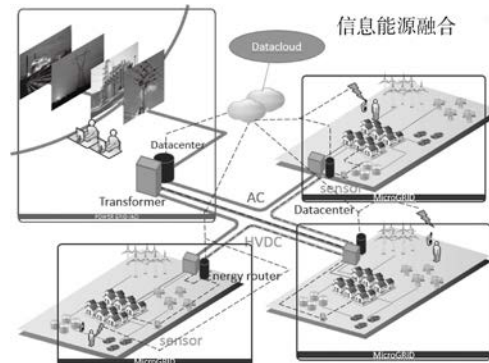


图7 信息能源基础设施一体化示意图

Fig. 7 An Illustration of Cyber-Energy Infrastructure

#### 3.4.1 场景组成

图7所示场景由三个微网和大电网组成。不管是微网还是大电网,都包含有能源基础设施和信息基础设施。微网是一个地域范畴也是能源互联网供电模型中的基本单元,其中包含有家庭用户,商业用户以及工厂或各类用电机构,总之从用户角度看微网就是一个小的社会范畴。微网的供电由分布式能源和大电网共同支撑,例如以分布式发电为主,以大电网供电为辅。微网内部即有风、光、储、电动汽车等基本分布式能源单元(微网的基本要素),

还包含了信息基础设施建设,如光纤通信、移动通信、传感器及数据中心。信息层收集用电信息,发电信息、环境信息并参照历史数据,根据当前用户用电需求,进行供电、调度决策。

### 3.4.2 场景运行机制

三个上述微网组成了设计的模型,可以用来描述微网间电能交换与路由。大电网与三个微网分别联通,也可以保障微网用电。当微网内部的分布式能源发电不中以满足微网的用电需求时,则该微网的供电有可能考虑由其他两个微网提供,也可能由大电网提供。

### 3.4.3 信息与能源基础设施融合

能源路由器是能源互联网的核心要素,与数据中心做一体化设计,同时能源基础设施中的“物”通过传感器接入,用户通过移动终端接入。通过能源路由器,能量层和信息层得以有效融合:一方面路由器为基于信息的能量控制提供了电力电子接口,可以实现能量在网络模型中的路由、实现能量流的精细管控、如电能质量控制等;同时,能源路由器的是基于能源基础设施的信息采集的主要渠道,以数据中心为核心,以用户、电力设施上的采集装置、传感器为信息来源,能源路由器将能源基础设施、用户、运行状态等等相关信息抓取并反馈给数据中心,实现能源互联网的信息互联。

融合需要数据中心和能源路由器融合、输电线路和光纤通信融合、传感器和局域、广域网融合等。可以通过能源路由器为数据中心供电,降低数据中心静默成本。由于通信基础设施和电力基础设施的一体化,可以节省数据中心的电缆铺设成本;理论上可以通过通信网络和数据中心设施更好的监控电力设备的运行状态,通过电力网络拓扑和通信网络拓扑的结合,可以更好的定位故障位置和及时的采取修复工作,提高系统安全性和运行效率;每个能源路由器会配备一定容量的储能设备,可用于数据中心备用电力,平滑能量的传输。同时储能设备的

一个重要功能是当正在进行电力传输的电力路由器节点或线路出现故障时,可以实时的吸收中断电路上的电流,保证该电流不会对其它设备造成影响;通信链路可以采用电力线通信或光纤通信,二者均可以与输电线路一体化建设。极大的减少了安装成本。融合的过程是一个信息化的过程,同时融合的过程也是一个立足现有设施进行过渡的过程,是一个将互联网嵌入能源网的过程。

### 3.4.4 应用场景分析

微网的风、光、储及电动汽车的基本功能与目前研究的微网概念没有本质区别,主要区别在于开放对等的信息和能量交换。信息层面,通过增加信息层,微网本身不再是一个简单的能源供给环节,而变成一个智能的能源补给实体,即多种能源之间有了协调与平衡;此外,更为重要的一点是信息层的存在使得微网不再是一个独立的个体,信息层为微网之间的互通建立了信息通道,使得微网的组网成为可能,也使得能量在微网间流动得以实现。例如基于这样的框架,当微网A处于缺电状态,A并不急于向广域大电网提出电能需求,而可以转向附近电价更加低廉,使用更加环保的微网B或微网C提出供电需求,后者根据自己发电和用电情况同时或单独向微网A供电,这一过程代表能源互联网自底向上开放互联、能量和信息对等交换的典型场景。类似信息互联网中局域网与广域网的本质区别一样,能源互联网中广域互联也必须以设备的即插即用和开放简洁的标准协议为基础。而具体控制的目标函数可以有多种、以电价为目标、以节能环保为目标、以最大输出功率为目标,或者以综合指标为目标等,以实现实时在线动态的更加精细化的分散协同式的能量管理。

## 4 结语

能源互联网相关研究可围绕以下三方面开展:

- 1) 能源互联网仿真环境。基于现有的电网仿真

环境,结合信息物理融合仿真技术,将信息基础设施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平台,为能源互联网研究与发展奠定基础。

2)能源路由器样机研制。集成新一代信息技术、柔性输电技术、大规模储能技术和电力电子控制等方面技术的最新成果,研发新一代能量管理系统,以实现分散协同式的能量交换和路由管理,研制具有产业化前景的中低压大容量的能源路由器样机。

3)能源互联网示范工程。根据本文提出的信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网典型场景,建设能源互联网仿真环境,配置能源路由器设备,进行能源互联网示范工程建设。一个好的示范工程是对能源互联网理念、技术与标准的整体验证,是能源互联网大规模发展的必经之路。

#### 参考文献:

- [1] CAO J (Ed.). Cyberinfrastructure Technologies and Applications [M]. Nova Science Publishers, 2009.
- [2] LEE E A. Computing Foundations and Practice for Cyber-Physical Systems: A Preliminary Report, Technical Report No. UCB/EECS-2007-72 [R]. Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, May 21, 2007.
- [3] 武建佳, 赵伟. WInternet: 从物网到物联网[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50 (6): 1127-1134.  
WU Jianjia, ZHAO Wei. WInternet: From Net of Things to Internet of Things [J]. Journal of Computer Research and Development. 2013, 50 (6): 1127-1134.
- [4] 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[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37 (7): 1-6.  
HAN Yingduo, WANG Zhonghong, LIN Kongxing, et al. Three Frontiers in Power System-FACTS, Intelligent Control, GPS based Dynamic Security Analysis and Monitoring System [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science, 1997, 37 (7): 1-6.
- [5] 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.  
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information System Architecture for Smart Grids [J]. Chinese Journal of Computers. 2013, 36 (1): 143-167.
- [6] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命[N]. 科技日报, 2012-12-05 (1).
- [7] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命[M]. 张体伟, 孙毅宁, 译. 中信出版社, 2012.
- [8] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 714-727.  
CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. Energy Internet and Energy Router [J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44 (6): 714-727.
- [9] WANG J, MENG K, CAO J, et al. Electricity Services Based Dependability Model of Power Grid Communication Networking [J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19 (2): 121-132.
- [10] WAN Y, CAO J, ZHANG S, et al. An Integrated Cyber-Physical Simulation Environment for Smart Grid Applications [J]. Tsinghua Science and Technology, Special Section on Smart Grid, 2014, 19 (2): 133-143.
- [11] CAO J, YANG M. Energy Internet - Towards Smart Grid 2.0 [C]. Proc. 4th Int. Conf. on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013.
- [12] HUANG A Q. FREEDM System - A Vision for the Future Grid [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-4.
- [13] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet [J]. Proc. the IEEE, 2011, 12 (17): 133-148.
- [14] XU Y, ZHANG J H, WANG W Y, et al. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet [C]// Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, 2011: 31-36.
- [15] ZHANG J H, WANG W Y, Bhattacharya, S. Architecture of Solid State Transformer-based Energy Router and Models of Energy Traffic [C]// Proc. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1-8.
- [16] KATZ R H, CULLER D E, SANDERS S, et al. An Information-centric Energy Infrastructure: The Berkeley View [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 1 (1): 7-22.
- [17] LaMonica M. A Startup's Smart Batteries Reduce Buildings' Electric Bills, MIT Technology Review [R/OL]. (2012-11-06)[2014-07-15] <http://www.Technologyreview.com/news/506776/a-startups-smart-batteries-reduce-buildings-electric-bills/>.
- [18] VERMESAN O, BLYSTAD L.-C, ZAFALON R. Zafalon A, et al. Internet of Energy - Connecting Energy Anywhere Anytime [C]// MEYER G, VALLDORF J (Eds.). Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springer-Verlag, 2011.
- [19] PERROD P F, GEIDL M, KLOKL B, et al. A Vision of Future Energy Networks [C]. Proc. Power Engineering Society Inaugural Conf. and Expo. in Africa, 2005: 13-17.
- [20] GEIDL M, KLOKL B, KOEPEL G, et al. Energy Hubs for the Futures [J]. IEEE power & Energy Magazine, 2007 (1): 24-30.
- [21] GHASEMI A, HOJIAT M, JAVIDI M H. Introducing a New Framework for Management of Future Distribution Networks using Potentials of Energy Hubs [C]// Proc. 2nd Iranian Conf. on Smart Grids, 2012: 1-7.
- [22] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and Optimization of Renewables: Applying the Energy Hub Approach [C]// Proc. Int. Conf. on Sustainable Energy Technologies, 2008: 83-88.
- [23] BOYD J. An Internet-inspired Electricity Grid [C]. IEEE Spectrum, 12-14, Jan 2013.
- [24] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (6): 702-713.  
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of Key

- Technologies of Energy Internet[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44 ( 6 ): 702-713.
- [25] 查亚兵,张涛,谭树人,等. 关于能源互联网的认识与思考[J]. 国防科技, 2012 ( 5 ): 1 -6.
- ZHA Yabing, ZHANG Tao, TAN Shuren, et al. Understanding and Thinking of the Energy Internet[J]. National defense science and technology journal, 2012 ( 5 ): 1-6.
- [26] 余贻鑫,秦超,智能电网基本理念阐释[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 ( 6 ): 694-701.
- YU Yixin, QIN Chao. Expatiation on the Basic Ideas of Smart Grid[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44 ( 6 ): 694-701.
- [27] 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[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 ( 6 ): 762-773.
- CI Song, LI Hongjia, CHEN Xin, et al. Crucial Support of Energy Internet: Exploration and Practice of Distributed Energy Storage Technology[J]. Science China Press: Information Science, 2014, 44 ( 6 ): 762-773.
- [28] SMARR L, CATLLET C E. Metacomputing [J]. Communications of the ACM, 1992, 35 ( 6 ): 44-52.
- [29] FOSTER I, KESSELMAN C. The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure [M]. Morgan-Kaufmann, 1998.
- [30] ZHANG L J, ZHANG J, CAI H. Services Computing [M]. Tsinghua University Press / Springer Verlag, 2007.
- [31] BUYYA R, YEO C S, VENNGOPALA S, et al. Cloud Computing and Emerging IT Platforms: Vision, Hype, and Reality for Delivering Computing as the 5th Utility, Future Generation Computer Systems [J]. Future Generation Computer Systems. 2009, 25 ( 6 ): 599-616.
- [32] HWANG K, DONGARRA J, FOX G C. Distributed and Cloud Computing [M]. Morgan-Kaufmann, 2012.
- [33] CAO J, HWANG K, LI K, et al. Optimal Multiserver Configuration for Profit Maximization in Cloud Computing [J]. IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, Special Issue on Cloud Computing, 2013, 24 ( 6 ): 1087-1096.
- [34] BARHAM P, DRAGOVIC B, FRASER K, et al. Xen and the Art of Virtualization[C]//Proceedings of the 19<sup>th</sup> ACM Symposium on Operating Systems Principles, 2003 : 164-177.
- [35] SHENKER S. Software-Defined Networking: History, Hype, and Hope [C]. Proceedings of the Conference on Large-Scale Distributed Systems and Middleware, 2012.

---

收稿日期: 2014-08-01

作者简介:

曹军威 ( 1973 ), 男, 河北乐亭人, 研究员, 博士, 研究方向包括分布式计算与网络系统、智能电网与能源互联网等 ( Tel ) 010-62772260 ( e-mail ) jcao@tsinghua.edu.cn ;

杨明博 ( 1981 ), 男, 吉林通化人, 博士, 研究方向包括电能质量治理, 能源互联网, 磁共振无线能量传输 ( e-mail ) jlsthdsqyx@sina.com ;

张德华 ( 1984 ), 男, 河南新乡人, 博士, 研究方向包括智能电网优化控制, 信号处理, 非线性系统的自适应控制等。