第523次学术讨论会·能源互联网: 前沿科学问题与关键技术

美国的能源互联网与电力市场

SU WenCong^{①*}, HUANG Alex Q.^{②*}

① University of Michigan-Dearborn, Michigan 48128, USA;

② North Carolina State University, North Carolina 27606, USA

* 联系人, E-mail: wencong@umich.edu; aqhuang@ncsu.edu

2015-10-09 收稿, 2015-11-02 修回, 2015-11-03 接受, 2016-01-09 网络版发表

北卡罗来纳州立大学未来可再生电力能源传输与管理(FREEDM)系统中心、美国国家科学基金会工程研究中心(EEC-0812121)和密歇根大学迪尔伯恩分校新晋教职启动资金资助

摘要 受早期计算机工业发展的启发, 美国北卡罗来纳州立大学的Alex Q. Huang教授在2007年提出了“能源互联网”(Energy Internet)这一概念, 并主持开发了未来可再生电能传输及管理系统(FREEDM Systems). 作为一个全新的居民配电基础设施, 能源互联网支持大规模的分布式可再生能源的即插即用. 能源互联网的发展依赖于一系列萌芽期的新兴技术, 如双向通信、双向潮流, 电力系统控制和电力电子器件技术等. 能源互联网的全面建设发展给我们带来了机遇和挑战. 值得一提的是, 在能源互联网的蓝图下, 能源细胞(Energy Cell)作为全新的电力市场参与者, 将大大促进了多样化, 高度市场化的零售电市场发展. 个体居民用户将在未来的电力市场当中扮演及其重要的角色.

关键词 能源互联网, 能源细胞, 智能电网, 电力市场, 可再生能源

电力系统是人类有史以来最为庞大和复杂的基建设施及工业投资. 美国工程学院称之为20世纪以来改变我们生活的最伟大成就, 其重要性甚至超过了汽车、因特网, 高速公路及众多其他发明^[1]. 美国的电力系统更是一个超级庞大的传输网络, 将电能从发电端源源不断地输送至数百万电力用户, 且途经上千上万公里的传输配电线路. 电能几乎供应哺育着所有国民生产部门, 从居民住户、商业网点到运输交通. 电力系统网络已成为整个国民经济赖以构建存在的最重要基础设施^[2].

世界能源需求不断增长, 供需矛盾进一步恶化. 据美国能源信息管理局统计数据显示, 2014年美国能源消耗总量超过98.2 Quadrillion Btu, 其中大约39%直接用于产生电力能源^[3]. 能源生产能力的增长远远低于能源消费的增长. 目前, 对于包括美国在内的绝

大多数国家, 其消耗的绝大部分能源都来自于非可再生、非环保性的化石燃料资源, 如煤炭、石油和天然气. 这种对化石燃料的严重依赖将会极有可能导致一场潜在的能源危机. 有几个主要因素加剧了这种不确定性: (1) 虽然从长期看, 化石能源的主体地位不可撼动, 但石油价格仍面临上涨压力; (2) 能源安全匮乏——大部分进口石油来自政治动荡地区. 石油的供给容易受自然灾害、气候变化、局部战争、社会动乱、恐怖活动等因素制约; (3) 化石燃料的非可再生性. 近20年来, 在世界范围内新发现的油田越来越少, 特别是特大油田; (4) 化石燃料燃烧释放二氧化碳所引发的全球气候变暖, 传统能源污染严重, 废水、废气、废渣处理, 气候变化, 石油生产、应用带来的污染也不容小觑, 节能减排是一项长期任务; (5) 天然气价格波动较大, 尤其是非常规天然气开

引用格式: Su W C, Huang A Q. 美国的能源互联网与电力市场. 科学通报, 2016, 61: 1210–1221

Su W C, Huang A Q. The energy internet and electricity market in the United States (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1210–1221, doi: 10.1360/N972015-00761

采,生产和推广前景仍面临若干不确定因素;(6)日本核事故沉重打击了全球核能产业,对世界各国的核电政策造成不同程度影响。

可再生能源的大规模应用可以帮助减弱化石燃料的不确定性。受环境因素的驱使,美国政府开始致力于大规模引进可再生能源。但是美国能源信息管理局2012年度报告显示,整个可再生能源在全美电力生产中的比重仅仅将从2010年的10%上升至2035年的16%。绝大部分电力生产仍然严重依赖于对环境有着强烈危害的化石能源。根据预测,到2035年,其对化石能源的依赖程度竟与1980年相当。对于美国大规模利用可再生能源的预期,其高效率利用手段等问题必须首先得到有效解决。大规模可再生能源入网的一个关键挑战便是如何储存和控制这些不同形式的能量来源。因此,为了大范围长时间利用这些安全、可持续、环境友好的能源形式,未来的配电网络必须处理好储存和复杂性系统控制的问题。有一种设想指出:全球绿色可再生能源(太阳能、风能、地热、水力、潮汐和洋流)可以满足超过50%的全世界能源需求。而为了实现这一目标,可再生能源必须从两方面得到推广:(1)大规模集中式安装(太阳能或者风电场);(2)大规模分布式再生资源安装,包括生物燃料电池及地热能源的就地使用。目前,大部分基于可再生能源所生产的电能(如离岸风电场)都直接被注入主干电力传输网络。这些集中式的可再生能源发电机组都与最终消耗电能的人口中心相距甚远。因为其受限于输电系统扩建及维护所带来的高昂成本,大规模集中式可再生能源的发展仍是一个巨大挑战。因此存在一个迫切需求去发展全新的居民配电基础设施,以适应大规模分布式再生资源入网。

1 FREEDM系统:能源互联网体系架构

2007年,美国北卡罗莱纳州立大学(North Carolina State University)的Alex Q. Huang(黄勤)教授^[4,5]提出了能源互联网的概念,并主持开发了未来可再生电能传输及管理系统:The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System。效仿网络技术的核心路由器,提出了能源路由器(Energy Router)的概念并且进行了原型实现,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。值得注意的是此次所提出的能源互联网不同于以信息技术为基石的智能

能源网络,后者仍然是以控制信号为信息传输主体而前者是将电力能源作为信息载体本身^[6]。这意味着电力流与信息流合二为一,电能传输本身将也会遵循某些数据传输的基本原则,如多层级体系结构、最短路径法则、缓存队列等待和即插即用式载入等。这些新型电力模式的引入也正是能源互联网概念被某些学者称为智能电网2.0之原因所在^[7]。Alex Q. Huang教授所提出的FREEDM系统和能源互联网概念,其最终目标是每家每户都可以参与到电力市场当中,在电力的传输、分配、交易当中扮演更重要的角色。简而言之,在我们研究的初期,这里所提到的FREEDM系统和能源互联网概念更加着重于配网侧的零售电市场。值得一提的是,2011年出版的《第三次工业革命》(*The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*)一书中,作者Rifkin^[8]提出了类似的观点。他认为“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,就像我们现在网络上分享信息一样”。

FREEDM系统并不是一个特例,普渡大学Lefteri H. Tsoukalas教授及其研究团队也在2008年参照互联网的架构提出了能源互联网架构,与FREEDM系统相比,所提能源互联网架构更注重发挥储能系统的作用^[9]。加利福尼亚大学伯克利分校的研究人员提出了与FREEDM系统相类似的能源互联网架构,其更加注重能源互联网所需求的信息体系建设^[10]。瑞士联邦理工学院的研究团队则设计了能源集线器(Energy Hub),并通过能源集线器架设能源互联网^[11]。中国也于推进发展“坚强智能电网”项目之后快速组织起“能源互联网”的相关研讨和软课题研究并举办了首届中国能源互联网发展战略论坛,以期形成详细的能源互联网调研报告和路线图^[12]。以上全世界范围内对“能源互联网”研究的热潮也迅速在学术界对其特性初步形成一定共识。

简而言之,这里提到的能源互联网概念与智能电网并不互斥。随着电力电子技术、通信技术、分布式控制技术,数据监测和采集处理,以及“大数据”技术的发展,近几年蓬勃发展的智能电网技术为能源互联网创造了良好的物理(physical)和信息(cyber)平台。目前而言,正如智能电网在不同的国家和地区被赋予了有差别的定义,全世界各地对于能源互联网也没有

一个统一的标准和定义. FREEDM版本的能源互联网的核心是基于智能电网的平台, 为广大的终端用电客户, 提供一个全新开放性的电力交易和消费平台.

具有以下几个特点.

(1) 可再生: 可再生能源(风能、太阳能等)将成为能源互联网的主要电力发电来源, 尤其是大量分布式可再生发电设备的入网, 会给现有的电网带来很多挑战和机遇.

(2) 分布式: 这里提到的“分布式”并不局限于分布式电力发电设备, 更包括“分布式”储能、“分布式”控制、“分布式”数据采集和处理. 现有的电力系统远远不能满足这样大规模的“分布式”设备和节点.

(3) 互连性: 整个能源互联网将是一个网络的网络(a network of networks)和复杂的信息物理融合系统(cyber-physical system). 这里的网络包括物理层面(比如输电配电网), 也包括信息层面(如通信和控制网络). 每个参与个体, 都可以在任意时刻和地点实现发电设备, 储能装置, 和智能负载的即插即用.

(4) 开放性: 终端用电客户将不仅仅是传统的电力消费者, 也可以作为个体电力生产者和个体供应商. 这样的信息透明度和潜在的卖电收益将大大刺激终端用电客户自主安装分布式新能源和智能家居的积极性和参与度, 增加用户对电力供应的自主选择权, 最终提升用户的体验度.

当然我们也必须认识到, 电力市场在世界各国的发展状况十分不同, 即使在美国不同地区的电力市场政策也是不一样的. 把FREEDM系统和能源互联网概念引入到具体的实际应用中, 还需要做一些因地制宜的改进和扩展.

为了实现能源互联网的全面发展和应用, 很多关键技术还需要攻坚, 包括能源路由器(energy router), 交直流柔性输电, 电网和信息网络的快速重构, 和开放式的电力交易平台. 同时, 随着相关技术的发展, 结合各地电力系统和市场的实际情况, 建立相应的产业标准和规范也迫在眉睫.

在下文中, 我们将侧重于现有的FREEDM系统和能源互联网概念在美国电力市场中的角色做些介绍, 也会讨论其的一般性和扩展性. 首先, 如图1所示, 能源互联网的概念与大家所熟知的信息互联网有很多的共同之处. 20世纪80年代开始, 在相对较短的一段时间里, 计算机工业便从大型集中式过渡到了基于分布式的信息框架, 随后又步入世界范围内

图1 (网络版彩色)信息互联网与能源互联网的比较

Figure 1 (Color online) Paradigm shift in computer industry (information internet) and power industry (energy internet)

的因特网时代. 也正是由于因特网的爆炸性发展, “用户”得以成为了基础设施和经济发展的重要一部分, 也驱动了各个领域的技术创新和生产力提升. 在类似的模式转换中, 为了可持续的能源发展, 分布式可再生能源的大规模渗透势在必行, 这就要求电网能够支持“用户”更为积极地参与到电网的运行和管理当中. 与此同时, 一种新型配电基础设施(能源互联网)便显得非常必要. 传统电力网络的设计初衷基于大型集中式的发电和传输. 一种更加多元的新型能源传输和管理方法也显得极为需要. 传统电网结构已无法适应大规模的分布式能源发电, 传输和自由交易.

在信息互联网当中, 有3个关键技术至关重要: 即插即用接口、信息路由器和开放标准的操作系统. 在当今的电力系统中, 与之相对应的功能组件仍未出现. 而为了使能源互联网成为可能, 未来的电力网络必须包括这三者作为电网核心构件.

图2展示了这3个关键技术特征. 第一个关键特征便是一个包含400 V直流总线和120 V交流总线的即插即用接口. 这个即插即用接口也同时包含了一个基于开放标准的通信接口, 它能使任何并网设备都能够在其连接时被立即识别. 这个开放标准的通信协议必须可以描述负载、分布式储能和发电设备.

图2 (网络版彩色)FREEDM系统的原理图和能源互联网

Figure 2 (Color online) Envisioned FREEDM systems and energy internet

这样一个即插协议的开成功开发将会使能源互联网具有计算机中“USB”端口的类似功能。第二个关键特征是能源路由器(energy router),其可以连接至12 kV的交流配电总线和支持管理120 V交流及400 V直流总线。能源路由器需要能解析上述的“USB”协议及识别管理所有连接至交直流低电压总线的设备。这种管理包括状态监控和数据采集,并为所有设备提供控制决策。对于可控负载来说,控制参考可为一个“开”或者“关”的命令,或者一个可调节的功率或电压命令。对分布式储能设备来说,这个命令可以是一个充放电速率。对于分布式可再生能源发电设备来说,这个命令可以针对具体设备的控制决策。举例来说,对于太阳能(PV)系统,功率输出受最大功率点跟踪算法控制,因此能源路由器并不直接控制PV系统的功率输出。但是能源路由器可以针对当地的负载需求决定PV系统的连接状态。能源路由器也提供了重要的分布式能源管理功能,如对低压交流和直流的控制、网侧低电压穿越、负载侧故障电流限制及其他重要功能。第3个关键特征是针对未来可再生电能传输及管理系统的开放式操作系统。通过通信网络,这个开放式操作系统可以分布式地嵌入到各个能源路由器当中。各个能源路由器相互协作,而达到整个配网的系统优化管理。

需要指出的是,虽然这里只展示了以12 kV交流总线为例的未来可再生电能传输及管理系统,未来可再生电能传输及管理系统同样适用于中等电压的直流配电线路,无论是针对放射型还是网络型配置结构。当然我们也要认识到FREEDM系统的大规模发展还要取决于几个迄今在电力工业领域尚未成熟

的关键技术。比如,上文提到的能源路由器将被整合到新型的固态变压器(Solid State Transformer)当中。固态变压器并非仅仅是传统配电变压器的替代品,也能提供电压下降修复、功率因素纠正和故障电流限制等功能。当前,仍未有合适的商用高电压、高频率半导体电子器件去实现固态变压器。为了获得这样高电压和高频率的电力电子器件,新型电力电子技术也处于迅速发展之中,而其研究重点往往以宽频带新型材料(SiC, GaN)为基础。这些技术之所以被迫切需求是因为当前的大功率硅电子器件无法实现超过1 kHz的超高频切换,极大限制了发展紧凑和高效率型能源路由器的能力。

针对FREEDM系统是实施可行性,我们可以拿当今笔记本电源供应系统做个类比。在一台笔记本电脑中,一条通信主线可以协作管理所有的电源管理设备。笔记本电脑可以暂时地连接或断开外接电源,而不影响自身的计算运行。与之相类似的,FREEDM系统也将能在暂时断开与主配网的连接时运行良好。计算机用户可以选择不同的电源管理策略,相类似的,FREEDM系统也能够自主的能源管理和负载调度。进一步来说,正如计算机系统可以自动识别新的USB硬件设备,FREEDM系统也将可以查验和兼容并网的新增负载,分布式发电和储能设备。在计算机电源供应中,成熟的能源管理技术是通过数字电路和高频硅电力电子器件来实现的。电能质量几乎趋于完美,系统稳定性也可以通过电力电子器件的适当设计来取得保障。举例来说,CPU的高速动态性受到电压调制模块(VRM)的良好协助,而其实质为一个专用电源转换器,由此计算机电源系统便可忽视微型处理器高频率切换所带来的暂态不稳定。因此FREEDM概念可以借由与计算机系统相类似的技术而实现,如数字通信技术和高电压、高频率电力电子技术。数字通信在今天已广泛适用于各个不同领域,自然也可被结合到诸如FREEDM这种能源系统当中。

2 能源互联网与美国电力市场

能源互联网将给美国的电力市场改革带来巨大的挑战和机遇^[2]。电能的发电、传输和配送向来都受到美国联邦政府和当地执行机构的严格控制。虽然电力市场化改革已经经历了20多年的发展,但是美国电力零售市场(retail electricity market)改革非常缓慢,自21世纪早期的加州电力危机之后便显得尤为

沉寂. 在现今的电力系统中, 居民用户仅仅有着极为有限的“能源选择权”(energy choice)从长远来看, 电力用户被期许对美国售电市场产生更为重要的实质性影响, 不仅是通过自由选择电力供应商, 更是利用自身的分布式发电能力来更加积极地参与到电力零售市场当中.

首先让我们对美国整个电力工业发展有个简要的回顾. 1880年左右, 托马斯爱迪生在纽约市成立了第一个投资人占有的电力公司. 起先如此小规模的美国电力公司被允许不受管制的向当地用户提供服务. 随后到了20世纪早期, 出现了第一家国有管控的电力公司. 在大多数商业模式中, 客户购买意愿是商品价格的决定因素. 且从纯粹经济学角度, 我们可以说市场在供求关系曲线的交叉点决定了商品或者服务的价格平衡点. 然而对电力市场来说, 从20世纪初开始, 电力公司便大多以区域性垄断的形式呈现. 因此电力服务本身的运行成本便成了电能价格制定的重要基本原则, 而较少考虑客户本身的支付意愿. 这类价格通常根据不同客户类型(如居民住户、商户或者工业用户)上下变动来提供一个包括电力运输成本在内的合适收益回报. 在1935年, 国家层面的管控制度已不能满足市场的需要, 尤其是那些涉及到全国能源交易量三分之二的巨型境内控股供电公司. 因此美国国会在1935年通过了一项《公用事业控股公司法》(PUHCA)来强制拆分大型控股公司, 只赋予其基于国家审核法规的在一定区域范围内行使的有限垄断供应权. 作为交换, 供电公司也承诺以国家规定费率为全部客户无差别提供电力服务. 从1940年一直到1960年, 这类垂直业务整合式的垄断性电力公司似乎运行的非常之良好. 但因受到石油禁运和20世纪70年代中期国际原油市场奔溃的影响, 电力价格在此期间大幅上涨. 作为对20世纪70年代此次能源危机的回应, 国会在1978年间又通过了一项《公用事业管制政策法案》(PURPA)来促进电力公司对美国境内能源和诸如水利、风能、太阳能等可再生能源的利用. PURPA 法案也同时向非公用电力生产商放开了整个售电市场.

PUHCA和PURPA这两个法案都被视为美国电力市场化改革的标志, 乃美国电力改革的起始点. 总体来说, 电力批发市场(wholesale electricity market)主要针对各个发电方在传输层面的互相竞价, 而电力零售市场主要针对在配电层面的短期或实时配送. 1980

年左右, 一些大型商业或者工业用户开始积极争取其与电力批发供应方的议价权. 在过去, 当地电力公司独自拥有和运营从生产、传输到配电的所有电力资产. 正因为这种垄断天性, 居民用户在电能购买价格方面几乎没有任何选择权. 但是从20世纪90年代开始, 在某些美国地方电力市场上, 电力用户开始被允许根据服务价格和质量在一系列电力供应方之间进行选择. 1992年的《能源政策法案》(EPACT) 更是改革了1935年的《公用事业控股公司法》和修正了1978年的《公用事业管制政策法案》. EPACT 的目的正是在于提高清洁能源的使用率和全面提升全美能源效率. 这一法案允许联邦能源管制委员会(FERC)命令电力传输方为其他电力销售方提供电力供应, 也对美国电力市场化改革产生了深远影响. 其值得注意的是即使在此法案之后, 电能零售客户仍然缺乏电力购买的选择权. 在1994年, 加州公立设施委员会(CPUC)开始调查研究电力用户的选择权问题, 使加州成为第一个涉及此领域的行政区域.

在1996年, 联邦能源管制委员会(FERC)条例第888和889号同时促生了独立系统运营商(ISO)的概念并深刻改变了整个北美电力生产、运输到配送的方方面面. 同年, 条例第888号详细描述了电力传输线路所有方的收费权和对其他电力供应方义务开放使用的若干种情形. 条例第888号同时要求电力公司拆分他们的传输和生产业务并且公开无差别电力传输服务的相关财务资料. 在同一年, 条例第889号开创了一种开放式实时信息系统(OASIS). 通过这一系统, 电力传输方可以实时申报其传输线路的即时容量来方便各类有电力传输需求的公司去跟踪查验他们的可用电力输送容量. ISO概念的不断发展为大规模电力生产商提供了一个更为广阔且充满竞争机制的电力市场结构. 当然, ISO主要还是只致力于处理大规模聚集负荷在传输层面的电力需求而并较少关心更为底层的配电系统. 在1999年, FERC条例第2000号促使诞生了区域性的电力传输机构(RTOs)且将其定义为独立非营利性的电力传输网络操作实体. 这一法案旨在加强售电市场的竞争机制来降低电力批发市场的供应价格.

美国电力所有权结构较为复杂. 截至2012年, 整个美国电力产业由接近3300家各类不同性质的供电公司, 超过1000家独立电力生产商, 3个区域性同步电力网络, 8个电力可靠性咨询公司, 大约150个电力

控制操作机构和上千家独立的工程、经济、环境和土地使用主管机构所组成。图2展示了整个美国供电工业的统计数据。公立供电公司占到61%的总电力供应实体,为14.4%的美国人口提供电力服务。投资人占有性质的电力公司则占到5.8%的总电力供应实体,并为68.5%的美国人口提供电力服务。集体合作和私人拥有的非营利性电力公司则大多在乡村地区运营。此外,其他各类非供电实体(如联邦电力代理和电力销售方)也覆盖美国部分地区来提供相关服务。

从另一种角度来看,整个美国电力供应体系只存在着两种操作结构:垂直整合式供电公司和仅涉及配电层面的供电公司。简要说,垂直整合式供电公司负责从生产、运输到配电零售的方方面面,并且专属式的对电厂,传输线路和配给线路无可争议的拥有所有权。大多数此类供电公司组合使用其名下的各类资产资源,电力合同资源和短期买卖交易来满足电力客户的需求,同时组合优化配置其拥有的各类电力网络设施和其他辅助设施来将电能从初始生产源转移到用户终端。另一些供电公司则仅提供终端配电服务,因此被称为专职配电公司。这类公司性质从小客户拥有到大型投资人拥有不一而足。在大多数情况下,这些仅配电公司一般从其上游产业的售电方购电。一些巨型客户甚至直接与电力供应方交易而只享受仅配电公司的配电服务。

在一些致力于重塑电力零售市场的州,不同的公司会面向不同的当地客户来销售商品电能。一些公司专注于绿色能源服务,而另外一些专注于居住、商业或者工业服务。这些电力供应商也许拥有他们自己的电厂,也许从供电实体或者电力期货市场那购电。

在某些区域,高度组织化的售电市场甚至会依靠RTOs和ISOs来组织当天或者实时的电力竞价拍卖。RTOs和ISOs实质上也不依附于任何市场参与者并且服务于全美三分之二的电力用户。RTOs和ISOs都同样负责管理运作很大一块区域的售电市场。但是他们略有不同的是:今天的RTOs对FERC建立起来的输电网络有一些额外的短期责任。截至2014年1月,共有9个ISOs/RTOs覆盖整个北美地区。他们分别为:加州ISO(CAISO)、纽约ISO(NYISO)、德州电能可靠性委员会(ERCOT)、中西部独立传输作业系统(MISO)、新西兰ISO(ISO-NE)、阿尔伯塔电力操作系统(AESO)、负责加拿大安大略省的独立电能系统操

作组(IESO)、PJM连接系统组(PJM)和西南电力储蓄池(SPP)。

电力零售市场的情况根据不同工业种类的电力零售商而相互有所差异,尤其是针对居民用户和小型商业用户的零售电市场。例如,一些像实时定价,多重商标,礼品馈赠,便捷商区和开业时间之类的传统商品零售概念压根不存在于电力零售市场。因此目前有一种需要通过开创新型商业模式来降低电力零售成本的迫切性。居民电力购买用户多样性的持续增长将会提升整个电力零售市场的竞争性和市场流动性,也会帮助减少商业风险从而在长远预期上降低售电价格。在20世纪90年代早期,一些高电价的州县便开始试图开发电力零售服务竞争机制。然而即使客户能选择他们钟意的电力供应商,当地配电公司仍然要负责电能传送的职能。电力零售竞争被期许可以带来更低的价格,创新式的服务和更多的电价选择。它也被希望可以用来将新增装机量的成本风险从支付方转移到市场供给方。自20世纪90年代起,许多区域性电力市场已经在削弱管制和竞争机制引进方面取得一定进展。但是21世纪早期的重大事故如加州电力瘫痪和安然公司危机都大大拖累了此项改革进程,一些区域从中重新看到了适当减弱竞争机制的必要性。作为对比,德州自2002年起成功在电力零售市场引进客户选择机制。在2006年,德州电力用户可以从17家电力供应商中选择36种不同类别的电价套餐方案。到2008年,这些电力用户已可以从大约28家供应商所提供的100种费率方案中自由选择。70%左右的商业、工业用户和40%左右的居民用户自2000年起利用选择优势开始变更他们的电力供应商。到2011年,15个州和哥伦比亚特区开始重构其电力零售服务并且允许进行“能源选择”。零售电用户现在已可以在不同供应商之间充分自由选择。零售电力供应商(REPs)包括TXU, Just Energy, Con Edison, Champion Energy等。

根据最新报告显示,电力用户从电力市场竞争机制中已节省总额巨大的开支。根据美国能源信息管理局和美国劳工部统计数据表明,CPI指数在1998~2012年为40.3%,而同期各个引进竞争机制州的电力用户只受到电价上涨0.89%的影响,且全国范围内此项指标平均为4.06%。在没有引进竞争机制州的电力用户却见证了其电价上涨9.44%以上。在引进竞争机制州的居民用户甚至目睹了1998~2012年1.20%

的电价下调,而同比全国电价平均增长2.51%以上.作为对比,在没有引进竞争机制州的居民用户见证了同期电价8.87%的上涨.对于引进竞争机制州的商业用户来说,其同期商业类别电价下降了4.84%,全国此项数据为2.95%,非电价竞争机制州为0.12%.对于工业电力用户,全国同期平均电价上涨6.12%,引进竞争机制州电价只上涨3.51%,非竞争机制州电价上涨11.36%.有明显证据表明,所有的电能消费方都受益于电力市场的竞争机制.

美国电力市场改革虽受益于其特有的工业发展模式及成熟的消费市场,但其背后的技术推动力量和革新意愿亦广泛存在于全球其他国家.从以上论述中我们也可发现即使在整个美国境内,各个州的电力工业发展状况及政策法规亦非完全一致,其电力市场改革步骤亦是依赖州为独立单位从东西两岸如加州、纽约州向中西部内陆地区如俄克拉荷马州、犹他州而逐步深化推行.这一由点及面的电力改革策略选择对于其他地区发展差异显著的国家亦有一定借鉴作用.

3 能源互联网与能源细胞(Energy Cell)

迄今为止,仍然没有一个被广泛接受的未来电力市场蓝图.但是所有人都逐步达成共识:具有良好组织结构的竞争型电力市场最终会从成本、效率、可靠性和安全性等各个方面对我们社会产生巨大的益处.更为重要的是,电力零售和批发市场的竞争机制会促使居民用户习惯购买并接纳更多的创新型智能电网技术和清洁能源技术,这会提升客户的选择多样性并且从长远上降低电能价格.在笔者看来,有两方面革新将会剧烈重塑原有的传统电力市场、社会环境和商业模式:(1) 分布式可再生能源;(2) 居民用户参与程度.

竞争机制会鼓励所有的电力产业参与方,包括供电公司、工业用户、私人投资者去提升可再生能源在电力市场中的参与度,其会有效减少碳排放量和降低对损害环境的化石能源的依赖.在我们理想化的未来电力市场中,成千上万独立运作的生产者(如居民用户)将会促使数目更为庞大的分布式可再生能源并网到全国电力系统当中.分布式能源(最好是可

再生能源)生产者和消费者的高度参与将会带来一个更加高效和有益环境的能源格局.需要注意的是这些分布式能源发电机组仍需符合联邦或当地政府的相关规定,诸如环保标准和安全要求等.

如上文所介绍的,“能源互联网”是一种开创性的下一代电力网络,其可以高效整合分布式和居民供电者,为电力市场改革带来巨大的契机.能源互联网与信息互联网有很多的共同性.比如,IT产业正是通过提供一系列创新型服务和产品而发展兴盛起来的.IT产业的蓬勃发展更为国民经济增长、成本节约、创造就业岗位提供了巨大机会,并且在相对较短的发展期内,使主流集中式计算机框架逐步让位于允许个人用户通过万维网连接的分布式计算机框架.在计算机工业当中,用户活跃度¹⁾是造成IT产业(如Amazon, eBay, Alibaba和Facebook)爆发性增长的决定因素.信息互联网的不断创新已经几乎重新塑造了我们所认知的传统社会环境和商业模式.如果说“信息互联网”是过去30年里带动国民经济发展的关键引擎,那么一个类似强力的能源互联网将至少也会在未来几十年内带来更多潜在的发展契机.新型电力市场框架将尽可能发展成为金融证券市场或eBay那样的互联网C2C商业模式.在构想的能源互联网当中,每一位居民用户都可被称之为一个能源细胞(Energy Cell),他们不仅仅扮演一个电能消费者的角色(energy consumer),也通过管理各自拥有的分布式发电机组(DGs)、分布式能源储备设施(DESs)和分布式负载来充当一个电能供给者(energy producer),从而进一步提高其在整个能源互联网中的参与程度.当然,能源互联网中用户活跃度的显著提高还有赖于今后各项创新型能源商业模式的进一步开发及整个能源交易生态系统的建立.图3展示传统电力市场和能源互联网下的新型电力市场蓝图.

居民用户能够通过返销自产的富裕电能来抵销部分他们消耗电能的费用,甚至从中赚取额外收入.一些客户也许会继续从各类竞争供电方那基于服务标准购买电能.能源互联网给居民用户提供了足够动机去自我安装分布式可再生发电机(如小型风电机组或屋顶太阳能板).随后竞争型零售电市场将会为当地绿色能源生产者提供种种益处,从而最终带动

1) 用户活跃度是指在线用户的积极参与程度,即从终端用户角度考察其与服务方终端或其他用户的互动频率.电力用户活跃度遵从其类似含义,指其在线主动参与电力交易的自主性及与其他方信息交换的互动频率.

图3 (网络版彩色)传统电力市场和能源互联网下的新型电力市场蓝图

Figure 3 (Color online) Legacy electricity market v.s. energy internet market

绿色能源的蓬勃发展. 居民用户也可以自由选择各类分布式电力生产者(如能源细胞)来为之提供可持续性的清洁能源. 同时, 基础科学的发展突破和新兴

技术会不断降低就地可再生能源发电机和储蓄设施的运行成本, 从而使居民用户在未来的电力市场中扮演更为积极的角色. 可以相信的是, 下一代居民配

电系统将尽可能提供一个新型电力交易参与平台, 其中所有居民用户都有同等的参与机会. 能源互联网需要我们整个社会从传统的集中式发电、配电和消费模式那里, 升级为具有很高用户活跃度的新兴电力市场当中去. 在新的市场结构里, 配电和输电仍然会遵从基于服务成本的电力管制, 从而保证整个系统的可靠性和安全性. 但不管怎样, 供电公司和分布式电力生产者的生产成本绝对会在电力批发市场中有所反映.

能源细胞由分布式发电机组、能源储蓄和可控负载所组成. 在我们构想的能源互联网中, 能源细胞既可以达到一个乡镇的规模也可以仅限于一家独栋住户的规模. 成百上千的能源细胞将会被物理连接成为一个类似于因特网的组织结构. 同时, 每一个能源细胞都能够通过双向通信网络设施与其他细胞、社会环境实体实时交换数据和信息. 一些能源细胞可能仅仅只作用为电能消费者, 而另外一些则可能积极参与到居民用户层级的电力交易当中去. 新型电力市场将会面临各类不确定因素. 例如传统的电力系统调度方仅仅依赖于确定性的优化方法, 因为其供电层级的预测往往足够精确或者预测误差能被限定在一定范围之内. 而在能源互联网中, 用户行为和他们的消费生产状况将会很难预测. 同时我们必须了解到今天的供电公司所赚取的足够涵盖投资成本的利润额度是从顺从的支付者那得来. 电力工业可以说只是被成本利润分析和可靠性要求所驱动. 他们天性便是极其保守的, 且对任何投资决定(如输电和配电线路扩建)都会十分谨慎, 几乎没有任何主观动力去改革传统的电力网络和市场. 如果没有一个理性的经济模型, 未来的供电公司几乎没有任何动力去发展壮大能源细胞所占的市场份额. 能源互联网却能够使电力用户通过利用分布式发电和转移用电负荷的方式来减少能源费用. 在一个经过充分改革的零售电市场框架出现之前, 供电公司肯定会通过降低售电量来攫取利润, 而用户拥有的发电量便会在整个电力交易中占到一个可观份额. 另一方面, 供电公司需要投资一大笔资金去升级改造现有的配电系统, 包括通信基础设施和控制中心. 在不同供电公司之间便会产生这样一个利益冲突: 他们都必须为自己争取更大的客户量来赚取更多利润. 值得注意的是供电公司迄今为止仍然拥有绝大部分配电基础设施(如配电线路、变压器、二次配电站). 所以在我

们构想的能源互联网蓝图当中, 供电公司将会从租借住户配电设施中获得可观利润, 这些配电设施将会被用于满足能源细胞间电力交易的硬件需求. 与相对静止的主干式电力系统拓扑结构相比, 由差异性显著的不同能源细胞而组成的能源互联网将会是一个更为动态和复杂的系统. 因此, 供电公司在保证配电安全和可靠性方面也会扮演一个更为重要的角色. 换言之, 供电公司被期许通过提供传统电力交易之外的辅助性服务来赚取更多利润, 这些服务包括策划调度、无功功率和电压控制、损耗补偿、系统保护和能源平衡等. 图4展示了未来分布式可再生能源和住户能源消费生产者(能源细胞)高度参与下的电力市场结构.

针对这样的全新电力市场, 笔者也做了探索性的理论研究^[13~15]. 相关新型电力市场体系架构与交易平台的革新研究于近年来也不断得到广泛重视^[16]. 这些开创性工作主要针对电力零售市场化改革并虑及分布式能源供应商高度竞争. 简而言之, 在这些研究中, 我们探索了能源互联网蓝图下的电力市场框架及其关键组成部分(能源细胞), 并建立了相关的数学模型. 所提出的零售电市场框架也以Cournot模型为基础, 后者在电力市场竞争估算方面受到广泛使用. 此外为了保护个体竞价的隐私性, 能源细胞和大型电力供应商之间无需相互公开任何运行状态. 所有的竞价都累积进入集中式的市场清算部门. 图4展示了能源互联网的整体市场框架. 同时我们也结合博弈论概念和方法在具体算例研究了所提出新型零售电市场的电价清算机制, 并给出了详细分析和讨论. 作为一个 n 方博弈的问题, 其中每一个参与者(能源细胞)都通过分布

图4 (网络版彩色)能源互联网的新型电力市场框架^[15]

Figure 4 (Color online) An envisioned electricity market infrastructure for energy internet^[15]

式决策过程来最大化自身目标. 数值模拟实例展示了所提出的电力市场清算机制的有效性. 博弈理论方法帮助我们用来寻找纳什均衡点, 在局部和全局约束条件下去清算市场化的电力市场价格. 因为篇幅所限, 详细的数学公式和建模, 我们就不再这里一一赘述. 有兴趣的读者, 请参考文献[13~17].

本质上, 每一个能源细胞都是一个利己的客观实体, 其目的在于根据当地和全局限制来使自身获益最大化. 而能源细胞之间也可能会产生一定冲突. 首先在这样一个电力市场中, 能源细胞在某种意义上会与传统电力供应者(如供电网络)相对独立. 其次, 因为卖方数量(如供电公司、电力系统运营商和零售商)在自由化电力市场中相当灵活和固定, 市场结构和网络拓扑在一定时间内可轻易提前确定. 与之不同的是, 有着大量差异性能源细胞的能源互联网却实为一个高度动态性和复杂化的系统, 包含大量空间及暂态的不确定性. 再次, 过去10年里, 大量研究调查了可再生能源生产对于批发市场电价的影响. 但时至今日, 分布式可再生能源对于零售电市场的影响仍未被充分研究. 分布式可再生能源的充分采用主要依赖于居民用户的参与程度. 能源互联网另外一个重要特点是居民用户可以通过售卖富裕自产电能给相邻用户或者供电网络来部分抵消他们的电能花费. 能源互联网也可以提供居民用户一系列激励措施来促使他们安装分布式可再生能源发电机组(如就地风电发电机和屋顶太阳能板). 最后, 在一个传统自由化电力市场中, 系统运营往往只依靠集中式数据采集和管理方法. 而随着能源细胞的大量增加, 直觉上目前的集中式信息处理框架将不再能够持续性满足数据量的爆发式增长.

供电网络也不同于在传统电力市场中的角色. 在这样一个充分市场化的电力市场中, 供电公司将不再专属性地拥有电厂, 也不再仅仅只通过售卖电能而获取利润. 与相对固定的主干电力系统相比较, 拥有大量能源细胞的居民配电系统可以成为一个高度动态和复杂性的系统. 供电公司也将在保证居民

配电系统安全性和可靠性方面扮演一个更为重要的角色. 除电力交易外, 供电公司还被期许通过提供辅助性服务(如电力计划调度; 无功功率和电压控制; 损耗补偿; 负载追踪; 系统保护和能源平衡)来获取更多利润.

4 展望

众多研究预测表明能源互联网极可能也是一个潜力巨大的市场概念, 它能允许所有新兴参与者(能源细胞)通过分布式决策过程参与到动态多样性的能源市场中来. 电能费率也将是充分竞争和智能买卖决策后的结果. 然而, 所需的市场清理机制仍然处于萌芽期, 它将会为分布式电力生产者和消费者提供一个清晰的、时效性的和透明的价格信号. 为了实现之前所提到的能源互联网蓝图, 底层的配电基础设施也必须得到显著升级. 新型电力网络必须在分布式发电高度渗透情景之下支持大量即插即用式操作. 另一方面, 在能源政策上(如联邦能源管理委员会和州立或区域管理机构), 我们仍有很长一段路要走. 目前的能源网络体系构建仍然以电能为主, 但亦不排除其今后将结合石油、天然气或页岩气等管道网络体系直接并网使用的可能性. 这又将对能源决策规划提出新的要求.

此外, 一个经过充分论证的商业模式将会是以居民用户参与为特征的下一代零售电市场中至为关键的一环. 如住户电能生产者(能源细胞)等新型参与角色的引进将会深刻影响我们使用电能的方式, 而这一电能使用模式在过去的几十年中都没有得到任何改变. 这一模式的转变和电力工业的重新构建并不能一蹴而就. 其管制垄断的零售电市场结构已良好运作了极长一段时间并会继续在未来几年内继续拥有它的一席之地. 在下一代新型电力市场变为现实之前, 仍有大量研究调查工作需要完成. 如果该项技术研究进展顺利, 其所带来的未来住户零售电市场竞争机制将会为整个能源市场及多方参与者带来相当可观的资本收益.

致谢 感谢密歇根大学迪尔伯恩分校的Tao Chen在该文撰写过程中提供的帮助; 也希望借此机会向各位匿名评审人表示衷心感谢, 他们的点评及建议对这篇文章贡献良多.

参考文献

- 1 National Academy of Engineering. Greatest Engineering Achievements of the Twentieth Century. <http://www.mae.ncsu.edu/eischen/courses/mae415/docs/GreatestEngineeringAchievements.pdf>
- 2 Su W. The role of customers in the U.S. electricity market: Past, present, and future. *Electr J*, 2014, 27: 112–125
- 3 U.S. Energy Information Administration. Monthly Energy Review (Accessed on March 2015). <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>
- 4 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet. *Proc IEEE*, 2011, 99: 133–148
- 5 Huang A Q. FREEDM system—A vision for the future grid. In: *Proc. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, Minnesota, 2010
- 6 Bui N, Castellani A P, Casari P, et al. The internet of energy: A web-enabled smart grid system. *IEEE Netw*, 2012, 26: 39–45
- 7 Cao J, Yang M. Energy internet—towards smart Grid 2.0. In: *2013 Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing (ICNDC)*, Los Angeles, CA, 2013. 105–110
- 8 Rifkin J. The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world. <http://www.thethirdindustrialrevolution.com/>
- 9 Tsoukalas L H, Gao R. From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements. In: *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008*, IEEE, 2008
- 10 Katz R H, Culler D A, Sanders S, et al. An information-centric energy infrastructure: The berkeley view. *Sust Comput Inform Syst*, 2011, 1: 7–22
- 11 Ghasemi A, Hojjat M, Javidi M H. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs. In: *2nd Iranian Conference on Smart Grids (ICSG)*, IEEE, 2012. 1–7
- 12 Xie T. Architecture and key technologies of energy internet. Dissertation of Postdoc Degree. Beijing: Tsinghua University, 2013. 5–6
- 13 Zhang N, Yan Y, Su W. A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers. *Appl Energ*, 2015, 154: 471–479
- 14 Zhang N, Yan Y, Xu S, et al. Game-theory-based electricity market clearing mechanisms for an open and transactive distribution grid. In: *2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Denver, CO, U.S.A., 2015
- 15 Su W, Huang A Q. A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers. *Appl Energ*, 2014, 119: 341–350
- 16 Cazalet E G. Transactional energy market information exchange (TeMIX). An OASIS Energy Market Information Exchange Technical Committee White Paper, 2010
- 17 Alamaniotis M, Gao R, Tsoukalas L H. Towards an Energy Internet: A Game-theoretic Approach to Price-directed Energy Utilization. Berlin: Springer, 2011. 3–11

The energy internet and electricity market in the United States

SU WenCong¹ & HUANG Alex Q.²

¹ University of Michigan-Dearborn, Michigan 48128, USA;

² North Carolina State University, North Carolina 27606, USA

The vision of Energy Internet was originally proposed by Professor Alex Q. Huang (North Carolina State University, United States) in 2007 and was inspired by the paradigm shift of computer industry in early 1980s. The centralized computer mainframes gave way to a distributed computing infrastructure which allows individual users to access via a worldwide internet. From its inception, the information Internet (computer network) innovations have been completely reshaping the traditional views of our social environment and business world. In a similar paradigm shift, highly distributed and scalable renewable energy resources must play a primary role, of which the centralized bulk power plants are currently serving. This paradigm shift can only be achieved by encouraging and facilitating the participation of individual residential customer with a future power distribution infrastructure. While legacy power system operations are solely driven by least-cost and reliability concerns, the Energy Internet innovations are completely reshaping the traditional views of our power generation, distribution, consumption, social environment, and business world. The vision of Energy Internet will require the equivalent of a Manhattan Project for energy, as suggested in Thomas Friedman's book, *The World is Flat*. It is believed that Energy Internet is a level playing field in terms of electricity transactions, where all residential customers have an equal opportunity. The residential energy customers, referred as Energy Cells, will radically change the traditional view of electricity market. The envisioned Energy Internet requires that our society move away from, or at least supplement, the traditional centralized generation, distribution, and consumption business model to one where every user can actively participate in the energy market. User participation is a major factor that has resulted in exponentially increasing innovation and ingenuity in the information technology sector (e.g., Amazon, eBay and Facebook). If the "Information Internet" was the engine that powered our country's economic growth in the last thirty years, then a similar and even more powerful Energy Internet will accomplish even more in the next several decades. The Energy Internet builds upon advanced power electronics, power system control, two-way communication, and two-way power flow. The Energy Internet will bring both opportunities and challenges to our research and education society. This paper will present the role of Energy Internet in United States as a means of allowing new market participants to fully engage in a dynamic and diverse energy market through a distributed decision making process in which electricity rates are determined via competitive and intelligent purchasing and selling strategies.

energy internet, energy cell, smart grid, electricity market, sustainable energy

doi: 10.1360/N972015-00761