

能源互联网信息技术研究综述

王继业¹ 孟坤*^{2,4} 曹军威^{3,5} 程志华¹ 高灵超¹ 林闯^{4,5}

- 1 (国家电网公司, 北京 100031)
- 2 (北京信息科技大学, 计算机学院, 北京 100101)
- 3 (清华大学信息技术研究院, 北京 100084)
- 4 (清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)
- 5 (清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

Research on Information Technology for Energy Internet: A Survey

Wang Jiye¹, Meng Kun^{2,4}, Cao Jun-Wei^{3,5}, Cheng Zhihua¹, Gao Lingchao¹, and Lin Chuang^{4,5}

1. (State Grid Corporation of China, Beijing 100031)
2. (Computer school, Beijing information science and technology, Beijing 100101)
3. (Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)
4. (Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)
5. (Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084)

Abstract The drastic increasing demand for energy aggravates the shortage of energy state. Using green renewable energy paves a way to solve the above problem, however, how to access and control these types of intermittent energy face more challenges. Energy Internet (or Internet of Energy), differentiated from the Internet of only transferring and sharing information, has been forecasted as a typical representative of the coming industry revolution. Comparing with the Internet, Energy Internet must have the ability of efficiently managing the energy lifecycle including energy production, energy transmission and distribution, and energy consumption. Its objective contains conveniently switching in and switching out, efficiently dispatching energy and dedicatedly fulfilling all consumers' demand etc. In this paper, we analyze the potential requirements of the future energy system, state the related concepts and characters of energy Internet, survey all results with respect to the information technology in energy Internet, and conclude an energy Internet infrastructure and its support technologies. In addition, we discuss the opportunities and challenges of information technology during developing the energy Internet.

Key words Energy internet; renewable energy sources; distributed energy sources; information technology.

摘要 可再生能源将在一定程度上缓解能源供给的紧张局势, 但实现与已有能源系统的有机融合存在诸多问题, 使得当前的能源体系面临着新一轮变革。借鉴信息领域的互联网理念、方法与技术等成果, 能够保证从能源生产、传输到消费全过程的开放对等、便捷接入、智慧用能的能源互联网成为了重要发展方向。本文从基础架构角度讨论能源、信息基础设施发展的一般规律, 阐述了能源互联网概念和基本特征; 在总结能源互联网体系结构与技术框架、综述国内外相关信息技术研究成果的基础上, 详细分析了发展能源互联网过程中信息技术所面临的关键问题和挑战。

关键词 能源互联网; 可再生能源; 分布式能源; 信息技术。

中图法分类号 TP393, TP273 DOI号: *投稿时不提供 DOI号* 分类号

0 引言

收稿日期: 年-月-日*投稿时不填写此项*; 最终修改稿收到日期: 年-月-日 *投稿时不填写此项*。

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究计划基金项目(2011CB302805), 国家自然科学基金项目(60932003, 61020106002, 61233016), 中国博士后科学基金项目(2013M540952), 清华大学自主科研项目(20121087999)和国家电网科技项目资助。

*通信作者: 孟坤 (mengkurt@tsinghua.edu.cn)

能源被认为是能够提供热、光、动力等形式的能量来源,包括化石能源、核能、风能、水能、光能等[1-3]。19世纪,电的发现和利用、内燃机等机械技术的发展直接推动了第二次工业革命,推动了人类文明近百年的快速发展,同时也导致化石能源的急速消耗和能源需求规模的不断增加,发掘更多能源形式和提高能源利用效率成为了缓解当前能源供需矛盾的有效办法。实现下述目标成为了目前被广泛认同的努力方向:(1)保证可再生能源适时适量地转化为所需的能源形式;(2)确保能源的高效利用,避免生产、传输、分发等各个阶段的损耗。在该过程中,信息处理和利用处于基础性地位,为信息技术的应用和发展提供了前所未有的机遇和挑战。

Internet 经过四十余年的发展,已成为了信息高效传输与共享的重要载体,形成了具有相当规模且管理较为有效的体系架构。在能源竞争日益激烈的背景下,Rifkin 在《第三次工业革命》一书中指出:“第三次工业革命”的标志将是互联网和可再生能源的结合而形成的新能源互联网(Energy Internet)[4],是实现能源分布式供应的一种有效模式。从优化运行角度看,保证能源生产和传输过程中所需信息流高效传输的通道是引导和控制分布式能源生产单元操作的关键;获取能源需求和供给信息,并实施合理调配策略,能够实现能源的高效流动;用户参与可提供有用信息,为引导能源流优化调度提供支撑,并支撑个性化能源消费。能源互联网旨在利用信息技术和能源技术实现以可再生能源为主的能源供给和应用体系。因此,能源互联网是“信息流、能源流、控制流”的高度融合,保证能源使用更为可靠、经济和便捷,支持智能供应和个性化利用等功能。

电灯、电热水器、电磁炉、电动汽车等发明几乎涵盖了人类生产、生活的方方面面,技术发展使得电能可以便捷地转化为光、热、动力等,电能已成为人类利用能源的主要形式。此外,电力网络已实现通过高压形式实现低功耗、远距离传输,覆盖面极为广泛的分发网络便利了人们对电能的使用。因此,在未来能源供应体系中,电力网络将处于整个能源网络的核心地位。基于此,本文重点以电能为背景叙述能源互联网研究中亟待解决的信息技术问题。

完全实现可再生能源供给,实现全球或更广泛范围的能源共享是能源互联网的目标。可以想象,

在不远的将来,仅利用太阳能,地理位置的差异能使洲际间电力生产和消费实现互补,两极的电力生产可以供给全球。因此,能源互联网的成功与否取决于如何高效利用分布式可再生能源、并提供稳定的能源供给[3,5-6]。面对可再生能源受自然条件等因素影响,难以保证电能质量的挑战(如:仅可在白天利用太阳能发电,风力的不稳定性导致生产的电能难以被直接利用等),探讨基于广域、分布式控制方法成为了能源互联网亟待研究的方向。基于电力系统,成果较为有限,并主要表现在以下方面:

(1)耦合能源流和信息流实现分布式能源接入,实现产能、用能的模式变革[7-10];(2)构建能够支撑上述模式变革的能源架构[11-12]。代表性的研究方向包括:智能电网 [13-14]、分布式能源 [15-16]、以及微网[17]等。然而,能源互联网作为能源体系新模式,如何借鉴 Internet 的经验、开拓信息和能源的有机融合模式等仍存在较多问题 [18]。

本文在分析、总结相关领域已有成果的基础上,对涉及的相关信息技术进行了梳理,重点以电力网络为例,从体系架构、相关技术和潜在的研究热点等角度全面分析了信息技术研究潜在的机遇和挑战,并探讨性地分析了多种能源形式共存的能源互联网模式和可行的管理运营模式。

1 能源互联网发展现状

全球能源供需矛盾和环境压力是促使人们探讨更广泛清洁能源形式、更便捷能源控制方式和更高效能源使用方法的直接推动力。《第三次工业革命》中提出的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开启了能源互联网相关技术研究的大门[4]。针对能源供应相对短缺、能源利用效率不高及能源需求量持续增加的现状,各研究团体根据自身需求和已有条件开展了大量原创性工作,从不同角度诠释了他们对能源互联网的理解,形成了该领域多源并进的局势。

1.1 能源互联网起源

文献[10]提出了基于虚拟储能装置实现能源供应系统的伸缩管理方法,并设想为能源互联网。正式以能源互联网为对象的研究可以追溯到 2008 年德国 BDI 提出和实施的 E-Energy 理念和能源互联网计划[19]。随后,在系统设计、管理方式等方面,研究人员开展了广泛研究,其中,美国南加州州立

大学的研究人员提出了 FREEDM 的系统架构 [11-12]; Berkeley 的研究人员从信息系统与能源网络相融合的角度提出了以信息为中心能源架构, 突出了能源管理 [14]; 此外, 文献 [18] 对比分析了 Internet 和电网成功运营的经验, 阐述了能源互联网建设过程中应借鉴的相关概念和方法。

1.2 已有能源互联网原型总结

目前, 按建设方式和管理模式, 能源互联网原型分为以集中、自上而下模式为主和以分散、合作自治模式为主两种。典型地, 美国由于其广阔的疆域与自然形成的能源布局, 强调集中式的超级大电

网在未来能源互联网中占据重要地位; 欧盟作为区域一体化组织, 更多地强调分散模式; 由于中国能源供给、传输的能源体系具备了一定的基础网络, 提供坚强骨干传输网络、提高智能化水平是主要目标。从实现目标来看, 无论选用哪种模式, 能源互联网都是将集中式、单向、生产者控制的能源体系, 转变成大量分布式、双向能源供给为主, 辅以较少集中式能源供给, 且能够满足生产者、消费者互动的能源网络。

详细地, 表 1 按照地区列举了相关成果。

Table 1 Existing energy internet prototypes

表 1 已有的能源互联网原型总结

Location	Name & references	Solution routes	Objects	Achievements
USA	FREEDM -2008 [12]	Regulation control through power electronic techniques Components connection through energy routers Realizing energy internet for power distribution	Electricity	① Plug and play interfaces ② Energy router prototype ③ Open OS
	Smart Energy [9-10] [7] - 2008 (Pudure)	Coupling tightly energy technique and information technique Concerning all stages of energy consumption	Electricity	① Virtual energy storage ② TELOS
	LoCal [14] [20] -2011 Berkeley View	Internet inspired future energy system	Electricity	① LoCal
	Spotlight & PEIR -2010 UCLA [21] [22]	Information networking supports energy scheduling and demand response	Electricity	Sensors networking architecture for gaining information
Germany	E-energy -2008 [23]	Coupling information and energy Communication channels between transmission and consumption of energy	Electricity	① Service based IOE ② Smart meters ③ Predication system
Danmark	Bornholm island energy networking -2011	Connection of smart meter and smart equipment, Strategies relies on various of information, such as weather and demand, Automation decision	Electricity Gas Water	An example
UK	Smarter grid plan-2010 [24] [25]	Double direction dispatch of energy Intelligent interaction between production and consumption	Electricity	Energy is storage with Electricity vehicles
European Union	Integrated European energy network [26] -2011	A general networking of Europe including sharing and optimizing all kinds of energy	All kinds	Integrated energy networking architecture Energy Hub

China	Smart energy networking [27]	A networked energy service platform to assign all kinds of energy efficiently	All kinds	Energy service system
	-2009	Integrated information technology to enhance efficiency of sharing information		
	Smart grid [13] [28]	Robust smart grid architecture with ultra-high voltage transmission networking	Electricity	Ultra-high voltage power transmission networking.
	-2007	Smart scheduling center Smart transformation stations Integrated information system Distributed power generation		Series of power control devices and systems.
	Energy internet	Power grid as backbone WAN Microgrid as LAN Integrated information-energy switch devices connect all kinds of components	Electricity	Technique reports Energy router prototypes

2 能源互联网对信息技术的要求

2.1 能源互联网需求

2.1.1 能源互联网的三种理解

直观地，能源互联网（Energy Internet, EI; Internet of Energy, IOE）在于构造一种能源体系使得能源能像 Internet 中的信息一样，任何合法主体都能够自由的接入和分享。从控制角度看，在于通过信息和能源融合，实现信息主导、精准控制的能源体系。根据融合方式的不同，目前存在三种观点：

（1）侧重信息互联网：借助互联网收集信息，分析决策后指导能源网络的运行调度，信息网络可以认为是能源网络的支持决策网络，其本质与当前的智能电网类似，以欧洲的 e-energy 为典型代表；（2）侧重能源网络结构：借鉴互联网开放对等的理念和体系架构，形成包括骨干网（大电网）、局域网（微网）及其连接网络的新型能源网，采用自治或中心控制的方法实现能源的供给平衡，其实质为一种分布式的能源网络，以美国的 FREEDM 为典型代表；

（3）革新性能源互联网：互联网技术和能源网络的深度融合，结构上难以区分能源网络和信息网络；在运行模式上采用区域自治和骨干管控相结合的方式，能源和信息的双向通信，信息流支撑能源调度，能源流引导用户决策，最大限度地利用可再生能源，以日本的数字电网、电力路由器为代表。

2.1.2 互联网与能源互联网

能源互联网旨在解决当前能源网络运营中存在的问题，如调度精确度较低、新能源接入兼容性

低、能源传输损耗大等问题，因此，信息的高效利用、新能源的合理调度是其实施的关键，能源流和信息流的深度融合是其实施的必然趋势。综合其实现目标和实施方法，能源互联网定义如下：

能源互联网：在现有能源供给系统（能源生产、能源传输、能源存储等）的基础上，通过新能源技术与互联网技术的深度融合，实现将大量分布式能量采集装置和分布式能量储存装置互联起来，通过智能化的管理，实现能量和信息双向流动的能源对等交换和共享网络。

能源互联网应具有以下特征：（1）分布式：适应可再生能源的分散特性，能够就地收集、存储和使用能源的网络节点是能源互联网的基本组成部分之一。（2）联接互动：保证分布式的微型能源网络互联互通，合理的能源交换平衡微网供需。（3）开放性：提供对等、扁平和双向流动的能源共享网络，发电装置、储能装置和负载能够即插即用。（4）安全性：任意恶意行为都应该被及时的发现和阻止，严格的接入控制规则，避免用户信息的泄露和篡改。（5）健壮性：具有自愈和一定的抗毁能力，在环境、操作失误、恶意攻击等情况下仍能保持系统正常运行，并具有及时发现和修复错误的能力。（6）基础设施继承性：充分利用已有的传统能源网络，在传统基础网络设施逐步改造的基础上，实现微型能源网络融入，渐进性地形成能源互联网。

在建设目标、实现模型、协议支持、服务对象、相关要求及相互关系方面，传统的（信息）互联网和能源互联网存在诸多的联系，Internet 为能源互联网构建提供了借鉴[18]。为明确能源互联网建设中

对信息技术的要求，对比 Internet，表 2 讨论了可能牵涉的信息技术。

Table 2-1 Comparison between Internet and energy internet

表 2 信息互联网与能源互联网对比

	<i>Internet</i>	<i>Energy Internet</i>
Objective	Infrastructure for information communication, Information transmission and sharing, Convenient interfaces for users, QoS for various types of Internet applications	Information driven energy utilization infrastructure---information utilization, Distributed renewable energy is used easily---intelligent control, Customization for using energy---information processing Constructing information and energy coupled system---efficiency
Infrastructure Model	OSI model (or TCP/IP model) [29]: Separating application and information transmission: ISPs provide basic Internet access, information forwarding and equipment leasing. Network application service providers can provide a variety of Internet applications. Finite resource of IP becomes the bottleneck, CCN, SDN and adaptive future Internet model appear [30]	None related standard model, several academic exploration (1) “1+1” model: information infrastructure supports energy control and scheduling of energy systems (2) “1×1” model: inspired by Internet, switch devices that be able to optimally couple information and energy flow are designed as fundamental connections. (3) hybrid model: different scale and environment apply different solution
Protocol	multiple protocols for every layer, appropriate combination serves different application:	More research is needed for communication protocol, energy control protocol and mutual integration protocols. Building the protocol family which both inherits the existing mature technology and meet the goal of energy Internet
Customers	ISP, Service providers, Internet surf customers, customers that rich internet contents	Supply side: Energy production unit, energy transmission unit, smart control and regulation, information manager Consumption side: energy consumption unit, personalize energy consumption customers, information users
Service	Internet access, service access, information interaction and security	Energy demand response, personalized energy consumption, security and information processing.
QoS	Delay, jitter, packet loss rate, availability, confidentiality, reliability, feasibility, etc.	Energy utilization efficiency, energy fees, network reliability, security, survivability, etc. information service related quality
Relationship	Internet provides a reference example for energy Internet. Energy Internet needs to study issues related to the distributed energy management; Existing energy networking has covered almost all area. The future energy Internet can become important supplement for existing information Internet; energy management functions of energy Internet may be only one hand of the future Internet	

2.1.3 智能电网与能源互联网

智能电网是基于物理电网，以通信信息平台为支撑，具有信息化、自动化、互动的特征，涉及电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度环

节，在于实现“电力流、信息流、业务流”高度一体化融合的现代电网，是对传统电网的升级与改造，强调优化的电能配送[13]。能源互联网是新型电子控制技术、信息技术、分布式能源生产、可再生能

源利用技术和储能技术的有机结合，强调可再生能源的利用和能源单元的自由接入。智能电网可以认为是以电力为能源形式的能源互联网的发展雏形，在目标规划、实现模式和优化策略等方面为能源互联网建设提供了良好的借鉴。具体地，它们之间具有 5 个明显的共同特点：（1）自愈性：指无需或仅需少量人为干预，存在危险或潜在危险隔离的器件，针对出现的故障，能快速自愈使其恢复正常运行。（2）安全性：物理系统和信息系统遭到外部攻击时，能有效抵御由此造成的伤害以及对其他邻域形成的影响。（3）高效性：采用 IT、监控技术等来优化设备和资源的使用效益，合理规划，整体上实现网络运行和扩容的优化。（4）经济性：与消费市场实现无缝衔接，利用市场设计提高电力系统的规划、运行和可靠性管理水平。（5）集成性：监视、控制、维护、能量管理（EMS）、配送管理、市场运营等模块和其他信息系统之间的有机融合，完善业务运行。

相对地，智能电网、能源互联网在基础设施建设、技术方案设计、服务对象规划等方面也具有各自特点，通过与传统电网加以比较（见表 3），不

难发现能源互联网在以下方面较智能电网有更高的要求，对信息技术提出了更多的挑战：（1）能源生产来源：能源互联网强调分布式可再生能源的应用和能源的个性化利用；智能电网仅强调电力资源的高效利用，侧重基于能源消费的电力优化供应；（2）主体接入方式：能源互联网强调生产、储能、消费装置的“即插即用”；智能电网重点在于对传统电网的继承与改造，多采用用户被动接入、集中控制的方式。（3）优化和控制方式：能源互联网支持多种控制方式，运行拓扑不再局限于特定结构，决策单元摆脱中心控制节点限制，自主能源调配；智能电网强调骨干电网的构建和优化，较少关注用户自主贡献。（4）优化配置范围：能源互联网可以实现多种能源的优化调配和针对性管理，综合调配可获得联合收益；智能电网仅支持电力能源，对能源互联网建设有借鉴作用。（5）催生的业务类型：能源互联网支持分布式能源供应，广布的自能源或微电站成为能源网络主体，势必催生新的能源供给商业模式；智能电网目前还偏重于分布式能源生产主体的被动接入，运营模式相对单一。

Table 3 Comparison of traditional power grid, smart grid and energy internet

表 2-2 传统电网-智能电网-能源互联网比较

	Traditional power grid	Smart grid	Energy internet
Energy type	Electricity	Electricity	All energy including power, heat, light and so on
Objective	Plan and build power infrastructure of production, scheduling, distribution and transmission to meet end-user consumption	Using technology of sensor, communication, analysis decision and automatic control to enhance efficiency of traditional power grid such that the grid is observable, controllable, adaptive and self-healing.	Building an intelligent energy networking that integrates energy production, storage, metering, communication, analysis decision and automatic control. It aims to realize an energy ecotope such that energy supply meets demand access and customized consumption.
Characteristic	Rigid system and centric hierarchical control mechanism to meet the users' demand. There exists several information islands and the information share degree is low.	Robust and reliable power grid architecture and efficient information exchange platform to support energy consumption; optimized control. Building a flexible architecture including function modules and system configuration. With the features of efficiency, robust, self-healing, compatible, economy and optimization.	“plug and play” for energy whole system; “prosumers” become the main type of user; flexible networking structure may be adaptive with the time, events and other factors. Users can customize their energy strategy. The features of robust, compatible, integration and optimization will be more evident.

Techniques	Focus on electricity technology, information technology appears to enhance efficiency of power supply.	Integrating power technology, intelligent control technology and information technology to provide an efficient power grid. The control cover the cycle of support power generation, transmission, transformation, distribution, consumption, scheduling and other aspects.	For various types of energy, related technologies from production, storage transmission, distribution to consumption are imperative to be studied deeply. Information and intelligent control may merge. An open, adaptive, self-learning and self-evolving system is to support the rapid expansion of the networking.
Construction	From LAN to WAN, gradually expand the coverage and improve the power protection capabilities. Until to the end of 2013, China realizes power supply for all residential areas.	Upgrade and replace existing equipment, augment more intelligent devices. Research on architecture and mechanisms provides fundament, using existing technique and specification to construct smart grid steadily. SGCC has planned to build the robust smart grid through building the Ultra-high voltage transmission network.	Goal-oriented, none planned road map. "Evolution" emphasizes that gradually achieve the goal through the developing the needed technology based on the existing energy network. Smart grid 2.0 can be considered as the electrical energy Internet. "Revolution" stresses a new energy supply-consumption patterns, on-demand design. Open and "horizontal" feature will accelerate the integration of various technologies and innovation.
Operation	Power supply	Power supply is main, smart life management (a platform providing information interaction between supply and demand of water, heat, gas and so on).	A harmonious ecological environment of energy supply, the pay of using energy is no longer the main profit model. Various services will emerge in order to improve the quality of life of users. Supply specific application will become its main profit model, such as smart transportation, smart home services and so on.

总之，能源互联网采用互联网理念、方法和技术，旨在构建能源-信息融合的基础设施体系，实现能源、信息网络的革新，更好地满足上层服务的需求。以具有优越传输能力的电力资源为对象，智能电网的成果提供了信息化和智能化的基础，为能源互联网提供能源和信息技术融合的平台，能源互联网前瞻探究有利于明确智能电网的未来发展方向。智能电网和能源互联网在较长的时间内将相辅相成，坚强的骨干电网、智能变电站、分布式能源、微网等研究成果将极大地支撑了能源互联网发展。

2.2 能源网络主体职能演进的需求

以电网为例，文献[10]指出可再生分布能源的并网将支撑电力更有效地流动，“虚拟电站（Virtual Power Plants）”将大量出现，形成既有生产能力又是消费主体的产销主体（Prosumers），如图 1 所示，

现有生产或消费单一角色模式将被打破。

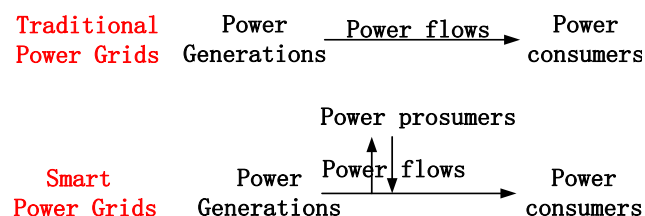


Figure 1 Evolution of customers' role

图 1 智能电网中的主体角色进化

对于能源互联网，BDI Initiative 报告指出[19]: 能源网络中可再生能源生产供应比重将逐步提高，最终实现以可再生能源生产为主、信息驱动、和谐的能源供销生态环境。在该过程中，能源生产方式、传输模式及能源消费形式势必发生转变。图 2 总结了可能的运营模式，生产、传输和消费等智能化功

能都将依赖于信息技术。

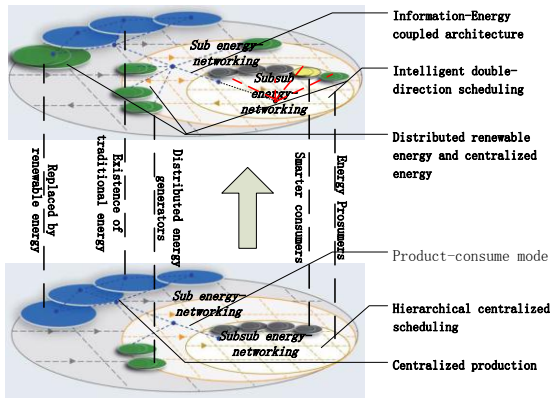


Figure 2 Evolution of energy internet

图 2 能源生产、传输和消费模式的转变

2.2.1 支撑以可再生能源主导的生产模式转变

大规模可再生能源生产基地的建设将提供足以取代传统能源的能源供应能力，大量分布式微型新能源生产进一步扩展了能源供应多样化，特别地，以家庭为单位能源供应模式是未来能源互联网中重要的能量来源之一。但是，由于可再生能源受到天气、地理位置、技术等条件的限制，其供应波动幅度较大，难以满足目前大规模供电的需求，利用传统能源生产电力的模式还将存在较长的时间，传统能源生产和可再生能源生产相辅相成的局面将是能源互联网过渡时期的能源供应格局。协调多种能源形式共存，支持复杂多变可再生能源的接入给信息技术提出了挑战。

2.2.2 加速信息驱动的能源双向传输模式发展

在现有能源网络中，生产和消费被严格划分，能源传输企业（如国家电网）调节供需关系，保持典型的生产-并网-消费模式，供需平衡依赖传输控制效率，存在传输能耗严重和生产安排过剩的问题。分布式微网技术和智能用户使得生产者 and 消费者的角色越来越难以区分，直接催生能源双向传输的需求。信息是引导能源合理流动的关键，保证电力的近距离利用和提高能源利用率是面临的问题。平衡信息分享范围和信息技术效率、整合强大的信息搜集和计算能力是主要突破点。

2.2.3 支持能源消费智能化程度的提高

能源互联网要求能源利用效率最优化，一方面，用户应可以通过分享信息，建立最小范围的能源供需子网，降低能源使用成本；另一方面，用户应根据能源价格和自身能源需求，建立恰当的供需模型，安排其消费、并网和存储策略，实现利益最大化。能源互联的发展将革命性地改变能源消费

模式，消费智能化程度势必大幅度提升，对应的信息传输、优化调度和智能控制技术面临挑战。

2.3 能源互联网功能建设的需求

在 2008 年，Brown[7]就列举了智能电网建设必须关注的功能模块，类似地，能源互联网也应涉及生产、储存、传输、监控、调度等功能模块。实现能源生产-消费均衡、传输损耗降低、信息高效共享、满足用户需求是能源互联网的建设目标。

2.3.1 能源生产智能化

微网技术探索了分布式可再生能源支撑局部范围能源供需平衡的可能性。骨干网络与微网有效配合、合理规划，由分布式可再生能源实现局部范围的能源供应是降低骨干网络传输压力和生产智能化的途径。信息分享能提高预测准确度，从而提高生产规模设计、生产成本控制及消费需求满足水平。为实现生产和传输的精准安排，对全网精确地负荷辨识是关键，亟需突破现有信息采集、计算、传输机制。

2.3.2 能源存储智能化

储能装置既是负荷也是能源供给，是能源互联网必不可少的部分[31-33]。文献[33]指出了多种提高可再生能源利效率的能源存储方式，文献[4]强调氢储能是未来重要储能方式。数据中心、电动汽车等拥有的储能设备都可能成为储能单元，能源互联网中优化和管理的范围将大幅度增加。构造虚拟电厂、实现能源的最小区域消纳等给信息处理和控制在提出了挑战。文献[34]探讨了一种依赖信息技术的混杂电力能源存储装置(Electrical energy storage, EES)架构。

2.3.3 能源传输智能化

能源高效传输需要及时消纳具有间歇、突发等特点的可再生能源；控制能源流动、调节能源类型以满足消费需求需要更有效的计算设备。电子、通信等技术是上述目标实现的支撑。电子电路技术旨在实现对电压/电流的智能控制，保证用户所需的能源类型；通信技术能够把需求、线路状况等信息及时发送到决策计算中心，为优化电力调度和配电策略设计提供支撑。电力路由器[11]为电力能源互联网示范建设提供了思路，涉及的信息技术包括路由器的部署、控制、安全保护等。此外，能源互联网单元间实现能源供给协同，实时、高效的监控和调配等都需要信息技术支撑。

2.3.4 能源消费智能化

能源消费智能化要求所有终端都应包含智能

通信模块,并具备对信息整合分析、合理配置能源、实现市场需求迅速响应、公正准确计量、数据实时采集、多途径收缴费用等能力,与信息技术密切相关。在当前实践中,文献[35-36]针对智能家居应用,给出了一种基于电池阵列的智能用电装置,较好地实现了能源流、信息流和控制流的统一,是在微网范围内实现智能消费的有益探讨。

2.3.5 能源调度智能化

信息技术将被广泛应用于电能信息采集、电能质量监测分析、电网能量管理、及用户侧能量管理等。功能至少包括(1)电源协调控制:支撑多个分布式、异构能源的并网,依赖能源内在特性和时间特征等因素设计策略保证系统平稳;(2)电能质量控制:在电压波形、频率、功率因数等多个角度加强综合控制,适应如太阳能、风能等随机性能源的频繁启停操作和功率输出变化;(3)高级能量管理:根据能源需求、市场信息和运行约束等实时决策,控制能源生产与能源交换,对设备和负荷进行灵活调度确保系统的最优化运行。

3 能源互联网的支撑信息技术

3.1 能源互联网的支撑技术框架

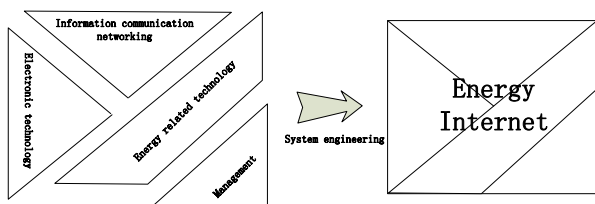


Figure 3 Technology architecture of Energy internet

图 3 能源互联网技术支持框架

为了满足能源互联网各方面的要求,支撑技术可以分为五个组成部分(见图3):系统规划技术、电子控制技术、信息通信网络技术、能源技术、管理调度技术。每类技术衍生分支都对应相应的技术创新要求,具体内容如下:

(1)系统规划技术:能源互联网是由多个复杂系统组成的复杂体系[37-38](System of systems),需要用系统的思想进行顶层谋划。主要包括体系架构设计、方法学与接口设计、发展规划设计、相关协议标准筛选等。

(2)能源技术:涉及能源生产、传输、调配、储存、使用等环节,包括分布式可再生能源利用、清洁高效的传统能源生产、新兴能源探索,降低传

输损耗、延长传输距离,稳定能源供应,实现能源高效合理流动,以及用能安全保障、个性化支撑等。

(3)信息通信技术:信息通信是系统的中枢神经,负责用能信息进行收集、传输和处理,是能源合理调配的前提和保障。包括智能计量、信息平台、人工智能、分布计算、高性能计算以及通信网络等。

(4)管理调度技术:对网络进行系统管理、资源优化与综合调度,信息收集、分析、反馈与预判能力是优化管理调度的前提和支撑。功能包括能源利用管理、需求响应管理、费用效用价格管理以及排放管理等,涉及方法包括优化方法、机器学习、博弈论、决策理论等。

(5)电子控制技术:能源传输、调配、控制元器件和程序的设计与开发,直接决定策略的实施效果。生产过程中的工控系统、传输过程中的安全保障设备、消费阶段的能源计量和信息采集等都属于该类技术的支撑内容。

一般地,可以把涉及的信息技术分为系统优化技术、信息传输和共享技术、能源调配和控制技术、能源-信息融合技术。

3.2 组织与优化——网络结构设计

在能源互联网中,实现能源供给和消费的均衡是能源流性质的要求,建立各组成单元间信息交互和能源传输的高效通道成为了必须解决的问题。不同的网络结构对应各异的管理规范和组网模式,在可扩展性、健壮性和安全性等方面都拥有各自的特性。根据能源类型和运行需求选取相应的网络结构将是能源互联网结构的发展趋势。

以电力系统为例,灵活、健壮的拓扑结构一直是电力网络系统追求的目标,也是未来智能电网的支撑技术之一[13]。各级电网的优化配置和协同部署成为了实现电力互联网优化运行的硬件基础,目前采用的典型网络结构包括总线结构、层次化结构和自组织结构。在未来能源互联网中,三种结构根据时间、事件等因素持续演化、合理组合,将为网络优化运行提供坚实的物理基础。

3.2.1 总线结构

文献[39]指出,智能电网是微网的智能化融合,总线结构是可以选择的典型网络架构之一,如图4所示,骨干传输通道(包括能源传输高速公路和信息传输高速公路)是基础,接入单元(包括微网、消费终端、电力生产企业等)通过即插即用的方式接入网络。接入单元把其负荷或能量状况通过信息

通道实现共享，为合理调整控制策略提供信息支撑。

该结构在网络可扩展性、资产继承性等方面具有无可比拟的优势：一方面，当前具有相当规模的骨干电力网（尤其是高压、超高压或特高压线路）为未来能源互联网骨干线路提供了可行选择，耦合能源和通信的线路为构建能源互联网提供了极大的便利；另一方面，分区域建设的配、变电设施天然地适应了该结构的要求，只需要开发智能的边界交换装置即可方便地实现能源互联网组建。

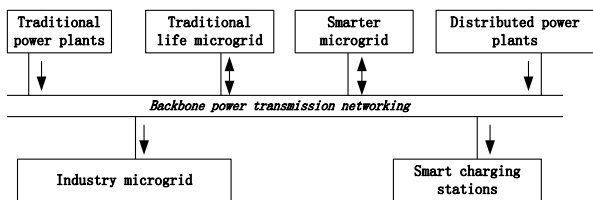


Figure 4 The bus structure of energy internet

图 4 骨干能源供应的总线结构

一般地，为适应能源定向流动，交换装置可以选择或配置为双向或单向，方便网络接入、能源个性化供给和消费等。但是，随着接入单元数量的增加，处理交互信息流给总线结构带来巨大挑战，设计与其它结构协同的信息处理架构和方法是重要研究方向。

3.2.2 层次化结构

尽量实现能源的本地化供应、降低能源的传输损耗是能源互联网建设的目标之一。互联网的相关成果表明：层次化（树形）网络管理结构是一种较为有效的方法[40]。

文献[41][40]针对微网能源管理提出了树形结构，如图 5，簇控制器是核心部件，控制器通过智能电表等信息采集设备获知底层用电单元的能源需求和生产信息，经过简单的计算完成电力能源的由底至上的调度。只有当底层用能单元无法实现供给平衡时，控制器才向上层控制器发送能源请求信息，并与骨干总线结构配合实现能源供给平衡。此外，树形结构具有较好地错误隔离特性，当发生故障时，能较好地避免故障的蔓延，本质上具有提高网络可生存性的能力。

更进一步，为支撑分布式可再生能源兼容，文献[8]给出了覆盖网结构，可以认为是对树形结构的推广。结构强调微网可以受多个控制器控制，与树形结构相比，虽然控制和调度更为困难，但能够更加灵活地实现能源的供给平衡。目前，层次化结构已被较好地应用于网络主体位置和需求变化较小

的微网，但是，高效控制和管理策略仍是推广该结构的瓶颈。

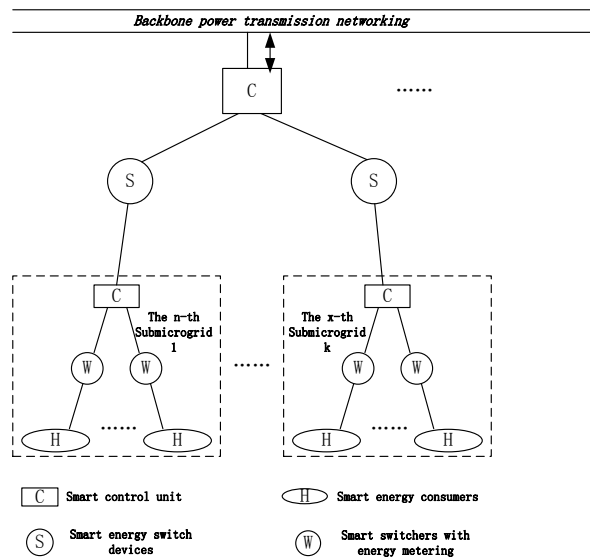


Figure 5 The tree structure of energy internet

图 5 微网内的层次化结构

3.2.3 自组织结构

自组织网络架构摆脱了固定网络结构的束缚，旨在通过能源主体间的协同协议实现网络结构的快速演化，提供一种利于发挥能源体自主能动性、应用潜力巨大的网络组织结构。

简单地，自组织网络架构是能源主体根据需求或事件，借助已有的物理设施主动变换于能源互联网构建的架构，如图 6 所示。该类网络没有固定的网络结构，随着能源需求的变化可以自主地组建合适的网络结构，如电动汽车从 A 区域驶入 B 区域后，可以自主地选择加入的电力子网络，实现能源的最优利用，从时间角度看，该种能源网络结构呈现较大的动态变化性。

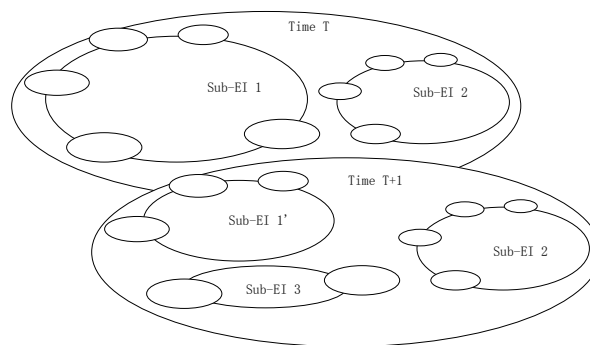


Figure 6 The ad hoc structure of energy internet

图 6 自组织能源协同的子互联网结构

类似于计算机网络中的 P2P 网络和无线通信中的自组织网络，自组织结构中的能源主体行为受其

自身价值判断的影响，越多的能源体参与越能够体现该类网络结构的效率，设计合适的激励合作机制是推广该类网络的关键。为实现能源消费的最小化和能源需求的平稳化，文献[42]基于能源消费调度器设计给出了一种激励合作机制，探索了该结构的应用前景。

3.3 信息传输与共享——通信网络技术

保证控制策略的及时性、有效性和可靠性，收集和分享必要信息是不可或缺的工作，通信网络是重要的技术支撑。在边缘部署通信交换设备、定义接口涵盖多元化底层技术、实现易扩展、便维护、多业务支持的信息互联网架构给能源互联网的信息支撑框架设计提供了借鉴。

以电力能源为例，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，革命性的更换会带来巨大的资金投入和实现时延。基础设施向后兼容、服务逐步更新的实施策略是可行选择。回顾互联网的发展，互联网最初被部署在电话网络之上，通过采用富有弹性的组织原则，在功能优先的基础上，不断完善设施，最终发展成今天互联网的规模。类似地，能源互联网通信网络架构需要充分利用现有的基础实施（如电网的通信网络等），实现特有功能，并力求在效率和耐用性上实现突破。在功能上，能源互联网强调智能通信协议与电能传输相互融合，有效分发能源价格信号、可用电量分布信号、控制决策指令等，并支持分布式控制，可行的通信架构为在边缘配置标准化智能“接口”，通过汇总负荷和电力供应，利用储能和调度管理使供需趋于平稳，并支持独立供电、分布式发电和电力交易等业务，力争实现能源实时调度生产、资源存储规划等，把当前满足高峰/最坏情况的生产战略转变为关注平均需求的生产规划。在实现方法上，数据分享功能依赖于层次架构、聚合、分层、应用编程接口（API）协议等，目标在于调节储能装置，破解发电和用电负荷间强平衡的限制，与互联网智能边缘和哑管道类似，能源互联网中的通信网络应具备普遍用电情况感知功能，为“随供电量调整负荷”提供信息支持。

3.4 能源调配和控制——电子控制技术

电子控制技术是实现能源互联、能源调控和网络分布式控制的支撑技术，能源质量调节、能源远程调配、网络信息监控与策略部署等无不涉及电子控制技术，它是承接能源流控制与信息流融合的桥

梁。在能源互联网的架构中，电子控制技术亟需支持分布式可再生能源的接入和精细粒度的控制策略实施。

以电力能源为例，为接纳分布式可再生能源到电能的转化和并网，电力电子技术被广泛使用。针对分布式可再生能源间歇性、微量性、分散性的特点，为保证它们所生产电能能够成功并网，专门的电力电子技术设备已被广泛应用在下列典型的联接设备中：并网逆变器、光伏电池、风机、燃料电池、储能元件等。电力电子技术的采用使得该类变换器具有响应速度快、惯性小、过流能力弱等特性，但为更好地保证能源质量，还需集成一些控制功能，如有功-频率下垂控制和电压-无功下垂控制等。能源流精细化管控也需要电子控制技术支撑，如对能源流的精细调节和全局控制指令的快速响应等。如当前智能电力变压器通过由电力电子变换技术和电能变换技术相结合实现了电流的调节，可实现所有 FACTS/DFACTS 功能，具备了可控性强，接口灵活多样、体积小、便于电源接入等特点。嵌入式控制模块可实现控制指令的快速响应，开发基于通信网络的自适应嵌入式控制设备对能源流控制具有重要意义。





3.5 模块融合与协同——网络标准和协议

集成通信协议是实现信息能源基础设施一体化的基础，功能要求能够从物理设施中获取数据，并完成能源互联网的高级应用，如：实时价格控制、能源传输双向控制等。目前，已存在多种通信协议，但通常仅能完成能源互联网体系的某一个功能侧面，尚缺乏一个集成的通信基础架构和协议组。

在能源互联网中，能源高效传输、能源精准度量、网络优化控制、网络运维管理等功能都需要相关的协议支撑，此外，为实现用户的用能定制化，支持交互的实时通信协议成为保证能源生产和负荷平衡的关键。因而，能源互联网的通信基础设施和协议应满足以下基本功能：实现双向通信，具备面向能源互联网高级应用的互操作性，实现端到端的可靠安全通信，能抵御潜在的网络攻击。表4总结了能源互联网技术体系中所应涉及的各项标准和协议[19, 43]。

Table 4 Existing standards and protocols for constructing energy internet

表 4 能源互联网构建可能使用的标准和协议

	 Distributed renewable energy	 Power transmission	 Energy measurement	 End use
Application layer	IEC TS 62351 (data and communication security)		IEC 62443 (safety)	
	IEC 61968 (integration of applications into electricity supply facilities)			
	IEC 61400-25 (wind power plants)	IEC 61970 (API energy management systems)		ISO/IEC 14543-3-1 (KNX)
	IEC 61850-7-420 (decentralized energy generation)		IEC TR 62325 (ebXML)	
Transport layer	IEC 61850 (station automation)		IEC 62055 (electric meter [prepaid])	
	3GPP		IEC 62056 (DLMS/COSEM)	EN 13757-2 (M-BUS & KNX)
			EN 13757 (M-BUS)	ZigBee + IEEE (2.4 GHz) 802.15.4
Communication layer	TCP/IP		IEC 61334 (PLC)	
	IEC 60255 (protection installations)	G3-PLC	CDMA	IEEE P1901
			WiMax	GPRS/GSM
			Ethernet	DSL
			ISO/IEC 14543-3 Application and (KNX)	ISO/IEC 14543-3-5 to 8 (KNX)
			BacNet/IP	U-SNAP
			LAN	W-LAN

4 能源互联网中信息技术的热点问题

能源、信息、电子控制等领域的技术为能源互联网的建设与发展提供了必要条件，但是，实现规划目标还存在较多问题亟待突破。剩余部分将对能源利用、能源传输、信息获取与处理等方面涉及的潜在信息技术研究热点问题进行分析。

4.1 多类型能源的生产调度

分布式能源供应体系是支持包括可再生能源在内的多类能源接入的一种可行方案，已形成了多种分布式能源资源范式 (Distributed energy resource paradigm, DERP) [16, 44-46]。微网 (Microgrid) 是分布式资源 (能源生产单元、能源存储单元或两者兼有的混杂单元) 和负荷组成的集群，并按照分布式系统的模式运行，已被广泛认可，可以灵活地选用微网互联式、孤岛式和混杂模式[17]。实现可再生能源高效利用和系统供需平衡是微网追求的目标，对应的能源管理系统旨在实现负载信息的高效分享、微网模式转变的快速响应、能源接入与存储的优化配置及维护自主运行、微网和主网的同步与互联等。面对繁杂的研究内容，我们分别从生产装置部署、存储装备设置及调度策略选择三个方面阐述多类型能源高效利用亟待突破的热点研究问题。

4.1.1 分布式能源生产装置的部署

能源生产特性、接入网络结构和能源特征、优化部署模型等都是该领域的研究内容，主要机遇和挑战表现在特征模型和优化指标体系方面。以电力能源为例，该部分探讨相关的研究热点问题。

发电方式对应相应的电力供应特征，一般地，简单地用电力容量、稳定性、电磁夹角等来描述，在明确上述参数的情况下，可以确定任何能源生产装置的供应情况，方便构建供应模型，为后续的决策提供便利。然而，能源生产方式受到的影响因素各异 (如光伏发电装置和风电装置等的影响因素不尽相同)，时间特性成为刻画能源生产不可或缺的因素，针对各种能源生产方式建立精确模型面临巨大挑战。

网络结构是能源生产装置优化部署需考虑的另一个因素，对网络结构做适当简化和划分是常采用的技巧，已有的假设包括放射状网络和网格化网络[47-52]等。一般地，给定网络结构，可以根据电力学定律得到各种负载下所需要电压水平，进而确定生产装置接入点的接入电压，结合生产装置的生产特性和已有能源供应状况可以分析新增装置对整个系统的影响，为有效地指导能源生产装置建设提供支持。然而，网络规模和能源供给快速时变性使得构建准确且效率兼顾的模型面临巨大挑战。

指标体系是明确规划目标的基础，相关研究还相对匮乏，选择依据还有待探讨，归纳、总结、分类分析各种指标的工作大量存在。针对电力能源，已考虑的指标主要包括电压波动、能源损耗及能源需求变化波动幅度等[48]，相对零散，缺乏系统比较，存在研究空白。下列方向需进一步研究：（1）归纳已有指标的形式化定义，扩充包括瞬时指标值、稳态指标值、区间指标值在内的指标度量体系；（2）总结实际需求，完善需要考虑指标的形式化描述，探讨能综合反映多指标的宏观指标的构造，简化多目标优化模型的构造与求解；（3）探讨建立指标体系的方法，建立满足正交性条件的原子指标集合，并探讨基于原子指标定义构造可组合的复合指标的方法，方便优化目标的选择。

此外，假设上述成果为已知条件的情况下，选择合适的优化模型确定最优部署方案也是研究重点。组合优化模型、随机模型或动态规划模型等计算模型选择，优化部署方案选择方法、兼顾组成部件随机特性和时间特性的决策方法等存在诸多亟待解决的问题。

4.1.2 能源的分布式优化存储

能源存储载体的多样化（如计算机网络中数据中心的能源备份装置[53]、电动汽车[54-55]、智能家庭的能源存储单元等[35-36, 56]等），拓宽了能源互联网优化设置手段，存储策略不仅考虑存储设备容量大小、部署位置等设置，还需考虑存储设备动态变化对存储策略的制约作用，优化存储模型、计算方法等方面存在诸多研究热点和挑战。以电力能源为例，我们从能源装置部署、能源装置优化等方面论述。

能源存储装置部署要重点解决在何地部署多大的存储设备的问题。需要考虑的因素包括其供应范围内需求负荷需求情况、需求时间特性、可再生能源生产装置的运行状况等。一般地，针对单一能源供应情景，规划建设何种规模的能源存储装置是目标，建立和求解相应优化模型是典型的解决思路，在于实现现有装置利用率的最大化，关注的指标应包括成本因素、能源供应的服务质量、信息交互的依赖程度、计算能力的需求程度等。针对多类型能源方式供应情景，由于要兼顾任意能源方式供应最优性，对应模型复杂度远高于单一能源情形，分而求解是其直观思路，探讨简化求解方法将是解决该问题需要考虑的重要方面。各因素的综合模型、复杂模型的简化求解是其面临重大挑战。

移动存储装置的优化利用在于实现能源的高效转移，减少能源传输过程中发生的能源损耗，需要考虑装置的动态性和存储容量。直观地，移动能源存储装置应根据存储和供给情况选择相应充、放程序，但是，如何判断自身的能源存储和网络供给状况、哪些必要信息指导设计调度策略、如何把信息传输到分布式存储装置、及如何计算最优调度策略都是研究重点，同时也面临巨大挑战。

考虑时间因素的存储装置优化设置在于建立统筹的充、放策略来实现需求曲线的相对平稳，需关注所有存储装置的充、放调度策略。一般地可分为观测状态下优化策略设计和统筹的优化策略设计。对于前者，观测状态空间的选取及状态间转移模型直接影响策略的计算结果，实现模型的准确性与计算高效性是需要解决的问题；对于后者，如何把时间因素巧妙地融合于优化模型之中是关键，常采用的方法是把整个时间轴近似地看作符合周期性特征，把一个周期划分为时隙，每个时隙的动作定义为策略，实现无限时间决策转化为有限状态优化。但是，观测状态和时间粒度影响计算结果，指数级增长的计算空间给高效计算带来巨大挑战。

4.1.3 多能源形式的综合调度

满足能源需求，实现各种能源的供需平衡是能源互联网调度的基本目标；网络状态信息、需求信息及环境影响是制定调度策略的基本依据；控制装置的设置、控制方法的制定和控制信息分发是实现高效调度的手段。能源调度架构、能源调度模型和高效计算方法构成了该方面的研究重点。

能源调度架构可以采用中心控制、分布式控制和混杂式。中心控制方式采用统一收集、处理和发布方式，具有信息优势，可以统筹调配各种资源，难点在于保证有用信息及时、准确地处理，信息收集和处理能力是制约因素，信息设备部署、信息传输、存储和处理方法是研究重点。分布式控制方式采用分而治之的方法完成调度管理，理论上具有灵活性和及时性的优势，但信息不对称等因素导致策略不能保证适应整体网络，保证各决策单元间相互协同的机制是研究重点。混杂式是一种更为灵活的控制方法，结合中心式和分布式的优势提高调度效率，确定两者有机结合方式、设计层次化的信息通信架构是亟待解决问题。

基于调度目标的优化策略设计重点关注信息收集模型和策略计算模型。保证有用信息及时传输和冗余信息及时摒弃的大数据网络架构设计、信息

挖掘技术等是信息收集模型研究重点，难点在于设计信息融合机制，保证负荷状况及网络运行状况及时分享。优化决策依赖多种约束条件，网络节点和可控制设备数量增加将导致模型规模势迅速膨胀，高效计算方法是制定优化策略的关键，模型化简方法、计算机辅助求解方法、近似计算方法及新的计算架构等是研究重点。调度目标影响能源使用效果，调度指标细化应满足网络的自愈性要求、调度策略的时效性要求、调度策略的安全性要求等，使得基于目标得到的策略应能够应对特定模式失效情况的发生、避免过时策略对网络造成冲击、避免信息被篡改或阻挡的能力。

4.2 开放智能的能源传输控制

可靠传输是能源互联网推广和应用的基本要求，便捷接入控制、传输过程中对失效预警与容忍能力、及高效应急响应能力是建设目标。研究的重点主要包括以下方面：（1）可靠传输网络和传输机制设计，从传输过程角度保证能源传输的可靠性；（2）信息-能源紧耦合的网络交换设备，提高网络控制的智能化水平，从接入控制和异常处理方面提高传输可靠性。

4.2.1 可靠传输网络和传输机制设计

能源传输线路将分布于各种自然环境中，所有线路和传输机制设计都涉及到处理和响应设备失效。网络规模的扩大和用户对智能化要求的提高，可靠的传输网络规划和传输机制设计的研究重点集中在网络可靠性分析模型、安全传输机制设计和网络架构规划等方面。

可靠性分析模型的研究在于给出能够反映网络可靠性状况的指标和形式化定义，探讨能够刻画能源互联网的模型工具、研究高效的模型计算方法等。一般地，能源传输网络可以认为是基于物理载体的传输机制的实现，其可靠性依赖于物理网络架构和传输机制或承载业务类型。能够综合反映各个层面特征的模型方法是亟需突破的方面。此外，指标度量尺度决定可采用的模型分析方法，综合平均情况指标度量和即时状态指标度量的动态度量体系是应该关注的重点。

安全传输机制设计涉及传输网络的选择、保护设备的部署、设备协同工作机制及安全事件应急响应方案等。从网络生命周期看，传输业务实施之前，应确定主传输网络、备份传输网络及它们之间的协同机制，避免级联失效发生的方法、保护设备的部署和设置以及各种保护设备的系统工作方案是研

究重点；安全事件发生后，传输恢复、传输迂回是必须考虑的应急响应内容，兼顾性能或成本的应急策略是关注重点；能源互联网建设是一个渐进过程，基于已有网络基础设计经济、兼容的网络架构进化路线是可靠传输网络设计研究重要方向，已有设备的继承和可靠性兼顾构成了研究难点，开放、灵活的网络管理机制是研究重点。

4.2.2 智能能源交换设备设计与优化

借鉴信息互联网的组网经验，设计具有连接能源网络各组成部分和能源调节控制功能的能源路由器可以实现网络便捷接入、能源传输控制，并为满足用户个性化能源需求奠定硬件基础。针对电力能源，文献[56]给出了路由器原型（见图7），并指出应对能源流动态调整和电力设备间实时通信是其主要功能要求。更为实用的能源交换设备的设计和优化一直是当前电子控制领域研究的重点。

以电力能源为例，智能交换设备应支撑大规模发电、电力传输、电力分发、操作优化、电力销售、智能消费等方面的应用。从用户层面看，应支持便捷接入与断开、请求高效上传、策略随状态及时更新等功能；从运营层面看，应具有微网间和微网内的管理功能，表现在动态调整能源流向实现整体网络的供需平衡，调配域内的各种资源实现生产方式的优化调度；从实施角度看，应采用电力电子技术实现自动化电力分发与管理功能，支持通信功能，保证消息传输具有低延时、高可靠性和高安全性的特点，部署具有即插即用功能，保证分布式网络智能性（Distributed Grid Intelligence, DGI）。

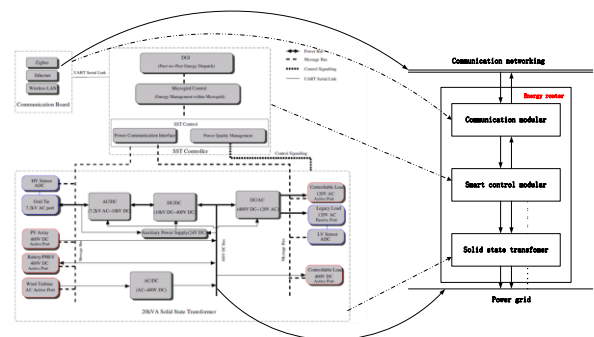


Figure 7 Layered architecture of power energy routers

图7 电力路由器层次化架构

该设计给出了上述功能的实现方法，但信息通信模块作为底层支撑单元可能变为整个设备运行的瓶颈，无法满足所有业务的要求（如目前电网中的保护业务等）。因此，适应各种能源网络业务的交换设备设计仍面临挑战。此外，细化用户的能源

需求形式，避免能源形式相互转化引起的损耗，设计支持多类型能源协调的智能交换设备逐步引起注意，典型代表是微网中的 Energy Hub，尽管该调度装置具备了上述基本要求，但其结构还存在较大的商讨空间。

4.3 综合信息获取与高效处理

信息是支撑能源互联网智能化和优化运行的关键，信息获取效率和利用程度决定能源互联网性能。传感器、网络计算技术等为信息获取和处理提供了良好基础，但尚缺乏系统、针对能源网络应用的理论和方法，针对能源互联网设计高效信息获取与处理方法具有重要现实意义。

4.3.1 基于物联网的信息采集与传输

依赖专网构建信息采集和传输网络面临实施成本高和时效性差的缺点，借用物联网技术实现网络设施整合是提高信息采集和传输效率的可行方式[57-58]。针对能源生产、传输、调配各等阶段，选取或设计合理方案完成现有设施的整合是极具挑战性的研究方向。

覆盖网技术不仅能有效改善网络服务质量[59]，还为新业务的推广提供了途径。结合覆盖网特点和能源互联网的需求设计覆盖网信息采集模型有助于解决信息采集和传输效率的问题。目前，已有成果包括将 P2P 网络类比电力系统中的能量调配过程[60-61]，把 CDN 网络思想应用于基于电动汽车存储的能量调配等[62]。覆盖网技术改善网络性能的技巧还远未被充分利用，探讨能提高能源互联网效率的覆盖网模型仍需进一步研究。

实现能量流的按需供给和按需生产，需要解决信息如何计算、指令如何及时下达的问题。针对前者，等价于设计与之相匹配的计算构架和数据存储模型，云计算技术被认为是一种可行方法[63]。云存储技术被广泛应用于统计家庭用电的历史信息[64]（如北美 WAMS 系统的数据处理存储系统 OpenPDC[65]等），其面临的问题将在下节中给出讨论；针对后者，从信息传输实时性保证看，群智理论和物联网相结合的方法是值得探讨的方向，采用代理机制获取用户实时行为信息，并给出了相应激励电价设计[66-69]。但该方面成果还比较有限，满足能源互联网应用实时性需求的计算模型仍具有较大的科学价值。

数据传输、存储和处理的耦合是信息采集和处理应注意的另一个重要问题，电力系统协议组 IEC61970、IEC61850、IEC61968 等针对电力应用

形成了数据存储与传输处理耦合的网络层面模型；OpenHAN 协议改进家庭用电数据传输时效性[69]。但是，能源互联网业务种类和要求差异仍需要设计面向业务的传输层协议满足多种应用需求。

4.3.2 基于云计算架构的能源信息处理

能源互联网承载业务类型的多样化导致信息采集、信息传输、信息处理、以及策略分发都要求较高的效率，支持计算密集型业务的处理架构是能源互联网所必需的技术。云计算能高效整合网络资源、提供强大信息处理能力，应用云计算成果解决能源互联网中的信息处理问题是可行方向[63]。

利用云计算架构优势服务能源互联网高效运行是重要的研究方向，面临的问题包括：（1）如何利用其整合分布式资源的能力，在信息采集、预处理和汇聚阶段，为能源互联网的信息获取提供支持？例如，借鉴以簇结构进行信息预处理来去除冗余信息的再传递的方法，针对能源互联网应用，如何设计簇结构规模、层次结构的数量等来优化信息处理和传递？（2）如何借用云计算模式提供的强大计算能力高效规划能源调配方案满足用户个性化能源需求？典型代表为针对用户请求，研究规范请求格式，探讨类似于 Map-Reduce 的并行计算模型等提高计算效率。（3）如何借鉴云计算架构的容错或可靠性确保机制设计存储、传输等机制确保能源互联网可靠性？例如，把云计算资源调度策略成果是否可以应用于分布式存储单元的部署和充放电管理？此外，探讨对已有信息资源的继承和整合方法，设计统一的信息模型、探讨在不影响正常业务运行的系统改造、业务类型整合和服务模式转化方法，构建为能源互联网所用的云计算系统也具有重要的现实意义和经济价值。

4.3.3 大数据技术支撑信息挖掘

从纷繁复杂的数据中挖掘有用的信息，更好地支撑所提供的大数据服务是大数据研究的目标。未来，能源互联网将覆盖人类生产、生活的方方面面，影响运行效率的数据包括天气、个体需求、网络状态监控信息、社会事件等，不仅数据来源广泛，数据规模也异常庞大，大数据技术的研究成果的应用将有力地保证能源互联网的服务质量，对应的处理方法也将丰富大数据技术的理论体系。

实现能源供需实时平衡、极大地利用清洁可再生能源、满足尽量多用户的个性化需求是能源互联网的目标，实时的能源供给和需求数据、能源存储情况、正交的个性化需求数据是影响决策的因素。

但是,上述数据往往蕴含在天气状况、用户使用习惯、生产或存储设备的运行状况等门类纷杂的数据中,设计数据融合和交互适配方法可行的信息挖掘思路,大数据技术成果为该方面研究提供借鉴。典型应用为能源供需实时平衡问题,一般地,采用统计分析方法可以较为准确的得到供给曲线(如图4-2的供给曲线),该问题的重点在于挖掘和调节需求曲线。需求函数的挖掘可以采用传统的分类、聚类或数理统计方法,也可以采用更为准确的深度学习方法(Deep Learning)[70]。在用户的实时请求、使用习惯、所处位置、时间因素等原始数据的支撑下,可给出各种时间粒度的需求函数(如图8中的自然需求曲线)。类似地,可以分析用户对能源价格、服务质量的反应,进而可以设计针对性的激励机制实现需求的平滑迁移,保证整体服务质量。

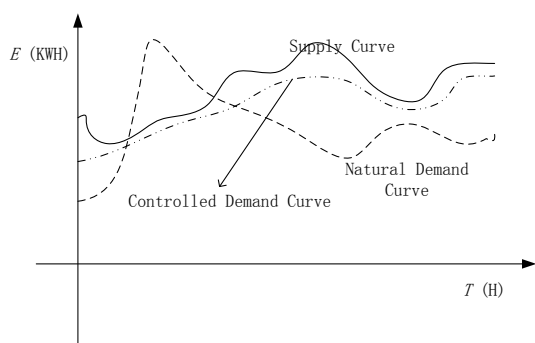


Figure 8 Intelligent production based on users' behavior

图 8 基于用户使用特征挖掘的智能消费

此外,针对可再生能源的利用问题,大数据技术还能够应用于需求和存储空间的准确控制和调节。

4.4 其他热点问题

除了上述三个方面的研究问题之外,作为开放的网络运营系统,下面的问题也应得到足够的关注:

- (1) 网络安全问题: 安全问题是所有开放系统必须考虑的问题,在信息方面,应重点关注恶意行为入侵的防范方法,信息传输和存储的隐私保护;在能源控制方面,应重点关注传输网络的可靠性分析方法,高生存性的传输机制设计等;此外,能源传输和信息传输的干扰问题也值得关注。
- (2) 能源消费的激励合作机制设计问题: 突发需求在信息互联网和能源互联网都是较难处理的问题,倡导用户合理规划能源消费是有效的解决办法,激励合作机制是较为经济的途

径,目的在于鼓励尽量多的用户参与,恰当的激励元素设计和分析模型是研究的重点,博弈论可能是有效的理论工具。

- (3) 能源互联网提供信息服务问题: 能源互联网具有目前互联网无法比拟的覆盖和能源供给优势,具备了提供信息服务的条件,探讨能源互联网提供信息服务的方式具有一定的前瞻意义。电力线载波通信技术支持信息网络服务、物联网融合提供移动网络接入服务、云计算架构搭建提供公共云服务等都是值得探讨的方向[71]

5. 总结

能源互联网作为人类“第三次工业革命”的主要代表技术受到了多方面的关注,新能源技术、电子控制技术和网络通信技术为能源互联网的建设提供了必要的技术积累,但与能源互联网的规划目标相比,上述技术的已有研究成果难以完全满足需求,存在诸多的问题亟待突破,给相关领域的研究带来了前所未有的挑战。

目前的研究侧重点和系统架构假设上存在多种观点,各方研究历程密切反映其技术专长,涉及领域相对繁杂,促进该领域的深入研究要求对已有研究工作进行梳理和归纳。针对其中的信息技术,我们对比分析了能源互联网现有的实现原型,通过分析能源互联网发展过程中使用主体职责的演化,从必需的功能模块、潜在的网络结构、支撑的信息技术方面阐述了能源互联网对信息技术体系的要求。在此基础上,我们总结了能源互联网信息技术研究领域面临的热点问题,分析了可行的研究方法和可能遇到的挑战。

结合我国当前的能源形势和相关领域技术的发展状况,开展支撑能源互联网发展的基础技术研究工作不仅具有学术价值,还具有重要的战略意义,是使我国在第三次工业革命中保持先机的必备工作。相信我们针对该领域研究方向所作的梳理工作能为广大有志于在该领域开展工作的同仁提供一定的帮助。

参考文献

- [1]. MacKay D. Sustainable energy-without the hot air [M]. UIT Cambridge, 2008.

- [2]. Hermann W A. Quantifying global energy resources [J]. Energy, 2006, 31(12): 1685-1702.
- [3]. Liu Z Y. Electricity power and energy in China. Beijing: China Electric Power Press, 2013 (in Chinese)
(刘振亚, 中国电力与能源 [M], 中国电力出版社, 北京, 2013)
- [4]. Rifkin J. The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world. Palgrave Macmillan, 2011.
- [5]. NASA Earth's energy budget. Earth radiation budget experiment. (ERBE) NASA Langley Research Center, Langley, VA (2004) See also:
<http://asd-http://asd-www.larc.nasa.gov/erbe/ASDerbe.html>
- [6]. NASA Surface meteorology and solar energy (release 5). Earth science enterprise program NASA Langley Research Center, Langley, VA (2004) See also:
<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [7]. Brown R E. Impact of smart grid on distribution system design [C]. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. IEEE, 2008: 1-4.
- [8]. Erol-Kantarci M, Kantarci B, Mouftah H T. Reliable overlay topology design for the smart microgrid network[J]. Network, IEEE, 2011, 25(5): 38-43.
- [9]. Tsoukalas L H and Gao R. From smart grids to an energy internet -- assumptions, architectures and requirements. The Proceeding of DRPT. Nanjing, China: IEEE, 2008: 94-98.
- [10]. Tsoukalas L H and Gao R. Inventing energy internet: the role of anticipation in human-centered energy distribution and utilization [C]. SICE Annual Conference, 2008. IEEE, 2008: 399-403.
- [11]. Huang A. FREEDM system - a vision for the future grid [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-4.
- [12]. Huang A, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system [J]. The Energy Internet. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(1):133-148.
- [13]. Liu Z Y. Smart Grid Techniques [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010 (in Chinese)
(刘振亚, 智能电网技术 [M], 中国电力出版社, 北京, 2010.)
- [14]. Randy H. Katz, David E. Culler, Seth S, et al. An information - centric energy infrastructure: The Berkeley view [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 7:7-22.
- [15]. Blarke M B. Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration [J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 349-365.
- [16]. Ackermann T, Andersson G, and Söder L. Distributed generation: a definition [J]. Electric power systems research, 2001, 57(3): 195 - 204.
- [17]. Lasseter RH and Piagi P. Microgrid: A conceptual solution [C]. In Proceedings Power Electronics Specialists Conf., Aachen, Germany, Jun. 2004, 6: 4285 - 4290.
- [18]. Keshav S and Rosenberg C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid, In Proceedings of the first ACM SIGCOMM workshop on Green networking, 2010, 35-40.
- [19]. BDI Initiative, Internet of Energy - ICT for Energy Markets of the Future [R], 2008.
- [20]. LoCal Project.
<http://local.cs.berkeley.edu/wiki/index.php/> 2014.
- [21]. PEIR Project. <http://peir.cens.ucla.edu/>, 2014.
- [22]. Spotlight project.
<http://nesl.ee.ucla.edu/project/show/59>, 2014.
- [23]. E-Energy - Smart Energy made in Germany [EB/OL].
<http://www.e-energy.de/en/>. 2014.
- [24]. IDEAS Project. <http://www.ecs.soton.ac.uk/research/projects/618>, 2014.
- [25]. Lawrence Livermore National Laboratory Energy Flow Diagram. <https://publicaffairs.llnl.gov/news/energy/energy.html#2008>, 2014.
- [26]. European Commission, Directorate-General for Energy. Priorities for 2020 and beyond - a blueprint for an integrated European energy network [R]. 2011.
- [27]. Wu J D. Towards the third Internet innovative architecture [J]. High technology and industrialization. 2012, 5 : 56-59. (in chinese) (武建东. 谁将把握电网行业变迁的制高点:关于第三互联网的创新架构[J]. 高科技与产业化. 2012, 5 : 56-59.)
- [28]. Cao J W, Wan Y X, Tu G Y, et al. Information system architecture for smart grid [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143 -167. (in Chinese)

- (曹军威, 万宇鑫, 涂国煜 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.)
- [29]. Tanenbaum A S. Computer Networks (4th Edition) [M]. NJ, Prentice-Hall. 2003.
- [30]. Lin C, Jia Z X and Meng K. Research on adaptive future Internet architecture [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1077 - 1093. (in Chinese)
(林闯, 贾子晓, 孟坤. 自适应的未来网络体系架构[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1077-1093.)
- [31]. Ramchurn S D, Vytelingum P, Rogers A, et al. Putting the smarts' into the smart grid: a grand challenge for artificial intelligence[J]. Communications of the ACM, 2012, 55(4): 86-97.
- [32]. Green K, González S R and Wijnvliet R. Innovative energy storage solutions for future electromobility in smart cities[C]. In Proceedings of the Conference on Design, Automation and Test in Europe. EDA Consortium, 2013: 1730-1734.
- [33]. Barin A, Canha L N, Abaide A D R, et al. Multiple criteria analysis for energy storage selection [J], Energy and Power Engineering, 2011, 3: 557 - 564.
- [34]. Wang Y, Kim Y, Xie Q, et al. Charge migration efficiency optimization in hybrid electrical energy storage (HEES) systems [R], in ISLPED, 2011.
- [35]. Mishra A, Irwin D, Shenoy P, et al. Smartcharge: cutting the electricity bill in smart homes with energy storage[C]. In Proceedings of the 3rd International Conference on Future Energy Systems: Where Energy, Computing and Communication Meet. ACM, 2012: 29.
- [36]. Mishra A, Irwin D, Shenoy P, et al. Scaling distributed energy storage for grid peak reduction[C]. In Proceedings of the fourth international conference on future energy systems. ACM, 2013: 3-14.
- [37]. Pérez J, Díaz J, Garbajosa J, et al. Large-scale smart grids as system of systems[C]. In Proceedings of the First International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems. ACM, 2013: 38-42.
- [38]. Boardman J, Sauser B. System of Systems-the meaning of [C]. System of Systems Engineering, 2006 IEEE/SMC International Conference on. IEEE, Los Angeles, CA. 2006, 6: 118-123.
- [39]. Farhangi H. The path of the smart grid [J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2010, 8(1): 18-28.
- [40]. Rech D and Harth A. Towards a decentralised hierarchical architecture for smart grids [C]. In Proceedings of the 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops. ACM, 2012: 111-115.
- [41]. Zhu T, Huang Z, Sharma A, et al. Sharing renewable energy in smart microgrids [C]. In Proceedings of the ACM/IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS 13'), NY. 2013: 219-228.
- [42]. Mohsenian-Rad A H, Wong V W S, Jatskevich J, et al. Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid [C]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010. IEEE, Gaithersburg, MD. 2010: 1-6.
- [43]. Rohjans S, Uslar M, Bleiker R, et al. Survey of smart grid standardization studies and recommendations [C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, Gaithersburg, MD. 2010: 583-588.
- [44]. Lopes J A, Hatziargyriou N, Mutale J, et al. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(9): 1189-1203.
- [45]. Chicco G and Mancarella P. Distributed multi-generation: a comprehensive view [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(3): 535-551.
- [46]. Pepermans G, Driesen J, Haeseldonckx D, et al. Distributed generation: definition, benefits and issues [J]. Energy policy, 2005, 33(6): 787-798.
- [47]. Hatziargyriou N D. and Meliopoulos A P S. Distributed energy sources: Technical challenges [C]. in Proceeding of IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, New York. 2002, 2: 1017 - 1022.
- [48]. Smallwood C L. Distributed generation in autonomous and non-autonomous micro grids [C]. in Proceeding of IEEE Rural Electric Power Conf, Colorado Springs, CO. 2002: D1/1 - D1/6.
- [49]. Barker P P and De Mello R W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2000 IEEE, Seattle, WA. 2000, 3: 1645-1656.
- [50]. Celli G, Ghiani E, Mocci S, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2005, 20(2): 750-757.

- [51]. Girgis A and Brahma S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system [C]. Power Engineering, 2001. LESCOPE'01. 2001 Large Engineering Systems Conference on. IEEE, 2001: 115-119.
- [52]. Wang C and Nehrir M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2004, 19(4): 2068-2076.
- [53]. Wang D, Ren C, Sivasubramaniam A, et al. Energy storage in datacenters: what, where, and how much? [C]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. ACM, 2012, 40(1): 187-198.
- [54]. Georgiadis G and Papatriantafilou M. A greedy algorithm for the unforecasted energy dispatch problem with storage in Smart Grids[R]. Chalmers University of Technology, 2012.
- [55]. Kempton W and Tomić J. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy [J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [56]. Electricity storage technologies.
<http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>, 2014.
- [57]. Xu Y, Zhang J, Wang W, et al. Energy router: Architectures and functionalities toward energy internet [C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 31-36.
- [58]. Wu J J and Zhao W. WInternet: From Net of Things to Internet of Things [J]. Journal of Computer Research and Development, 2013 50(6): 1127-1134,
- [59]. Clark D, Lehr B, S. Bauer, et al. Overlay networks and the future of the Internet [J]. Communication & Strategies, 2006 6(3): 109- 129.
- [60]. Deconinck G, Labeeuw W, Vandael S, et al. Communication overlays and agents for dependable smart power grids [C]. Critical Infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference on. IEEE, Beijing, China. 2010: 1-7.
- [61]. Beitollahi H, Deconinck G. Analyzing the Chord peer-to-peer network for power grid applications [C]. 4th IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, 2008: 5.
- [62]. Arulampalam A, Barnes M, Engler A, et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation microgrids[J]. International Journal of Electronics, 2004, 91(9): 503-523.
- [63]. Hwang K, Fox G C, and Dongarra J. Distributed and cloud computing [M]. Morgan Kaufmann, 2011
- [64]. Arenas-Martinez M, Herrero-Lopez S, Sanchez A, et al. A comparative study of data storage and processing architectures for the smart grid[C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, Gaithersburg, MD. 2010: 285-290.
- [65]. <http://openpdc.codeplex.com>
- [66]. Samadi P and Mohsenian-Rad A. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid [C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, Gaithersburg, MD. 2010: 415-420.
- [67]. Molderink A, Bakker V, Bosman M G C, et al. Management and control of domestic smart grid technology [J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2010, 1(2): 109-119.
- [68]. Bakker V, Bosman M G C, Molderink A, et al. Demand side load management using a three step optimization methodology[C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on. IEEE, Gaithersburg, MD. 2010: 431-436.
- [69]. Kim Y J and Thottan M. SGTP: smart grid transport protocol for secure reliable delivery of periodic real time data [J]. Bell Labs Technical Journal, 2011 16(3): 83-99.
- [70]. Han J, Kamber M, Pei J. Data mining: concepts and techniques [M]. Morgan kaufmann, 2006.
- [71]. Lin Y J, Latchman H A, Lee M, et al. A power line communication network infrastructure for the smart home [J]. Wireless Communications, IEEE, 2002, 9(6): 104-111.

校对联系人信息:

孟坤,

电话: 010-62772487, 18911059682,

E-mail: mengkurt@tsinghua.edu.cn