

能源互联网及其关键控制问题

孙秋野¹ 滕菲¹ 张化光¹

摘要 能源互联网是以电力网络、热力网络及天然气网络等能源网络为对象,以分布式协同控制技术、智能优化控制技术以及先进的信息通讯技术等为实施手段,通过各能源网络集成交互形成的新型复杂能源系统,具有泛在互联、对等开放、低碳高效、多源协同、安全可靠等特点. 本文根据能源互联网前期已开展学术研究展开讨论,剖析能源互联网的内涵,分类并简要分析能源互联网的系统结构,针对能源互联网的建设目标及工程需求层面,归纳并提炼了能源互联网未来发展中面临的若干控制科学问题,包括分布式协同控制、能量调度管理、能量转换、信息处理、故障诊断等关键技术,最后对能源互联网发展所面临的主要挑战及未来可能的研究方向进行了总结和展望.

关键词 能源互联网, 泛在互联, 协同控制, 能量管理, 能量转换, 信息处理, 故障诊断

引用格式 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题. 自动化学报, 2017, 43(2): 176–194

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160390

Energy Internet and Its Key Control Issues

SUN Qiu-Ye¹ TENG Fei¹ ZHANG Hua-Guang¹

Abstract Being a ubiquitously interconnected, reciprocally opening, effective low-carbon, multi-source cooperative, safe and reliable system, energy internet is a kind of novel complex energy system by means of integration of power system, heat system, natural gas system and other energy systems, based on distributed cooperative control technology, intelligent optimization control technology, advanced information communication technology and so on. According to previous academic studies related to energy internet, the notion and the characteristics of energy internet are discussed. Further, a classification and brief analysis of the architectures of energy internet are presented. Considering the development goal and engineering demand of energy internet, several basic scientific issues of energy internet during its construction and development process are summarized and extracted, including distributed cooperative control, energy management, energy conversion technology, information processing technology and fault diagnosis technology. Finally, the main challenges to the development of energy internet are pointed out, and the future research directions are prospected.

Key words Energy internet, ubiquitous interconnected, cooperative control, energy management, energy conversion, information processing, fault diagnosis

Citation Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang. Energy internet and its key control issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 176–194

能源是人类社会和经济发展的物质基础. 随着传统化石能源逐渐枯竭和全球环境污染问题日益加剧, 能源互联网作为第三次工业革命的核心, 是实现以可再生能源逐步替代化石能源, 使得能源消费结构向低碳化方向转变, 建立绿色、可持续能源利用体系的有效途径, 引起了各国政府及学者的高度关注.

作为新一代更为集约、环保、可持续的能源利

用模式, 能源互联网的发展与人类的生活和社会、经济的发展息息相关. 能源互联网是能源领域与自动控制、信息处理、网络通讯等领域深度融合的产物, 是以电力网络、热力网络、天然气网络及交通网络等复杂网络为物理实体, 以能源技术与先进控制技术、智能优化技术及信息处理技术等为实施手段的一种新型开放式能源生态系统, 可实现可再生能源的高效利用, 提高可再生能源在一次能源生产和消费中的占比, 其发展历程如图 1 所示. 20 世纪 70 年代, 在世界游戏模拟大会上, 巴克敏斯特·福乐最早提出“全球能源互联网战略”这一概念^[1], 他认为实现这一战略是能源最高优选; 1986 年, 彼得·迈森创立全球能源网络学会, 该学会特别关注国家与大陆之间的电力传输网络连接, 利用季节性变化、气候变化和日照变化等的差异收集再生能源, 以供全球使用. 以上仅仅是一些未来能源系统的发展愿景, 缺乏具体的实施步骤. 直到 2004 年, 《经济人》

收稿日期 2016-05-11 录用日期 2016-08-31
Manuscript received May 11, 2016; accepted August 31, 2016
国家自然科学基金 (61433004, 61573094), 中央高校基础科研业务费 (N140402001), 国家电网公司科技项目 (XT71-14-055) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61433004, 61573094), Fundamental Research Funds for the Central Universities (N140402001), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (XT71-14-055)
本文责任编辑 魏庆来
Recommended by Associate Editor WEI Qing-Lai
1. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819
1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819

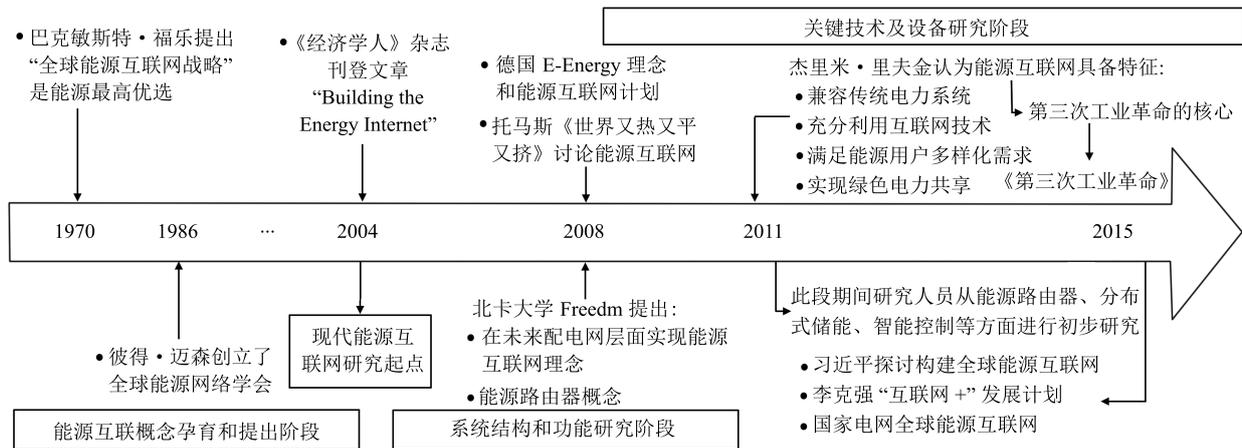


Fig. 1 The development of energy internet

杂志刊登了一篇题为“Building the Energy Internet”的关于能源互联网的文章^[2], 各国研究者才正式开始了对现代能源互联网的研究; 2008年, 美国国家科学基金会资助的美国北卡州立大学未来可再生能源传输和管理中心指出, 为实现大规模分布式可再生能源及分布式储能设备的即插即用, 应将电力电子技术和信息技术引入电力系统, 通过能源路由器等能源互联网中核心的电力变换、智能控制设备, 在未来配电网层面实现能源互联网理念^[3]; 同年, 德国联邦经济和技术部提出 E-Energy 理念和能源互联网计划^[4], 以新型的 ICT 通讯设备和系统为基础, 在六个城市试点不同侧重点的智能电网示范项目, 来应对日益增多的分布式电源接入及各种复杂的用户终端负荷需求; 同年, 三度普策利奖得主托马斯·弗里德曼在《世界又热又平又挤》一书中专门对能源互联网进行讨论^[5]; 2011年, 杰里米·里夫金在《第三次工业革命》^[6]一书中提出能源互联网是第三次工业革命的重要标志, 其主旨是在兼容传统电力系统的基础上, 利用互联网技术实现广域内大量分布式电源、储能设备及负荷等的协调控制, 构建一种能够满足用户多样化能源需求的新型能源体系网络, 从而实现绿色电力的共享, 减少化石能源的使用, 解决能源危机与环境污染问题; 第三次工业革命和现代能源互联网迅速引起我国国家领导人和从业者的关注^[7]; 2015年, 刘振亚提出, 要以特高压电网为骨干网架, 构建全球范围内互联的坚强智能电网—全球能源互联网, 加快实施“两个替代”, 实现绿色清洁能源在全球范围内合理、高效、优化配置^[8]; 同年, 国务院总理李克强在两会报告提出能源生产和消费革命, 关乎发展与民生, 要大力发展风电、光伏发电、生物质能. 同时提出“互联网+”发展计划, 为未来能源资源配置利用模式提供了发展方向, 引领能源互联网发展成为具备“互联网+”特征的能

源共享网络; 国家主席习近平也在联合国发展峰会上宣布中国倡议探讨构建全球能源互联网, 推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求. 向世界彰显了中国欲探索环保、绿色、低碳的能源发展新道路的智慧 and 决心^[9-10].

本文对能源互联网这一新兴热点研究领域进行概述. 在对能源互联网的基本定义、发展进行综述的基础上, 分析能源互联网与智能电网、微电网及泛能网的主要区别, 进一步对能源互联网的系统结构进行分类及简要分析, 并综述了目前对能源互联网研究中涉及的关键控制问题, 最后对能源互联网未来的研究方向进行展望.

1 能源互联网内涵

作为下一代能源系统, 能源互联网的发展引起欧盟、美国、中国等世界各国研究人员的持续关注. 本节从能源互联网的基本定义着手, 分析能源互联网的特点, 及其与智能电网、微电网及泛能网的区别, 为进一步总结归纳能源互联网的系统结构、提炼能源互联网的相关控制问题奠定基础.

1.1 能源互联网的基本定义

研究人员从能源互联网的系统设计、物理实体、核心技术、关键设备、资源配置等不同层面对其进行研究, 然而由于能源互联网具有较高的兼容性和复杂性, 其发展涉及到多个学科的不同技术, 难以对其进行全面且精确的定义; 同时, 不同领域的研究者对能源互联网的理解各异, 因此短期内对能源互联网的定义尚未达到共识. 下述几类能源互联网的定义获得了较为广泛的认可.

从能源互联网的构建目的及系统设计层面可以认为能源互联网主要是利用互联网技术实现广域内的分布式电源、储能设备^[11]与负荷的协调, 实现由

集中式化石能源利用向分布式可再生能源利用的转变,其应具有以下四个主要特征^[6]: 1) 以可再生能源为主要一次能源; 2) 支持超大规模分布式发电系统与分布式储能系统接入; 3) 基于互联网技术实现广域能源共享; 4) 支持交通系统的电气化。

从能源互联网包含的复杂网络的物理实体层面,可以认为能源互联网是以电力系统为核心,以互联网及其他前沿信息技术为主要手段,以分布式可再生能源为主要一次能源,与天然气网络、交通网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂多能流系统^[12]。

从能源互联网的核心技术与关键设备层面,有些研究人员指出,能源互联网可理解为以能源路由器等关键设备为核心^[3],综合运用智能终端、信息采集处理、预测分析、协同控制、云计算、物联网、大数据与电力变换控制等相关技术,将大量由分布式能量采集与储存装置和各类负载所构成的新型能源

网络节点互联起来,实现能量与信息双向流动的能源交易与共享网络。

从全球能源资源配置层面,能源互联网可以看作坚强智能电网发展的高级阶段^[8],核心是以清洁能源为主导,以特高压电网为骨干网架,各国各洲电网广泛互联,能源资源全球配置,各级电网协调发展,各类电源和用户灵活接入的坚强智能电网。

综合能源互联网的研究现状,笔者认为,能源互联网可以从能源互联网结构及其功能两个角度定义为狭义能源互联网和广义能源互联网^[13]。如图 2 所示,广义能源互联网将一个广泛区域内分散的能源碎片集聚形成一个扁平化结构的超级能源体,将人类使用的分散于不同地区的各种能源资源及信息资源深度融合,包含现今社会中以能源为主体的网络(例如交通、电力、石化等)和以先进信息技术为基础的信息网络,实现广域能源资源和信息资源生产

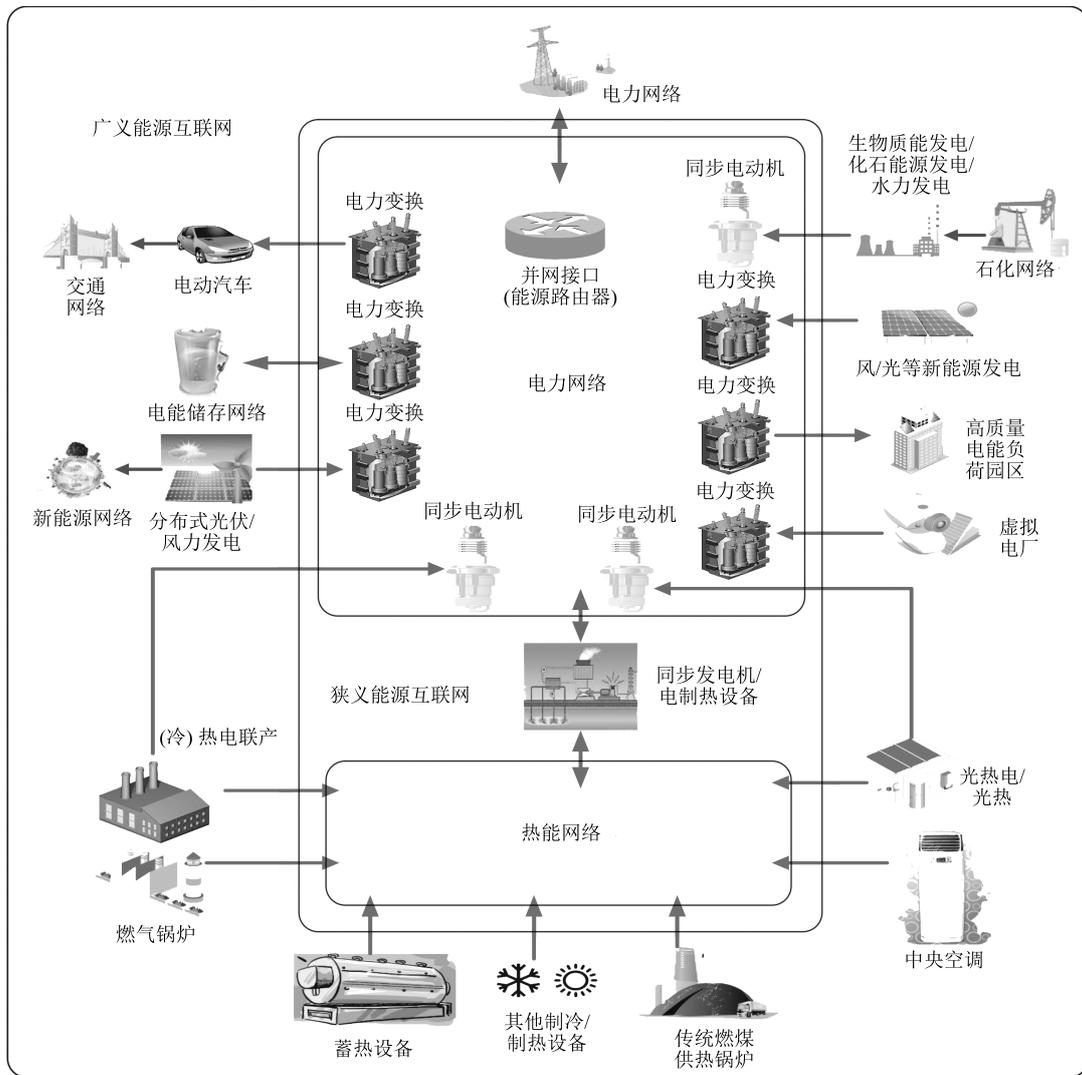


图 2 广义能源互联网和狭义能源互联网的组成元素

Fig. 2 The components of generalized energy internet and narrow energy internet

消费的互联和共享; 狭义能源互联网将一个区域内的能量生产、消费和存储设备按照一定的拓扑结构组成网络, 并通过能源路由器等能量转换设备将该网络关联至传统能源主传输网络, 实现各传统能源网络的协调互补. 各个狭义能源互联网互联互通将所有以能源为主体的网络联合成广义能源互联网. 目前, 针对狭义能源互联网的研究不仅限于理论方面, 国内部分地区已经开展相关的实践研究, 建立了一些狭义能源互联网试验示范工程. 2014 年, 国防科技大学与山西省吕梁市军民融合协同创新研究院和中国节能环保集团总公司共同建立了国内首个内部采用分布储能理念、以云计算中心为主要应用对象的能源互联网示范系统^[14]. 2015 年, 《四川省“互联网+”工作重点方案》^[15] 中提出, 四川省将携手清华大学能源互联网研究院, 创建能源互联网创新产业园区, 建设能源互联网示范项目. 同年, 东北大学以信息科学与工程学院为载体建设了一个校园级狭义能源互联网综合试验示范平台^[13]. 该平台突破了含分布式电源、微网、储能、负载的能源互联网的联供并网控制、能量监控核、态势分析、自愈恢复和一体化优化控制技术, 是国内首个具有高稳定性、兼容性和可拓展性的狭义能源互联网的能量产生、管理、优化、协调控制的综合智能实验和展示平台. 此外, 基于协鑫能源中心“六位一体”微能源网项目, 协鑫集团联合苏州工业园计划建立一个国家级能源互联网示范区, 重点研究能源互联网海量数据安全^[16]. 上述狭义能源互联网试点工作的开展为能源互联网关键技术研究提供了实践平台, 为日后向更广范围推广能源互联网累积了经验, 为我国能源体系转型奠定了坚实的基础.

1.2 能源互联网的特点

谈到能源互联网, 很多研究人员都会将其与现有的一些能源网络 (诸如智能电网、微网、泛能网等能源网络) 进行对比, 分析其中存在的异同点, 进而得出能源互联网的特点. 本节将首先列举能源互联网与当前主要能源网络的区别, 在此基础上, 得出能源互联网的特性.

1.2.1 能源互联网与智能电网的区别

智能电网就是电网的智能化 (智能电力), 也被称为“电网 2.0”, 是在集成的、高速双向通信网络的基础上, 通过先进的传感、测量、控制方法以及决策支持技术的应用, 实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标^[17], 主要特征包括能够提供满足 21 世纪用户需求的电能质量、容许各种不同发电形式的接入、启动电力市场以及资产的优化高效运行^[18], 与能源互联网的区别主要体现在:

1) 接入能源类型不同. 智能电网以电能为主, 能

源互联网包括电、气、热等多种类型能源. 但不能简单地认为多种能源接入了就是能源互联网, 一定要针对多种能源的统一度量, 统一建模和统一优化与调度.

2) 接入方式不同. 智能电网尽管强调了分布式发电在其中起到的作用, 但从本质上, 无论是调度模式, 还是控制策略, 都还是集中的垂直调控思想, 即通过一个调控中心来进行统一的控制, 任何能源提供设备的接入必须在上一级调控中心进行报备, 并归入集中控制. 能源互联网采用的是分布式对接接入, 各个能源提供设备可以实现即插即用.

3) 信息利用模式不同. 智能电网相对于传统电网的采集点和采集信息更多、更全面, 但对于信息的利用与传统的调度自动化并没有本质区别, 信息与物理系统还是独立的, 没有有机结合. 能源互联网更为强调物理与信息系统的统一建模, 特别是考虑了信息系统对于物理系统的影响.

1.2.2 能源互联网与微电网的区别

微网, 即微电网, 是相对传统大电网的一个概念, 是指多个分布式电源及其相关负载按照一定的拓扑结构组成的网络, 并通过静态开关关联至常规电网^[19], 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 既可以与外部电网并网运行, 也可以孤立运行, 其与能源互联网的区别主要体现在:

1) 功能定位不同. 微网本质上来讲是主电网的补充环节, 将小范围内的分布式电源、储能和用户通过组网结合起来, 提高区域内供电的可靠性, 减少对于主电网的扰动, 与传统电网是主从关系. 能源互联网连接了多种类型能源网络, 实现网络内的能源终端的自主接入, 实现的是多种类型能源网络的综合能源优化, 与传统电网是并列的关系.

2) 网络结构不同. 微网仍然采用传统的主从结构, 一般设有集中的调控中心, 微网用户接受调控中心的控制, 微网接受主电网的调度, 用户的自主性较差. 能源互联网强调的是各个终端能源主体的自主即插即用式接入, 用户一般不受上一级调度的控制, 而是通过能源价格等目标进行全局分布式优化, 用户具有较强的自主性.

3) 在接入能源类型和信息利用模式方面, 微网与智能电网类似, 其与能源互联网的区别前面已经论述.

1.2.3 能源互联网与泛能网的区别

泛能网在很多方面类似于德国提出的 E-Energy 网络^[20], 可以说是现有的以热电联产或者其他能源综合利用形式的升级网络. 泛能网是指基于系统能效技术, 通过能源生产、储运、应用与回收四个环节, 进行能量和信息的耦合, 形成能量输入和

输出跨时域协同, 实现系统全生命周期的最优化和能量的增效, 能效控制系统对各能量流进行供需转换匹配, 梯级利用, 以达到系统能效最大化, 最终输出一种自组织的高度有序的能源组网形式. 其与能源互联网的区别主要体现在:

1) 能源传输和转换枢纽不同. 泛能网一般以泛能站为核心 (E-Energy 一般为 Energy hub) 进行能源的传输和转换, 实际上是需要一个核心的能源枢纽设备, 可视为能源的星形结构. 能源互联网强调的是能源的平行对等接入, 类似于信息传输中的母线结构, 同类型能源在能源母线上完成传输和交换, 不同类型能源通过能源转换设备间实现能源交换.

2) 构建目的不同. 以泛能网为代表的能源网络更多的是通过多种能源的综合利用来实现能源的高效综合利用, 其本质关注点仍然在于能源的转换问题; 能源互联网不但考虑了多种能源的综合利用, 更将能源的物理和信息属性融合, 在保证网络安全稳定运行的基础上实现能源的最优利用.

3) 能源主体不同. 泛能网强调打通不同类型能源企业之间的壁垒, 提高能源利用效率, 其主体仍然是能源企业; 能源互联网是将原有的能源消费者通过网络的反向能源传输, 成为能源生产者与消费者的统一体, 实现能源的就地平衡, 降低能源的传输和转换成本, 提高可再生能源的利用率.

综合以上分析, 可以得出能源互联网是一个支持多种能源接入, 能源与信息高度集成, 具有扁平化的网络结构以及对等、自由、实时的能源交易模式的新型复杂能源网络. 其特点具体体现如下:

1) 能源互联网支持多种能源接入, 利用不同类型能源的时空互补特性, 克服可再生能源间歇性、波动性等对能源网络稳定性的影响, 最大程度地保证对可再生能源的充分利用, 实现各种类型能源的最优调度和环境友好协调.

2) 能源互联网是一个能源与信息高度集成的网络, 通过先进的信息采集、传输、处理方式, 以及对应的计算、估计、感知策略, 实现全能源网络的可观、可控, 保证能源生产、传输、存储、消费的安全有序进行.

3) 能源互联网具有扁平化的网络结构, 保证各个合格能源主体的对等、开放、自由、分布接入, 实现合格能源主体的即插即用, 促进能源的就地生产, 就地消纳, 降低能源传输成本, 保证能源在网络内部的高度共享.

4) 能源互联网具有对等、自由、实时的交易模式, 最大限度地去除能源交易的中间环节, 实现能源生产者和能源消费者的直接交易, 为各类参与者的低成本进入及便捷交易提供开放平台, 为能源革命提供持续动力.

2 能源互联网的系统结构

由于能源互联网是涉及到能源、信息、控制、通讯等技术的新型复杂能源集成网络, 不同学者的研究侧重点不同, 根据目前已有能源互联网的研究内容, 本节对能源互联网的系统结构进行分析.

2.1 大区能源配置型能源互联网

大区能源配置型能源互联网重点关注对能源资源的配置范围、调控能力, 强调广域能源的资源共享、跨洲跨国家的大区能源配置. 在建设坚强智能电网的基础上, 提出以特高压电网为骨干网架构建全球能源互联网^[8], 通过各国各洲电网广泛互联, 实现全球能源资源的合理配置, 构建一个服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的新型能源体系. 全球能源互联网的构建目标是连接“一极一道”和各大洲、各国大型能源基地及各类分布式电源, 突破资源瓶颈、环境约束和时空限制, 将太阳能、风能、水能、海洋能等清洁能源转化为电能送到各类用户.

2.2 多种能源网络互联型能源互联网

多种能源网络互联型能源互联网主要体现未来能源网络的构建模式, 其主张能源互联网是由电力网络、天然气网络、石油网络、交通网络等多种能源网络高度耦合形成新型能源供应系统.

由多种传统能源网络互联形成的能源互联网是未来能源供应体系的雏形^[6], 利用各种产能、用能、储能设备等将电力网络、热力网络、交通网络、石化网络等复杂能源网络, 通过一些即插即用接口连接起来, 形成以可再生能源为主要一次能源的低碳型综合能源供应体系^[12]. 该类能源互联网既可以是广义上的复杂能源网络^[13], 将广泛区域内的分散的能源供应体连接起来, 进行统一调度管理, 将以可再生能源为主的一次能源转换为电、热等易传输的二次能源进行利用, 实现能源的大区域互联及广域共享; 也可以是狭义上的集生产-转换-存储-利用于一体的小型能源供应系统^[21], 以可再生能源为主要一次能源, 通过分布式发电技术, 将一些小型发电站与热电联产系统互联, 为社区、医院、工厂等区域供电, 促进建设低碳环保型城市.

2.3 强调能源优化利用模式型能源互联网

强调能源优化利用模式型能源互联网偏重考虑大规模分布式可再生能源、电动汽车等智能终端接入设备的即插即用、能量信息双向流动等诉求, 对其中的能源管理/能量转换关键设备、网络形态架构及运行方式等进行深刻变革, 通过能源就地消纳平衡实现能源的优化利用. 按照关键设备类型可把能源互联网分为两类.

一类能源互联网被认为是多载能体网络, 核心是作为网络内供能体与用能体之间的接口的 Energy hub^[22]. Energy hub 能够根据网络内的能源需求, 完成从可再生能源、清洁能源、化石能源等一次能源向电、热、冷等多种二次能源形式的转换, 进而实现以可再生能源为主要一次能源的能源资源的合理分配、绿色共享^[23].

另一类能源互联网被认为仍是以电力系统为主要物理实体的能源供应体系, 因此在构建能源互联网的过程中, 其主要考虑的是设计一种智能能量转换调控设备——能源路由器^[24], 能够根据网络内能量用户的需求, 实现不同发电设备产生的高低压、交直流等不同种类电能间的转换, 同时兼容电压补偿、故障隔离、谐波隔离等功能, 保障供应电能的高质量^[25], 并利用先进的控制理论、储能技术、信息通讯技术, 实现对网络内大规模分布式电源、储能设备及用户负载的智能管理^[26]. 考虑能源互联网内能量流—信息流双向流动、一体化的发展趋势, 合理设计能源路由器的智能控制方案, 使其能够自主、并行完成电能调度、分配、质量监测、负荷投切等多样化任务, 保证能源互联网的运行稳定性.

2.4 基于互联网技术改造现有能源网络型能源互联网

基于互联网技术改造现有能源网络型能源互联网主要借鉴互联网理念, 将信息通讯技术与能源供应技术融合, 形成一个以信息为中心、以可再生能源为主要一次能源的清洁能源网络^[27], 使得现有的能源网络更加智能化、环保化、低碳化, 实现信息互联网对能源网络内各设备物理实体的全面覆盖, 提升现有能源网络的高效性、灵活性、开放性, 实现分布式电源的即插即用、供能—储能—用能设备的整合配置与能量的高效管理利用, 此类能源互联网被认为是未来能源体系结构^[3, 28]. 网络内各能量生产者与消耗者之间通过信息互联网及传统能源网实现其信息通讯及物理实体双层面上的联通^[29], 能量与信息一样通过数据包的形式在能量生产者与消耗者之间双向流动^[30], 各能量生产者通过彼此间交互合作及与传统电网的信息共享, 实现能量的智能调配、可靠传输与安全供应^[31].

上述四类能源互联网构建的着眼点不同, 但是发展目标一致, 均致力于探索低碳、可持续的未来能源利用模式. 如图 3 所示, 以上能源互联网以“立体—平面—线—点”四个层次阐述未来能源利用体系, 其中大区能源配置型能源互联网以全球区域性能源战略为主导, 复杂性已远超单纯的能源交易, 更多地涉及到国际政治、外交、安全等方面问题; 多种能源网络互联型能源互联网以讨论多种能源互联利用这

种概念为主, 面临的挑战极其广泛, 涉及社会、体制、环境、经济等很多问题; 强调能源优化利用模式型能源互联网、以及基于互联网技术改造现有能源网络型能源互联网, 则侧重于能源互联网内部结构设计与其功能实现, 涉及更多具体技术问题. 笔者认为, 前两类能源互联网更多的是探索一种未来绿色环保的多能源跨区域互联的能源利用模式, 而针对后两类能源互联网的研究更加具象化, 重点关注网络内部的关键设备研制及运行控制问题, 也是我们更为关注的科学技术研究内容.

3 能源互联网中的控制问题

能源互联网是综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术, 将大量由分布式能量转换装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络、石化网络、天然气网络等能源节点互联起来, 以实现能量多向流动的广域能量对等交换与共享的新型复杂能源网络, 在产能、输能、配能和用能四大环节对传统能源网络进行全面升级, 涉及到大量的先进控制科学与技术问题. 本节对“考虑能源互联网产能侧结构特征, 如何实现能源互联网的自适应最优控制”、“如何保证优化过程中能源互联网的安全性及稳定性”、“考虑能源互联网中用户侧结构特征, 分析安全、稳定的优化过程中用户的能源交互行为, 探索能源互联网的市场贸易模式”三个方面涉及的控制科学与技术问题进行论述.

3.1 分布式协同控制

协同控制起源于现代数学和协同学, 由 Kolesnikov 等^[32]于 2000 年提出, 通过协同控制器使被控系统中各部分产生相互协作的行为, 将被控系统中的未知行为引导成为相互协作的定向自组织行为, 主要应用于解决网络同步问题^[33]、一致性问题^[34]及编队控制问题^[35]等. 随着通讯技术的发展及实际工程系统中受控对象数量的增加, 网络化控制系统及复杂网络中多子系统间的协同控制问题引起广泛关注, 分布式协同控制理论成为新的研究热点. 由于多智能体系统具有灵活性、协调性及可靠性, 且能够描述电力系统等众多实际复杂系统的特性, 因此如何合理设计适用于多智能体系统的算法流程实现分布式协同控制成为解决相关工程问题的焦点及难点.

基于多智能体系统的分布式协同控制是实现能源互联网智能协调控制的重要途径. 基于多智能体系统的分布式协同控制实际上是网络内智能体间的协同同步, 具体可体现为根据一定的通信协议, 网络内智能体与其他智能体完成交互合作的过程. 能源

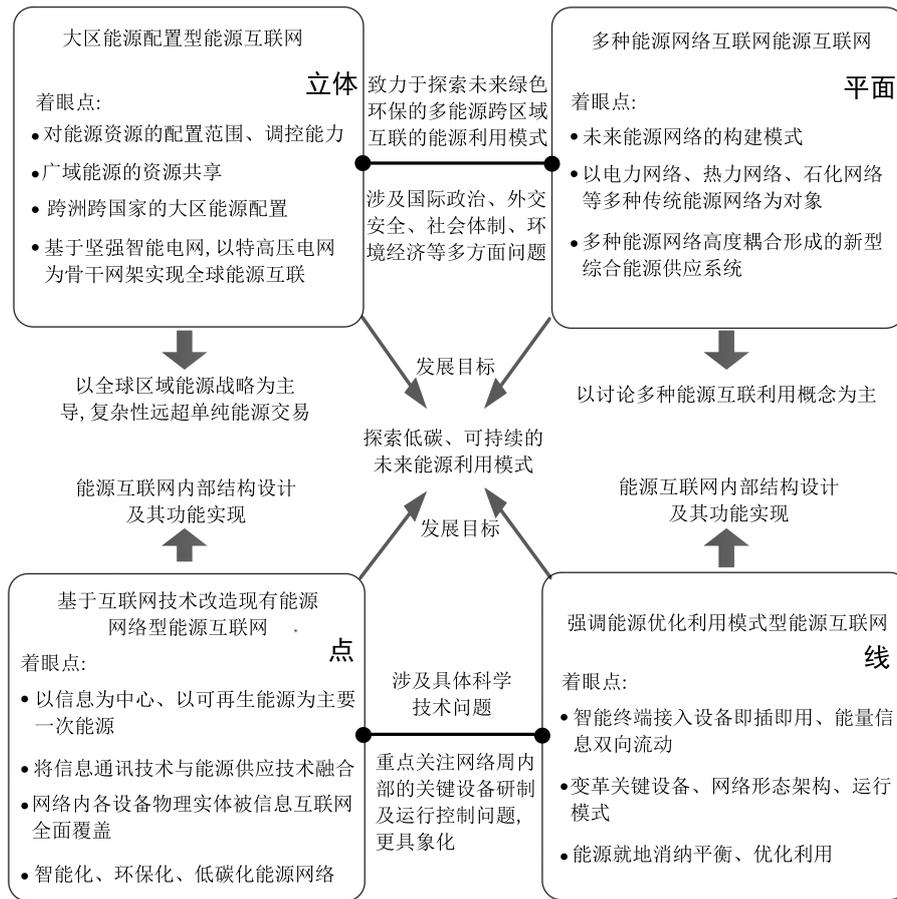


图 3 四类能源互联网间的联系与区别

Fig. 3 The connection and difference between the four types of energy internet

互联网背景下的分布式协同控制问题本质上是基于多智能体系统, 利用信息通讯技术, 实现能源互联网内各分布式设备的协同合作, 对整个能源互联网内的可控能源进行协同调度, 实现能源互联网的故障诊断、故障恢复、状态监控、系统控制, 保证能源互联网安全、稳定运行。根据上述问题解决方法的设计类型, 能源互联网中分布式协同控制的实施方案主要包括两类。

一类是根据能源互联网的网络结构、节点设备功能及负荷特性设计多智能体系统, 利用系统内各智能体的自治性、主动性和社会性等行为特性, 实时控制各节点设备的开关状态, 维持能源互联网的运行稳定性^[36]。针对采用的多智能体系统的网络拓扑结构, 这类分布式协同控制系统被分为无领导者多智能体系统、有领导者多智能体系统及混合式多智能体系统。无领导者多智能体系统指的是设计的多智能体系统中所有的多智能体均处于同一层级。当能源互联网运行状态异常时, 系统内各设备对应的本地智能体通过相互通信协作实现网络的状态估计^[37]及故障恢复等。有领导者多智能体系统指的是

设计的多智能体系统中存在一个或多个领导者智能体。该智能体汇总各个本地智能体上报的本地信息, 制定系统恢复方案并发送回各个本地智能体, 本地智能体交互合作实现系统的故障恢复^[38]等。混合式多智能体系统指的是系统中的各个智能体在多层分散式模式下工作, 然而该系统中的各层智能体除能接收本地及其邻居智能体的信息外, 也能接收上层智能体信息。当能源互联网发生故障时, 通过不同层级间和同层级中多智能体间的协同合作实现系统的故障检测及自愈控制^[39-40]等。

另一类是根据能源互联网的运行状态及供能、储能、用能特性设计多智能体一致性协议, 利用系统内各智能体的反应性和进化性等行为特性, 调节各节点设备的关键参数, 保障能源互联网内广域分布式设备的正常运行, 保证能源互联网的能量平衡及输出高质量能量。该类分布式协同控制问题的核心是将系统内所有智能体看作同一组智能体, 设计多智能体一致性协议, 使得所有智能体向协作交互得出的方案同步, 最终运行于同一状态, 解决方案主要分为调节同步算法和追踪同步算

法^[41]. 调节同步算法(无领导者多智能体一致性问题)指的是所有智能体的状态同步到各智能体状态的平均值或者一个不可预测、不可控制的常数值,当能源互联网内负荷功率变化时,可应用调节同步算法设计多智能体一致性协议协同计算各分布式发电设备应承担的有功/无功功率,快速平抑网络内负荷功率波动,使能源互联网运行状态恢复正常^[42]. 追踪同步算法(有领导者多智能体一致性问题)指的是所有智能体的状态同步到一个作为命令发布者的领导者智能体的状态,其中邻居智能体间可以交互信息,领导者智能体只与系统中一部分智能体相连,主要被用于跟踪并控制互联分布式发电设备的电压/频率,实现分布式发电设备的有功/无功功率的输出调节^[43-45]及对冷、热、气等多种类能源资源间的能量转换调度管理^[23]等.

然而,当前对于能源互联网的分布式协同控制策略研究尚处于起步阶段,由于能源互联网内包含多种复杂能源网络,不同于传统电力系统中只有电能作为传输媒介的单一性,热、冷等均为能源互联网的能源传输媒介.能源传输媒介的多样性和可转换性使得针对能源互联网协同控制策略的研究更多关注于多能源网络间能源传输媒介的耦合性调度控制问题.由于能源互联网内对冷、热等能源形式的调度均体现出滞后性,使得能源互联网内多能源形式协同调度存在时空差异性,应更多侧重研究适用于能源互联网的多时间、空间尺度上的协同调度策略.该问题实质上是要在理论上研究一类考虑带有时变时滞的高阶、异构多智能体一致性问题,在解决这类问题时既要考虑高阶、异构多智能体的控制成本,又要考虑分析时变时滞系统所带来的保守性,向当前相关理论研究提出挑战.

3.2 能量优化调度管理

任何控制与决策问题本质上均可归结为优化问题^[46].解决被控系统优化问题的最终目标是实现被控系统的最优控制.最优化理论即为一门寻求最优决策的科学^[47],针对复杂环境下各种有组织系统的经营管理及生产调度问题进行研究,运用数学方法,依据某种指标求解问题的最佳途径及优化方案,进而实现被控系统的最优目标.最优化理论分支众多^[48-53],被广泛应用于解决复杂系统中资源规划配置^[54]、故障诊断^[55]等领域.

能源互联网的能量优化调度问题根本上是复杂网络有约束的规划问题,依据能源互联网的最优控制目标,遵循网络的某些物理约束,运用最优化方法制定能源互联网的最优运行模式.对应于能源互联网的能量供应侧和需求侧,能量优化调度问题被分为经济分配问题和需求响应问题.解决经济分配问

题的目的是如何根据能源互联网预测的能源生产和能源消费状况,制定各个能量供应者的出力分配方案,实现能源互联网的经济运行;解决需求响应问题的目的是如何根据能源互联网的能量消耗情况,考虑到网络内可调度负荷及不可调度负荷的分布情况,制定合理的投切负荷方案,保障能源互联网运行的社会效益最大化.

能量调度优化问题的传统解决方案大多是集中式优化方案,方案中需要设计一个能够处理海量数据的集中控制器,基于其获取的网络内各节点的信息,判断能源互联网内各节点设备的运行状况;依据能源互联网的最优运行目标,制定能量调度优化方案^[56],主要可归纳为分析法^[57-59]和启发式算法^[60-62]两类,可以在全局信息可知的情况下,得到最优的解决方案.然而,集中控制器的存在易使系统发生由于单点故障而导致全网瘫痪的连锁事故,且计算响应时间较长,因此针对能源互联网中分布式设备日益增多、通讯实时性差的情况,集中式优化方案存在明显的局限性.针对集中式优化方案存在的缺陷,有些研究者提出一类混杂式优化方案,将能源互联网能量调度优化过程中部分流程设计为分布式优化方案,但还需要设计一个集中控制器作为最终决策者,制定能源互联网的能量调度优化方案^[63].例如,尽管竞标过程是分布式控制,能量交易最终的市场价格仍由一个集中控制器根据系统内所有用户的能量需求状况最终决策^[64].然而,此类方法只是降低了系统出现单点故障的概率,一定程度上提高了系统的响应速率及算法的适用性,并没有从本质上解决问题.目前,学者们将能量调度优化问题的研究重心逐渐转移在分布式优化方案,主要通过多智能体系统中各个智能体的自治性及智能体间的协同性实现能源互联网的能量分布式优化调度.方案中将能源互联网内参与能量调度优化的设备看作智能体,每个智能体只与其邻居智能体交互信息,通过智能体间的协同合作,探求能源互联网能量调度的最优方案,并不需要任何集中控制器^[65-66].与带有集中控制器的优化方案相比,分布式优化方案的灵活性、可靠性、低成本、易实施等特性进一步降低了单点故障发生的概率,提高了算法的适用性.

随着能源互联网的发展,网络内部电力网络、天然气网络、交通网络等物理实体的逐渐增多导致系统变量更加混杂、能量调度优化问题的维数提高.电力网络等传统能源网络的互联使得能源互联网的网络结构日益复杂,进而导致能量调度优化问题的网络物理约束更多、耦合性更强;热能等能量传输媒介的加入使得网络内能量转换形式的种类增加,进而导致能量调度优化问题的模态增多、非分解性更强;

一次能源与可再生能源渗透率的提升进一步提高了能量调度优化问题的不连续性、不确定性, 能源互联网的复杂性为解决其能量调度优化问题增加了困难. 另一方面, 在理论上解决这类考虑多时滞、变拓扑结构的分布式耦合优化问题时, 如何利用并改进多智能体优化理论, 减少分布式控制器的计算量, 获得分布式系统耦合优化的最优解, 需要被重点关注.

3.3 能量转换控制

目前, 能源互联网能量转换控制技术的研究主要集中在电能与电能间相互转换和电能与其他能源间相互转换两个方面.

3.3.1 电能—电能转换技术

能源互联网的兴起促使能源路由器成为其核心设备, 包括 ABB、GE、ALSTOM、ETH、KTH、西门子等研发机构正投入大量资金和精力在能源路由器的研究中^[67]. 能源路由器的基本拓扑最早可追溯至 1968 年 McMurray 在其专利中提出的高频链 AC/AC 变换器^[68]. 1980 年, Brooks 等在其发明专利中提出了固态变压器的概念^[69]. 2010 年, Huang 等提出了能源互联网中能源路由器的概念, 明确了能源路由器在能源互联网中的核心地位^[3]. 该能源路由器以固态变压器为基本拓扑构成. 除能源互联网外, 以固态变压器为基础的能源路由器在轨道交通等领域也有广泛应用.

目前, 能源路由器的研究主要集中于拓扑与电气参数优化设计^[70]、暂态分析^[71]、调制策略^[72]、试验样机试制^[73]等方面. 对能源路由器路控制策略的研究还比较少. Ortiz 等研究了能源路由器中双向 DC/DC 直流链的建模^[74-75]. Zhang 等研究了固态变压器并联运行时抑制环流电流的控制策略和参数选择方法^[76], 分析了系统的小信号稳定性, 其功率控制仍基于下垂控制方法设计. Rodriguez-Bernuz 等研究了单相功率路由控制的试验效果^[77]. Kimball 等对能源路由器中直流链双有源变换器输出电压闭环控制策略进行了研究^[78], 提出采用带阻滤波器前馈补偿和比例谐振反馈两种策略改善控制器性能. 对于 DAB 输出电压的控制, Ge 等提出了采用电感能量变化前馈控制策略抑制负载突然启动时直流母线电压的跌落^[79]. Huang 等研究了基于模块化固态变压器级联的能源路由器的电压和功率平衡控制策略^[80-81]. She 等研究了能源路由器中 DC/DC 变换器的无电流传感器功率平衡控制策略^[82]. Hwang 等研究了基于 DSP 和 FPGA 的固态变压器分布式数字控制策略^[83]. 盛万兴等提出了一种基于虚拟电机的能源路由器控制方法^[84]. 以上研究主要集中于能源路由器本身的内部控制, 主要包括改善直流母线电压稳定性以及模块化并联变换器间的功率平衡分

配. 在系统集成方面, Huang 等研究了在微电网应用背景下固态变压器的系统集成及其分层功率控制策略^[85-86]. 以上文献中, 其控制策略主要是基于传统 PI 控制器和下垂控制器的各种改进. 在此基础上, 张化光等提出了下垂控制和数据驱动无模型自适应控制相结合的新型控制策略^[87].

对于能源路由器控制策略的研究, 未来应在以下方面进行深入研究:

1) 对于能源路由器本身的内部控制, 应研究更加先进的控制策略, 尝试将预测控制、鲁棒控制以及容错控制等先进控制方法引进来, 研究一些智能控制方法在能源路由器中的应用.

2) 由于能源互联网中, 将会有多个能源路由器投入运行, 为了使系统更加经济、安全地运行, 能源路由器间需要必要的协同. 因此, 除研究单个能源路由器的控制外, 应研究网络状态下多个能源路由器在不同运行目标下协调优化控制策略. 特别是研究基于多智能体理论和复杂网络理论的多能源路由器分布式协同控制.

3) 能源路由器除了控制功率的合理路由分配以外, 还有诸如智能故障监测、预警以及诊断定位等重要使命. 应在故障监测、预警控制等方面深入研究. 例如, 电压崩溃的评估、预警等.

总之, 能源路由器的研究, 目前的工作只是冰山一角, 还有许多工作需要深入研究.

3.3.2 其他能源转换技术

苏黎世联邦理工学院于 2007 年在“未来能源网络愿景”项目研究中首次提出了能量枢纽 (Energy hub) 的概念^[88]. 能量枢纽集成风、光、电、气等多种能源输入、冷热电等多种产品输出, 使不同形式能源在生产、传输、消费等多个环节进行协同优化, 实现优势互补, 有助于提升能源利用效率, 降低能源供应成本.

能量枢纽是描述能源生产商、能源消费者与能源运输基础设施间能量交换、耦合关系的多输入—多输出端口模型, 可将其看作广义网络节点, 负责能量的分配、转换与储存. 其内部装置的多样化可实现多种能源间的转换, 例如电能与电能间的转换 (通过变压器、整流器以及逆变器等)、天然气热电联产 (燃气轮机等)、电热转换 (电锅炉、中央空调等) 以及风、光等可再生能源的发电等. 根据能量枢纽各输入、输出功率, 能量的分配及转换效率情况建立起能量枢纽的数学模型^[89], 成为研究多能源系统的重要工具. 在此基础上, 对储能装置建模的加入, 完善了能量枢纽模型^[90], 新能源并网的建模, 实现了反向潮流的分析^[91]. 考虑到消费终端可以通过短期调节自身负荷达到与安置储能装置类似的效果, 将此

调节效应称为“需求响应”并实现了建模研究^[92]。

基于以上模型, 能源互联网中能量枢纽的研究可分为两类:

一类是能量枢纽的规划, 研究如何因地制宜地建设能量枢纽, 配置各规划时段能量枢纽内的能量转换及储存装置的容量和组合情况^[93-98], 提高经济效益. 能量枢纽规划问题的目标函数一般包括设备的投资成本及运维成本等, 系统约束来自设备容量及启停时间、资源约束等, 保证能量供需平衡, 系统安全稳定运行. 根据规划周期可分为短期规划和长期规划, 短期规划以日规划或月规划为主^[93], 长期规划则多达数年^[98]. 能量枢纽的规划可归纳为一个两层优化模型, 第一层是决定能源转化或储存设备的投建与否和容量大小. 规划模型中常用 0-1 变量来表示某个设备投入与否, 称之为“决策变量”; 第二层是典型日(年)的优化运行^[99].

另一类是能量枢纽的优化运行, 研究在现有能量枢纽结构下的多能源系统协同运行优化, 分为单个能量枢纽的优化运行、多个能量枢纽的优化运行. 单个能量枢纽的优化运行是根据某一能量枢纽内的设备配置及系统约束决定各时段的能源/能量输入功率, 其主要以电、气、热为主, 达到运行成本最低、碳排放量最小等目标^[100-102], 其中最为典型的是(冷)热电联产的优化调度^[103]. 除此之外, 新能源输入能量枢纽实现了能量反馈^[91, 101], 促进新能源消纳, 这也是能量枢纽的显著优点之一. 在此基础上, 综合考虑需求响应、电动汽车、可再生能源等的研究应运而生^[101, 104]. 多能量枢纽的优化运行中, 能量枢纽间通过电网、燃气网、供热网等相连, 研究其满足各网络约束的最优潮流^[105-107]. 多能量枢纽的研究对象小到居民用户间, 大到国家与国家间^[108], 多能量枢纽协调优化的目标也具有多样性, 例如总成本最低、促进新能源消纳等. 能量枢纽优化运行的求解方法多将优化模型近似为线性问题, 针对能量枢纽中能量转换装置效率的非线性以及来自系统约束的非线性问题, 提出了一些非线性系统求解方法^[109]. 除此之外, 针对能源实时价格、负荷变化等的不确定性, 应用了蒙特卡洛法、鲁棒优化算法等求解方法^[102, 110].

能源互联网的能量枢纽打破了原有各供能系统单独规划单独设计和独立运行的既有模式, 进行多能源系统的一体化规划设计和运行优化^[111]. 然而, 能量枢纽本身具有高度抽象性, 如何将各元件的特性合理协调地等效化是需要解决的重要问题之一. 且当前对能量枢纽的研究尚处于稳态建模阶段, 对能量枢纽中的动态过程欠缺考虑, 例如供热网络的延时、机组的稳定极限. 另外, 能量枢纽具有复杂的不确定性, 存在于各个环节, 针对这些不确定性因素

进行建模与研究将会使能量枢纽在多能源系统的应用分析中更加全面.

3.4 信息物理系统

信息物理系统 (Cyber-physical systems, CPS) 的概念由美国科学家 Helen Gill 于 2006 年在美国国家科学基金会上提出^[112], 可理解为是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统, 通过 3C (Computing, communication, control) 技术的有机融合与深度协作^[113], 实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务. 随着计算机与通信等技术的发展, CPS 与电力系统等多种系统的控制交叉, 所涉及研究方向多样, 如何更好地利用 CPS 解决相关实际系统优化控制等问题已成为焦点及难点.

CPS 可认为是多学科的融合, 涉及无线传感器网络 (Wireless sensor networks, WSN)、物联网 (Internet of things, IoT)、嵌入式系统等学科的紧密融合, 实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务^[114]. 能源互联网作为一个信息与物理高度融合的复杂网络, 其实际控制优化过程可理解为一个信息与物理的交互过程, 利用 CPS 相关研究成果可有效地实现能源互联网的优化控制. 在能源互联网的背景下, 研究信息物理融合系统, 可分为信息物理融合建模及优化控制和系统信息物理安全分析两类.

信息物理融合建模是信息物理系统的热点问题, 许多学者就信息物理系统模型的建立给出了自己的想法. 基于信息物理系统自动控制中的实时调度, Facchinetti 等建立了电力系统的实时模型^[115]; 孙宏斌在物理系统的视角上, 借鉴电力系统分析中“外网等值”的思想, 建立一个复杂信息网络在物理系统侧的“等值模型”, 并在此模型基础上评估了电力系统的安全性^[116]; Pasqualetti 等则从线性小信号角度出发, 将电力信息物理系统描述为一个动态线性化波动方程等^[117]. 这些文献推动了能源互联网信息物理模型的研究, 而网络的信息物理模型建立有利于实现能源互联网的网络优化控制. 在基于信息物理模型的网络优化控制方面研究以解决实际功能需求为主. Poor 团队讨论了智能电网背景下多播通信路在对信息物理系统分散控制中的应用^[118]; Ilic 等分析了信息物理能源系统中的传感与控制技术^[119].

能源互联网作为一个融合信息系统与物理能源系统的综合复杂网络, 其控制优化相对复杂, 且因其与互联网的相似性, 使得能源互联网信息物理安全将成为网络研究热点问题之一. 在信息物理系统中, 无论物理系统本身还是信息通信系统中的部件发生故障或被攻击^[120], 都可能导致这个系统的崩溃, 如 2015 年底乌克兰电力系统因遭受黑客攻击

导致的大规模停电事件^[121],这使得研究系统信息物理安全成为未来的研究热点之一。目前,德国研究者 Pasqualetti 等提出了一种基于几何最优原则的信息物理安全的跨层弹性控制理论方法^[122],并对信息物理系统中的攻击探测和识别进行了探讨^[117]。能源互联网的信息物理安全研究可基于这些研究实现,但同时也需要依据网络特性,对能源互联网中特定存在的网络安全问题进行分析。

能源互联网采用先进的信息和通信技术实现网络的能源优化配置,作为一个新兴能源系统,其中的信息技术与物理技术交互融合,既为能源互联网的发展提供了便利,也是其发展的挑战。在与能源互联网相关的信息技术研究中,如何建立一个反应信息物理交互影响的网络模型,基于此模型实现网络的优化控制等都将作为未来的研究难点,大量信息物理融合技术在能源互联网中的使用,使得能源互联网较传统能源网络存在更多安全隐患问题,这对能源互联网的系统安全性提出了挑战。

3.5 故障诊断及自愈控制

安全稳定运行是能源互联网构建的基础,因此,国内外相继展开了含分布式电源的能源系统故障诊断和自愈控制的研究^[123],其中能源互联网的故障诊断是通过系统信息,获得故障特征,发现故障元件,判定故障区域,进而为故障隔离、故障恢复和自愈控制打下基础。其中自愈控制的概念源于生物界,在系统理论中定义为系统的一种能够察觉自身状态,并在无人干预的情况下采取适当的措施以恢复常态的性质^[124]。在能源互联网中,相较于故障隔离和故障恢复,它更有利于快速寻找故障状态、异常情况和薄弱环节,诊断和消除故障元件,恢复能源系统的稳定^[125],是现代能源系统的主要特征。根据解决问题所建立的模型的不同,能源互联网中故障诊断与自愈控制可分为两类。

一类是根据能源互联网的物理模型建立的有模型故障诊断和自愈控制。有模型的故障诊断主要是基于解析模型的诊断方法^[126],该诊断方法是在对诊断规则进行解析化表达的基础上,通过构建一个反映保护装置实际动作状态与期望动作状态之间差异的目标函数,找到最能解释警报信息的故障元件的方法^[127],并利用解析算法或进化算法获得优化方案^[128-129]。有模型的自愈控制主要包括启发式方法和数学优化方法。启发式方法是一种从事物的变化规律中出发,模拟其变化过程,并将模拟量引入到求解的搜索过程中的方法^[130]。将启发式方法融入能源系统的自愈控制时,启发规则制定与算法目标能够很好地结合,并能利用电网的实际特点进行优化和加速求解,算法一般比较容易实现。数学优化方法是

一种首先将电力系统重构问题用数学模型进行描述,然后通过一定的算法求解,从而得到不依赖能源网初始结构的优化结果的方法^[131],实际的能源系统的恢复问题非常复杂,建立的数学模型不能考虑到所有方面,所以数学优化方法往往与启发式方法等结合使用。

另一类是基于数据的无模型故障诊断和自愈控制。无模型的故障诊断包括基于专家系统、人工神经网络、Petri 网等的诊断方法,其中基于专家系统的诊断方法是结合运行人员的经验,将其存储于知识库中,发生故障时,只需将调度中心采集到的警报信息与知识库中的规则进行匹配即可辨识出故障元件^[132];基于人工神经网络的诊断方法是首先从能源网络中提取出大量具有代表性的故障实例作为训练样本集,然后采用学习训练算法让神经网络通过对训练样本集的联想泛化获得对能源网络故障的诊断能力^[133];基于 Petri 网的诊断方法是一种离散事件图形化表示的因果推理方法^[134],更符合人类思维中模糊判断的模式。除此之外,针对复杂系统故障诊断产生的建模及推理的复杂、数据不足、领域知识及监测信息不完备等问题,还提出了基于因果网络的故障诊断方法^[135];针对间歇性故障,提出了动态系统间歇的故障诊断方法^[136-137],这些方法的发展为能源系统的故障诊断提供了更多的解决方案。而无模型的自愈控制主要包括人工智能方法,如为降低运营支出和提高服务质量模糊集法^[138]、降低通信带宽并丰富分布式数据的模拟退火^[139]以及拥有完整的网络可观测性的禁忌搜索法^[140]等的现代优化方法。

然而,当前对于能源互联网的故障诊断与自愈控制的研究还处于初级阶段,由于能源互联网具有分布式故障、大延时、信息采集量大、数据维度大、由电热强耦合所产生的不同时间尺度、由不同工作点所产生的非线性等特点,其可被等效为一类存在大量强非线性、多耦合变量的分布式系统的故障诊断和自愈控制问题,与传统集中式电力系统的故障诊断和自愈控制问题具有很大区别,故为探索适用于能源互联网的故障诊断理论和自愈控制策略造成了极大的困难。

3.6 市场贸易与竞价机制

在多能源互联的市场环境下,传统的自上而下的市场销售模型已经不能满足能源交易的需求。能源互联网中,基于价格响应的用户将由传统的单一消费模式转变为消费生产一体化的混合模式,能源的双向传输及存储多元化等因素使能源市场经济体系更加复杂化,用户之间不仅存在利益的冲突,还有相互作用的关系。有效的价格控制方法和竞价策略

是实现能源互联网能源交易的重要途径, 可以间接地解决能源互联网中的可再生能源并网、能源流动阻塞、能源分配及调度等问题^[18, 141]. 因此, 能源市场价格控制将是处理用户之间的利益冲突的重要手段. 目前能源市场价格控制根据竞价策略分为两类.

第一类是基于预测控制的竞价策略. 能源市场参与对市场出清价格 (Market clearing price, MCP) 的准确预测可以使其更可能完成能源交易. 然而, 由于 MCP 的预测不仅受到负荷的影响, 还受到其他参与者报价的影响, 在新能源参与生产的能源互联网中价格预测还会受到天气的影响, 因此 MCP 预测要比负荷预测考虑更多的因素, 面临更多的困难. 目前, 人工智能算法和时间序列算法被广泛应用到能源价格预测控制中^[142]. 在智能算法中, 人工神经网络、遗传算法和粒子群算法可以对能源价格进行预测控制, 通过神经网络可以预测出价格影响因素与价格之间的映射关系, 遗传算法和粒子群算法可以对价格预测的目标函数进行优化控制^[143-147]. 基于相似信息处理技术的人工神经网络可以减少预测误差^[145]. 为了避免传统的人工神经网络训练方法速度慢和局部最优解, 单隐层前馈神经网络学习可加快市场价格预测速度并得到全局最优^[146]. 通过混沌自适应粒子群优化算法被用来优化控制生产者各时段的竞价策略^[147]. 时间序列算法主要是通过对历史数据分析从而进行 MCP 预测. 为了提高时间序列的预测精度, 多变量稀疏化预测模型可以用来映射多元混沌时间序列的动力学特性^[148]. 根据输入信号特性和预测精度要求动态指导储备池神经元的稀疏连接, 一种基于小世界回声状态网的时间序列预测方法可以提高能源价格的预测精度, 缩短训练时间^[149]. 此外, 分布式系统协调预测控制^[150]、Boosting 增强学习法^[151]、双层 (稳态目标计算层和动态控制层) 结构预测控制算法^[152] 均可应用于能源价格预测中.

第二类是基于博弈思想的竞价策略. 该类报价方法主要是通过生产者和消费者之间进行价格博弈使双方利益最大化. 常用的博弈模型有 Cournot 模型^[153]、Bertrand 模型^[154]、Stackelberg 模型^[155]. 能源市场买卖双方的合作与竞争实质是一种对买卖双方的最优控制问题, 基于离散时间的非线性非零和微分对策可以对此类问题求解^[156]. 由于买方对能源需求大小不同, 能源供应者之间可以通过进行编队重构控制, 将其转变为纳什谈判过程, 进而实现互相支援和补充^[157]. 在市场价格和消费者价格响应不确定情况下, Stackelberg 零售市场模型可以用来确定零售价格和用户用电策略, 消费者根据零售商的价格策略来制定自身的消费策略, 进而使零售商和消费者的利益最优^[158]. 然而, 在含有大量的存储单

元的能源互联网中, 能源传输是双向的, 需要考虑含分布式存储单元的用户之间的非合作博弈^[159], 各存储单元所有者根据自身存储能源决定利益最大化的能源销售量. 对于此类不完全信息议价博弈模型, 单阶段偏离法则可以证明议价博弈将唯一地实现合并均衡^[160]. 针对小型能源供应商和用户^[161], 可以采用跨过零售商的直接交易模型保证市场价格的稳定性. 针对大型的能源区域互联的情况, 卖方可以根据自身能源存储情况制定交易策略, 买方根据卖方行为提交报价, 其能源交易量按比例分配给买方^[162], 还可以在能源分配过程中设置合理的服务费来权衡报价策略^[163]. 针对分时价格的时变性, 通过博弈策略可以更加灵活地控制能源价格, 参与者不仅可以进行小时竞价, 还可以进行不等时竞价^[164].

尽管上述研究均可用于能源互联网竞价控制策略中, 但由于能源互联网相关研究处于起步阶段, 还存在很多问题有待解决. 能源互联网中能源市场的扁平化结构将导致市场价格波动更加剧烈, 需要研究一种有效的控制策略使其稳定在合理范围内; 传输媒介的多样性使竞争更加激烈, 终端用户既是能源消费者又是潜在的能源生产者, 使得参与者需要一种最优的控制方法使自身利益最大化; 此外, 多种能源的互补性使市场竞价更加灵活, 导致能源互联网中存在多重价格标准, 能源储存单元和电动汽车的普及也增加了能源市场能源调度的难度, 进而影响整个能源市场竞争策略的优化控制. 因此, 设计一套灵活、完整、扁平化的市场交易机制, 以保证网络中能源供需平衡, 保障能源交易参与者的利益, 是能源互联网经济运行的前提. 能源互联网的市场竞价问题可被归纳为一类基于不完全信息的非合作博弈问题, 因此在理论上研究适用于解决带有强随机性、不确定性的非线性复杂系统的最优控制问题的动态博弈理论可以为探索适用于未来能源利用体系的参与者最优控制策略提供强有力的支持.

作为公认的环保、低碳的未来能源体系结构, 能源互联网中产能侧大规模可再生能源的接入导致网络中存在大量分布式设备, 并且异构能源传输媒介在调度中存在的时空差异性、非分解性与随机性, 使得研究适用于能源互联网的多时间、多空间尺度上的分布式协同控制理论以及高维度、强耦合的能量优化调度管理理论势在必行. 同时对能源互联网内能源路由器及能量枢纽等关键设备的研制及相关能量转换控制技术的研究为上述理论的实施奠定了基础. 作为深度融合信息网络与物理能源网络的新型复杂能源网络, 基于信息物理系统研究能源互联网的融合建模与信息安全问题为实现能量优化控制提供了保障; 对适用于能源互联网的非线性、大时滞、大维度的故障诊断及自愈控制技术的研究是能源互

联网安全稳定运行的保证. 考虑能源互联网中用户侧电动汽车等用户负荷的加入以及多种用户负荷用能需求的多样性, 对灵活、扁平化的市场贸易机制与竞价策略的研究也是影响能源互联网未来发展的重点. 虽然上述控制问题的研究侧重点不同, 但都是围绕实现能源互联网自适应最优控制而展开的关键内容, 是制约此次能源体系结构升级的瓶颈问题.

4 能源互联网面临的挑战与结束语

本文首先阐述了能源互联网的产生及发展历程, 从多维度论述了不同研究人员对于能源互联网的理解, 在与当前几个主要能源网络对比的基础上总结了能源互联网具有的特点, 提出了能源互联网的结构特征, 详细论述了能源互联网中的主要控制问题及相关解决策略. 与其他形式的能源网络相比, 其具有以下几个关键特征并由此对于控制科学与控制技术带来了新的挑战.

1) 能源互联网中将接入大量的各类可再生能源, 能源供给侧的不稳定将带来极大的不确定性、强非线性、时空不同步性等复杂特性, 而由于这些可再生能源的广域分布特性, 其信息通讯网络难以实现全连通, 网络具有复杂的时延、丢包等非可靠特性, 这对于当前的控制优化理论都是一个极大的挑战.

2) 能源互联网强调能源主体的分布式对等接入, 实现其即插即用, 各个能源主体具有极大的自治性, 而整个能源网络又在各类强约束下要有一个统一的调控目标, 这就要求系统能够实现分布式的优化控制, 这与传统能源网络的集中调控策略具有很大的区别, 也对控制方法提出了更高的要求.

3) 能源互联网包括能源供给侧、存储侧、传输侧、消费侧以及相关互联系统等多个来源的海量信息, 而且信息与能源紧密耦合, 如何利用并萃取这些信息, 进而获得对于能源互联网更清晰的认识, 并应用信息物理系统的相关技术进行综合的调控, 实现能源的安全高效利用, 是能源互联网面对的新课题.

4) 能源互联网是一个能源、设备、信息、经济深度融合的系统, 是物理空间、能源空间、信息空间乃至社会空间耦合的多域、多层次耦合的混杂大系统, 其具有更广阔的开放性和更大的系统复杂性, 呈现出复杂的、不同尺度的动态特性和演化趋势, 其周期规划问题将是一个必须面对的重要基础问题.

尽管能源互联网的发展面临着社会、经济、技术等多方面的问题, 但是, 能源互联网是人类对于能源循环利用和环境可持续发展的必然选择, 是由能源小范围生产消纳的自给自足模式, 到大规模生产/网络化传输的集中能源模式后的又一次重大变革, 其对于可再生能源的安全高效利用、综合多种能源形式的优化调度、信息与能源系统的紧密耦合以及扁

平化多方自由参与的能源交换模式无疑更符合未来的能源发展趋势, 也必将得到跃升式的发展.

References

- 1 Is energy internet the economic mode in future? [Online], available: <http://www.Cet.com.cn/nypd/yw/1354443.shtml>, October 30, 2014
- 2 The Economist. Building the energy internet [Online], available: <http://www.economist.com/node/2476988>, May 11, 2004
- 3 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, Zheng J P, Dale S J. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proceedings of the IEEE*, 2011, **99**(1): 133–148
- 4 Pasquale A, Michaela B. Finseny white paper [Online], available: <http://www.fi-ppp-finseny.eu/finseny-white-paper/>, April 24, 2012
- 5 Friedman T. *Hot, Flat, and Crowded: Why We Need a Green Revolution and How It Can Renew America*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2008.
- 6 Rifkin J. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: Palgrave MacMillan, 2011.
- 7 Cao Jun-Wei, Sun Jia-Ping. *Energy Internet and Energy Systems*. Beijing: China Electric Power Press, 2016. (曹军威, 孙嘉平. 能源互联网与能源系统. 北京: 中国电力出版社, 2016.)
- 8 Liu Zhen-Ya. *Global Energy Internet*. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (刘振亚. 全球能源互联网. 北京: 中国电力出版社, 2015.)
- 9 Promote the energy internet building [Online], available: <http://energy.people.com.cn/n1/2016/0303/c7166128168-200.html>, March 3, 2016
- 10 The government work report in 2015 [Online], available: <http://www.guancha.cn/politics/201503173125111.shtml>, March 17, 2015
- 11 Ci Song, Li Hong-Jia, Chen Xin, Wang Qiang-Wen. The cornerstone of energy internet: research and practice of distributed energy storage technology. *Science China: Information Sciences*, 2014, **44**(6): 762–773 (慈松, 李宏佳, 陈鑫, 王强文. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(6): 762–773)
- 12 Dong Chao-Yang, Zhao Jun-Hua, Wen Fu-Shuan, Xue Yu-Sheng. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, **38**(15): 1–11 (董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架. 电力系统自动化, 2014, **38**(15): 1–11)
- 13 Sun Qiu-Ye, Wang Bing-Yu, Huang Bo-Nan, Ma Da-Zhong. The optimization control and implementation for the special energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(18): 4571–4580 (孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 马大中. 狭义能源互联网优化控制框架及实现. 中国电机工程学报, 2015, **35**(18): 4571–4580)
- 14 The energy internet demonstration area construction in Lvliang [Online], available: <http://www.sx.xinhuanet.com/dfzx/2014-11/13/c1113227683.htm>, November 13, 2014

- 15 “Internet +” in Sichuan [Online], available: <http://www.wccdaily.com.cn/shtml/hxdsb/20150616/290936.shtml>, June 16, 2015
- 16 The demonstration area construction energy internet proposed by Xiexin [Online], available: <http://business.sohu.com/20151109/n425741299.shtml>, November 7, 2015
- 17 Yu Yi-Xin, Luan Wen-Peng. Smart grid and its implementations. *Proceedings of the CSEE*, 2009, **29**(34): 1–8 (余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评. 中国电机工程学报, 2009, **29**(34): 1–8)
- 18 Mei Sheng-Wei, Zhu Jian-Quan. Mathematical and control scientific issues of smart grid and its prospects. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 119–131 (梅生伟, 朱健全. 智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望. 自动化学报, 2013, **39**(2): 119–131)
- 19 Yang Xin-Fa, Su Jian, Lv Zhi-Peng, Liu Hai-Tao, Li Rui. Overview on micro-grid technology. *Proceedings of the CSEE*, 2014, **34**(1): 57–70 (杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 刘海涛, 李蕊. 微电网技术综述. 中国电机工程学报, 2014, **34**(1): 57–70)
- 20 Zeng Ming, Yang Yong-Qi, Liu Dun-Nan, Zeng Bo, Ouyang Shao-Jie, Lin Hai-Ying, Han Xu. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies. *Power System Technology*, 2016, **40**(1): 114–124 (曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 曾博, 欧阳邵杰, 林海英, 韩旭. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术. 电网技术, 2016, **40**(1): 114–124)
- 21 Liang H, Long W D. Future energy system in low-carbon community-energy internet. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*. Changsha, China: IEEE, 2011. 227–230
- 22 Favre-Perrod P. A vision of future energy networks. In: *Proceedings of the 2005 Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*. Durban, Africa: IEEE, 2005. 13–17
- 23 Sun Qiu-Ye, Teng Fei, Zhang Hua-Guang, Ma Da-Zhong. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(14): 3667–3677 (孙秋野, 滕菲, 张化光, 马大中. 能源互联网动态协调优化控制体系构建. 中国电机工程学报, 2015, **35**(14): 3667–3677)
- 24 Huang Ru, Ye Le, Liao Huai-Lin. Microelectronics technologies in renewable energy internet. *Science China: Information Sciences*, 2014, **44**(6): 728–742 (黄如, 叶乐, 廖怀林. 可再生能源互联网中的微电子技术. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(6): 728–742)
- 25 Zha Ya-Bing, Zhang Tao, Huang Zhuo, Zhang Yan, Liu Bao-Long, Huang Sheng-Jun. Analysis of energy internet key technologies. *Science China: Information Sciences*, 2014, **44**(6): 702–713 (查亚兵, 张涛, 黄卓, 张彦, 刘宝龙, 黄生俊. 能源互联网关键技术分析. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(6): 702–713)
- 26 Cao Jun-Wei, Meng Kun, Wang Ji-Ye, Yang Ming-Bo, Chen Zhen, Li Wen-Zhuo, Lin Chuang. An energy internet and energy routers. *Science China: Information Sciences*, 2014, **44**(6): 714–727 (曹军威, 孟坤, 王继业, 杨明博, 陈震, 李文焯, 林闯. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, **44**(6): 714–727)
- 27 Katz R H, Culler D E, Sanders S, Alspaugh S, Chen Y P, Dawson-Haggerty S, Dutta P, He M K, Jiang X F, Keys L, Krioukov A, Lutz K, Ortiz J, Mohan P, Reutzler E, Taneja J, Hsu J, Shankar S. An information-centric energy infrastructure: the Berkeley view. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2011, **1**(1): 7–22
- 28 Orecchini F, Santiangeli A. Beyond smart grids — the need of intelligent energy networks for a higher global efficiency through energy vectors integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, **36**(13): 8126–8133
- 29 Keshav S, Rosenberg C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, **41**(1): 109–114
- 30 Tsoukalas L H, Gao R. From smart grids to an energy internet: assumptions, architectures and requirements. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Nanjing, China: IEEE, 2008. 94–98
- 31 Cao J W, Yang M B. Energy internet-towards smart grid 2.0. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Networking and Distributed Computing*. Los Angeles, USA: IEEE, 2013. 105–110
- 32 Kolesnikov A, Veselov G. *Modern Applied Control Theory: Synergetic Approach in Control Theory*. Moscow-Taganrog: TSURE Press, 2000.
- 33 Wang Xing-Ping, Song Yan-Rong, Cheng Zhao-Lin. Exponential synchronization of time-varying linear multi-agent systems with switching topology. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(8): 1528–1532 (王兴平, 宋艳荣, 程兆林. 切换网络下时变线性多智能体系统的指数同步. 自动化学报, 2015, **41**(8): 1528–1532)
- 34 Zhou Feng, Wu Yan-Xuan. Consensus tracking algorithms with directed network. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 180–185 (周峰, 吴炎焜. 基于有向网络的一致性跟踪算法. 自动化学报, 2015, **41**(1): 180–185)
- 35 Chen Yang-Yang, Tian Yu-Ping. Directed coordinated control for multi-agent formation motion on a set of given curves. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(12): 1541–1549 (陈杨杨, 田玉平. 多智能体沿多条给定路径编队运动的有向协同控制. 自动化学报, 2009, **35**(12): 1541–1549)
- 36 Ren F H, Zhang M J, Sutanto D. A multi-agent solution to distribution system management by considering distributed generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(2): 1442–1451
- 37 Nordman M M, Lehtonen M. Distributed agent-based state estimation for electrical distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, **20**(2): 652–658
- 38 Nagata T, Sasaki H. A multi-agent approach to power system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, **17**(2): 457–462
- 39 Ren F H, Zhang M J, Soetanto D, Su X D. Conceptual design of a multi-agent system for interconnected power systems restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(2): 732–740
- 40 Teng F, Sun Q Y, Xie X P, Zhang H G, Ma D Z. A disaster-triggered life-support load restoration framework based on multi-agent consensus system. *Neurocomputing*, 2015, **170**: 339–352

- 41 Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, Guerrero J M. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(3): 3462–3470
- 42 Liu W, Gu W, Sheng W X, Meng X L, Wu Z J, Chen W. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, **5**(2): 446–456
- 43 Xin H, Lu Z, Qu Z, Gan D, Qi D. Cooperative control strategy for multiple photovoltaic generators in distribution networks. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(14): 1617–1629
- 44 Xin H H, Liu Y, Wang Z, Gan D Q, Yang T C. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, **4**(4): 985–993
- 45 Sun Q Y, Han R K, Zhang H G, Zhou J G, Guerrero J M. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the energy internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(6): 3006–3019
- 46 Xin Bin, Chen Jie, Peng Zhi-Hong. Intelligent optimized control: overview and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1831–1848
(辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1831–1848)
- 47 Xue Yi. *Optimization Theory and Method*. Beijing: Press Beijing University of Technology, 2001.
(薛毅. 最优化原理与方法. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.)
- 48 Zhang H G, Jiang H, Luo Y H, Xiao G Y. Data-driven optimal consensus control for discrete-time multi-agent systems with unknown dynamics using reinforcement learning method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2016.2542134
- 49 Zhang H G, Feng T, Yang G H, Liang H J. Distributed cooperative optimal control for multiagent systems on directed graphs: an inverse optimal approach. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, **45**(7): 1315–1326
- 50 Zhang H G, Feng T, Liang H J, Luo Y H. LQR-based optimal distributed cooperative design for linear discrete-time multiagent systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2490072
- 51 Yang Ruo-Li, Wu Cang-Pu. A novel neural network model for nonlinear programming. *Acta Automatica Sinica*, 1996, **22**(3): 293–300
(杨若黎, 吴沧浦. 一种新的非线性规划神经网络模型. 自动化学报, 1996, **22**(3): 293–300)
- 52 Yan Hong-Sen, Zhang Xiao-Dong. Optimal hierarchical stochastic production planning and control. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(1): 83–89
(严洪森, 张晓东. 最优递阶随机生产计划与控制. 自动化学报, 2002, **28**(1): 83–89)
- 53 Zhang Hua-Guang, Zhang Xin, Luo Yan-Hong, Yang Jun. An overview of research on adaptive dynamic programming. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 303–311
(张化光, 张欣, 罗艳红, 杨珺. 自适应动态规划综述. 自动化学报, 2013, **39**(4): 303–311)
- 54 Wei Zhong, Xu Xiao-Fei, Zhan De-Chen, Deng Sheng-Chun. Multi objective optimization model for collaborative multi-echelon inventory control in supply chain. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(2): 181–187
(卫忠, 徐晓飞, 战德臣, 邓胜春. 协同供应链多级库存控制的多目标优化模型及其求解方法. 自动化学报, 2007, **33**(2): 181–187)
- 55 Chen Jin-Shui, Sun You-Xian. A algorithm of fault detection for dynamic systems with bounded parameter perturbation based on quadratic programming. *Acta Automatica Sinica*, 1997, **23**(1): 77–80
(陈金水, 孙优贤. 系统存在参数摄动时基于二次规划的一种故障诊断算法. 自动化学报, 1997, **23**(1): 77–80)
- 56 Zhang W, Xu Y L, Liu W X, Zang C Z, Yu H B. Distributed online optimal energy management for smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, **11**(3): 717–727
- 57 Wood A J, Wollenberg B F. *Power Generation, Operation, and Control*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- 58 Lin C E, Chen S T, Huang C L. A direct Newton-Raphson economic dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, **7**(3): 1149–1154
- 59 Mohsenian-Rad A H, Leon-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, **1**(2): 120–133
- 60 Chiang C L. Genetic-based algorithm for power economic load dispatch. *IET Generation, Transmission, and Distribution*, 2007, **1**(2): 261–269
- 61 Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Evolutionary programming techniques for economic load dispatch. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003, **7**(1): 83–94
- 62 Kuo C C. A novel coding scheme for practical economic dispatch by modified particle swarm approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**(4): 1825–1835
- 63 Pantoja A, Quijano N. A population dynamics approach for the dispatch of distributed generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(10): 4559–4567
- 64 Saad W, Han Z, Poor H V, Basar T. Game-theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2012, **29**(5): 86–105
- 65 Zhang W, Liu W X, Wang X, Liu L M, Ferrese F. Online optimal generation control based on constrained distributed gradient algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, **30**(1): 35–45
- 66 Guo F H, Wen C Y, Mao J F, Song Y D. Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, **7**(3): 1572–1583
- 67 Kolar J W, Ortiz G. Solid-state transformers. In: Proceedings of the 2014 Plenary Session Presentation at the IEEE International Power Electronics and Applications Conference and Exhibition. Shanghai, China: IEEE, 2014. 5–8
- 68 McMurray W. Power Converter Circuits Having a High Frequency Link, U. S. Patent 3517300, April 1968.
- 69 Brooks J L, Staab R I, Bowers J C, Nienhaus H A. Solid State Regulated Power Transformer with Waveform Conditioning Capability, U. S. Patent 4347474, September 1980.

- 70 Blume S, Biela J. Optimal transformer design for ultraprecise solid state modulators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, **41**(10): 2691–2700
- 71 Bortis D, Biela J, Kolar J W. Transient behavior of solid-state modulators with matrix transformers. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, **38**(10): 2785–2792
- 72 She X, Huang A Q, Wang G Y. 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded seven-level converter in a solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**(12): 3778–3789
- 73 She X, Yu X W, Wang F, Huang A Q. Design and demonstration of a 3.6-kV-120-V/10-kVA solid-state transformer for smart grid application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(8): 3982–3996
- 74 Ortiz G, Uemura H, Bortis D, Kolar J W, Apeldoorn O. Modeling of soft-switching losses of IGBTs in high-power high-efficiency dual-active-bridge DC/DC converters. *IEEE Transactions on Electronics Devices*, 2013, **60**(2): 587–597
- 75 Martínez-Velasco J A, Alepuz S, González-Molina F, Martín-Arnedo J. Dynamic average modeling of a bidirectional solid state transformer for feasibility studies and real-time implementation. *Electric Power Systems Research*, 2014, **117**: 143–153
- 76 Zhang M R, Du Z C, Lin X Q, Chen J. Control strategy design and parameter selection for suppressing circulating current among SSTs in parallel. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(4): 1602–1609
- 77 Rodríguez-Bernuz J M, Prieto-Araujo E, Girbau-Llistuella F, Sumper A, Villafafila-Robles R, Vidal-Clos J A. Experimental validation of a single phase intelligent power router. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2015, **4**: 1–15
- 78 Qin H S, Kimball J W. Closed-loop control of DC-DC dual active bridge converters driving single-phase inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(2): 1006–1017
- 79 Ge J J, Zhao Z M, Yuan L Q, Lu T. Energy feed-forward and direct feed-forward control for solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, **30**(8): 4042–4047
- 80 Shi J J, Gou W, Yuan H, Zhao T F, Huang A Q. Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**(4): 1154–1166
- 81 Zhao T F, Wang G Y, Bhattacharya S, Huang A Q. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, **28**(4): 1523–1532
- 82 She X, Huang A Q, Ni X J. Current sensorless power balance strategy for DC/DC converters in a cascaded multi-level converter based solid state transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(1): 17–22
- 83 Hwang S H, Liu X H, Kim J M, Li H. Distributed digital control of modular-based solid-state transformer using DSP + FPGA. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, **60**(2): 670–680
- 84 Sheng Wan-Xing, Liu Hai-Tao, Zeng Zheng, Lv Zhi-Peng, Tan Qian, Duan Qing, Ran Li. An energy hub based on virtual-machine control. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(14): 3541–3550
(盛万兴, 刘海涛, 曾正, 吕志鹏, 谭睿, 段青, 冉立. 一种基于虚拟机控制的能量路由器. *中国电机工程学报*, 2015, **35**(14): 3541–3550)
- 85 Yu X W, She X, Ni X J, Huang A Q. System integration and hierarchical power management strategy for a solid-state transformer interfaced microgrid system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(8): 4414–4425
- 86 Yu X W, She X, Zhou X H, Huang A Q. Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**(2): 954–965
- 87 Zhang H G, Zhou J G, Sun Q Y, Guerrero J M, Ma D Z. Data-driven control for interlinked AC/DC microgrids via model-free adaptive control and dual-droop control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, DOI: 10.1109/TSG.2015.2500269
- 88 Geidl M, Koeppel G, Favre-Perrod P, Klockl B, Andersson G, Frohlich K. Energy hubs for the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, **5**(1): 24–30
- 89 Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, **22**(1): 145–155
- 90 Geidl M. Integrated Modeling and Optimization of Multi-Carrier Energy Systems [Ph. D. dissertation], Graz University of Technology, Zürich, 2007.
- 91 Schulze M, Friedrich L, Gautschi M. Modeling and optimization of renewables: applying the energy hub approach. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. Singapore, Singapore: IEEE, 2008. 83–88
- 92 Ahčin P, Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology*. Hangzhou, China: IEEE, 2010. 1–7
- 93 Geidl M, Andersson G. Optimal coupling of energy infrastructures. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne Power Technologies*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007. 1398–1403
- 94 Salimi M, Ghasemi H, Adelpour M, Vaez-Zadeh S. Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015, **9**(8): 695–707
- 95 Ren H B, Gao W J, Ruan Y J. Optimal sizing for residential CHP system. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(5–6): 514–523
- 96 Sheikhi A, Rayati M, Ranjbar A M. Energy hub optimal sizing in the smart grid; machine learning approach. In: *Proceedings of the 2015 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*. Washington, DC, USA: IEEE, 2015. 1–5
- 97 Kienzle F, Ahcin P, Andersson G. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, **2**(2): 194–202

- 98 Zhang X P, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, Abusorrah A. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(5): 2302–2311
- 99 Wang Yi, Zhang Ning, Kang Chong-Qing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(22): 5669–5681
(王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望. 中国电机工程学报, 2015, **35**(22): 5669–5681)
- 100 Shahmohammadi A, Dalvand M M, Ghazizadeh M S, Salemnia A. Energy hubs' structural and operational linear optimization with energy storage elements. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*. Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, 2011. 1–6
- 101 Pazouki S, Haghifam M R, Olamaei J. Economical scheduling of multi carrier energy systems integrating renewable, energy storage and demand response under energy hub approach. In: *Proceedings of the 2013 Smart Grid Conference*. Tehran, Iran: IEEE, 2013. 80–84
- 102 Parisio A, Del Vecchio C, Velotto G. Robust optimization of operations in energy hub. In: *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011. 4943–4948
- 103 Rastegar M, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. Home load management in a residential energy hub. *Electric Power Systems Research*, 2015, **119**: 322–328
- 104 Pazouki S, Haghifam M, Pazouki S. Short term economical scheduling in an energy hub by renewable and demand response. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2013. 1–6
- 105 Xu Xian-Dong, Jia Hong-Jie, Jin Xiao-Long, Yu Xiao-Dan, Mu Yun-Fei. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(14): 3634–3642
(徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 余晓丹, 穆云飞. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究. 中国电机工程学报, 2015, **35**(14): 3634–3642)
- 106 Shabanpour-Haghighi A, Seifi A R. Energy flow optimization in multicarrier systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, **11**(5): 1067–1077
- 107 Moeini-Aghtaie M, Dehghanian P, Fotuhi-Firuzabad M, Abbaspour A. Multiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, **5**(2): 699–708
- 108 Krause T, Kienzle F, Liu Y, Andersson G. Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Trondheim PowerTech*. Trondheim, Norway: IEEE, 2011. 1–7
- 109 Moeini-Aghtaie M, Abbaspour A, Fotuhi-Firuzabad M, Hajipour E. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(2): 707–716
- 110 Pazouki S, Haghifam M R, Moser A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2014, **61**: 335–345
- 111 Jia Hong-Jie, Wang Dan, Xu Xian-Dong, Yu Xiao-Dan. Research on some key problems related to integrated energy systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(7): 198–207
(贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 余晓丹. 区域综合能源系统若干问题研究. 电力系统自动化, 2015, **39**(7): 198–207)
- 112 Philip A, David B, Edward L, Martin T, Shyam S S. Cyber-Physical Systems [Online], available: <http://cyber-physicssystem.org/>, January 18, 2017
- 113 Wang Zhong-Jie, Xie Lu-Lu. Cyber-physical systems: a survey. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(10): 1157–1166
(王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述. 自动化学报, 2011, **37**(10): 1157–1166)
- 114 Wen Jing-Rong, Wu Mu-Qing, Su Jing-Fang. Cyber-physical system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(4): 507–517
(温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统. 自动化学报, 2012, **38**(4): 507–517)
- 115 Facchinetti T, Vedova M L D. Real-time modeling for direct load control in cyber-physical power systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, **7**(4): 689–698
- 116 Xin S J, Guo Q L, Sun H B, Zhang B M, Wang J H, Chen C. Cyber-physical modeling and cyber-contingency assessment of hierarchical control systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(5): 2375–2385
- 117 Pasqualetti F, Dörfler F, Bullo F. Attack detection and identification in cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, **58**(11): 2715–2729
- 118 Li H S, Lai L F, Poor H V. Multicast routing for decentralized control of cyber physical systems with an application in smart grid. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, **30**(6): 1097–1107
- 119 Ilic M D, Xie L, Khan U A, Moura J M F. Modeling of future cyber-physical energy systems for distributed sensing and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, **40**(4): 825–838
- 120 Sridhar S, Hahn A, Govindarasu M. Cyber-physical system security for the electric power grid. *Proceedings of the IEEE*, 2012, **100**(1): 210–224
- 121 Guo Qing-Lai, Xin Shu-Jun, Wang Jian-Hui, Sun Hong-Bin. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson from Ukraine's blackout. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, **40**(5): 145–147
(郭庆来, 辛蜀骏, 王剑辉, 孙宏斌. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估. 电力系统自动化, 2016, **40**(5): 145–147)
- 122 Pasqualetti F, Dorfler F, Bullo F. Control-theoretic methods for cyber-physical security: geometric principles for optimal cross-layer resilient control systems. *IEEE Control Systems*, 2015, **35**(1): 110–127
- 123 Zhou Zi-Guan, Bai Xiao-Min, Li Zai-Hua, Xu Jing, Li Xiao-Jun, Li Hui-Ling. Novel fault diagnosis approach of smart transmission grid based on knowledge grid technology. *Proceedings of the CSEE*, 2010, **30**(4): 8–15
(周子冠, 白晓民, 李再华, 许婧, 李晓珺, 李惠玲. 采用知识网格技术的智能输电网故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2010, **30**(4): 8–15)

- 124 Chen Xing-Ying, Gu Xin-Xin, Yu Kun, Liu Hao-Ming, Wang Ping. Architecture for self-healing control of urban power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, **33**(24): 38–42
(陈星莺, 顾欣欣, 余昆, 刘皓明, 王平. 城市电网自愈控制体系结构. *电力系统自动化*, 2009, **33**(24): 38–42)
- 125 Amin S M, Giacomoni A M. Smart grid, safe grid. *IEEE Power Energy Magazine*, 2012, **10**(1): 33–40
- 126 Guo W X, Wen F S, Ledwich G, Liao Z W, He X Z, Liang J H. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, **25**(3): 1393–1401
- 127 Lin X N, Ke S H, Li Z T, Weng H L, Han X H. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-tabu search. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, **25**(3): 1268–1274
- 128 Yao Jun-Feng, Mei Chi, Peng Xiao-Qi. The application research of the chaos genetic algorithm (CGA) and its evaluation of optimization efficiency. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(6): 935–942
(姚俊峰, 梅枳, 彭小奇. 混沌遗传算法 (CGA) 的应用研究及其优化效率评价. *自动化学报*, 2002, **28**(6): 935–942)
- 129 Wang Li-Fang, Zeng Jian-Chao. A cooperative evolutionary algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(4): 630–635
(王丽芳, 曾建潮. 基于微粒群算法与模拟退火算法的协同进化方法. *自动化学报*, 2006, **32**(4): 630–635)
- 130 Shahsavari A, Mazhari S M, Fereidunian A, Lesani H. Fault indicator deployment in distribution systems considering available control and protection devices: a multi-objective formulation approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, **29**(5): 2359–2369
- 131 Yao W, Chen X Q, Zhao Y, van Tooren M. Concurrent subspace width optimization method for RBF neural network modeling. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2012, **23**(2): 247–259
- 132 Cauvin, J M, Le Guillou C, Solaiman B, Robaszekiewicz M, Le Beux P, Roux C. Computer-assisted diagnosis system in digestive endoscopy. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2003, **7**(4): 256–262
- 133 Ye F M, Zhang Z B, Chakrabarty K, Gu X L. Board-level functional fault diagnosis using artificial neural networks, support-vector machines, and weighted-majority voting. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2013, **32**(5): 723–736
- 134 Wang L, Chen Q, Gao Z J, Niu L, Zhao Y S, Ma Z G, Wu D J. Knowledge representation and general Petri net models for power grid fault diagnosis. *IET Generation, Transmission, and Distribution*, 2015, **9**(9): 866–873
- 135 Dong Chun-Ling, Zhang Qin. Research on weighted logical inference for uncertain fault diagnosis. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(12): 2766–2781
(董春玲, 张勤. 用于不确定性故障诊断的权重逻辑推理算法研究. *自动化学报*, 2014, **40**(12): 2766–2781)
- 136 Zhou Dong-Hua, Shi Jian-Tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(2): 161–171
(周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述. *自动化学报*, 2014, **40**(2): 161–171)
- 137 Wang Jing, Hu Yi, Shi Hong-Bo. Fault detection for batch processes based on Gaussian mixture model. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(5): 899–905
(王静, 胡益, 侍洪波. 基于 GMM 的间歇过程故障检测. *自动化学报*, 2015, **41**(5): 899–905)
- 138 Khatib E J, Barco R, Gómez-Andrades A, Serrano I. Diagnosis based on genetic fuzzy algorithms for LTE self-healing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, **65**(3): 1639–1651
- 139 Zimmerman A T, Lynch J P. A parallel simulated annealing architecture for model updating in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(11): 1503–1510
- 140 Koutsoukis N C, Manousakis N M, Georgilakis P S, Korres G N. Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method. *IET Generation, Transmission, and Distribution*, 2013, **7**(4): 347–356
- 141 Bai Jian-Hua, Xin Song-Xu, Liu Jun, Zheng Kuan. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(14): 3699–3705
(白建华, 辛颂旭, 刘俊, 郑宽. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究. *中国电机工程学报*, 2015, **35**(14): 3699–3705)
- 142 Zhang Xian, Wang Xi-Fan. Review of the short-term electricity price forecasting. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, **30**(3): 92–101
(张显, 王锡凡. 短期电价预测综述. *电力系统自动化*, 2006, **30**(3): 92–101)
- 143 Zhong Wei-Cai, Liu Jing, Jiao Li-Cheng. Optimal approximation of linear systems by multi-agent genetic algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(6): 933–938
(钟伟才, 刘静, 焦李成. 多智能体遗传算法用于线性系统逼近. *自动化学报*, 2004, **30**(6): 933–938)
- 144 Zhou Xiao-Jun, Yang Chun-Hua, Gui Wei-Hua, Dong Tian-Xue. A particle swarm optimization algorithm with variable random functions and mutation. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1339–1347
(周晓君, 阳春华, 桂卫华, 董天雪. 带可随机函数和变异算子的粒子群优化算法. *自动化学报*, 2014, **40**(7): 1339–1347)
- 145 Mandal P, Senjyu T, Urasaki N, Funabashi T, Srivastava A K. A novel approach to forecast electricity price for PJM Using neural network and similar days method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, **22**(4): 2058–2065
- 146 Chen X, Dong Z Y, Meng K, Xu Y, Wong K P, Ngan H W. Electricity price forecasting with extreme learning machine and bootstrapping. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, **27**(4): 2055–2062
- 147 Bajpai P, Singh S N. Fuzzy adaptive particle swarm optimization for bidding strategy in uniform price spot market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, **22**(4): 2152–2160
- 148 Han Min, Xu Mei-Ling, Ren Wei-Jie. Research on multivariate chaotic time series prediction using mRSM model. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 822–829
(韩敏, 许美玲, 任伟杰. 多元混沌时间序列的相关状态机预测模型研究. *自动化学报*, 2014, **40**(5): 822–829)
- 149 Lun Shu-Xian, Lin Jian, Yao Xian-Shuang. Time series prediction with an improved echo state network using small world network. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(9): 1669–1679
(伦淑娴, 林健, 姚显双. 基于小世界回声状态网的时间序列预测. *自动化学报*, 2015, **41**(9): 1669–1679)

- 150 Cao Ying, Miao Qi-Guang, Liu Jia-Chen, Gao Lin. Advance and prospects of AdaBoost algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 745–758
(曹莹, 苗启广, 刘家辰, 高琳. AdaBoost 算法研究进展与展望. 自动化学报, 2013, **39**(6): 745–758)
- 151 Ru Chang-Jian, Wei Rui-Xuan, Dai Jing, Shen Dong, Zhang Li-Peng. Autonomous reconfiguration control method for UAV's formation based on Nash bargain. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1349–1359
(茹常剑, 魏瑞轩, 戴静, 沈东, 张立鹏. 基于纳什议价价的无人机编队自主重构控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1349–1359)
- 152 Zheng Yi, Li Shao-Yuan. Networked cooperative distributed model predictive control for dynamic coupling systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1778–1786
(郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1778–1786)
- 153 Barroso L A, Carneiro R D, Granville S, Pereira M V, Fampa M H C. Nash equilibrium in strategic bidding: a binary expansion approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, **21**(2): 629–638
- 154 Molina J P, Zolezzi J M, Contreras J, Rudnick H, Reveco M J. Nash-Cournot equilibria in hydrothermal electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, **26**(3): 1089–1101
- 155 Belgana A, Rimal B P, Maier M. Open energy market strategies in microgrids: a Stackelberg game approach based on a hybrid multiobjective evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(3): 1243–1252
- 156 Tan Fu-Xiao, Liu De-Rong, Guan Xin-Ping, Luo Bin. Review and perspective of nonlinear systems control based on differential games. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(1): 1–15
(谭拂晓, 刘德荣, 关新平, 罗斌. 基于微分对策理论的非线性控制回顾与展望. 自动化学报, 2014, **40**(1): 1–15)
- 157 Pan Hong-Guang, Gao Hai-Nan, Sun Yao, Zhang Ying, Ding Bao-Cang. The algorithm and software implementation for double-layered model predictive control based on multi-priority rank steady-state optimization. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(3): 405–414
(潘红光, 高海南, 孙耀, 张英, 丁宝苍. 基于多优先级稳态优化的双层结构预测控制算法及软件实现. 自动化学报, 2014, **40**(3): 405–414)
- 158 Wei W, Liu F, Mei S W. Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, **6**(3): 1364–1374
- 159 Wang Y P, Saad W, Han Z, Poor H V, Başar T. A game-theoretic approach to energy trading in the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, **5**(3): 1439–1450
- 160 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Sequential equilibrium analysis and computational experiments of a Bargaining game with incomplete information. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(5): 724–734
(袁勇, 王飞跃. 不完全信息议价博弈的序贯均衡分析与计算实验. 自动化学报, 2016, **42**(5): 724–734)
- 161 Lee W, Xiang L, Schober R, Wong V W S. Direct electricity trading in smart grid: a Coalitional game analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, **32**(7): 1398–1411
- 162 Lee J, Guo J, Choi J K, Zukerman M. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6): 3524–3533
- 163 Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, Huang Xiu-Qiong. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(4): 848–857
(赵敏, 沈沉, 刘锋, 黄秀琼. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究. 中国电机工程学报, 2015, **35**(4): 848–857)
- 164 Yang P, Tang G G, Nehorai A. A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, **28**(2): 884–892



孙秋野 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为网络控制技术, 分布式控制技术, 分布式优化分析及其在能源互联网, 微网, 配电网等领域相关应用. 本文通信作者.

E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn

(**SUN Qiu-Ye** Professor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers network control technology, distributed control technology, distributed optimization analysis and various applications in energy internet, microgrid, power distribution network. Corresponding author of this paper.)



滕菲 东北大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为分布式控制技术及其在能源互联网, 微网, 配电网等领域相关应用.

E-mail: brenda.teng@163.com

(**TENG Fei** Ph.D. candidate at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. Her research interest covers distributed control technology and its various applications in energy internet, microgrid, power distribution network.)



张化光 东北大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为自适应动态规划, 模糊控制, 网络控制, 混沌控制.

E-mail: zhanghuaguang@mail.neu.edu.cn

(**ZHANG Hua-Guang** Professor at the School of Information Science and Engineering, Northeastern University. His research interest covers adaptive dynamic programming, fuzzy control, network control, and chaos control.)