

# 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战

艾 芊, 郝 然

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240)

**摘要:** 有效能源的获取、转换、控制和利用是现代人类文明的核心, 能源互联网作为能源系统的新一代革新, 将分布式能量转化、存储装置和各类型负荷构成的冷、热、电、气等能源节点连接起来, 以实现多种能量双向互补与集成优化。文中选取能源互联网在多能互补集成优化方面的关键技术为研究对象。首先, 总结了近年来能源互补集成的研究现状。然后, 以多能流混合建模为基础, 对多能系统规划、智能调控、协同控制与互动、综合评估、系统信息安全与通信及能源交易和商业服务运行模式等关键技术和挑战进行归纳。最后, 对未来能源系统在多能互补优化方面的研究进行展望, 以期多能互补、集成优化提供部分研究思路。

**关键词:** 多能互补; 集成优化; 协调互动; 区域综合能源系统

## 0 引言

能源是社会和经济发展的动力和基础。由于传统化石能源日益枯竭, 提高能源利用效率、开发新能源、加强可再生能源的综合利用成为解决社会经济发展过程中的能源需求增长与能源紧缺之间矛盾的必然选择。2015年国家发改委、能源局在促进智能电网发展的指导意见中明确提出“加强能源互联, 促进多种能源优化互补”<sup>[1]</sup>。

由于不同能源系统发展的差异, 供能往往都是单独规划、单独设计、独立运行, 彼此间缺乏协调, 由此造成了能源利用率低、供能系统整体安全性和自愈能力不强等问题。

多能互补并非一个全新的概念, 在能源领域中, 长期存在着不同能源形式协同优化的情况, 几乎每一种能源在其利用过程中, 都需借助多种能源的转换才能实现高效利用。而集成优化是在能源系统源-网-荷-储纵向优化的基础上, 通过能源耦合关系对多种供能系统进行横向上的协调优化, 其目的是实现能源的梯级利用和协同调度, 为解决上述问题提供了新思路。

随着分布式发电供能技术, 能源系统监视、控制和管理技术, 以及新的能源交易方式的快速发展和

广泛应用, 能源耦合紧密, 互补互济。区域综合能源系统作为多能互补在区域供能系统完整的功能实现单元, 是本文的主要研究对象, 其多种能源的源、网、荷深度融合、紧密互动对系统分析、设计、运行提出了新的要求。区域综合能源系统一般涵盖集成的供电、供气、供暖、供冷、供氢和电气化交通等能源系统, 以及相关的通信和信息基础设施。传统的能源系统相互独立的运行模式无法适应区域综合能源系统多能互补的能源生产和利用方式, 在能量生产、传输、存储和管理的各个方面, 都需要以考虑运用系统化、集成化和精细化的方法来分析整个能源系统, 进而提高系统鲁棒性和用能效率, 并显著降低用能价格。

在能源消费终端, 多能市场是相互联系的各类市场的有机整体, 具有信息反馈、资源配置、多元化用能服务和利益均衡的功能。为分析基于政策的能源市场设计和市场分析, 达到能源的供需均衡, 能源市场应是以物理系统为建模基础、以最大经济性为驱动的动态线性能源模型, 可对多能互补系统中多种能源生产、传输、转换、消费及收益均衡环节进行描述。博弈论模型<sup>[2]</sup>、系统动力学模型<sup>[3]</sup>、多代理仿真模型<sup>[4]</sup>等被广泛应用于能源市场分析。

为进一步提高用能效率, 促进多种新能源的规模化利用, 多种能源的源、网、荷深度融合、紧密互动又是未来能源系统发展的必然趋势, 据此, 多能互补协同优化研究具有前瞻性和巨大的工程应用价值。

本文以多能互补集成优化方面的关键技术为研究对象, 首先, 归纳总结了近年来能源互补集成的研究现状。然后, 通过多能流混合建模, 对多能系统规

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-12-22。

上网日期: 2018-01-16。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901304); 国家自然科学基金资助项目(51577115); 国家自然科学基金委员会-国家电网公司联合基金资助项目(U1766207)。

划、智能调控、协同控制与互动、综合评估、系统信息安全与通信及能源交易和商业服务运行模式等关键问题进行总结与归纳。最后,提供一种多能系统分析的思路,并对多能互补的研究进行展望。

## 1 国内外相关研究与实践

多能互补、集成优化系统相关技术一直受到世界各国的重视,不同国家往往结合自身需求和特点,各自制定适合自身的综合能源发展战略。国内外专家学者也进行了大量研究。

瑞士联邦理工学院的 Geidl 和 Andersson 在文献[5]中首次给出了能量枢纽(energy hub, EH)的概念[6],其概念和模型应用到欧盟的 EPIC-HUB 项目中。作为多种能源和负荷需求的能源转换单元,可为不同场景下的能源输入输出提供接口,并量化表征系统能量转化关系,通过管理多种能源的消费与供应的转化关系,实现能源间的综合优化。

在此基础上,文献[7-9]综合分析了热/电/气系统的运行与协同调度问题。文献[7]中的 EH 将区域内的燃气锅炉、热电联产(CHP)技术和电力变压器等元件统一建模为具有固定转化特性的中间元件;文献[9]分析了过量风电转换为热能的调度方法和技术手段,方案促进了风能的消纳能力,提高了风电场的经济效益。

随着能量需求呈现多样化和分布化趋势,以多能互补为中心的理论研究和工程实践也在国外率先展开。英国曼彻斯特大学最先于当地区域综合能源系统开发了电/热/气系统与用户交互平台,该平台整合了用能模式、节能策略和需求响应 3 个功能。欧盟资助的智能电网综合研究计划 ELECTRA<sup>[10]</sup>致力于 2030 年未来高可再生能源系统的协同运行,利用自治网元实现分布式多能源互联。德国亚琛大学和德国联邦经济和环境部通过需求管理实现了智能电表 Smart Watts 项目<sup>[7]</sup>和 E-Energy 项目<sup>[11]</sup>,旨在能量流、信息流与资金流的高度融合,推动能量服务的电子商务化,其成果在德国朗根费尔德成功落地。欧盟确立了其 2050 电力生产无碳化发展目标并发布了欧盟电网计划新版路线图,致力于融合各国能源系统构建跨欧洲的搞笑能源系统<sup>[12]</sup>。日本早在 2010 年就成立了日本智能社区联盟,致力于智能社区技术的研究与覆盖全国的综合能源系统示范<sup>[13]</sup>。

在国内多能互补的研究实践中,广州明珠工业区结合城市电网未来发展方向和技术需求,通过冷/热/电/气系统优化提高能源综合利用率,积极打造可再生能源大规模就地消纳智能工业示范园。北京市延庆县“城市能源互联网”综合示范工程<sup>[14]</sup>旨在

建设支撑高渗透率新能源充分消纳的区域能源系统。雄安新区多能互补工程的特点在于对地热能的梯级利用,以中深层地热为主,浅层地热、再生水余热、垃圾发电余热为辅,提出了考虑燃气等能源为补充的“地热+”多能互补方案<sup>[15]</sup>。张家口张北风光热储输多能互补示范是国家电网公司建设坚强智能电网首批重点工程<sup>[16]</sup>,综合运用多种储能和光热发电技术,开创了规模化多能互补发电的先例。

然而在实践和研究过程中,各子系统通过大量的异质元件耦合,耦合元件在不同的管理模式、运行场景和控制策略下相互影响,呈现不同的电气、热力、水力特性,对所耦合的能源系统产生强烈的非线性、不确定的影响,多能系统无论在科学研究还是工程应用方面仍面临着巨大的挑战<sup>[17]</sup>。

## 2 多能互补、集成优化关键技术

近年来,多能互补、集成优化能源系统成为项目实践中和理论研究的焦点,其中的关键问题包含的几个方面可归纳为图 1。多能流混合建模作为不同能源系统的统一描述,是多能系统规划、调度、控制和互动的研究基础;多能源流综合评估依据多能流模型特性为规划和运行优化提供目标集;多能流交易、商业运营模式作为系统的上层规则设计,为运行优化提供多元驱动力;而多能融合信息系统为多元定制化能源交易提供支撑平台,信息系统的安全问题也是评估系统可靠性和安全性的重要依据。

### 2.1 多能流混合建模

多个能源系统混合建模描述了各个能源系统运行和互补转化特性。混合建模作为多能互补系统的统一描述是集成优化和其他关键技术的基础。

#### 1) 静态 EH 模型

EH 模型反映了能量系统间的静态转化关系。大量相关研究已用于含有冷、热、电、气系统的耦合关系描述,并被广泛应用于各类综合能源系统相关研究中。如文献[18-19]引入 EH 的概念以刻画综合能源系统中电、气、冷、热等不同形式能源的耦合关系,该模型反映了能源在传输和转换环节的静态关系,而无法描述能源系统内复杂的动态行为。

EH 可等效为某一区域的能源多输入多输出的转化结构, $C$  为能量转换矩阵,其中每一个耦合系数代表某种能源与负荷对应的转化关系;输入变量一般为能源向量  $P = [P_a, P_b, \dots, P_n]^T$ ,表示所有输入该区域的能源;输出变量一般为负荷向量  $L = [L_a, L_b, \dots, L_n]^T$ ,表示该区域所有终端的负荷;其多输入多输出的功率转换公式如下:

$$L = CP \quad (1)$$

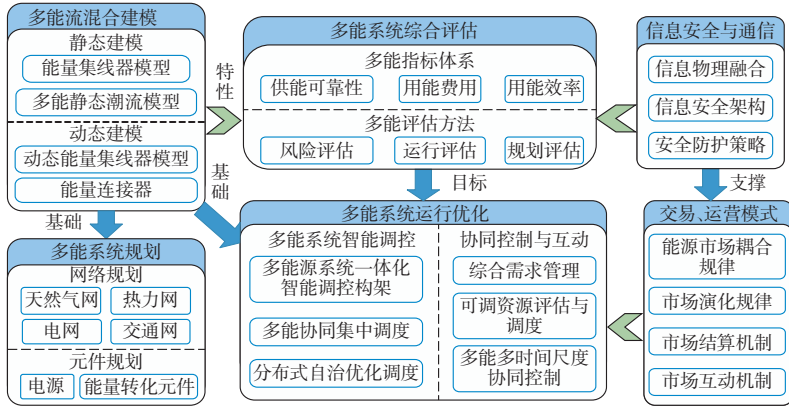


图1 多能互补、集成优化研究关系图

Fig.1 Research diagram of multi-energy complementarity and integrated optimization

$$C = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ba} & \dots & C_{na} \\ C_{ab} & C_{bb} & \dots & C_{nb} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{an} & C_{bn} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_{ij} = \sum_{n=1}^N (v_{i,n}(t) \prod_{m=1}^M \eta_{n,m}^j(\Theta, t)) \quad (3)$$

式中： $C_{ij}$ 为*i*种能源与*j*类负荷的耦合系数，其由转化机组特性和调度参数决定，可统一为式(3)； $v_{i,n}(t)$ 为调度参数，表示*i*能源在*n*机组的分配系数； $\eta_{n,m}^j(\Theta, t)$ 为能源转化机组*n*在*m*环节生产负荷*j*的转化效率，其与机组运行参数集合 $\Theta$ 和时间*t*有关。

EH对不同能流载体之间的功率转换关系建立了相应的耦合矩阵，从协同理论的角度看，冗余的能流路径为协同优化提供了空间，系统优化的目的即是在系统约束下搜索最优的耦合矩阵。

2) 多能稳态混合潮流模型

无论是在规划还是调度运行中，能流计算作为静态能源传输模型，一直是多能系统的静态分析的一个关键问题。一般采用改进的EH模型，考虑耦合单元作为平衡节点对于电力网络和天然气网络潮流的影响，形成该系统适用的潮流求解算法。

电力、热力和天然气系统为典型场景的多能互补静态混合潮流模型一般表述形式为<sup>[1]</sup>：

$$\begin{cases} 0 = G(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ 0 = F(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ 0 = H(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \\ 0 = E_H(x_e, x_g, x_h, x_{eh}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $x_e, x_g, x_h, x_{eh}$ 分别为电力系统、天然气系统、热力系统和能量枢纽变量； $F(\cdot)$ 为电力潮流方程； $G(\cdot)$ 为天然气系统代数方程，包括压缩机方程、支路流量方程和压力回路方程； $H(\cdot)$ 为热力系统，包括热功率计算方程、节点流量方程、压力回路方程和

节点温度混合方程等； $E_H$ 为EH输入输出转化方程组。

相应的研究可分为统一求解法和解耦求解法两类。采用统一求解法时，需要建立多能源潮流系统的混合模型，在统一的框架下建立多个能网状态的潮流方程，最后对系统混合潮流进行求解，在算法求解方面要求较高。文献[20]考虑不同能源之间的复杂耦合关系，建立多能流系统综合潮流模型。文献[21]在混合潮流模型的基础上设计了扩展Newton-Raphson算法。而解耦求解法需分析不同模式下多个系统的耦合关系，将电力潮流与天然气及热力系统解耦计算，因此可以在原有独立的潮流计算模块上增加电/气/热耦合分析模块来实现，计算难度较小。

结合静态EH和稳态混合潮流模型，多能系统建模方案如图2所示。

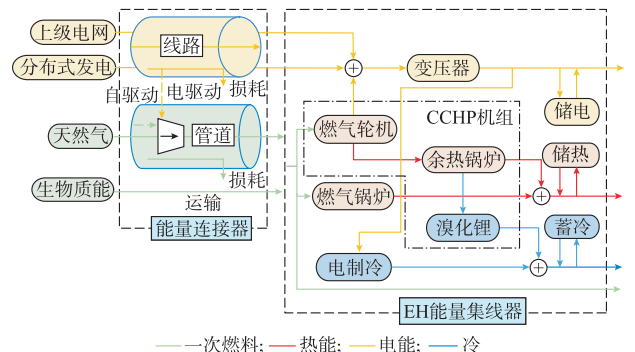


图2 多能流稳态建模方案

Fig.2 Steady-state modeling scheme of multi-energy flow

3) 多能互补动态建模

多能互补动态模型一般包括动态EH和动态能量连接器模型，分别描述转换机组和能流传输的动态特性。动态EH在静态模型的基础上，考虑能量转换机组在状态切换时的动态特性；动态能源连接

器描述了电能、液态工质或气态燃料输送环节的静态特征和动态变化规律,研究两端传递和协调反馈环节,对多个能源输送环节进行统一和协调控制<sup>[19-20]</sup>。

综上,在多能互补静态转化和潮流建模方面较为成熟,部分研究考虑了多能流网络约束。但是,对多能流、多时间尺度动态特性研究较为薄弱<sup>[22]</sup>,缺乏对传输和转化过程的动态描述,尚未形成成熟的建模方法。

## 2.2 多能流系统规划

区域级多能流系统的规划是基于多种能流负荷长期预测的基础上,既需要考虑 CHP 机组、电转气(P2G)装置等能量转化装置的选址、定容,也需要规划相应的电、气、热网。规划主问题是对区域综合能源系统进行拓扑结构的优化,子问题是根据规划区内部冷、热、电、气负荷预测值和已有的多能流供能网络,依据典型日优化调度策略对 CHP 机组、P2G 装置和燃气锅炉等供能设备进行选址、定容,并适当配置储热、蓄冷、储气和储电等设备。子问题设备配置方法确定后,根据运行调度结果对配套的配电网、天然气管网进行混合潮流校验,如不满足则需适当扩建线路、管道。

对于多能互补的协同规划,规划场景构建与预测较传统电力系统规划更加复杂。文献<sup>[23]</sup>建立多阶段下多能流源、网及能量转化原件的联合规划模型,并通过混合潮流计算校验规划方案的安全性和可行性。文献<sup>[24]</sup>构建了包含 CHP 机组和 P2G 装置的综合能源系统的非线性模型并进行线性化处理,以该模型为基础对系统进行优化规划,同时对规划方案的可靠性和电转气厂站消纳可再生能源的效益进行了评估。文献<sup>[25]</sup>采用两阶段规划模型,在第 1 阶段,采用多目标遗传算法进行系统的结构优化;第 2 阶段,用混合整数规划方法求解系统最优运行问题。另外,随着能源交易服务方式的改革,调度和日前市场中负荷预测、燃料费用等不确定性因素带来的风险也越来越多地考虑在规划中<sup>[26-27]</sup>。

综合政策、市场等重要信息,构建基于数据分析的规划场景,依据源荷互补特性划分互动集群,基于分解协调思想实现互动集群和互济网络的协同优化规划。在各场景中,通过冷、热、电负荷需求和不确定性分析用能需求的时空分布,考虑多能流潮流和系统及能量转换能力,优化规划多能源网和能量转化元件。

综上,现阶段多能互补规划已经形成一套较为成熟的规划方法。然而,相关研究的规划对象多集中于源网荷,较少涉及多种储能的配置方法。并且,

在不确定性分析、多时间常数系统建模、多能源系统可靠性分析及能源市场的影响还有待进一步研究<sup>[28]</sup>。

## 2.3 多能系统智能调控

从系统的角度看,耦合不同的能量载体相对于常规的解耦能量供应系统显示出许多潜在的优点,冗余的能流路径提供一定程度的自由度为多能系统智能调控提供了空间。从调控主体分类,区域综合能源系统智能调控又可分为园区和用户内部智能调控。

### 1) 园区多能流智能调控

园区调度中心通过能量系统互联互通,改善不同能源在不同供需背景下的时空不平衡,实现降低系统用能成本、提高用能的效率及增强系统供能可靠性的目标。同时,这也使得协同优化问题的规模和求解难度也不断提高,设计易于实施且优化效果明显的运行策略一直是国内外的研究热点<sup>[29]</sup>。

多能互补的协同优化调度是多能系统规划和市场互动博弈的基础。通过多个系统的协同合作,实现区域系统的经济和能效目标,并促进区域新能源的大规模消纳。相反的,系统的耦合在取得互补增益的同时,故障后发生的影响范围和影响程度也会扩大,特别是对于不同时间尺度的系统来说,很容易发生连锁故障,因而对园区系统安全调控提出了新要求,电力系统在线安全分析和控制比较成熟,而对供热、冷、天然气及多能流故障交互影响的研究相对薄弱。

### 2) 用户多能流智能调控

用户侧的分布式电源、储能设备将在需求响应下得到更广泛的应用,冷、热、电、气多种能源形式在用能端的交叉耦合也将更为紧密,为用户参与区域综合能源系统智能调控提供物质基础。“以用户为中心”的概念被越来越多地应用于系统建设中,未来的综合能源系统能流传输不再是由供能服务商到用户的单向流动,能源用户也由单一的消费者转变为能源消费者和服务商,传统能源系统中供给者、消费者的概念被淡化,取而代之的是综合能源系统供需双侧的智能交互。文献<sup>[30]</sup>通过对家用电器运行特性的分析建立混合能源协同控制的智能家庭能源优化控制模型;文献<sup>[31]</sup>考虑电热不同的时间尺度,研究了分时电价下用户电、热、冷、气的优化问题及能流耦合对负荷峰值的影响;文献<sup>[32]</sup>对楼宇多能系统用户最优调度和评估方法进行了深入研究。然而,以上大部分的用户多能流智能调控研究单纯从自身的利益出发,未充分考虑与多能源系统的交互,且主要面向稳态问题。

## 2.4 多能系统协同控制与互动

### 1) 多能系统协同控制

随着能源系统向着分布式的方向发展,多代理系统(MAS)的控制框架越来越多地应用到多能互补控制架构<sup>[33]</sup>,如图3所示。结合“弱中心化”的思想,在Web-of-Cell体系中,未来的电网被划分为许多被定义为互联的源、荷、储的灵活组合的Cell,每个Cell在一定的电气或地理边界范围内都具有自治性,通过和邻近个体的通信,一致性协调不同能源系统分布式个体,最终完成多能系统的稳定和精确控制<sup>[34]</sup>。

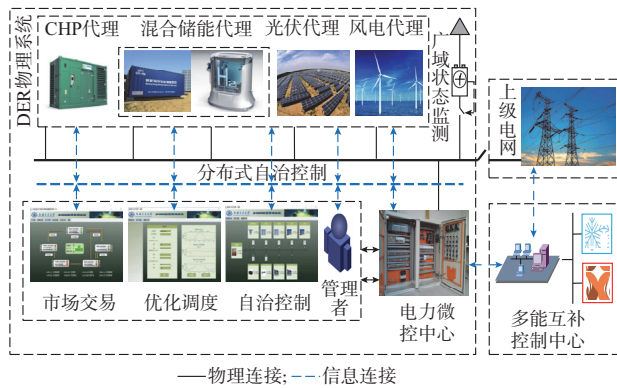


图3 基于MAS的多能互补控制框架

Fig.3 Control framework of multi-energy complementarity based on MAS

现阶段,电力系统源-网-荷-储纵向的协同控制的研究较为领先,但多能系统间的横向协同控制方法的研究还处于起步阶段,多种能源设备调节速度差异导致难以有机配合。需要根据多能流动态特性和相互作用,进而提出最佳时间尺度配合的智能调控方法。

### 2) 考虑用能替代的综合需求响应

多能互补系统用户参与需求响应,响应手段不仅限于传统电能的削减和在时间上的平移,在传统需求响应调度的基础上,将用户对冷、热、电等多种能源的需求纳入广义需求侧资源的范畴中。另外,用能替代正逐渐成为综合需求响应的一个重要方式,能量的替代使用可降低用户侧的用能成本,在满足用能需求的前提下响应各个能源系统的调度期望,可观的响应收益为用户相应行为提供充足的驱动力。

多能互补系统中能量转化设备运营商也可参与需求响应,考虑多种能源在价格、转化方法、需求特性上的异质性和能量转化设备(如热电冷联产(CCHP)系统、电制冷设备)的运行和调节特性,能量转化设备运营商可调整EH的调度参数,可建立基于多能互补的广义需求响应互动优化模型<sup>[35]</sup>,一

方面可以提高多能需求响应能量并降低响应的随机性;另一方面运营商也可从中获得辅助服务收益。目前,基于能源服务运营商和能源转化设备的需求响应的研究还在起步阶段。

综上,多能互补广义需求响应方案设计见图4。

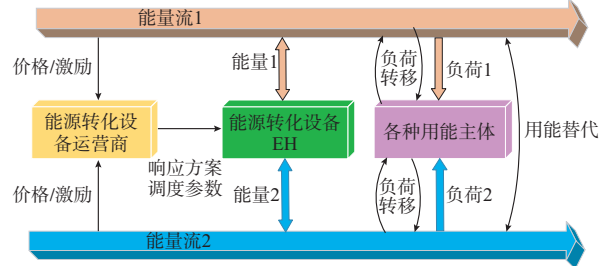


图4 多能互补广义需求响应方案

Fig.4 Scheme for generalized demand response of multi-energy complementarity

## 2.5 多能系统综合评估

作为系统规划与运行的基础,多能系统综合评估研究对多能系统智能化和实用化具有重要意义。建立不同能流的工作特性及各种能源间的耦合关联模型是多能集成系统综合评估的关键<sup>[36]</sup>。

多能系统综合评估体系需满足的条件:①适应高渗透新能源规模化利用的趋势,对新能源随机性建立概率模型并定量分析;②准确描述高低能源品质的差异;③评估算法须与其运行模式有良好的适应性,做到准确模拟、快速评估。

基于以上原则,文献[37]建立了计及风电和光伏出力随机性的微电网停运模型,提出了两步状态采样、区域划分和最小路径搜索等技术的蒙特卡罗模拟可靠性评估方法,较好地描述了可再生能源随机特性对系统可靠性的影响;文献[38]对比了不同类别指标、不同热力指标对区域综合能源系统园区多能联供、能量梯级利用评估效果;对于综合评估的算法实现,文献[39]提出将动态权重函数、2维惩罚函数、突变决策理论和自组织特征映射网络用于多能互补系统评估;文献[40]通过多代理的通信、分析、博弈及决策设计多能流优化策略,并结合时序蒙特卡罗法的动态过程仿真进行可靠性评估。

综上所述,多能系统可靠性和性能指标体系和算法研究相对成熟,但是缺乏对耦合系统连锁故障、需求响应和市场交易不确定性等风险的研究,随着系统集成程度和市场化水平的提高,更多更复杂的关系和不确定性势必会增强系统面临的风险。

## 2.6 多能系统信息安全

能量流与信息流的高度融合是未来多能互补系统的主流发展方向,在大数据、互联网及人工智能等技术快速发展的背景下,分布式调度通信方式不断

成为研究的热点,然而在网络和通信安全上还存在很大问题,2015年末网络黑客攻击造成乌克兰大停电就是该问题的一个佐证<sup>[41]</sup>。

随着物理系统的融合<sup>[42]</sup>,能源系统信息安全与通信逐渐抛弃了传统单点化、孤立式的构架,向着立体化、全局式的智能防护和分布式分层通信的体系发展,相应的,国外信息安全研究人员提出的“木桶理论”<sup>[43]</sup>。另一方面,由于多能互补,集成优化系统覆盖面广,大数据、云平台逐渐显露出其在跨区域、跨平台能源互联系统的优势,然而也不可避免地引入了安全风险。基于虚拟化技术的信息安全通信与传统信息系统有所区别,数据云、主站和子站的通信结构均发生了改变,文献[44]提出一种“云+端+边界”的安全体系,即是一种新的云计算架构方式。数据云可协调多个安全模块之间的互动,涌现群集智能并提高信息系统安全防护水平。然而由于互联网带来的信息安全风险,国内暂时缺乏相关工程实践,该部分研究尚停留在理论研究阶段。

多能互补信息系统间的耦合一方面提高了系统的量测冗余,如图5所示,在一定程度上提高了系统的可观测性。同时,信息系统的耦合也使得能源系统信息安全关联性较强,需要考虑信息攻击引起多个能源系统连锁故障的情况。因此,多能系统信息安全与通信的安全威胁有别于传统的网络信息安全,需进行多链条、多层次全面的安全防护<sup>[42]</sup>。

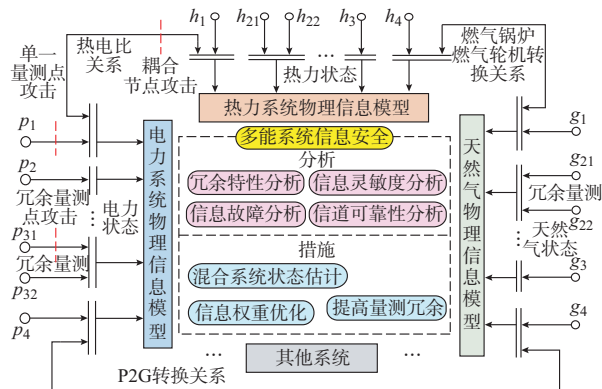


图5 多能互补信息安全问题

Fig.5 Information security problems of multi-energy complementarity

多能系统信息灵敏度分析中,其影响范围不仅局限于单一能源系统,特别需要重点考虑耦合信息节点受到攻击的情况。但是信息耦合也增加了量测冗余,通过多能流混合系统状态估计可辨识出错误信息来源,一定程度上提高信息安全性。另外,不同信息平台的融合使得其不同信道的可靠性也不同,优化冗余通信信息的权重可以较好地规避信息安全风险。

目前,对于电力系统物理信息系统安全评估和风险控制的研究较多,而对于其他能源信息系统特别是多种能源信息融合的研究较少,缺少多能信息互补的安全评估方法,尚没有形成成熟的多能流信息安全风险控制方法。

## 2.7 能源交易、综合能源服务及商业运营模式

传统的能源系统由电力公司、燃气公司、热力公司等不同能源主体各自独立规划、独立建设、运行和管理,完成某一种能源从生产到传输销售的所有过程,其市场相对独立且封闭。为真正实现能源的梯级利用,不可避免地需要推动能源交易服务的体制改革,赋予不同能源符合其能源品味的商品属性。文献[45]提出一系列的市场化改革和发展建议,以期构建优良的能源市场环境促进能源互联网不同层级接入的公平竞争。文献[46]提出了一种以能源路由器为硬件基础的分布式能源交易模式,能够实现分布式电源、电动汽车和负荷能源的即插即用。

在能源市场分析方面,越来越多的市场建模和定量分析方法被设计出来以描述能源交易行为和市场供需关系,多能源市场分析方法分类见图6。分析模型可概括为两类:自底向上模型和自顶向下模型<sup>[44]</sup>。自顶向下模型采用宏观经济学方法侧重于市场过程的总体表征而不是具体的技术指导,其主要缺点是该模型参照的历史参数有时效性且无法分析策略变化的灵敏度,只能提供整体经济政策指导;而自底向上模型是技术层面的基于政策的能源市场构成的分析,根据功能差异又可分为优化和仿真模型<sup>[47]</sup>。

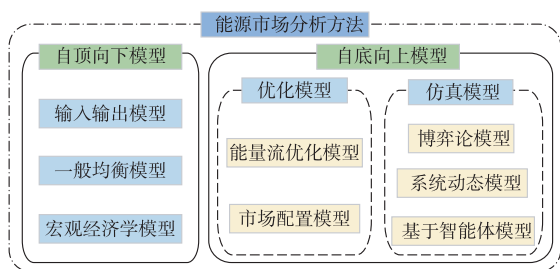


图6 多能源市场分析方法

Fig.6 Analysis method of multi-energy market

多能互补系统能源交易与商业运营的参与主体主要包括综合能量管理中心、综合能源服务商、各类用户、电动汽车、新能源系统、储能设备、CHP 机组等。各类主体在互动框架中扮演着不同的角色,新型的综合能源服务公司直接面向用户或增量能源市场,业务范围涵盖多种不同品味的能源销售。用户根据自身的用电特性、风险偏好和响应潜力,响应电价信息和管理中心发布的中断信息,调整自身负荷计划,从而达到柔性互动的目标。然而主体众多,不

同的用户利益诉求不同,其参与互动的目标也有所差异,因此一个能够吸引用户参加的健全的交易运营机制,应在一定程度上满足各个主体的利益诉求,一种多能典型交易服务机制设计方案如图7所示。

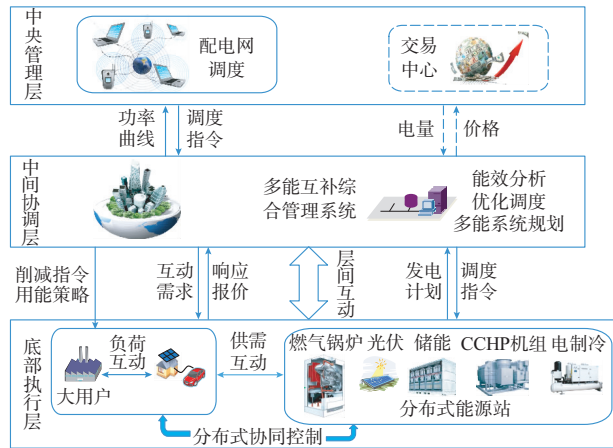


图7 多能交易服务机制设计方案  
Fig.7 Design scheme of multi-energy interaction mechanism

综上,整合能源交易市场,兼顾各方利益的收益分摊机制,可增强多能互补的经济驱动力,推动综合能源系统可持续发展。电力市场研究较为成熟,而多能市场互补交易和收益分配研究基本处于空白状态。

### 3 多能系统研究展望

为进一步提高用能效率,促进多种新能源的规模化利用,多种能源的源、网、荷、储深度融合,紧密互动又是未来能量系统发展的必然趋势。据此,多能互补研究具有前瞻性和巨大的工程应用价值。同时,现阶段多能互补集成优化依然面临着上述难点和挑战,因此,未来多能系统应解决以下问题。

#### 1) 系统集成程度更高

横向上多种能源系统互补与纵向上分布式“源-网-荷-储”协调优化相结合,两个方面提高多能系统集成水平,多时间尺度优化多能流时空分布,因而可以获得更多的集成互补效益。

#### 2) 有序调控和故障处理能力

考虑不同能源系统时间常数,综合能量管理系统应具有的多能流有序调控和故障处理能力,在区域综合能源系统内实现自治调控和故障处理,降低大系统统一调控和安全动作的工作压力。

#### 3) 考虑更多不确定性因素

高可再生能源渗透率下,考虑实时电价,运行模式变化、需求响应和开放市场等因素的随机特性,使得系统的不确定性进一步提高,再加上系统耦合互补使得能源系统规模成倍增加,具有更广阔的开放

性和更大的系统复杂性,需在系统规划、调度和安全分析与控制等阶段加以考虑。

#### 4) 先进的通信和数据服务平台

应用虚拟云技术整合现有的能源调度管理平台、企业用能监测和评估平台、需求侧管理平台以及用户用能优化终端,融合成为一个多维度多能流的物理信息系统,为分布式电源、CCHP技术、多种储能设备、电动汽车等提供多元化物理接口,能够精确量测、汇总、储存并分析预测用能数据、能源价格信息和多能系统运行整体运行态势,形成运行安全、用能经济、互动有序的能源综合服务平台。

#### 5) 贯彻以“以用户为中心”的理念

综合负荷聚集商应以用户利益为中心,提供经济高效的综合用能方案,引导用户“绿色需求”。能源企业要树立服务意识和社会意识,高质量满足用户用能需求,提供多方位保障服务,促进能源的梯级利用,提高能源利用效率并实现社会整体节能运行。用户应发挥主观能动性,树立节能意识和能源经济观念。

#### 6) 多种能源服务、交易和运营模式相结合

完善并整合能源交易市场,兼顾综合能源服务商、各类用户、电热气网运营公司等各个主体的利益,针对可调资源和需求响应建立有效的互动和收益分摊机制,创新综合能源服务与交易机制,并推广综合能源服务商和聚合商的运行模式。以经济手段为杠杆驱动多能互补集成优化系统良性发展。

## 4 结语

多能互补、集成优化即是通过物理信息上的互联来涌现规模效应和群集智能,以实现系统级优化目标,其中心思想在于整合资源,协调优化。现阶段,能源系统呈现出智能化、去中心化、物联化、市场化和电商化等演变趋势,将注定要颠覆现有的能源系统和行业运营模式,能源横向和纵向上的互补协调是能源系统发展的必然趋势,因此,多能互补研究具有前瞻性和巨大的工程应用价值。与此同时,多能互补集成优化技术依然在多个方面面临着诸多挑战,仍需在多能系统建模、规划、智能调控等领域,考虑多时间尺度多不确定性等实际问题进行深入研究。

## 参考文献

- [1] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3305.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [2] SONG H, LIU C, LAWARREE J. Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 73-79.
- [3] FEMANDO O, FRANCISEO G, HAUBRICH H J. Modeling long-term dynamics of electricity markets[J]. Energy Policy, 2006, 34(12): 1411-1433.
- [4] ARIFOVIE J, KARAIVANOV A. Learning by doing vs. learning from others in a principal-agent model[J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2010, 34(10): 1967-1992.
- [5] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [6] GEIDL M, ANDERSSON G. A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow[C]// IEEE Russia Power Tech, June 27-30, 2005, St. Petersburg, Russia; 1-7.
- [7] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [8] XU X, JIA H, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [9] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(5): 2302-2311.
- [10] MARTINI L. Trends of smart grids development as fostered by European research coordination: the contribution by the EERA JP on smart grids and the ELECTRA IRP[C]// Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, September 14, 2015, Milan, Italy; 8p.
- [11] BDI Initiative. Internet of energy ICT for energy markets of the future: BDI No. 439 [R]. Berlin, Germany: Federation of German Industries, 2008.
- [12] 张毅威,丁超杰,闵勇,等.欧洲智能电网项目的发展与经验[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1717-1723.  
ZHANG Yiwei, DING Chaojie, MIN Yong, et al. Development and experiences of smart grid projects in Europe [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1717-1723.
- [13] NAKANISHIH. Japan's approaches to smart community[EB/OL]. [2014-10-09]. <http://www.ieee-smart-gridcomm.org/2010/downloads/Keynotes/nist.pdf>.
- [14] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20141229010.  
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20141229010.
- [15] 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等.雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230.  
PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in Xiongan new area [J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2017, 32(11): 1224-1230.
- [16] 坚强智能电网领跑未来[EB/OL]. (2011-12-16)[2017-07-20]. <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/mtbd/262795.shtml>
- [17] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [18] KOEPEL G, ANDERSSON G. The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply [C]// The Sixth World Energy System Conference, July 10-12, 2006, Torino, Italy; 10-12.
- [19] KOEPEL G A. Reliability considerations of future energy systems: multi-carrier systems and the effect of energy storage [D]. Zurich, Switzerland; Swiss Federal Institute of Technology, 2007.
- [20] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.  
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [21] 王英瑞,曾博,郭经,等.电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2950.  
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi energy flow calculation method of an electric thermal gas integrated energy system[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [22] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来.多能流能量管理研究:挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20160522006.  
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qianglai. Research on energy management of multi energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20160522006.
- [23] 黄国日,刘伟佳,文福控,等.具有电转气装置的电-气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 1-13.  
HUANG Guori, LIU Weijia, WEN Fushuan, et al. Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13.
- [24] GUO Li, LIU Wenjian, CAI Jiejian, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [25] BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.
- [26] 赵峰,张聪慧,孙波,等.冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.  
ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three level collaborative whole optimization design method for CCHP system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [27] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market[J]. IEEE Transactions on Power



- Systems, 2015, 30(4): 2119-2129.
- [28] 别朝红,王旭,胡源.能源互联网规划研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6445-6462.  
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Research and prospect of energy internet planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462.
- [29] 蒲天骄,陈乃仕,王晓辉,等.主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J].电力系统自动化,2016,40(1):17-23. DOI:10.7500/AEPS20150520010.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Architecture analysis and application design of multi source cooperative optimization dispatching for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23. DOI: 10.7500/AEPS20150520010.
- [30] PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Impacts of optimization interval on home energy scheduling for thermostatically controlled appliances [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 90-100.
- [31] 徐建军,王保娥,闫丽梅,等.混合能源协同控制的智能家庭能源优化控制策略[J].电工技术学报,2017,32(12):214-223.  
XU Jianjun, WANG Baobe, YAN Limei, et al. Intelligent home energy optimization control strategy based on hybrid energy coordinated control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 214-223.
- [32] LI M, MU H, LI N, et al. Optimal option of natural-gas district distributed energy systems for various buildings [J]. Energy & Buildings, 2014, 75(11): 70-83.
- [33] 宋蕙慧,于国星,曲延滨.Web of Cell 体系——适应未来智能电网发展的新理念[J].电力系统自动化,2017,41(15):1-9. DOI: 10.7500/AEPS20160915002.  
SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin. Web of Cell system—a new idea for the future development of smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20160915002.
- [34] 艾芊,吴俊宏,章健.智能电网中清洁分布式能源的优化利用策略[J].高电压技术,2009,35(11):2813-2819.  
AI Qian, WU Junhong, ZHANG Jian. Optimized utilization strategy of clean distributed energy resources in smart grid [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2813-2819.
- [35] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.  
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian, et al. Research on interaction mechanism of industrial parks based on cold and thermal power and multi energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267.
- [36] 李更丰,别朝红,王睿豪,等.综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J].高电压技术,2017,43(1):114-121.  
LI Gengfeng, BIE Zhaohong, WANG Ruihao, et al. Present situation and prospect of comprehensive energy system reliability assessment [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121.
- [37] BIE Z, ZHANG P, LI G, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2342-2350.
- [38] 薛屹洵,郭庆来,孙宏斌,等.面向多能协同园区的能源综合利用效率指标[J].电力自动化设备,2017,37(6):117-123.  
XUE Yixun, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Energy comprehensive utilization index for multi energy cooperation park [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 117-123.
- [39] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等.能源互联网供能质量综合评估[J].电力自动化设备,2016,36(10):1-7.  
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy supply quality of power Internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.
- [40] LI G, BIE Z, KOU Y, et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication [J]. Applied Energy, 2016, 167: 397-406.
- [41] 童晓阳,王晓茹.乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J].电力系统自动化,2016,40(7):144-148. DOI: 10.7500/AEPS20160202101.  
TONG Xiaoyang, WANG Xiaoru. Network attack caused by power cut in Ukraine and thoughts on information security of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 144-148. DOI: 10.7500/AEPS20160202101.
- [42] 郭庆来,辛蜀骏,孙宏斌,等.电力系统信息物理融合建模与综合安全评估:驱动力与研究构想[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1481-1489.  
GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system information physics fusion modeling and integrated security assessment: driving force and research conception [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [43] 张晓兵.下一代网络安全解决方案[J].电信工程技术与标准化,2014,27(6):59-61.  
ZHANG Xiaobing. The next generation network security solution [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2014, 27(6): 59-61.
- [44] PALANIAPPAN S, RABIAH A, MARIANA Y. A conceptual framework of info structure for information security risk assessment (ISRA) [J]. Journal of Information Security and Applications, 2013, 18(1): 45-52.
- [45] 李芙蓉.适应综合能源局域网的市场化改革方案[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3693-3698.  
LI Furong. A market-oriented reform program for integrated energy LANs [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3693-3698.
- [46] 田兵,雷金勇,许爱东,等.基于能源路由器的能源互联网结构及能源交易模式[J].南方电网技术,2016,10(8):11-16.  
TIAN Bing, LEI Jinyong, XU Aidong, et al. Energy internet structure and energy trading model based on energy router [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(8): 11-16.
- [47] SARIEA K, TYNER W E. Alternative policy security: a hybrid modeling approach impacts on US GHG emissions and energy [J]. Energy Economics, 2013, 40(2): 40-50.

艾芊(1969—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:分布式发电、微电网、人工智能在电力系统中的应用等。E-mail: aiqian@sjtu.edu.cn

郝然(1993—),男,博士研究生,主要研究方向:多能互补微电网和分布式优化。E-mail: haoransjtu@sjtu.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

(下转第 46 页 continued on page 46)

## Key Technologies and Challenges for Multi-energy Complementarity and Optimization of Integrated Energy System

*AI Qian, HAO Ran*

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Effective access to energy, energy conversion, control and use is the core of modern civilization. Energy Internet, as a new reform of the energy system, connects distributed energy storage, conversion devices, multiple loads and other energy networks, such as cooling, thermal, power and gas system, to achieve two-way complementary energy and integration optimization. The key technologies are selected from multi-energy complementarity in Energy Internet as the research object. Firstly, the recent researches of multi-energy complementarity and integration are summarized. Then, based on the hybrid energy model, key technologies and challenges are summarized as well, such as system planning, intelligent control, cooperative control and interaction technology, comprehensive evaluation, information security system communication and energy trading services. Finally, in order to provide some research ideas for multi-energy complementarity and integration optimization, the future energy system in the multi-energy complementarity is prospected.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901304), National Natural Science Foundation of China (No. 51577115) and National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund (No. U1766207).

**Key words:** multi-energy complementarity; integrated optimization; coordinated interaction; regional integrated energy system