

多能源市场耦合交易研究综述及展望

肖云鹏^{1,2*}, 王锡凡¹, 王秀丽¹, 别朝红¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省 广州市 510600)

Review and Prospects of Coupled Transactions in Multi-carrier Energy Systems

XIAO Yunpeng^{1,2*}, WANG Xifan¹, WANG Xiuli¹, BIE Zhaohong¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. Power Dispatching and Control Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

Abstract: Transitioning and developing toward the low-carbonization of energy systems is a common global solution to address climate, environmental, and energy issues. The coordinated operation and integrated optimization of multi-carrier energy systems have drawn widespread attention in the context of the recent deregulation of energy industries. The coordinated operation of multi-carrier energy systems and the coupled transactions of multi-carrier energy markets could develop and utilize the complementarity and substitutability of different forms of energy, realize flexible energy production, consumption, storage, and transmission, optimize resource allocation within a broader range for renewable energy integration, and promote the low carbonization of energy systems. Based on the current development scenarios of energy markets, this study analyzes the necessities of coupled transactions in multi-carrier energy systems; then summarizes the state-of-the-art research on interactive effects, coordinated operation and joint clearing, and trading strategies and equilibrium analysis in multi-carrier energy markets; and finally proposes key issues for further studies.

Keywords: multi-carrier energy market; integrated energy system; low-carbon; electricity and energy transaction; renewable energy integration

摘要: 能源系统的低碳化转型与发展是国际社会应对气候、环境、能源问题的共同解决方案,特别是在全球范围能源行业放松管制的现实背景下,能源系统协同运行和综合优化的效益得到了广泛关注。多能源系统协同运行和多能源市场耦合交易能够挖掘利用不同能源间的互补性和替代性,实

现灵活的能源生产、消费、储存、传输,在更大的范围内优化配置资源、消纳可再生能源,推动能源系统的低碳化转型与发展。立足能源市场发展实际,在分析开展多能源市场耦合交易必要性的基础上,总结了近年来多能源市场间交互影响、多能源市场协调运行及联合出清、多能源市场中的交易行为及均衡分析等方面的最新研究进展,提出了进一步研究中面临的关键问题。

关键词: 多能源市场; 综合能源系统; 低碳; 电力能源交易; 可再生能源消纳

0 引言

气候变化、环境污染、能源安全是人类社会共同面临的重大挑战,全球主要经济体无一不在进行着能源可持续与低碳化转型的实践与探索^[1-3],并纷纷制定了宏伟的减排目标^[4-5],如欧盟提出到2030年可再生能源将满足电力需求的57%,温室气体相比20世纪90年代减排40%以上^[6];中国政府也做出了到2030年左右实现碳排放达到峰值的郑重承诺,并提出推进能源供给、消费、体制、技术革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

发展和利用可再生能源是达成低碳减排目标、实现社会经济可持续发展的重要基础和有效途径。当前,可再生能源已成为全球多个主要经济体电力供应中不可或缺的来源。截至2019年底,全球非水可再生能源装机容量已达1226 GW,已接近总发电装机容量的20%,其中风电和光伏发电装机容量分别达到了622 GW和586 GW^[7]。可再生能源往往具有间歇性、随机性和波动性特征,其快速发展催生了对多能源系

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020M672528); 中英繁荣基金(CGF-R1-FPP206)。

China Postdoctoral Science foundation (2020M672528); HM Government China Prosperity Fund (CGF-R1-FPP206).

统协同运行及综合优化的需求^[8-9]。近年来,各能源系统的耦合及依赖程度均有所增加。例如,从1973年到2017年,全球范围内天然气发电量在总发电量中占比由12.1%上升至23.0%,用于发电及热电联产的天然气在天然气消费总量中的占比由21.6%上升至38.6%^[10];在中国华北及东北地区的部分省份,热电联产机组在总电力装机中的占比达到50%~70%^[11];氢能也因其清洁、能量密度大等特点,逐渐成为耦合能源系统的重要环节^[12]。

多能源系统协同运行对提升能源系统可靠性、经济性和清洁性的显著作用已受到广泛关注。首先,多能源系统协同运行能够丰富能源系统运行调节手段,增强能源系统灵活性,减小单一能源系统价格及供需不确定性的影响,降低能源系统运行风险,提升能源系统安全性及可靠性^[13-14]。其次,多能源系统协同运行能够实现能源的梯级利用,挖掘不同类型能源生产和消费间的互补性和替代性,提高能效,降低排放及能源成本,提升能源基础设施利用率^[15-16]。最后,多能源系统协同运行能够充分利用不同能源时空互补替代特性,补偿可再生能源的不确定性,促进可再生能源的充分消纳^[11,17]。

当前对多能源系统耦合建模、效益评估、协同规划、优化运行的研究较为丰富,但对市场机制及交易行为等问题的研究尚不系统^[18-19]。随着全球范围能源行业放松管制的进程不断深入,能源领域市场化程度显著提升,如何发挥市场配置能源资源的优势作用,实现高效的能源供给、传输、储存和消费并有效激励能源技术进步,是亟待解决的重要问题^[4,20]。本文重点关注网络化能源系统(即电力、天然气、供热等)的多能源市场耦合交易问题,在分析多能源市场耦合交易的必要性、综述多能源市场耦合交易研究应用现状的基础上,分析提出进一步研究和发展中面临的关键问题。

1 多能源市场耦合交易的必要性

高效、高流动性的多能源市场耦合交易是多能源系统协调运行、综合优化的机制基础。近年来,多能源市场耦合交易快速发展,并受到了学术界和工业界的广泛关注,主要包含以下方面原因。

1.1 能源间转换技术的发展带来更多的能源联合生产及消费

天然气发电机组作为电力系统的供给者及天然气系统的消费者,是电力和天然气系统耦合的最重要环节。由于具有灵活低碳的特点,随着可再生能源电网

渗透率的增加,天然气发电机组在发电结构中的占比不断提升。电转气(P2G)技术的出现使电力、天然气系统的耦合从传统的通过天然气发电机组的单向转换改变为双向^[21]。近年来,由于成本降低、电解效率提高、氢能消费增加,P2G得到快速发展^[22]。

传统的热电联产将电力和热力的生产耦合,运行灵活性较低^[11]。近年来,电锅炉、电热泵等能源转换技术逐渐成熟,应用于热电联产机组有助于弱化热电耦合特性,减小电力和供热系统中能源供给的相互制约,已在部分国家实践中表现出良好特性^[23-24]。

能源间转换设备的丰富使各能源市场的惯性、价格差异能够实现互补、流动,增强了能源市场的流动性^[25]。多能源市场的耦合交易应促进能源联合生产与消费设备的优化运行与科学规划,并引导需同时参与不同能源市场的市场主体合理安排能源生产和消费行为。

1.2 消纳可再生能源需在更大范围内配置灵活资源

提升可再生能源消纳能力的关键是提升灵活资源的配置效率^[26-28],包括增加灵活资源容量及占比、扩大灵活资源配置范围、采用合理的调度交易机制使灵活资源高效补偿可再生能源的不确定性。

相较单一能源系统,多能源系统的协同运行既增加了灵活资源容量,又扩大了灵活资源配置范围^[20]。具体来说,多能源系统协同运行能够:①挖掘能源生产的替代性和互补性,促进不同种类能源生产者之间竞争,弱化能源消费者和生产者之间的界限,提升能源生产的灵活性^[29-30];②挖掘能源消费的替代性和互补性,激励用户根据用能习惯和能源价格调整、转换不同种类能源的负荷需求,提升能源消费的灵活性^[31-32];③挖掘能源储存的替代性和互补性,减小如电储能成本较高、抽水蓄能选址约束较多、热储能效率较低等单一系统储能自身约束对增强系统灵活性的制约,提升能源储存的灵活性^[23,33];④挖掘能源传输的替代性和互补性,削弱单一系统传输受阻对能源供给安全的影响,充分利用多能源系统传输容量及天然气、供热管道储能能力,提升能源传输的灵活性^[19,34]。

多能源市场的耦合交易应合理、高效地配置及调用多能源系统生产、消费、储存、传输的灵活性。

1.3 各能源市场的价格相关性增强

随着用于电力生产的天然气消费逐年增加,电力和天然气价格的关联越来越紧密,天然气发电机组在电力和天然气市场的定价中均扮演着重要角色。天然气发电机组通常是电力系统中的边际机组,天然气市场的价格直接影响天然气发电机组报价行为,进而影

响电力系统的机组组合及经济调度结果^[35];相反,电力价格也会影响天然气生产和运输成本(P2G及压缩机需使用电力),进而影响天然气价格^[36]。此外,两市场价格的变化及相关性会进一步催生套利空间,刺激两市场耦合交易需求^[35,37]。同样,在热电联产机组占比较高的电力系统中,电力和供热价格也有很强的相关性^[38]。

随着能源系统耦合程度的加深,来自不确定性的风险将在能源系统中传递,任何一种能源系统发生阻塞或产生价格波动,都会对耦合能源系统带来风险^[37,39]。

多能源市场的耦合交易应协调各能源系统,在满足系统安全约束的同时,减小系统能源供给成本,降低交易风险,并为市场主体提供有效的风险管理手段。

1.4 有助于推动能源增值服务发展

在能源消费侧,用户通常只关注用能效果而非用能种类,如居民用户只关注供暖期间的取暖成本与房间温度,并不关心具体供热的是电力、天然气或集中供暖^[30,40]。

多能源市场耦合交易有助于实现多种能源市场价值的统一衡量^[41],可通过向用户提供电、气、热、冷等不同能源组合产品^[42],开展个性化能源服务,满足多元化能源需求,推动能源增值服务发展,促进竞争,增进社会福利。

2 多能源市场耦合交易研究现状

2.1 多能源市场间交互影响

随着同时参与多个能源市场的市场主体逐渐增多,能源市场间的交互影响越来越显著。天然气系统的运行约束^[43]和天然气市场中的市场力^[44]均会改变天然气发电机组的生产成本,引起其中标电量的变化,影响电力市场购电成本及电价。由于天然气短期市场往往流动性不足,天然气发电企业更多地通过电力市场报价行为的变化间接调整天然气市场中的消费行为,发电厂面临将长期天然气合同转化为短期电力交易的决策风险,因此天然气短期市场的低效会影响电力市场的价格信号^[45];反之,提升天然气价格形成机制的灵活性能够提升电力市场效率^[46]。文献[35]对比了以电力视角及天然气视角研究两市场交互影响的方法,电力视角下,在电力市场社会福利最大化出清模型中融入通过天然气市场模型计算得到的等效天然气合同;天然气视角下,在天然气市场购气成本最小出清模型中融入电力市场中边际收益与天然气消费的关系。单一能源系统中的灵活性也会影响其他耦合能源

系统运行的经济性,如电力需求响应能够减小在天然气系统阻塞时电力系统运行的风险,减少电力系统对天然气的需求并降低天然气短期市场价格^[47]。文献[48]发现提升热电联产机组的灵活性会减小因供热而限制电力出力的机会成本,增加其市场力,从长期来看,还能促使更多的热电联产机组参与供热市场。此外,在系统规划问题中考虑多能源系统的协同运行能够降低成本、延缓投资^[49]。

2.2 多能源市场协调运行及联合出清

由于各类能源之间存在互补性和替代性,一些学者以能源系统整体的经济性为目标,研究了多能源市场协调运行机制,提出了多能源市场联合出清模型。与单一能源市场出清模型以单一能源购买成本最低、风险最小、社会福利最大化为目标函数相似,多能源市场联合出清模型以多能源购买总成本最低、风险最小、社会福利最大化为目标函数。文献[34]对比了3种电力与天然气市场的出清模式,分别为电力与天然气市场分别出清且日前与实时市场顺次出清、电力与天然气市场联合出清且日前与实时市场顺次出清、电力与天然气市场联合出清且考虑实时市场场景进行日前市场出清。结论显示电力与天然气市场联合出清可以降低购能成本并优化天然气潮流及管存。此外,日前与实时市场联合出清通过更高效地补偿可再生能源的不确定性也进一步降低了购能成本。文献[50]建立了电力、天然气、区域供热三个市场的联合出清模型,并在目标函数中同时考虑了成本和风险。文献[51]考虑微网作为电力需求响应的执行主体,以电力、天然气系统综合运行成本最小及电力系统动态安全和天然气管道过载指数为目标函数建立了多目标优化模型。但多能源市场联合出清的前提是多个能源市场的运营权应属同一机构,因此区域能源系统和微网更有可能采用联合出清。文献[52]考虑外部能源供应成本、需求响应申报及新能源低碳价值建立了区域综合能源系统日前出清模型。文献[53]以系统购能成本、环境成本、失负荷成本最小为目标构建了冷热电区域综合能源系统优化调度模型,采用NSGA-II求解,验证了多能源系统协同运行能够降低系统成本、减少排放、提高能效。对于各能源系统运营者不同、无法实现多能源市场联合优化及出清的情况,研究中通常采用基于各能源市场出清结果交互^[51]或基于一致性的交替方向乘子等分布式算法^[54],实现各能源市场多次出清、经多次迭代达到均衡的目标。对于出清时序不同的能源市场,可生成较晚出清的能源市场的多个场景并纳入较早出清的能源市场出清模型中考虑^[55]。

借鉴电力市场中节点电价的思想,文献[46,56-57]提出了节点能价的概念。文献[46]在天然气日前市场应用节点气价,利用协同进化算法求解通过综合能源需求者耦合的电力及天然气市场。文献[56]提出了电力与热力耦合系统中包含生产边际成本和能源耦合成本的节点能价计算方法。与节点电价不同,由于供水系统和回水系统两套供热系统的存在,节点热价的特性规律较复杂。距离热源越远的节点热价不一定更高,节点热价与热负荷大小及运行调节方式有关^[57]。

现有研究也关注了零售侧的多能源市场。文献[58]提出通过多能源市场主体实现电力、天然气批发市场与当地能源系统(local energy systems)的交互方案,建立了双层混合整数非线性优化模型,并证明多能源市场主体的存在能够提升不同能源系统交互的效率。在文献[31]中,多个能源供给站作为电力、天然气、热力的耦合环节在电力、供热零售市场中扮演供给方,电力、热力负荷聚集商作为需求方,建立了以能源供给站总收益最大化为目标函数的零售市场出清模型,算例结果表明通过电力与热力的耦合能够促进可再生能源消纳并降低终端用户用能成本。文献[59]建立了基于购能总成本最低的多个热电耦合微网之间能量交易模式,并出于微网运行隐私性的考虑,采用分布式算法求解。文献[60]提出了包含电力、天然气、供热的综合能源微网参与多能源市场的优化运行模型,考虑电储能、热储能、天然气储能,以优化可再生能源的利用。文献[61]建立了氢能与电能交互下的促进分布式可再生能源灵活消纳的当地电力市场迭代出清机制。

还有一些学者基于多能源市场耦合的特点,提出了创新性的交易机制。文献[62]提出了一个灵活天然气合同,在天然气发电机组未能在电力市场中被调用时,将天然气直接转供给天然气用户,并探讨了合同定价的问题。文献[13]提出了多能源市场的关联竞价机制,例如天然气发电机组同时作为天然气市场的需求方和电力市场的供给方申报关联报价信息,只有在天然气市场中中标时才可在电力市场中中标。文献[39]通过在日前市场给天然气传输容量合理定价,使电力、天然气耦合市场实现更高效的资源配置。

2.3 多能源市场中的交易行为及均衡分析

在多能源市场中,市场主体基于对市场的判断,优化自身策略,实现效用最大化。一些研究着重关注批发侧市场主体的交易策略。文献[63]假定电力、天然气市场时序相同并采用节点电价及节点气价,研究了天然气发电机组在两市场中的竞价策略。中长期交

易也会对短期市场策略产生影响,文献[64-65]分别探讨了电力及天然气市场耦合下天然气发电机组的中长期电量合同和中长期天然气合同的分解执行策略。文献[66]研究了天然气发电机组在天然气现货市场购气决策、中长期天然气管道容量购买策略及电力市场策略的相互关系,表明短期的电力市场申报策略受长期天然气管道容量购买的限制,故优化天然气容量购买策略应考虑未来短期电力市场场景。天然气发电机组和P2G设备能够实现电力和天然气市场的双向耦合,二者联合参与市场能够获得更高的效益^[29]。文献[67]考虑电价和热负荷的不确定性,研究了热泵和电锅炉在电力及供热市场中的优化策略,验证了其经济效益。文献[68]建立了包含天然气发电和天然气锅炉的社区综合能源系统参与电能量和调频、备用辅助服务市场的鲁棒优化策略,社区综合能源系统整合了冷热电需求及分布式发电资源,算例结果显示当参与电力辅助服务市场时,天然气发电能更好地发挥其调节性能好的特点而获得收益。

也有一些研究关注零售侧能源供给者在多能源市场中的交易策略。文献[69-70]中,多能源零售商购买天然气,向终端用户供电和供冷,建立了以分布式能源站为领导者决策电力和冷气的价格,多能源用户为跟随者决策用能量的Stackelberg博弈模型。相似地,文献[71]建立了多能源市场零售商以在电力和天然气市场实现收益最大化为上层,通过当地能源系统对分布式及需求侧资源优化调用为下层的策略优化模型。文献[72]研究了天然气和电力市场异步的情况下综合能源服务商参与两阶段市场的策略。文献[73]着重探讨了电储能和热储能的优化运行策略,并提出利用实时电价能够更加高效利用储能资源,平抑能源需求波动。

还有一些研究关注了终端用户参与多能源市场的交易策略。文献[74]研究了装设有热电联产、锅炉、热储能的电力及热力用户在实时电价下的需求响应管理模型,同时采用避险合同规避实时电价风险,降低最恶劣情况下满足电力及供热需求的购能成本。文献[75]考虑基于价格和基于激励的电力、天然气需求响应,终端制造业用户通过电力及天然气需求响应与能源供应商产生互动,降低能源成本。文献[76]说明了电力需求响应能在天然气系统传输受限而使天然气供给量减少时,为电力系统提供灵活爬坡服务以减少电力系统对天然气供给的依赖。

电力市场中的需求响应在多能源市场中衍生成为综合需求响应^[77],除与电力需求响应相似的包含可削减多能源负荷及可转移多能源负荷外,综合需求响应还可通过可转换负荷来实现,促使不具有电价弹性的

负荷也能参与到需求响应项目中。适用于配置在需求侧的典型能量转换设备包括微型燃气轮机、微型热电联产机组、P2G、电锅炉、燃气锅炉、制冷设备、热泵等^[15]。能量枢纽(energy hub)是一种广泛采用的描述可转换负荷的等效建模方法,数学层面上是一个多能源输入到多能源输出的函数^[78]。文献[79]建立了电力、天然气配网与多个综合负荷聚合商之间的主从博弈模型,并探讨了综合需求响应和储能容量对负荷聚合商购能成本的影响。文献[80]考虑价格型需求响应电力负荷及室内供热温度柔性控制,建立了两阶段电力、热力耦合微网鲁棒优化运行模型,验证了综合需求响应对能源利用效率的提升作用。文献[81]和[82]分别以购能成本最低和购能风险最小为目标函数,研究了能量枢纽在考虑能源价格及需求不确定性下的最优策略。文献[83]研究了电力和天然气配网中能量枢纽的优化调度模型,考虑单一能量枢纽的隐私保护,采用基于Benders分解的分布式算法求解。文献[84]建立了多个能量枢纽间的非合作博弈模型,研究了能量枢纽与供电、供气企业的互动问题,表明综合需求响应既能减少用户侧用能成本,还能削减负荷峰值。文献[85]面向售电侧能源市场,研究了能量枢纽参与供电及供热的策略优化问题。文献[86]考虑电力、天然气、供热系统运行约束,研究了包含综合需求响应、电储能、储气的多能源负荷服务商的购售能策略,结果表明利用综合需求响应能够平抑各类能源负荷曲线。文献[87]提出了产消者聚合为能量枢纽的实时滚动能量管理模型及基于贡献的效益分摊机制,使能量枢纽运营者与终端产销者实现共赢,促进分布式能源的就地消纳。文献[77]基于对综合需求响应建模、策略及应用的广泛调研,提出了综合需求响应市场设计及运行应解决协调不同时间尺度不同市场下的竞价策略、应设计市场机制有效减少需求侧信息不对称等关键问题。

多能源市场耦合运行下市场主体交易行为的改变可能导致市场均衡点的变化,因此一些研究关注了多能源市场耦合交易下的市场均衡问题。基于价格、供需信息交互的迭代出清方式能够在保护市场运行私有信息隐私性的同时,达到电力和天然气市场供需耦合下的市场均衡^[88-91]。热电联产机组和电热泵是电力及供热系统耦合的主要元件,在电力和供热市场出清中考虑热电联产机组和电热泵的策略更新,经多次出清迭代可达到市场均衡^[92-93]。文献[94]研究了电力、天然气、供热三个市场的均衡问题,认为由于天然气和热力在系统内传输速度较慢,供热系统所需的天然气价格在日内维持不变,因此可将三市场均衡问题转化

为双层问题简化求解。文献[95]建立了多个用户参与电力、供热市场的两阶段博弈模型,证明了市场均衡点的存在性及唯一性。文献[49,96]基于非合作博弈模型,探讨了多个能量枢纽参与多能源市场下市场均衡点的存在性和唯一性问题。

3 进一步研究的关键问题

多能源系统耦合交易旨在利用市场配置资源的优势作用优化多能源系统的规划和运行,将对传统能源体系带来革命性的改变。当前很多国家都对多能源系统耦合交易做了一些探索,但总体而言尚处于起步阶段,在市场模型、交易算法、行为风险分析等方面还需开展深入研究。本文基于对当前各国研究现状的综述,提出以下需要在进一步研究中关注的重要问题。

3.1 不同市场基础下多能源市场的协调问题

不同类型能源市场基础条件不同,主要体现为交易时间尺度、交易空间尺度、市场流动性方面的差别。

在交易时间尺度方面,电力市场包含成熟的中长期、日前、实时平衡市场,近年来欧洲很多国家还引入了日内交易;天然气市场多为中长期交易,且通常签订照付不议的合同^[45],尽管天然气短期交易逐渐增加^[19],但也多以双边交易为主且日内价格恒定;供热市场较不成熟且多采用中长期合同,但由于大量灵活供热设备的接入增加了短期市场供热成本的波动性,使短期市场未来发展具有较大潜力^[11,67,92]。此外,各能源市场交易时序并不统一。以美国中西部独立系统运营商(MISO)所在区域为例,电力现货市场在天然气市场交易日到来前出清,因此电力现货市场出清结果将影响同一交易日内天然气市场中市场主体的行为^[88]。在丹麦,热力供应计划是在电力现货市场出清前确定的,因而热电联产机组在参与日前电力现货市场的时候只具有很有限的灵活性,不利于系统安全运行和可再生能源消纳^[19]。低碳目标下的能源系统势必会接入更多的可再生能源,也必将增加对各能源市场短期灵活交易的需求,因此需考虑当前市场基础条件,深入研究不同时间尺度交易下各能源市场的协调机制。

在交易空间尺度方面,欧洲已建立了国家间电力现货市场,美国也建立了西部电力平衡市场,但天然气市场仍主要在国家或地区内部开展。此外,由于供热系统损耗较大,供热市场的范围较小,通常为区域供热市场,竞争程度较低,市场力和策略性竞价行为^[13,48]仍需深入研究。因此,多能源市场的协调机制也需要

考虑不同空间尺度的能源交易。

在市场流动性方面,电力市场发展较为成熟,中长期、日前、实时平衡市场均有较强的流动性,天然气短期市场流动性较低,供热市场更是多以中长期合同为主开展交易^[13,67],各能源市场流动性的差异可能降低市场效率。例如,中国当前已开展了电力现货市场试点,以南方(以广东起步)电力现货市场为例,运营规则中提到热电联产机组如因供热需求开机,在运行补偿费用(即上抬费用)中将不考虑补偿启动成本,而由于供热市场市场化程度较低,热电联产机组实际上很难通过供热市场回收机组启动成本。因此,市场流动性的差别会影响市场主体行为和市场出清结果,可能削弱多能源系统协同运行的效益,在研究中应重点关注。

3.2 不同产权和运营权下多能源市场的协调问题

除少数如澳大利亚^[49]、丹麦^[19]等国家由同一机构运营电网和天然气管网外,更多国家的不同能源系统产权和运营权属不同企业^[54],由此给多能源市场耦合交易的开展带来挑战,应在研究中重点关注。一方面,不同能源系统由不同部门运营的特点给跨部门的信息汇总与协调优化带来困难^[32],如美国PJM就已发布报告提出要加强电力及天然气系统运行信息的交互^[39]。因此,在研究中应建立支撑多能源市场耦合交易的信息交互机制,促进各能源市场信息的主动披露并做好信息所有权保护。另一方面,多能源市场耦合交易下各类能源的定价将影响多能源系统协同运行效益在不同能源系统中的分配,其合理性评价方法还需深入研究^[13],并应以多能源系统协同运行效益合理分配为目标建立多能源市场耦合交易机制。

3.3 与多能源系统协同运行安全性的协调问题

多能源系统协同运行下,能源种类的多样性、网络的复杂性和运行中的不确定性,放大了单一能源系统的异常运行给其他能源系统带来的安全风险^[97]。以美国东北地区为例,天然气发电所需的天然气使用优先级低于居民及商业用气,在冬季供热需求较大时,用于发电的天然气供应量减少、天然气价格出现尖峰,影响电力系统运行、增加电力市场风险^[47]。同时,天然气发电企业为获得较低的天然气价格,通常会签订可中断天然气供应合同,当天然气系统出现阻塞等导致供给短缺时,天然气发电机组也会因燃料短缺而停机,影响电力市场供需关系和电价^[36,64]。此外,在用户供热需求高峰时,热电联产机组电力出力也会较大,可能导致局部电压升高,给电网调度运行及新能源消纳带来困难^[98]。因此,多能源市场耦合交易应

能考虑能源系统间运行安全性的交互影响,建立合理的价格机制反映能源系统安全风险。此外,当遇到系统供应可靠性问题时,不同能源系统运营者如何协调应对也是研究中需要重点关注的问题^[13]。

3.4 开发新的市场机制、出清算法及分析手段,应对计算复杂性、隐私性及不确定性

多能源市场机制设计应能够挖掘多种能源生产、消费、储存、传输的灵活性,激励高效的能源转换,实现可再生能源和灵活资源的广泛接入,有效保护私有信息,实现能源的公平交易和综合利用^[17,19]。电力、天然气、供热系统中包含大量的非线性约束,多能源系统协同运行将增加优化模型复杂度。此外,大量的报价信息还会进一步增加计算复杂性,在多能源市场机制设计和出清算法研究中应做好出清速度和模型精度的权衡^[32,34]。多能源形式发用电资源在系统同一节点的行为耦合和多能源系统运行的不确定性,也将给市场效应评估、市场主体行为分析、市场风险管理提出新的挑战。

4 结语

多能源系统协同运行和多能源市场耦合交易能够挖掘利用不同能源间的互补性和替代性,实现灵活的能源生产、消费、储存、传输,在更大的范围内优化配置资源、消纳可再生能源,推动能源系统的低碳化转型和发展。特别是在当下全球范围能源行业放松管制的现实背景下,开展多能源市场耦合交易的研究具有重要的理论价值和现实意义。本文立足能源市场发展实际,分析了开展多能源市场耦合交易的必要性,包括能源间转换技术的发展带来更多的能源联合生产及消费、消纳可再生能源需在更大范围内配置灵活资源、各能源市场的价格相关性增强、有助于推动能源增值服务发展等方面原因;总结了各国在多能源市场交互影响、多能源市场协调运行及联合出清、多能源市场中的交易行为及均衡分析等方面的最新研究进展;提出了进一步研究中面临的关键问题,包括不同市场基础、不同产权和运营权下多能源市场间的协调,与多能源系统协同运行安全性的协调,开发新的市场机制、出清算法及分析手段以应对计算复杂性、隐私性及不确定性等。

参考文献

- [1] 王锡凡,邵成成. 助力能源革命的多频率电力系统[J]. 中国

- 电机工程学报, 2018, 38(21): 6195-6204.
- WANG Xifan, SHAO Chengcheng. Develop multi-frequency power systems to promote energy revolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6195-6204(in Chinese).
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [3] 黄其励. 中国可再生能源发展对建设全球能源互联网的启示[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 1-9.
- HUANG Qili. Insights from China renewable energy development for global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 1-9(in Chinese).
- [4] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
- WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7(in Chinese).
- [5] Deloitte. 2019 Renewable energy industry outlook[R/OL]. (2019) [2020-03]. <https://www2.deloitte.com/be/en/pages/energy-and-resources/articles/renewable-energy-outlook-2019.html>.
- [6] Energy Reform Institute NDRC. P.R.C.. et al. Energy transition trends 2018: China, Europe, USA[R]. 2019.
- [7] IRENA. Renewable capacity statistics 2020[R/OL]. (2020-03)[2020-03]. <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>.
- [8] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
- YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [9] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318-4328.
- DING Tao, MU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy Internet and its operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318-4328(in Chinese).
- [10] IEA. Key world energy statistics[R]. Paris: IEA, 2019.
- [11] CHEN X Y, MCELROY M B, KANG C Q. Integrated energy systems for higher wind penetration in China: formulation, implementation, and impacts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1309-1319.
- [12] JIANG Y W, DENG Z H, YOU S. Size optimization and economic analysis of a coupled wind-hydrogen system with curtailment decisions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(36): 19658-19666.
- [13] VAN STIPHOUT A, VIRAG A, KESSELS K, et al. Benefits of a multi-energy day-ahead market[J]. Energy, 2018, 165: 651-661.
- [14] 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. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121(in Chinese).
- [15] 徐箴, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205.
- XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205(in Chinese).
- [16] IEA. Energy efficiency[R]. Paris: IEA, 2016.
- [17] 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. Review and prospect of planning of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462(in Chinese).
- [18] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 低碳多能源系统的研究框架及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4060-4069.
- CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Research framework and prospects of low-carbon multiple energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4060-4069(in Chinese).
- [19] PIERRE P, LESIA M, CHRISTOS O, et al. Towards fully renewable energy system: experience and trends in Denmark[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1): 26-35.
- [20] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
- XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674(in Chinese).
- [21] LYNCH M, DEVINE M T, BERTSCH V. The role of power-to-gas in the future energy system: market and portfolio effects[J]. Energy, 2019, 185: 1197-1209.
- [22] VAN LEEUWEN C, MULDER M. Power-to-gas in electricity markets dominated by renewables[J]. Applied Energy, 2018, 232: 258-272.
- [23] DENG B F, FANG J K, HUI Q, et al. Optimal scheduling for combined district heating and power systems using subsidy strategies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 399-408.
- [24] 张富强, 元博, 张晋芳, 等. 提升风电消纳水平的电力系统灵活性措施经济性评估方法研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 558-564.
- ZHANG Fuqiang, YUAN Bo, ZHANG Jinfang, et al. Economic evaluation of power system flexibility means for improvement of wind power integration[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 558-564(in Chinese).
- [25] 谈金晶, 李扬. 多能源协同的交易模式研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6483-6496.
- TAN Jinjing, LI Yang. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6496(in Chinese).
- [26] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.

- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [27] 世界银行, 国家能源局西北监管局, 西安交通大学. 西北地区新能源发展滚动机制路径研究[R]. 2018.
- [28] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
- WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028(in Chinese).
- [29] LI Y, LIU W J, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal operation strategy for integrated natural gas generating unit and power-to-gas conversion facilities[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1870-1879.
- [30] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy Internet(1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [31] WANG D, HU Q E, JIA H J, et al. Integrated demand response in district electricity-heating network considering double auction retail energy market based on demand-side energy stations[J]. Applied Energy, 2019, 248: 656-678.
- [32] 王业磊, 赵俊华, 文福拴, 等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 1-10.
- WANG Yelei, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 1-10(in Chinese).
- [33] LIU B, MENG K, DONG Z Y, et al. Optimal dispatch of coupled electricity and heat system with independent thermal energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3250-3263.
- [34] ORDOUDIS C, PINSON P, MORALES J M. An integrated market for electricity and natural gas systems with stochastic power producers[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(2): 642-654.
- [35] GIL M, DUENAS P, RESESES J. Electricity and natural gas interdependency: comparison of two methodologies for coupling large market models within the European regulatory framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 361-369.
- [36] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Equilibrium of interdependent gas and electricity markets with marginal price based bilateral energy trading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4854-4867.
- [37] RUBIO R, OJEDA-ESTEYBAR D, ANO O, et al. Integrated natural gas and electricity market: a survey of the state of the art in operation planning and market issues[C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. 13-15 Aug. 2008, Bogota, Colombia. IEEE, 2008: 1-8.
- [38] LI H L, SUN Q, ZHANG Q, et al. A review of the pricing mechanisms for district heating systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 56-65.
- [39] CHEN R Z, WANG J H, SUN H B. Clearing and pricing for coordinated gas and electricity day-ahead markets considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2496-2508.
- [40] MOGHADDAM I G, SANIEI M, MASHHOUR E. A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building[J]. Energy, 2016, 94: 157-170.
- [41] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 基于能值分析的多能互补综合能源系统价值评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2925-2933.
- TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. Multi-energy system valuation method based on emergy analysis[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2925-2933(in Chinese).
- [42] 刘凡, 别朝红, 刘诗雨, 等. 能源互联网市场体系设计、交易机制和关键问题[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 108-117.
- LIU Fan, BIE Zhaohong, LIU Shiyu, et al. Framework design, transaction mechanism and key issues of energy Internet market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 108-117(in Chinese).
- [43] TOLEDO F, SAUMA E, JERARDINO S. Energy cost distortion due to ignoring natural gas network limitations in the scheduling of hydrothermal power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3785-3793.
- [44] SPIECKER S. Modeling market power by natural gas producers and its impact on the power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3737-3746.
- [45] VAZQUEZ M, HALLACK M. Representing the valuation of take-or-pay provisions in gas markets with limited liquidity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3152-3159.
- [46] JI Z Y, HUANG X L. Day-ahead schedule and equilibrium for the coupled electricity and natural gas markets[J]. IEEE Access, 2018, 6: 27530-27540.
- [47] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [48] VIRASJOKI V, SIDDIQUI A S, ZAKERI B, et al. Market power with combined heat and power production in the Nordic energy system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5263-5275.
- [49] QIU J, YANG H M, DONG Z Y, et al. A linear programming approach to expansion co-planning in gas and electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3594-3606.
- [50] WANG H B, WANG C M, KHAN M, et al. Risk-averse market clearing for coupled electricity, natural gas and district

- heating system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2):240-248.
- [51] GOROOHI SARDOU I, KHODAYAR M E, AMELI M T. Coordinated operation of natural gas and electricity networks with microgrid aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 199-210.
- [52] 周琳, 付学谦, 刘硕, 等. 促进新能源消纳的综合能源系统日前市场出清优化[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 9-18.
ZHOU Lin, FU Xueqian, LIU Shuo, et al. Day-ahead market clearing model of integrated energy system for promoting renewable energy consumption[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 9-18(in Chinese).
- [53] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Optimal scheduling of the regional integrated energy system considering economy and environment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1939-1949.
- [54] WEN Y F, QU X B, LI W Y, et al. Synergistic operation of electricity and natural gas networks via ADMM[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4555-4565.
- [55] MITRIDATI L, KAZEMPOUR J, PINSON P. Heat and electricity market coordination: a scalable complementarity approach[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 283(3): 1107-1123.
- [56] DENG L R, LI Z S, SUN H B, et al. Generalized locational marginal pricing in a heat-and-electricity-integrated market[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6414-6425.
- [57] 方宇娟, 魏韡, 梅生伟, 等. 考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 682-687.
FANG Yujuan, WEI Wei, MEI Shengwei, et al. Stackelberg game strategy for combined heat power unit considering locational marginal prices[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(5): 682-687(in Chinese).
- [58] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, CHICCO G, et al. Aggregation of distributed energy resources under the concept of multienergy players in local energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4):1679-1693.
- [59] LIU N, WANG J, WANG L F. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1139-1151.
- [60] LI Y, ZOU Y, TAN Y, et al. Optimal stochastic operation of integrated low-carbon electric power, natural gas, and heat delivery system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 273-283.
- [61] XIAO Y P, WANG X F, PINSON P, et al. A local energy market for electricity and hydrogen[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3898-3908.
- [62] STREET A, BARROSO L A, CHABAR R, et al. Pricing flexible natural gas supply contracts under uncertainty in hydrothermal markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1009-1017.
- [63] JI Z Y, HUANG X L. Coordinated bidding strategy in synchronized electricity and natural gas markets[C]//2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). 24-26 Oct. 2017, Singapore. IEEE, 2017: 1-6.
- [64] WU G, XIANG Y, LIU J Y, et al. Chance-constrained optimal dispatch of integrated electricity and natural gas systems considering medium and long-term electricity transactions[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3):315-323.
- [65] DUENAS P, BARQUIN J, RENESES J. Strategic management of multi-year natural gas contracts in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 771-779.
- [66] DUEÑAS P, LEUNG T, GIL M, et al. Gas-electricity coordination in competitive markets under renewable energy uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 123-131.
- [67] NIELSEN M G, MORALES J M, ZUGNO M, et al. Economic valuation of heat pumps and electric boilers in the Danish energy system[J]. Applied Energy, 2016, 167: 189-200.
- [68] ZHOU Y Z, WEI Z N, SUN G Q, et al. A robust optimization approach for integrated community energy system in energy and ancillary service markets[J]. Energy, 2018, 148: 1-15.
- [69] WEI F, JING Z X, WU P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200: 315-329.
- [70] LU Q, LÜ S, LENG Y J. A Nash-Stackelberg game approach in regional energy market considering users' integrated demand response[J]. Energy, 2019, 175: 456-470.
- [71] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, SHAFIE-KHAH M, et al. Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a Bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 397-411.
- [72] 丛昊, 王旭, 蒋传文. 电力-天然气异步市场环境下的综合能源系统优化运行策略[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3110-3118.
CONG Hao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Strategies of optimal operation of integrated energy system in asynchronous market environment[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3110-3118(in Chinese).
- [73] ZHOU K, PAN J P, CAI L. Indirect load shaping for CHP systems through real-time price signals[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 282-290.
- [74] ALIPOUR M, ZARE K, ZAREIPOUR H, et al. Hedging strategies for heat and electricity consumers in the presence of real-time demand response programs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1262-1270.
- [75] DABABNEH F, LI L. Integrated electricity and natural gas demand response for manufacturers in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4164-4174.
- [76] ZHANG X P, CHE L, SHAHIDEPOUR M, et al. Electricity-natural gas operation planning with hourly demand response for deployment of flexible ramp[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 996-1004.
- [77] WANG J X, ZHONG H W, MA Z M, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.
- [78] 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[J]. 中国电机工程学报, 2015,

- 35(22): 5669-5681.
- WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [79] 李昊飞, 余涛, 瞿凯平, 等. 综合负荷聚合商参与的配电网-气能源系统供需互动均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 32-45.
- LI Hao-fei, YU Tao, QU Kaiping, et al. Interactive equilibrium supply and demand model for electricity-gas energy distribution system with participation of integrated load aggregators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 32-45(in Chinese).
- [80] ZHANG C, XU Y, LI Z M, et al. Robustly coordinated operation of a multi-energy microgrid with flexible electric and thermal loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2765-2775.
- [81] MAJIDI M, ZARE K. Integration of smart energy hubs in distribution networks under uncertainties and demand response concept[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 566-574.
- [82] MOAZENI S, MIRAGHA A H, DEFOURNY B. A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy hub optimal dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2169-2178.
- [83] LI Y, LI Z Y, WEN F S, et al. Privacy-preserving optimal dispatch for an integrated power distribution and natural gas system in networked energy hubs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 2028-2038.
- [84] SHEIKHI A, BAHRAMI S, RANJBAR A M. An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs[J]. Energy, 2015, 89: 490-499.
- [85] LI R, WEI W, MEI S W, et al. Participation of an energy hub in electricity and heat distribution markets: an MPEC approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3641-3653.
- [86] LIU P Y, DING T, ZOU Z X, et al. Integrated demand response for a load serving entity in multi-energy market considering network constraints[J]. Applied Energy, 2019, 250: 512-529.
- [87] MA L, LIU N, ZHANG J H, et al. Real-time rolling horizon energy management for the energy-hub-coordinated prosumer community from a cooperative perspective[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1227-1242.
- [88] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Strategic offering and equilibrium in coupled gas and electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 290-306.
- [89] ZHAO B N, ZLOTNIK A, CONEJO A J, et al. Shadow price-based co-ordination of natural gas and electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1942-1954.
- [90] CHEN S, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Operational equilibria of electric and natural gas systems with limited information interchange[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 662-671.
- [91] CHEN S, CONEJO A J, SIOSHANSI R, et al. Equilibria in electricity and natural gas markets with strategic offers and bids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1956-1966.
- [92] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4080-4094.
- [93] CAO Y, WEI W, WU L, et al. Decentralized operation of interdependent power distribution network and district heating network: a market-driven approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5374-5385.
- [94] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. A multi-lateral trading model for coupled gas-heat-power energy networks[J]. Applied Energy, 2017, 200: 180-191.
- [95] WU C Y, GU W, BO R, et al. A two-stage game model for combined heat and power trading market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 506-517.
- [96] SHEIKHI A, RAYATI M, BAHRAMI S, et al. Integrated demand side management game in smart energy hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 675-683.
- [97] 梅生伟, 李瑞, 黄少伟, 等. 多能互补网络建模及动态演化机理初探[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 10-22.
- MEI Shengwei, LI Rui, HUANG Shaowei, et al. Preliminary investigation on the modeling and evolutionary analytics of multi-carrier energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 10-22(in Chinese).
- [98] 周晓鸣, 丁一, 邵常政, 等. 计及电-热综合需求侧响应的热电联产机组优化配置研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 248-254.
- ZHOU Xiaoming, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Multi-objective sequential CHP placement based on flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 248-254(in Chinese).

收稿日期: 2020-04-08; 修回日期: 2020-08-03。

作者简介:



肖云鹏

肖云鹏(1990), 男, 博士, 主要研究方向为电力能源市场及新能源电力系统优化调度。通信作者, E-mail: xiaoyunpeng@163.com。

王锡凡(1936), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与规划、电力系统可靠性分析、电力市场、新型输电方式等, E-mail: xfwang@mail.xjtu.edu.cn。

王秀丽(1961), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与规划、电力市场、电力系统可靠性分析、新型输电方式, E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn。

别朝红(1970), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及可靠性评估、新能源接入系统安全性评估、弹性电力系统、能源互联网、电力市场, E-mail: zhbic@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)