

碳中和目标下的能源系统转型与变革:多能流协同技术

陈 胜¹,卫志农¹,顾 伟²,郭庆来³

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;
3. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要:近年来全球多个国家提出了碳中和战略目标,能源系统的转型与变革已迫在眉睫。在能源系统低碳化转型路径中,高比例新能源渗透充当了极为重要的战略角色,且各能源系统之间的转型呈现相辅相成、协同发展的趋势。一方面,新能源可通过电转气、电转热、电制氢等能源耦合设备分别为天然气、热力、交通侧等负荷提供绿色能源供应,终端用能的电气化改善了终端能源结构;另一方面,多能源系统的灵活性及多能互补性为间歇性新能源并网的消纳提供了支撑。为此,综述了面向碳中和目标的能源系统转型与变革的多能流协同技术,介绍了高比例新能源渗透下的多能流协同技术,剖析了支撑新能源并网的多能源市场机制设计,最后归纳总结了未来能源系统转型与变革面临的核心挑战。

关键词:碳中和;能源系统;转型与变革;新能源;新型电力系统;多能流协同

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109037

0 引言

当今世界能源需求日趋增加,能源供需矛盾凸显,如何保障能源供应安全,提高能源利用效率,降低温室气体排放,寻求替代性能源已然成为能源改革的必经之路。因此,构建低碳可持续能源系统已成为世界各国的重要战略目标,美国与欧盟已提出于2050年前实现碳中和目标^[1-2],我国也提出了于2030年前及2060年前分别实现碳达峰与碳中和目标。

在电力、建筑、工业及交通行业中,电力行业的碳排放量最高^[3],因此也成为降低碳排放的关键。而在世界各国电力/能源系统低碳化转型的过程中,低碳与清洁技术(如新能源发电、新型储能、燃气发电、碳捕集电厂、电制氢等)的利用尤为关键,其中“零碳排放”新能源(以风电与光伏为主)的高比例渗透已成为能源系统转型与变革的必经之路。另一方面,交通系统的碳排放量是仅次于电力系统的,因此交通行业的低碳化转型也尤为关键,而为实现该目标,离不开能源系统可靠的燃料供应,因此交通系统与现有能源系统将呈现深度耦合的趋势。进一步而言,交通系统与能源系统的低碳化转型相辅相成,因此本文所述的能源系统转型与变革计及了交通侧。

值得注意的是,对于以新能源为主体的电力/能源系统,新能源出力取决于实时的天气条件,存在着间歇性、波动性、难以准确预测的特点。因此,高

比例新能源渗透给现代电网的安全高效运行(尤其是实时供需平衡)带来了极大的挑战。对于间歇性新能源的平抑,近年来的研究侧重于储能技术与需求响应技术的利用^[4-6]。但是目前电能尚难以大规模高效存储,传统电负荷的灵活性响应能力也相对有限。在传统电源侧,燃气轮机组的快速爬坡能力充当了灵活性调节资源的角色,因此燃气轮机组的装机容量占比呈现逐年增长的趋势,该趋势在高比例新能源渗透区域及低气价区域尤为明显^[7-8]。同时,燃气轮机组发电占比的提升加深了电力系统与天然气系统之间的耦合:一方面,燃气轮机组的发电依赖于天然气系统(管道)提供可靠的燃料供应;另一方面,灵活性燃气轮机组短时间内的快速爬坡也影响了天然气系统的运行。针对此类问题,北美多个独立系统运营商(ISO)(包括PJM、ERCOT、CAISO等)成立了“气-电协同”工作组^[9],解决包括电力市场与天然气市场出清时间不同步问题以及运行信息交互问题,以规避电力系统与天然气系统深度耦合下的潜在风险^[10]。

概括而言,为实现高比例新能源的消纳,电力系统(包含电源侧、储能侧、负荷侧)的灵活性资源未必足够充裕。然而,多能源耦合下的多能流(包括电力流、天然气流、热力流、交通流等)协同技术为间歇性新能源的消纳提供了新的解决思路,尤其是使得天然气系统与热力系统的运行灵活性更高^[11-12]。此外,对于电网难以消纳的新能源,可通过多能源耦合设备(如电转气P2G(Power-to-Gas)、电转热、电制氢等)转化为更易于大规模存储的天然气/热能/氢能^[13-14]。因此,综合能源系统视角下的多能流协同有助于高比例新能源的消纳。另一方面,高比例新能源的渗透也为综合能源系统的低碳化转型提供了

收稿日期:2021-07-03;修回日期:2021-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007051);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019B05714)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007051) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2019B05714)

支撑。另外,综合能源系统的低碳化转型与市场机制/政策密切相关。新能源机组(如风电、光伏机组)的边际发电成本接近于0,对于以新能源为主体的电力系统,当前现货市场机制未必严格适用^[15]。而对于多能源耦合设备,其需要参与多个能源市场的交易,因此综合能源市场机制的设计影响了多能源耦合设备的投资与运营。此外,碳排放交易与绿色证书交易也为低碳与清洁技术的投资规划提供了政策支撑^[16-17]。

碳中和目标下能源系统的本质特征在于高比例新能源的渗透,而多能流协同技术则在灵活性、安全性、经济性等方面支撑了以新能源为主体的能源系统的转型与变革。本文首先介绍了高比例新能源渗透下的多能流协同技术;其次介绍了支撑高比例新能源并网的市场机制设计,包括电力市场、碳排放市场、多能源市场的协同;然后归纳总结了综合能源系统低碳化转型面临的挑战;最后对未来研究进行了展望。

1 高比例新能源渗透下的多能流协同技术

考虑到电力系统灵活性资源相对有限,本节从综合能源系统(多能流协同)的视角叙述消纳间歇性新能源。本文计及了电力系统与天然气系统、热力系统及交通系统的协同,充分挖掘各能源系统的灵活性。下面将分别从综合能源系统建模、协同优化及协同规划展开介绍。

1.1 低碳综合能源系统建模

图1展示了多能源耦合下的综合能源系统架构。电力系统与天然气系统之间的耦合元件包括燃气轮机组、热电联产CHP(Combined Heat and Power)及P2G;电力系统与热力系统之间的耦合元件包括CHP、电锅炉及热泵;电力系统与交通系统之间的耦合元件为电动汽车^[18];天然气系统与交通系统之间的耦合元件包括氢燃料汽车与天然气汽车^[19]。多能

源耦合元件的建模可由能源输入与能源输出的转化效率描述。另外,多能流耦合元件的统一建模可由能量枢纽^[20](可包含单个或多个耦合元件)描述。值得注意的是,多能源系统之间的耦合能够为新能源的消纳提供支撑,这将在下文中展开介绍。

由于电力系统的动态过程远快于天然气系统/热力系统^[21],因此在综合能源系统的建模中,电力系统一般采用熟知的稳态电力潮流模型,此处不展开深入介绍。

天然气流量的传播速度一般在48 km/h左右^[22],因此天然气系统的动态过程需持续数分钟乃至数小时(取决于气压等级与管道长度)。对于中长期规划问题,可考虑采用天然气稳态潮流模型^[23],主要由节点流量平衡方程、管道流量-节点气压非线性Weymouth方程及加压站加压比构成;而对于短期运行,有必要采用天然气动态潮流模型。对于天然气动态潮流模型^[24-25],其关键在于天然气管道的管存(line-pack)建模,管存量近似正比于管道的平均气压值。连续2个运行断面管存量之差即为管道向系统释放/吸收的天然气量。因此,管道的管存量充当了储能的角色,对于净负荷波动的平抑至关重要。

热力系统的建模与天然气系统的建模相似,分为稳态建模^[26-27]与动态建模^[28]。其中,稳态热力潮流模型包括水力计算与热力计算,当二者独立计算时,通过水力计算获得管道流量,而通过热力计算获取节点温度;当二者联合计算时,管道流量与节点温度呈现非线性双向耦合。对于热力系统的动态建模,关键在于供热管道水温动态特性的描述,传输过程中水温的动态延时决定了供热管道天然气的储热特性。

值得注意的是,在电-气-热互联综合能源系统的建模中,文献[29-30]提出了基于傅里叶变换的多异质能流统一能路理论,为综合能源系统的统一分析奠定了理论基础;文献[31-32]提出了基于拉普拉斯变换的广义电路分析理论,推导了多能源网络的外端口等值模型。

对于交通系统的建模,交通网中的交通流分布是用户驾驶行为的聚集性表现,通常采用交通分配模型来描述^[33]。交通分配问题可分为静态、半动态和动态交通分配^[34-35]。其中,静态交通分配所对应的时间尺度较长(90 min以上),最终的分配结果可视为相应时段内的平均流量,因此该模型通常适用于中长期规划问题;半动态交通分配所对应的时间尺度为15~90 min,该模型可以考虑时变交通需求以及交通流在各时段间的耦合,适用于在日前处理交通分配问题;动态交通分配所对应的时间尺度小于15 min,能够精确地描述各路段间交通流的动态传播过程(可以达到秒级),适用于实时交通控制管理问题。文献[36]从势博弈的角度,分析了电力-交通

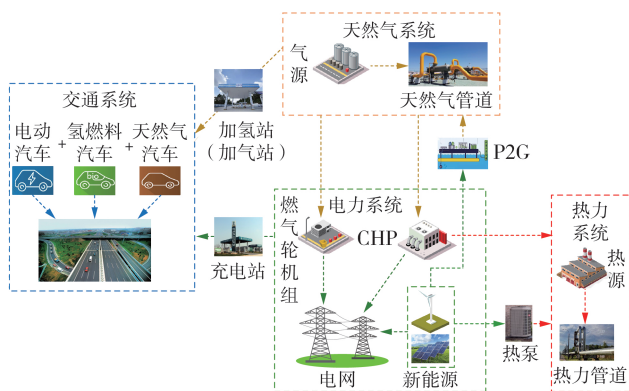


图1 支撑高比例新能源消纳的综合能源系统架构

Fig.1 Framework of integrated energy system supporting accommodation of high penetrations of renewable energy

网络相互作用的运行均衡点。

1.2 支撑新能源消纳的多能流协同运行

当新能源出力不足或者过剩时,可利用多能流系统的灵活性平抑新能源出力波动。图2以新能源出力不足为例,展示了利用多能流协同维持电功率的实时平衡。其中天然气管道释放储气,支撑燃气轮机组提高发电量;同时热力管道释放储热,保证CHP机组减少热出力而增大电出力。

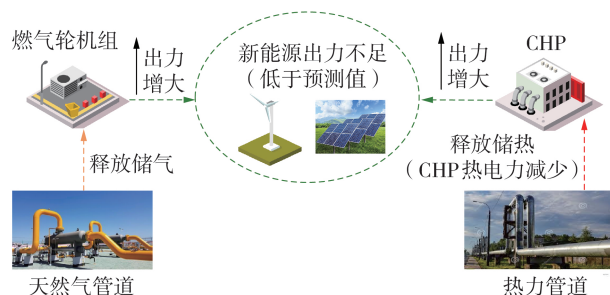


图2 新能源出力不足时的多能流协同

Fig.2 Multi-energy flow coordination when renewable energy production is insufficient

在气-电协同方面,可利用燃气轮机组的灵活性、P2G及天然气系统的储气量支撑新能源消纳。文献[37]采用动态场景刻画新能源出力的随机性,研究了电-气互联综合能源系统的协同优化,验证了利用灵活性更高的气网平抑间歇性新能源出力的有效性。文献[38]提出了计及P2G的综合能源系统协同调度模型,定量分析了P2G对于风电消纳的经济效益。文献[39]构建了计及动态管存与风电消纳的电-气互联综合能源系统优化调度模型,推导验证了动态管存特性对于平抑风电出力不确定性的缓解作用。文献[40]定量评估了P2G与燃气轮机组协同下对风电消纳、碳排放量及经济效益的积极影响。文献[41]分析了将新能源通过P2G技术转化为氢气/合成天然气存储于天然气网络中的经济性,定量评估了季节性储气的灵活性价值。文献[42]构建了计及高比例风电渗透的综合能源系统两阶段鲁棒调度模型,同时考虑了输网侧与配网侧的气-电协同。

在热-电协同方面,可利用CHP、电锅炉、热泵及供热网络的储热量支撑新能源的消纳。文献[43]定量分析了大容量储热对于提升系统灵活性与风电消纳能力的效果。文献[44]分析了含储热CHP与电锅炉协同供热时对于消纳风电的作用,并验证了电锅炉在消纳弃风时具备最优的经济性。文献[45]构建了面向风电消纳的电-热互联综合能源系统优化调度模型,计及了热网延时特性与热负荷的舒适度弹性。文献[46]针对我国由CHP机组灵活性不高导致的弃风问题,从技术与经济层面探讨了电锅炉与热储能对于风电消纳的可行性。文献[47]定量

分析了大规模热泵的使用对于丹麦能源系统能源供应成本的降低及向100%可再生能源供应转型的作用。

在电-交通协同与电-氢协同方面,主要利用电制氢、电动汽车与氢燃料汽车的灵活性支撑新能源的消纳。文献[48]论述了面向高比例可再生能源消纳的电-氢能源系统框架,展望了以电与氢为核心能源载体的前景。文献[49]通过对于快充车辆的导航,利用其可移动的灵活性调节能力,同时缓解电网拥塞与交通阻塞。文献[50]构建了计及风、光、电动汽车、氢燃料汽车的新能源汽车一体化充能站能量优化方法。文献[51]研究了计及新能源与氢燃料汽车的电力系统与交通系统协同调度方法,分析了氢储能对于提高系统灵活性的重要性。文献[52]研究了在电力-交通网络协同下,通过优化电动汽车行驶路径实现新能源的消纳。文献[53]构建了计及电力系统随机机组组合与交通流分配的协同调度模型,评估了电动汽车灵活性对于降低配电网运行成本与缓解交通阻塞的作用。文献[54]在考虑信息-物理-社群融合的情况下,通过能源-交通系统的联合动态定价实现协同优化。

1.3 支撑新能源消纳的多能流协同规划

综合能源系统规划是在中长期规划周期内,投资新建多能源设备、线路、管道、储能等,一般以规划周期内的投资成本与运行成本最优为目标,需考虑一系列典型场景的运行问题,因此1.2节所述的多能流协同运行是本节多能流协同规划的基础。

文献[55]综述了考虑互联互通的综合能源系统规划研究,梳理了电、气、热、氢等多能流系统规划的关键科学问题。文献[56]研究了计及CHP机组与P2G厂站的综合能源系统协同规划模型,算例分析表明CHP机组与P2G厂站的联合应用能够降低综合能源系统的运行成本,提升系统的风电消纳能力。文献[57]构建了综合能源系统中P2G设备容量规划模型,计及了氢气注入天然气管道的天然气-氢气混合流量模型。文献[58]构建了计及混合交通均衡的综合能源系统规划模型,充分利用了配电网、天然气网及交通网之间的协同互补。文献[59]提出了计及季节性氢能存储的电-氢混合综合能源系统协同规划模型,采用随机-鲁棒混合优化模型处理中长期负荷与新能源出力的不确定性。文献[60]构建了考虑分布式新能源的综合能源系统选址与定容问题,分析了负荷曲线、能源价格及设备参数对综合能源系统规划结果的影响。

2 支撑新能源并网的多能源市场机制设计

电力/能源市场机制的设计与监管在能源系统的转型过程中充当了重要的角色。合理的市场机制

(价格信号)能够直接激励市场参与者/投资商投资环境友好型发电技术,而逐步淘汰传统高碳排放发电技术。本节概述了以电力市场为核心的多能源市场机制的设计。首先以电力市场为例,介绍了能量市场的定价机制,天然气/热力等能量市场的出清可参考该机制,区别在于出清的时间尺度;然后介绍了支撑电力系统低碳化转型的市场机制——碳市场交易机制与绿色证书交易机制这2种机制;最后介绍了在多能耦合下多个能源市场的协同机制。

2.1 能量市场定价机制

当前能量市场的出清一般以社会效益最大化为目标,且需满足电力系统的安全运行约束。需要说明的是,能量市场与备用市场是相互关联、不可切分的,因此北美ISO普遍采用了能量-备用市场联合出清,而能量与备用市场顺序独立出清(如部分欧洲地区ISO)则难免会造成社会效益的损失^[61]。

图3展示了传统能源结构下单断面电力市场出清,为便于表述,此处忽略了负荷的价格弹性及网络运行约束,此时满足负荷需求情况下边际发电机组的报价为节点边际价格LMP(Locational Marginal Price)。由图3可知,在传统能源结构下,LMP随着负荷需求量逐步增长,且在不同的负荷需求区间内LMP的变化量相对比较稳定。

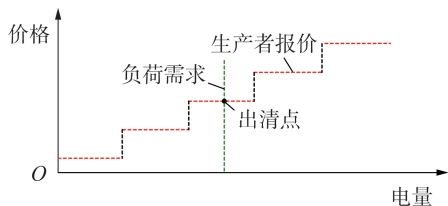


图3 常规能源结构下的电力市场出清

Fig.3 Market clearing of conventional energy structure

图4展示了高比例新能源并网下的电力市场出清。一方面,因新能源发电边际成本明显低于传统发电机组,故新能源发电占比的提高有利于降低系统的LMP。文献[62]分析了北美各ISO新能源发电占比提升对电价的影响,在得州电网,新能源发电占比每增加1%,平均电价降低0.52 \$/(MW·h),而在新英格兰电网,该值达到了0.80 \$/(MW·h)。另一方面,由图4可知,对于新能源发电占比较高的电

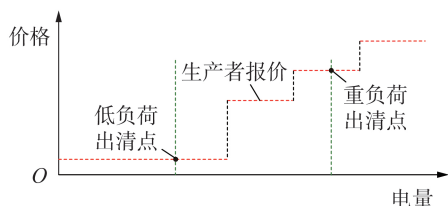
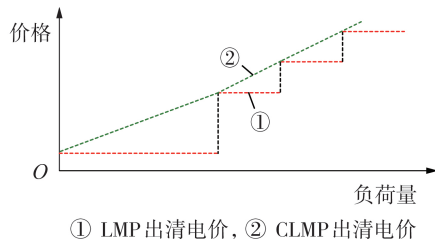


图4 高比例新能源并网下的电力市场出清

Fig.4 Market clearing of high penetrations of renewable energy integrated to power system

网,轻负荷(新能源为边际发电机组)与重负荷(传统电源为边际发电机组)下LMP差异性极大,尤其是当边际发电机组由新能源切换为传统电源时,将导致LMP的“陡升”,此类价格信号可能造成市场效率的损失。具体而言,电力消费者在LMP“陡升”的区间段用电行为将会变得尤为谨慎;而发电商则可能在此区间段提高能量市场报价,以达到抬高LMP及最大化自身盈利的目的。从市场监管的角度而言,此时发电商市场力的抑制显得尤为重要。

对于充分竞争的电力市场,基于LMP的出清机制能够保证社会效益的最大化,因此在绝大多数ISO得到了应用^[63]。但对于基于LMP的出清机制在以新能源为主体的新型电力系统中的适用性,笔者认为仍然有待验证。文献[64]提出了一种基于连续节点边际电价CLMP(Continuous LMP)的出清机制,在该机制下,节点电价与负荷量呈现连续变化的关系,而非LMP出清机制下的间断变化关系。进一步而言,笔者认为基于CLMP的出清机制更适用于以新能源为主体的新型电力系统(如图5所示),因为该机制可避免节点电价的“陡升”,可为市场参与者提供更为完善的市场价格信号。



① LMP出清电价, ② CLMP出清电价

图5 基于CLMP的高比例新能源并网下的电力市场出清

Fig.5 Market clearing of high penetrations of renewable energy integrated to power system based on CLMP

对于能量市场的出清时间尺度,北美地区电力市场普遍采用日前-实时两阶段出清机制;而随着新能源发电占比的提升,部分地区ISO引入了日内市场,即形成了日前-日内-实时三阶段出清机制。文献[65]对比分析了三阶段市场出清机制与两阶段市场出清机制,该研究表明三阶段出清机制的市场效率更高。除能量市场外,辅助服务市场也是现货市场的核心,尤其是在高比例新能源渗透的情况下。文献[66]概述了国外典型辅助服务市场产品,归纳总结了其对我国辅助服务市场机制设计的启示。

2.2 碳市场交易机制

在我国电力行业的碳排放量约占总碳排放的40%,因此电力行业的减排对于我国碳中和目标的实现至关重要。在控制/减少碳排放方面,当前有2类碳政策^[67]。第一类为碳排放税,即发电商每单位的碳排放需支付固定价格的税,此类政策有利于

提高低碳技术的市场竞争力,但不能直接控制总碳排放量。第二类为碳配额交易(cap and trade),即政策制定者设置总碳排放配额(一般以年为周期),各个发电商可以在碳市场购买/出售碳排放配额,而碳价格则由碳交易市场决定,此类政策可直接控制年度的碳排放总量。其中,碳配额交易机制在欧盟国家得到了广泛应用^[68],也有效促进了欧盟电力行业的减排。在欧洲碳市场的早期,碳配额免费发放至企业,而随着碳市场的逐步成熟,部分碳配额需通过拍卖获得。此外在碳排放总额方面,欧盟设立了2030年的排放量比2005年降低43%的目标。归纳而言,碳配额下的碳市场交易机制更适用于当前碳达峰与碳中和的政策目标。

在碳市场对电力市场及电力系统转型的影响方面,文献[69]构建了计及碳交易的电力市场均衡模型,分析了发电侧市场力与碳政策的交互影响。文献[70]提出了基于帕累托最优的碳市场设计模型,综合考虑了消费者的需求量、电价及碳排放量。文献[71]研究了基于碳流追踪的多能源系统低碳运行问题,定量分析了碳定价模型对于减少碳排放的作用。文献[72]提出了计及电力市场及碳交易市场的电力系统低碳规划模型。

2.3 绿色证书交易机制

类似于碳配额交易机制,绿色证书交易机制本质上属于配额机制下激励环境友好型发电技术的政策^[17]。在绿色证书交易机制下,发电商每生产1 MW·h的可再生能源可获得1个绿色证书,市场主体(包括发电商、负荷供应商等)需要每年购买一定配额量的绿色证书,而绿色证书的价格则由市场决定。对于缺少全国性碳交易市场的北美地区,绿色证书交易机制为可再生能源的并网提供了良好的政策支撑^[67]。

文献[73]提出了计及绿色证书交易的电力系统电源扩展规划模型,评估了绿色证书交易机制的中长期影响。文献[74]构建了计及电力市场及绿色证书交易的古诺均衡模型,分析了绿色证书交易机制对于提高可再生能源发电商市场竞争力的作用。文献[75]研究了新能源发电商日前-实时两阶段决策报价问题,计及了基于古诺模型的绿色证书交易出清模型及新能源发电商的市场力行为。

2.4 多能源市场协同机制

当前针对综合能源系统的协同规划/运行研究大多采用集中式决策,即间接假定了综合能源系统由单个主体统一运营,这与当前多个子能源系统运营相对独立的现状不相符,尤其是在市场机制下存在信息隐私的问题。因此,对于市场机制下的综合能源系统协同问题,有必要考虑以下2类问题:①多能源市场之间的信息交互与协同问题,如电力市场

与天然气市场的协同(二者各自的市场机制相对比较成熟,而供热系统更多呈现垂直一体化管理,其市场机制尚不成熟);②市场主体(如燃气轮机组、CHP机组、P2G、综合能源服务商等)参与多个能源市场(如电力市场、天然气市场、碳交易市场、绿色证书市场等)的决策报价问题。以电力-天然气-碳交易-绿证市场的协同为例,图6展示了计及市场参与者决策报价的多能源市场博弈均衡问题,侧重说明了电力市场与其余市场的耦合协同,因此天然气、碳交易及绿色证书交易市场的建模不再具体展开描述。

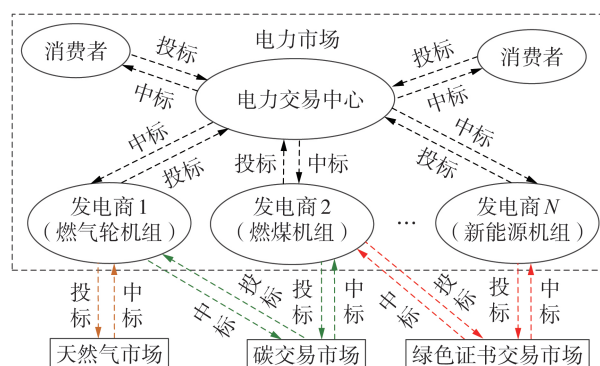


图6 多能源市场的耦合与协同

Fig.6 Coupling and coordination of multi-energy markets

文献[76]分析了电力-天然气市场的博弈均衡点,评估了能源生产者与能源消费者在综合能源市场中的市场力。文献[77]构建了电力-天然气-碳交易博弈均衡模型,分析了碳配额机制对于提高燃气轮机组市场竞争力的作用。文献[78]提出了计及风电不确定性的气-电协同综合能源市场出清模型,提出了一种天然气备用容量报价机制,保证了燃气轮机组燃料供应的充裕性。文献[79]构建了基于两阶段随机优化的综合能源市场模型,对比分析气-电市场顺序出清与联合出清的运行成本。文献[80]分析了计及P2G的多能源市场的均衡问题,其中多能源系统之间的耦合统一由能源中心描述。文献[81]提出了基于广义纳什均衡的电-热联合市场出清模型,采用了一种基于增广拉格朗日的分布式求解方法,保护了市场主体的信息隐私。文献[82]设计了一种以用户为中心的电-热综合能源市场机制,对比分析了4种不同利益分配机制的经济性与计算效率。文献[83]设计了一种基于多市场均衡的综合能源市场机制,构建了综合能源服务商套利交易模型。

3 能源系统低碳化转型的核心挑战

虽然当前围绕多能源系统建模、协同规划/运行、市场机制等开展了较多研究,但多能流协同视角下的能源系统低碳化转型仍有一些问题亟待解决。因此,本节归纳总结了如图7所示的能源系统低碳

化转型需面临的3个核心挑战。

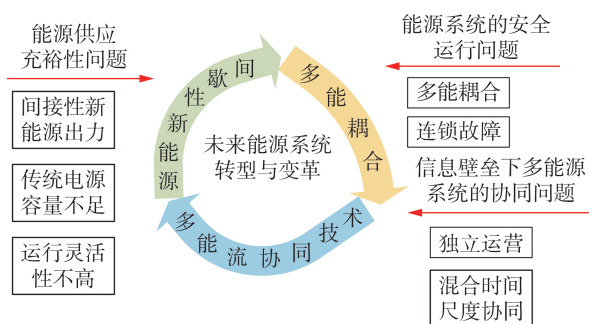


图7 能源系统转型与变革面临的挑战

Fig.7 Challenges faced by transition and revolution of energy systems

3.1 碳中和目标下能源供应的充裕性问题

不同于传统能源系统,以新能源为主体的电力/能源系统会面临能源供应的充裕性问题。具体而言,新能源的出力主要取决于天气因素,这导致在某些场景下新能源的出力未必能达到预期值,2021年2月得州大停电事件部分原因在于风电机组在极寒天气下的退出运行^[84]。当前能源系统的规划侧重于经济性层面,然而规划阶段考虑的典型日与实际的运行场景难免存在偏差。换言之,电力系统规划阶段的充裕性要求电源侧总装机容量达到一定数值(结合峰值负荷与备用容量设定),然而新能源机组的装机容量与传统发电机组的装机容量(能够可靠供电)难以同等看待。

对于以新能源为主体的能源系统,另外一个需充分考虑的问题是系统的灵活性水平。电力系统在规划阶段侧重于考虑中长期负荷不确定性与新能源出力的随机性,而短期运行的灵活性问题容易被忽略。一种可能出现的情况是电力系统中长期电力电量平衡能够满足,但短期运行情况下传统电源的灵活性难以平衡新能源出力的波动,造成能源供应的充裕性问题。值得注意的是:若采用燃气轮机组平抑新能源波动,则需考虑天然气系统的安全运行约束;若采用CHP机组平抑新能源波动,则需考虑热力系统的负荷供应问题。

3.2 能源系统的安全运行问题

多能源系统之间的耦合协同为能源的高效利用提供了机遇,但也不可避免地带来了潜在的运行风险^[10]。得州大停电事故发生的另一个重要原因在于燃气轮机组失去了可靠的天然气供应^[84],此时天然气系统的阻塞问题引发了电力系统的安全运行风险。另一方面,燃气轮机组参与电力系统净负荷波动的平衡易引发天然气系统的运行风险^[85],一个典型的案例是2016年的加州燃气泄漏事故^[86],当时由于气源供应短缺,天然气系统运行在安全边界,此时燃气轮机组的快速爬坡(为平衡新能源波动)导致节

点气压低于安全下限值,造成了气网设备脱网。

归纳而言,在多能源系统深度耦合的情况下,单个系统的运行风险可能造成耦合能源系统的运行风险,甚至引发连锁故障。规避此类运行风险需解决两方面的难题:一是多能源系统之间共享实时的安全运行裕度信息,即出现潜在运行风险时及时告知耦合的能源系统;二是故障发生后,多能源系统之间制定协同的校正控制方案,利用耦合能源系统的灵活性与多能互补性支撑故障恢复。

3.3 信息壁垒下多能源系统的协同问题

随着多个能源系统耦合的加深,相对独立的规划/调度策略往往并非经济上最优。然而,各能源系统运营相对独立,集中式运行决策在工程上难以实现。因此,多能源系统的协同问题需充分考虑各运营主体的信息壁垒问题。当前已有学者开展了有限信息交互下的多能源系统协同研究,文献^[87]研究了日前运行与实时运行下的气-电协同问题。文献^[88]提出了一种基于纳什均衡的配电网与区域热网协同运行模型。文献^[89]构建了基于最佳响应分解法的电力系统与交通系统运行均衡点模型。

在保护信息隐私的前提下,多能流系统的协同仍需考虑时间尺度的问题^[90],即各能源系统在何时交互运行信息。一方面,多个能源系统的运行决策在时间上不一定同步,例如北美地区电力市场与天然气市场日前出清存在不同步的问题;另一方面,电力系统与天然气/热力系统动态过程持续时间差异明显,决定了其运行决策周期存在较大差异。因此,关于多能源系统混合时间尺度协同,尤其是计及市场机制下的信息壁垒问题,值得深入研究。

4 结论与展望

本文综述了碳中和目标下的能源系统转型与变革的多能流协同技术,归纳分析了支撑新能源并网的多能源系统建模、运行及规划问题,分析探讨了以新能源为主体的电力/能源系统的市场机制问题,最后总结了多能流协同下能源系统转型与变革所面临的潜在的核心挑战。值得注意的是,能源系统的低碳化转型路径多样化,本文从多能流协同的视角探讨了支撑高比例新能源并网的关键技术,有望为该领域的研究及工程应用提供有益参考。

参考文献:

- [1] WILLIAMS J H, JONES R A, HALEY B, et al. Carbon-neutral pathways for the United States[J]. AGU Advances, 2021, 2(1): e2020AV000284.
- [2] BBC News. EU carbon neutrality: leaders agree 2050 target without Poland[EB/OL]. (2019-12-03)[2021-07-03]. <https://www.bbc.com/news/world-europe-50778001>.
- [3] BP. Energy outlook 2020[EB/OL]. (2020-09-14)[2021-07-03]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/>

- energy-outlook.html.
- [4] 薛小代,梅生伟,林其友,等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. 电网技术,2016,40(1):164-171.
XUE Xiaodai, MEI Shengwei, LIN Qiyu, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164-171.
 - [5] 易文飞,张艺伟,曾博,等. 多形态激励型需求侧响应协同平衡可再生能源波动的鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报,2018,33(23):5541-5554.
YI Wenfei, ZHANG Yiwei, ZENG Bo, et al. Robust optimization allocation for multi-type incentive-based demand response collaboration to balance renewable energy fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5541-5554.
 - [6] 李国栋,李庚银,周明. 基于可再生能源消纳的欧洲需求侧管理经验与启示[J]. 电力需求侧管理,2020,22(6):96-100.
LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Experience and enlightenment of demand side management in Europe based on renewable energy accommodation[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(6): 96-100.
 - [7] ZHAO B, CONEJO A J, SIOSHANSI R. Unit commitment under gas-supply uncertainty and gas-price variability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2394-2405.
 - [8] ROALD L A, SUNDAR K, ZLOTNIK A, et al. An uncertainty management framework for integrated gas-electric energy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1518-1540.
 - [9] CONEJO A J, CHEN S, CONSTANCE G E. Operations and long-term expansion planning of natural-gas and power systems: a market perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1541-1557.
 - [10] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11.
 - [11] WANG J, ZONG Y, YOU S, et al. A review of Danish integrated multi-energy system flexibility options for high wind power penetration[J]. Clean Energy, 2017, 1(1): 23-35.
 - [12] CHICCO G, RIAZ S, MAZZA A, et al. Flexibility from distributed multienergy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1496-1517.
 - [13] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
 - [14] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.
 - [15] ELA E, MILLS A, GIMON E, et al. Electricity market of the future: potential north American designs without fuel costs[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(1): 41-52.
 - [16] 秦炎. 欧洲碳市场推动电力减排的作用机制分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 37-45.
QIN Yan. Role of European carbon market in power sector decarbonization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 37-45.
 - [17] 樊宇琦,丁涛,孙瑜歌,等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5): 1729-1751.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1751.
 - [18] YANG T, GUO Q, XU L, et al. Dynamic pricing for integrated energy-traffic systems from a cyber-physical-human perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110419.
 - [19] SHAO C, FENG C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal stochastic operation of integrated electric power and renewable energy with vehicle-based hydrogen energy system[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2021-02-01)[2021-07-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9352518>. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3058561.
 - [20] HUANG W, ZHANG N, CHENG Y, et al. Multienergy networks analytics: standardized modeling, optimization, and low carbon analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1411-1436.
 - [21] 顾伟,陆帅,姚帅,等. 综合能源系统混合时间尺度运行优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):203-213.
GU Wei, LU Shuai, YAO Shuai, et al. Hybrid time-scale operation optimization of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 203-213.
 - [22] BAUTISTA A G. Energy insecurity due to gas supply availability: efforts to coordinate electric and gas systems[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(2): 28-36.
 - [23] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.
 - [24] FANG J, ZENG Q, AI X, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198.
 - [25] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47.
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
 - [26] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.
 - [27] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
 - [28] LI Z, WU W, WANG J, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 480-492.
 - [29] 陈彬彬,孙宏斌,陈瑜玮,等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一):气路[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):436-443.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443.
 - [30] 陈彬彬,孙宏斌,尹冠雄,等. 综合能源系统分析的统一能路

- 理论(二):水路和热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142.
- [31] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(一)支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.
- YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks-part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.
- [32] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(二)网络模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 10-21.
- YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks-part two network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 10-21.
- [33] BLIEMER M C J, RAADSEN M P H, BREDERODE L J N, et al. Genetics of traffic assignment models for strategic transport planning[J]. Transport Reviews, 2017, 37(1): 56-78.
- [34] ZHOU X, ZHANG X, GUO Q, et al. Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110083.
- [35] 吕思, 卫志农. 基于动态无线充电的电力-交通网协同优化运行研究综述与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 484-491.
- LÜ Si, WEI Zhinong. Coupling electricity and transportation networks to achieve dynamic wireless charging: review and prospects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 484-491.
- [36] ZHOU X, MOURA S, ZHANG H, et al. Power-traffic network equilibrium incorporating behavioral theory: a potential game perspective[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116703.
- [37] 王静, 徐箭, 廖思阳, 等. 计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 2-9.
- WANG Jing, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated electricity-gas energy system considering uncertainty of renewable energy output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 2-9.
- [38] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3680-3689.
- LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3689.
- [39] 陈泽兴, 赵振东, 张勇军, 等. 计及动态管存的电-气互联系统优化调度与高比例风电消纳[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 31-40, 49.
- CHEN Zexing, ZHAO Zhendong, ZHANG Yongjun, et al. Optimal dispatch of integrated electricity and natural gas system and accommodation of high-penetration wind power considering dynamic line pack[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 31-40, 49.
- [40] GUANDALINI G, CAMPANARI S, ROMANO M C. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: energy and economic assessment[J]. Applied Energy, 2015, 147: 117-130.
- [41] CLEGG S, MANCARELLA P. Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 566-575.
- [42] YAN M, ZHANG N, AI X, et al. Robust two-stage regional-district scheduling of multi-carrier energy systems with a large penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1227-1239.
- [43] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
- CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [44] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.
- CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [45] 林俐, 顾嘉, 王铃. 面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度弹性的电热联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3648-3661.
- LIN Li, GU Jia, WANG Qian. Optimal dispatching of combined heat-power system considering characteristics of thermal network and thermal comfort elasticity for wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3648-3661.
- [46] CHEN X, MCELROY M B, KANG C. Integrated energy systems for higher wind penetration in China: formulation, implementation, and impacts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1309-1319.
- [47] LUND R, ILIC D D, TRYGG L. Socioeconomic potential for introducing large-scale heat pumps in district heating in Denmark[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 219-229.
- [48] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电热能源系统[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 1-10.
- PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accommodation of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10.
- [49] GUO Q, XIN S, SUN H, et al. Rapid-charging navigation of electric vehicles based on real-time power systems and traffic data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1969-1979.
- [50] 陈中, 陈妍希, 车松阳. 新能源汽车一体充电站框架及能量优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 41-49.
- CHEN Zhong, CHEN Yanxi, CHE Songyang. Framework of integrated charging station for renewable energy vehicle and energy optimal dispatch method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 41-49.
- [51] SHAO C, FENG C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal stochastic operation of integrated electric power and renewable energy with vehicle-based hydrogen energy system[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2021-02-10)[2021-07-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9352518>. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3058561.
- [52] ZHANG H, HU Z, SONG Y. Power and transport nexus: routing electric vehicles to promote renewable power integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3291-3301.
- [53] SUN Y, CHEN Z, LI Z, et al. EV charging schedule in coupled constrained networks of transportation and power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4706-4716.
- [54] YANG T, GUO Q, XU L, et al. Dynamic pricing for integrated energy-traffic systems from a cyber-physical-human perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110419.

- [55] 吕佳伟,张沈习,程浩忠,等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021.
LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [56] 黄国日,刘伟佳,文福拴,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.
- [57] 高鹏飞,周孝信,杨小煜,等. 考虑氢气注入的电-气综合能源系统电制气设备容量规划[J/OL]. 电网技术. (2021-06-16)[2021-07-03]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0300>.
- [58] 王珏莹,胡志坚,谢仕炜. 计及交通流量调度的智慧综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7539-7555.
WANG Jueying, HU Zhijian, XIE Shiwei. Smart multi-energy system planning considering the traffic scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7539-7555.
- [59] PAN G, GU W, LU Y, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [60] HUANG W, ZHANG N, YANG J, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1452-1464.
- [61] CONEJO A J, CARRIÓN M, MORALES J M. Decision making under uncertainty in electricity markets[M]. New York, USA: Springer, 2010.
- [62] ELA E, MILL A, GIMON E, et al. Electricity market of the future: potential north American designs without fuel costs[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(1): 41-52.
- [63] LITVINOV E, ZHENG T, ROSENWALD G, et al. Marginal loss modeling in LMP calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 880-888.
- [64] LI F. Continuous Locational Marginal Pricing (CLMP)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1638-1646.
- [65] ABBASPOURTORBATI F, CONEJO A J, WANG J, et al. Three- or two-stage stochastic market-clearing algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3099-3110.
- [66] 何永秀,陈倩,费云志,等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术,2018,42(9):2915-2922.
HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. Power Systems Technology, 2018, 42(9): 2915-2922.
- [67] GABRIEL S A, CONEJO A J, FULLER J D, et al. Complementarity modeling in energy markets[M]. New York, USA: Springer, 2012.
- [68] 秦炎. 欧洲碳市场推动电力减排的作用机制分析[J]. 全球能源互联网,2021,4(1):37-45.
QIN Yan. Role of European carbon market in power sector decarbonization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 37-45.
- [69] LIMPAITON T, CHEN Y, OREN S S. The impact of carbon cap and trade regulation on congested electricity market equilibrium[J]. Journal of Regulatory Economics, 2011, 40(3): 237-260.
- [70] FEIJOO F, DAS T K. Design of Pareto optimal CO₂ cap-and-trade policies for deregulated electricity networks[J]. Applied Energy, 2014, 119: 371-383.
- [71] CHENG Y, ZHANG N, ZHANG B, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1307-1318.
- [72] WANG Y, QIU J, TAO Y, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [73] NGUYEN H T, FELDER F A. Generation expansion planning with renewable energy credit markets: a bilevel programming approach[J]. Applied Energy, 2020, 276: 115472.
- [74] HELGESEN P I, TOMASGARD A. An equilibrium market power model for power markets and tradable green certificates, including Kirchhoff's laws and Nash-Cournot competition[J]. Energy Economics, 2018, 70: 270-288.
- [75] GUO H, CHEN Q, XIA Q, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1898-1910.
- [76] 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.
- [77] CHEN S, CONEJO A J, WEI Z. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2021-03-17)[2021-07-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9380720>. DOI:10.1109/TPWRS.2021.3066459.
- [78] CHEN R, WANG J, SUN H. 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.
- [79] ORDOUDIS C, PINSON P, MORALES J M. An integrated market for electricity and natural gas systems with stochastic power producers[J]. European Journal of Operations Research, 2019, 272: 642-654.
- [80] 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):1-10,65.
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, 65.
- [81] WU C, GU W, BO R, et al. Energy trading and generalized Nash equilibrium in combined heat and power market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3378-3387.
- [82] MITRIDATI L, KAZEMPOUR J, PINSON P. Design and game-theoretic analysis of community-based market mechanisms in heat and electricity systems[J]. Omega, 2021, 99: 102177.
- [83] 王剑晓,夏清,李庚银,等. 基于多市场均衡的综合能源市场机制设计[J/OL]. 中国电机工程学报. (2021-06-28)[2021-07-03]. <https://doi.org/10.13335/j.0258-8013.pcsee.210349>.
- [84] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12): 4033-4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [85] CHERTKOV M, BACKHAUS S, LEBEDEV V. Cascading of fluctuations in interdependent energy infrastructures: gas-grid coupling[J]. Applied Energy, 2015, 160: 541-551.
- [86] FAIRLEY P. The troubled link between gas and electricity grids[J]. IEEE Spectrum, 2016, 53(6): 11-12.

- [87] CEHN S, CONEJO A J, WEI Z. Gas-power coordination: from day-ahead scheduling to actual operation[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2021-07-21)[2021-08-02]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9492841>. DOI:10.1109/TPWRS.2021.3098768.
- [88] 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.
- [89] WEI W, WU L, WANG J, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764-6779.
- [90] 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 systems towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24.

作者简介:



陈 胜

陈 胜(1990—),男,江苏溧阳人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源系统、电力市场等(**E-mail**: chensheng2019@hhu.edu.cn);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为综合能源系统、交直流配电网等(**E-mail**: wzn_nj@263.net);

顾 伟(1981—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为综合能源系统、电力系统运行控制等(**E-mail**: wgu@seu.edu.cn);

郭庆来(1979—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为信息物理系统、能源互联网、智能电网、电力系统运行与控制等(**E-mail**: guoqinglai@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems: multi-energy flow coordination technology

CHEN Sheng¹, WEI Zhinong¹, GU Wei², GUO Qinglai³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, many countries around the world have proposed the carbon neutral strategic goal. Hence, the transition and revolution of energy systems are urgent. The high penetrations of renewable energy act as a paramount role towards the pathways to low-carbon energy systems. Moreover, the transition among multiple energy systems has become mutually beneficial and coordinated development. On the one hand, renewable energy can provide natural gas, heat, and transportation demands with green energy supply through multi-energy conversion units including power-to-gas, power-to-heat and power-to-hydrogen. The electrification of the user-side energy demands contributes to improving the energy mix. On the other hand, the flexibility provided by multi-energy systems and multi-energy complement can contribute to the accommodation of intermittent renewable energy production. Therefore, the application of multi-energy flow coordination technology to carbon neutral oriented transition and revolution of energy systems is reviewed. The multi-energy flow coordination technology under the high penetrations of renewable energy is introduced. Then, the design of multi-energy markets for supporting the integration of renewable energy is analyzed. Finally, the core challenges of transition and revolution of energy systems in the future are summarized.

Key words: carbon neutral; energy systems; transition and revolution; renewable energy; new power system; multi-energy flow coordination