

面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场研究综述

李 奇,霍莎莎,蒲雨辰,陈维荣
(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:在我国“双碳”目标愿景下,电-碳-氢耦合交易市场正通过市场机制优化能源配置,加速能源转型,但含氢综合能源系统的兴盛给多能耦合交易市场的发展带来了新的挑战。介绍了含氢综合能源系统的基本结构,并在电-碳、电-氢交易市场研究的基础上分析了电-碳-氢耦合交易机制,深入探究了面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场机制。分别从市场的交易标的物、交易对象、交易价格角度进行了阐述,并归纳分析了目前实现市场均衡的能源定价策略与市场出清机制。最后总结了电-碳-氢交易市场与含氢综合能源系统发展面临的挑战,并对后续的研究方向进行了展望。

关键词:综合能源系统;电-碳-氢交易市场;能源定价策略;出清机制

中图分类号:TM73;TK01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202310006

0 引言

随着全球气候危机的来临,全球能源转型和能源短缺问题愈加显著。各国都在不断协调推进绿色低碳发展和能源供应,朝着高效、清洁、多样化的方向积极发展能源^[1]。含氢综合能源系统因其对清洁能源氢能的高效利用与多能协同规划优势得到广泛关注^[2]。同时,在大力发展市场经济的背景下,通过市场机制采用价格传导优化各类资源的配置也成为一大研究重点^[3]。目前,如何利用市场机制,将外部成本内部化,激发相关企业的创新活力,助力含氢综合能源系统发展,进而加速我国能源结构转型成为亟需解决的问题。

对于我国电力行业而言,碳、氢交易市场与电力市场的交易主体、发展目标高度重合。在碳中和、碳达峰目标背景下,三市场之间互相交叉、彼此影响,呈现出紧密耦合的发展态势^[4]。若在此背景下只关注电能交易市场的发展,将氢能仅作为各能源间的转换介质,则系统对氢能的“制、储、运、用”水平有限,当氢能需求大量增加时,系统的灵活性与可靠性会大幅度降低,同理,若不考虑与碳交易市场间的耦合关系,则各类生产活动将舍弃环保性换取经济性,不利于“双碳”目标的实现。故近年来以不同能源市场间耦合关系为对象的研究逐渐增加,文献[5]提出在电力市场交易过程中融合碳属性指标,形成能够

在满足用户用能需求的同时减少碳属性消费的电-碳市场机制。文献[6]构建了电-碳-气-绿证多级市场耦合下的电氢综合能源系统多目标优化模型,验证了电氢综合能源系统同时参与多级耦合市场在经济与低碳环保方面的优越性。文献[7]以欧洲电力市场为研究对象,将氢气市场作为电力市场的附加市场整合到现有的长期优化电力市场调度模型中,并应用系统动力学对市场进行了建模,分析了此模型中氢能和电力市场的相互依存关系。

在含氢综合能源系统中,氢能作为优质的长期储能载体,可使系统更好地利用不稳定的可再生能源,实现系统电、热、冷等能源的平稳供应,避免各能源生产与耦合设备不合理运行造成二氧化碳的大量排放,有利于碳减排^[8-9]。文献[10]建立了含多种氢能利用设备的氢能综合利用单元,研究了该单元与多能系统运行的调度策略,实验结果表明规模化利用氢能的综合能源系统具有更高的灵活性与风光消纳水平。文献[11]将包含氢储能与碳捕集的园区综合能源系统交易决策模型引入博弈框架,利用改进差分进化算法验证了含氢综合能源系统对风光资源的充分消纳特性与低碳性。含氢综合能源系统不仅为氢能交易市场发展提供了市场主体,其清洁生产特性与对可再生能源的高效利用特性也有助于碳交易市场与电能交易市场的发展,即含氢综合能源系统与电-碳-氢耦合交易市场之间彼此影响、相互促进。

本文以电、碳、氢3种能源为枢纽,整合分析了面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场机制的相关研究。首先对含氢综合能源系统的基本结构与电-碳、电-氢交易市场运行机制进行了分析介绍。在此基础上,考虑到电、碳、氢能源交易市场均

收稿日期:2023-06-16;修回日期:2023-09-18

在线出版日期:2023-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377123,51977181);
四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0027)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52377123,51977181) and the Natural Science Foundation of Sichuan Province(2022NSFSC0027)

是能源结构转型低碳减排的有效解决方案,在分析对比了几种市场机制建立方法的基础上,建立了电-碳-氢耦合交易市场机制。然后从市场形成要素角度总结了含氢综合能源系统参与多能耦合交易市场机制所带来的影响,此外,对实现耦合交易市场均衡的能源定价策略与市场出清机制进行了归纳分析。最后,总结并展望了面向含氢综合能源系统的电-碳-氢交易市场的相关挑战与后续研究方向。

1 含氢综合能源系统的基本结构

含氢综合能源系统的结构图如图1所示。综合能源系统主要由如下4个部分组成:能源输入层、转换层、存储层和需求层。能源输入层主要由光伏、风电等可再生能源组成,当能源输入层无法满足负荷需求时,非孤岛式综合能源系统可以从外部购买能源以满足用户需求。能源转换层可以通过各种能源转换设备实现不同形式能源的转换,如电锅炉可将电能转化为热能,燃气轮机可将天然气转化为电能与热能。能源存储层采用各种储能设备来解决供需的时空不一致问题。能源需求层主要包括用户对电、热、冷等负荷的需求^[12]。

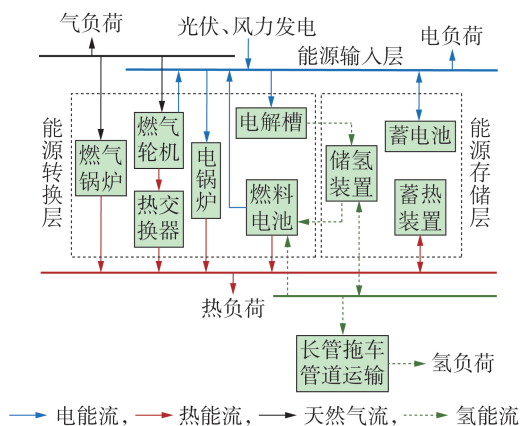


图1 含氢综合能源系统结构图

Fig.1 Structure diagram of integrated energy system with hydrogen

相较于传统综合能源系统,在含氢综合能源系统中氢能不单以缓冲能源形式存在于系统中,主要以储氢系统、运输载体与氢能负荷几种形式存在,能够满足综合能源系统长时间尺度储能^[13]、跨空间尺度运输^[14]、能源清洁高效利用等需求^[15-16],氢能在系统中的需求量与重要性大幅增加。氢气作为一种清洁燃料,可以替代传统的化石燃料,如煤、石油、天然气等,在综合能源系统中常以储氢系统形式存在,利用电解槽制氢、储氢罐储氢和燃料电池耗氢形成一个集氢气制取、储存、消耗于一体的氢能子系统,氢能子系统的大量应用可大量减少高碳排放能源,如煤炭、天然气等能源的使用,文献[9]将储氢系统引入

综合能源系统中,利用氢气的清洁与储能特性提高了系统的经济环保性与功能可靠性。氢气还可以作为能源运输载体,氢能的低自损耗与高能量密度特性使其相较于其他能源载体在进行能源存储与运输时更高效。在中短距离运输时,一般利用长管拖车通过交通系统进行运输,能够适应不同路线的需求,灵活性高^[17]。而远距离运氢则可采用天然气管道掺氢或纯氢管道运输,基于目前的天然气管网进行再开发的掺氢管道运输具有运输成本低、能耗小、可实现氢的规模化连续性运输的优点,天然气管道掺氢比例理论上已可高达24%,常用于大区域间的供应;纯氢管道运输是指专门建设的氢气管道运输系统,相较于前者具有更大规模、更长距离的特点,主要用于跨国运输或供应大型工业领域,我国的“西氢东送”工程已有距离长达400 km的纯氢长输管道正在建设^[18-19]。氢能还可以负荷形式存在于含氢综合能源系统中,含氢综合能源系统通过对负荷响应的过程提高对氢能子系统的调度,增加系统对氢能的利用率,政府和相关机构可以从氢负荷角度激励各工业或其他商业领域对氢能源的需求,从负荷端引导能源变革^[20-21]。

多能流耦合是综合能源系统区别于智能电网的重要特征之一,而氢能接入综合能源系统为多能流管理提供了新的解决方案^[22-23]。综合能源系统最基本的特征是由多种异质能流系统组成,而不同能流系统的特性差异很大,因此建模、分析以及控制方法各不相同。传统的单能流系统的能量管理方法无法直接适用于综合能源系统,需要考虑各能流之间的相互转化关系。氢能在此扮演着重要的角色,它作为一种优质的能量载体,可以很好地缓冲各能流之间的转换,为综合能源系统多能流能量管理提供更丰富的解决方案,避免耦合带来的不利影响^[24]。在传统能源体系中,电力、热能、气能等属于不同的行业,存在行业壁垒,使得综合能源系统中存在多个管理主体。这造成了信息隐私、操作权限、目标差异等方面的问题,进一步增加了能量管理的难度。为实现综合能源系统的全局安全和高效运转目标,需要引入必要的能源转换技术,实现多能源互相协作、协同控制的目标,如文献[25]分析了混合储能、氢能汽车、电动汽车在综合能源系统中的作用,探究了能源转换技术对系统成本与碳排放的影响,并拓展总结了能源转换技术对建筑和交通领域减碳的积极作用。同时,各能源具有不同的动态过程,对应着不同的时间尺度,其中电力系统惯性最小,调节速度最快,天然气次之,热力系统最慢。因此,由多种能源组成的综合能源系统也会表现为多时间尺度的特点,进而增加不同能源间相互作用的复杂性。氢能具有长时间存储、方便运输、高能量密度等特点,可

以作为连接各时间尺度下能源的桥梁,提高多能源协同管理的效益^[26-28]。

2 电、碳、氢交易市场运行机制

电力交易市场、碳交易市场、氢能交易市场分别是以电能、温室气体排放权、氢能为商品进行交易的市場^[29],这种基于供求关系与价格信号产生的自由竞争的市场机制可以引导用户自发地改变需求,从而倒逼相关行业部门进行改革创新。电力交易市场通过竞价方式协调电力供求关系,提高资源配置效率,促进清洁能源发展,降低用能成本。碳交易市场通过买卖碳排放权形式对碳排放企业进行奖惩,将环保问题转化为经济问题,实现资源的优化配置^[30-31]。而氢能交易市场则通过提供经济激励与相关政策的支持,促进氢能技术的创新和商业化应用,为碳中和目标的实现、能源结构的转型提供支持^[32]。可见电、碳、氢能源交易市场都是实现减排目标和社会低碳转型的重要路径,如果它们彼此之间深度融合,则将加快我国碳中和的步伐^[33]。

2.1 电、碳、氢交易市场之间的耦合

目前电、碳、氢交易市场多以电-碳、电-氢的方式进行耦合,即电能是多能源耦合的桥梁,故在多能耦合市场中电力市场也起到连接各市场的作用。我国电力交易市场是指经国家能源局批准设立的,为保障电力市场公平、公正、公开竞争和安全稳定运行,促进电力资源配置优化与消费端灵活需求响应的电力交易。我国电力交易市场多采用集中撮合方式进行交易^[34-35]。委托人可通过自主报价或申报量的形式提交电量委托,系统会根据购售双方的报价信息进行撮合交易,匹配成功后生成交易清单并计算交易价格。在我国电力市场交易机制中,实施多元化的交易模式,包括现货市场、长期协议市场、跨区调节市场等多个子市场。我国电力交易市场拥有完善的运行机制,包括委托撮合方式、多元化交易模式、电量交易风险管理体系、专业化的管理团队和监管机制等。这些措施有利于电力交易市场公平竞争,优化资源配置,推动能源结构转型。

2.1.1 电-碳交易市场

随着全球环保意识的提高,碳排放量已成为影响企业经济利益的重要因素之一。2017年12月,国家发展和改革委员会印发了《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》,并将发电企业作为首批纳入行业参与全国碳交易市场的对象。通过减少碳排放,电力企业可以获得收益或避免罚款。随着相关政策不断出台和市场需求的提高,电-碳耦合交易市场逐渐受到重视和推广。

碳交易市场是指以温室气体排放配额或温室气体减排信用为标的物所进行交易的市場。在碳交易

市场中,控排企业可以获得一定的排放配额,若在履约周期内排放量高于企业获取的配额数,则必须从市场中购买其他企业未使用的配额来弥补超额排放量;若排放量低于企业获取的配额数,则可以出售多余的配额给其他需要的企业,实现减排效益和经济效益的双赢。此外,我国可再生能源、林业碳汇、甲烷利用项目的温室气体减排效果可以通过量化核证自愿登记参与碳交易市场,用来抵消一定比例的碳排放^[36]。

电、碳2种能源形式可以通过市场机制相互联系,从而深刻地影响发电企业等市场参与者的行为决策。如在电力市场交易过程中融合碳属性,构建“能量+碳”的电力交易指标,将碳价与电价深度耦合,形成满足用户用能需求的同时减少碳属性消费的电-碳交易市场,并通过一些中间变量如发电量、装机容量和碳配额量来传递市场信息和状态^[37]。当前,电力碳交易的核心技术主要包括碳足迹核算、节能改造、碳捕集利用与封存技术、碳资产管理4个方面^[38]。文献[39]为了定量评价系统降碳能力,建立了多能流与物流的全生命周期清单进行碳足迹评价,指出了减碳的可行路径。文献[40]从用户角度,根据潮流与碳流追踪模型获得用户侧电力来源的碳排放强度,为用户侧承担碳排放责任提供了依据。在技术方面的节能改造可从碳排放源头减少燃煤等传统发电企业的碳排放^[41],与之相对的是碳捕集利用与封存技术,该技术可实现对已产生的碳排放的吸纳与转化,降低碳排放对环境的影响^[42]。同时,随着电-碳交易市场的不断深入,碳资产逐渐得到电力企业重视,加强自身碳资产的管理,也可有效规避履约风险寻求碳收益。

2.1.2 电-氢交易市场

风能、太阳能等可再生能源在减缓气候变化方面发挥着关键作用,这些可再生能源因政策支持与生产成本的降低,在发电中的份额不断增加,将电力和氢能交易市场进行整合运用可以有效地解决可再生能源出力的间歇性问题,提高能源利用效率,实现电力和氢能的相互转化、互补利用,实现能源的优化配置,降低能源消耗和碳排放,也可为清洁能源的广泛应用提供市场条件。

氢能市场是以氢能源为主导的交易市场,通过氢能的获取,氢能的定价、交易和结算等步骤完成氢能交易市场的运行。在氢能市场中供应商将利用电解水、天然气重整等方式获得的氢能输入市场中,以合约交易模式或自由交易模式进行交易^[43],最后通过配套的物流服务将氢能顺利送达买方手中。在氢能市场中,氢能不仅可以作为能源进行销售和利用,还可以作为商品进行交易和投资。

电和氢2种能源形式可从市场角度相互耦合,

当市场上的电力价格较低时,可以通过电解水制氢的方式生产氢气,并在氢能交易市场上销售;当电力价格较高时,可以使用储备的氢气通过燃料电池发电并回售到电力交易市场中,以获得更高的收益。这种耦合机制可以有效地平衡能源系统中的供需关系,提高能源利用效率,降低能源成本,并促进可持续发展。在能源结构转型背景下,各国对可再生能源的占比要求不断提高,然而高比例可再生能源结构会加大电网平衡的难度,增加系统对灵活性的需求,目前,包括欧盟在内的许多政府都将氢作为电力系统灵活性的提供者发挥突出作用,通过电转气、氢储能以及燃料电池相关技术实现对供需的调整^[44-45]。文献[46]利用电解水制氢的绿色优势以及氢能系统的灵活性建立虚拟氢厂应对风电功率较大时的随机波动性。我国的可再生能源与用能存在逆向分配问题,氢能作为能量密度高、可长期存储的优质能量载体,可通过长管拖车或掺氢管道运输解决可再生能源难以完全就地消纳问题。氢能还可作为终端能源直接用在车载燃料电池上为车辆供电,减轻电力供应压力,并减少交通碳排放^[47]。

2.2 电-碳-氢耦合交易市场机制

在全球范围内对可持续发展需求增加,以及推动清洁能源技术应用的背景下,电力市场、碳交易市场、氢能市场均得到了不同程度的发展,考虑到三市场在促进能源结构转型、低碳经济发展方面都有一定的作用,若三市场建立耦合关系,则可通过共享信息和数据将电价、碳价和氢价汇聚在耦合市场内,更好地反映市场的供需状况,协调三市场的运作,提高能源系统效率并减少成本,还可以帮助降低碳排放并推动氢能技术的发展,为实现全球碳中和目标做出贡献。

基于此,已有部分研究学者在丰富的电-碳交易市场、电-氢交易市场研究成果基础上,初步开展了3个市场深度耦合关系的研究。目前较多研究采用实验法验证多能源耦合交易市场机制的优越性。将相同的算例用不同的交易机制进行仿真,验证该设定下多能源耦合交易市场机制的经济性或环保性。文献[6]通过交易机制能源耦合的差异性算例进行验证,得到电氢耦合系统在电-碳-气-绿证联合交易机制下不仅可以提高系统的经济效益,还可以提升系统供能的稳定性,降低碳排放量的结论。实验法虽然可以宏观验证多能源耦合交易市场的优越性,但对市场的内在运行机制未加以说明。因果网络分析法则是利用收集到的多个市场的供需数据,使用因果网络分析技术对各个市场之间的交互作用进行探究,深度观测价格信息在各市场之间的传导过程^[48-49]。如文献[48]通过建立电、碳、绿证交易市场之间的因果环路图,分析各反馈环中价格变动造成

的市场变化,剖析了三市场之间的交互影响机理。该方法可以为联合交易市场政策的制定提供参考,以减少不必要的价格波动和市场垄断,提高供需平衡和经济效益,但该方法对供需数据的需求较高,数据质量和收集的难度可能会影响分析的效果。系统动力学方法更注重市场的建模和模拟分析,通常需要建立一种动态的模型来模拟市场的变化和交互作用,以系统内部各要素互为因果反馈的特点,从系统整体的视角分析各决策之间的因果关系和反馈机制,进而预测和模拟系统未来的动态行为。而电-碳-氢耦合交易市场协同发展是一个多变量、高阶次、非线性的动态反馈复杂系统问题,故可采用系统动力学来分析多能源耦合交易市场的协同发展路径^[50-51]。文献[50]在对电-碳-氢耦合交易市场因果关系进行分析的基础上,在VensimPLE软件中运用DYNAMO语言建立了三市场耦合的存量流量图,在验证了模型拟合度较好的前提下考察了国家核证自愿减排量(Chinese certification emission reduction, CCER)抵消比例、落后机组淘汰率、拍卖比例等场景对耦合交易系统的影响。

基于电、碳、氢能交易市场特点总结得到多市场耦合交易机制,如图2所示。从图中可以发现存在多个反馈回路:碳价升高—火力发电利润减少—火力发电装机投建收紧—碳交易市场中火力发电碳配额购入需求减少—碳价回落;CCER价格升高—可再生能源发电利润增加—可再生能源发电设备装机投建增加—碳交易市场中CCER供应量增加—CCER价格回落;氢价上涨、化石燃料等制氢利润增加—化石燃料制氢装备投建增加—氢能交易市场中氢能供给增加—氢价回落;电价上升—火力发电与可再生

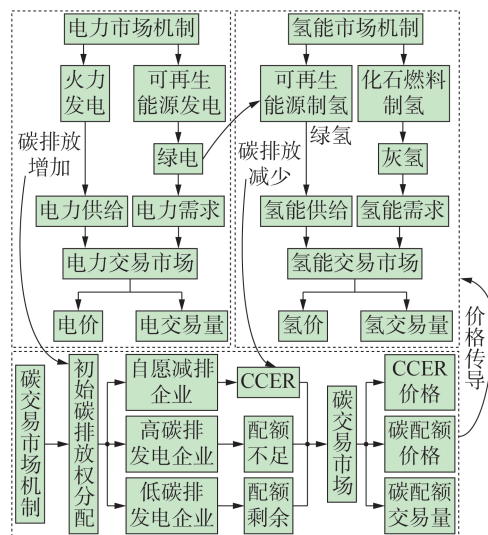


图2 电-碳-氢交易市场耦合机制

Fig.2 Coupling mechanism of electricity-carbon-hydrogen trading market

能源发电利润增加—发电设备投建增加—电力交易市场中电能供给增加—电价回落。通过以上反馈回路可以看出,系统耦合交易机制可以通过 CCER 和电转气将电、碳、氢交易市场联系起来。

图 2 展示了不同能源市场间的反馈关系,并不代表各能源市场间随时可进行这类反馈,不同能源交易市场间的协调具有时间尺度差异与能否进行实物交割的物理市场和金融市场差异,可利用不同异质能源本身时间尺度上的差异和不同互动机制的时间差异设计合理的耦合市场交易机制^[52]。电力交易市场的惯性相对最小,调节速度快,时间交易尺度通常较短,在较短期的实时市场中,电力交易的结算是通过金融手段进行的,而不要求实际的电力传输,其交易重点是电力价格和调度,而非实际的电力交割,但是电力交易市场在进行日前或长期交易时则采用实物交割的方式。目前碳交易市场多以年度为交易周期,各控排企业自主设定交易周期内的碳排放权的买卖,在碳交易市场中,交易的完成主要是通过账务的调整和结算资金的转移来实现,而不需要实际的物理交割。氢能交易市场的交易时间尺度范围更大。短期交易可能以小时或天为单位,中期交易可能涵盖几个月或一年的交易合同,而长期交易可能涉及数年的交易合同,氢能交易多以实物交割为主^[53-54],氢能加入耦合交易市场后,加大了市场的可调控时间尺度,有利于能量在更大时间范围内的流动,增加了耦合交易市场结算周期的多样性。三市场的耦合可以以电力市场短期快速响应、氢能市场中长期调节能量、碳交易市场年度内限制碳排的方式,利用各市场的时间尺度差异为参与市场的主体提供全时间范围的优化。

3 面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场

近年来综合能源系统以其对多种能源的高效整合、绿色低碳的特性得到持续的发展,在大力发展多能耦合交易市场的背景下,含氢综合能源系统的规划设计和优化运行出现了诸多以市场为手段的新型解决方式,同时含氢综合能源系统的蓬勃发展给电-碳-氢多能耦合市场的发展也注入了新的活力,因此研究面向含氢综合能源系统的电-碳-氢多能耦合交易市场,对相关研究方法进行总结分析有重要的研究意义,可以帮助学者更好地理解含氢综合能源系统在电-碳-氢耦合交易市场中的作用和影响,有助于优化含氢综合能源系统的运行和管理,提高其经济效益和环境效益,同时也有助于推动电-碳-氢耦合交易市场的发展和创新。

3.1 含氢综合能源系统介入耦合交易市场的影响

自含氢综合能源系统开始发展以来,电、碳、氢

交易市场主体逐渐从单个个体演变为各能源模块,综合能源系统内部实现各类资源的整合,产生更高效的协作,再向外部进行市场交易,这种模式可减少市场的交易频次,提高能源交易效率,降低企业的交易成本,使市场更加稳定,以能源模块进行交易还可以汇集更多的资源,使其更容易进行大规模的交易。同时以含氢综合能源系统为能源交易主体对于个体的隐私也是一种保护。即含氢综合能源系统的介入赋予了各单一市场更丰富的内涵与职能,发展成为电-碳-氢多能源交易市场,这一改变主要体现在市场交易的标的物、交易主体、价格形成 3 个方面^[55]。

3.1.1 丰富耦合交易市场标的物

含氢综合能源系统介入电-碳-氢耦合交易市场,相较于现有市场丰富了耦合交易市场的标的物,为市场带来更多的交易机会。含氢综合能源系统通过可再生能源制氢、碳捕集利用与存储等技术,多途径地生产利用氢气,促进了电、碳、氢的交易以及行业发展,为实现能源结构转型和可持续发展提供了更丰富的解决路径。

含氢综合能源系统介入电-碳-氢耦合交易市场对三市场的交易标的物产生了影响。①电力标的物:提供了新的电力交易标的物,即利用可再生能源生产氢气的电力^[56-58]。可再生能源供给量具有不稳定、不连续性,导致它们往往不能直接成为商业性发电,因此大量的可再生能源仍存在闲置、浪费的情况。而在含氢综合能源系统中可以利用过剩的可再生能源生产氢气,并将氢气输送到相应的耦合市场,为市场提供稳定可靠的电力。②碳排放交易标的物:含氢综合能源系统还可以通过碳捕集利用与封存技术、溶液氧化吸收技术等回收利用二氧化碳,从而产生可以交易的碳排放减排量^[59-60]。二氧化碳是温室气体之一,它的大量排放对全球气候变化造成极大影响。而含氢综合能源系统可以通过回收利用二氧化碳,将其转化为可再利用的碳资源。③氢气标的物:含氢综合能源系统可以从多途径生产氢气,并将其供应到电、碳等耦合市场相关的行业和领域,对市场的氢能利用和发展起到重要作用。同时在含氢综合能源系统中,可以利用多种手段,如电解水、天然气重整等方式,大规模生产氢气,降低氢气的生产成本,加快氢能在能源市场的应用和推广。

3.1.2 构成基于能源模块的交易框架

随着综合能源系统不断发展,微网和配网也变得更加灵活和丰富。微网已经从最初的微电网扩展到更为全面的微能网,包含对多种能源类型、多种转换方式及协调控制技术的支持。区别于现有的市场交易主体,为应对多种能源类型和复杂的利益主体结构,面向含氢综合能源系统的多能源交易市场主要采用模块化设计的方式,将分布式发电、燃气轮

机、热电联产装置、碳配额、氢储能系统、可控负荷、电动汽车、冷热负荷、电转气设备等多种电/碳/氢资源视为能源基础模块。通过一定的交易机制,不同的能源模块可以在对应的交易模式下进行独立或组合交易。这种交易方式通过灵活的能源交易来管理和协调能源需求和供给,从而提高能源利用率,降低成本,并促进现代能源市场发展^[61]。能源基础模块的组合交易策略可以针对特定的能源设备的聚合^[62-63](如电动汽车、风机、光伏板),可面对不同的用户群^[64-65](如居民社区、工业园区、智能楼宇),也可为解决某个特定的能源问题^[9,66](如弃风、弃光、弃水),在保障系统安全运行的基础上,能源模块主体从自身利益出发进行博弈交互,最终决策结果体现为单个综合能源系统内、多区域综合能源系统间的技术与经济性能提升,提高可再生能源的消纳水平,促进能源的灵活交易。

3.1.3 影响耦合市场价格形成机制

多能源耦合交易市场有助于实现多种能源交易市场价值的统一衡量,含氢综合能源系统的介入会影响现有市场电力、碳排放权和清洁能源的价格形成机制,耦合交易市场的价格形成主要受市场调控和政策影响。政策通过对包括太阳能、风能、氢能在内清洁能源进行补贴或惩罚而影响能源价格的形成。而市场调控则通过竞价交易、挂牌交易与合同交易3种交易过程确定能源价格。竞价交易是指供需双方在市场上以竞价的方式确定标的物的价格,挂牌交易是指卖方在市场上设置销售价格,买方可以选择购买,合同交易则是指买卖双方根据约定达成一定协议,由合同规定价格^[67]。含氢综合能源系统介入电-碳-氢耦合交易市场会对3种价格形成机制均产生影响。市场价格形成机制如表1所示。

表1 市场价格形成机制

Table 1 Market price formation mechanism

定价机制	运行机制	优点	缺点
竞价交易	买卖双方代表提交订单→以订单为基础进行撮合→确定市场价格→交割和结算	公开公正、灵活性高、可进行风险控制	交易成本高、市场不确定性高
挂牌交易	卖方发布挂牌信息→买方浏览挂牌信息→确定交易价格→交割和结算	公开透明、交易场所无限制、灵活性高	定价难以公允、交割方式不明确、风险高
合同交易	买卖双方代表达成交易意向→买卖双方签订交易合同→确定交易价格→交割和结算	稳定可靠、长期性	交易成本高、市场灵活性差、信息不对称

竞价交易定价机制。①耦合市场的信息复杂度增加,加大交易报价方了解市场品类定价、数量等信息的难度。②出现新的市场主体从而产生新的购买与销售意愿,撮合匹配的准确性和有效性受到影响。③市场价格的不稳定性增加,新的购买与销售意愿的出现会影响竞价定价的公正性和有效性。④监管

难度增加,监管部门需要考虑市场竞争程度、产品实际质量等多重因素,监管难度随着市场复杂度而增加。

挂牌交易定价机制。①影响挂牌交易价格形成机制的信息透明度。②含氢综合能源系统与传统参与者产生竞争,将增加市场多样性和选择空间,提高市场稳定性,扩大买家选择。③挂牌交易价格通常是确定的价位,而含氢综合能源系统介入会引起市场竞争,导致价格波动,这使得挂牌交易中的价格变得不稳定,导致挂牌交易买卖双方需要重新评估产品的价格。

合同交易定价机制。①市场信息变得更加复杂,需要更高效的数据分析和技术支持。②由于含氢综合能源系统会与其他先进技术系统进行交互配合,会影响技术和商业条件的谈判和调整,这将需要更长的时间和更多的资源,进而影响合同价格形成。③合同签署:交易主体和相关技术的改变需要对合同相关的条款进行更改,故合同签署需要更长时间。

3.2 研究要点

市场均衡是指商品或服务供需量相等,价格稳定的一种状态。合理设置交易价格与出清方式是实现市场均衡的有效手段,也是目前探究面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场机制的两大研究要点。

3.2.1 能源产消者定价策略

含氢综合能源系统参与耦合交易市场时,在市场中既属于能源生产者,又属于能源消费者,故含氢综合能源系统多以能源模块形式作为能源产消者存在于电-碳-氢耦合交易市场中,由于多个能源产消者的用能行为有良好的互补特性与交互关系,故可将价格信号作为驱动对集群化产消者进行资源管理,从而在多时间尺度多能源层级上发挥含氢综合能源系统聚合资源的灵活性价值,称这种能源交易机制为交互式能源机制。

在含氢综合能源系统介入耦合市场的背景下,已有较多的有关交互式能源机制的研究。文献[68]以园区售电商为电力交易平台中心,负责统筹园区内的智能楼宇的相关信息并进行电能的分配与电价的制定。文献[69]将运营商作为引导者,综合化考虑售电收益与满意度并独立裁定出售电量与电价,买方作为跟随者获得独立报价与电能分配。而在同一配电区域的多个产消者常常会建立联盟,在联盟内通过能源共享减少与市场运营商的交易量,提高经济效益。文献[70]以产消者最大化能源自耗为目标,设计一种微网自适应定价模型,实现利益的灵活分配与灵活定价。文献[71]同时考虑电力网络与碳网络,优先进行各能源枢纽间的本地交易,最后使用Shapley值法结合与交易量成正比的议价能力进行

利益分配与交易定价。

由上述分析可知,目前的交互式能源机制主要有集中式与集中-分散式2种。在集中式交易模式下,交易策略较单一,产消者只能直接与市场运营商进行交易,市场运营商作为主导者有绝对的市场定价权。而在集中-分散式交易模式下,产消者可以通过价格信号,灵活选择与市场运营商还是其他产消者进行交易,增加了市场竞争,有利于能源的本地消纳且可减少用户的成本。文献[72]分别采用集中式与集中-分散式2种交互能源机制进行算例分析,将纳什议价问题分解为社会福利最大化与能源交易2个子问题,结果表明采用集中-分散式定价策略可显著提高社会经济效益。同时含氢综合能源系统产消者内部含有能量管理系统(energy management system, EMS),可以实现数据收集与分析、优化决策等操作,还可以根据对自身可再生能源的出力与负荷的预测调整相应的能量管理策略,在集中-分散式交易定价策略模式下具有天然的优势。多产消者集中-分散交易机制如图3所示。

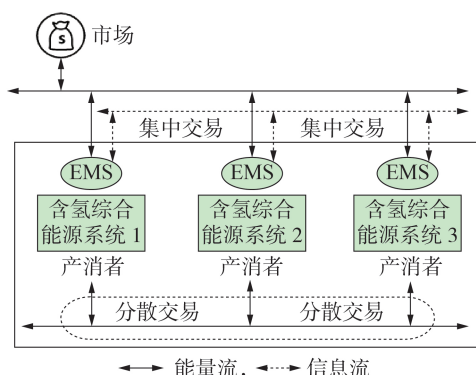


图3 多产消者集中-分散交易机制

Fig.3 Centralized-decentralized trading mechanism of multiple prosumers

3.2.2 耦合市场出清机制

市场出清是指通过调节商品或服务的价格、数量等方式达到市场需求和供给平衡的一种状态,设计合理的市场出清方式可以使市场快速达到均衡状态,从而保证市场的稳定运行和资源的合理配置。近年来,关于市场出清方式的研究已经非常广泛。

在集中竞价交易方式下,可以将出清方式划分为边际统一出清和高低匹配出清2种。边际统一出清是指根据买卖双方的平均申报价格,将最后成交的匹配对作为本次所有成交匹配对的统一出清价格进行出清。这种方式以平均价格为基准,确保所有成交都按照相同的价格进行。而高低匹配出清则是根据每一个成交匹配对各自买卖双方的平均申报价格来确定成交价格。因此,每个成交匹配对的成交价格可能会有所不同,根据买卖双方的申报价格来灵活确定成交价格。而广义上,国内对集中竞价的出清方式可分为统一出清(按照唯一价格交易)和分散出清(不同主体间价格不唯一)2种,高低匹配出清可以看作是一种以高低匹配为原则的分散式出清方式。以上述2种分类方式为基础,研究学者们提出了多种细化类型的出清方式来满足不同场景下的市场需求从而达到均衡状态。文献[73]对比分析了在省间中长期市场交易中传统的高低匹配出清方式与以社会福利最大为目标的多通道集中优化出清方式,结果表明其提出的集中优化出清方式更能充分挖掘通道的输送能力,有助于新能源的消纳。目前,国内外关于日前电能市场的研究较多,优化出清多以社会福利最大为目标,考虑机组自身约束与电力平衡约束,实时市场的优化目标和运行约束与日前市场基本一致,常采用易于求解的线性规划模型,并用成熟的商业化软件求解。不同的是日内实时市场的优化出清由于调度间隔较短,对信息采集与数据运算的要求较高,集中式通信一旦发生故障,整个系统将无法有效运行,故分散式的计算方法常用于求解实时市场的出清问题^[74]。

对于多能耦合交易市场,目前的相关研究思路主要有2种:一种是将多种能源的生产、销售权及其他服务集成到一个主体,即从综合能源运营商的角度对不同类型的能源进行统一的销售与分配^[75];另一种是各能源运营商相互独立,通过考虑不同类型能源之间的耦合关系而进行的不同市场之间的联合出清^[76]。由于目前综合能源系统运营商数量较少,第一种思路的开展比较困难,故当前耦合市场的机制与出清方式相关的研究多以第二种思路进行。市场出清方式如表2所示。

表2 市场出清方式

Table 2 Market clearing method

研究对象	出清机制	目标函数	求解方法
省间中长期电力交易市场 ^[73]	考虑通道可用输电容量(传统高低匹配出清、集中优化出清)	社会福利最大化	专用优化出清软件
风电并网电力市场 ^[77]	计及风电不确定性(考虑“事后电价”的电力联营市场统一出清)	利润最大化	混合整数规划法
省级电力市场 ^[78]	采用多代理决策模型(统一出清)	社会福利最大化	计算经济学仿真法
多主体跨省区发电权交易市场 ^[79]	双层优化模型(上层引入碳交易机制,下层建立利润最大出清模型)	经济与环境效益最大化	竞价博弈法
电-热-气综合能源市场 ^[80]	对比分析集中式出清、分散式出清	利润最大化	线性规划
电-碳-绿证市场 ^[81]	考虑现货价格的不确定性(分散式出清)	社会福利最大化	鲁棒优化

4 研究展望

面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场虽然在市场模型建立、运行机制、市场交易对象、价格形成等方面已有研究,但仍存在诸多问题。一方面,含氢综合能源系统的各类技术瓶颈和安全性问题制约着其大规模应用,不利于电-碳-氢耦合市场的发展;另一方面,我国电-碳-氢交易市场都只处于起步阶段,有关电-碳-氢耦合交易市场的研究更是刚刚开始,耦合市场缺乏系统性和可操作性,这会影响含氢综合能源系统的市场化运作。随着能源转型和经济发展低碳化趋势逐渐加强,如何进一步解决以上问题,提高电-碳-氢交易市场的效益和可持续性,成为了未来研究的核心议题。

4.1 含氢综合能源系统发展的挑战及展望

通过上文的分析可以看出含氢综合能源系统参与电-碳-氢耦合交易市场可以增加耦合交易市场的活力,促进电-碳-氢耦合交易市场发展,但含氢综合能源系统还存在诸多技术问题限制着其进一步发展。

4.1.1 多能协同规划技术

多能协同规划技术是综合利用不同能源的规划和设计技术。含氢综合能源系统面临的一个重要问题是如何在电-碳-氢交易市场机制下,协同不同能源,在确保系统中各能源的使用效率和稳定性的同时,提高其在市场中的竞争力。多能协同规划技术的不成熟是目前综合能源运营商稀少,电-碳-氢耦合交易方式多以运营商相互独立、能源之间耦合的方式进行的原因。故在未来研究中应大力发展和利用多能协同规划技术,建立统一的信息交互平台、数据标准和技术接口,实现能源之间的有效交流与协调,提高含氢综合能源系统运行效率和市场效益^[82-83]。例如,通过确定不同能源之间的相互作用关系,制定合理的能源流动路径、控制策略等。

4.1.2 能源转换技术

能源转换技术是指综合能源系统中不同能源之间相互转化的技术,如热电转换、电氢转换等。含氢综合能源系统中氢作为各能源之间转化的重要媒介,与其相关的各类转换技术的效率和经济性直接影响到系统整体的发展,但目前的电制氢、氢燃料电池等技术还不够成熟,商业化程度较低,成本高,有众多技术问题有待解决。例如:电解池在长时间运行过程中可能出现的腐蚀、材料疲劳和降解等导致性能下降的问题,未来需要研究更适合阴极、阳极的材料,提高催化活性、稳定性与抗腐蚀能力;对于燃料电池,应开展催化剂的设计与优化、氧气与水管理技术、耐久性、寿命等方面的研究与创新,加强系统集成和规模化生产的研究。

4.1.3 储能技术

储能技术是指综合能源系统中用于储存和释放能量的技术,例如电池储能、高压水气储能等。对于含氢综合能源系统,氢能以其独特而具优势的长时间稳定存储特性帮助系统实现更大时间尺度下的削峰填谷以及电价差额套利,同时良好的储能技术还可以帮助氢能实现长距离的运输,实现各能源系统之间的互联互通。然而目前氢能存储存在投资成本高、转化效率低等问题,未来需要继续开发高效高密度储氢材料,研究快速储氢与释放技术、氢气泄漏防护技术,提高储氢容量和效率^[84]。

4.1.4 政策和市场机制

含氢综合能源系统的发展需要有利的政策环境和市场机制来推动。可通过制定相关政策,如出台鼓励多能互补清洁能源利用的政策、减免相关税收等方式解决氢能生产成本较高问题;可通过制定氢能发展长期目标和关键指标,为含氢综合能源系统规划布局,明确资源分配、技术标准和建设目标,驱动各方力量参与,利用资金支持和科技创新推动氢能技术的突破与市场应用^[85-86]。在市场机制方面,需要建立健全市场竞争机制和电、碳、氢等多种能源的定价机制,建立公平竞争的市场环境,鼓励不同能源供应商和服务提供商参与含氢综合能源系统的建设和运营,推动技术创新,降低成本。

4.2 电-碳-氢耦合市场发展的挑战及展望

目前我国综合能源运营商发展不足,各能源市场标准不统一,不利于发展多种能源与服务集成于一体的交易平台。即当前的多能源耦合交易市场将长期处于不同能源市场各自分立、能源之间相互耦合的多市场联合出清模式。故电、碳、氢交易市场发展的关键问题也是制约电-碳-氢耦合交易市场发展的重要因素。

4.2.1 电力市场

我国电力市场改革自2002年开始,目前已经取得一定进展,形成包括2个区域电力交易中心、32个省级电力交易中心的交易体系。然而,该市场仍存在电力市场体系不完善、交易规则不统一、跨区域交易存在障碍以及可再生能源消纳不足的问题。目前电力市场缺乏国家层面的统一电力交易中心,且各省区间的交易规则不一致,跨省区交易受到发电组织不平衡、输电网络建设不均衡、跨省输电费用等因素的限制^[87]。同时,我国东西部电力资源分布不平衡,存在发电与用能需求时空错位、新能源发电规模与用电需求增长不一致等问题,限制了电力市场的发展。未来需加强对发电设施、输电网络的建设,加大对可再生能源的支持和投资,建设更多可再生能源配套设施,并加强电力系统的灵活性和储能技术的应用,提高对可再生能源的消纳能力,加快电力市

场的低碳转型^[88]。

4.2.2 碳交易市场

我国于2021年进入全国碳交易市场阶段。尽管目前的全国碳交易市场已经初步建立了市场准入规则和相关法律法规,碳交易成交量和成交额也在上升,但仍存在市场主体单一、配额分配标准不一、碳金融支持不足等问题。为解决上述问题,应扩大市场准入行业范围,吸引更多的碳排放主体参与,进一步统一配额分配方式和标准体系,优化配额抵消机制,抑制碳价过低现象^[89-90],鼓励金融机构积极参与碳交易市场,弥补碳交易市场中碳远期、碳期货等产品的缺失。

4.2.3 氢能交易市场

氢能交易市场发展较晚。在2023年4月,我国建立了首个氢能交易平台。在政策支持、投资增加和技术进步的推动下,我国的氢能市场展现出巨大的发展潜力。然而,该市场还面临着氢能产销局限于本地化和内部化^[32]、氢能市场化和商品化程度低等问题。为解决上述问题,在未来的研究中,应大力发展氢能的长距离运输技术,加快氢能压缩、减压相关技术的突破,提高长距离运氢的市场竞争力。同时应建立统一的氢能定价机制,提高氢能交易市场的透明度和规范性,鼓励跨区域氢能市场的发展,打破氢能市场内部化困局。

4.2.4 电-碳-氢耦合交易市场

首先,由于我国目前的电-碳-氢耦合交易市场还未形成统一的交易平台,大多通过能源之间的耦合关系建立耦合交易市场,故各市场之间具有相对独立性,即各市场的发展与挑战也是耦合交易市场的发展与挑战。此外,电-碳-氢耦合交易市场的发展还受到多能源耦合技术的限制。如电-氢耦合技术,电解制氢虽技术可行,但受限于成本,目前生产的氢气多为灰氢、蓝氢,绿氢在我国氢气总产量中占比不到1%,未来应积极开展电解制氢技术下游应用的研究,如在合成氨、合成甲醛领域,提高氢能需求量,进而通过市场调节,降低绿氢生产成本,扩大绿氢占比。电-碳耦合多依托于清洁能源技术的发展,但如风能、太阳能等可再生能源发电系统配置的储能系统,碳捕集与存储技术等成本还相对较高,故需要通过对应的技术进步、规模效应、政策支持等手段降低成本,提高多能源耦合技术的经济可行性。

电-碳-氢耦合交易市场发展的最终目标是建立一个集电能、碳配额、氢能3种能源生产权、销售权及其他服务为一体的综合能源交易市场。在未来的发展中,应积极探索各市场间的衔接机制,如建立数据共享与信息传递平台、制定跨市场交易规则、互通各市场交易账户、统一认证机制等。同时,应研究电、碳、氢能的整合方法,设计可表征3种能源特性

的综合能源市场标的物。此外,政府也应当针对各市场的发展缺陷制定更具体的发展方针政策来规范市场行为,鼓励更多更丰富的对象参与市场,加强市场之间的耦合关系,提高耦合市场引导各类资源发展的作用,使综合能源系统的优化运行逐渐从政策驱动阶段向市场驱动阶段发展。

5 结论

在实现碳中和目标的背景下,发展和完善电-碳-氢耦合交易市场机制有利于实现能源行业以市场为导向进行发展的良好态势。本文考虑含氢综合能源系统对多种能源的综合调控能力,首先探究了含氢综合能源系统参与电-碳-氢耦合交易市场带来的一系列变化,结果表明含氢综合能源系统参与市场后不仅增加了耦合交易市场交易对象的丰富性,带来了新的交易标的物,还影响着耦合交易市场的价格形成机制。然后对影响市场均衡的能源产消费者定价策略和市场出清机制进行分析总结,得到含氢综合能源系统能源产消费者参与市场多采用集中-分散式混合定价策略,且目前多能源耦合交易市场多采用各能源市场独立运行、能源之间相互耦合的出清机制的结论。最后对耦合市场不统一不系统、可操作性低、氢能产运储用等相关技术不成熟不经济等关键问题进行了总结与展望。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 关于印发“十四五”现代能源体系规划的通知[EB/OL]. [2023-06-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [2] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等. 新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J]. 电网技术,2022,46(3):821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [3] GAFFNEY F, DEANE J P, GALLACHÓIR B P Ó. Reconciling high renewable electricity ambitions with market economics and system operation: lessons from Ireland's power system[J]. Energy Strategy Reviews, 2019, 26: 100381.
- [4] 卓振宇,张宁,康重庆,等. 面向双碳目标的电力系统规划方案量化归因分析方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(2):1-14.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Quantitative attribution analysis method of power system planning scheme for carbon emission peak and carbon neutrality goals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 1-14.
- [5] 黄思嘉,陈卫中,郑宁敏,等. 融合碳交易的电力市场交易机制及交易模式探索[J]. 能源与环境,2023(2):65-67.
HUANG Sijia, CHEN Weizhong, ZHENG Ningmin, et al. Exploration on trading mechanism and trading mode of power market integrating carbon trading[J]. Energy and Environment, 2023(2): 65-67.
- [6] 杜易达,王迹,谭忠富,等. 电-碳-气-绿证市场耦合下的电氢耦合系统运行优化研究[J]. 电网技术,2023,47(8):3121-3135.
DU Yida, WANG Ji, TAN Zhongfu, et al. Research on operation optimization of electro-hydrogen coupling system under

- the coupling of electricity, carbon, gas and green card market [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3121-3135.
- [7] HESEL P, BRAUN S, ZIMMERMANN F, et al. Integrated modeling of European electricity and hydrogen markets [J]. Applied Energy, 2022, 328: 120162.
- [8] 刘妍, 胡志坚, 陈锦鹏, 等. 含碳捕集电厂与氢能多元利用的综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. 电力系统自动化. [2023-06-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230510.1119.002.html>. DOI: 10.7500/AEPS20230221001.
- [9] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈颖光, 等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 48-55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 48-55.
- [10] 王文辉, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J/OL]. 电网技术. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2511>.
- [11] 陈晚晴, 项康利, 林晓凡, 等. 基于主从博弈的综合能源系统电氢碳运行优化[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001335>.
- [12] 钟鹏元, 杨晓宏, 寇建玉. 含储氢结构的园区综合能源系统优化配置研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 11-19.
ZHONG Pengyuan, YANG Xiaohong, KOU Jianyu. Research on the optimal configuration of integrated energy systems for parks with hydrogen storage devices [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 11-19.
- [13] 王士博, 孔令国, 蔡国伟, 等. 电力系统氢储能关键应用现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6660-6681.
WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Current status, challenges, and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6681.
- [14] 王丰, 杨函煜, 李林溪, 等. 考虑氢能交通运输时空特性的电-氢综合能源系统协同优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 31-43.
WANG Feng, YANG Hanyu, LI Linxi, et al. Collaborative optimal method for electricity-hydrogen integrated energy system considering spatial-temporal characteristics of hydrogen transportation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 31-43.
- [15] 侯健敏, 李志, 孟莹, 等. 考虑氢能利用与需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J/OL]. 南京信息工程大学学报(自然科学版). [2023-06-16]. <https://doi-org-s.era.lib.swjtu.edu.cn:443/10.13878/j.cnki.jnuist.20230526002>.
- [16] 王雨晴, 王文诗, 徐心竹, 等. 面向低碳交通的含新能源汽车共享站电-氢微能源网区间-随机混合规划方法[J/OL]. 电工技术学报. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.10006753.tces.L10038>.
- [17] YANG G, JIANG Y, YOU S. Planning and operation of a hydrogen supply chain network based on the off-grid wind-hydrogen coupling system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(41): 20721-20739.
- [18] 严思韵, 周登极. 综合能源天然气网混氢运输的仿真与调度综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8816-8832.
YAN Siyun, ZHOU Dengji. Review of simulation and scheduling of hydrogen-blended transportation in natural gas network of integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8816-8832.
- [19] 刘超广, 马贵阳, 孙东旭. 氢气管输技术研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 451-458.
LIU Chaoguang, MA Guiyang, SUN Dongxu. Research progress for technology of hydrogen transportation by pipeline [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 451-458.
- [20] DE RANGO P, WEN J, SKRYABINA N, et al. Hydrogen storage properties of Mg-Ni alloys processed by fast forging [J]. Energies, 2020, 13(13): 3509.
- [21] 李颖然, 薛屹洵, 戴铁潮, 等. 考虑氢负荷响应的化工园区电-氢耦合系统协同优化调度[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 93-100.
LI Haoran, XUE Yixun, DAI Tiechao, et al. Collaborative optimal dispatch of electricity-hydrogen coupling system in chemical industry park considering hydrogen load response [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 93-100.
- [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, 16.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8, 16.
- [23] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 122-128, 171.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WU Wenchuan, et al. Integrated energy management system with multi-energy flow for energy internet: design and application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 122-128, 171.
- [24] YAN N, ZHONG Y, LI X, et al. Energy management method of electricity heat hydrogen multi-coupling system for retired power battery echelon utilization in microgrids [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-5.
- [25] FAN G, LIU Z, LIU X, et al. Two-layer collaborative optimization for a renewable energy system combining electricity storage, hydrogen storage, and heat storage [J]. Energy, 2022, 259: 125047.
- [26] ZHANG L, DAI W, ZHAO B, et al. Multi-time-scale economic scheduling method for electro-hydrogen integrated energy system based on day-ahead long-time-scale and intra-day MPC hierarchical rolling optimization [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1132005.
- [27] 李天格, 胡志坚, 陈志, 等. 计及电-气-热-氢需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行优化策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 16-24.
LI Tiange, HU Zhijian, CHEN Zhi, et al. Multi-time scale low-carbon operation optimization strategy of integrated energy system considering electricity-gas-heat-hydrogen demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 16-24.
- [28] 胡俊杰, 童宇轩, 刘雪涛, 等. 计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J/OL]. 电工技术学报. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.222335>.
- [29] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13, 22.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13, 22.
- [30] 肖白, 刘健康, 张博, 等. 考虑阶梯碳交易和需求响应的含氢储能的并网型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 121-129.
XIAO Bai, LIU Jiankang, ZHANG Bo, et al. Optimal configura-

- tion of grid-connected microgrid with hydrogen energy storage considering ladder-type carbon trading and demand response [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(1): 121-129.
- [31] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(11): 39-48.
WAN Wenxuan, JI Yanan, YIN Li, et al. Application and prospect of carbon trading in planning and operation of integrated energy system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(11): 39-48.
- [32] 国家发展改革委. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [EB/OL]. [2023-07-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/content_5680975.htm.
- [33] WANG H R, FENG T T, LI Y, et al. What is the policy effect of coupling the green hydrogen market, national carbon trading market and electricity market [J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 13948.
- [34] 王林, 李晨, 刘嘉佳, 等. 基于复式竞价撮合的电力市场交易模式设计与实践[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 188-195.
WANG Lin, LI Chen, LIU Jiajia, et al. Design and practice of electricity market trading mode based on compound bidding matchmaking [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 188-195.
- [35] 于申, 申建建, 程春田, 等. 耦合梯级水电调蓄价值的月度集中撮合交易出清方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 5858-5868, 6162.
YU Shen, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. Centralized matchmaking transaction clearing method embedded the regulation value of cascade hydropower [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 5858-5868, 6162.
- [36] 生态环境部. 碳排放权交易管理办法(试行) [EB/OL]. [2023-06-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360.htm.
- [37] 冯昌森, 谢方锐, 文福拴, 等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 1-11.
FENG Changsen, XIE Fangrui, WEN Fushuan, et al. Design and implementation of joint trading market for green power certificate and carbon based on smart contract [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 1-11.
- [38] 岳铂雄, 熊厚博, 郭亦宗, 等. 碳交易机制推动电力行业低碳转型[J]. *电气自动化*, 2022, 44(4): 1-3, 7.
YUE Boxiong, XIONG Houbo, GUO Yizong, et al. Carbon transaction mechanism promotes low-carbon transformation of power industry [J]. *Electrical Automation*, 2022, 44(4): 1-3, 7.
- [39] 余潜跃, 张玉琼, 赵强, 等. 综合能源生产单元的全生命周期碳足迹评价与技术经济性评估[J/OL]. *中国电机工程学报*. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223326>.
- [40] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 等. 用户侧电力碳排放强度的评估原则与模型[J]. *电网技术*, 2012, 36(8): 6-11.
LI Baowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Principle and model for assessment on carbon emission intensity caused by electricity at consumer side [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(8): 6-11.
- [41] 朱法华, 许月阳, 孙尊强, 等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J]. *中国电力*, 2021, 54(4): 1-8.
ZHU Fahua, XU Yueyang, SUN Zunqiang, et al. Practice and enlightenment of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants in China [J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 1-8.
- [42] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(7): 22-28.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(7): 22-28.
- [43] DENG Z, JIANG Y. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11527-11537.
- [44] LI X, MULDER M. Value of power-to-gas as a flexibility option in integrated electricity and hydrogen markets [J]. *Applied Energy*, 2021, 304: 117863.
- [45] LIU J, SUN W, YAN J. Effect of P2G on flexibility in integrated power-natural gas-heating energy systems with gas storage [J]. *Energies*, 2021, 14(1): 196.
- [46] 潘郑楠, 梁宁, 徐慧慧, 等. 基于纳什谈判理论的风电-虚拟氢厂参与现货市场合作运行策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 129-137.
PAN Zhengnan, LIANG Ning, XU Huihui, et al. Cooperative operation strategy of wind power-virtual hydrogen plant participating in spot market based on Nash bargaining theory [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 129-137.
- [47] MANOHARAN Y, HOSSEINI S E, BUTLER B, et al. Hydrogen fuel cell vehicles: current status and future prospect [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2296.
- [48] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 142-154.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 142-154.
- [49] FENG T, LI R, ZHANG H, et al. Induction mechanism and optimization of tradable green certificates and carbon emission trading acting on electricity market in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169: 105487.
- [50] 王浩然, 冯天天, 崔茗莉, 等. 碳交易政策下绿氢交易市场与电力市场耦合效应分析[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 32-46.
WANG Haoran, FENG Tiantian, CUI Mingli, et al. Analysis of coupling effect between green hydrogen trading market and electricity market under carbon trading policy [J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(3): 32-46.
- [51] SONG X, HAN J, ZHANG L, et al. Impacts of renewable portfolio standards on multi-market coupling trading of renewable energy in China: a scenario-based system dynamics model [J]. *Energy Policy*, 2021, 159: 112647.
- [52] 王善磊, 孙国强, 吴晨, 等. 基于集中-分散交易机制的多产销者两阶段鲁棒优化模型[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5): 175-182.
WANG Shanlei, SUN Guoqiang, WU Chen, et al. Two-stage robust optimization model of multiple prosumers based on centralized-decentralized trading mechanism [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5): 175-182.
- [53] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 179-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 179-186.
- [54] PAN Z, GUO Q, SUN H. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow [J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 230-243.
- [55] 谈晶品, 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): 6483-6497.
TAN Jinjing, LI Yang. Review on transaction mode in multi-

- energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6483-6497.
- [56] 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.
- [57] LIU X. Optimal scheduling strategy of electricity-heat-hydrogen integrated energy system under different operating modes[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(9):12901-12925.
- [58] WANG C, DING X, GUO C, et al. Optimal configuration of hydrogen storage system and hydrogen supply chain equipment for regional integrated energy system[C]//2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS). Jinan, China: IEEE, 2020:976-981.
- [59] MA Y, WANG H, HONG F, et al. Modeling and optimization of combined heat and power with power-to-gas and carbon capture system in integrated energy system[J]. Energy, 2021, 236:121392.
- [60] ZHANG J, CHEN J, JI X, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on liquid carbon dioxide energy storage[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11:1-11.
- [61] 国家发展改革委办公厅, 国家能源局综合司. 关于进一步推动新型储能参与电力市场和调度运用的通知[EB/OL]. [2023-06-16]. https://www.gov.cn/jzhengce/zhengceku/2022-06/07/content_5694423.htm.
- [62] 刘敦楠, 刘明光, 王文, 等. 充电负荷聚合商参与绿色证书交易的运营模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10):1-9.
- LIU Dunnan, LIU Mingguang, WANG Wen, et al. Operation mode and key technology of charging load aggregator participating in green certificate trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):1-9.
- [63] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑碳排放成本的电力市场均衡分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5):1558-1563.
- LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Electricity market equilibrium analysis considering carbon emission cost[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1558-1563.
- [64] 李章溢, 马昕, 裴玮, 等. 含用户聚合代理的工业园区需求响应主从博弈机制与策略[J]. 中国电力, 2020, 53(8):40-49.
- LI Zhangyi, MA Xin, PEI Wei, et al. Leader-follower game mechanism and strategy of industrial park demand response with user aggregator[J]. Electric Power, 2020, 53(8):40-49.
- [65] 魏超, 焦晓峰, 刘永江, 等. 能源市场背景下含储能的光伏和热电联产评估[J]. 电气传动, 2021, 51(18):76-80.
- WEI Chao, JIAO Xiaofeng, LIU Yongjiang, et al. Evaluation of photovoltaic and CHP with energy storage under the background of energy market[J]. Electric Drive, 2021, 51(18):76-80.
- [66] LIU H, WANG Y, XU F, et al. P2H modeling and operation in the microgrid under coupled electricity-hydrogen markets[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9:812767.
- [67] 陈伟, 宋维明. 国际主要碳交易市场价格形成机制及其借鉴[J]. 价格理论与实践, 2014(1):115-117.
- CHEN Wei, SONG Weiming. Price formation mechanism of major international carbon trading markets and its reference[J]. Price: Theory & Practice, 2014(1):115-117.
- [68] 吴界辰, 艾欣, 张艳, 等. 配售分离环境下高比例分布式能源园区电能日前优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6):1709-1719.
- WU Jiechen, AI Xin, ZHANG Yan, et al. Day-ahead optimal scheduling for high penetration of distributed energy resources in community under separated distribution and retail operational environment[J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1709-1719.
- [69] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6):3524-3533.
- [70] MENSIN Y, KETJOY N, CHAMSA-ARD W, et al. The P2P energy trading using maximized self-consumption priorities strategies for sustainable microgrid community[J]. Energy Reports, 2022, 8:14289-14303.
- [71] ZHONG X, ZHONG W, LIU Y, et al. A communication-efficient coalition graph game-based framework for electricity and carbon trading in networked energy hubs[J]. Applied Energy, 2023, 329:120221.
- [72] ZHONG W, XIE S, XIE K, et al. Cooperative P2P energy trading in active distribution networks: an MILP-based Nash bargaining solution[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 2(12):1264-1276.
- [73] 程海花, 杨辰星, 刘硕, 等. 基于路径组合计及ATC的省间中长期交易优化出清和系统研发[J]. 电网技术, 2022, 46(12):4762-4774.
- CHENG Haihua, YANG Chenxing, LIU Shuo, et al. Optimization clearing and system development of inter-provincial medium and long term trade considering ATC base on path combination[J]. Power System Technology, 2022, 46(12):4762-4774.
- [74] 唐翀, 周保荣, 赵文猛, 等. 适用于实时市场出清的分散式鞍点动态求解方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1):121-128.
- TANG Chong, ZHOU Baorong, ZHAO Wenmeng, et al. Decentralized saddle-point dynamics method for real-time market clearing[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2022, 34(1):121-128.
- [75] 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.
- [76] 李吉峰, 梁贤明, 吴俊, 等. 低碳导向的区域综合能源服务市场交易机制设计[J]. 东北电力技术, 2023, 44(3):55-62.
- LI Jifeng, LIANG Xianming, WU Jun, et al. Design of low carbon oriented local integrated energy services market trading mechanism[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(3):55-62.
- [77] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 考虑风电的电力联营市场日前出清模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13):45-50.
- SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. An electricity market clearing model for day-ahead pool market considering wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):45-50.
- [78] 李知远, 张翼飞, 张政, 等. 基于多代理决策模型的电力市场月度集中竞价博弈分析[J]. 电气自动化, 2022, 44(5):50-52, 56.
- LI Zhiyuan, ZHANG Yifei, ZHANG Zheng, et al. Game analysis of monthly centralized competitive bidding in electricity market based on multi-agent decision model[J]. Electrical Automation, 2022, 44(5):50-52, 56.
- [79] 王辉, 陈波波, 廖昆. 基于低碳激励型出清的跨省区发电权交易双层优化模型[J]. 可再生能源, 2019, 37(12):1842-1849.
- WANG Hui, CHEN Bobo, LIAO Kun. Bi-optimal model for trans-provincial power generation trading based on low-carbon incentive clearing method[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(12):1842-1849.

- [80] HE L, WEI Z, YAN H, et al. A day-ahead scheduling optimization model of multi-microgrid considering interactive power control[C]//2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid(IGBSG). Yichang, China: IEEE, 2019: 666-669.
- [81] 詹博淳, 冯昌森, 尚楠, 等. 发电联盟参与电-碳-绿证市场的协同优化策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. [2023-06-16]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001276>.
- [82] WANG Y, LIU C, QIN Y, et al. Synergistic planning of an integrated energy system containing hydrogen storage with the coupled use of electric-thermal energy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(40): 15154-15178.
- [83] 张军, 霍现旭, 戚艳, 等. 多能信息交互支撑的综合能源协同优化调度对综合供能可靠性影响分析技术[J]. 供用电, 2022, 39(3): 9-17.
- ZHANG Jun, HUO Xianxu, QI Yan, et al. Impact analytical technique for reliability of complementary integrated energy system based on the multi-energy information interaction scheme[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(3): 9-17.
- [84] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99.
- XU Chuanbo, LIU Jianguo. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89-99.
- [85] KLATZER T, BACHHIESL U, WOGGIN S. State-of-the-art expansion planning of integrated power, natural gas, and hydrogen systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(47): 20585-20603.
- [86] OLABI A G, ALI ABDELKAREEM M A, MAHMOUD M S, et al. Green hydrogen: pathways, roadmap, and role in achieving sustainable development goals[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 177: 664-687.
- [87] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[EB/OL]. [2023-06-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/30/content_5671296.htm.
- [88] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
- WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [89] WENG Q, XU H. A review of China's carbon trading market[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 613-619.
- [90] JIANG J, XIE D, YE B, et al. Research on China's cap-and-trade carbon emission trading scheme: overview and outlook[J]. Applied Energy, 2016, 178: 902-917.

作者简介:

李 奇(1984—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为轨道交通新能源技术、综合能源系统运行与控制等(**E-mail**: liqi0800@163.com);

霍莎莎(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统规划与运行(**E-mail**: shashahuo1022@163.com);

蒲雨辰(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微电网运行与控制(**E-mail**: yuchen_pu@126.com)。

(编辑 李玮)

Review on electricity-carbon-hydrogen coupling trading market for integrated energy system with hydrogen

LI Qi, HUO Shasha, PU Yuchen, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To achieve China's "dual carbon" target, the electricity-carbon-hydrogen coupling trading market optimizes energy allocation and accelerates energy transformation through market mechanism. However, the prosperity of integrated energy system with hydrogen has brought new challenges to the development of multi-energy coupling trading market. The basic structure of integrated energy system with hydrogen is introduced, and based on the research of the electricity-carbon and electricity-hydrogen trading markets, the electricity-carbon-hydrogen coupling trading mechanism is analyzed. Then, the electricity-carbon-hydrogen coupling trading market mechanism of integrated energy system with hydrogen is deeply explored. It is elaborated from the perspectives of the subject matter, transaction object and transaction price of the market. And the current energy pricing strategy and market clearing mechanism to achieve market equilibrium are summarized and analyzed. Finally, the challenges of the development of the electricity-carbon-hydrogen trading market and the integrated energy system with hydrogen are summarized, and an outlook on the direction of subsequent research is given.

Key words: integrated energy system; electricity-carbon-hydrogen trading market; energy pricing strategy; clearing mechanism