

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.12.006

面向新型产消者的综合能源系统和电力市场研究

Research on the integrated energy system and the electricity market towards new prosumers

侯鲁洋^{1a}, 葛磊蛟², 王彪³, 王宣元⁴, 徐连明^{1b}, 王莉^{1a}

HOU Luyang^{1a}, GE Leijiao², WANG Biao³, WANG Xuanyuan⁴, XU Lianming^{1b}, WANG Li^{1a}

(1.北京邮电大学 a. 计算机学院(国家示范性软件学院); b. 电子工程学院, 北京 100876; 2. 天津大学
电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 3. 长安大学 能源与电气工程学院, 西安 710038;
4. 国家电网冀北电力有限公司, 北京 100054)

(1. a. School of Computer Science (National Pilot Software Engineering School); b. School of Electronic Engineering,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. School of Electrical and Information
Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Energy and Electrical Engineering,
Chang'an University, Xi'an 710038, China; 4. State Grid Jibei Electric Power Company
Limited, Beijing 100054, China)

摘要: 能源互联网为综合能源系统提供了一种能源供应的新型共享平台, 物联网和人工智能技术也推动着传统电力用户向具有人工智能和经济学属性的能源产消者转换。然而, 分布式能源和能源产消者的融入给综合能源系统的建模优化和电力市场设计带来诸多挑战, 需要借助人工智能开发综合解决框架实现资源的最优配置、多能互补以及分布式决策。为实现综合能源系统中产消者和分布式能源的有机结合, 研究了综合能源系统下多能互补和源网荷储多元协调等问题, 分析了产消者的社会 and 经济学属性, 提出了基于博弈论、运筹学和机器学习的综合解决框架, 借助数字孪生和仿真技术构建电力市场, 实现与产消者和综合能源系统的连接和交互, 可为建立清洁低碳安全高效的能源体系并实现碳中和目标提供理论指引和技术支持。

关键词: 碳中和; 综合能源系统; 分布式能源; 多能互补; 源网荷储; 能源产消者; 电力市场; 人工智能; 信息物理系统; 数字孪生; 博弈论; 机器学习; 能源互联网

中图分类号: TK 01⁹; TM 73

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)12-0040-09

Abstract: Energy Internet provides a new sharing platform for the energy supply of integrated energy systems, and Internet of Things and Artificial Intelligence (AI) technologies are driving the transformation of traditional energy consumers to prosumers with AI and economic attributes. However, the participation of distributed energy and energy prosumers brings challenges to the model optimization of integrated energy systems and electricity market design, calling for the development of AI-based integrated solution framework to deal with the optimal allocation of resources, multi-energy complementation and distributed decision-making. To facilitate the fusion of energy prosumers and distributed energy resources into integrated energy systems, the multi-energy complementation and source-grid-power-storage coordinated control of integrated energy systems are studied, and the social and economic characteristics of energy prosumers are analyzed. A comprehensive solution framework taking advantages of game theory, operations research and machine learning is proposed to solve the aforementioned issues. With the support of digital twin and simulation techniques, an electricity market based on digital twin and simulation techniques is constructed to realize the connection and interaction between prosumers and integrated energy systems. The method provides the theoretical guidance and technical support for the establishment of a clean, low-carbon, safe, and efficient energy system and advances the carbon neutrality target.

Keywords: carbon neutrality; integrated energy system; distributed energy; multi-energy complementation; source-grid-power-storage; energy prosumer; electricity market; artificial intelligence; cyber physical system; digital twin; game theory; machine learning; Energy Internet

收稿日期: 2022-08-20; 修回日期: 2022-11-12

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5400-202128572A-0-5-SF); 国家自然科学基金项目(U2066201); 国家电网公司总部科技项目(5700-202014197A-0-00)

0 引言

为助力实现碳达峰、碳中和目标^[1],国家发展改革委提出了划定推动绿色发展,实现“双碳”目标的《“十四五”循环经济发展规划》。中央财经委员会第九次会议指出,要构建清洁低碳安全高效的能源体系,控制化石能源总量,着力提高利用效能,实施可再生能源替代行动,深化电力体制改革,构建以新能源为主体的新型电力系统^[2]。2022年3月22日,国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》中指出,当前能源系统形态向分散化和去中心化的方向加速变革,系统模式由大基地大网络为主逐步向与微电网、智能微网并行转变,新型储能和氢能有望规模化发展,互联网、大数据、人工智能(Artificial Intelligence, AI)加快与能源产业融合,能源系统向智能灵活调节、供需实时互动方向发展,推动能源生产消费方式深刻变革^[3]。围绕“双碳”目标,国家能源局提出了探索培育“风光水电+氢储能”的一体化应用新模式。

为实现“双碳”目标,需要在能源生产、分配、建设及运输过程中增加清洁能源的供给比例,以风光等为代表的可再生能源提供了一条通往可持续发展的低碳经济道路^[4]。在物联网和AI技术的加持下,能源互联网能够结合大数据技术,使电网、交通运输和其他信息物理设施变得更加智能和交互,为实现电网多能源协调发展和综合高效利用提供了关键技术和支撑^[5-6]。这些趋势为研究能源互联网提供了契机。能源互联网可被视作一个集成信息层和物理层的多模态网络,其中AI技术和物联网系统结合了“绿色”元素用以提供数据、信息、能源流,继而实现能源互联环境下的控制、决策、优化和管理。

随着能源互联网的发展,风光等集群式新能源、微电网接入配电网的比例越来越高,电网与分布式能源和信息系统等多种网络的耦合程度也越来越高^[7]。源网荷储端的变化推动着传统电力用户向能源产消费者(Prosumer)转变并提出了多元用电需求,分布式储能和电解水制氢可平抑可再生能源并网带来的波动并促进风光能源消纳,大数据、5G、AI和泛在互联技术的应用形成了能量流和信息流的交叉融合。能源互联网中AI和数字孪生(Digital Twin)技术的应用使综合能源系统成为一个社会、信息、物理相互依存的大规模复合网络^[8]。可见,综合能源系统的发展要求在信息物理系统的架构下满足能源系统中多元化用能需求的同时,能够有效提升能源利用效率,促进可再生能源低碳、高效、经济

利用。

在此背景下,本文以“综合能源系统中新型产消费者和分布式能源的有机融合”为主线,分析能源互联网下综合能源系统的新特点和AI经济学背景下能源产消费者的新特征,研究当前综合能源系统中存在的主要问题、挑战以及新技术。为实现综合能源系统中源网荷储的协同并与新型产消费者有机融合,针对面向产消费者的源荷交互和供需互动等若干问题,提出了基于AI理论和技术的集成解决架构,并分析了基于数字孪生构建电力市场中的关键问题。

本研究旨在实现下述目标。

(1)实现综合能源系统中多类型分布式能源和新型产消费者的有机融合。针对综合能源系统中产消费者缺乏理性和信息资源受限等客观约束,基于AI的经济学范式对其建模并分析其属性,与其他分布式能源有机结合,实现多能互补和最优协调控制;针对综合能源系统中的关键问题提出集成解决框架,利用博弈论等经济学分析方法和多目标优化方法处理其冲突的目标,通过机器学习训练出最优群体策略。

(2)在考虑新型产消费者的环境下实现综合能源系统建模分析和协调控制,以实现其低碳、平稳、经济运行。通过机器学习和数据挖掘实现物理系统数据的充分利用,推动分布式可再生能源并网和就近消纳,减少弃风弃光;对综合能源系统进行数学建模时,考虑系统的物理约束和产消费者不完全偏好等信息,以“多能互补、源网荷储协同”为目标,应用需求响应机制实现供需实时互动和生产消费方式变革,通过数字孪生技术驱动综合能源系统的平稳、高效运行。

1 能源互联网下的综合能源系统

1.1 信息物理架构

能源互联网优先利用分布式可再生能源,应用互联网技术将能源系统中的各个模块广泛互联,促进多能互补协同和需求供给互动,最终实现能源流和信息流的优化配置。能源互联网中电网形态的变化使综合能源系统逐渐发展为具有电能集聚、传输、储存和交易的智慧能源系统。此环境下的综合能源系统可被视为一个典型的信息物理系统(Cyber Physical System),其物理层由不同子系统和模块组成,如智能建筑、水电解制氢系统、光伏发电装置、充电/加氢站、零排放汽车、各种传感器和信息通信设施等,信息层通过收集来自这些模块的数据来研究这些模块如何交互并做出兼顾系统效率和

社会福利的决策。信息物理系统数学模型考虑系统物理约束、资源约束、供需平衡和负荷约束等物理层的多重约束,从而实现系统的多能源多元协调和互补。具体研究问题包括但不限于多能流综合调度控制、能源管理、车网交互、能源共享、多能互补等。信息物理融合的综合能源系统可实现一次、二次调控下风光氢热能源集中并网与就地消纳,三次调控下产消者之间和与能源系统的优化联动并建立电力市场能源交易的多层网络架构。

综合能源系统中的分布式能源可由光伏和风力发电装置、电解水制氢装置、热电联产系统、氢气供能装置、储能系统、智慧建筑、电动汽车和燃料电池汽车等构成,如何获得这些分布式能源的参数和信息并开发出有效的运行协调控制方法是实现系统源网荷协同、平稳、经济运行的关键。如优化建模方法和需求响应机制可用于协调系统中电动汽车充电和电解水制氢,以充分利用光电资源和分布式储能实现微电网的低碳经济运行^[9-10]。在微电网中,屋顶光伏等分布式可再生能源的并网推动传统电力消费者转变为能源产消者,并在需求端助力能源系统的经济稳定运行。

1.2 能源产消者 2.0: AI 的经济学范式

一个多元复杂的综合能源系统运行融合了环境的不确定性和非线性等特征,可被构建为一个多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)。为协同源网荷储,系统决策和优化控制需要收集的信息不仅包括传感器等物理系统所提供的数据,更多来自产消者的多元负载需求和反馈输入,这让系统的优化控制目标变得异构和冲突;同时,产消者的潜力在综合能源系统中并没有被充分挖掘,表现为能源系统缺乏对产消者参与市场调配的硬件支持、调频调峰潜力未被充分开发、AI技术没有与产消者有效结合、产消者存在隐私顾虑等。

在综合能源系统广泛应用AI技术的背景下,基于社会经济人(Homo Economicus)建模的产消者中完全理智、单维、分布已知且不变的私人信息函数等假设在现实中难以成立,他们有不同的理智性、行为方式难以被系统控制和预测、个人偏好具有时变性。2020年诺贝尔经济学奖获得者Milgrom和Wilson教授^[11]指出,对智能体进行经济学层面的分析非常困难,因为他们在决策和与其他系统交互的过程中只考虑他们所知道和他们相信别人所知道的信息,并根据他们所拥有的局限信息表现出“策略性”的一面,这使得在现实世界中难以对经济人的属性进行精确建模且缺乏可解释的“理智性”。因此,如何在MAS环境下协调系统效率和个

人利益并利用AI技术解释个体的“经济理智”将成为研究综合能源系统和产消者融合的关键。

随着综合能源系统中越来越多AI设备和技术的应用,传统电力用户或能源产消者向新一代具有微观经济学属性的、基于AI建模的新型产消者转变,即机器经济人(Machina Economicus, ME)。具备经济学属性的ME范式由Parkes和Wellman教授共同提出^[12]。与社会经济人相比,新型产消者融合了AI技术和社会经济人的特性,驱使AI向具有微观经济学属性的方向进化。在ME的假设下,可以利用博弈论分析并预测“自私”的能源产消者如何行动并得出纳什均衡解;可通过设计交互系统和激励机制来引导这些自私的能源产消者共同做出社会福利最优的群体行为^[13]。

1.3 基于ME建模的新特性

作为一个全新的AI智能体,建模为ME的能源产消者展现出与人类或广义上AI不同的特点,其集成了自动感知、数据处理、推理和能动性能力,可以更好地遵守经济理智原则,具备经济学人的属性和博弈论的视角,在自适应学习、AI辅助决策和参与复杂系统的交互中具有更强的信息处理、学习和决策能力并展现出人类的“利己性”。通过对产消者的不同特征进行标签化建模,考虑其偏好时变的特点,建立其对环境状态的目标和偏好函数,得到边际需求效益函数和不确定性概率分布。结合系统的物理约束,分析其电气属性、社会属性和经济学属性,采取相应的激励机制引导其改变在系统内的竞争或协作行为方式和策略,实现系统效率和个人利益的统一。

能源互联网中的产消者可以是微电网、家庭储能系统、零排放/自动驾驶汽车、智能建筑、可再生能源发电系统等基于ME建模的智能体。集成了ME特点的能源产消者为综合能源系统中的研究问题带来了新的特点并实现了系统与产消者的深层交互。以自动驾驶出租车(Robo-Taxi)为例,它可以被建模为ME并学习如何将个人的利益和偏好与其他车辆、电网或环境目标进行统一协调。通过学习乘客的用车习惯并预测电网和交通系统的负荷参数,在载客、路径规划、能量管理、与其他子系统自动协商中做出与能源和交通系统协同的最优决策。

2 问题与挑战

本章节从能源供给侧、分配和控制侧及需求侧依次介绍当前综合能源系统下的若干关键问题,并针对基于ME建模的产消者和综合能源系统的融合架构,分析其物理层和信息层所面临的挑战。

2.1 源网荷规划、协同和互补

2.1.1 光氢能源和氢供应链规划

太阳能光伏发电技术的应用可有效减少化石能源的使用,减少对周围环境的污染^[14-15]。近年来光伏发电技术在国内发展迅速,带来了诸多与微电网互动相关的应用研究^[16]。氢作为一种优质的二次能源,在能源存储和利用中具备巨大的应用潜力,有助于解决能源系统中可再生能源的消纳问题^[15-16]。随着以风光为代表的可再生能源发电规模的不断扩大,电解水制氢成本有望随着电价的降低而进一步下降并实现真正意义上的零排放。因此,开展以光氢为主的综合能源系统相关研究,对促进间歇性可再生能源在电力系统中的消纳意义重大。

潘光胜等^[17]提出了一种以电和氢为能源载体的新型能源承载形式——电氢能源系统,提出了电氢能源系统发展成熟度的核心量化指标:可再生能源在一次能源消费中的占比;电氢能在终端能源消费中的占比;制氢、储氢和输氢等基础设施的配置容量与相应电力基础设施的匹配程度。从制、储、输、配、用等角度评述现有的研究基础与技术支撑,从经济性分析、系统集成和近期实施路径等方面对电氢能源系统进行了展望。

2.1.2 多能流协调互动和能量管理

综合能源系统包含冷、热、电、气等多种能源形式,需要控制多能流以实现系统的高效运行^[18-19]。能量管理通常被建模成两阶段随机规划问题^[20-22],以实现不同场景下的最优能源分配并最小化日运行成本,其中第1阶段决定了日前的能量预分配,第2阶段实现了不同场景下的实时功率控制。Yan等^[21]提出了一个四阶段的优化和控制算法,实现配电网下的日前能量管理、充电价格和反向充电补偿价格的更新优化以及小时前和实时功率控制。刘静等^[22]针对含电池储能系统以及充电场站的智能楼宇提出了一种多阶段能量管理方法,在日前和日内级别提出了鲁棒优化策略以应对可再生电源出力 and 负荷需求的不确定性,采用基于加权模型预测控制的滚动优化和反馈校正方法来动态调整可控机组的有功出力和能量交易。

2.1.3 车网交互

基于电动汽车的分布式储能具有响应快速、双向调节等优势,可在削峰填谷和平抑电网波动方面发挥关键作用^[23]。然而大规模电动汽车集群充电产生的负荷会在时间和空间上带来较大的波动和不确定性,如何更好地发挥电动汽车作为分布式储能装置的作用并实现车网互动成为当前的研究热点。段俊东等^[24]提出了考虑风电消纳的电动汽

车充电优化策略,利用蒙特卡罗仿真方法对不同数量电动汽车的充电负荷进行预测,考虑风电出力和电动汽车充电需求动态调整分时电价,建立电动汽车有序充电模型并采用改进的粒子群优化算法对此模型进行求解。Hou等^[25]对高速公路中多用户多次充电协同调度问题进行数学优化建模,考虑了分布式环境下电动汽车用户的充电偏好和经济学特性,提出了基于市场的多回合同步竞拍机制,用以分配不同充电站的充电资源;针对充电的不确定性设计了动态调度策略,实现充电等待时间最小化;其优胜者模型融合了资源配置约束并考虑了充电站的时空间约束和动态事件影响,允许用户表达偏好和价格敏感度等信息,在满足用户不同偏好的同时,保证了充电资源的最优分配和充电站的利润最大化。

2.1.4 需求响应

随着大量可再生和分布式能源的接入,当前电网中存在负荷率过高、峰谷差较大的情况,如电动汽车充放电波动会导致配电网调峰更加困难^[26]。建立需求响应机制的目的在于激励电力用户根据电价信息改变其用电习惯,以实现电网的“削峰填谷”^[27-28]。管馨等^[29]研究了风电参与电力市场的策略及风储系统的运行优化,以联合系统的总收益最大为目标,考虑风电出力波动和市场电价波动因素,建立需求侧储能运行优化模型并确定了优化策略。

2.1.5 小结

近年来国内外对分布式能源并网和源网荷储协同展开了诸多研究,如电动汽车微电网互动、多能流协调和能量管理等,但面向新型能源产消者的综合能源系统建模和协同优化尚未得到深入研究,当前研究在综合能源系统和产消者融合问题上仍有较大发挥空间。例如,氢作为一种优质的二次能源,在能源存储和利用中具备巨大潜力,有助于解决能源系统中可再生能源的消纳问题,目前针对氢能源系统的研究和试验平台还较少,对于氢并网和与其他分布式能源交互的研究尚不全面。能源互联网如何促进风光氢等可再生能源的消纳和与产消者的协调运行依旧是信息物理系统下的重点研究问题。当前针对车网交互的研究缺乏对路网和电网跨域方面的探索,随着新能源汽车渗透率的提升和自动驾驶技术的应用,未来零排放汽车应在多系统互联和AI背景下展开研究。此外,储能设备运行成本的不断下降为其凭借自身经济性参与市场竞争创造了条件,但目前电力市场中的调度、交易、结算等机制还难与产消者和分布式能源的特性全

面匹配,以光风氢为代表的分布式储能在电力市场中的潜力也未被充分开发。因此,如何准确表征新型产消者的多维特性并对其各类属性进行刻画和建模将成为实现需求响应、可再生能源并网和大范围供需实时互动的关键并将重新定义系统目标和约束。

2.2 挑战

基于以上分析,能源互联网中的综合能源系统协同优化控制呈现出以下特征:多模态化的交互和系统耦合,子系统或模块之间大量的数据交换,决策过程需要系统中模块的反馈和数据。这些特点将综合能源系统中的研究问题置于一个数据驱动的(Data-driven)、动态的(Dynamic)和分布的(Distributed) D^3 环境中。

在 D^3 环境下研究能源产消者和综合能源系统的有机融合面临以下挑战。

(1)系统态势感知与数据获取。综合能源系统中相关设备、关联环境、状态属性信息产生的海量数据为系统的运行控制提供了数据基础;此外,能源产消者的特性分析和需求偏好信息的获取将直接影响系统的性能。然而,能源互联网中传感器的数量和采集数据的质量会影响源网荷数据状态感知的完整性和准确性;同时,能源产消者不愿过多披露隐私信息或策略性地提供误导信息,也会给系统性能和他人利益带来挑战。

(2)系统建模。大量分散、无序接入的分布式能源和多源异构的能源产消者使得综合能源系统的协调控制十分困难,将带来负荷率高、峰谷差大、波动大等问题。决策和优化过程中需要考虑系统中不同模块之间的目标冲突和约束,参数随机、可扩展、多元化负荷的并入也会影响系统的电能质量和稳定性。

(3)新型产消者的特征属性。在供需关系和激励机制的引导下,综合能源系统可灵活调整能源的供应、消费和存储。然而,在能源互联网广泛应用AI技术的背景下,能源产消者可利用强大的数据处理和分析决策能力在与他人分享信息和交互中变得“自私”和“理智”,以牺牲系统性能为代价最大化自身利益,从而危害系统效率。

由此可见,综合能源系统不是多种能源的简单叠加,而是在系统层面上按照不同能源品位的高低进行互补利用,统筹安排能源产消者之间的协调和转换,并鼓励产消者积极参与需求侧配置和电力市场交易,以实现能源利用效率和系统收益最大。

3 关键技术

3.1 基于AI的集成解决框架

针对产消者融合下系统物理层和信息层带来的挑战,需要结合机器学习、数据处理、优化控制和博弈论等工具开发集成解决方案。

基于AI关键技术的集成解决框架首先要获取真实世界的时空用电需求、可再生能源发电量、电网负荷及运行、能源构成和成本等数据并对这些数据进行处理、预测和分析。面对上述挑战需要开发集成解决框架来处理优化控制和分布式决策等具体问题,利用各种理论的优点并融合不同算法,考虑产消者的新特性以及系统中的多维复杂约束,以最大化收益或最小化成本为目标,基于数学建模和优化理论开发出不同的优化控制算法,确保解的质量、可控的计算和通信成本、激励相容、易部署于分布式环境、良好的可扩展性、可信、面向用户需求等。该集成解决框架可利用监督或无监督学习技术对系统中海量的多源异构数据进行评估并提取或预测有用信息;对系统进行数学建模并考虑系统中的多元约束和产消者的特征信息,开发不同的优化模型、机器学习算法和沟通交互协议,解决分布式决策和优化控制问题;吸收强化机器学习中的群体决策策略,运筹学中的数学建模技术以及优化理论、博弈论中的沟通协调机制来处理相互冲突的目标,解决能源-交通融合带来的分布式储能优化配置、负荷需求响应、车网互动、电力市场中多能流系统协调控制等问题。

此外,基于博弈论和机制设计理论可开发出融合资源分配的数学模型和基于机器学习的先进机制框架,在 D^3 环境下允许产消者表达他们的私人偏好,考虑真实数据集和用户的偏好函数,建立产消者的时变需求和效用模型,利用强化学习算法训练最优群体策略,优化信息利用和数据交换方式,降低通信成本。

3.2 技术路线图

图1展示了综合能源系统和产消者融合的技术路线及框架(图中:SCADA为数据采集与监视控制;HELICS为大规模基础架构协同仿真的分层引擎)。对综合能源系统和能源产消者建模并实现物理层和信息层的连接,以能源系统中的典型问题为例,分析数据获取和系统建模面临的挑战,提出针对产消者AI和经济学属性的综合解决框架,并构建综合能源系统和产消者融合的电力市场,从需求侧促进多能流优化配置和供需互动。

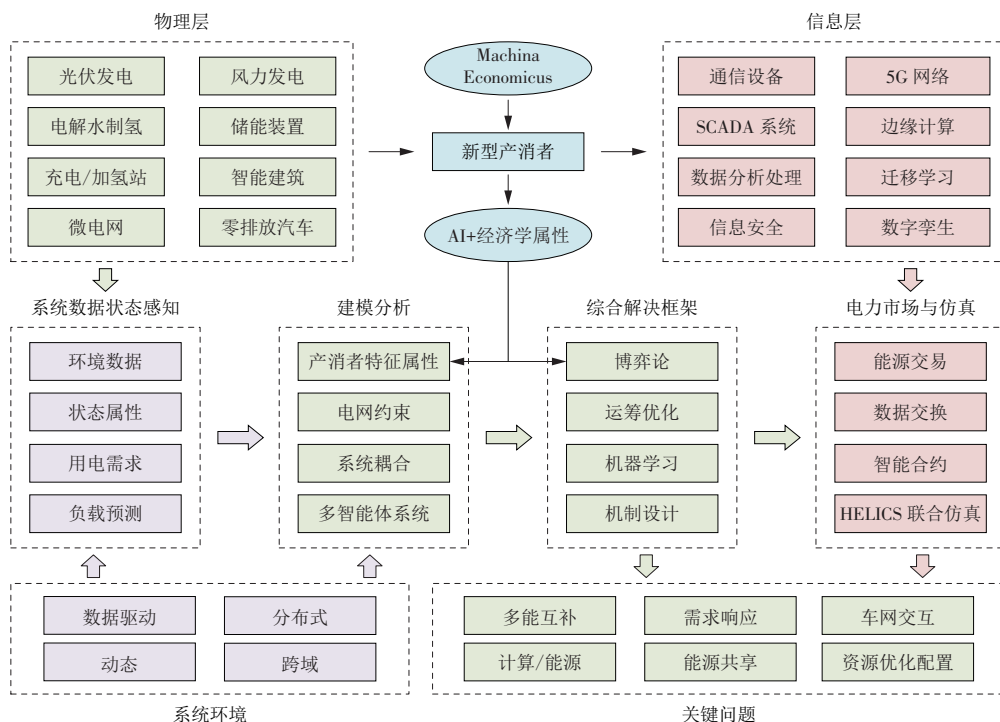


图 1 综合能源系统和新型产消者融合技术路线

Fig. 1 Technical route of the fusion of an integrated energy system and new prosumers

4 考虑新型产消者的电力市场

4.1 电力市场构建

电力市场泛指电力流通交换的领域,以实现远、中、近期的电力交易,是实现需求侧能源参与、可再生能源消纳和碳交易的重要形式^[30-32]。电力市场是新型能源产消者主动参与分布式能源协调优化运行的一个典型应用场景,可通过分布式可再生能源发电、电动汽车充放电、新型储能系统等方式将不同类型的能源进行转换和存储并在市场环境中进行交易,从而最大化系统的收益。电力市场中的电力和能源交易配合需求响应机制,以协商竞价为基础、以供需价格为引导进行经济调度。然而,大量 AI 技术在需求侧市场中的部署和应用使 ME 在与传统电力用户进行交流或争夺有限资源中处于占优地位(Domination),从而影响能源的公平高效利用。

在此背景下,综合能源系统和产消者融合的电力市场设计应在考虑用户物理属性的同时,以保护隐私和可信为目标,建立兼顾公平性与效率的机制。根据不同的场景开发不同的市场机制并与供需均衡价格共同作用,配合电网端实现一次和二次调节,合理匹配电、热、气、氢等能源需求。基于 AI 技术开发协商沟通机制,实现能源产消者的自动决策和高效协作,以运行成本、碳排放、用户满意度、电能质量等单个或多个参数为优化控制目标,实现

物理系统和信息系统的双向互通并确保综合能源系统的高质量可持续发展。具体来讲,在能源互联网的架构下,信息物理层互连的多模态架构通过 5G 网络收集数据,利用分析技术补齐量测数据并剔除坏数据,根据历史数据集进行预测。电力市场中数据分析、数据交换、数据安全、智能交互需要考虑产消者的多元性和互动性,实现对其社会和经济属性的重新认知。在态势感知数据不足和缺少标注的限制下,可利用迁移学习算法对有限数据实现重复高效利用,与各个模块相连并采用适当的通信结构和云服务来整合这些数据,从而实现物理系统和信息系统下能量流、信息流的融合以及系统的最优控制。

4.2 数字孪生和仿真

信息物理系统旨在促成物理世界和信息世界的交互融合,基于数字孪生技术或虚拟电厂(Virtual Power Plant),综合能源系统可实现在信息系统对物理系统的等价映射。通过收集和实时接入处理物理系统中不同模块的数据,在 D³ 环境下实现产消者的最优决策和多种分布式能源的协同优化。通过物联网、实时控制、边缘计算、5G 通信等技术,将不同类型的新型产消者聚合连接,通过运行调度控制措施促进分布式可再生能源消纳,推动多能源综合运营管理和交易,有效提升系统运行效率并取得最合理的能源利用效率与效益;同时,能源产消者可利用边缘智能技术与其他子系统或产消

者交互,开发需求侧机制,以尽可能低的信息成本,通过不完全供需信息的交换和调整,实现个人收益和系统效率的一致。

作为实现物理层和信息层交互的一种手段,还可基于 HELICS 仿真软件^[33]做二次联合仿真平台开发。HELICS 仿真平台采用分布式架构,其不同模组可集成来源于系统和产消者的多元异构数据和数学模型,完成输/配电网建模、产消者分布式决策、数据收集和处理、需求侧管理、可再生发电预测和数据挖掘等任务,并基于消息队列遥测传输(MDPT)协议实现不同模组之间的数据交换、实时通信和并行计算。这些特点使其被广泛应用于动态系统建模和分布式能源集成。例如,文献[34]开发了基于 Python 和 HELICS 的大规模联合仿真架构,以实现电网输配电系统的平行计算和仿真分析。该框架可实现电网规划、关键突发事件下的控制验证以及各种广域监控和控制,还可用于生成考虑噪声和数据丢包的真实测量数据。可见,基于 HELICS 二次开发的联合仿真平台可实现综合能源系统建模、数据分析和处理、电力市场构建以及与产消者和综合能源系统的连接和交互、电力市场能源分配和交易、电网潮流计算、产消者交互通信、基于区块链模式的能源共享、集成微电网的互联协调和能源管理等,还可共享物理系统中产生的数据和模型,从而在不同环境下实现自定义系统的快速重构,因此,HELICS 仿真平台可作为分析综合能源系统和产消者的重要工具。

5 结束语

为满足国家能源转型和未来能源系统的发展需求,针对综合能源系统和产消者的未来发展方向,本文重点研究了基于 AI 经济学范式的能源产消者与综合能源系统融合问题,以源网荷多元协调控制为目标,以多能互补和产消者互动为关键问题,对复杂系统的联合建模、优化控制和分析提出了可行的技术路线。分析了综合能源系统的新特点、新挑战和关键问题,针对系统间的建模和运行控制提出了基于博弈论、运筹学和机器学习的集成解决思路,构建了电力市场,实现产消者和分布式可再生能源的交互,在保证电网稳定安全运行的前提下实现系统效率和社会效益的协调统一。

本文紧密围绕负载预测、充电调度、车网交互、能源管理、需求响应、能源模型等关键问题,建立了“理论-技术-经济-政策”的多维架构和技术路线,聚焦于解决能源系统和产消者融合带来的实际工程问题,实现大数据、AI 和能源交通领域的前沿交

叉,利用 AI 技术,以分布式能源为载体,为互联网架构下多类型能源产消者和综合能源系统规划设计、源网荷储协同优化控制、电力市场构建和能源产消者积极参与需求侧管理提供理论基础与技术支撑,实现以源荷互动和需求侧响应为主的综合能源系统低碳经济运行控制,建立清洁、低碳、安全、高效的能源体系,助力“双碳”目标实现。

参考文献:

- [1] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2022-04-01]. http://www.xinhuanet.com/world/2020-09/22/c_1126527652.htm.
- [2] 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15) [2022-04-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- [3] 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]. (2022-01-29) [2022-04-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [4] RIFKIN J. The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth [M]. New York: Jeremy Tarcher/Putnam, 2003.
- [5] 刘振亚. 全球能源互联网[J]. 当代电力文化, 2015 (3): 102.
- [6] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and Energy Internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (1): 1-13.
- [7] 秦羽飞, 葛磊蛟, 王波. 能源互联网群体智能协同控制与优化技术[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 1-13.
QIN Yufei, GE Leijiao, WANG Bo. Swarm intelligence collaborative control and optimization technology of Energy Internet [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (9): 1-13.
- [8] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies [J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(6): 702-713.
- [9] IPSAKIS D, VOUTETAKIS S, SEFERLIS P, et al. The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system [J]. Energy, 2008, 33(10): 1537-1550.
- [10] 王鑫, 陈祖翠, 卞在平, 等. 基于粒子群优化算法的智慧微电网风光储容量优化配置[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 52-58.
WANG Xin, CHEN Zucui, BIAN Zaiping, et al. Optimal

- allocation of a wind-PV-battery hybrid system in smart microgrid based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(6): 52-58.
- [11] The Sveriges Riksbank prize in economic sciences in memory of Alfred Nobel 2020 [EB/OL]. (2020-10-28) [2022-04-01]. <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2020/prize-announcement>.
- [12] PARKES D C, WELLMAN M P. Economic reasoning and artificial intelligence [J]. *Science*, 2015, 349 (6245): 267-272.
- [13] HOU L Y, WANG C. Market-based mechanisms for smart grid management: Necessity, applications and opportunities [C]//2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2017:2613-2618.
- [14] 赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 11-20.
- [15] 詹天津, 谢玉荣. 国内分布式光伏发展形势分析及思考 [J]. *华电技术*, 2021, 43(12): 60-65.
ZHAN Tianjin, XIE Yurong. Development status analysis and consideration on domestic distributed PV energy [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(12): 60-65.
- [16] HAN D, LEE J H. Two-stage stochastic programming formulation for optimal design and operation of multi-microgrid system using databased modeling of renewable energy sources [J]. *Applied Energy*, 2021, 291:116830.
- [17] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统 [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 accomodation of high proportion of renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44 (23): 1-10.
- [18] DANESHVAR M, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K, et al. Transactive energy management for optimal scheduling of interconnected microgrids with hydrogen energy storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46: 16267-16278.
- [19] OLATOMIWA L, MEKHILEF S, ISMAIL M S, et al. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 821-835.
- [20] WU F, SIOSHANSI R. A two-stage stochastic optimization model for scheduling electric vehicle charging loads to relieve distribution-system constraints [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 102: 55-82.
- [21] YAN Q, ZHANG B, KEZUNOVIC M. Optimized operational cost reduction for an ev charging station integrated with battery energy storage and PV generation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10: 2096-2106.
- [22] 刘静, 史梦鸽, 胡永锋. 含电池储能系统的智能楼宇多阶段能量管理策略 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(3): 29-37.
LIU Jing, SHI Mengge, HU Yongfeng. Multi-stage energy management strategy for smart buildings with BESS [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(3): 29-37.
- [23] HOU L Y, WANG C, YAN J. Bidding for preferred timing: An auction design for electric vehicle charging station scheduling [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(8): 3332-3343.
- [24] 段俊东, 李高尚, 李一石, 等. 考虑风电消纳的电动汽车充电站有序充电控制 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10 (2): 630-637.
DUAN Jundong, LI Gaoshang, LI Yishi, et al. Coordinated charging control for EV charging stations considering wind power accommodation [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(2): 630-637.
- [25] HOU L Y, YAN J, WANG C, et al. A simultaneous multi-round auction design for scheduling multiple charges of battery electric vehicles on highways [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7):8024 - 8036.
- [26] HOU L Y, MA S, YAN J, et al. Reinforcement mechanism design for electric vehicle demand response in microgrid charging stations [C]// IEEE Computational Intelligence Society and the International Neural Network Society, The International Joint Conference on Neural Networks, 2020.
- [27] 丁叶强, 姚学恒, 陈向民, 等. 基于5G与实时电价的电动汽车需求侧管理研究 [J]. *华电技术*, 2021, 43(1): 66-70.
DING Yeqiang, YAO Xueheng, CHEN Xiangmin, et al. Study on electric vehicle demand side management based on 5G and spot pricing [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43 (1): 66-70.
- [28] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1: 320-331.
- [29] 管馨, 陈涛, 高赐威. 适应风电参与电力市场的需求侧储能负荷运行优化研究 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44 (2): 35-41.
GUAN Xin, CHEN Tao, GAO Ciwei. Study on optimal operation of the demand-side energy storage system for

- wind power participating in electricity market [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(2): 35-41.
- [30] 康重庆, 杜尔顺, 张宁, 等. 可再生能源参与电力市场: 综述与展望[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 16-23.
- KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: Review and prospect [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 16-23.
- [31] 吉斌, 孙绘, 梁肖, 等. 面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 33-40.
- JI Bin, SUN Hui, LIANG Xiao, et al. Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 33-40.
- [32] 宋莉, 刘敦楠, 庞博, 等. 需求侧资源参与电力市场机制及典型案例实践综述 [J]. 全球能源互联网, 2021 (4): 401-410.
- SONG Li, LIU Dunnann, PANG Bo, et al. Mechanism of demand-side resource participation in the electricity market and typical case practice review [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021(4): 401-410.
- [33] TOP P, FULLER J, HARDY T, et al. Hierarchical engine for large-scale infrastructure co-simulation (HELICS) [EB/OL]. [2022-04-01]. <https://docs.helics.org>.
- [34] BHARATI A K, AJJARAPU V. SMTD co-simulation framework with HELICS for future-grid analysis and synthetic measurement-data generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 58 (1): 131-141.
- (本文责编: 刘芳)

作者简介:

侯鲁洋(1991), 男, 副研究员, 博士, 从事能源互联网、车网交互与边缘计算、机制设计、人工智能等方面的研究, luyang.hou@bupt.edu.cn;

葛磊蛟(1984), 男, 副教授, 博士, 从事智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和智能配用电大数据云计算等方面的研究, legendglj@tju.edu.cn;

王飏(1969), 男, 副教授, 博士, 从事大系统协调优化、人工智能与机器人控制、过程控制理论与技术等方面的研究, wangbiao@chd.edu.cn;

王宣元(1979), 女, 正高级工程师, 博士, 从事电力市场、电力系统运行控制、新能源并网与消纳、电力电子等方面的研究, wang.xuanyuan@jibei.sgcc.com.cn;

徐连明(1982), 男, 讲师, 博士, 从事协作定位、边缘智能、边缘缓存以及计算等方面的研究, xulianming@bupt.edu.cn;

王莉(1982), 女, 教授, 博士, 从事应急通信与智能系统、能源互联网、边缘计算与分布式缓存等方面的研究, liwang@bupt.edu.cn。