

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600478



本刊网刊

重构工业用户生产流程支撑电力系统低碳转型

陈庚睿¹, 惠红勋¹, 高红均², 刘俊勇², 宋永华^{1*}

(1. 澳门大学 智慧城市物联网全国重点实验室, 澳门特别行政区 999078; 2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在“双碳”目标持续推进的背景下,高比例可再生能源接入带来的随机性、波动性和间歇性使电力系统供需平衡的压力显著提升,亟需能对系统供需平衡进行有效调节的各类灵活性资源。然而,以火电为主的电源侧资源在碳减排和技术发展等方面受到限制,有必要进一步挖掘需求侧资源参与电力系统灵活性调节的潜力。工业用户具有耗电量、碳减排潜力高、可调节容量可观和自动化控制体系成熟的特点,可以通过在技术层面上改进工艺路线,在运行层面上进行生产批次调度和设备功率调整,以形成能够支撑电力系统供需平衡和低碳运行的能力,成为面向碳减排的需求侧灵活性开发的重点方向。同时,工业用户正逐步重构为兼具电源、负荷和储能等多重属性的综合主体,其参与电力系统灵活性调节不仅有助于可再生能源消纳,降低工业产品碳足迹,更是促进工业与电力系统协同低碳转型的重要手段。因此,本研究围绕工业用户生产流程重构支撑电力系统低碳转型开展综述。首先,从工业用户由消费者向产消者重构的视角出发,概括其基本内涵和主要资源分类。其次,选择钢铁、电解铝和水泥作为代表性工业场景,分析相关工业用户的工艺特征及灵活性调节机理。重点讨论了钢铁行业的高炉-转炉长流程、废钢短流程及氢基直接还原铁短流程工艺的灵活性差异,电解铝行业依托铝电解槽热惯性形成的不同层次灵活性调节能力,以及水泥行业的生产调度和功率调整。然后,面向基于工业用户生产流程重构的灵活性潜力评估,提出应从物理、经济和碳效益3个维度进行综合考虑。其中,物理维度主要关注多种物质与能量的耦合约束,经济维度主要考虑用户侧调节意愿,碳效益维度则进一步关注碳减排效益对调节边界的影响。随后,围绕基于工业用户生产流程重构的灵活性调控策略,进一步指出需要在短时、中时和长时等不同时间尺度上进行调控策略的协调匹配,并考虑电力市场与碳市场等多种市场机制联动的影响。最后,综合当前研究和产业发展方向,总结工业用户生产流程重构支撑电力系统低碳转型所面临的挑战,并展望未来。

关键词:低碳转型;工业用户;电力系统灵活性;需求侧资源

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)05-0138-15

在全球气候变化与能源安全的双重压力下,加速能源绿色低碳转型已成为国际社会的广泛共识^[1]。中国明确提出“要在2030年前实现碳达峰,并在2060年前实现碳中和”的战略目标,构建以可再生能源为主体的新型电力系统已成为能源转型的核心任务^[2]。截至2025年底,中国可再生能源发电装机占比已达60%^[3]。然而,以风电和光伏为主的可再生能源固有的随机性、波动性和间歇性给电力系统供需平衡带来严峻挑战,电力系统灵活性不足已成为新能源消纳的关键瓶颈^[4-5]。电力系统灵活性是指在一定时间和经济成

本约束下,电力系统对供需两侧有功功率波动进行有效响应和调节的能力^[6-7]。传统以火电为主的调节模式虽能提供灵活性支撑,但其高碳排放属性不利于“双碳”目标实现,亟需开发面向碳减排的多元灵活资源^[8]。然而,电源侧灵活资源受技术、经济与资源禀赋的多重限制,电网侧亦面临输电能力与跨区协调等问题,仅靠电源和电网的资源难以支撑新型电力系统的运行需求^[9-10]。因此,开发需求侧灵活资源,推动“源荷互动”逐步取代“源随荷动”,不仅可以提升系统调节能力,更是实现电力系统低碳运行的重要途径^[11]。

收稿日期:2026-06-03 修回日期:2026-08-12 网络出版日期:2026-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52407075);澳门特别行政区科学技术发展基金项目(0089/2026/RIB1;0050/2025/AIJ);澳门大学讲座教授研究项目(CPG2026-00026-IOTSC)

作者简介:陈庚睿(1998—),男,博士生.研究方向:低碳电力系统优化.E-mail: gengrui.chen@connect.um.edu.mo

* 通信作者:宋永华,教授,E-mail: yhsong@um.edu.mo

<https://jsuese.scu.edu.cn>

从总量看,工业能源消费量约占全社会能源消费总量的三分之二,其碳排放量约占全社会碳排放总量的七成^[12]。工业耗电量大、可调节容量可观,且多数工业企业已具备较为成熟的自动化控制体系,是需求侧灵活资源开发的重点领域^[13]。因此,工业用户已经成为能调节自身功率来为电力系统提供灵活性的综合主体^[14-15]。此外,工业用户灵活性不应仅理解为对电力系统的被动响应,还包括通过生产调度、能源替代及中间产品储运等方式主动参与电力系统调节。在高比例可再生能源接入背景下,工业用户不仅能通过灵活调节自身用电促进可再生能源消纳,以有效缓解电力系统运行压力,还能提升系统运行的经济性和低碳性^[16]。从工业过程看,低碳用电有助于降低工业产品碳足迹,增强其在国际贸易中的竞争力^[17]。因此,工业用户既是支撑电力系统供需平衡的需求侧资源,也是通过重构自身生产流程推动工业生产方式由高碳刚性运行向低碳柔性运行转变的重要主体。在新型电力系统建设背景下,推动工业用户参与电力系统灵活性调节,已成为工业和电力系统协同低碳转型的重要路径。

近年来,中国关于工业用户参与电力系统灵活性调节的相关政策框架持续完善。《电力需求侧管理办法(2023年版)》将需求侧资源界定为可调节负荷、分布式电源和新型储能等可参与调节的电力资源,并提出全面推进需求侧资源参与电力市场和辅助服务市场常态化运行^[18]。《电力负荷管理办法(2023年版)》进一步将工业用户、负荷聚合商和虚拟电厂等纳入新型电力负荷管理系统,为工业用户的聚合、管理和调控提供了制度依据^[19]。更深层的变化发生在考核维度,进入“十五五”时期,中国已从“能耗双控”全面转向“碳排放双控”^[20]。碳排放强度将取代能耗强度成为国民经济和社会发展的约束性指标,调控对象从能源消费总量聚焦至碳排放本身^[21]。在此背景下,工业用户参与电力系统灵活性调节的政策定位已不再局限于传统需求侧管理工具,而是进一步与工业绿色用能和电力系统低碳转型的制度框架相衔接^[22]。

因此,有必要对工业用户生产流程重构支撑电力系统低碳转型的关键技术进行系统综述。基于此,首先,梳理工业用户从消费者到产消者的重构,进一步阐述其支撑低碳电力生产的优势;其次,分析钢铁、电解铝和水泥等典型工业场景的工艺特征与灵活性调节机理;然后,从物理、经济和碳效益3个维度开展基于工业用户生产流程重构的灵活性潜力评估,进一步归纳多时间尺度协同和多市场机制协同下的灵活性调控策略;最后,对当前面临的挑战与未来发展方向

进行讨论,以期工业与电力系统协同低碳转型的相关研究提供一定的思路。

1 工业用户从消费者到产消者重构支撑低碳电力生产

本文所研究的工业用户生产流程重构,是指工业用户在技术层面上改进工艺路线,在运行层面上进行生产批次调度和设备功率调整,从而形成能够支撑电力系统供需平衡和低碳运行的能力。随着现代化产业体系的持续发展,工业用户已经从纯粹的消费者逐步重构为具备电源、负荷和储能等多重属性的主动产消者^[23-24]。具体表现如下:

1)工业用户可以通过配置分布式能源、自备电厂和余热发电等装置,实现由单一用电向多能互补、自给自足的模式转变^[25]。这种自发电能力不仅提升了其内部供能的可靠性,也使其具备与电网进行功率交换及余电上网的产消者特征。

2)工业生产存在大量具备灵活调节潜力的工艺环节^[26],通过对工艺进行精细化建模,工业负荷可表现出柔性调节特性^[27]。作为重要的可调负荷资源,工业用户能够通过调整自身用电行为参与电力系统调节,从而实现生产计划与系统调度的时空协同。

3)工业用户不仅可以通过配置电储能和储热等储能装置实现能量平衡,还可依托物流仓储将能量以中间产品的形式进行储存,从而实现能量在不同时空的转移^[28]。储能装置与中间产品协同使工业用户能够在保障生产的基础上提升灵活性调节能力。

工业负荷是工业用户参与电力系统灵活性调节的主体,对工业负荷进行分类可以更好地厘清不同负荷的调节属性,为参与电力系统灵活性调节提供依据^[29]。图1给出了工业负荷分类。

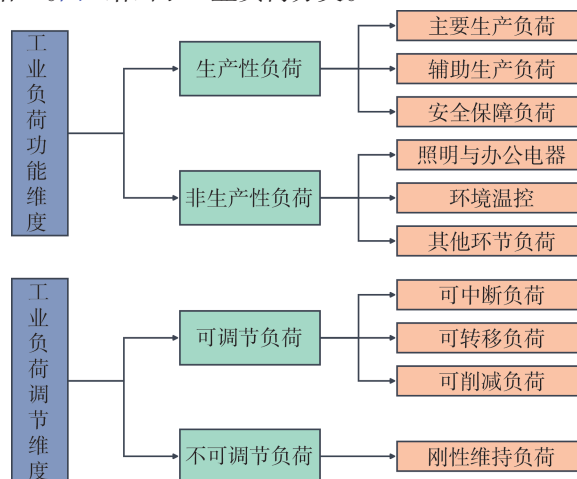


图1 工业负荷的分类

Fig. 1 Classification of industrial loads

如图 1 所示:从功能维度看,工业负荷可分为生产性负荷与非生产性负荷,前者主要保障生产,后者负责照明、温控等生产环境的维持^[30];从调节维度看,工业负荷又可分为可调节负荷与不可调节负荷。其中,可调节负荷进一步分为可中断负荷、可转移负荷与可削减负荷,不可调节负荷则主要指刚性维持负荷^[31]。

自备电厂是工业用户参与电力系统灵活性调节的重要组成部分,其兼具发电与调节属性,在钢铁和化工等行业较为常见,其形式包括热电联产、自备燃煤或燃气机组,以及余热发电等^[32-33]。与单纯工业负荷不同,自备电厂既可以降低工业企业对外购电力的依赖,也可以配合可调负荷实现工厂内部源荷协同

运行^[34]。

储能是承担跨时段灵活性调节功能的重要组成部分^[35],其核心作用在于借助电储能、储热和储氢等技术实现能量的跨时段转移,以增强工业用能体系对供需波动和不确定性的适应能力^[36-37]。

2 工业用户生产流程重构支撑电力系统供需平衡

选择钢铁、电解铝和水泥作为代表性工业场景,系统分析其生产流程重构与灵活性调节机理,以支撑电力系统供需平衡。上述 3 种代表性工业场景灵活性特征比较,如表 1 所示。

表 1 代表性工业场景灵活性特征比较

Tab. 1 Comparison of flexibility characteristics in representative industrial scenarios

工业	主要灵活性来源	主要调节对象	关键工艺约束	主要调节定位
钢铁	副产气发电、生产批次调度、中间产品缓冲	自备电厂、电弧炉、配套制氢与储氢系统	工序连续性、物料平衡、多能流耦合	负荷转移、多能流互补的跨时段调节
电解铝	铝电解槽热惯性	整流侧电压或电流	热平衡、槽温安全	快速频率响应
水泥	生产工序启停、连续功率调节、物料仓储缓冲	磨机、破碎设备、窑料准备设备	熟料烧制连续性、物料平衡、启停约束	负荷削减、连续功率调节

从 3 种代表性行业的共性看,钢铁、电解铝和水泥均属于高耗能、高排放工业,其灵活性本质来源于工业过程对电力输入、物料缓冲和生产时序的可调整空间。3 种代表性行业均可通过生产调度优化和设备功率调整等方式,在一定程度上实现用电行为与电力系统供需平衡的匹配。从差异看,钢铁行业的灵活性更多体现为多工序耦合、生产批次调度、中间产品缓冲和副产气发电之间的协同;电解铝行业主要依托铝电解槽热惯性形成快速响应能力;水泥行业则更多依赖破碎、窑料准备和粉磨等非连续工序的启停调度。由此可见,虽然不同行业都可作为需求侧灵活性资源,但其主要灵活性来源、调节对象、调节定位和工艺约束存在显著差异。

2.1 钢 铁

钢铁是中国碳排放最高的制造行业^[38]。目前,中国粗钢生产仍以高炉-转炉长流程工艺为主^[39]。然而,该工艺高度依赖焦炭、煤粉等碳基还原剂,碳排放刚性较强,难以从源头上满足深度脱碳要求^[40]。因此,以电解水制氢作为还原剂结合电弧炉进行钢铁冶炼的氢基直接还原铁短流程工艺,正成为钢铁行业实现深度脱碳的重要技术方向^[41]。

2.1.1 高炉-转炉长流程工艺生产流程

钢铁行业需求侧灵活性供给主要有直接负荷调节与副产气发电调节两类^[42]。高炉-转炉长流程工艺的灵活性调节能力主要来源于钢厂内部的副产气发电系统^[43]。依托高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气构成

的副产煤气系统,钢厂可通过锅炉与汽轮机组系统以及燃气与蒸汽联合循环等方式形成自备发电能力,并在外部供电波动时通过调节自发电出力实现对电网的间接响应^[25]。与此同时,高炉-转炉长流程工艺也可提供一定的负荷调节能力,但受流程连续性和工序耦合约束,整体调节空间相对有限^[44]。

2.1.2 废钢短流程工艺生产流程

以废钢为主要原料的电弧炉短流程工艺,是钢铁行业提升电气化水平并推进低碳转型的重要技术路径^[45]。与长流程工艺相比,短流程的灵活性优势主要依赖装料、熔炼、精炼与轧钢等环节存在可调度的时序空间,因此,可通过优化生产批次调度实现一定程度的负荷转移^[46]。不过,中国电炉钢占比目前还较低,明显低于欧盟和美国的水平,其进一步发展主要受制于废钢资源保障能力和用电成本竞争力^[47]。

2.1.3 氢基直接还原铁短流程工艺生产流程

氢基直接还原铁(H-DRI)短流程工艺是钢铁深度脱碳的关键技术路径之一^[48]。此工艺是指以氢为主要还原剂,在直接还原环节替代焦炭、煤粉等传统碳基还原剂,将铁矿石在低于熔化温度的条件下直接还原为铁,再经电弧炉熔炼成钢的一种炼钢技术^[49]。

从现有工业实践看,此工艺大致可分为两类:一是,以天然气为主要还原剂的气基竖炉直接还原工艺,实现长期商业化稳定运行^[50],并在此基础上,通过掺氢逐步提高还原剂中的氢气比例,是当前向全氢还原过渡的最成熟技术路径^[51];二是,以电解水制氢(绿

氢)结合竖炉-电弧炉为代表的全流程电气化路线,被普遍认为是实现近零排放炼钢的重要方向^[52]。

经过一系列技术迭代,H-DRI短流程工艺可形成可再生能源、电解水制氢、氢基竖炉及电弧炉的新型能源与物质链条,多能流耦合示意图如图2所示。其核心是将炼铁环节的主要能源和原料由煤焦体系转向电力与氢能体系。从运行机理看,可概括为电-氢-热多能流耦合:电力主要驱动电解制氢与电弧炉冶炼;氢气作为还原剂并可借助储氢单元实现供需解耦;热能则可通过竖炉尾气与电弧炉余热回收实现梯级利用。

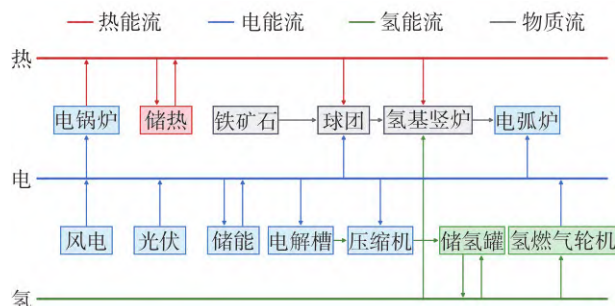


图2 H-DRI短流程工艺多能流耦合示意图

Fig. 2 Schematic of multi-energy flow coupling in the H-DRI short-process

H-DRI短流程工艺的需求侧灵活性主要体现在以下3个层面:

1)电解槽的快速调节能力。电解制氢的质子交换膜电解槽可实现快速变载,因其功率范围动态可调及能适应功率波动,质子交换膜电解槽在消纳可再生能源出力的同时,亦具备参与电网频率调节等辅助服务的潜力^[53]。

2)储氢系统的跨时段解耦能力。储氢系统的引入在技术层面实现了电解槽运行与竖炉供氢之间的时序解耦,形成了H-DRI短流程工艺中制氢、储氢与用氢全链条灵活性协同^[54]。从长时储能角度来看,氢储能凭借其大储存容量和长周期的特性,在长时尺度的能量调节中具有不可替代的优势^[55],是支撑高比例可再生能源电力系统与氢能工业深度耦合的重要技术路径。

3)中间产品储运及生产批次调度的灵活性。直接还原铁及其热压块产品具有一定程度的储运稳定性,有利于在工序层面实现直接还原与电弧炉冶炼的时序解耦^[56],为各生产环节灵活性协同提供关键支撑,从而为生产批次调度提供更大的灵活空间。

H-DRI示范工程的相继推进,初步验证了电氢耦合冶金路径的工程可行性。中国河钢集团120万t氢冶金示范工程一期于2022年12月建成投运,采用全球

首创的“焦炉煤气零重整竖炉直接还原”工艺,是目前工业化生产中含氢比例最高的气基竖炉直接还原工艺^[57]。据测算,该工程一期每年可减少二氧化碳排放80万t,减排比例达70%以上。国内首条百万吨级近零碳排放钢铁产线于2025年12月全线贯通,依托中国宝武首创的氢冶金电熔炼工艺技术路径,形成了氢基竖炉还原、高效电弧炉冶炼与低碳轧制生产的完整工艺流程,每年最高可减碳超314万t^[58]。

2.2 电解铝

电解铝属于典型的高载能工业,高度依赖电力供应。其核心生产路线为霍尔-埃鲁工艺,即在约1 000℃左右的熔融冰晶石电解质中溶解氧化铝,并通过电解获得液态铝^[59]。电解铝既是高耗电负荷,也是具有较高调节潜力的重要需求侧资源,可通过参与削峰填谷和调频助力电力系统安全稳定运行^[60-61]。此外,随着该产业向风光水资源富集地区转移,企业利用可再生能源替代部分自备火电具备现实基础^[62]。

电解铝的灵活性来源于铝电解槽在热平衡约束下所呈现的“虚拟储能”特征^[63]。电解槽内高温熔盐和铝液具有较强热惯性,短时功率扰动通常可由系统热容缓冲,而不会立即转化为显著温度偏移^[64]。因此,在不破坏电解槽热平衡和关键工艺的前提下,电解槽可在一定范围内实现灵活性调节。

电解铝灵活性调节可概括为快速频率响应、浅层调节和深层调节3类,具体如下。

1)快速频率响应。主要依靠调节整流侧电压或电流实现,响应时间可达亚秒级至秒级,可用于一次调频等快速辅助服务^[65]。

2)浅层调节。通常通过整流侧调压来改变直流电流实现,研究表明,现有工程多将实际调节深度控制在±25%以内,以兼顾调节能力与槽体热平衡约束^[66]。

3)深层调节。此类操作通常涉及降载或停槽,但需要严格满足时间约束。若降载或停槽持续过久,槽温下降容易导致电解质冻结并诱发冷槽现象,严重时将造成停产损失,因此,其工程应用仍受到较强的工艺约束^[67]。

电解铝工业的碳排放受电力因素影响较大,电力间接碳排放是其碳足迹的核心来源^[68]。中国电解铝生产仍以煤电供电为主,碳排放强度显著高于可再生能源占比较高的冶炼体系^[69]。随着电解铝产业持续向清洁电力资源更丰富地区布局,供电结构低碳化与相关技术进一步发展会共同构成其参与电力系统灵活性调节的资源基础。中国云南电网依托当地丰富的水电资源集中布局电解铝产业,成为电解铝参与调峰及辅助服务市场建设的重要应用场景^[70]。

2.3 水 泥

水泥是高耗能、高排放的代表性工业,可以通过参与电力系统灵活性调节支撑电力系统供需平衡。水泥行业的碳排放主要由碳酸盐原料在熟料煅烧阶段产生的直接排放、化石燃料燃烧产生的直接排放及用电间接碳排放共同构成^[71]。

从工艺组织看,水泥生产沿破碎、窑料准备、熟料生产、粉磨 4 个环节开展,电力消耗集中于粉磨类工序^[72]。其中,破碎与窑料准备承担原料处理与入窑前预制功能,工序前后通常配置料仓或中间仓库,物料缓冲使设备启停具备较大的时间裕度,是水泥厂灵活性供给的重要来源之一^[73]。粉磨虽同样具备可中断和可转移属性,但当物料储存和产能条件受限时,其可调空间会相应变小。熟料生产则依托预热器与回转窑连续运行,温度与窑内工况一旦扰动便难以快速恢复,因此,一般不作为灵活性调节对象^[74]。从现有工艺特征和调节方式看,水泥厂参与电力系统灵活性调节可概括为两类:一类是设备的启停调度,依据系统运行状况对破碎、窑料准备和粉磨设备进行启停,可以实现用电负荷中断或转移;另一类是基于变频驱动和过程控制的连续功率调节,即在维持工序运行的同时,对部分磨机及其辅助设备的功率进行平滑调整。

水泥行业实现深度降碳必须从直接和间接排放两条路径协同推进。针对碳酸盐原料在熟料煅烧阶段的直接排放,重点推进原料替代与低碳熟料体系的构建;针对化石燃料燃烧阶段的直接排放,则以替代燃料、低碳燃料及提升烧成系统能效为核心,辅以碳捕集、利用与封存实现深度减排;对于用电间接排放,主要通过绿色电力替代、余热回收利用及用电能效提升,降低外购能源整体对应的碳排放。

3 基于工业用户生产流程重构的灵活性潜力评估

现有灵活性潜力评估研究通常要区分理论潜力、技术潜力、经济潜力和可实现潜力。对工业用户而言,若仅以额定容量与最小出力之差估算响应潜力,通常只能反映理论上界。但若评估仍停留于物理可调容量估算,往往难以表征工业用户的实际调节价值。一方面,物理容量并不等同于实际可调用容量,用户参与意愿、生产组织方式和执行能力都会影响灵活性调节;另一方面,传统评估多聚焦功率调节能力本身,对负荷调节的碳效益关注不足,难以判断调节行为是否真正有利于系统减排。据此,工业用户灵活性潜力评估可概括为 3 个递进问题:物理维度是否可调,经济维度是否有用户参与,以及是否有碳效益维度的价值。

需要指出的是,现有的工业用户灵活性潜力评估研究虽然已分别从物理约束、经济激励和碳减排效益等维度开展了大量探索,但不同维度之间仍存在一定割裂。物理建模通常侧重于刻画设备的可调容量,经济建模更多关注用户参与调节的成本收益,碳效益评估则强调调节行为对系统减排的贡献。若三者缺乏统一的约束关系,容易出现“物理上可调,经济上不可行”或“设备可以响应,但是碳减排效益不足”的评估偏差。因此,工业用户灵活性潜力评估需要从单一可调容量估算,进一步转向物理可调性、经济可行性和碳减排有效性的协同评估。

3.1 灵活性潜力评估体系

工业用户的灵活性潜力评估可以从物理、经济和碳效益 3 个维度开展,具体如下:

1) 物理维度主要反映资源对电力系统调节需求的适配性,核心指标包括可调容量、爬坡速率和持续时间。这些指标直接影响资源可参与的调节场景,如快速辅助服务更强调响应速度,调峰与移峰则更依赖持续时间和调节深度^[75]。

2) 经济维度主要反映用户侧参与调节的成本边界,可采用单位调节成本或边际调节成本进行表征。在工业场景下,调节成本不仅受电价影响,还与生产计划、产品质量等因素有关^[76]。因此,若忽略上述间接影响,经济潜力往往会被高估。在实际应用中,调节成本通常随调节深度增加而上升,因此,激励机制的设计需要与用户成本边界相匹配^[77]。

3) 碳效益维度主要刻画工业用户参与电力系统灵活性调节的碳减排价值。该维度可重点关注单位调节量碳减排收益和边际减排成本等指标,用于表征灵活性调节的碳减排收益以及对系统边际碳排放的影响^[78]。

工业用户灵活性评估框架应至少包含物理可调性、经济可行性、碳减排有效性 3 个层面。其中:物理可调性主要用于刻画可调容量、持续时间和工艺安全边界等;经济可行性主要用于刻画调节成本、机会成本和用户参与意愿等;碳减排有效性主要用于量化调节行为对于电力系统和工业产品的碳减排效益。此外,在高比例可再生能源接入背景下,工业用户灵活性调节不再只是对确定性指令的执行,而是需要面向可再生能源出力、电力市场价格、碳市场价格和工业产品供需关系等多元不确定性进行适应性决策。从不确定性来源看,风电和光伏出力的不确定性会改变系统调峰、调频和消纳需求;电力市场价格和碳价波动会影响工业用户参与调节的经济收益;订单需求、设备状态和物料供应波动则会改变工业用户的参与意愿。因此,工业用户灵活性评估应从传统静态确定性评估进

一步拓展为面向多元不确定性的动态评估。

3.2 考虑工业用户物理约束的灵活性

物理建模的核心任务是判定工业用户在工艺约束下是否具备可行的调节空间。工业生产过程并非单一的电力消耗过程,而是电、热、物料等多种能源及物质相互耦合的综合转化过程^[79]。现有研究通常将物质与能量纳入一个整体框架,比如,王海博^[28]、Zhang^[80]等将资源任务网方法用于钢铁等多工艺环节耦合的建模,以刻画生产与能耗约束之间的时序耦合关系,并且,其求解通常可归纳为混合整数规划问题。在此基础上,物理建模的关键输出是工业用户的可行调节域,指在生产与能耗约束下,功率可以取值的集合^[81]。经过线性化等数学转化,该集合通常可表述为多面体形式。其边界一般由设备出力上下限、爬坡速率、启停条件及生产与能耗约束等共同决定。约束刻画越完整,所得可行调节域越保守,也越接近工业过程的真实可调边界。以氢基直接还原铁炼钢为例,电解槽的运行区间、原料与还原剂的用量、电弧炉的批次调度,以及各环节产品的库存等都会共同塑造系统层面的调节边界^[82]。多重约束叠加后,系统层面的可行调节域通常不同于单体装置调节能力的简单叠加,这正是物质与能量耦合的物理建模在工业用户灵活性评估中的核心价值。

在物理建模方面,现有研究常将工业过程简化为单工序、单体设备或单一能量约束,能够较清晰地刻画设备的功率边界,但对多工序联合、物料平衡约束和安全运行边界的刻画仍不充分。尤其在钢铁、化工等流程工业中,单体设备的可调能力并不等同于全流程可调能力,若忽略上下游工序耦合和物料平衡约束,可能高估工业用户向电力系统提供的实际灵活性。

3.3 考虑工业用户经济效益的灵活性

真实的可行调节域还会受到用户侧意愿的影响,用户并非被动执行调节指令,而是在调节收益与成本之间进行权衡。对工业用户而言,调节成本不仅包括用电成本,还包括生产计划偏移、产品质量风险、控制与通信等成本^[83]。

因此,经济维度建模需要考虑将用户侧意愿表示为考虑调节收益与成本的综合函数^[84]。若调节方案无法带来正向收益,则即使该方案满足物理约束,也不应高估其实际可用潜力。具体而言,用户侧综合调节成本可表示为由直接成本、生产调节成本、风险成本和管理与技术成本构成的函数^[85]。其中:直接成本反映用电和其他能源的费用;生产调节成本反映因生产计划调整造成的生产收益损失;风险成本反映产品质量波动和违约惩罚带来的潜在损失;管理与技术成

本反映为实现调节所发生的通信、计量、验证和管理费用。由于工业用户通常会优先调节低成本、低扰动的柔性环节,调节成本一般随调节深度、持续时间和调节频次增加而上升。在数据获取层面,反映用户侧意愿的关键参数可由历史调节行为记录、合同申报容量、负荷基线偏差、履约率及问卷访谈等手段共同校准^[86]。因此,采用分段线性成本函数、边际成本曲线或报价曲线刻画用户侧意愿,比采用固定的单位调节成本更能准确反映工业用户的实际经济边界。

在经济激励方面,现有研究多采用固定单位调节成本、分段成本函数或报价曲线表征用户侧意愿,但工业用户的真实决策还受到生产计划偏移、产品质量风险、合同履约惩罚、设备损耗,以及市场价格波动等因素影响。若仅从峰谷电价差或政策补贴收益角度评价调节行为,难以准确反映工业用户在实际生产中的机会成本和风险偏好。

3.4 考虑工业用户碳效益的灵活性

随着减排需求日益增长,工业用户灵活性评估不仅要关注可调性,还需要考虑调节方案的碳效益。这意味着,在考虑碳约束的框架中,部分在电力约束下可行的调节方案可能因碳排放过高而失去可行性。从技术上看,增加碳约束相当于对原有可行调节域的进一步收缩^[87]。

成功量化碳效益是提升工业用户参与电力碳减排的前提。周天睿等^[88]提出的电力碳排放流理论为评估需求侧资源的实际减排效益提供了关键依据。基于此,边际节点碳势和动态碳责任因子等研究进一步提升了需求侧资源碳效益核算的时空分辨率^[89-90]。因此实际运行中,同等规模的工业用户在不同时段及不同供电结构下的碳减排效益并不相同。

在碳效益评估方面,现有研究常采用电力碳排放因子等估算调节行为的减排效果,但在高比例新能源接入和电碳市场耦合加深的背景下,电力系统碳减排需要进一步考虑边际机组出力变化、绿电消纳边界及碳排放责任归属等因素。因此,后续研究需要进一步将边际碳排放、绿电交易、碳市场履约和产品碳足迹核算纳入统一框架。

总体而言,工业用户参与电力系统灵活性调节潜力评估正在由静态转向动态评估,由单一电力视角转向电碳协同视角,并由单一物理建模转向信息物理数据融合建模。

4 基于工业用户生产流程重构的灵活性调控策略

传统工业调控以保障生产安全与工艺稳定为首

要目标,而电力系统调控则更注重系统可调性与响应能力,二者在调控目标和边界上存在差异。随着新型电力系统建设的推进,工业用户参与电力系统灵活性调节,已成为多时间尺度协同调控及多市场机制协同调控共同作用的结果。

4.1 多时间尺度协同的调控策略

电力系统灵活性需求具有明显的多时间尺度特征,不同尺度下系统调控目标、响应机制及工业场景均存在明显差异。因此,工业用户调控策略需要与不同的时间尺度协调匹配。现有研究可概括为短时、中时和长时尺度3类研究^[29]。多时间尺度下工业用户参与电力系统灵活性调节示意图,如图3所示。

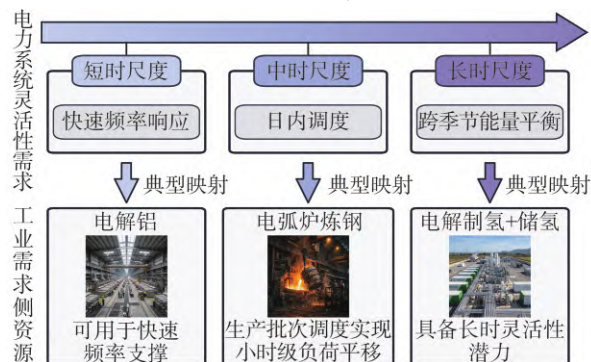


图3 多时间尺度下工业用户参与电力系统灵活性调节示意图

Fig. 3 Schematic of industrial users in power system flexibility regulation across multiple timescales

由图3可知:短时尺度主要面向快速频率响应,在高比例新能源接入削弱系统转动惯量的背景下,该尺度对调控速度提出较高要求^[91]。电解铝是短时尺度的典型应用场景之一,由于铝电解槽具有较强热惯性,槽电压可在秒级时间范围内灵活调节,且不会引起槽体热状态的明显波动,因此,具备参与一次调频的技术基础。中时尺度主要对应日内调度,侧重于通过负荷时序调整实现削峰填谷和供需再匹配^[92]。电弧炉炼钢具有多批次生产特征,可通过调整运行时段实现负荷平移,因此,适用于中时尺度调控场景。长时尺度则主要服务于跨季节能量平衡,通常需要依赖长时储能手段支撑系统灵活性调节^[93]。相较于受自放电损耗和经济性约束的电化学储能,电解制氢结合储氢系统可通过电氢转化或电氢化工转化实现跨季节能量平衡,因此,在长时灵活性供给方面更具优势。需要说明的是,图3中的对应关系为代表性归纳,不同资源的实际调控仍受工艺约束、控制策略及系统运行的影响。此外,同一种工业用户参与的调节也可能横跨多个时间尺度,需要根据实际情况调整调控策略。然而,多时间尺度协同调控并不仅仅是确定性的电力供需平衡问题,其实际效果还受到可再生能源出力、各市场价格、工业产品供需关系等多元不确定因素

的共同影响。从建模方法看,现有的优化方法可助力解决这些问题。例如:随机优化可以通过概率分布刻画新能源出力和市场价格的不确定性,并在期望收益或风险约束下形成各部分调度决策^[94]。鲁棒优化则适用于概率分布难以准确获取的场景,可通过构造不确定集来计算工业用户在最恶劣场景下的调度决策^[95]。分布鲁棒优化可在有限历史样本条件下兼顾概率分布和决策保守程度^[96]。滚动优化则可根据可再生能源预测和生产状态等数据实时更新,不断修正各部分的调度策略^[97]。上述方法为工业用户适应不确定性提供了建模基础。

4.2 多市场机制协同的调控策略

工业用户的调节价值,最终需要通过各类市场机制转化为可持续的经济收益。工业用户作为产消者参与多市场机制协同调控时,其决策目标并非单一用电成本最小化,而是在用能成本、调节收益和市场履约风险之间进行综合权衡。工业用户参与不同市场的典型行为与主要风险,如表2所示。

表2 工业用户参与不同市场的典型行为与主要风险

Tab. 2 Typical behaviors and main risks of industrial users participating in different markets

市场类型	典型行为	主要风险
电力市场	分时购电、需求响应、电力辅助服务	电价波动、生产计划扰动
绿电与绿证交易市场	绿电交易、绿证购买、分布式新能源配置	绿电及绿证价格波动、绿色属性重复计算
碳市场	碳配额管理、低碳生产排程	碳价波动、碳核算偏差

在电力市场中,工业用户可通过参与需求响应或电力辅助服务获取收益。在碳市场中,工业用户则需要结合碳配额、碳市场价格和减排成本确定生产计划与用能结构。在绿电交易和绿证交易中,工业用户需要通过绿电消费或绿证购买来降低产品碳足迹并满足绿色用能要求。多市场信号共同作用,使工业用户的灵活性调控从单一的用电成本优化转变为电力、碳排放和产品价值协同优化。随着电力市场和碳市场等逐步发展,工业用户的用能决策不再局限于电力价格,而是逐步成为多市场信号共同作用下的综合决策。围绕此场景,现有研究尝试从多市场联合角度刻画工业用户的调控价值。张思源等^[98]针对工业用户承担可再生能源消纳责任与提升运营收益之间的矛盾,提出了一种工业用户参与电力、绿电和碳市场的联合决策模型,使工业用户能够在多市场协同场景下兼顾绿电消纳责任和经济收益。工业用户不仅要考虑多市场机制联动的影响,还需要考虑多能源耦合等客观存在的技术问题。巴金宇等^[99]针对工业园区多能源耦合复杂的物理机制及减碳效益不足的问题,引入绿电和碳交易联动机制,面向电能、

热能和氢能混合使用的工业园区构建低碳经济运行模型,实现了多能源协同利用及绿电和碳交易的收益提升。此类研究表明,合理参与绿电、碳交易,不仅可以发挥工业用户参与调控的优势,还可以兼顾工业园区的运营收益和减排效益。

从机制设计角度看,工业用户参与电力系统灵活性调节价值的实现需要解决市场准入、收益分配和风险分担等问题。对于单体工业用户,需明确其可调容量、响应速度和持续时间能否满足市场准入要求。对于通过负荷聚合商或虚拟电厂参与市场的工业用户,还需进一步明确聚合边界、收益分配、违约责任承担和碳减排价值归属。只有明确各市场收益与风险,工业用户参与电力系统灵活性调节才能形成可持续的经济驱动。

5 结论与展望

在“双碳”目标和新型电力系统建设持续推进的背景下,高比例可再生能源并网带来的不确定性使电力系统对需求侧灵活性资源的依赖显著增强。工业用户作为高耗能、高排放且具备较强调节潜力的主体,正在由传统单一的负荷逐步转变为兼具电源、负荷和储能等多种属性的综合主体。推动工业用户参与电力系统灵活性调节,是促进电力系统与工业协同低碳转型的重要路径。本文对工业用户生产流程重构支撑电力系统低碳转型的关键技术进行了系统综述。首先,围绕工业用户由消费者向产消者重构这一视角,对其基本内涵进行了概括。其次,以钢铁、电解铝和水泥作为典型工业场景,分析了不同工业用户的特征与调节机理。然后,考虑工业过程中的物质与能量耦合、用户侧意愿及碳减排约束,分别从物理、经济和碳效益维度评估了工业用户参与灵活性调节的潜力。进一步结合多时间尺度协同和多市场机制协同的要求,归纳了主要的调控策略。最后,梳理了当前需要考虑的关键问题,并对未来研究方向进行了展望,以期为后续研究提供借鉴。

尽管工业用户参与电力系统灵活性调节有诸多优点,但面向未来仍需围绕以下关键科学技术问题开展深入研究:

1)工业用户生产流程重构涉及多种物质和能量的复杂耦合关系,未来需要突破单一电力负荷建模范式,建立能够同时刻画物质流、能量流及工业生产约束的统一模型,以揭示工业生产流程重构对电力系统低碳运行的作用机理。

2)用户侧调节行为受生产计划、工艺安全、设备状态和市场价格等因素共同影响,实际的灵活性调节

能力具有较大的不确定性和波动性。未来需要在考虑多元不确定性的基础上进一步研究基于工业用户生产流程重构的灵活性潜力评估方法和调控策略。

3)人工智能大模型的应用仍有较大的拓展空间,未来需进一步研究其与工业和电力调控的深度融合,可围绕工业负荷预测、工业生产调度及工业过程异常识别等方向开展研究,形成兼具预测、决策与优化能力的一体化调控体系,以支撑工业用户更高效地参与电力系统灵活性调节。

4)工业用户减碳效益与国内外市场机制尚未完全衔接,未来需要建立可信的工业用能碳排放与产品碳足迹核算体系,并进一步明确负荷聚合商、虚拟电厂等市场主体的准入边界和收益分配机制,从而实现工业用户参与电力系统灵活性调节的规模化、常态化和市场化运行。

参考文献:

- [1] Hu Bo, Xie Kaigui, Shao Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: Characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15. [胡博, 谢开贵, 邵常政, 等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 1-15.]
- [2] Li Zheng, Li Weiqi, Zhang Zhongwei, et al. Development strategy of flexible resources in China's power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 108-120. [李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 108-120.]
- [3] 国家能源局. 2025年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. (2026-02-12) [2026-04-20]. <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>.
- [4] Li Bo, Chen Minyou, Zhong Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580. [黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580.]
- [5] Yao Lingxiang, Wang Yang, Xiao Xianrong, et al. Dynamic modelling of concentrated solar power plant and hierarchical control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5512-5524. [姚凌霄, 王杨, 肖先勇, 等. 光热电站动态建模与递阶控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5512-5524.]
- [6] Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19. [鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡

- 机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.]
- [7] Impram S, Nese S V, Oral B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 31: 100539.
- [8] Shu Yinbiao, Zhang Zhengling, Tang Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(21): 8327-8340. [舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8340.]
- [9] Zhang Shu, Chen Wenyi. Exploring the feasible net-zero transition pathway in China considering energy system flexibility[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 5440.
- [10] Ma Yinghao, Liu Chen, Xie Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(14): 5429-5440. [马英浩, 刘琛, 谢开贵, 等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5429-5440.]
- [11] Huang Xueliang, Liu Yongdong, Shen Fei, et al. Vehicle to grid: Review and prospect[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(7): 3-23. [黄学良, 刘永东, 沈斐, 等. 电动汽车与电网互动: 综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 3-23.]
- [12] 刘志强. 更高水平更高质量做好节能降碳工作(政策解读)[N]. 人民日报, 2026-04-26(2).
- [13] Cui Hongbo, Zhou Kaile. Industrial power load scheduling considering demand response[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204: 447-460.
- [14] International energy agency. Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach[R]. Paris: IEA, 2023.
- [15] Wu Linlin, Chen Can, Hu Junjie, et al. User side resource application and key technologies for flexibility demand of renewable energy power system[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(4): 1435-1444. [吴林林, 陈璨, 胡俊杰, 等. 支撑新能源电力系统灵活性需求的用户侧资源应用与关键技术[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1435-1444.]
- [16] Fan Yuhui, Jiang Tingyu, Huang Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(1): 41-49. [范宇辉, 姜婷玉, 黄奇峰, 等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 41-49.]
- [17] Lin Boqiang, Zhao Hengsong. Green electricity system dynamics under the carbon border adjustment mechanism[J]. *Renewable Energy*, 2026, 256: 124069.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委等部门关于印发《电力需求侧管理办法(2023年版)》的通知[EB/OL]. (2023-09-27)[2026-04-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360902.html.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《电力负荷管理办法(2023年版)》的通知[EB/OL]. (2023-09-27)[2026-04-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360904.html.
- [20] Li Dongdong, Shang Chenxuan, Huang Qingzi, et al. Carbon emission permit trading mechanism with emission cap and intensity dual regulations under “dual carbon” goal[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2026, 40(2): 209-219. [李冬冬, 商辰宣, 黄清子, 等. “双碳”目标下基于总量与强度双控的碳排放权市场交易机制研究[J]. 管理工程学报, 2026, 40(2): 209-219.]
- [21] Tang Fang, Dai Hongcai, Zhang Ning, et al. Effect analysis and promotion path design for transformation from energy consumption “dual control” to carbon “dual control”[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 255-261. [汤芳, 代红才, 张宁, 等. 能耗双控向碳排放双控转变影响分析及推进路径设计[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 255-261.]
- [22] 中华人民共和国工业和信息化部. 五部门关于印发《工业绿色微电网建设与应用指南(2026—2030年)》的通知[EB/OL]. (2026-01-09)[2026-07-24]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2026/art_44c5364d80b748c4b797bc115388c6aa.html.
- [23] Fleschutz M, Bohlayer M, Braun M, et al. From prosumer to flexuser: Case study on the value of flexibility in decarbonizing the multi-energy system of a manufacturing company[J]. *Applied Energy*, 2023, 347: 121430.
- [24] Li Jiarong, Lin Jin, Wang Jianxiao, et al. Redesigning electrification of China's ammonia and methanol industry to balance decarbonization with power system security[J]. *Nature Energy*, 2025, 10(6): 762-773.
- [25] Gu Pengfei, Sun Hongbin, Xue Yixun, et al. Collaborative optimization method of energy and material flows in iron and steel park considering gas scheduling[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(9): 32-40. [谷鹏飞, 孙宏斌, 薛屹洵, 等. 考虑煤气调度的钢铁园区能量流-物质流协同优化方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 32-40.]
- [26] Heffron R, Körner M F, Wagner J, et al. Industrial demand-side flexibility: A key element of a just energy transition and industrial development[J]. *Applied Energy*, 2020, 269: 115026.
- [27] Wu Yuhang, Yang Ping, Sun Tao. A hybrid data-driven and physics-based method for industrial load modeling and aggregated flexibility evaluation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 173: 111424.
- [28] Wang Haibo, Zhang Li. Supply-demand interactive scheduling model considering short production process of steel enterprises[J]. *Automation of Electric Power Systems*,

- 2021,45(15):64-76.[王海博,张利.计及短流程钢铁企业生产过程的供需互动调度模型[J].电力系统自动化,2021,45(15):64-76.]
- [29] Jia Hongjie,Han Yide,Xu Xiandong,et al.Development trends and technical challenges of flexible interaction of energy-intensive industrial users under goals of carbon emission peak and carbon neutrality[J].Automation of Electric Power Systems,2026,50(2):1-17.[贾宏杰,韩一德,徐宪东,等.双碳目标下高载能工业用户灵活互动发展趋势与技术挑战[J].电力系统自动化,2026,50(2):1-17.]
- [30] Cheng Yuan,Rao Yao,Ding Sheng.Potential analysis of power demand side adjustable load in industrial field[J].Energy Engineering,2023,43(1):72-78.[程元,饶尧,丁胜.工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析[J].能源工程,2023,43(1):72-78.]
- [31] 刘子屹,谢俊,刘雨菁,等.电力需求侧灵活性系列:工业灵活性潜力及发展现状[R/OL].(2023-12-25)[2026-07-29].<https://rmi.org.cn/insights/industrial-dsf/>.
- [32] Wang Qiujie,Qi Hao,Tan Hong,et al.Low-carbon scheduling of CHP virtual power plant considering carbon market risk[J].Electric Power Automation Equipment,2024,44(10):8-15.[王秋杰,亓浩,谭洪,等.考虑碳市场风险的热电联产虚拟电厂低碳调度[J].电力自动化设备,2024,44(10):8-15.]
- [33] Cui Yang,Sun Xibin,Cheng Dingran,et al.Stochastic low-carbon scheduling of integrated energy virtual power plant considering “coal-fired+” coupling power generation and the coupling of electricity-carbon-hydrogen-chemical[J].Power System Technology,2025,49(6):2388-2397.[崔杨,孙喜斌,程丁然,等.考虑“燃煤+”耦合发电与电-碳-氢-化工耦合的综合能源虚拟电厂随机低碳调度[J].电网技术,2025,49(6):2388-2397.]
- [34] Le Shengtong,Zhang Yachao,Zhu Shu,et al.Collaborative optimization of configuration-operation for coal-fired power plants with carbon capture considering low-carbon demand response[J].Electric Power Automation Equipment,2024,44(7):278-286.[乐生铜,张亚超,朱蜀,等.考虑低碳需求响应的碳捕集燃煤电厂配置-运行协同优化[J].电力自动化设备,2024,44(7):278-286.]
- [35] Xu Minxing,Miao Shihong,Li Gang,et al.Day-ahead and intra-day optimal scheduling of power system considering multiple energy storage participating in spot market[J].Automation of Electric Power Systems,2025,49(24):51-62.[许敏兴,苗世洪,励刚,等.考虑多元储能参与现货市场的电力系统日前-日内优化调度[J].电力系统自动化,2025,49(24):51-62.]
- [36] Liu Tianyang,Shu Yinbiao,Bi Tianshu,et al.Configuration optimization method of hybrid energy storage for desert-Gobi-wasteland renewable energy bases considering retrofit of molten salt heat storage coupled with thermal power units[J].Proceedings of the CSEE,2026,46(2):478-492.[刘天阳,舒印彪,毕天姝,等.考虑熔盐储热耦合火电机组改造的沙戈荒新能源基地混合储能优化配置方法[J].中国电机工程学报,2026,46(2):478-492.]
- [37] Fan Wenxuan,Yuan Zhi,Wang Weiqing,et al.Comprehensive evaluation system and double-layer optimization method of green hydrogen energy storage system[J].Electric Power Automation Equipment,2025,45(4):19-27.[范文轩,袁至,王维庆,等.绿氢储能系统综合评价体系和双层优化方法[J].电力自动化设备,2025,45(4):19-27.]
- [38] Tan Quanyin,Liu Fei,Li Jinhui.An integrated analysis on the synergistic reduction of carbon and pollution emissions from China’s iron and steel industry[J].Engineering,2024,40(9):111-121.
- [39] Wu Xinyi,Meng Jing,Liang Xi,et al.Technological pathways for cost-effective steel decarbonization[J].Nature,2025,647(8088):93-101.
- [40] Zhang Rufeng,Yuan Rui,Chen Houhe,et al.Multi-market transaction method for intergrated energy system of steel industrial park considering multiple flow coupling[J].Automation of Electric Power Systems,2025,49(21):85-97.[张儒峰,袁瑞,陈厚合,等.考虑多流耦合的钢铁园区综合能源系统多元市场交易方法[J].电力系统自动化,2025,49(21):85-97.]
- [41] Wang Yihan,Chen Chen,Tao Yuan,et al.Uneven renewable energy supply constrains the decarbonization effects of excessively deployed hydrogen-based DRI technology[J].Nature Communications,2025,16:4916.
- [42] Boldrini A,Koolen D,Crijns-Graus W,et al.Flexibility options in a decarbonising iron and steel industry[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2024,189(Part B):113988.
- [43] Ye Xingjie,Xu Yonghai,Huang Zitong,et al.Iron and steel enterprises participating in power system scheduling and wind power consumption[J].Electric Power Automation Equipment,2023,43(8):112-118.[叶兴杰,徐永海,黄子桐,等.钢铁企业参与电力系统调度及风电消纳[J].电力自动化设备,2023,43(8):112-118.]
- [44] Zhang Pengcheng,Xu Jian,Sun Yuanzhang,et al.Low-carbon development mode for energy system of iron and steel park driven by hydrogen energy[J].Automation of Electric Power Systems,2022,46(13):10-20.[张鹏成,徐箭,孙元章,等.氢能驱动下钢铁园区能源系统低碳发展模式[J].电力系统自动化,2022,46(13):10-20.]
- [45] Lin Zewei,Cai Chen,Zhang Yumeng,et al.Coordinating interprovincial scrap supply for technology transition to minimize carbon emissions of China’s iron and steel industry[J].Environmental Science & Technology,2025,59(12):6004-6015.
- [46] Zhang Yi,Sun Shouquan,Liao Siyang,et al.A mechanism-

- data hybrid-driven power model for short-process steel production[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(18): 7098–7109.[张逸,孙守铨,廖思阳,等.基于机理数据混合驱动的钢铁企业生产短流程功率模型[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(18): 7098–7109.]
- [47] Liu Xianmei, Liu Yuxiang, Bai Caiquan, et al. Pathways for decarbonizing China's iron and steel industry using cost-effective mitigation technologies: An integrated analysis with top-down and bottom-up models[J]. *Renewable Energy*, 2024, 237: 121506.
- [48] Si Fangyuan, Duan Yuge, Sheng Kangling, et al. Fundamental problems and research framework for optimization of integrated energy system for green hydrogen metallurgy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(16): 6203–6222.[司方远,段玉戈,盛康玲,等.绿氢冶金综合能源系统优化:关键问题与研究框架[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(16): 6203–6222.]
- [49] Wang R R, Zhao Y Q, Babich A, et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129797.
- [50] Qiu Ziyang, Yue Qiang, Yan Tianyi, et al. Gas utilization optimization and exergy analysis of hydrogen metallurgical shaft furnace[J]. *Energy*, 2023, 263: 125847.
- [51] Li Zhaoyang, Qi Zheng, Zhang Lechen, et al. Numerical simulation of H₂-intensive shaft furnace direct reduction process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 409: 137059.
- [52] Li Jianlin, Liu Wenbo, Liang Zhonghao, et al. Analysis of global typical hydrogen energy demonstration projects under background of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2026, 46(2): 1–11.[李建林,刘文博,梁忠豪,等.“双碳”背景下全球典型氢能示范工程分析[J]. *电力自动化设备*, 2026, 46(2): 1–11.]
- [53] Ye Yurun, Fang Jiakun, Ai Xiaomeng, et al. Dynamic modeling of PEM Electrolyzers for power system frequency control with power HIL validation[J]. *Applied Energy*, 2026, 413: 127504.
- [54] Li Zhiwei, Zhao Yuze, Wu Pei, et al. Low-carbon dispatching strategy of integrated energy system with coordination of green hydrogen and blue hydrogen based on fine modeling of hydrogen production equipment[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2317–2326.[李志伟,赵雨泽,吴培,等.基于制氢设备精细建模的综合能源系统绿氢蓝氢协调低碳优化策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2317–2326.]
- [55] He Huajin, Ren Zhouyang, Gao Yuge. Power system scheduling method considering characteristics of green hydrogen to chemical virtual energy pools[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(11): 161–169.[何华锦,任洲洋,高宇歌.计及绿氢化工虚拟能量池特性的电力系统调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(11): 161–169.]
- [56] Kieush L, Lesiak S, Rieger J, et al. Reoxidation behavior of the direct reduced iron and hot briquetted iron during handling and their integration into electric arc furnace steel-making: A review[J]. *Metals*, 2024, 14(8): 873.
- [57] 河北省国资委. 河钢集团 120 万吨氢冶金示范工程一期全线贯通[EB/OL]. (2022–12–22)[2026–04–20]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588129/c26776681/content.html>.
- [58] 中国宝武钢铁集团有限公司. 国内首条百万吨级近零碳钢铁产线全线贯通[EB/OL]. (2026–01–05)[2026–04–20]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c35176124/content.html>.
- [59] Lu Xin, Zhang Zhengyang, Hiraki T, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap[J]. *Nature*, 2022, 606(7914): 511–515.
- [60] Zhang Rufeng, Pang Songyuan, Fu Linbo, et al. Low-carbon optimal operation of flexible distribution network with electrolytic aluminum industrial park[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2026, 46(4): 165–174.[张儒峰,庞淦元,付麟博,等.含电解铝工业园区的柔性配电网低碳优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2026, 46(4): 165–174.]
- [61] Nie Shihao, Huang Run, Chen Lei, et al. Adaptive control of primary frequency regulation for electrolytic aluminum load considering energy recovery[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(17): 37–45.[聂世豪,黄润,陈磊,等.考虑能量恢复的电解铝负荷一次调频自适应控制[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(17): 37–45.]
- [62] Tang Chao, Geng Yong, Rui Xue, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors for GHG emissions of aluminum industry in China[J]. *Frontiers in Energy*, 2023, 17(2): 294–305.
- [63] Yue Xiaoyu, Liao Siyang, Fu Lijun, et al. Hierarchical optimization strategy of high-penetration wind power system considering electrolytic aluminum energy-intensive load regulation and deep peak shaving of thermal power[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(8): 3186–3196.[岳晓宇,廖思阳,付立军,等.计及电解铝高耗能负荷调控和火电深调的高比例风电系统分层优化策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3186–3196.]
- [64] Zhao Qinghua, Zhang Shu, Zhou Yongjun, et al. Method for accommodating new energy in regional power grids based on the load elasticity of electrolytic aluminum[J/OL]. *Advanced Engineering Sciences*, [2026–04–20]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251202.1504.002>. [赵清华,张姝,周勇军,等.基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法[J/OL]. *工程科学与技术*, [2026–04–20]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251202.1504.002>.]
- [65] Ding Xin, Liao Siyang, Xu Jian, et al. An active power sup-

- port control strategy in VSC-HVDC power systems considering load characteristics of electrolytic aluminum[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2025, 10(3):1-17.
- [66] Yu Qingfang, Xu Jian, Liao Siyang, et al. Adaptive load control of electrolytic aluminum for power system frequency regulation based on the aluminum production operation state[J]. *Energy Reports*, 2022, 8:1259-1269.
- [67] Golmohamadi H. Demand-side management in industrial sector: A review of heavy industries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156:111963.
- [68] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 温室气体产品碳足迹量化方法与要求 电解铝:GB/T 44905—2024[S]. 北京:中国标准出版社, 2024.
- [69] Wang Lijuan, Shao Zhuqiang, Xiong Hui, et al. Pathway of carbon emissions peak of aluminum industry[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2):377-384. [王丽娟, 邵朱强, 熊慧, 等. 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2):377-384.]
- [70] Chen Yuanxiang, Liu Yiling, Li Run, et al. Research on low carbon development path of electrolytic aluminum industry under the expansion of national carbon market: Taking Yunnan Province as an example[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(8):62-71. [陈远翔, 刘奕伶, 李润, 等. 全国碳市场扩围下的电解铝行业低碳发展路径研究——以云南省为例[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(8):62-71.]
- [71] He Jinyu, He Jie, Wang Yutao, et al. Pathway of carbon emissions peak for cement industry in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2):347-355. [贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 等. 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2):347-355.]
- [72] Madloul N A, Saidur R, Hossain M S, et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(4):2042-2060.
- [73] Dai Xinyun, Chen Haoyong, Xiao Dongliang, et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11):4169-4186. [代心芸, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J]. *电网技术*, 2022, 46(11):4169-4186.]
- [74] Zhao Xudong, Wang Yibo, Wang Bowen, et al. Review of market implementation and scheduling models considering the flexibility extraction of differentiated industrial energy-intensive loads[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(7):2043-2062. [赵旭东, 王艺博, 王博闻, 等. 考虑差异化工业高载能负荷灵活性挖掘的市场实施及调度模型研究综述[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(7):2043-2062.]
- [75] Zhou Suyang, Guan Aobo, Gu Wei, et al. Unified modeling and planning of industrial integrated energy system with multiple processes[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(3):31-41. [周苏洋, 关奥博, 顾伟, 等. 工业综合能源系统的多工序统一建模与规划[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(3):31-41.]
- [76] Liao Siyang, Xiao Yuduo, Xu Jian, et al. Economic dispatch model considering production process of energy-intensive industrial load under demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(3):22-30. [廖思阳, 肖雨朵, 徐箭, 等. 需求响应下计及高耗能工业负荷生产流程的经济调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(3):22-30.]
- [77] Li Min, Ding Mengru, Huang Shenmao, et al. Optimal strategy for flexible production scheduling of textile industry load for flexibility requirement of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(22):156-169. [李敏, 丁梦茹, 黄申茂, 等. 面向电网灵活性需求的纺织工业负荷柔性生产调度优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(22):156-169.]
- [78] Fleschutz M, Bohlayer M, Braun M, et al. The effect of price-based demand response on carbon emissions in European electricity markets: The importance of adequate carbon prices[J]. *Applied Energy*, 2021, 295:117040.
- [79] Kong Xiangyu, Yu Fanfan, Zhang Zufeng, et al. Interactive decision-making method for energy-intensive loads in industrial parks considering carbon emission constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2026, 50(5):33-43. [孔祥玉, 于凡凡, 张祖锋, 等. 考虑碳排放约束的工业园区高耗能负荷互动决策方法[J]. *电力系统自动化*, 2026, 50(5):33-43.]
- [80] Zhang Xiao, Hug G, Harjunkski I. Cost-effective scheduling of steel plants with flexible EAFs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(1):239-249.
- [81] Liao Siyang, He Cong, Li Lingfang, et al. Solution method of regulation boundary for industrial park virtual power plant considering power network constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(18):66-75. [廖思阳, 贺聪, 李玲芳, 等. 考虑电力网络约束的工业园区虚拟电厂调控边界求解方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(18):66-75.]
- [82] Luo Zhao, Zheng Li, Liu Dewen, et al. Multi-objective optimization of process industrial energy systems containing hydrogen energy[J]. *Renewable Energy*, 2026, 267:125689.
- [83] Yin Xunhu, Ding Yi, Hui Hongxun, et al. Design of demand response mechanism considering response behaviors of customers in initial electricity spot market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23):94-103. [尹逊虎, 丁一, 惠红勋, 等. 初期现货市场上考虑用户响应行为的需求

- 响应机制设计[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 94–103.]
- [84] Wang Yunchu, Zhang Zhi, Lu Feng, et al. Stepwise incentive mechanism of demand response considering uncertainty of user behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 64–73. [王韵楚, 张智, 卢峰, 等. 考虑用户行为不确定性的阶梯式需求响应激励机制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 64–73.]
- [85] Rodríguez-García J, Álvarez-Bel C, Carbonell-Carretero J F, et al. A novel tool for the evaluation and assessment of demand response activities in the industrial sector[J]. Energy, 2016, 113: 1136–1146.
- [86] Xu Qingyang, Lin Lin, Liang Qiaomei. What influences industrial enterprises' willingness of demand response: A survey in Qinghai, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 428: 139483.
- [87] Ouyang Xinyu, Sun Xiaocong, Bao Minglei, et al. A region-based model for quantifying the integrated energy-carbon flexibility of process industries[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, [2026–04–20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11449540>.
- [88] Zhou Tianrui, Kang Chongqing, Xu Qianqiao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44–49. [周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44–49.]
- [89] Wu Jing, Liu Xuanyu, Li Xiang, et al. Research and modeling of bus marginal carbon intensity for power systems considering network losses[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 215–224. [吴静, 刘轩宇, 李响, 等. 考虑网损的电力系统节点边际碳势理论研究与建模[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 215–224.]
- [90] Jiang Yi, Zhang Ji, Zhang Tao, et al. Dynamic carbon emission responsibility factor of electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7024–7038. [江亿, 张吉, 张涛, 等. 电力动态碳排放责任因子[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7024–7038.]
- [91] Bao Yi, Xu Jian, Liao Siyang, et al. Field verification of frequency control by energy-intensive loads for isolated power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6098–6108.
- [92] Jiang Tingyu, Tao Jinyu, Wang Ke, et al. Non-cooperative game based strategy for energy-intensive industrial load participating in peak-regulation demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 13–21. [姜婷玉, 陶劲宇, 王珂, 等. 基于非合作博弈的高耗能工业负荷参与调峰策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 13–21.]
- [93] Wu Junling, He Shuaijia, Liu Junyong, et al. Distributionally robust joint chance-constrained low-carbon planning method for energy station considering low-carbon demand response and seasonal hydrogen storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(4): 205–214. [吴骏玲, 贺帅佳, 刘俊勇, 等. 考虑低碳需求响应与季节性氢储的能源站分布鲁棒联合机会约束低碳规划方法[J]. 电力自动化设备, 2026, 46(4): 205–214.]
- [94] Abunima H, Park W H, Glick M B, et al. Two-stage stochastic optimization for operating a renewable-based microgrid[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119848.
- [95] Yazdani D, Omidvar M N, Yazdani D, et al. Robust optimization over time: A critical review[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024, 28(5): 1265–1285.
- [96] Wang Jie, Gao Rui, Xie Yao. Sinkhorn distributionally robust optimization[J]. Operations Research, 2025, 74(3): 1581–1603.
- [97] Silvente J, Kopanos G M, Pistikopoulos E N, et al. A rolling horizon optimization framework for the simultaneous energy supply and demand planning in microgrids[J]. Applied Energy, 2015, 155: 485–501.
- [98] Zhang Siyuan, Wang Haining, Yuan Mingzhu, et al. Integrated decision-making model of industrial users participating in electricity-carbon-green certificate multi-market[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2025, 37(9): 1–10. [张思源, 王海宁, 袁明珠, 等. 工业用户参与电-碳-绿证多市场联合决策模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(9): 1–10.]
- [99] Ba Jinyu, He Chuan, Nan Lu, et al. Low-carbon economic scheduling of park-integrated energy system containing hydrogen based on green certificate-tiered carbon trading and distributionally robust chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 169–176. [巴金宇, 何川, 南璐, 等. 基于绿证-阶梯碳交易联动与分布鲁棒机会约束的含氢园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(10): 169–176.]

【校友简介】



宋永华, 博士, 电气工程讲座教授, 澳门大学校长, 智慧城市物联网国家重点实验室主任及智慧城市技术研究院院长。宋永华教授于 1984 年在原成都科技大学(现四川大学)取得学士学位, 1989 年在中国电力科学研究院获博士学位。长期从事电力系统分析与控制研究, 在电力系统安全高效低碳运行方面做出了系统性、创造性的贡献, 享有较高的国际声誉。获得 2020 年度国家科学技术进步奖二等奖、2020 年度何梁何利基金科学与技术进步奖、2022 年光华工程科技奖、2023 年第三届全国创

新争先奖。于2004年当选英国皇家工程院院士,2008年当选美国电气与电子工程师学会(IEEE)会士,2019年获选欧洲科学院(外籍)院士;也是英国工程技术学会(IET)会士、国际欧亚科学院院士、中国电工技术学会第八届及第九届理事会副理事长、

中国电机工程学会第九届及第十届理事会副理事长。自2002年至今,一直获委任为澳门特别行政区政府科技委员会顾问;2023年获澳门特别行政区政府颁授教育功绩勋章,以表彰其在教育事业方面的杰出贡献。

Reconfiguring Industrial Users' Production Processes to Support the Low-carbon Transition of Power Systems

CHEN Gengrui¹, HUI Hongxun¹, GAO Hongjun², LIU Junyong², Song Yonghua^{1*}

(1.State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macao 999078, China;

2.College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Significance Driven by carbon peaking and carbon neutrality goals, power systems are integrating an increasing share of renewable energy, which is characterized by uncertainty, variability, and intermittency. Maintaining the supply-demand balance in power systems is thus difficult. Therefore, power systems urgently require flexible resources that can provide effective balancing support. Supply-side flexibility still relies heavily on thermal power units, which are increasingly constrained by carbon-reduction requirements and technical limits. It is therefore necessary to further unlock the flexibility potential of demand-side resources. Industrial users are characterized by substantial electricity consumption, large carbon-reduction potential, considerable adjustable capacity, and mature automation and control systems. At the technical level, they can improve their process routes, while at the operational level, they can reschedule production batches and adjust equipment power. These measures create flexibility that supports power-system balancing and low-carbon operation, making industrial users a major focus for developing demand-side flexibility for carbon reduction. Industrial users are evolving from conventional loads into integrated resources that can function as generation, load, and energy storage. This transition gives industrial users three main resource attributes. Distributed energy, self-owned power plants, and waste-heat generation provide on-site power. Adjustable production loads can coordinate production with system dispatch. Electrical, thermal, hydrogen, and intermediate-product storage enable energy transfer across time. This paper reviews the process reconfiguration of industrial users in supporting the low-carbon transition of power systems.

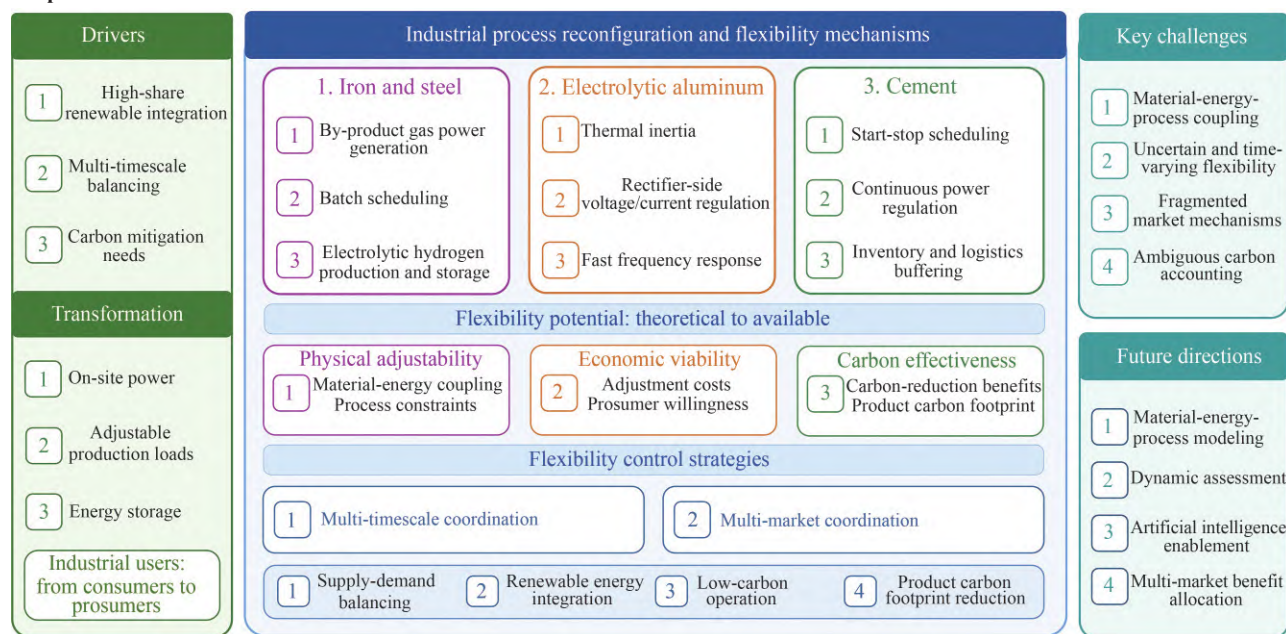
Progress First, the transition of industrial users from consumers to prosumers was summarized, outlining their basic characteristics and primary resource classifications. Second, representative industrial scenarios were examined, including iron and steel, electrolytic aluminum, and cement. For each process, the characteristics and flexibility mechanisms were analyzed. For the steel industry, special attention was given to the flexibility differences among three process routes: the blast furnace-basic oxygen furnace long-process route, the scrap-based short-process route, and the hydrogen-based direct reduced iron (H-DRI) short-process route. The multilevel regulation capability of electrolytic aluminum, which mainly originates from the thermal inertia of aluminum reduction cells, was examined. The flexibility of the cement industry was considered in terms of start-stop scheduling and smooth power adjustment. The industries were found to differ in their dominant flexibility mechanisms. Long-process steelmaking mainly relies on self-generation fueled by byproduct gases. Scrap-based electric-arc-furnace (EAF) production can shift loads through batch scheduling. In H-DRI processes, electrolyzers, hydrogen storage, and intermediate-product storage can be coordinated to provide flexibility. Electrolytic aluminum provides a fast frequency response and multilevel load adjustment under thermal constraints. Cement plants mainly adjust crushing, raw-material preparation, and grinding, with clinker kilns generally operating continuously. A three-dimensional modeling framework was proposed for industrial users, covering physical characteristics, economic incentives, and carbon benefits to assess flexibility potential based on the process reconfiguration of industrial users. The physical dimension focused on the coupling constraints among material and energy flows. The economic dimension considered the willingness of users to provide flexibility. The carbon benefits dimension captured how carbon-reduction benefits affect feasible regulation boundaries. The assessment enabled theoretical potential to be distinguished from actual available potential. Physical modeling could be applied to identify the feasible regulation region under equipment, production, material-balance, and energy-coupling constraints. Economic modeling accounted for energy costs, production adjustment losses, operational risks, and management costs. Carbon benefit modeling was needed to further incorporate marginal carbon emissions, green electricity consumption, carbon market compliance, and product carbon footprint accounting. For flexibility control strategies enabled by the reconfiguration of industrial processes, coordination should be designed across short-, medium-, and long-term time scales. At short timescales, electrolytic aluminum is a representative resource for a rapid frequency response. At medium timescales, batch processes, such as EAF steelmaking, can enable intraday load shifting. At long times-

cales, electrolysis combined with hydrogen storage can support cross-seasonal balancing. These decisions must also account for multiple uncertainties, including renewable energy output, market prices, product demand, equipment states, and material supply. The interactions among multiple market mechanisms, including electricity and carbon markets, should also be considered.

Conclusions and Prospects By participating in power system flexibility regulation, industrial users can promote renewable energy integration, reduce the carbon footprint of industrial products, and support the coordinated low-carbon transitions in the industrial and power sectors. Future research should develop a unified model that captures material flows, energy flows, and industrial production constraints. Furthermore, it is essential to promote the deep integration of artificial intelligence with industrial production and power system control. Additionally, credible accounting frameworks for industrial carbon emissions and product carbon footprints must be established, alongside the improvement of multimarket benefit allocation mechanisms. Ultimately, these developments will enable the large-scale, normalized, and market-driven participation of industrial users in power-system flexibility regulation.

Key words: low-carbon transition; industrial users; power system flexibility; demand-side resources

Graphical abstract:



(编辑 赵 婧)

引用格式: Chen Gengrui, Hui Hongxun, Gao Hongjun, et al. Reconfiguring industrial users' production processes to support the low-carbon transition of power systems[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 138–152. [陈庚睿, 惠红勋, 高红均, 等. 重构工业用户生产流程支撑电力系统低碳转型[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 138–152.]