

服务国家重大战略需求 加速高校科研成果转化

——访清华大学电机系主任、清华大学能源互联网创新研究院院长、清华四川能源互联网研究院院长康重庆

■本报记者 别凡

“十五五”规划纲要提出，着力构建新型电力系统，加快智能电网建设。同时明确，推动绿色电力与算力协同布局。这为未来五年新型电力系统建设以及电力支撑智能经济新形态提供了关键指引。绿色电力与算力如何实现“双向奔赴”？新型电力系统中的虚拟电厂将向哪些方向“进化”？高校在能源领域的科研成果如何有效落地？带着这些问题，本报记者近日专访了清华大学电机系主任、清华大学能源互联网创新研究院院长、清华四川能源互联网研究院院长康重庆。

算电碳一体化是新型电力系统与数字经济融合的必然方向

我国电力系统年碳排放量在全社会碳排放总量中的占比超40%，电力碳中和是实现“双碳”目标的“主战场”。电力系统低碳转型不仅是应对国际绿色贸易壁垒的重要手段，也是支撑我国从“能耗双控”迈向“碳排放双控”的坚实基础。

作为国内低碳电力技术研究领域的先行者，康重庆教授团队首次揭示了电网潮流与碳排放的时空耦合机理，创立了“电力系统碳排放流理论”，并构建起系统的方法论。

与忽视电力碳排放时空差异的传统计算方法不同，电力系统碳排放流理论把碳排放作为可追踪、可溯源、可优化的网络流，与电力潮流同构耦合。其本质是嵌入在电力潮流中的等效碳排放量，随电力潮流在网络中流动，从电源节点流向负荷节点，实现了“一度电、一份碳”的精准对应。

“通过电力系统碳排放流理论，我们给电力潮流打上‘碳标签’，让每一度电都有清晰的碳足迹，从电源，到电网，再到负荷，全程可追溯、可核算、可交易，解决了‘谁用电、谁担碳’的责任划分难题，为碳市场、绿电交易、零碳园区碳核算等提供了统一的计量基石。”康重庆介绍，目前，电力系统碳排放流理论已帮助电力系统碳排放实现

“分钟级、用户级”精准计量与溯源。

“借助电力系统碳排放流理论，企业可以知道何时用电最低碳、何地用电最绿色。在‘碳关税时代’，低碳电力优势就是降低企业成本的驱动器、打破贸易壁垒的通行证。”康重庆强调。

康重庆进一步介绍，目前，电力系统碳排放流理论已有核心落地成果，电力碳表、动态电碳因子、电力碳地图、低碳需求响应都是典型代表。其中，电力碳表实现源网荷全链条碳排放实时计量，夯实数据基础；动态电碳因子打破传统固定核算模式，形成分时、分区的低碳电力评价标准；电力碳地图则直观展示区域碳强度分布与跨区碳流规律，支撑全局决策。三者共同输出实时碳信号，“进化”为低碳需求响应，推动电力负荷由“随电价调节”转向“电碳协同优化”。目前电碳监测等部分成果已在华北电网、江苏电网、广西电网等地落地，实现了电网运行安全、经济与低碳三元目标的协同优化。

虽然已经明晰电网中的碳如何流动，并解决了电力系统如何主动控碳、协同降碳，但电力系统的低碳转型远没有止步。

随着人工智能技术的飞速发展，以及东数西算等战略的积极推进，数据中心成为新型负荷，用电量占比快速上升。但我国风光新能源主要集中在西部、北部，数据与算力需求却主要集中在东部、中部。这种空间错配与能源与AI的双向赋能提出新的更高要求，电力系统需要在满足高速增长算力的同时实现低碳转型，挑战巨大。

对此，康重庆强调，在“双碳”目标和数字化转型机遇下，新型电力系统将由“源网荷储”四要素拓展为“源网荷储碳数”六要素，构建算电碳三位一体协同体系是新型电力系统与数字经济融合的必然方向。

“实现算电碳协同，关键就是要实现算力跟着绿电走、负荷跟着碳强度走。”算力负荷具有可延时、可平移特性，是天然的海量柔性资源，发挥其“虚拟储能+虚拟调峰”功能，可提升新能源消纳、降低系



统碳强度。“因此，必须破解电力市场、碳市场、绿证市场、算力市场之间的规则分割、数据孤岛、价值脱节等问题，建立算电碳联合交易机制，让低碳算力可计量、可交易、可追溯。”

我国虚拟电厂技术飞速发展

虚拟电厂是新型电力系统构建中提升需求侧协同能力的关键举措。在康重庆看来，虽然虚拟电厂的概念起步较早，但真正的工程应用主要集中在最近七八年。但也正是这七八年时间，我国虚拟电厂技术已经走到世界前列。

“每个国家的资源禀赋、实际情况不同，所以各国根据自己的聚合资源情况发展出适合自己的虚拟电厂技术，形成了自己的特点。我国需求侧资源品类很多，我们针对异构资源聚合提出标准化建模方法，可以让不同资源按照统一外特性刻画出来。如此一来，可以使虚拟电厂具有规范的表征模型，进而对虚拟电厂在电力系统中参与平衡的手段进行优化与控制。这也成为我国虚拟电厂领先世界的领域。”康重庆介绍，随着我国电力现货市场的不断完善，虚拟电厂也将得到进一步发展，并在区域探索方面，取得更加明显的发展优势。

事实上，早在2017年，康重庆就带领团队开始了对虚拟电厂的前期研究。从“十三五”时期的国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项，到“十四五”时期我国首个虚拟电厂国家重点研发计划项目“规模化灵活资源虚拟电厂聚合互动调控关键技术”，再到“十五五”时期的第二个国家级虚拟电厂项目“虚拟电厂主动支撑多级电网运行关键技术”，随着研究的不断深入，虚拟电厂技术也不断进化。“目前，虚拟电厂技术已由能量为主的静态聚合为基础，逐步发展到具备动态响应的完备机组化响应能力，即在更短的时间尺度上形成对多级电网的支撑能力。”

“通过虚拟电厂，电力系统平衡模式从此前刚性的源随荷动转变为柔性的源荷互动。”康重庆介绍，在技术发展以及政策支持下，目前我国虚拟电厂已经形成了良好的发展态势，在技术上，实现了跨节点、跨区域的资源聚合；在机制上，除了组建研究领域的“国家队”，还在中国能源研究会成立了虚拟电厂专委会，中国电机工程学会新型负荷与虚拟电厂专委会也正在筹备中。同时，还吸引了大量民营企业在虚拟电厂平台交易，真正把能聚合的资源都聚合起来，产生了实实在在的收益。

标准是做一切工作的基础。谈及虚拟电厂的标准体系建设，康重庆表示，目前我国已出台多项虚拟电厂国家标准，今年3月国家能源局发布的《2026年能源行业标准计划立项指南》将虚拟电厂列入重点方向，“预计今年虚拟电厂方向在行业标准基础上产生国家标准的密度会更大。”康重庆认为，在此过程中，央企和民企将同步参与，“虚拟电厂本质上需要央企和民企同时作用，才能产生效应。”

四川院成长为校地合作亮丽名片

作为清华大学电机系主任，康重庆同时也是清华四川能源互联网研究院院长。2016年，清华四川能源互联网研究院(以

下简称“四川院”)正式落地四川天府新区，成为清华大学与四川省校战略合作落地地的首个新型研发机构，也是清华大学目前在西部地区设立的唯一一所派出研究院。

“十年磨一剑。我们始终坚守‘源自清华，扎根四川’的初心，把实验室里的理论成果，变成能落地、能见效的工程实践，让清华智慧真正服务四川能源转型和国家‘双碳’目标。”康重庆表示。

康重庆介绍，由清华大学电机系引领的“一系两院一室一联盟”的“五位一体”发展体系，为四川院提供了全方位的支撑保障——清华大学电机系为基础研究提供策源支撑，清华大学能源互联网创新研究院把握政策战略方向，四川院聚焦技术落地转化，新型电力系统运行与控制国家重点实验室攻克核心技术瓶颈，国家能源互联网产业及技术创新联盟推动产业协同发展。

十年间，四川院这支从3人起步的初创团队，已成长为拥有445名全职人才、行业领军力量，用一组组实打实的数据、一项项可落地的成果，书写着校地协同创新的“清华答卷”。

“紧扣四川清洁能源禀赋，四川院精准布局科研方向，聚焦清洁低碳能源、新型电力系统、能源碳中和、能源交叉融合四大方向，构建十个学科交叉的研究中心，针对能源行业需求，着力开展技术攻关。”康重庆介绍，十年间，四川院累计承担国家级项目70余项，服务300余家能源企业，申请专利1200余件，完成科技成果处置45项、转化总金额超1亿元，在国际科技奖项及标准制定等方面实现多点突破。

从实验室到产业场，从技术突破到生态构建，十年深耕，四川院已成为省校合作的“桥头堡”、能源创新的“孵化器”。站在新十年的起点，康重庆表示：“四川院不仅要源自清华、扎根四川，也要服务全国、走向世界，紧跟时代步伐，围绕国家重大战略需求，加速成果转化，为我国新型电力系统建设、‘双碳’目标实现贡献更多力量。”

全国首套煤矿智能化建设与运维培训教材发布

本报讯 日前，全国首套煤矿智能化建设与运维教育培训丛书——《煤矿智能化建设与运维指南》在京发布，成为宣传国家煤矿智能化政策、培育煤矿智能化复合型人才、推动煤矿劳动力转型的重要一环，有望进一步提升煤矿智能化建设运行水平。

当前，我国煤炭行业两化融合和数字化转型进入快速发展期，煤矿智能化建设实现由示范引领到规模化推广阶段。中国煤炭工业协会发布的《2025煤炭行业发展年度报告》显示，截至2025年底，全国已建成智能化煤矿1066处，智能化产能占比超过65%。煤矿智能化的快速发展拉动该领域复合型人才需求上升，相应的权威培训教材也成为业内期盼。

对此，中国工程院院士王国法在接受《中国能源报》记者采访时表示，“煤矿智能化建设是多学科多技术交叉融合的复杂巨系统，相关专家大多集中在细分领域、细分方向，掌握系统运维知识的人才相对匮乏。尽管当前部分高校已经设立智能采矿专业，但这些专业的毕业生到煤矿一线工作的数量仍然较少。即使在高校，全面系统认识煤矿智能化的教师、学科带头人也比较少。”王国法强调，当前，在煤矿智能化等能源新工科领域，普遍呈现出工程牵引教育的特征，亟需探索教育科技人才一体化发展新路径。“借助系统的培训教材，提高煤矿企业智能化建设人才培养水平是重要途径。”

煤炭企业对煤矿智能化人才匮乏的感受尤其深刻。山东能源集团煤炭产业管理部相关技术人员坦言，很多煤矿智能化系统和装备水平逐步提升，但煤矿职工的操作水平和运维能力却跟不上，严重依赖厂家维护设备。“随着人工智能的快速发展，煤矿智能化技术迭代加速，企业亟需标准化教材支撑人才培养。”

“智能化是煤炭开采的新一轮技术革命，加强煤矿智能化开采培训，既是提升对煤炭产业发展规律认识的需要，也有助于传播煤矿智能化发展政策。”中国煤炭工业协会相关负责人介绍，《煤矿智能化建设与运维指南》实现了煤矿人工智能识读继续教育培训教材“从无到有”的突破，有望助力煤矿智能化从“建好”向“用好”转型。

据悉，《煤矿智能化建设与运维指南》由国家能源局指导，中国煤炭工业协会组织，中国煤炭工业协会培训中心具体实施，分井工篇、露天篇、选煤篇，共24册，历时2年，由14位两院院士担任总顾问，来自煤炭生产企业、科研院所、高等院校和装备制造企业等236家单位的共1400余位专家学者集体编纂完成，后期将开展丛书全国主要矿区精读巡讲工程，推动教材进矿区、进企业、进校园，赋能行业高质量发展。(别凡)

省间电力现货交易规则现三大变化

■本报记者 苏南



近日，国家发展改革委办公厅、国家能源局综合司联合印发《关于修订省间电力现货交易规则的复函》(以下简称“复函”)，正式批复由国家电网有限公司申报修订的《省间电力现货交易规则》(以下简称“规则”)。业内认为，规则是我国电改纵深推进的又一重磅文件，也是当前新能源消纳瓶颈的“破局之钥”，更是我国构建新型电力系统的重要里程碑。

省间电力现货交易是连接各省电力市场的枢纽，透过规则则可以清晰地看到，我国省间电力现货市场建设在顶层逻辑、机制衔接以及主体扩容方面正迎来新跃升。

省间电力现货交易明确为实物交易

我国省间电力现货市场建设的顶层逻辑正在发生变化。此前相当长时间，省间电力交易被贴上“应急互济”或“保供兜底”的标签，更多是用

作“备胎”。规则在总则中对省间电力现货交易的内涵进行了重新界定，明确其是利用省间通道剩余输电能力，开展省间日前、日内电能交易。省间电力现货交易为实物交易。

“‘实物交易’这一定语，标志着省间现货市场的定位发生了根本性转变。”一位不愿具名的电改研究人士对《中国能源报》记者表示，规则强调“实物交易”属性，这意味着每一笔在省间现货市场成交的电能，都必须严格对应实际的物理电网输送路径和电力潮流，统筹兼顾了市场交易效率与电网运行安全。

规则明确，通过市场化手段开展电力余缺互济，促进清洁能源大范围消纳，推动构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统，助力实现碳达峰碳中和。

厦门大学中国能源经济研究中心教授孙传旺在接受《中国能源报》记者采访时指出：“面向碳达峰碳中和目标，省间现货市场已经成为清洁能源消纳、能源绿色转型的重要保障。一方面，它有助于将西北风电光伏、西南水电等充裕清洁能源精准运送到东部沿海、南部的负荷中心，畅通新能源的高效消纳渠道，大幅提升清洁能源利用率；另一方面，通过在全国范围内实现多种形式能源电力的相互补充，也为迎峰度夏、度冬等电力安全保供提供了坚实保障。”

打通“跨区—省间—省内”全链条

此次规则的另一个变化是机制衔接。电力市场建设忌讳“碎片化”和“孤岛化”。长期以来，省间市场出清结果如何顺畅地传导至省内市场，一直制约着资源跨省流动。此次规则的修订精准完善了不同层级、不同周期市场之间的协同痛点。

谈及当前市场的“堵点”，孙传旺明确指出数据与机制的双重壁垒：“一是省间和省内外交易衔接不畅。省间与省内现货市场在时序配合、边界条件传递、计划编制流程等方面的衔接效率偏低，跨电网经营区的交易结算周期较长。二是新型经营主体的参与受限。虚拟电厂、独立储能等主体参与跨区调峰的机制有待健全，在省间现货市场中的申报、出清、结算等缺少专门制度安排，大量灵活性资源的调节价值发现不足。三是省间数据壁垒制约实时响应。省间现货市场数据共享机制缺位，各省电力供需数据、新能源出力预测数据、电网阻塞数据等难以互联互通，导致

跨省跨区实时电价信号传递滞后。”

针对跨电网经营区的交易难题，复函中特别强调要扎实做好省间现货与各省(区、市)内电力现货市场的高效衔接，这意味着省间现货产生的价格信号和电量空间必须被省内市场接纳或内部消化，严禁设置行政性壁垒，真正让市场在资源配置中起决定性作用。

向用户侧开放与市场生态优化的未来图景

健康的电力现货市场，必须具备多元、广泛且对等的参与主体。规则虽然现阶段仍以发电企业和电网企业为主要组织对象，但在前瞻性设计上留下了极具想象力的空间。复函明确指出，要“加快研究论证用户侧直接参与省间电力现货市场的可行路径，完善计量、结算、风险防控等配套措施，适时推动用户侧主体有序参与”。

“这是规则释放出的最大增量信息之一。”上述不愿具名的电改研究人士直言，目前省间现货主要是“批发商”——发电企业之间的“游戏”。终端用户，特别是具备跨省购电需求的大型高耗能企业或售电公司无法直接下场。随着绿电消费成为企业ESG合规和国际出口的刚性需求，东部企业渴望直接购买西部低成本绿电。推动用户侧直接参与，不仅能大幅降低中间交易成本，还将极大提升新型电力系统的柔性。

对于新型主体的引入，孙传旺认为亟待破题：“目前，新型经营主体的参与受限。虚拟电厂、独立储能等主体参与跨区调峰的机制有待健全，在省间现货市场中的申报、出清、结算等缺少专门制度安排，大量灵活性资源的调节价值发现不足。”

在全盘统筹上，孙传旺将规则视为全国统一电力市场建设的“定海神针”。他表示：“规则为一体化建设运营省间电力现货交易市场奠定了制度基础。在参与主体层面，实行一地注册、全国共享，推动全面积极参与；在交易层面，规范了注册退出、交易申报、偏差处理等市场标准；在价格层面，完善了‘能涨能跌’的市场化机制，实时反映电能时空价值；在衔接层面，健全了多层次统一电力市场体系。”

业内一致认为，规则修订绝非简单的条款增删，而是面对“十五五”时期新能源跨越式发展、全国统一电力市场加速成型大背景下的制度升级。随着规则的落地实施，我国省间电力现货市场正从建章立制全面迈向高效运转的新阶段。