

在2022能源电力转型国际论坛上，与会专家对安全—经济—环境“矛盾三角形”这一能源电力转型面临的长期矛盾高度关注。对此，应采用系统观认识能源电力转型，用整体性原则统筹布局、用动态性原则有序推进，通过政策完善、技术进步、能源结构调整化解不断转化的主要矛盾，在新的动态平衡状态下实现能源电力转型发展。

构建新型电力系统，合力化解“矛盾三角形”

文 / 郭剑波

随着“双碳”目标的推进，中国已成为世界上新能源发展最快、装机容量最大的国家。截至2021年年底，我国风电和太阳能发电装机容量均超过3亿千瓦，约占总装机容量的27%；新能源已成为我国第二大电源，在部分地区甚至成为第一大电源。

新能源发电的不确定性、波动性，给电力电量时空分布不均衡带来充裕性挑战；而新能源发电设备的低抗扰性、弱支撑性，给大规模替代常规机组带来安全性挑战；新能源发电设备的低边际运行成本、高系统运行成本，对系统灵活调节资源和系统安全稳定支撑能力都提出了更高的要

求，也给经济性和体制机制带来挑战。构建新型电力系统，需合力化解安全—经济—环境的“矛盾三角形”。

发展新能源的代价不能是降低安全性。以“矛盾三角形”为切入点，用系统整体思维认识和规划设计新型电力系统，统筹政策法规、技术经济、创新发展、产业转型、行业协同，有助于在协调平衡状态下实现“双碳”目标和可持续发展。

新认知：需结合新特性发力

新型电力系统是一个多时空尺度、多层级、多行业、多能源耦合的

发展新能源的代价不能是降低安全性。在扰动不断增强的情况下确保电力可靠供应是新型电力系统的核心技术问题。



复杂的巨系统，也是一个具有灵活、弹性、智慧特性的社会信息物理系统。在扰动不断增强的情况下确保电力可靠供应是新型电力系统的核心技术问题。对于新型电力系统的认知，要结合其新的功能定位、供需特性、产业基础、结构形态、市场机制、政策法律和关键技术。

基于新的功能定位，新型电力系统是实现“双碳”目标的主要举措。随着其他行业将“电力化”作为实现“双碳”目标的重要举措，新型电力系统与其他行业、多种能源耦合增强，安全、经济、环境矛盾愈加突出，需要全社会各参与方协同有序构建。反之，新型电力系统构建又要适应经济社会对基础性、平台性系统的需求，对相关政策法规、体制机制、科技创新、数字化提出新要求。

基于新的供需特性，新能源电

力具有强不确定性和低保障性。据预测，2030年新能源出力占系统总负荷的比例为5%~61%，2060年为16%~142%。峰荷增速快于电量增速，“极热无风”“晚峰无光”以及极端天气下负荷与新能源出力的负相关性等特征明显。新能源长时间、低出力带来保供挑战，长时间、高出力则带来系统消纳、安全和能源转储利用挑战，因此，新能源各时间尺度波动需要系统匹配相应时间尺度的灵活调节能力，如考虑暂态过电压的限制，波动将从毫秒级延伸到季度和年的时间跨度。新型电力系统新的供需特性需能源系统甚至社会系统（用电行为、负荷响应等）协同。

基于新的产业基础，新型电力系统建立在新型产业链基础上，物质基础、技术体系和瓶颈环节都将发生变化。国际能源署（IEA）的报告指出，

>> 2022能源电力转型国际论坛之能源低碳转型与能源安全平行高端论坛12月9日上午在北京举行。中国工程院院士郭剑波发表主旨演讲。 王伟 / 摄

陆上风电场所需矿产资源是类似燃气发电厂的9倍，2040年锂、钴、镍年消耗量分别增至2020年水平的42、21、19倍。我国铝、锂、铜、铁、镍对外依存度分别为60%、70%、80%、80%、90%左右，关键矿产资源等产业链供应安全成为能源供应安全新的组成部分，需要加强战略规划、政策支持、矿产探采技术创新等，完善矿产资源供给保障体系，保证产业链安全的多元化和安全性。

基于新的结构形态，新型电力系统是一个多能源、多行业、多区域、多层次耦合的信息物理社会系统（CPSS），研究对象从电气物理系统拓展到信息物理社会系统。从电源形态看，常规电源占比和利用小时数呈下降趋势，清洁和灵活发电技术、政策法规和市场机制对电源构成和系统形态将起决定性作用；从电网形态看，呈现交/直流混联、大/微电网共存、交流同步机制为主的多层级多元电网形态和多种运行机制；从负荷形态看，增长空间大、峰谷差加大、反调节性强，又具有可交易、可聚合、可塑性和可控性；从储能技术看，需求大、增长快、种类杂、功用多，大规模应用需实现安全性提升、成本下降、价值兑现。

基于新的市场机制，需要完善以电量交易为主、价格主导的市场形式。电力市场建立在可靠安全的电力供应基础上。新能源高占比场景中，电力电量总量充盈与时空不平衡的矛

盾突出，将呈现丰饶和短缺交织、多功用价值兑现的新市场形态。需要建立健全体现供需格局和系统特征的市场机制和多层级多种类统一市场体系，合理传导新能源导致的系统成本和支撑能力增加。调动多利益主体共同参与辅助服务等多层级市场，通过保障、激励机制及监管机制，稳定投资者预期，确保可持续的电力供应。电力市场改革过去关注的是市场主体的改革，下一步要更加关注市场客体和市场规则的改革。

基于新的政策法规，建立适用新型电力系统的政策规范引导新能源健康发展十分必要。《中华人民共和国电力法》（1996年）是在新能源发展初期制定的，而新能源的不确定性、高系统成本及相关的矿产开发、退役回收等给能源电力的安全、经济、清洁供应带来新的挑战，需要明确的方面很多，比如规划制订的法律地位和责任关系、电力监管的重点和方式、电力商品和安全双重属性的统筹等。同时需要注意不同政策法规之间的衔接和协同，以及与市场机制、供需关系等的协同。

基于新的关键技术，技术创新是构建新型电力系统的关键支撑。“双碳”背景下，电力系统规划分析、电网运行控制、电力市场建设及碳捕集利用与封存（CCUS）、氢能乃至可控核聚变等技术，需要加大基础理论研究、技术攻关、装备研发、示范工程和创新体系建设。相关建设会进一步

增加系统构建成本，需要体制机制、商业模式、标准规范的系统性创新，需要多行业协同推动关键技术经济高效落地应用及系统转型升级。

新思路：科学系统、动态平衡

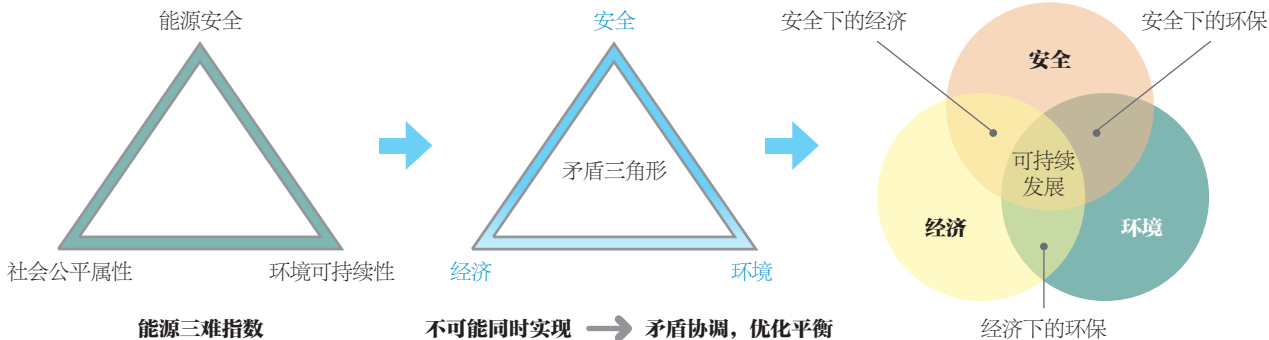
如果孤立和静态地看，能源“矛盾三角形”难以实现完全破解。伴随新能源发电比例不断提高，新能源接入带来发电侧的间歇性、波动性；直流输电增加了系统的“刚性”，交直流混联增加了复杂性；电动车等接入带来不确定性，峰谷差加剧。对于新型电力系统而言，能力与规模不匹配、特性与需求不匹配，该如何保持平衡？

新的思路是，只能根据不同能源场景，利用科学系统观，动态平衡应对各项挑战和问题，将系统作为一个整体，保证要素之间关联耦合，保持系统开放和动态优化。

实际上，安全—经济—环境“矛盾三角形”是能源电力转型面临的长期矛盾；三者都是政策、技术和能源结构相关性指标，应采用系统观认识能源电力转型，用整体性原则统筹布局、用动态性原则有序推进，通过政策完善、技术进步、能源结构调整化解不断转化的主要矛盾，在安全—经济—环境新的动态平衡状态下实现能源电力转型发展。

针对新能源电力电量时空平衡的问题，须从增供和减需两个方面着手，实现合理水平下的系统动态平

能源三难指数演进示意



>> 信息来源：作者提供

衡。站在“矛盾三角形”的安全角度，结合我国的资源分布情况和经济发展状况考虑，跨大区的新能源输送是必要的，也是很困难的，应坚持集中与分布开发相结合。随着我国新能源发电比例越来越高、增长加快，2030年左右可能会出现“弃风弃光”和供电紧张同时存在的局面，需同时考虑增加系统灵活性和需求侧管理措施。为了增加系统灵活性，用存量火电来改造是成本最低的，但存量火电灵活性改造成本传导机制还急需加强研究。提高新能源利用率，需要在负荷特性上预备一些智能化程度高和固定成本低的负荷来应对。

针对新能源发电出力波动持续时间长、分布广、随机性高的问题，要采用“填”低谷、“储”高峰的应对方式。例如，新疆连续8天风电低出力，给保供带来了极大压力；2021年，我国东北各地出现了供电缺口，

也是风电长时间低出力造成的。根据预测，到2060年，我国火电、水电等传统发电机组的装机占比虽然只有20%左右，但其电量占比依旧达到约40%。在以“散、小、软、低、动”新能源为主的一次能源基础上生产出稳定、高密度、高集中、高可靠的电力，是需要大量的传统机组和储能等作为支撑的。所以，在新能源低谷时段，须使用多种手段实现功率平衡，合理利用常规能源装机确保“兜底负荷”。对于高峰时段存在的电力消纳问题，业界提出用储能来稳定输出，但长时间的储能技术还处在突破的瓶颈期，储能作用还未发挥充分，须加大攻关力度进行储能技术优化升级，实现低成本、长寿命、长周期、高安全、易回收的储能。

总之，新型电力系统是实现“双碳”目标的重要举措，是支撑能源转型和可持续发展的关键技术，是一个

用新政策法规、新体制机制、新标准规范、新产业基础构建的多系统交互、多能源耦合的新型能源体系的重要组成部分，是一个各利益主体都能和谐健康生长的生态系统。新型电力系统的规划不局限于电网或者电力系统。加大、加快相关技术的开发研究是必要的，但更应该从全社会、多行业、高层次的广阔角度，从一个大的能源体系来考虑，进行统筹规划。因此，新型电力系统要从不同层面、角度、维度和尺度加强结构性设计——不仅是物理结构，还包括技术体系、政策法规、电价市场等。

需要强调，结构设计要简化和突出关键要素的耦合关系，用结构化和规则化分散化解矛盾，增强系统的整体稳定性和抗击风险的能力。■

（作者系中国工程院院士、中国电力科学研究院名誉院长、国家电网有限公司一级顾问）