

能源安全格局下新型电力系统发展战略框架

汤广福^{1,2}, 周静^{1,3,4}, 庞辉², 林俊杰^{1,3,4*}, 范征^{1,3,4}, 吴亚楠^{1,3,4}, 贺之渊^{1,3,4},
马士聪⁵, 薛峰⁶, 周保荣⁷

(1. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 北京怀柔实验室, 北京 101407; 3. 先进输电技术全国重点实验室 (国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209; 4. 直流电网技术与仿真北京市重点实验室 (国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209; 5. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 6. 国网电力科学研究院有限公司, 南京 211106; 7. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 构建新型电力系统是实现碳达峰、碳中和战略目标, 确保能源安全转型的关键路径; 电力系统作为当前规模最大、层次复杂、强非线性的人造系统, 是未来能源转型的核心, 而新能源发电的波动性、随机性将使电力系统安全面临严峻挑战。本文结合我国能源安全转型面临的新形势、新挑战, 明确了能源安全涉及的供给、环境、经济、科技等方面的内涵; 探讨了能源转型的发展目标与战略路径, 阐述了新型电力系统对于能源安全的重要性; 剖析了影响新型电力系统安全发展的电源、电网、负荷、储能、市场、技术等关键环节。研究认为, 需从应急预警、共享互济、安全防御3个层面着手, 构建新型电力系统安全发展所需的核心体系; 进一步提出了新型电力系统发展路径研究的基本思路, 以期新型电力系统构建及安全发展研究提供基础参考。

关键词: 能源安全; 新型电力系统; 应急预警; 共享互济; 安全防御; 战略框架

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A

Strategic Framework for New Electric Power System Development under the Energy Security Pattern

Tang Guangfu^{1,2}, Zhou Jing^{1,3,4}, Pang Hui², Lin Junjie^{1,3,4*}, Fan Zheng^{1,3,4}, Wu Yanan^{1,3,4},
He Zhiyuan^{1,3,4}, Ma Shicong⁵, Xue Feng⁶, Zhou Baorong⁷

(1. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101407, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China; 4. Beijing Key Laboratory of DC Grid Technology & Simulation (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China; 5. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 6. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 7. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The construction of a new electric power system is the key path to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals and ensure energy transition security. As the largest man-made system that is complex and highly nonlinear, the electric power system

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-03-24

通讯作者: *林俊杰, 国网智能电网研究院有限公司高级工程师, 研究方向为电力系统分析与规划; E-mail: linjunjie_1991@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源安全战略研究”(2022-JB-05)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

is the core of future energy transition. However, the security of the electric power system faces severe challenges owing to the volatility and randomness of new energy power generation. Considering the new situation and challenges faced by the energy transition security in China, this study clarifies the implications of energy security in terms of supply, environment, economy, and technology, investigates the development goals and strategic paths for energy transformation, and explores the significance of the new electric power system to energy security. The key factors of power source, power grid, load, energy storage, market, and technology that affect the new electric power system security are analyzed. According to the study, the core systems required for the security development of the new electric power system should be constructed from three aspects: emergency warning, sharing and mutual aid, and security defense. Furthermore, the basic idea for the research on the new electric power system development path is proposed to provide a basic reference for the new electric power system construction and the security development research.

Keywords: energy security; new electric power system; emergency warning; sharing and mutual aid; security defense; strategic framework

一、前言

党的二十大报告提出，积极稳妥推进碳达峰、碳中和（“双碳”），深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，确保能源安全。目前，我国是世界第二大石油消费国、第三大天然气消费国^[1]；作为高碳能源类型的煤炭仍处核心消费能源地位，加之国际形势复杂多变、消费能源价格高企，我国从化石能源向可再生能源的转型过程具有显著的复杂度和挑战性。能源安全作为能源绿色转型、经济高质量发展的基本前提，与环境安全、经济稳定、产业链供应链安全等密切相关，对国家经济、社会、外交等具有不容忽视的影响。

电力安全是能源转型发展的底线^[2]。近年来，世界多国电力安全问题频发，如乌克兰电网系统遭网络攻击而中断（2015年）、美国得克萨斯州大停电（2021年）、我国东北部分地区拉闸限电（2021年）、我国四川省大规模高温限电（2022年）等。2021年3月，我国首次提出构建新型电力系统，这是能源电力转型的必然要求、实现“双碳”目标的重要途径。新型电力系统以确保能源电力安全为基本前提，具有电力电源清洁化，电力系统柔性化、数字化、电力电子化的内在本质特征。随着传统电力系统向新型电力系统转型升级不断加快，一次能源特性、电源布局功能、电网形态规模、负荷结构特性^[3]等都发生深刻变化；新能源的强不确定性、低保障性^[4]、电网灵活调节、多能源融合^[5]、信息网络防御等因素，都与新型电力系统的安全稳定发展密切关联。

近年来，针对国内外频繁发生的电力安全事故问题开展了一些研究分析。在电网系统调频方面，因高比例新能源的接入，电力系统惯量与以常规发电机组为主体的系统相比大幅降低，出现扰动或故障时的电网系统功率平衡出现变化，而惯量对电

网的支撑能力不足可导致系统启动低频减载等措施；如英国“8·9”大停电事故^[6]、欧洲大陆同步电网“1·8”解列事故^[7]的研究表明，需提升电源侧抗干扰能力，合理配置系统保护资源，加强电网频率特性及调频能力。在应对极端天气方面，结合美国得克萨斯州大停电事故分析，提出了我国新能源在适应气候环境、电力互济能力、电力预测与调度技术、标准体系制定等方面的发展建议^[8]。在电网形态构建方面，分析了我国电力系统网架结构在能源低碳转型发展中存在的稳定性问题，提出了交/直流联合运行3种发展模式并以“交流分区+直流组网”为优^[9]。

随着高比例新能源、高度电力电子化新型电力系统的构建，电力系统的安全稳定运行不仅面临来自源侧、网侧变化的直接挑战，而且受到荷、储、市场、技术等新增关键因素的影响。因此，为了实现能源有序低碳转型、新型电力系统安全发展，需立足国家能源安全的宏大背景，聚焦源、网、荷、储、市场、技术等主要影响因素，深入探讨新型电力系统安全发展的战略架构。针对于此，本文解析能源转型形势下的能源安全内涵，明确能源安全转型的目标、路径、支撑，分析能源安全与新型电力系统发展的关系；提出反映源、网、荷、储、市场、技术六大影响因素，包含应紧急预警、共享互济、安全防御三大技术体系的新型电力系统发展战略框架，以期促进新型电力系统安全发展、高质量建设等研究。

二、能源安全与新型电力系统发展

（一）能源安全的内涵与能源转型发展

1. 能源安全的内涵

20世纪70年代，因石油危机研究提出了能源安全概念；随后逐步形成了更为综合的能源安全概

念,主要包括能源资源的可利用性,能源资源的可获得性,环境的可接受性,能源成本的可承受性^[10]。在全球能源转型的新形势下,因极端天气、科技发展、地缘政治等因素影响,全球能源供应问题频发,如价格波动、供应趋紧等^[11],能源安全韧性的不足得以充分暴露。当前,我国进入了能源转型发展阶段,能源安全要求常态情况下的“长久安全”、极端情况下的“自主可控”;具体而言,可从供给安全、环境安全、经济安全、科技安全四方面把握其核心内涵。

供给安全是能源安全的基础。在传统能源系统中,石油供应是能源安全供应的核心内涵;而当今的能源体系,品种范围扩展至多种其他能源,纳入了能源供应链及基础设施,同时供给安全涉及的范围扩大至社会稳定、地缘政治、生态环境、经济福利等^[12]。我国作为世界最大的能源消费国,面临着较为严峻的能源安全形势。①传统能源供应风险增大,油气消费对外依存度居高不下,2021年的能源对外综合依存度达到20%(其中原油、天然气消费分别超过70%、40%)^[13],油气消费的持续增长将放大传统能源安全风险。②新能源的安全风险逐步显现,能源系统受极端气候的影响更为明显,如2022年夏季四川省面临持续高温,水电日发电能力下降超过50%,全天电力电量“双缺”,每天外省入川支援电力约 6×10^6 kW仍无法对冲电力缺口^[14]。③未来新能源规模的扩大,对矿产资源的需求保持高速增长并将呈现多样化^[15],而部分关键矿产资源的对外依存度已超过80%^[16]。

环境安全是在适应生存的基础上反映人与环境和谐程度的量度,兼顾能源系统的绿色低碳发展才能更好实现“双碳”目标。化石能源燃烧产生的大量 SO_2 、烟尘等气体和固体污染物,导致雾霾、酸雨、土壤、水资源污染等现象。以煤为主体的能源结构带来了温室气体排放量的持续增加,我国2021年能源产生的 CO_2 排放量约为 1.087×10^{10} t,占世界总量的32.1%^[17];加之碳中和过程的窗口期偏短(全球从碳达峰到碳中和平均用时为53年,我国仅有30年时间),实现碳中和目标可谓时间紧、任务重。此外,我国的单位国内生产总值产生的 CO_2 强度较高,主要原因是煤炭在能源结构中占据主导地位,如2021年煤炭在一次能源消费结构中的占比达到56%^[13]。整体来看,“偏煤”的能源结构凸显了减碳与保供的矛盾,能源转型节奏把握难度较大,局部

地区易因煤电供应不足出现规模性的“拉闸限电”。

经济安全指妥善解决能源价格日益上涨、稳定能源价格需求迫切之间的矛盾。近年来,受产业发展、国际形势等因素的影响,能源价格波动幅度加大,一次能源、关键矿产资源价格高启,抬高了能源转型成本,如锂的价格快速和大幅波动(1年时间价格上涨7倍多)。能源体系中新能源占比的提升推动了终端用能成本的增长,而随着碳市场的深化发展,化石能源使用成本也将随之走高,直接影响经济市场体系的运转稳定性。

科技安全是能源安全的根本保障。当前,我国能源安全的重点领域中存在诸多技术薄弱环节,如煤炭清洁利用与转换,新能源核心技术,先进核电技术,智能电网,智慧矿山,氢能产业链关键技术与装备,天然气上游勘探开发,现代煤化工(技术、装备、催化剂)等。着力补齐能源发展的技术短板,引领新兴领域前沿技术发展,才能保障能源科技自主可控与高质量发展。

2. 能源转型发展

我国能源转型将经历数十年的漫长过程,战略任务是支撑“双碳”目标实现,将能源消费结构从以煤炭为主的“一大三小”(煤炭、石油、天然气、新能源)向以新能源为主的“三小一大”(煤炭、石油、天然气,新能源)转型^[18]。基于统筹“双碳”目标实现与能源安全转型的考虑,能源转型过程可分为3个阶段。①过渡期(2021—2030年),降低煤炭消费量,在2030年前后达到峰值(5.9×10^9 tce),之后转为下降趋势;控制石油消费量,提高天然气消费量,有序发展核能,积极发展可再生能源,非化石能源在一次能源消费中的占比保持在25%左右。②转型期(2031—2050年),以非化石能源加速替代化石能源,实现节能提效方面的整体突破,非化石能源在一次能源消费中的占比稳步提高到75%。③发展期(2051—2060年),非化石能源实现主体替代,在一次能源消费中的占比平稳增长到90%,新能源成为主体消费能源^[19]。

为了支持能源安全转型,需着力攻克能源生产、传输、消费等主要环节的核心关键技术。①在能源生产环节,逐步由“稳煤”向“减煤”过渡,发展更为先进的燃煤发电技术,提升煤炭清洁利用效率,研究碳捕捉、碳收集等负碳技术;加大石油替代力度,控制石油消费量增长,加快发展天然气(消

费增长 $2 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$)；提高核能装备、风能与太阳能等清洁能源技术水平，探索变革性光伏发电技术。②在能源传输环节，规模化发展天然气并实现消费量达峰，整体性提升节能提效水平，促进煤电兜底，石油平稳过渡，碳捕集、利用与封存（CCUS）规模化推广；形成新型电力系统构建基础理论与关键技术体系，突破柔性输电装备及其器件材料、绿色氢能与储能等技术。③在能源消费环节，非化石能源实现主体替代，高碳化石能源回归原料属性，天然气与可再生能源融合发展，气电成为新能源发电的互补类型；推动CCUS规模化商业应用，发展多能流综合利用、供需互动、数字化与智能化等技术。

（二）新型电力系统安全的重要性

电能是清洁、高效、便利的二次能源，2040年电力将超过原油成为主要能源资源^[20]。电力系统是一次和二次能源转换的枢纽，当前规模最大、层次复杂、强非线性的人造系统，规划建设新型能源体系、实现能源安全转型的关键领域。新型电力系统安全作为能源安全的核心要素，在能源供给安全、环境安全、经济安全、科技安全等方面发挥着重要作用。

我国是能源消费大国和进口大国。石油、天然气等对外依存度较高的化石能源，主要依靠自身物质燃烧产生能量，而风能、太阳能等新能源的主要利用形式是转化为电力。显著提升新能源电力在能源消费中的占比，实现电力系统以化石能源为主体向以新能源为主体的平稳转型，有利于科学发挥我

国能源资源的禀赋优势、降低能源资源的对外依存度，从而显著增强能源安全保障能力。

目前在世界范围内，电力行业既是最大的CO₂排放来源^[21]，也是能够通过风能、太阳能等可再生能源引导转向净零排放的关键行业。交通、制造业、建筑等其他行业的减碳和脱碳工作，也直接依赖电能替代等手段。

电力是市场经济的重要组成部分，支撑医疗、金融、交通等诸多关键行业的发展。电力市场的健康发展，将有力推动国际能源市场、碳市场的有序过渡及安全转型。

电力系统安全发展面临的技术挑战，是能源安全转型亟待解决的关键难题。支撑能源转型与能源安全的重要动力之一即为电力系统安全发展核心技术取得突破。

三、新型电力系统安全发展的影响因素

新型电力系统是实现“双碳”目标、重塑能源安全格局的重要载体，构建新型电力系统是提高能源安全韧性的根本性举措。新型电力系统的安全发展主要受到源、网、荷、储、市场、技术六大因素的综合影响（见图1）。

（一）从电源层面保障安全

未来我国的电源结构将形成“风光”领跑、多元协调的格局。预计2030年，风能和太阳能将合并成为第一大装机主体，2045年合并发电量将超过火

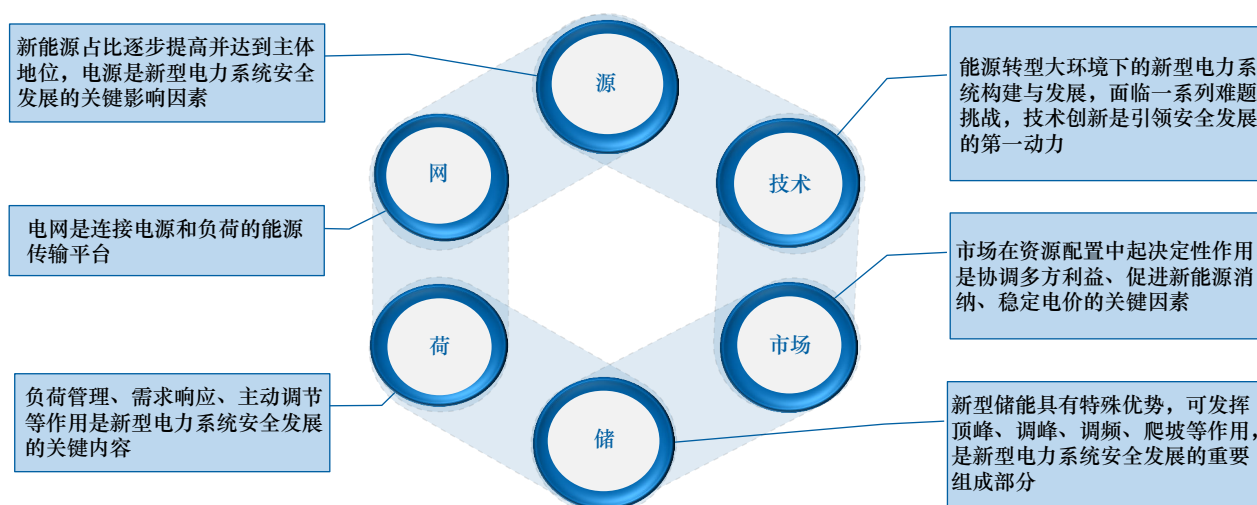


图1 新型电力系统安全发展的六大影响因素

电成为第一发电量主体。常规水电、抽水蓄能在2045年将基本开发完毕,规模约为 6.9×10^8 kW;核电将在2050年达峰,规模约为 2.3×10^8 kW;若将内陆核电包含在内,2060年将增长至 4×10^8 kW^[22]。根据国网智能电网研究院有限公司开发的“电力系统碳中和路径优化程序”分析结果,我国非化石能源装机占比将从2020年的46%^[23]提高到2030年的57%、2060年的88% (见图2)。因此,稳步推进电源结构清洁化转型并构建新型能源供应体系,是保障新型电力系统在电源层面安全发展的首要措施。

不宜简单“一刀切”地对待传统能源发电,而需将之与新型能源实现协同发展。煤炭是我国能够自主可控、具有储量优势的一次能源类型,保留必要的煤电装机容量,在新能源连续出力水平低的特殊条件下可起到兜底保障作用。合理预计,2030年我国煤电将达到峰值(装机容量约为 1.37×10^9 kW),随后进入快速下降通道,从主体电源转向调节性和保障性电源;与新能源发电优化组合,平稳有序地实现能源体系转型。准确界定煤电发展定位,发挥煤炭兜底保障与战略资源作用,以有效降低高比例新能源接入系统的保供压力,支持化石能源发电逐步转型为系统调节性和基础保障性电源。这是保障新型电力系统安全发展的应有之义。

燃气发电具有灵活启停、响应迅速、可季节性调峰等优势,在近中期较煤电不具有成本优势;但考虑碳排放+CCUS的应用成本后,在远期的成本差距将显著缩小。可突出天然气与新能源适宜密切协同的特征,通过煤电/气电优化配置起到电力供应安全的托底作用。

目前,我国电力系统的灵活性资源容量约为 7.7×10^8 kW,未来随着常规能源装机量占比的持续下降,对灵活性资源的需求将逐步增加。灵活性

资源预计2030年开始由盈余转为不足(缺口约为 8.6×10^7 kW^[23]),2060年的缺口将进一步扩大。发展多元化的灵活性调节电源是实现新型电力系统安全稳定运行的重要保障。

(二) 从电网层面保障安全

我国幅员辽阔,不同地域的自然资源禀赋差异明显。西部和北部地区的新能源装机占比超过66%,而东中部地区的负荷比重长期维持在60%左右,区域性的供需逆向分布格局凸显。大容量、远距离输电的基本需求长期存在,跨省区输电通道规模将由2020年的 2.7×10^8 kW增长到2060年的 $7 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ kW^[24];跨省电网柔性共享和互济的需求也将进一步增加,未来省间潮流多为双向输送。

在现有的技术条件下,电网受频率约束导致对新能源的承载规模受限;未来“交流分区、直流成网、交/直流分网”将是电网发展极具潜力的模式。加强电网柔性互联和互济、提升新能源安全承载能力,是支撑新型电力系统安全发展的重要途径。

为了实现不同能源体系内部、相关能源体系之间的融合,需将电力安全防御系统的数据采集、知识提取、决策支持等环节进行拓展,覆盖一次能源、环境、信息等系统。考虑不同能源体系之间的交互影响以应对电力系统外部状态的不确定性,也是“双碳”目标下保障能源安全发展的必然要求。

(三) 从负荷层面保障安全

在灵活性电源和柔性电网之外,需求侧响应也是保障电力系统灵活调节与安全运行的重要资源。未来电力系统负荷弹性化的趋势更为明显,分布式电源占比持续提高(如光伏发电的可开发容量为 3.7×10^9 kW),越来越多的用户成为“产消者”。负

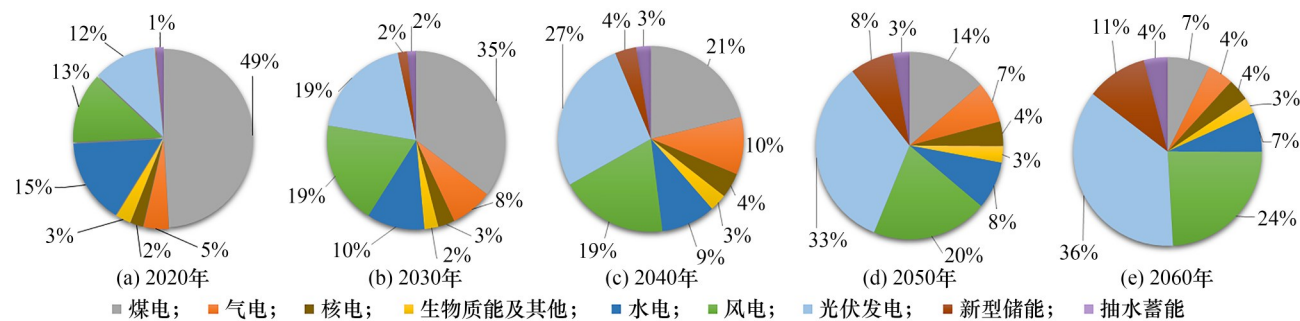


图2 各类型电源装机容量 (2020—2060年)

荷聚合商快速发展，预计2030年、2060年的需求侧响应分别可达 1.2×10^8 kW、 3.5×10^8 kW，各占最大负荷的7%、15%^[22]。

随着数字化水平的提升，未来可控负荷发展空间极大。在我国部分地区，空调负荷在夏季尖峰负荷中的占比甚至超过40%；商业空调的可调节性更强，在主流温度区间每调高1℃可降低用电负荷约10%。预计2030年、2060年我国电动汽车用电分别占社会用电量的3.5%、11.5%，2030年电动汽车有序充电以及电动汽车给电网送电方式的理论调峰潜力约为 6×10^7 kW^[22]，相当于三峡工程装机容量的3倍，约占整个电网最大负荷的3.3%。预计2030年我国数据中心用电量占社会总用电量的5%，需通过“东数西算”工程来显著改善绿色能源使用比例，缓解资源与负荷的时空矛盾。也要注意，网络恶意攻击等手段可能导致电力系统中的设备和过程失去控制，需针对突发情况提升电力系统网络的安全防御能力，切实支撑供需双向互动。

（四）从储能层面保障安全

推动多形式储能发展，提升供应链安全保障水平，支撑电力电量的时空平衡。在当前及未来一段时期内，以抽水蓄能为主体的储能技术可满足日内平衡需求，抽水蓄能装机容量将持续增长；以电化学储能为代表的新型储能容量快速增加，伴随大规模储能技术实现突破，将实现日以上的平衡调节。预计2030年抽水蓄能装机容量为 1.2×10^8 kW，新型储能容量为 1×10^8 kW；2060年抽水蓄能的装机容量约为 4.5×10^8 kW，新型储能装机容量约为 3×10^8 kW；在中长期，氢能将发挥长时段储能作用，2040年、2060年电解水制氢可分别实现 8×10^{11} kW·h、 2.4×10^{12} kW·h的电量转移，未来电制氢可作为跨季平衡模式^[22]。

在极端气象条件下，新能源电力供给与短期负荷高峰之间的供需不平衡被进一步放大，未来高比例新能源接入的新型电力系统对调峰缺口的弥补需求也将显著增长。2030年前，抽水蓄能作为最具经济性和可靠性的储能形式得到推广应用，形成以抽水蓄能、灵活煤电及气电为主要手段的调节形式。随着储能技术的发展，2030年后新型储能（含氢能）与灵活煤电及气电保持协调发展，可满足系统调节的缺口需求。2040年后，抽水蓄能、电化学储

能、压缩空气储能成为主力储能形式。

未来20年，由于储能电池应用规模的扩大，锂资源的需求量甚至攀升至当前的40倍。电动汽车所需的铜材料是内燃机汽车的4倍。因此，关键矿产供应链安全及成本问题也成为构建新型电力系统的新增风险因素。

（五）从市场层面保障安全

新型电力系统的安全稳定运行需要多层次的体系与机制，才能适应新型电网形态和各类电源角色的转变。构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，需要推进全国统一电力市场建设，形成电力系统大范围内的共享互济能力。以电力市场为载体，推动电力资源在全国范围内的优化配置，促进新能源在更大范围内的充分消纳并保持灵活资源的共享互济；健全调峰等辅助服务补偿及跨省区交易机制，支持大范围内输电通道安全运行及调峰资源高效平稳配置。构建多层次的统一电力市场，逐步融合省间与省内电力市场，便于各类市场主体通过分散资源聚合平台等形式参与统一电力市场。实现电力资源价格稳定与大范围安全交易，是充分发挥电网共享互济功能、保障新型电力系统安全有序运行的必要手段。

（六）从技术层面保障安全

着眼能源安全格局，为实现源、网、荷、储、市场等环节的转型升级，需要攻克核心关键技术、探索前沿新兴技术，为新型电力系统建设筑牢科技支撑。重点研究新型电力系统的基础共性、战略性、前沿性技术，新型高端装备、系统、器件、新材料等方面的基础理论，聚焦新能源“构网”主动支撑、大规模远距离新能源发电送出、储能支撑电网安全运行、源网荷储资源协调控制、新型电力系统仿真评估与故障防御等关键技术，构建涵盖源、网、荷、储、市场等要素的新型电力系统关键技术体系，支持破解未来电力系统“安全保障、供应可及、环境可持续”的矛盾三角。

四、新型电力系统安全发展战略框架

在能源安全格局下发展新型电力系统，需在突破源侧托底保供、网侧互联互通、荷侧需求响应、

储能调峰支撑、市场机制升级、技术全面攻关六大关键因素的基础上，围绕应对极端天气、大范围资源互济、跨能源调节三方面重大需求，构建应急预案、共享互济、安全防御三大技术体系，形成新型电力系统安全发展战略框架（见图3）并据此规划能源安全格局下的新型电力系统发展路径。

（一）极端天气下的应急预案体系

在供需结构方面，基于极端气象特征、气象发展趋势研究成果，分析极端天气下新能源波动、负荷可调节的电力供需平衡场景，攻关电力供需保障技术，构建电力系统应急组织机制，提出电力系统在极端天气下的应急预案体系。

新能源出力具有波动性，高比例新能源接入的新型电力系统，其功率和能量灵活平衡需求显著提高；极端天气频发趋势将进一步放大新能源发电随机性及波动性对电力系统安全运行的不利影响。针对全球气候变暖趋势，研究我国大型新能源基地、负荷中心等送受端地区的极端气象特征与演变趋势，揭示典型极端气象场景影响电力供给及负荷需求侧的作用机理与传导机制。结合高温、台风、雷电等极端天气的历史事件，新能源的出力特性、负荷特性，分析极端天气频发条件下的电力供需平衡场景与风险；从组织、管理、技术等维度，形成应

对极端气象的电力供需保障技术框架与应急组织机制（见图4）。

（二）大范围资源共享互济支撑体系

在资源配置模式方面，采取定量仿真、定性分析、综合评估等方式，根据生产运行模拟平台、电力现货市场仿真平台的结果，融合电网形态及市场形态数据分析，论证形成新型能源体系下电网互济模式及相应的市场支撑机制，从而构建新型电力系统资源互济模式、全国统一电力能源大市场框架相互支撑的大范围共享互济体系。

我国能源资源、用电需求具有逆向分布特征，加之新型电力系统中新能源占比提高对系统灵活性提出更高需求，未来电网在全国大范围内的灵活资源共享互济需求将进一步加大。构建全国统一电力市场是实现电力资源大范围优化配置、促进新能源高比例消纳的重要途径。在全国统一能源大市场的基础上，围绕市场区域演变路径，从电网供给安全、运行安全维度着手，研究电网大范围内资源共享互济的面临挑战、解决经验、成熟模式。依托专业平台开展仿真，细致分析未来新型能源体系下的电网形态与市场格局；统筹电网互济模式和市场化机制设计，形成新型电力系统资源互济模式以及不同尺度范围的电力市场支撑机制（见图5）。

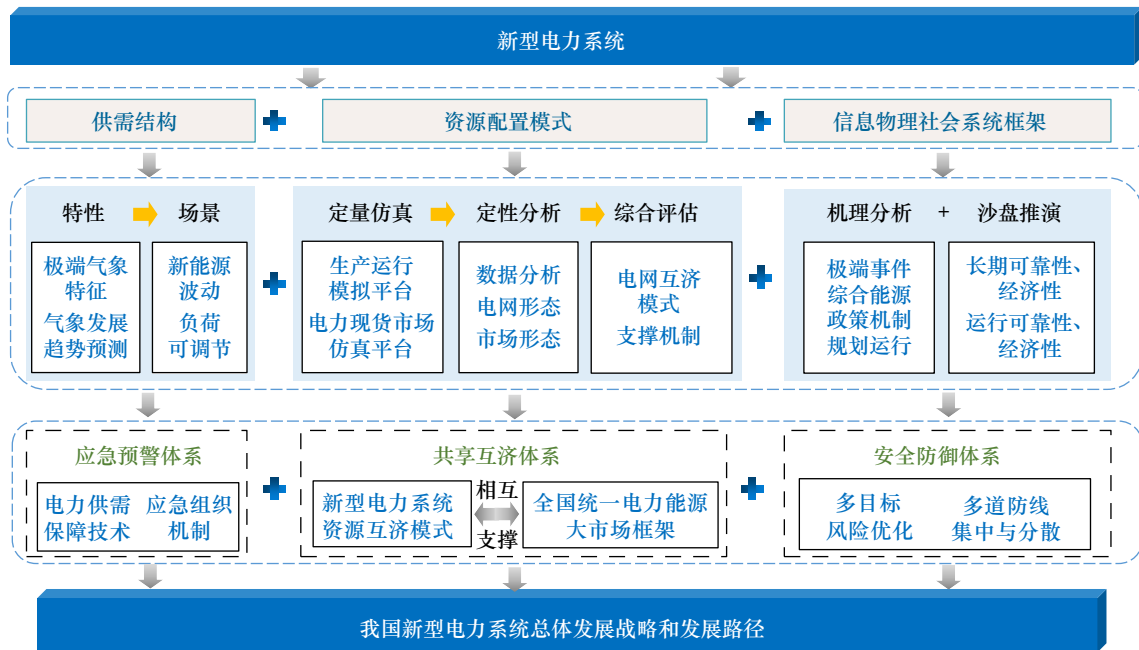


图3 新型电力系统安全发展战略研究框架

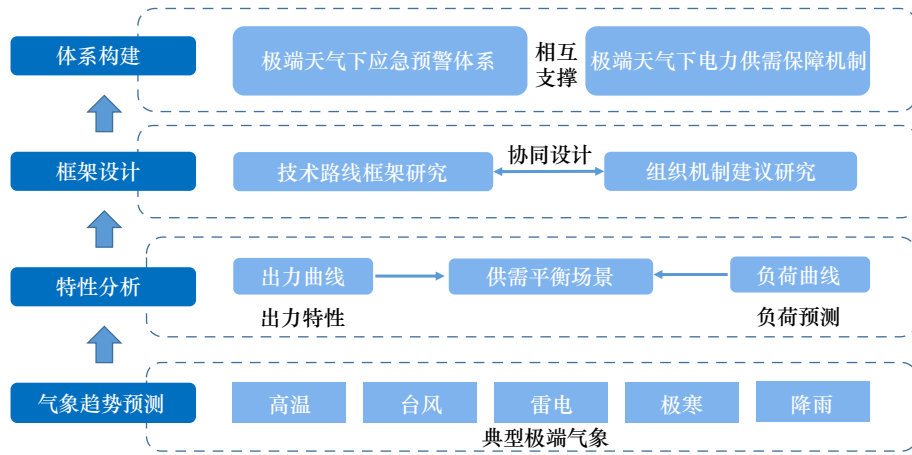


图4 极端天气应急预案体系构建

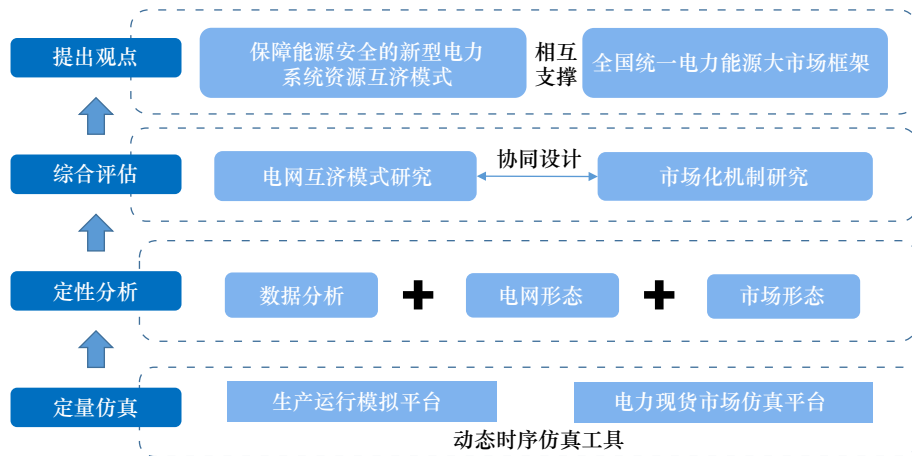


图5 大范围资源共享互济支撑体系构建

（三）可调节资源互动的安全防御体系

在信息物理社会系统框架方面，采用机理分析和沙盘推演手段，开展极端事件、综合能源、政策机制、规划运行的“时-空-物”要素分析；研究不确定性因素对能源-电力可靠性及经济性的影响规律，构建覆盖电力系统运行过程，具有多类目标、多道防线能力的电力安全主动防御体系。

电力与能源、生态环境、社会等系统关系紧密，电力系统与其他系统的互联互通、灵活互补是电力安全防御的关键内容。将电力安全防御系统的数据采集、知识提取、决策支持等能力推广应用到一次能源、环境、市场等机制中，实现电力系统与信息系统、广义物理环境、社会系统之间的灵活交互，从而将电力系统拓展为信息-物理-社会-能源系统。考虑能源、环境、经济、社会、人类行为

的协调效应，突出电力系统安全运行需求，分析极端情况下电力系统主动支撑能源安全的“时-空-物”要素并提出应对策略；建立多时空尺度、跨领域的综合研究框架，将多个单一研究领域进行有机整合，形成基于能源-信息-物理-社会系统框架的自适应电力安全主动防御体系（见图6）。

（四）新型电力系统安全发展战略路径

新型电力系统安全性的提升，需要不同领域的科技进步以及交叉融合，也离不开电力系统具体业务工作（如规划、运行、交易、政策）的丰富实践。从电力安全供应、电网安全运行维度着手，将极端天气纳入电力系统规划与安全运行的范围，开展包括正常情况和极端条件在内的多情景分析。以常态情景下的“长久安全”、极端情景下的“自主可控”为目标，综合极端天气电力供需应急预警、

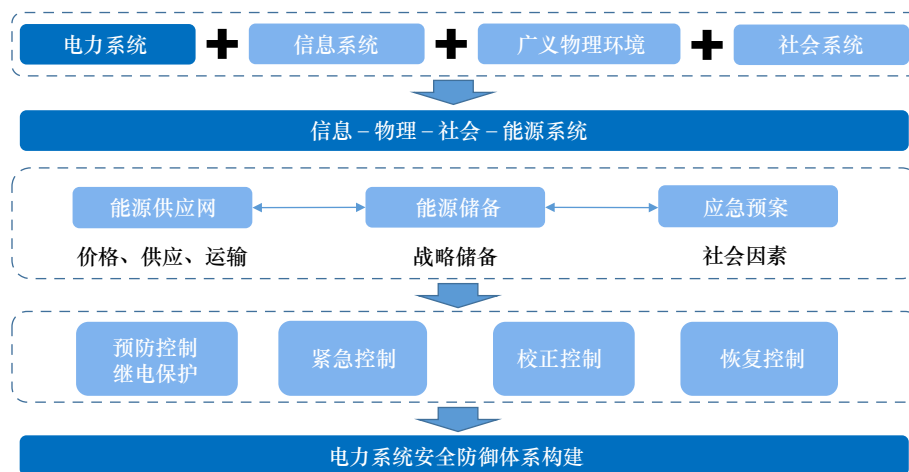


图6 跨能源电力安全防御体系构建

电网大范围资源共享互济、跨能源电力安全主动防御以及相应的支撑体系，形成能源安全格局下新型电力系统发展战略路径（见图7）。

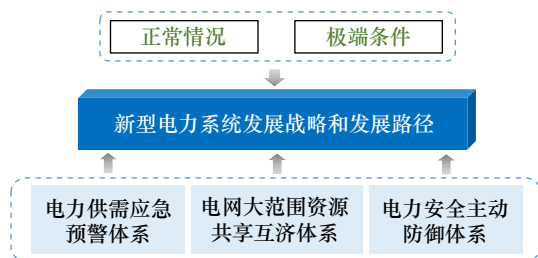


图7 新型电力系统发展战略路径构建

五、结语

本文立足当前能源安全格局形势，对未来新型电力系统的发展战略框架进行了探析。通过探讨能源安全内涵与能源转型发展要素，分析了新型电力系统安全发展的重要意义；以突破源侧、网侧、负荷、储能、市场、技术六大关键环节为切入点，从应急预警、共享互济、安全防御3个维度，论证提出了“三大体系+战略路径”的新型电力系统安全发展战略框架。相关成果可为我国新型电力系统构建，安全稳定运行理论、方法、机制的研究与实践提供参考及借鉴。

在“双碳”目标下，我国能源电力绿色转型持续加速推进，新型电力系统的构建与发展需要更多关注电力供需平衡、应急共享互济、电力市场稳定等安全问题；也需在科学而明确的战略研

究框架下，针对不同转型阶段实现新型电力系统发展路径的动态调整与多目标平衡。立足全局，稳步构建新型电力安全运行体系，支撑能源绿色低碳转型如期实现。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 17, 2023; **Revised date:** March 24, 2023

Corresponding author: Lin Junjie is a senior engineer from the State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd. His major research field is power system analysis and planning. E-mail: linjunjie_1991@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05)

参考文献

- [1] 吴智勇. 碳达峰碳中和目标下我国能源低碳转型思路初探 [J]. 中国能源, 2022, 44(9): 51–56.
Wu Z Y. Research on energy low-carbon transition in China based on carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Energy of China, 2022, 44(9): 51–56.
- [2] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117–3125.
Xin B A, Shan B G, Li Q H, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117–3125.
- [3] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61–69.
Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61–69.
- [4] 郭剑波. 科技创新支撑新型电力系统构建 [J]. 国家电网, 2021 (5): 18–20.
Guo J B. Scientific and technological innovation supports the construction of new power system [J]. State Grid, 2021 (5): 18–20.

- [5] Xue Y S. Active support of power system to energy transition [J]. *Engineering*, 2021, 7(8): 1035–1036.
- [6] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6183–6191.
Sun H D, Xu T, Guo Q, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2019, 39(21): 6183–6191.
- [7] 孙为民, 张一驰, 张晓涵, 等. 欧洲大陆同步电网“1·8”解列事故分析及启示 [J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2630–2637.
Sun W M, Zhang Y C, Zhang X H, et al. Analysis and lessons of disconnection accident of synchronous power grid in continental European area (on January 8, 2021) [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2630–2637.
- [8] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4033–4042.
Wang W S, Lin W F, He G Q, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2021, 41(12): 4033–4042.
- [9] 贺之渊, 杨杰, 吴亚楠, 等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 99–113.
He Z Y, Yang J, Wu Y N, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2023, 43(1): 99–113.
- [10] 姬强, 张大永. “双碳”目标下我国能源安全体系构建思路探析 [J]. *国家治理*, 2022 (18): 22–26.
Ji Q, Zhang D Y. Exploring the approaches to constructing China’s energy security system under the carbon peak and neutrality goals [J]. *Governance*, 2022 (18): 22–26.
- [11] 刘泽洪, 阎志鹏, 侯宇. 俄乌冲突对世界能源发展的影响与启示 [J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(4): 309–317.
Liu Z H, Yan Z P, Hou Y. The impact and implication of Russia–Ukraine conflict on world energy development [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(4): 309–317.
- [12] 王建良, 唐旭. 大变局下的中国能源安全: 挑战与破局 [J]. *国家治理*, 2022 (20): 52–55.
Wang J L, Tang X. China’s energy security under the changes unseen in a century: Challenges and breakthroughs [J]. *Governance*, 2022 (20): 52–55.
- [13] 周守为, 朱军龙, 李清平, 等. 科学稳妥实现“双碳”目标, 积极推进能源强国建设 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(12): 1–11.
Zhou S W, Zhu J L, Li Q P, et al. Scientifically and prudently achieving the goals of peak carbon emissions and carbon neutrality, actively promoting the construction of an energy power [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12): 1–11.
- [14] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望 [EB/OL]. (2022-12-16)[2023-02-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971>.
- Gao H J, Guo M H, Liu J Y, et al. Power supply challenges and prospects in new-generation power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [EB/OL]. (2022-12-16)[2023-02-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971>.
- [15] International Energy Agency. The role of critical minerals in clean energy transitions [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [16] 张生辉, 王振涛, 李永胜, 等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局 [J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(5): 138–168.
Zhang S H, Wang Z T, Li Y S, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(5): 138–168.
- [17] BP Amoco. Statistical review of world energy(2022 edition) [R]. London: BP Amoco, 2022.
- [18] 戴厚良, 苏义脑, 刘吉臻, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略思考 [J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(1): 1–8.
Dai H L, Su Y N, Liu J Z, et al. Thinking of China’s energy development strategy under carbon neutrality goal [J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022, 41(1): 1–8.
- [19] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术 [J]. *中国电力企业管理*, 2021 (31): 14–17.
Zhou X X, Zhao Q, Zhang Y Q. Development prospects and key technologies of Chinese energy and power system under the “double carbon” goal [J]. *China Power Enterprise Management*, 2021 (31): 14–17.
- [20] International Energy Agency. Power systems in transition: Challenges and opportunities ahead for electricity security [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [21] International Energy Agency. Electricity market report 2023 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [22] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2021 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
State Grid Energy Research Institute. China energy & electricity outlook 2021 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [23] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(19): 6919–6930.
Xin B A, Chen M, Zhao P, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 6919–6930.
- [24] 孔力, 裴玮, 饶建业, 等. 建设新型电力系统促进实现碳中和 [J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 522–528.
Kong L, Pei W, Rao J Y, et al. Build new power system to promote carbon neutrality [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 522–528.