

碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望

张智刚¹, 康重庆^{2*}

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100031;

2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Challenges and Prospects for Constructing the New-type Power System Towards a Carbon Neutrality Future

ZHANG Zhigang¹, KANG Chongqing^{2*}

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China; 2. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Building a clean low-carbon energy dominated energy supply system and forming a new-type power system is the key to achieving the target of carbon neutrality. Transiting from a fossil-fuel-dominated system to a clean-energy-dominated system, the power system faces multiple challenges and evolution including new power balance mechanisms, complex security problems, and cost allocation principles. The connotation and features of the new-type power system were revealed from the aspects including structure, morphology, technology and mechanism. The evolution path of new-type power system was also analyzed. Finally, the development suggestions and prospects for the construction of new-type power system were put forward.

KEY WORDS: new-type power system; carbon peaking; carbon neutrality; renewable energy; low-carbon transition

摘要: 构建以清洁低碳能源为主体的能源供应体系, 建设新型电力系统是实现碳中和目标的关键举措。电力系统从化石能源主导转变为清洁能源主导, 面临新型平衡体系、复杂安全机理、成本疏导机制等多重挑战与变革。该文从结构、形态、技术、机制 4 个方面分析新型电力系统的内涵与特征; 分析研判新型电力系统演化路径; 最后, 针对新型电力系统构建提出发展建议与展望。

关键词: 新型电力系统; 碳达峰; 碳中和; 新能源; 低碳转型

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130702); 国家电网公司科技项目(1400-202099500A-0-0-00)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program) (52130702); Science and Technology Project of State Grid Corporation (1400-202099500A-0-0-00).

0 引言

构建新型电力系统, 是贯彻落实我国能源安全新战略、实现“30·60”碳中和气候应对目标的重大需要。目前, 我国能源相关二氧化碳排放量每年约 100 亿吨, 约占全球碳排放总量的 1/3。我国煤炭消费约占全球总消费量的一半, 约占我国能源总消费的 57%。电力作为我国煤炭消费与碳排放占比最大的单一行业, 碳排放占比超过 40%^[1]。2020 年 9 月, 习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和^[2]。”2021 年 3 月, 习总书记在中央财经委员会第九次会议上提出构建新型电力系统的战略, 指出“要着力提高利用效能, 实施可再生能源替代行动, 深化电力体制改革”。2021 年 10 月, 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》提出“构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统, 推动清洁电力资源大范围优化配置”。因此, 大力发展新能源, 在新能源安全可靠的替代基础上, 传统能源逐步退出, 构建新型电力系统, 加快电力脱碳, 推动能源清洁转型, 是实现碳达峰、碳中和目标的必由之路。

大力发展以风能、太阳能为代表的新能源电力, 促进高比例可再生能源并网消纳, 将成为我国构建新型电力系统的当务之急。在过去的 20 年间, 我国实现了风电、光伏等新能源技术的跨越式发展。截至 2021 年, 我国风电、光伏发电容量均突

破 3 亿千瓦，装机规模均居世界首位。但风光发电量占比仅约 10%，现有电力系统结构形态与体制机制难以支撑更高比例的新能源并网消纳。预计到 2030 年，我国风光总装机容量将超过 12 亿千瓦，装机占比突破 50%，发电量占比将增长到 25%以上；到 2060 年，风光发电量占比预计进一步提升到约 60%^[3-4]。未来 40 年，大力发展风电、光伏等新能源，实现煤电从主体电源向保障电源的重大转变，统筹发展与安全，保障电力持续可靠供应，面临前所未有的挑战与变革。

引导绿色能源消费，提升终端电气化率是推动能源消费模式转型、实现能效提升与保障能源安全的必然选择。一直以来，我国经济增长过多依靠投资和出口拉动，高能耗产业发展过快，一次能源消费总量持续增加，2020 年达 49.8 亿吨标准煤。尽管我国能源供给侧结构性改革不断向清洁能源转型发展，但能源转化和利用效率偏低，较发达国家存在一定差距。2020 年电能占能源终端消费比重仅为 27%左右。近年来，能源消费环节积极推进“以电代煤、以电代油”的清洁电能替代技术，大力发展新能源汽车、燃料电池、分布式能源、微电网等技术，显著提升了能源终端电气化水平，支撑工业、交通等领域的自动化和智能化发展。为实现碳达峰、碳中和目标，到 2030 年电能占能源终端消费比重需达 40%左右，到 2060 年提升至 70%左右^[4]。未来 40 年，提高电能终端能源消费中的比重，实现再电气化，构建以电为核心的清洁能源体系，将迎来巨大的机遇与创新。

能源电力的生产、传输、消费方式面临根本性变革，新型电力系统是构建清洁低碳、安全高效现代能源体系的关键支撑技术^[5]。得益于我国近 10 年来特高压交直流技术的跨越式发展，全国交直流互联的坚强智能电网格局初步形成，新能源的集中式开发、规模化利用已成为实现我国能源资源大范围优化配置的重要手段。此外，我国中东部地区的海上风电和陆上分布式风光等资源蕴藏巨大储量，仅海上风电可开发资源就超过 5 亿千瓦，预计到 2030 年有望开发 1 亿千瓦。同时，随着电能替代技术的推广，诸如电动汽车、空调热泵、分布式储能等用户侧灵活可调资源的聚合汇总，负荷侧的角色将从被动转为主动。构建新型电力系统将呈现广域集中式与局部分布式发电并举的形态结构，源-网-荷-储协同的统筹运行与平衡机制，电碳协同的新型市

场机制与治理模式。新型电力系统真正意义进入了国际的“无人区”，亟待攻克“卡脖子”重大基础理论与关键核心技术^[6]。

综上所述，构建新型电力系统既面临巨大的挑战与变革，同时又迎来绝佳的机遇与创新。本文首先研究电力系统由于新能源比例不断提高而面临的新型平衡体系、复杂安全机理、成本疏导机制等多重挑战与变革；在此基础上，从结构、形态、技术、机制 4 个方面分析新型电力系统的内涵与特征；然后，分析研判新型电力系统演化路径，以低碳电力技术创新为驱动力，以电力体制改革为推手，逐步实现可再生能源对化石能源的替代，明确煤电保容减量的压舱石定位，统筹能源经济、安全与碳减排节奏。最后，针对新型电力系统构建提出发展建议与展望。

1 新型电力系统的挑战与变革

构建新型电力系统，需立足我国能源资源禀赋的基本国情，传统能源逐步退出要建立在新能源安全可靠的替代基础上。解决好新能源与传统能源、新能源与电网之间的矛盾，夯实电力系统稳定基础，需要从供给、消费、技术和机制各方面不断推动转型发展，面临新型平衡体系、复杂安全机理、成本疏导机制等多重挑战与变革，总结如图 1 所示。

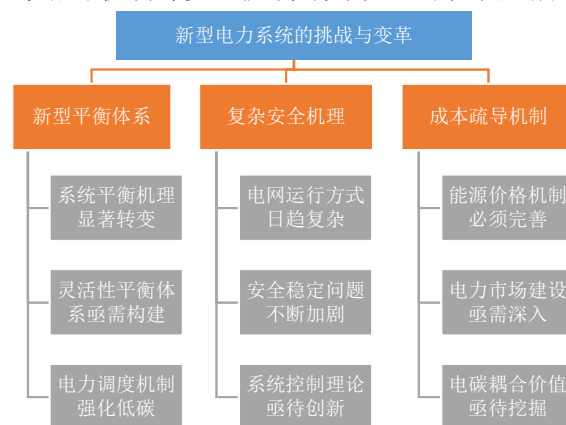


图 1 新型电力系统的挑战与变革

Fig. 1 Challenges and changes of new-type power system

1.1 新型平衡体系

1) 系统平衡机理显著转变。

在现阶段我国以煤电为主导的电力系统，电力电量平衡以及发电充裕度以确定性思路为主，依托“源随荷动”的平衡模式保障电力供需平衡，可再生能源出力仅作为电力系统的补充。随着新能源占比的不断提高，新型电力系统的电源结构将由可控连续出力的煤电装机占主导，向强不确定性、弱可

控性的新能源发电装机占主导转变^[7]。电力系统供需双侧均面临强不确定性,可再生能源与灵活负荷将承担一部分电力电量平衡的责任。电力电量平衡机理将向概率化、多区域、多主体的源网荷储协同的平衡模式转变。此外,电力电量平衡在不同时间尺度将凸显不同矛盾,呈现弃电与缺电风险并存的特点。长时间尺度凸显电量不平衡,新能源电量分布与负荷需求存在季节性不匹配,亟需加强跨省跨区互联,打造大范围资源优化配置平台,转向电、氢、热、气跨能源平衡;短时间尺度凸显电力不平衡,通过火电“退而不拆”,预留足够的可靠电力容量,保障电力供应安全可靠。

2) 灵活性平衡体系亟需构建。

随着新能源占比的不断提高,电力系统不仅需要保障电力电量平衡,还需要具备充裕的灵活调节性以应对新能源发电的强随机性与波动性^[8]。受限于“富煤、缺油、少气”的资源禀赋特征,我国一直面临灵活调节电源不足的局面,在西北部可再生能源富集地区,水电、抽蓄等快速调节电源严重匮乏,部分煤电机组冬季因承担供热负荷需“以热定电”运行,调节能力进一步下降。现有电力系统结构形态与平衡机制难以支撑更高比例的新能源并网消纳,亟需构建适应新型电力系统的灵活性平衡体系。一是传统火电机组需要实现从“主要能源供应者”向“灵活性资源提供者”的转变;二是加快推进包括抽蓄、储能、气电、光热电站、煤电灵活性改造等灵活调节资源建设;三是通过数字化与智能化转型,提升多元用户互动能力,聚合海量的分布式可控资源,挖掘用户侧灵活调节潜力;四是以坚强智能电网为枢纽平台,以源网荷储互动与多能互补为支撑,构建多时空尺度的电力灵活性供需平衡体系,提升新型电力系统的新能源消纳能力^[9]。

3) 电力调度机制强化低碳。

我国电力调度经历了“三公调度”、“经济调度”、“节能调度”等方式的演变。“三公调度”以“公平性”为目标,在确保各类设备发电完成率均匀性的原则下制定发电计划。“经济调度”以“经济性”为目标,以成本等微增率为原则制定发电计划,考虑了调度中“显性”的生产与运营成本。“节能调度”则以“节能性”为目标,优先调度可再生能源,并按火电机组能耗和污染物排放水平由低到高依次调用。“三公调度”和“经济调度”分别偏重于调度的“公平性”和“经济性”,没有考虑电

能生产对于环境、资源的巨大外部性。“节能调度”尽管将能源资源的消耗纳入发电计划决策之中,但没有考虑对于各类低碳电源的调度问题。面向碳中和目标,新型电力系统需要引入低碳目标,考虑经济-安全-绿色的综合效益,计及源-网-荷-储各环节的低碳要素,构建新型、科学、高效的“低碳电力调度”方式^[10]。

1.2 复杂安全机理

1) 电网运行方式日趋复杂。

现阶段我国以煤电为主导的电力系统,由于负荷变化相对有规律,整个电力系统的调度运行方式与电网潮流分布相对固定,在电力系统安全分析时,只需选取不同季节的典型运行工况。但是针对新型电力系统,一方面由于新能源出力与复杂随机气象因素的强相关性,另一方面由于新能源与新型负荷海量分布式并网的特点,电网调度运行方式与潮流分布将呈现随机化与多元化特点^[11],电网不仅仅承担电能传输的作用,而且将更多地承担电能互济、备用共享的职能。此外,电动汽车、分布式储能、需求响应在需求侧不断普及,将使得电力系统源荷界限模糊化,形成电力产消者,局部配电网将会发生潮流反转,向主网倒送功率,使得电网安全运行分析进一步复杂化^[12]。

2) 安全稳定问题不断加剧。

随着新能源大量替代常规电源,意味着电力系统中电力电子设备将不断增加,电力系统惯量持续下降,电力系统动态特性将发生深刻变化,支撑电网安全稳定的传统同质化大容量旋转设备日益稀缺,电网的安全稳定问题加剧^[13]。例如:电力电子设备过流耐受能力比同步发电机差,易发生故障连锁脱网;系统惯量下降将直接影响系统故障时的频率响应特性,进而影响系统频率稳定能力^[14];电力电子设备对电网动态无功主动支撑能力弱,且新能源发电逐级升压接入电网,与主网的电气距离是常规机组的2~3倍,系统电压支撑与调节能力急剧下降;新能源的控制方式与电力电子设备的电磁暂态过程对同步电机转子运动产生深刻影响,功角稳定问题更为复杂^[15]。

3) 系统控制理论亟待创新。

随着新能源占比的不断提高,新能源通过电力电子设备并网,电网呈现交直流混联态势,涌现多样化的电力电子接口新型负荷与储能设备,新型电力系统的源-网-荷-储全环节都将呈现高度电力电

子化的趋势^[11]。电力电子装置具有低惯性、弱抗扰性和多时间尺度响应特性，导致电力系统的暂态特性与电压稳定难以用现有的经典理论解释与分析，电力系统呈现多失稳模式耦合的复杂特性，引入了宽频振荡等新形态稳定问题^[16]。此外，电力电子装置具有海量、碎片化、分布式的并网特点，但同时具有快速响应能力，控制策略多样化，迫切需要构建适应高比例电力电子化形态的电力系统稳定分析新理论与协同控制新技术。

1.3 成本疏导机制

1) 能源价格机制必须完善。

能源是关系我国经济社会发展全局的大事,保持能源长期稳定充足供给始终是一个必须高度重视的重大战略问题。让市场在资源配置中发挥决定性作用,这需要对价格进行改革以便给市场传递正确信号。新型电力系统的新能源占比较高,新能源普遍具有近零的低运行成本,导致电力系统具有低边际成本的特点。同时,由于新能源存在间歇性与不确定性的特点,需要更高的调频、备用、容量等需求,导致电力系统具有更高的系统成本特性。面对低边际成本和高系统成本的冲突,迫切需要革新能源价格机制,通过建立容量市场、增加辅助服务收益等合理途径疏导高系统成本,反映电力能源资源在不同时间空间的真实供需价值^[17]。除此之外,还需要建立不同品种能源价格联动机制,协调考虑能源价格弹性、油价和电价调整对通货膨胀影响、与弃风弃光有关的产业规划和激励机制问题。促进能源与电力行业全面、协调、可持续发展。

2) 电力市场建设亟需深入。

自2015年中发9号文发布后,我国进入新一轮电力体制改革,各地纷纷发力建设电力市场。目前,虽然各省已建立电力中长期市场,部分省份电力现货市场即将正式运行,但目前的建设仍存在诸多问题。其一,跨区跨省交易机制尚不完善,导致省间省内市场衔接差,存在省间市场壁垒,短时电力交易仅能在省内市场组织,难以充分发挥跨区跨省联网对于新能源的消纳作用,导致电力资源优化的范围较小;其二,缺乏适应新型电力系统转型的市场机制,对新型电力系统中重要的成员,包括风光等新能源、储能等新型市场主体,缺乏适应的市场机制与交易细则,难以充分激励新型市场主体参与市场,导致电力资源优化的广度有限;其三,缺乏支持源网荷储互动的市场机制,难以支撑新型电

力系统中的发输配用各个环节的市场主体灵活参与市场,包括分布式新能源、电动汽车、虚拟电厂、负荷聚集商在内的多种市场主体难以接入电力系统参与优化,导致电力资源优化的深度不足^[18-19]。

3) 电碳耦合价值亟待挖掘。

碳达峰、碳中和目标下,除能源的生产成本外,其环境价值也变得更为重要。具体的,新能源发电兼具低生产成本特性与高环境价值;而以煤电、气电为代表的传统能源,其生产成本适中,但环境价值较低。新型电力系统的市场机制应统筹考虑不同能源的生产成本与环境价值,通过调整价格机制、增加补贴税费、建立单独市场(如绿电市场),以实现市场经济运行与节能减排碳中和的多重目标^[20]。2021年9月7日,我国绿色电力交易试点正式启动后的首次交易完成,来自北京、江苏、辽宁等17个省份的259家市场主体达成79.35亿千瓦时的绿电交易,预计可减排二氧化碳607.18万吨。后续,绿电交易还将与我国绿证市场、碳市场等有序衔接,协同推动能源绿色转型。目前,我国新能源装机世界第一,未来将拥有世界上最大的新能源市场和碳市场。随着绿电交易的推进,市场规模预计将有大幅增长。

2 新型电力系统的核心内涵

应对新型电力系统面临的挑战与变革,需要立足国情,以低碳电力技术创新为驱动力,以电力体制改革为推手,统筹能源经济、安全与低碳,推动形成适合中国国情、有更强新能源消纳能力的新型电力系统。具体而言,新型电力系统是以确保能源电力安全为基本前提,以清洁能源为供给主体,绿电消费为主要目标,以电网为枢纽平台,以源网荷储互动及多能互补为支撑,具有绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动、数字赋能、经济高效等方面突出特点的电力系统。新型电力系统需要依托数字化技术,统筹源、网、荷、储资源,完善调度运行机制,多维度提升系统灵活调节能力、安全保障水平和综合运行效率,满足电力安全供应、绿色消费、经济高效的综合性目标。

新型电力系统的内涵可总结为低碳、安全、高效3个核心层面:

1) 适应大规模高比例新能源的低碳化电力系统。

低碳是新型电力系统的核心目标。电力系统作

为能源转型的中心环节,将承担着更加迫切和繁重的清洁低碳转型任务,仅依靠传统的电源侧和电网侧调节手段,已经难以满足新能源持续大规模并网消纳的需求。新型电力系统亟需激发负荷侧和新型储能技术等潜力,形成源网荷储协同消纳新能源的格局,适应大规模高比例新能源的持续开发利用需求。

2) 保障能源供需和防范风险的安全性电力系统。

安全是新型电力系统的基本要求。当前我国多区域交直流混联的大电网结构日趋复杂,间歇性、波动性新能源发电接入电网规模快速扩大,新型电力电子设备应用比例大幅提升,极大地改变了传统电力系统的运行规律和特性。同时,人为极端外力破坏或通过信息攻击手段引发电网大面积停电事故等非传统电力安全风险增加。新型电力系统必须在理论分析、控制方法、调节手段等方面创新发展,应对日益加大的各类风险和挑战,保持高度的安全性。

3) 全国统一电力市场优化的高效率电力系统。

高效是新型电力系统的关键要素。未来高比例新能源与海量用户接入电力系统,会为能源资源优化配置的效率带来重大挑战。新型电力系统将建设全国统一电力市场,实现更高的资源优化配置效率与更大的能源优化空间。未来,在市场架构上,将形成各层次电力市场协同运行、统一交易规则与技术标准、健全多层次的统一市场体系。在市场品种上,将进一步发挥中长期市场平衡供需、稳定预期的作用,引导现货市场更好地发现电力实时价格,建立涵盖电能量、辅助服务、发电权、输电权和容量等多交易品种的灵活开放式市场体系。建设适应能源结构转型的电力市场机制,形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系。

3 新型电力系统的关键特征

电力系统实现碳达峰、碳中和目标的过程,伴随着以化石能源为主导的传统电力系统向以清洁低碳能源为主导的新型电力系统的转型升级,电力系统的结构、形态、技术、机制将发生深刻转变,如图2所示。

3.1 结构特征

1) 清洁低碳电源为主体,化石能源为压舱石。

在电源侧,未来清洁低碳电源将成为主体,发电量占比达90%以上。未来电源主要分为3类,第

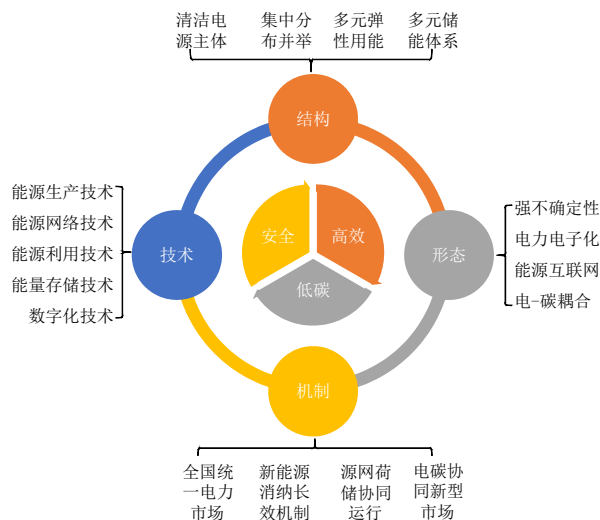


图2 新型电力系统的关键特征

Fig. 2 Key features of new-type power system

一类是具有强不确定性的可再生能源,包括风电、光伏、小水电等;第二类是可提供灵活性的可靠零碳电源,比如大中型水电、核电、生物质、光热、氢能发电等;第三类是保留的化石能源发电机组,近期通过灵活性改造用于系统调峰,远期加装碳捕集装置实现深度脱碳,同时提高“退而不拆”的应急备用煤电规模。未来将形成多元化的电力灵活性资源体系,清洁能源不仅是电量供应主体,并具备主动支撑能力,常规电源功能逐步转向调节与支撑。

2) 大电网和分布式并举的互联互动。

在电网侧,立足我国国情与资源禀赋,“西电东送、北电南送”的电力流分布持续强化,新能源开发呈现集中式与分布式并举的格局,电网结构将呈现“大电源、大电网”与“分布式系统”兼容互补,交直流混联大电网、柔直电网、主动配网、微电网等多种形态电网并存局面^[21]。电网不仅承担电能传输的作用,而且将更多地承担电能互济、备用共享的职能。配电网将从交流电网转为柔性交直流配网,还将接入分布式可再生能源、储能、电动汽车、需求响应等各种灵活性的“配套”资源,实现灵活性需求的就地平衡^[22]。

3) 终端用能多样化、弹性化与有源化。

在负荷侧,随着能源消费结构与产业结构调整,电气化水平将不断提升,高耗能工业负荷将减少,数据中心、电动汽车等将大幅增长,电制氢、储能、智能电器等交互式用能设备将广泛接入和应用,未来负荷种类将呈多元化特点。同时,终端用能弹性将显著增强,一方面伴随数字化与智能化转型,海量用户聚合下的双向互动与需求响应将成为常态,

另一方面通过电-热-冷-气等不同能源消费的协同互动与优化,实现不同能源负荷的弹性替代,灵活可控负荷将成为电力灵活性资源的重要组成部分。此外分布式能源、多能灵活转换等技术的广泛应用,终端负荷将从单一用能向有源微网转变^[22]。

4) 跨时空多元融合的共享储能体系。

在储能侧,不同环节、不同时间尺度、不同应用场景对储能的技术需求各不相同,发挥的功能也各有侧重。用户侧以大量接入的电动汽车作为短时储能,主要用于日内需求响应;电源侧配置以电化学储能为主的短时储能,适当开发通过储热具备调节能力的光热发电,用于平滑新能源出力,参与调频和日内调峰;以压缩空气、“电-氢(甲烷)-电”等作为长期储能,为系统提供长周期调节能力;电网侧配置以电化学、抽水蓄能等为主的短时储能,提供保障电网安全、应急备用、缓解输变电阻塞的调节能力。总的来说,新型电力系统将依托抽蓄、化学储能、光热储热、氢储能、压缩空气储能等多元储能技术体系,以电网为纽带,将独立分散的电网侧、电源侧、用户侧储能资源进行全网的优化配置,推动源-网-荷各环节储能能力全面释放,构建多元、融合、开放、共享的储能体系。

3.2 形态特征

1) 从确定性系统转向不确定性系统。

传统电力系统可通过调整发电机组出力满足需求侧随机波动的负荷需求,呈现供应侧可控、需求侧随机的特征^[11]。随着波动性和间歇性的风能和光伏发电为主的可再生能源在电源结构中占比持续增长,供应侧也将出现强随机波动的特性,能源电力系统将由传统的需求侧单侧随机系统向源-荷双侧随机系统演进。现有电力系统必须实现从“被动适应可再生能源并网带来的不确定性”的模式,转向“适应强不确定性的源网荷储协同互动”模式。

2) 从机电主导转向机电-电磁耦合。

新能源的并网、传输和消纳在源-网-荷端广泛引入电力电子装备,电力系统呈现显著的高比例新能源和高比例电力电子(“双高”)趋势。因此,电力系统基本特性正由旋转电机主导的机电暂态过程为主演变为由电力电子控制主导的机电-电磁耦合特性为主^[16]。电力电子装置具有低惯性、低短路容量、弱抗扰性和多时间尺度响应特性,导致“双高”电力系统的响应时间常数更小(毫微秒级)、动态频率范围更宽(上千 Hz)、运行控制要求更高。在

多种扰动情形下,系统的机电暂态和电磁振荡等多重因素交织影响,导致新型安全稳定问题凸显。例如,目前新能源基地出现的暂态电压支撑不足、风电机组高/低电压穿越性能不佳、从数 Hz 到数千 Hz 的宽频电磁振荡、多馈入直流换相失败等,给电力系统的安全高效运行带来巨大的挑战。

3) 从传统电力系统转向能源互联网。

伴随电力系统的数字化与智能化转型,新型电力系统将转向以智能电网为核心、可再生能源为基础、互联网为纽带,通过能源与信息高度融合,实现能源高效清洁利用的能源互联网形态^[23]。一是传统电网与智能化技术广泛融合,发挥先进输电技术,将传统电网升级为具有强大能源资源优化配置功能的智能化平台;二是采用先进的信息技术、智能终端和平台,使得能量和信息双向流动,提升电网可观性与可控性,支撑源-网-荷-储的高效互动,提升高比例新能源的消纳能力;三是将分布式发电、储能系统、负荷等组成众多的微型能源网络,形成产消合一的新模式,挖掘释放负荷侧灵活调节潜力;四是打破行业壁垒,接纳各类市场主体,协助共享行业资源,实现产业互补,将新型电力系统打造为现代清洁能源高效利用体系的重要载体。

4) 从电视角转向电碳耦合视角。

面向双碳目标,未来电力系统的发展趋势与形态演化将转变为节能减排、低碳发展的“外力驱动”倒逼机制^[20]。一是各种宏观调控与经济手段的引入,包括减排立法、碳税、碳配额、碳交易机制等,将为电力行业未来的发展构建一个全新的宏观经济环境与政策环境,各类低碳技术的蓬勃发展更是为电力行业带来了新的机遇与挑战。二是低碳环境下,碳减排将成为电力行业可持续发展的重要目标之一,从而改变了电力行业的发展模式,并在行业内部各个环节引入“碳约束”;三是低碳理念的渗透与各类低碳要素的引入将使得电力行业呈现出明显的低碳特性与全新的运行模式,并广泛地影响电力系统的运行、投资、调度与规划等功能环节。

3.3 技术特征

1) 低碳清洁的能源生产技术。

在发电侧,新型电力系统需具备低碳清洁的能源生产技术特征。主要包括煤炭清洁高效灵活智能发电技术、先进风电技术、太阳能利用技术、负碳生物质技术、氢能技术以及核能技术等。以风电、太阳能为代表的非碳基能源将持续快速发展,生物

质能是目前已知有望实现负碳的能源生产技术,氢能技术有望与电力并重成为世界能源科技战略竞争焦点之一,核能发电技术是保障我国能源安全的战略性技术。

2) 安全高效的能源网络技术。

在电网侧,新型电力系统需具备安全高效的能源网络技术特征。主要包括高比例新能源并网支撑技术、新型电能传输技术、新型电网保护与安全防护技术、碳排放流技术等。高比例新能源并网支撑技术是实现大规模新能源并网稳定运行的关键;新型电能传输技术是支撑大规模电能广域高效配置的关键枢纽;继电保护与稳定控制系统共同组成电力系统的安全防御体系;碳排放流技术是实现精准电力碳排放追踪与计量的核心技术,可以支持碳计量终端研发,实现源侧、网侧、荷侧的实体碳表。

3) 能源高效利用技术。

在用户侧,新型电力系统需具备灵活高效的能源利用技术特征,主要包括柔性智能配电网技术、智能用电与供需互动技术、分布式低碳综合能源技术、电气化交通技术与工业能效提升技术等。柔性智能配电网技术是支撑用户侧分布式能源及多元负荷“即插即用”,负荷主动支撑并网的关键平台枢纽;智能用电与供需互动是挖掘用户灵活调节潜力,引导电力消费模式低碳转型的支撑技术;分布式低碳综合能源技术是实现多种异质能源子系统之间协同管理和互补互济,提高能源综合利用效率,推动分布式清洁能源就近消纳的支撑技术;电气化交通与工业能效提升是终端用能低碳转型的关键技术。

4) 能量高效存储技术。

在储能侧,新型电力系统需具备经济高效的能量存储技术特征。主要包括电化学储能技术、机械与电磁储能技术、抽水蓄能技术、异质能源存储技术、云储能技术等。电化学储能技术是目前发展最快、应用最广的储能技术之一;机械与电磁储能具有大功率、长寿命、安全可靠的特点;抽蓄技术是当今技术最成熟、经济性最好和大规模开发的储能技术;异质能源存储包括储热、储氢等技术,支撑不同能源形式之间的灵活转化与协同互济;云储能技术是支撑储能资源聚合共享、协同控制、价值分配的发展新模式。

5) 数字化支撑技术。

数字化技术是支撑构筑新型电力系统的关键

技术。数字化技术包括了现代信息技术、先进传感技术、人工智能和大数据技术,支撑构建具有智能化运行控制和运营管理,数字孪生全景展示与智能交互的新型电力系统^[24]。传感技术实现对物理实体全面感知,网络通信技术满足不同场景与应用的通信需求,云计算与大数据技术实现大容量数据存储、计算与知识发现,人工智能技术实现智能控制和智能管理,数字孪生技术实现智能优化与数字赋能。国网新能源云是国家电网公司数字化战略在新能源领域的典型实践,是新一代信息技术与新能源业务深度融合形成的新能源工业互联网平台。

3.4 机制特征

1) 全国统一电力市场机制。

一是国家市场、省(区、市)市场的协同运行,实现交易时序耦合、不同交易规则协同、交易结算流程有序,在全国范围内实现电力资源优化配置和共享互济。二是电力市场体系的功能进一步完善,中长期交易周期缩短、频次增加,现货市场稳定运行、各类优先发电主体及用户侧共同加入,调频及备用等辅助服务市场建立健全。三是建立适用于新型电力系统的电力市场体系,针对电力市场不同维度的需求,包括新能源参与中长期市场、容量补偿、灵活性爬坡、绿色电力交易、分布式发电市场化交易等,建立多种市场并实现多个市场间的有序衔接与互相补充。

2) 新能源消纳长效机制。

一是在电网保障消纳的基础上,通过源网荷储一体化、多能互补等途径,实现电源、电网、用户、储能各类市场主体共同承担清洁能源消纳责任的机制。二是统筹电源侧、电网侧、负荷侧的灵活调节资源,完善新能源调度机制,多维度提升电力系统的调节能力,保障调节能力与新能源开发利用规模匹配。三是要科学制定新能源合理利用率目标,要形成有利于新能源发展和新型电力系统整体优化的动态调整机制,各个地方风光资源不一样、负荷情况不一样、电源电网结构不一样,要因地制宜,制定各地区的目标,充分利用系统消纳能力,积极提升新能源发展空间。

3) 源网荷储协同运行机制。

源网荷储一体化是指通过优化整合本地资源,以先进技术突破和体制机制创新为支撑,探索源网荷储高度融合的电力系统发展路径,强调发挥负荷侧调节能力、就地就近灵活坚强发展及激发市场活

力，引导市场预期。随着能源互联网逐步建成，需求侧资源和储能将能够参与系统优化调节，源网荷储各环节间协调互动将成为常态。电力系统运行机制将由“源随荷动”转向“源荷互动”，统筹安排源、网、荷、储各环节的运行策略，充分发挥各类资源特点，以灵活高效的方式共同推动系统优化运行，促进清洁能源高效消纳。

4) 电碳协同新型市场机制。

市场是实现碳减排的关键手段。我国正稳步推进电力市场与碳市场建设。在电力市场中，通过建立有利于清洁能源优先消纳的交易机制，促进清洁电能的普及利用，推动能源系统的低碳发展；在碳市场中，通过限制企业允许排放的总量，达到控制碳排放的目的，推动各行业降低排放。两个市场都对促进社会碳减排、实现“双碳”目标发挥重要作用。电-碳市场将电力市场和碳市场的交易产品、管理机构、参与主体、市场机制等要素深度融合。在发电侧，发电成本与碳排放成本共同形成电-碳产品价格，通过价格动态调整不断提升清洁能源市场竞争力，促进清洁替代；在用能侧，建立电力与工业、建筑、交通等领域用能行业的关联交易机制，用能企业在能源采购时自动承担碳排放成本，形成清洁电能对化石能源的价格优势，激励用能侧电能替代

和电气化发展。电-碳市场以气候与能源协同治理为方向，能够将相对分散的气候与能源治理机制、参与主体进行整合，实现目标、路径、资源高效协同，有效解决当前两个市场单独运行存在的问题，提供科学减排方案与路径，激发全社会主动减排动力。

4 新型电力系统的演化路径

构建新型电力系统是一个复杂的系统工程，不可能一蹴而就，需要不断渐进演化，不同发展阶段要重点解决不同的基本矛盾，不同阶段在政策设计上要统筹兼顾好发展和减排、整体和局部、短期和中长期的关系。随着清洁能源比例的不断提高，在充分考虑煤电有序转型和气电适度发展需要的同时，积极安全有序发展核电，积极发展和友好消纳不同分布形态的新能源，并与不同发展阶段的技术特征、成本特性相适应。

总体来看，2030 年左右新能源发电装机有望达到 50%左右，以 2030 年为界可划分为两个阶段。2030 年以前，利用现有技术框架挖掘技术潜力，实现规模化储能应用，突破体制机制痛点。2030 年以后，大力推进技术创新，实现电源形态、电网形态、用电形态、体制机制等方面的深度变革。不同演化阶段的电力系统特性对比如表 1 所示。

表 1 不同演化阶段的电力系统特点对比

Table 1 Comparison of power system characteristics in different evolution stages

类别/阶段	碳达峰期	碳中和期
电源侧	新能源逐渐发展为装机主体，煤电保容减量， 转变为灵活调节电源	清洁能源发展成为电力电量主体、部分煤电“退而不拆”， 保障安全备用
电网侧	呈现大电网与分布式并举，总体维持较高转动惯量和 交流同步运行特点	交直流混联大电网、柔直电网、主动配网、 微电网等多种形态电网并存
负荷侧	清洁取暖等多种形式的电能替代加速、 电动汽车等可调节灵活负荷加快发展	与建筑、工业、交通等终端部门深度融合， 建成清洁智慧的未来能源互联网
储能侧	抽蓄与电化学储能快速发展	多尺度多技术类型的储能体系与共享模式
体制机制	基本建成全国统一电力市场体系	全面建成全国统一电力市场和电碳市场

1) 碳达峰期。

2021—2030 年为电力碳达峰期。电力系统碳排放努力先于能源系统进入峰值，然后快速下降。随着终端部门电气化进程快速推进，电力需求将持续增长，预计 2030 年达 10 万亿 kW·h 以上。新增电力需求力争全部由清洁能源满足，2030 年风光发电装机占比提升至 50%左右^[25-26]。

此阶段为传统电力系统转型期。电源形态方面，新能源将逐渐发展为电力装机主体，主要依靠

火电灵活性改造调峰、抽蓄与储能和跨区互联互通提供灵活性，支撑大规模风/光并网消纳。煤电的功能与定位转变为“保容减量”，成为支撑电力平衡与灵活调节功能的灵活性电源。电网形态方面，呈现大电网与分布式并举的特点，总体维持较高转动惯量和交流同步运行特点，交流与直流、大电网与微电网协同发展。用电形态方面，呈现灵活、多样化特点，清洁取暖、港口岸电、工业电锅炉等多种形式的电能替代加快发展。电动汽车、新型储能、

电供暖等可调节灵活负荷加快发展。体制机制方面,基本建成全国统一电力市场体系,统一交易规则和技术标准,破除市场壁垒,推进适应能源结构转型的电力市场机制建设。电碳市场形成较完备的交易产品、市场主体、关键机制,基本覆盖碳排放重点行业。

2) 碳中和期。

2031—2060年为电力碳中和期。电力系统碳排放快速下降,考虑碳捕集后电力生产实现净零排放。终端部门电气化率持续提升加之绿色电力制氢,都将使得电力需求持续增长,预计2060年达16万亿kW·h以上。非化石能源发电占比进一步提升,达到90%以上,保留一定煤电装机配备碳捕集做电力支撑与安全备用。清洁能源将发展为电量供应主体,全面建成新型电力系统^[25-26]。

此阶段为新型电力系统发展成熟期。电源形态方面,清洁能源发展成为电量主体,具备主动支撑能力,新能源以电/氢等多种二次能源形式传输和利用;退役煤电机组仍保留一定容量,保障安全备用,保留运行的煤电容量将很大程度上取决于碳捕集技术以及和负排放生物质发电技术的发展和运用;全面形成包括核电、水电、光热、储能、灵活负荷等的低碳多元灵活性资源体系。电网形态方面,呈现“大电源、大电网”与“分布式系统”兼容互补,

交直流混联大电网、柔直电网、主动配网、微电网等多种形态电网并存局面;高比例电力电子化电力系统的安全稳定技术全面突破;电网全面实现跨时空、跨能源的源-网-荷-储优化调控。用电形态方面,呈现多样化、智能化、主动性特征;与建筑、工业、交通等终端部门深度融合,建成清洁智慧的未来能源互联网。体制机制方面,全面建成全国统一电力市场和电碳市场,实现终端用能行业、用能主体全面覆盖;新型电力系统打造成为绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动的清洁能源资源优化配置平台。

5 构建新型电力系统的展望与建议

面向我国碳达峰碳中和目标,电力部门需要率先达峰,并力争提前实现净零排放。技术创新突破是建设新型电力系统的基石与源动力,比如核电与氢能等技术的创新突破都将对新型电力系统的演化路径产生显著的影响。未来新型电力系统的结构形态具有显著的不确定性。但未来十年的发展方向是明确的,是建设新型电力系统的关键期和窗口期,亟需解决好新能源与传统能源、新能源与电网之间的矛盾,解决传统电力系统低碳转型过程中存在的体制机制、政策体系、治理方式等困难和挑战,为新型电力系统建设夯实基础,如图3所示。

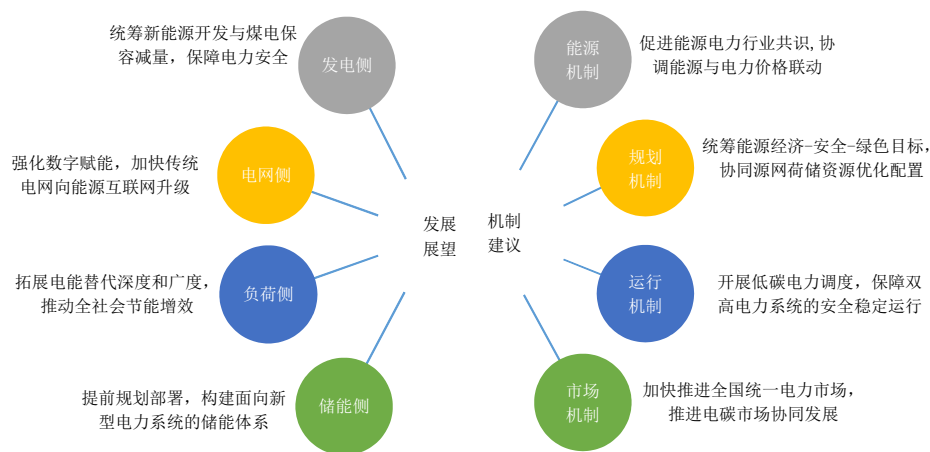


图3 构建新型电力系统的发展展望与机制建议

Fig. 3 Development prospect and mechanism suggestions of constructing new-type power system

5.1 构建新型电力系统的发展展望

1) 在发电侧,统筹新能源开发与煤电保容量减量,保障电力安全。

电力行业碳达峰不仅依赖新能源的快速发展,也离不开煤电的保驾护航。因此,在未来十年新能源开发与煤电转型的配合节奏是关键。既要避免可

再生电力不顾接纳能力和安全稳定性要求的“一窝蜂”式发展,同时需要明确煤电的定位,近期严格控制新增煤电项目,推进灵活性改造,担当调峰电源,远期由电量生产功能逐渐转变为日内调峰和容量备用功能,同时需要尽早制定煤电合理有序减量方案,降低电网安全稳定风险。

2) 在电网侧, 强化数字赋能, 加快传统电网向能源互联网升级。

电网作为支撑能源生产清洁化、能源消费电气化的主要“桥梁”和“纽带”, 未来十年需要加快传统电网向能源互联网的升级演变, 广泛应用新一代信息通讯、人工智能与控制技术, 促进能源信息深度融合与数字化转型, 加快推动智能配电网的改造与建设, 提高电网对各类调节资源的统筹协调和集成优化能力, 支撑源-网-荷-储的协同调控, 保障新能源的接入、消纳和利用, 满足多样化用能需求, 加快建设和完善国网新能源云平台, 立足我国能源资源和能源转型需求, 服务国家能源安全战略、政府和智库决策, 全力打造具有中国特色国际领先的新能源数字经济平台。

3) 在负荷侧, 拓展电能替代深度和广度, 推动全社会节能增效。

提升电气化水平是终端部门节能增效的重要途径。未来十年对电力行业转型非常关键, 需要拓展终端部门电能替代深度和广度, 深化重点领域的电气化提升, 构建智慧灵活的综合能源服务体系, 引导用电负荷与电网双向互动, 试点打造零碳综合能源园区等, 一方面助力终端部门节能增效, 另一方面提升终端部门用电的灵活性和可控性。

4) 在储能侧, 提前规划部署, 构建面向新型电力系统的储能体系。

2030年前, 电力系统可以依靠煤电机组灵活性改造、电网互联互通、抽水蓄能等支撑间歇性可再生能源消纳。2030年后, 随着碳减排加速, 可再生能源份额进一步提高的同时煤电机组逐渐大量退出, 储能需求将继续增加。因此, 在未来十年, 需要提前布局面向新型电力系统的储能体系。从时间尺度部署用于提供电力支撑的短时储能以及解决季节性电量不平衡的长期储能; 从空间尺度部署用于平抑新能源波动的发电侧储能, 用于支撑电网安全稳定运行的电网侧储能, 以及用于提升负荷可控性与灵活性的需求侧储能。2022年初, 国家发改委、能源局印发《“十四五”新型储能发展实施方案》, 文件提出: “创新新型储能商业模式, 探索共享储能、云储能、储能聚合等商业模式应用。”以云储能为代表的新型储能商业模式将逐渐由概念走向实际。

5.2 构建新型电力系统的机制建议

1) 在能源机制上, 促进能源电力行业共识,

协调能源与电力价格联动。

首先需要促进对电力行业在国家低碳转型中的定位、目标及技术路线达成共识。五大发电集团均提出预计不晚于2025年实现碳达峰, 国家电网和南方电网也发布了“碳达峰、碳中和”行动方案。亟需在转型前期强化顶层设计, 促进全行业达成共识, 明确目标、路线和技术路径, 全力协调能源电力上下游价格联动, 推进煤-油-气-电全环节协调减碳。

2) 在规划机制上, 统筹能源经济-安全-绿色目标, 协同源网荷储资源优化配置。

能源基础设施建设具有显著的“碳锁定”效应, 电力规划需要协调技术发展与碳减排目标之间的不一致性, 统筹能源经济-安全-绿色目标, 寻找技术可行且成本可负担的低碳转型路径。面向双碳目标, 需要充分考虑碳中和目标的倒逼驱动, 建立电-碳约束驱动的源-网-荷-储协同规划方法。同时建立面向源-网-荷-储规划方案的全年8760小时精细化运行模拟模型, 实现对规划结果的全方位评估。

3) 在运行机制上, 开展低碳电力调度, 保障双高电力系统的安全稳定运行。

为了保障“双高”电力系统的安全、经济、绿色运行, 需要重点关注高比例可再生能源并网后的安全稳定运行问题、多类型低碳电力技术与减排策略之间相互协调等系统性问题。推动考虑风电、光伏、光热、储能、碳捕集等多类型低碳电力技术的电-碳耦合约束下电力系统低碳调度运行方式, 分析虚拟同步技术与同步调相机等电力系统安全稳定设备与控制措施对于提升电力系统碳减排的作用。

4) 在市场机制上, 加快推进全国统一电力市场建设, 推进电碳市场协同发展。

我国电力系统灵活性差的一个重要原因是市场机制和相关激励机制缺失, 灵活性资源价值无法实现, 各类经济主体没有动力提供灵活性资源。因此, 在未来电力转型的前十年, 需要继续坚定推进电力体制市场化改革, 健全多层次统一电力市场体系, 形成统一开放、竞争有序、安全高效、治理完善的电力市场体系, 使各种电力资源都能市场交易中实现其价值, 充分发挥市场在资源配置中的决定性作用。此外, 需要协调绿证市场、碳交易市场等相关机制来实现可再生能源的“绿色价值”, 为后续的电力深度脱碳提供成熟的市场环境, 促进电碳市场协同发展。

6 结论

推动构建适合中国国情的新型电力系统,是贯彻落实我国能源安全新战略、实现 30·60 碳中和目标的重大需求。我国提出要推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系,明确了新时代我国能源发展的方向。大力发展以风能、太阳能为代表的新能源技术,构建新型电力系统,促进电力领域脱碳,是推动能源清洁低碳转型、实现碳达峰、碳中和目标的必由之路。我国电力系统是世界上规模最大、电压等级最高的电力系统,如此大规模的电力系统由高碳排放走向碳中和是从“0 到 1”的重大创新,全世界没有经验与样板可以借鉴学习。因此,加快新型电力系统理论与技术的研究,对于构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,推进我国能源领域供给侧改革、推动能源生产和利用方式变革,具有重大的基础性、前瞻性和战略性意义。本文梳理了新型电力系统建设面临的新型平衡体系、复杂安全机理、成本疏导机制等多重挑战与变革;从结构、形态、技术、机制 4 个方面辨析了新型电力系统的内涵与特征;分析研判了新型电力系统的演化路径;并针对新型电力系统构建提出了发展建议与展望。希望本文的初步探讨能为新型电力系统的构建提供一些有益的参考。

参考文献

- [1] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 (2020)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. China energy & electricity outlook 2020[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020(in Chinese).
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
XI Jinping. Speech at the general debate of the 75th session of the united nations general assembly[R]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2020(in Chinese).
- [3] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14(in Chinese).
- [4] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
Project Comprehensive Report Preparation Team. A comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1-25(in Chinese).
- [5] 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 Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).
- [6] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2060 年前碳中和研究报告[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research of carbon neutrality in China by 2060[R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2021(in Chinese).
- [7] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [8] 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.
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(in Chinese).
- [9] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8(in Chinese).
- [10] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7(in Chinese).
- [11] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017,

- 41(9): 1-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11(in Chinese).
- [12] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [13] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
- LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042(in Chinese).
- [14] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5191.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5191(in Chinese).
- [15] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角 动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154(in Chinese).
- [16] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New Issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [17] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-378.
- CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-378(in Chinese).
- [18] 丁一, 谢开, 庞博, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1): 国外市场启示、比对与建议[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2401-2410.
- DING Yi, XIE Kai, PANG Bo, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics(1): enlightenment, comparison and suggestions from foreign countries[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2401-2410(in Chinese).
- [19] 夏清, 陈启鑫, 谢开, 等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(2): 我国跨区跨省电力交易市场的发展途径、交易品种与政策建议[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2801-2808.
- XIA Qing, CHEN Qixin, XIE Kai, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics(2): development path, trading varieties and policy recommendations for inter-regional and inter-provincial electricity markets[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2801-2808(in Chinese).
- [20] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
- KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833(in Chinese).
- [21] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
- [22] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [23] 清华大学能源互联网研究院和国家能源互联网产业及技术创新联盟. 国家能源互联网发展白皮书(2018)[R]. 北京: 清华大学, 2019.

Energy Internet Research Institute of Tsinghua University and National Energy Internet Industry and Technological Innovation Alliance. National energy internet development white paper(2018)[R]. Beijing: Tsinghua University, 2019(in Chinese).

- [24] 辛保安. 抢抓数字新基建机遇 推动电网数字化转型[J]. 电力设备管理, 2021(2): 17-19.

XIN Baoan. Seize the opportunity of new digital infrastructure to promote the digital transformation of power grids[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(2): 17-19(in Chinese).

- [25] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4000.

LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000(in Chinese).

- [26] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.

ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11(in Chinese).



张智刚

收稿日期: 2022-02-25。

作者简介:

张智刚(1964), 男, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统运行及管理工作, zhang-zhigang@sgcc.com.cn;



康重庆

*通信作者: 康重庆(1969), 男, 教授, 研究方向为可再生能源、低碳电力、能源互联网等, cqkang@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Challenges and Prospects for Constructing the New-type Power System Towards a Carbon Neutrality Future

ZHANG Zhigang¹, KANG Chongqing^{2*}

(1. State Grid Corporation of China; 2. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University))

KEY WORDS: new-type power system; carbon peaking; carbon neutrality; renewable energy; low-carbon transition

Building a clean low-carbon energy dominated energy supply system and forming a new-type power system is the key to achieving the target of carbon neutrality. At present, the amount of China's energy-related carbon emissions is about 10 billion tons per year, accounting for 1/3 of the total global carbon emissions. Especially, the CO₂ emission in the power sector accounts for more than 40% of the total CO₂ emissions in China. In the future, it is estimated that the share of non-fossil electricity generation will increase up to near 90% in 2060 from the generation side, and the share of electricity in terminal energy consumption will increase up to around 70% in 2060 from the demand side. Overall, building a new-type power system dominated by renewable energy faces enormous challenges but also has great opportunities.

This paper firstly analyzes the multiple challenges and evolution faced by the new-type power system. The construction of new-type power system should consider the basic national conditions of China. The phase down of fossil-power generation should be based on the safe and reliable replacement of renewable energy. Transiting from a fossil fuel dominated system to a clean energy dominated system, the power system faces multiple challenges and evolution including new-type power balancing mechanisms, complex security problems and cost allocation principles, as depicted in Fig. 1.

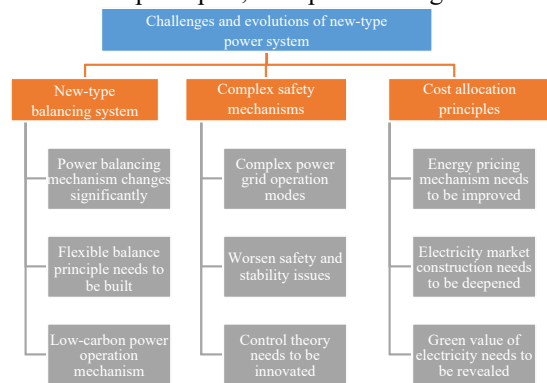


Fig. 1 Challenges and evolutions of new-type power system

In general, the new-type power system is with the outstanding characteristics of green and low-carbon, safe and controllable, intelligent and flexible, open and interactive, digital and smart, economic and efficient. In this paper, the connotation and features of the new-type power system are also revealed from the aspects including structure, morphology, technology and mechanism, as shown in Fig. 2.

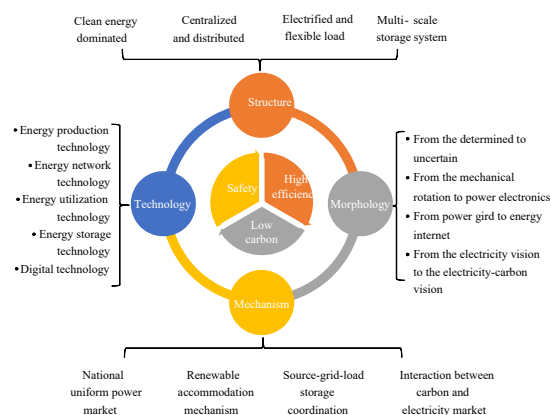


Fig. 2 Key features of new-type power system

Achieving the target of carbon neutrality in 2060, power sector is required to reach carbon emission peak as soon as possible and strive to realize net-zero emissions in advance. The construction of new-type power system is a complex project and will not happen overnight. Technology innovation is the cornerstone and motive power for the construction of new-type power system. The future structure and morphology of the new-type power system has significant uncertainty. Different development stages should focus on solving different basic contradictions. The energy policy and mechanism are supposed to balance the development and decarbonization relationship, global and local relationship, short-term and long-term relationship. The development trend and direction in the future decade is relatively clear. The development suggestions and prospects for the construction of new-type power system are put forward in this paper.