



“双碳”目标下我国能源电力系统发展前景

周孝信*, 赵强, 张玉琼

中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192

* 联系人, E-mail: xxzhou@epri.sgcc.com.cn

习近平主席于2020年9月代表中国宣布应对气候变化的“双碳”目标, 2021年3月部署了“构建清洁低碳安全高效的能源体系”“构建新型电力系统”的“十四五”重点工作任务^[1], 并相继出台了多项相关政策要求^[2-4], 明确了我国能源电力转型的实施路径. 2022年10月, 中国共产党第二十次全国代表大会报告进一步提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和. 立足我国能源资源禀赋, 坚持先立后破, 有计划分步骤实施碳达峰行动”, 并再次强调了“推动能源清洁低碳高效利用”的能源发展要求, 提出“加快规划建设新型能源体系, 确保能源安全”重要指示, 为“双碳”目标下我国能源电力系统升级转型指明了宏观方向.

为如期实现“双碳”目标, 同时在保障能源电力供应安全条件下满足经济社会发展需求, 需统筹平衡“清洁低碳、安全稳定、经济可行”3个方面需求, 科学合理推进能源电力系统转型升级. 为探讨“双碳”目标下我国未来能源电力发展前景, 开展我国2020~2060年中长期能源电力情景分析, 研判能源电力结构调整路径、核心指标发展趋势、技术措施手段需求, 可为新型能源体系下的电力系统建设提供参考.

1 我国未来能源电力系统发展情景

1.1 一次能源消费结构演化趋势

为了实现“双碳”目标和绿色发展, 规划建设新型能源体系, 首先要研究全国一次能源消费结构及其演化趋势. 一次能源消费包括煤炭、石油、天然气组成的化石能源和水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等组成的非化石能源两大部分, 其中非化石能源又可分为电力应用和非电利用两个部分. 实现“双碳”目标和建设新型能源电力系统, 必须在保障供应安全的基础上在一次能源消费中逐步降低化石能源比例, 相应增加非化石能源比例. 其中可再生能源电力应用将有快速发展, 在碳中和阶段逐步占有较高比例, 成为一次能源消费的主体. 本文采用电热当量法将非化石能源电能转化为等价的功当量值, 与化石能源和非化石能源非电利用一起成为一次能源消费的组成部分. 目前我国每年发布的国民经济和社会发展统计公报中能源消费相关数据、国家能源战略文件中的指标设定数据均基于发电煤耗法, 这



周孝信 中国科学院院士, 美国国家工程院外籍院士. 中国电力科学研究院名誉院长, 中国电机工程学会理事, 中国电工技术学会常务理事. 长期从事电力系统分析控制的数学模型和计算方法研究. 主持开发了电力系统分析综合程序(PSASP), 开展了灵活交流输电(FACTS)研究并首次实施于超高压输电可控串补工程, 研制了高性能电力系统全数字实时仿真

装置(ADPSS); 在能源电力发展战略研究中提出三代电网、新一代电力系统、新一代能源系统的概念、发展模式和关键技术.

是我国能源结构以煤为主的历史和现状所决定的. 在现阶段非化石能源电量占比较低时, 采用发电煤耗法与电热当量法计算结果差别较小, 但随着未来非化石能源消费增加, 非化石能源电力占比较高时, 采用发电煤耗法进行电力能源计量将会带来一次能源消费总量虚高. 本文研究时段跨度长达40年(2020~2060年), 覆盖化石能源电力占比逐步提高的阶段, 因此本文采用电热当量法计算结果作为分析的基础.

基于电热当量法的场景分析结果(图1)表明, 我国一次能源消费总量将在2030年左右达峰, 峰值约为49亿tce, 此后持续下降, 2050年约为35亿tce, 2060年降至30亿tce以下; 非化石能源消费占比于2035年提高至21.5%左右, 2050年接近60%, 2060年将超过80%; 煤炭消费占比持续下降, 2030年降至50%以下, 2050年降至20%以下, 2060年不超过10%. 以图1中2060年数据为例, 全年一次能源消费总量29.5亿tce, 其中非化石能源电力利用(含水电、核电、太阳能和风力发电、地热能和生物质能及绿氢发电能量)占比63.2%, 地热能等非电利用能量占比9.7%, 绿氢非电利用能量占比7.7%, 非化石能源占比总计80.6%; 煤炭、天然气、石油消费占比分别为9.7%、7.8%、1.9%, 总计19.4%.

1.2 电源结构清洁低碳转型

电力工业作为国民经济发展中最重要的基础产业, 在能

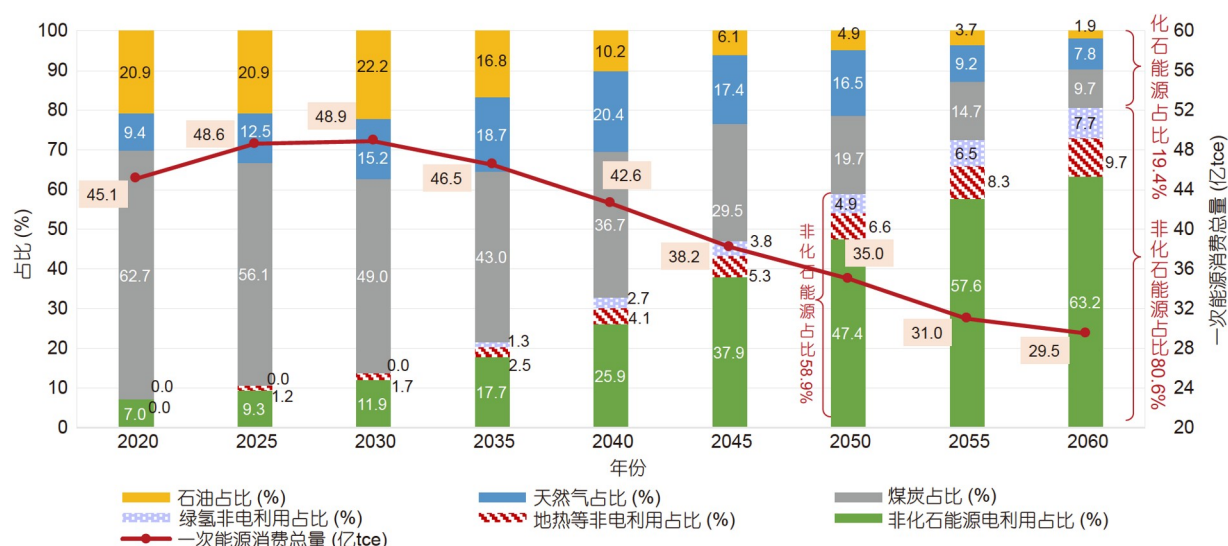


图1 2020~2060年我国一次能源消费总量及其组成结构演化趋势

Figure 1 Evolution trend of China's total primary energy consumption and its composition in 2020–2060

源行业发挥支柱性作用。积极稳妥推进电源结构清洁低碳转型是能源转型的关键途径。基于一次能源消费结构中非化石能源占比持续增长、化石能源占比逐步减少的预设,对能源电力发展的情景分析结果(图2)表明:在发电装机方面,我国风光发电装机量在2020~2060年期间持续上升,2035年超过总装机容量的50%,成为装机主体,2050年占比超过70%;随着风光发电的快速发展,非化石能源发电装机逐步提高,2050年达到85%以上,2060年超过90%;煤电装机于2030年后持续下降,但2050年后下降速度放缓,2055~2060年仍保持3亿kW左右,为电力系统安全稳定运行提供重要支撑。在发电量方面,2045~2050年间,风光年发电量占比超过50%,成为电量主体;以风光发电为主要组成部分的非化石能源年发电量也呈持续上升趋势,其在年总发电量中的占比预计在2030~2035年间超过50%;煤电年发电量于2030年后开始呈下降趋势,2050年后低于1万亿kWh,电力系统整体呈现显著的高比例新能源特征。

2 新型能源电力系统的主要特征与核心指标

“双碳”目标下我国新型能源电力系统主要具有6个特征:一是高比例可再生能源广泛接入。以风、光等新能源为主的可再生能源电力占比大幅提高,是电力系统升级换代的重要标志,也是促进非化石能源大规模利用,实现能源转型的主要支撑。二是高比例电力电子设备大规模应用。随着超大规模交直流输电及大量新能源机组接入系统,电力电子设备并网数量不断提升、范围不断扩大,将深刻改变以传统电磁变换装备为主的传统电力系统运行特征。三是多能互补综合能源利用。随着多行业多类型技术高度融合,电力系统的能源

资源配置平台功能将不断外延,实现风、光、水、煤等资源协同互补,电、热、冷、气综合利用。四是数字化智能化智慧能源发展。先进传感量测、信息通信、数字化控制等技术手段将与电力系统深度融合,形成高效运行、用户友好的智慧能源系统。五是清洁高效低碳零碳转型。清洁能源开发利用规模增加、系统总体能源利用效率提升、二氧化碳排放量有效控制,将为能源转型奠定坚实基础。六是高韧性本质安全可靠。集中分布并举的生产供应和消费是新型电力系统重要结构模式,以此为特征导向的电网形态和电源布局,将从结构设计层面增强系统应对不确定性风险和故障的能力,从根本上实现“高韧性”意义上的“本质安全”和可靠性提高。

为量化分析我国新型能源电力系统发展水平和主要特征,综合考虑结构调整、节能减碳、电气化等不同维度的战略要求,确立5项核心指标。指标名称及其设置维度如表1所示,其中指标1、指标2和指标3与一次能源消费总体情况密切相关,同时对电力发展具有决定性的影响;指标4和指标5则主要针对电力行业转型水平进行描述。

根据情景分析结果,可初步研判各指标未来演化发展趋势,其中指标1和指标5已在前文中详细阐述。在碳排放方面(指标2),2020~2060年我国能源电力系统CO₂排放总量变化可大致分为3个阶段,即2020~2030年碳达峰阶段、2030~2050年加速减碳阶段、2050~2060年碳中和阶段。据初步估算,2030年电力系统CO₂排放量约占当年能源系统CO₂排放总量50%;2050~2060年碳中和阶段,碳排放量持续下降,但电力系统仍需保留少量煤电、气电,提供灵活性调节作用,助力极端条件下电力安全保供,同时碳捕获、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)及生物质等零

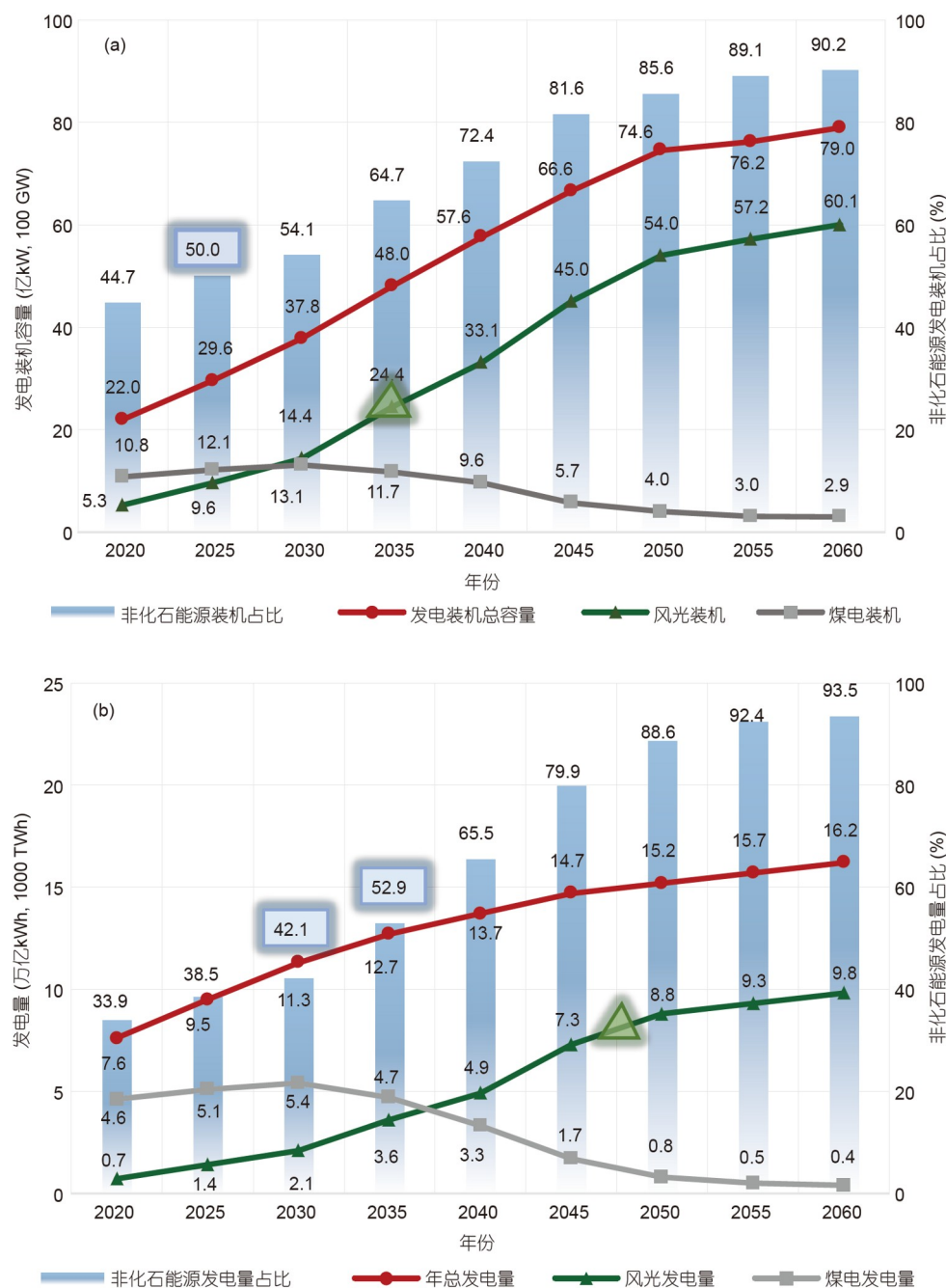


图 2 2020~2060年我国电源结构演化趋势。(a) 装机容量; (b) 发电量

Figure 2 Evolution trend of China's power source composition in 2020–2060. (a) Installed capacity; (b) power generation

碳负碳技术的采用, 将助力实现CO₂净零排放。

在能源利用效率方面(指标3), 随着风光发电及水电等可再生能源电力的快速发展, 电力系统源端效率大幅提高, 2030~2050年将提高约15个百分点; 与此同时, 终端消费能效的提高也是总体效率普遍持续提高的关键。在2030~2050年加速减碳阶段, 我国能源系统总体效率快速提升, 因此在

2030年后能源消费总量呈递减趋势条件下, 有效能源消费总量仍保持稳定增长。在终端电能消费占比方面(指标4), 随着电力工业发展, 我国电气化水平持续提高, 2015年后我国电能终端能源消费比重已超过美国、德国等发达国家及世界平均水平^[5], 根据中国电力企业联合会发布的《中国电气化年度发展报告2022》^[6], 2021年我国电能占终端能源消费

表 1 我国新型能源电力系统核心指标

Table 1 Major indicators of the new energy & power system

序号	指标名称	指标设置因素
1	非化石能源在一次能源消费中比重	结构调整
2	能源电力系统CO ₂ 排放总量	节能减碳
3	系统总体能源利用效率	节能减碳
4	电能 in 终端能源消费中比重	电气化
5	非化石能源发电量比重	结构调整

比重约为26.9%，该指标未来将呈持续提升趋势；情景分析结果表明，随着未来我国电气化水平不断提升，电能占终端能源消费比重将在2040年达到50%左右，2060年超过70%。

3 “双碳”目标下能源电力系统技术发展需求展望

3.1 具有全局性影响的关键技术方向

在规划建设新型能源体系和构建新型电力系统目标要求下，需要充分发挥技术创新的引领作用，为推动我国能源电力发展提供根本动能。现代经济社会发展过程中，能源系统的转型升级与技术创新存在相互制约和促进关系，技术的更新迭代为能源电力系统的安全、稳定、高效、经济运行提供了有力支撑，不断驱动电源结构清洁低碳调整、电网形态结构变化和用户服务水平提升，同时新能源占比逐步提升带来的系统特性变化、终端需求多元化带来的服务模式创新等发展趋势也不断倒逼和催生新的技术手段。

总体来看，对未来能源电力系统发展具有全局性影响的关键技术不仅应涵盖发电、输电、配用电等电力系统多个环节，还应延伸至电力以外的其他能源形式，进而从整体上促进能源的清洁高效利用和优化配置。在发电技术方面，主要包括可再生能源发电和综合利用技术、燃煤发电提高灵活性和CCUS技术；在能源储运与综合利用方面，主要包括新型储能技术、氢能生产储运转化和应用技术、新型输电和超导综合输能技术、综合能源电力系统技术；在系统安全运行保障方面，主要包括新型电力系统理论体系及运行控制技术、新型电力电子元器件装置和系统技术；在其他支撑性技术方面，包括数字化智能化能源互联网技术、综合能源电力市场技术。上述10类关键技术涉及基础理论、装置研发、融合应用等不同类型，为全面支撑能源电力转型，需要产学研等多方共同发力，任何一项技术进步或突破都将可能带动相关行业乃至整个能源体系发展。

3.2 综合能源生产单元设想

在“双碳”目标引领下，需要充分发挥多能源协同、多行

业融合作用，利用技术集成优势，加快推进传统系统向具有清洁高效、多能互补等特征的新型能源电力系统转型，终端消费中实现各类能源利用形式的互补利用将有效提升能源利用效率、促进新能源消纳利用，而能源生产侧引入多能互补理念，推行结构调整和技术创新，将从根本上支撑高比例可再生能源的广泛接入和大规模开发利用，对此需要立足我国能源行业特征，探索多类型能源技术与传统机组升级改造的融合发展模式。

由于资源禀赋及行业发展历史等原因，我国目前仍保有大量燃煤火电机组，截至2022年底，我国煤电装机已超过11亿kW，在发电总装机中的占比达到43.8%。燃煤发电是我国电源结构的劣势也是优势，据研究统计，我国煤电机组服役年限普遍较短，大部分为20年以下，平均仅为11.1年，而美国、欧盟煤电机组平均服役年限已分别达到39.6、32.8年^[7]，且随着技术水平提升，近年来我国新建与计划建设机组普遍为大容量、超超临界机组，节能减排、灵活调节等方面性能优异；同时，煤电因其固有技术特性，具有较强的有功调节和电压支撑能力，且可为电网提供必要的转动惯量，在电力系统安全稳定运行中发挥重要的基础保障作用。若采用简单关停方式处理传统煤电，既可能造成大规模存量资产闲置浪费，也不利于一定时期内能源供应平稳过渡。此外，新能源发电的天气依赖性导致其机组出力不确定性强，抗扰动能力和动态调节能力弱，未来其高比例接入将对电网安全稳定带来巨大风险挑战，系统灵活性、韧性等方面需求显著提升。

为应对上述问题，我们提出一种融合煤电机组碳捕集、可再生能源电解水制氢、甲烷/甲醇合成、新型燃气发电等技术的方案设想——综合能源生产单元(integrated energy production unit, IEPU)，其概念示意图(示例方案之一)如图3所示。

IEPU的基本运行方式为：白天利用低成本的光伏发电制取绿氢，夜间利用低谷时段电网供电或火电机组发电，尽可能保持电解制氢系统持续稳定工作，产出的氢气可与煤电机组捕集的CO₂进一步合成生产甲烷/甲醇，亦可与氮合成氨。通过IEPU单元内部各设备容量优化配置和协同运行，一方面可实现单元自身的高效经济运转及多类型产品生产，另一方面可充分发挥灵活调节煤电、可再生能源制氢、燃气轮机等装置的灵活性调节作用，以多设备融合的整体单元(实体或虚拟)为受调控主体，与外部电网实现友好互动。IEPU预期可成为能源电力系统中具有多种能源产品和灵活性调节功能的新成员，作为煤电低碳/无碳转型路径方案的一种选择。

初步仿真研究表明，IEPU作为具有正负值双向调节能力的综合能源生产发电单元，可成为提升电力系统灵活性的有效措施之一^[8]，其生产的甲烷、甲醇、氨等绿色能源产品，以便于运输、易于储存的特性，既可作为新型电力系统应对中长期能源电力供需不平衡的一种储能介质，也可作为绿色燃料和化工原料，替代石油、天然气等化石能源非电利用，在

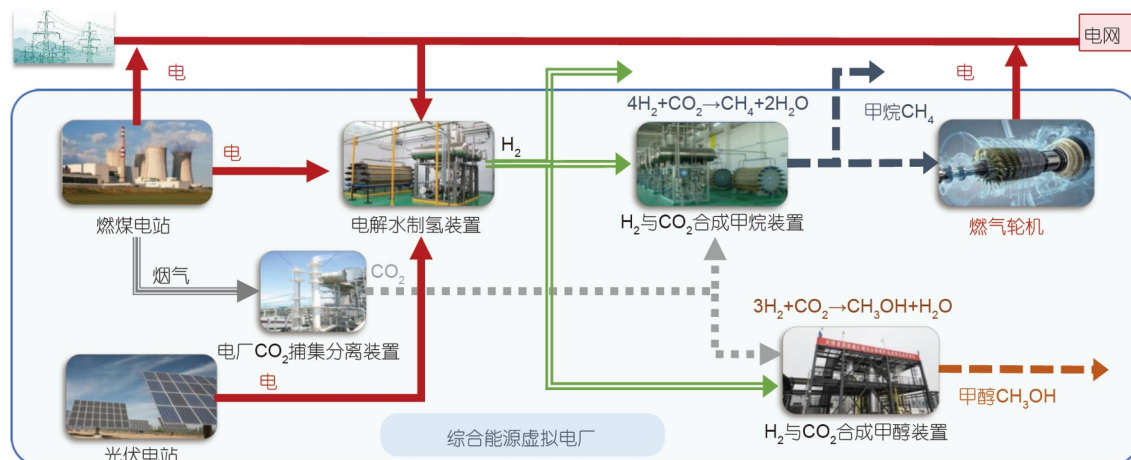


图3 综合能源生产单元设想概念示意图(方案之一)

Figure 3 Conceptual diagram of the integrated energy production unit (one scheme)

应对全球气候变化的“气候韧性”建设、保证灾害情况下短期及中长期能源电力供应中发挥重要作用。

4 总结

本文基于我国能源转型战略目标构建了未来能源电力系统发展情景，分析了一次能源消费及电源结构演化趋势，提出了我国新型能源电力系统的主要特征和核心指标，在此基础上展望了未来具有全局性影响的关键技术方向，并综合考虑煤电合理转型退役、综合能源利用需求，提出综合能源生产单元设想。研究表明，大幅度提升非化石能源在一次能源消费中比重，坚持节能优先、提高能源利用效率，大力发展以风光为主的可再生能源发电，提高电能终端能源消费

中比重，是实现“双碳”目标的主要途径。2050~2060年我国电力系统中仍保留少量煤电气电的主要目的是提供灵活性资源，助力极端条件下的电力安全保供，并期待通过零负碳技术实现彼时的零碳电力。可再生能源发电和综合利用、灵活低碳燃煤发电、新型电力系统理论体系及运行控制、新型储能、氢能生产储运转化和应用等10类关键技术，将可能会对未来能源电力系统发展具有全局性影响。期望综合能源生产单元(IEPU)能作为煤电机组低碳/无碳转型路径方案的一种选择，能以其高灵活调节能力支撑高比例可再生能源电力系统稳定运行，其生产的各种近绿色燃料，又可作为储能介质用于应对新型电力系统可能出现的中长周期能源电力供需不平衡问题，同时有助于实现“西能东输”远景目标。

致谢 感谢国家电网公司总部科技项目“规模化综合能源生产单元对我国电力系统转型路径的影响研究”(1400-202255326A-2-0-YS)资助。

推荐阅读文献

- 1 The Central People's Government of the People's Republic of China. The Outline of the 14th Five-Year Plan for Economic and Social Development and Long-Range Objectives Through the Year 2035 of the People's Republic of China (in Chinese). 2021, http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm [中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要. 2021, http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm]
- 2 The State Council of the People's Republic of China. Action Plan for Carbon Dioxide Peaking Before 2030 (in Chinese). 2021, https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211027_1301020.html [中华人民共和国国务院. 2030年前碳达峰行动方案. 2021, http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm]
- 3 The State Council of the People's Republic of China. Working Guidance for Carbon Dioxide Peaking and Carbon Neutrality in Full and Faithful Implementation of the New Development Philosophy (in Chinese). 2021, http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm [中华人民共和国国务院. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见. 2021, http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm]
- 4 National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 14th Five-Year Plan for Modern Energy System (in Chinese).

- 2022, <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dfca8f24880a80af12755558f4a.pdf> [国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划. 2021, <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dfca8f24880a80af12755558f4a.pdf>]
- 5 International Energy Agency. World Energy Balances Highlights. 2023, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>
- 6 China Electricity Council. Annual Development Report on China's Electrification 2022 (in Chinese). Beijing: China Building Materials Press, 2022 [中国电力企业联合会. 中国电气化年度发展报告2022. 北京: 中国建材工业出版社, 2022]
- 7 Tong D, Zhang Q, Zheng Y, et al. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5°C climate target. *Nature*, 2019, 572: 373–377
- 8 Zhou X X, Zhao Q, Zhang Y Q, et al. Integrated energy production unit: An innovative concept and design for energy transition toward low-carbon development. *CSEE J Power Energy Systems*, 2021, 7: 1133–1139

Summary for “‘双碳’目标下我国能源电力系统发展前景”

Prospect of China's energy and power system under dual carbon goals

Xiaoxin Zhou^{*}, Qiang Zhao & Yuqiong Zhang

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

^{*} Corresponding author, E-mail: xxzhou123@163.com

Based on the strategic goals of China's energy transformation, this paper performs a scenario analysis of China's energy and power system in 2020–2060, with a particular focus on the composition of the primary energy consumption and power supply. A preliminary analysis of the development scenario of China's energy and power system has revealed that the installed wind and solar power capacity in China will continuously rise from 2020 to 2060, exceeding 50% of the total by 2035, becoming the main installed capacity, and accounting for over 70% by 2050. The installed capacity of nonfossil energy power generation has gradually increased with the rapid development of wind and solar power generation, reaching over 85% by 2050 and over 90% by 2060. Furthermore, the installed capacity of coal-fired power will decline after 2030, with the decline rate slowing down after 2050. Approximately 300 million kW of coal-fired power plants are proposed to be retained from 2055 to 2060, providing important support for a safe and stable power system operation. In terms of power generation, the share of nonfossil energy power generally shows a continuous upward trend of up to more than 50% between 2030 and 2035. Moreover, between 2045 and 2050, the annual wind and solar power generation will account for over 50% of the total generation, becoming the main electricity source. The annual power generation of coal-fired power has been showing a downward trend since 2030 and may fall below 1 trillion kWh after 2050. The power system exhibits a substantially high proportion of new energy characteristics.

China's new energy power system is proposed to have the following six features: (1) High proportion of renewable energy; (2) high proportion of power electronic equipment; (3) multienergy complementary integrated energy; (4) cyber-physical and smart energy; (5) clean, efficient, and low-/zero-carbon; and (6) highly resilient and intrinsically safe and reliable. The revolution trends of five core indicators, including the share of nonfossil energy in primary energy consumption, total carbon dioxide emissions of the energy and power system, and the share of electric energy in final energy consumption, are emphatically analyzed. From 2050 to 2060, the power system will still need some coal- and gas-fired power plants to provide flexibility and help ensure a safe power supply under extreme conditions. The simultaneous adoption of zero- and negative-carbon technologies, such as carbon capture, usage, storage, and biomass, will help achieve net zero CO₂ emissions. With the continuous electrification efforts, the share of electricity in the final energy consumption of China will reach approximately 50% by 2040 and over 70% by 2060. Furthermore, despite the decrease in the total primary energy consumption after 2030, effective energy consumption will retain steady progress due to the rapid improvement of energy efficiency. The total electricity production efficiency will increase by approximately 15% from 2030 to 2050 due to the rapid renewable deployment in the power sector.

To address the adjustment and power supply problems of new power systems with high renewable penetration, special attention should be paid to 10 key technologies, including renewable energy generation and comprehensive utilization, new energy storage, theory and operational control of new power systems, etc. The concept and the basic framework of the integrated energy production unit (IEPU) are proposed as an effective measure of facilitating the transformation of coal power units. The IEPU can realize a large-scale time–space migration of energy with a strong positive and negative two-way flexible adjustment ability and basically unrestricted duration time. The efficient usage of the IEPU is expected to improve system flexibility and resiliency. The economy and related technological innovation of the IEPU still need further study.

scenario analysis, the primary energy consumption mix, power source composition, major indicators of the new power system, key technologies, integrated energy production unit

doi: [10.1360/TB-2023-0529](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0529)