

引用格式: 罗莎莎, 郭经韬, 蔡颖倩, 等. 面向碳中和的广东省电源结构转型分析 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 102-110. LUO Shasha, GUO Jingtao, CAI Yingqian, et al. Analysis on power supply structure transformation towards carbon neutrality in guangdong [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 102-110. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.10.

面向碳中和的广东省电源结构转型分析

罗莎莎[✉], 郭经韬, 蔡颖倩, 余欣梅

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 为实现“双碳”目标, 电源侧的绿色低碳转型是广东实现绿色低碳转型的关键。同时, 紧紧围绕新能源发展构建高比例新能源的多元电源支撑体系也是广东建设新型电力系统的重中之重。因此, 提前谋划面向碳中和的广东电源结构具有十分重要的意义。[方法] 在对广东省远景能源供需格局进行研判的基础上, 统筹低碳转型和能源安全, 考虑非化石能源消费比重、资源条件、电力供应平衡 3 个方面约束, 提出广东面向碳中和的电源发展思路, 对不同转型路径进行分析, 并提出相关建议。[结果] 研究表明, 碳中和时期, 广东省电源总装机规模预计将达到当前电源装机规模的 3 倍左右; 电源供应主体由当前的“火电+核电+外电”组合, 转变为“新能源+核电+外电”组合, 非化石能源装机比重达到 80%, 其中, 省内新能源装机比重达到 50%。[结论] 广东省的电源结构调整前景看似乐观, 然而, 这个过程仍然面临政策、技术、产业和市场等诸多挑战, 建议转型过程中关注火电在电力系统中的定位转变、保障非化石能源发展关键要素、重视新型电力系统调节能力建设; 为了满足碳中和时期广东两倍于现状的电力消费需求, 更为重要的是需特别关注引领电源结构清洁低碳转型的科技创新问题, 通过科技创新推动新能源类型、能源新技术的探索, 向能量密度更大、能效转换效率更高的方向发展。

关键词: 碳中和; 低碳转型; 资源约束; 新能源发展; 电力保供; 灵活调节

中图分类号: TK01; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0102-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.10

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Analysis on Power Supply Structure Transformation Towards Carbon Neutrality in Guangdong

LUO Shasha[✉], GUO Jingtao, CAI Yingqian, YU Xinmei

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to realize the goal of "dual-carbon", the green and low-carbon transformation of power supply side is the key to realize the green and low-carbon transformation of Guangdong, and at the same time, the construction of a diversified power supply support system with a high proportion of new energy is also the most important task for achieving a new type of power system in Guangdong. Therefore, it is of great significance to plan the carbon neutral power supply structure of Guangdong in advance. [Method] Based on the study of the prospective energy supply and demand pattern of Guangdong Province, this paper integrated the low-carbon transformation and energy security, considered the constraints from the proportion of non-fossil energy consumption, resource conditions, and the balance of power supply, and proposed a carbon-neutral power supply development idea for Guangdong, analyzed different transformation paths, and put forward relevant suggestions. [Result] The study shows that during the period of carbon neutrality, the total installed capacities of power supply in Guangdong Province is expected to reach about three times of the current installed capacities; the main body of power supply will be transformed from the current combination of "thermal power + nuclear power + external power supply" to "new energy + nuclear power + external power supply"; The proportion of non-fossil energy installed capacity will reach 80%, of which the proportion of new energy resources in the province will reach 50%. [Conclusion] The prospect of power structure

收稿日期: 2023-07-19 修回日期: 2023-10-12

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“以新能源为主体的新型电力系统解决方案研究”(CEEC2021-KJZX-02); 中国能建广东院科技项目“碳达峰碳中和背景下广东省能源与经济发展关系研究”(EV10981W)

adjustment in Guangdong Province seems optimistic. However, this process still faces many challenges from policy, technology and market, etc. It is suggested to pay attention to the role change of thermal power in the power system, safeguard the key factors of non-fossil energy development, and emphasize the building of regulating capacity for new power system; in order to meet the demand for electricity consumption in Guangdong twice as much as the status quo during the period of carbon neutrality, it is even more important to pay special attention to technological innovation issues leading the clean and low-carbon transformation of power supply structures, and through scientific and technological innovation, to promote the exploration of new energy types and new energy technologies towards the development of greater energy density and more efficient energy conversion.

Key words: carbon neutral; low carbon transformation; resource constraints; new energy development; power supply preservation; flexible regulation

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

实现碳达峰、碳中和是推动经济高质量发展的内在要求^[1]。我国能源领域二氧化碳排放占全社会二氧化碳排放总量的90%左右,其中电力行业的二氧化碳排放又占能源领域二氧化碳排放的一半左右^[2-3]。实现碳达峰碳中和目标,能源是主战场,电力是主力军。

广东是经济大省,以全国7%的能源消费和5%的碳排放,支撑了全国11%的经济总量。但广东也是能源资源小省,能源自给率不足26%,而能源消费结构仍以化石能源为主,非化石能源消费比重约为30%。在推动实现碳达峰、碳中和目标过程中,广东省的能源结构尤其是电源结构将发生深刻调整。电源供应侧的绿色低碳转型是能源电力领域绿色低碳转型的关键。

以2060年碳中和为战略目标导向,前瞻性研究和谋划远景广东省电源结构、并由远及近指导近中期的电源建设布局,具有十分重要的意义。本文在对广东省远景能源供需格局进行研判的基础上,结合资源禀赋分析各类电源发展条件,提出面向碳中和的电源低碳转型发展思路,以满足电力供应、灵活调节需求和低碳为目标,测算电源发展的不同情景,提出电源发展建议。

1 我国和广东省远景能源供需展望

2021年9月,中共中央、国务院印发的《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》明确提出,到2060年,非化石能源消费比重

达到80%以上^[4]。为实现这一目标,能源领域需着力从供应端推动清洁替代和从消费端促进电能替代:(1)在能源供应端,通过高比例地发展风、光、核等零碳能源,去替代煤、油、气等化石能源,非化石能源与化石能源的比重约呈8:2的格局^[5];(2)在能源消费端,通过工艺流程的再造,用电能或绿氢去替代煤、油、气,形成以电能为主、氢能等新型能源和化石能源为补充的消费模式^[6-8]。根据业内权威机构初步预测^[2-3],到2060年,我国电能占终端能源消费比重将达到70%左右、非化石能源消费占比将达到80%以上、非化石电源发电量占比将达到90%左右。

结合全国的远景能源发展目标要求和广东省的资源禀赋及发展特点,从能源的供应端和消费端两端来分析广东省的能源供需格局:

1)能源供应端。广东省非化石能源资源有限,其中水电基本开发完毕,太阳能、陆上风能资源条件一般,沿海核电、海上风能相对而言资源丰富,但开发规模和节奏受安全、管理等多重约束。此外,目前非化石能源消费的40%来自于省外调入的清洁能源,受送端省份自身发展及其他因素影响,中远期存在一定的不确定性,预计远景广东非化石能源消费比重与全国平均水平相当或略低于全国水平。

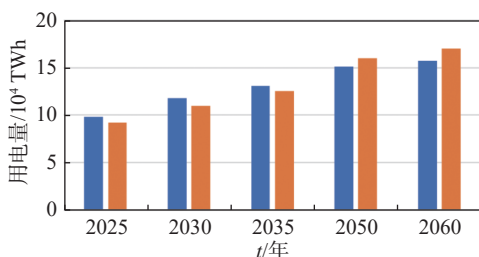
2)能源消费端。目前广东省电能占终端能源消费比重超35%,高于全国平均水平,随着可再生能源在建筑交通等领域的应用和电气化水平的进一步提升,发展到远景年,电能占终端能源消费比重将大幅提升。此外,氢能将在工业、交通等领域得到广泛应用、占比逐步提升,而化石能源在电力、钢铁、建材、有色金属、化工等行业仍有少部分应用场景、但占比较当前大幅降低。

2 广东省远景电力需求预测

2.1 我国远景电力需求预测

我国已转向高质量发展阶段,经济长期向好,经济发展将带动电力需求持续增长。同时从实现温室气体和污染物减排、提升终端能效等角度来看,电力将在能源转型、实现“双碳”目标中发挥重要作用。以绿色、高效为特征的新一轮电气化趋势已经显现^[9-10],我国电力需求将持续增长,增速逐步放缓。

国内权威机构对全国面向碳中和的电力需求增长趋势进行了预判^[2-3],如图 1 所示。中国 2060 年全社会用电量增长至 $(1.5\sim 1.7)\times 10^4$ TWh,人均用电量将于 2040~2050 年超过 10 MWh/人。



注: ■ 国网能源研究院《中国能源电力发展展望》
■ 全球能源互联网《中国碳中和之路》

图 1 主要研究机构对全国电力需求预测结果

Fig. 1 Results of national electricity demand forecasts by research organizations

2.2 广东远景电力需求预测

采用电能占终端能源消费比重法和产值单耗法^[11-12],对广东各规划年份的电力需求进行预测,如图 2 所示。

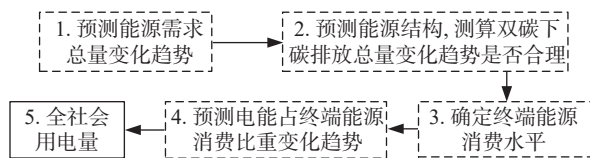


图 2 电能占终端能源消费比重法

Fig. 2 Share of electricity in final energy consumption

1) 电能占终端能源消费比重法

根据《广东省能源发展“十四五”规划》,2035 年广东能源消费总量控制在 4.8 亿 t 标准煤以内。中长期来看,预计广东省能源消费增速逐步放缓,能源弹性系数持续下降,于 2030 年之后逐步处于平台期,2035 年之后能源消费出现负增长。本研究中,预计

广东省 2030、2035 和 2060 年能源消费总量分别达到 4.6 亿、4.8 亿、4.4 亿 t 标煤。在终端能源消费量在 2030~2035 年达到峰值的情况下,随着电能占终端能源消费比重的不断提升,广东省全社会用电量保持持续增长,预计 2060 年达到 1 430~1 620 TWh。

2) 产值单耗法

如图 3 所示,综合各产业和居民用电量的预测结果,随着广东经济发展方式的转变,产业结构调整逐步深入,预计第二产业用电量在 2035 年达峰,用电量的增长极逐步由第二产业转向第三产业和居民用电,2060 年广东全社会用电量将达 136~158 GWh。

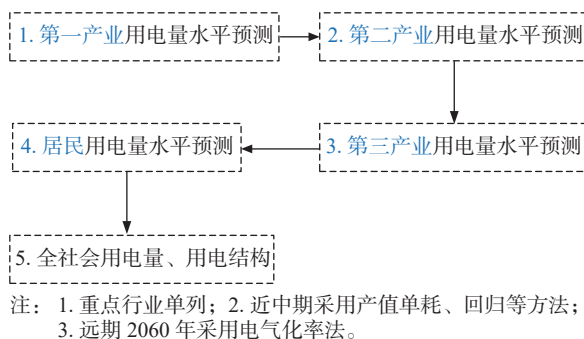
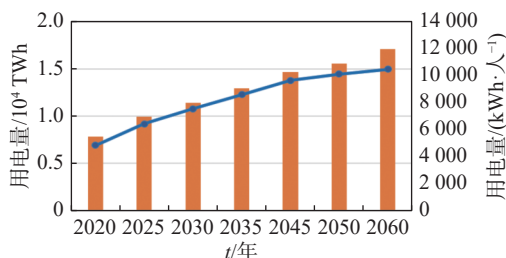


图 3 产值单耗法

Fig. 3 Unit consumption method of output value

根据以上两种方法对广东未来用电需求趋势进行判断:预计 2035 年前,广东省用电量仍将保持 3%~5% 的中速增长;2035 年后逐步趋于平稳,用电量增速降至 1%,逐步实现和经济发展的脱钩;到 2060 年,全社会用电量预计为当前水平的 2 倍,终端电气化率达 70%,用电量占全国比重的 9.6%,如图 4 所示。



注: ■ 人均用电量 — 全社会用电量

图 4 广东用电量预测

Fig. 4 Guangdong electricity consumption forecasts

3 广东省电源低碳转型条件

截至 2022 年底,广东省内电源装机容量达 170 GW,

从电源装机看,煤电、气电、非化石能源大致呈4:2:4的结构。面向碳中和目标,广东省将大力发展非化石能源、大幅提升非化石能源装机和消费比重。从各类非化石能源资源条件来看,广东省水电基本开发完毕,陆上风资源一般,且陆上风电受用地、生态环境等因素影响,开发潜力非常有限,后续广东省非化石能源发电的增量,主要来源于海上风电、光伏发电、核电和省外的清洁电力(如西南的水电、藏东南的风电光伏等,本文简称“外电”)等4类。

在不考虑技术突破的情况下,按照目前已知的资源条件,初步测算,广东非化石能源最大可开发装机容量达310 GW以上,未来随着各类新能源的技术创新突破,可开发量预计将进一步增大。

具体而言:广东海上风能资源丰富,近海海域风电可开发容量为110 GW,未来随着深远海漂浮式风电技术发展,可开发潜力更为巨大。广东属于全国太阳能资源三类、四类地区,初步估算,全省可开发的地面光伏电站装机容量约60 GW,但开发规模影响的因素较多。另外,全省各类工业园区、产业园区多,屋顶资源可以充分利用,考虑屋顶分布式光伏,全省合计可开发的光伏发电装机在100 GW以上(以当前的转化效率测算)。沿海核电站址资源丰富,仅考虑现有、在建及已核准的核电项目、且单个站址按6台机组测算,总装机可达40 GW以上。若进一步计及已开展前期和其他具备建设条件的站址,可开发装机将进一步增大,主要需考虑安全、铀资源等因素。广东目前接受外电容量45 GW,存量部分由于云黔桂等送端省份自身需求的增长,存在回收

减送的可能。增量来源主要考虑藏东南的清洁能源基地及西北地区的蒙西、陕北、青海海西、甘肃河西、新疆等风光清洁能源基地,但送电距离较远、实施难度较大。总体来看,外电规模有望增大到65 GW,进一步扩大规模存在难度。

4 广东省远景电源发展思路和展望

4.1 电源结构分析思路

在2060年碳中和阶段,广东电源结构转型需要统筹考虑资源条件、电力供应安全和低碳转型3个方面的约束^[13-15],既要在满足资源条件约束下大力发展风电、光伏等新能源,同时也要在满足系统运行需要的前提下合理发展火电、抽水蓄能等调节型电源^[16],如图5所示。

资源方面,在不考虑技术突破的情况下,按照目前已知的资源条件预测省内风电、光伏、核电的装机规模,再结合非化石能源消费比重目标约束,推算出广东对外电的需求规模。

低碳转型方面,考虑非化石能源消费比重目标约束,将非化石能源装机和化石能源装机进行解耦。在非化石能源消费比重的约束下,推算广东所需的非化石能源装机规模以及对应的发电量;由化石能源消费量约束,可推算火电的能源消费量,进而得到火电的发电量约束。

电力供应安全方面,主要考虑电力平衡量和调峰平衡量两方面的约束,推算出系统对火电、储能(含抽蓄、电化学储能、氢能及其他新型储能)装机的需求规模。

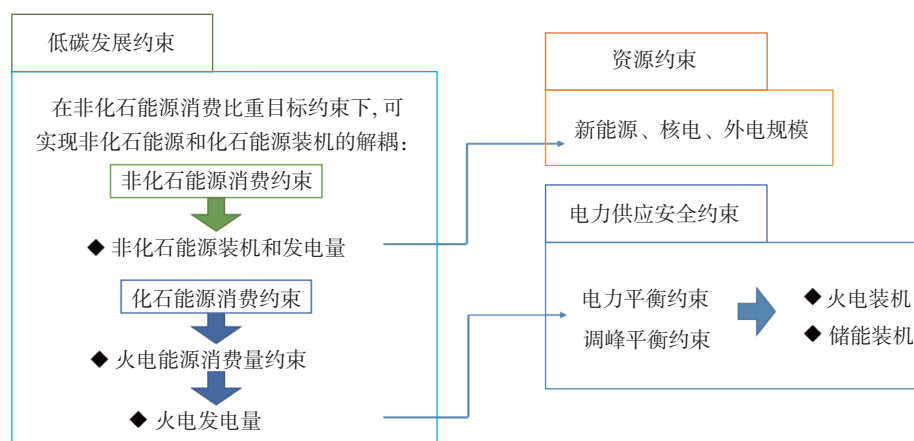


图5 2060年广东电源结构分析思路

Fig. 5 Ideas for analyzing the power structure of Guangdong in 2060

4.2 电源发展情景分析

4.2.1 非化石能源消费比重 80%

在非化石能源消费比重 80% 的约束下, 2060 年化石能源消费量需控制在 8 800 万 t 标煤(能源消费总量按 4.4 亿 t 标煤考虑), 扣除 4 000 万 t 标煤的非电能耗后, 火电的化石能源消费量需控制在 4 800 万 t 标煤, 火电可提供的电量仅为 170 TWh, 占 2060 年广东全社会用电量的 10%。

广东未来电源供应主体将逐步由目前的“火电+核电+外电”组合, 转变为“新能源+核电+外电”组合。在不考虑技术突破的前提下, 按照当前的资源条件, 各类非化石能源电源可提供电量如下:

1) 省内海上风电可装机 110~130 GW、陆上风电可装机 10 GW、光伏可装机 100~120 GW, 合计可提供电量 500~590 TWh(海上风电、陆上风电、光伏年发电小时数分别按 3 500 h、1 800 h、1 000 h 测算), 仅占广东全社会用电量 33%~39%。

2) 广东的水电、生物质资源有限, 仅能提供广东全社会用电量的 5%。

3) 抽水蓄能、新型储能等作为耗能型的元件, 不能作为电量提供主体。

4) 按上述考虑, 核电+外电需提供全社会用电量的 46%~52%, 才可满足非化石能源消费比重需求。

省内核电大规模发展可能面临铀资源、核安全约束、民众接受度等问题, 按照当前建设条件较好的厂址资源条件, 广东可发展核电规模仅有 50~60 GW, 按年发电小时数 7 500 h 测算, 核电可提供广东全社会用电量的 24%~29%; 外电考虑送端省份资源条件、自身供需形势, 在新增藏东南送粤 20 GW 之后, 预计规模进一步大幅增长难度很大, 按总规模 65 GW、年平均发电小时数 4 000 h 测算, 外电约可提供广东全社会用电量的 17%。核电和西电合计仅能提供广东 42%~46% 的电量, 到 2060 年广东还将存在 70~140 TWh 电量缺口(占比约 5%~10%)。

综合来看, 发展深远海风电是填补电量缺口的主要来源。为适应 70~140 TWh 电量缺口, 需再新增 20~40 GW 深远海风电资源, 海上风电装机总规模达到 150~160 GW。高海风情景下, 2060 年, 海上风电将提供广东全社会用电量的 34%~36%, 风电、光伏合计提供广东全社会用电量的 43%~45%。

电源发展的高海风、高外电和高核电情景^[17-18],

非化石装机如表 1 所示。

表 1 2060 年非化石能源装机情景
Tab. 1 Scenario of installed non-fossil energy in 2060

情景	高海风		高外电		高核电	
	装机/ GW	电量占比/ %	装机/ GW	电量占比/ %	装机/ GW	电量占比/ %
外电	65	17	85	22	65	17
核电	50~55	24~27	50~60	24~29	65~70	32~34
海上风电	150~160	34~36	110~130	25~30	110~120	25~27
光伏	100~120	8	100~120	8	100~120	8
陆上风电	10	1	10	1	10	1
水电	9.38	2	9.38	2	9.38	2
生物质	10	3	10	3	10	3

根据电源建设空间分析, 仅考虑非化石能源装机, 系统仍存在电力缺口 150~180 GW。受负荷特性、需求响应规模、外电调节特性不确定性影响, 未来广东灵活性需求仍有较大的不确定性。初步测算, 为满足电力供应和灵活调节需求, 2060 年全省需配置储能装机容量 50~60 GW、火电装机容量 100~120 GW。为实现电力行业碳中和, CCUS^[19] 配置规模达到 0.5 亿 t~1 亿 t。

考虑广东当前资源禀赋条件, 如果新能源发电技术不产生重大突破, 80% 非化石能源消费比重目标对核电、西电、新能源发展都提出了极高的要求, 实现难度较大。发展大规模 CCUS 是实现碳中和的另一重要途径, 若 CCUS 技术实现突破, 大规模应用存在经济性, 广东 CCUS 配置规模可达到 1 亿 t~1.5 亿 t, 建议积极争取降低非化石能源消费比重至 70% 左右。海上风电发展规模需达到 110~130 GW、核电装机规模需达到 40~50 GW、外电总规模维持 65 GW, 按照当前的资源条件已可基本满足。

4.2.2 非化石能源消费比重 70%

如表 2 所示, 化石能源消费比重由 20% 提高至 30%, 若化石能源消费增量全部用于火电, 则火电发电量可增加近 1 倍, 火电发电量占全社会用电量的比重由 10% 提升至 20%。在此情景下, 煤电年发电小时数可提高至 2 300~2 500 h, 运行工况可得到一定程度改善, 能够促使煤电更好地发挥风火打捆、促进海上风电等新能源消纳等作用。

非化石能源消费比重 80% 和 70% 情景下的全

表 2 70% 敏感性方案主要差异
Tab. 2 Key differences between 70% sensitivity programs

非化石能源消费比重	80%(以高海风 情景为例)	70%	差异
海上风电装机/GW	155	120~130	减少30~40
核电装机/GW	50	40~45	减少5~10
火电装机/GW	120	140~150	退役减少10~20
抽蓄储能装机/GW	60	40~50	减少10
煤电发电小时/h	1 200~1 600	2 300~2 500	提高1 000

社会度电成本存在一定差异, 主要影响因素包括 CCUS 成本、新能源发电成本、火电发电成本等。随着技术进步, 预测 CCUS 成本仍有较大下降空间, 到 2060 年, CCUS 成本可降低至 50~200 元/t 二氧化碳, 比当前水平下降 50%~70%。新能源发电成本与技术水平、开发难度有关, 初步预测到 2060 年, 新能源度电成本可比当前水平降低 30%~50%。火电发电成本受燃料价格影响较大, 在碳中和背景下, 考虑化石燃料的稀缺性, 预测火电发电成本大幅下降的可能性较低, 如图 6 所示。综合来看, 若按照当前预测的成本变化趋势, 到 2060 年, 非化石能源消费比重 80% 情景相对于 70% 情景的经济性更优, 但在新能源开发难度较大、成本较高的情况下, 非化石能源消费比重 70% 情景也可具备一定的经济性优势。

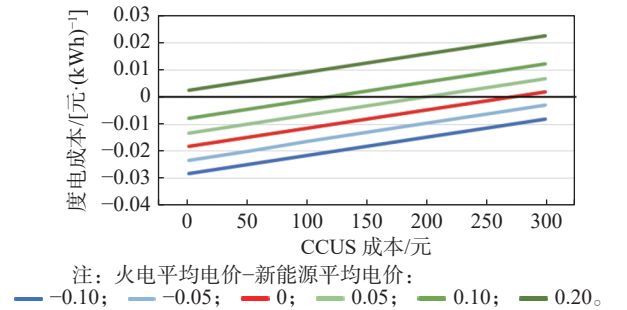


图 6 每吨二氧化碳 70% 情景与 80% 情景度电成本差值变化图

Fig. 6 Change chart of the difference in electricity cost between the 70% and 80% scenarios per ton of carbon dioxide

4.3 电源结构转型思路 and 展望

纵观各国能源低碳转型实践^[20-21], 虽因资源禀赋和国情不同, 转型路径各有侧重, 但均致力于提升非化石能源尤其是可再生能源比重, 不断降低化石能源消费比重。广东电源结构的清洁低碳转型也应在确保安全的前提下综合考虑资源禀赋、经济成本、

生态环境等因素有序推进, 构建新能源为主体的多元电源供应体系是面向碳中和阶段电源结构转型的终极目标, 但对应不同的发展阶段, 转型过程中的优先级和侧重点又各有不同, 宜分阶段、有步骤地推进转型进程。

碳达峰阶段(2030 年前), 以服务长远、先立后破为原则, 推进纳入国家规划的支撑性和调节性清洁煤电项目建设, 适度扩大天然气发电规模, 提升电力供应安全保障能力, 并制定配套机制推动煤电向支撑性、调节性电源转变; 同时以加快发展海上风电、安全有序发展核电为主要抓手, 以发展光伏发电、积极争取清洁外电为重要补充, 推动电源结构清洁低碳转型, 支撑实现全省 2030 年前碳达峰目标。

碳中和阶段(2030~2060 年), 依托技术进步, 重点发展海上风电、光伏发电、核电等非化石能源, 同时积极争取增量外电和接续外电, 电源主体逐步由火电、核电、外电转变为新能源、核电、外电。结合电力安全供应和灵活调节需求, 仍需保留较小规模的火电, 提升火电机组性能并配置 CCUS 装置, 逐步调整配套机制以适应火电功能转变需要。

按照上述发展思路, 对照前述非化石能源消费比重目标, 对碳中和时期广东省电源发展进行展望。总量上, 电源总装机规模预计将达到负荷规模的 2~3 倍; 结构上, 非化石能源装机比重达到 80%, 其中, 省内新能源装机比重(不含外电)达到 50%。分类型看: 火电方面, 化石能源消费比重需控制在 20%~30% 之内, 考虑其中部分用于发电, 预计火电的发电量为 2060 年全社会用电量的 10%~20%, 主要在系统中发挥兜底保障和灵活调节的作用; 新能源方面, 立足资源禀赋, 全力开发风电和光伏资源, 加大深远海开发力度, 为全社会用电量提供 1/3 以上的电量; 核电方面, 作为提升本地供应能力的重要途径, 坚持安全有序发展核电的思路, 做好核电厂址保护和选址筛查工作, 为全社会用电量提供 25% 左右的电量; 外电方面, 尽早谋划西电接续, 积极寻求新的外区电力供应来源, 为全社会用电量提供 15% 以上的电量。

4.4 科技创新支撑

在能源革命和数字革命双重驱动下, 能源科技创新进入持续高度活跃期。可再生能源、核能、储能、氢能等一大批新型能源技术加速迭代, 成为全球

能源向绿色低碳转型的核心驱动力。广东为实现碳中和目标,还需瞄准世界科技前沿和产业变革前沿,提升优势关键技术的创新供给能力,大力推动三代核电技术优化及新一代核能发电、小堆、浮动堆、聚变堆技术和装备研发;加强海上风电基础理论和共性技术创新,重点开展大容量抗台风海上风电机组、漂浮式风机基础、柔性直流送出、低频直流送出等技术攻关;推动高效晶硅电池、钙钛矿叠层电池、薄膜电池、逆变器以及智能组件等关键技术创新;加快新型充换电(V2G)技术装备研发,强化推动电化学储能系统集成、试验检测、监控运维、梯次利用、电池回收等技术研发应用;开展质子交换膜电解水制氢、氢气储运、掺氢发电、氢燃料电池等技术研究,加快关键核心设备的国产化研制;加快柔性直流关键技术研发,带动核心元件装备制造;攻关智能电网核心元器件,在数字化、智能化方向,加强大功率电力电子器件、电力物联网、人工智能与电力融合、电力网络安全等装备及系统研制。突破大规模二氧化碳捕集封存利用关键技术,在吸收/吸附/膜/催化剂等核心材料以及反应塔器和组件等关键设备研发方面取得先机。

通过大力推进能源技术创新,突破一系列关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术,不断拓展能源应用场景,推动用能成本逐步下降,产业创新和商业模式创新推动经济持续发展。

5 结论

锚定远景的能源发展目标,广东面向碳中和的电源供应侧低碳转型,需要综合考虑广东省各主要电源类型的资源条件、建设条件、经济性及技术演进等因素,统筹协调供应安全、清洁低碳、经济合理三大目标。既要在满足资源条件、建设条件约束下大力发展风电、光伏、核电等非化石能源,又要为满足系统安全稳定运行的要求合理适度发展煤电、气电、储能等作为保障性和调节性电源。此外,还要充分结合送端省份的清洁能源开发情况和电力供需形势,提前研判外电未来发展趋势,积极做好增量的谋划和存量回收的应对方案。

值得注意的是,非化石能源的开发规模和节奏很大程度上与科技创新密不可分,技术的提升和成本的下降将带动更大范围的可再生资源开发,也将

进一步提升能源开发转换效率^[22]。建议充分发挥科技创新的引领支撑作用,长期跟踪关注能源领域新技术发展变化,积极推动深远海风电、高效光伏发电、大规模 CCUS、海洋能、先进核能、新型储能和氢能等技术创新突破,加强关键技术集中攻关和示范应用,为广东能源电力的绿色低碳转型和实现“双碳”目标创造良好条件。但同时也须认识到,能源绿色低碳转型绝不是一蹴而就的事,需要合理把握节奏,循序渐进、科学转型,近期在可再生能源尚未大规模开发利用的情况下,煤炭等化石能源仍需承担保障供应安全的重要作用,中长期随着新能源逐步成为电力供应的主体,其他能源将发挥为新能源保驾护航的作用,共同构建安全、低碳的多元化电源供应体系。

参考文献:

- [1] 田雨扬,卢锦玲,赵洪山,等.基于联盟区块链的直购电交易模型[J].电力系统保护与控制,2022,50(8):139-148. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210901.
TIAN Y Y, LU J L, ZHAO H S, et al. Direct purchase electricity transaction model based on a consortium chain [J]. Power system protection and control, 2022, 50(8): 139-148. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210901.
- [2] 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.
- [3] 全球能源互联网发展合作组织.中国碳中和之路[M].北京:中国电力出版社,2021.
Global Energy Internet Development Cooperation Organization. China's path to carbon neutrality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [4] 新华社.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[EB/OL].(2021-10-24)[2022-03-18]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
Xinhua News Agency. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on fully implementing the new development concept and doing a good job in carbon peaking and carbon neutrality [EB/OL]. (2021-10-24) [2022-03-18]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [5] 丁仲礼,张涛.碳中和:逻辑体系与技术需求[M].北京:科学出版社,2022.
DING Z L, ZHANG T. Carbon neutral logic system and technical requirements [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [6] 杨胜,樊艳芳,侯俊杰,等.考虑平抑风光波动的 ALK-PEM 电

- 解制氢系统容量优化模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(01): 85-96. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230500](#).
- YANG S, FAN Y F, HOU J J, et al. Capacity optimization model for an ALK-PEM electrolytic hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(01): 85-96. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230500](#).
- [7] 周楠, 梁馨予, 于向华, 等. 基于 DRL 的综合能源系统优化运行研究 [J]. *电力大数据*, 2023, 26(6): 49-57. DOI: [10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.06.006](#).
- ZHOU N, LIANG X Y, YU X H, et al. Research on optimal operation of integrated energy system based on DRL [J]. *Power systems and big data*, 2023, 26(6): 49-57. DOI: [10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.06.006](#).
- [8] 毕锐, 王孝淦, 袁华凯, 等. 考虑供需双侧响应和碳交易的氢能综合能源系统鲁棒调度 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(12): 122-132. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221371](#).
- BI R, WANG X G, YUAN H K, et al. Robust dispatch of a hydrogen integrated energy system considering double side response and carbon trading mechanism [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(12): 122-132. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221371](#).
- [9] 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. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.06.001](#).
- SHU Y B, ZHANG L Y, ZHANG Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(6): 1-14. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.06.001](#).
- [10] 魏泓屹, 卓振宇, 张宁, 等. 中国电力系统碳达峰-碳中和转型路径优化与影响因素分析 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(19): 1-12. DOI: [10.7500/AEPS20220228009](#).
- WEI H Y, ZHUO Z Y, ZHANG N, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(19): 1-12. DOI: [10.7500/AEPS20220228009](#).
- [11] 苏步芸, 张英杰, 熊晓晨. 双碳、双区背景下深圳电力需求预测 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 127-134. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.016](#).
- SU B Y, ZHANG Y J, XIONG X S. Power demand forecast for Shenzhen under carbon peak and neutrality and Greater Bay Area and pilot demonstration area of socialism with Chinese characteristics [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 127-134. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.016](#).
- [12] 郭挺, 饶建业. “新常态”下广东省中长期电力需求预测 [J]. *广东电力*, 2015, 28(6): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2015.06.002](#).
- GUO T, RAO J Y. Medium and long term electric power demand forecasting for Guangdong province under the "new normal" [J]. *Guangdong electric power*, 2015, 28(6): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2015.06.002](#).
- [13] 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. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780](#).
- 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. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212780](#).
- [14] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002](#).
- CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002](#).
- [15] 张浩楠. 面向碳中和的电力低碳转型规划与决策研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022. DOI: [10.27140/d.cnki.gbbu.2022.000116](#).
- ZHANG H N. Research on low-carbon power transition planning and decision making aligned with China's carbon neutral target [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022. DOI: [10.27140/d.cnki.gbbu.2022.000116](#).
- [16] 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. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.221673](#).
- 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. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.221673](#).
- [17] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 555-580. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716](#).
- LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 555-580. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716](#).
- [18] 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. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0440](#).
- LI M J, CHEN G P, DONG C, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. *Power system technology*, 2019, 43(11): 3979-3986. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0440](#).
- [19] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国 CCUS 路径研究 [R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
- CAI B F, LI Q, ZHANG X, et al. Carbon capture utilization and storage (CCUS) annual report (2021) in China: China's CCUS

pathway research [R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2021.

- [20] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.

ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467.

- [21] 樊星, 李路, 秦圆圆, 等. 主要发达经济体从碳达峰到碳中和的路径及启示 [J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(1): 102-115. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.073.

FAN X, LI L, QIN Y Y, et al. The pathway from carbon peak to carbon neutrality in major developed economies and its insights [J]. Climate change research, 2023, 19(1): 102-115. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.073.

- [22] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3361.2021.31.005.

ZHOU X X, ZHAO Q, ZHANG Y Q. Development prospect and key technologies of China's energy and power system under the "dual carbon" target [J]. China power enterprise management, 2021(31): 14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3361.2021.31.005.

作者简介:



罗莎莎

罗莎莎(第一作者, 通信作者)

1988-, 女, 高级工程师, 注册咨询工程师, 硕士, 主要从事电源规划、能源规划、产业发展研究工作(e-mail) luoshasha@gedi.com.cn。

郭经韬

1988-, 男, 高级工程师, 注册咨询工程师, 硕士, 主要从事能源规划、双碳研究工作(e-mail) guojingtao@gedi.com.cn。

蔡颖倩

1992-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统电源优化规划、能源规划研究工作(e-mail) caiyinqian@gedi.com.cn。

余欣梅

1978-, 女, 正高级工程师, 注册咨询工程师, 博士, 主要从事电源规划、能源规划、低碳产业发展研究(e-mail) yuxinmei@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)

广 告

封面图片: 万物互联视角下的能源物联网: 现状、技术和案例----- 封一

喜报: 《南方能源建设》收获期刊首个 CiteScore----- 封二

2025 年“大规模新能源制氢技术”专刊征稿----- 封三

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司----- 封四