

“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想

叶强,胥威汀,汪伟,王海燕,刘阳,李旻,唐权
(国网四川省电力公司经济技术研究院,四川成都 610041)

摘要:中国提出力争2030年前实现碳达峰,争取2060年前实现碳中和,为中长期中国应对气候变化指明了方向,将对中国的能源和经济系统产生深远的影响。为支撑全国“碳中和”目标的实现,首先,分析了“碳中和”的目的和意义、国内外“碳中和”措施和政策;然后,提出了四川电力系统减碳的路径构想,并提出了需提前准备应对大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求;最后,经初步估算,该路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。

关键词:碳中和;电力;减碳;发展战略

中图分类号:TK01 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)02-0028-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210206

Path Design of Carbon Emission Reduction of Sichuan Power System for Carbon Neutrality

Ye Qiang, Xu Weiting, Wang Wei, Wang Haiyan, Liu Yang, Li Ming, Tang Quan
(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: China will achieve the goal of peak carbon dioxide emissions in 2030 and carbon neutrality in 2060, which will have a profound impact on China's energy and economic system. Firstly, the purpose and meaning of carbon neutrality, and the policies and measures at home and abroad for carbon neutrality are analyzed. Secondly, the path design of carbon emission reduction of Sichuan power system for carbon neutrality is proposed. Finally, the suggestions for integration of large-scale renewable energy, flexible resource allocation, stability of large system with low inertia, high elasticity of power grid are proposed. According to the preliminary estimation, carbon emission reduction in Sichuan will occupy about 3% of the goal of national carbon neutrality.

Key words: carbon neutrality; power system; carbon emission reduction; development strategy

0 引言

中国国家主席习近平2020年9月22日在第七十五届联合国大会宣布:中国将提高自主贡献力度,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”。这是中国首次向全球明确实现“碳中和”的时间点,也是迄今为止各国中做出的最大减少全球变暖预期的气候承诺。2020年12月12日习近平主席在气候雄心峰会上进一步宣布:到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,森林蓄积量将比2005年增加 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$,

风电、太阳能发电总装机容量将达到1200 GW以上。

四川是中国最大清洁能源基地,为支撑全国“碳中和”目标的实现,下面分析了“碳中和”的目的和意义、国内外“碳中和”措施和政策。根据新形势下的变化分析了四川电力减碳的路径构想,并提出了需提前准备应对大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求。经初步估算,该战略路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。

1 “碳中和”的目的和意义

“碳中和”是指在一定时间内直接或间接产生的温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形

式,以抵消自身产生的二氧化碳排放量,实现二氧化碳“零排放”。“碳中和”涉及政府行为、企业行为、个人行为,需要全民族的共识和全社会的行动。

“碳中和”旨在减少碳排放,控制温室效应。为应对气候变化所造成的影响,各国政府于 2015 年达成的《巴黎协定》提出要将全球平均气温相比于工业革命前的升幅控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,并努力控制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。根据最新评估模型和情景研究,若要将温升控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,中国需要在 2080 年左右实现“碳中和”;若要将温升控制在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,需要在 2060 年左右实现“碳中和”。

实现“碳中和”有利于能源经济和生态文明良性发展。对内有利于经济结构、能源结构、产业结构转型升级;有利于生态文明建设和生态环境保护、生态环境质量持续改善;有利于国内大循环为主体、国内国际双循环发展格局的形成。对外有利于中国国际政治形象提升和国际影响力的增强;有利于生态文明和美丽地球建设;有利于全球“碳中和”目标的尽早实现。

2 “碳中和”国内外现状

“碳中和”是世界各国应对气候变化的重要手段,根据《巴黎协定》中各国碳排放承诺目标,全球各国均根据本国发展情况制定相关支持政策^[1]。

欧盟及日本等发达经济体采取较为积极支持政策,稳步推进主要碳排放部门减排。欧盟委员会于 2018 年年底发布了 2050 年零净碳排放量计划,计划到 2050 年实现“碳中和”,即将净碳排放量降至 0;日本于 2019 制定了《巴黎协定下的长期战略》,其中提出到 2030 年温室气体较 2013 年减排 26%,2050 年减排 80%,到本世纪下半叶尽早实现温室气体排放中和的目标。德国 2019 年可再生能源发电比例达到 46%,创历史新高,计划到 2050 年实现总发电量中可再生能源占 80% 以上。法国计划到 2050 年全国电力全部来自清洁能源。瑞典、奥地利已于 2020 年关闭了所有燃煤电厂。法国、英国分别宣布到 2021 年、2025 年关闭所有燃煤电厂。芬兰计划更为彻底,到 2030 年将全面禁止使用煤炭。此外,挪威计划到 2025 年禁售全部燃油汽车;丹麦、荷兰、爱尔兰计划到 2030 年实现燃油车禁售;法国、西班牙、英国、葡萄牙计划到 2040 年实现此目标。减碳措施总体而言:能

源供应方面,提高可再生能源装机及应用比例,减少煤炭利用;交通运输方面,推广电动汽车应用,降低燃油汽车排放标准;工业生产方面,促进碳排放与工业生产脱钩,降低钢铁、水泥等行业碳排放量;建筑物排放方面,提高建筑物及设备能效标准,并要求新建房屋“零能耗”。美国、印度等国,在“碳中和”目标实现上政策较为保守甚至出现倒退。

中国采取有力措施应对气候变化。2013 年制定了《国家适应气候变化战略》,出台了行业适应气候变化政策。2015 年向联合国提交了国家贡献目标;二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达到峰值。2016 年在《能源生产和消费革命战略 2016—2030》制定出各阶段目标,综合运用调整产业结构和能源结构、节约能源和提高能效、增加森林碳汇和制度创新等多种手段,大幅度降低了能源消耗强度和二氧化碳排放强度,有效地控制了温室气体排放。2019 年碳排放强度比 2005 年降低 48.1%,提前完成 2020 年控制温室气体排放目标,据转了二氧化碳排放快速增长的局面。

世界主要国家二氧化碳逐年排放量及 2019 年碳排放比例分别如图 1 和图 2 所示。

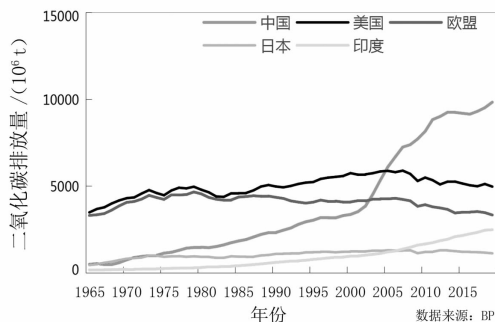


图 1 世界主要国家二氧化碳逐年排放量

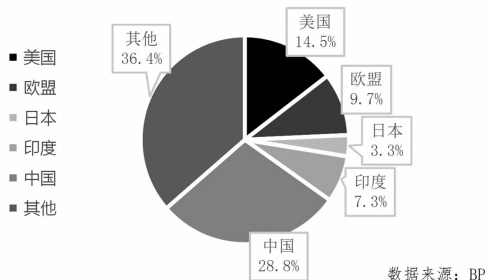


图 2 2019 年世界主要国家二氧化碳排放比例

3 四川电力减碳路径构想

3.1 四川碳排放现状

四川碳排放已阶段性达到峰值。四川在有效的环

保减排政策和“清洁替代、电能替代”等一系列举措下,通过调整能源结构、提高节能技术、优化产业结构等措施,节能减排成效显著,单位 GDP 能耗呈下降态势,“十一五”和“十二五”分别降低了 20.3% 和 25.2%,“十三五”以来降低了 16.0%。二氧化碳排放总量在 2013 年阶段性达到峰值 3.42×10^8 t,此后开始逐年下降,2019 年已降至 3.04×10^8 t。相比于发达国家和东部发达地区,四川经济基础较为薄弱,人均 GDP、城镇化率均低于全国平均水平,持续推进工业化、城镇化和农业现代化对碳排放仍有刚性需求。伴随着成渝地区双城经济圈的建设,碳排放极有可能出现新的峰值。四川逐年二氧化碳排放量和单位产值能耗见图 3。

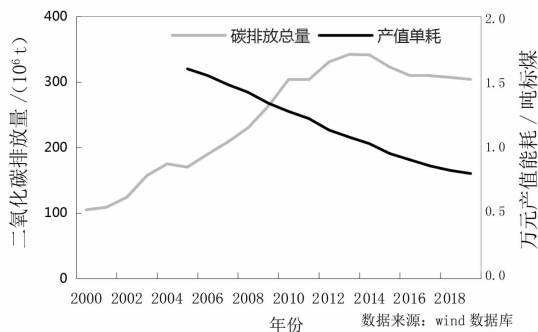


图 3 四川逐年二氧化碳排放量和单位产值能耗

四川为减少碳排放作出了巨大贡献。2019 年四川可再生能源发电量 341 500 GWh,占全部发电量的 87.5%,高于全国平均水平 56.4 个百分点,相当于减排二氧化碳 2.86×10^8 t。碳排放强度为 0.65 t/万元,仅全国平均水平的 66%,居全国 22 位,是中西部最低省份之一,仅高于西藏。

四川可率先实现“碳中和”。作为全国最大的清洁能源基地,四川省碳排放总量和人均排放均处于较低水平。2019 年四川碳排放占全国 3%,居全国第 12 位,而 GDP 占全国 4.7%,居全国第六;人均碳排放约 36 300 t/a,仅为全国平均水平的 50%,是除西藏外人均碳排放最低的省份。清洁能源是四川目前保持较低碳排水平的重要原因。依托清洁能源优势,四川可提前实现省内“碳中和”,并可向省外输出净碳减排量。四川省碳排放总量和人均排放均还处于较低水平。

3.2 电力减碳的必要性

电力系统降低碳排放是实现“碳中和”的必然要求。自 2005 年起,中国已成为世界第一碳排放国,2019 年全球二氧化碳排放总量为 3.3×10^{10} t 左

右,其中中国二氧化碳排放量达到 28.8%,见图 1 和图 2。能源生产,主要是电力和热力生产是中国最大的二氧化碳排放行业,2018 年电力和热力生产行业二氧化碳排放量占总排放量比例已超过 50%^[3],详见图 4。可见,电力系统降低碳排放是“碳中和”中至关重要的一环,电力减碳是实现“碳中和”的重要路径和手段。

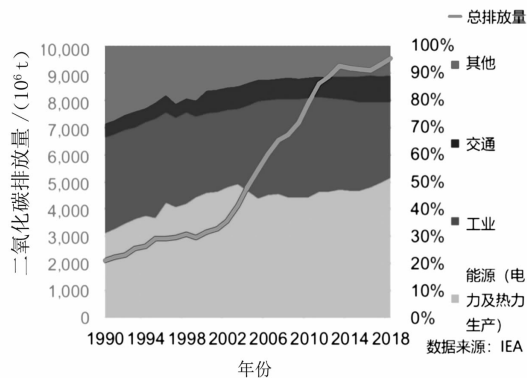


图 4 1990—2018 年中国主要排放行业二氧化碳排放量

3.3 减碳路径

通过推动能源生产低碳化、能源消费电气化及电网降损等措施,可大大降低二氧化碳排放量。以 2060 年实现以上减碳总量为目标,努力实现全国“碳中和”。

3.3.1 加速推进能源生产低碳化

持续开发水力发电,适度发展天然气发电,大力发展风力和光伏发电^[4],适时发展生物质发电,安全高效发展核电,严控煤电规模并有序退出^[5]。预计 2060 年清洁能源每年可发 998 400 GWh 电量,减排 $9.294 8 \times 10^8$ t 二氧化碳。相对 2019 年减排 $6.211 7 \times 10^8$ t。

1) 持续开发水力发电。水力发电效率高,不产生碳排放,绿色环保,具有较高的技术成熟度、能源密度以及较优的经济性,长期在中国电力低碳转型中发挥着战略性作用。四川境内河流众多,水力资源丰富,技术可开发量 148 GW,年发电量 676.4 TWh,位居全国第一;经济可开发量 145 GW,年发电量 659.4 TWh。水电是四川最具优势的清洁能源,目前已累计外送电量超过 1000 TWh,为减排做出了巨大贡献。2019 年年底,四川水电装机 78 460 MW,开发率仅五成,后续开发空间依然较大。

2) 适度发展天然气发电。相比煤电,气电碳排放低,每千瓦时的发电量的二氧化碳排放约为煤电的 44%;相比风电光伏,气电更加稳定、灵活,有优秀的

调峰性能,建设一定比例的气电,有利于维持电网安全稳定运行。目前制约气电发展的因素主要有天然气对外依存度高、上网电价高以及燃气发电核心技术尚未完全掌握。随着国内燃机、页岩气开采技术的提升,气电的发展空间巨大。四川天然气资源丰富,是全国三大气田之一,根据全国第二次油气资源评价结果,四川盆地天然气总资源量为 $7.1851 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占全国天然气资源总量的 19%。

3) 严控煤电规模并有序退出

煤电在中国的发电结构中占有主导地位,约占发电量 50% 以上。要实现“碳中和”,必须严控煤电规模并有序退出,煤电的发电量由可再生能源来替代,这是实现电力减碳的重点所在。四川省煤炭资源贫乏,煤炭资源保有储量约 $1.227 \times 10^{10} \text{ t}$,探明储量仅占全国总储量的 1% 左右,电煤主要依靠本地煤炭及铁路运输供给本地煤电机组。宜按“先小后大”的原则有序退出煤电装机,同时在电力系统中发展电化学储能,提高电网运行灵活性。

4) 安全高效发展核电。核电是一种清洁能源,不排放二氧化碳和烟尘,具有经济性、高效性和安全性的特点,发展核电是电力减碳的有效途径。目前中国核电规模较小,发展潜力巨大。目前已完全掌握以华龙一号、AP1000 为代表的三代核电技术,并具有完全自主知识产权,部分领域已达到了国际领先水平,并在积极开展小堆、四代堆、热核聚变等新一代核电技术的研发。四川铀矿资源丰富、地质稳定、河流众多,同时拥有中国核动力研究院、核工业西南物理研究院、中国工程物理研究院等核技术研发单位,有东方电气等核电设备制造单位,发展核电具有得天独厚的优势。

5) 快速提升风电和光伏发电装机。新能源分布广,具备可再生特性,可供永续使用,不产生碳排放。四川省风能资源集中在川西高原和盆周山地,其中以德昌为中心的安宁河谷、茂县为中心的岷江河谷、丹巴为中心的大渡河谷资源较好,盆周地区也具有潜在

开发价值。初步估算目前全省离地 50 m 高的风能理论储量为 88 350 MW,潜在开发量 15 000 MW。

川西高原太阳能相对富集,是四川省乃至中国太阳能的主要分布区,年总辐射量在 5000 MJ/m^2 以上。全省太阳能理论蕴藏量每年约 $8.0 \times 10^5 \text{ t}$ 标准煤,其中三州一市约占全省的 72%。

6) 适时发展生物质发电。生物质属于清洁的可再生能源,燃烧后的二氧化碳排放属于自然界的碳循环,利用生物质发电可大限度降低环境污染问题,也可降低化石能源消耗。四川生物质能源比较丰富,每年有可待开发利用的人畜粪便 $3.149 \times 10^7 \text{ t}$,薪柴 $1.189 \times 10^7 \text{ t}$,秸秆 $4.212 \times 10^7 \text{ t}$,沼气约 $1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。适时建设一定规模的生物质发电,可减少二氧化碳的排放。

综合考虑了四川能源资源禀赋、发电技术约束及电力电量平衡等因素,清洁能源装机规模建议详见表 1。

3.3.2 持续推动终端用能电气化

加快电能替代,推动电能工业、建筑、交通等领域以电代煤、以电代油、以电代气、以电代柴的广泛应用,形成以电能为主的能源消费格局,将大幅提高中国能效水平,降低二氧化碳排放强度^[6]。预计 2060 年汽车保有量约 3000 万辆,全部实现电动化,用电量为 $4.5 \times 10^{10} \text{ kWh}$,节约替代燃油超过 $6.96 \times 10^7 \text{ t}$,减少二氧化碳排放超过 $1.166 \times 10^8 \text{ t}$ 。相对 2019 年减排 $1.1648 \times 10^8 \text{ t}$ 。

3.3.3 提高电网传输效率

1) 电网技术设备低碳更新:增强科研力量重点研究 SF₆ 泄露监测技术和回收再利用技术^[7],加强 SF₆ 气体回收工作,最大限度减少 SF₆ 的排放。据测算,国网四川省电力公司每年回收 SF₆ 气体约 3.5 t,相当于年降低碳排放 $8.3 \times 10^4 \text{ t}$,净化再生气体回用至设备,可节约新气购置费约 50 万元,低碳和经济效益可观。

2) 电网低碳调度控制^[8]:充分利用四川省内的

表 1 2019—2060 年四川省清洁能源装机构成

单位:MW

年份	水电	风电	太阳能	气电	生物质	核电	合计
2019	78 460	3030	1880	820	530	0	84 730
2025	112 340	10 000	10 000	4000	1420	0	13 770
2030	133 190	1400	20 000	4000	1520	0	172 720
2035	139 400	1700	30 000	4000	1600	0	192 000
2060	145 000	70 000	5 0000	4000	3000	15 000	287 000

清洁能源发电资源和储能技术,开展水风光储协调的低碳调度,在煤电退出以前通过对各类发电机组按能耗排序联合经济调度,以优化电网潮流与清洁能源的利用和消纳。

3) 电网节能降损:通过合理规划电网结构、调整运行方式、加强管理等手段来降低电网的能量损耗。网损在电能传输过程中并未直接导致碳排放,但其源端的化石燃料燃烧发电因这部分损耗产生了实际的碳排放。2019年,国网四川省电力公司综合线损率为7.65%,损失电量为 1.807×10^{10} kWh,若分摊至火电,相当于 2.39×10^6 t的二氧化碳排放。这意味着在其他条件不发生变化的情况下,当前四川电网线损率每降低1个百分点,折合减排二氧化碳约 3.35×10^5 t。考虑化石能源发电规模变化,能够得到逐年减排规模。

经初步估算:预计2030年,四川电力每年可贡献二氧化碳减排量 6.17×10^8 t,相对于2019年减排 3.08×10^8 t;预计2060年,四川电力每年可贡献二氧化碳减排量 1.046×10^9 t,相对于2019年减排 7.38×10^8 t。四川电力贡献减碳量估算见图5和表2。

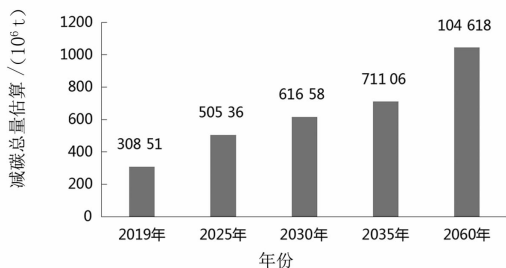


图5 四川电力减碳总量估算

四川电力减碳路径能为全国“碳中和”目标贡献约3%的二氧化碳减排量。根据以上路径分析,若能按期实现减碳目标,则到2030年,四川电力能为全国贡献 3.08×10^8 t碳减排量;2030—2060年,四川电力能通过源、网、荷多个维度的路径,实现 4.29×10^8 t碳减排量(含电动汽车接入),为全国

减碳目标做出约3%的贡献值。

按照规划,四川将在现有的“四直六交”跨省跨区外送通道的基础上规划新增雅中—江西、白鹤滩—江苏、白鹤滩—浙江以及金上—湖北共四回 ± 800 kV特高压直流工程,建成后年外送电量达 3.0×10^{11} kWh,相当于为外省提供 2.67×10^8 t碳减排量。

4 建议

要实现以上减碳战略,四川电网将面临大规模新能源接入、大范围灵活性资源调配、低惯量大系统稳定性及电网“高弹性”等全新的挑战和要求。为适应“碳中和”图景下的新形势,建议提前采取以下举措,实现电网的迭代升级,力争在万象更新的未来保持科学发展和创新引领。

1) 大力推进大渡河、雅砻江、金沙江上游水电开发,全面支撑甘孜、阿坝、攀西新能源基地建设及其接入送出,积极论证四川天然气和核电规划布局,到2060年水电装机容量至少达到140 GW,新能源装机容量至少达到约120 GW,天然气、核电、生物质及其他清洁能源装机容量至少达到20 GW;统筹火电灵活性改造、需求侧响应、电化学储能等灵活性资源的配置,确保电网调节友好和系统备用。

2) 推进电能替代,提升电能在终端能源消费占比。提前布局,科学合理规划充换电网络,满足大规模电动汽车接入电网的需求。密切跟踪研究电动汽车市场发展动态,对具有经济开发潜力的点位提前做好项目前期和储备工作,提高市场应对速度;配合政府主管部门做好电动汽车充换电设施规划工作,同时做好与电网规划的对接工作,引导充换电设施有序建设,避免电网配套工程重复或滞后建设,确保社会资本投资建设的充电设施无障碍接入电网,为

表2 四川电力各环节减碳总量估算

单位:10⁴ t

年份	水电	风电	太阳能	气电	生物质	核电	发电小计	电网	电动汽车	合计
2019	29 513	634	251	103	330	0	30 831	8	12	30 851
2025	45 492	2225	1335	499	885	0	50 436	48	52	50 536
2030	53 935	3115	2670	499	947	0	61 166	48	444	61 658
2035	56 450	3783	4005	499	1017	0	65 754	28	5324	71 106
2060	58 718	15 575	6675	499	1869	9612	92 948	10	11 660	104 618

(下转第42页)