

文章编号: 1006-2467(2021)12-1499-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.272

“双碳”目标下中国清洁电力发展路径

黄 强, 郭 恂, 江建华, 明 波

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要: 目前,第三次能源革命已经开始,为了减少碳排放,发达国家先后制定了清洁能源发展战略,并公布了放弃火电、核电的时间表。与此同时,中国也向世界作出承诺:2030 年前碳排放达峰,2060 年实现碳中和。因此,在“双碳”目标下,研究清洁电力发展路径具有重要意义。分析了中国水、风、光等清洁能源储量及其特征,预测了中长期电力需求,依据电力电量平衡原理,估算了 2030 和 2050 规划水平年电力系统结构组成,并分析了未来 CO₂ 排放趋势,提出了未来中国清洁电力的发展对策与建议。结果表明:预计 2027 年中国电力系统将实现“碳达峰”;2030 年中国清洁电力发电量将超过总发电量的 50%;2050 年火电、核电将被水、风、光等清洁电力全部取代,电力行业将实现 CO₂ 的“零排放”,基本全面实现电力系统的绿色转型,以响应国家的“双碳”目标。

关键词: 清洁电力;碳排放;水-风-光-储互补运行;电力电量平衡;发展对策

中图分类号: TM 612

文献标志码: A

Development Pathway of China's Clean Electricity Under Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

HUANG Qiang, GUO Yi, JIANG Jianhua, MING Bo

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Nowadays, the third energy revolution has taken place. Many developed countries have formulated clean energy development strategies and announced the time for phasing out thermal and nuclear power to reduce carbon emissions. Meanwhile, China has made a commitment to the world that the carbon emissions of China will peak before 2030, and the carbon neutrality will be achieved before 2060. Therefore, it is of great significance to study the development pathway of clean electricity of China. The reserves and characteristics of clean energy such as hydro, wind, and solar in China are analyzed. The medium and long-term power demand of China is projected, and the power system structure in 2030 and 2050 are respectively estimated based on the electric power and energy balance equations. In addition, the trend of carbon emissions is also analyzed. Some suggestions are proposed to guide the development of China's clean electricity. The results indicate that the “carbon peaking” of China's power system would arrive in 2027, and the clean electricity of China is projected to exceed 50% of the total energy production

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879213, 52009098), 国家重点研发计划项目(2017YFC0405900), 博士后创新人才支持计划项目(BX20200276)

作者简介: 黄 强(1958-), 男, 四川省绵阳市人, 教授, 博士生导师, 主要从事清洁能源多能互补运行研究。

通信作者: 明 波, 男, 副教授, 电话(Tel.): 029-82312797; E-mail: mingbo@xaut.edu.cn.

in 2030. Thermal and nuclear power can be replaced by clean electricity such as hydro, wind, and solar energy in 2050, the power industry will achieve “zero CO₂ emission”, and the transformation of the green power system will be achieved in response to carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: clean electricity; carbon emission; hydro-wind-photovoltaic-storage complementary operation; electric power and energy balance; development strategy

工业革命以来,化石能源的开发利用加速了人类文明的发展.但一方面,化石燃料燃烧产生大量的CO₂、SO₂等气体,导致全球气温升高,生态环境遭到破坏^[1].另一方面,全球化石能源储量有限,仅能满足人类未来100年左右的需求^[2],且化石能源用于发电并不能完全发挥其价值.进入21世纪,日益减少的化石能源储量使世界各国有了能源危机意识,促进了第三次能源革命,以水能、风能和太阳能等为代表的清洁能源得到世界各国的青睐,被认为是世界未来电力系统的发展方向.

中国是世界上最大的能源生产与消费国,也是CO₂排放大国.2019年CO₂排放量达 9.8×10^9 t,占全球26.6%.因此,中国的节能减排对于实现“全球平均气温较工业化前期上升幅度控制在2℃以内”的巴黎协定具有重大意义.为应对全球变暖,实施节能减排,我国提出了“CO₂力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”目标^[3-4].在当前中国的碳排放结构中,电力系统占比最高:2019年火电CO₂排放量为 4.16×10^9 t,占总排放量的42.4%.因此,按照电力发展趋势和节能减排要求,中国电力系统的绿色转型是实现“双碳”目标的必由之路.

中国清洁能源储量丰富,开发潜力巨大.其中,水能资源蕴藏量约 6.94×10^8 kW,为世界之冠^[5],风能(70 m高度)资源的理论蕴藏量约为 6.37×10^{10} kW,太阳能资源理论蕴藏量约为 1.86×10^{12} kW,合计 1.92×10^{12} kW,足以满足中国未来的电力需求.虽然风、光电具有强随机性、间歇性和波动性,电网难以消纳^[6],但是通过大规模水-风-光-储互补协调运行可弥补其不足.在清洁能源大规模开发利用方面,中国拥有得天独厚的优势,其必要性与可行性表现在如下几个方面:

(1) 经济体量大,是目前世界第二大经济体,且发展迅速,经济的持续发展是电力系统实现绿色、清洁化转型的重要基础.

(2) 风能与太阳能存在天然的季节互补性.风能资源在冬季较丰富,夏季较匮乏;而太阳能在冬季

较匮乏,夏季则较丰富,风、光能资源的互补性为中国未来清洁电力的稳定生产创造了有利条件.

(3) 水能资源丰富,水机组具有启闭速度快、出力可调性强等优点,是平抑风、光出力随机波动性的理想电源.近年来的实践证明,水-风-光-储联合运行,能够很好地满足电力生产中清洁能源稳定性需求^[7-8].

(4) 除了常规水电,抽水蓄能电站是水电发展的重要方向.2019年,中国已规划建设抽水蓄能电站 1.2×10^8 kW,抽水蓄能发电不受河川径流变化影响,调节能力更强,将会为电网安全运行提供重要的容量支撑^[9].

(5) 随着电化学、氢等储能技术的进步^[10-11],未来建成的大型储能电站也将会在风、光能源的消纳中发挥举足轻重的作用.

因此,中国新型电力系统的发展和建设应以风、光能为主的新能源为核心,常规水电、抽水蓄能和储能作为风、光电消纳的补偿电源,并逐步降低火电和核电在电力系统中的占比,构建水-风-光-储互补协同运行的绿色、清洁电力系统,响应“碳达峰、碳中和”战略,最终实现节能减排目标和电力系统的可持续发展.

本文针对“双碳”目标下中国清洁电力的发展问题,在简述电力发展趋势的基础上,揭示中国清洁能源储量及其特征.以2019为现状年、2030为中期规划水平年、2050为长期规划水平年,预测中长期电力需求.依据电力电量平衡原理,估算中长期规划水平年电力系统结构组成,并分析未来电力行业碳排放趋势.本文旨在为以新能源为主体的新型电力系统发展对策的制定提供学科依据和参考.

1 世界电力发展趋势

随着全球气候变暖、环境污染、化石燃料储量下降以及核废料排放、核事故等问题的出现,当今世界各国基本确立以新能源发电为主导的电力发展战略.世界发达国家在能源转型中坚持科技创新为先行,并制定了有关清洁再生能源发展政策和战略计

划,以指引新能源产业的发展.其核心是逐步淘汰电力系统中的火电、核电,同时不断增加水风光等清洁电力占比.

(1) 火电. 目前,部分发达国家已经宣布放弃火电(见表 1). 瑞典 2020 年放弃火电,是淘汰火电时间最早的国家之一;法国宣布 2023 年完全依赖清洁能源供电;2019 年,英国的清洁能源发电量已经超过化石燃料发电,到 2025 年完全依赖清洁能源供电;德国于 2000 年通过《可再生能源法》,以法律形式定调未来 50 年的新能源发展,到 2038 年完全依赖清洁能源供电.

表 1 部分国家淘汰火电时间

Tab. 1 Time to phase out thermal power of some countries

国家	年份
奥地利	2020
瑞典	2020
法国	2023
意大利	2025
英国	2025
丹麦	2030
瑞士	2030
德国	2038

(2) 水电. 挪威、美国、日本、德国等发达国家水能资源开发利用率较高^[12]. 其中挪威水力发电占 99.5%,是世界上水电比例最高的国家^[13].

(3) 风电. 丹麦是世界上最早发展风力发电的国家,其风力发电技术在全球处于领先地位,风力发电占全国总发电量的 50%左右^[13].

(4) 光电. 德国的太阳能发电在技术创新、国家政策方面都处于领先地位,2019 年光电占全国总发电量的 7.7%^[14].

(5) 核电. 核电在 20 世纪 60 年代至 20 世纪 80 年代得到快速发展.但在切尔诺贝利事故(1986 年)和福岛核电站事故(2011 年)后,部分国家决定逐渐淘汰核电.日本 2018 年宣布在 2030 年前彻底放弃核电,并在 2050 年之前实现全面脱碳^[15].德国于 2011 年正式宣布放弃核能发电,并计划于 2022 年关闭所有核电厂^[16].除此之外,瑞士、意大利和韩国也都宣布全面取消新建核电站,逐渐走向零核电时代.

近十年来,中国清洁电力发展迅速,风、光电在电力系统中的占比不断上升.但与挪威、英国、德国、

丹麦等发达国家相比,仍存在火电占比高、水电开发利用率低等问题.因此,应大力发展清洁电源,逐渐压缩火电与核电,建设清洁、低碳、高效的新型电力系统.

2 中国清洁能源储量及电价分析

中国幅员辽阔,各地能源结构存在差异,清洁能源的发展应遵循因地制宜的原则,需充分了解清洁能源在全国各地的储量情况,与时俱进地发挥当地特色能源的优势.

2.1 清洁能源储量

中国水、风、光等清洁能源储量丰富,技术可开发总量达 15.687 TW,如表 2 所示.

表 2 中国水、风、太阳能资源储量

Tab. 2 Hydro, wind, and solar energy reserves of China

能源类型	理论蕴藏		技术可开发	
	装机容量/ TW	年发电量 $\times 10^{-3} /$ (TW · h)	装机容量/ TW	年发电量 $\times 10^{-3} /$ (TW · h)
水能	0.694	5.92	0.687	5.86
风能	63.7	132.69	5	10.42
太阳能	1 860	2 401.26	10	12.91
合计	1 924.394	2 536.52	15.687	25.87

(1) 水能. 中国水能资源技术可开发量达到 0.687 TW,居世界首位^[5].以电量计,可开发的水能资源占世界总量的 15%.水能资源主要集中在西南、西北地区,占总量的 82.5%.

(2) 风能. 中国疆域辽阔,海岸线长,风能资源丰富.70 m 高度年平均风功率密度为 232.4 W/m²,技术可开发量达到 5 TW,主要分布在三北(西北、华北和东北)地区、青藏高原、云南、广西以及浙江沿海等地.

(3) 太阳能. 太阳能资源理论储量约 1 860 TW,技术可开发量达 10 TW.但资源分布地区差异较大,总体上呈现高原、干旱地区储量多,平原、多雨地区储量少的特点.

中国水、风、光清洁能源储量丰富,技术可开发总量装机 15.687 TW、年电量 25 870 TW · h,清洁能源储量远远大于国家电力需求,实现电力系统绿色转型切实可行.此外,中国水、风、光清洁能源均居世界首位,但多集中于西部地区.为满足东部经济发展的电力需求,“西电东送”已成为国家电力发展战略.

2.2 电价分析

近十年来,风电、光电随着建设成本以及发电成本的大幅下降,已经实现了平价上网,财政补贴缺口正逐渐缩小.根据文献资料得到中国目前和未来水平年水、风、光、储电站电价^[17-19],如表 3 所示.可以看出,随着风电、光电开发技术的进步,发电成本显著下降,清洁电力的经济性将远超化石能源发电.

表 3 中国目前及未来水平年水、风、光、储电站电价
Tab.3 Electricity prices of hydro, wind, solar, and storage plants in China

年份	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]			
	水电	风电	光电	储能
2019	0.2~0.3	0.38	0.389	0.6~0.9
2030	0.2~0.3	0.25	0.150	0.4
2050	0.2~0.3	0.20	0.100	0.3

3 未来水平年中国电力需求分析

3.1 2019 年电力现状分析

图 1 所示为中国近十年各类型发电装机以及发电量的变化过程.可知:随着经济的快速发展、电力需求持续增长,各类型的电源装机都以不同速度增长,且火电装机和发电量的占比逐年降低.2019 年中国电力构成如表 4 所示,总装机容量 2.01 TW,发电量 7 326.6 TW·h,相比 2009 年分别增长 130%和 99%.

此外,中国电力需求的增长速率与 GDP 增速密切相关(见图 2),随着 GDP 增速放缓,总用电量的增速也由 10%以上降至 5%左右.因此,可以预见,未来用电量的增速也将与经济发展速度呈正相关关系.

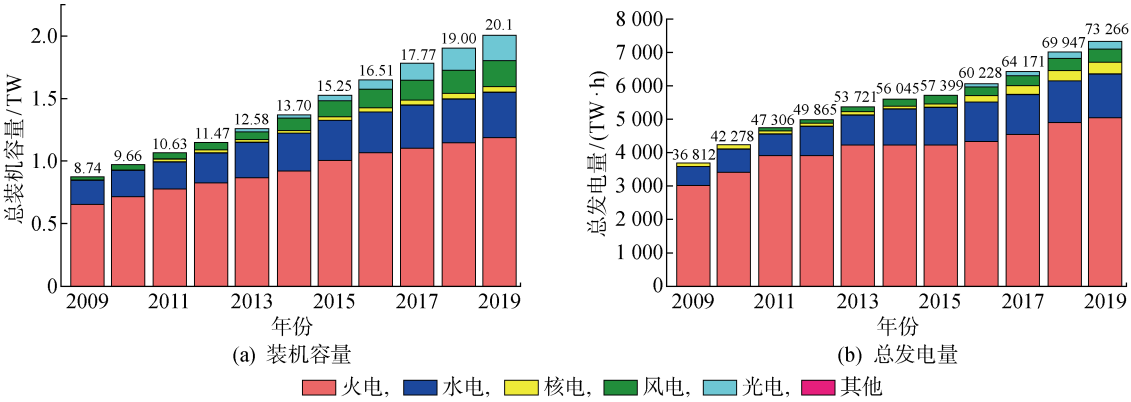


图 1 2009—2019 年中国发电总装机与总发电量
Fig. 1 Total installed capacity and total energy production of China in 2009—2019

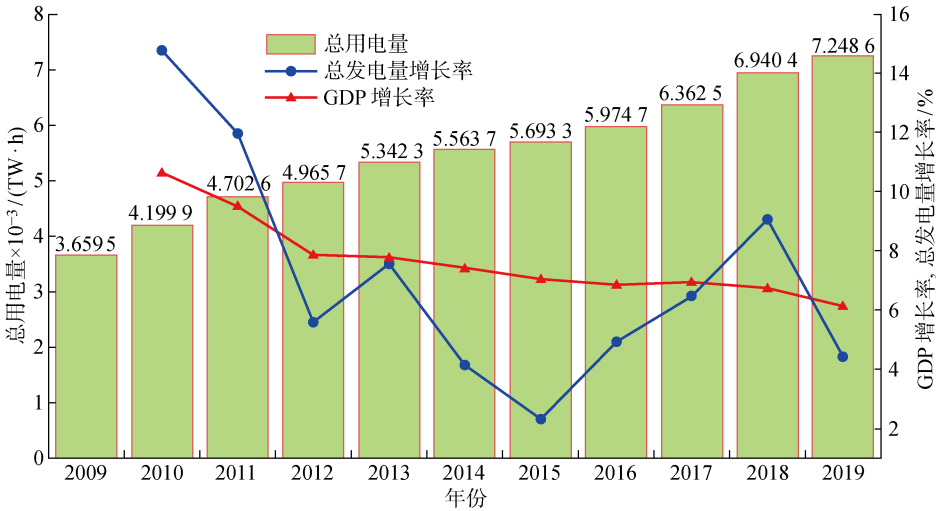


图 2 中国电力需求与 GDP 增长情况
Fig. 2 Electricity demand and GDP growth of China

表 4 2019 年中国电力构成

Tab. 4 Electric power structure of China in 2019

电源类型	装机容量/ TW	年发电量/ (TW·h)	年利用 时间/h
火电	1.166	4 935.4	4 307
核电	0.049	347.8	7 394
常规水电	0.328	1 302.1	3 697
风电	0.209	405.3	2 083
光电	0.204	223.7	1 291
抽水蓄能	0.030	31.6	1 053
其他	0.024	111.1	5 181
合计	2.010	7 326.6	3 645

注:年利用时间为 6 000 kW 及以上发电设备数据(来源:中电联行业发展与环境资源部)。其他类型装机主要指生物质能,潮汐能电站装机较小。

3.2 中长期电力需求预测

据测算,中国 2020—2049 年间的 GDP 年均增长率需达到 5.0%,才能实现社会经济现代化强国的经济建设目标^[20-21]。依据现有经济增长水平,对未

来年均 GDP 增长率分阶段规划:2020—2030 年、2030—2040 年及 2040—2050 年年均 GDP 增长率分别为 5.7%、5.0%及 4.3%。在全社会电气化加速改革的背景下^[22-23],用电技术的不断提高和电力市场的完善使得电能最终用能环节的竞争力显著提升,加之电动汽车产业的快速发展和普及^[24-25],推动了未来电力需求的持续增长。综合考虑当前电力需求增长速率、未来 GDP 增速持续放缓、节能意识和技术的持续进步^[26]等因素,预计 2020—2030 年、2030—2035 年、2035—2040 年、2040—2045 年及 2045—2050 年的电力需求年平均增长率分别为 3.5%、3.0%、2.0%、1.5%及 1.0%。

依据现状年电力需求及未来各阶段电力需求年均增长率,采用趋势外推法计算得到未来电力需求结果,如图 3 所示。其中,2030 和 2050 水平年的电力年最大负荷将分别达到 1.73 TW 和 2.51 TW,年电量需求 10 200 和 14 700 TW·h。该预测结果与张宁等^[23]采用长期能源替代规划系统(LEAP)模型预测得到的中国未来电力需求结果基本一致。

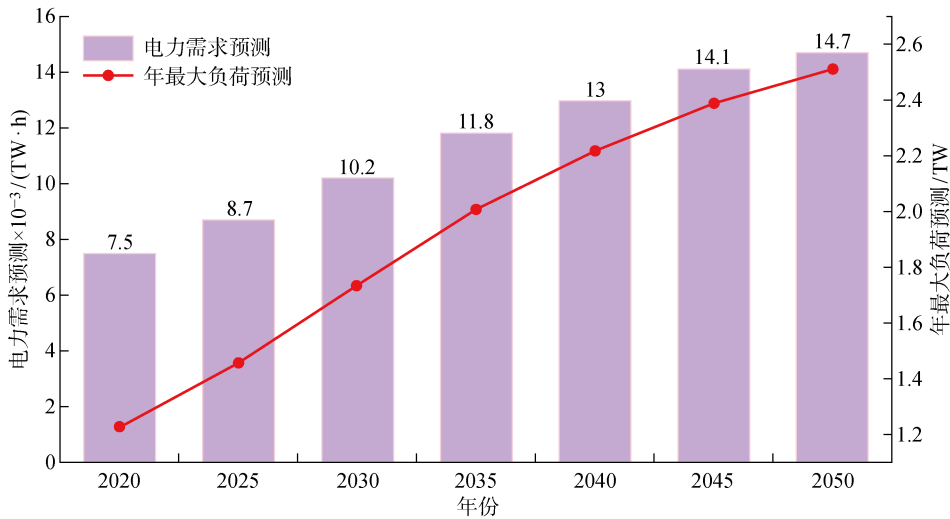


图 3 未来 30 年中国电力需求预估

Fig. 3 Projected energy demand of China in the next 30 years

4 中长期电力电量平衡及碳排放估算

近年来,中国火力发电居高不下,燃煤排放出大量 CO₂ 以及大量细颗粒物(PM_{2.5})等有害物质,危害巨大。因此,加快绿色、清洁电力的发展,是推进生态文明建设和可持续发展的重要保障。

4.1 各类型电源发电特点及年利用小时数分析

(1) 各类型电源发电特点如表 5 所示。

(2) 年利用时间分析。

受电网负荷、季节更替、天气条件、径流条件及

电站特性等复杂因素共同影响,不同电源的发电效益不同。通常采用年利用时间来衡量电站的发电效益(见图 4)。可以看出,火电和核电的年利用时间较高,且随着日益增加的风、光等新能源电站并网发电,其年利用时间存在明显下降。随着大型水电系统的完善和调度技术的提高,水电年利用时间逐渐提升并趋于稳定。风、光电易受天气条件影响,年利用时间较低。考虑未来风、光电站开发技术及储能技术的进步,设置 2030 和 2050 水平年各类型电站年利用时间,如表 6 所示。

表 5 各类型电源发电特点
Tab. 5 Characteristics of each type of power source

类型	是否为清洁能源	优点	缺点	承担任务
火电	否	发电量稳定	电价较高、污染环境	基荷,可适当调峰
核电	是	发电量稳定	电价高、存在安全隐患	基荷
常规水电	是	电价低、灵活性强	发电量受径流条件影响	调峰、调频、备用
风电	是	无噪、安全、电价低	强随机性、间歇性、波动性	基荷
光电	是	无噪、安全、电价低	强随机性、间歇性、波动性	基荷
抽水蓄能	是	可储能,灵活性强	造价高、电能消耗较大	调峰、调频、备用
储能	是	可储能,电能消耗低	造价高	调峰、调频
其他	是	发电量稳定	电价较高	同火电

表 6 未来水平年各类型电站年利用时间(h)
Tab. 6 Annual utilization time of different power sources in future planning years (h)

年份	火电	常规水电	风电	光电	核电	抽水蓄能	其他	储能
2030	4 200	3 650	2 000	1 250	7 000	1 100	5 200	1 900
2050	4 200	3 650	2 100	1 300	7 000	1 200	5 200	2 700

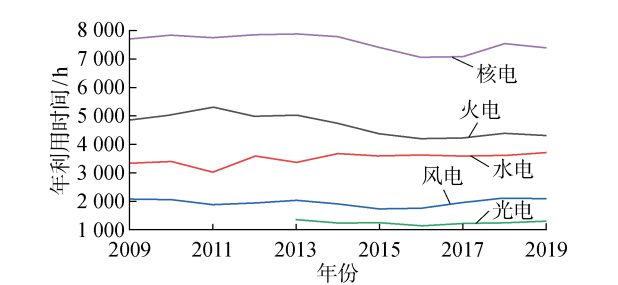


图 4 各类型电站年利用时间

Fig. 4 Annual utilization time of various power sources

4.2 电力电量平衡原理

电力电量平衡是电力系统确定规模的依据,其基本原理是系统各类发电装机大于等于年最大负荷加备用容量,系统各类电站的年发电量等于预测用电量. 电力电量平衡计算公式如下:

$$L_{\max}(1 + \delta) \leq \sum_{i=1}^n Z_i \tag{1}$$

$$C = \sum_{i=1}^n Z_i h_i - (E_w + E_p)\lambda(1 - \eta_s) - (Z_{sp}h_{sp}/\eta_{sp} - Z_{sp}h_{sp}) \tag{2}$$

式中: L_{\max} 为年最大负荷; δ 为电力装机备用率(包括事故备用、检修备用和负荷备用等), 本文 $\delta = 0.2$; Z_i 为第 i 类电源的装机容量; C 为年电量需求; h_i 为第 i 类电源的年利用时间; E_w 和 E_p 分别为风电和光电的年发电量; λ 为弃风、弃光限电水平; η_s 为储能电站利用效率, $\eta_s = 0.98$; Z_{sp} 为抽水蓄能电站装机容量; h_{sp} 为抽水蓄能电站年利用时间; η_{sp} 为抽水蓄能电站利用效率, $\eta_{sp} = 0.7$. 值得一提的

是,抽水蓄能电站和储能电站仅能为电网带来装机效益,自身不产生电能,且抽水消耗的电能比发电大.

若式(1)满足,则满足电力平衡;若式(2)满足,则满足电量平衡. 可靠、稳定、安全的电力系统必须满足以上两个条件,即满足电力电量平衡.

4.3 2030 规划水平年电力电量平衡分析

预计 2020—2030 年,中国新能源产业进入快速发展阶段,风、光新能源规模将保持 13%~15% 的增长速率,水能资源开发利用率将达到 65%,生物质能、潮汐能等清洁能源也将得到快速发展. 此外,预计 2030 年储能电站规模需满足 10% 弃风、弃光限电水平^[27],规模达到 0.14 TW/(0.403 TW·h).

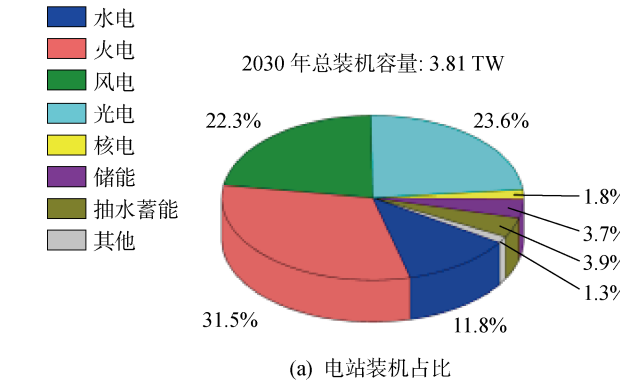
2030 年,预测最大负荷 1.73 TW,所需电力装机 2.08 TW、电量 10 200 TW·h. 假设火电能够被风电、光电等清洁能源部分取代. 通过电力电量平衡计算,结果如表 7 所示.

可以看出,2030 年总装机将达到 3.81 TW,总发电量 10 200 TW·h,满足电力电量平衡需求. 其中,清洁电力装机达到 2.61 TW,大于 2.25 TW 装机需求,但电量 0.517 TW·h,不能满足 1.02 TW·h 的电量需求. 因此,2030 年仍需保留火电装机 1.2 TW,与现状年基本持平,电力生产仍是化石能源与清洁能源协同完成,火电在保障电力安全方面仍发挥基础性的作用^[28]. 2030 年各类型电站平均年利用时间为 2 677 h,相比 2019 现状年的 3 645 h 减少 26.6%. 与火电、核电相比,风、光电站发电效

表 7 2030 水平年电力电量平衡计算表

Tab. 7 Calculation results in the planning year of 2030 based on electric power and energy balance

电源类型	装机容量/ TW	发电量×10 ⁻³ / (TW·h)	年利用 时间/h
核电	0.07	0.49	7 000
常规水电	0.45	1.64	3 650
火电	1.2	5.04	4 200
风电	0.85	1.7	2 000
光电	0.9	1.13	1 250
其他	0.05	0.26	5 200
抽水蓄能	0.15	−0.07	1 100
储能	0.14	−0.006	1 900
合计	3.81	10.2	2 677
电力电量平衡需求	2.08	10.2	—



率较低,年利用时间较低. 随着火电占比逐渐减小,为满足电量需求,清洁电力装机快速增长,进而造成系统各类型电站平均年利用时间下降. 需要说明的是,2030 年不可能全部废弃火电,一是短时间废除不经济,对社会稳定不利;二是清洁电力的开发能力与速度不容许.

各类型电站装机占比及发电量占比如图 5 所示,由图 5 看出,清洁电力装机占比超过 65%,发电占比超过 50%. 与国家“十四五”电力发展规划 2025、2035 年比较,结果基本一致,表明了本研究结果的合理性与可靠性.

综上所述,2030 年之前,风电、光电等新能源发展迅速,但火电在电力系统中仍占比最大,多数风电、光电的消纳任务可由水电与抽水蓄能电站共同承担,进而为储能电站的技术进步和健康发展提供时间保障.

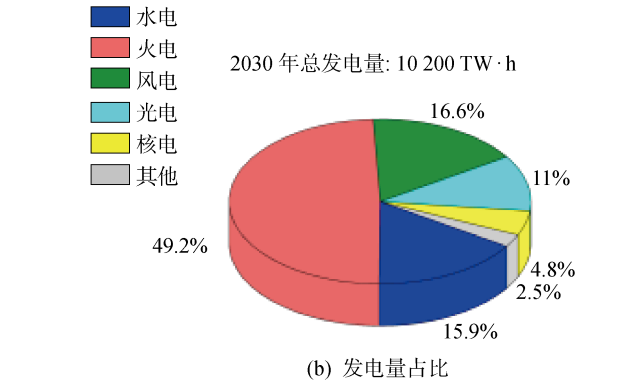


图 5 2030 水平年中国各类电站装机占比及发电量占比

Fig. 5 Proportion of installed capacity and energy production of different power sources of China in the palnning year of 2030

4.4 2050 规划水平年电力电量平衡分析

2030—2050 年,中国新能源产业技术持续进步,规模持续增大,预计新能源装机以年均 7%~8%的速度增长,火电在电力系统的占比将持续降低且装机容量逐渐下降^[29]. 核电虽属清洁能源,但其安全性存在隐患,借鉴发达国家经验核电站也将逐渐被风、光等新能源取代. 2050 年,中国水能资源开发利用将达到 80%. 风、光清洁电力装机规模大幅度增加,而常规调节电源容量下降,电网的稳定运行需要配备更多的储能设施. 综合考虑风电、光电预测与调控技术的进步^[30]、电网智能化发展^[31-32]、电网调度技术和大规模储能技术的进步,以及未来电动汽车 V2G 技术普及对电网带来的正面影响^[25],预估储能电站规模需满足 25%的弃风、弃光限电水平,装机规模达到 1.07 TW/3.02 TW·h.

2050 年,预测最大负荷 2.51 TW、所需电力装机 3.01 TW、电量 1 4700 TW·h. 假设火电、核电

能够被风电、光电等清洁电源全部取代,风、光电通过水电、抽水蓄能和储能电站消纳. 通过电力电量平衡计算,结果如表 8 所示.

表 8 2050 水平年电力电量平衡计算表

Tab. 8 Calculation results in the planning year of 2050 based on electric power and energy balance

指标	装机容量/ TW	发电量×10 ⁻³ / (TW·h)	年利用 时间/h
常规水电	5.6	2.04	3 650
风电	34	7.14	2 100
光电	38	4.94	1 300
其他	1.5	0.78	5 200
抽水蓄能	3	−0.15	1 200
储能	10.7	−0.06	2 700
合计	92.8	14.7	1 584
电力电量平衡需求	30.1	14.7	—

可以看出,2050 年的总装机达到 9.28 TW,总发电量 1.47 TW·h,满足电力电量平衡需求.2050 年各类型电站平均年利用时间进一步降至 1 584 h,与 2019 现状年、2030 水平年相比分别减少了 56.5%和 40.8%.2050 年,火电和核电将被水电、风电和光电等清洁电力全部取代,电力系统的备用容量可由水电、抽水蓄能和储能电站来提供,从而实现 100%依靠清洁能源的电力生产,由此完成电力结构的绿色转型.

各类型电站装机及发电量占比如图 6 所示,由图 6 可以看出:水电(含抽水蓄能)装机占比 9.8%,电量占比 13.7%;风电装机占比 36.6%,电量占比

47.9%;光电装机占比 40.9%,电量占比 33.1%;生物质能、潮汐能等装机占比 1.6%,电量占比 5.2%;储能装机占比 11.5%.国家“十四五”电力发展规划 2050 年总装机达到 6.01 TW,总发电量 14 300 TW·h,其中清洁电力装机 5.36 TW,占比 89.5%,电量 13 000 TW·h,占比 90.9%;仍保留火电、核电装机 0.403、0.177 TW,占比 9.7%,电量 2 040 TW·h,占比 14.3%.

研究结果表明,2050 年火电和核电被清洁电力全部取代,与“十四五”电力发展规划相比,思路超前,结果符合世界电力发展趋势以及“双碳”驱动下的发展目标,仅供国家有关部门参考.

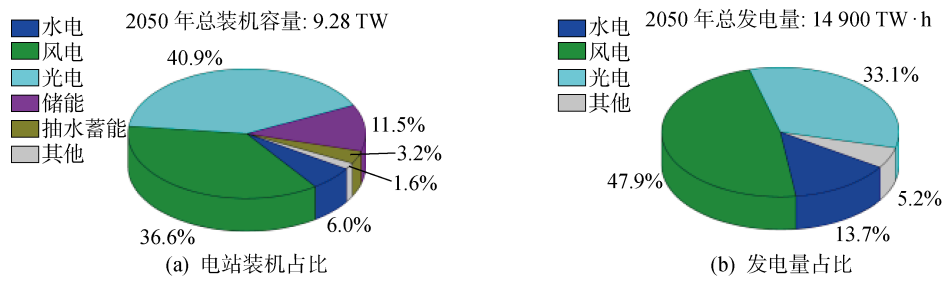


图 6 2050 水平年中国各类电站装机占比及发电量占比

Fig. 6 Proportion of installed capacity and energy production of different power sources of China in the planning year of 2050

4.5 未来水平年中国电力 CO₂ 排放量分析

依据中国未来碳排放规划^[33],2019 现状年火电 CO₂ 排放水平(0.841 kg/(kW·h)),2030 和 2050 水平年电力电量平衡结果,估算了未来电力碳排放量,并绘制了中国未来 CO₂ 排放量趋势图,如图 7 所示.由图 7 可知:2027 年中国火电电量达到峰值,约为 5 310 TW·h.同时,电力行业 CO₂ 排放量也将于 2027 年达到峰值,约为 4.47×10⁹ t,符合中国“2030 年前碳达峰”的规划目标.中国将于 2028 年首次实现清洁能源电量增量大于电量需求增量.2030 年后,火电将加速被水电、风电和光电等清洁

电力取代,电力系统的 CO₂ 排放量也将加速降低.到 2050 年,伴随电力结构绿色转型的完成,中国电力行业将实现 CO₂ 的“零排放”,进而为兑现中国“2060 年实现碳中和”的承诺做出贡献.

5 发展对策与建议

在中国“双碳”目标驱动下,未来中国大规模发展清洁电力势在必行,在技术和经济层面不但具有必要性而且存在可行性.本文通过对中国新型电力系统发展对策的研究,阐述了世界电力发展趋势,预测了中长期电力需求,依据电力电量平衡原理估算了规划水平年电力系统结构组成等,得出如下发展对策与建议.

5.1 发展对策

(1) 必要性.清洁能源是未来世界电力发展方向.中国是世界上最大的电力生产与消费国,为了实现“碳达峰、碳中和”承诺,必须走电力系统的绿色转型之路.

(2) 可行性.中国水、风、光等清洁能源储量丰富,地域广,开发利用技术基本成熟,具备在未来大规模发展清洁电力的前提条件.虽然风电、光电具有强随机性、间歇性和波动性,电网难以消纳,但是通

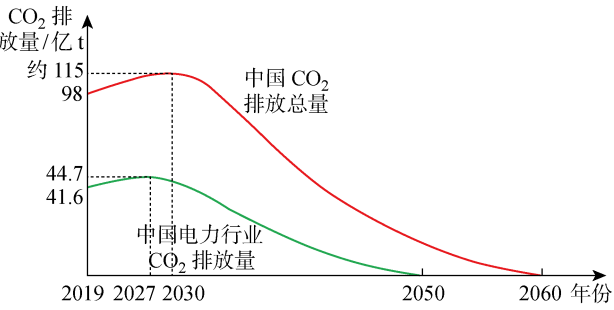


图 7 中国未来 CO₂ 排放趋势图

Fig. 7 Projected changing trend of China's future CO₂ emissions

过大规模水-风-光-储互补协调运行可弥补其不足。

(3) 2030 规划水平年. 清洁电力装机容量和发电量分别占总装机和总发电量的 65%、50%以上,配套的储能电站规模达 0.14 TW/(0.403 TW·h),但不可全部废除火电. 一是短时间废除不经济,对社会稳定不利;二是清洁电力的开发能力与速度不容许。

(4) 2050 规划水平年. 随着水、风、光等清洁电力的进一步发展,水电、储能和抽水蓄能电站在电网运行中将承担调峰和风、光电消纳任务,火电、核电将被清洁电力全部取代,届时中国将建成水-风-光-储等电源结构系统,完成电力结构的绿色转型。

5.2 建议

(1) 加快清洁电源的规划和建设. 水电开发利用程度从当前的 47%到 2050 年的 80%以上. 2030 年前风、光电开发增速保持在 13%以上,2030 至 2050 年保持在 7%以上,以确保 2050 年实现电力结构的绿色转型目标。

(2) 大力发展抽水蓄能电站、储能电站、潮汐能和生物质能发电. 实现 2030、2050 年储能电站规模能够分别匹配 10%、25%弃电限电水平. 同时,生物质能等电源发电量占比分别达到 2.5%和 5%,构建多元化、清洁化电力生产系统。

(3) 逐步关停火电. 从现在开始不再规划、立项火电项目. 2030 年以后,当火电投资回收后,不再利用,成熟一个关停一个,到 2050 年实现全部关停火电。

(4) 谨慎利用核电. 从安全性考虑,从现在开始减少核电规划、立项项目,对过去已建核电,一旦有安全隐患,坚决关停. 2030 年开始同步减小核电规模,到 2050 年基本关停核电。

(5) 电力行业作为中国的碳排放“大户”,需紧抓当前电力系统绿色转型的历史机遇,加速推进低碳化、清洁化电力系统的建设,争取分别于 2027、2050 年实现电力行业的碳达峰、碳中和。

需说明的是,本文所采用的部分数据难以准确预估,因此采用的是情景设置值,据此所得到的计算结果可能与未来实际情况有所偏差. 另外,限于篇幅,本文主要探讨了“碳达峰、碳中和”目标下未来电力系统各类型电源的装机容量、发电量与用电需求的平衡,而未从系统运行层面进行供需平衡分析,未来仍需做进一步研究. 本文在此抛砖引玉,所采用的研究思路、结论以及建议供各界学者参考。

参考文献:

[1] STOCKER T F, DAHE Q. Climate change 2013:

The physical science basis. Working group, contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013.

[2] 耿新华, 赵玉文. 光伏发电和光伏产业在本世纪能源中的地位与发展趋势[J]. 科学中国人, 2003(9): 24-25.

GENG Xinhua, ZHAO Yuwen. The position and development trend of photovoltaic power generation and photovoltaic industry in energy in this century[J]. Scientific Chinese, 2003(9): 24-25.

[3] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2021-07-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.

XI Jinping. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly [EB/OL]. (2020-09-22) [2021-07-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546168.htm.

[4] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. Nature, 2020, 586(7830): 482-483.

[5] 董维娜. 生态文明建设背景下水资源可持续发展研究——评《中国水资源与可持续发展》[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 173.

DONG Weina. Study on sustainable development of water resources under the background of ecological civilization construction: Comment on water resources and sustainable development in China[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 173.

[6] 明波, 李研, 刘攀, 等. 嵌套短期弃电风险的水光互补中长期优化调度研究[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 712-722.

MING Bo, LI Yan, LIU Pan, et al. Long-term optimal operation of hydro-solar hybrid energy systems nested with short-term energy curtailment risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 712-722.

[7] MING B, LIU P, CHENG L, et al. Optimal daily generation scheduling of large hydro-photovoltaic hybrid power plants[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 528-540.

[8] ZHANG Y, MA C, LIAN J, et al. Optimal photovoltaic capacity of large-scale hydro-photovoltaic complementary systems considering electricity delivery demand and reservoir characteristics[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 597-608.

[9] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题

- [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36.
- CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(16): 29-36.
- [10] 姜欣, 郑雪媛, 胡国宝, 等. 市场机制下面向电网的储能系统优化配置[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4601-4610.
- JIANG Xin, ZHENG Xueyuan, HU Guobao, *et al.* Optimization of battery energy storage system locating and sizing for the grid under the market mechanism[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2019, 34(21): 4601-4610.
- [11] 刁涵彬, 李培强, 吕小秀, 等. 考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 151-165.
- DIAO Hanbin, LI Peiqiang, LÜ Xiaoxiu, *et al.* Coordinated optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering the diversity of multi-energy storage[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2021, 36(1): 151-165.
- [12] 徐志, 马静, 贾金生, 等. 水能资源开发利用程度国际比较[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(1): 63-67.
- XU Zhi, MA Jing, JIA Jinsheng, *et al.* International comparison of hydropower resources development[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2018, 38(1): 63-67.
- [13] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892.
- BAO Minglei, DING Yi, SHAO Changzheng, *et al.* Review of nordic electricity market and its suggestions for China[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(17): 4881-4892.
- [14] 刘定, 赵德福, 白木仁, 等. 可再生能源发电对实时电价的影响分析: 德国电力现货市场的数据实证[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 126-133.
- LIU Ding, ZHAO Defu, BAI Muren, *et al.* Analysis on impact of renewable energy generation on real-time electricity price: Data empirical research on electricity spot market of Germany[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2020, 44(4): 126-133.
- [15] 陈伟, 郭楷模, 岳芳. 国际能源科技领域新进展与启示建议[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2): 172-181.
- CHEN Wei, GUO Kaimo, YUE Fang. Development trend of global energy technology and its strategic implication[J]. **World Sci-Tech R&D**, 2019, 41(2): 172-181.
- [16] 王宁. 德国能源转型的经济分析及启示[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- WANG Ning. Economic analysis and enlightenment of German energy transition[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [17] 国网能源研究院. 中国新能源发电分析报告(2019) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- State Grid Energy Research Institute. China new energy power generation analysis report (2019) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [18] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[DB/OL]. (2020-08-07) [2021-07-15]. <https://xueqiu.com/9331049986/156109885>.
- Global Energy Interconnection Development Cooperation Organization. Research on China's 14th five-year plan for electric power development[DB/OL]. (2020-08-07) [2021-07-15]. <https://xueqiu.com/9331049986/156109885>.
- [19] 杨尉薇, 朱玲, 李威, 等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 58-64.
- YANG Weiwei, ZHU Ling, LI Wei, *et al.* Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system[J]. **Power System Protection and Control**, 2019, 47(20): 58-64.
- [20] 周琼芳, 张全斌. 面向 2049 年的中国能源市场展望[J]. 经济界, 2019(5): 44-51.
- ZHOU Qiongfang, ZHANG Quanbin. Chinese energy market outlook for 2049[J]. **Economic Affairs**, 2019(5): 44-51.
- [21] 韩民青. 全面建设现代化的主要经济指标及其实现路径[J]. 东岳论丛, 2018, 39(3): 21-27.
- HAN Mingqing. The comprehensive construction of modernization: Main economic indicators and the way to realize them[J]. **Dongyue Tribune**, 2018, 39(3): 21-27.
- [22] 丁宣升, 曹勇, 刘潇潇, 等. 发展承压仍具韧性动能转换迈向新阶: 2019 年中国能源回顾与 2020 年展望[J]. 当代石油石化, 2020, 28(2): 7-15.
- DING Xuansheng, CAO Yong, LIU Xiaoxiao, *et al.* Resilient growth, shifting impetus and new horizon despite headwinds—2019 China's energy review and 2020 prospect[J]. **Petroleum & Petrochemical Today**, 2020, 28(2): 7-15.
- [23] 张宁, 邢璐, 鲁刚. 面向 2050 年的中国电力发展展望[J]. 中国能源, 2018, 40(3): 5-10.
- ZHANG Ning, XING Lu, LU Gang. Outlook for China power development for 2050 [J]. **Energy of**

China, 2018, 40(3): 5-10.

[24] ANTONY F, DANIEL Q. The power of flexibility: The survival of utilities during the transformations of the power sector[DB/OL]. (2018-07-22)[2021-07-18]. <https://apo.org.au/node/188831>.

[25] ZHANG C, GREENBLATT J B, MACDOUGALL P, *et al.* Quantifying the benefits of electric vehicles on the future electricity grid in the Midwestern United States[J]. **Applied Energy**, 2020, 270: 115174.

[26] 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.

[27] HUA Z C, MA C, LIAN J J, *et al.* Optimal capacity allocation of multiple solar trackers and storage capacity for utility-scale photovoltaic plants considering output characteristics and complementary demand [J]. **Applied Energy**, 2019, 238: 721-733.

[28] 张博, 孙旭东, 刘颖, 等. 能源新技术新兴产业发展动态与 2035 战略对策[J]. **中国工程科学**, 2020, 22(2): 38-46.
ZHANG Bo, SUN Xudong, LIU Ying, *et al.* Development trends and strategic countermeasures of China's emerging energy technology industry toward 2035[J]. **Strategic Study of CAE**, 2020, 22(2): 38-46.

[29] 舒印彪. 坚持“两线”“两化”发展战略助力构建清洁低碳、安全高效能源体系[J]. **中国电力企业管理**, 2019(10): 24-25.
SHU Yinbiao. Adhere to the development strategy of “two lines” and “two tendency” to help build a clean, low-carbon, safe and efficient energy system[J]. **China Power Enterprise Management**, 2019(10): 24-25.

[30] 刘青, 徐宏璐. 提高 STATCOM/BESS 风电系统频率与电压支撑的智能联调优化控制方法[J]. **电力自动化设备**, 2020, 40(7): 62-71.
LIU Qing, XU Honglu. Intelligent joint optimization control method for improving frequency and voltage support of STATCOM/BESS wind power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2020, 40(7): 62-71.

[31] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. **中国电机工程学报**, 2015, 35(3): 503-511.
PENG Xiaosheng, DENG Diyuan, CHENG Shijie, *et al.* Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2015, 35(3): 503-511.

[32] 李博, 方形. 北斗卫星导航系统(BDS)在智能电网的应用与展望[J]. **中国电力**, 2020, 53(8): 107-116.
LI Bo, FANG Tong. Application and prospect of beidou navigation satellite system (BDS) in smart grid [J]. **Electric Power**, 2020, 53(8): 107-116.

[33] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年前碳达峰研究报告[DB/OL]. (2021-03-19)[2021-07-18]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210319/1142888.shtml>.
Global Energy Interconnection Development Cooperation Organization. Report on China's carbon peak by 2030 [DB/OL]. (2021-03-19) [2021-07-18]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210319/1142888.shtml>

(本文编辑:陈晓燕)