第 53 卷 第 2 期 热力发电 Vol.53 No.2
2024 年 2 月 THERMAL POWER GENERATION Feb. 2024

DOI: 10.19666/j.rlfd.202306087

“双碳”背景下我国低碳电力发展研究

任晨星[1]，任清洁[2]，高 翔[1]
（1.浙江大学能源清洁利用国家重点实验室，浙江 杭州 310027；
2.华电陕西能源有限公司，陕西 西安 710016）

［摘 要］在“十四五”规划中提出的“碳中和”以及“碳达峰”目标对电力行业各方面的发展产生了深层次的影响，电力行业向低碳方向转型已成为主流趋势。通过阐述低碳电力体系中的低碳电厂、低碳电网、低碳能源消费以及相关评价技术，说明了该体系在节能减排、环境保护方面有着高效、清洁、可循环的低碳属性。同时，分析了国际低碳形式变化对我国的影响以及“双碳”政策具体落实过程中的相关问题，为“双碳”战略的执行以及电力行业的低碳转型提供了新的科研思路。

［关 键 词］碳中和；碳达峰；低碳电力；低碳电网；节能减排

［引用本文格式］任晨星，任清洁，高翔．“双碳”背景下我国低碳电力发展研究[J]．热力发电，2024，53(2)：1-7. REN Chenxing, REN Qingjie, GAO Xiang. Research on low-carbon electric power development in China under “carbon neutralization and carbon peak” background[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 1-7.

Research on low-carbon electric power development in China under “carbon neutralization and carbon peak” background

REN Chenxing[1], REN Qingjie[2], GAO Xiang[1]
(1.State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2.Huadian Shaanxi Energy Co., Ltd., Xi’an 710016, China)

Abstract: The “carbon neutralization and carbon peak” goal proposed in the 14th Five-Year Plan has a profound effect on the power industry in many aspects, the transformation of electricity to low carbon direction has become an irreversible mainstream trend. This paper expounds the low-carbon power plant, low-carbon power grid, low-carbon energy consumption and related evaluation technologies in the low-carbon electric power system, and shows that the system has high efficiency, clean and recyclable low-carbon attributes in terms of energy saving, emission reduction and environmental protection. At the same time, the effect of the change of international low-carbon forms on China and the related problems in the concrete implementation of the “carbon neutralization and carbon peak” policy are analyzed, it puts forward a new scientific thinking for the implementation of the “carbon neutralization and carbon peak” strategy and the low-carbon transformation of the power industry.

Key words: carbon neutralization; carbon up to peak; low-carbon electricity; low-carbon power grid; energy conservation and emissions reduction

2020 年 9 月 22 日，在第 75 届联合国大会期间，习总书记[1]提出：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，推动疫情后世界经济“绿色复苏”，汇聚起可持续发展的强大合力。2021 年 5 月，中电联党委书记杨昆[2]在 2021 年经济形势与电力发展分析预测会上表示：十四五时期，构建以新能源为主体的新型电力系统，要加快形成以新能源为主体的电力供应格局，建设高弹性、数字化、智能化电力系统，

收 稿 日 期：2023-06-09
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52076191）
Supported by：National Natural Science Foundation of China (52076191)
第一作者简介：任晨星（1996），男，博士研究生，主要研究方向为低碳电力及新能源热电联供，renchenxing@zju.edu.cn。
通信作者简介：任清洁（1970），男，高级工程师，主要研究方向为电力企业生态环境保护及新能源开发、政策研究与管理，1481917168@qq.com。

深入推进能源消费革命，提升能效水平，发扬市场在资源配置中的关键性作用。从电力行业的发展来看，近期的政策突出了“双碳”背景下的“低碳电力”发展主题。

国内关于“双碳”背景下“低碳电力”的发展有着不同论述。杜冬梅等[3]认为，我国应减少高排放煤电机组，提升终端电气水准，建设新型发电系统。米剑峰等[4]认为，受国家对新能源开发及产业政策影响，碳捕集技术及其相关封存技术已成为今后的发展趋势，对低碳电力的发展尤为重要。江亿[5]提出未来新型电力系统的目标是建立以风电光伏为主要电源的低碳电力系统并以“光储直柔”的新型建筑配电系统解决安装空间和有效消纳风电光伏的瓶颈问题。

中国是全球碳排放大国之一，中国 CO_2 排放结构如图 1 所示[6]。由图 1 可见，电力行业已成为碳排放的主要来源。确立“双碳”目标，必然会带给电力和能源行业全新的挑战，能源数字化、能源供应、能源结构转型、新能源利用、能源消费等方面都要做出相应规划与调节。因此，必须以可持续发展为主题，把“双碳”目标与低碳电力体系紧密地结合起来。

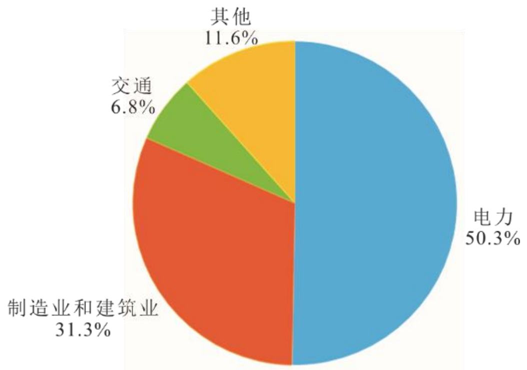

图 1 中国 CO_2 排放结构
Fig.1 CO_2 emission structure in China

本文将从“双碳”战略背景着手，对低碳电力的概念进行解读；以“双碳”目标为依据，结合国内外相关规划，提出发展低碳电力体系的构思，为我国传统电力行业向低碳方向转型提供新的策略与路径。

1“双碳”战略与低碳电力

1.1 “双碳”战略概念和实现途径

1.1.1 “双碳”战略的概念

针对“双碳”一词的定义，全球暂无精确、详细的解读。业界一般认为：“碳达峰”是 CO_2 的排放量由增加转向降低的拐点，意味着碳排放量和经济增长完成脱钩的过程，而达峰目标则包括达峰时间和峰值；“碳中和”指的是个人或企业在某一时间段内进行测算，采用节能减排、植树造林等形式抵消产生的 CO_2 总排放量，进而实现 CO_2 的零排放[7]。

1.1.2 实现途径

实现“双碳”目标的途径可以从负碳技术和节能减排这 2 个层面进行研究。从负碳技术的研发与应用来讲，需考虑 CO_2 捕集、应用和储存技术，以解决传统负碳技术低效率、高能耗等问题。从节能减排发展角度考虑，推进碳排放管控，推动光伏风电等新能源发展，实现由传统能源向新能源逐渐过渡，从而推进国内能源革命、保障能源安全。从国家政策来看，“双碳”战略的实施是对相关法律法规、规范标准的补充与完善，为今后全国的节能减排提供政策引导；从相关市场需求来看，则是将相应的信息监控、管理手段、技术装备与市场进行结合，进而激活市场，促进能源经济的发展。

1.2 低碳电力概念

当前，很多学者认同低碳电力是以太阳能、风能等为代表的二次能源发电的观点[8-11]，并围绕其开展相关的研究。表 1 为 2019 年及 2020 年全国用电量及全口径发电设备容量对比[12]。从表 1 可见，这 2 年全国投产的发电设备当中，风电和太阳能发电均呈现快速增长状态。随着“双碳”政策的推进和新能源发展力度的逐步加大，低碳电力也有了更深层次的内涵。

1）从节能减排角度出发，低碳电力的能源结构组成应以风电、光伏等可再生能源的发电方式为主。同时，应重点发展节能装备与技术，并通过电子信息技术实现能源的发送、传输、配送、使用等流程的有效监管，进而减小能耗。

2）从生态环保角度出发，低碳电力的建设和运行等各环节应注重对所在区域生态平衡的保护，在确保质量的同时，实现对环境污染从源头的控制和对末端的治理。

3）从资源再生利用角度出发，低碳电力的发展应体现在原材料的低耗费、废弃物的回收使用，相关器械的维护，全程低碳循环等方面，以促进电力体系的可持续发展。

表 1 2019 年及 2020 年全国用电量及全口径发电设备容量对比

Tab.1 Comparison of national power consumption and capacity of full caliber power generation equipment in 2019 and 2020

项目	2019 年全年累计量	2020 年全年累计量	同比增长量/%
全国全社会用电量/($\times10^8$ kW·h)	72 255	75 110	4.0
第一产业用电量/($\times10^8$ kW·h)	780	859	9.2
第二产业用电量/($\times10^8$ kW·h)	49 362	51 215	3.8
第三产业用电量/($\times10^8$ kW·h)	11 863	12 087	1.9
全口径发电设备容量/($\times10^4$ kW)	201 066	220 058	9.4
水电/($\times10^4$ kW)	35 640	37 016	3.9
火电/($\times10^4$ kW)	119 055	124 517	4.6
核电/($\times10^4$ kW)	4 874	4 989	2.3
并网风电/($\times10^4$ kW)	21 005	28 153	34.0
并网太阳能发电/($\times10^4$ kW)	20 468	25 343	23.8

2 低碳电力体系

2.1 低碳电厂

目前，同样缺乏低碳电厂相关的概念和标准，现阶段的研究多为火电低碳建筑技术和环保排放措施。火电低碳建筑技术多注重相关技术设备的设计方略以及对生命健康的影响[13-14]；环保排放措施则注重碳捕集、脱硝、脱硫等方面[15-17]。传统火电厂的低碳改造可通过下列途径实现。

1）从节能角度出发，应推动传统火电环保系统、热能系统、动力系统的节能技术发展。如从提高热能利用率的角度，重视燃料热能和化学能品位的联系，进一步优化煤粉清洁等工艺过程，以及对各项设备开展节能改造；同时，不断提升余热和余压利用率，时刻关注投入成本与收益之间的关系，最大程度上提高能源经济性。

2）从污染物减排和末端治理的角度出发，首先，要完善燃煤监管体系，从采购源头强化质量管控，提升高品质煤的燃烧效率；其次，对相关设备进行优化设计，注重提高效率；最后，加强烟气排放监管和分析，并推进煤污染物超低排放相关改造，从源头解决监测数据失真问题。

3）从能源可再生利用的角度出发，进一步开发和使用新能源也是促进低碳电力发展的重要组成部分。"双碳"背景下，新能源发电的装机总量将持续增长，其带来的消纳问题也应受到重视。特别是在相关市场机制逐渐完备的状态下，新能源发电的持续并网和高消纳将大力促进火电碳达峰进程。此外，负碳技术的应用也是促进火电企业转向低碳发展的重要方式[18]（图 2）。

2.2 低碳电网

现阶段低碳电网研究仅限于智能电网、环保节能等方向[19-20]，而以"双碳"战略目标为背景，可对低碳电网做以下解读。

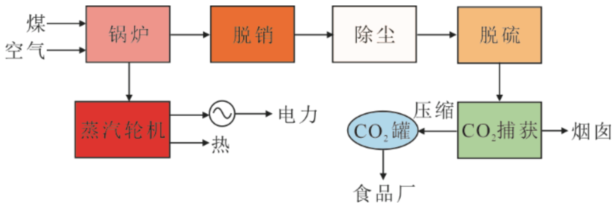

图 2 电厂 CO_2 捕集系统

Fig.2 The CO_2 capture system in power plant

1）从节能减排方面来分析，低碳电网的能量损失大多来源于输送中的损耗。因此，可选择升压改造或无功补偿设备升高功率，同时，通过节能改造等方式对相关配电线路进行优化。在"双碳"战略下，针对大型新能源电厂并网造成的能源损耗已受到广泛关注。

2）从碳排放方面来分析，低碳电网中实现减排的主要策略是通过减少六氟化硫在相关设备中的用量并提高输电过程中的节能量。碳减排当量等于减少的六氟化硫使用量与六氟化硫的全球变暖潜势值的乘积[21]；节能项目碳减排量等于节能措施产生的节能量与区域电网排放因子的乘积[22]。

3）从资源多次利用角度出发，低碳电网按照"节约资源-节能-减排"的路线来诠释其内涵。变电、输电、配电等过程相关材料以及定位、传感、变压、检测、通信等设备，都具有节约资源和重复利用的可能。同时，可以引入市场机制，通过市场提升电网相关资源重复利用的水平。

2.3 低碳能源消费

能源消费是能源生产的最终环节，对于低碳能源消费的解读如下。

1）从节能减排和环保角度出发，低碳能源消费

体现在与“双碳”目标结合紧密的新能源电力系统需求侧响应技术，通过以“网侧线损，用户侧节能量，用户侧减碳量”为主线，跟踪碳排放流的足迹，这对增进源荷互动、协同增效具有深刻的影响[23]。同时，低碳能源消费应侧重于对负荷侧用能所产生的污染源治理。例如，使用能量过程中的空气、噪音、光、电磁辐射等污染。

2）从低碳层面分析，能源消费的侧重点应落实在碳普惠机制。它的运行方法为借助碳普惠平台，通过对接公共大数据库，对企业所创造的减碳量进行测算与考核。近期该机制的推行主要集中在对全民节能、低碳行为的鼓励。

3 评价体系与实现途径

3.1 低碳电力评价技术与体系评价

3.1.1 生命周期评价技术

生命周期评价技术是可量化的处理方法，该方法主要分析由能源消耗和污染物排放带来的潜在环境影响[24]。该技术的应用方法为：确立评价目的和范围指标，建立数据库进行清单分析，运用多种方法开展影响评价，对相关结果开展分析和改进。其中，评价影响和分析清单是比较重要的过程，一般参考相关专业的系列标准，通过相关软件进行分析，为有关的决策提供依据。常用的软件包括 Simapro7 系统、AIST-LCA Ver. 4 系统、GaBi 4. 3 系统等。生命周期评价技术是低碳电力内涵关键的一环，也是评价该体系的基础。生命周期评价框架如图 3 所示。

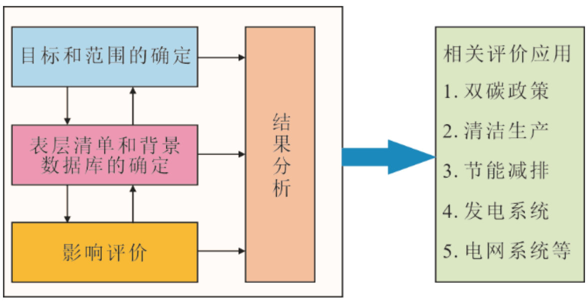

图 3 生命周期评价框架
Fig. 3 Framework of life cycle assessment

3.1.2 低碳电力体系评价

“双碳”战略要求下，低碳电力体系应该按照生命周期评价技术的内涵进行测评，即以“碳减排”为中心，结合节能减排、资源循环利用、环保等相关要素，对低碳电力的实施情况进行系统性评价和分析。同时，使用信息数据库，构建全方位的动态测评系统，对生命周期法的分析结果进行推进和监管，采取有效手段，进一步提升评价体系的可行性。

3.2 实现低碳电力路径规划

现阶段，行业内实现低碳目标的重点是节能，节能量的总值最终都将被计入减碳量，这就是“节能就是减碳”模式，是电力企业增强低碳改造的基石。电力配送过程主要的能量损失来自电力产生、输送以及负荷侧的损耗。今后，仍需重视对节能产品与相关技术的研发，加强节能市场扶持与监管力度，推进节能工作的进行。

3.2.1 我国针对碳减排的路径规划

2021 年第一季度，我国《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》[25]正式发布。规划与纲要中提出：对于传统能源行业，煤电方面，要促进煤炭生产向资源富集地区集中，同时推行以电代煤，推进煤电灵活性改造。油气方面，要开放油气勘探开发市场，加快深海、深层和非常规油气资源利用，推动油气增储上产；对于新能源行业，要提升风电和光伏发电规模，发展海上风电、西南水电以及集中式和分布式供能，大力发展非化石能源，使其占能源消费总量比重提高到 20%左右；因地制宜开发利用地热能，提升清洁能源消纳和存储能力，提升向边远地区输配电能力，加快抽水蓄能电站建设和新型储能技术规模化应用。

同时，在《能源生产与消费革命战略中》提出：2021 年至 2030 年，能源消费总量控制在 60 亿 t 标准煤以内，新增能源需求主要依靠清洁能源满足，初步构建现代能源体系[26]；到 2050 年，能源消费总量基本稳定，非化石能源占比超过 50%，建成现代能源体系。2030 年风能与太阳能总装机 16.1 亿 kW，符合 12 亿 kW 以上的目标要求；2021 至 2025 年“十四五”期间单位 GDP 能耗降低 15.5%，单位 GDP CO_2 排放降低 21.4%，下降幅度分别超过“十四五”规划纲要设置的 13.5%、18.0%指标要求[26]；能源系统碳氧化物排放于 2027 年达峰，电力系统碳氧化物排放于 2025 年达峰；2060 年能源系统碳氧化物排放量 9.5 亿 t，约为 2025 年水平的 10%，电力系统碳氧化物排放量 5.5 亿 t，为 2025 年峰值的 13.8%。

3.2.2 西方等国针对碳减排的路径规划

为落实《巴黎协定》到 2050 年实现碳中和的目

标要求，法国政府[27]于 2017 年 6 月正式提出气候计划，启动了“国家低碳战略”和“能源计划”的修订工作，并制定了法国政府未来 15 年内实现能源结构多样化和温室气体减排目标的行动蓝图；到 2030 年可再生能源消费占总能源消费的 33%（欧盟目标 32%），最终能源消耗降低 20%（欧盟目标 32.5%），同时每年以 1.3%的幅度提高热量回收的速度。

英国提出[28]，到 21 世纪 30 年代中期，在所有净零情景下，发电的净碳强度均为负；新能源发电能力的提高将对整个系统提出更佳的灵活性要求。在净零情景下，电力部门的净排放量到 2033 年将为负；到 2038 年，天然气消耗水平将减少近 50%，普通住宅供暖所需的输入能量可能会下降到目前的 1/4。2050 年，最终用户的净零能源需求中，氢的需求占 21%~59%。

2014 年，日本政府制定了相关目标[29]，到 2030 年可再生能源占一次能源供应的比例达到 13%~14%。因此，日本发布了到 2030 年可再生能源达到总发电量 22%~24%的要求。其中，太阳能光伏在发电中的份额预计将从 2013 年的 1%增加到 2030 年的 7%，风能从不足 1%增加到 2%，生物能源从 2%增加到 4%，水电从 7%增加到 9%，地热将上升到 1%。自 2014 年以来，电力领域的可再生能源得益于上网电价，其增长速度较快(同期从 12%增长到 18%)。日本有望达到并超过 2030 年的目标。

到 2050 年，美国电力生产燃料份额占比中[30]，天然气将从 2020 年的 40%下降到 36%，可再生能源将从 2020 年的 21%上升至 42%，核能将从 2020 年的 19%下降至 11%，耗煤量将从 2020 年的 19%下降至 11%。到 2050 年，美国可再生能源发电中，太阳能发电占比将从 2020 年的 16%上升至 47%，风能将从 2020 年的 41%下降至 34%，水力发电将从 2020 年的 41%下降至 34%，地热能发电维持 2%不变，其他可再生能源从 7%下降至 4%。

4 我国低碳电力转型主要措施

通过以上表述不难看出，“双碳”目标下欧美各国的低碳转型途径是基于其自身发展和地缘战略的综合体现。现如今，美国通过美元结算石油贸易以及页岩油革命，处于现有传统能源贸易的核心地位；而欧洲等国的本土传统能源生产大都处于传统能源开采的中后阶段，由于能源安全和地缘运输等不确定因素，欧美等国在低碳电力转型的相关政策制定和执行程度上各有不同。所以，我国应避免走欧美各国的老路。我国的低碳电力转型要为国家发展和社会责任服务，主要对策可归为以下 4 个方面：

1）从顶层设计做起，大力促进传统电力行业向低碳转变。目前，煤电等传统能源正历经深层次改革，由于其关乎各行各业的发展，尤其是许多的基础设施必须进行资源整合以及重新建造。近些年，全球各大电力公司通过改进管理体制，构建相关低碳部门以及绿色能源部门。我国电力行业也应成立相关部门，统筹促进传统煤电向低碳转型。

2）低碳转型与传统能源协同发展。未来很长一段时间内，既要继续发展传统火电，又要逐渐开拓新能源业务。在具体转型方式与路径抉择上，短期内我国对煤炭石油天然气等资源的依赖不会减少，其仍然是构建我国能源安全的重要组成部分。因此，我们不仅保持传统燃煤电力的发展，充分保障能源安全。同时，又要大力发展新能源（地热能、太阳能、氢能、风电等可再生能源），使二者充分融合，协调发展。

3）低碳发展是全球大势，各国都在踊跃加入碳中和的行列，承诺碳中和的国家及其进展情况见表 2。若想在这场变革中有所作为并引领发展，那么重中之重则是制定标准。面对未来如此巨大的市场空间与投资额度，虽然低碳行业热度很高，但是却缺少相关制度和具体标准，这对参与者的能力要求较高。欧美等国依靠其丰厚的资本以及在行业多年的经验积累，在低碳电力转型中频繁出招，试图再次成为行业引领者和标准制定者。对此，我国也应积极谋划，依托相关政策和财政支持，低碳转型的引领者，做推动世界能源低碳转型的参与者，国际标准的制定者。

表 2 承诺碳中和的国家及其进展情况
Tab.2 Countries with carbon neutrality commitments and their progress

承诺国家	实现进度	实现时间
苏里南	已实现	2014 年
不丹		2018 年
芬兰	政策宣示	2035 年
冰岛、奥地利		2040 年
瑞典	已立法	2045 年
英国、法国		2050 年
美国、德国、日本	政策宣示	2050 年
中国、哈萨克斯坦		2060 年

4）增强技术创新驱动，借助政策和资金扶持，不断加强核心技术的开发与优化。今后几十年是“双碳”战略推进的关键时刻，我国应在科学研究和人才引进等方面给予支持，针对制约新能源业务发展的相关技术攻坚克难，大力促进低碳电力行业向智能化转型，推进碳捕集、碳封存等技术的研发。如今全球电力行业面临重大变革与重新洗牌，这也给我国带来了新的机遇和挑战，我们应顺势而为，把握机会，力争成为引导世界低碳电力行业转型的领头羊。

5 结 语

“双碳”战略的提出对低碳电力各方面发展产生深层次的影响，传统能源行业向绿色低碳转型已成为不可逆转的大趋势。本文以“双碳”战略目标为依据，通过阐述低碳电力体系中的低碳电厂、低碳电网、低碳能源消费和相关评价技术，表明该体系在节能减排和生态保护等方面具有高效、无污染、可再生的低碳属性。同时，提出应关注碳减排，研究并解决其实施过程中的问题，为早日实现“双碳”战略与能源结构低碳转型提供新的策略和方法。

［参 考 文 献］

［1］ 习近平. 在 75 届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(3).
XI Jinping. Address to the General Debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly[N]. People’s Daily, 2020-09-23(3).

［2］ 王啸江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J]. 热力发电, 2022，51(1): 52-59.
WANG Xiaojiang, LIU Peng, LI Rongchun, et al. Research progress and prospects of advanced power generation technology under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 52-59.

［3］ 杜冬梅, 曹冬慧, 何青. “双碳”目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 1-9.
DU Dongmei, CAO Donghui, HE Qing. Discussion on low-carbon transformation of China’s power industry under the “double-carbon” goal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 1-9.

［4］ 米剑峰, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2543.
MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2543.

［5］ 江亿. 光储直柔—助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J]. 暖通空调, 2021, 51(10): 1-12.
JIANG Yi. PSDF (photovoltaic, storage, DC, flexible): a new type of building power distribution system for zero carbon power system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(10): 1-12.

［6］ 赵洱岽. 中国电力行业低碳化发展研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012: 6-9.
ZHAO Erdong. Study on the decarbonization development in China’s electricity sector[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012: 6-9.

［7］ 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓碳中和[J]. 气候变化研究进展, 2021,17(1): 107-113.
DENG Xu, XIE Jun, TENG Fei. What is carbon neutrality [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113.

［8］ 李航, 陈亮, 王春波, 等. 太阳能燃气联合循环机组热电联产性能分析[J]. 中国电机工程学报，2021, 41(14): 4931-4940.
LI Hang, CHEN Liang, WANG Chunbo, et al. Performance analysis of integrated solar combined cycle cogeneration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4931-4940.

［9］ 杨晓巳, 陶新磊. 综合能源技术路线研究[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 22-25.
YANG Xiaosi, TAO Xinlei. Research on integrated energy technical route[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 22-25.

［10］曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2187-2200.
CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2200.

［11］张美霞, 郭鹏超, 杨秀, 等. 促进上海绿色电力实施机制的研究[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(6): 584-588.
ZHANG Meixia, GUO Pengchao, YANG Xiu, et al. Research on improving green power implementation in Shanghai[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(6): 584-588.

［12］华经产业研究院. 2019 年中国发电量, 用电量及不同方式装机容量统计分析[R/OL]. (2021-10-15)[2023-06-12].http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20200317/11410.html.
Hua Jing Industrial Research Institute. Statistical analysis of China’s power generation, power consumption and installed capacity in different ways in 2019 [R/OL]. (2021-10-15)[2023-06-12]. http://www.chinapower.com.cn/zx/zxbg/20200317/11410.html.

［13］赵国涛, 钱国明, 王盛, 等. “双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 11-21.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng, et al. Analysis on solution for green and low-carbon transformation of thermal power enterprises to achieve carbon peak and carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 11-21.

［14］钟志勇, 温志华. 低碳火电技术战略的相关选择[J]. 南方电网技术, 2010, 4(6): 27-31.
ZHONG Zhiyong, WEN Zhihua. The choices correlative to the low-carbon technology strategy in thermal power plants[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(6): 27-31.

［15］高元. 建筑节能技术与新材料在火力发电厂中的运用研究[J]. 武汉大学学报, 2009, 42(2): 499-503.
GAO Yuan. Research on application of building energy saving techniques and new material to thermal power plants[J]. Southern Power System Technology, 2009,

42(2): 499-503.
[16] 朱峰. 宁海电厂绿色发电研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.
ZHU Feng. Study on green power generation in Ninghai Power Plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
[17] 黄斌, 许世森, 郜时旺, 等. 华能北京热电厂 CO_2 捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-20.
HUANG Bin, XU Shisen, GAO Shiwang, et al. Industrial test of CO_2 capture in Huaneng Beijing Coal-fired Power Station[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 27-31.
[18] 尹硕, 郭兴五, 燕景, 等. 考虑高渗透率和碳排放约束的园区综合能源系统优化运行研究[J]. 华电技术, 2021, 43(17): 1-7.
YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints[J]. Huadian Technology, 2021, 43(17): 1-7.
[19] 王伟. 绿色电网发展理论与实证研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 1.
WANG Wei. Development theory and empirical research on green in grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 1.
[20] 李响, 牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 1-7.
LI Xiang, NIU Sai. Study on multi-layer evaluation system of source-grid-load under carbon-neutral goal [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(Suppl.1): 1-7.
[21] 侯潾, 谢荣飞. 双碳战略目标下我国新能源产业如何发力[N]. 新华日报, 2021-04-06(7).
HOU Lin, XIE Rongfei. How to develop China’s new energy industry under the dual carbon strategic goal[N]. Xinhua Daily, 2021-04-06(7).
[22] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[R/OL]. (2020-12-20) [2023-06-12]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.
Ministry of Ecology and Environment, People’s Republic of China. Emission factors of China Regional Power grid base line for 2019 Emission Reduction Project [R/OL]. (2020-12-20)[2023-06-12]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/ wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.
[23] 曾博, 杨雍琦, 段金辉, 等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 10-18.
ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18.
[24] 张沛超, 江健宁, 杨漪俊, 等. 智能变电站配置信息的全生命周期管理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 85-89.
ZHANG Peichao, JIANG Jianning, YANG Yijun, et al. Life-cycle management of smart substation configuration information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 85-89.
[25] 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[R/OL]. (2021-03-13) [2023-06-12]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
The Central People’s Government of the People’s Republic of China. The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People’s Republic of China and the Outline of the Vision Goals to 2035 [R/OL]. (2021-03-13) [2023-06-12]. https://www.gov.cn/xinwen/ 2021-03/13/content_5592681.htm.
[26] 中华人民共和国国家发改委. 能源生产和消费革命战略[R/OL]. (2021-10-15) [2023-06-12].https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201705/t20170517_1196767.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission, PRC. Strategies for the Revolution in energy production and consumption [R/OL]. (2021-10-15) [2023-06-12]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201705/t20170517_1196767.html?code=&state=123.
[27] 郝志鹏. 法国《气候能源法》的颁行, 实施与挑战[N]. 人民法院报, 2021-04-30(8).
HAO Zhipeng. The implementation, implementation and challenges of the French climate energy law[N]. People’s Court Daily, 2021-04-30(8).
[28] 中国对外承包工程商会. 世界主要国家能源发展战略及政策动向[R/OL]. (2022-04-14) [2023-06-12]. https://www.chinca.org/CICA/info/22041410364911.
China International Contractors Association. Energy development strategies and policy trends of major countries in the world[R/OL]. (2022-04-14) [2023-06-12]. https://www.chinca.org/CICA/info/22041410364911.
[29] 中华人民共和国商务部. 日本计划到 2030 年时将可再生能源占比提高至 36%[R/OL]. (2021-08-05) [2023-06-12]. http://jp.mofcom.gov.cn/article/ztdy/202108/20210803183882.shtml.
Ministry of Commerce of the People’s Republic of China. Japan plans to increase the share of renewable energy to 36% by 2030[R/OL]. (2021-08-05) [2023-06-12].http://jp.mofcom.gov.cn/article/ztdy/202108/20210803183882.shtml.
[30] 中国石化新闻网. EIA: 到 2050 年美国电力的 44%将由可再生能源提供[R/OL]. (2022-03-22) [2023-06-12]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2022-03/22/content_7024561.html.
Sinopec News.Com. EIA: 44% of U.S. electricity will be supplied by renewable energy sources by 2050[R/OL]. (2022-03-22) [2023-06-12]. http://www.sinopecnews. com.cn/xnews/content/2022-03/22/content_7024561.html.

（责任编辑　杨嘉蕾）