

“双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究

李政^{1,2}, 李伟起^{1,2*}, 张忠伟², 常淦², 吕俊复¹, 岳光溪¹, 李立涅³, 倪维斗¹

(1. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610200;

3. 中国南方电网公司, 广州 510620)

摘要: 大力发展新能源是实现“双碳”目标的重要途径, 但新能源的随机性、波动性和间歇性特点给电力系统供需平衡及稳定性带来严峻挑战, 亟需发展多元灵活性资源来保障系统的安全稳定运行。本文综述了我国碳中和目标下电力需求及电源结构发展路线的相关研究情况, 深入分析了不同风光发电量比例下电力系统对灵活性调节的不同需求, 并从高峰能力(充足性)、爬坡灵活性、稳定性、惯性四个方面阐述了未来所需要的“源网荷储”各类灵活性资源特性; 之后, 结合国际经验, 提出了保障安全、低碳发展、经济最优的灵活性资源发展原则, 并在分析我国灵活性资源发展存在问题的基础上, 提出了与我国电力行业减排目标和中长期电力结构变化趋势相一致的灵活性资源发展路线; 最后从电源、电网、负荷、储能、市场机制五个方面提出了发展灵活性资源的重点举措。

关键词: “双碳”目标; 电力系统; 高比例风光; 灵活性资源; 发展路线

中图分类号: TM7 **文献标识码:** A

Development Strategy of Flexible Resources in China's Power System under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

Li Zheng^{1,2}, Li Weiqi^{1,2*}, Zhang Zhongwei², Chang Gan², Lyu Junfu¹, Yue Guangxi¹,
Li Licheng³, Ni Weidou¹

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610200, China; 3. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Vigorously developing new energy sources is an important approach to achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. However, the randomness, volatility, and intermittency of new energy pose severe challenges to the supply-demand balance and stability of the electric power system. Therefore, there is an urgent need to develop diversified flexible resources to guarantee the system's safe and stable operation. This study summarizes the electricity demand and the power structure development pathways in China under the carbon neutrality goal. Based on this, it analyzes the different flexibility demands of electric power systems with different proportions of wind and solar power generation capacities and elaborates on the characteristics of various types of flexible resources needed for power generation, transmission, load, and storage from four aspects: peak capacity (adequacy), ramping flexibility, stability, and inertia. Drawing from the international experience regarding flexible resource development, we propose the principles

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-23

通讯作者: *李伟起, 清华大学能源与动力工程系副研究员, 研究方向为绿色低碳发展规划与战略研究; E-mail: liweiqi023@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“能源与矿产资源节约战略若干重大问题研究”(2023-XBZD-17)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

for flexible resource development: supply security guarantee, low-carbon development, and economic optimization. Considering the existing problems in the flexible resource development in China, we propose a flexible resource development pathway that aligns with the emission reduction goal of the power sector and the medium- to long-term development trend of the electric power structure of China. Furthermore, key initiatives to ensure the development of flexible resources are proposed from five aspects: power source, power grid, load, energy storage, and market mechanism.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality goals; electric power system; high proportion of wind and solar power generation; flexible resources; development pathway

一、前言

党的二十大报告指出，要积极稳妥推进碳达峰、碳中和（“双碳”）^[1]。2020年，我国电力行业的碳排放量约占碳排放总量的41%^[2]，“双碳”目标下电力部门将承担更多的减排责任，发展新能源是电力部门低碳转型的重要举措^[3,4]，但必须审慎面对电力安全稳定供应问题^[5]。新形势下需加快落实全面提升电力系统调节能力和灵活性等要求，构建适应新能源占比逐渐提高的新型电力系统^[6]。

近年来，新能源发电得到长足发展。截至2023年年底，全国风电和太阳能（以下简称“风光”）发电总装机达到 1.05×10^9 kW，占电力总装机的36%，发电量达到 1.47×10^8 kW·h，占全年总发电量的15.8%^[7]。然而，风光发电固有的随机性、波动性和间歇性特点对保障电力系统供需平衡和稳定性带来严峻挑战，电力系统灵活性资源不足的矛盾正在显现，而且随着低碳转型的深入，这一矛盾还会进一步加剧，原因在于：首先，随着风光发电量占比提升和气候变化导致的极端天气事件的日益频繁，电力系统对复杂多变气象条件的敏感性增加；其次，随着电气化水平提升，电动汽车、电锅炉、电解槽等一系列新型负荷以及传统冷、热负荷不断增加带来的负荷不确定性日益增强；第三，叠加电力资源和负荷在空间上呈逆向分布、跨区电网互联传输容量不足、高比例电力电子设备接入电网等原因，电力系统净负荷（系统负荷与风光出力的差值）日峰谷差增大，季节不平衡、系统惯量降低等问题逐渐显现，系统灵活性将面临满足更多时间尺度、更大变化幅度、更高变化速度的需求^[8,9]。由此可见，必须发展多样化的灵活性资源，以保障电力系统安全稳定运行。

电力系统灵活性资源是指电力系统中可稳定调度的、能够快速提供或者吸收功率以应对电力系统供需变化的各种资源。这些资源可以帮助克

服风光的间歇性和不确定性以及实现电力系统峰谷负荷的调节，保障系统频率稳定。电力系统灵活性资源主要分布在电源侧、电网侧和负荷侧，并且随着技术的发展，储能也成为重要的灵活性来源。具体来说，灵活性资源的例子包括但不限于：可调节出力的煤电、气电、常规可调节水电、光热机组，电网互联互通、灵活的电网运行和控制技术，需求侧管理，电池储能、抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能等。这些资源能够在不同时间尺度下增加或减少电力供应及电力需求，确保电力系统的稳定性^[10-12]。关于灵活性资源发展策略及路线，现有研究从单一的灵活性资源发展路线（抽水蓄能^[13]、储能^[14]、配电网^[15]、微电网^[16]等）拓展至多元灵活性资源系统发展规划^[17-19]，并在考虑技术成熟度及经济性、不同时间尺度下灵活性需求差异等因素的基础上，展望了我国未来灵活性资源发展路线^[20,21]，但有关碳达峰前后对灵活性资源需求差异的研究尚不多见。随着“双碳”目标的推进以及风光发电量比例的提升，发展与我国中长期电力结构变化趋势相匹配的灵活性资源是满足高比例风光电力系统的灵活性需求、保障电网安全稳定运行、构建新型电力系统的迫切任务，有必要对灵活性资源中长期发展路线开展更深入的研究。

本文首先对不同研究机构提出的我国“双碳”目标下电力需求及电源结构发展路线进行综述，分析不同风光发电量占比下电力系统对灵活性资源需求的差异，并对比不同灵活性资源的技术特性。在此基础上，结合国外电力系统发展灵活性资源的经验，针对我国灵活性资源发展存在的问题，提出我国电力“双碳”目标下灵活性资源发展的基本原则和路线。最后，从电源、电网、负荷、储能、市场五个方面提出保障我国灵活性资源发展的重点举措，以期为电力结构低碳转型背景下灵活性资源中长期发展策略提供参考。

二、我国中长期电力低碳发展路线及电力系统灵活性需求

(一) 我国中长期电力低碳发展路线综述

本文对有关我国中长期电力发展路线的研究进行了梳理,包括:国网能源研究院有限公司的零碳情景^[4],南方电网科学研究院有限责任公司的电力安全供应目标^[5],清华大学气候变化与可持续发展研究院的1.5℃情景^[22],美国马里兰大学的1.5℃情景^[23],北京理工大学的技术突破情景^[24]等。相关研究总结如下:一是全国电力需求自2030年起从中速增长转变为低速增长,2030年前年均增速为4%左右,到2030年全社会用电量为 $1 \times 10^{13} \sim 1.2 \times 10^{13}$ kW·h,由于经济增长模式转变、能效标准提升、人口老龄化和人口增长放缓等原因,2030年后年均增速将变缓,到2060年全社会用电量为 $1.55 \times 10^{13} \sim 1.87 \times 10^{13}$ kW·h。二是远期非化石发电装机占比将超过90%(见表1)。到2030年,我国的电源装机容量预计将达 $3.3 \times 10^9 \sim 4 \times 10^9$ kW,其中风光占比为44%~50%,煤电占比为30%左右;到2060年,我国电源装机容量预计达 $7.1 \times 10^9 \sim 1.19 \times 10^{10}$ kW,风光占比为58%~80%,煤电装机占比为5%~12%。三是远期风光发电量占比逐渐提升(见图1)。2030年预计风光发电量占比为23%~50%,2060年将提升至50%~65%。在高比例风光电力系统中,风光机组利用率(机组在一定时间内实际发电量与其最大可能发电量的比率)不断变化,导致系统净负荷变化幅度更大、速度更快,对灵活性资源需求上升。

(二) 不同风光发电量占比对电力系统的灵活性需求

日内灵活性资源发挥电力调节作用的原理示意

图如图2所示。在时段1,由于“风光+常规电源”电力供给大于负荷需求,因此存在“降低供给、增加负荷”的灵活性调节需求;而在时段2,由于“风光+常规电源”供给小于负荷需求,存在“增加供给、减少负荷”的灵活性调节需求。

随着风光发电量占比不断升高,日内、日间、年内和年间尺度上对灵活性资源需求的特点也在发生变化。在日内和日间尺度上,随着净负荷的峰谷差不断加大,对灵活性资源的需求表现为更大范围的出力和更高的响应速度,但对灵活性资源发电量的需求并不大。

在年内尺度上,由于风光资源的季节性差异,低谷季节的风光发电减少,导致灵活性资源不仅要发挥日内和日间调节的作用,还要补足风光季节性发电量的差异,因此具有“出力又出量”的特点,在煤电或者气电担当这一任务条件下,“出量”也意味着碳排放的同时增加。

在年间尺度上,随着风光发电占比的进一步提高,电力行业碳排放将在达峰之后实现绝对下降,此时所需要的灵活性资源,不仅需要满足日内调峰和季节性调峰的要求,还要同时满足低碳甚至零碳排放的要求,这要求担任灵活调峰任务的火电机组持续改换低碳燃料或者利用碳捕集、利用与封存(CCUS)技术以减少碳排放,同时需要面向碳中和发展新型跨季节储能技术,实现可再生能源的季节性平移。

结合上述有关日内和日间、年内和年间不同时间尺度对灵活性资源需求的分析,以及电力低碳发展路线的要求,2030年前、2030—2050年、2050—2060年三个阶段不同风光发电量占比对电力系统灵

表1 我国2030年和2060年的发电装机结构

机构	时间/年	装机规模/ $\times 10^8$ kW	装机占比/%		
			非化石发电	风光发电	煤电
国网能源研究院有限公司	2030	40	64	48	28
	2060	71	89	66	7
南方电网科学研究院有限责任公司	2030	—	>60	44	29
	2060	—	>90	58	12
清华大学气候变化与可持续发展研究院	2030	32.6	65	50	30
	2060	76.9	>90	>80	<5
北京理工大学	2030	—	—	—	—
	2060	95~119	>90	72	5

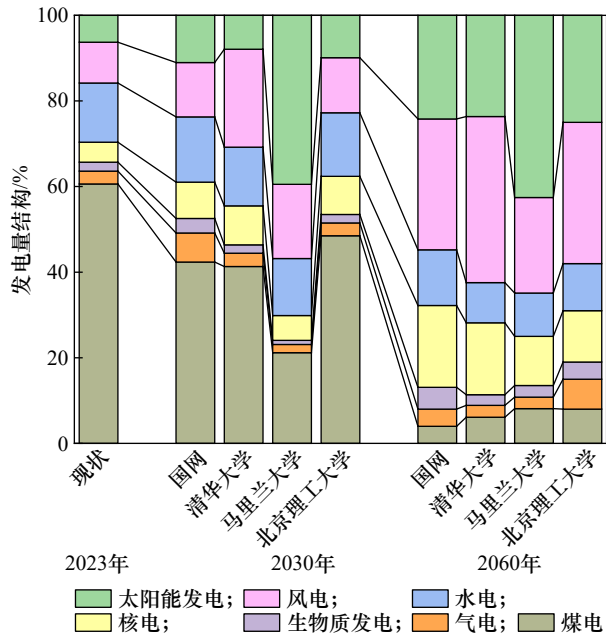


图1 我国2030年和2060年发电量结构
注：国网指国家能源研究院有限公司。

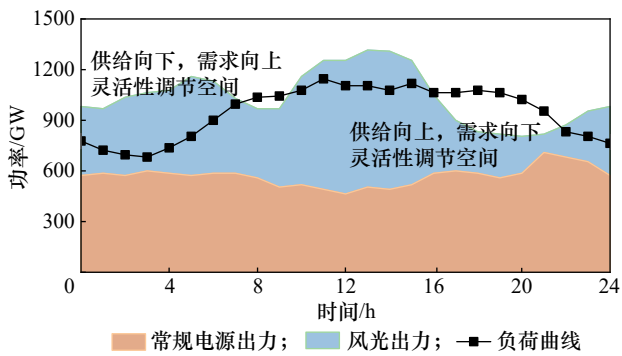


图2 灵活性资源满足日内灵活性需求的原理示意图

活性需求的具体分析如下。

在电力部门碳达峰前（2030年前），风光发电量占比低于30%，火电发电量仍占据主导地位。随着风光发电量占比的提升，风光资源的随机性和波动性对电力系统的影响逐渐加大，局部时段（日出及日落）源荷不平衡矛盾凸显，净负荷相邻时段差值增大，电力系统需要配置一定比例的灵活性调节资源。由于电力部门碳达峰前碳排放仍存在一定的增长空间，系统灵活性可以通过火电机组变负荷运行来实现。此阶段，电力系统灵活性调节主要考虑如何以最低代价调度火电机组的启动与运行，同时兼顾风光出力精准预测和抽水蓄能等灵活性资源的发展，以确保日内和年内灵活性调节需求得到满足。

2030—2050年，风光发电量占比为30%~50%。电源侧，部分时段甚至100%的电力由可再生能源提供，气象条件变化导致的电源波动将成为系统不确定性的主要来源，发生弃电和缺电的风险逐渐增加；电网侧，高比例风光并网对电网频率和运行惯性的冲击进一步增强^[25]，风光出力与用电负荷区域不匹配导致跨区域输送通道容量需求进一步增加^[22]；负荷侧，电动汽车、电热工业设备、农业电气化机械、电解槽等一系列新型不确定负荷大规模出现在电力系统中，日内及年内不平衡矛盾更加突出。此阶段，在构建近零排放电力系统的过程中，灵活性资源运行所产生的碳排放也将受到限制，低碳灵活性资源将更加重要，无CCUS的火电厂逐渐减少，电力系统灵活性调节主要考虑在深度减排目标约束下，如何协同发展具备不同特性的新型低碳灵活性资源，以满足更长时间尺度、更大调节幅度、更迅速变化的灵活性调节需求。

2050—2060年，风光发电量占比提升至50%以上，可再生能源发电量可能出现较长时间富余或缺，全年富余电量时段风光出力有可能达到负荷峰值的2~5倍，而短缺电量时段风光出力有可能不到负荷峰值的10%^[8]。此阶段，电力系统对季节性供需平衡的需求迅速上升，在灵活性资源满足日内及年内电力供需平衡的基础上，在碳排放受限的前提下，系统灵活性调节主要考虑如何通过CCUS火电、零碳燃料火电、氢燃料电池、跨季节储能技术等灵活性资源实现能量的季节性转移来满足较高的年内高峰负荷需求。

三、灵活性资源的服务能力及技术特性

（一）灵活性资源的服务能力

综合考虑不同风光发电量比例下电力市场对灵活性资源的需求，电力系统灵活性资源组合应具有以下服务能力^[26]：一是高峰能力（充足性），即确保有足够的容量来满足一年中最高预期负荷需求；二是爬坡灵活性，即在短时间内（数分钟到数小时内）快速改变电力输出以保持供需平衡的能力；三是稳定性，即当系统频率因突然失去输出或需求激增而出现较大偏差时，迅速减少需求或增加供给的能力；四是惯性，即系统克服供给或需求的瞬间扰动而不引起电网连带故障的能力。

(二) 灵活性资源的技术特性

前文所述,不同灵活性资源满足不同的灵活性调节需求,这取决于各类灵活性资源的技术特性。为此,本文梳理了多家研究机构关于“源网荷储”不同类型灵活性资源的技术特性,将高峰能力(充足性)、爬坡灵活性、稳定性和惯性四个重要指标整理如表2所示^[21,27]。

高峰能力主要包括调节容量范围及调节时间尺度。调节容量范围主要指该灵活性资源最小技术出力到最大技术出力的功率范围。调节时间尺度指灵活性资源可参与调节的时间长度,分为短时(秒、分钟)、中时(小时、日内、多日)和长时(周、月、季度)三类,可满足不同幅度和不同时间长度的高峰调节需求。同时容量充足性是高峰能力的重要体现,到2060年,可用来满足全国高峰负荷的灵活调节容量需求接近 2.8×10^9 kW,火电、核电、水电、风光发电、清洁燃料和其他可再生能源、储能(含电动汽车)、需求响应分别占比约为23%、7%、14%、4%、13%、34%、5%,其中火电、核电、水电将提供长周期高峰能力,而电化学储能将成为系

统短期灵活性的重要来源^[26]。

爬坡灵活性主要包括启动时间和爬坡速度,启动时间指灵活性资源接收到调度信号至灵活性资源开始响应的的时间;爬坡速度指单位时间可调机组最大爬坡功率占额定功率的百分比。启动时间分为秒级、分钟级和小时级三类,定义 P_n 为额定功率,则爬坡速度可分为10% P_n/min 以下、10%~20% P_n/min 和瞬时爬坡三类。不同灵活性资源的启动时间和爬坡速度能满足不同净负荷的波动速度需求。需求侧响应作为灵活性资源通过快速减少负荷可做到秒级响应,2060年预计占爬坡灵活性需求的50%以上;灵活性电源及抽水蓄能启动时间为分钟级及小时级,但爬坡较慢,主要满足中长期规律变化的灵活性需求;储能(含电动汽车)启动时间为分钟级,且能做到瞬时爬坡,主要满足日内灵活性需求。

稳定性未来主要由电池储能、常规可调节水电和氢能提供,2060年三者可满足90%的稳定性。火电提供稳定性的能力将逐渐减弱,原因是配备CCUS会阻碍火电机组做出快速响应。

惯性未来主要由核电、配备CCUS的火电和机

表2 各类灵活性资源的技术特性比较

分布区域	灵活性资源类型	高峰能力(充足性)		爬坡灵活性		稳定性	惯性
		调节容量范围	调节时间尺度	启动时间	爬坡速度		
电源侧	纯凝煤电(改造后)	10%~100%	中长时	热态: 3~5 h	3%~6% P_n/min	具备	具备
	热电联产煤电(改造后)	50%~100%	长时	热态: 4~5 h	3%~6% P_n/min	具备	具备
	单循环气电	近零~100%	中长时	热态: <0.1 h	15% P_n/min	具备	具备
	联合循环气电	30%~100%	长时	热态: 1.1~1.5 h	8% P_n/min	具备	具备
	常规可调节水电	近零~100%	中短时	<20 s	20%~40% P_n/min	具备	具备
	核电	30%~100%	中短时	—	1%~5% P_n/min	具备	具备
	光热发电	15%~100%	中时	热态: 20 min	15% P_n/min	具备	具备
	氢燃料电池	-100%~100%	中长时	<10 s	瞬时	具备	—
	负荷侧	需求响应	—	中短时	秒级	瞬时	—
电动汽车		—	中短时	秒级	瞬时	具备	—
储能侧	压缩空气储能	-100%~100%	中短时	分钟级	瞬时	具备	具备
	飞轮储能	-100%~100%	短时	15~60 s	瞬时	具备	具备
	超级电容/超导磁储能	-100%~100%	短时	<60 s	瞬时	具备	—
	锂/铅酸/液流/钠硫电池	-100%~100%	短时	30 s~2 min	瞬时	具备	—
	熔盐储能	-100%~100%	中时	10~40 min	15% P_n/min	具备	具备
	抽水蓄能	-100%~100%	中短时	10~40 min	10%~50% P_n/min	具备	具备
电网侧	电网互联互通	利用各地区资源禀赋差异及用电的非同时性进行负荷调整					
	微电网	分布式电源、负荷、储能装置、控制系统等形成模块化、分散式的供电网络					
	柔性输电	结合现代控制技术,电网电压、线路阻抗及功率角等可按系统需要迅速调整					

械储能提供，核电和配备CCUS的火电在2060年分别满足惯性需求的60%和30%。未来，虚拟同步发电技术也可以弥补系统中旋转惯量的缺失。

四、我国灵活性资源发展存在的问题

(一) 我国不同类型灵活性电源发展均存在困境

截至2023年年底，全国累计完成灵活性改造煤电约 3×10^8 kW^[28]，加上“十四五”以来建成的已考虑灵活性的煤电约 8×10^7 kW，以及气电、常规水电分别为 1.3×10^8 kW、 3.7×10^8 kW，累计装机 8.8×10^8 kW，超额完成2025年灵活调节电源占比达到24%左右（约 8.4×10^8 kW）的目标，但灵活性机组装机容量并不等于可以提供灵活性调节的容量，如660 MW的煤电机组最小出力可降低到30%，提供462 MW的调节容量。不同灵活性电源发展存在如下问题：煤电作为灵活性调节的重要手段，其频繁调节过程中尤其是进入深度调峰区间时，机组运行安全性降低、排放增加、效率下降（见图3），这将对机组安全性和经济性提出更高要求，所增加的额外成本需要有合理的分摊模式或补偿方案保障其可持续发展。气电受困于气价与电价的不协调，发展规模及潜力较小。水电作为具有优异特性的灵活性调节电源，频繁调节将加速机组磨损并损害发电量收益，还将导致下游水位陡增/陡降进而影响生态环境，且受气候变化影响不确定性较大。核电尚不具备日跟踪调节能力，无法频繁参与系统调峰。光热发电、氢燃料电池、天然气掺氢发电等其他灵活性电源技术成熟度相对较低、成本较高、市场规模较小。

(二) 近期储能仍不是主要灵活性资源

截至2023年，全球和我国已投运的电力储能容量分别为 2.89×10^8 kW和 0.87×10^8 kW^[29]，占风光发电装机容量的比例分别为11.8%和8.3%；预计到2030年我国电力储能容量至少将达到 3.41×10^8 kW（其中抽蓄容量为 1.2×10^8 kW），占风光发电装机容量比例将提升到17.8%~20.9%。储能近期不是主力灵活性资源的主要原因是：抽水蓄能对地理条件要求较高、建设周期长，我国大规模投运将在2030年以后；新型储能利用率较低，2023年电网侧、用户侧、新能源配储项目储能平均利用率指数分别为

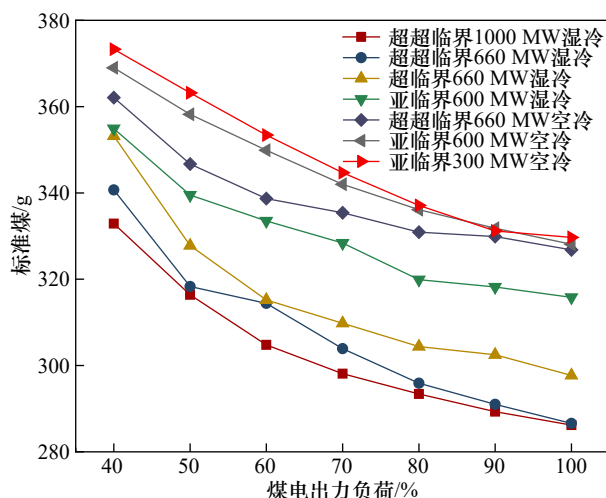


图3 不同煤电技术变负荷运行时的发电煤耗

38%、65%、17%^[30]，原因是新型储能自身成本依旧较高，市场成熟度较高的磷酸铁锂电池的度电成本为0.62~0.82元/kW·h，是抽水蓄能的3倍^[31]；另外配套的市场机制和盈利机制仍不健全，现货市场的峰谷价差较小且无其他成熟的盈利模式。

(三) 跨区域输电通道灵活性不足

西北地区风光资源丰富、西南地区水电资源丰富且调节能力强，负荷需求集中在中部及东南沿海地区，需通过特高压线路与负荷侧电网互联，充分利用不同地区资源禀赋和负荷特性，优化电力资源配置，有效保障电力供需。随着未来新能源外送需求增大，电网输送功率、运行方式和安全稳定特性将更为复杂多变，联络线传输计划和省网发电计划的制定与新能源跨区消纳需求不匹配表现得更为突出，省间壁垒仍然存在^[32]。

(四) 电力市场机制不健全

新能源特别是中西部水风光清洁能源基地跨省跨区交易电价机制不尽合理，未充分考虑送受两端的供需特点，造成送受端电价“倒挂”，影响开发积极性；目前电源侧调峰补贴资金主要由新能源机组或未参与调节机组分摊，调节资金来源及规模受限，不利于激发市场活力，甚至出现火电机组因参与分摊调峰成本总调峰收益为负的情况；负荷侧通过虚拟电厂等作为主体聚合分布式资源及灵活负荷参与电力市场交易仍处于起始阶段，交易品种较少，盈利模式单一。

五、我国灵活性资源发展思路

(一) 国际灵活性资源发展的成功经验

德国2023年风光装机占比为62%，风光发电量占比为41%，其电力系统运行稳定，灵活性资源发展经验成熟，本节结合德国情况介绍国际灵活性发展的成功经验。

一是发展应用安全、灵活、低碳的可调峰电源。在保障电力系统安全的前提下，德国以降低最小出力、快速升降负荷、减少启停时间为目标对煤电机组进行灵活性升级。同时建立战略备用机制，将部分煤电机组纳为战略备用资源，在电力系统常规运行时，战略备用机组将不被调用，在冬季或当光伏发电不足、电力市场无法提供充足电力的时段，备用机组由运营商激活调用，防止电力系统出现电力供应缺口^[33]。通过“盐穴储氢+氢能发电”满足中长期煤电退出后剩余负荷用电及冬季供暖需求，预计到2035年气电发电量占比将达到9%（氢气占比为7%），以及推动“分布式光伏+家庭储能”建设，家庭储能可提供约一半的需求侧灵活性潜力^[34,35]。

二是欧洲通过“物理互联+市场一体化”的互联模式实现电量余缺互济。一方面欧洲具备建立一体化电力市场的物理条件，20世纪中叶已初步建立跨国互联电网，且各国根据自身资源禀赋形成了具有互补优势的电源装机结构，如法国多核电、丹麦风电占比高、挪威水电丰富^[36]；另一方面欧洲具备电力市场一体化的现实需要及市场条件，各国在产业结构及地理位置上的差异使各国的负荷需求和发电出力时空上具备互补特性，而跨国电网的运营及市场联合出清机制将多国电力市场联结在一起，并通过竞价分区机制，推动电力从能源生产富余区以低廉成本送至高负荷消费区^[37]。德国通过与周边11国进行跨国电力交易，满足其逐时电力供需平衡，根据调研^[38]，2023年德国调出电力中奥地利、法国、瑞士3国共占比52%，德国冬季（12月一次年2月）风电发电量占比达37%，奥地利仅占比17%，且该时段德国调出电力平均为103 €/MW·h，而奥地利国内现货市场电价平均为119.98 €/MW·h，冬季取暖电力需求、价格、电力供给能力的不同共同促进奥地利成为德国最大的电力出口国；德国调入电力主要依赖于丹麦、法国、挪威等国，最大可满足其国内51%的电力需求。

三是充分调度多元灵活性负荷。德国建立了平衡责任单元机制，全国现已形成约 1.1×10^4 个平衡责任单元^[39]。平衡责任单元不受地域结构限制但隶属于同一调度区域，每个电力市场成员必须加入一个单元，且单元内必须包含一个平衡责任主体，并接受输电系统运营商管理。平衡责任单元负责预测本单元内的整体负荷与出力，并通过协调单元内成员交易和单元间交易来降低系统的不平衡性。平衡责任主体由售电公司、发电企业、负荷聚合商承担，但需接受不平衡电量考核和付费机制，若平衡责任主体无法实现单元内平衡，则由输电系统运营商调动资源确保系统总体平衡，并对单元内的不平衡电量进行清算。

(二) 我国灵活性资源发展的基本原则

借鉴发达国家的先进经验，结合电力系统对灵活性资源的需求，我国灵活性资源发展基本原则如下。

一是保障安全原则。“源网荷储”各环节灵活性资源在时空尺度协调发展和布局，确保灵活性电源容量、电网互济容量、储能容量和需求侧减少的容量需求，在共同作用下能满足全年最大用电负荷需求，保障极端条件下的系统电力电量平衡和安全运行。

二是低碳发展原则。在确保电力安全的前提下，科学有序规划加装CCUS的灵活性火电、常规可调节水电、核电、气电、抽水蓄能、电化学储能、氢能等清洁低碳灵活性资源。

三是经济最优原则。综合考虑各类灵活性资源的技术特性及发展潜力，根据不同风光发电量占比对灵活性资源的需求，优先发展技术成熟度高、投资或改造成本低、运行维护时间少的灵活性资源。

(三) 我国灵活性资源发展路线

借鉴国际经验，灵活性电源、储能技术、灵活负荷、电网互联互通将共同保障电力系统的灵活性，我国灵活性资源的发展将从目前以灵活性电源为主向“源网荷储”协同的低碳灵活性资源保障体系演变。根据上文对不同阶段灵活性资源需求的分析，结合我国中长期电力结构变化趋势以及煤电资产丰富、电网技术先进、储能及新能源汽车行业发展迅速的实际情况，在对各种灵活性资源技术的进入时间、发展规模以及成本进行综合研判的基础

上，提出了对我国电力系统灵活性资源发展路线的建议（见图4）^[4,22-24,40-43]。

在电力部门碳达峰前，电力部门净排放将增长至 4×10^9 t以上。考虑成本因素，可以优先发展应用灵活性煤电（2030年为 $5 \times 10^8 \sim 7 \times 10^8$ kW）、区域内灵活调度、智能微电网等成本相对较低的灵活性资源，重点解决电网中可能存在的响应能力和日内高峰能力不足等问题。同时，可辅以气电、抽水蓄能、工商业负荷需求响应等灵活性资源，这些技术需要付出相对较高的经济成本，可起到一定的辅助支撑作用。除此之外，提前扩大跨区电网互联传输容量，提高区域间电网互联互通能力，到2030年，跨区电力交换功率总容量达到2020年的1.8~2.7倍^[22]。

电力部门碳排放达峰后，排放量将逐渐下降，到2050年，净排放量将下降至 $0 \sim 1 \times 10^9$ t。此阶段，对日内及年内高峰能力的需求迅速上升，且部分时段调节幅度需求较大，同时对能提供系统惯量的灵活性资源需求上升。此阶段，通过借助成本较低的储气、储热、蓄冷等储能设备以及分布式电源与微电网、虚拟电厂深度结合，可平抑风光日内的波动性；当上述技术不能满足需求时，可进一步考虑工业领域大工业用户负荷中断、交通领域电动汽车车

网协同（2030年千万千瓦级以上）、建筑领域智能家居控制优化等需求侧响应技术，以及加装CCUS的火电、高比例掺氢气电、光热发电、氢燃料电池、压缩空气储能、液流电池储能、超级电容储能等成本较高的资源。

到2060年，净排放量将下降至 $-3.4 \times 10^8 \sim -2.5 \times 10^8$ t，该阶段火电几乎全部为加装CCUS的掺烧生物质及氨煤电、掺氢气电、生物质发电等零碳或负碳火电技术。此阶段，对灵活性资源更大的调节容量范围、更长的调节时间尺度、更多样的惯量提供需求达到巅峰。一方面需要通过虚拟同步发电技术、火电、机械储能调频等措施增强系统的惯量，提高系统的稳定能力；另一方面，可通过跨季节储热、蓄冷、盐穴储氢等季节性储能技术实现季节性的能量转移，解决季节性不平衡的问题；应用电制氢（P2H）、电制气（P2G）、电制热（P2H）、电制冷（P2C）等电转其他能源（P2X）技术，实现电力部门和其他能源部门的耦合平衡，解决富余风光电力消纳问题。

（四）灵活性资源发展路线可行性分析

根据前文介绍的灵活性调节原理，结合表2总

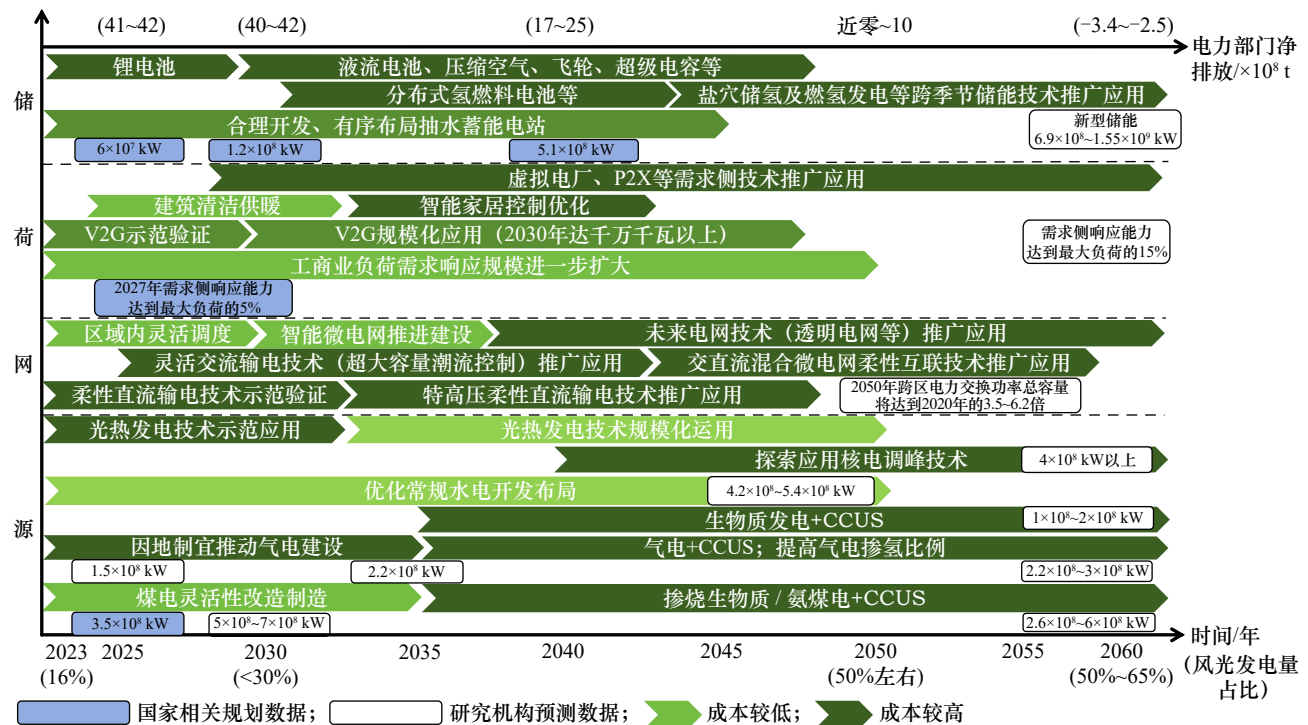


图4 我国电力系统灵活性资源发展路线
注：V2G为车对网技术。

结的各类灵活性资源技术特性，本节选取发展路线中的2060年灵活性资源组合为研究对象，对其电力、电量安全保障能力进行分析。

从电力保障来看，2060年风电、光伏装机容量均为 3×10^9 kW^[4]，全国最高用电负荷为 2.6×10^9 kW^[44]；根据图4中梳理的2060年灵活性资源装机容量的预测范围，以及表2中的灵活性资源调节容量范围，其平均值分别是煤电为 3×10^8 kW（70%可调节容量）、气电为 2.1×10^8 kW（80%可调节容量）、生物质发电为 1.1×10^8 kW（70%可调节容量）、抽蓄为 5.1×10^8 kW、新型储能为 1.12×10^9 kW，需求侧响应容量为 3.9×10^8 kW，累计可调节容量为 2.64×10^9 kW。根据国网区域风电和光伏的日内最大波动率（全部风光装机输出总功率的日内最大变化幅度）约23%和54%^[45]，可以得出日内风光最大波动量之和约为 2.31×10^9 kW，小于累计可调节容量（ 2.64×10^9 kW），结合全国特高压交直流输电网络及相应市场机制的完善，灵活性资源可保障电力供应安全。从可调节容量的响应速度来看，储能、需求侧响应能在瞬时进行出力或削减负荷，煤电爬坡速度为3%~6% Pn/min，气电的爬坡速度为8%~15% Pn/min，均可在1 h内提升至最大出力状态，可满足日内风光最大波动率下的电力缺口。

从电量保障来看，根据2023年各机组平均发电利用小时数以及2060年火电机组低负荷运行的出力情况，2060年风电、光伏发电、水电、核电、火电平均利用小时数分别为2221 h、1337 h、3412 h、7616 h、800 h，则全年发电量达到 1.6×10^{13} kW以上，能满足全年电力需求。

六、我国灵活性资源发展的重点举措

（一）保障煤电作为灵活调节的支撑性电源，因地制宜发展其他灵活性电源

保障煤电作为电力系统灵活调节的支撑电源。针对当前煤电企业灵活性改造积极性不足的问题，有必要加强政策公平性，提升煤电企业长远收益的预期。在遵循“谁调峰、谁受益，谁改造、谁获利”的原则下，充分考虑不同区域、机组类型以及改造投入和运营成本等多种因素，对于灵活性改造机组，完善容量电价、给予额外发电小时数补偿、制定财政补助及税收优惠政策等措施分

担改造及调峰成本。同时，随着风光发电量比例的增加，完善与推广火电和新能源企业承担调峰成本的机制及模式。研究存量煤电机组的区域分布，确保必要的转动惯量以维持电力系统的安全稳定水平。

因地制宜发展其他灵活性电源。在气源有保障、气价可承受、调峰需求大的地区，适当建设气电，并逐步提升气电中掺混氢气比例。在西南地区，发展智慧水电，通过与风、光、储等多种能源资源跨时空协同开发，实现大范围互补互济。在西北地区，逐步凸显光热发电的系统价值，在晚高峰时段发挥电力支撑作用。在东南地区，探索核电调峰，研究核电安全参与电力系统调节的可行性。在调峰时间比较集中的地区，研发并应用具备经济竞争力的分布式氢燃料电池发电机组。

增加新能源出力的灵活性。综合考虑高比例风光并网的经济性及利用率，多途径提升新能源并网友好性，适当情况下可以考虑弃风弃光。开发高精度新能源超短期功率预测技术，为电力系统灵活性调节提供关键信息。积极应用虚拟同步机技术，实现新能源电站具备类似火电厂同步发电机的一次调频特性。

（二）规划建设跨省跨区输电通道，构建透明电网及电力人工智能系统

规划建设跨省跨区输电通道。持续开展电网运行的科学预测分析，超前规划电网通道建设，加快特高压等清洁能源送出通道的电网建设步伐，以确保清洁能源的高效传输和利用。支持发展基于电压源型换流器的柔性直流输电技术，加强区域间、省间输电线路联络线建设，提高跨区域输电通道运行方式灵活性，有效挖掘并利用不同区域间的净负荷时序互补特性，降低各区域净负荷波动。

建设可见、可知、可控的透明电网，构建电力人工智能系统。依托透明电网，采用智能控制算法优化调度有功、无功潮流，提高电网灵活性运行水平。结合先进人工智能技术开发电力系统专用大模型，建设电力人工智能系统，实现动态感知、精准控制，实现系统电力电量实时平衡，保障新能源最大程度消纳。

（三）发展多元灵活性负荷，深入挖掘需求侧灵活性资源利用价值

发展多元灵活性负荷。因地制宜发展电制氢、

电转气、电锅炉、电制甲烷、电制冷等灵活用电负荷，推动其参与系统灵活调节运行，减少系统峰谷差。调动大的高载能工业用户参与需求响应，实现源随荷动逐渐向源荷互动转变。持续引导电动汽车有序充放电，构建完善车网互动与换电相结合的灵活调节体系。

深入挖掘需求侧可响应资源利用价值。充分利用可调节负荷、分布式电源、储能等资源潜力，支持通过负荷聚合商、虚拟电厂、微电网等主体聚合形成规模化调节能力，推动实施分钟级、小时级需求响应，参与调峰、调频等辅助服务市场。加速部署用户侧关键环节的信息交互设备，有序进行用户侧资源的挖掘、开发、聚合和交易等业务，实现需求侧资源的自动化和智能化调用。开展不同类型用户（居民、工业、建筑）的高精度负荷预测分析研究，借助高精度用户级负荷数据，以及分时电价、有序充电、上网补贴等激励政策，有效引导用户错峰用电、节约用电，提高电力系统的灵活性。

（四）多元化发展及应用储能技术，重点研发示范跨季节储能技术

多元化发展及应用储能技术。高比例风光电力系统中的储能技术需要具备高安全、大容量、低成本、长周期、响应迅速、多层次支撑等多种功能。充分发挥各类新型储能的技术经济优势，多元化推进抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、重力储能等机械储能，钠离子电池、液流电池等电化学储能，超级电容器，光热储能等技术的应用，结合电力系统发电侧、输电侧、用户侧应用场景需求，合理选择储能技术类型，提高储能利用率。

重点研发示范跨季节储能技术。未来储能技术将实现短时、长时、季节性多尺度发展，跨季节能满足日以上时间尺度平衡调节需求，大幅提升电力系统中远期灵活性。着力研发及试点示范盐穴储氢、氢燃料电池、跨季节储热等跨季节储能技术，解决新能源大规模并网带来的日以上时间尺度的系统灵活性调节需求。

（五）建立多元化的电力市场主体格局，完善保障灵活性资源发展的市场机制

建立多元化的电力市场主体格局。鼓励发电企

业、电网企业、售电企业、交易公司、储能企业、电力用户、政府相关监管机构和市场管理委员会积极参与市场建设，形成全员参与的电力市场新格局。

健全容量成本回收机制。落实抽水蓄能和煤电容量电价机制，按照“谁承担、谁收益，谁提供、谁获利”的原则，探索建立新型储能、氢燃料电池等灵活性资源参与容量市场的机制。

健全辅助服务市场的交易主体及品种。在交易主体方面，推动负荷聚合商、虚拟电厂、储能等主体参与市场竞争，降低其准入条件。在交易品种方面，根据各地系统需求探索新增快速频率响应、快速爬坡、备用、转动惯量等辅助服务品种，积极应对高比例风光电力系统低惯性及无功支撑能力下降带来的系统不稳定性。同步建立跨省跨区的调峰辅助服务交易机制，提升灵活性资源的优化配置能力。通过市场化手段，实现省间和区域间调峰能力的互济，有效应对电力供需波动，确保电力系统的稳定运行。

七、结语

在我国坚持走可持续发展道路，大力发展新能源，构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统背景下，需要着力推动我国灵活性资源的合理发展，确保电力供应安全。本文在综述“双碳”目标下电力低碳发展路线研究、分析不同比例风光发电量占比的灵活性需求基础上，提出了与我国电源结构发展相匹配的灵活性资源发展基本原则和发展路线，进一步提出了保障灵活性资源发展的重点举措。

展望后续研究，建议结合“双碳”目标的推进情况、能源及电力行业的新发展态势、不同灵活性资源的技术成熟度，前瞻性地开展技术和经济评价，细化和深化我国灵活性资源发展的时间表、路线图，形成支撑发展高比例风光电力系统的可行对策。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 3, 2024; Revised date: May 23, 2024

Corresponding author: Li Weiqi is an associate researcher from the Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University. His

major research fields include green and low-carbon development planning and strategy research. E-mail: liweiqi023@tsinghua.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Several Major Issues of Energy and Mineral Resource Conservation Strategies” (2023-XBZD-17)

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜, 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [EB/OL]. (2022-10-25)[2024-02-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
Xi J P. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects—Report to the 20th National Congress of the Communist Party of China [EB/OL]. (2022-10-25)[2024-02-21]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告—2020 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2020.
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry—2020 [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2020.
- [3] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987–4001.
Li Z, Chen S Y, Dong W J, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987–4001.
- [4] 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.
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.
- [5] 饶宏, 韩丰, 陈政, 等. 我国电力安全供应保障策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 100–110.
Rao H, Han F, Chen Z, et al. Strategy for guaranteeing power supply security of China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 100–110.
- [6] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案 [EB/OL]. (2022-05-14)[2024-02-21]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-05/30/c_1310608539.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation plan for promoting high quality development of new energy in the new era [EB/OL]. (2022-05-14) [2022-07-20]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-05/30/c_1310608539.htm.
- [7] 中国电力企业联合会. 2023—2024 年度全国电力供需形势分析预测报告 [EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-21]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-330280>.
China Electricity Council. 2023—2024 national electricity supply and demand situation analysis and prediction report [EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-21]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-330280>.
- [8] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3–16.
Lu Z X, Lin Y S, Qiao Y, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3–16.
- [9] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61–69.
Shu Y B, Chen G P, He J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61–69.
- [10] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147–158.
Lu Z X, Li H B, Qiao Y. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147–158.
- [11] Holttinen H, Tuohy A, Milligan M, et al. The flexibility workout: Managing variable resources and assessing the need for power system modification [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(6): 53–62.
- [12] International Energy Agency. Empowering variable renewables—options for flexible electricity systems [R]. Paris: International Energy Agency, 2009.
- [13] 井浩然, 赵红生, 姚伟, 等. 含分布式变速抽水蓄能的新能源发电系统灵活性资源规划 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 117–123, 173.
Jing H R, Zhao H S, Yao W, et al. Flexible resource planning of renewable generation systems with distributed variable speed pumped storages [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 117–123, 173.
- [14] 杨修宇, 刘沛焯, 孙勇, 等. 考虑灵活性需求演化规律的灵活性资源动态规划方法 [J]. 电力建设, 2023, 44(9): 3–12.
Yang X Y, Liu P Y, Sun Y, et al. Dynamic planning method for flexible resources considering evolution of flexibility requirements [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 3–12.
- [15] 程杉, 傅桐, 李泮洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1–12.
Cheng S, Fu T, Li F Y, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1–12.
- [16] 杨跃, 安然然, 梁晓兵, 等. 计及灵活性约束的配电网—微电网灵活性资源协同规划模型 [J]. 广东电力, 2023, 36(8): 54–69.
Yang Y, An R R, Liang X B, et al. Collaborative planning model of distribution network-microgrid flexibility resources with flexibility constraints [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(8): 54–69.
- [17] 杜维柱, 白恺, 李海波, 等. 兼顾保供电/消纳的源荷储灵活性资源优化规划 [J]. 电力建设, 2023, 44(9): 13–23.
Du W Z, Bai K, Li H B, et al. Source-load-storage flexible resource optimization planning that takes into account power supply and accommodation [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 13–23.
- [18] 郇政林, 刘杰, 徐沈智, 等. 面向高比例新能源接入的源—荷—储灵活性资源协调规划 [J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 107–117.
Huan Z L, Liu J, Xu S Z, et al. Source-load-storage flexibility resource coordinated planning for high proportion of renewable energy [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 107–117.

- [19] 金晨,任大伟,肖晋宇,等.支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J].中国电力,2021,54(8):164-174.
Jin C, Ren D W, Xiao J Y, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the “carbon neutrality” target of China [J]. Electric Power, 2021, 54(8): 164-174.
- [20] 赵东元,胡楠,傅靖,等.提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):1-8.
Zhao D Y, Hu N, Fu J, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [21] 中国电力圆桌项目课题组.电力系统灵活性提升:技术路径、经济性与政策建议[EB/OL].(2022-07-18)[2024-02-21].<http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2022-07-18/62d4c2e313df1.pdf>.
China Electric Power Roundtable Project Research Group. Improving power system flexibility: Technical paths, economics and policy recommendations [EB/OL]. (2022-07-18)[2024-02-21]. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2022-07-18/62d4c2e313df1.pdf>.
- [22] 清华大学气候变化与可持续发展研究院.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[M].北京:中国环境出版集团,2021.
Institute of Climate Change and Sustainable Development Tsinghua University. *Research on the strategy and pathway of low-carbon transition in China: Synthesis report* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2021.
- [23] Cui R Y, Hultman N, Cui D Y, et al. A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1468.
- [24] 吴娜,余碧莹,邹颖,等.碳中和愿景下电力部门低碳转型路径研究[J].中国环境管理,2021,13(3):48-55.
Wu Y, Yu B Y, Zou Y, et al. The path of low-carbon transformation in China’s power sector under the vision of carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 48-55.
- [25] Zhang Z Y, Du E S, Teng F, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [26] International Energy Agency. Roadmap for carbon neutrality in China’s energy system [EB/OL].(2021-09-23)[2024-03-21].<https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh>.
- [27] 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟.中国太阳能热发电行业蓝皮书[R].北京:国家太阳能光热产业技术创新战略联盟,2023.
National Solar Thermal Industry Technology Innovation Strategic Alliance. China solar thermal power generation industry blue book [R]. Beijing: National Solar Thermal Industry Technology Innovation Strategic Alliance, 2023.
- [28] 林水静.到2027年存量煤电机组实现“应改尽改”——煤电机组灵活性改造有了新目标[N].中国能源报,2024-03-25(10).
Lin S J. By 2027, the stock of coal-fired power units will achieve “all that should be improved”: New goals have been set for the flexibility transformation of coal-fired power units [N]. China Energy News, 2024-03-25 (10).
- [29] 中关村储能产业技术联盟.储能产业研究白皮书(2024)[EB/OL].(2024-04-10)[2024-05-20].<http://www.esresearch.com.cn>.
China Energy Storage Alliance. White paper on energy storage industry research (2024) [EB/OL]. (2024-04-10)[2024-05-20]. <http://www.esresearch.com.cn>.
- [30] 中国电力企业联合会.2023年度电化学储能电站行业统计数据[EB/OL].(2024-03-27)[2024-05-20].<http://cnnes.cc/shichang/zhishu/20240327/7561.html>.
China Electricity Council. 2023 electrochemical energy storage station industry statistics [EB/OL]. (2024-03-27)[2024-05-20]. <http://cnnes.cc/shichang/zhishu/20240327/7561.html>.
- [31] 何颖源,陈永翀,刘勇,等.储能的度电成本和里程成本分析[J].电工电能新技术,2019,38(9):1-10.
He Y Y, Chen Y C, Liu Y, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 1-10.
- [32] 姚昕,孙永平.“双碳”目标下的跨区域输电:突出问题及完善对策[J].国家治理,2022(18):34-37.
Yao X, Sun Y P. Cross-regional electricity transmission under the carbon peaking and carbon neutrality goals: Major issues and the countermeasures [J]. Governance, 2022 (18): 34-37.
- [33] 王鹏,杜瑜铃,王雁凌,等.欧洲战略备用机制对我国发电容量充裕性问题的启示[J].电力建设,2022,43(10):16-25.
Wang P, Du Y L, Wang Y L, et al. Enlightenment of European strategic reserve mechanism on the adequacy of power generation capacity in China [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 16-25.
- [34] Simon M, Dr B S, Thorsten L. Climate-neutral power system 2035: How the German power sector can become climate neutral by 2035 [EB/OL].(2022-06-23)[2024-03-21].https://static.agora-energiawende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/AEW_KNStrom2035_Summary_EN.pdf.
- [35] 李娜娜,赵晏强,王同涛,等.国际盐穴储能战略与科技发展态势分析[J].中国科学院院刊,2021,36(10):1248-1252.
Li N N, Zhao Y Q, Wang T T, et al. Analysis of international salt cave energy storage strategy and scientific and technological development trend [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1248-1252.
- [36] 赵腾,高艺,郭炜,等.欧洲大范围跨国电力互联在极端天气下电力安全保供中的作用分析[J].全球能源互联网,2024,7(1):14-24.
Zhao T, Gao Y, Wu W, et al. Analysis of large-scale cross-border interconnected power grids in Europe for ensuring secure electricity supply under extreme weather conditions [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 14-24.
- [37] Ciferri D, D’Errico M C, Polinori P. Integration and convergence in European electricity markets [J]. Economia Politica, 2020, 37(2): 463-492.
- [38] Energy-Charts. Total net electricity generation in Germany in 2023 [EB/OL].(2024-04-08)[2024-05-18].<https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=en&c=DE&year=2023&interval=year&source=total>.
- [39] Smard. Balancing energy [EB/OL].(2022-1-18)[2024-05-18].<https://>

- www.smard.de/page/en/wiki-article/6076/6086.
- [40] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32–43.
Guo J B, Wang T Z, Luo K, et al. Development of new power systems: Challenges and solutions [J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32–43.
- [41] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究 [J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17–25.
Ren D W, Hou J M, Xiao J Y, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality [J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17–25.
- [42] 国家能源局. 抽水蓄能中长期发展规划 [EB/OL]. (2021-9-8)[2024-3-21]. http://zfxgk.nea.gov.cn/1310193456_16318589869941n.pdf. National Energy Administration. Medium-and long term development plan for pumped storage energy [EB/OL]. (2021-9-8)[2024-03-21]. http://zfxgk.nea.gov.cn/1310193456_16318589869941n.pdf.
- [43] 中国化学与物理电源行业协会. 2024 年中国新型储能产业发展白皮书 [R]. 杭州: 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会课题组, 2024.
China Chemical and Physical Power Industry Association. White paper on the development of China's new energy storage industry in 2024 [R]. Hangzhou: Research Group of the Energy Storage Application Branch of China Chemical and Physical Power Industry Association, 2024.
- [44] 袁家海, 张凯. “碳中和”目标下, 新型电力系统中常规煤电退出路径研究 [J]. 中国能源, 2021, 43(6): 19–26, 66.
Yuan J H, Zhang K. Coal power phase-out pathway in the new power system under carbon neutral target [J]. Energy of China, 2021, 43(6): 19–26, 66.
- [45] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662–1677.
Wu S, Bian X Y, Zhang J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662–1677.