

新型电力系统下火电机组灵活性运行技术发展及挑战

王放放¹, 杨鹏威², 赵光金¹, 李琦², 刘晓娜², 马双忱^{2*}

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南省 郑州市 450000; 2. 华北电力大学(保定)
环境科学与工程系, 河北省 保定市 071003)

Development and Challenge of Flexible Operation Technology of Thermal Power Units Under New Power System

WANG Fangfang¹, YANG Pengwei², ZHAO Guangjin¹, LI Qi², LIU Xiaona², MA Shuangchen^{2*}

(1. Electric Power Science Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, Henan Province, China;
2. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, Hebei Province, China)

摘要:“双碳”背景下, 新能源开始大规模并网发电, 但新能源发电的随机性与波动性对电网造成一定冲击, 亟需构建新型电力系统。在这一过程中, 作为电力系统的基石, 传统火电将向提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础保障性和系统调节性电源转型, 火电机组的灵活性改造成为必然选择。分析了构建新型电力系统的阶段性目标及面临的困难与挑战, 探讨了现阶段火电机组灵活性改造遇到的问题, 结合火电运行数据, 分析火电机组配置储能设备的技术途径。研究认为: 构建新型电力系统过程中存在着电力系统不稳定、传统火电转型困难、能耗大、环保压力大等问题; 火电机组本体的灵活性改造面临调峰能力不足、运行成本较高、负荷响应慢、运行能耗大及安全性不高等问题; 通过火电加储能的运行模式会带来较好的经济效益和环境效益。

关键词: 新型电力系统; 火电机组; 次同步振荡; 线性自抗扰; 阻抗模型; 直驱式风机; 弱电网

ABSTRACT: Under the background of “dual carbon”, new energy sources have begun to be connected to the grid on a large scale. However, the randomness and volatility of new energy generation significantly impact the power grid, making it urgent to build a new power system. As the cornerstone of the power system, traditional thermal power will transform into a basic security and system regulatory power supply,

providing reliable capacity, peak regulation and frequency modulation and other auxiliary services. The flexible transformation of thermal power units has become an inevitable choice. The phased objectives, difficulties, and challenges of building a new power system were analyzed, along with the problems encountered in the flexible transformation of thermal power units at the present stage. Combined with thermal power operation data, the technical ways of configuring energy storage equipment for thermal power units were analyzed. The research shows that there are several issues in building a new power system, such as power system instability, difficulties in transforming traditional thermal power, high energy consumption, and environmental pressures. The flexibility transformation of thermal power units faces challenges such as insufficient peak regulation capacity, high operation costs, slow load response, high operation energy consumption, safety concerns, etc. The integration of thermal power and energy storage will bring better economic and environmental benefits.

KEY WORDS: new power system; thermal power units; subsynchronous oscillation; linear active disturbance rejection control; impedance model; direct-driven wind turbine; weak grid

0 引言

温室气体的过量排放会导致温室效应, 造成全球极端气候的出现, 严重影响人类的生存与发展^[1]。为应对全球气候问题, 国际上陆续出台《联合国气候变化框架公约》(1992年)、《京都议定书》(1997年)和《巴黎协定》(2015年)等文件为

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(236Z3703G); 国网河南省电力公司电力科学研究院科技项目(52170222000Q)。

Project Supported by Central Government Guides Local Science and Technology Development Fund (236Z3703G); Science & Technology Project of Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company (52170222000Q).

基础的国际治理框架^[2]。其中，在《巴黎协定》下，所有国家同意在2050年前将温升控制在2℃，并尽力控制在1.5℃^[3-4]。在此背景下，截至2022年2月，198个国家已承诺实现碳中和^[5]。2020年我国提出了“双碳”目标，即我国的CO₂排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和^[6]。“双碳”目标的确定为工业体系，尤其是CO₂排放占比达40%的能源电力行业带来了深层次的影响，也引导着产业结构的布局与发展。

为加速电力行业转型，我国新能源保持高速发展的态势。根据2023年1月国家能源局发布的2022年全国电力工业统计数据，截至2022年12月底，风电装机容量约3.7亿kW，太阳能发电装机容量约3.9亿kW。预计到2025年，我国风电、光伏装机容量将超过12亿kW。但因新能源发电的随机性与波动性，发电量具有不稳定性，导致新能源发电巅峰时电能可能无法有效释放，会造成弃电情况；新能源发电低谷时电力系统负担较大，容易造成电力缺口，对电力系统灵活性带来较大挑战^[7-10]。传统电力系统已无法满足复杂的能源体系，亟需构建新型电力系统^[11-13]。作为电力系统的基石，传统火电的角色和定位也会迎来新的转变。本文立足于分析构建新型电力系统过程中的困难与挑战，并结合火电灵活性改造技术进行深入分析，合理规划火电转型策略，对我国能源转型与双碳目标的实现具有重要意义。

1 构建新型电力系统

1.1 新型电力系统的各阶段分析

传统电力系统向新型电力系统的转变是一个循序渐进演变的过程。图1为国家统计局公布的2018—2022年我国清洁能源消费量占能源消费总量的比重。预计2030年左右新能源发电装机达到50%左右。

以2030年为界，新型电力系统可划分为2个阶段，2030年以前为碳达峰期，利用现有技术框架挖掘技术潜力，实现规模化储能应用。2030年以后为碳中和期，将大力推进技术创新，实现火电机组的升级转型、多种大规模储能技术融合等

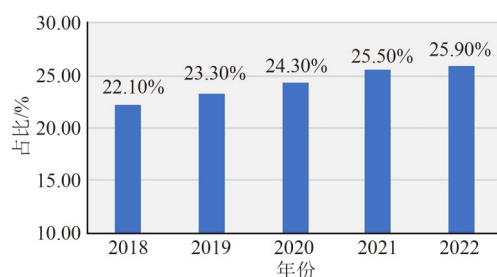


图1 2018—2022年我国清洁能源消费量占能源消费总量的比重

Fig. 1 Proportion of clean energy consumption in total energy consumption in China from 2018 to 2022

方面的深度变革。

1) 碳达峰期

随着各终端用户侧的电气化进程加速推进，电力需求将持续增长，预计2030年将达10万亿kW·h以上。这一阶段为传统电力系统向新型电力系统转变的转型期，新增的电力需求以新能源发电为主，确保电力系统的碳排放尽快达到峰值。新能源将逐渐发展为电力装机主体，主要依靠火电灵活性改造调峰、抽蓄等储能方式和跨区互联互通提供灵活性，支撑大规模风电、光伏并网消纳。因火电运行的稳定可靠等特性，火电成为支撑电力平衡与灵活调节功能的灵活性电源。在这一阶段，火电通过灵活性改造，保障电力系统的稳定运行。

2) 碳中和期

2031—2060年为碳中和期。在这一阶段电力系统的碳排放快速下降，考虑碳捕集后电力生产实现净零排放。清洁能源将发展为电量供应主体，全面建成新型电力系统，保留一定配备碳捕集装置的火电作为备用电源。

未来的新型电力系统体系包括传统火电、水电，以及可再生能源发电、储能、灵活性负荷等的低碳多元灵活性资源体系。在传统电力系统转型为新型电力系统的阶段，亟需提升电网灵活性，满足电网正常运行。《“十四五”现代能源体系规划》明确指出，煤电将由主体性电源向提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础保障性和系统调节性电源转型。力争到2025年，煤电机组灵活性改造规模累计超过2亿kW^[14]。因此，传统火电的灵活性改造将是重中之重。

1.2 构建新型电力系统过程中的困难及挑战

新型电力系统的结构形态具有显著的不确定性,但发展方向是明确的,即以新能源发电为主体,火电等化石能源发电作为电网灵活性运行的保障。然而,构建新型电力系统过程中面临着诸多的困难及挑战。

1.2.1 电力系统稳定性问题

在新型电力系统中,电源侧将由以火电为主体向新能源发电为主体进行转型。与火电相比,新能源发电出力的不确定性较高,电网的稳定性受到影响。风电、光伏发电在短时间内具有较强的波动性,当发电处于波峰期时需要可控发电机组的深度调峰能力予以平抑;当因季节影响,发电处于波谷期时,容易导致部分地区出现限电情况。2021年9月,因风电出力骤减等原因,东北地区电力供应缺口骤增。为防止全电网崩溃,东北电网调度部门依照有关预案,执行电网事故拉闸限电,直接影响居民和企业正常用电^[15]。因此,解决供需不平衡带来的弃电与灵活性需求是构建新型电力系统过程中面临的挑战,传统火力发电转型的重要性日益提升。

1.2.2 传统火电转型困难

为兑现低碳承诺,世界各国及相关机构着力推进传统火电的退煤进程^[16-17],但火电的退出具有一定的复杂性。火电关乎发展问题,对社会稳定、经济发展、能源安全具有重要影响^[18-19]。因我国富煤、贫油、少气的资源禀赋,煤炭深植于中国能源系统和经济体系^[20],如图2所示,2018—2022年我国煤炭消费量占能源消费总量的比重仍然超过一半。而火电耗煤量约占全国煤炭消耗量的一半^[21-24]。

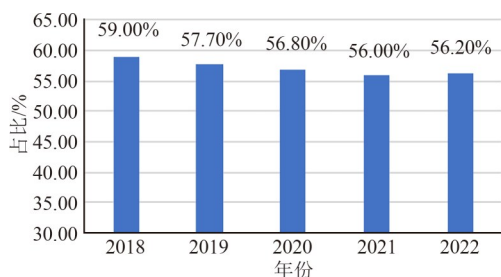


图2 2018—2022年我国煤炭消费量占能源消费总量的比重

Fig. 2 Proportion of coal consumption in total energy consumption in China from 2018 to 2022

我国的火电长期处于主体电源地位,呈现体量大、清洁化、产能过剩等特点。截至2020年年底,我国现役的1 TW煤电机组平均运行时间约13年,而发达国家的煤电机组平均运行年龄约为40年^[25]。从设计与成本角度考虑,我国诸多火电机组回收期仍未达到,此时关停火电机组将会造成一定的经济损失。

1.2.3 能耗、环保问题

根据国家能源局发布的《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》,预计到2025年,全国火电平均供电标准煤耗必须降至300 g/(kW·h)以下。2017年我国煤耗水平已经达到世界先进水平,总体煤耗水平优于美国、澳大利亚,接近日本和欧洲等发达经济体水平^[26]。2022年我国煤电的平均供电煤耗为301.5 g/(kW·h),达到国际领先水平,但距离最终目标仍有一段差距。另外,对发电过程中产生的SO_x、NO_x、颗粒物等污染物的排放,国家也有严格的排放限制。环保压力与减碳压力的叠加不可避免会导致发电企业能耗及成本的增加。

在传统的电力系统中,火电作为主体电力进行供电,而新能源发电的增加使得传统火电迫切需要新定位,且当新能源发电出力降低时,需火电机组保障供电。但因现有的火电机组灵活性不足,导致瞬时出力困难,严重时将导致电网出现负荷缺口。因此,综合来看,新型电力系统转型过程中提升火电机组灵活性是重中之重。

2 火电机组灵活性技术分析

2.1 灵活性改造途径

电力系统灵活性指的是电力系统的各类资源快速改变自身发电特性以维持系统有功功率平衡的能力^[27]。随着风电、光伏等新能源大量渗透,电网稳定性面临重大挑战。图3给出了电力系统灵活性改造途径,可见,电力系统的灵活性改造一般从4个方向进行。电力的跨省跨区交易及需求侧资源调整仅仅是在市场层面进行了宏观调整,要从根本上解决问题,需要从电厂发电的层面入手。因此,目前电力系统灵活性改造的最主要途径是从可调度发电厂的灵活运行与配置储能设备

这2方面着手。其中，可调度发电厂主要指火电厂，其纯凝机组负荷调节能力较强，改造的重点在于在低负荷状态下保证锅炉的稳定燃烧、减少污染物的排放^[28-30]。

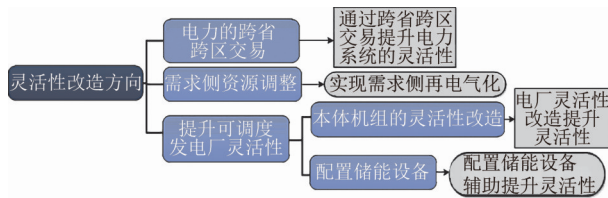


图3 电力系统的灵活性改造途径

Fig. 3 Flexible transformation approach of power system

2.2 火电机组灵活性技术

基于我国能源特性，提高煤电灵活性是保持电力供需平衡、应对电网波动性的重要手段。煤电的灵活性体现在3方面：启动时间、最小负荷、爬坡速率^[31]。我国煤电机组灵活性与国际先进水平的差距如表1^[27]所示。

表1 我国煤电机组与国际先进机组的差距

Tab. 1 Gap between China's coal-fired power units and international advanced units

灵活性参数	中国煤电		世界先进机组
	已建机组	改造潜力	
最小出力/%	50	30	20
爬坡速率/(%/min)	1~2	3~6	4~5
热态启动时间/h	3~5	4	1.5~2.5
冷态启动时间/h	10	5	<10

灵活性技术分类方式多样，部分研究分为锅炉系统改造、汽机和给水系统改造、脱硝等其他系统改造、控制系统改造、热电解耦、储能技术等^[32-34]。欧阳子区等^[35]对火电灵活性技术进行研究总结，将其分为4类，包括机组燃烧侧灵活调峰技术、热电联产机组热电解耦技术、提高变负荷速率调峰技术等火电机组本体的灵活性改造技术以及发电侧配置储能设备辅助调峰技术。

1) 机组燃烧侧灵活调峰技术。该技术包括低负荷稳燃、水动力安全性、宽负荷脱硝以及运行经济性等措施。

2) 热电联产机组热电解耦技术。该技术包括2类技术：一种是通过配置电锅炉、储热设备等方式；另一种是对机组汽轮机侧进行技术改造，包括低压缸零出力供热技术、高低压旁路改造技

术、高背压供热技术、余热供热技术等。

3) 提高变负荷速率调峰技术。该技术包括机组协调控制系统优化、机组蓄能调节、高压加热器调节技术以及凝结水变负荷深度调峰技术等。

凝结水变负荷深度调峰技术是通过主动改变火电机组凝结水流量而间接实现机组负荷的升降。凝结水变流量调节应用相对较多，但该方法存在一定的响应滞后，且会导致除氧器水位大幅波动，对机组的安全运行有一定影响^[35-37]。

高压加热器调节技术主要通过调整回热加热器抽汽量，改变汽轮机内蒸汽流量，从而迅速改变机组功率，具有参数品质高、储热足的特点^[38]。但在调节过程中高温加热器的温度、压力会发生变化，容易导致设备的损耗，影响电厂的安全稳定运行。

目前国内外很多研究人员在火电机组灵活性调节方面开展了深入研究。章良利等^[39]针对“三北”地区采暖区电负荷与热负荷不平衡现状，通过研究火电机组灵活性改造，表明各技术路线及方案在其适用范围内提升了火电机组运行的灵活性。徐俊^[40]提出一种基于弹性消纳新能源的火电机组调峰优化调度策略，将调峰裕度作为电网调峰灵活性的指标，并将新能源出力预测的不确定部分与负荷预测的不确定部分离散化，以模拟退火-Q学习算法求解调度策略。陆昊^[41]构建了基于集成贝叶斯最优最劣法-模糊累积前景理论方法的储能选型模型及考虑新型电力系统中多元随机干扰的储能规划双层模型，对新型电力系统中储能的综合价值测度及补偿机制进行了研究。

Koytsoumpa等^[42]提出了一种集成储能的新方法，将多种储能技术与火电厂相结合，将其作为一种新型方案来应对电力系统灵活性挑战。Mimica等^[43]为应对可再生能源并入电网，提出了一种新型混合储能系统的设计框架和一种有效的协调运行方案，可自动分配电力给储能系统和机组组合(unit commitment, UC)。Samakoosh等^[44]提出了一种利用需求侧信息和储能系统参数的最小集算法，获取了储能系统运行计划，以达到削峰填谷的目的。Babu等^[45]使用了基于实际负荷曲线的遗传算法优化技术，通过优化电池系统的尺寸，

解决太阳能光伏资源的间歇性给调峰带来的最大需求期间的电力消耗。

上述研究基本上集中于通过火电机组改造使得机组深度调峰更灵活, 以及通过构建理论模型的方式研究灵活性方案, 然而关于深度调峰过程中存在问题的研究较少。因此, 在现阶段, 首先需要分析火电机组灵活性改造中存在的问题。

2.3 火电机组本体灵活性运行中存在的问题

因投入使用的火电机组机型及运行状况、原料煤价、电价、不同机组升级改造的投入产出等情况存在差异, 通过分析火电机组灵活性运行过程中存在的问题, 选择适用的改造方案是提升火电机组灵活性的重要保障^[46]。

1) 调峰能力不足

调峰能力不足是制约火电灵活性运行的关键因素。目前, 我国纯凝机组的实际调峰能力一般为额定容量的50%左右, 典型抽凝机组在供热期的调峰能力仅为额定容量的20%左右。而目前的目标是热电机组增加20%额定容量的调峰能力, 最小技术出力达到40%~50%额定容量; 纯凝机组增加15%~20%额定容量的调峰能力, 最小技术出力达到30%~35%额定容量^[47]。因此, 采取措施增加调峰能力, 是缓解现状的有效途径。

2) 运行成本较高

汽轮机旁路供热、高背压循环水供热等改造技术涉及汽轮机本体技改。汽轮机旁路供热技术能够大幅降低汽轮机组的强迫出力, 具有较强的调峰能力。但考虑到汽轮机旁路容量、再热器超温等问题, 调峰幅度具有一定限制; 且高温高压蒸汽用于供暖, 存在较大的热损, 成本较高^[48]。

高背压循环水供热技术是将低压缸的排汽压力升高, 利用较高的排汽温度加热循环水供热, 具有较好的热经济性。但由于排汽压力较高, 需要更换专门的低压缸转子, 改造费用较高^[49]。

3) 负荷响应、运行能耗及安全性问题

火电机组运行过程中, 因本身的能量转换方式较为复杂, 当调整负荷的信号发出时, 响应较为迟缓。目前火电机组的设计、考核均以额定负荷为基础, 与长期偏离额定工况的现状不匹配, 机组的性能指标不能全面反映实际运行的安全性

和经济性。尤其是对机组在深度调峰、调频下的安全性、可靠性和经济性等方面尚缺乏完善的理论和技术支撑。另外, 在火电机组的发展中, 高参数、大容量机组成为主流, 但随着蒸汽参数的提升, 燃煤机组的蓄热能力却在下降, 大大降低了机组运行的灵活性, 并导致锅炉爆管、熄火等安全事故, 直接影响到系统的安全、经济运行。

综合上述问题, 为解决调峰能力、运行成本、负荷响应、运行能耗以及安全性等问题, 亟需找寻火电灵活性改造的新型高效模式。

3 储能技术辅助火电机组灵活性运行分析

发电侧储能调峰, 即以储能技术辅助火电机组进行调峰。火电机组加储能设备是提升火电灵活性运行的新型高效模式, 是保证机组及电网安全、经济运行的基础。火电机组通过外接储能设备, 可以提升火电机组的调峰能力, 在用电低谷期, 储存富余能量; 在用电高峰期, 储能系统辅助机组输出。发电侧储能调峰既可保障机组稳定运行, 降低锅炉负荷变化对汽轮机运行的影响, 又可高效地调节汽轮机运行出力, 提升机组灵活性。储能设备储存下来的能量也可以为电厂带来潜在的经济效益, 侧面降低运行和改造成本。同时, 机组在正常负荷运行, 运行能耗降低, 安全性可以保障, 既符合国家能源高效利用的政策, 也会为电厂带来环境效益。

3.1 火电机组加储能的经济效益分析

表2为某电厂330 MW火电机组在不同负荷下的运行情况。

表2 某电厂火电机组在不同负荷下的运行情况

参数	负荷					
	30%	40%	50%	60%	75%	85%
煤耗率/[g/(kW·h)]	342	326	313	305	305	305
年运行时间/h	200	300	800	1 000	1 500	2 000
燃煤单价/(元/t)	1 350	1 350	1 350	1 350	1 350	1 350

由表2可以看出, 随着运行负荷的减小, 煤耗率增大, 导致燃煤发电成本增加, 与环保理念相悖且经济性差, 不利于电厂的长久发展。

机组在各负荷下运行, 燃煤成本计算公式为

$$C_{\text{coal}(p)} = \tau \cdot t \cdot c \cdot k \quad (1)$$

式中： τ 为煤耗率， $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； t 为年运行时间， h ； c 为燃煤单价，元/ t ； k 为机组在满负荷下运行1 h可产生的电量， $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； p 为电厂改变运行策略前的运行负荷，%。

机组在30%、40%、50%、60%、75%、85%负荷运行的燃煤成本分别为2.770 2、5.281 2、16.902、24.705、34.233 8、69.997 5万元，总成本合计为153.89万元，全年发出的电量为 $4.005 \times 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。已知峰谷时出售的标杆上网电价为0.377 9元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，则收益为151.35万元，电厂处于亏损状态。

假设火电机组在全年最高负荷(85%)下稳定运行，富裕的电力以电池储能形式存储起来，计算公式为

$$Q = 0.85kt - pkt \quad (2)$$

经计算，机组稳定在85%负荷下运行1年，富余电量合计为337.58万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，若直接出售，收益为127.57万元。因此，火电加储能的运行模式可以提高电厂经济效益。

3.2 火电机组外接储能环境效益分析

电厂的环境效益主要表现在 CO_2 排放量、 NO_x 排放量以及 SO_2 排放量3方面，可以将其作为评价储能系统环境效益的指标，对其进行检测计算可直接反映出电厂增设储能系统的环境效益及低碳发展效果。

根据国家发改委提供的基础数据，即工业锅炉每燃烧1 t标准煤，就产生2 620 kg CO_2 、8.5 kg SO_2 、7.4 kg NO_x ，在火电机组原有的运行模式下，该电厂火电机组在不同负荷下的排放量如表3所示。

运行1年 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 总排放量分别为3 221 356、10 452、9 097 kg。增设储能设备，将机组维持在85%负荷下运行时， CO_2 、 SO_2 、 NO_x

表3 某电厂火电机组在不同负荷下的污染物排放量

污染物	负荷					
	30%	40%	50%	60%	75%	85%
CO_2	53 920	102 494	328 024	479 460	898 988	1 358 470
SO_2	175	333	1 064	1 556	2 917	4 407
NO_x	152	289	926	1 354	2 539	3 837

总排放量分别为3 200 396、10 383、9 039 kg。

火电机组在增设储能设备后，可满足火电机组灵活性提升。储能系统可以与汽轮机、锅炉协调控制系统配合，迅速联合响应自动发电控制指令，避免了机组频繁地进行负荷折返调节。同时，旁挂式的储能设备安全性高，在发生故障的情况下也不会影响火电机组的正常运行。储能产出的附属品可以自用或对外销售等^[50]，附带较为可观的经济效益，短时间之内可达到储能设备的回收期，且 CO_2 排放量、 NO_x 排放量以及 SO_2 排放量均有明显下降，为电力系统带来可观的环境效益。

火电+储能的新型运行模式既可为电厂带来经济与环境效益，同时也有助于辅助机组负荷速率调节，实现快速响应，降低对机组设备的损害。

4 储能技术应用现状及展望

储能技术按照储能形式大致可分为以下4种：

1) 物理储能，包括抽水蓄能、重力能、压缩空气能、飞轮储能等；2) 化学储能，包括电池储能和以氢能和氨能等为代表的化学储能；3) 电磁储能，超导磁储能等；4) 热储能，包括蓄热能、液态空气储能、热机械储能等。目前储能技术相对不成熟，安装有储能系统的电站尚处于示范阶段。表4为典型储能技术性能对比^[51-52]。

几种储能技术目前存在自身的技术限制。物

表4 不同储能技术性能对比

Tab. 4 Performance comparison of different energy storage technologies

储能技术	能量密度/ ($\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$)	响应时间	储能周期	使用寿命/a	经济成本/(元/ kW)	安全与环境问题
抽水蓄能	0.5~15.0	小时	数小时至数月	30~60	5 000~6 000	受地形、气候影响较大,水资源匮乏地区较难实现
电池储能	2.0~15.0	秒至小时	数分钟至数天	5~15	2 000~4 000	存在电池的化学成分对环境污染问题以及本身的安全问题
氨/氢化学储能	350.0/45.0	小时	数小时至数月	—/5	20 000	无污染,但目前存在技术问题
热储能	80.0~200.0	小时	数分钟至数月	5~15	400~800	存在腐蚀等问题以及北方地区的热损问题

理储能方式以抽水蓄能技术为例,受地形和气候影响较大,在内陆地区补给水问题不好解决,且所需要地势在平原地区的电厂难以实现。

电池储能技术包括锂离子电池储能、钒液流电池储能、铅炭电池储能等。锂离子电池储能具有能量密度大、无记忆效应、充放电快速、响应速度快等优点,广泛应用于风电、光伏等新能源发电侧配储和用户侧储能项目。但锂离子电池在高电压下可能会损坏,导致热失控和燃烧情况,安全问题不容忽视。钒液流电池具有寿命长、安全性好、输出功率大、储能容量大且易于扩展等特点。但是,钒液流电池能量密度低,能量转化效率方面不如锂电池,且体积、质量远大于其他电池,对放置空间、环境温度的要求较高。铅炭电池储能是由传统铅酸电池发展而来的一项储能技术,即将活性炭混合到负极活性物质铅中,具有充放电性能好、电池寿命长于铅酸电池、投资成本低等优点,但铅炭电池放电深度低于其他储能形式,其能效比铁锂电池低,经济性处于一定劣势。

以氢、氨为代表的化学储能目前的技术转换效率较低,投资成本较高,亟需技术突破^[56]。热储能以熔融盐储能技术为例,熔融盐在替换后需要集中处理,环境负担较大,且在北方地区冬季需注意熔融盐的保温,热转换效率较低^[50]。

通过改进现有储能技术的应用模式,在利用储能系统辅助火电机组调峰调频时,既要充分考虑火电机组的实际运行情况,又要注意发挥自身的优势,尝试将多种储能技术相结合,利用其不同的功率与容量特性,调整组合安装策略,优化储能系统在电网中的选型及布点,将储能向系统级方向发展,探索构建源网荷储深度融合的新型电力系统发展路径,实现资源共享、增强消纳新能源电力的能力。

5 结论

1) 在构建新型电力系统过程中,传统火电由主体电源向辅助调节型电源转型,保障电力系统的稳定运行。火电机组灵活性改造技术包括机组燃烧侧灵活调峰技术、热电联产机组热电解耦技

术、发电侧储能调峰、提高变负荷速率调峰技术,但目前火电机组本体灵活性改造中存在着调峰能力不足、运行成本较高、负荷响应慢、运行能耗高及安全性差等问题,亟需高效的灵活性改造模式。

2) 根据火电机组实际运行数据分析,低负荷运行情况下火电机组能耗增高,污染物排放增多。而通过电池储能技术辅助火电机组进行灵活性改造,既可减少燃煤消耗及污染物排放,储存的电量也可为电厂带来可观的经济效益。

3) 未来随着储能技术的进一步发展,利用储能技术辅助火电机组进行调峰调频的成本将更低,性能也会更好。大力推广储能技术辅助火电机组进行灵活性改造,对推进源网荷储一体化、提升电力系统的保障能力和能源利用效率,以及推进多能互补、提升可再生能源消纳水平都具有重要意义。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014 synthesis report[R]. Geneva: IPCC, 2015.
- [2] 王志轩,潘荔,张建宇.碳排放权交易培训教材[M].北京:中国环境出版集团,2022:125-126.
WANG Z X, PAN L, ZHANG J Y. Training materials for carbon emission trading[M]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2022: 125-126.
- [3] WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. Innovation (Camb), 2021, 2(4): 100180.
- [4] LUO S H, HU W H, LIU W, et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 166: 112618.
- [5] CHEN L, MSIGWA G, YANG M, et al. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(4): 2277-2310.
- [6] 陈美安,杨鹏,胡敏.中国NDC进程及展望2021:迈向全球碳中性的未来[R].北京:绿色创新发展中心,2021.
CHEN M A, YANG P, HU M. The process and prospect of NDC in China 2021: Towards a global

- carbon-neutral future[R]. Beijing: Green Innovation Development Center, 2021.
- [7] 杨京渝, 罗隆福, 阳同光, 等. 计及谷时段风电消纳的储能系统平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 131-141.
YANG J Y, LUO L F, YANG T G, et al. Smoothing wind power fluctuation control strategy for an energy storage system considering wind power consumption in the valley period[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 131-141.
- [8] 吴应双, 冯祥勇, 王寅, 等. 一种考虑新能源电站出力不确定性的采样鲁棒无功优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 84-95.
WU Y S, FENG X Y, WANG Y, et al. A sample robust reactive power optimization approach considering the power output uncertainty of renewable energy stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 84-95.
- [9] 杨京渝, 彭丽, 罗隆福, 等. 计及风电消纳的风储系统跟踪计划出力控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 160-170.
YANG J Y, PENG L, LUO L F, et al. Wind storage system tracking plan output control strategy considering wind power consumption[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 160-170.
- [10] 兰贞波, 冯万兴, 胡军峰, 等. 基于可变误差多面体算法的储能融合电锅炉提升风电消纳控制技术[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 47-53.
LAN Z B, FENG W X, HU J F, et al. Usage of combined energy storage electric boiler to enhance wind power accommodation based on flexible tolerance polyhedron method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 47-53.
- [11] 荆朝霞. 新型电力系统下电力市场的建设及运行机制研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 1.
JING Z X. Research on the construction and operation mechanism of power market under the new power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 1.
- [12] 郭庆来, 兰健, 周艳真, 等. 基于混合智能的新型电力系统运行方式分析决策架构及其关键技术[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 1-13.
GUO Q L, LAN J, ZHOU Y Z, et al. A New power system operation mode analysis and decision architecture based on hybrid intelligence and its key technologies[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 1-13.
- [13] 苏步芸, 王诗超. 新型电力系统背景下新能源送出合理消纳率研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(6): 43-50.
- SU B Y, WANG S C. Research on reasonable consumption rate of new energy transmission under the new power system[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(6): 43-50.
- [14] 李树明, 刘青松, 朱小东, 等. 350 MW 超临界热电联产机组灵活性改造分析[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 449-454.
LI S M, LIU Q S, ZHU X D, et al. Flexibility transformation analysis of 350 MW supercritical cogeneration unit[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 449-454.
- [15] 孙韶华, 王璐, 白涌泉, 等. 拉闸限电的背后: 煤炭价格高企火电企业发电意愿低迷[N]. 企业家日报, 2021-09-29(3).
SUN S H, WANG L, BAI Y Q, et al. Behind the power limit by pulling the gate: the willingness of thermal power enterprises to generate electricity is low because of high coal prices[N]. Entrepreneur Daily, 2021-09-29(3).
- [16] 韩迪, 马越, 陆彬, 等. 全球退煤进展追踪报告[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2021.
HAN D, MA Y, LU B, et al. Follow-up report on global coal withdrawal progress[R]. Beijing: Green Innovation Development Center, 2021.
- [17] 韩迪, 汪燕辉. 2022 年全球退煤进展追踪报告[R]. 北京: 绿色创新发展中心, 2022.
HAN D, WANG Y H. Follow-up report on global coal withdrawal progress in 2022[R]. Beijing: Green Innovation Development Center, 2022.
- [18] CUI R N, HULTMAN N, JIANG K J, et al. A high ambition coal phaseout in China: feasible strategies through a comprehensive plant-by-plant assessment[R]. Maryland: Center for Global Sustainability: College Park, 2020.
- [19] International Energy Agency. Phasing out unabated coal current status and three case studies[R]. London: IEA, 2021.
- [20] International Energy Agency. The role of China's ETS in power sector decarbonisation[R]. London: IEA, 2021.
- [21] LUO S H, HU W H, LIU W, et al. Study on the decarbonization in China's power sector under the background of carbon neutrality by 2060[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 166: 112618.
- [22] WANG G, DENG J, ZHANG Y, et al. Air pollutant emissions from coal-fired power plants in China over the past two decades[J]. The Science of the Total

- Environment, 2020, 741: 140326.
- [23] WANG W, LI Z, LYU J, et al. An overview of the development history and technical progress of China's coal-fired power industry[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13(3): 417-426.
- [24] ZHOU S, CHEN B, WEI W, et al. China's power transformation may drastically change employment patterns in the power sector and its upstream supply chains[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17: 1-11.
- [25] Climate Action Tracker. China going carbon neutral before 2060 would lower warming projections by around 0.2 to 0.3 degrees[EB/OL]. (2020-09-23)[2023-06-05]. <https://climateactiontracker.org/press/china-carbon-neutral-before-2060-would-lower-warming-projections-by-around-2-to-3-tenths-of-a-degree>.
- [26] CHEN L, MSIGWA G, YANG M, et al. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022, 20(4): 2277-2310.
- [27] 袁家海, 张健, 孟之绪, 等. 电力系统灵活性提升: 技术路径、经济性与政策建议[R]. 北京: 自然资源保护协会, 2022.
- YUAN J H, ZHANG J, MENG Z X, et al. Improving the flexibility of power system: technical path, economy and policy suggestions[R]. Beijing: Natural Resources Conservation Association, 2022.
- [28] 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.
- [29] International Energy Agency (IEA). *Harnessing variable renewables: a guide to the balancing challenge*[M]. Paris: OECD Publishing, 2011: 153-158.
- [30] 胡嘉骅. 电力系统灵活性提升方法及灵活调节产品获取机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HU J H. Power system flexibility improvement method and flexible adjustment product acquisition mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [31] LI J, HO M S, XIE C, et al. China's flexibility challenge in achieving carbon neutrality by 2060[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112112.
- [32] 甘益明, 王昱乾, 黄畅, 等. “双碳”目标下供热机组深度调峰与深度节能技术发展路径[J]. *热力发电*, 2022, 51(8): 1-10.
- GAN Y M, WANG Y Q, HUANG C, et al. Development path of deep peak-shaving and deep energy conservation technology for cogeneration units with “dual carbon” target[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(8): 1-10.
- [33] KOYTSOUMPA E I, BERGINS C, KAKARAS E. Flexible operation of thermal plants with integrated energy storage technologies[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54(8): 2453-2460.
- [34] COLIN H. *Increasing the flexibility of coal-fired power plants*[R]. London: IEA Clean Coal Centre, 2014.
- [35] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8772-8790.
- OUYANG Z Q, WANG H S, LÜ Q G, et al. Progress in deep peak regulation technology of pulverized coal fired boiler generator set[J]. *Proceedings of CSEE*, 2023, 43(22): 8772-8790.
- [36] 马良玉, 宁福军, 宋胜男. 凝结水节流对机组负荷影响的仿真研究[J]. *热力发电*, 2015, 44(3): 109-114.
- MA L Y, NING F J, SONG S N. Influence of condensate throttling on unit load: simulation test[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(3): 109-114.
- [37] 刘吉臻, 王耀函, 曾德良, 等. 基于凝结水节流的火电机组 AGC 控制优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23): 6918-6925.
- LIU J Z, WANG Y H, ZENG D L, et al. An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 6918-6925.
- [38] 汤可怡, 杨建明, 蔡喜冬. 大型机组一次调频性能优化方法[J]. *发电设备*, 2016, 30(6): 374-377.
- TANG K Y, YANG J M, CAI X D. Optimization on primary frequency regulation of large power units[J]. *Power Equipment*, 2016, 30(6): 374-377.
- [39] 章良利, 李敏, 周晓蒙, 等. 深度调峰下燃煤机组运行方式对能耗的影响[J]. *中国电力*, 2017, 50(7): 85-89.
- ZHANG L L, LI M, ZHOU X M, et al. Impact of the running modes of coal-fired units on energy consumption in in-depth peak load cycling[J]. *Electric Power*, 2017, 50(7): 85-89.
- [40] 徐俊. 新能源消纳下的火电机组调峰策略及效益评估[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- XU J. Peak regulation strategy and benefit evaluation of thermal power units under new energy consumption [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and

- Telecommunications, 2021.
- [41] 陆昊. 新型电力系统中储能配置优化及综合价值测度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- LU H. Research on optimization of energy storage configuration and comprehensive value measurement in new power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [42] KOYTSOUMPA E I, BERGINS C, KAKARAS E. Flexible operation of thermal plants with integrated energy storage technologies[J]. Heat and Mass Transfer, 2018, 54(8): 2453-2460.
- [43] MIMICA M, SINOVI Z, JOKI A, et al. The role of the energy storage and the demand response in the robust reserve and network-constrained joint electricity and reserve market[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 204: 107716.
- [44] SAMAKOOSH H M, JAFARI NOKANDI M, SHEIKHOLESAMI A. Coordinated resource scheduling in a large scale virtual power plant considering demand response and energy storages[J]. Journal of Operation and Automation in Power Engineering, 2018, 6(1): 50-60.
- [45] BABU B C, FRIVALDSKY M, PIEGARI L, et al. Design, control, and application of energy storage in modern power systems[J]. Electrical Engineering, 2022, 104(1): 1-12.
- [46] 徐彤, 周云, 王新雷. 300 MW级热电联产机组调峰能力研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 35-41.
- XU T, ZHOU Y, WANG X L. Research on peak regulation capability of 300 MW combined heat and power plant[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 35-41.
- [47] 毕庆生, 田春光, 吕项羽, 等. 大型供热机组深度参与电网调峰的一种新模式[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(1): 69-71.
- BI Q S, TIAN C G, LÜ X Y, et al. A new model of large heating units deeply involved in the peak regulation of power network[J]. Turbine Technology, 2014, 56(1): 69-71.
- [48] 郭丰慧, 胡林献, 周升彧. 基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 50-56.
- GUO F H, HU L X, ZHOU S Y. Dispatching model of wind power accommodation based on heat storage electric boiler for peak-load regulation in secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 50-56.
- [49] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13.
- QIN T, LIU H D, WANG J Q, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13.
- [50] 马双忱, 杨鹏威, 王放放, 等. “双碳”目标下传统火电面临的挑战与对策[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 36-45.
- MA S C, YANG P W, WANG F F, et al. Challenges and countermeasures of traditional thermal power under the goals of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 36-45.
- [51] 刘思远. 配电网储能设备并联运行控制方法与控制特性[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- LIU S Y. Parallel operation control method and control characteristics of energy storage equipment in distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [52] 王亚莉, 叶泽, 戴双凤, 等. 基于ESG理念的新型电池储能综合价值测算及经济性评估[J]. 财经理论与实践, 2022, 43(5): 108-115.
- WANG Y L, YE Z, DAI S F, et al. Integrated value measurement and economic evaluation of new battery energy storage based on ESG concept[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2022, 43(5): 108-115.

收稿日期: 2023-07-24.

作者简介:



王放放

王放放(1991), 男, 硕士, 工程师, 从事电力储能技术研究, 939882516@qq.com;



马双忱

马双忱(1968), 男, 博士, 教授, 从事燃煤大气污染控制教学与研究, 本文通信作者, msc1225@163.com。

(责任编辑 辛培裕)