

双碳目标下燃煤热电联产机组储能技术应用分析

邵建林^{1,2}, 郑明辉³, 郭宸昊⁴, 闫梦迪³, 夏子晴⁴, 许宏鹏⁴, 魏书洲^{1,2,✉}

(1. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201; 2. 河北省燃煤电站污染防治技术创新中心, 河北 廊坊 065201;
3. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003; 4. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: [目的]“碳达峰、碳中和”目标要求现有能源结构进行深刻变革。提高原有燃煤热电联产机组灵活调节能力是保障新能源电力安全并网的重要内容之一。[方法]分别从燃煤热电联产系统灵活调节需求、潜在储能应用现状以及耦合储能技术的发展方向等方面进行了评述。[结果]分析认为深度“热电解耦”仍是提高燃煤热电联产系统的关键内容。其次,为满足“源-荷”匹配性,储能技术将在燃煤热电联产系统中发挥重要作用,其中具有应用潜力的储能技术主要包括储热、蓄电以及飞轮储能。[结论]最后根据燃煤热电联产机组耦合储能技术的应用特点,提出了储能性能老化、新能源消纳、扩容区域热电负荷中长期变更、初投资与回收期的经济性分析四个方面的建议以及需要注意的相关问题。

关键词: 低碳目标; 燃煤热电联产; 储能技术; 热电解耦; 应用分析

中图分类号: TK02; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0102-09

开放科学(资源服务)二维码:



Application Analysis of Energy Storage Technology for Coal-Fired Combined Heat and Power Generation Under Carbon Peak and Neutrality Goal

SHAO Jianlin^{1,2}, ZHENG Minghui³, GUO Chenghao⁴, YAN Mengdi³, XIA Ziqing⁴, XU Hongpeng⁴, WEI Shuzhou^{1,2,✉}

(1. SanHe Power Plant Ltd., CHN Energy, Langfang 065201, Hebei, China;
2. Hebei Innovation Center for Coal-fired power station Pollution Control, Langfang 065201, Hebei, China;
3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;
4. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: [Introduction] The goal of "carbon peak and neutrality" will require profound changes in the existing energy structure. Improving the flexible adjustment capabilities of the original coal-fired cogeneration units is one of the essential elements in ensuring the safe grid connection of new energy power. [Method] This paper reviewed the flexible adjustment requirements of the coal-fired cogeneration system, the current status of potential energy storage applications, and the development direction of coupled energy storage technology. [Result] It is concluded that the deep "thermoelectric decoupling" is still the key to improving the coal-burning cogeneration system. Secondly, to meet the "source-charge" matching, energy storage technology will play an essential role in the coal-fired cogeneration system, among which energy storage technology with potential application mainly includes heat storage, electricity storage, and flywheel energy storage. [Conclusion] Finally, according to the application characteristics of coupled energy storage technology for coal-fired cogeneration units, the paper puts forward suggestions on the aging of energy storage performance, absorption of new energy, long-term change of thermal power load in the expansion area, economic analysis of initial investment, and payback period and relevant issues needing attention.

Key words: low-carbon target; coal-fired combined heat and power generation(CHP); energy storage technology; thermoelectric decoupling; application analysis

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-05-15 修回日期: 2022-05-21

基金项目: 河北省自然科学基金绿色通道项目“生活垃圾成分多变性对污染物生成与燃烧过程影响机制研究”(E2021203041)

0 引言

为适应全球气化变化以及我国“碳达峰、碳中和”的“双碳”工作的开展和实施,新能源电力将发挥着重要作用,能源体系和电力系统将迎来新的变革。新能源电力的波动性和不确定性对原有燃煤机组的调峰能力提出了更高的要求^[1]。目前对于燃煤机组的灵活性调整主要表现为快速启停,提高升降负荷速率以及降低机组的最小运行负荷。方旭等^[2]对利用热泵余热回收技术提高其运行负荷能力进行了综述,结果发现该方案可以部分热电解耦,降低机组最小负荷且有较好的经济效益;王金星等^[3]针对快速启停提出采用水冷壁安全防护技术,结果发现可以有效应对在启停时机组产生的热变形。

对于燃煤热电联产系统,“以热定电”的生产模式限制了其灵活运行能力。目前提高燃煤热电联产系统的灵活性主要包括低压缸零出力改造以及增设辅助设备^[4],扩大燃煤热电联产系统的热电比也是一个重要内容^[5]。天罡等^[6]分析了350 MW燃煤供热机组在切除低压缸后再供热的运行数据,其中末级叶片未发现大规模水蚀且经济效益显著,但其运行监视测点不足,无法对叶片进行监控;刘双白等^[7]基于低压缸零出力改造方案对某320 MW供热机组开展理论模拟,结果发现机组供热能力将大幅度提升,节能效果显著,但该理论模型未考虑在实际改造过程中的经济性和安全性。由此可见,根据区域热电需求针对性地改造燃煤联产系统能够在灵活性和经济性上展现一定的优势,但是由于系统自身性能的限定,仍会带来不同程度的问题。储能技术作为一种跨时间尺度调节的辅助技术,为弥补系统自身的约束,进一步实现深度调峰提供了潜在的应用前景^[8],同时也为原有燃煤机组在能源结构转型过程中提供了一个重要发展方向^[9]。目前,燃煤机组的储能技术主要应用于一次调频和降低最小运行负荷。例如,何林轩等^[10]分析了飞轮储能辅助火电机组一次调频的效果,发现采用飞轮储能辅助一次调频能够减轻电机组调频负担,提高机组效率。

随着新能源电力不断并网,未来储能技术的发展将从经济性、安全性、低碳性等方面助力国家电网建设。同时,热电机组与储能的耦合配置有利于提升火电机组灵活性以及热电机组的调节能力^[11]。

本文将以“双碳”目标为背景,通过对潜在的储能技术应用现状的分析与对比,进一步提出耦合储能技术的发展方向,最后基于研究分析提出了需要关注的问题及具可行性的相关建议。

1 燃煤热电联产机组灵活调节需求

虽然燃煤热电联产系统具有较高的能量利用率,但“以热定电”的生产模式大大降低了系统的灵活运行能力。基于电力需求、燃料组合和发电效率^[12],可再生能源的不确定性及其并网需求要求电网的各产能组件具有较高的灵活性。而提高燃煤机组的灵活性主要包括最小运行负荷能力,快速启停以及升降负荷速率。在提高机组升降负荷速率方面,张兴等^[13]对500 kW/100 kWh的飞轮储能系统进行测试,结果发现飞轮储能系统与火电机组联合调频可以提高机组的快速响应能力并具有相当可观的经济收益。

1.1 燃煤热电联产系统特点

热电联产系统相比于传统的火力发电系统而言具有较高的利用效率,理论上,该系统的综合能源利用效率可达80%以上^[14]。高背压机组和抽凝机组是目前燃煤热电联产机组的主要运行方式^[2,15],如图1所示。其中对于抽凝机组,汽轮机的排汽为正压排汽,且排汽直接送到热用户,其“以热定电”的主要原因在于在中压缸抽出一部分蒸汽用于供热。这势必会使得进汽量减少,发电量降低,而热负荷的多少决定抽汽量。对于高背压机组,则通过汽轮机的抽气口直接将部分仍具有做功能力的蒸汽抽出送至热用户。用户端供热量决定了汽轮机的进汽量,而机组的发电量直接被进汽量决定,因此机组的发电量完全受热负荷的制约。为此,有必要进一步探索平抑机组负荷波动,同时进一步降低其最小运行负荷能力。

1.2 “双碳”目标牵引方向

长期碳减排已成为我国的一项重要能源政策,其政策走向如图2所示。2021年以前,我国能源政策的主要导向为加快煤炭行业完成落后产能改造,建设“煤改气”工程,大力发展清洁能源^[16]。而进一步分析中国能源结构可以发现,中国的风电、光伏等可再生能源占比明显增长,但比例仍然较低^[17]。而自2021年之后,尤其是“双碳”目标提出后,未来中国能源结构的转变方向很可能直接从煤炭转向新能

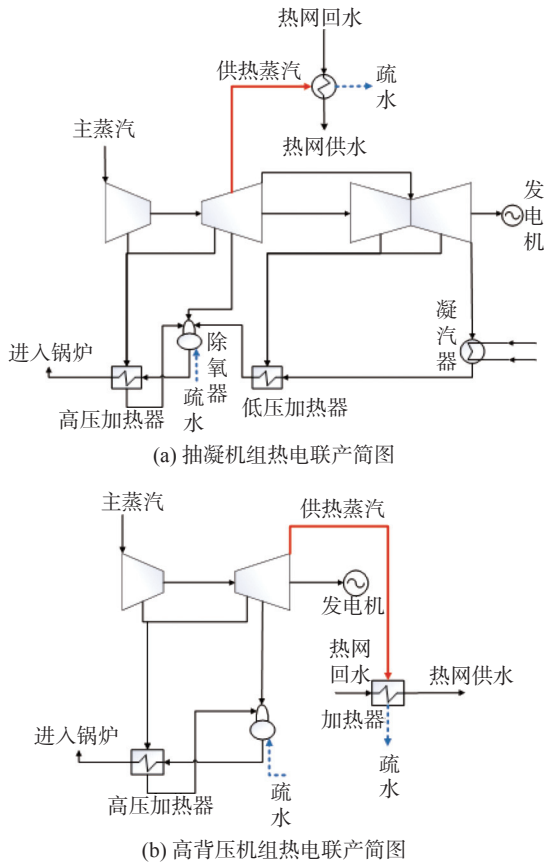


图1 两种热电联产机组供热形式

Fig. 1 Two heating forms of cogeneration units

源,且煤炭仅作为保障型能源供给。在双碳目标的指导下,热电联产机组进行灵活性改造已经是大势所趋,进一步发展耦合储能技术势在必行,增加能源系统的存储能力与节能能力是必由之路^[18]。在减少排放的同时增强对新能源的消纳能力并逐渐建立新能源发电与燃煤热电联产机组耦合的综合能源系统对火电行业既是机遇也是挑战。

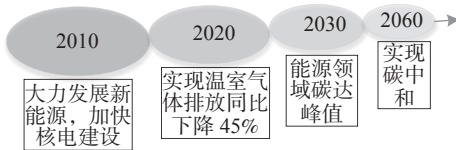


图2 中国碳减排政策动态

Fig. 2 Trends of China's carbon emission reduction policies

1.3 机组耦合储能技术形式

在双碳目标的指引下,将储能技术与热电联产系统相耦合是一个较为重要的发展方向。热电联产机组耦合系统如图3所示。可用于机组耦合储能技术形式主要包括储热、蓄电、飞轮储能、抽水蓄能、

化学储能等储能装置。储能技术的调节能够有效提高系统对多种能源需求的动态响应能力。例如,杨挺等^[19]通过研究热电联产耦合太阳能系统,提出了机组惯性功率补偿方案,结果发现该方案能有效的缩短调节时间,适应负荷的动态变化过程;Nurdan Burgu等^[20]采用光伏板电池耦合热电联产技术,分析其在医院的应用,结果发现该技术不仅提高了能效而且减少了二氧化碳排放;Shu-shuo Kang等^[21]提出了热电联产耦合地源热泵的能源系统,通过参数分析,结果发现新系统比传统热电联产系统总效率提高了接近20%。

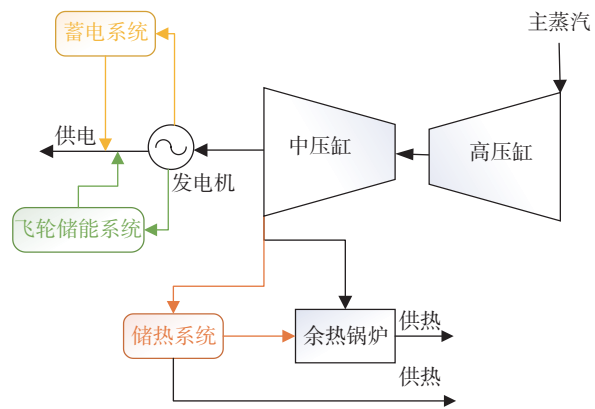


图3 热电联产机组耦合系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coupling system of cogeneration unit

2 潜在储能技术的应用现状

目前用于热电联产机组灵活性改造的技术主要包括扩大热电比、增设电热转换装置以及耦合储能系统^[15]。其中扩大热电比、增设电热转换装置属于储热技术,是物理过程。耦合储能技术则已涉及到了化学能转化。潜在储能具体技术特点及应用现状如下: Benjamin McDaniel等^[22]对系统增加储热罐,不仅缓解系统热负荷的要求,提高系统的灵活性,而且可以令热电系统维持运行在高效的区域。于波等^[23]对混合储能的光伏发电并网系统建立能量管理模型并进行并网仿真模拟分析,结果发现基于蓄电池和超级电容器构建的储能系统在电网能量管理中具有更好的协同优势,其通过优化蓄电池的充放电过程,一方面延长了电池使用寿命的作用,另一方面为光伏电站并网运行的平稳可靠提供支撑。潜在储能技术的分类以及其应用场景如图4所示。潜在储能技术性能对比如表1所示。

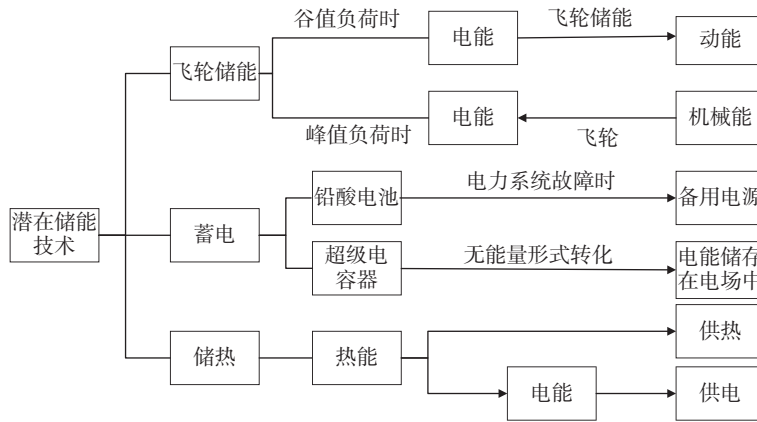


图 4 潜在储能技术的分类及应用

Fig. 4 Classification and application of potential energy storage technologies

表 1 潜在储能技术性能对比

Tab. 1 Comparison on performances of potential energy storage technology

储能技术种类	优点	缺点	参考文献
储热技术	显热储热	系统集成的低成本和简易性, 储能介质环境友好性	储能密度低、集成系统体积庞大; 热损问题突出 [24-25]
	潜热储热	在近似等温的状态下存释热, 利于热控; 储能密度高于显热储热	储热介质与容器的相容性较差; 热稳定性需强化; 相变材料较贵 [26-27] [24,28]
	热化学储热	储能密度最大, 适用于紧凑装置; 自散热损失可以忽略不计	储/释热过程复杂, 不确定性大, 控制难; 循环中的传热传质特性较差 [24-25]
蓄电技术	铅酸电池	价格低	功率密度较低 [29]
	液流电池	低成本	电池自放电可控, 输出功率可控 [30-31]
	大功率电容器	免维护	快速充放、电功率密度大 [32]
	锂电池	不具备明显的经济性	比功率高 [32]
飞轮储能技术	永磁-机械轴承混合支承式	成本低廉	储能过程中能量损失大 [33-34]
	电磁悬浮轴承支承式	轴承运行稳定, 工作寿命长	电机运行过程中散热条件差 [35]
	超导磁悬浮轴承支承式	可实现低损耗磁悬浮飞轮储能, 储能效率高	成本高 [36]

2.1 储热技术

采用储热技术可以让机组在高负荷运行时进行储热, 在低谷期可以作为热源为热网供热, 同时可以将储存的热量去加热给水将热量间接转换为电能进行供电。目前的储热技术可以细分为显热储热、潜热储热与热化学储热等, 其具有的优缺点见表 1。潜热储热技术工作原理为热能的储存和释放发生在材料的相变过程中, 这令潜热储能密度明显高于显热, 且存放热过程易于进行热量管控; 但是潜热储热技术存在储热介质与容器的相容性差, 相变材料较贵等不足。而潜热储热技术中也包括熔盐储热, 熔盐

储热技术的优点在于蓄热方式灵活, 相比于其他储能技术, 系统结构简单, 初投资较低^[26]。其基本原理为利用熔盐自身比热容, 通过温度的变化来进行热量的存储与释放。但是熔盐储热技术由于熔岩凝固点较高的限制, 容易造成集热管管路堵塞, 在实际应用方面会有一些温度上的限制。显热储热技术的优点在于系统集成的低成本和简易性, 储能介质具有环境友好性; 但储能密度低、集成系统体积庞大等不足制约该技术的推广。储能密度最大是热化学储热技术相比于上述两种储热技术的主要优点, 其基本原理为利用物质间的可逆化学反应或者化学吸/脱附

反应的吸/放热进行热量的存储与释放,因此储热期间的散热损失极小,但热化学储热技术也存在储/释热过程复杂,不确定性大,控制难等不足^[27]。

2.2 蓄电技术

目前的蓄电技术还可以细分为,铅酸电池蓄电、钒液流电池蓄电、锂离子电池蓄电、超级电容器蓄电技术等。其应用汇总见表1。电化学电池的基本原理为利用电池材料化学能与电能的相互转化过程实现电能的存储和释放。铅酸电池蓄电技术的优点在于铅酸电池性能可靠、价格低,可以在电力系统发生故障时,作为备用电源使用,但缺点为能量密度和功率密度均较低。钒液流电池的优点在于电池寿命长、可深度放电、电解质溶液可反复再生,却也存在体积大、比能量低、密封性不好等问题。锂离子电池具有能量密度高、环境友好等优势,在电力系统储能方面有较强的竞争力。超级电容器具有电容量超高、功率密度大、充电速度快、充放电效率高、循环寿命长、工作温度范围宽、免维护、安全无毒、环境友好等优点,可以将机组多发的电储存起来,提高机组的深度调峰能力。其不足之处表现为能量密度偏低,漏电流较大,单体工作电压低,如何在保持其优秀的功率密度和循环稳定性的前提下,进一步提升能量密度的是当前重点研究方向^[30-31]。

2.3 飞轮储能技术

飞轮储能基本原理为利用旋转体旋转时的动能进行能量存储和释放。利用飞轮装置将电能储存为机械能,是一种物理储能方式,其技术的应用汇总见表1。在谷值负荷时,可以将电能以机械能的形式储存在飞轮之中,而峰值负荷到来时,将飞轮中的机械能释放转换为电能,满足负荷。飞轮储能技术具有功率密度高、充放电响应速度快、使用寿命长、放电深度大、无环境污染、运营成本低、安全风险小等综合优势^[37]。电磁悬浮轴承支承式、超导磁悬浮轴承支承式和永磁-机械轴承混合支承式是三类不同的飞轮储能系统^[33]。其中电磁悬浮轴承需要有源控制;超导永磁轴承的运行需要维持低温环境;永磁轴承与小型螺旋槽流体动压轴承的混合支承方式具有结构简单、运行可靠和成本低廉的优点,适用于小型飞轮(重量为数千克力到数十千克力),并且其摩擦功耗还有降低的潜力^[34]。

3 耦合储能技术的发展方向及相关建议

3.1 储能技术协同调控

多种储能技术的协同调控是进一步降低投资成本,综合提高系统性能的重要途径之一。燃煤机组耦合储能技术近几年的发展如图5所示。牟春华等^[38]对火电机组与储能联合发电系统进行控制调频研究,结果证实了耦合储能可提升系统的调频性能。隋云任等^[39]对飞轮与常规火电机组耦合系统展开了调频研究,结果发现耦合系统能够有效降低污染物排放以及避免非正常停机等情况。其中协同调控的主要内容包括:(1)性能调配。储能技术性能调配,可以维持电网频率稳定,减少两区域间联络线上交换功率的波动性。例如,何林轩等^[10]对飞轮与600 MW火电机组耦合系统展开了研究,结果发现,可以减少系统频率的偏差值,增大联络线上交换功率的稳定,还能帮助飞轮储能荷电状态恢复至正常范围内。(2)参数优化。参数的优化是指对原有系统耦合储能技术后,其最佳运行工况发生了改变,对其进行参数优化能够进一步提高其机组性能。(3)区域规划。通过区域划分,构建模型,进而便于对此分析。(4)个例设定。以某种燃煤机组为例,通过具体的系统能力调研,确定更优的各项参数,以使得整个系统收益最大。

马成龙等^[40]通过系统性分析证明600 MW燃煤机组耦合飞轮储能系统可以有效减少其响应延迟,并能迅速跟随AGC信号变动,最后在稳定阶段也能维持机组输出功率始终保持在AGC信号附近波动。崔杨等^[41]对储热电站与火电机组联合调度展开了研究,结果发现调度性能提升可有效提高运行的经济效益。

3.2 需要关注的问题和建议

飞轮储能需要进行长时间的连续调频工作,因此我们需要关注储能性能老化等相关问题,有利于飞轮储能及燃煤机组的状态在调频过程中保持良好。

1)储能性能老化。为保障燃煤机组的安全运行及减缓各装置老化速度,增大收益,避免储能性能老化具有重要意义。

2)新能源消纳扩容。新能源与燃煤机组相耦合既能够避免能源短缺以及传统能源带来污染的问题,

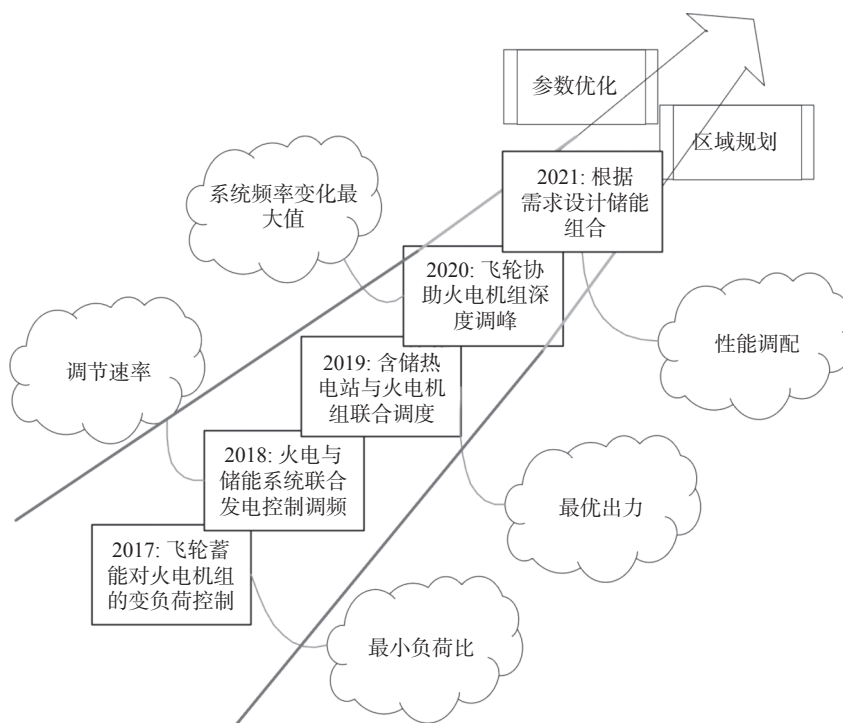


图5 燃煤机组耦合储能技术年份发展图

Fig. 5 Year development chart of coupling energy storage technology of coal-fired units

也能够提升部分机组发电效率。王金星^[15]对可再生能源与燃煤热电联产系统相耦合展开了研究, 结果发现, 将可再生能源产生的热量经过某些加热器的旁路进入燃煤热电联产系统提高其消纳可再生能源的能力。

3) 区域热电负荷中长期变更。郑明^[42]对飞轮蓄能与火电机组耦合系统进行变负荷控制, 结果发现对 1 000 MW 火电机组甩负荷回路模块优化可达到较理想的效果。为了实现燃煤机组负荷的灵活调节, 我们可以通过扩大热点比等, 抵消热电负荷的变更。

4) 初投资与回收期的经济性分析。通过经济型分析, 明确投资收益, 为落实项目安排有着一定的指导意义。张兴等^[13]对飞轮与 600 MW 燃煤机组耦合系统进行分析, 结果表明飞轮储能系统的超长寿命、快速功率响应能力和高精度功率控制能力, 可以增加火储联合调频收益 16 433 万元, 投入产出比达 4.56。

4 结语

在“碳达峰、碳中和”目标的引导下, 储能技术在电力系统的应用已形成广泛共识, 在满足“源-电”匹配性、提高原有燃煤热电联产机组灵活调节能力和电网系统灵活性上扮演着重要角色。本文就燃煤

热电联产系统灵活调节需求进行综述, 同时对储热、蓄电以及飞轮储能等具有应用潜力的储能技术进行分析, 提出了将燃煤热电联产系统与储能技术相耦合的发展方向。最后综合考虑燃煤热电联产机组耦合储能技术的应用特点, 对耦合储能技术的发展方向提出了需要关注的问题以及协同调控的相关建议, 期望为储能技术在热电联产机组的应用提供参考与借鉴。

参考文献:

- [1] 黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略 [J]. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6. DOI: 10.19666/j.rlfid.202101004.
HUANG C, ZHANG P, WANG W L, et al. Coal-fired power generation industry upgrade to support China's energy conservation and carbon neutral national strategy [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(4): 1-6. DOI: 10.19666/j.rlfid.202101004.
- [2] 方旭, 彭雪风, 张凯, 等. 燃煤热电联产系统冷端余热供热改造研究进展 [J]. 华电技术, 2021, 43(3): 48-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.008.
FANG X, PENG X F, ZHANG K, et al. Research progress of cold-end waste energy heating retrofit in coal-fired cogeneration systems [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(3): 48-56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.008.

- [3] 王金星, 卓建坤, 李菁, 等. 适应燃煤电厂灵活调峰的安全改造技术探讨 [C]. 北京能源与环境学会. 2018火电灵活性改造及深度调峰技术交流研讨会论文集. 北京能源与环境学会: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2018: 31-37.
- [4] 张翼, 魏书洲, 任学武, 等. 风电-抽凝机组耦合系统供暖方案研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(11): 54-60+67. DOI: [10.19666/j.rlfid.202106111](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202106111).
ZHANG Y, WEI S Z, REN X W, et al. Study on the heating scheme of wind power-extraction condensing unit coupled system [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(11): 54-60+67. DOI: [10.19666/j.rlfid.202106111](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202106111).
- [5] 王金星, 郝剑, 刘畅, 等. 抽凝机组热电联产系统中扩大热电负荷比的灵活性研究 [J]. *热力发电*, 2020, 49(12): 41-50. DOI: [10.19666/j.rlfid.202002095](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202002095).
WANG J X, HAO J, LIU C, et al. Study on the flexibility of expanding cogeneration load ratio in pumped condensing unit cogeneration system [J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(12): 41-50. DOI: [10.19666/j.rlfid.202002095](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202002095).
- [6] 天罡, 刘立华, 黄智, 等. 350 MW机组低压缸切除供热改造方案及调峰性能分析 [J]. *汽轮机技术*, 2019, 61(6): 457-460. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2019.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2019.06.014).
TIAN G, LIU L H, HUANG Z, et al. Reconstruction scheme of removing low pressure cylinder and heating for 350 MW unit analysis of peak regulation performance [J]. *Turbine Technology*, 2019, 61(6): 457-460. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2019.06.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2019.06.014).
- [7] 刘双白, 张晶, 吴昕, 等. 320 MW机组低压缸零出力性能分析及应用研究 [J]. *中国电力*, 2021, 54(5): 213-220. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202101053](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202101053).
LIU S B, ZHANG J, WU X, et al. Performance analysis and application study of zero output of low pressure cylinder in 320 MW unit [J]. *Electric Power*, 2021, 54(5): 213-220. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202101053](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202101053).
- [8] GE W C, LIU D B, DENG G N, et al. Optimal dispatching strategy in the domain with energy storage and heat storage taking into account deep regulation of thermal power plants [J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2021, 675(1): 012145. DOI: [10.1088/1755-1315/675/1/012145](https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012145).
- [9] TAN K M, BABU T S, RAMACHANDARAMURTHY V K, et al. Empowering smart grid: a comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102591. DOI: [10.1016/j.est.2021.102591](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102591).
- [10] 何林轩, 李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1679-1686. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283).
HE L X, LI W Y. Simulation analysis of primary frequency regulation process of flywheel energy storage assisted thermal power units [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1679-1686. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0283).
- [11] HAMIDPOUR H, AGHAEI J, PIROUZI S, et al. Flexible, reliable, and renewable power system resource expansion planning considering energy storage systems and demand response programs [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(11): 1862-1872. DOI: [10.1049/iet-rpg.2019.0020](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0020).
- [12] YUAN J H, NA C N, LEI Q, et al. Coal use for power generation in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 443-453. DOI: [10.1016/j.resconrec.2016.03.021](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.021).
- [13] 张兴, 阮鹏, 张柳丽, 等. 飞轮储能华中区域火电调频中的应用分析 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1694-1700. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0277](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0277).
ZHANG X, RUAN P, ZHANG L L, et al. Analysis of the application of flywheel energy storage in the frequency regulation of thermal power in central China [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1694-1700. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0277](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0277).
- [14] 陈银丽. 热电联产的供热运行调节方式及热电分产能源效率对比 [J]. *低碳世界*, 2020, 10(1): 54-55. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2066.2020.01.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2066.2020.01.033).
CHEN Y L. Heating operation regulation of cogeneration and comparison of energy efficiency of cogeneration [J]. *Low Carbon World*, 2020, 10(1): 54-55. DOI: [10.3969/j.issn.2095-2066.2020.01.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2066.2020.01.033).
- [15] 王金星. 大型燃煤热电联产系统研究现状和展望 [J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2019.06.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2019.06.12).
WANG J X. Research status and prospect for large coal-fired combined heat and power generation system [J]. *Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition)*, 2019, 46(6): 90-98. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2019.06.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2019.06.12).
- [16] 郭海涛, 刘力, 王静怡. 2020年中国能源政策回顾与2021年调整方向研判 [J]. *国际石油经济*, 2021, 29(2): 53-61. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007).
GUO H T, LIU L, WANG J Y. Review of China's energy policy in 2020 and study of adjustment direction in 2021 [J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(2): 53-61. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007).
- [17] 刘晓龙, 崔磊磊, 李彬, 等. 碳中和目标下中国能源高质量发展路径研究 [J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(3): 1-8. DOI: [10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7522](https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7522).
LIU X L, CUI L L, LI B, et al. Study on the path of China's energy quality development under the carbon neutrality target [J]. *Journal of Beijing University of Technology (Social Science Edition)*, 2021, 23(3): 1-8. DOI: [10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7522](https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.7522).
- [18] 高虎. “双碳”目标下中国能源转型路径思考 [J]. *国际石油经济*, 2021, 29(3): 1-6. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2021.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2021.03.001).

- GAO H. China's energy transformation under the targets of peaking carbon emissions and carbon neutral [J]. *International Petroleum Economics*, 2021, 29(3): 1-6. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2021.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2021.03.001).
- [19] 杨挺, 于亚利, 张亚健, 等. 计及热电耦合的太阳能联产系统功率协调控制 [J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3433-3440. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1391](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1391).
- YANG T, YU Y L, ZHANG Y J, et al. Coordination control for integrated solar combined cycle with thermoelectric coupling [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3433-3440. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1391](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1391).
- [20] NURDAN BURGU, Haluk GÖZDE, M Cengiz TAPLAMACIOĞLU. Efficiency optimization of combined heat and power system integrated with renewable energy for a hospital [J]. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2019, 3(1): 76-81.
- [21] KANG S S, LI H Q, LIU L F, et al. Exergy analysis of a novel CHP-GSHP coupling system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 308-314. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2015.09.039](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.039).
- [22] MCDANIEL B, KOSANOVIC D. Modeling of combined heat and power plant performance with seasonal thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2016, 7: 13-23. DOI: [10.1016/j.est.2016.04.006](https://doi.org/10.1016/j.est.2016.04.006).
- [23] 于波, 沈啸轩. 浅谈基于混合储能的光伏发电并网系统的能量管理及协调控制 [J]. *中国设备工程*, 2021(13): 194-195. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2021.13.118](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2021.13.118).
- YU B, SHEN X X. Introduction to energy management and coordinated control of grid-connected PV power generation system based on hybrid energy storage [J]. *China Plant Engineering*, 2021(13): 194-195. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0711.2021.13.118](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2021.13.118).
- [24] 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势 [J]. *科学通报*, 2017, 62(15): 1602-1610. DOI: [10.1360/N972016-00663](https://doi.org/10.1360/N972016-00663).
- WANG X, CHEN H S, XU Y J. Research progress and trends in thermal storage technology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(15): 1602-1610. DOI: [10.1360/N972016-00663](https://doi.org/10.1360/N972016-00663).
- [25] 李廷贤, 李卉, 闫霆, 等. 大容量热化学吸附储热原理及性能分析 [J]. *储能科学与技术*, 2014, 3(3): 236-243. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.008).
- LI T X, LI H, YAN T, et al. Principle and performance analysis of large capacity thermochemical adsorption thermal storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2014, 3(3): 236-243. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.008).
- [26] 李磊. 熔盐储热技术在光热电站中的应用 [J]. *能源与环境*, 2018(5): 26-28. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9064.2018.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9064.2018.05.012).
- LI L. Application of molten salt thermal storage technology in solar thermal power plants [J]. *Energy and Environment*, 2018(5): 26-28. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9064.2018.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9064.2018.05.012).
- [27] 周宇涵. 熔盐蓄热供热技术研究及示范项目 [J]. *区域供热*, 2021(3): 129-133. DOI: [10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.03.023](https://doi.org/10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.03.023).
- ZHOU Y H. Research and demonstration project of molten salt heat storage heating technology [J]. *District Heating*, 2021(3): 129-133. DOI: [10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.03.023](https://doi.org/10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2021.03.023).
- [28] 徐治国, 赵长颖, 纪育楠, 等. 中低温相变蓄热的研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2014, 3(3): 179-190. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.02](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.02).
- XU Z G, ZHAO C Y, JI Y N, et al. Research progress of medium and low temperature phase change thermal storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2014, 3(3): 179-190. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.02](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2014.03.02).
- [29] 张永锋, 俞越, 张宾, 等. 铅酸电池现状及发展 [J]. *蓄电池*, 2021, 58(1): 27-31. DOI: [10.16679/j.cnki.21-1121.2021.01.007](https://doi.org/10.16679/j.cnki.21-1121.2021.01.007).
- ZHANG Y F, YU Y, ZHANG B, et al. Current status and development of lead-acid batteries [J]. *Chinese LABAT Man*, 2021, 58(1): 27-31. DOI: [10.16679/j.cnki.21-1121.2021.01.007](https://doi.org/10.16679/j.cnki.21-1121.2021.01.007).
- [30] POONAM, SHARMA K, ARORA A, et al. Review of supercapacitors: materials and devices [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 21: 801-825. DOI: [10.1016/j.est.2019.01.010](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010).
- [31] RAZA W, ALI F, RAZA N, et al. Recent advancements in supercapacitor technology [J]. *Nano Energy*, 2018, 52: 441-473. DOI: [10.1016/j.nanoen.2018.08.013](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.013).
- [32] 张明勋, 丛鹏, 刘光辉. 电池储能技术在电力系统中的应用 [J]. *通信电源技术*, 2020, 37(11): 121-123. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9772.2018.05.185](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9772.2018.05.185).
- ZHANG M X, CONG P, LIU G H. Application of battery energy storage technology in power systems [J]. *Telecom Power Technology*, 2020, 37(11): 121-123. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9772.2018.05.185](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9772.2018.05.185).
- [33] 鞠立华. 飞轮储能系统机电耦合非线性动力学研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005. DOI: [10.7666/d.y943415](https://doi.org/10.7666/d.y943415).
- JU L H. Study of electromechanical coupling nonlinear dynamics of flywheel energy storage system [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. DOI: [10.7666/d.y943415](https://doi.org/10.7666/d.y943415).
- [34] 戴兴建, 卫海岗, 沈祖培. 储能飞轮支承系统进动模态阻尼研究 [J]. *振动工程学报*, 2002(1): 102-105. DOI: [10.3969/j.issn.1004-4523.2002.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4523.2002.01.020).
- DAI X J, WEI H G, SHEN Z P. Study on the damping of energy storage flywheel support system into the dynamic mode [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2002(1): 102-105. DOI: [10.3969/j.issn.1004-4523.2002.01.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4523.2002.01.020).
- [35] 刘付成, 李结冻, 李延宝, 等. 磁悬浮储能飞轮技术研究及应用示范 [J]. *上海节能*, 2017(2): 80-84. DOI: [10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2017.02.005](https://doi.org/10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2017.02.005).
- LIU F C, LI J D, LI Y B, et al. Research and application demonstration of magnetic levitation energy storage flywheel technology [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2017(2): 80-84. DOI: [10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2017.02.005](https://doi.org/10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2017.02.005).
- [36] 詹三一, 唐跃进, 李敬东, 等. 超导磁悬浮飞轮储能的基本原理

- 和发展现状 [J]. *电力系统自动化*, 2001(16): 67-72. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2001.16.017.
- ZHAN S Y, TANG Y J, LI J D. The basic principle and development status of superconducting magnetic levitation flywheel energy storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001(16): 67-72. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2001.16.017.
- [37] 王睿佳. 飞轮储能在电力系统的应用和发展前景 [J]. *中国电业*, 2021(5): 21-23.
- WANG R J. Application and development prospect of flywheel energy storage in power system [J]. *China Electric Power*, 2021(5): 21-23.
- [38] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用 [J]. *热力发电*, 2018, 47(5): 29-34. DOI: 10.19666/j.rlfid.201803053.
- MOU C H, WU P Y, SUN G H, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(5): 29-34. DOI: 10.19666/j.rlfid.201803053.
- [39] 隋云任, 梁双印, 黄登超, 等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2597-2606. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921.
- SUI Y R, LIANG S Y, HUANG D C, et al. Simulation study on the dynamic process of frequency regulation of flywheel energy storage assisted coal-fired units [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2597-2606. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190921.
- [40] 马成龙, 隋云任. 飞轮储能系统辅助调频的参数配置和经济性分析 [J]. *节能*, 2020, 39(10): 25-29. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2020.10.009.
- MA C L, SUI Y R. Parameter configuration and economic analysis of auxiliary frequency regulation of flywheel energy storage system [J]. *Energy Conservation*, 2020, 39(10): 25-29. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2020.10.009.
- [41] 崔杨, 杨志文, 仲悟之, 等. 基于成本最优的含储热光热电站与火电机组联合出力日前调度 [J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(2): 71-77. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.011.
- CUI Y, YANG Z W, ZHONG W Z, et al. Day-ahead dispatch for output of combined CSP with thermal storage system and thermal power units based on minimized operation cost [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(2): 71-77. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.011.
- [42] 郑明. 1 000 MW火电机组汽轮机控制系统分析与设计 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3262993.
- ZHENG M. Analysis and design of 1 000 MW coal fired steam turbine control system [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3262993.

作者简介:



邵建林

邵建林 (第一作者)

1974-, 男, 河北廊坊人, 硕士, 工程师, 主要从事火电厂节能环保及灵活性技术研究工作(email)dq1shao@126.com。



魏书洲

魏书洲 (通信作者)

1981-, 男, 湖北十堰人, 硕士, 高级工程师, 主要从事火电厂生产技术管理工作(email)shuzhou.wei@ceic.com。

(编辑 叶筠英)