

引用格式: 许婷, 侯景峥, 祝玉章, 等. 燃煤机组耦合非补燃式压缩空气储能技术的深度调峰系统应用与经济性研究 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 17-23. XU Ting, HOU Jingzheng, ZHU Yuzhang, et al. Application and economic study on deep peak shaving system for coal-fired units coupled with non-supplementary compressed air energy storage technology [J]. Southern energy construction, 2025, 12(6): 17-23. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-364.

燃煤机组耦合非补燃式压缩空气储能技术的深度调峰系统应用与经济性研究

许婷^{1,✉}, 侯景峥², 祝玉章¹, 刘成伟¹, 朱治德², 刘禹初¹

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100022)

摘要: [目的]为提高燃煤机组深度调峰能力, 文章提出一种燃煤机组耦合非补燃型压缩空气储能的深度调峰系统。[方法]该系统在电网负荷低谷期, 通过压缩空气储存电能以降低对外供电量; 电网负荷高峰期, 通过释放压缩空气储能的电能从而增加对外供电量。[结果]以某2×350 MW超临界一次中间再热燃煤机组为例, 测算出项目资本金内部收益率为7.45%, 具有一定的经济性。[结论]现阶段燃煤机组耦合非补燃型压缩空气储能虽然在初投资上略显劣势, 但是该方案可显著提升燃煤机组的双向调峰能力, 且不需要改造机组的原有设备, 不会给机组的运行造成不利影响, 在煤电机组深度调峰领域具有一定的应用前景。

关键词: 深度调峰; 燃煤机组; 非补燃式压缩空气储能; 经济性

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-364

文章编号: 2095-8676(2025)06-0017-07

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-364

中图分类号: TM621; TK02



论文二维码

Application and Economic Study on Deep Peak Shaving System for Coal-Fired Units Coupled with Non-Supplementary Compressed Air Energy Storage Technology

XU Ting^{1,✉}, HOU Jingzheng², ZHU Yuzhang¹, LIU Chengwei¹, ZHU Zhide², LIU Yuchu¹

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Objective] To enhance the deep peak shaving capacity of coal-fired units, this paper proposes a deep peak shaving system for coal-fired units coupled with non-supplementary compressed air energy storage. [Method] During periods of low grid load, the system stores electrical energy via air compression to reduce external power supply; during peak grid load periods, it releases the energy stored in compressed air to increase external power supply. [Result] Taking a 2×350 MW supercritical coal-fired unit with primary intermediate reheat as an example, the calculated internal rate of return (IRR) on project capital is 7.45%, demonstrating that the system has a certain degree of economic viability. [Conclusion] At present, while coal-fired units coupled with non-supplementary compressed air energy storage may have some disadvantages in initial investment, this scheme can significantly enhance the bidirectional peak shaving capacity of coal-fired units. Furthermore, it requires no modification to the units' existing equipment, thus preventing adverse impacts on their operation and offering certain application prospects in the field of deep peak shaving for coal-fired units.

Key words: deep peak shaving; coal-fired units; non-supplementary compressed air energy storage; economic viability

收稿日期: 2024-10-25 修回日期: 2024-10-30 网络首发日期: 2025-03-31

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技专项“300 MW级压缩空气储能电站关键技术和装备研究”(CEEC-KJZX-04)

2095-8676 © 2025 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/>).

0 引言

随着能源结构优化转型的需求日益迫切, 世界多国都在积极发展压缩空气储能技术, 我国一直重视压缩空气储能技术的发展, 2022 年国家能源局印发《“十四五”新型储能发展实施方案》明确提出将百兆瓦级压缩空气储能技术作为新型储能核心技术装备攻关的重点方向之一, 这表明压缩空气储能技术在国家层面上被赋予了重要的发展地位。2024 年国务院颁布《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027 年)》提出探索应用一系列新型储能技术, 包括液流电池、飞轮、压缩空气储能等。随着中国能源结构的调整和新能源的快速发展, 对储能的需求日益增长, 同时, 提升传统燃煤机组深度调峰能力也势在必行^[1-2]。

压缩空气储能可实现电力系统调峰、调频、无功调节、旋转备用、黑启动等多个功能, 非常适合作为电网的长期储能设施以提高系统的灵活性和响应速度。与抽水蓄能电站需要特定的地形条件不同, 压缩空气储能系统可以在多种地理环境中实施, 不受特定地形限制, 且建设周期短; 与其他新型储能技术相比, 具有长时间存储能量、使用寿命长、运行安全性高、维护成本相对较低等优势。非补燃式压缩空气储能技术, 在传统压缩空气储能的基础上引入热能存储技术取代助燃燃料, 实现全过程无燃烧、无排放、对环境更友好, 是目前国内压缩空气储能的主要发展方向。随着技术的不断发展和优化, 非补燃式压缩空气储能有望在未来的能源体系中发挥更加关键的作用^[3-4]。

国际先进水平燃煤机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力能达到 20%, 而我国大部分燃煤机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力仅达到 50%, 与国际先进水平相比, 我国燃煤机组调峰能力改造具有较大潜力^[5]。燃煤机组的常规调峰手段在安全性、经济性和调节性能方面存在一些问题, 比如机组运行会出现工况大幅度变化, 热应力使设备产生疲劳损失, 机组使用寿命缩短^[6]; 机组若在偏离额定运行工况的低负荷运行将导致机组能耗大幅增加;

机组调节负荷范围通常不足 50%, 此外还会面临低负荷运行风险、磨损寿命损失、附加污染物排放等隐性成本增加的问题^[7-8]。近年来大量研究提出了新型调峰手段, 如燃煤机组耦合多形态储能、耦合 CCUS、多能互补调节等^[9]。燃煤机组耦合储能技术的应用中, 以熔盐储热居多, 压缩空气储能、压缩二氧化碳储能、太阳能蓄热、抽水蓄能等储能系统也是研究焦点。其中, 熔盐储热由于热导率低、比热容低、存在腐蚀性、相变过程中有液体泄漏的危险等因素制约, 推广和发展受限。压缩空气储能运行特性、装机容量、响应速度、储能时长上与熔盐储热相当, 但在转换效率、寿命、安全性上更具优势。

当前燃煤机组耦合压缩空气储能的研究重点集中在热力学指标上, 主要区别在于耦合方式的不同。路雪琴提出了火电耦合汽驱压缩空气储能系统^[10]; 李斌等提出了一种储能阶段用压缩空气的热量加热燃煤机组的凝结水, 释能阶段抽取抽汽加热压缩空气的压缩空气储能系统与火电机组耦合方案^[11]; 李佳佳等提出一种热电联产机组与先进压缩空气系统和热网耦合, 利用压缩空气热联合供热缓解供热机组的热电耦合约束^[12]。为充分利用余热, 本论文提出了一种储能阶段利用压缩空气热量加热燃煤机组凝结水泵出口凝结水, 释能阶段利用烟气余热加热压缩空气的方案, 并对其系统方案、主要工艺参数以及技术经济指标进行研究, 以促进非补燃式压缩空气储能技术在燃煤机组深度调峰中的应用推广。

1 系统概况

1.1 系统构成

非补燃式压缩空气储能技术的燃煤机组深度调峰技术方案由压缩空气储能系统、燃煤机组给水回热系统和燃煤机组烟气余热利用系统 3 个模块组成。其中, 压缩空气储能系统含电动机、空气压缩机、气水换热器、空气冷却器、储气库、空气加热器、空气透平和压缩空气储能系统发电机等设备及相关连接管道、阀门; 燃煤机组给水回热系统含凝结水泵、低压加热器组、除氧器、给水泵、高压加热器

组、锅炉和凝汽器热井等设备及相关连接管道、阀门; 燃煤机组烟气余热利用系统含脱硝装置、空气预热器和除尘器等设备及相关连接管道、烟道、阀门^[13]。

1.2 系统基本原理

当电网负荷低谷期时, 电动机用电来源于燃煤机组厂用电, 电动机带动空气压缩机对空气进行压缩, 并将压缩后的空气储存在储气库。空气压缩机压缩空气产生的热能通过气水换热器加热燃煤机组给水回热系统中的部分给水; 电网负荷高峰期时利用燃煤机组烟气余热通过空气加热器加热储气库释放的压缩空气以提高空气透平入口压缩空气温度, 从而提升压缩空气的做功能力, 带动压缩空气储能系统发电机发出电能输送至电网, 详见图 1^[13]。

1.3 系统特性

1.3.1 充分利用余热以提高系统热效率

压缩空气储能系统模块取消了常规独立储能电站的冷热水储罐, 而是在压缩空气储能系统储能阶段, 直接利用空气压缩机压缩空气产生的热量加热燃煤机组给水回热系统凝结水泵出口凝结水, 另一方面, 在压缩空气储能系统释能阶段, 从燃煤机组脱硝装置出口接一路烟气加热储气库释放的压缩空气, 以提高空气透平入口压缩空气温度从而提高压缩空气的做功能力。系统充分利用压缩空气和燃煤机组烟气余热, 既节省了冷热水储罐的投资费用,

又减少了燃煤机组的煤耗^[13]。

1.3.2 提高深度调峰调节范围, 提升爬坡速度

燃煤机组耦合非补燃式压缩空气储能后, 机组负荷调节范围扩大。

设定燃煤机组额定负荷为 P_n , 最低稳燃负荷为额定负荷的 $x\%$, 非补燃式压缩空气储能容量为 P_{sn} 。

该系统最低负荷可表示为:

$$P_{n,\min} = x\%P_n - P_{sn} \quad (1)$$

该系统最高负荷可表示为:

$$P_{n,\max} = P_n + P_{sn} \quad (2)$$

即通过耦合压缩空气储能系统, 燃煤机组负荷调节范围由 $x\%P_n \sim P_n$ 扩大为 $(x\%P_n - P_{sn}) \sim (P_n + P_{sn})$ 。

未经灵活性改造的燃煤机组爬坡速率一般为额定容量的 $1\%/min \sim 2\%/min$, 改造后的机组爬坡速率一般为额定容量的 $3\%/min \sim 6\%/min$ ^[14], 而非补燃式压缩空气储能启停时间为 $6 \sim 8 \text{ min}$ ^[15], 因此, 燃煤机组耦合非补燃式压缩空气储能后, 爬坡速度也得到了提升。

1.3.3 提高燃煤机组运行安全性

深度调峰期间, 燃煤发电机组锅炉仍能保证在最低稳燃负荷的工况下正常运转, 汽轮机低压缸末级叶片运转工况也得以改善, 提高了燃煤机组的运行安全性^[16]。

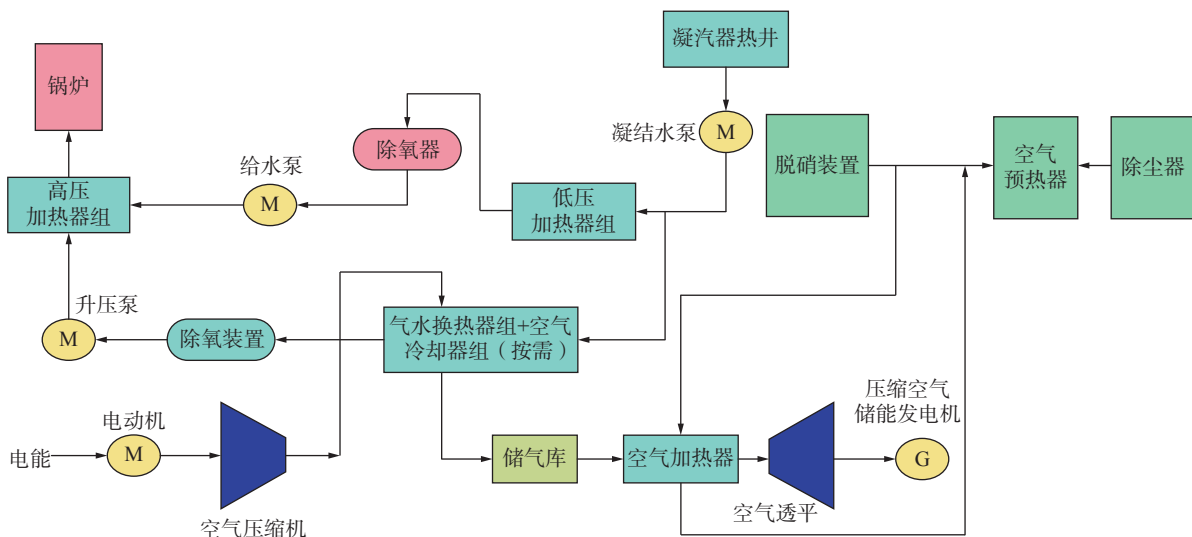


图 1 非补燃型压缩空气储能系统与燃煤机组耦合深度调峰技术基本原理

Fig. 1 Basic principle of deep peak shaving technology for coal-fired units coupling non-supplementary compressed air energy storage system

2 工程案例

2.1 深度调峰案例

近年来,我国已有煤电机组正在开展基于储能技术的燃煤机组深度调峰改造工作,但仅有少量熔盐储热投运案例,其他大多在前期研究阶段。以某2×350 MW超临界一次中间再热燃煤机组为例,拟对该燃煤机组耦合非补燃型压缩空气储能技术的深度调峰系统进行分析,机组有关热力参数见表1。

根据现有燃煤机组条件,经综合比选,拟配置60 MW等级压缩空气储能,采用中温170℃绝热压缩方案,储气库采用人工硐室。根据当地“十四五”规划电力电量平衡分析测算及近几年同类电厂运行情况,储能电站按储电时长6 h,发电时长4 h考虑。机组耦合60 MW等级压缩空气储能后,参与电网调峰能力为45~760 MW,单台机运行时,机组深度调峰负荷率最低为13%,最高可达117%。

当电网负荷低谷期时,燃煤机组向压缩空气储能系统模块充电,环境大气经过滤器、消音器后进入每段压缩机做功后升压、升温至185℃,压缩机排气依次经气水换热器和空气冷却器降温至40℃后送入下一级压缩机重复上述的储热过程,最末一级压缩机出口空气降温后送入储气库储存。各段压缩机排气在换热器中与燃煤机组给水回热系统凝结水泵出口的凝结水进行热量交换,凝结水吸热升温

至165℃,经除氧升压后接入2号高压加热器进口给水系统,完成热量的储存过程。

当电网负荷高峰期时,从脱硝装置出口烟道接一路烟气通过空气加热器加热储气库释放的压缩空气,压缩空气温度从40℃升高到170℃,升温后的压缩空气进入空气透平,带动压缩空气储能系统发电机发出电能输送至电网。烟气温度从360℃左右降低至230℃,降低温度后的烟气再接回至空预器进口前烟道。燃煤机组单机容量350 MW耦合60 MW左右的压缩空气储能系统,加热压缩空气后烟气回到空预器前烟道进口与高温烟气混合,对空预器进口烟温影响很小,基本可以忽略不计。

2.2 案例的技术经济分析

2.2.1 项目初投资及运行成本

由于不同储气库形式投资差异较大,与燃煤机组耦合的非补燃式压缩空气储能系统初设单位投资为4000~7000元/kW,储能系统年修理费率约1.5%,材料费约6元/MWh。该项目静态投资约3.12亿元,其中设备购置费占比约31%,储气库费用占比约24%,年运行成本约720万元。

2.2.2 项目盈利模式分析

机组锅炉在燃用设计煤种时不投油及等离子体的最低稳燃负荷不大于锅炉的30%BMCR。根据当地电力调峰辅助服务市场运营规则,负荷降至50%以下即可获得深度调峰补偿,相关补偿规则见表2。

表1 某2×350 MW超临界一次中间再热燃煤机组热力参数

Tab. 1 Thermal parameters of a 2×350 MW supercritical primary reheat coal-fired unit

℃

名称	锅炉最大连续蒸发量工况 (BMCR)	50%汽轮机热耗率验收工况 (50%THA)	最低稳燃负荷工况
空预器入口风温 (一次风/二次风)	35/25	47/37	50/40
空预器出口风温 (一次风/二次风)	332/339	301/303	286/286
空预器进口烟温	367	324	303
空预器出口烟温	121	105	102
8号低压加热器进口水温	37.9	38.2	38.6
7号低压加热器进口水温	58.9	44.8	38.6
6号低压加热器进口水温	80	64.8	54.6
5号低压加热器进口水温	104.3	84.6	72.7
除氧器进口水温	151.6	125.9	110.6
3号高压加热器进口水温	200.1	168.3	150
2号高压加热器进口水温	220.6	185.2	165.4
1号高压加热器进口水温	258.2	216.7	194.1

表2 某省燃煤机组深度调峰报价表

Tab. 2 Quotation for deep peak shaving for coal-fired units in a certain province

报价档位	燃煤机组负荷率	申报价格上限 M [元·(MWh) ⁻¹]
第一档	[40%, 50%)	$M_1=200$
第二档	[30%, 40%)	$M_2=300$
第三档	30%以下	$M_3=400$

系统收入主要包括:参与深度调峰收入和利用峰谷电价差政策带来的收入。

根据历史调度数据,每年参与30%以下深度调峰辅助服务约210次,每次1h,则新增参与30%以下深度调峰辅助服务约12.6GWh,年收入504万元。

每天尖峰、高峰时段发电量分别增加120MWh,每年按330d考虑,每年尖峰、高峰时段发电量分别增加39.6GWh,考虑储能系统转换效率(在规定的条件下,以额定功率进行一次充放电循环,储能电站在并网点处放电能量与充电能量的比值^[17])65%,则低谷时期充电量约121.85GWh。根据当地分时电价政策:

低谷电价=基础电价×48%+政府性基金及附加+系统运行费

尖峰电价=基础电价×180%+政府性基金及附加+系统运行费

高峰电价=基础电价×149%+政府性基金及附加+系统运行费

由上面政策可以测算出,尖峰、高峰时段加权平均上网电价约为低谷电价的3.42倍。利用峰谷电价差政策带来的收入约2987万元。

2.2.3 经济效益计算模型

投资项目的经济评价是投资管理的重要一环,是项目投资决策的重要依据,是充分发挥市场经济优势,促进资源合理配置,提高投资效益的重要手段^[18],通常用财务内部收益率(FIRR)和投资回收期等指标来分析项目的盈利能力。

1) 财务内部收益率

财务内部收益率是项目在计算期内各年净现金流量累计为零时的折现率^[19],其数学表达式为:

$$\sum_{t=1}^n (CI - CO)_t (1 + FIRR)^{-t} = 0 \quad (3)$$

式中:

CI —— 现金流入量;

CO —— 现金流出量;

t —— 第 t 年;

n —— 计算期。

2) 投资回收期

投资回收期是以项目的净收益回收项目投资所需要的时间,是评价投资回收能力的重要静态评价指标,投资回收期越短,表示项目的风险承受能力越强^[20]。其数学表达式为:

$$P_t = T - 1 + \frac{\left| \sum_{i=1}^{T-1} (CI - CO)_i \right|}{(CI - CO)_T} \quad (4)$$

式中:

T —— 各年累计净现金流量首次为正值或零的年数。

按项目静态投资3.12亿,项目资本金占动态投资30%,年贷款利率3.95%,还款期15a,运营期25a,年运行成本720万元,深度调峰辅助服务年收入504万元,峰谷电价差政策增加收入2987万元对项目经济指标进行测算,结果见表3。

表3 主要财务评价指标

Tab. 3 Main financial evaluation indexes

项目	内容	参数
融资前 (项目投资)	内部收益率(税前)/%	6.61
	投资回收期(税前)/a	12.82
	内部收益率(税后)/%	5.34
	投资回收期(税后)/a	14.19
融资后 (项目资本金)	内部收益率(税后)/%	7.45
	投资回收期(税后)/a	17.08

本项目的项目资本金内部收益率为7.45%,项目回收期17.08a,表明项目具有一定的经济性。同时,由于深度调峰补偿标准、调度时长、峰谷电价差均会直接影响项目收益,以项目资本金内部收益率6.5%(压缩空气储能行业基准收益率)作为目标值,测算得出深度调峰补偿标准的临界值为280元/MWh,调峰年小时数临界值为148h,峰谷电价差临界值为0.467元/kWh。

2.2.4 小结

与其他深度调峰方案相比,本系统的初始投资偏高,主要原因在于:

1) 设备费占整个系统投资的大部分,但未来

伴随着压缩空气储能建设的推进,产业链内各环节均会有不小的降价空间,存在着快速降本的可能^[21]。

2) 储气库费用高。储气库的主要形式有地下盐穴、人工硐室、管线钢等,其中地下盐穴投资最低,但需依赖盐岩资源;人工硐室投资次之,其优势在于无特殊地质构造要求,可根据建设需求灵活布置,为有地下储气库建设需求却没有合适地质条件的地区提供了可能,其缺点在于深部硬岩岩层工程地质环境复杂,硐室开挖难度大,施工风险高,且易产生大量废石;管线钢储气库人为可控化程度高,储库的规模、结构、储气承压能力等均可根据实际需求灵活布置,施工难度小、风险低,且后期运维成本较低,但造价高昂。目前实施的压缩空气储能项目主要以地下盐穴,人工硐室为主^[22-23]。本论文案例选用的人工硐室储气库,如燃煤机组在有盐穴资源的地区,可采用地下盐穴储气库,投资可降低 4% 左右,项目资本内部收益率可达到 8.41%,比人工硐室方案提高 12.89%。

3 结论

燃煤机组耦合非补燃型压缩空气储能技术的深度调峰系统具有调节范围大、响应速度快、运行安全等优势,在煤电机组深度调峰领域具有一定的应用前景,但现阶段初投资偏高。

随着压缩空气储能行业的快速发展,压缩空气储能产业链内各环节均会有不小的降价空间,存在着快速降本的可能;未来更多压缩空气储能项目正式投入商业运营,储能技术日趋成熟,可通过计算机仿真模拟、性能调试等途径使各设备处于最佳匹配状态,以提高系统运行效率。此外,燃煤机组还可以考虑采取租赁模式与附近独立压缩空气储能电站进行合作,以降低初投资。

参考文献:

- [1] 宋民航, 杨宏燕. 基于智能控制的燃煤锅炉灵活调峰技术 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 1-17. DOI: 10.16516/j.cec.2024.6.01.
- [2] SONG M H, YANG H Y. Flexible peak shaving technology for coal-fired boilers based on intelligent control [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(6): 1-17. DOI: 10.16516/j.cec.2024.6.01.
- [3] 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.14.
- [4] YUAN Z W, YANG Y F. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 146-153. DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.14.
- [5] 姬海民, 薛磊, 周方盛, 等. 非补燃液态压缩空气储能系统性能模拟研究 [J]. *发电技术*, 2024, 45(5): 910-918. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24030.
- [6] JI H M, XUE L, ZHOU F S, et al. System simulation study on performance of non-supplementary combustion liquid compressed air energy storage system [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(5): 910-918. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24030.
- [7] 冀帅宇, 段立强, 王远慧, 等. 典型燃煤机组灵活调峰策略及性能研究 [J]. *热力发电*, 2023, 52(9): 94-103. DOI: 10.19666/j.rlf.202305092.
- [8] JI S Y, DUAN L Q, WANG Y H, et al. Research on flexible peak load regulation strategy and performance of typical coal-fired units [J]. *Thermal power generation*, 2023, 52(9): 94-103. DOI: 10.19666/j.rlf.202305092.
- [9] 黎永华. 结合储能的并网光伏发电对电网的调峰作用分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012. DOI: 10.7666/d.y2140252.
- [10] LI Y H. Analysis on peak regulating of the grid-connected photovoltaic power generation with energy storage [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. DOI: 10.7666/d.y2140252.
- [11] 贾志军, 范伟, 任少君, 等. 600 MW 亚临界机组长时间深度调峰燃烧稳定性研究 [J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 216-225. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23016.
- [12] JIA Z J, FAN W, REN S J, et al. Research on combustion stability of a 600 MW subcritical power unit under long-term deep peak shaving [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(2): 216-225. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23016.
- [13] 张磊. 燃煤机组深度调峰问题研究 [J]. *湖南文理学院学报 (自然科学版)*, 2024, 36(3): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6146.2024.03.013.
- [14] ZHANG L. Research on deep peak shaving of coal-fired units [J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science (science and technology)*, 2024, 36(3): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6146.2024.03.013.
- [15] 袁鑫, 刘骏, 陈衡, 等. 碳捕集技术应用对燃煤机组调峰能力的影响 [J]. *发电技术*, 2024, 45(3): 373-381. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22127.
- [16] YUAN X, LIU J, CHEN H, et al. Effect of carbon capture technology application on peak shaving capacity of coal-fired units [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(3): 373-381. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22127.
- [17] 路雪晴. 火电耦合汽驱压缩空气储能系统优化研究与调峰性能分析 [D]. 济南: 山东大学, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.

- 2023.002268.
- LU X Q. Optimization research and peak shaving performance analysis of coal power coupling steam-driven compressed air energy storage system [D]. Jinan: Shandong University, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.002268.
- [11] 李斌, 陈吉玲, 李晨昕, 等. 压缩空气储能系统与火电机组的耦合方案研究 [J]. *动力工程学报*, 2021, 41(3): 244-250. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2021.03.011.
- LI B, CHEN J L, LI C X, et al. Research on coupling schemes of a compressed air energy storage system and thermal power unit [J]. *Journal of Chinese society of power engineering*, 2021, 41(3): 244-250. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2021.03.011.
- [12] 李佳佳, 李兴朔, 周国文, 等. 先进储能型燃煤热电联产系统热力特性及灵活性分析 [J]. *动力工程学报*, 2023, 43(2): 205-213. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.02.011.
- LI J J, LI X S, ZHOU G W, et al. Thermodynamics and flexibility analysis of a novel coal-fired CHP-CAES system [J]. *Journal of Chinese society of power engineering*, 2023, 43(2): 205-213. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.02.011.
- [13] 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 中能建数字科技集团有限公司, 湖北楚韵储能科技有限责任公司. 一种基于先进压缩空气储能的燃煤机组深度调峰系统: CN221169682U [P]. 2024-06-18.
- Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Group, China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Hubei Chuyun Energy Storage Technology Co., Ltd. Coal-fired unit deep peak regulation system based on advanced compressed air energy storage: CN221169682U [P]. 2024-06-18.
- [14] 孟之绪. 考虑系统灵活性的综合资源战略规划模型及应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.gbbu.2022.001249.
- MENG Z X. Integrated resource strategic planning model considering system flexibility and application research [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. DOI: 10.27140/d.cnki.gbbu.2022.001249.
- [15] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645.
- ZHANG W L, GU H, ZHANG C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645.
- [16] 周信华, 郑祯晨, 胡远庆. 抽汽熔盐蓄热技术在煤电灵活性改造中的应用研究 [J]. *科学技术创新*, 2023(22): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2023.22.014.
- ZHOU X H, ZHENG Z C, HU Y Q. Application research of steam extraction molten salt heat storage technology in coal-fired power generation flexibility transformation [J]. *Scientific and technological innovation*, 2023(22): 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2023.22.014.
- [17] 中国电力企业联合会. 电力储能基本术语: DL/T 2528—2022 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- China Electricity Council. Basic terminology of electrical energy storage: DL/T 2528—2022 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2022.
- [18] 王秋彬. 基于多因素非线性敏感分析的工业项目评估模型 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. DOI: 10.7666/d.d009486.
- WANG Q B. Hereby it establishes a model for analyzing sensitive of nonlinear and multifactor of investment project [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. DOI: 10.7666/d.d009486.
- [19] 秦帆, 刘聪. 储能系统商业模式及峰谷差运行工况的经济性评价研究 [J]. *电气技术与经济*, 2023(10): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2023.10.020.
- QIN F, LIU C. Research on the economic evaluation of business models and peak valley operating conditions of energy storage systems [J]. *Electrical equipment and economy*, 2023(10): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8845.2023.10.020.
- [20] 电力规划设计总院. 火力发电工程经济评价导则: DL/T 5435—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- China Electric Power Planning & Engineering Institute. Guidelines for economic evaluation of fossil-fired power plant: DL/T 5435—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [21] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望 [J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI: 10.16081/j.epae.202309005.
- LIU X C, MEI S W, DING R C, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects [J]. *Electric power automation equipment*, 2023, 43(10): 38-47, 102. DOI: 10.16081/j.epae.202309005.
- [22] 杨雪雯, 任灏, 廖泽球, 等. 压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(4): 54-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06.
- YANG X W, REN H, LIAO Z Q, et al. Research status and prospect of underground artificial rock caverns for compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(4): 54-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06.
- [23] 彭威, 利奕年, 商浩亮, 等. 压缩空气储能电站中的老井锻铣封堵技术研究和应用 [J]. *电力勘测设计*, 2024(6): 61-65. DOI: 10.13500/j.dlksj.issn1671-9913.2024.06.013.
- PENG W, LI Y N, SHANG H L, et al. Research and application of old well sealing technology in compressed air energy storage power station [J]. *Electric power survey & design*, 2024(6): 61-65. DOI: 10.13500/j.dlksj.issn1671-9913.2024.06.013.

作者简介:



许婷

许婷 (第一作者, 通信作者)

1984-, 女, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事火电、新型储能经济性研究工作 (e-mail) xuting@csepedi.com。

(编辑 徐嘉铨)