

## “燃煤机组灵活性技术”专题

## 燃煤发电灵活性标准体系建设

韩亨达,龙妍,徐俊,许凯,江龙,汪一,苏胜,胡松,向军

(华中科技大学 能源与动力工程学院 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

**摘要:**提升燃煤火力发电灵活性是促进新能源消纳,实现能源绿色低碳转型和安全保障的重要抓手,构建完善的燃煤发电灵活性标准体系是推动燃煤火力发电灵活性发展的关键环节。围绕燃煤火力发电内涵,分析了当下火力燃煤发电灵活性改造建设面临的4个主要挑战:灵活性指标难突破、灵活性下安全问题突出、灵活性下经济性指标大幅下降、灵活性下清洁性难保障。应对4个挑战,初步构建了综合考虑目标、专业门类和功能序列的燃煤发电灵活性标准体系框架,覆盖通用、设计、制造、安装、试验、计量、运行、评价等流程。结合燃煤发电灵活性发展现状以及相关标准情况,提出将灵活性标准术语及评价、机组灵活性安全运行和寿命评价、燃煤机组灵活性运行下效率评价、二氧化碳检测及污染物排放控制、燃煤火力发电机组在线监控等作为重点标准建设领域,其中效率评价方法重点考虑非稳态及深度调峰非常态工况,特别重视煤质、煤流等燃料侧在线监测技术及耦合燃料-燃烧-工质流动等灵活控制标准的建立。标准体系框架的构建及相关建议的提出,为我国燃煤火力发电灵活性标准修订提供参考。

**关键词:**燃煤发电;灵活性;标准体系;重点领域

中图分类号:TK01;TK-9 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2024)09-0026-07

## Standard system construction for flexible coal-fired power generation

HAN Hengda, LONG Yan, XU Jun, XU Kai, JIANG Long, WANG Yi, SU Sheng, HU Song, XIANG Jun

(State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Engineering Power,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Enhancing the flexibility of coal-fired power generation is a crucial for promoting clean energy consumption, green-oriented transition of energy and energy security guarantee. The construction of a comprehensive standard system for the flexible coal-fired power generation is a key step for promoting flexible coal-fired power generation development. Based on the essence of flexible coal-fired power generation, the current reconstruction and construction of flexible coal-fired power generation face four main challenges were proposed, such as difficulties in breaking through on flexibility indicators, prominent safety issues under flexibility, a significant decline in economic indicators under flexibility, and difficulties in ensuring cleanliness under flexibility. In response to four key challenges, a preliminary framework for a comprehensive coal-fired power plant flexibility standard system has been established, taking into account goals, specialized categories, and functional sequences. This framework covers processes including general use, design, manufacturing, installation, testing, measurement, operation, and evaluation. Based on the current state of flexibility development in coal-fired power generation and related standards, it is proposed to focus on several key areas for standard development: terminology and evaluation of flexibility standards, safe operation and life assessment of flexible units, efficiency evaluation under flexible operation of coal-fired units, carbon dioxide detection and pollutant emission control, and online monitoring of coal-fired power generation units. The efficiency evaluation methods will particularly address non-steady-state and deep load-following abnormal conditions, with special emphasis on online monitoring technologies for fuel quality

收稿日期:2024-04-12;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.LHX24041201

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100804)

作者简介:韩亨达(1991—),男,河南长垣人,博士。E-mail:han\_hengda@hust.edu.cn

通讯作者:向军(1968—),男,山东荣成人,教授,博士。E-mail:xiangjun@hust.edu.cn

引用格式:韩亨达,龙妍,徐俊,等.燃煤发电灵活性标准体系建设[J].洁净煤技术,2024,30(9):26-32.

HAN Hengda, LONG Yan, XU Jun, et al. Standard system construction for flexible coal-fired power generation [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(9): 26-32.



移动阅读

and coal flow, as well as the establishment of flexible control standards for fuel-burning-working fluid interactions. The proposed framework and suggestions can be served as revision and establishment references for the standards related to flexibility of coal-fired power generation.

**Key words:** coal-fired power generation; flexibility; standard system; key areas for standard development

## 0 引言

在“双碳”目标背景下,构建新型电力系统是推动我国能源绿色低碳转型、构建新型能源体系的核心,也成为贯彻能源安全新战略、保障国家能源安全的必然选择。近年来,我国新能源迎来跨越式增长,但新能源机组出力稳定性、调节性较差,电力系统适应新能源发展调节能力不足,灵活性调峰资源严重缺乏。通过对存量煤电机组实施大规模灵活性改造,增加电力系统调节能力,能有效满足系统调峰需求,促进大规模新能源消纳<sup>[1]</sup>。煤电是我国当前最经济且具备大规模深度调峰能力的灵活性资源,是电力系统稳定安全运行的调节剂与压舱石<sup>[2]</sup>。煤电正由传统主体电源,逐步转变为向电力系统提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础性、调节性电源。

2021年,国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》(发改运行〔2021〕1519号),旨在通过实施煤电机组改造升级,进一步降低煤电机组能耗,提升灵活调节能力和清洁高效水平;提出煤电机组灵活性改造应改尽改,“十四五”期间完成灵活性改造2亿kW,可增加系统调节能力3000万~4000万kW。2022年,国家发展改革委员会、国家能源局联合下发了《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》,再次指出要全面实施煤电机组灵活性改造。同年,国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》明确要大力推动煤电灵活性改造,大幅提高煤电灵活性是国家重大需求;国家能源局综合司、国家发展改革委办公厅、国家市场监督管理总局办公厅联合发布《关于进一步提升煤电能效和灵活性标准的通知》,提出在现有基础上进一步提升煤电能效和灵活性标准,以标准支撑和规范煤电机组清洁高效灵活性水平提升。

我国正处于开展煤电机组灵活性改造建设的关键时期,但煤电机组灵活性建设改造项目技术路线多<sup>[3]</sup>,不同地域、电网、机型等均存在一定适用差异性,灵活性机组建造改造在实际工程应用中缺乏标准化、规范化和科学化参考。为促进行业健康发展,开展燃煤机组灵活性标准化建设工作非常重要。笔者结合当前燃煤火力发电机组灵活性改造、建设发展现状及面临的主要挑战,对燃煤发电灵活性标准

化工作提出思考和建议。

## 1 燃煤火力发电机组灵活性现状

### 1.1 燃煤火电灵活性内涵

风、光等新能源间歇性强、波动性大和随机性突出等特点,发电量无法按需配置。为适应新能源特点,燃煤火力发电机组需提高煤电灵活性容量、提升变负荷响应速率,具备以下4种能力:①快速变负荷能力:快速应对新能源波动或其他事件对电网带来的冲击;②深度调峰能力:能够在低负荷甚至超低负荷下安全稳定运行,保证电力系统对新能源的充分利用;③顶负荷能力:即在超出设计满负荷运行的能力,在新能源供电轻微不足的情况下仍保证电力系统稳定性;④快速启停能力:短时间内启动/关停的能力,应对极端情况下上网电量大幅波动,保障国家及地区的能源安全。

### 1.2 燃煤火电机组灵活性发展

煤炭在我国化石资源中占比90%以上,富煤、缺油、少气的资源禀赋决定了数十年来我国以煤为主的一次能源消费结构,因此长期以来我国燃煤发电主要以安全、清洁、高效作为燃煤发电重要目标。为响应安全、高效等需求,火力发电机组通常设计的最低运行负荷不超过设额定负荷的50%<sup>[2]</sup>。近年来,我国能源生产结构加速转变,清洁能源占比持续提升。2021年非化石能源发电装机首次超过煤电,装机容量达到11.2亿kW,占发电总装机容量的比重为47%。据《中国可再生能源展望报告2020》预测21世纪中叶,我国新能源占比将达到80%。储能技术发展尚不成熟,灵活性资源极度稀缺的情况下,燃煤发电面临前所未有的灵活性改造压力。

近年来,已有不少燃煤发电机组通过运行优化或改造,将深度调峰负荷从50%降至30%~40%,并尝试长期运行。德国煤电机组改造后最小出力低至25%~30%,丹麦改造后可低至15%~20%,升降负荷速率高,主要通过控制优化、加装给水预热燃气轮机,或以天然气、石油作为补充燃料等技术实现<sup>[4-5]</sup>。近3a,华电、华能、国能等大型发电集团通过燃烧器强稳燃技术、汽轮机高背压改造、热电解耦、智能优化控制算法等<sup>[6-8]</sup>突破超低负荷运行技术壁垒,燃煤发电机组在20%以下设计负荷试运行报道增多,标志着我国燃煤火力发电深度调峰技术

正逐渐步入世界先进水平。然而在燃煤火力发电机组升降负荷速率、快速启停及顶负荷能力实践应用却鲜有报道,燃煤火力机组灵活性改造建设仍存在较大空间。

燃料系统、燃烧系统是制约火电机组负荷响应的主要因素<sup>[9]</sup>,而制粉系统严重滞后燃烧是导致锅炉系统响应速率慢的核心原因。华中科技大学提出煤粉增强储供技术<sup>[10]</sup>和基于煤质等多参量智能控制技术<sup>[11]</sup>,突破制粉系统大滞后难题,是最具前景的提升变负荷速率关键技术之一;西安交通大学提出发展燃煤机组耦合农林生物质强化调峰技术<sup>[12]</sup>,不仅提升机组灵活性,同时具有碳减排潜质;清华大学发展了粉煤循环流化床燃烧技术<sup>[13]</sup>,可以改善变负荷速率,并降低污染物排放。以上关键技术将为进一步提升我国燃煤机组灵活性提供保障。

### 1.3 燃煤火电灵活性面临的挑战

当前燃煤火力发电灵活性主要面临四大挑战:灵活性指标难突破、灵活性下安全问题突出、灵活性下经济性指标大幅下降、灵活性下清洁性难保障。

灵活性指标方面:①虽然部分机组具备了深度调峰负荷运行的工作经验,但多为短时间试运行,超低负荷长期运行可靠性未验证,且部分燃煤火力发电机组深度调峰仍有空间未被挖掘。②燃煤火力发电机组变负荷速率仅1%~2%,远低于新能源波动性引起的功率变化,升降负荷速率是当前亟需提升的关键性指标<sup>[2]</sup>。③当前燃煤火力发电机组鲜有超过设计满负荷运行工况,且为保障机组安全、提高寿命,机组启停频率较低。但随着新能源发电量日益增多,电力系统面临波动性挑战更为严峻。从能源安全和新能源最大化利用角度出发,需探索燃煤机组“顶峰”及燃煤机组快速启停能力。

灵活性安全方面:①超低负荷下,传统火检可能存在失真,不投油超低负荷运行困难<sup>[14]</sup>,亟需开展超低负荷火焰检测及稳定燃烧器研究;②深度调峰工况炉内燃烧器一般非均匀投入,且锅内工质水动力偏离设计工况,炉内燃烧非稳态、热负荷不均与锅内水动力匹配难等问题导致受热面极易超温<sup>[15]</sup>;③高频升降负荷过程,锅炉厚壁部件材料持久强度受到更大挑战,汽轮机运行中更易出现鼓风、水蚀<sup>[16]</sup>等现象,发电机定子绕组与铁芯热膨胀引起轴向膨胀和绕组部件等振动,也带来安全性隐患。

灵活性高效方面:①深度调峰时,锅炉、汽轮机和主要辅机的运行状态偏离了最佳运行状态,机组的热经济性大幅下降;②当下对燃煤发电机组效率评价主要采用稳态效率评估方法,而快速升降负荷

过程中燃煤发电机组处于非稳态过程,现有评价方法无法应用于快速升降负荷瞬态过程效率分析<sup>[17]</sup>;③非稳态运行为锅炉高效燃烧和热力系统能量高效利用带来挑战:快速变负荷过程中锅炉内部流场、温度场急剧变化,风粉匹配难;热力设备内部热量时空分布特性复杂,能质转化规律不清。实现机组快速变负荷与高效的协同面临巨大挑战。

灵活性清洁方面:①超低负荷下SCR入口烟气温度无法满足脱硝系统投入要求,易降低催化剂效率,并生成ABS导致催化剂中毒<sup>[18]</sup>,NO<sub>x</sub>排放易超标。②灵活性运行时烟气脱硫过程难平衡,易出现浆液溢流、除雾器结垢,降低浆液品质,影响脱硫效率<sup>[19]</sup>,干扰脱硫设备正常运行。③低负荷下生成的ABS还会降低除尘效率;低负荷投油辅助燃烧时,如存在未完全燃烧的油,还可能沉积到除尘器上引起除尘器效率降低,甚至存在风险。

当前我国燃煤火力发电机组灵活性改造和建设正处于关键时期,但当下燃煤火力机组灵活性相关标准相对缺乏,燃煤火力发电机组的灵活性难以量化评估,灵活性下安全、效率、清洁考核指标是否应有所变化也值得考虑。燃煤发电机组灵活性标准体系建设对于更好地应对挑战,推动灵活性技术发展具有重要意义。

## 2 灵活性标准体系构建

### 2.1 基本原则

燃煤火力发电灵活性标准体系是全面搜集涉及燃煤火力灵活性发电的标准,并按照其内在联系进行分类整理,最终形成科学的有机整体。编制燃煤火力发电灵活性标准体系过程中,编制组应始终遵循以下原则:

1)科学性原则。科学性是标准化的基本原则,是使用标准的各有关应用系统和技术系统安全、可靠、稳定的根本保障,也是最高原则。在燃煤火力发电灵活性标准体系研究和编制过程中,进行大量文献查阅工作,多次调研火力发电领域主管部门、标准化主管部门、企业、技术机构、行业团体、科研机构等,了解各方对火力发电灵活性标准的需求,以确保标准体系的分类科学、层级清晰、结构合理。

2)完整性原则。完整性是标准体系发挥系统效应的重要保障。燃煤火力发电灵活性标准体系将燃煤灵活发电相关标准分门别类纳入系统,并保证标准协调一致、互相配套,构成完整、全面的整体。标准收录范围主要包括国家标准、行业标准、地方标准等文件。充分考虑整个标准体系范围的完整性和

所有标准文本的数量完整性,体现标准信息的广度。

3)应用性原则。应用性是标准体系的构建起点和归宿。为满足国民经济建设和燃煤火力发电灵活性标准化工作实际需求,以问题为导向,有目的、有计划地对标准化过程及成果信息进行收集、加工、分析、研究等,构建面向应用的国家燃煤火力发电灵活性标准体系,满足燃煤火力灵活发电领域主管部门、标准化主管部门、企业、技术机构、行业团体、科研机构等多方需求。

4)开放性原则。由于标准体系内容取决于燃煤火力灵活发电领域发展实际情况,而燃煤火力灵活发电领域本身处于不断拓展和发展中,因此编制过程中充分考虑体系的可分解性和可拓展性。既要考虑现有标准,也要为未来标准制定做出规划,火力灵活性发电标准体系是开放系统,新制定的标准可及时补充到标准体系,淘汰的标准也能及时删减。

## 2.2 标准体系框架构建

针对当前燃煤机组灵活性改造、建设面临的四大主要挑战,以机组高灵活性、灵活性安全、灵活性高效和灵活性清洁为主要目标,可构建灵活、安全、高效、清洁四大目标门类(表1)。充分考虑机组系统构成,基于主机系统、环保系统、辅机系统、监控系统对标准的专业门类进行划分(表2),各系统下又划分成多个主要设备。储能装备或系统有望助力燃煤灵活性发展<sup>[20]</sup>,但因储能技术种类繁多、当下技术发展尚不成熟,因此未在标准体系框架中单独列出。秉承开放性原则,储能和其他新技术/系统相关标准可考虑划分至辅机系统的其他子门类。

表1 目标门类说明

Table 1 Illustration on target categories

目标门类	包括范围及解释说明
A 灵活	主要指燃煤火力发电机组快速启停、深度调峰以及快速变负荷等过程
B 安全	主要指燃煤火力发电灵活性运行过程设备安全稳定运行,低故障或无故障,同时对寿命等进行预测、管理
C 高效	主要指燃煤火力发电灵活性运行过程高效率及高经济性等
D 清洁	主要指燃煤火力发电灵活性运行过程氮、硫、飞灰、重金属等污染物排放低

从功能序列上,可进一步明确标准类型,首先规定面向整个燃煤机组灵活性的通用标准,再者从设计、制造、安装、试验计量、运行、评价等机组全生命周期尺度进行更细致分类(表3),以响应完整性、应

表2 专业门类说明

Table 2 Illustration on professional categories

专业门类	包括范围及解释说明
a 主机系统	主要涉及燃煤发电的锅炉、汽轮机和发电机三大核心生产设备,分别具有燃烧供热、蒸汽驱动和发电作用
b 环保系统	主要涉及燃煤发电过程中污染物脱除设备,包括脱硫、脱硝和除尘等工艺
c 辅机系统	除三大主机及环保设备外的其他辅助硬件设备,主要包含磨煤机、送风机、引风机、给水泵、加热器等
d 监控系统	主要涉及燃煤发电过程关键参量的在线/离线监测硬件及控制软件,实时获得机组状态并调控

用性原则。由此构建起包括4个目标门类、4个专业门类、14个专业子门类和8个功能序列的标准体系,具体如图1所示。

表3 功能序列说明

Table 3 Illustration on functional categories

功能门类	包括范围及解释说明
①通用	术语等通用性标准,涉及2个或2个以上类别的标准,或不属于其中任何一类的标准
②设计	方案设计、初步设计、技术设计、施工图设计等
③制造	材料选型、装备制造
④安装	土建、设备安装等
⑤试验计量	调试、验收等
⑥运行	工程调度、运行操作、检修维护、报废等
⑦评价	灵活性、效率/经济性、污染物排放及安全性关键指标评价等

## 3 标准体系建设的重点领域

燃煤发电灵活性标准体系建设是一个多学科交叉的复杂问题,涉及许多关键议题,至少包括百余项国家、行业、团体标准。本文将围绕灵活性面临主要挑战、应对措施对亟需建设的5个重点领域进行讨论。

### 3.1 灵活性标准术语及评价方法缺失

尽管我国大力推动燃煤火力发电灵活性改造和建设,行业内也逐渐对具备调峰能力、快速升降负荷等能力的机组是灵活性机组形成共识,但不同团体对于燃煤机组灵活性表述及指标认定存在差异;热电联产机组与纯凝机组最低出力存在天然差异性,煤粉炉与流化床炉深度调峰、快速调节能力也有所不同,不同设计负荷、炉型机组灵活性改造技术难度差异很大。当下缺乏对燃煤火力发电灵活性机组术语的统一定义,灵活性燃煤火力发电机组定义缺乏相关规定,不同炉型、设计负荷的机组灵活性认定指

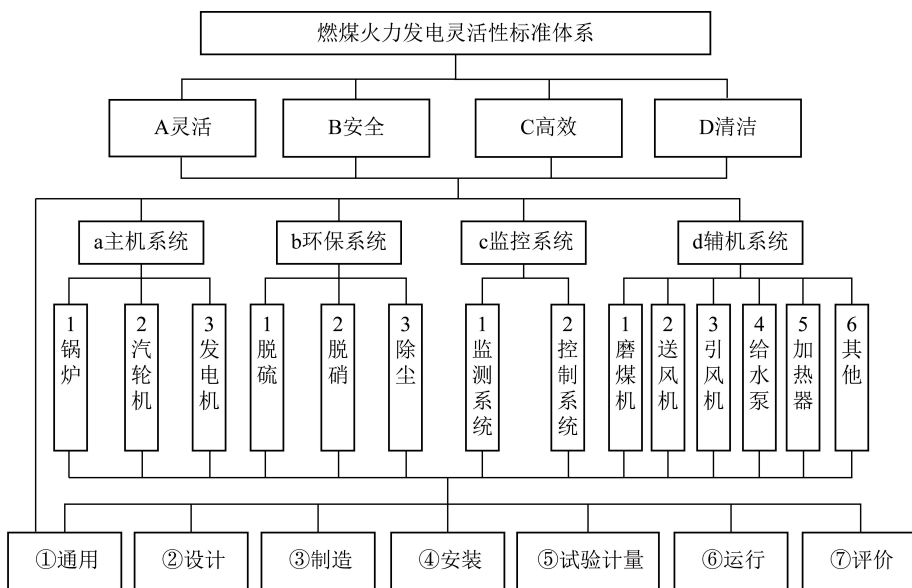


图1 燃煤发电灵活性标准体系框架示意

Fig. 1 Coal-fired power generation flexibility standard system framework

标尚无定论,需建立燃煤火电机组灵活性基本术语标准及面向不同机组的灵活性评估标准方法。

### 3.2 灵活性下机组安全运行方法和寿命评价标准有待发展

频繁快速变负荷和深度调峰运行偏离机组设计工况,设备安全面临巨大挑战,机组寿命大幅缩减。现有电站锅炉承压系统风险管理方法标准主要针对20 a甚至30 a以上锅炉,而参与灵活调峰的机组关键设备部件更易发生疲劳危险,应提前开展寿命评估;考虑设置模拟快速调峰极端工况,即快速变温、变压情况,并明确快速调峰时疲劳阈值,以确保寿命评估准确性和可执行性;变负荷深度调峰极易引发水侧干湿态的不可控转化,不利于锅炉安全运行,考虑提升机组快速补减水能力,提出水动力安全运行准则;频繁调峰影响汽轮机运行,导致汽轮机安全保护系统、热力性能、转速等受影响,建议增设频繁调峰试验和评价方法;低负荷运行烟气温度低,易生成ABS,除尘效率相对较低,空预器容易堵塞,需增加吹灰,低负荷运行空预器运行维护规程等缺失,考虑增设或修订超(超)临界锅炉水动力安全性运行准则、火力发电厂汽轮机安全保护系统技术条件、低负荷空预器堵塞指导原则/回转式空气预热器运行维护规程等相关标准。

### 3.3 灵活性下燃煤机组效率评价方法待完善

我国针对燃煤火力发电机组能耗考核主要依据GB 21258—2017《常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》以及GB/T 35574—2017《热电联产单位产品能源消耗限额对机组能耗》进行评估,2项标准

重点针对常规负荷、稳态运行时机组性能进行考量,深度调峰、快速升降负荷非稳态运行时的适用性有待验证、改进和整合;如机组负荷修正等主要面向50%~100%负荷工况,深度调峰工况下指标计算精度有待验证;机组煤耗的获得前提是机组保持负荷稳定运行4 h,煤耗计算通常依赖正/反平衡计算方法,但在快速调峰过程无法保证机组稳定运行,变负荷过程瞬态变化使正/反平衡计算结果出现差异,现有稳态热经济性评估方法难以对机组灵活性瞬态效率进行精确评价。亟需完善机组能源消耗量、经济性指标(或计量)相关标准。

### 3.4 碳排放监测及适应灵活性运行的污染物评价方法待发展

提升燃煤灵活性的重要目的是提升新能源利用率从而减碳降污,机组灵活性运行下的碳排放及污染物排放问题不可避免。当下我国燃煤火力发电机组尚无二氧化碳在线监测与评价标准,碳排放体系不完善,应制定标准的碳数据收集流程,建立完整的碳排放数据库,探究适合中国燃煤电厂的碳排放监测、报告与核查制度<sup>[21]</sup>。燃煤火力发电灵活性运行工况,污染物脱除装置运行面临烟气温度低、流速不均、波动大等问题,由此导致部分污染物的生成路径发生改变,污染物脱除难度增大、成本增加。可考虑增设灵活性下大气污染物排放标准等级,同时优化面向超低负荷及快速升降负荷下脱硫、脱硝等装备设计要求及运行规程。

### 3.5 燃煤火力机组在线监控标准严重缺乏

灵活性工况下,机组高效控制难、安全性差、清

洁运行面临挑战,本质上是由于机组监测不足、关键参量信号实时性差、缺乏有效调控手段等所导致。应用煤质、煤流、风粉等在线监测技术,优化受热面温度实时监测位点布置,结合能效、安全和污染物智能灵活调控模型,是保障机组灵活性运行工况下保持高经济性、安全性和清洁性的关键手段。然而当下在线监测及控制技术和设备良莠不齐,火力发电机组动态监测系统不完善,机组灵活运行缺乏科学依据。在大力发展和应用在线监测技术的同时,应适时提出在线监测装备的设计、安装、调试与运行标准,提出动态监测系统原则,统一通信信息模型、信息交换模型等规范。

## 4 结 论

1) 针对新能源对灵活性资源的需求特点,提出了燃煤火力发电灵活性应不仅包含快速变负荷、深度调峰,同时应考虑顶负荷和快速启停。我国在深度调峰方面已逐渐步入世界先进行列,但在快速升降负荷能力上与先进指标仍有较大差距。

2) 围绕灵活性指标提升、灵活性运行下安全性、经济性和清洁性保障四大目标,结合燃煤火电机组特征,初步构建了燃煤发电灵活性标准体系,为相关标准建设提供参考。

3) 提出了重点发展燃煤火力发电灵活性机组术语及评价方法、优化机组安全运行方法和寿命评价标准、改善燃煤机组效率评价方法、增设碳排放检测以及灵活性机组在线监控标准等建议。其中效率评价方法应重点考虑非稳态及深度调峰非常态工况。为切实提升燃煤火电机组灵活性,要特别重视煤质、煤流等燃料侧在线监测技术及耦合燃料-燃烧-工质流动等灵活控制标准建立。

## 参考文献 (References):

- [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.  
HUANG Chang,ZHANG Pan,WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 1-6.
- [2] 刘吉臻,李云鸷,宋子秋,等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报,2022,42(11): 993-1004,1012.  
LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 993-1004, 1012.
- [3] 张少强,孙晨阳,余落杭,等. 燃煤发电机组灵活性改造的研究进展综述[J]. 南方能源建设,2023,10(2): 48-54.

- ZHANG Shaoqiang, SUN Chenyang, YU Luohang, et al. Research progress on flexibility modification of coal-fired generating units [J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 48-54.
- [4] 丹麦能源署. 丹麦电力系统中灵活性的发展及其作用[R]. 哥本哈根: 丹麦能源署, 2021.
- [5] GONZALEZ-SALAZAR M A, KIRSTEN T, PRCHLIK L. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1497-1513.
- [6] 高奎,赵晖,胡罡,等. 超超临界试运机组深度调峰控制优化[J]. 热力发电,2021,50(3): 158-164.  
GAO Kui, ZHAO Hui, HU Gang, et al. Automatic control optimization of deep peak load regulation during trial operation of ultra supercritical units [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 158-164.
- [7] 马亮,刘翔,吴学崇. 330 MW 火电机组深度调峰下 AGC 控制优化研究及应用[J]. 电工技术,2023(6): 1-2,6.  
MA Liang, LIU Xiang, WU Xuechong. Research and application of AGC control optimization under deep peak shaving of 330 MW thermal power units [J]. Electric Engineering, 2023(6): 1-2,6.
- [8] 庞力平,袁虎,丘文生,等. 深度调峰锅炉水动力特性分析[J]. 化工进展,2023,42(4): 1708-1718.  
PANG Liping, YUAN Hu, QIU Wensheng, et al. Hydrodynamic characteristics during peaking operation in utility boiler [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(4): 1708-1718.
- [9] 帅永,赵斌,蒋东方,等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电,2022,51(1): 1-10.  
SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.
- [10] 向军,陈德志,徐俊,等. 提升锅炉灵活性的输配储给煤方法、装置、设备及介质: CN115685898A [P]. 2023-02-03.
- [11] 苏胜,任强强,向军,等. 一种燃煤锅炉灵活稳燃与燃烧优化的方法: CN115111600A [P]. 2022-09-27.
- [12] 郭慧娜,吴玉新,王学斌,等. 燃煤机组耦合农林生物质发电技术现状与展望[J]. 洁净煤技术,2022,28(3): 12-22.  
GUO Huina, WU Yuxin, WANG Xuebin, et al. Current status of power generation technology of the agriculture and forest biomass co-firing in coal-fired power plants [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 12-22.
- [13] 吕俊复,尚曼霞,柯希玮,等. 粉煤循环流化床燃烧技术[J]. 煤炭学报,2023,48(1): 430-437.  
LYU Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 430-437.
- [14] 林俐,邹兰青,周鹏,等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7): 21-27.  
LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [15] 常伟,徐贤,魏然,等. 煤电机组深度调峰对锅炉受热面管的影响[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(6): 458-466.  
CHANG Wei, XU Xian, WEI Ran, et al. Analysis of influence of deep peak shaving on heating surface tubes of coal-fired power units[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(6): 458-466.
- [16] 李立波,张凯波. 深度调峰工况下某汽轮机异常振动原因分析[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(1): 74-76.  
LI Libo, ZHANG Kaibo. Analysis of abnormal vibration of a steam turbine under deep regulation condition[J]. Turbine Technology, 2023, 65(1): 74-76.
- [17] 赵永亮,许朋江,居文平,等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2100.  
ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2100.
- [18] QINGM X, LEI S Y, KONG F H, et al. Analysis of ammonium bisulfate/sulfate generation and deposition characteristics as the by-product of SCR in coal-fired flue gas [J]. Fuel, 2022, 313: 122790.
- [19] 高沛荣,何未雨,王晓乾,等. 脱硫浆液循环系统灵活性改造及其调节性能试验[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 98-104.  
GAO Peirong, HE Weiyu, WANG Xiaoqian, et al. Flexibility transformation of desulfurization slurry circulating system and its adjustment performance test [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 98-104.
- [20] ZHAOS F, GE Z H, SUN J, et al. Comparative study of flexibility enhancement technologies for the coal-fired combined heat and power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 15-23.
- [21] 王萍萍,赵永椿,张军营,等. 双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 170-183.  
WANG Pingping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 170-183.