

新型电力系统火电机组灵活低碳调峰面临的问题及解决方案

秦河 袁璐 于亚宁 胡杰 刘一明

华电新疆五彩湾北一发电有限公司 新疆昌吉 830034

摘要: 伴随着我国能源结构转型及气候变化应对需求, 电力系统火电机组的作用发生重大改变。新型电力系统突出可恢复、灵活以及高效调峰的特点, 可恢复的传统火电机组正面临着一系列的挑战和机遇。本研究在分析火电机组灵活多调峰关键制约因素的基础上论述机组安全运行、物理性能及经济性三者间存在的冲突, 并着重从政策环境、市场机制等方面论述调峰激励及约束效果。提出多目标优化动态平衡策略, 其目的是在增强灵活性与低碳效能之间达成调峰任务高效执行。研究显示优化调峰策略、改善政策环境与市场机制并促进技术创新将成为促进火电机组调峰运行的核心途径。

关键词: 火电机组; 低碳调峰; 灵活性; 多目标优化

引言

伴随着全球能源转型步伐加快, 火电机组作为新型电力系统的作用也逐渐发生变化, 传统火电机组以担负基荷供电为主在可再生能源发电占比越来越高的情况下调峰功能显得更加重要, 火电机组灵活机动地参与调峰既是电力资源优化配置的需, 又是应对气候变化和实现电力节约的关键, 火电机组实现高调峰时面临安全性、经济性和物理性能的挑战。配合这一政策、市场机制等因素调峰路径变得较为复杂, 如何兼顾机组灵活性和低碳效能、优化政策支持和市场激励将成为促进火电机组可持续调峰发展的重点问题。本研究正在对上述挑战进行探讨并给出优化对策。

一、火电机组灵活调峰能力的理论基础与演进逻辑

(一) 灵活调峰定义和背景意义及其在不同系统阶段的功能转变

灵活调峰是电力系统内发电机组在需求波动的情况下, 通过快速有效调节出力来满足负荷需求和保持系统稳定运行的一种能力, 在可再生能源大范围接入的背景下, 常规火电机组的负荷调节能力也被赋予更加复杂和多元的作用, 电力系统初期阶段火电机组的调峰主要用于应对负荷的日常波动, 保障供电的连续性和系统的可靠性是电力系统中不可或缺的调节手段之一。

随着风能、太阳能等可再生能源的迅猛发展其间歇性和波动性的特征显著加剧系统对调峰能力的需求, 这一新阶段的火电机组的调峰作用逐渐由传统的单一负荷平衡任务, 转变为一种更加多元化、灵活的调度工具特

别是在新能源高比例接入的复杂场景下火电机组不仅要

对负荷的常规变化迅速作出响应, 还需处理由可再生能源发电波动带来的电力供需动态平衡问题^[1], 这一转变使灵活调峰成为保障电力系统安全稳定运行、实现高效资源配置的重要支撑手段并在电力系统持续演变的过程中发挥着愈发关键的作用。

(二) 火电机组调峰能力构成要素及相互作用机制

火电机组调峰能力受到很多关键要素的影响, 机组最小负荷率就是决定机组调峰能力的根本指标, 机组可运行负荷点最小值越小调峰幅度越高所能适应负荷的波动幅度越宽, 增强整体调峰的灵活性及系统兼容性。除最小负荷率外机组响应时间与响应速度也是评价机组调峰性能好坏的一个重要因素, 特别是当电力系统遭遇突发事件时, 新能源出力会出现波动, 火电机组能否快速调节出力是机组能否有较好的调峰能力是支撑电网平稳运行的关键。燃料的燃烧效率及机组的整体热效率也会显著地影响调峰能力因其直接影响机组不同负荷时的经济性、运行稳定性及连续调峰能力。

随着科技的发展机组控制系统智能化水平逐渐成为提高火电机组调峰能力最重要的因素, 通过先进自动化控制技术的引进以及大数据分析运行模型的建立, 火电机组在降低调整滞后会造成负面影响时能实现运行参数精准调整, 增强机组对调度需求的快速反应能力。这些要素以及它们之间相互影响的机制综合决定着现代电力系统火电机组灵活调峰能力, 通过系统性技术优化和设备升级火电机组既能满足传统电网基础负荷调节需求又能满足未来新能源比重不断增加的新型电力系统调度需

求起到不可取代的辅助作用。

（三）灵活性提升对电力系统稳定性的深层影响

火电机组灵活调峰能力增强给电力系统稳定性带来深刻影响，灵活调峰能有效地应对系统负荷波动以及新能源波动。随着新能源占比增加以火电机组为支柱的系统稳定性迅速弥补新能源发电波动，降低新能源不确定性带来的供电风险。提高灵活调峰能力既促进火电机组动态响应又提高电力系统对外部扰动适应性和系统抗扰动能力。

增强灵活性也有助于降低电力系统对备用容量的要求，在传统的电力系统中备用容量往往依赖于大型的快速响应机组，但火电机组的灵活调峰能力能在较小的负荷范围内迅速调整，降低对附加备用容量的依赖性并减小系统运行成本。提高灵活调峰能力对于电力市场运行机制也有积极作用，在灵活调峰技术推动下火电机组能更好适应市场价格波动、促进市场交易高效、对电力市场价格发现机制支持更灵活、将电力市场和发电系统深度结合^[2]。

二、火电机组低碳调峰路径的关键技术及协同机制

（一）基于燃烧优化的低碳灵活调峰技术体系

随着全球能源结构不断变化，火电机组担负负荷调节、保障能源安全等功能日益凸显，传统火电机组灵活性与低碳排放目标存在冲突。在燃烧优化基础上建立低碳灵活调峰技术体系是解决该问题的重点其目的是通过对燃烧过程进行精细化控制来达到燃煤过程碳排放降低和灵活性增加的双重目的。燃烧优化既有赖于合理的燃料配比及燃烧方式的完善又需综合运用先进的燃烧监测及反馈控制技术。

该技术体系下燃料配比调整能有效地控制燃烧温度与压力，降低有害气体特别是二氧化碳、氮氧化物等温室气体产生起到积极保护环境的效果，燃烧过程动态优化控制使火电机组能在负荷波动大时及时做出反应，保持稳定电能输出显著提高机组负荷调节能力满足负荷排放需求。燃烧优化技术也能通过燃烧过程实时监测和数据分析进一步提高智能化、精准化调节水平，最终提高火电机组运行效率和环境友好度有利于可持续发展目标的实现。

（二）辅助设施改造与系统集成的双重优化路径

火电机组要实现灵活调峰其辅助设施改造及系统集成是关键环节，传统火电机组通常依赖固定配置辅助设施导致机组面临负荷波动时会反应迟钝，不能在低碳要求的环境中有效地运行。辅助设施尤其是锅炉、汽轮机

与循环水系统核心环节改造优化可显著提升机组灵活性与低碳性能。

基于这一背景锅炉和燃烧系统协调优化问题就成为一个重要研究领域，通过提高燃烧系统热效率和强化锅炉热负荷调节能力既能增加系统灵活性又能减少燃烧时二氧化碳排放量，汽轮机系统集成优化也不容忽视尤其在对机组运行灵活性需求越来越高的大环境下，如何确保汽轮机在各种负荷条件下响应速度快、稳定性高是优化设计中最核心的部分。冷却系统优化设计还可显著提高机组低碳能力和降低高温排放带来的环境效应，通过以上多维度协同优化既能实现火电机组低碳调峰时的有效运行又能对系统灵活性提供强有力的保证^[3]。

（三）低碳与灵活性目标下的运行控制策略协同演化

新型电力系统背景下高可再生能源与灵活性目标协同进化是保证火电机组在可再生能源大规模接入时仍能起到关键性作用的根本。制定运行控制策略时既要技术层面上考虑不同负荷下机组调节能力的大小又要充分考虑碳排放控制和机组经济性的权衡。以低碳目标为约束条件其运行控制策略需负荷快速响应与低碳排放优化。利用基于大数据与人工智能动态调节算法能依据实时运行数据准确地预测负荷需求及碳排放变化趋势并对机组负荷输出及运行方式进行调节。

运行控制策略协同演化也包含多机组、区域电网和新能源系统协同调度问题需不同发电单元间调度策略能互相适应以保证系统整体可达，通过智能化调度和反馈机制能使火电机组能有效地补偿可再生能源的波动，又不会增加更多的排放为电力系统整体的平稳运行提供强有力的支持。

三、火电机组灵活低碳调峰的制约因素与优化对策

（一）机组安全运行、物理性能、经济性约束与调峰效能的矛盾

新型电力系统以火电机组为调节主力面临着多重冲突其面向基载稳定的设计很难满足频繁启停和剧烈负荷波动对运行的影响，频繁调峰造成设备热应力增大和机械疲劳的累积，显著增加故障率和降低使用寿命并抬高维护成本。在低负荷运行条件下机组面临着热效率急剧下降、锅炉燃烧不稳定和脱硝系统失控等一系列问题，这些问题严重限制其在灵活低碳调节方面的效能使其陷入“能耗高、污染大、效益低”的运行困境^[4]。

要突破以上困境应从技术革新和机制优化两个层面协同发力，在技术上要更新控制系统采用智能监测及宽负荷燃烧技术能增强机组响应负荷波动能力，提高燃烧

稳定性。推进锅炉低氮改造、汽轮机滑参数运行及其他灵活化改造项目有利于促进低负荷经济性的提高。机制层面要构建多元调度模型、优化热电联产调度、引入容量补偿和辅助服务的市场机制、确保调峰收益,介绍以大数据为基础的设备健康评估系统来加强状态预警和故障诊断,从本质上提高机组灵活运行时的安全性和可靠性。

(二) 政策环境、市场机制对低碳调峰的激励与约束

在建设新型电力系统的进程中政策环境和市场机制对于火电机组灵活地参与调峰既有促进作用又有实际约束。国家为促进清洁能源大范围接入电网提出多项涉及碳和、碳和碳目标的相关政策,也要求火电机组担负更多的调峰任务。但从实际情况来看政策激励还没有系统化和长效化,尽管碳排放权交易、容量补偿、灵活性改造补贴等措施为火电机组提供一定的短期支持,但缺乏与运行绩效、调峰深度等关键指标挂钩的动态激励机制,难以形成激励与约束并重的政策环境。

在市场层面当前电力现货市场尚未全面建立,辅助服务价格机制不健全难以有效反映灵活调峰的价值,频繁的负荷波动与电价不确定性显著增加火电机组承担调峰任务的经济风险、市场回报与实际贡献不匹配。碳市场价格机制尚不稳定价格信号偏弱无法充分体现低碳运营的效益,应从完善容量补偿机制、建立灵活性服务市场、提升碳市场定价机制等方面入手推动构建长期有效、风险可控的市场激励体系,政策设计应加强与市场机制的衔接,通过法规引导与经济杠杆并举为火电机组灵活低碳调峰营造可持续的外部环境。

(三) 多目标优化下灵活性与低碳效能的动态平衡策略

新型电力系统下火电机组既要担负基础负荷支持功能又需具有对可再生能源波动做出快速反应的调整能力,火电机组在实践中面临着启停费时费力深度调峰易损坏设备以及频繁启停加剧碳排放的难题使灵活性和低碳效能很难兼顾^[5]。尤其是新能源大范围并网情况下负荷变化愈加频繁,这对于火电机组调峰效率有更高的要求,现有调度模式简单、排放约束机制不够完善等问题也限制火电机组灵活多能运行时容量的释放,实现灵活性和低碳效能协同优化迫切需构建系统性和多维度政策支持机制来增强火电机组对新型电力系统的适应性和可持续性。

应对以上挑战要从技术路径和调度策略上努力,一

是建立多目标优化调度模型,综合考虑负荷需求、碳排放约束、燃料成本等因素,借助人工智能算法(如粒子群、遗传算法)实现对机组运行状态的动态优化,提升调峰决策的精准性与前瞻性。二是推动燃烧技术升级和燃料结构优化优先采用低碳燃料(如生物质、天然气)或改进煤炭燃烧控制方式减少碳排放强度,强化调峰辅助服务市场机制引导灵活性资源理性进入市场促进火电机组市场化调峰,通过建立“预报—优化—反馈”闭环控制系统有利于火电机组灵活性和低碳效能的动态平衡推动电力系统朝着绿色高效的方向发展。

结论

火电机组作为新型电力系统的重要组成部分并发挥着越来越复杂的作用,它所具有的灵活高调峰能力,不仅关系到机组本身的安全性、经济性与全球气候目标能否实现密切相关。机组在安全运行和物理性能方面存在矛盾、在经济性和低碳要求上存在矛盾、在政策环境与市场机制双重制约下低碳调峰工作面临着诸多挑战。为解决上述问题研究提出一种多目标优化策略,该策略在灵活性和低碳效能之间取得均衡,优化调度策略、完善政策支持和市场机制设计并促进技术创新将成为提高火电机组调峰效能关键途径,采取综合措施火电机组低碳调峰才能更好为电力系统可持续发展服务。

参考文献

- [1] 杨易达,高红均,刘挺坚,等.考虑CCER收益共享激励火电机组深度调峰的电力系统低碳调度[J].电力自动化设备,2024,44(9):121-128.
- [2] 刘汉林,廖鹏,石德勇.新型电力系统下省间-省内2级市场交易模式设计及出清优化[J].现代电力,2024(001):041.
- [3] 肖玲娟,李俊彪,段敬东,等.抽水蓄能在新型电力系统中的功能定位和发展建议[J].中国电力企业管理,2024(4).
- [4] 《南方能源建设》编辑部.新书推荐:《燃煤机组智慧供热与灵活调峰》[J].南方能源建设,2023,10(2):54-54.
- [5] 崔杨,张聪,赵钰婷,等.计及碳捕集电厂调峰定价策略的多主体电力系统日前-实时灵活调度[J].中国电机工程学报,2023,43(18):7043-7060.