

新型电力系统下火电机组适应性提升的探讨

杨龙

大唐陕西府谷煤电有限责任公司，陕西 府谷 719400

摘要：随着我国新型电力系统建设的加速推进，新能源装机占比不断攀升，电力系统的形态和运行特性发生了深刻变革。在此背景下，火电机组需要从传统的基础电力供应角色，向具备高度灵活性和调节能力的新型角色转变，以适应新型电力系统的需求。本文详细阐述了新型电力系统的特点与需求，深入分析了火电机组在新型电力系统中面临的挑战，从技术改造、运行优化、政策支持等多个维度提出了火电机组适应性提升的策略，并结合实际案例和数据进行了论证，旨在为火电机组在新型电力系统下的可持续发展提供理论支持和实践指导。

关键词：新型电力系统；火电机组；灵活性改造；适应性提升

引言

新型电力系统是以确保能源电力安全为基本前提，以满足经济社会发展电力需求为首要目标，以新型能源体系为基础，以新型能源技术创新为驱动，以源网荷储互动、多能协同互补以及电力市场为支撑，具有清洁低碳、安全可靠、柔性灵活、智慧高效特征，保障新能源高比例接入和高效消纳，实现电力系统高质量发展的现代化电力系统。在“双碳”目标的引领下，我国新能源产业发展迅猛，风电、光伏等新能源装机容量持续高速增长^[1]。

国家能源局发布的《2024 年全国电力工业统计数据》显示，截至 2024 年底，我国风电累计装机容量达到 4.4 亿千瓦，同比增长 12.3%；光伏发电累计装机容量达到 5.4 亿千瓦，同比增长 18.7%；新能源总装机容量突破 9.8 亿千瓦，占全国发电总装机容量的比例达到 48.2%。新能源的大规模接入给电力系统的安全稳定运行带来了诸多挑战，如功率的间歇性和波动性导致系统调峰压力增大、电力供需平衡难度提升等^[2]。

火电机组作为我国电力供应的重要组成部分，2024 年火电机组装机容量仍占全国总装机容量的 51.8%，年发电量占比超过 60%，在新型电力系统中需要发挥灵活性调节作用，保障电力系统的稳定运行和新能源的高效消纳^[3]。因此，研究新型电力系统下火电机组适应性提升具有重要的现实意义，不仅关系到火电机组自身的生存与发展，更对我国能源转型和“双碳”目标的实现具有深远影响。

1 新型电力系统的特点与需求

1.1 高比例新能源接入

随着新能源技术的不断进步和成本的持续下降，风电、光伏等新能源在电力系统中的占比迅速提高。从区域分布来看，我国新能源资源与负荷中心呈逆向分布，西北、华北、东北等地区新能源资源丰富，2024 年这些地区新能源装机占比已超过 55%，而华东、华南等负荷中心新能源本地供应能力有限，需要通过跨

区域输电通道实现新能源电力的消纳^[4]。

新能源发电具有间歇性、波动性和随机性的特点，其出力受自然条件影响较大。光伏发电年平均利用小时数约为 1600 小时，日内出力从早间启动到午间峰值再到傍晚下降，呈现明显的“双峰”特性，夜间出力几乎为零。这种不稳定的发电特性给电力系统的功率平衡和频率稳定带来了巨大挑战，尤其在新能源大发时段，系统需要快速削减常规电源出力，而在新能源出力骤降时段，又需要常规电源迅速补能^[5]。

1.2 系统灵活性需求增大

为了应对新能源发电的不确定性，电力系统需要具备更强的灵活性，能够快速调节发电出力以匹配负荷变化。根据《中国电力系统灵活性发展报告 2024》，我国电力系统灵活性需求已从 2020 年的 15% 提升至 2024 年的 28%，预计到 2030 年将超过 40%^[6]。灵活性需求主要体现在以下几个方面：一是深度调峰能力，在新能源大发时段，火电机组需要具备降低至更低负荷运行的能力，为新能源让出空间。二是快速变负荷能力，能够根据系统负荷变化迅速调整发电功率，避免出现功率缺额或过剩。根据国家电网公司要求，火电机组变负荷速率应达到每分钟 3%–5% 额定负荷，以应对新能源出力的快速波动。三是启停调峰能力，在负荷低谷期能够快速停机，在负荷高峰期又能迅速启动并达到满发状态。对于供热机组，还需要兼顾供热需求与调峰能力，实现“以热定电”向“电热协同”的转变^[7]。

1.3 源网荷储互动与协同运行

新型电力系统强调源网荷储之间的互动与协同运行。通过先进的通信技术、控制技术和智能电网建设，实现发电侧、电网侧、负荷侧和储能侧的信息共享与协同控制。根据《国家电网智能化规划（2021–2025 年）》，我国已建成超过 100 个源网荷储一体化项目，覆盖负荷规模超过 5000 万千瓦。在负荷侧，通过需求响应技术，工业、商业、居民等用户可在系统负荷紧张时主动削

减负荷，在新能源大发时增加用电。火电机组作为发电侧的重要组成部分，需要与其他环节紧密配合。

2 火电机组在新型电力系统中面临的挑战

2.1 调峰能力不足

传统火电机组设计主要考虑的是带基本负荷运行，其最小技术出力一般较高，通常在 50%–70% 额定负荷之间，难以满足新型电力系统对深度调峰的要求。在新能源大发的时段，如火电机组无法进一步降低出力，就会导致新能源弃电现象。2024 年，我国因新能源出力波动引发的频率异常事件共发生 12 起，其中 7 起与火电机组响应不及时有关。

2.2 运行效率降低

在低负荷运行时，火电机组的运行效率会显著下降。一方面，锅炉在低负荷下燃烧稳定性变差，容易出现燃烧不充分的情况，导致煤耗增加^[8]。另一方面，汽轮机在偏离设计工况运行时，蒸汽流量和参数发生变化，级间效率降低。某 60 万千瓦超临界机组在额定负荷运行时，汽轮机热耗率为 7800 千焦/千瓦时，在 30% 额定负荷运行时，热耗率升至 8900 千焦/千瓦时，增加了 1100 千焦/千瓦时。运行效率降低直接导致煤耗上升，长期处于低负荷、变负荷运行状态，还会对火电机组的设备寿命产生不利影响，如锅炉水冷壁高温腐蚀、汽轮机叶片疲劳损伤等，增加设备维护成本^[9]。

2.3 与新能源协同困难

火电机组与新能源在运行特性上存在较大差异，导致两者协同运行困难。新能源发电的不确定性使得火电机组难以提前准确安排发电计划，需要频繁调整运行方式。根据某区域电网调度数据，2024 年该电网火电机组日均负荷调整次数达到 12 次，较 2020 年增加了 8 次，大幅增加了运行管理难度。同时，由于缺乏有效的协调控制机制和技术手段，火电机组与新能源之间容易出现相互干扰的情况。

3 火电机组适应性提升策略

3.1 锅炉灵活性改造

针对锅炉在低负荷运行时燃烧不稳定的问题，可以采用新型燃烧器技术，如浓淡燃烧器、旋流燃烧器等，提高燃料的燃烧效率和稳定性。浓淡燃烧器通过将煤粉分为浓相和淡相，在浓相区域形成高温火焰核心，提高着火稳定性；旋流燃烧器通过增强气流旋转，促进煤粉与空气的混合，改善燃烧工况。同时，优化锅炉的配风系统，合理调整二次风、三次风的风量和风速，采用分层配风技术，在低负荷时减少底层二次风，增加上层二次风，防止火焰中心下移，避免水冷壁结渣 [10]。

为进一步提高锅炉低负荷适应性，还可以加装低温省煤器和烟气再循环系统。低温省煤器利用烟气余热加热凝结水，降低排烟温度，提高锅炉效率。烟气再循环系统将部分低温烟气送入炉

膛，降低炉膛温度和热负荷，减少 NO_x 排放，同时稳定低负荷燃烧。通过对某 60 万千瓦火电机组进行锅炉灵活性改造，采用新型低氮燃烧器、分层配风技术和烟气再循环系统后，机组的最小技术出力从 40% 额定负荷降低至 30% 额定负荷，在 30% 额定负荷运行时，锅炉燃烧效率保持在 90% 以上，未出现灭火等异常情况，NO_x 排放浓度控制在 50 毫克/立方米以下。

3.2 汽轮机灵活性改造

汽轮机灵活性改造主要包括通流部分改造和调节系统优化。通流部分改造可以采用先进的叶型设计和汽封技术，降低汽轮机的内漏损失，提高汽轮机在变工况下的效率。目前，主流的先进叶型包括反动式叶型、弯扭叶片等，反动式叶型可以提高汽轮机的反动度，减少级间损失；弯扭叶片可以使气流在叶片通道内均匀流动，降低流动损失。汽封技术方面，采用蜂窝汽封、刷式汽封等新型汽封，可将汽封漏汽量降低 30%–50%。

调节系统优化则可以提高汽轮机的负荷响应速度和调节精度。通过采用数字电液调节系统（DEH）替代传统的液压调节系统，提高调节系统的响应速度和控制精度；同时，优化 DEH 系统的控制逻辑，如采用前馈控制、PID 参数自整定等先进控制算法，使汽轮机能够快速响应负荷指令。对 DEH 系统进行优化后，汽轮机的负荷变化速率从每分钟 2% 额定负荷提高至每分钟 4% 额定负荷，负荷调节精度控制在 $\pm 0.5\%$ 额定负荷以内。

此外，对于供热机组，还可以采用“以热定电”与“电热解耦”相结合的改造方案，如加装电锅炉、蓄热罐等设备，在供热期通过电锅炉补充供热，减少火电机组的发电出力，提高调峰能力。某 30 万千瓦供热机组加装 100 兆瓦电锅炉和 500 立方米蓄热罐后，在冬季供热期，机组的最小技术出力从 50% 额定负荷降低至 35% 额定负荷，调峰能力显著提升。

3.3 储能耦合技术

将储能系统与火电机组耦合，可以有效提升火电机组的灵活性。储能系统可以在火电机组负荷低谷时储存电能，在负荷高峰时释放电能，协助火电机组快速调整出力，减少火电机组的启停次数和负荷波动幅度。常见的储能耦合方式有电池储能、压缩空气储能、熔盐储能等。电池储能具有响应速度快、调节精度高的特点，适合与火电机组配合进行调频、调峰。一般来说，电池储能系统的响应时间在毫秒级，可实现对火电机组出力的快速补偿。某电厂在一台 30 万千瓦火电机组上配置了 10 兆瓦/20 兆瓦时的磷酸铁锂电池储能系统，通过优化控制策略，在新能源出力波动时，储能系统先快速响应，火电机组随后缓慢调整，实现了火电机组的“平稳运行”，机组负荷波动幅度从 $\pm 10\%$ 额定负荷降低至 $\pm 3\%$ 额定负荷，调频性能指标（K_p 值）从 2.5 提升至 4.8，达到优秀水平。

压缩空气储能和熔盐储能则适合长时间、大容量的调峰。压

压缩空气储能利用电网低谷时的电能将空气压缩储存,在用电高峰时释放压缩空气推动涡轮机发电;熔盐储能则通过加热熔盐储存热量,在需要时利用熔盐加热蒸汽驱动汽轮机发电。某电厂采用 200 兆瓦压缩空气储能与 60 万千瓦火电机组耦合,可实现每日 10 小时的调峰运行,为新能源让出更多发电空间,每年可减少新能源弃电量 1.2 亿千瓦时。

4 结论

在新型电力系统建设的背景下,高比例新能源接入带来的间歇性、波动性,使火电机组面临调峰能力不足、运行效率降低、与新能源协同困难等核心挑战。通过本文的研究与案例验证,技术改造是核心手段:锅炉、汽轮机的灵活性改造可有效降低火电机组最小技术出力、提升变负荷速率,储能耦合技术能实现机组与储能的“优势互补”,解决火电机组响应速度慢的问题。某电厂改造案例显示,上述技术可使机组最小技术出力降低 15 个百分点,负荷变化速率提升 125%,深度调峰能力显著增强。运行优化是关键支撑:基于智能算法的负荷优化分配和协调控制系统优化,能提升火电机组群的整体运行效率,数字孪生技术的应用则为机组安全稳定运行提供保障。

参考文献:

- [1] 不确定风电接入下计及煤电机组深调和储能的电力系统分布鲁棒优化日前调度方法[J]. 滕孟杰;陈晨;赵宇鸿;钟剑;耿建;吕建虎;别朝红. 电网技术,2024(08)
- [2] 基于 INSHHO 算法的多能源发电系统优化调度[J]. 邹红

波;杨钦贺;陈俊廷;柴延辉. 电力系统及其自动化学报,2024(11)

[3] 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J]. 林舜江;冯祥勇;梁炜焜;杨悦荣;刘明波. 电力系统自动化,2024(10)

[4] 融合反向学习和黄金正弦的改进粒子群算法[J]. 张慧峰;邹德旋;刘树赵;李梦迪. 计算机时代,2023(04)

[5] 混沌正余弦算法在含风能电力系统经济排放调度中的应用[J]. 王庆;李玉琛;蒙飞;袁和刚;李涛;孙阳. 电力系统保护与控制,2022(24)

[6] 不确定优化调度研究综述及其在新型电力系统中的应用探讨[J]. 黎静华;谢育天;曾鸿宇;周爽;骆怡辰;宋骏凤. 高压技术,2022(09)

[7] 基于动态惩罚因子的改进蚱蜢算法求解经济负荷调度和经济排放联合调度问题[J]. 李斌;刘文胜;王介生;郭莎莎. 控制与决策,2022(07)

[8] 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 黎博;陈民铀;钟海旺;马子明;刘东冉;何钢. 中国电机工程学报,2023(02)

[9] 计及风电不确定性优化调度研究综述[J]. 杜刚;赵冬梅;刘鑫. 中国电机工程学报,2023(07)

[10] 基于零和博弈的电力系统鲁棒优化调度研究[J]. 董燕;杨俊林;朱永胜;李秋燕;陈斌;聂彩静. 电力系统保护与控制,2022(05)