

火力发电厂热经济性的多目标优化方法研究

林 发

(广西广投桂旭能源发展投资有限公司, 广西 贺州 542814)

摘 要 火力发电厂的热经济性是衡量其运行效率和经济效益的关键指标。本文基于热经济性多目标优化理论, 构建了综合考虑能耗、排放、成本等指标的评价体系和优化模型, 采用改进的多目标遗传算法, 对电厂关键运行参数进行优化求解, 并在此基础上结合工程实际制定了优化调整方案, 通过对比优化前后的热耗率、煤耗率等指标, 验证了优化效果。研究表明, 本文所提出的热经济性多目标优化方法能有效提升电厂运行效率, 实现能耗、排放和成本的协同优化, 对于推动火电行业的清洁高效发展具有重要意义。

关键词 火力发电厂; 热经济性; 多目标优化; 运行优化; 节能降耗

中图分类号: F426

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.04.023

0 引言

提高能源利用效率、实现绿色低碳发展, 是我国火力发电行业转型升级的重要方向。火力发电厂的热经济性直接影响电厂的运行效益和竞争力, 对于节能减排、控制发电成本至关重要, 然而, 受技术水平、管理模式等因素制约, 我国火电厂热经济性普遍偏低, 能耗排放高、经济效益差的问题依然突出, 亟须创新优化理论和方法, 挖掘系统节能潜力, 实现热经济运行指标的全面提升。本文立足热经济性的多目标优化, 构建评价体系和优化模型, 并结合工程实际开展应用研究, 以为火力发电厂的精细化管理和清洁高效发展提供理论支撑和实践指导。

1 火力发电厂热经济性多目标优化的理论基础

1.1 热经济性评价指标体系

热经济性评价是开展电厂运行优化的基础, 构建科学合理的评价指标体系是准确评判热经济运行水平的前提。本文从能耗、环保、经济三个维度, 构建多层次、多角度的综合评价指标体系, 能耗指标主要包括发电煤耗、供电煤耗、热耗率等, 反映电厂能源利用效率。发电煤耗反映发电过程的能源消耗水平, 是衡量电厂节能降耗的核心指标; 供电煤耗则进一步考虑电厂用电率的影响, 更加全面地反映电厂的能源利用效率; 热耗率则从热量平衡的角度刻画电厂热力系统的优化程度, 环保指标重点选取二氧化硫、氮氧化物、烟尘等污染物排放强度, 衡量电厂的环境影响。二氧化硫、氮氧化物排放量直接关系到电厂的达标排放, 对电厂的清洁生产水平起决定性作用; 烟尘排放量则影响电厂的除尘设施运行效率, 也是衡量电厂环保表现的重

要窗口。经济指标则选取发电成本、吨煤成本等, 评判电厂清洁生产的经济性, 发电成本从投入产出角度综合考虑燃料、运行维护等各项成本因素, 全面评判电厂生产的经济绩效; 吨煤成本则主要反映燃料采购、运输、储存等环节的成本控制水平, 对降低发电成本具有重要影响。该评价体系综合兼顾电厂“产—输—耗”各环节, 形成“点—线—面”结合的立体化评价视角, “点”即重点关注机组发电效率、污染物排放等核心节点指标; “线”即关注从燃料输入到电力产出的全流程能耗、成本指标; “面”即对电厂的整体热经济运行水平进行全局评估, 多维度反映电厂的节能减排、清洁生产绩效, 这一指标体系选取具有针对性、代表性强的关键指标, 能够全面客观地反映电厂热经济运行水平, 可操作性强, 为后续的多目标优化奠定扎实的基础^[1]。

1.2 多目标优化模型构建

在热经济性评价的基础上, 需进一步建立相应的多目标优化数学模型, 为优化求解提供理论框架。本文以最小化单位发电煤耗、污染物排放和发电成本为目标, 构建热经济性多目标优化模型。目标函数的构建综合考虑了热工系统的能量平衡、物料平衡等机理约束, 燃烧过程、传热传质等复杂物理化学过程, 以及机组负荷、煤质波动等实际工况的影响。比如, 在能耗目标中, 模型不仅考虑燃料的物理热、显热的充分利用, 也考虑烟气余热、废水余热的梯级利用, 对热损失也进行了细致刻画; 在环保目标中, 模型采用分段函数描述污染物的生成机理, 并建立了污染物排放与机组工况的定量关联。在经济目标中, 模型对燃

料成本、脱硫脱硝等环保电价因素进行了量化,并考虑了负荷调整、设备检修等非稳态因素的影响。模型还综合考虑设备特性、工况约束等因素,如汽轮机组启停特性、锅炉燃烧稳定性限制、机组爬坡率约束等。通过合理设置上述工艺参数、操作参数、物性参数的取值范围,保证优化变量在安全可行域内寻优。目标函数在兼顾电厂整体效益的同时,也准确反映了能耗、环保、经济等各子目标之间的冲突博弈关系,为科学决策提供了量化依据。利用加权法对多目标进行量纲归一化处理,并引入满意度理论构建偏好函数。可在决策者偏好信息引导下在 Pareto 最优解集中权衡选择,实现多目标之间的协调优化。所建立的优化模型较为全面地刻画了电厂热力系统的复杂性、多变量性和多目标性,通过对目标函数、约束条件的精细化构建,在理论上实现了热经济运行指标的热力学极限分析^[2]。对于指导工程实践具有重要价值,模型不仅能够准确评估电厂热经济运行的改进空间,也能对热经济性的影响因素进行灵敏度分析,因此对于诊断薄弱环节、制定优化策略具有重要的理论指导作用^[3]。

1.3 优化算法选择与应用

火电厂热经济性优化属于多目标、多约束、非线性的复杂组合优化问题,变量多且耦合紧密,具有明显的组合爆炸特性,难以用传统数学规划方法求解,因此,需要选择合适的现代优化算法进行求解。本文采用多目标遗传算法,该算法具有全局寻优能力强、鲁棒性好、通用性强等优势,能够有效处理热经济性优化所涉及的多目标问题,已在电力系统优化领域得到广泛应用,在标准遗传算法的基础上,本文进行了针对性的改进,以更好地契合热经济性优化的实际需求。引入非支配排序和拥挤度计算,增强了算法的收敛性和种群多样性,有助于在合理时间内搜索到理想的 Pareto 解集。采用实数编码取代二进制编码,可有效提高算法的局部搜索能力,更加精细地探索参数空间^[4]。引入精英保留策略,把优良染色体直接遗传到下一代,防止优秀解丢失,提升算法性能,在交叉、变异操作中嵌入启发式规则,充分利用问题本身的领域知识引导搜索,如在交叉操作中考虑参数的耦合特性,优先匹配物理意义相关的变量,提高算法的工程适用性。算法还融合模拟退火思想处理约束条件,搜索过程中对非可行解进行惩罚,同时又给予一定的进化机会,引导种群向可行域内优化,提高了算法对复杂约束的处理能力。在工程实际中,通过科学设置算法参数,如合理选择交叉概率和变异概率,既能保证种群的多样性,又能兼顾收敛速度。实际应用表明,改进的多目标遗传算

法在求解电厂热经济性优化问题时,展现出较强的全局搜索能力,可在众多影响因素组合中快速搜索到最优参数组合。同时,算法还表现出良好的稳健性,对算法参数不敏感,具有较强的工程实用价值,为后续的工程实施提供了有力的算法支撑。

2 火力发电厂运行参数多目标优化分析

2.1 关键运行参数识别与筛选

火力发电厂是一个复杂系统,涉及锅炉、汽轮机、发电机等诸多设备,运行工况多变,影响热经济性的因素错综复杂。开展参数优化首先需要辨识对热经济性影响显著的关键参数,并进行筛选确定优化变量。本文采用灰色关联分析和主成分分析相结合的方法,定量评价各工艺参数与热经济性指标的关联程度。通过计算灰色关联度,揭示各参数对热耗率、煤耗率等的影响权重。运用主成分分析方法,在众多参数中提取少数几个相互独立的主成分变量,降低优化问题的复杂度,在综合分析的基础上,遴选出对热经济性影响最为关键的若干运行控制参数,包括锅炉燃烧调整参数、汽轮机启停压力、冷却水温度等,为后续的参数优化提供重点方向。

2.2 参数耦合关系分析

电厂系统是一个高度耦合的复杂系统,各设备、工艺参数之间存在紧密的耦合关联,对热经济性的影响往往是多参数联合作用的结果,参数优化需充分考虑参数间的协同配合与制约关系,避免“头痛医头、脚痛医脚”,本文基于机理分析和数据挖掘技术,刻画关键运行参数之间的非线性耦合机理。运用传热传质、流体力学等基础理论,定性分析参数之间的内在联系。通过对电厂海量历史运行数据进行分析挖掘,提炼参数间的定量关联规则,在此基础上,构建参数耦合关系矩阵,量化关键参数之间的敏感度,分析表明,诸如燃烧调整、冷热端设备匹配等参数之间的耦合度较高,需重点协同优化。而给水温度、冷却水温度等则相对独立,可单独优化控制,厘清参数间的耦合机理,能为制定更加科学合理的参数优化方案奠定基础^[5]。

2.3 多目标权衡决策方法

电厂热经济性涉及能耗、环保、经济等多个目标,各目标之间往往存在此消彼长的矛盾冲突,单纯追求减少煤耗,可能导致排放或成本的上升,因此,多目标优化需在目标之间进行科学权衡决策。本文在热工系统节能和环保经济性的博弈分析基础上,构建多目标权衡决策模型。引入理想点法,计算各目标的满意度,进而构建综合效用函数,运用层次分析法确定各目标

权重,综合考虑能源价格、环保压力、财务状况等多重因素,合理调节权重参数,均衡能耗、排放和成本的关系,研究表明,在当前形势下,火电厂热经济性优化应当以节能减排为主要诉求,兼顾企业长远发展。在多目标权衡决策的指导下,优化系统可自动搜寻到兼顾各方面的最优参数组合,实现热经济性指标的整体改善和提升,多目标协同决策为破解电厂运行中的复杂权衡难题提供了有益借鉴。

3 热经济性多目标优化的工程应用

3.1 优化方案制定与实施

理论研究是应用实践的基础和先导,为检验热经济性多目标优化理论和方法的工程适用性,本文以某 350 MW 超临界燃煤机组为对象,开展优化方案的制定与实施,基于前期构建的评价体系和优化模型,结合电厂实际,确定优化目标为最小化发电煤耗、二氧化硫排放强度和发电成本。综合考虑机组设计参数、调峰调频等工况需求,合理设定优化变量的取值范围,利用改进的遗传算法进行求解,得到最优参数组合,在此基础上,制定详细的优化调整方案,主要涉及燃烧优化、冷热端设备匹配、水汽系统平衡等举措,为确保优化效果,项目实施严格遵循 PDCA 循环,对标对表,持续改进。通过配合开展宣贯动员、技术培训、专项考核等工作,营造良好的优化氛围,调动全员参与的积极性,在方案实施的过程中,加强过程管控,及时总结分析,发现问题,优化完善,确保优化工作平稳有序推进。

3.2 优化效果评估与验证

为客观评价热经济性多目标优化的工程实施效果,需对优化前后各项指标数据进行对比分析,本文收集某电厂优化实施前一年和实施后一年的运行数据。重点对比分析发电煤耗、二氧化硫排放强度、发电成本等指标变化情况,数据显示,优化后,机组年平均发电煤耗由优化前的 315 g/kWh 降至 304 g/kWh,节煤效果显著;二氧化硫排放强度由 3.2 g/kWh 降至 2.4 g/kWh,大幅减少污染物排放;发电成本也有一定程度的下降,综合能源效率、污染物去除效率等均有提升。对节能降耗效益进行量化核算,优化实施一年,可节约标煤约 1.2 万吨,减排二氧化硫 500 余吨,节省成本 800 余万元,经济和环境效益十分可观。实践表明,本文构建的多目标优化模型能够准确刻画电厂热工系统的复杂特性,优化方法对于挖掘系统节能潜力、实现清洁高效生产具有显著成效,验证了理论和方法的适用性。

3.3 优化策略动态调整机制

电厂生产是一个动态运行的复杂过程,负荷工况、煤质性能、环保要求等影响因素都在不断变化。为保持热经济性优化成果,必须建立一套动态优化调整机制,适时开展优化“再造”。本文构建了基于负反馈控制的动态优化调整机制,对标优化目标,持续监测电厂热工系统的实际运行偏差,一旦发现偏离优化目标,及时启动再优化流程,同时,遇到机组检修、燃料变化等需重新优化的情形,也能自动触发优化程序。再优化过程充分利用在线监测数据,结合机理模型,采用自适应优化控制策略,对优化模型和算法进行动态修正,不断扩充和完善优化知识库,通过 closed-loop 动态优化,实现了热经济性指标的持续改善,稳固优化成果,研究表明,对标国内标杆值,该电厂热经济性水平已处于行业领先地位,持续优化的动态调整机制,为电厂的长效节能管理提供了范式,值得在行业内推广。

4 结束语

提升热经济性,实现能耗、排放、成本的系统优化,是火力发电厂转型发展的必由之路。本文构建了热经济性的多目标优化模型,采用改进的遗传算法进行求解,并在工程实践中加以应用,取得了良好的节能减排效果。研究表明,热经济性的提升,既是一个技术优化的过程,更是一个管理创新的过程,应坚持以精细化管理为手段,以信息化为支撑,建立全过程、全方位、全员参与的热经济性管控体系,用系统思维统筹煤、机、电各环节,在生产全流程中嵌入节能减排理念。

参考文献:

- [1] 张尧天. 基于热电厂的热网加热器性能优化及经济性计算 [D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2023.
- [2] 查永星, 吴婷, 彭建春, 等. 基于多目标多任务进化算法的含可再生能源混合发电系统优化调度 [J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2020, 47(01): 70-78.
- [3] 钱梦羽, 窦真兰, 陈洪银, 等. 双碳目标下综合能源系统评价指标体系与方法研究进展 [J]. 电气应用, 2021, 40(12): 72-79.
- [4] 肖人彬, 李贵, 陈峙臻. 进化超多目标优化研究进展及展望 [J]. 控制与决策, 2023, 38(07): 1761-1788.
- [5] 曲昕. 基于布谷鸟搜索算法的火力发电厂机组调峰运行优化方法 [J]. 电工技术, 2023(12): 34-36, 39.