

基于智能控制的发电厂热工过程优化研究

李娜¹ 姜肇雨² 庄琰³

1 华能青岛热电有限公司 山东青岛 266409

2 华能日照电厂 山东日照 276826

3 华能临沂发电有限公司 山东临沂 276002

摘 要: 发电厂热工过程是保障机组安全经济运行的关键,传统的控制方法已难以适应日益复杂的工况需求。本文针对发电厂热工过程优化这一问题,探讨了智能控制技术的应用,在分析热工智能控制现状的基础上,重点探讨了数据处理、模型优化、控制策略设计等关键技术,并提出了一种智能控制优化的系统实施方案。通过仿真分析和现场应用,证明该方案能够有效提升机组运行效率,保障机组的安全稳定。研究成果对提高发电厂智能化水平、实现节能减排具有重要意义。

关键词: 发电厂; 热工过程; 智能控制; 数据挖掘; 优化算法

引言:

火力发电厂是我国电力工业的主力军,在保障电力安全稳定供应中扮演着举足轻重的角色,然而随着发电机组参数日益复杂、环保要求日益严格,传统的控制手段已难以满足机组优化运行的需求。为了在提高机组效率的同时保障安全环保,智能控制技术正被越来越多地引入发电厂热工过程控制中,智能控制依托于现代信息技术、优化理论、人工智能等前沿科技,能够实现更精准、更灵活、更高效的过程优化控制,国内外发电行业和学术界对智能控制在热工过程的应用开展了广泛而深入的研究,涌现出一批优秀成果。

1. 发电厂热工过程智能控制现状

1.1 控制系统应用现状

发电厂热工过程涉及锅炉燃烧、蒸汽动力循环、烟气净化等环节,具有参数多、干扰大、响应慢等特点,给控制系统设计带来挑战,当前 PID 控制、专家系统、模糊控制等方法在热工过程控制中得到了初步应用,一定程度上提高了系统的控制精度和响应速度。但这些方法大多基于线性化模型和启发式规则,对工况变化的适应能力有限,难以应对电厂灵活调峰、长周期低负荷运行等新形势,同时不同业务系统数据孤岛严重,缺乏融合集成机制,也限制了智能化手段的应用范围。

1.2 优化需求分析

随着电力体制改革的深化和新能源的快速发展,火电机组面临着更加严峻的生存竞争压力,通过智能化手段实现

热工过程的精细优化控制,已成为发电企业提质增效的迫切需求。具体表现为:灵活性需求增大,要求控制系统能够适应负荷骤变、煤质波动等外部扰动,快速、平稳地完成工况调整;经济性要求提高,燃料成本和环保成本的上升,倒逼企业在确保安全的前提下,最大限度地提高热效率、降低排放;可靠性需求加强,电厂设备大型化、参数临界化趋势明显,对控制系统故障诊断、智能决策能力提出了更高要求。

1.3 技术发展趋势

近年来,以大数据、云计算、机器学习为代表的新一代信息技术蓬勃发展,为发电厂热工智能控制创造了前所未有的机遇,借助这些新技术和新方法,发电厂热工智能控制正朝着全局优化、自适应调节、在线学习等方向发展。在控制模型方面,基于机理和数据融合的多尺度跨域建模方法不断涌现,使得模型的精度和普适性大幅提高;在优化算法上,群智能算法、深度强化学习等新型优化方法为求解高维复杂系统优化问题提供了新思路;在系统架构上,边缘计算、CPS 等新型计算架构有望打通数据流通壁垒,实现数据、模型、知识、控制策略的无缝集成^[1]。

2. 智能控制优化的关键技术

2.1 数据采集与处理技术

海量异构数据是智能控制优化的血液,其质量和丰富程度直接决定了优化效果,热工过程涉及 DCS、SIS、EMS 等多个异构系统,数据源分散,时空尺度各异,如何实现数据的快速采集、融合集成和流通共享是智能应用的首要问题。

要建立统一的数据标准规范,采用 OPCUA 等通用工业以太网协议,打通多源异构数据通道壁垒,引入数据清洗、数据压缩等技术,在边缘端完成数据的预处理和语义提取,减轻通信和存储压力,运用时序数据库、数据湖等大数据平台,构建覆盖全厂的工业数据中台,为数据的共享交换、分析挖掘奠定基础,创新可视化展现形式,采用三维建模、虚拟仿真等技术,为工程师提供全景式、体验式的数字孪生平台,提高数据分析洞见能力^[2]。

2.2 模型构建与优化算法

工程先验知识与数据驱动相结合的模型构建方法,以及快速、鲁棒的优化算法,是支撑热工智能优化控制的两大利器,在模型构建方面,要立足热力系统多尺度、强耦合、非线性特点,综合机理分析与数据挖掘手段,构建面向全局优化的多领域协同仿真模型,可采用 ROM 降阶、代理模型等方法简化高精度机理模型;运用机器学习实现复杂过程的数据驱动建模;引入贝叶斯深度学习等不确定性量化方法,提高模型泛化能力。在优化算法方面,针对热工过程具有多目标、多约束、非凸等特点,重点研究群智能优化、鲁棒优化等启发式算法,以提高全局寻优能力和收敛速度,针对模型失配、扰动频发等情况,探索模型预测控制、迭代学习控制、自适应动态规划等先进控制方法,增强优化控制的自适应性、鲁棒性。

2.3 控制策略设计方法

控制策略是智能优化的执行者,直接影响系统的动态性能和经济性,热工控制涉及锅炉燃烧、汽轮发电、凝汽系统等多个子过程,且存在强耦合、弱响应、大滞后等复杂动态特性,传统的 PID 控制等方法难以胜任,要充分利用先进控制理论,综合工艺约束、控制目标等因素,设计具有多变量协同、分布式自治、主动抑扰等特性的智能控制器。针对锅炉燃烧系统的多变量、强耦合特点,可基于动态矩阵控制(DMC)、模型预测控制(MPC)等方法,设计具有前馈补偿、解耦控制功能的多变量协同控制器,实现锅炉负荷、燃烧、水位的一体化协调控制,针对机组调峰、变负荷等工况频繁切换的需求,研究负荷预测模型、工艺优化模型与控制器的协同机制,可采用模糊决策、元学习等方法,实现控制策略的自适应动态切换,针对 NO_x、CO 等污染物排放的严格管控要求,可采用滑模控制、鲁棒控制等非线性控制方法,实现在保证锅炉燃烧稳定性、热效率

的前提下的排放最优控制。

3. 智能控制系统实施方案

3.1 系统架构设计

发电厂智能热控系统的建设,必须立足全局视角,统筹规划,构建开放融合的数字化架构,传统的发电厂自动化系统,往往存在“烟囱式”的信息孤岛,设备层、控制层、管理层各自为政,数据流、控制流割裂分离,严重制约了数字化时代的创新应用。智能热控系统必须打破部门界限,遵循“统一规划、分步实施、分层设计、融合创新”的原则,构建面向智能优化的开放式系统架构,要统筹推进数字化转型的顶层设计,制定数字化发展战略规划和技术路线图,明确阶段目标和行动方案,夯实发展基础。构建横向集成、纵向贯通的分层架构。自下而上包括现场物联层、边缘计算层、智能应用层和决策优化层,通过工业互联网、CPS 等先进架构,打通设备协议、数据通道、功能模块的壁垒,实现设备互联、数据融合、过程协同、决策智能的无缝衔接,要坚持开放创新,广泛采用通用工业以太网、开源软件等标准化产品,积极引入人工智能、区块链等新技术,支撑灵活、快速的智能化应用开发和迭代升级^[3]。

例如,以电厂“智慧热控”项目为例,该电厂积极顺应电力工业数字化发展大势,高起点规划了智能热控系统的建设蓝图,他们先组织开展了全要素、全流程的数字化评估,摸清了信息化的基础和短板,在此基础上对标国内外同行业标杆,制定了“十四五”智慧电厂发展战略规划,明确了“智慧热控”项目建设的时间表、路线图和关键任务。在总体架构设计上,该系统基于 CPS 架构和工业互联网平台,分别建设感知执行层、边缘计算层、工业 APP 应用层和智慧大脑决策层,利用 5G、TSN 等新一代网络技术,搭建了高速互联、低时延确定的数字化底座,实现了海量异构数据的就地分析、实时流转和智能应用。

3.2 优化控制实现

智能热控系统的实施,必须立足机组工况,分步实施智能化改造,循序渐进地提升全流程的智能优化控制水平,热工过程涉及锅炉燃烧、汽轮机出力调节、除氧加热等多个环节,不同环节的控制目标、约束条件差异显著,且相互影响、动态耦合,导致传统的集中式优化控制难以奏效。为此,应当本着“重点突破、分而治之、灵活协同”的思路组织实施。率先在锅炉燃烧优化控制方面实现突破,综合机理分析、数

据挖掘等手段,构建多工况、强非线性的智能燃烧模型,引入先进控制算法实现燃烧过程的多目标自适应优化控制,为机组节能降耗、灵活调峰铺平道路,针对热系统各子过程的特点,因地制宜部署智能优化控制单元,灵活采用专家控制、模糊控制、智能PID等多种控制方式,实现分布式自主优化。

例如,大型火电厂积极探索智能热控技术创新应用,针对不同工况需求,分步组织实施系统改造,他们先聚焦锅炉燃烧过程这一难点痛点,历经两年攻关,建成了具有燃料特性辨识、燃烧参数自适应优化功能的智能燃烧控制系统,该系统通过机理模型和数据模型的协同,可实现燃烧过程50多个关键参数的实时动态优化,使得锅炉热效率提高1.2个百分点,氮氧化物排放降低20%以上。在此基础上,他们又陆续在锅炉水位三冲量控制、主蒸汽温度控制、空气系统优化等方面实施智能化改造,引入模糊逻辑、专家知识库等,使各分系统的自动控制水平和节能减排效果显著提升,同时他们还自主开发了热工智能优化软件包,集成了工况诊断、性能评估、燃烧优化、联合调节等功能模块,使操作人员可便捷调取智能决策信息,显著提高了系统异常处置和应急调控的及时性、有效性。

3.3 效果评估与改进

智能热控系统的应用成效评估和持续改进,是保障系统长期稳定运行、充分发挥效益的关键举措,由于热工智能系统的复杂性、创新性,其效果评估不能简单照搬常规自动化系统的评价模式,而应结合机组实际,构建涵盖节能减排、灵活性、可靠性、安全性等在内的多维度综合评价体系,建立全面客观的评价指标,从热效率、污染物排放、负荷调节速率、事故跳闸率、防护动作率等方面,设置定量考核指标,同时兼顾人机交互质量等定性指标,形成重效益、重体验的评价导向。加强效果评估的组织保障,成立跨部门协作小组,统筹推进各专业系统评估、共性问题会诊;制定科学的评估管理制度,将评估要求嵌入生产运营流程。

例如,电厂高度重视智能热控系统的成效评估,狠抓智能化水平的持续提升。系统投运初期,他们即成立了跨专业的评估工作组,从节煤、节电、减排、调峰、事故率、自动投退率等12个方面,制定量化考核指标,采取“旁站监督+专项测试”方式开展多轮评估,在过程中他们发现给

煤机互锁逻辑不完善、炉膛安全监控策略不优等问题,通过专题会诊、技术攻关,逐一完成整改,促进了系统功能的快速完善。针对海量生产数据利用不足的痛点,他们还组建数据分析团队,利用Pandas、PyTorch等大数据智能工具,开展设备性能评估、工况深度挖掘,形成了18项优化控制策略,进一步提升了系统效果。每年定期开展智能化专项培训,并将培训考核结果纳入KPI管理,极大提振了技术人员的数字化技能和创新热情,在可持续改进机制的驱动下,该系统的技经指标稳步提升,标煤单价下降6%,机组事故停运次数下降50%,为企业创造了可观的经济效益和社会效益。

结语

发电厂热工智能控制是一个复杂的系统工程,对建设运维团队的多学科融合能力提出了更高要求,各类专业人员要树立数字化思维和智能化理念,加强协同创新,既要立足热工专业知识,又要积极吸收信息技术、人工智能等新方法,在工程实践中不断积累优化控制经验,同时还要高度重视智能系统的安全风险防范,完善技术、管理、应急响应等多层次的安全保障体系,确保机组运行和电网调度始终处于可控、在控状态。可以预见,随着智能热控系统在发电厂的推广应用,必将推动火电产业从经验驱动向数据智能驱动转变,在提高发电效率、降低能耗排放、保障电力安全等方面发挥越来越重要的作用,作为一名电力工作者,应当立足本职,勇于创新,为加快建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系贡献自己的一份力量。

参考文献:

- [1] 郭石开. 基于智能控制的发电厂热力设备运行优化分析[J]. 自动化应用, 2024, 65(S1): 140-142+148.
- [2] 万明远. 大型火力发电厂中输灰智能控制平台的实践探索[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(05): 89-91.
- [3] 贺旭杰, 燕晓龙, 杨晶. 智能控制技术在发电厂中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(04): 248-249.

作者简介:

李娜 1984年11月生,女,汉族,山东齐河县人,大学本科,工程师,研究方向:热控设备可靠性管理研究;一次调频、AGC优化研究;自动调节优化。