

火电厂引送风自动控制策略优化

李江川

新疆能源(集团)有限责任公司 新疆 阿拉尔 843300

摘要:在“双碳”目标与能源结构转型的时代背景下,作为我国电力供应基石的火力发电厂,其运行效率与环保性能面临前所未有的挑战。引送风系统作为锅炉燃烧控制的核心环节,其自动控制策略的优劣直接决定了机组的安全性、经济性与环保性。本文旨在系统性地探讨火电厂引送风自动控制策略的优化路径。首先,深入剖析了引送风系统的基本构成、功能及其在锅炉燃烧过程中的关键作用;其次,全面梳理了当前主流的基于PID的串级-交叉限幅-前馈复合控制策略及其固有局限性;进而,从多变量解耦、氧量校正精细化、变频调速深度应用、RB工况下的鲁棒性提升以及智能优化算法融合等五个维度,详细论述了引送风自动控制策略的前沿优化方向;最后,对引送风控制系统未来的发展趋势进行了展望,指出智能化、协同化与自主化将是其演进的核心脉络。本文的研究对于推动火电机组向更高效、更灵活、更清洁的方向发展具有重要的理论参考价值。

关键词:火电厂;引送风系统;自动控制;控制策略;优化;智能算法

引言

电力是现代社会的基石,火力发电因技术成熟、供电稳定,在我国及全球能源格局中长期居主导。但全球气候变暖加剧,我国提出“双碳”目标,传统火电行业迎来深刻变革。在保障能源安全前提下,提升机组运行效率、降低煤耗与污染物排放,成为火电领域亟待解决的关键问题。火电机组热力系统复杂,锅炉燃烧是能量转换起点,其控制品质决定机组性能。引送风系统是燃烧控制关键子系统,送风系统为炉膛提供助燃空气,兼顾燃烧经济性与NO_x排放;引风系统维持炉膛负压稳定,保障锅炉及人员安全。二者相互关联制约,构成强耦合、非线性等复杂过程控制系统。传统比例-积分-微分(PID)控制策略因结构简单、鲁棒性强,在工业界广泛应用。但面对现代大型、超临界等火电机组严苛运行要求,其在动态响应、抗干扰、多变量协调及宽负荷适应性等方面明显不足。所以,对引送风自动控制策略进行系统性优化升级,是提升火电机组自动化水平的内在需求,也是实现火电绿色、低碳、高质量发展的必然。本文将围绕此主题深入展开理论探讨。

1 火电厂引送风系统概述

1.1 系统构成与基本功能

火电厂引送风系统主要由送风子系统和引风子系统两大部分构成。送风子系统的核心设备是送风机(通常为轴流式或离心式),其主要功能是克服空气预热器、风道及燃烧器的流动阻力,将外界冷空气送入炉膛。送风量的调节通常通过改变风机入口导叶开度(静叶可调)或风机转速(变频调速)来实现。送风自动控制

的根本目标是维持烟气中的氧含量(或过量空气系数)在最优设定值附近,该设定值通常根据机组负荷进行动态调整,以实现燃烧效率最大化与污染物排放最小化的平衡^[1]。引风子系统的核心设备是引风机,其作用是克服烟道、除尘器、脱硫装置及烟囱的流动阻力,将燃烧后的烟气排入大气。引风量的调节方式与送风机类似,同样可通过调节静叶或转速实现。引风自动控制的核心任务是维持炉膛压力在微负压状态(通常为-50Pa至-100Pa),这是保证锅炉安全稳定运行的关键参数。

1.2 控制对象特性分析

引送风系统的控制对象呈现出极为复杂的动态特性。首先,其强耦合性不容忽视,送风量的任何变动都会直接作用于炉膛内的燃烧强度与烟气生成速率,进而对炉膛负压形成显著扰动;反之,引风量的调整也会改变炉膛负压,反过来影响送风系统的稳定性,二者之间形成了紧密且双向的动态耦合关系。其次,系统表现出明显的非线性与时变特征,风机自身的流量-压力特性曲线本身就非线性,加之机组负荷的频繁波动、入炉煤质的不稳定性以及受热面的积灰结焦等因素,共同导致了系统动态参数如增益和时间常数的持续变化。再者,由于调节指令从执行机构发出到最终在被控量(如氧量、炉膛负压)上产生可观测的响应,需要经过冗长的风道、庞大的炉膛容积等多个物理环节,这使得整个系统不可避免地存在较大的传输滞后和惯性。最后,该系统还暴露于众多内外部干扰源之下,包括燃料供给量的微小波动、电网调度指令引发的负荷快速变化、燃煤发热量的批次差异以及环境温度的季节性变迁等,这些都对

控制系统的鲁棒性和适应性提出了严峻考验。

2 传统引送风自动控制策略及其局限性

2.1 传统控制策略

目前,国内绝大多数火电厂仍采用一种经典的复合控制策略,其核心架构为“串级-交叉限幅-前馈”控制。送风控制回路通常采用串级结构。主回路以烟气氧量为被控量,其输出作为副回路(总风量控制回路)的设定值。副回路快速调节送风机执行机构,使总风量跟踪设定值。为了保证燃烧安全,系统引入了“风-煤交叉限幅”逻辑:当增加负荷时,先增加风量再增加煤量;当减少负荷时,先减少煤量再减少风量。此外,还会引入燃料量或主蒸汽流量作为前馈信号,以提前补偿负荷变动对风量的需求。引风控制回路相对简单,通常采用单回路PID控制,以炉膛压力为被控量,直接调节引风机执行机构。

2.2 局限性

尽管该策略在工程实践中取得了良好效果,但其局限性也日益凸显:(1)耦合抑制不足:交叉限幅仅能在一定程度上缓解耦合带来的安全隐患,但无法从根本上消除耦合对控制品质的负面影响,导致系统响应迟缓、超调量大。(2)氧量校正精度有限:氧量测量易受烟气流场不均、探头老化、标定不准等因素影响,且单一的氧量反馈难以全面反映炉内燃烧状况,导致校正效果不佳。(3)参数整定困难:PID控制器参数依赖于现场调试,面对宽负荷、变工况运行,固定参数难以保证全工况下的最优控制性能^[2]。(4)RB工况适应性差:在辅机故障减负荷(Runback, RB)等极端工况下,传统策略往往难以快速、平稳地将系统过渡到新的稳定状态,存在较大的安全风险。

3 引送风自动控制策略的优化方向

针对传统策略的不足,学术界与工业界提出了多种优化方向,旨在全面提升引送风系统的控制性能。

3.1 多变量解耦控制

为从根本上解决引送风系统间的强耦合问题,多变量解耦控制成为重要的研究方向。其核心思想是设计一个解耦补偿器,置于原多变量系统之前,使得补偿后的系统近似成为一个对角优势矩阵,即每个控制量主要只影响其对应的被控量。常用的解耦方法包括:(1)前馈解耦:基于对系统稳态增益矩阵的逆矩阵构建解耦网络,计算简单,但仅能消除稳态耦合,对动态耦合效果有限。(2)状态反馈解耦:通过引入状态观测器获取系统内部状态,利用状态反馈实现动态解耦,效果较好但对模型精度要求高。(3)智能解耦:利用神经网络、模

糊逻辑等智能算法在线辨识系统耦合关系并进行动态补偿,具有较强的自适应能力。通过有效的解耦,可以使送风和引风两个控制回路相对独立,显著提升各自的动态响应速度和控制精度。

3.2 氧量校正的精细化与多参数融合

为了突破单一氧量信号所带来的信息瓶颈,现代优化策略正朝着精细化处理与多源信息融合的方向演进。一方面,通过对氧量测量技术本身的改进,例如采用炉膛出口多个截面的氧量探头进行数据融合取均值、应用先进的动态滤波算法剔除噪声干扰、以及建立在线诊断与漂移补偿模型,可以有效提升氧量信号的可靠性与对炉内真实燃烧状况的代表性。另一方面,控制系统开始尝试引入更多元化的燃烧状态判据,将一氧化碳(CO)浓度、飞灰含碳量等能够更直接反映燃料燃烧完全程度的关键参数纳入控制逻辑,与氧量信号共同构成一个多维度的燃烧优化评价体系^[3]。在此基础上,系统不再依赖于简单的负荷-氧量查表函数,而是通过建立更为复杂的、能够综合考虑负荷、煤质等多重因素的动态最优氧量设定模型,确保锅炉在任何运行工况下都能逼近全局最优的燃烧状态。

3.3 变频调速技术的深度集成与优化

伴随着高压大功率变频技术的日臻成熟与成本的持续下降,越来越多的火电厂正将原有的节流式(如挡板或静叶调节)送、引风机改造为变频调速驱动模式。这一变革不仅带来了立竿见影的巨大节能效益,更为控制策略的深度优化创造了前所未有的技术条件。变频调速实现了风量的无级、平滑调节,彻底规避了传统节流方式所固有的非线性特性和调节死区问题,尤其是在低负荷运行区间,其控制品质得到了革命性的改善。在此基础上,控制逻辑也需进行相应的重构与优化。例如,在引风控制中,可以巧妙地炉膛压力的宏观控制目标与风机转速的微观调节指令相结合,构建出更为高效的串级控制结构,并通过智能算法实时规划风机运行轨迹,有效规避其机械特性中的喘振危险区域。当送、引风机均完成变频化改造后,更有条件设计出高级别的协调控制策略,通过中央控制器对两台风机的转速进行协同优化,从而同步实现对炉膛负压和总风量的快速、精准且能耗最低的联合控制。

3.4 RB工况下的控制策略强化

辅机故障减负荷(RB)工况是对引送风控制系统鲁棒性与安全性的终极考验。为此,优化后的控制策略必须具备在单侧风机意外跳闸后,迅速而平稳地将机组负荷降至50%额定值的能力。这要求RB逻辑必须更加精细

化,能够根据不同初始负荷段、不同燃煤特性等因素,动态设定差异化的降负荷速率,以避免因速率过快引发炉膛熄火,或因速率过慢导致炉膛超压。在RB动作触发的瞬间,控制系统应立即施加一个基于跳闸风机容量计算得出的强大前馈指令,以最快的速度关闭对应侧的风机挡板或停止其运行,并同步启动另一侧健康风机的加速增容逻辑。与此同时,炉膛压力和氧量的反馈控制回路必须得到空前加强,以强大的抑制能力应对由此产生的剧烈动态波动^[4]。此外,在引风机RB过程中,还需特别关注并列运行的剩余风机可能出现的“抢风”失稳现象,通过优化控制指令的分配策略并嵌入专门的防喘振与防抢风保护逻辑,全方位确保剩余风机的安全、稳定运行。

3.5 智能优化算法的应用

人工智能与先进控制理论的深度融合,正在为引送风控制领域开辟全新的可能性。利用粒子群优化、遗传算法等智能寻优工具,可以对传统PID控制器的参数进行在线或离线的自寻优整定,使其能够在纷繁复杂的变工况运行环境中始终保持卓越的控制性能。更进一步,一些先进的控制算法正逐步尝试替代或部分替代经典的PID控制器。例如,模糊控制能够有效处理系统中存在的不确定性和非线性;而模型预测控制(MPC)则凭借其能够显式处理多变量耦合、输入输出约束以及优化未来性能指标的独特优势,在理论上展现出远超传统方法的控制潜力。此外,依托于大数据和机器学习技术的数据驱动方法也崭露头角,它能够绕过对精确物理机理模型的苛刻依赖,直接从海量的历史运行数据中挖掘出系统的内在规律,并据此构建自适应甚至具备自学习能力的智能控制器。

4 引送风自动控制系统的未来发展趋势

展望未来,火电厂引送风自动控制系统的发展将呈现以下趋势:(1)高度智能化:人工智能技术将深度融入控制系统,实现从“自动”到“自主”的跨越。系统

将具备更强的自感知、自诊断、自决策和自优化能力,能够主动适应复杂多变的运行环境。(2)深度协同化:引送风控制将不再是孤立的子系统,而是作为燃烧优化、机炉协调乃至全厂AGC(自动发电控制)大系统中的一个有机组成部分。通过信息共享与协同优化,实现全厂运行效益的最大化。(3)数字孪生赋能:基于数字孪生技术构建的虚拟电厂模型,将为引送风控制策略的研发、测试、验证和优化提供强大的仿真平台,极大缩短优化周期,降低试错成本。(4)云边协同架构:控制系统架构将向“云-边-端”协同模式演进。边缘计算负责实时控制,云计算负责大数据分析、模型训练和策略优化,二者协同工作,共同提升系统整体性能。

5 结语

火电厂引送风自动控制策略的优化是一个涉及多学科、多层次的系统工程。本文系统地回顾了传统控制策略的架构与局限,并从解耦控制、氧量校正、变频集成、RB强化及智能算法应用等五个方面,深入探讨了当前主要的优化方向。研究表明,未来的引送风控制系统必将朝着更加智能、协同和自主的方向发展。通过持续的技术创新与集成应用,引送风系统将为火电机组在新型电力系统中扮演好“压舱石”和“调节器”的双重角色提供坚实的技术支撑,助力我国能源电力行业的绿色低碳转型。

参考文献

- [1]马春虎,谭金龙.智能控制技术在火电厂热工自动化中的应用[J].中国设备工程,2026,(07):26-28.
- [2]张逸轩.基于人工智能的火电厂热工过程智能控制策略优化研究[J].电气技术与经济,2026,(03):165-167+171.
- [3]林宇华,高伟,刘城.火电厂一次风动态自寻优控制技术的研究与应用[J].自动化应用,2024,65(02):86-88.
- [4]王志纲,范秋香,马高街,等.火电厂燃料智能化采制样系统平衡风装置研究[J].电力科技与环保,2020,36(06):58-59.