

基于前馈-反馈复合控制的1000MW机组输灰压缩空气智控系统应用

薛 凯 姜 涛

国能(绥中)发电有限责任公司 辽宁 葫芦岛 125222

摘 要: 针对 1000MW 火电机组输灰压缩空气系统传统控制模式下供需失衡、能耗偏高、智能化水平不足等行业共性问题,以国能绥中电厂二期 2 台 1000MW 机组为工程背景,设计并投运了一套基于前馈-反馈复合控制的输灰压缩空气智控系统。该系统通过管网联通优化、全参数 DCS 接入、多机协同联控及输灰工况前馈调节,实现了压缩空气按需精准供气。工程应用结果表明:改造后管网压力波动范围由 $\pm 0.2\text{MPa}$ 缩小至 $\pm 0.1\text{MPa}$,空压机月均启停次数减少 25%,厂用电率由 0.0605% 降至 0.0535%,综合节能率达 11.57%。该方案技术成熟、效益显著,可为同类型大容量火电机组辅助系统智能化改造提供参考。

关键词: 火电厂; 1000MW 机组; 输灰压缩空气系统; 前馈-反馈复合控制; DCS 协同; 智能控制; 节能降耗

引言: 在碳达峰、碳中和战略目标引领下,我国燃煤发电行业正加速向高效、低碳、智能、安全方向转型。机组容量不断提升的同时,辅助生产系统的运行效率、控制精度与智能化水平,直接决定机组整体能耗指标与安全稳定裕度。据行业统计,当前我国燃煤电厂辅助系统厂用电率约占机组总厂用电率的 60%-70%,其中压缩空气系统能耗占辅助系统总能耗的 15%-20%,是电厂节能降耗的重点攻坚领域。

输灰压缩空气系统承担着锅炉除尘、飞灰输送等重要任务,是保障火电机组环保排放与连续运行的关键公用动力系统。1000MW 等级大容量机组输灰用气点多、耗气量大、工况波动频繁,且用气特性呈现明显的周期性脉冲特征,对压缩空气压力稳定性、供气连续性与系统响应速度提出了远高于中小机组的严苛要求。然而,国内多数同类型机组的输灰压缩空气系统仍沿用 20 世纪末的控制技术,约 80% 的系统采用人工启停或简单压力控制,平均加载率仅为 60%-70%,空载能耗占比超过 20%,节能潜力尚未得到充分挖掘^[1]。

国能(绥中)发电有限责任公司二期 2 台 1000MW 机组输灰空压站配置 6 台寿力 LS32-450HWC 型螺杆空压机及配套微热再生干燥机,采用母管制集中供气。原系统采用传统就地控制与简单远方启停模式,存在三大突出问题:一是控制逻辑单一,仅依靠人工启停调节压力,无法根据实时用气量动态匹配输出,供需失衡导致管网压力大幅波动;二是关键运行参数与故障信号未接入辅网 DCS,依赖人工就地巡检,数据滞后、监管盲区多,隐患发现不及时;三是空压机频繁加卸载与启停,加剧

机械磨损,缩短设备寿命,同时造成厂用电消耗偏高。

在电厂能耗管控趋严、设备可靠性要求提升的背景下,传统控制模式已难以满足现代化机组运行需求。为此,实施输灰压缩空气系统智能化改造,构建集数据采集、远程监控、自动调压、协同联控、前馈调节于一体的智控系统,全面提升输灰供气系统的经济性、安全性与智能化水平。

本文开展 1000MW 火电机组输灰压缩空气系统优化研究,以为同类型机组系统升级提供参考。

1 项目概述

1.1 工程概况

国能(绥中)发电有限责任公司装机容量 3760MW,其中二期 2 台 1000MW 超超临界机组为东北电网主力调峰机组,年发电量约 120 亿 kWh。机组除灰系统采用正压浓相气力输送方式,压缩空气作为核心动力介质,要求供气压力稳定在 0.7MPa,用气负荷随锅炉负荷、输灰周期、仓泵运行状态实时变化,波动范围大、响应要求高。输灰空压站采用 6 台 $62.6\text{m}^3/\text{min}$ 空压机与 6 台微热再生干燥机单元制配置,母管并联运行,常规 4 台运行、2 台备用,是保障输灰系统稳定运行的重要辅助车间^[2]。

1.2 原系统运行痛点

改造前系统自动化程度低,运行人员仅能在远方对空压机执行启、停操作,无法实现连续压力调节。当输灰系统多个仓泵同时启动输送时,耗气量瞬间达到峰值,管网压力会在 30s 内骤降 0.15MPa 以上,严重时导致输灰流速不足引发堵管;而当输灰周期结束进入进料阶段时,耗气量骤减,管网压力快速上升,空压机被迫

频繁卸载甚至停机,造成大量能量浪费。同时,设备运行温度、电流、振动、故障报警等信息无法在集控室实时监视,只能依靠巡检员定期现场记录,不仅运维效率低,还存在漏检、误判风险,易引发设备非计划停运。此外,频繁启停使电机与主机承受冲击载荷,轴承、齿轮、油封等易损件更换周期缩短,维护成本逐年上升。

1.3 改造必要性

随着电力行业节能降碳考核趋严、智慧电厂建设加速,辅助系统智能化已成为必然趋势。传统输灰压缩空气系统能耗高、响应慢、管控弱,已成为制约机组整体效益提升的短板^[3]。实施智控改造,既能实现压力精准调节、降低电耗,又能完善远程监控、提升安全水平,同时延长设备寿命、减少维护工作量,兼具经济效益、安全效益与环保效益,对同类型机组改造具有典型示范意义。

2 管网联通优化

原 #3、#4 炉输灰储气罐后设 DN200 联络母管,联络阀门长期常闭,仅作为事故备用,两套系统相对独立运行,无法实现气量互补与压力均衡。当 #3 炉输灰系统处于用气高峰时,即使 #4 炉空压站有富余气量也无法调用,只能启动备用空压机;反之,当 #4 炉用气高峰时也存在同样问题,导致设备利用率低下。

改造中为提升管网稳定性与设备利用率,将联络门改为常开状态,实现两台机组输灰压缩空气系统管网完全联通、统一调度、互为备用。联通后 6 台空压机统一纳入智控系统协同调控,形成一个容量更大、调节能力更强的集中供气系统,避免单炉用气高峰导致压力骤降、另一炉用气低谷造成能量浪费,为后续集中自动控制与压力稳定奠定了坚实基础。

3 输灰压缩空气智控系统构建

3.1 系统架构

智控系统采用模块化集成设计,由电源模块、数字量输入输出模块、通讯接口模块、空压机专用通讯模块、干燥机通讯模块、智能网关及组态软件组成,以 PLC 为控制核心,与辅网 DCS 实现数据双向交互。系统通过 Modbus、Profibus 等通讯协议,将空压机排气压力、排气温度、运行电流、加载状态、故障信号,以及干燥机运行状态、露点等信号全量采集,统一上传至 DCS 操作员站,实现集中监视、集中控制、集中报警。

3.2 核心功能

(1) 全参数接入 DCS 远程监控改造完成后,所有空压机、干燥机实时运行数据、状态量、报警信息全部接入辅网 DCS 系统,运行人员在集控室即可完成全流程监视,

具备历史趋势查询、故障追忆、数据统计等功能,彻底取消依赖人工就地巡检的传统模式,消除监管盲区^[4]。

(2) 管网压力闭环自动控制

系统提供就地、远方手动、远方自动三种控制模式,自动模式下可由运行人员设定管网压力目标值、加载阈值与减载阈值。智控系统根据母管压力实时偏差,采用 PID 算法自动完成空压机的启动、停止、加载、减载,多台机组协同匹配输出气量,使压力稳定在设定区间,避免超压放空与低压不足,实现按需供气、精准调压。

(3) 多机协同优化

系统建立空压机运行时长数据库,采用“先启先停、均衡运行”的调度策略,自动轮换运行与备用空压机,确保各台设备运行时间偏差不得超过 24h。同时,根据空压机能效曲线,优先调度能效高的设备带基本负荷,能效低的设备调峰,在满足供气需求的前提下,实现系统整体能效最优。

4 前馈调节与联锁优化

输灰系统采用料位优先,时间辅助的控制方式,仓泵集中进料、集中输送,导致压缩空气用量呈现周期性脉冲式变化,波动剧烈。传统反馈调节存在 15~30s 的滞后性,易出现压力超调或欠调,无法满足输灰系统对压力稳定性的要求。

为此,智控系统引入前馈-反馈复合控制算法,实时采集除尘器、省煤器各输灰单元的仓泵进料信号、出料信号、阀门状态信号,提前预判用气量变化趋势。前馈调节系统采用分层控制架构,底层采集各输灰单元运行数据,中层通过逻辑运算计算当前输灰周期的预计耗气量,上层将预需气量信号发送至空压机控制模块,在压力波动发生前预先调整空压机输出,实现“预判调节、超前响应”。

前馈信号优先级高于反馈信号,当检测到 3 个及以上输灰单元同时启动时,系统立即触发预加载指令,在压力下降前完成气量补充。同时,设置前馈调节死区,避免因单个输灰单元频繁启停导致的空压机误动作,确保系统运行稳定性。该控制方式显著提升了压力稳定性与调节精度,从根源上避免了因输灰周期导致的压力大幅波动^[5]。

5 应用成效分析

5.1 技术成效

系统投运后运行稳定,DCS 远程监控、压力自动调节、前馈联锁等功能全部投入,各项技术指标均达到设计要求。改造前后主要技术指标对比见表 1。

表1 改造前后主要技术指标对比

指标	改造前	改造后	提升幅度
管网压力波动范围/MPa	±0.2	±0.1	50%
空压机月均启停次数/次	80	60	25%
设备平均无故障运行时间/h	2000	2800	40%

投运以来,未发生因供气压力异常导致的输灰堵管、除尘异常等事件,系统安全可靠性能显著提升。

5.2 节能指标

输灰压缩空气智控系统的应用显著改善了输灰压缩空气系统的能耗表现,尤其是空压机厂用电率方面。对比同期运行数据,改造前(2024年12月)输灰空压机厂用电率为0.0605%,改造后(2025年12月)降至0.0535%,综合节能率11.57%。按年耗电量1000万kWh测算,年节约电量115.7万kWh,以0.375元/kWh电价计算,年直接节能收益达43万元,经济效益突出。

5.3 综合效益

改造实现智能化、集约化运行,降低巡检与操作工作量,每年可减少巡检工时约1200h,降低人工成本约6万元;设备运行工况优化,维护频次减少40%,年节约备件及维修费用约20万元;能耗降低同步减少碳排放,年节约电量相当于减少二氧化碳排放约900t(按全国电网平均碳排放因子0.778kg/kWh计算),按碳交易80元/t计算,碳收益约7万元,环保效益突出^[6]。

改造实现智能化、集约化运行,降低巡检与操作工作量,减少人为误操作风险;设备运行工况优化,维护频次与备件消耗下降;能耗降低同步减少碳排放,助力电厂“双碳”目标落地。

6 存在问题与展望

本次改造实现了输灰压缩空气系统的基本智能化控制,但仍存在一定的提升空间。一是当前系统仅基于当前输灰运行状态进行前馈调节,未结合锅炉负荷预测、飞灰产生量预测等数据进行中长期气量预判,在机组负荷大幅波动时,仍存在少量压力波动;二是未建立空压机全生命周期健康管理模型,无法实现基于设备状态的

预测性维护;三是系统尚未与全厂智慧能源管理系统深度融合,无法实现全厂压缩空气资源的统一调度与优化配置。

未来,将进一步引入人工智能算法,构建基于LSTM的输灰用气量预测模型,实现更精准的超前调节;建立设备健康状态评估体系,通过分析振动、温度、电流等数据,提前预判设备故障,实现预测性维护;推进与全厂智慧能源系统的对接,实现全厂能源的协同优化,进一步提升系统运行效率与智能化水平。

结束语

在“双碳”目标与智慧电厂建设双重驱动下,输灰压缩空气系统智能化改造是大容量火电机组辅助系统升级的重要方向。国能绥中发电1000MW机组通过构建输灰压缩空气智控系统,实现数据全面接入、压力自动调节、多机协同联控与前馈精准控制,有效解决传统系统能耗高、调节粗、监控弱、寿命短等痛点,在节能降耗、安全提升、运维减负等方面取得显著成效。该方案技术成熟、实施便捷、效益明显,可为国内同类型火电机组输灰及压缩空气系统改造提供可靠参考与示范,对推动燃煤发电行业辅助系统低碳化、智能化发展具有重要工程价值。

参考文献

[1]国家发展改革委,国家能源局.2030年前碳达峰行动方案[Z].北京:国家发展改革委,2021.

[2]中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告[M].北京:中国电力出版社,2025.

[3]王爽,李明,张伟.火电机组压缩空气系统节能优化技术研究[J].热力发电,2024,53(02):112-117.

[4]张军,刘阳.燃煤电厂辅助系统智能化改造实践[J].中国电力,2023,56(09):89-95.

[5]赵志强.火力发电厂除灰系统设计与运行维护[M].北京:中国水利水电出版社,2022.

[6]李萌,陈峰.DCS系统在电厂辅助设备管控中的应用研究[J].自动化仪表,2023,44(05):67-71.