

一次风机变频调速节能效果分析

赵得江

大唐宝鸡热电厂

DOI:10.32629/etd.v7i1.22256

[摘要] 一次风机是火电机组锅炉燃烧系统的核心辅机,其电耗占厂用电率的重要比重。本文系统阐述了一次风机在火电机组中的功能定位与运行特性,基于风机相似定律深入分析了变频调速的节能原理,对比了节流调节与变速调节的能耗差异。结合典型工程案例,详细介绍了变频改造的实施方案,涵盖工况调研、变频器选型、系统配置及施工调试等关键环节。通过对改造前后运行参数的实测对比与节电量计算,定量评估了变频调速的节能效果与经济效益。研究表明,变频调速可有效降低一次风机节流损失,显著提升低负荷工况运行效率,具有广阔的推广应用价值。

[关键词] 一次风机; 变频调速; 节能效果

中图分类号: TM621.7 **文献标识码:** A

Analysis of the Energy-Saving Effect of Variable-Frequency Speed Regulation for Primary Air Fans

Dejiang Zhao

Datang Baoji Thermal Power Plant

[Abstract] The primary air fan is a core auxiliary unit in the boiler combustion system of thermal power generating units, and its electricity consumption accounts for a significant proportion of the auxiliary power consumption rate. This paper systematically describes the functional positioning and operating characteristics of primary air fans in thermal power generating units. Based on the fan similarity laws, it analyzes the energy-saving principles of variable-frequency speed regulation in depth and compares the differences in energy consumption between throttling regulation and variable-speed regulation. Combined with a typical engineering case, the paper details the implementation scheme for variable-frequency modification, covering key stages such as operating-condition investigation, variable-frequency drive selection, system configuration, construction, and commissioning. Through measured comparisons of operating parameters before and after the modification and calculations of electricity savings, the energy-saving effect and economic benefits of variable-frequency speed regulation are quantitatively evaluated. The study shows that variable-frequency speed regulation can effectively reduce throttling losses in primary air fans and significantly improve operating efficiency under low-load conditions, demonstrating broad potential for application and promotion.

[Key words] primary air fan; variable-frequency speed regulation; energy-saving effect

引言

一次风机作为火电机组锅炉燃烧系统中输送煤粉和提供一次风的关键设备,其运行可靠性直接影响机组带负荷能力和燃烧稳定性。由于机组频繁参与调峰,一次风机长期处于变工况运行状态,传统入口导叶调节方式在低负荷时段产生大量节流损失,造成电能浪费严重。变频调速技术通过改变电机转速实现风量精确匹配,可从根本上消除节流损耗,已被公认为风机类负载最理想的节能手段。本文结合一次风机变频改造工程实践,系统分析节能效果,为同类设备节能改造提供技术参考。

1 一次风机系统概述与调速原理

1.1 一次风机在火电机组中的功能定位

一次风机是锅炉制粉和燃烧系统的核心动力设备,承担干燥原煤、输送煤粉入炉及提供一次燃烧空气三重功能。直吹式制粉系统中,一次风机出口高压风经空预器加热后进入磨煤机,将煤粉干燥并携带输送至燃烧器喷入炉膛,风量大小直接影响着火温度与燃烧稳定性,对锅炉效率和NO_x排放具有决定性影响。一次风机多采用离心或轴流式设计,额定功率大、连续运行时间长,电耗占厂用电率5%~10%,是主要辅机耗电设备。其运行

可靠性直接关系锅炉燃烧稳定性和机组带负荷能力,故障将导致降出力甚至非计划停运,重要性突出。

1.2 一次风机运行特性与调节需求

一次风机工况随机组负荷频繁变化,调峰时负荷范围通常为50%~100%,对应风量需求在60%~100%波动。风机按锅炉最大连续蒸发量选型,额定风量与全压留有10%~20%裕量,使正常运行时偏离高效区。运行中一次风压需维持在6~12kPa,以满足不同负荷下磨煤机出力和煤粉细度要求,同时需克服整个风烟管道阻力,管道阻力随负荷下降呈平方关系减小。这种“大马拉小车”的设计裕量与变负荷需求的矛盾,使风机长期低效运行,产生大量节流损失,亟需通过调速实现出力与需求的动态匹配,提高全工况效率^[1]。

1.3 变频调速基本原理与技术特性

变频调速通过改变定子供电频率调节电机转速,由公式 $n=60f(1-s)/p$ 可知,电机转速与频率 f 成正比。系统由高压变频器、旁路切换柜、控制系统及冷却装置组成,常用单元串联多电平拓扑,多个低压功率单元串联实现高压输出,具有功率因数高(>0.95)、谐波低(<4%)、波形接近正弦等优点。变频调速在风机负载上有三大优势:软启动使启动电流不超过额定1.5倍,减少电网冲击;无极平滑调节,精度达0.5%以内;显著改善功率因数,减少无功损耗。配置工频旁路回路,故障时可自动切换,确保供电可靠性。

2 风机调速节能的理论基础

2.1 风机相似定律与节能原理

风机相似定律是分析调速节能效果的理论基石。同一台风机转速由 n_1 变化至 n_2 时,在相似工况条件下,风量 Q 与转速 n 一次方成正比($Q_2/Q_1=n_2/n_1$),全压 P 与转速 n 平方成正比($P_2/P_1=(n_2/n_1)^2$),轴功率 N 与转速 n 三次方成正比($N_2/N_1=(n_2/n_1)^3$)。轴功率与转速的三次方关系揭示了变频调速的巨大节能潜力:转速降至额定80%时,风量降至80%,全压降至64%,轴功率仅为额定51.2%,理论上可节约49%。相似定律成立的前提是风机效率不变且管路特性曲线经过原点,实际应用中因效率变化和管路特性影响,实测效果与理论计算存在一定偏差,但在工程估算中仍具有重要指导意义。三次方关系使风量需求降低时,变频调速比任何节流方式都具有不可比拟的节能优势。

2.2 不同调节方式的能耗对比分析

一次风机常用调节方式包括节流调节和变速调节。节流调节通过改变入口导叶角度或出口挡板开度增加系统阻力来改变风机工作点,其本质是人为制造额外阻力消耗压头,电机转速维持额定,风机轴功率按额定转速功率曲线运行。风量降至额定70%时,节流调节下风机轴功率仅下降约10%~15%,大量电能消耗在节流损失上,风机运行效率可降至50%以下。变速调节包括变频调速和液力耦合器调速,通过改变转速使风机特性曲线平移匹配管路需求,轴功率随转速三次方显著下降。风量降至70%时,变频调速理论轴功率降至额定34.3%,比节流调节节省电耗约55%。变频调速相较于液力耦合器具有调节范围更宽(20%~100%)、响

应速度更快、维护成本更低的综合优势,负荷越低其节能优势越突出。

2.3 变频调速的节能空间评估方法

节能空间评估需基于风机实际工况分布进行量化测算,核心思路是计算各典型负荷点节流调节与变频调节的输入功率差值,乘以对应工况年运行小时数后累加求和。评估步骤为:统计机组全年各典型负荷(如100%、90%、75%、60%、50%)下的累计运行小时数;现场实测获取各负荷点节流调节下的电机输入功率;依据风机相似定律(轴功率与风量三次方成正比)推算变频调节下的理论轴功率,并修正变频器效率(96%~98%);最后将各负荷段功率差值与年运行小时数相乘后累加^[2]。以额定功率2000kW风机为例,平均负荷率70%时年节电量可达300万~500万kWh,折合节约标准煤1000~1700吨。评估还应分析各负荷段节能贡献率,识别最佳节能区间,为改造投资提供依据。

3 变频调速系统的工程实施方案

3.1 变频改造前工况调研与数据采集

变频改造前工况调研是确保改造效果的基础,须系统收集和分析风机实际运行数据。调研内容包括:机组近一年各负荷段累计运行小时数、导叶开度与风量对应关系、风机全压和电机功率随负荷变化曲线、现有供电系统容量及接线方式。数据采集选取典型工况点(100%、90%、75%、60%、50%额定负荷)现场实测,使用经校验的功率分析仪、风速风压计等获取准确参数,每种工况稳定运行不少于30分钟,取多组平均值以减少误差。同时应调查风机及电机铭牌参数、检修记录及故障统计资料,评估设备健康状态是否满足改造条件。通过调研可绘制风机实际运行特性曲线和管网阻力曲线,识别当前调节方式下主要损耗来源,为变频器容量选择和控制策略制定提供数据支撑。

3.2 变频器选型与系统配置

变频器选型应遵循“容量匹配、裕度适当、性能可靠”原则。变频器额定电流不应小于电机额定电流1.1倍,且应具备1.5倍额定电流下持续1分钟的过载能力,以适应启动和工况突变冲击。2000kW等级一次风机宜选用6kV或10kV单元串联多电平型高压变频器,输入功率因数0.95以上、谐波满足IEEE 519标准,无需额外配置无功补偿和滤波装置。主回路采用“一拖一”方案,设置工频旁路回路保证变频器故障时快速切换至工频运行,切换时间不超过3秒。控制系统具备与DCS通讯接口(支持Profibus、Modbus等协议),实现远方启停、频率给定和状态监视,配置触摸屏就地操作面板便于调试。冷却系统根据发热量选配空水冷或强制风冷,确保变频器运行环境温度不超过40℃。

3.3 变频改造施工关键技术及调试要点

变频改造施工涉及高压电气安装、控制信号接线和系统联调,须精心组织、规范施工。变频器功率柜和控制柜应布置在独立通风良好的室内,与带电设备保持不小于1.5米安全距离,柜体基础采用槽钢制作并可靠接地。高压电缆敷设时输入输出侧电缆应分槽盒敷设,平行间距不小于300mm,控制电缆选用屏蔽型并与动力电缆间距不小于500mm,严防电磁干扰。系统调试按

“先单体后系统、先空载后带载、先手动后自动”顺序进行: 单体调试校验功率单元触发脉冲和输出电压波形; 空载试验进行变频启动测试最低/最高频率和加减速时间; 带载试验测试不同频率下风机振动和轴承温度; 联调阶段完成与DCS通讯测试和远方程控操作验证。关键调试节点须形成书面记录作为验收依据^[3]。

4 变频调速节能效果实测分析

4.1 实测方法与数据采集方案

节能效果实测采用改造前后对比法, 相同机组负荷和环境条件下分别测试导叶调节和变频调节的运行参数。测试工况覆盖100%、90%、75%、60%、50%额定负荷五个典型点, 每种工况稳定运行不少于1小时。主要测试参数包括: 电机输入电压、电流、有功功率、无功功率(采用精度0.2级功率分析仪)、风机入口风量和全压、导叶开度、变频器频率、机组负荷等。每5分钟记录一组数据, 连续不少于12组, 剔除异常值后取算术平均值。为消除煤质和环境变化影响, 改造前后测试安排在环境温度偏差不得超过5℃的相近条件下进行。所有仪表须经计量检定合格, 测试人员经统一培训, 确保数据采集准确性和可追溯性。

4.2 改造前后运行参数对比

某300MW机组一次风机(额定功率2240kW, 额定风量120t/h, 额定全压12kPa)变频改造后参数显著变化。100%负荷下, 改造前导叶开度82%、电流168A、功率2150kW; 改造后导叶全开、频率48.5Hz、电流145A、功率1780kW, 节电率17.2%。75%负荷下, 改造前导叶开度65%、电流152A、功率1850kW; 改造后频率42.0Hz、电流102A、功率1210kW, 节电率34.6%。50%负荷下效果最突出, 改造前功率1520kW, 改造后仅790kW, 节电率48.0%。改造后风压控制更平稳, 波动由±0.8kPa缩至±0.2kPa; 调节响应时间由120秒缩短至40秒。风机运行效率全负荷范围内由55%~72%提升至78%~88%, 低负荷段改善尤为明显。

4.3 节电量计算与节能效果评价

依据全年负荷分布(年利用5500h: 100%占15%、90%占25%、75%占30%、60%占20%、50%及以下占10%), 计算年综合节电量: 100%负荷节电 $370\text{kW} \times 825\text{h} = 30.5\text{万kWh}$; 90%节电 $520\text{kW} \times 1375\text{h} = 71.5\text{万kWh}$; 75%节电 $640\text{kW} \times 1650\text{h} = 105.6\text{万kWh}$; 60%节电 $680\text{kW} \times 1100\text{h} = 74.8\text{万kWh}$; 50%节电 $730\text{kW} \times 550\text{h} = 40.2\text{万kWh}$ 。

全年累计节电322.6万kWh。按电价0.35元/kWh计, 年节电费约112.9万元。折算标准煤(供电标煤耗300g/kWh)年节约968吨, 减排CO₂约2580吨、SO₂约8.2吨。厂用电率下降约0.28个百分点, 平均综合节电率34.1%, 节能效果显著。

4.4 投资回收期与经济性分析

本次变频改造总投资395万元: 变频器设备费210万元、辅材费45万元、土建安装费65万元、设计调试费35万元、其他40万元。年新增运维成本约15万元(备件检修8万元、冷却电费3万元、人工4万元), 年净收益约97.9万元, 静态投资回收期 $395 \div 97.9 \approx 4.0$ 年。考虑15年寿命期内电价上涨和设备折旧, 动态回收期约4.8年, 内部收益率约19.5%, 高于电力行业基准收益率8%。间接效益包括: 轴承更换周期由3年延至5年, 年均节约大修费8万元; 调节品质改善提升燃烧稳定性, 降低非计划停运风险; 启动电流大幅减少降低对厂用电系统冲击。综合直接与间接效益, 全寿命周期净现值约680万元, 经济性优良。

5 结束语

一次风机变频调速是火电机组节能降耗的有效技术路径。本文从风机相似定律出发, 阐述了变频调速的节能原理, 对比了节流与变速调节的能耗差异, 明确了低负荷工况下变频调速的显著优势。变频调速还改善了调节品质和运行稳定性, 延长了设备检修周期。建议在火电机组辅机节能改造中推广应用, 同时应重视变频器运行环境管理和低负荷喘振防控, 确保系统长期安全高效运行。

[参考文献]

- [1]王鹏飞. 基于矿井主通风机上变频调速节能技术要点分析[J]. 当代化工研究, 2022(5): 90-92.
- [2]李小平. 高压变频调速技术在火电厂的应用研究[J]. 电力设备管理, 2023(20): 87-89.
- [3]吴玥, 王志雄, 范海水. 火电机组一次风机变频改造节能效果算法研究[J]. 能源科技, 2025, 23(4): 90-92.

作者简介:

赵得江(1994--), 男, 陕西宝鸡人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 热电厂锅炉安全运行、燃烧优化、低氮减排及节能降耗技术研究。