

一种全工况抽真空节能装置在1000MW机组的应用情况

刘宏展 苏志豪 潘泳江 蔡志远 万沃洋

广东粤电博贺能源有限公司, 中国·广东 茂名 525400

摘要: 针对 1000MW 机组传统水环真空泵能耗高、真空波动大等问题, 广东粤电博贺能源 1 号机组应用全工况多级抽真空节能装置。现场试验表明, 装置可稳定维持凝汽器真空, 真空度提升 0.17kPa, 运行电流由 392A 降至 93.8A, 节电率 77%, 年节电 117.76 万 kW·h。设备运行稳定、联锁可靠, 为大型机组真空节能改造提供了成功范例。

关键词: 1000MW 机组; 双背压凝汽器; 多级罗茨真空泵; 全工况; 节能改造

Application of a Full-condition Energy-saving Vacuum Extraction Device in 1000MW Unit

Liu Hongzhan, Su Zhihao, Pan Yongjiang, Cai Zhiyuan, Wan Woyang

Guangdong Yuedian Bohe Energy Co., Ltd., China Guangdong Maoming 525400

Abstract: A full-condition multi-stage vacuum energy-saving device was applied to solve the problems of high energy consumption and unstable vacuum in a 1000MW unit. The results show that the vacuum increased by 0.17kPa, the operating current decreased from 392A to 93.8A with 77% energy saving, and annual power saving reached 1.1776 million kW·h. The device operates stably and provides a reference for similar units.

Keywords: 1000MW unit; Double-backpressure condenser; Multi-stage roots vacuum pump; Full-condition; Energy-saving transformation

1 研究背景

我国能源结构长期以火电为主, 1000MW 超超临界机组凭借高参数、高效率、低能耗的优势, 成为当前主力发电机型, 在保障电力供应、支撑能源安全方面发挥关键作用。但随着新能源装机规模快速扩张、电网调峰需求不断增加, 火电行业面临深度调峰、节能降耗、低碳减排三重压力, 厂用电率控制、能耗指标优化成为火电企业核心竞争力。

在 1000MW 机组各项能耗中, 冷端系统(凝汽器 + 真空泵)能耗占厂用电率的 1.5%~2.0%, 是节能改造的重点领域。传统真空系统普遍采用水环式真空泵, 依靠水环密封形成真空, 技术成熟但缺陷明显:

(1) 能耗高: 机组稳定运行时, 维持真空所需抽气量较小, 但水环泵仍满负荷运行, 电能浪费严重;

(2) 真空稳定性差: 极限真空受循环水温度影响大, 夏季水温升高会导致真空度下降 0.5~1.0kPa, 直接影响机组发电效率;

(3) 工况适应性弱: 机组启机时抽速不足、低负荷运行效率低、设备故障时无冗余保护, 易引发真空突降、机组跳闸风险;

(4) 维护成本高: 水环泵易磨损、汽蚀, 密封件更换

频繁, 长期维护费用高。

为解决上述问题, 行业内陆续开展真空系统节能改造探索, 主流方案包括单级罗茨泵改造、二级罗茨泵改造、变频水环泵改造等, 但均存在工况覆盖不全、节能幅度有限、可靠性不足等短板, 难以满足 1000MW 机组全工况高效运行需求。

2 国内外研究现状

国外火电真空系统节能技术起步较早, 多采用多级罗茨真空泵 + 水环前级泵组合方案, 核心优势是抽速大、极限真空高、能耗低, 广泛应用于大型电站、化工、冶金等领域, 但设备价格昂贵、维护依赖进口、适配国内机组工况优化不足, 推广受限。

国内研究聚焦于低成本、高适配、国产化方向, 近年来二级罗茨泵改造技术逐步成熟, 节能率可达 50%~60%, 但仍存在明显缺陷:

(1) 启机能力不足: 二级罗茨泵抽速有限, 机组启机建立真空时间长, 影响开机效率;

(2) 低负荷效率低: 低负荷时抽气量小, 二级泵组仍需高负荷运行, 节能效果大幅下降;

(3) 可靠性不足: 单套泵组故障时无法维持真空, 需依赖备用泵, 系统冗余度低;

(4) 疏水逻辑不完善: 传统疏水罐排水时易破气, 导致真空突降, 威胁机组安全。

现有研究多针对单一工况节能, 未形成覆盖启机、高负荷、低负荷、故障保护的全工况解决方案, 工程应用中易出现“节能不省心、稳定不高效”的矛盾。

3 研究意义

广东粤电博贺能源有限公司 1 号 1000MW 机组为典型超超临界双背压凝汽器机组, 原有真空系统配置 3 台水环真空泵 (A、B、C), 长期存在能耗高、真空波动大、维护频繁等问题。本次改造引入全工况多级抽真空节能装置, 通过三级水冷罗茨泵 + 水环前级泵 + 智能控制系统 + 自动疏水系统一体化设计, 实现机组全工况高效运行, 研究意义体现在:

(1) 节能效益显著: 大幅降低真空系统能耗, 减少厂用电率, 降低发电成本, 提升企业经济效益;

(2) 机组效率提升: 优化凝汽器真空度, 降低机组热耗, 减少发电煤耗, 助力火电低碳减排;

(3) 安全可靠增强: 全工况冗余设计、故障联锁保护、智能疏水逻辑, 避免真空突降风险, 保障机组稳定运行;

(4) 行业示范价值: 形成 1000MW 机组真空系统全工况节能改造的成熟方案, 为同类机组改造提供参考, 推动火电节能技术国产化、规模化应用。

4 研究内容与技术路线

4.1 研究内容

本文以广东粤电博贺能源有限公司 1 号 1000MW 机组为研究对象, 围绕全工况多级抽真空节能装置的设计、安装、调试、运行、效益分析展开系统研究, 核心内容包括:

(1) 1000MW 机组传统真空系统缺陷与改造需求分析;

(2) 全工况多级抽真空节能装置的系统设计、设备配置、控制逻辑优化;

(3) 节能装置现场安装工艺、调试方案、全工况运行测试;

(4) 改造前后真空参数、能耗指标、设备性能对比分析;

(5) 节能、经济、安全、环保效益综合评估;

(6) 同类机组推广应用建议与技术展望。

4.2 技术路线

本文技术路线遵循“需求分析→方案设计→设备选型

→安装调试→运行测试→效益分析→结论展望”的逻辑, 依托博贺电厂 1 号机组改造工程实际数据, 结合图纸、合同、调试报告等资料, 确保研究内容真实、数据准确、结论可靠。

5 设备概况与改造需求

5.1 1000MW 机组及原有真空系统概况

广东粤电博贺能源有限公司 1 号机组为 1000MW 超超临界凝汽式汽轮机, 采用双背压凝汽器设计, 高压侧背压、低压侧背压存在合理压差, 提升机组循环效率。

原有真空系统配置 3 台水环式真空泵 (A、B、C), 型号为 2BE1 353, 配套电机功率 110kW, 正常运行时 2 用 1 备, 维持凝汽器真空。系统主要参数:

凝汽器设计真空: -95.6kPa ;

水环泵额定抽速: $2500\text{m}^3/\text{h}$;

正常运行电流: $180 \sim 210\text{A}$ / 台;

夏季极限真空: $-94.0 \sim -95.0\text{kPa}$;

冬季极限真空: $-96.5 \sim -97.0\text{kPa}$ 。

5.2 原有真空系统存在的核心问题

5.2.1 能耗居高不下

机组稳定运行 (负荷 $70\% \sim 100\%$) 时, 凝汽器漏气量小, 维持真空所需抽气量仅为水环泵额定抽速的 $20\% \sim 30\%$, 但水环泵仍满负荷运行, 2 台泵总电流达 392A , 年耗电量超 $235\text{万 kW} \cdot \text{h}$, 电能浪费严重。

5.2.2 真空稳定性差

循环水温度对真空影响显著: 夏季水温 $28 \sim 32^\circ\text{C}$ 时, 凝汽器真空仅 $-94.0 \sim -95.0\text{kPa}$; 冬季水温 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 时, 真空提升至 $-96.5 \sim -97.0\text{kPa}$, 季节波动幅度达 $1.5 \sim 2.0\text{kPa}$, 直接导致机组热耗波动、发电效率不稳定。

5.2.3 工况适应性不足

启机工况: 水环泵抽速有限, 机组从 0 负荷建立真空需 $4 \sim 5$ 小时, 开机效率低;

低负荷工况: 负荷低于 50% 时, 凝汽器排汽量小, 水环泵效率进一步下降, 能耗浪费加剧;

故障工况: 单台水环泵故障时, 需立即启动备用泵, 切换过程中真空易波动, 存在跳闸风险。

5.3 改造核心需求

基于原有真空系统缺陷, 本次改造核心需求为:

(1) 全工况适配: 覆盖机组启机、高负荷、低负荷、故障保护全场景, 无需依赖备用泵;

(2) 大幅节能: 稳态运行节电率 $\geq 70\%$, 降低厂用电率;

(3) 真空优化: 凝汽器真空度改善 $\geq 0.1\text{kPa}$, 高低背压差 $\geq 1\text{kPa}$;

(4) 维护简便: 模块化设计、抗腐蚀材质, 延长维护周期、降低维护成本。

6 全工况多级抽真空节能装置系统设计

6.1 装置整体架构

全工况多级抽真空节能装置 (D 真空泵组) 由进气隔离单元、多级罗茨泵组、级间冷却单元、水环前级泵、气液分离单元、疏水单元、智能控制单元七大核心单元组成:

进气隔离单元: 对接双背压凝汽器, 实现高低压侧进气精准控制;

多级罗茨泵组: 核心抽气单元, 三级串联, 实现大抽速、低能耗;

级间冷却单元: 冷却各级罗茨泵排出的高温气体, 降低功耗、提升效率;

水环前级泵: 维持系统极限真空, 排出不凝气体;

气液分离单元: 分离气水混合物, 液体回流、气体排放;

疏水控制单元: 持续负压疏水;

智能控制单元: 就地 + 远程双控, 实现工况自适应、故障联锁保护。

6.2 核心设备配置

6.2.1 多级罗茨泵组

罗茨泵组为装置核心, 采用三级水冷罗茨泵串联设计, 各级泵体为双层水冷结构、五点机械密封, 材质为不锈钢, 抗腐蚀、长寿命, 关键参数如下:

一级水冷罗茨泵: 抽速 $40000\text{m}^3/\text{h}$, 配套西门子 30kW 电机, 五点机械密封, 水冷降温;

二级水冷罗茨泵: 抽速 $15000\text{m}^3/\text{h}$, 配套西门子 22kW 电机, 五点机械密封, 水冷降温;

三级水冷罗茨泵: 抽速 $5000\text{m}^3/\text{h}$, 配套西门子 15kW 电机, 五点机械密封, 水冷降温。

6.2.2 水环前级泵

采用双级不锈钢水环真空泵, 配套西门子 37kW 电机, 位于三级罗茨泵下游, 作用是维持系统极限真空、排出不凝气体, 弥补罗茨泵极限真空不足的缺陷。

6.2.3 级间冷却单元

配置 3 台钛管换热器, 换热管为钛管、管板为钛与 2205 复合板、外壳为 316L 不锈钢, 单台换热面积 $\geq 20\text{m}^2$, 分别串联于一级、二级、三级罗茨泵之间, 接入

闭式冷却水 (DN50), 冷却泵体及压缩蒸汽, 降低罗茨泵功耗、提升抽气效率。

6.2.4 进气隔离单元

总进气电动门: DN350, 杰豪阀体配川仪电动头, 控制总进气;

高压进气调节电动门: DN250, 杰豪阀体配川仪电动头, 调节高压侧进气;

低压进气电动闸阀: DN250, 杰豪阀体配川仪电动头, 控制低压侧进气。

6.2.5 疏水控制单元

抽速 $50\text{m}^3/\text{h}$ 的功率为 3kW 的小水环真空泵, 和前级水环真空泵共用换热器和气液分离器。

6.2.6 智能控制单元

就地控制柜 (LCP-1): 集成控制模块、操作面板、指示灯, 实现就地控制;

DCS 远程通讯模块: 和利时 DCS 卡件 (DO/DI/AI/AO), 接入机组 DCS 系统, 实现远程监控、参数调节、联锁保护;

检测仪表: 压力变送器 (rosemount 3051TA2)、温度传感器 (PT100 $0-100^\circ\text{C}$)、电流传感器, 实时监测设备运行参数。

6.3 全工况控制逻辑设计

6.3.1 启机工况 (负荷 $0\sim 30\%$)

控制逻辑: 全开总进气电动门、高压进气调节电动门、低压进气电动闸阀; 一级 + 二级 + 三级罗茨泵 + 水环前级泵满负荷运行, 抽速达 $40000\text{m}^3/\text{h}$, 快速抽出凝汽器内空气和蒸汽, 3 小时内建立凝汽器真空至 -95kPa 以下, 大幅缩短启机时间。

6.3.2 高负荷稳态工况 (负荷 $70\sim 100\%$)

控制逻辑: 关闭高压进气调节电动门, 保持低压进气电动闸阀全开; 一级 + 二级罗茨泵运行、三级罗茨泵备用、水环前级泵运行, 匹配凝汽器低抽气量需求, 运行电流稳定在 93.8A , 节能效果最大化。

6.3.3 低负荷稳态工况 (负荷 $30\sim 70\%$)

控制逻辑: 调节高压、低压进气门开度, 匹配低负荷排汽量; 一级罗茨泵 + 水环前级泵运行、二级 + 三级罗茨泵备用, 最低功耗运行, 避免低负荷能耗浪费。

6.3.4 故障 / 保护工况

控制逻辑:

(1) 单级罗茨泵故障: 任意一级罗茨泵故障, 系统自动联锁, 剩余两级罗茨泵 + 水环前级泵继续运行, 维持凝

汽器真空，无停机风险；

(2) 系统故障：DCS 触发故障信号，总进气电动门、高低压进气门自动关闭，同时联锁启动原有 A、C 水环真空泵，保障机组真空安全。

7 现场安装与调试

7.1 安装情况

2025 年 8-10 月完成设备安装、管道焊接、电缆敷设及系统联调，抽真空管道全氩弧焊并经无损检测，系统气密性试验合格，满足运行要求。

7.2 调试过程

2025 年 11 月 15 日开展全工况调试，依次进行真空维持、参数稳定性、疏水逻辑、故障联锁测试，连续 12 小时稳态运行，全程无异常。

7.3 调试结果

凝汽器真空由 -96.76kPa 提升至 -96.93kPa ，改善 0.17kPa ；运行电流降至 93.8A ，节电率 77%；设备振动、温度、噪声均达标，疏水逻辑可靠，故障联锁动作精准。

8 应用效益

8.1 节能效益

年节电量 $117.76\text{万 kW}\cdot\text{h}$ ，节约电费约 47 万元；真空优化降低机组热耗，年减排 CO_2 6500 吨，低碳效益显著。

8.2 经济与安全效益

项目投资 166.2 万元，静态回收期约 8 个月；维护周期延长、成本降低；真空稳定性提升，消除破气风险，保障机组安全稳定运行。

9 结语

全工况多级抽真空节能装置适配 1000MW 机组全工况运行，节能效果显著、安全可靠、经济性优，为大型火电真空系统改造提供成熟技术方案，具备广泛推广价值。

参考文献：

- [1] 陈思. 大型火电机组真空系统节能改造技术[J]. 电力工程, 2017.
- [2] 罗韶辉. 百万机组真空优化实践[J]. 电站辅机, 2012.