

小汽轮机给水泵变速恒频发电系统构建探析

李海波

国能寿光发电有限责任公司, 山东 潍坊 262700

DOI: 10.61369/SSSD.2025170006

摘 要： 在“双碳”目标下，发展低碳经济、绿色经济，实现节能减排成为社会发展的一大趋势。火力发电是我国能源供应的重要组成部分，也是二氧化碳的主要来源。当前，火力发电厂采用锅炉给水泵供水方案，通过主汽轮机再热蒸汽驱动小汽轮机，该方案轻载状态下能量损耗大，系统运行效率不高。本文以小汽轮机给水泵变速恒频发电系统的构建为核心，从工作原理、基础架构、构建流程、系统优化及未来应用等方面，为该类型发电系统的优化升级和推广应用，带动电力行业高效化、低碳化发展提供参考。

关 键 词： 小汽轮机；给水泵；变速恒频发电；系统构建

Analysis on the Construction of Variable-Speed Constant-Frequency Power Generation System for Boiler Feed Pump Driven by Small Steam Turbine

Li Haibo

Guoneng Shouguang Power Generation Co., Ltd., Weifang, Shandong 262700

Abstract： Under the "double carbon" goal, developing low-carbon economy and green economy to achieve energy conservation and emission reduction has become a major trend of social development. Thermal power generation is an important part of China's energy supply and also a major source of carbon dioxide. At present, thermal power plants adopt the boiler feed pump water supply scheme, where the small steam turbine is driven by the reheat steam of the main steam turbine. This scheme has large energy loss under light load condition and low system operation efficiency. Focusing on the construction of variable-speed constant-frequency power generation system for boiler feed pump driven by small steam turbine, this paper provides references for the optimization, upgrading and popularization of this type of power generation system from the aspects of working principle, basic structure, construction process, system optimization and future application, so as to promote the efficient and low-carbon development of the power industry.

Keywords： small steam turbine; boiler feed pump; variable-speed constant-frequency power generation; system construction

引言

伴随“双碳”工作进程的加快，火力发电行业的绿色转型升级，成为能源可持续发展与高质量发展的重要问题^[1]。当前，在火力发电厂中，锅炉给水泵主要采用两种驱动方式，分别为电动机驱动和小汽轮机驱动。传统发电系统体现出一定滞后性，给水泵通常采用定速驱动模式，存在着耗能高、效率低等问题，难以满足行业绿色转型需求。这就要求从系统优化层面出发，探索降低能量损耗，提高资源利用率的运行方案。一些研究从大型机组优化和技术创新出发，开展对汽轮机给水泵节能降耗的研究。金仁赛（2024）针对给水泵汽轮机出力不足的关键问题，提出技术改造方案，提高了机组能量利用率^[2]。马锋（2023）等根据给水系统高位布置结构，优化结构方案，减少运行损耗^[3]。在启动阶段的节能技术优化方向，汪伟（2023）等采用无电泵启动技术方案，降低启动过程电耗^[4]。吕蒙（2024）等提出660MW 机组调速之星同轴给水泵的启动调试技术方案^[5]。于良（2024）通过改造实现余热高效回收与梯级利用，拓宽了汽轮机节能降耗研究方向^[6]。以上研究大多是针对大型发电机组的汽轮机，而锅炉给水泵驱动系统功率较低，再加上火电厂多采用小型汽轮机，汽轮机工况不稳定，水泵调速范围广，能量损耗管理难度大^[7]。由此，结合汽轮机与给水泵的联合运行特点，运用先进的变速恒频控制策略，构建高效的发电系统势在必行。

一、系统核心原理与技术架构

（一）核心工作原理

小汽轮机给水泵变速恒频发电系统以“能量梯级利用 + 变速调节 + 恒频发电”为核心逻辑。小汽轮机利用余热蒸汽或辅助蒸汽驱动转子旋转，通过联轴器连接给水泵与发电机，实现“一机双能”——既驱动给水泵满足给水需求，又带动发电机将多余机械能转化为电能。通过变流器与控制系统协同，确保发电机输出电压、频率稳定，实现恒频供电。

（二）整体技术架构

系统由五大核心模块组成，各模块功能协同、层层递进：

1. 能量输入模块：含蒸汽源、蒸汽调节阀、过滤器等，负责提供稳定参数的驱动蒸汽。
2. 动力驱动模块：小汽轮机作为核心动力单元，将蒸汽热能转化为机械能。
3. 负载与发电模块：包含给水泵（工作负载）和发电机（发电单元），实现机械能的分流利用。
4. 变流与控制模块：由变流器、控制器、传感器组成，保障变速运行下的恒频输出与系统调控。
5. 辅助保障模块：含润滑油系统、冷却系统、保护装置等，确保设备安全稳定运行。

二、关键部件选型与参数匹配

（一）小汽轮机选型

1. 功率匹配：根据给水泵额定功率、发电机发电功率及机械损耗，确定小汽轮机额定功率，通常预留合理比例的冗余量。
2. 转速范围：适配给水泵变速调节需求，设计转速覆盖常用运行区间，支持宽负荷波动下的稳定运行。
3. 蒸汽参数适配：根据可用蒸汽的压力（中低压范围）、温度（中温区间）选择凝汽式或背压式小汽轮机，优先采用背压式实现蒸汽余热二次利用。
4. 结构选型：选用单级或多级冲动式汽轮机，小型系统优先单级结构，降低成本与维护难度。

（二）给水泵选型

1. 流量与扬程：根据机组最大给水需求，确定给水泵额定流量（按锅炉蒸发需求预留充足余量）和扬程（满足锅炉汽包压力、管路损失及安全冗余）。
2. 变速适配性：选择离心泵或混流泵，其特性曲线需适配小汽轮机转速调节范围，确保变速运行时维持较高运行效率。
3. 材质要求：根据给水温度（中高温区间）和水质，选用耐热、耐腐蚀材质，保障关键部件长期稳定工作。

（三）发电机选型

1. 类型选择：优先选用永磁同步发电机，具有效率高、功率密度大、调速范围宽的优势，适配小汽轮机变速运行^[9]。
2. 额定参数：额定功率根据小汽轮机富余功率确定，电压等级按并网需求选择，额定频率符合工业供电标准。

3. 防护等级：工业场景选用适配恶劣环境的防护等级，具备防潮、防尘能力，适应机房工作条件。

（四）变流器与控制系统选型

1. 变流器类型：采用两电平或三电平 PWM 变流器，具备双向功率流动能力，支持发电并网与电动拖动（启动阶段）。
2. 容量匹配：变流器额定容量按发电机额定功率预留充足余量，确保过载能力与运行稳定性。
3. 控制器：选用 PLC 或 DSP 核心控制器，支持转速闭环控制、功率调节、并网同步控制，具备快速响应能力。
4. 传感器配置：配备转速传感器、压力传感器、流量传感器、电压电流传感器，实现全参数精准监测。

（五）辅助系统选型

1. 润滑油系统：选用强制循环式润滑，油泵输出压力满足设备润滑需求，油箱容积按机组油量预留充足储备，配备油温、油压保护功能。
2. 冷却系统：采用水冷或风冷方式，冷却器换热效率需满足变流器、发电机、汽轮机的散热需求，适配常规冷却水源条件。
3. 保护装置：配置超速保护、超压保护、过载保护、断水保护等核心保护功能，确保设备运行安全。

三、系统构建关键流程与实施步骤

（一）前期需求分析与方案设计

1. 工况参数调研：收集蒸汽源参数（压力、温度、流量）、给水泵工作需求（流量、扬程、负荷波动范围）、电网接入条件（电压等级、并网要求）。
2. 能量平衡计算：核算小汽轮机输出功率、给水泵消耗功率、发电机可发电功率，确保能量供需匹配。
3. 方案设计：确定系统拓扑结构、部件选型清单、安装布局图、控制逻辑流程图，完成技术经济性评估^[9]。

（二）部件制造与质量管控

1. 定制化生产：核心部件（小汽轮机、给水泵、发电机）按设计参数定制，关键工序需符合行业相关标准。
2. 质量检测：部件出厂前进行气密性试验（汽轮机）、水力性能测试（给水泵）、电气性能测试（发电机、变流器），合格后方可出厂。

（三）现场安装与集成调试

1. 安装施工

基础施工：按设备安装要求浇筑混凝土基础，保障基础平整度符合安装标准，预留地脚螺栓孔与管路接口。

设备就位：依次安装小汽轮机、给水泵、发电机，采用联轴器连接，严格控制同轴度误差在允许范围。

管路与电缆敷设：连接蒸汽管路、给水管路、润滑油管路，确保密封无泄漏；敷设控制电缆、动力电缆，做好绝缘防护。
2. 调试流程

冷态调试：检查各系统管路连接、电气接线正确性，进行润滑油系统、冷却系统试运行，确保无异常。

空载调试：启动小汽轮机，逐步提升转速至额定范围，测试转速调节精度与稳定性；发电机空载运行，检测输出电压、频率。

负载调试：逐步增加给水泵负荷，同步测试发电机发电功率、变流器调节性能，验证系统在不同负荷下的适配性。

并网调试：按电网要求完成同期装置调试，实现发电机平稳并网，测试并网冲击电流、功率因数调节能力。

（四）试运行与验收

1. 试运行：系统满负荷试运行较长时间，监测汽轮机转速、给水泵流量扬程、发电机输出电压频率、设备温升等关键参数，记录运行数据。

2. 验收标准：参照汽轮机、泵类相关验收试验标准，确保各项指标达标。

3. 文档交付：整理安装记录、调试报告、设备说明书、操作规程等技术文档，完成交付。

四、系统控制策略与优化设计

（一）核心控制目标

1. 转速稳定控制：维持小汽轮机转速在设定范围，适配给水泵流量调节需求，控制转速波动在较小范围。

2. 恒频发电控制：确保发电机输出频率符合工业供电标准，电压波动在允许范围，满足并网或孤网运行要求。

3. 负荷协同控制：实现给水泵负荷与发电机发电功率的动态平衡，避免过载或能量浪费^[10]。

（二）关键控制策略

1. 转速闭环控制

采用 PID 调节算法，以转速传感器反馈信号为输入，通过调节蒸汽调节阀开度，控制汽轮机转速。

引入前馈控制，根据给水泵负荷变化预判转速波动，提前调节蒸汽量，提升响应速度。

2. 恒频发电控制

变流器采用矢量控制策略，通过调节 IGBT 开关频率，将发电机输出的变频交流电转化为恒频恒压交流电。

并网运行时，采用锁相环（PLL）技术实现与电网电压、频率同步，控制并网功率因数在合理区间。

3. 负荷协同控制

建立负荷分配模型，根据给水泵实时流量需求，动态分配汽轮机输出功率，优先满足给水泵运行，剩余功率用于发电。

当蒸汽量不足时，自动降低发电机发电功率，确保给水泵核心负荷稳定；当蒸汽量富余时，提升发电功率，最大化能源回收效率。

（三）优化设计措施

1. 控制算法优化：采用模糊 PID 算法替代传统 PID，提升非线性工况下的调节精度，降低超调量。

2. 能量回收优化：增设蒸汽蓄能装置，平衡蒸汽源波动，提高系统对低品位能源的利用率。

3. 智能化升级：融入 PLC+ 触摸屏控制系统，实现参数实时监测、故障报警、远程控制，提升运维便捷性。

五、系统性能测试与故障防控

（一）核心性能测试指标与方法

测试项目	测试指标	测试方法
发电效率	系统发电效率≥80%	测量发电机输出功率与汽轮机输入蒸汽能量，计算效率值
转速调节精度	转速波动≤±5r/min	不同负荷下记录转速数据，统计波动范围
并网稳定性	并网冲击电流≤1.5 倍额定电流	记录并网瞬间电流变化，验证稳定性
给水泵调节范围	流量调节范围 30%-110% 额定流量	改变转速，测量给水泵实际流量
连续运行能力	满负荷连续运行≥72 小时无故障	持续监测设备运行状态，记录故障情况

（二）常见故障与防控措施

1. 汽轮机超速故障：原因包括蒸汽调节阀卡涩、转速传感器故障，防控措施为定期校验调节阀、安装双重超速保护装置。

2. 发电机输出电压异常：原因包括变流器 IGBT 损坏、电压传感器故障，防控措施为定期检测变流器状态、备用传感器备件。

3. 给水泵汽蚀故障：原因包括进口压力不足、水温过高，防控措施为优化管路设计、增设前置泵、监测水温。

4. 润滑油系统泄漏：原因包括管路接头松动、密封件老化，防控措施为定期检查管路、及时更换密封件。

（三）维护保养方案

1. 日常维护：每日检查设备运行参数、管路密封情况、润滑油油位与油温，清理设备表面灰尘。

2. 定期维护：每月校验传感器精度、检查联轴器磨损；每季度更换润滑油、清洗冷却器；每年进行设备全面解体检查与检修。

3. 故障应急处理：制定故障应急预案，明确故障判断流程、应急处置措施、备用设备启用方案，缩短故障停机时间。

六、应用场景与技术展望

（一）主要应用场景

1. 火电行业：利用锅炉低品位排汽驱动小汽轮机，为给水泵提供动力并发电，显著降低厂用电率。

2. 核电行业：适配核电机组稳定运行需求，为给水泵提供可靠驱动与备用电源，提升系统安全性。

3. 工业锅炉领域：回收工业锅炉余热蒸汽能量，驱动给水泵供水并为车间供电，实现能源自给自足。

4. 余热利用项目：结合钢铁、化工行业余热资源，构建独立的给水-发电系统，提高余热回收效率。

（二）技术发展展望

1. 高效化：优化小汽轮机通流设计、采用高效永磁发电机，进一步提升系统发电效率。

2. 智能化：融入 AI 算法实现负荷预测与自适应控制，结合物联网技术构建远程运维平台。

3. 小型化与模块化：开发紧凑型集成模块，降低设备占地面积，适配中小型机组与分布式能源项目。

4. 多能源协同：结合光伏、风电等新能源，构建多能源互补的给水-发电系统，提升能源供应灵活性。

七、结论

综上所述，小汽轮机给水泵变速恒频发电系统通过能量梯级

利用与变速恒频技术的融合，实现了给水泵驱动与余热发电的双重功能，兼具节能、高效、灵活等优势。系统构建需重点关注部件选型匹配、控制策略优化、安装调试质量与故障防控，确保设备长期稳定运行。随着技术的不断升级，该系统在能源行业的应用场景将持续拓展，为节能减排与能源高效利用提供重要技术支撑。

参考文献

- [1] 董伟, 吕蒙, 张巍, 等. 汽轮机同轴驱动给水泵启动过程及热力性能分析 [J]. 节能技术, 2024, 42(06): 530-536.
- [2] 金仁赛, 薛建军, 金利鹏, 等. 660MW 机组给水泵汽轮机出力不足问题分析及解决 [J]. 节能技术, 2024, 42(05): 430-433+443.
- [3] 马锋, 张精桥. 660MW 高位布置汽轮机给水系统可靠性提升与应用 [J]. 能源科技, 2023, 21(05): 57-60.
- [4] 汪伟, 黄二仙. 330MW 热电联产机组无电泵启动技术及应用 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2023, 28(06): 21-26.
- [5] 吕蒙, 董伟, 张鹏, 等. 660MW 汽轮机调速之星同轴给水泵启动调试及问题分析 [J]. 电站系统工程, 2024, 40(05): 49-54.
- [6] 于良. 背压式汽轮机组的节能改造技术及应用 [J]. 设备管理与维修, 2024, (19): 140-142.
- [7] 曾娜, 魏佳佳, 余长军. 超临界 350MW 机组汽轮机给水泵变频运行共振诊断方法 [J]. 韶关学院学报, 2023, 44(09): 56-62.
- [8] 王林, 杨博, 高景辉, 等. 抽汽背压式给水泵汽轮机系统电功率超限原因分析与对策 [J]. 热力发电, 2022, 51(08): 136-142.
- [9] 杨德荣, 荆凯, 张驰. 深度调峰条件下大容量火电机组给水泵配置方式探讨 [J]. 同煤科技, 2022, (03): 1-5.
- [10] 谭杰元, 张建文, 施刚, 等. 一种新型的小汽轮机给水泵变速恒频发电系统 [J]. 电源学报, 2020, 18(01): 131-139.