

BEST 小机启动过程中冲转控制策略改进及安全性提升研究

谷宁

福建华电可门发电有限公司，福建省福州市，350000；

摘要：BEST 小机（背压式汽轮给水泵机组）作为热力系统的核心辅机设备，其启动冲转过程的稳定性与安全性对整个机组的运行效率及可靠性具有决定性影响。本文基于 BEST 小机现有启动冲转控制逻辑，结合变流系统与小汽机的协调控制特性，系统分析当前启动冲转过程中存在的转速波动超标、工况切换延迟、保护逻辑冗余度不足等关键问题。通过优化电动-汽动切换阶段的功率平衡控制策略、完善温升速率保护逻辑、增设故障工况下的双向应急协调机制，提出一套兼顾启动效率与运行安全性的综合改进方案。经理论仿真验证，改进后的控制策略可将冲转过程中转速波动幅度控制在 $\pm 2\%$ 以内，工况切换响应时间缩短 30%，同时有效规避因测点故障导致的保护拒动或误动风险，为 BEST 小机启动过程的安全稳定运行提供有力的技术支持。

关键词：BEST 小机；启动冲转；控制策略优化；安全性提升

DOI：10.64216/3080-1508.26.03.076

引言

在热力发电及工业动力系统中，BEST 小机负责锅炉给水，其启动控制影响机组运行经济性与安全性。传统采用分段控制模式，但存在转速超调、工况切换震荡、保护误动等问题。现有研究多关注正常运行阶段，对启动冲转控制策略优化较少。本文研究 BEST 小机启动冲转控制策略，结合四象限运行特性、汽门调节及保护逻辑，以优化启动过程。

1 BEST 小机启动冲转控制现状及问题分析

1.1 现有启动冲转控制流程

根据 BEST 小机系统设计规范，其启动冲转过程主要划分为两个核心阶段：电动启动阶段与汽机冲转进入阶段。

电动启动阶段：变流系统控制小发电机运行于电动机模式，拖动给水泵组从静止状态平稳升至 30%THA 工况转速（约 2422rpm）。此阶段小汽机仅通入小流量辅汽进行鼓风冷却，不参与轴系动力输出；

汽机冲转进入阶段：小汽机通入工作蒸汽并逐步开大汽门，变流系统同步控制小发电机从电动工况向发电工况过渡，同时维持轴系转速稳定，直至小汽机汽门达到目标开度（全开或预设固定开度），完成整个冲转过程。

现有控制逻辑中，变流系统采用“转速外环-转矩电流内环”的双环控制策略，小汽机汽门调节仅依据蒸汽压力进行开环控制，两者之间缺乏动态协同协调机制；此外，保护系统依赖“三取二”测点逻辑，未针对特殊工况下的测点故障设计应急应对策略，存在一定运行风险。

1.2 现存问题分析

1.2.1 电动-汽动切换阶段功率平衡失调

在汽机冲转进入阶段，小汽机汽门开度逐步增大，出力从 0 提升至 30%THA 工况下的 14.115MW，而变流系统需同步将小发电机出力从 3.738MW（电动工况）调整至-10.377MW（发电工况）。现有控制策略中，变流系统与小汽机的调节指令独立下发，未建立实时功率反馈协调机制，易引发以下问题：

当小汽机汽门开度调节速率过快时，轴系剩余功率骤增，变流系统转矩电流调节存在滞后性，导致转速超调，最大超调量可达 5%；

当小汽机汽门开度调节速率过慢时，变流系统需长期维持高负荷电动运行状态，导致变流器直流母线电压出现异常波动，缩短设备使用寿命。

1.2.2 温升速率保护逻辑存在漏洞

根据 DCS 跳闸 METS 项设定要求，小机启动过程中温升速率限制值为 $15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，温度保护定值为 95°C ，自动复归条件为“温度 $<90^{\circ}\text{C}$ （死区 $\text{DB}=5^{\circ}\text{C}$ ）且温升速率 $<15^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ”。但在特殊工况下（如磨瓦故障导致温度 1s 内从 75°C 升至 91°C ），现有逻辑存在明显缺陷：

温升速率（ $16^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ）超过限制值时，保护系统自动切除速率限制功能，导致温度保护拒动，无法及时响应过热风险；

自动复归温度固定设定为 90°C ，当温度降至 85°C 时仍无法满足复归条件，延长保护切除时间，大幅增加设备过热损坏风险。

1.2.3 故障工况下应急协调机制缺失

现有控制策略中，变流系统与小汽机的故障信号仅通过硬线进行单向传输，未建立双向应急协调机制，当出现以下故障时，易导致冲转过程中断：

变流系统发生可自恢复故障(如高低电压穿越、控制器冗余切换)时,短时间封波导致轴系失去转矩支撑,小汽机未及时调整汽门开度,转速波动幅度可达 $\pm 8\%$;

小汽机发生遮断(空转)故障时,变流系统需拖动轴系维持30%THA工况运行,但现有逻辑中变流系统接收故障信号存在延迟,导致转速下降超过10%后才启动应急控制,影响轴系稳定性。

1.2.4 测点保护逻辑冗余不足

BEST小机启动过程中,轴瓦温度、轴向位移、润滑油压等关键参数依赖“三取二”测点保护逻辑,但现有逻辑存在以下问题:

当任一测点出现坏点且数值超过跳闸值时,仅通过与其他测点的偏差判定坏点,未考虑多测点同时故障的极端情况(如坏点数量 ≥ 2 时,保护系统出现拒动);

温度、压力等核心测点未增设品质判断功能(如LT信号为FALSE时未触发备用测点切换),导致恶劣工况下测点失效后,保护系统失去稳定监测依据,增加运行风险。

2 BEST小机启动冲转控制策略改进

针对上述问题,结合变流系统四象限运行特性与小汽机调节规律,从功率平衡协调、保护逻辑优化、应急机制完善三个维度提出改进策略,确保启动冲转过程的安全稳定。

2.1 电动-汽动切换阶段功率平衡协调控制

2.1.1 增设功率闭环协调模块

在变流系统与小汽机控制系统之间增设功率闭环协调模块,实现以下核心功能:

实时功率反馈:变流系统实时采集小发电机输出功率(测量精度 $\pm 0.5\%$),小汽机控制系统同步采集汽门开度与蒸汽压力信号,通过ModbusTCP/IP通讯协议将数据传输至协调模块,确保信息实时交互;

动态调节指令生成:协调模块依据“小汽机出力=给水泵所需功率+小发电机出力”的功率平衡公式,计算小汽机汽门开度调节速率(建议控制在 $0.5\%/s \sim 1\%/s$)与变流系统转矩电流调节量,避免两者调节失衡;

转速波动抑制:当轴系转速偏差超过 $\pm 1\%$ 时,协调模块优先调节变流系统转矩电流(响应时间 $< 100ms$),同时微调小汽机汽门开度,将转速波动幅度严格控制在 $\pm 2\%$ 以内。

2.1.2 优化变流器飞车启动逻辑

针对热机启动工况下变流器飞车启动过程,优化控制逻辑如下:

转速预跟踪:变流器在闭合机侧开关S2前,通过高精度转速传感器采集轴系当前转速,预先生成与实际

转速匹配的交流电频率,避免开关闭合瞬间产生转矩冲击;

励磁渐变控制:励磁系统采用渐变式励磁投入方式,将励磁电流从0升至额定值的时间从5s延长至10s,减少励磁投入过程中电压波动对变流系统的影响;

并网平滑切换:当变流器输出频率与轴系转速频率偏差 $< 0.5Hz$ 时,逐步增大机侧变换器MSC的输出转矩,实现无冲击并网,切换时间缩短至2s以内,确保并网过程平稳。

2.2 温升速率保护逻辑优化

2.2.1 改进温升速率限制切除机制

针对特殊工况下温升速率保护拒动问题,优化逻辑设计:

分级切除策略:将温升速率限制划分为两级,一级限制为 $15^{\circ}C/s$ (正常工况),二级限制为 $20^{\circ}C/s$ (特殊工况)。当温度1s内升高超过 $15^{\circ}C$ 但未超过 $20^{\circ}C$ 时,不切除速率限制功能,仅触发报警信号;当温升速率超过 $20^{\circ}C$ 时,才切除速率限制功能,并同步触发备用冷却系统(如应急油泵),强化过热防控;

动态复归温度设定:将自动复归温度从固定值 $90^{\circ}C$ 改为动态设定模式,根据当前温度与跳闸值的差值自动调整复归温度(如温度为 $91^{\circ}C$ 时,复归温度设定为 $86^{\circ}C$;温度为 $88^{\circ}C$ 时,复归温度设定为 $83^{\circ}C$),大幅缩短保护复归时间,避免保护系统长期处于切除状态。

2.2.2 增设测点品质判断与备用切换功能

针对测点故障导致的保护失稳问题,优化测点保护逻辑:

品质判断功能:为轴瓦温度、轴向位移等关键测点增设品质判断模块,当测点信号出现以下情况时,判定为品质劣化(FALSE):信号波动幅度 $> 5\%/s$ 、信号与平均值偏差 $> 10\%$ 、信号中断时间超过100ms;

备用测点切换:每个关键参数设置4个测点(原设计为3个),采用“四取二”保护逻辑。当1个测点品质劣化时,自动切换至备用测点,维持“三取二”逻辑;当2个测点品质劣化时,切换为“二取一”逻辑,并触发紧急报警;当3个及以上测点品质劣化时,启动独立的应急保护(如基于转速的间接保护),彻底避免保护拒动风险。

2.3 故障工况下应急协调机制完善

2.3.1 变流系统故障应急协调

当变流系统发生可自恢复故障(如高低电压穿越、控制器冗余切换)时,完善应急控制逻辑:

故障信号双向传输:变流系统在发生故障的同时,

通过专用硬线向小汽机控制系统发送“故障暂态信号”，小汽机控制系统接收到信号后，立即将汽门开度固定在当前值，避免汽门误调节引发的转速波动；

变流器快速恢复控制：变流系统故障穿越完成后，通过转速预跟踪功能快速匹配当前轴系转速，1s内恢复转矩输出，将转速波动幅度控制在 $\pm 3\%$ 以内，确保轴系稳定；

故障记录与分析：在协调模块中增设故障记录功能，自动记录故障发生时间、故障类型、各设备运行参数，为后续故障溯源与策略优化提供数据支持。

2.3.2 小汽机故障应急协调

当小汽机发生遮断（空转）故障时，优化应急控制流程：

故障信号优先传输：小汽机遮断信号通过专用硬线通道传输至变流系统，传输延迟控制在50ms以内，避免变流系统接收信号延迟导致的转速下降；

变流器应急出力控制：变流系统接收到遮断信号后，立即从发电工况切换至电动工况，根据当前转速自动调整出力（如转速为2422rpm时，出力调整为3.738MW），确保轴系转速稳定；

小汽机恢复协调：当小汽机故障解除后，变流系统根据小汽机的恢复信号，逐步降低电动出力，同时小汽机逐渐增大汽门开度，实现从电动工况向汽动工况的平滑切换，切换过程中转速波动 $< \pm 2\%$ ，保障过渡过程稳定。

3 安全性提升效果验证

3.1 理论验证方法

采用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建 BEST 小机启动冲转过程仿真模型，模型涵盖变流系统（网侧变换器 GSC、机侧变换器 MSC）、小汽机、给水泵组、协调控制模块等核心子系统。仿真参数基于实际设备参数设定（如变流器容量 25MVA、小汽机额定功率 57.056MW、给水泵额定转速 5192rpm）。通过对比改进前后的关键性能指标（转速波动幅度、工况切换时间、保护动作正确率），验证改进策略的有效性与可行性。

3.2 关键指标改善效果

3.2.1 转速波动幅度

改进前，电动-汽动切换阶段转速最大波动幅度为 $\pm 5\%$ ，热机启动工况下变流器飞车启动时转速波动幅度为 $\pm 4\%$ ；改进后，通过功率闭环协调与飞车启动逻辑优化，电动-汽动切换阶段转速波动幅度降至 $\pm 2\%$ ，热机启动工况下飞车启动时转速波动幅度降至 $\pm 1.5\%$ ，均满足

启动过程中转速稳定要求（允许波动范围 $\pm 3\%$ ）。

3.2.2 工况切换时间

改进前，电动-汽动切换时间（从电动工况切换至发电工况）为15s，热机启动工况下变流器飞车启动时间为8s；改进后，通过转速预跟踪与励磁渐变控制，电动-汽动切换时间缩短至10s，飞车启动时间缩短至5s，启动效率提升30%以上，有效缩短机组启动周期。

3.2.3 保护动作正确率

改进前，当1个测点故障时，保护动作正确率为90%（存在误动风险）；当2个测点故障时，保护拒动率为100%。改进后，通过增设品质判断与备用切换功能，1个测点故障时保护动作正确率提升至100%，2个测点故障时保护动作正确率提升至95%，显著提升保护系统的可靠性，有效避免保护失稳。

3.3 典型故障工况应对效果

3.3.1 温升速率异常工况

当因磨瓦故障导致温度1s内从75°C升至91°C（温升速率16°C/s）时，改进前保护系统自动切除速率限制功能，导致温度保护拒动；改进后，采用分级切除策略，不切除速率限制功能，同时触发应急冷却系统，温度在5s内降至85°C，有效避免设备过热损坏。

3.3.2 变流系统高低电压穿越工况

当变流系统发生高低电压穿越（电压跌落至额定值的60%，持续时间0.5s）时，改进前变流系统封波导致轴系失去转矩支撑，转速下降8%；改进后，通过应急协调机制，小汽机固定汽门开度，变流系统故障恢复后1s内稳定转速，波动幅度仅2%，确保轴系运行稳定。

4 结论

本文针对 BEST 小机启动问题，提出综合改进方案：增设功率闭环模块、优化飞车启动逻辑，控制转速波动 $\pm 2\%$ 内，缩短切换时间30%；改进保护逻辑与测点判断，保护动作正确率达95%以上；完善应急机制，转速恢复时间缩至1s内。后续研究可深化智能化控制、多工况适配性与数字孪生技术应用。

参考文献

- [1] 丁莉. 变频恒压供水控制系统研究[D]. 天津大学, 2007. DOI: 10.7666/d.y1359644.
- [2] 顾跃. 基于 PLC 的变频调速恒压供水系统研究[D]. 中南大学, 2003. DOI: 10.7666/d.w028252.
- [3] 吴晶. 某热电厂1号机AB给水泵汽轮机振动原因分析及处理[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2017(17): 2. DOI: CNKI: SUN: CSJL. 0. 2017-17-137.