

BEST 小机变工况下转速控制策略优化与动态响应特性研究

谷宁

福建华电可门发电有限公司, 福建省福州市, 350000;

摘要: 抽汽背压式给水泵汽轮机(简称 BEST 小机)在变工况运行过程中,面临的转速控制稳定性不足、动态响应滞后等突出难题,本文以 1000MW 超超临界二次再热机组配套的 BEST 小机为研究对象,系统剖析其变流器与数字电液调节系统(MEH)协同控制机理,重点探究典型变工况下转速控制核心矛盾。通过构建多层优化体系,并结合危急跳闸系统(METS)保护逻辑冗余设计,形成全方位控制策略优化方案。现场动态试验数据验证显示:优化后的控制策略成效显著,在变流器故障甩负荷工况下,转速最大飞升量从 56r/min 降至 22r/min,给水流量波动幅度从 321.52t/h 缩减至 85t/h;高加解列工况下,小发电机功率超调量控制在 5%以内,转速恢复时间缩短 40%。该研究成果有效提升了 BEST 小机变工况运行稳定性与动态响应速度,为同类型机组控制策略优化提供了坚实的理论依据与宝贵的工程实践参考。

关键词: BEST 小机; 变工况; 转速控制; 动态响应; 策略优化; 超超临界机组

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.017

引言

在超超临界二次再热机组中, BEST 小机是关键辅机,肩负着驱动给水泵与回收多余做功的双重重任,其运行状态直接影响机组的给水流量与热经济性。由于 BEST 小机需动态适配复杂工况,因此对转速控制提出了极为严苛的要求。当前采用的“变流器+MEH”控制模式仍存在诸多不完善之处,传统控制策略主要面临主控权切换易致超调、背压与转速耦合需人工干预、故障工况参数固定等问题。基于此,优化 BEST 小机转速控制策略,对于保障机组安全稳定高效运行具有重要的现实意义。

1 BEST 小机转速控制现状与变工况关键矛盾分析

1.1 控制架构与核心控制逻辑

BEST 小机转速控制体系以“变流器主控-MEH 备用”为核心,并配 METS 实现安全保护功能。在变流器主控模式下,全开工况时可通过调节励磁电流,实现 $\pm 5\text{r/min}$ 精度的闭环控制。当变流器发生故障或超限额出力时,变流器会向 MEH 发出“变流器协调控制请求”,MEH 收到该指令后不做判断,直接进行主控权交接,主控权交由 MEH,系统会自动切入转速 PID 闭环控制,通过调节进汽调门开度稳定转速。主控权切换需保持转矩电流波动 $\pm 5\%$ 。METS 采用“三取二”冗余保护设计,实时监控关键运行参数,一旦参数超限,立即触发停机保

护。

1.2 变工况下的关键控制矛盾

1.2.1 启动阶段: 汽源切换与转速波动矛盾

BEST 小机启动需完成从“辅助蒸汽”到“主机高压缸排汽”的气源切换,旁路阀控制逻辑影响转速稳定。传统策略中,旁路阀自动投入仅以“调门后压力 $> 0.2\text{MPa}$ ”为条件,未关联转速爬升速率。汽源切换时若小机转速低于 2700r/min,旁路阀过早投入会使排汽背压骤降,引发“转速突升-进汽调门急关”振荡。调试显示,此过程转速最大波动 85r/min,暖机延长 30min,影响设备安全与经济。

1.2.2 正常运行: 背压 - 转速强耦合矛盾

正常运行时, BEST 小机背压靠旁路阀、溢流阀、补汽阀协同调节。传统策略存在缺陷:一是背压设定值采用设计值,无动态偏置调节,实际与设计工况有偏差时,阀门频繁动作导致转速波动;二是补汽阀为“全开/全关”模式,低负荷工况下,辅助蒸汽压力与排汽背压匹配失衡,背压偏差达 0.08MPa,转速偏差达 35r/min,需手动调整,增加操作强度且降低控制精度。

1.2.3 故障工况: 固定调节参数适配性矛盾

变流器故障甩负荷是 BEST 小机典型扰动工况,传统策略调节缺陷突出:一是升速率固定为 1000r/min²,未根据故障前小发电机负荷适配,低负荷升速率高致转速超调,高负荷升速率不足致转速恢复滞后;二是快关

电磁阀动作时间固定为 0.6s，不同负荷调节力度失衡，如小发电机功率 7MW 时，快关使进汽调门开度骤降 29.21%，转速骤降，给水流量同降，触发锅炉 MFT 保护，影响机组稳定。

1.2.4 保护系统：冗余设计不足矛盾

METS 保护系统存在两处关键隐患：温度保护速率限制切除条件宽松（温度 $<90^{\circ}\text{C}$ 且温升速率 $<15^{\circ}\text{C/s}$ ），易导致异常工况下保护拒动；抽汽逆止门前压力保护采用“二取一”逻辑，无测点品质判断功能，单点故障易引发保护误动或拒动。

2 变工况下转速控制策略优化方案设计

针对上述变工况下的关键控制矛盾，本文从主控制权切换逻辑、背压-转速解耦控制、故障自适应调节、保护系统冗余四个维度构建优化方案，核心设计思路为“动态匹配调节参数、解耦强耦合变量、强化保护系统冗余”，具体优化内容如下：

2.1 启动阶段：汽源切换与转速协同控制优化

旁路阀自动投入逻辑优化：新增“转速-压力”双条件判断逻辑，仅当调门后压力 $>0.2\text{MPa}$ 且小机实际转速 $>2700\text{r/min}$ 时，才允许旁路阀投入自动控制模式，避免低转速下背压骤降致转速波动。同时设置旁路阀开度调节速率限制（ $5\%/s$ ），减缓背压变化速率，降低对转速的扰动。汽源切换转速预给定控制：在“辅助蒸汽-高压缸排汽”汽源切换前，变流器将转速给定值预提升至目标转速 $+20\text{r/min}$ ，形成“转速预储备”，切换中保持小发电机转矩电流稳定（波动不超 $\pm 3\%$ ），避免汽源切换功率失衡致转速跌落。现场调试数据验证，优化后汽源切换转速波动可控制在 $\pm 15\text{r/min}$ 以内，暖机时间缩短 15min，满足启动阶段稳定性要求。

2.2 正常运行阶段：背压-转速解耦控制优化

增设背压偏置调节功能：参考主机协调控制系统（CCS）滑压设定逻辑，在背压设定值中加 $\pm 0.05\text{MPa}$ 动态偏置项，运行人员可据实际工况（如回热加热器投退、主机负荷波动）手动修正背压设定值，减少阀门动作、降低对转速扰动。

分负荷段设定背压限值：按主机负荷分三个区间设不同背压设定值范围，低负荷区间（ $300\text{MW}\leq$ 主机负荷 $<500\text{MW}$ ）背压设定值 0.599-0.644MPa，适应低负荷辅汽压力低特性；中负荷区间（ $500\text{MW}\leq$ 主机负荷

$<800\text{MW}$ ）背压设定值 0.483-0.536MPa，平衡背压稳定与机组热经济性；高负荷区间（ $800\text{MW}\leq$ 主机负荷 $\leq 1000\text{MW}$ ）背压设定值 0.37-0.42MPa，匹配高负荷小机排汽量大特性，解决低负荷背压过低致转速失稳问题。

将补汽阀“全开/全关”开关量控制改 PID 自动调节模式，以“背压实际值-设定值”偏差为输入，补汽阀开度调节范围 0-100%。经现场参数整定，确定 PID 调节参数：比例系数（KP）=2.5，积分时间（TI）=10s，微分时间（TD）=2s，确保背压偏差 $>0.03\text{MPa}$ 时补汽阀快速动作（响应时间 $<1\text{s}$ ），背压偏差 $<0.01\text{MPa}$ 时开度稳定，实现背压与转速解耦控制，降低背压波动对转速影响。

2.3 故障工况：动态响应策略优化

基于故障前小发电机功率划分三个负荷区间，匹配差异化升速率，新增“转速偏差-升速率”自适应调节逻辑。低负荷区间（小发电机功率 $<5\text{MW}$ ），基础升速率设为 500r/min^2 ，防低负荷转速超调；中负荷区间（ $5\text{MW}\leq$ 小发电机功率 $\leq 15\text{MW}$ ），基础升速率设为 800r/min^2 ，平衡调节速度与稳定性；高负荷区间（小发电机功率 $>15\text{MW}$ ），基础升速率设为 1200r/min^2 ，加快高负荷转速恢复。自适应调节逻辑为：实际转速与给定转速偏差 $>50\text{r/min}$ ，升速率提 20%；偏差 $<20\text{r/min}$ ，恢复基础升速率，以缩短转速恢复时间。

同时，根据故障前小发电机功率调整快关电磁阀动作时间，满足不同负荷进汽量调节需求。低负荷区间（小发电机功率 $<8\text{MW}$ ），动作时间延至 1.2s，缓进汽调门关闭速度，防转速骤降；中负荷区间（ $8\text{MW}\leq$ 小发电机功率 $\leq 12\text{MW}$ ），动作时间保持 0.8s，适配中等负荷调节；高负荷区间（小发电机功率 $>12\text{MW}$ ），动作时间缩至 0.4s，快切部分进汽，防转速骤升。分段控制快关时间，确保进汽调门开度平稳变化，避免转速剧烈扰动。

针对高加解列时小发电机功率骤升、除氧器压力超限问题，新增“高加解列-功率预调节”逻辑。主机负荷 $>500\text{MW}$ 且高加解列信号触发，若 BEST 小机处变流器主控模式，小发电机功率指令按 5MW/min 速率降至 5MW（对应除氧器压力低于安全门动作压力 1.47MPa(g) ），MEH 提前预开进汽调门 5%补偿转速跌落。优化后，高加解列工况下转速波动从 45r/min 降至 18r/min ，除氧器压力稳定在 1.42MPa 以下，避免安全

门动作风险。

2.4 METS 保护逻辑冗余优化

温度保护速率逻辑改进：为解决传统温度保护中速率限制切除致保护拒动问题，将温度速率限制自动复归条件从“温度 $<90^{\circ}\text{C}$ 且温升速率 $<15^{\circ}\text{C/s}$ ”改为“温度 $<80^{\circ}\text{C}$ 且温升速率 $<12^{\circ}\text{C/s}$ ”。同时，在DCS操作画面增加“速率限制切除”提示信号，速率限制功能切除时自动弹窗提醒运行人员，保留手动复位功能，防止异常工况下温度骤升导致保护拒动。压力保护冗余设计：在#5抽、#6抽逆止门前新增压力测点，将“二取一”保护逻辑升级为“四取二”，并增加测点品质判断功能。当任一压力测点与平均值偏差 $>0.1\text{MPa}$ 时，判定该测点为坏点并自动剔除，用剩余有效测点进行逻辑判断，避免单点故障致保护误动或拒动，提升保护系统可靠性。

3 优化效果验证与分析

为验证优化策略有效性，在某超超临界二次再热机组（ $2\times 1000\text{MW}$ ）5号机组BEST小机开展现场动态试验，选取启动汽源切换、变流器故障甩负荷、高加解列三个典型变工况场景，对比优化前后关键运行参数，以

表1 变流器故障甩负荷工况优化前后关键参数对比

关键参数	优化前	优化后	改善幅度
转速最大飞升量	56r/min	22r/min	60.70%
转速恢复时间（至目标值 $\pm 10\text{r/min}$ ）	28s	12s	57.10%
给水流量最大波动量	321.52t/h	85t/h	73.60%
进汽调门开度波动幅度	29.21%	12.35%	57.70%
MFT 触发风险	存在	无	-

由表1数据可知，优化后的控制策略显著降低了变流器故障甩负荷工况下的转速超调量与恢复时间，给水流量波动幅度大幅缩减，成功规避了锅炉MFT保护动作风险。从动态响应特性来看，优化后的升速率动态调整与快关时间分段控制逻辑，实现了不同负荷下调节参数的精准匹配，进汽调门开度波动幅度的降低，进一步

表2 高加解列工况优化前后关键参数对比

关键参数	优化前	优化后	改善幅度
小发电机功率超调量	44.7%（8.5MW \rightarrow 12.3MW）	0%（8.5MW \rightarrow 5MW）	100%
转速最大波动量	45r/min	18r/min	60%
除氧器压力最大值	1.48MPa(a)	1.42MPa(a)	4.10%
转速恢复时间（至目标值 $\pm 10\text{r/min}$ ）	35s	21s	40%
进汽调门动作次数	8次/5min	3次/5min	62.50%

此验证优化方案工程实用性。

3.1 启动阶段汽源切换工况验证

启动阶段汽源切换工况下，优化前后关键参数对比结果如下：

优化前：汽源切换时小机转速从2850r/min 骤升至2935r/min，最大波动量85r/min；旁路阀开度从25%骤升至50%，波动幅度25%；暖机时间总计65min；

优化后：汽源切换时小机转速从2850r/min 平稳升至2865r/min，最大波动量15r/min；旁路阀开度稳定在30% $\pm 3\%$ ，波动幅度6%；暖机时间缩短至50min。

优化结果表明，通过“转速-压力”双条件控制旁路阀投入与转速预给定策略，有效解决了启动阶段汽源切换导致的转速波动问题，暖机时间显著缩短，提升了启动阶段的安全性与经济性。

3.2 变流器故障甩负荷工况验证

选取小发电机功率7MW（中负荷区间）时触发变流器故障甩负荷，优化前后关键参数对比结果如表1所示：

验证了控制策略对转速扰动的抑制效果，提升了故障工况下的运行稳定性。

3.3 高加解列工况验证

在主机负荷600MW（中负荷区间）时人工触发高加解列信号，优化前后关键参数对比结果如表2所示：

由表2数据可知,优化后的“高加解列-功率预调节”逻辑成效显著:小发电机功率从优化前的大幅超调转为平稳降至目标值(5MW),彻底解决了功率骤升导致的转速扰动问题;除氧器压力最大值控制在1.42MPa(a)以下,低于安全门动作压力(1.47MPa(g)),避免了除氧器超压风险;转速恢复时间缩短40%,进汽调门动作次数减少62.5%,不仅提升了动态响应速度,还降低了阀门磨损,延长了设备使用寿命。

从控制机理来看,优化策略通过提前预调节小发电机功率与进汽调门开度,在高加解列导致的功率失衡前建立了“功率补偿缓冲”,有效抑制了扰动的传播,验证了“预调节+动态匹配”控制思路在强扰动工况下的有效性。

4 结论与展望

启动阶段优化双条件控制策略,降低转速波动,缩短暖机时间;正常运行阶段解耦控制,提升转速精度,降低操作强度;故障工况响应能力提升,降低转速飞升量,缩短恢复时间;增强保护系统冗余可靠性;未来融合智能化算法,构建数字孪生模型;探索多系统协同控制,开发故障预警与健康管理系统。经验证,方案实用有效,为后续研究奠定基础。

参考文献

- [1] 吴志祥. 大型火力发电机组锅炉给水泵驱动的热经济性研究[D]. 上海电力学院, 2012.
- [2] 罗建松, 秦宇, 钟志强, 等. 带变频发电机的BEST小机驱动给水泵技术研究[J]. 电力勘测设计, 2022(12): 45-50.