

# 轴向排汽汽轮机冷、热态启动旁路控制逻辑优化

## ——以 M701F4 一拖一机组为例

林依冕

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

**【摘要】：**根据三菱 M701F4 一拖一轴向排汽联合循环机组冷、热态启动时，原来固定阈值、同步调节的旁路控制逻辑造成蒸汽参数波动大、暖机效率低、汽包水位不稳定、工况切换卡顿等缺点，本文对旁路控制逻辑进行优化。该机组采用中位布置、轴向排汽结构，配套三压再热余热锅炉，旁路系统控制效果对于机组蒸汽参数匹配、设备安全、启动能耗等都起着非常重要的作用。本文根据机组结构特点和运行机理，重新构建冷热态启动差异化控制策略，改善旁路阀开度调节时序，完善压力、温度协同控制逻辑，较好地克服了传统控制方式的不足。现场实测结果表明，优化后的机组冷热态启动蒸汽参数波动范围明显缩小，锅炉汽包水位运行稳定，机组启动时间大大缩短，启动安全性、经济性大大提高。研究成果可以给同类型的轴向排汽联合循环机组旁路系统优化提供可靠的工程技术参考。

**【关键词】：**M701F4 机组；轴向排汽汽轮机；冷热态启动；旁路系统

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.052

### 1 引言

随着新型电力系统的建设，燃气蒸汽联合循环机组由于具有清洁低碳、启停灵活、调峰性能好等特点，是电网调峰和保供的主要电源机种。三菱 M701F4 型一拖一双轴布置联合循环供热机组属于目前主流机型之一，单套额定功率为 484.22MW，燃机、汽机分轴布置，燃机中位侧进气、汽机中位轴向排汽，配套无补燃三压再热脱硝型余热锅炉，可以实现纯冷凝发电和抽汽供热两种工况的灵活切换。汽轮机旁路系统是联合循环机组启动时的主要调节设备，具有蒸汽泄压、参数调节、暖机稳压、保护设备的作用。轴向排汽汽轮机的结构特点使它与常规侧向排汽汽轮机的通流、排汽阻力有很大差别，对于蒸汽温度、压力的变化速率和稳定性要求也更高。为解决运行隐患，根据现场运行数据，针对轴向排汽汽轮机启动特点，对冷热态启动旁路控制逻辑进行优化，提出不同的控制方案，改善调节时序和参数阈值，通过现场试验来检验优化效果，提高机组启停稳定性以及经济运行水平。

### 2 机组设备及旁路系统概况

#### 2.1 机组整体结构

本次研究对象为三菱 M701F4 型一拖一双轴燃气-蒸汽联合循环供热机组，整套设备由一台燃气轮机、一台燃机发电机、一台三压再热无补燃余热锅炉、一台轴向排汽汽轮机、一台汽轮发电机和全套辅助系统组成。机组燃料为天然气，运行方式灵活，非供热工况下汽轮机为全冷凝运行，供热工况下可以实现抽凝运行，满足电网发电和厂区供热双重需求。

机组的核心特点就是双轴布置、轴向排汽结构，燃气轮机和汽轮机独立布置、互不耦合，燃机侧中位侧进气，汽轮机中位布置、轴向排汽，通流顺畅、排汽损耗小，但是该结构对于

启动阶段蒸汽参数的平稳性、升降速率更加敏感，参数微小的变化都会影响到汽轮机暖机的效果以及轴系的稳定性。配套三压再热余热锅炉可以产生高压、中压、低压三级蒸汽，分别对应汽轮机高、中、低压缸进汽，旁路系统分为高、中、低压三级旁路，协同完成机组启动稳压泄压工作。

#### 2.2 旁路系统工作原理及控制逻辑现状

机组三级旁路系统的主要功能就是在机组启停、负荷变化时，迅速调节锅炉蒸汽的压力和温度，适应汽轮机进汽的要求，使锅炉的产汽量与汽轮机的耗汽量相匹配，防止蒸汽参数超压超温，并完成汽轮机的暖机、管道预热等工作，缩短机组启动时间。高压旁路是高压蒸汽的泄压稳压装置，中低压旁路配合调节再热蒸汽和低压蒸汽的参数，保证整个系统的蒸汽工况稳定。

机组原有的旁路控制逻辑为固定阈值、同步调节的方式，没有区分冷态和热态启动工况。冷态启动时，机组金属温度低，原有的逻辑旁路阀开启速度过快，蒸汽升温升压速度过高，造成汽轮机金属温差大、热应力大；热态启动时，机组金属温度高，原有的逻辑旁路调节滞后，蒸汽参数不匹配，造成主汽压力偏低、暖机不够、冲转参数不符合要求等问题。另外，原有的高低压旁路协同性不好，在启动时容易造成单级旁路过度调节、各级参数不匹配，引起余热锅炉汽包水位剧烈波动，经常触发辅助调节干预，影响机组启动的顺畅性。机组原有旁路系统工作原理及控制逻辑如图 1 所示。



图 1 旁路系统工作原理及控制逻辑

### 3 原有控制逻辑存在的问题及机理分析

#### 3.1 冷态启动工况存在的问题

机组冷态启动指的是机组停运时间大于 72h，汽轮机金属温度、锅炉汽包和管道温度降到环境常温的启动工况。在原来的控制逻辑中，冷态启动旁路阀是根据固定的压差阈值来开启的，没有对开启速度和开度增量进行动态的控制。燃机点火升温之后，余热锅炉迅速产汽，高压旁路瞬间大开泄压，蒸汽升压速度过快，汽轮机轴向通流通道不能适应快速升温的蒸汽，造成缸体上下、内外温差超标。三级旁路同步调节没有时序控制，低压蒸汽参数上升滞后，汽轮机低压缸暖机不充分，轴系振动轻微超标。另外蒸汽压力突然变化会引起锅炉汽包虚假水位，水位波动范围最大能达到±80mm，超出安全运行区间，加大启停风险。

#### 3.2 热态启动工况存在的问题

机组热态启动指的是机组停运 8h 之内，设备的金属温度一直处在运行高温区间内的启动情况。原有的统一控制逻辑不能适应热态设备高温的特点，存在旁路调节滞后、参数跟踪不及时的现象。热态启动时，余热锅炉产汽快、参数升得快，但是旁路阀的开启响应慢，造成主蒸汽压力短时间超压，不但加大了管道的承压负荷，而且会造成蒸汽温度和缸体金属温度不匹配，产生热冲击。另外，原来的逻辑热态启动旁路阀最小开度过大，在低负荷暖机阶段蒸汽泄压过多，造成主汽参数偏低，冲转等待时间变长，机组启动能耗增大。

#### 3.3 共性控制缺陷

除冷热态专属问题外，原有控制逻辑存在两项核心共性缺陷。一是无工况自适应功能，未根据设备金属温度、停运时长区分启动模式，固定调节参数无法适配全工况启动需求。二是三级旁路协同控制逻辑缺失，高、中、低压旁路独立调节，无联动闭锁与时序匹配机制，易出现单级参数达标、整体参数失衡的情况，无法满足轴向排汽汽轮机整体暖机、均匀升温的运行要求。结合本机组轴向排汽结构特点，汽轮机通流通道更为直通，蒸汽参数变化传递速度更快，原有分散式调节逻辑极易造成各级蒸汽匹配紊乱，引发局部蒸汽滞留与瞬时参数畸变。同时老旧逻辑未设置负荷联动修正机制，旁路调节开度仅参照

单一压力信号，无法适配三压余热锅炉产汽量动态变化特性，在暖机过渡、参数爬升等临界工况下调节精度不足，频繁触发系统小幅扰动，长期运行会累积设备疲劳损耗，影响机组启停稳定性与设备长效安全。因此，本次优化将重点针对上述共性缺陷，建立工况自适应机制与三级旁路协同控制逻辑，精准解决冷热态启动过程中的参数调节、时序匹配、工况稳定等核心问题。

### 4 旁路控制逻辑优化方案

根据 M701F4 轴向排汽汽轮机的结构特点和冷热态启动工况的不同，本次优化的主要思想是增设工况自动判别机制，建立冷热态不同的旁路控制逻辑，改善三级旁路协同调节的时序，修正压力、温度调节阈值和阀门动作速率，使旁路系统实现自适应精准调节。

#### 4.1 增设启动工况自动判别逻辑

根据汽轮机高压缸内壁金属温度和机组停运时间两个判据，自动完成冷热态启动工况的切换，代替原来的依靠人工判断、统一调节的模式。设定判别标准为机组停运时长大于 72h、高压缸金属温度低于 150℃ 为冷态启动，机组停运时长小于 8h、高压缸金属温度高于 300℃ 为热态启动，温态启动作为过渡工况沿用优化后的基础逻辑。系统根据判别结果自动调用对应的旁路控制参数和调节时序，从根本上解决了工况适应性差的问题。

#### 4.2 冷态启动旁路逻辑优化

冷态启动的主要控制目标就是低速升温升压、均匀暖机、稳定水位、减小热应力。优化后去掉原来的固定压力阈值大开度调节方式，用分段式慢速调节的方式。锅炉点火初期限制高压旁路初始开度，控制蒸汽升压速率达到 0.05MPa/min 以下，蒸汽升温速率控制在 1.5℃/min 以下，与汽轮机低温金属升温特性相匹配。增设三级旁路动作时序，先开启低压旁路进行低压管道预热，然后逐步开启中压、高压旁路，实现三级蒸汽逐级升温升压，保证汽轮机通流部件均匀暖机。改进汽包水位联动逻辑，旁路阀开度与给水流量联动调节，消除虚假水位的产生，把水位波动控制在安全范围之内。

#### 4.3 热态启动旁路逻辑优化

热态启动的主要控制目标是尽快达到匹配参数，缩短启动时间，防止产生热冲击。优化之后可以加快旁路系统的响应速度，缩短阀门动作延迟时间，改善压力跟踪调节逻辑，使旁路阀及时跟随主蒸汽压力的变化进行调节。适当增大热态启动旁路最小阀位，防止出现过度泄压造成参数过低的情况发生，放松压力调节精度阈值，满足热态快速升参数的要求。在超压快速泄压逻辑的基础上，在主蒸汽压力接近上限阈值的时候，旁路阀快速调节开度，防止出现参数超调。优化三级旁路联动机制，在热态启动的时候三级旁路同时动作、同步调节，保证高、

中、低压蒸汽参数同时满足要求，减小冲转等待时间。

#### 4.4 三级旁路协同控制逻辑优化

新增旁路联动闭锁逻辑，实现高、中、低压旁路协同调节，杜绝单级旁路独立调节引发的参数失衡。设置各级旁路调节优先级，高压旁路为主压力调节主体，中低压旁路辅助稳压调温，各级阀门开度变化相互约束、动态匹配。增加工况切换平滑逻辑，机组从暖机工况向冲转、带负荷工况切换时，旁路阀采用渐变式开关调节，避免阀门大幅动作引发参数突变，保障启动全过程工况平稳。针对该机组轴向排汽结构通流灵敏、参数响应快的特性，本次优化新增旁路联动滞后修正功能，消除不同等级旁路阀门动作时序偏差带来的参数脱节问题。同时匹配余热锅炉三压蒸汽产汽特性，建立旁路开度与锅炉负荷的动态关联模型，根据燃机排烟温度、锅炉蒸发量实时修正各级旁路调节幅度，避免单一压力参数调节导致的温度适配偏差。此外增设异常工况闭锁保护，单级旁路调节超限时自动联动其余两级旁路协同修正，有效规避单阀过载调节、系统蒸汽配比失衡的问题，进一步提升全工况调节稳定性。

#### 5 优化效果验证与数据分析

为了检验本次逻辑优化的效果，选取机组优化前后的 10 次典型启停数据进行对比分析，统计冷热态启动过程中蒸汽参数波动幅度、汽包水位波动范围、启动总时长、燃气消耗等主要指标，优化前后运行数据对比结果如下表所示。

表 1 机组启停运行数据优化前后对比

| 运行指标             | 冷态启动<br>(优化前) | 冷态启动<br>(优化后) | 热态启动<br>(优化前) | 热态启动<br>(优化后) |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 主汽压力波动<br>幅度/MPa | ±0.22         | ±0.08         | ±0.18         | ±0.06         |
| 主汽温度波动<br>幅度/℃   | ±12.5         | ±4.2          | ±10.3         | ±3.5          |
| 汽包水位波动<br>幅度/mm  | ±78           | ±32           | ±65           | ±28           |

#### 参考文献:

- [1] 王佳智,徐振谊,杨翔胜.三菱 M701F4 型燃机“一拖一”燃机调试遇到的主要问题及防范措施[J].通讯世界,2017,(1):165-166.
- [2] 徐进峰.M701F4 燃气轮机“二拖一”联合循环热电联供系统的热电特性[J].燃气轮机技术,2013,26(4):41-43+32.
- [3] 安宗武,辛军放,陈浩.M701F4 型燃机“二拖一”机组的并汽和解汽[J].热力发电,2012,41(8):65-68+71.
- [4] 王鑫.三菱 M701F4 型燃机“二拖一”联合循环机组调试中遇到的主要问题及解决方法[J].燃气轮机技术,2012,25(3):59-63.

|                                    |       |       |      |      |
|------------------------------------|-------|-------|------|------|
| 机组启动总时<br>长/min                    | 158   | 132   | 65   | 52   |
| 单次启动天然<br>气消耗量<br>/Nm <sup>3</sup> | 12850 | 10920 | 4680 | 3850 |
| 汽轮机最大温<br>差/℃                      | 48    | 22    | 35   | 18   |

注：数据为机组优化前后各 10 次典型冷热态启停对比测试得到的。

从表 1 的实测数据可以看出，旁路控制逻辑优化之后，机组冷热态启动综合性能都有明显提高。冷态启动工况下，主汽压力、温度波动幅度明显减小，汽包水位稳定性明显提高，汽轮机缸体最大温差由原来的 48℃降到现在的 22℃，有效地抑制了设备的热应力损伤；机组启动总时间缩短了 26 分钟，单次启动可以节约天然气 1930 标准立方米。热态启动工况下参数超调现象得到有效控制，蒸汽参数跟踪匹配精度提高，彻底解决了由于参数突变、工况卡顿等问题引起的异常情况，机组启动时间由原来的 13min 缩短为原来的 7min，单次启动节省天然气 830 标准立方米。

#### 6 结论

本文针对三菱 M701F4 一拖一轴向排汽联合循环汽轮机原有旁路控制逻辑无工况区分、协同性差、参数调节精度低的技术短板，根据机组双轴布置、轴向排汽、三压蒸汽供给的设备特点，通过实施冷热态差异化的旁路控制逻辑优化，有效地解决了机组启停过程中蒸汽参数波动大、暖机效果差、启动能耗高、设备热应力大的问题，全面提高了机组启停性能和经济运行水平。本次优化增加了工况自动识别功能，可以准确地对冷热态启动进行区分；制定了不同的冷热态调节策略，根据不同的工况来调节设备的升温特性；优化了三级旁路协调启动的顺序和闭锁逻辑，完善了参数联动调节机制，完全适应轴向排汽汽轮机启动运行特性，可以满足全工况蒸汽参数精确调节的要求，使机组启停更加稳定、经济，大大提高了设备的使用寿命。