

# 西门子燃机机组汽机主蒸汽旁路自巡航自适应控制策略设计

邝伟贤

(广州粤能电力科技开发有限公司, 广东 广州 510080)

**摘要** 2024 年广东某新建燃气—蒸汽联合循环机组 (9F 级) 项目, 余热锅炉、燃机、汽机分别由东方菱日、西门子、上海汽轮机厂提供, 项目 DCS 系统配套设计机组自启 / 停系统 (APS)。为配合 APS 系统实现机组自动升温升压、燃机升负荷、汽机冲转并网升负荷, 本项目为汽机主蒸汽旁路系统设计了一种自巡航自适应全程自动控制的控制策略, 实现从燃机点火到汽机并网带初负荷期间的旁路全程自动控制, 本文就此控制策略进行了详细的介绍, 以期相关人员提供借鉴。

**关键词** 自巡航; 自适应; 最小阀位; 最小压力; 停机定压

**中图分类号**: TM31

**文献标志码**: A

**文章编号**: 2097-3365(2024)12-0031-03

发电厂汽轮机主蒸汽旁路系统的主要作用是协调蒸汽参数、保护再热器、回收工质, 加快机组启动、实现机组快速降负荷、实现机组 FCB 功能等<sup>[1]</sup>。为了保障机组的安全稳定运行, 并提升机组自启 / 停控制系统 (APS) 的智慧化, 减少运行操作人员的操作量并降低出错率, 旁路控制系统担负着关键的角色。本文介绍了一种具有高度智慧化的旁路控制策略, 可实现旁路控制“无人值守”, 配合 APS 系统快速启停机组<sup>[2]</sup>。

## 1 项目概述

2024 年 5 月, 广东某燃机电厂一期工程建设 2 台 460 MW 级 (F 级改进型) 燃气—蒸汽联合循环热电联产机组顺利完成机组双投。本项目主机设备为双轴联合循环机组, 燃机采用西门子 SGT5-4000F 型, 汽机采用上海电气的三压再热、轴向排汽、凝汽式、双缸汽轮机, 余热锅炉采用东方菱日三压 / 再热 / 自然循环炉。联合循环机组总出力最大出力冬季 487 MW、夏季 433.2 MW, 正常稳定最小技术出力 270 MW。汽轮机主蒸汽旁路系统采用单元制, 设置了高、中、低压 100% 容量的旁路系统, 满足机组 100% 甩负荷和机组 FCB 功能的需求。汽机 DEH 采用上汽—西门子技术, 其集合了转速、应力、主汽压力以及负荷控制功能<sup>[3]</sup>。基于旁路的复杂性和重要性, 配置功能完善的旁路控制策略, 对机组的安全运行起着重要的保障<sup>[4]</sup>。

## 2 旁路自巡航自适应全程自动控制策略设计

本汽机旁路全程自动控制策略主要设计了四个回路, 分别是“自巡航全程自动投入”“模式自巡航切

换”“最小阀位自适应”和“目标压力自适应”。其中“目标压力自适应”回路, 由“目标压力自巡航生成回路”“速率限制回路”“手动偏置设定回路”“设定值限制回路”组成。汽机旁路全程自动控制策略详述如图 1 所示。

### 2.1 自巡航全程自动投入

系统始终处于巡航状态, 根据检测到的燃机点火状态、蒸汽压力起压状态、炉侧主蒸汽阀开启状态、高压旁路阀开启状态, 分别自动投入高、中、低压旁路系统全程自动。

### 2.2 模式自巡航切换

旁路阀在全程自动模式下, 自巡航判断状态, 根据不同工况, 自动进行“最小阀位模式”“最小压力模式”“升压模式”“定压模式”<sup>[5]</sup>“跟踪模式”“停机定压模式”模式的切换。

### 2.3 最小阀位自适应

旁路阀在全程自动模式下, 根据旁路阀的工作模式和汽机发电机并网带负荷的情况, 自适应调整最小阀位的限制值。

### 2.4 目标压力自适应

1. 目标压力自巡航生成回路: 在全程自动状态下, 系统始终处于巡航状态, 根据检测到的不同模式、不同工况, 自动生成目标压力, 目标压力再经过“速率限制回路”“手动偏置设定回路”“设定值限制回路”生成最终的压力设定值。

2. 速率限制回路: 根据不同模式、不同工况, 控制目标压力设定值的变化速率, 控制系统升压的速度,

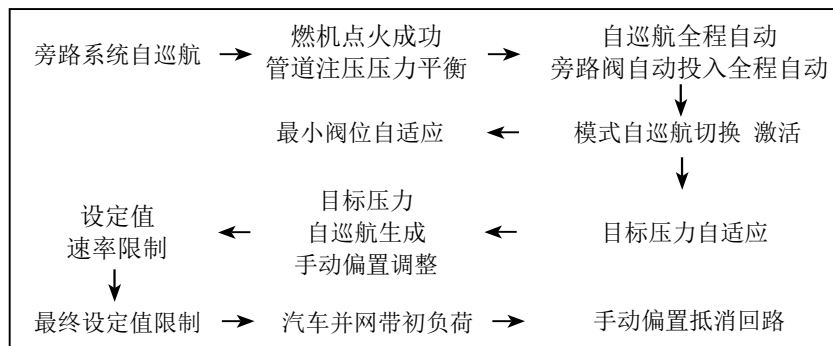


图1 自巡航自适应全程自动控制策略示意图

主要是汽机三态启动速率、速率置“0”、速率置最大“99999/s”。

(1) 最小压力模式自动将速率置“0”，维持最小压力，等待蒸汽压力稳定爬升。

(2) 为了避免目标压力设定值爬升过快，与实际压力爬升严重不匹配，导致阀门长时间停留在低开度的状态，当实际阀位指令下降至 $<(\text{最小阀位指令} + 3\%)$ 时系统自动将速率置“0”，保持当前目标压力设定不变，等待实际压力爬升。压力上升过程中PID模块根据偏差量控制阀门的开启，当实际阀位指令 $>(\text{最小阀位指令} + 10\%)$ 实际压力重新稳步上升后，释放目标压力设定速率至汽机三态启动速率，目标压力设定值继续滑向汽机三态冲转目标压力，随着实际压力的上升，实际压力值大于最终压力设定值，即PID计算模块中被调量大于设定值( $PV > SP$ )，在PID计算模块的控制下调阀继续开启，控制压力平滑上升。

3. 手动偏置设定回路：汽机并网前在某些情况下，如试验需求，可能需要临时调整蒸汽压力参数，为了满足这种需求，系统设计了手动偏置回路，操作人员可以通过此回路调整目标压力参数。

4. 设定值限制回路：为了防止安全阀动作，避免手动偏置设定误操作，手动偏置、压力最终设定值均设置了限值回路，限制最终压力设定值在安全阀动作范围内。另外，“目标压力自适应”回路在汽机并网带初负荷旁路定压模式切换到跟踪模式的过程中，还设计了手动偏置抵消回路，在切换过程中避免了手动偏置偏小（负数）使阀门全开或使阀门关闭过慢、避免了手动偏置为正数使阀门关闭过快，有效避免手动误操作的影响。

### 3 高压旁路阀控制策略举例

#### 3.1 “自巡航全程自动投入”回路

当系统检测到燃机有火、炉侧起压（过热主蒸汽压力 $> 0.4 \text{ MPa}$ ）后，自动缓慢打开炉侧过热主蒸汽阀，

机侧高压主蒸汽管道开始注压，当主汽阀开度 $> 35\%$ 或机炉两侧管道压力基本平衡后（两侧压力偏差 $< 0.4 \text{ MPa}$ ），经防抖动延时（3 s）判断后自动投入高压旁路阀全程自动，同时高压旁路减温水自动投入自动（温度设定值滑至预设的目标值）。

#### 3.2 汽机启动阀门指令和压力控制过程

全程自动投入后，“模式自巡航切换”“最小阀位自适应”和“目标压力自适应”三个控制回路相互配合，实现机组点火到汽机并网带负荷的旁路自巡航自适应全程自动控制，策略设计详述如下：

1. 全程自动模式且阀前压力起压（点火后阀前压力上升 $0.1 \text{ MPa}$ ）后最小阀位模式首先被激活，高压旁路阀缓慢打开至最小开度（10%）。当高压旁路阀指令 $\geq$ 最小开度指令（10%）后，系统会在汽机并网前保持至少有10%的阀门指令，用以保证主蒸汽管道暖管和蒸汽流通。在最小阀位模式下目标压力设定值和最终压力设定值自巡航自适应实时跟踪当前压力。

2. 在最小阀位模式下，阀门实际指令 $\geq$ 最小开度指令，且维持的时间已达到预设的系统状态运行时间（2 min），以上条件满足后自动转入最小压力模式。

3. 在最小压力模式下，压力设定值自巡航自适应，其变化速率自动置“0”。此时目标压力设定值保持不变，随着阀前压力的升高，系统为了维持最小压力值，在PID控制下会自动开启，阀门开启过程中当检测到阀门开度指令达到最小开度指令 $+10\%$ 后，自动转入升压模式。

4. 在升压模式下，目标压力设定值自巡航自适应，压力设定值根据汽机三态启动速率滑至汽机三态冲转目标值。升压过程中系统PID模块根据压力偏差对阀门指令进行调节，控制阀前压力平滑爬升，阀前压力到达三态冲转目标压力后自动进入定压模式，系统自动维持冲转目标压力，等待汽机冲转。

5. 在汽轮机开始接受蒸汽冲转后，旁路阀仍然自动维持冲转目标压力<sup>[6]</sup>。

6. 当系统巡航检测到汽机并网带初负荷后,“目标压力自巡航生成回路”通过补偿回路自动抵消手动偏置,防止手动偏置干扰模式切换。同时,旁路阀“目标压力自巡航生成回路”按汽机三态启动速率给定并定压目标压力设定值(阀前压力+0.15 MPa),旁路阀开始缓慢关闭,DEH 在限压模式负荷控制器激活的状态下继续升负荷开启高、中压主汽调阀。当旁路阀关至 5% 时自动转入跟踪模式,在跟踪模式下按最大速率给定目标压力设定值(阀前压力+0.5 MPa),旁路阀全关。高压旁路阀全关后,DEH 侧控制由限压模式转入初压模式,负荷控制器退出,自动激活高压压力控制器,操作人员设置压力给定值继续对汽机进行升负荷。

### 3.3 停机定压模式

系统始终处于自巡航状态,当检测到汽机跳闸或汽机解列或手动投机组旁路停机定压模式后,高压旁路阀自动转入停机定压模式,“目标压力自巡航生成回路”自动维持模式切换前的阀前压力,等待高旁参数重置。停机定压模式已维持 1 800 s 或手动激活,系统会自动重置机组高中低旁路系统参数,“目标压力自巡航生成回路”重新按汽机三态启动速率将目标压力设定值滑至三态冲转压力目标值。

### 3.4 燃机遮断自动关阀保压

系统始终处于自巡航状态,当检测燃机遮断无火后,“目标压力自巡航生成回路”自动调整目标压力(阀前压力+0.3 MPa),高压旁路阀缓慢关闭。

## 4 中、低压和高压旁路控制策略的差异部分

中、低压旁路控制阀的控制策略和高压旁路阀基本保持一致,但是由于系统管道、系统压力存在差异,控制策略中略有差异,主要差异有以下四点。

### 4.1 中、低压旁路阀自巡航控制相关定值、最小开度指令

由于系统压力存在差异,应根据系统压力特点,设置冲转目标压力(汽机温态时高/中/低:8/0.9/0.4 MPa)、模式自巡航切换控制的相关定值、最小开度指令定值(高/中/低:10/7/5%)。

### 4.2 中压旁路阀“自巡航全程自动投入”回路

由于中压旁路阀接收的再热蒸汽汽源来源有两处,分别为高压旁路阀汽源、中压主蒸汽汽源,故中压旁路阀“自巡航全程自动投入”这部分的控制策略和高压旁路阀略有不同,需要考虑两侧汽源的注压。

当系统自巡航检测到燃机有火、炉侧起压(中压主蒸汽阀前压力 $> 0.1$  MPa)且中压主蒸汽阀阀前后差压 $< 1$  MPa 时,系统自动缓慢打开炉侧中压主蒸汽阀。高压旁路阀开启或中压主蒸汽阀开启后,机侧再热主

蒸汽管道开始注压,当高压旁路阀开度 $> 10\%$ 或中压主蒸汽阀开度 $> 35\%$ 或机炉两侧管道压力基本平衡(偏差 $< 0.3$  MPa),经防抖动延时(3 s)判断后自动投入中压旁路阀全程自动。

### 4.3 中压旁路阀“停机定压模式”

由于 ETS 系统设计了高压缸压比保护、高排温度高保护,为了保证汽机降负荷停机过程中蒸汽参数不超限、避免启动排汽阀和安全阀动作,中压旁路阀进入“停机定压模式”模式后,压力目标自动滑至 1.6 MPa,如果模式转换前的压力小于 1.6 MPa 则自动维持模式切换前的阀前压力,等待中旁参数自动重置延时时间(1 800 s)满足或手动激活机组旁路系统参数重置,系统会重置旁路参数,“目标压力自巡航生成回路”重新按汽机三态启动速率将目标压力设定值滑至三态冲转压力目标值。

### 4.4 低压旁路阀不设计“最小压力模式”

由于机组启动汽机并网带初负荷期间低压主蒸汽压力正常都 $< 0.5$  MPa,压力没有高压过热主蒸汽、再热主蒸汽那么高,且其系统升压较慢,故低压旁路阀不设计“最小压力模式”,低压旁路阀全程自动控制只设计最小阀位、升压、定压、跟踪、停机定压五个模式。

## 5 结束语

汽轮机主蒸汽旁路系统在机组启动/停机期间协调控制余热锅炉出口和汽机主汽阀前的蒸汽参数,保证机组平稳的启动和停机。本文介绍的是一种燃机—蒸汽联合循环机组自巡航自适应旁路全程自动控制策略的设计思路。汽机并网后,旁路控制系统转跟踪模式的过程,还需协同 DEH 一起配合汽机升负荷,不同的现场系统情况会存在一定的差异,我们需根据现场实际情况,对控制策略进行适配优化,参数也需要现场调试适配调整以达到良好的控制状态。

## 参考文献:

- [1] 韩庆华,李凤奎.大型火电机组 100% 汽机旁路控制优化研究[J].工程技术研究,2019(18):19-20.
- [2] 贺悦科,王浩,孙创创,等.火力发电厂机组自启停控制(APS)技术研究[J].电力系统装备,2022(08):76-79.
- [3] 房小满.上汽-西门子机组 DEH 系统优化研究[J].仪器仪表用户,2019,26(06):62-65.
- [4] 张天海,爰建军,王骏,等.超超临界二次再热机组旁路控制策略设计及应用[J].发电设备,2020,34(01):51-55.
- [5] 潘宇,胡朝日.AV6 旁路控制 DCS 系统改造及优化控制[J].华东科技:综合,2021(04):16-17.
- [6] 同[5].