

# m701f4燃机整套启动过程的部分重点与难点分析

罗全福

华电四川发电有限公司内江发电厂 四川内江 641000

**摘要:** M701F4燃气轮机作为高效的燃气-蒸汽联合循环机组,其启动过程涉及多个系统的协同运作,操作复杂且存在诸多难点。本文针对M701F4燃机整套启动过程,首先概述了燃机的基本结构,随后详细分析了启动过程中的重点操作与难点问题,包括启动锅炉与高中低压汽包的调节、汽机专业的关键操作、TCA冷却系统的控制以及电气方面SFC系统的运行等,旨在为相关操作人员和技术人员提供参考,确保燃机启动过程的安全与稳定。

**关键词:** M701F4燃机;启动过程;难点分析;TCA系统;SFC系统

## 引言

随着能源行业的不断发展,燃气轮机以其高效率、低污染等优势在电力生产中得到广泛应用。M701F4燃气轮机作为三菱公司推出的先进机型,具有复杂的结构和精密的控制系统,其启动过程是确保机组安全、稳定运行的关键环节。在启动过程中,涉及多个系统的协调配合,任何一个环节出现问题都可能导致启动失败,甚至引发设备损坏等严重后果。因此,深入分析M701F4燃机整套启动过程中的重点与难点,对于提高启动成功率、保障机组安全具有重要意义。

## 一、M701F4燃机结构概述

M701F4燃机主要由进气部分、压气机部分、燃烧室部分、透平部分以及排气部分五大部分组成。来自大气的空气通过进气过滤系统、进气室和进气缸后被吸入压气机。三菱M701F4燃气轮机采用带有进气可调导叶(IGV)的17级高效率轴流式压气机。在压气机段,空气被压缩后送至燃烧室段。燃烧室由环绕机轴呈环状布置的20只燃烧器组成,燃料和压缩空气在分管燃烧器中燃烧,且燃烧器被设计成能尽量减少NO<sub>x</sub>生成物的型式。透平段包括4级反动式叶片,高压和高温的燃气被送到透平,并在透平段转换成机械动能,一部分动能用于驱动压气机,另一部分用于驱动发电机和励磁机<sup>[1]</sup>。透平叶片装有先进的冷却系统,且涂有涂层,以改进耐腐蚀和抗机械磨损的能力,从入口顺着气流方向观察,透平叶片沿顺时针方向旋转。从透平出来的烟气通过排气扩压段和轴向排气通道,进入HRSG(余热锅炉)、烟囱和消音器,最后排入大气。为确保燃气轮机的良好起动机

能,在压气机的第6和11级安装有抽气阀,启动期间抽气阀打开,当燃气轮机达到同步转速时该阀门关闭。

## 二、M701F4燃机启动过程中的重点与难点分析

### (一)启动锅炉与高中低压汽包操作难点

启动锅炉与高中低压汽包的操作是燃机启动过程中的重要环节,其运行状态直接影响燃机启动的顺利进行,操作难点主要在于调节锅炉水位、温度和压力。

#### 1.启动锅炉操作要点

启动锅炉的水位上限为220mm,下限为-220mm,当水位低于-100mm时,MFT(Main Fuel Trip,主燃料跳闸)会动作,导致启动锅炉熄火。MFT作为锅炉安全保护体系的核心,能够连续监视预先确定的各种安全运行条件是否满足,一旦检测到可能危及锅炉安全运行的工况,如炉膛压力异常、火焰检测失败等,将快速切断进入炉膛的燃料,以避免事故发生<sup>[2]</sup>。在实际操作中,为留有操作裕量,水位不能低于-50mm,上限不能高于+180mm。因为当水位高于180mm时,紧急放水会自动开启,待放水到+20到+30mm时关闭紧急放水,由于自动关闭需要时间,提前关闭更方便操作。正常运行时,水位应维持在-50mm到+50mm之间,最好维持在0mm左右。启动锅炉的额定压力为1.6MPa,运行初期压力不要超过1.4MPa,燃机启机之前压力不要超过1.2MPa。如果压力过高,打开对空排气门可最快降低压力,开关时间控制在8秒之内,一般为3秒。正常运行时压力不超过1.2MPa,吹管期间,压力根据需求一般为0.9MPa-1MPa。温度方面,正常运行时应控制在300-320℃之间。当温度过高时,可直接打开降温水(主降温)或打开对空排气(副降温)进行降温,且降温水的手动阀门需要提前

打开。

## 2. 高中低压汽包调节

启动前,为防止虚假水位,汽包水位需维持在低位。高压汽包水位维持在0位左右,上水调门开度3%~5%;中压汽包维持在0位左右,上水调门开度12%左右;低压汽包水位维持在50mm左右,上水调门投自动50mm。水位调节可通过调整上水调门、蒸发器定期排污门、汽包连续排污门、汽包启动排水门来实现<sup>[3]</sup>。开始吹管后,由于汽包压力急剧降低,大量水变成气泡蒸汽,汽包会出现虚假水位,水位会急剧上升到300~400mm左右(吹管期间虚假水位比正常运行时高)。而水变成蒸汽后,汽包水会减少,导致吹管结束后水位急剧下降。因此,在吹管过程中,需提前开大上水调门进行补水,高压汽包上水调门开到10%左右,中压汽包上水调门开到30%左右(中压汽包容积最小,水位下降最快),低压汽包上水调门投入手动,开20%左右。吹管结束后,高压汽包上水调门开到25%左右,中压汽包调门开到75%左右,低压汽包调门投入50mm自动。当汽包压力升高,水位急剧下降,高、中压汽包会下降到-300mm左右,等到水位回头开始上涨,再将上水调门调整到初始开度。

## (二) 汽机专业重点操作

### 1. 疏水阀的开启

在汽轮机组启停、变负荷运行过程中,蒸汽与汽轮机本体和蒸汽管道接触,当蒸汽温度被冷却到低于其压力所对应的饱和温度时,部分蒸汽会凝结成水,这是疏水产生的主要原因。因此,必须打开管道上高、中、低、再热冷段、再热热段的疏水阀。若不打开疏水阀,可能会导致一系列问题:积水可能导致水冲击,轻则引起管道振动和巨大噪声,重则使管道产生裂纹甚至破裂;积水进入汽轮机,会使动叶片受到水的冲击而损伤,甚至断裂,同时造成金属部件急剧冷却,产生很大的热应力,可能导致大轴弯曲,甚至永久变形;疏水未能排出,会在高压缸内外表面反复加热和冷却,对金属造成永久性损害,并可能在投高压缸时引起机组振动;停机后,汽轮机内部的积水会导致腐蚀,影响设备寿命和安全性。

### 2. 低压缸冷却蒸汽温度压力的控制

低压缸冷却蒸汽在机组启动后投入运行,其主要控制目标是防止低压缸排汽温度过高,从而保护低压缸及其内部部件不受热损伤。在机组启动初期,由于负荷较低,通过低压缸的蒸汽流量较小,可能导致低压缸排汽温度升高。过高的温度会对低压缸的金属部件造成热应

力,长期或频繁的高温运行会加速金属材料的蠕变和疲劳,降低设备的使用寿命。可通过降温水来控制蒸汽温度,降温水的水源来自凝结水及凝补水系统,需要提前制好符合要求的凝结水,并且需要设置调节降温水的电动自动阀门。

### 3. 轴封的重要性

汽轮机轴封的作用是阻止外界空气漏入汽缸,从而保护凝汽器的真空,提高汽轮机的排汽压力,提高机组的经济性。前期汽轮机轴封的压力来源于启动锅炉烧出来的蒸汽,且对轴封的蒸汽要求较高,原因如下:(1)防止转子骤冷:汽轮机在热态时,轴封处转子及轴封片温度较高。若不先投轴封就抽真空,冷空气会顺轴封进入汽缸,导致转子急剧收缩,产生热应力和热冲击。(2)避免大轴弯曲:冷空气进入汽缸会使上下缸温差增大,可能导致动静部分摩擦,严重时造成大轴弯曲。(3)控制胀差:先投轴封可防止转子局部冷却,避免正胀差过大,有利于控制胀差在合理范围内。(4)保护设备:投入轴封能确保汽轮机内部形成良好的密封环境,防止灰尘污染。

轴封还能维持真空度,在汽轮机的低压端,轴封能够有效阻止外界空气进入汽缸,从而维持凝汽器的真空状态,确保汽轮机的排汽压力保持在较低水平,这对于提高机组的热经济性和整体效率至关重要。同时,轴封可防止蒸汽泄漏,在汽轮机的高压端,轴封系统能防止高压蒸汽从轴端泄漏,减少能量损失,提高汽轮机的效率,同时防止蒸汽泄漏到汽轮机房内,避免对工作人员的安全和健康造成威胁,减少对环境的热污染<sup>[4]</sup>。

## (三) 燃机TCA冷却系统

三菱M701F4燃气-蒸汽联合循环机组,燃气轮机透平转子冷却空气系统(TCA系统)采用水冷式系统。该系统通过管壳式空气冷却器的换热功能,利用余热锅炉高压给水系统的水来冷却燃气轮机压气机排出的空气,吸收了热量的水直接进入高压汽包。由于热量在整个循环过程中基本上没有损耗,因此大大提高了整个联合循环的效率。

### 1. TCA系统简介

TCA系统由高压给泵出口来的水冷却压气机排气,被冷却过的排气作为转子冷却空气通入转子,冷却水回水有两路,一路回凝汽器,一路去高压汽包。其作用是燃机透平转子及叶片提供适宜温度足够流量的转子冷却空气。

## 2.TCA控制系统

TCA控制系统主要由TCA温度控制器、TCA温度控制阀、TCA流量控制器、TCA流量控制阀、温度变送器、流量变送器等组成。其控制原理为：TCA冷却空气的气源取自压气机排气，满负荷运行时温度有440℃以上，而转子冷却空气的设定值为230℃，因此必须提供一定量的冷却水，冷却水量的需求与冷却水温度有关。满足冷却水需求通过两个回水阀调节：回水至高压汽包调阀控制冷却空气温度；回水至凝汽器调阀监视和控制回水流量。

## 3.TCA系统常见问题及重要性

TCA系统控制不到位容易导致跳机，因此其在整个燃机系统中重要性不言而喻。常见问题如下：（1）当高压汽包水位高时，高压给水调门关小，导致TCA通过回高压汽包调门给水流量变小，若回水至凝汽器调门不能及时打开可能导致跳机。（2）TCA回水至凝汽器在燃机低负荷时回凝汽器，在高负荷时回高压汽包，在切换过程中，回凝汽器阀门出现0-10%快速开关导致管道剧烈震动，对管道、控制器和执行机构都是不小的考验。（3）TCA冷却器冷却水进出口差压对回水至高压汽包流量影响较大，影响该差压的原因主要有高压汽包压力的突变，及省煤器入口调门的开度。在常山的机组中，差压的自动调节已经引入，但自动运行效果不佳，一般保持40%左右开度。（4）TCA回水至高压汽包调门对流量是开环控制，若高负荷时因故全关就得考验回水至凝汽器调门及时响应的能力。

### （四）电气方面

燃气轮机在起动、清吹、高盘冷却过程中，其驱动力矩由同步发电机作为同步电动机运行来提供，通过静止变频器（SFC）装置调节电源频率来实现对转速的调节。静止变频器系统（SFC）由隔离变压器、谐波滤波器、整流装置、直流电抗器、逆变装置、SFC控制屏、SFC开关切换屏、励磁起动控制柜和逻辑切换盘等组成。其中逻辑切换盘通过PLC可实现TCS与SFC、励磁系统的逻辑信号切换、传送，一面逻辑切换盘可实现两套SFC系统对两台机组的启动控制<sup>[5]</sup>。SFC电源取自6kV厂

用电，经过输入隔离变压器，通过整流器将恒定的三相交流电压变成电压可变的直流电，再通过逆变器变为频率可变的交流电，输入到发电机定子绕组中，同时在发电机转子中加入直流励磁（启动励磁系统）。

## 结束语

M701F4燃机整套启动过程涉及多个复杂系统的协同操作，每个环节都存在一定的重点和难点。启动锅炉与高中低压汽包的水位、温度、压力调节需要精确控制，以避免MFT动作和虚假水位带来的影响；汽机专业中疏水阀的开启、低压缸冷却蒸汽的控制以及轴封系统的正常运行是保障汽机安全启动的关键；TCA冷却系统的稳定运行直接关系到燃机的安全，其控制精度要求较高；电气方面的SFC系统则为燃机的启动提供动力支持，其运行状态影响着启动的顺利与否。在实际操作中，操作人员应充分掌握各系统的工作原理和操作要点，密切关注各参数的变化，及时采取有效的调节措施，以应对各种可能出现的问题。同时，应加强对设备的维护和保养，定期进行检查和调试，确保各系统处于良好的运行状态，从而提高M701F4燃机启动的成功率，保障机组的安全、稳定、高效运行。

## 参考文献

- [1]王登银, 陈珂, 郭赞, 等.M701F4燃气轮机双轴联合循环FCB功能实践与探讨[J].电气技术与经济, 2024, (11): 184-186+190.
- [2]龙卓羽.三菱M701F4燃机自动启停系统控制策略模块建设与优化[J].中国机械, 2024, (31): 35-38.
- [3]陈延柏.M701F4燃气轮机轴承振动异常分析及处理[J].现代制造技术与装备, 2024, 60(02): 121-124.
- [4]吴攀.M701F4型燃气轮机发电机组IGV控制及燃机温控的研究[J].科技创新与应用, 2019, (22): 59-60.
- [5]许正武, 张慧军, 谷啸.M701F4燃气轮机TCA系统冷却水流量异常分析[J].青海电力, 2022, 41(01): 50-52+56.