

# 三菱M701F4++燃气-蒸汽联合循环机组APS一键启动开发与应用

杨洲 叶景

广州恒运东区天然气热电有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20281

**[摘要]** 三菱M701F4++改进型,高效一拖一双轴热电联产燃气蒸汽联合循环机组。设计为带供热连续运行,在设备选型上更突出汽轮机及整机效率。现实际调峰运行,与设计初衷存在差异,机组启动过程的安全性、操作量、耗时、风险及成本能耗高于原设计,规范机组启停操作意义重大。实现“一键启停”(APS控制),对规范机组启停过程的安全控制和操作有重要意义。本项目对三菱M701F4型联合循环机组启停过程进行了深入研究,开发了机组APS控制逻辑的组态和验证,并对原控制逻辑中不合理的部分进行了优化和完善,实现了APS功能模块对机组各设备的有效控制和调节,使机组在启停阶段的安全性和经济性得到明显提高。

**[关键词]** APS; 启停; 调试; 优化

**中图分类号:** TL374 **文献标识码:** A

## Development and Application of APS One-Button Startup for Mitsubishi M701F4++ Gas-Steam Combined Cycle Unit

Zhou Yang Jing Ye

Guangzhou Hengyun East District Gas and Electricity Natural Gas Co., Ltd

**[Abstract]** This project has conducted in-depth research on the startup and shutdown processes of the Mitsubishi M701F4 combined cycle unit, developed the configuration and verification of the unit's APS control logic, and optimized and improved the unreasonable parts in the original control logic. It has realized the effective control and regulation of various equipment in the unit by the APS functional modules, significantly enhancing the safety and economic efficiency of the unit during the startup and shutdown phases.

**[Key words]** APS; startup and shutdown; commissioning; optimization

### 1 背景及意义

某公司采用两套M701F4++改进型高效一拖一双轴热电联产燃气蒸汽联合循环机组。燃机由三菱重工制造,采用Diasys Netmation控制系统;汽轮机、余热锅炉及辅机由东方汽轮机厂(DTC)制造,采用艾默生OVATION控制系统。汽轮机为LZC161机型,设计为带供热连续运行,但目前实际处于调峰运行状态。这种工况差异导致机组启动过程的安全性、操作量、耗时及能耗均高于原设计,因此规范启停操作意义重大。

燃气轮机的APS(自动程序启停系统)能够协调各子系统,按预定参数和进程控制机组启动或停运。APS系统凭借高度自动化,显著降低了人工误操作风险,减轻金属部件热应力,保障机组长

期安全稳定运行,是实现减员增效和体现机组先进自动化能力的关键。

### 2 APS实现的难点

(1) 系统复杂度高: 燃机机组工艺流程复杂,各子系统需高度协同,运行工况多样,要求APS具备更强的自适应能力。

(2) DEH逻辑固化: 当前分轴联合循环汽轮机的DEH控制逻辑为通用出厂设置,挂闸、冲转至并网初负荷的控制策略过于固化,无法满足调峰机组灵活运行的需求。

(3) 冲转参数覆盖不足: 原设计的冷、温、热态冲转参数未能充分覆盖汽轮机缸温分布全过程,易导致叶片热冲击及内外缸温差超限。

(4)开发时机滞后:基建调试期内APS功能未有效开展,商业运行后自行开发面临技术难度大及考核风险高的问题。

(5)在紧张的基建调试期内,APS功能开发未能有效开展。如今机组已在考核压力下商业运行,在缺乏专业支持的情况下自行开发APS,不仅技术难度大,更带来了潜在的考核风险。

### 3 APS模块开发主要思路

通过借鉴现有项目的经验,并紧密结合我公司现有的逻辑架构,目前已完成了APS一键启动功能的逻辑组态与部署,而一键停机功能尚在规划中。该APS系统采用分步控制策略,将启动流程划分为多个断点,每个断点进一步细分为若干子节点。各断点及子节点均设有独立的启动条件判断机制,系统依据机组启动顺序自动依次激活,实现全流程顺序控制。其中,关键子节点(如:燃机启动指令下发、燃机并网、汽机挂闸、汽机并网等)需经运行人员人工确认后方可执行,以确保操作安全可靠。

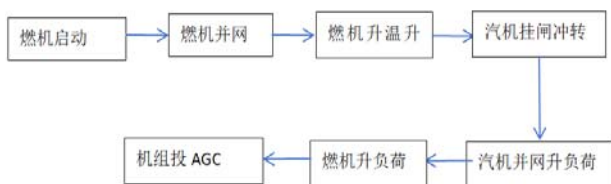


图1 APS启动模块流程

由于APS模块中关键子节点(如汽轮机挂闸冲转)需经人工确认方可执行,而运行人员无法在主操作界面上直观获取此类节点的条件状态,必须进入底层逻辑页面进行逐一查验,影响了操作效率。为提升APS模块的人机交互体验,调试小组优化了操作界面。

APS模块作为机组启动过程的管理与调度核心,负责整体流程协调,但部分设备的启动和调节仍依赖于其单体控制逻辑。通过系统总结启动操作与运行经验,我们对相关设备的单体逻辑提出了优化建议,为APS模块的开发、调试与稳定运行奠定了坚实基础。

### 4 APS模块开发过程解决问题汇总

#### 4.1 汽轮机启动控制与启动曲线不一致

根据DEH原有逻辑,汽轮机并网后无论处于冷、温或热态,均需执行长达20分钟的暖机过程,该设置缺乏合理性。并网后,高、中压调节阀切换到阀位控制模式,按固定速率开启,此时并不对汽轮机负荷进行直接控制。

根据多次启动经验积累,并与东方汽轮机、东方自控的设计人员深入讨论后,调试小组制定了《汽轮机启动方式优化方案》,将原有负荷控制模式调整为阀位控制模式。优化后,汽轮机在并网即进入间接负荷控制方式,能够严格遵循厂家提

供的启动曲线进行升负荷,显著提高了启动过程的控制精度和运行效率。

#### 4.2 汽轮机主调阀压力控制模式条件修正

汽轮机主调阀压力控制模式是根据压力设定值,对主汽系统压力进行控制,确保进入汽轮机的主蒸汽压力在设定范围内,且不低于最低压力。在原有控制逻辑中,存在以下问题:

(1)当前高、中压主调阀压力控制模式的投入条件设定不尽合理,致使汽轮机在热态启动过程中于低负荷阶段停留时间过长。由于进入汽轮机的蒸汽流量偏小、焓降较大且温度较低,导致转子冷却收缩,进而引发显著的负胀差现象。

(2)按照厂家说明书调整低压主调阀压力控制模式的投入条件,并删除低压主调阀控制模式与高、中压主调阀控制模式的关联。低压调门开启负荷由汽机48MW修改至汽机35MW且主汽阀前过热度大于70℃即可,提前开启低压主汽阀,大大提高机组启动时机组效率。

(3)原逻辑中,汽轮机调门全开后需由运行人员手动投入高、中、低压压力控制,影响了机组启动速度。经优化,现调整为调门全开自动投入压力控制,实现了该环节的自动化,有效提升了启动效率,避免了人为操作可能引起的延迟。

#### 4.3 机组启动阶段高压过热蒸汽温度超温

针对燃机负荷100MW升至140MW阶段因IGV开度偏小导致的排气温度急剧升高,开发了启动阶段的高压过热与中压再热蒸汽温度控制模块。

实践表明,适当降低主蒸汽温度是控制高压缸正胀差的关键。通过引入减温器后过热度监视功能,设置低报警及联动关闭保护,在避免蒸汽带水的同时,依据可变温度准则动态调整蒸汽参数,有效管理了转子胀差和内外缸温差。

#### 4.4 轴封电加热器运行超温跳闸

为保证轴封供汽温度与转子温度相匹配,在高压缸与中压缸前轴封供汽管路的合并段设置了电加热装置。该轴封电加热器主要用于机组启停阶段和甩负荷阶段,通过调节供汽温度使其与汽缸温度相适应,从而避免因轴颈过热或过冷导致的设备故障。

##### 4.4.1 存在问题: 不断修改轴封加热器温度设定值

投入轴封供汽时需人工根据汽缸缸温设定轴封供汽温度,该设定值因人而异,存在操作不一致性。在汽缸负荷上升过程中,汽缸缸温不断上升,需要根据汽缸缸温及时修改设定轴封供汽温度。

汽缸负荷达到轴封自密封时,高压轴封蒸汽从进入到逆流,逆流时轴封进口蒸汽温度会随着逆流蒸汽大幅下降,“反向流动”信号不出现,加热器不会停止加热,轴封加热器本体持续加热,直到本体超温跳闸。

汽缸负荷达到轴封自密封后,高压轴封逆流后蒸汽温度跟

随缸温和进汽温度不断上升的过程中, 仍需根据高压缸轴封溢流蒸汽温度手动调整加热器出口温度设定值。

4.4.2 加热器本身“正向流动”与“反向流动”判断功能不足但在实际运行中, “反向流动”检测可靠性不足。在蒸汽投入初期, “反向流动”即报警, 无法启动电加热器, 导致较冷蒸汽通过加热器流向高温轴承内。在汽机负荷达到40%左右, 高温轴封蒸汽已经逆流已达到自密封程度, 但是“反向流动”信号不出现。

#### 4.4.3 运行优化和优点

在送轴封汽时和轴封自密封时, 轴封温度跟踪汽机缸温值减一定温度。在汽机高压轴封开始逆流蒸汽时, 使用加热器本体温度作为判断条件, 避免本体超温。全程轴封温度设定值自动跟踪汽机缸温和负荷调节, 实现轴封供汽温度自动, 不需要人工不断输入温度设定值, 减少人员劳动强度。减少人为根据输入的偏差和不一致性, 同时减少人为失误的可能性。经过冷态热态上百次开机实践, 再未出现加热器本体超温跳闸的事件, 延长本设备使用寿命。

#### 4.5 机组疏水阀组开关条件优化

疏水阀组有“顺控开/关”“成组开/关”共有两套独立、并行的控制逻辑。在日常运行过程中, 存在以下问题:

(1) 机组启动抽真空阶段, 机侧疏水阀和锅炉管道疏水自动全部打开, 大量空气进入凝汽器, 延长了机组抽真空时间, 影响机组启动经济性。

(2) 机组热态启动阶段, 燃机点火并略微升压后, 机组机侧、炉侧疏水同时打开, 锅炉侧疏水噪声大, 影响环境安全。

(3) 机组冷态启动阶段, 燃机点火后, 机组机侧、炉侧疏水同时打开, 因主蒸汽系统内没有蒸汽, 导致凝汽器通过机侧、炉侧疏水阀直接与大气相通, 导致机组真空降低, 运行人员为了防止汽机真空低, 又特地加大循环水频率, 造成厂用电升高。

(4) 在机组启动过程中, 高压主汽阀疏水作为汽机高压疏水系统的一部分, 通常在抽真空或锅炉点火后开启。此时锅炉主汽温度尚未充分上升, 远低于目前汽机主汽阀前管壁温度。若在此阶段开启疏水, 会导致汽机侧管壁温度骤降, 引起管道收缩并在内壁产生拉应力, 严重威胁管道和阀门的安全。随后, 随着锅炉主汽温度上升, 汽机侧管道再次受热, 这种冷热交替作用易导致管道发生蠕变, 加速金属疲劳。

对汽机侧主汽阀前疏水逻辑进行了优化: 在机组启动令发出后, 高压主汽阀疏水气动门被强制切换至“手动”状态并保持关闭, 待锅炉主汽温度上升并超过主汽阀前温度时, 方允许开启疏水。该措施有效避免了因温度剧烈波动造成的金属疲劳损伤, 提高了系统运行的可靠性与安全性。

#### 4.6 燃机、汽轮机发电机“一键并网”

开发了给水泵及相关辅机(凝结水泵、闭冷水泵等)的“顺控启动”与“顺控停运”功能模块。系统可自动调整阀门至预定状态并按顺序操作附属设备, 实现了“一键启动”, 减轻了操作负担并避免了设备损坏风险。

在APS“一键并网”功能投入前, 从燃机启动令发出至并网成功总耗时约为34分钟; 实现一键并网后, 该过程时间稳定缩短至31~32分钟, 每次并网平均节约2分钟。

#### 4.7 给水泵组“一键启动”

在机组各给水泵启动前, 操作人员需手动调整泵体进、出口阀门至预定状态, 以满足电源开关的合闸条件, 同时还需手动操作各附属设备。为减轻操作负担并避免因附属设备操作延误导致设备损坏, 调试小组总结了给水泵的启停操作流程, 开发了“顺控启动”与“顺控停运”功能模块。该模块可自动将进出口阀门调整至启动状态, 并按顺序操作各类附属设备。目前, 机组中的凝结水泵、高压给水泵、中压给水泵、凝结水再循环泵、闭冷水泵及循环水泵均已实现“一键启动”。

#### 4.8 冷态、低温态启动阶段汽机胀差问题

汽轮机是东方汽轮机厂设计制造的最新LZC161-14.7/[0.47]/2.7/566/566/[283]机型。该汽轮机高中压缸体夹层内无蒸汽流通, 在冷态与低温态启动过程中, 缸体加热仅依靠金属导热, 导致缸体膨胀缓慢, 易出现高中压缸胀差偏大的现象。机组冷态启动耗时达10小时, 远超汽轮机厂家说明书规定的启动时长。

针对上述问题, 调试小组采取了以下控制策略: 首先, 依据锅炉厂家说明书, 设置了机组启动阶段高压过热器及中压再热器的蒸汽温度控制模块, 精确控制主汽温升速率; 其次, 通过分析历史冷态与低温态启动曲线, 总结出基于CCS控制模式的升负荷速率曲线。该曲线以高压缸胀差为主要判断依据, 相较于传统的固定速率方式, 更能贴合实际机组状态, 从而合理控制进汽温度; 第三, 在APS加负荷过程中, 严格遵循《汽轮机启动说明书》要求, 设置高压缸胀差与内外缸温差限值, 并在画面上实时显示关键温度参数。当数值超限时, DCS系统自动暂停加负荷并发出提示, 待参数恢复正常后方可继续操作, 有效避免汽轮机叶片热冲击与高压缸胀差过大带来的运行风险。

#### 4.9 汽机升速率优化

按照《汽轮机启动运行说明书》, 汽机冷态升速率为100r/min/min, 温态升速率为150r/min/min, 热态升速率为200r/min/min。根据同类型其他厂经验, 征求东汽厂家同意, 将温态升速率为200r/min/min, 热态升速率为300r/min/min。修改后机组运行振动无变化, 能有效避免启动过程中中低压缸胀差增大, 此次修改为汽机温态和热态升速并网时间节约5分钟。

原东汽设定的汽机冷态暖机转速为1650 r/min, 要求在此转速下暖机15~20分钟, 并监测轴承振动情况。然而在实际冷态

表1 汽机冷温热态划分与冲转参数

	汽轮机高压缸下壁温度	冲转主汽压力	主汽温度	再热汽压力	主汽温度
冷态	<240℃	3.8MPa	370℃	0.8MPa	350℃
温态	240℃<缸温<360℃	5.8MPa	420℃	1.0MPa	400℃
热态	缸温>360℃	7.8MPa	470℃	1.2MPa	450℃

启动过程中,中速暖机阶段因汽机进汽调门开度仅为10%,蒸汽在进入调阀后发生扩散,未能有效加热缸体,导致缸体金属温度仅上升约3℃。此外,原暖机转速接近转子临界转速范围(1423 r/min~1623 r/min),存在共振风险。经与东汽协商,将中速暖机转速调整为2100 r/min。修改后,在冷态中速暖机过程中未再出现轴承振动上升现象,缸体温度也实现明显提升,暖机效果显著改善,据此暖机时间,缸温可以上升20~30℃以上。

#### 4.10 汽机主汽阀前主汽温度温升优化

(1) 优化挂闸条件,提升预热效率。根据《汽轮机启动运行说明书》要求,热态启动时需满足主蒸汽压力7.8 MPa、主蒸汽温度470℃,再热蒸汽压力1.2 MPa、再热蒸汽温度470℃等冲转参数(表1)。原设计中,汽机主汽阀前仅设一根疏水管,平均需等待约47分钟才能达到冲转条件。经调试小组优化,允许在主蒸汽温度不低于缸温-40℃的条件下提前挂闸并开启主汽门,通过主汽门后疏水提升蒸汽温度。实施后,冲转参数等待时间平均缩短20分钟。

(2) 制定基于缸温的冲转参数准则。原冲转参数未充分考虑实际缸温状态,在部分工况下易导致汽轮内外缸温差过大。调试小组创新提出基于缸温的冲转参数准则,规定热态启动时主蒸汽温度高于缸温且不低于440℃即可冲转。该准则在避免蒸汽温度过高引发热应力的同时,显著减少了等待蒸汽温度的时间。

(3) 改进主汽疏水控制逻辑,防止管道反复冷却。热态启动过程中,受燃气轮机吹扫及初期排气温度较低影响,余热锅炉出口蒸汽温度偏低。原逻辑中高压主汽阀前疏水气动阀在点火后开启,导致低温蒸汽冷却主汽管道;待负荷上升蒸汽温度恢复后,高温蒸汽又对管道进行加热,造成管壁反复热疲劳。优

化后,逻辑调整为当锅炉侧高压过热器出口蒸汽温度高于主汽阀前温度时,方开启疏水阀,有效避免管道温度频繁波动,提升启动效率。

(4) 合理降低冷态启动进汽温度,减少热冲击。原标准中,缸温低于240℃均按冷态处理,采用370℃的主蒸汽温度冲转,易导致高压缸叶片热冲击及内外缸温差过大。经与东方汽轮机厂研究论证,将进汽温度调整为310℃,在减轻热冲击的同时也缩短了冲转等待时间,提升冷态启动的安全性及经济性。

#### 4.11 汽机压力升压优化

在机组建设期间,粤能科技自主研发并实现了高、中、低旁路全自动控制,有效支持机组频繁启停工况下的蒸汽压力稳定,减轻因汽压波动导致的汽包水位事故,同时显著减少了人工操作负担。

通过对APS全程启动过程的分析,调试小组将优化重点放在缩短燃机并网后等待汽轮机冲转参数的时间上,尤其是主汽压力及主汽温度与汽机缸温匹配的阶段。小组深入分析运行数据,从汽轮机高旁逻辑入手,将高旁升压速率提高至原来的120%,从而有效缩短了主汽压力建立时间。实际运行数据显示,每次启动过程中高、中、低压部分的升压速率均低于说明书规定的限值(分别为4.4℃/min、9.3℃/min和27.8℃/min),完全满足设计与规程要求。项目实施后,在热态启动中平均缩短主汽压力等待时间3分钟以上。

#### 4.12 中旁关闭逻辑优化

由于中压汽包容量较小,对中压系统压力变化较为敏感。自机组投产以来,在所有导致机组跳闸的事件中,约有65%是由中压汽包水位保护动作引发的。原中压旁路控制逻辑存在缺陷且

响应迟缓,尤其在汽机调门全开、机组加负荷过程中,中旁受水位影响关闭缓慢,导致部分蒸汽仍经中旁进入凝汽器,不仅影响机组效率与启动速度,运行人员为降低能耗往往需手动干预关闭中旁,该过程常耗时4分钟以上。

调试过程中通过持续优化中旁关闭速率,在实现快速关闭的同时避免中压汽包水位大幅下降。优化后,中旁关闭时间缩短至60~80秒,关闭期间中压汽包水位控制全程投自动,水位虽受系统压力影响下降约110mm,但通过给水自动调节可在约2分钟内恢复至正常水位,整体水位波动处于可控范围,未造成不利影响。

#### 4.13 提升DEH的目标转速

根据DEH原有逻辑,汽轮机冲转目标转速设置为3000 r/min。在接近目标转速时升速率逐渐降低,确保实际转速不会超调。启动过程中,受电磁力矩作用,转速会从3000 r/min下降至2988 r/min左右,再缓慢回升至额定转速。在启动并网同期阶段,转速进一步上升至3003~3004 r/min,使汽机频率略高于系统频率,从而实现并网。

经咨询东方汽轮机厂专家,将目标转速调整为3008 r/min,并不会引起安全问题。优化后,启动时转速下降至2996 r/min,转速恢复速度明显加快,在执行并网程控时较原逻辑节省约1分钟,有效提高了并网效率。

#### 4.14 人为设置“暂停”“继续”按钮

在汽轮机冲转前设置水质合格判断环节;若水质不合格,需人工点击“暂停”,待水质达标后可手动“继续”。热态/温态启动时,系统自动判定水质合格,并直接进入后续流程。

在汽轮机调节阀开启阶段设置“暂停”与“继续”按钮。机组处于冷态或温态时,系统虽已根据缸温设定调门开启经验曲线并降低加负荷速率,如仍出现汽缸内外温差过大情况,将自动触发保护逻辑停止加负荷。操作人员也可手动点击“暂停”,通过多重保护机制确保缸体温差始终处于规定范围内。正常启动过程中,系统默认自动执行后续步骤。

在汽轮机调门全开、燃气轮机开始加负荷阶段,同样设置“暂停”和“继续”按钮。冷态与温态工况下,系统将基于汽轮机缸温及历史曲线,自适应设定不同升温速率下的加负荷经验值,并在检测到缸温差或高压缸胀差超标时自动停止加负荷。由于主汽温度响应存在滞后,必要时可人工干预暂停燃气轮机加负荷,待参数恢复正常后继续操作,从而确保缸温差与胀差始终处于安全范围。

机组正常运行时,系统默认持续执行流程以提升启动效率,仅在实际必要时才手动中断加负荷等操作。

#### 4.15 人机界面优化

在APS界面的显著位置,集成汽机高压缸内外缸温差及高压缸胀差的实时数字显示模块。同时,优化报警逻辑,当控制系统

因缸温差或胀差超限而抑制负荷提升时,应在界面主动推送警示信息,且该信息须清晰说明“因高压缸内外缸温差大限制加负荷”或“因高压缸胀差大限制加负荷”等具体原因。

此方案实施后,将实现故障原因的透明化传递,使运行人员能够一目了然地获取参数状态并精确锁定负荷限制根源,极大提升故障判断的准确性和操作安全性,有效规避设备风险。

在APS操作界面中,增加汽机在冷、温、热态下的进汽参数以及汽机阀前进汽参数的实时数值显示,使操作人员能够直观掌握当前进汽条件是否满足要求,并为判断是否可执行后续操作提供明确依据。

在APS界面中,增加主汽阀前蒸汽温度与汽机缸温之间差值的实时显示。设定当该温差大于-40℃范围内时允许挂闸,以支持快速提升蒸汽温度。在机组热态条件下,需确保主汽阀前蒸汽温度高于缸温方可进行冲转。通过实时显示该温差数值,操作人员可直观判断是否满足挂闸与冲转条件,无需在不同画面之间切换比对参数,从而提高操作效率和准确性。

### 5 机组APS模块的使用效果

将机组启动全过程划分为三个阶段:燃机启动令至燃机并网、燃机并网后至汽机并网、汽机并网后至AGC投入,并在DCS画面上实时显示各阶段的具体耗时,便于所有运行人员实时查看与分析。调试小组通过统计每次启动各阶段的时间,据此识别可优化环节并提出改进措施。

#### 5.1 缩短机组启动时间,提高机组经济性

发电部根据汽机缸温对机组每次启动经济性进行了分类统计。剔除了部分因设备故障导致机组启动耗时延长的数据点。

第一套机组启动次数分析		
总启动次数	冷态	5次
98次	温态	13次
	热态	80次

第二套机组启动次数分析		
总启动次数	冷态	5次
77次	温态	15次
	热态	57次

图2 机组启动状态占比

机组不同的启动状态对机组启动经济性影响较大。如图2所示,经统计作为调峰机组,热态启动占比达78.3%。因此,本文在机组启动经济性分析时,重点对机组热态启动分析。

在APS系统实施前,机组热态启动全程耗时约120分钟,主要包含以下五个阶段:

(1) 燃机从启动至转速达到3000 r/min并网,耗时约33分钟。受燃机固定升速率限制,该时段基本恒定;

(2) 燃机升至暖机负荷, 并等待主蒸汽参数达到汽机冲转要求, 耗时约47分钟;

(3) 汽轮机从冲转至定速3000 r/min并网, 耗时约13分钟。受汽轮机升速率限制, 该阶段时间也较为固定;

(4) 燃机负荷保持, 汽轮机主调阀逐步开启至全开, 机组以7.5 MW/min的推荐速率升负荷, 耗时约10分钟;

(5) 汽轮机调阀投入压力控制, 中压旁路全关, 机组依次投入CCS与AGC控制。此阶段负荷提升通常由人工操作, 耗时约17分钟。

经APS系统优化后, 热态启动整体时间缩短至约85分钟, 各阶段耗时如下:

- (1) 燃机启动至并网耗时约32分钟;
- (2) 等待主蒸汽参数达标耗时缩短至27分钟;
- (3) 汽轮机冲转至并网仍需13分钟;
- (4) 汽轮机调阀开启及升负荷至全开过程压缩至8分钟;
- (5) 机组投入压控、CCS及AGC控制阶段, 通过将升负荷速率提升至12 MW/min, 耗时大幅减少至4分钟。

提升热态启动经济性是降低全年启动成本的关键。本次APS调试工作于8月至9月分阶段逐步实施, 经调试小组对控制逻辑的系统优化, 机组热态启动时间与相关成本均显著下降。启动时间统计如图3/4所示。

第一套机组					
日期	样本数	发启动令到燃机并网	燃机并网到汽机并网	汽机并网到270M	总时间
1月至8月	53	33.8	52.6	30.3	116.7
9月	8	32.3	49.3	20.6	102.2
10月	19	32	43.8	15	90.8

图3 第一套机组热态开机时间统计

第二套机组					
日期	样本数	发启动令到燃机并网	燃机并网到汽机并网	汽机并网到270M	总时间
1月至8月	40	33.7	63.8	37	134.5
9月	9	33	51.4	15.4	99.8
10月	8	32	44.9	15.5	92.4

图4 第二套机组热态开机时间统计

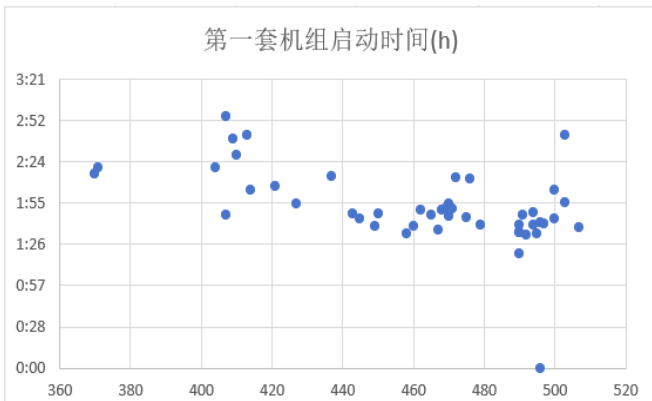


图5 2024年1月至8月第一套机组启动时间

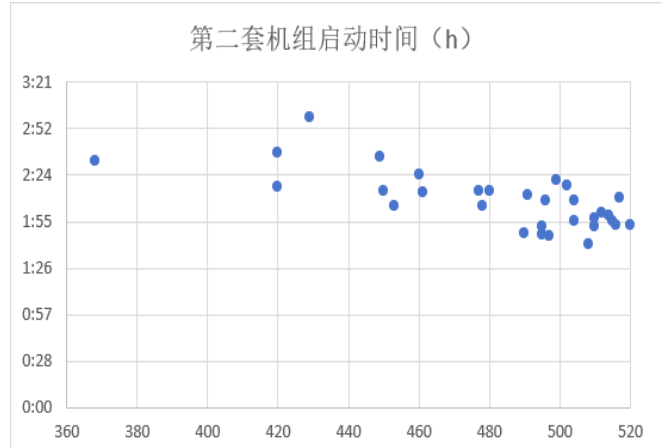


图6 2024年1月至8月第二套机组启动时间

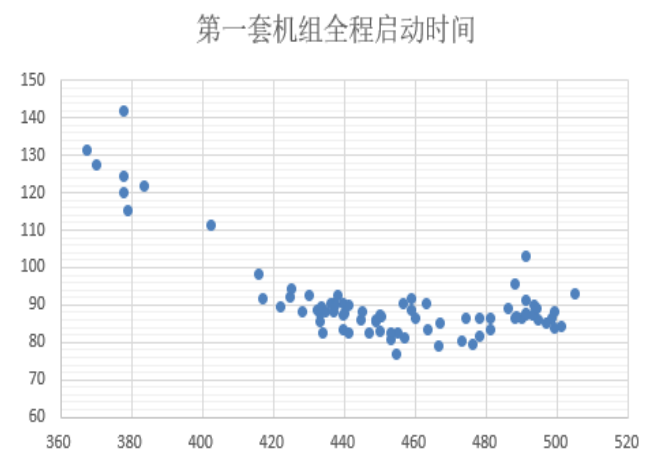


图7 2025年第一套机组启动时间(分钟)

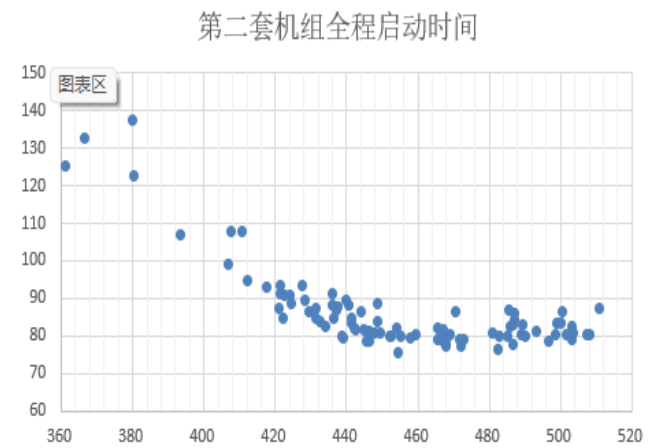


图8 2025年第二套机组启动时间(分钟)

尽管机组停运时间存在差异, 汽轮机缸温状态不一, 对启动时长具有显著影响。图7和图8, 2025年热态开机时间统计可以看出, 经逻辑优化后, 我厂APS热态启动平均时间为85分钟, 较优化前节约约35分钟。对于夜间停机、次日启动的工况, 平均启动时间可进一步缩短至82分钟左右。2025年将持续推进优化工作,

目前最短启动时间已达到75.5分钟,平均时间稳定在79~83分钟之间。

2025年,机组热态平均启动时间较2024年上半年缩短超过40分钟。根据每次启动的天然气消耗量与发电量积分累计差值计算,如天然气单价3.2元/方,则单次启动可实现节能效益约2.84万元/台,相较于原启动成本9.8万元/台,降幅达30%。若按全年热态启动200台次估算,预计年经济效益可达568万元。

### 5.2提高机组运行安全性

在本项目中,调试小组提出了多项合理化建议,经发电部、检修部与技术部分析论证后予以实施,共完成了95个设备的单体逻辑修改。此次逻辑优化不仅适用于APS模式下的机组启动,即使在运行人员手动操作过程中,仍可实现自主协调控制,显著扩大了应用范围。通过运行人员在日常启机操作、运行监视与盘盘检验中总结出的7条经验曲线,替代了逻辑中原有部分参数的固定速率设定,使逻辑参数更贴合不同启动工况的需求。优化后,机组启动过程中系统参数变化更为平稳,在将各项参数严格控制在安全范围内的同时,进一步提升了机组启动过程的安全性和可靠性。

在未采用APS模块时,机组启动操作票共计176项(不含辅机启动)。引入APS模块后,运行人员仅需发出启动指令,并通过若干检查与监视步骤,确认后后续进程即可完成整个启动流程。从燃机启动令发出至AGC投入,全程仅需3次关键确认,显著减少了操作步骤。这使得运行人员能够将更多精力投入设备状态检查与参数变化分析中,不仅降低了人为误操作的风险,也进一步提升了机组启动过程的安全性与可靠性。

### 5.3降低机组启动机阶段NO<sub>x</sub>排放

燃气轮机低负荷运行时,较低的空燃比和较高的火焰温度破坏了理想的燃烧化学平衡,导致NO<sub>x</sub>生成量增加。机组启动阶段,脱硝装置因烟温条件不满足投运条件,此阶段的NO<sub>x</sub>排放构成了一项重要的环保约束。优化启动流程、缩短启动时间,是减少低负荷运行窗口、控制NO<sub>x</sub>总排放量的关键举措,此举将有效提升企业的环保表现与环境合规性。

## 6 结语

### 6.1小结

M701F4分轴机组系统结构复杂、设备众多,燃机与汽机需高度协同,尤其在热态启动过程中操作步骤繁多,因此实现APS功能的难度较大。由于机组已处于商业运行状态,APS模块的调试需结合电网启动计划开展,在确保启动安全的前提下逐步推进,对调试流程与优化策略提出了更高要求。在机组各工况实际启动次数有限的情况下,项目团队通过深入分析历史运行曲线,并经多次试验与迭代优化,目前APS功能已趋于完善,机组启动时间显著缩短,并体现出如下特点:

(1)良好的适应性:一套顺控逻辑兼容冷态、温态与热态启动需求,当前冷态启动对高压缸胀差是整个工作难点,升负荷中控制曲线仍待进一步拟合优化;

(2)高度自动化:在冷态启动中,汽机低速摩检、中速暖机与高速暖机等关键步骤均可自动判断与执行,系统在反馈条件满足后自动进入下一阶段,无需人工设定参数,有效避免因人为误操作引发的安全风险;

(3)模块与逻辑协同优化:以优化单体逻辑为首要策略,确保在手动操作模式下多数设备仍可实现自动控制,提升整体操作灵活性;

(4)严谨的判条件设计:各步骤的启动与结束条件经科学设计,既保障APS执行期间参数严格达标,也避免因次要异常导致顺控中断;

(5)合理的断点控制:APS断点设置科学,关键节点可控性强,程序执行灵活可靠;在因故中断时可实现设备状态稳定保持,并能无缝切换至手动控制。

目前,机组在温态与热态下运行的APS功能已验证达到预期目标,并取得显著经济效益。

### 6.2后续工作

(1)积极推进APS一键停机功能开发,制定多种标准化停机模式,以满足调峰期间的保温保压、正常停机及检修停机等不同需求。此举将有效提升机组停运过程的经济性,并最大限度减少人为误操作。

(2)为深化推进APS一键启动优化,需系统统计每次启动各阶段的耗时,并据此进行深度分析,探寻经济性提升路径。针对APS运行中存在的疑难问题,将集结各部门技术力量并咨询厂家专家,共同会诊,从根本上保障操作的安全性与控制逻辑的严密性。

(3)进一步优化人机交互界面,通过信息整合与直接展示,减少运行人员对底层逻辑的查询需求,显著降低认知负荷和节约时间,使其能更专注于核心监控与决策任务。

### [参考文献]

[1]陈琦,燕金栋,龙涛.三菱M701F4型燃气—蒸汽联合循环机组APS“一键启停”的开发与应用[J].东方电气评论,2023,37(02):10-16.

[2]董溢华,胥波.M701F4机组一键自启停(APS)方案设计[J].东方电气评论,2022,36(1):56-61.

[3]曹泉.联合循环燃机机组APS控制策略及其实践[J].湖北电力,2015,39(4):71-73.

[4]范新宇.M701F型联合循环机组自动启停系统实施经验[J].气轮机技术,2016,29(2):53-57.

[5]孙健,张瑞华,赏锋,等.燃气—蒸汽联合循环机组一体化APS研究与应用[J].工业控制计算机,2021,34(7):1-3.

作者简介:

杨洲(1981--),男,汉族,四川巴中人,工程硕士,广州恒运东

区天然气热电有限公司,热能与动力工程师,研究方向为天然气  
机组安全经济运行,节能降耗专项。