

燃气-蒸汽联合循环机组数智 APS 研究及应用

莫真荣

广东粤电新会发电有限公司, 中国·广东 江门 529149

摘要: 介绍了广东能源集团新会电厂 453MW 燃气-蒸汽联合循环机组 APS 的关键技术特点、架构和控制逻辑功能, 以简洁清晰、一目了然的机组 APS 启动/停运控制操作画面、架构原理、逻辑等说明 APS 的 4 个启动操作节点 (BREAK POINT) 与 4 个停运操作节点功能执行及设计 APS 要应用现代控制理论、充分发挥 DCS 特长优化设备操控形成控制策略的方法。

关键词: 燃气-蒸汽联合循环; 数智 APS; 三态式自动控制; 复变系统; 程序控制; 一键启停

Research and Application of Digital-intelligent APS for Gas-steam Combined Cycle Unit

Mo Zhenrong

Guangdong Yuedian Xinhui Power Generation Co., Ltd., China Guangdong Jiangmen 529149

Abstract: This paper introduces the key technical features, architecture, and control logic functions of the APS (Automatic Power System) for the 453MW gas-steam combined cycle unit at Guangdong Energy Group's Xinhui Power Plant. It illustrates the functional execution and design of the four start-up operation nodes (BREAK POINT) and four shutdown operation nodes of the APS through concise, clear, and intuitive unit APS start/stop control operation screens, architecture principles, and logic. The paper also discusses the application of modern control theory and the full utilization of DCS (Distributed Control System) expertise to optimize equipment operation and control, forming a control strategy.

Keywords: Gas-steam combined cycle; Digital APS; Three-state automatic control; Complex system; Program control; One-key start-stop

1 APS 的概念

APS, 是火力发电机组程序自动启停系统的英文 Automatic Procedure Start-up / Shut-down 的缩写, 其实质是一种以“人工智能”为内核、实现了数字化和智能化的自动化程序控制应用软件, 专门用于火力发电机组的启动或停运。

火力发电机组被控对象的特性有两种类别, 一种是开关量控制, 比如电动机的启、停或电磁阀的通、断, 单纯的开关量步进自动控制被定义为顺序控制; 另一种是模拟量调节, PID 负反馈闭环调节, 例如锅炉给水、减温等调节回路。在一个系统中同时存在开关量和模拟量的热工控制, 称之为“复合变量系统”(简称“复变系统”), 而同时能够对开关量和模拟量两种以上不同类型变量进行控制的过程被称为程序控制 (Procedure Control)。一键启停在开关量工艺系统中, 在继电器的时代就存在了, 而复变系统控制需有 DCS 才能实现。

电网通常把燃气-蒸汽联合循环机组作为调峰机组, 运行常态是以每日启停 DSS (Daily Start-Stop) 方式为主,

每台机组每年启停至少在 100 次以上。燃气-蒸汽联合循环机组运行过程中启停的操作响应要求快速, 监视项目繁多, 运行人员如果长期以手动方式应对 DSS 运行方式, 无疑给机组运行带来较大的安全风险, 也会损失机组运行的经济性能。DSS 运行方式下, 机组必定在热备状态, 电网指令启停要立即响应。全自动、全过程的机组启停控制功能, 具有代表性的 APS, 为 DSS 方式下的机组配置“自动程序启停”功能有着特殊的必要性和迫切性。

2 APS 的关键技术

2.1 APS 的核心是“人工智能”

以数字化智能自动控制 (Digital intelligent automation-DIA) 为目标, 控制对象为开关量和模拟量交叉引用的“复合变量”, 衍生出许多新策略、新算法, 代表着现代的先进热工控制技术。典型如下:

2.1.1 基础设备控制采用智能化操控和智能联锁逻辑原则

以三态式自动控制、本安型设备操作开关、缺省自动智能选择器为基础的智能热工系统一键启停是 APS 成功的关键; APS 的分布式主控制器开始工作的充要条件就是各级

2025-01-14 15:2:24	#2机组运行日志	A值	#2机	1、#2机组APS热态启动 1、节点BP-01正常使用 开始送轴封时间: 13: 31 真空至92KPa时间: 14: 21 2、节点BP-02正常使用 燃机发启令时间: 14: 51 燃机并网时间: 15:30 3、节点BP-03正常使用 汽机挂闸时间: 15:41 汽机冲转至3000rpm时间: 15:51 4、节点BP-04正常使用 汽机并网时间: 15:54 机组负荷升至265MW: 16:05
--------------------	----------	----	-----	---

图1 机组APS启动运行日志

被控对象的工作方式都必须符合规则：开关量设备和顺序控制在“自动”，模拟量自动调节在“自动伺服”(Stand-By)，开关量联锁在“自动”；APS启、停以顺序控制为主线，参与APS的模拟量回路必须具备三态式切换、超驰纠偏的智能特性。

2.1.2 设备选择遵循“集中连贯、效率优先”原则

纳入APS的设备必须有取有舍，优先考虑那些操作反复、操作量大、启停先后连贯、设备数量多的工艺系统，而那些只有当机组全停检修时才需要隔离操作的装置或系统，没有参与APS的必要，否则，反而降低了APS的使用效果。

2.1.3 APS程序采用纵、横制设计

导引层横向为菊花链拓扑，若干个独立的节点主控器次第连接，构成APS系统，每个节点“一键启停”控制机组的一个阶段，阶段之间首尾衔接，按条件逻辑递进；纵向分为四个层级，从一级向上至四级，按功能划分为单体设备操作、单元顺序控制、系统程序控制和APS节点程序控制，分层导引相关的系统和设备。

2.2 APS依托DCS一体化

以“人工智能”为基础、融合复合变量、分阶段导引热工系统“一键启停”和在DCS系统优化组态而形成的APS程序控制，在启停顺序和方式上与人工操作有很大不同，DCS对工艺设备“多线程”并行控制和批量控制；人工是没有能力实现批量控制的，只能一次操作开关一台设备，依次逐台“串行”手动操作。利用DCS辅助运行操作，能够节省大量时间，也就意味着提高了机组运行的经济性和安全性。

3 APS投运基本原则

3.1 本质安全原则

(1) 固化最优运行操作方式，可以防止误操作，这是高水平自动化对安全生产的贡献之一。APS有人工操作无法比拟的规则性和重复性。其规则性，就是APS程序一经

固定，操作进程进退有据，绝无人工操作的分散性或误操作；其重复性，就是每个控制进程无论逻辑上还是时序上完全一致。

(2) 以DSS方式运行的机组，如果具备高度的自动化，另一个更重要的贡献是，能够降低热应力对机组的损害、延长机组的寿命，机组安全长寿的卫士。

3.2 用户优先原则

衡量APS的优劣，运行人员最有发言权。运行人员是否愿意使用、乐于使用APS操作机组启停，就是判断APS优劣的判据。自2023年1月底APS成功投入使用以来，两台机组的启停都是使用APS进行，达到设计预期效果；经过投用后将近3年的关键控制策略优化迭代，APS显著提升机组启停自动化水平，两台机组APS的投用率及成功率表现优异、均接近100%。图1是APS启动运行记录。

3.3 经济实用原则

(1) 燃气-蒸汽联合循环机组在电网中担负着“调峰”的重担，而且通常采用每日启停DSS运行方式，每台机组每年约启停100次以上。

(2) APS提高燃气机组自动控制水平，能有效地缩短启停时间，意味着节省了宝贵的天然气燃料，多发效益电，提升发电企业生产经营效益有重大贡献。

4 APS架构

APS架构采用纵、横制设计；APS启动、停运的基本功能配置和操作方式，各分为4个阶段，各由4个APS分布式主控器串联组成，每个分布式主控器控制机组启、停过程中的一个阶段，每个阶段进程都是从节点(BREAK POINT)开始，完成阶段任务后结束。

(1) 机组APS启动四个阶段(见图2)：

- A.机炉辅助系统启动与汽机抽真空；
- B.燃机点火与锅炉升温；
- C.汽轮机冲转；
- D.汽轮机同期燃机协调升负荷。

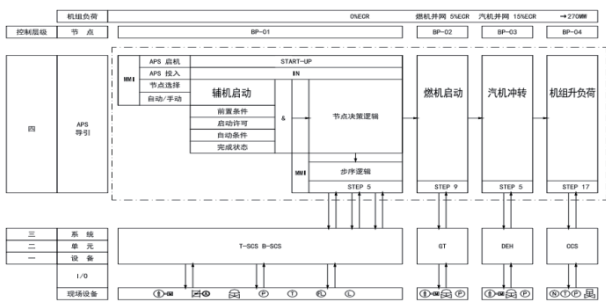


图2 APS启机架构框图

(2) 机组 APS 停运四个阶段 (见图 3) :

- A. 机组降负荷;
- B. 汽机打闸;
- C. 燃机停机;
- D. 真空破坏与停炉。

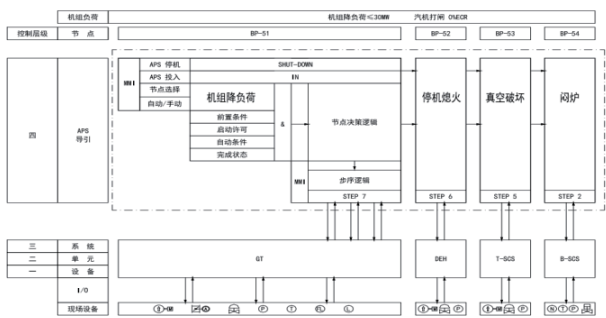


图3 APS停机架构框图

(3) 设计有 7 个热工系统 “一键启停” 程序:

- A. 汽机循环水系统;
- B. 闭冷水系统;
- C. 凝结水系统;
- D. 锅炉低压省煤器再循环系统;
- E. 锅炉中压给水系统;
- F. 锅炉高压给水系统;
- G. 汽机轴封与抽真空系统。

5 APS 控制操作画面

APS 主操作画面设计有两幅: APS 启动操作画面 (图 4) 和 APS 停运操作画面 (图 5)。

操作画面的上半幅, 用于确定 APS 执行的方向和功能: 确定用 APS 启动机组, 那就选择 “APS 启动操作画面”, 在画面的左上角按下 “节点启动” 按键。

(1) 再按下 “节点启动” 按键下面的 “APS 投入 / 退出” 按键, 确认执行 APS 机组启动。“APS 投入 / 退出” 按键是点动按键, APS 静止时按下按键唤醒 APS, APS 工作时按下按键 APS 返回静默状态。

(2) APS 启动机组有四个控制阶段, 阶段控制的起点

为 “节点”。第三排有四列按键, 从左至右排列四组节点, BP-01 ~ BP-04 按下对应的按键即可选择启动的节点。

(3) 节点的启动或保持通过按下 “启动 / 保持” 按键来实现。

操作画面的下半幅是各个节点逻辑执行阶段执行的热工程序控制系统, 带有宽边框的是 “操作与指示” 按键, 利用这种按键可以直接调用相应的热工程序控制。单线框的仅仅作为设备工作状态或过程参数指示。

APS 停运操作同理。

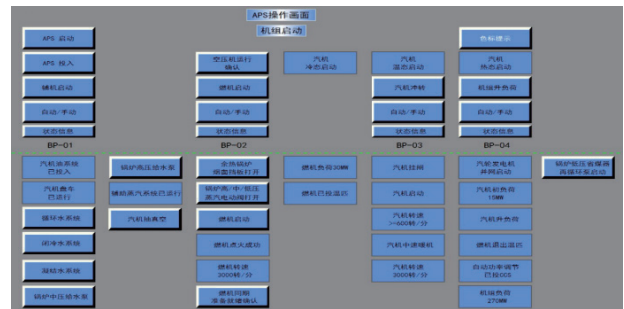


图4 APS启动操作画面



图5 APS停运操作画面

6 APS 启动阶段控制

6.1 BP-01 机炉辅助系统启动与汽机抽真空

APS 启动机组, 原则上同手动启动机组一致, 都是从辅助系统启动开始, 机组辅助系统启动与汽机抽真空节点 BP-01, 集中启动的是汽机和锅炉的辅助系统, 结合系统特性, 汽机抽真空也布置在 BP-01 节点启动阶段的最后一步, 启动步序如下:

STEP-1 启动: ①汽机循环水系统; ②闭式冷却水系统; ③汽机疏水系统。

STEP-2 启动: ①汽机凝结水系统; ②汽机油系统; ③汽机盘车系统。

STEP-3 启动: ①锅炉排空气与疏水系统; ②锅炉低压省煤器再循环泵。

STEP-4 启动锅炉中压给水泵。

STEP-5 启动锅炉高压给水泵。

STEP-6 启动汽机抽真空顺控系统。

6.2 BP-02 燃机点火与锅炉升温

这个阶段主要是燃机发电机组的启动控制，工艺流程决定了余热锅炉启动升温也包含在这一阶段。燃机采用 MARK-VI 自动控制装置，有全面、完善、独立的控制策略，汽轮机和余热锅炉 DCS 控制选用的是 OVATION，APS 设计在 OVATION 系统中，MARK-VI 和 OVATION 之间有硬接线 I/O 接口，APS 利用这些接口与燃机控制信息互通。启动步序如下：

STEP-1 打开锅炉烟囱挡板。

STEP-2 启动燃机。

STEP-3 启动：①锅炉高压主汽升温升压；②锅炉中压主汽升温升压；③锅炉低压主汽升温升压。

STEP-4 燃机并网。

STEP-5 燃机温度匹配控制。

6.3 BP-03 汽机冲转

汽轮机由 DEH 控制，这一阶段从汽机挂闸开始到汽机转速稳定在 3000rpm 结束。历经第一次冲转，目标转速 600rpm，进行摩擦检查。其后，重新启机，二次冲转，目标转速 600rpm。升速暖机，目标转速 1900rpm。暖机完成，继续冲转，目标转速 3000rpm。汽机转速 2995rpm，稳定运行，等待汽轮发电机并网带负荷。启动步序如下：

STEP-1 汽机挂闸。

STEP-2 汽机冲转。

STEP-3 目标转速 600rpm，发出摩擦检查申请。

STEP-4 摩擦检查完成，退出。

STEP-5 汽机二次启动，目标转速 600rpm。

STEP-6 目标转速 1900rpm，暖机。

STEP-7 继续冲转，目标转速 3000rpm。

6.4 BP-04 汽机同期燃机协调升负荷

这个启动阶段需要燃机和汽机两者之间的协调控制。汽轮机的功质 - 过热蒸汽，是由燃机的排气经余热锅炉 HRSG 换热产生的，燃机的温度控制在此过程中起到关键作用。

通常燃机采用分段方式控制燃机排气温度。即：温度匹配阶段、部分负荷运行阶段和基本负荷运行阶段。BP-04 阶段就处在燃机的“部分负荷运行阶段”，机组联合循环运行后，FSR 根据负荷需求进行控制，燃机排气温度由 IGV 控制独立完成，根据排气温度参考值与排气温度值的偏差去调节 IGV，产生合适的压气机出口压力及空气流量来建立系统要求的排气温度，保证余热锅炉、汽机稳定高效地运行，开启了与汽机协调控制的阶段。

汽轮发电机组在本节点的起始部分完成了同期并网带初负荷，其后燃机主导 HRSG 升温升压、联合循环运行、升负荷、负荷至 270MW（投机组 AGC 负荷点），标志着本阶段的控制完成，APS 退出返回静默状态。启动步序如下：

STEP-1 合汽机灭磁开关。

STEP-2 DCS 起励建压。

STEP-3 DTK 投入。

STEP-4 向 DEH 发出同期请求。

STEP-5 发出同期指令。

STEP-6 汽轮发电机并网带初负荷，退出同期控制。

STEP-7 汽机初负荷控制，目标功率 15MW。

STEP-8 全开调门。

STEP-9 DEH 压力控制，给定压力值。

STEP-10 投入燃机温匹自动升温功能。

STEP-11 退出温匹控制。

STEP-12 投入燃机远方控制。

STEP-13 投入燃机协调控制。

STEP-14 目标负荷 270MW。

7 APS 停止阶段控制

停运阶段，设备的控制是按照主机 - 主要辅机 - 机炉辅助系统的先后次序进行调控，虽然是机组停运，但不意味着所有的设备一律停运。机组停运过程中，有的系统和设备反而要随机启动，比如汽机疏水、汽机顶轴油泵、汽机盘车等。

7.1 BP-51 机组降负荷

降负荷阶段，协调系统 CCS 把机组从高负荷降低到低负荷，为燃机和汽机创造合适的停机条件，270MW 是机组的一个负荷阈值，AGC 功能的负荷转换分界点，其上投入 AGC，其下退出 AGC。因此机组在 > 270MW 以上负荷时计划停机，首先要退出 AGC 和一次调频。机组负荷低于 30MW 后，燃机的控制策略发生了改变，从“基本负荷控制”转为“部分负荷运行阶段”，要从 CCS 调节方式退出。停止步序如下：

STEP-1 机组负荷主控转为 LOCAL MODE（退出 AGC 和一次调频）。

STEP-2 AGC、一次调频已退出，按下“机组降负荷”按键发出降负荷指令。

STEP-3 机组负荷主控设定目标负荷 270MW。

STEP-4 燃机负荷 ≤ 270MW，燃机负荷主控退出 CCS。

STEP-5 给定燃机目标负荷 30MW。

STEP-6 燃机负荷 \leq 40MW, DEH 退出低压补汽。

7.2 BP-52 汽机打闸

本节点包括汽机降负荷至最低目标值、投汽机疏水和汽机打闸等过程。停止步序如下:

STEP-1 给定汽机 DEH 目标负荷 5MW。

STEP-2 投汽机疏水系统顺控。

STEP-3 燃机负荷 \leq 30MW, DEH 转功率控制。

STEP-4 汽机负荷 \leq 5MW, 汽机打闸。

7.3 BP-53 燃机停机

本节点在 APS 的导引下, 与燃机的 MARK- VI e 控制装置功能互动, 完成燃机发电机的解列、燃机熄火、投燃机盘车等控制。同时, 根据汽轮机转速适时启动汽机顶轴油泵、打开盘车喷油电磁阀。停止步序如下:

STEP-1 燃机负荷 \leq 6MW, 燃机发电机解列。

STEP-2 燃机转速 \leq 600rpm, 燃机熄火。

STEP-3 汽机转速 \leq 600rpm, 投汽机顶轴油泵。

STEP-4 汽机转速 \leq 200rpm, 汽机盘车喷油电磁阀自动打开。

STEP-5 燃机转速 \leq 36rpm, 投燃机盘车。

7.4 BP-54 真空破坏与停炉

前两个节点, 汽机和燃机都先后退出运行, 这个阶段继续停止运行的是主要辅机(如汽机真空系统、锅炉给水泵等)和辅助设备, 启汽机盘车、关锅炉烟卤挡板。停止步序如下:

STEP-1 汽机转速 \leq 20rpm, 顺控停止汽机真空系统。

STEP-2 汽机零转速, 投汽机盘车。

STEP-3 锅炉高压汽包水位 \geq 300mm, 停锅炉高压

给水泵。

STEP-4 锅炉中压汽包水位 \geq 200mm, 停锅炉中压给水泵。

STEP-5 锅炉低压汽包水位 \geq 100mm, 停低压省煤器再循环泵。

STEP-6 关闭锅炉烟卤挡板。

8 结语

规划设计 APS 要应用现代控制理论、充分发挥 DCS 特长优化设备操控而形成最优的控制策略, 要有完整、独立的原则和理念。APS 依托的是以 3C (Computer- 计算机、Control- 控制、Communications- 通信) 技术为核心的计算机集散控制系统 DCS, 发出一条指令即刻同时启动设备几台、十几台乃至几十台不等, 称为并行操作, 或多线程控制。

新会电厂机组 APS 的成功投用, 为 DSS(每日启停)方式下的燃气-蒸汽联合循环机组配置 APS 功能有着特殊的示范作用。

参考文献:

[1] 王立地. 火电燃煤机组程序自动启停系统 (APS) 与智能控制. - 北京: 水利电力出版社, 2020.

[2] 章素华. 燃气轮发电机组控制系统. - 北京: 中国电力出版社, 2012.4.

[3] 中国华电集团公司, 大型燃气蒸汽联合循环发电技术丛书. 控制系统分册. - 北京: 中国电力出版社, 2009.

作者简介: 莫真荣 (1973.02-), 男, 汉族, 广东湛江人, 本科, 热能动力工程高级工程师, 一直从事火力发电厂设备检修、设备管理、工程建设、系统调试、生产准备、人员培训及新能源开发建设等工作, 深入研究火力机组 APS 应用技术。