

AE94.3A 型燃气—蒸汽联合循环机组 启动控制优化研究

冯鹏飞, 吴公宝

(珠海市钰海电力有限公司, 广东 珠海 519055)

摘要 AE94.3A型燃气—蒸汽联合循环机组在冷态启动阶段存在耗时较长、部分控制方案不够完善等问题,难以充分适配电网调峰运行的实际需求。通过优化燃气轮机清吹方式、燃气轮机排气管道可燃气体实时在线监测、汽轮机冷态启动中速暖机、设置汽轮机冷态预暖系统、增加轴封自动暖管等措施,机组冷态启动时长能够从8小时缩减至5小时,有效降低启动成本,提高机组启动效率,更灵活地契合电网负荷调峰需求,创造了较为可观的经济效益。

关键词 燃气—蒸汽联合循环机组; 电网调峰; 冷态启动; 清吹方式; 中速暖机

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.004

0 引言

燃气—蒸汽联合循环机组具备起停便捷、调峰性能优良的特点,是电网调峰任务中的核心装备之一^[1]。AE94.3A型燃气—蒸汽联合循环机组受到运维经验不足、控制策略不完善等因素影响,机组冷态启动时间长、APS人工确认断点较多,造成了能源的无谓损耗与发电成本的增加^[2]。广东某电厂配置两套465 MW单轴“一拖一”燃气—蒸汽联合循环机组,TCS采用ABB SYMPHONY PLUS系统,DCS采用南京科远NT6000控制系统,2020年10月投产以来通过冷态启动中速暖机、冷态预暖快速启动、轴封自动暖管、缩短燃气轮机清吹时间等方式逐步解决以上问题。

1 冷态启动中速暖机

根据设备设计特性,燃气轮机可在20 min内达到满负荷运行状态,而汽轮机启动过程中需完成锅炉升温、管道暖管、阀门预热、转速提升等一系列工序,如何实现两者的协调运行成为机组启动控制中的关键难题^[3]。在传统的汽轮机870 r/min暖机工艺中,仅有少量蒸汽进入汽缸以维持转速,这些蒸汽轴向进入高压缸后在转子区域流动并向下一级流通,导致转子温升速率高于汽缸,难以快速满足3 000 r/min的冲转要求;同时,高压缸正胀差的升高,进一步制约了后续机组升负荷的速率。基于此,需通过提高汽轮机暖

机转速的方式,增加蒸汽与汽缸的接触面积和接触时间,加快汽缸温升速率,缩小高压缸胀差^[4-5]。经现场试验与理论分析,最终确定采用870/1 500 r/min分段暖机结合的方式。2023年7月24日,1号机组首次1 500 r/min中速暖机。启动前机组累计停运216 h,汽轮机高压缸内缸温度为74℃。03:15,发电机并网后燃机负荷由10 MW升至18 MW。04:33,汽轮机冲转并加速至870 r/min暖机,40 min后再加速至1 500 r/min中速暖机;06:01,汽轮机中、低压转子温度 ≥ 200 ℃,汽轮机加速至3 000 r/min与发电机成功啮合;09:24,联合循环负荷270 MW,此次启动总耗时369 min,启动耗时最大缩短99 min。

2 冷态预暖启动

冷态预暖启动即在机组动前,利用邻机蒸汽或辅助蒸汽对汽轮机进行提前预热处理,待汽轮机缸体温度提升至预设标准后,再按照温态模式启动。此举可避免机组进入冷态启动模式,大幅提升调峰响应效率。

暖机蒸汽分两路进入汽缸。高压支路在高压进汽阀组前方与高压主蒸汽管道连通,相继流过高压阀组、高压缸,然后从高排通风阀排入凝汽器。中压支路从再热管道接入,经再热阀组进入中压缸后排入凝汽器(详见图1)。暖机蒸汽参数为300~380℃,1.2~3 MPa,过热度 > 56 ℃。暖机转速为600~800 r/min,

作者简介: 冯鹏飞(1988-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:热能动力工程。

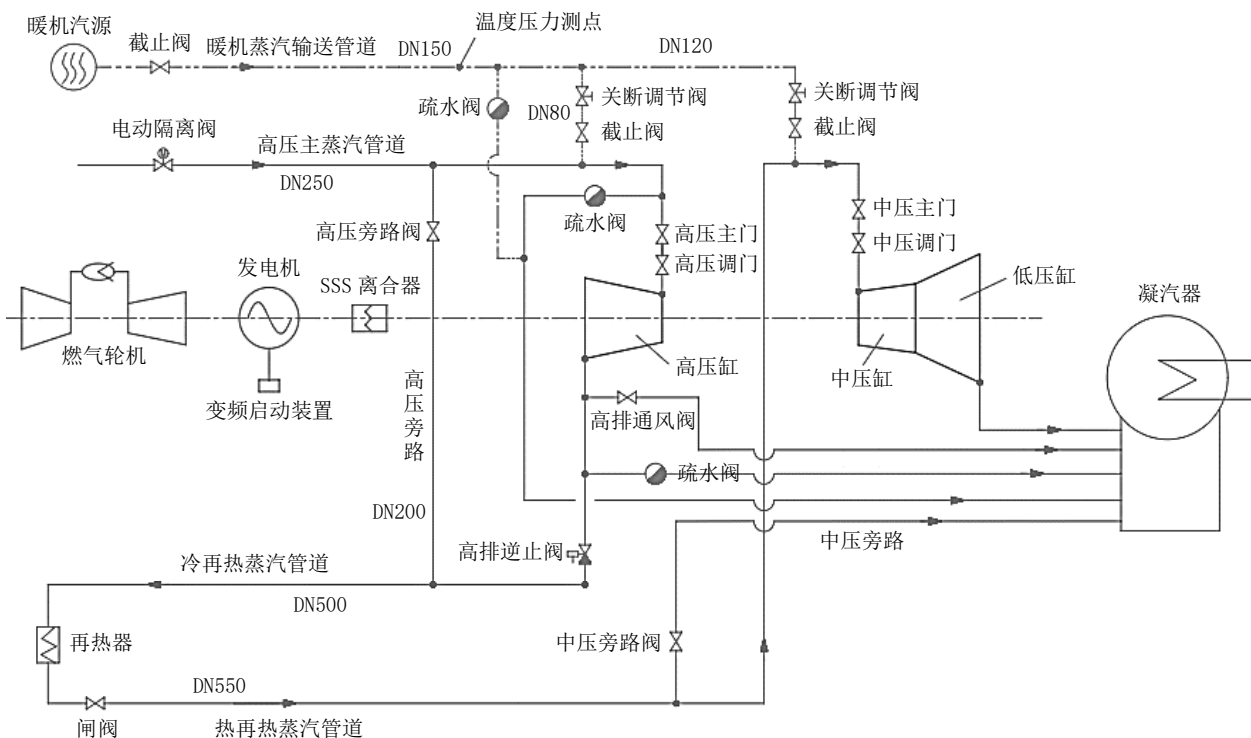


图 1 冷态预暖系统图

蒸汽动力要求能克服阻力矩，保证整个轴系能维持暖机转速，同时能把汽轮机预暖至较高温度。

3 轴封自动暖管

优化轴封暖管控制策略，明确区分手动与自动两种控制模式。手动控制模式下，轴封供汽阀与轴封溢流阀不受系统限制，操作人员可直接控制阀门的全开、全关操作，便于应对突发故障及特殊启动场景。自动控制模式下，系统可实现超驰控制、自动调节及阀位限制三大功能，无需人工干预即可完成轴封暖管的全过程控制。轴封自动暖管控制策略如下。

3.1 动作条件（“与”逻辑）

(1) 汽轮机顺控停进行中；(2) 汽轮机转速 ≥ 47.5 Hz；(3) 溢流阀位 $\geq 3\%$ ；(4) 负荷 < 40 MW 且 低压轴封压力 < 5 kPa。动作情况：溢流阀全关，供汽阀保留全关位，延时 120 s，期间延时 9 s 后，当轴封压力再下降到 8.0 kPa 后，供汽调门超驰 2 min 快开到 46%，之后超驰消失，供汽阀进入正常控制模式。

3.2 轴封暖管逻辑（轴封启动顺控）

(1) 供汽调门前温度二取二 ≥ 276 °C，启动轴抽风机，真空破坏阀未关闭，轴封供汽调节阀控制低压轴封供汽压力 1.0 kPa；(2) 轴封进汽支管温度三取二 \geq

150 °C，自动调节轴封供汽调阀跟踪 3.0 kPa，或者轴封母管温度达到 180 °C，自动调节轴封供汽调阀跟踪 3.0 kPa；(3) 支管温度三取二 ≥ 160 °C，轴封供汽调阀设定自动跟踪低压轴封 8.5 kPa，延时 30 min，开始抽真空。

3.3 轴封启动顺控步骤

第一步：指令：TURBINE DRAIN SLC ON 开真空破坏阀。反馈：(1) 加热器后疏水阀开 OR 阀位限制 OK；(2) TURBINE DRAIN SLC ON；(3) 凝结水系统 OK；(4) 轴封冷却器水位不高；(5) 轴封供汽压力 ≥ 0.2 MPa；(6) 真空破坏阀开；(7) 轴封供汽阀前温度 ≥ 276 °C。

第二步：指令：轴封供汽调阀、低压汽封减温水调阀自动投入、投入轴抽风机。反馈：(1) 轴封供汽调阀、低压汽封减温水调阀自动投入；(2) 轴抽风机运行；(3) 支管温度 ≥ 160 °C 延时 30 min。

第三步：指令：启动真空泵，延时 5S 关真空破坏阀，退解锁。反馈：(1) 汽轮机转速 ≥ 1 r/min；(2) 真空 < 80 ，延时 10 min；(3) 真空破坏阀关；(4) 真空破坏阀连锁退出。

第四步：指令：关所有轴封系统疏水阀。反馈：轴封系统疏水阀全关。

第五步：完成。

4 燃气轮机启动吹扫优化

燃气轮机正常启动时,需启动 SFC 变频装置升速至 770 r/min 持续吹扫,确保烟道内无天然气聚集。依据 NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) 2015 版 8.8.4.6.4 条款相关规定,若天然气浓度符合安全标准,正常停机后短时间内启动机组时,可省略吹扫程序,且省略吹扫的最长间隔时间不超过 8 天。结合该标准及电厂运行经验,对燃气轮机启动吹扫策略进行优化。

根据测算,AE94.3A 型燃气轮机正常停机灭火后,机组转速仍处于较高水平,轴系惰走过程中产生的气流体积约为 36 302 m³,远超标准规定的 34 725 m³ 安全吹扫体积。为精准监测排气扩散段天然气浓度,每台机组增设两套天然气在线监测装置,对烟道内天然气浓度进行连续实时监测,为启动吹扫优化提供精准依据。为进一步提升安全性,当出现以下任一情况时,必须执行吹扫程序:(1)燃气轮机负荷 ≥ 30 MW 跳机;(2)排气扩散段天然气浓度检测值 $\geq 10\%$;(3)ESV 阀开启后 15 s 内关闭且燃机跳闸,点火未成功;(4)累计停机时间 ≥ 192 h;(5)火焰检测失败燃机跳闸;(6)手动吹扫按钮。

基于上述分析,将燃气轮机主顺控 SFC 模式优化为“吹扫模式”与“无吹扫模式”两种可选模式(详见图 2)。当机组启动时,系统将自动综合判断三项关键指标:烟道内天然气浓度、燃气轮机停机类型(正常/异常)、停机持续时间;若无强制吹扫条件,自动选择“无吹扫模式”,直接由 SFC 变频装置带动燃气轮机升至点火转速,完成点火启动,带动燃气轮机快速升速至 3 000 r/min;否则将选择“吹扫模式”。

5 结束语

广东某电厂两套 AE94.3A 型燃气-蒸汽联合循环机组自 2020 年 10 月投产以来,围绕缩短机组冷态启动时间、提升运行经济性这一核心目标,开展了一系列启动控制优化工作。通过技术改造与策略优化,燃气轮机清吹时间由原来的 12 min 缩短至 4 min,热态与温态启动采用无清吹直接启动模式;汽轮机冷态与温态启动过程中应用中速暖机工艺,优化轴封自动暖管控制逻辑,并计划增设冷态预暖启动系统。上述优化措施在确保机组及相关设备运行安全的前提下,大幅缩短了机组启动耗时,有效减少了天然气消耗量与厂

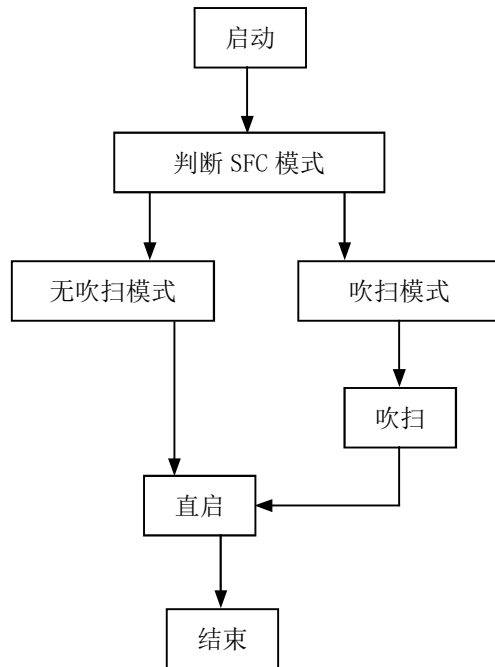


图 2 优化后燃气轮机启动吹扫过程

用电率,显著提升了机组运行经济性。同时,通过增设燃气轮机排气扩散段可燃气体实时在线监测装置,实现了对烟道内天然气浓度的全程精准监测,有效防范了炉膛爆燃等安全事故的发生,消除了机组原设计中存在的安全隐患。此次启动控制优化工作进一步提升了该型联合循环机组启动过程的灵活性与可靠性,实现了安全运行、节能降耗与经济效益提升的多重目标,优化效果显著,可为同类型燃气-蒸汽联合循环机组的启动控制优化提供现场实践经验与技术参考。

参考文献:

- [1] 王哮江,刘鹏,李荣春,等.“双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J].热力发电,2022,51(01):52-59.
- [2] 万安平,杨浩,王景霖,等.燃气蒸汽联合循环机组运行优化调控系统[J].热力发电,2021,50(12):21-29.
- [3] 朱宪然,张清峰,赵振宁.700 MW 级多轴燃气-蒸汽联合循环机组调峰和启动特性[J].中国电力,2009,42(06):1-5.
- [4] 梁朝,吴恒运,张晓邦,等.燃气-蒸汽联合循环机组自动起停控制系统(APS)的应用[J].热力发电,2009,38(10):58-60.
- [5] 宋兆星,李卫华,王立.双轴燃气-蒸汽联合循环机组协调控制策略[J].中国电力,2009,42(07):64-67.