

Research and Application of One-Button Start-Stop Technology for the First Ansaldo GT36-S5 Heavy-Duty Gas Turbine Combined Cycle Unit in China

Chao Wang Longyun Zheng Wenhua Liu Kexun Wang

Shanghai Electric Power Co., Ltd. Minhang Power Plant, Shanghai, 200245, China

Abstract

The traditional thermal power unit startup process faces issues such as long operation time, significant parameter fluctuations, and poor economic efficiency, making it difficult to meet the modern power grid's demand for rapid peak shaving response. Gas-steam combined cycle units play a crucial role in power grid peak shaving due to their rapid start-up, flexible regulation, cleanliness, and high efficiency. This paper systematically analyzes three key technical aspects of the combined cycle unit: gas turbine start-up sequence control optimization, steam turbine warm-up process improvement, and boiler transition control, focusing on the first GT36 gas turbine, the first high-pressure direct current waste heat boiler, and the first 250MW steam turbine. A comprehensive optimization scheme is proposed, providing theoretical basis and practical reference for improving the automation level of gas turbine power plants, shortening start-up time, and reducing energy consumption. It also offers a scalable technical path for intelligent control of gas-steam combined cycle units, which has significant engineering application value in enhancing the peak shaving capability of combined cycle power plants from daytime operation to nighttime shutdown

Keywords

GT36; DC waste heat boiler; One-click start-stop technology

国内首台 Ansaldo GT36-S5 重型燃气轮机联合循环机组 一键启停技术优化与应用

王超 郑隆云 刘文华 汪可训

上海电力股份有限公司闵行发电厂, 中国·上海 200245

摘要

传统火电机组启动过程存在操作耗时长、参数波动大、经济性差等问题,难以满足现代电网对快速调峰响应的需求。燃气-蒸汽联合循环机组以其启动迅速、调节灵活、清洁高效的特点在电网调峰中扮演着至关重要的角色。本文针对首台GT36燃气轮机、首台高压直流的余热锅炉、首台250MW级蒸汽轮机汽机的联合循环机组,系统分析燃机启动顺控优化、汽机暖机过程改进和锅炉转态控制三大关键技术环节,提出一套全面优化方案,为提升燃机电厂自动化水平、缩短启动时间、降低能耗提供理论依据和实践参考,为燃气-蒸汽联合循环机组智能化控制提供了可推广的技术路径,对提升联合循环电厂日启夜停调峰能力具有显著工程应用价值。

关键词

GT36; 直流余热锅炉; 一键启停技术

1 引言

随着自动化水平的提高,特别是在燃机电厂,一键启停技术应用越来越广泛。对于国内首台的H级燃机及配套的高压直流锅炉和汽轮机联合循环机组还未有成熟的应用实例,进行一键启停控制功能的研究可以在提高机组自动化控制水平的同时,全面提高机组的运行水平和管理水平,

缩短机组启停时间,提高机组自动调节品质,对于调峰机组而言意义重大。

2 APS 框架及断点

2.1 APS 概念

APS是机组自启停控制(Automatic Unit/Plant Start-up and Shut-down System)的缩写,用于实现燃煤机组或燃气轮机的全过程自动启动和停止控制,是机组顺序控制系统中最高一级的顺序控制。它根据机组工艺流程在启停过程中不同阶段的需要和对机组工况全面、准确、迅速的监测情况,

【作者简介】王超(1989-),男,中国湖南龙山人,本科,工程师,从事火力发电燃气-蒸汽轮机联合循环机组自动控制研究。

通过大量条件与时间等方面逻辑判断，向各功能组、功能子组或驱动级、发出控制指令，使机组能在冷态、温态、热态、极热态方式下进行启动。

2.2 启动顺控

2.2.1 启动顺控程序

机组启动顺控主要步序为：启动除盐水箱子组顺控→启动闭式水系统子组顺控→启动循环水系统子组顺控→启动

凝结水系统子组顺控→启动辅汽系统子组顺控→启动汽机辅助系统子组顺控（包含轴封、真空、油系统顺控）→启动低压给水加热系统子组顺控→启动低压系统子组顺控→启动高压给水系统子组顺控→启动高中压系统子组顺控→判断余热锅炉、旁路等允许燃机启动条件→启动燃机启动顺控→暖机冲转汽机并网→联合循环到 AGC 投入负荷。

如图 1 所示。

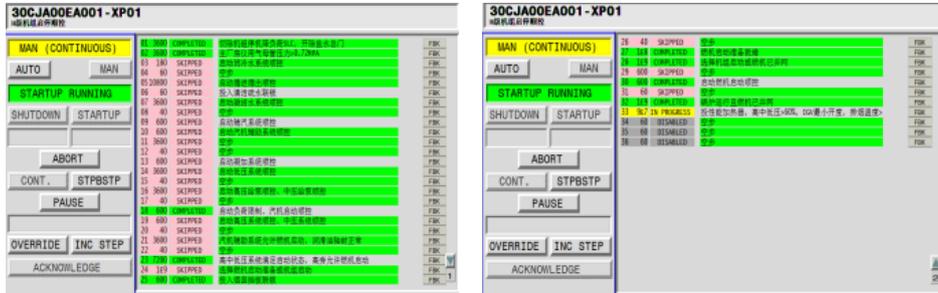


图 1 机组启动顺控

2.2.2 控制难点

如图 2 所示，F 级机组在燃机点火并网后，协调控制系统根据锅炉出口温度和 IGV 开度等生成一个由最低 370℃ 缓慢上升排烟温度设定值送至燃机控制系统，然后燃机根据排烟温度升负荷至暖汽机负荷，冲转压力和温度到设定后进行汽机的暖机和冲转，整个过程是没有断点。但 GT36 不接受排烟温度设定值，燃烧方式是二级顺序燃烧，仅点一级燃烧器时，排烟温度约为 500℃，对应负荷 10MW（夏季工况，冬季约 20MW），当二级投入，排烟温度快速上升至 600℃，对应负荷 70MW（夏季工况，冬季约 80MW），如何使燃机稳定在某个负荷是第一个难点。

250MW 的汽轮机也是首次设计，不能参照 F 级汽机无论冷态、温态或者热态均为同一冲转压力和温度，如何优化

冲转参数，让汽机快速并网这是第二个难点。

从图 2 不难看出，锅炉只要温度参数正常后基本不用管，但 GT36 配置的余热锅炉为高压直流，为国内首台，不同于常规汽包炉，也不同煤机的直流炉，设计的直流余热锅炉转态裕度小，如何快速安全转态成了第三个难点。

2.3 停止顺控

2.3.1 停止顺控程序

机组停止顺控主要步序为：投入机组最小负荷子环→投入高中低压系统疏水联锁→燃机降负荷至停机负荷→开高中低压旁路减温水隔绝阀→启动汽机停顺控→汽机解列燃机负荷到最小负荷启动燃机停顺控→停高中压系统顺控→停低压系统顺控→停汽机辅助系统顺控→停凝结水系统顺控→关烟档挡板门。如图 3 所示。

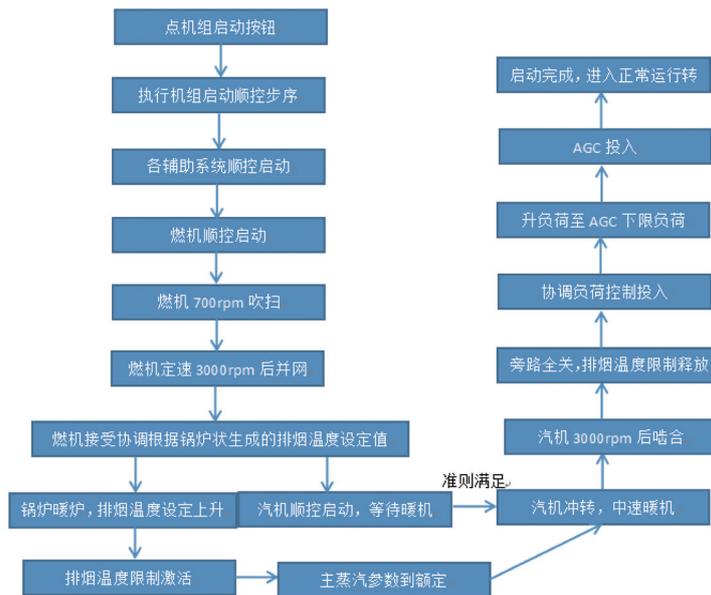


图 2 F 级燃机联合循环机组启动框图

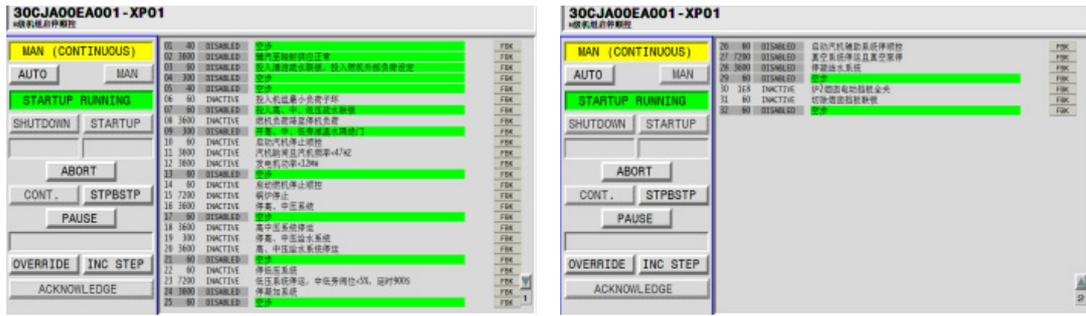


图 3 机组停顺控

2.3.2 控制难点

停机过程结构上不存在难点问题，但每次汽机走停顺控解列时仍有 30MW 负荷，是通过高排温度大于 450℃这一条件满足后直接 TRIP 的，如何实现汽机逆功率解列是 GT36 联合循环机组停机过程的难点。

3 APS 难点研究及优化应用

根据遇到的问题，明确整个启动过程的难点后，可以从以下几个方面入手：

3.1 构建计算模型

构建针对联合循环机组启停效益计算模型，将其作为启停过程优化前后判断依据。

$$F = |WQ - WH| \times C \text{ 机组}$$

其中 F 为优化收益，WQ 为优化前的启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，WH 为优化后的启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，C 机组为利润。功率的累计可用一下公式计算：

$$W = \int_0^t w(t) dt$$

W 为启动阶段到 AGC 下限的累计发电量，是机组启动后时间的函数。所以缩短机组启动时间即可提高机组出力，带来更多经济效益。

3.2 Ansaldo GT36 燃气轮机

随着能源需求的增长，高效清洁的燃气轮机技术成为电力行业的重要发展方向。GT36 燃气轮机的透平进口燃气温度达到 1600℃级，其气动热力学设计和验证基本是从现有的 GT26 设计演变而来。该型燃机可在比较宽的工作范围内运行，并且还能够在线切换，折寿模式产生最大的性能和功率输出，而延寿模式允许更长的大修间隔期，两种模式选择可以平衡电力需求和节约成本，GT36 配备 15 级压气机和 4 级空气冷却透平，有 16 个火焰筒，燃料采用天然气为单一燃料，采用恒压顺序燃烧、低 NOx 燃烧技术。其主要参数如表 1 所示。

表 1 燃机参数简介

型号	GT36	转子结构型式	焊接转子
驱动方式	冷端驱动	燃烧器个数	16 个
点火转速	775 rpm	透平动叶进口初温	1390℃
自持转速	2700 rpm	进气系统	两级静态过滤系统
压气机	15 级轴流式，压比 25	排气压力（静压）	1.049 kpa
透平级数	4 级	排气温度	626.3℃
燃烧室型式	环管形燃烧室	排气流量	1028.3 t/h
每个燃烧室的燃料喷嘴数量	2 个		

3.3 缩短燃机启动到并网的时间

H 级机组启动，需在 775rpm 转速吹扫 5min 后才能点火，同时吹扫的同时会降低锅炉侧的温度 5℃，后续暖炉也会增加时间。燃机停机过程其实就是在进行吹扫，空气量大于开机时的 5 分钟定速吹扫量，若果能够减少启动时的吹扫时间，在相同时间里就能多发电。因此根据 H 级阀门情况在机组停运后增加 TSOV 的严密性测试（如图 4）。

停机后，一、二级的四个关断阀（TSOV）关闭，总放

散阀 51AA010 关闭，分别打开一（51AA001）、二级放散阀（55AA001），打开压缩空气阀，TSOV1（MBP40AA001）和 TSOV2（MBP45AA001）的前后会有压差，在一定时间内压力大于 0.21bar，说明关断阀不存在泄漏，试验成功，下次启动机组无需吹扫。并网后按 20MW/h，缩短的 5min 可多发 1.7MW 左右电量，调峰机组，每日启停，每年按 100 次启停，多发电量为 170MW。

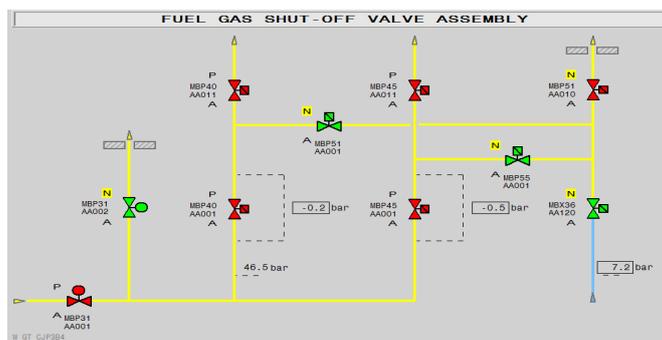


图 4 关断阀 TSOV 泄漏测试

3.4 汽机简介

蒸汽轮机采用上海电气三压、再热、三缸、向下排汽，凝汽式汽轮机，主要参数如表 2 所示

表 2 蒸汽轮机主要参数

额定转速	3000 r/min
末级叶片的长度	1220 mm
末级叶片出口的环面面积	11.6 m ²
高压蒸汽进汽压力	16.6MPa(a)
高压蒸汽进汽温度	600℃
高压蒸汽进汽流量	46800 kg/h
高压缸排汽压力	3.745 MPa(a)
高压缸排汽温度	369.7℃
高压缸排汽流量	127.81kg/s
再热蒸汽进汽压力	3.4MPa(a)
再热蒸汽进汽温度	600℃
再热蒸汽进汽流量	523764 kg/h

3.5 确定汽机状态

燃气 - 蒸汽联合循环机组在启动阶段汽机是个需求单元，启动阶段燃机的负荷是由汽机的状态来确定，所以首先要定义汽机的状态到底是冷态、温态还是热态。

上汽厂提供的高、中压缸推荐温度是根据高、中压转子温度裕度计算而来，所以将燃机点火瞬间汽轮机高压内缸中部 100% 处金属温度作为判断冷、热、温态判断依据

1) 冷态：高压内缸中部 100% 处金属温度小于 330℃，此时推荐温度基本为 390℃，

2) 温态：高压内缸中部 100% 处金属温度小于 380℃ 且大于 330℃，汽机蒸汽推荐温度在 390℃ ~490℃ 之间

3) 热态：高压内缸中部 100% 处金属温度大于 380℃；推荐蒸汽温度至少在 490℃ 以上。

3.6 确定对应燃机的负荷

汽机冷态时推荐蒸汽温度为 390℃，GT36 燃机仅点一级燃烧器排烟温度已接近 500℃，所以冷态时汽机的暖机对应的燃机负荷为二级未点时的最大负荷，若点火瞬间，汽机为冷态，发一个开关信号“Hold Point 2”至燃机，称为 HP2，限制燃机点二级燃烧器，待汽机并网允许燃机升负荷

后 HP2 释放，选定冲转压力为 5MPa。

由于 GT36 在低负荷段出力较大，HP2 对应的排烟温度还是能搞满足汽机所需的主蒸汽温度，所以温态也采用 HP2 点暖机，不过冲转压力会抬高至 6MPa。

汽机热态时，所需蒸汽温度较高，对应燃机负荷必须为点二级后的负荷才能有大于 500℃ 的排烟温度，所以给到燃机一个“Hold Point 3”，称为 HP3，排烟温度在 600℃，冲转压力设为 7.2MPa。

3.7 优化缩短的暖机时间

汽机温态热态的中速暖机时间基本上根据上汽厂的准则来判断，现有的 F 级机组冷态暖机时间除了准则以外还有冷态启动倒计时，真空状态很好的情况下需要 6 小时，在破真空暖机后虽可缩短时长，但从燃机启动到汽机啮合需要 4 小时 10 分钟左右时间，H 机配置的这台汽轮机为新机型，准则很快能满足冲转条件，但仍受制冷态限制，强制测试后发现温度及振动均正常，未对汽机造成影响，所以经与厂家讨论确定汽机冲转时只看准则，准则满足即可冲转删除冷态暖机时真空函数的倒计时限制，缩短汽机暖机时间约半小时。

低压系统起压慢，温度要满足准则也相对较慢，所以将低压主汽门开启条件从顺控的反馈条件中剔出，先开高中压主汽门调门进行冲转并网，低压准则满足后再单独开低压主汽门和低压调门，此处节约时间半小时。

经过对顺控逻辑自主优化，与原汽轮机启动时间比较，缩短了低压系统带来的延时时间，整个联合循环机组从启动到汽机并网只需要 3 小时 8 分钟，缩短了将近一小时时间，也就是汽机并网后到锅炉转态的负荷点 330MW 提早了 40 分钟，多发 200MW，每年按照启停 100 次计算，多发 20000MW 电量。

4 高压直流转态过程控制优化

4.1 锅炉简介

余热锅炉采用上海电气三压、再热、无补燃、高压直流、中低压自然循环、卧式锅炉，室外布置，主要参数如表 3 所示：

表3 余热锅炉主要参数

高压蒸汽出口压力	16.99MPa (a)
高压蒸汽出口温度	602℃
高压蒸汽流量	468t/h
再热热段蒸汽出口压力	3.54MPa (a)
再热热段蒸汽出口温度	602℃
再热热段蒸汽流量	523.8t/h
中压蒸汽压力	3.69MPa(a)
中压蒸汽温度	310.4℃
中压蒸汽流量	63.6t/h

4.2 转态控制

燃机在不同环境温度情况下同样负荷对应的热量不同，转态时所需要的给水量也是变化的，再加上 H 级余热锅炉高压直流炉设计因锅炉的高压蒸发器受热面少，减少给水量强制转态容易汽化产生气泡导致分离器两侧温度偏差大，高压给水系统复杂等，基本无法按照设计的 25% 负荷来转态，也没有可参照的模型，如何解决这一问题难点。

4.2.1 负荷变化

汽机并网前，协调负荷指令由燃机实际负荷加上固定 10MW 生成，冷态限制在 30MW，温态限制在 90MW，燃机侧由 HP2 和 HP3 限制；当汽机并网后，旁路全关且高压转子温度大于 250℃，协调将会释放燃机的 HP2 或 HP3，燃机实际负荷上升，协调负荷指令开始上升，上限设置在 190MW，由于燃机的排烟温度会迅速到 650℃，设计汽机进汽温度为 600℃，余热锅炉主蒸汽温度保护为 607℃，所以燃机升温这一段限制燃机的升负荷速率为 10MW/min，燃机负荷到 190MW 后，此时根据锅炉状态匹配的水量等待转态。转态完成到干态后协调闭环控制投入，协调负荷指令切至手动或 AGC 回路，汽机跟随模式，负荷响应慢，需要燃机快速调节，所以燃机指令由总的负荷指令减去汽机实际负荷生成。

4.2.2 给水流量控制

高压系统除了减温水 and 正常给水，还增加了给泵出口和高压省煤器各引一路冷却水去 OTC 系统，最终变成比锅炉出口压力略高的过热蒸汽回到过热器；增加高压省煤器出口引一路给水至天然气二级性能加热器；增加不经省煤器的

高省旁路；整个系统比常规汽包炉复杂的多，如何在确保满足 OTC 冷却水、兼顾省煤器过冷度，同时还要满足燃机排烟温度随负荷变化的特性，最终保证锅炉分离器出口过热度在合理范围是个难题。

由于最初设计的负荷与转态时的给水量不匹配，根据手动控制下的负荷和对应流量拟合燃机 250MW 负荷以下对应的给流量的基础曲线，用环境温度作为其修正系数，经过三阶惯性环节后作为给水设定值。

但锅炉不同状态需要的水量也不一致。所以还需要根据锅炉状态确定转态时的水量，根据停机后观察高过出口温度冷却相对规律，将高过出口温度三选中的值为依据点，当高过出口温度小于 210℃时，判断为冷态，转态时给水流量固定为 150t/h，缓慢升燃机负荷至 190MW（190MW 为锚定的转态对应的燃机负荷），直到分离器出口过热度大于 15℃；当高过出口温度大于 210℃且小于 400℃时判断为温态，转态时给水流量固定为 165t/h，缓慢升燃机负荷至 190MW，直到分离器出口过热度大于 15℃；当高过出口温度大于 400℃时为热态，转态时给水流量固定为 180t/h，缓慢升燃机负荷至 190MW，直到分离器出口过热度大于 15℃。

最终组合成锅炉不同转态下三根不同的给水曲线。如均按照热态给水流量，需要 40 分钟才能完成，优化后转态时间缩短至 10 分钟，提早到 450MW 负荷时间缩短半小时，每年按照启停 100 次计算，多发 6000MW 电量。

5 APS 启停机实际应用

5.1 优化后冷态启动曲线

H 级机组的冷态启动曲线（如图 5），图中曲线 1（红色）为 H 级联合循环机组总功率，曲线 2（蓝色）为燃机转速，曲线 3（绿色）为汽机转速，曲线 7（紫色）为汽机负荷，从燃机启动到汽机并网需 3 小时 8 分。

5.2 热态启动曲线

热态启动曲线（如图 6），图中曲线 1（红色）为 H 级联合循环机组总功率，曲线 2（淡蓝色）为燃机转速，曲线 3（绿色）为汽机转速，曲线 4（深蓝色）为汽机负荷，燃机顺控启动到燃机并网用时 8min12 秒，再到汽机并网用时 48 分钟，到联合循环总负荷 450MW 仅需 1 小时 22 分钟。

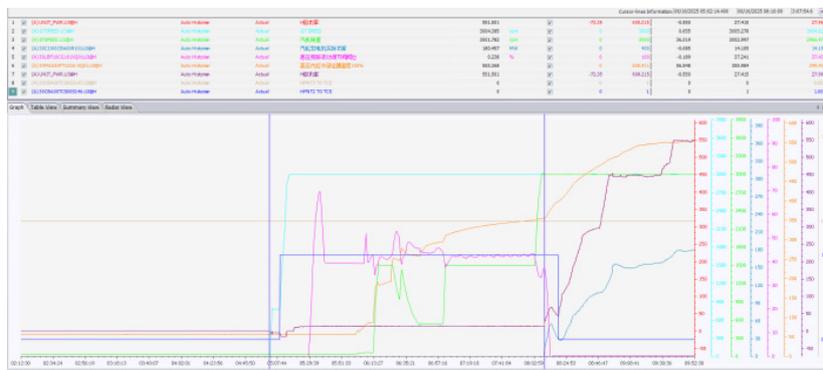


图 5 H 冷态启动至汽机并网时间

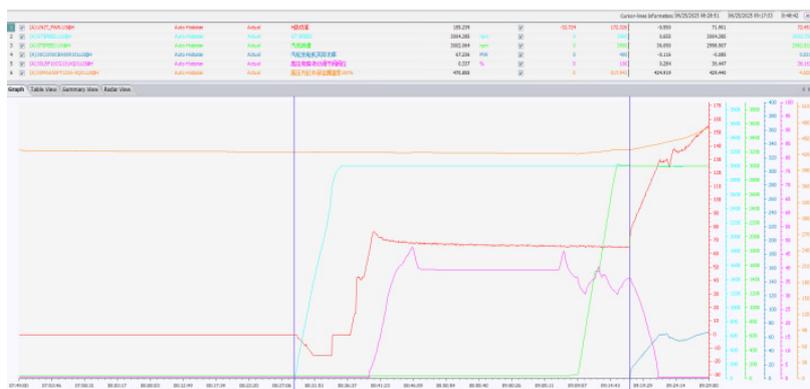


图 6 H 级机组热态启动曲线

6 结论

通过缩短燃机启动时间，减少汽机暖机时间，减少余热锅炉高压直流转态时间，一年可多发电量 26700MW，带入计算公式，一年可多盈利 80 万。从响应电网，能源保供能力方面来说也得到提升。尽管首台 H 级 GT36 燃气-蒸汽联合循环机组一键启停技术取得一些成效，但在汽机变参数暖机、锅炉转态等方面还有待深入研究。

参考文献

[1] 苏俊. 燃气蒸汽联合循环电厂自启停控制系统 APS 的优化[J]. 电

子技术. 2021, (4). 176-177

- [2] 徐征. 燃气蒸汽联合循环机组一键自启停技术[J]. 云南电力技术, 2012, 40(06): 76-78
- [3] 王力, 王彬. 600MW 机组自启停控制方案介绍《电力设备》2017 年第 19 期
- [4] 北京能源投资(集团)有限公司, 西门子电站自动化有限公司, 艾默生过程控制有限公司: 中国电力出版社: 燃气-蒸汽联合循环发电机组自启停控制技术及应用.