

燃气-蒸汽联合循环机组汽轮机冷态预暖 控制策略优化与应用

吴青云,高奎,蔺奕存,谭祥帅
(西安热工研究院有限公司,陕西西安710054)

摘要:为了缩短冷态启动过程中联合循环同轴机组汽轮机的启动时间,通过启动锅炉蒸汽对汽轮机提前预暖,解决了机组无法快速响应电网调峰的问题。根据汽轮机冷态预暖系统及机组启动方式,结合机组冷态启动历史过程及数据,进行冷态预暖系统运行特性分析试验、优化后试验及温态启动顺控试验,通过对现有控制逻辑的优化,提出了一种全新的冷态预暖控制策略。结果表明:该策略避免了机组在预暖启动过程中由于预暖管道过热度低,造成热应力准则、紧急切断阀(Emergency Shutoff Valve,ESV)无法满足启动条件、高排逆止阀自动打开以及静止变频启动装置(Static Frequency Converter,SFC)在燃气轮机与汽轮机啮合过程中自动退出等问题;优化后机组的冷态预暖启动运行过程表明,实现机组全过程无断点的预暖及自启动控制,可有效缩短同轴联合循环机组冷态启动时间约2 h,使机组具备快速灵活的启动方式和应急调峰的能力。

关键词:联合循环;启动顺控;冷态预暖;控制策略

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.010

[引用本文格式]吴青云,高奎,蔺奕存,等.燃气-蒸汽联合循环机组汽轮机冷态预暖控制策略优化与应用[J].热能动力工程,2023,38(8):76-86. WU Qing-yun, GAO Kui, LIN Yi-cun, et al. Optimization and application of cold-state preheating control strategy for gas-steam combined cycle unit steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8): 76-86.

Optimization and Application of Cold-state Preheating Control Strategy for Gas-steam Combined Cycle Unit Steam Turbine

WU Qing-yun, GAO Kui, LIN Yi-cun, TAN Xiang-shuai
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054)

Abstract: In order to shorten the startup time of the steam turbine during the cold startup process of the combined cycle coaxial unit, the steam turbine was preheated through the startup of boiler steam, which solves the problem that the unit cannot quickly respond to the peak regulation of the power grid. According to the cold-state preheating system of the steam turbine and the startup mode of the unit, combined with the historical process and data of the cold-state startup of the unit, the cold-state preheating system operation characteristic analysis test, the optimized test and the warm-state startup sequential control test were carried out. Based on the optimization of the current control logic, a new cold-state preheating control strategy was proposed. Results show that the strategy can avoid the problems that the thermal stress criterion and the emergency shutoff valve (ESV) cannot meet the starting conditions, and the high discharge check valve automatically opens due to the low superheat degree of the preheating pipeline, during the preheating startup process of the unit, as well as the static frequency converter (SFC) automatically exits during the engaging process of the gas turbine and the steam turbine; the optimized operation process of the unit during cold-state preheating startup shows that the realization of the preheating and

self-starting control without breakpoints in the whole process of the unit can effectively shorten the cold-state startup time of the coaxial combined cycle unit by about two hours, so that the unit has fast and flexible startup mode and emergency peak shaving capability.

Key words: combination cycle, startup sequential control, cold-state preheating, control strategy

引言

目前,我国风电、核能、光伏和水电等新能源电力装机容量在逐年增长,但新能源的发电出力存在许多随机性和不稳定性,影响了电力系统的稳定运行。因此,提高新能源的消纳能力及机组的运行灵活性迫在眉睫。由于燃气-蒸汽联合循环机组(简称“联合循环机组”)具有高效率、低能耗、启动速度快、可用率高、投资少、建设周期短及环境污染少等优点,越来越得到世界各国的重视而迅速发展。为了快速响应电网应急调峰的需求,联合循环机组的冷态启动频率日益增加。在冷态启动时,通常会消耗大量时间来预暖机组,灵活启动性能逐步下降。

各界专家学者开始对冷态预暖技术进行研究,并已应用于200,350,600及1 000 MW等火力发电机组和9E,9F等级的燃气-蒸汽联合循环机组^[1-8];对各类型机组冷态启动的过程展开分析研究,包括对汽轮机启动步序的设置^[9-10],使汽轮机各启动阶段能够准确执行相关特殊动作;通过取消冲转暖机时间,增加低负荷的暖机时间,有效提高冷态启动的冲转参数^[11-12];采用高速暖机后缓慢提升蒸汽温度的方法,控制汽轮机胀差及上下缸温差,可有效保持转子的热应力^[13-14];采用延长暖机时间和降低转速升速率的方法,避免了启动步序各项温度准则的突变^[15-16];增加暖机时间及避免转子初始温度高,在启动过程中防止了胀差波动、再热汽温变化等问题^[17];薛江涛等人^[18]及肖丽等人^[19]针对汽轮机启动的各项参数、各启动步序中温度准则、进汽流量不足、低压缸外缸温度高等问题进行了完善,机组顺利实现冷态启动;徐江等人^[20]对低速暖机时造成中压调节阀振动大和低速暖机用时长的问题进行研究,结合多次冷态启动参数,优化冲转参数曲线并成功应用于汽轮机冷态启动;王雨等人^[21]对汽轮机冷态启动时X准则未能满足汽轮机启动顺控步序的问题进行了优化,寻找出机组的主、再热蒸汽温度等

参数的变化规律,完善了X准则的需求;文献[22-25]实现了350 MW机组汽轮机辅汽预暖技术,增加了辅助管网系统,并在锅炉点火前利用邻机辅汽实现汽轮机的冷态预暖技术,缩短了机组启动时间。

通过上述研究发现,同轴联合循环机组在日常冷态启动时,需要进行长时间的中速暖机对汽轮机预暖,导致机组出现启动时间长、耗气量大、无法快速并网等问题。本文首次利用冷态预暖技术,在汽轮机侧增加预暖系统并优化原汽轮机启动控制策略。通过冷态启动试验,解决了预暖管道过热度低、热应力准则和ESV阀无法满足启动条件、高排逆止阀自动打开以及SFC在燃气轮机与汽轮机啮合过程中自动退出等问题,实现了机组快速启动及灵活启动的目标。

1 机组及冷态预暖系统

1.1 机组及DCS控制系统

采用上海汽轮机厂的汽轮机与安萨尔多AE 94.3A燃气轮机组组成的一拖一同轴联合循环机组进行研究。机组操作控制系统采用阿西布朗勃法瑞公司(Asea Brown Boveri Ltd., ABB)的分散控制系统(Distributed Control System, DCS)及透平控制系统(Turbine Control System, TCS),为冷态预暖系统改造及相关控制逻辑的优化提供了便利。

1.2 冷态预暖系统

在汽轮机侧增加冷态预暖管道,并使用邻机蒸汽或启动蒸汽来实现汽轮机冷态预暖。冷态预暖系统如图1所示。由图1可知,预暖蒸汽管路分别作用于汽轮机高压缸和中压缸。高压缸预暖管路新增2个气动关断阀,中压预暖蒸汽管路新增1个气动关断阀和1个气动关断调节阀。冷态预暖系统启动时,高压预暖蒸汽流经高压预暖管路后,通过汽轮机高压缸进汽阀组进入汽轮机。中压预暖蒸汽流经中压预暖蒸汽管路,不经过中压缸进汽阀组,直接进入中低压缸做功。

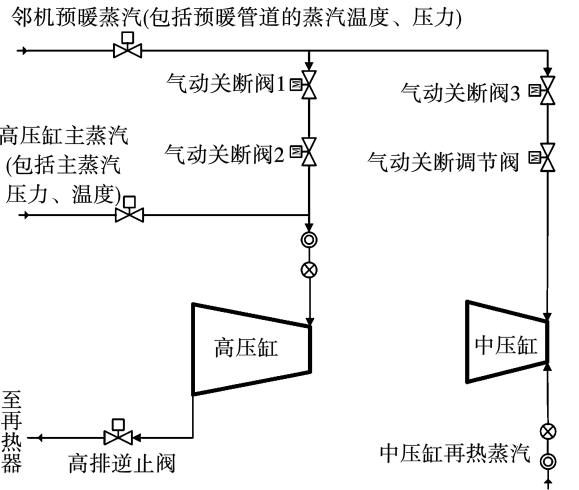


图 1 冷态预暖系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cold-state preheating system

2 预暖试验分析

2.1 优化前汽轮机冷态启动过程

优化前汽轮机启动过程如图 2 所示。预暖过程中预暖蒸汽流向高排逆止阀,在 16:40 时高排逆止阀自动开启(信号 1 为全开状态,0 为全关状态),阀后温度上升,导致余热锅炉换热面受到影响。由图 2 可知,在预暖过程中需保持高排逆止阀在关闭状态,以保证汽轮机启动过程的安全性。

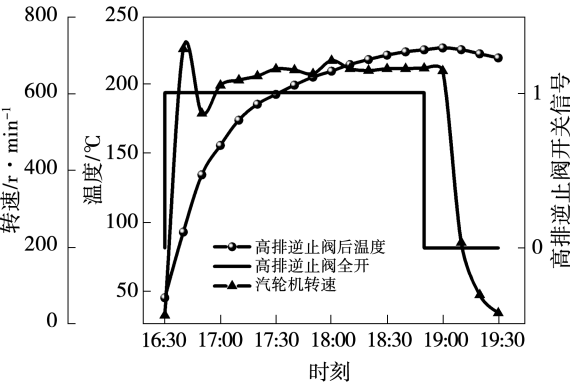


图 2 优化前汽轮机启动过程

Fig. 2 Steam turbine startup process before system optimization

2.2 过热度及 X 准则优化前试验

具备冲转条件并允许启动汽轮机需要满足温度 X 准则与过热度 Z 准则。启动过程中出现预暖蒸汽流量不足的情况,此时因为暖缸蒸汽压力和温度偏低,导致过热度不足,从而影响到汽轮机顺控的热应力准则,最终停止预暖。

2.3 燃气轮机启动方式优化前试验

燃气轮机启动方式分 3 种,分别是正常模式、水洗模式以及清吹模式。在正常模式及清吹模式启动过程中,燃气轮机会进行高盘吹扫,该过程燃气轮机转速会在一定范围内波动;而水洗模式启动时,燃气轮机则会维持稳定转速。由于本机组为同轴一拖一联合循环机组,汽轮机在预暖时需与燃气轮机进行啮合,因此要求燃气轮机转速稳定。结合该运行工况,在汽轮机进行冷态预暖时,燃气轮机启动方式选择水洗模式。当燃气轮机转速停留在 780 r/min 时,SFC 在原预设时间内退出,导致燃气轮机与汽轮机无法啮合。

3 冷态预暖系统运行特性分析

根据汽轮机冷态预暖系统的布置方式结合启机顺控,优化完善其控制策略,避免了冷态启动时高排逆止阀自动打开、过热度及预暖蒸汽不足时导致冷态预暖启动顺控无法顺利进行。冷态预暖启动顺控优化后示意图如图 3 所示。由图 3 可知,优化完善了冷态预暖启动顺控策略,避免了事故工况下对冷态预暖系统运行的影响。

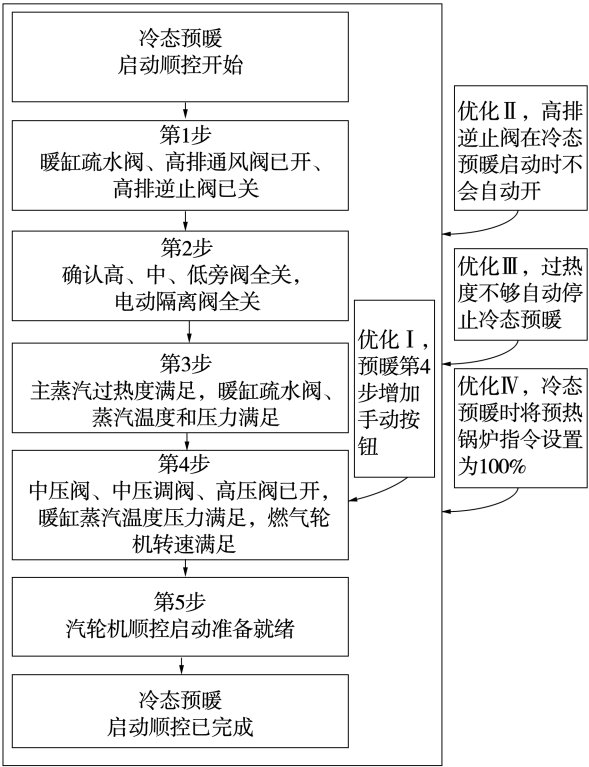


图 3 优化后的冷态预暖启动顺控示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optimized cold-state preheating startup sequential control

3.1 冷态预暖启动顺控优化

对冷态预暖启动顺控逻辑进行优化:

(1)优化 I :对原冷态预暖启动顺控第 4 步增加手动确认按钮。当预暖中压蝶阀、中压调节阀、高压闸阀处于已开的状态,暖缸蒸汽管道温度、压力满足启动条件,燃气轮机转速超过 600 r/min 且汽轮机处于盘车状态时,按下手动确认按钮。此时预暖蒸汽已充分对高、中管道进行预暖;

(2)优化Ⅳ:汽轮机冷态预暖时将启动锅炉出力设置为 100%,保证启动锅炉保持最大出力,满足冷态预暖启动顺控第 3 和第 4 步的“暖缸蒸汽管道和压力”的信号,解决了因预暖蒸汽流量不足导致过热度、Z₂、Z₄及 X₆准则无法满足的问题。冷态预暖第 1~5 步逻辑图如图 4~图 6 所示,实现了冷态预暖启动的全程控制。

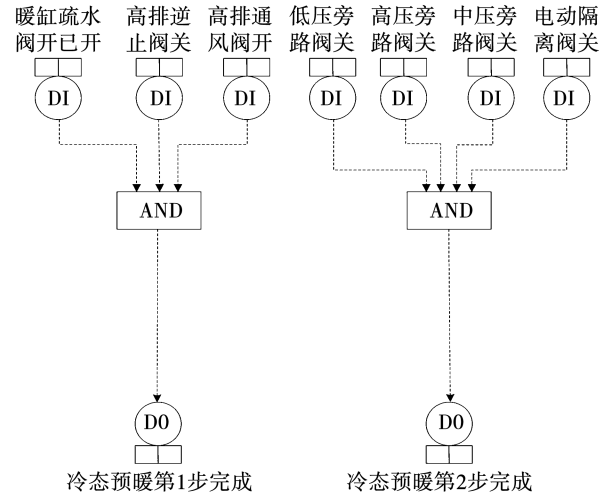


图 4 冷态预暖第 1 和第 2 步逻辑图
Fig.4 The 1st and 2nd steps logic diagram of cold-state preheating

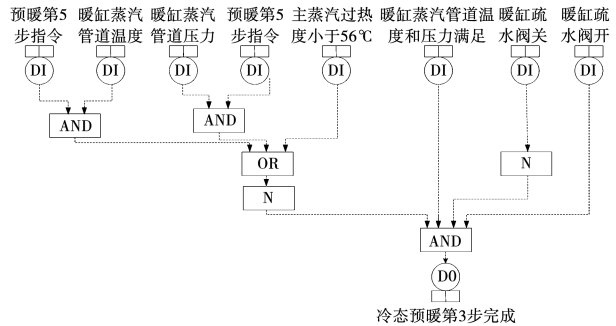


图 5 冷态预暖第 3 步逻辑图
Fig.5 The 3rd step logic diagram of cold-state preheating

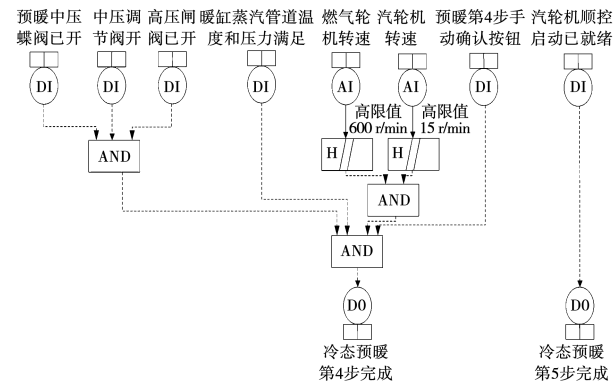


图 6 冷态预暖第 4 和第 5 步逻辑图
Fig.6 The 4th and 5th steps logic diagram of cold-state preheating

3.2 保护控制逻辑优化

冷态预暖启动顺控增加保护控制逻辑,保证机组冷态预暖过程的安全:

(1) 优化Ⅱ:高排逆止阀在汽轮机冷态预暖过程中处于关闭状态。预暖蒸汽流向高排逆止阀,导致其自动开启,致使预暖蒸汽流至锅炉换热面,并形成水垢影响其导热性。此时金属管壁局部温度升高,当超出温度安全范围时,换热面发生鼓包、穿孔、破裂的现象,影响余热锅炉的安全运行^[26];

(2) 优化Ⅲ:预暖蒸汽过热度低于 56℃时自动停止冷态预暖。在冷态预暖启动过程中,若蒸汽过热度低,会发生前几级蒸汽温度降低过快和后几级蒸汽参数降至饱和温度以下的情况,此现象危害到汽轮机叶片^[27]。当暖缸蒸汽温度与压力对应的过热度小于 56℃时(高调门进气设定值满足 22%),立刻对冷态预暖启动顺控下达自动停止信号,来保证设备安全。启动顺控保护逻辑图如图 7 和图 8 所示。

3.3 汽轮机启动顺控优化

实现在冷态预暖启动时汽轮机启动顺控的优化,优化后控制策略如图 9 所示。优化实现了冷态预暖时汽轮机启动全程控制,保障了汽轮机安全高效运行。

对原汽轮机启动顺控进行以下 10 点优化:

- (1) 优化 I :屏蔽汽轮机主顺控第 1 步启动负荷限制投入功能;
- (2) 优化Ⅱ:屏蔽汽轮机主顺控第 7 步 Z₂准则;
- (3) 优化Ⅲ:屏蔽汽轮机主顺控第 8 步 Z₄准则;
- (4) 优化Ⅳ:屏蔽汽轮机主顺控第 10 步紧急切断阀全开;

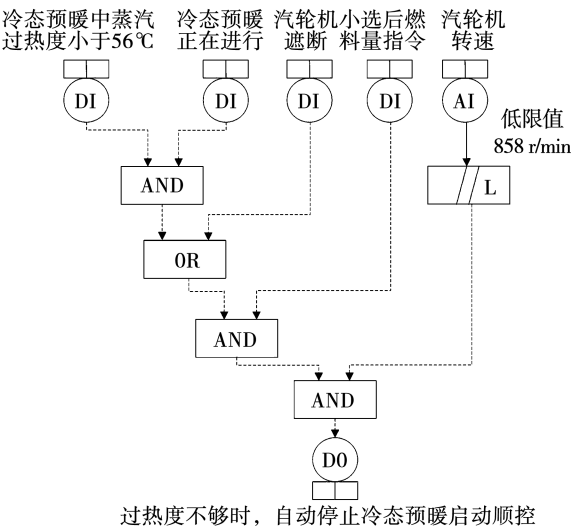


图 7 热度不足时的保护逻辑图

Fig. 7 Protection logic diagram when overheating is insufficient

- (5) 优化 V:屏蔽汽轮机主顺控第 11 步紧急切断阀全开;
- (6) 优化 VI:屏蔽汽轮机主顺控第 13 步 Z_4 、 X_6 及紧急切断阀全开;
- (7) 优化 VII:预暖时更改静止变频启动装置水下模式设定的转速;

- (8) 优化 VIII:汽轮机主顺控屏蔽 Z_2 及紧急切断阀全开;
- (9) 优化 IX:更改汽轮机的转速升速率;
- (10) 优化 X:预暖模式下延长燃气轮机启动顺控第 5 步时间。

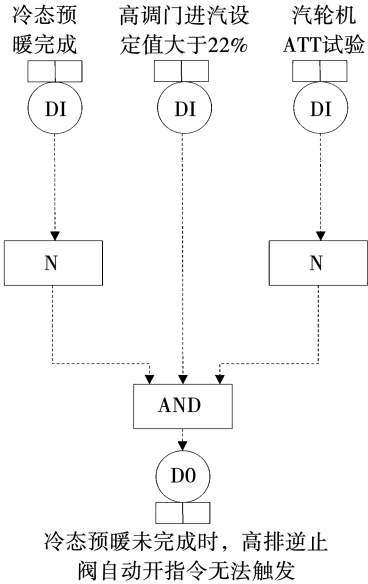


图 8 冷态预暖未完成时的保护逻辑图

Fig. 8 Protection logic diagram when cold-state preheating is not completed

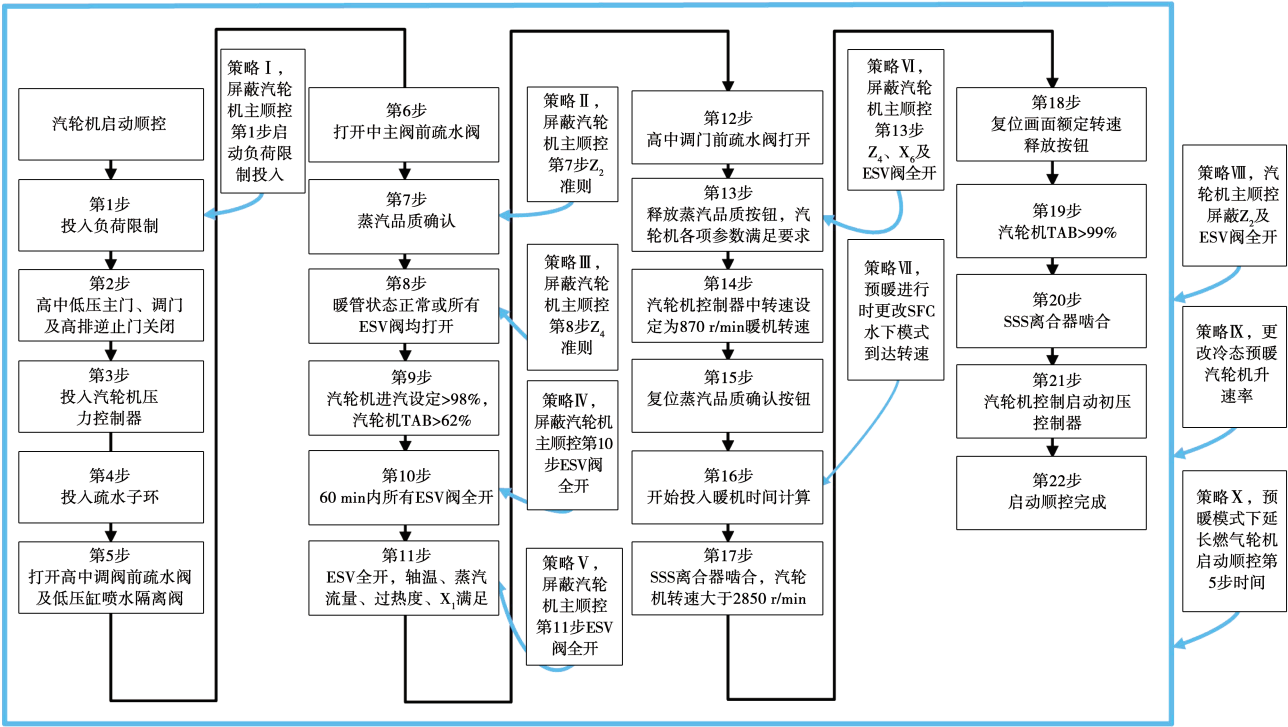


图 9 基于冷态预暖技术的汽轮机启动顺控优化后控制策略示意图

Fig. 9 Schematic diagram of control strategy after optimization of steam turbine startup sequential control based on cold-state preheating technology

为实现所述控制策略中的策略Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ和Ⅵ,对汽轮机启动顺控第 7,8,10,11 和 13 步控制策略逻辑进行完善。因为汽轮机 Z_2 , Z_4 和 X_6 准则判定的温度和压力测点都来自中压缸再热蒸汽管路,紧急切断阀全开的信号包括高、中压主汽门信号,所以

在冷态启动过程中无法触发上述判定条件。因此,需要屏蔽热应力 Z_2 , Z_4 和 X_6 准则、再热蒸汽过热度大于 30 K 以及紧急切断阀全开的信号,如图 10 ~ 图 13 所示。

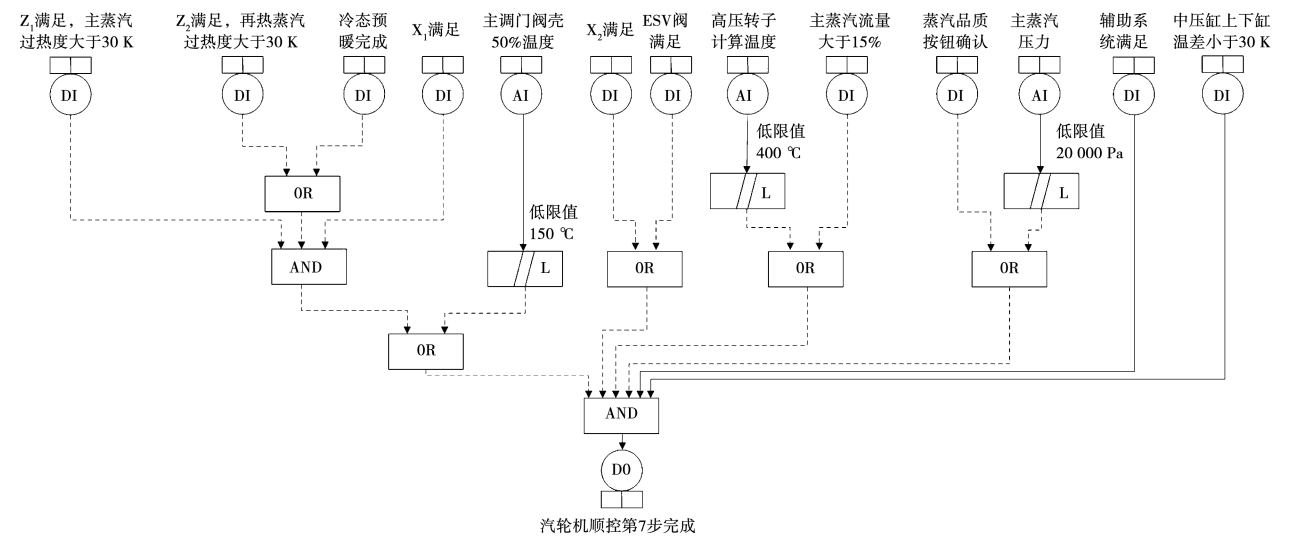


图 10 优化汽轮机主顺控第 7 步 Z_2 准则逻辑图

Fig. 10 Logic diagram of Z_2 criterion in the 7th step of optimizing main sequential control of steam turbine

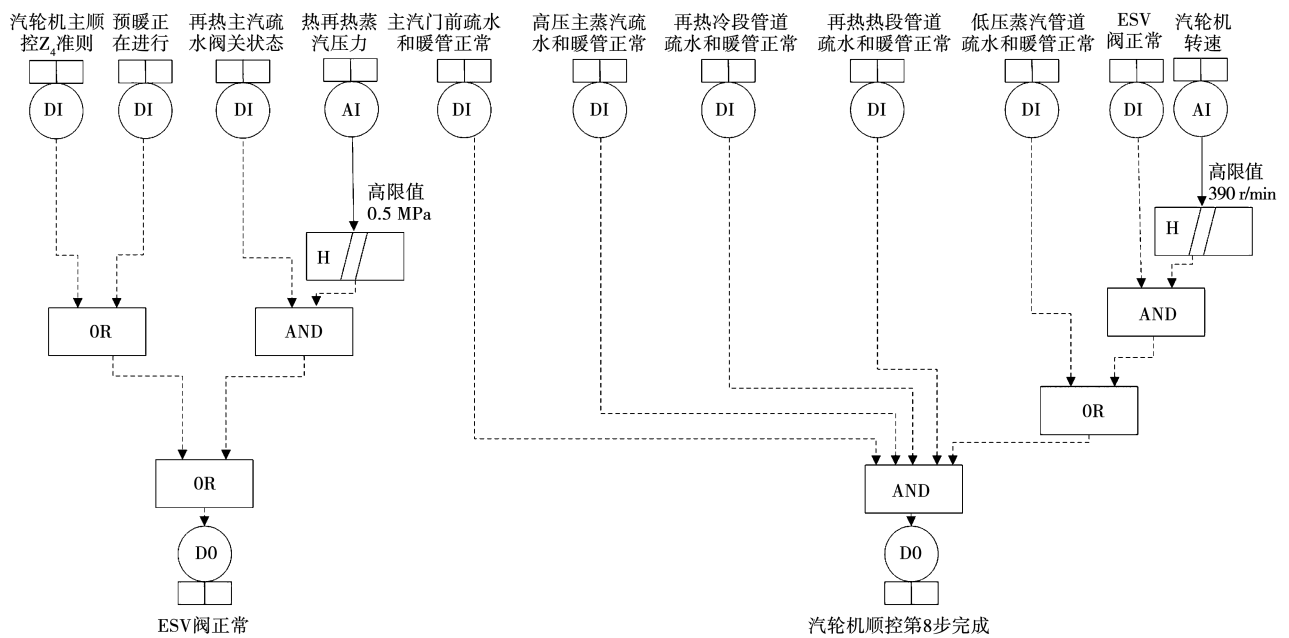


图 11 优化汽轮机主顺控第 8 步 Z_4 准则逻辑图

Fig. 11 Logic diagram of Z_4 criterion in the 8th step of optimizing main sequential control of steam turbine

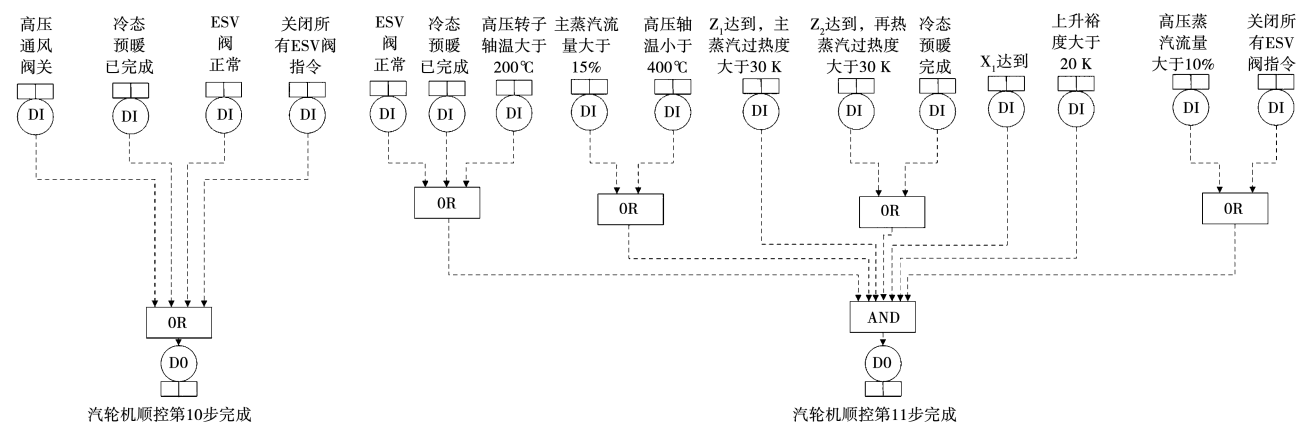


图 12 优化汽机主顺控第 10 和第 11 步 ESV 阀逻辑图

Fig. 12 Logic diagram of ESV in the 10th and 11th steps of optimizing main sequential control of steam turbine

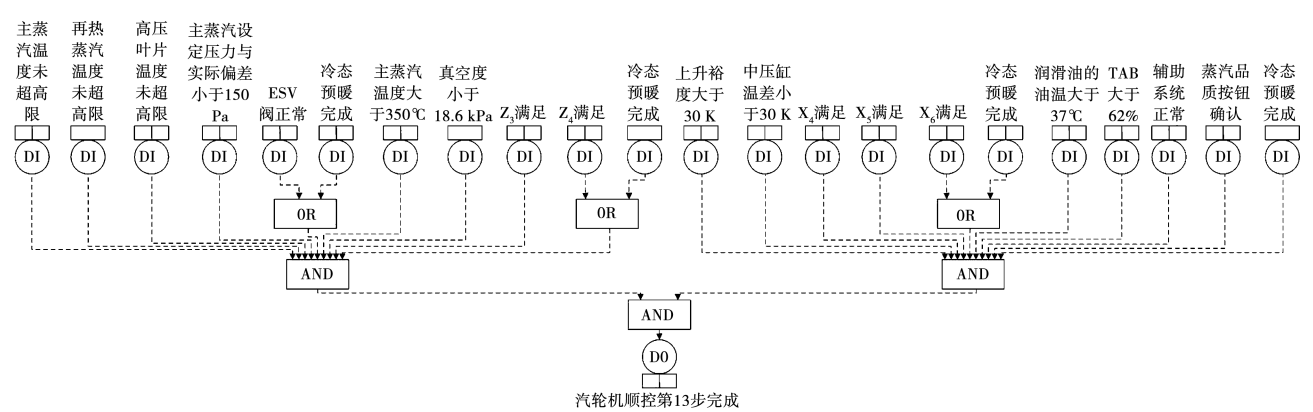


图 13 优化汽机主顺控第 13 步 Z_4 , X_6 及 ESV 阀全开逻辑图

Fig. 13 Logic diagram of Z_4 , X_6 and ESV full-open in the 13th step of optimizing main sequential control of steam turbine

为实现优化后控制策略Ⅶ和Ⅹ,对预暖模式下燃气轮机顺控第 5 步和汽轮机顺控第 16 步进行优化。原燃气轮机顺控第 5 步为水洗模式下燃气轮机转速达到 780 r/min,对空压机进行 5 min 清洗后进行燃气轮机停止运行顺控。现在冷态预暖模式下延长燃气轮机启动顺控第 5 步时间,当冷态预暖时,燃气轮机转速停留在 780 r/min,在 30 min 内等待汽轮机转速满足 780 r/min 并与燃气轮机啮合,此时汽轮机顺控第 16 步完成,SFC 成功退出,逻辑图如图 14 所示。

4 优化后试验

4.1 高排逆止阀优化后试验

优化后的高排逆止阀未自动打开(高排逆止阀信号 1 为全开状态,0 为全关状态),高排逆止阀的温度上升速度减缓,避免了对余热锅炉换热面的影响。高排逆止阀优化后汽轮机启动过程如图 15 所

示。由图 15 可知,高排逆止阀处于关闭状态,杜绝了恶劣事故发生。

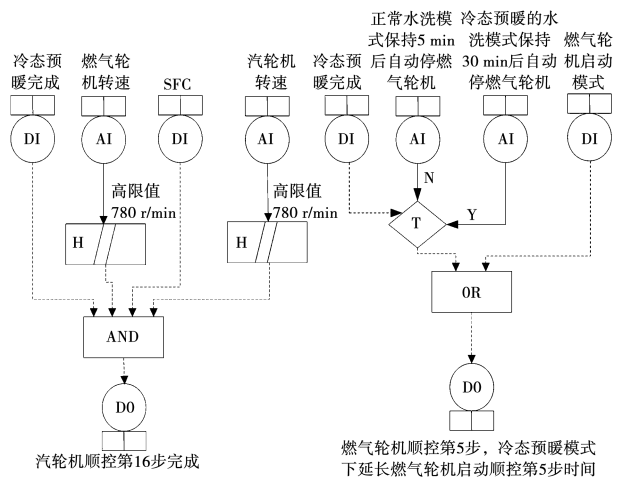


图 14 汽轮机顺控第 16 步和燃气轮机顺控第 5 步逻辑图

Fig. 14 Logic diagram of 16th step of steam turbine sequential control and 5th step of gas turbine sequential control

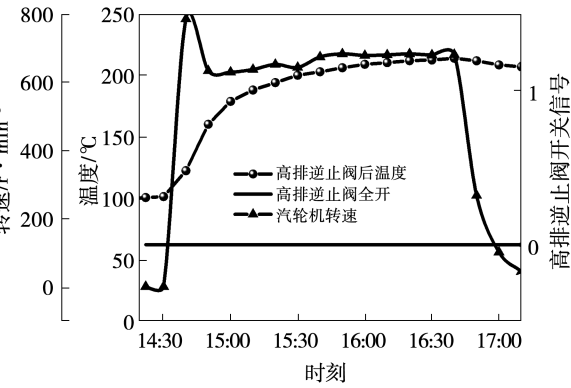


图 15 高排逆止阀优化后汽轮机启动过程

Fig. 15 Startup process of steam turbine after the optimization of high discharge check valve

4.2 Z₂,Z₄,X₆准则及 ESV 阀优化后试验

因无法触发 Z₂,Z₄,X₆准则及 ESV 阀(高压及中压主汽门信号 1 为全开状态,0 为全关状态),对相关启动控制策略优化,优化后启动过程如图 16 和图 17 所示。由图 16 可知,中压主汽门信号未触发不会影响冷态预暖模式启动(预暖启动信号 1 为启动状态,0 为停止状态)。由图 17 可知 Z₂,Z₄及 X₆准则(Z₂,Z₄及 X₆准则信号 1 为触发状态,0 为未触发状态)信号未触发,不会影响冷态启动过程。

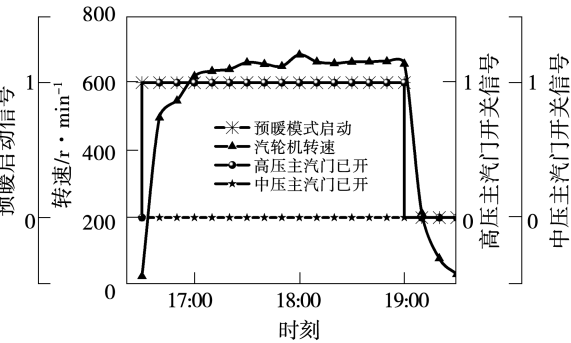


图 16 ESV 阀优化后启动过程

Fig. 16 Startup process of ESV after optimization

4.3 燃气轮机启动顺控水洗模式下优化后试验

进行两次燃气轮机启动顺控水洗模式下试验。冷态预暖时,燃气轮机在水洗模式下转速升至 780 r/min,等待汽轮机转速上升至 780 r/min 与燃气轮机啮合,此过程在 30 min 内。SFC(SFC 启动信号 1 为启动状态,0 为停止状态)成功啮合后 5 min 退出啮合。燃气轮机与汽轮机啮合过程如图 18 和图 19

所示。由图 18 和图 19 可知,在冷态预暖启动过程中,燃气轮机与汽轮机可顺利啮合。

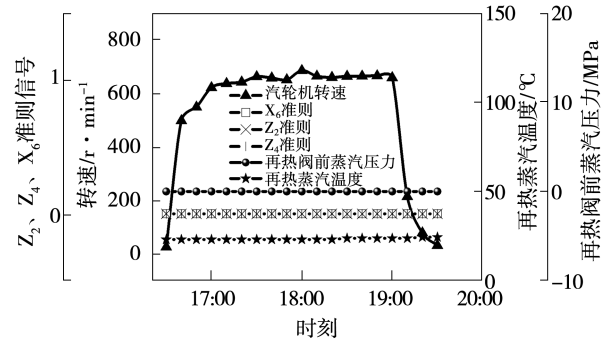


图 17 Z₂,Z₄及 X₆优化后汽轮机启动过程

Fig. 17 Startup process of steam turbine after optimization of Z₂,Z₄ and X₆

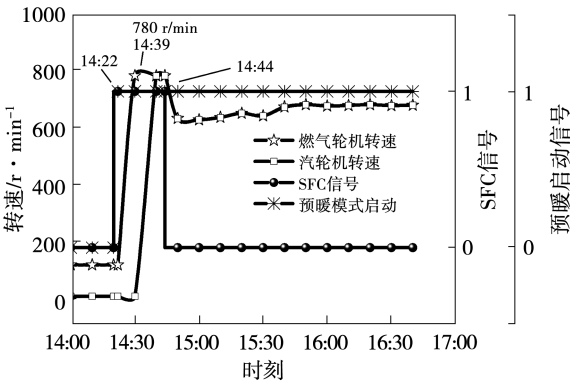


图 18 燃气轮机与汽轮机第 1 次啮合过程

Fig. 18 1st Engaging process of gas turbine and steam turbine

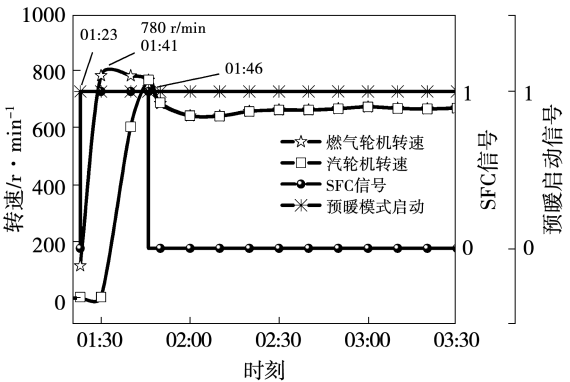


图 19 燃气轮机与汽轮机第 2 次啮合过程

Fig. 19 2nd Engaging process of gas turbine and steam turbine

5 预热后温态启动顺控试验

5.1 高排逆止阀的温态试验

高排逆止阀优化后汽轮机温态启动过程如图 20 所示。由图 20 可知,在正常预热后温态启动时,高排逆止阀全开,未影响高排逆止阀优化后汽轮机温态启动过程。

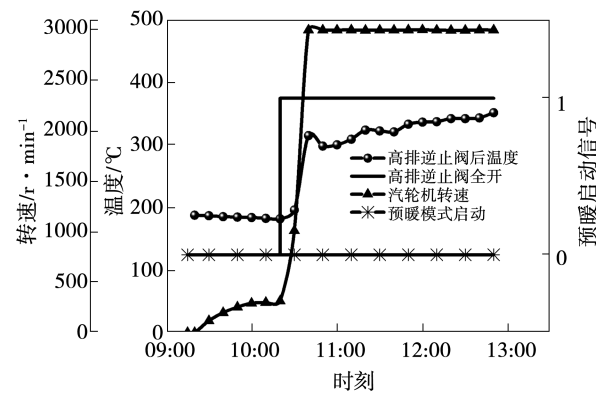


图 20 高排逆止阀优化后温态启动过程
Fig. 20 Warm-state startup process of high discharge check valve after optimization

5.2 Z_2, Z_4, X_6 准则及 ESV 阀的温态试验

ESV 阀及 Z_2, Z_4, X_6 准则优化后温态启动如图 21 和图 22 所示。由图 21 和图 22 可知,在正常预热后温态启动时,高、中压主汽门会全开,冷态启动的 Z_2, Z_4, X_6 准则及 ESV 阀控制策略不会影响正常汽轮机温态启动。随着汽轮机转速上升,高、中压主汽门同时打开, Z_2, Z_4, X_6 准则也依次随着再热蒸汽压力和温度的提高而满足。

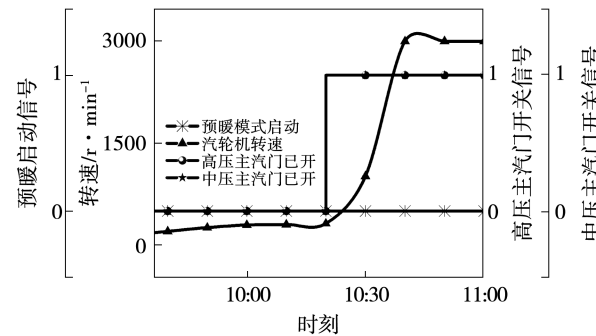


图 21 ESV 阀优化后温态启动过程
Fig. 21 Warm-state startup process of ESV after optimization

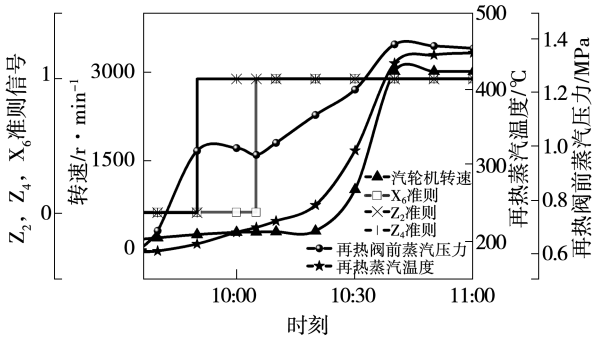


图 22 Z_2, Z_4 及 X_6 优化后温态启动过程
Fig. 22 Warm-state startup process of Z_2, Z_4 and X_6 after optimization

5.3 燃气轮机启动顺控水洗模式下的温态试验

燃气轮机正常启动与汽轮机啮合过程如图 23 所示。由图 23 可知,在温态启动时 SFC 在 30 min 内成功拖动燃气轮机,转速升至 2 100 r/min 并退出。汽轮机无需暖机升至额定转速,燃气轮机点火冲转到汽轮机定速 3 000 r/min,全程约为 80 min,相比于冷态启动缩短 2 h 左右。燃气轮机冷态启动水洗模式下控制策略未影响温态启动,燃气轮机正常启动并与汽轮机成功啮合。

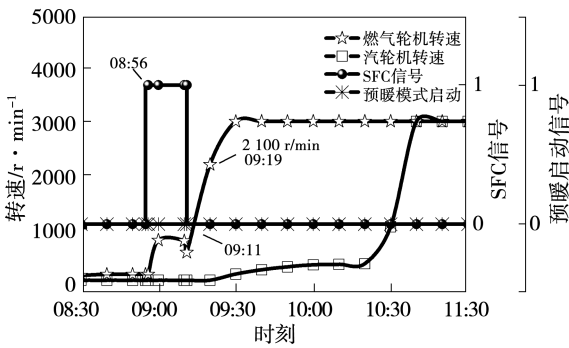


图 23 燃气轮机正常启动与汽轮机啮合过程
Fig. 23 Engaging process of gas turbine and steam turbine in normal startup

6 结 论

(1) 同轴联合循环机组首次将冷态预热控制策略应用于机组冷态启动,避免了预热时过热度过低以及高排逆止阀自动开启致使预热蒸汽流至锅炉换热面导致机组停机等问题。该控制策略可为同类型机组提供借鉴意义;

(2) 冷态预暖控制策略与原启动控制策略互不冲突,可进行无扰切换,其优点为全过程无断点的自启动控制,缓解了运行人员的监盘压力;

(3) 利用汽轮机预暖系统可以有效缩短联合循环机组冷态启动时间约2 h,使机组具备快速启动调峰能力,达到了降能增效的目标。

参考文献:

[1] 魏毓华. 国产 200 MW 汽轮机冷态中压缸启动的技术实践[J]. 东北电力技术,2000,21(12):1-11.
WEI Yu-hua. A technical practice of cool-state medium-pressure cylinder starting for domestic 200 MW turbine[J]. Northeast Electric Power Technology,2000,21(12):1-11.

[2] 伍 鹏. 国产新型 350 MW 超临界汽轮机特点及问题初探[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2018,23(1):46-48.
WU Peng. A probe into the features and problems of the new-type domestic 350 MW super-critical turbine[J]. Journal of Chongqing Electric Power College,2018,23(1):46-48.

[3] 李春银,张世永,王小良,等. 350 MW 超临界空冷汽轮机机组的启动运行分析[J]. 热力透平,2021,50(1):16-20.
LI Chun-yin,ZHANG Shi-yong,WANG Xiao-liang,et al. Start-up and operation analysis of 350 MW supercritical air-cooled steam turbine unit[J]. Thermal Turbine,2021,50(1):16-20.

[4] 张 强,黄常城. 600 MW 超临界汽轮机冷态启动暖机方式优化[J]. 山东工业技术,2017(7):17-18.
ZHANG Qiang,HUANG Chang-cheng. Optimization of warm-up mode for cold startup of 600 MW supercritical steam turbine[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2017(7):17-18.

[5] 郭晶晶,焦庆丰,卞 双,等. 国产 600 MW 超临界汽轮机冷态启动热应力有限元分析[J]. 湖南电力,2010,30(6):8-11.
GUO Jing-jing,JIAO Qing-feng,BIAN Shuang,et al. Finite element analysis of thermal stress of domestic 600 MW supercritical steam turbine under cold start-up[J]. Hunan Electric Power,2010,30(6):8-11.

[6] 吴凌轩,纪冬梅. 某 1 000 MW 超超临界汽轮机转子冷态启动优化[J]. 发电设备,2020,34(5):324-328.
WU Ling-xuan,JI Dong-mei. Cold startup optimization for the rotor in a 1 000 MW ultra-supercritical steam turbine unit[J]. Power Equipment,2020,34(5):324-328.

[7] 黄 庆,周 建,章 恂,等. 9E 燃气-蒸汽联合循环机组冷态启动优化[J]. 燃气轮机技术,2019,32(1):68-72.
HUANG Qing,ZHOU Jian,ZHANG Xun,et al. Optimization of cold start of 9E gas-steam combined cycle[J]. Gas Turbine Technology,2019,32(1):68-72.

[8] 秦爱民,张 涔. 660 MW 西门子汽轮机自启动控制策略及实现[J]. 河北电力技术,2006,25(6):36-39.

QIN Ai-min,ZHANG Yun. Control strategy and actualization of 660 MW Siemens turbine overall self-startup[J]. Hebei Electric Power,2006,25(6):36-39.

[9] 刘显旺. 汽轮机启动过程优化研究[J]. 中国高新技术企业,2015(25):44-45.
LIU Xian-wang. Optimization research on startup process of steam turbine[J]. China High-Tech Enterprises,2015(25):44-45.

[10] 田建斌. 汽轮机启动控制技术[J]. 电工技术,2018(10):6-8.
TIAN jian-bin. Turbine starting control technology[J]. Electric Engineering,2018(10):6-8.

[11] 丁阳俊,盛德仁,陈坚红,等. 某电厂联合循环汽轮机启动过程优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(2):9-15.
DING Yang-jun,SHENG De-ren,CHEN Jian-hong,et al. Optimization of start-up process in combined cycle steam turbine of a power plant[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(2):9-15.

[12] 查文建. 联合循环机组凝汽器压力对汽轮机冷态启动暖机时间的影响[J]. 浙江电力,2015,34(5):49-52.
ZHA Wen-jian. Influence of combined cycle units condenser pressure on warming-up time of turbine cold-state startup[J]. Zhejiang Electric Power,2015,34(5):49-52.

[13] 廖均利,郑展友. 330 MW 汽轮机冷态启动的热应力控制[J]. 华北电力技术,2012(7):28-30.
LIAO Jun-li,ZHENG Zhan-you. Thermal stress control strategies during the cold start-up of 330 MW steam turbine[J]. North China Electric Power,2012(7):28-30.

[14] 程 功. 660 MW 西门子汽轮机启动程序中应力控制策略[J]. 电力与电工,2012,32(4):71-73.
CHENG Gong. Stress control strategy in startup procedure of 660 MW Siemens steam turbine[J]. Electric Power & Electrical Engineering,2012,32(4):71-73.

[15] 黄 雪. 某 300 MW 等级汽轮机启动过程控制[J]. 机械工程师,2015(8):243-244.
HUANG Xue. Startup process control of a 300 MW steam turbine[J]. Mechanical Engineer,2015(8):243-244.

[16] 王艳青,盛会霞. 联合循环机组冷态启动分析及优化探讨[J]. 河南科技,2018(4):74-76.
WANG Yan-qing,SHENG Hui-xia. Analysis and optimization of cold starting of combined cycle unit[J]. Henan Science and Technology,2018(4):74-76.

[17] 康 明,吴仕芳,王海涛,等. 二次再热汽轮机中压转子冷态启动暖机过程分析[J]. 热能动力工程,2022,37(6):32-39.
KANG Ming,WU Shi-fang,WANG Hai-tao,et al. Analysis on warming-up process of intermediate pressure rotor of double reheat steam turbine during cold startup[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(6):32-39.

[18] 薛江涛,马运翔,张耀华,等. 1 000 MW 二次再热汽轮机启动

步序及问题处理[J]. 中国电力,2016,49(11):119-123.

XUE Jiang-tao, MA Yun-xiang, ZHANG Yao-hua, et al. Startup sequence and troubleshooting of 1 000 MW double reheat steam turbine[J]. Electric Power,2016,49(11):119-123.

[19] 肖 丽. 西门子 T3000 型汽轮机组自启动控制步序解析[J]. 设备管理与维修,2018(17):77-79.

XIAO Li. Analysis of self-starting control steps of Siemens T3000 steam turbine unit [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(17):77-79.

[20] 徐 江,薛小宇. 1 000 MW 二次再热机组汽轮机组冷态启动冲转参数优化[J]. 发电设备,2019,33(4):293-296.

XU Jiang, XUE Xiao-yu. Optimization on cold start-up rotation-impulsing parameters of a 1 000 MW double reheat steam turbine [J]. Power Equipment,2019,33(4):293-296.

[21] 王 雨. 汽轮机冷态启动时 X 准则的控制优化[J]. 河南科技,2021,40(2):137-139.

WANG Yu. Control optimization of X criterion during cold start of steam turbine[J]. Henan Science and Technology,2021,40(2):137-139.

[22] 姚 岭. 350 MW 机组汽轮机辅汽预暖技术的应用[J]. 华东电力,2007,35(7):89-91.

YAO Ling. Application of auxiliary steam pre-warming technology to 350 MW units[J]. East China Electric Power,2007,35(7):89-91.

[23] 樊印龙,张 宝. 西门子百万千瓦级汽轮机启动过程中的温度制约[J]. 热力透平,2008,37(4):282-284.

FAN Yin-long, ZHANG Bao. Temperature criteria of Siemens 1 000 MW steam turbine in start-up processing[J]. Thermal Turbine,2008,37(4):282-284.

[24] 孙海元. 某电厂 330 MW 汽轮机冷态启动用时过长原因分析及处理[J]. 华电技术,2018,40(7):54-55,58.

SUN Hai-yuan. Analysis and treatment of long-time cold start of a 330 MW steam turbine in a power plant[J]. Huadian Technology,2018,40(7):54-55,58.

[25] 蔺奕存,伍 刚,吴青云,等. 燃气-蒸汽联合循环机组汽轮机冷态预暖技术应用及优化[J]. 热力发电,2022,51(9):126-131.

LIN Yi-cun, WU Gang, WU Qing-yun, et al. Application and optimization of cold-state preheating technology for steam turbine of gas-steam combined cycle unit [J]. Thermal Power Generation, 2022,51(9):126-131.

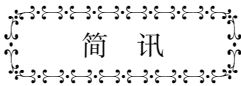
[26] 张伟旗. 余热锅炉常见故障分析与控制[J]. 世界有色金属,2014(4):48-51.

ZHANG Wei-qi. Analysis and control of common faults of waste heat boiler[J]. World Nonferrous Metals,2014(4):48-51.

[27] 王永新,吴鹏良. 300 MW 机组蒸汽过热度保护方案改进[J]. 江西电力,2008,32(5):16-18.

WANG Yong-xin, WU Peng-liang. Modification of protection scheme for superheated steam degree of 300 MW unit[J]. Jiangxi Electric Power,2008,32(5):16-18.

(刘 颖 编辑)



简 讯

东方电气集团有限公司(DEC)成功测试了海水原位直接电解制氢技术

据官网报道,中国工程院谢和平院士带领的研究团队自2022年11月30日在《自然》正刊发表海水制氢原创性成果后,破解了该领域近半个世纪的世界难题,被评为2022年中国科学十大进展之一。基于这一全新原理与技术,东方电气集团有限公司与谢和平院士团队专门研制了漂浮式海上制氢平台以及海上风电智慧稳定供电系统。全球首套与可再生能源相结合的漂浮式海上制氢平台东福一号,位于中国东部福建省的一个海上风电场,集现场制氢、智能能源转换管理、安全监控、装卸系统于一体。

5月17日至26日,于福清市兴化湾海域对接海上风电场连续稳定运行10天,首次实现了海上风电无淡化海水直接电解制氢的海试成功。

联合攻关团队表示,本次海试成功充分标志着海水无淡化原位直接电解制氢在产业化进程上跨出了一大步,意味着正式迈入了海水直接电解制氢新时代,提供了碳中和路径下的零碳能源中国方案、中国智慧、中国标准。

(孙嘉忆摘译自 <https://hydrogen-central.com>)