9FA 燃气轮机清吹系统分析

吴学崇[1], 贡文明[2], 周晟阳[1]

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030;
2. 江苏华电戚墅堰发电有限公司, 江苏 常州 213011)

摘 要: 以 9FA 燃气轮机为研究对象,在充分掌握燃气轮机清吹系统的组成结构及工作机理的前提下,对控制逻辑进行深入解析,根据清吹阀限位开关及阀间压力开关可排列组合出 32 种清吹系统潜在的运行工况,并分别定义其故障程度,建立起相关故障类型库。根据机组在实际运行过程中燃烧模式及故障程度的差异性来进一步制定相应的防范策略。通过对清吹系统控制逻辑的有效分析,掌握燃烧模式闭锁、自动停机、保护跳闸等逻辑实现机理,有助于及早发现清吹系统运行过程中出现的问题,进一步提高燃气轮机清吹系统运行的可靠性,为机组的安全稳定运行保驾护航。

关 键 词: 燃气轮机;清吹系统;燃烧模式切换;主保护

中图分类号: TK474.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-2889(2023)04-0053-07

9FA 燃气轮机采用干式低氮氧化物的 DLN 2.0 +燃烧系统,燃料控制阀由 D5、PM1 和 PM4 组合而成[1]。机组从启动运行至满负荷的过程中,根据机组实时的燃烧基准温度,选择投用部分或全部燃料阀,形成多种配气模式,进而完成燃烧模式的切换,以达到降低 NO_x 排放的目的[2]。当机组正常运行时,对于没有燃料流经的燃气支路,清吹系统会从压气机排气中抽取一部分用作清吹空气,维持一定的清吹压力对燃气环管进行持续吹扫,这样不仅可以将支路中残存的燃料吹扫干净,也可以防止凝结水凝结导致回火、脱火、振荡燃烧、负荷波动等问题[3]。

燃气轮机清吹系统能够正常工作是燃气轮机安全稳定运行的重要保障,但清吹系统的故障率较高,极易发生燃烧模式闭锁、自动停机等事故,对燃气轮机运行乃至整个电厂的稳定性造成影响。国内关于清吹系统故障的案例比比皆是,相关从业人员也发表过相关技术论文,给出了改造建议和方案[4-7],但也仅停留在安装工艺等设备层面,并没有从控制原理出发深入分析故障原因,改造成本高且仍存在故障隐患。本文针对某电厂 9FA 燃气轮机清吹系统控制进行逻辑解析,并详细阐述因清吹系统故障导致燃烧模式闭锁、自动停机、主保护跳闸等触发原因,对燃气轮机控制系统国产化具有较为重要的实际参考价值和指导意义。

1 清吹系统组成

燃气轮机清吹系统布置在燃气控制系统和压气机之间,系统如图 1 所示,由以下组件共同构成:4 只燃料清吹阀(VA13-1、VA13-2、VA13-5 和 VA13-6), 4 只燃料清吹电磁阀(20PG-1、20PG-2、20PG-5 和 20PG-6), 2 只燃气放空阀(VA13-8 和 VA13-13), 2 只燃气放空电磁阀(20VG-2 和 20VG-4), 10 只燃料清吹阀和放空阀的位置限位开关(33PG), 4 只清吹阀执行机构快速排气阀(VA36-1、VA36-2、VA36-9 和 VA36-10), 6 只压力开关(63PG-1A、63PG-1B、63PG-1C、63PG-3A、63PG-3B 和 63PG-3C), 1 只 VA13-1 清吹阀的仪用空气压力调节阀(VPR54-22), 6 支 K 型热电偶, 1 只清吹阀的远程位置调节器。

在机组启动及正常燃烧模式过程中,清吹系统会从压气机排气中抽取一部分空气对没有燃气流经

收稿日期:2022-07-09 **改稿日期:**2022-08-29

作者简介:吴学崇(1994—),男,吉林吉林人,硕士研究生,从事燃气轮机控制系统方面的理论和应用研究,E-mail:751462909@qq.com。

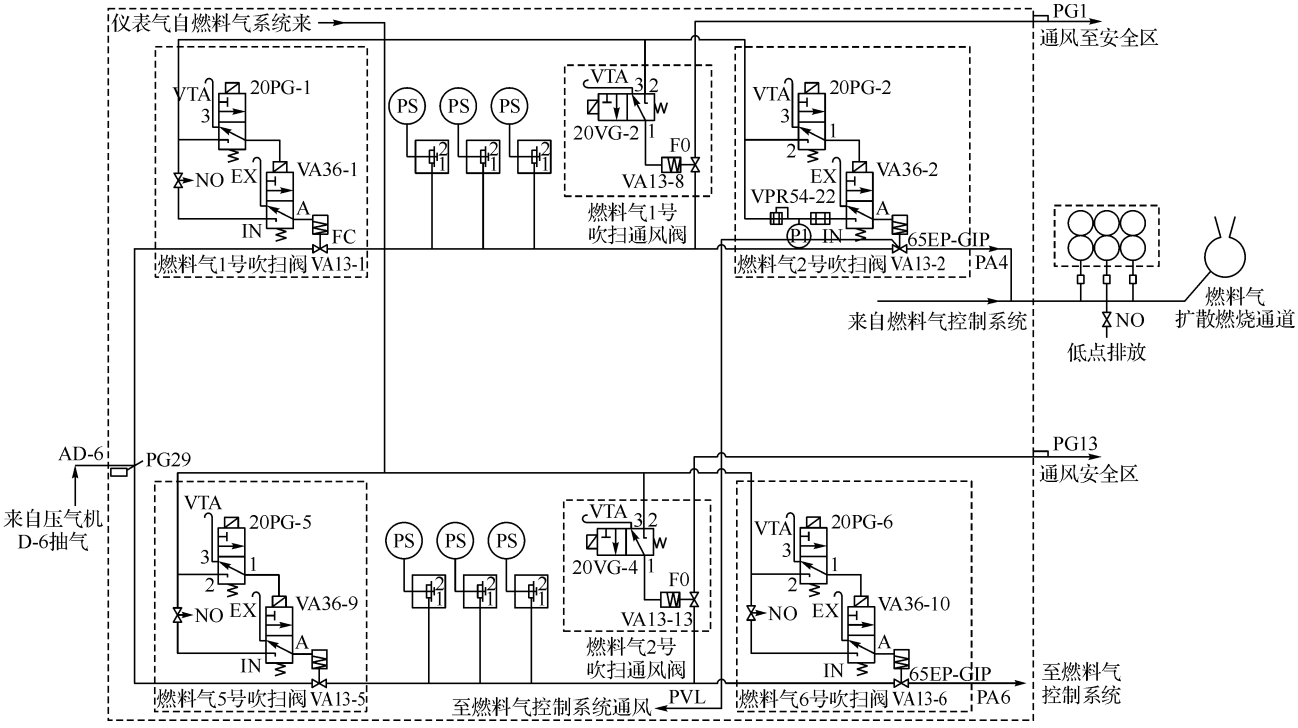

图 1 清吹系统图

的环管进行吹扫。当 D5 燃料阀关闭后,D5 清吹阀组启动对 D5 环管进行吹扫;当 PM4 燃料阀关闭后,PM4 清吹阀组启动对 PM4 环管进行吹扫,以保证燃气环管内部不会积聚易燃气体。

2 清吹系统投退及联锁

9FA 燃气轮机在机组正常启动至满负荷的过程中,会依次经过扩散燃烧(初始)、亚先导预混燃烧(SPPM)、先导预混燃烧(PPM)、预混燃烧(PM)四个燃烧模式。在模式切换过程中需对应开启的燃料阀如表 1 所示。

表 1 不同燃烧模式下需对应开启的燃料阀

燃烧模式	信号名	燃料阀
扩散燃烧	L83FXP	D5
亚先导预混燃烧	L83FXL	D5 + PM1
先导预混燃烧	L83FXH	D5 + PM1 + PM4
预混燃烧	L83FXM	PM1 + PM4

机组启动(加负荷),清吹系统的动作过程为:

(1) 机组启动时,转速达到清吹转速设定值(TNH ≥ 14%),清吹阀 VA13-5、VA13-6 打开,对 PM4 环管进行吹扫。

(2) 燃烧模式由 SPPM 上切至 PPM 模式时,清吹阀 VA13-5、VA13-6 关闭。

(3) 燃烧模式由 PPM 上切至 PM 模式时,清吹阀 VA13-1、VA13-2 打开,对 D5 环管进行吹扫。

停机(减负荷),清吹系统的动作过程为:

(1) 燃烧模式由 PM 模式下切至 PPM 模式时,清吹阀 VA13-1、VA13-2 关闭。

(2) 燃烧模式由 PPM 下切至 SPPM 模式时,清吹阀 VA13-5、VA13-6 打开,对 PM4 环管进行吹扫。

(3) 机组停机时,转速低于冷托转速设定值(TNH≤1.2%),清吹阀 VA13-5、VA13-6 关闭。

2.1 燃烧器清吹及联锁保护

当燃烧模式处在扩散燃烧(初始)模式时,20PG-5、20PG-6 电磁阀带电,清吹阀 VA13-5、VA13-6 打开,对 PM4 环管进行持续吹扫。限位开关 33PG-9/33PG-10 和 33PG-11/33PG-12 用于反馈清吹阀 VA13-5 的关/开和清吹阀 VA13-6 的开/关状态。

放空阀 VA13-13 布置在两个清吹阀之间,当两个清吹阀都关闭时,电磁阀 20VG-4 带电打开来释放两个清吹阀间的压力。一旦任一清吹阀未关到位将导致放空阀不能正常开启,阀间压力达到设定值会触发有关燃气吹扫故障的联锁保护。

2.2 燃烧器清吹及联锁保护

当燃烧模式处在预混燃烧(PM)模式时,20PG-1、20PG-2 电磁阀带电,清吹阀 VA13-1 打开,清吹阀 VA13-2 则是通过电-气定位器 65EP-G1P 输出 4 ~

20 mA 模拟量信号来输出阀位开度指令,并对 D5 环管进行持续吹扫。限位开关 33PG-1/33PG-2 用于反馈清吹阀 VA13-1 的关/开状态,限位开关 33PG-3/33PG-4/33PG-15 用于反馈清吹阀 VA13-2 的全关/17% 开度/55% 开度状态。

放空阀 VA13-8 布置在两个清吹阀之间,当两个清吹阀都关闭时,放空电磁阀 20VG-2 带电打开来释放两个清吹阀间的压力。一旦任一清吹阀未关到位将导致放空阀不能正常开启,阀间压力达到设定值同样会触发有关燃气轮机吹扫故障的联锁保护。

3　清吹系统故障定义

判别清吹系统运行工况的控制机理是通过清吹阀组的开关反馈和清吹阀间的压力开关综合定义的。

以 D5 清吹阀组为例,定义 PG1 为 D5 清吹系统的运行状态,并对 PG1 赋值:PG1 = 0。具体策略如表 2 所示。

表 2　D5 清吹阀组运行状态判定方法

序号	事件说明	信号名	赋值
①	VA13-2 清吹阀关反馈到位	l33pg2c	1
②	VA13-2 清吹阀开反馈到位(综合判定)	L33PG20PEN	2
③	清吹阀间压力高(三取二)	L63PG1H	4
④	VA13-1 清吹阀关反馈到位	l33pg1c	8
⑤	VA13-1 清吹阀开反馈到位	l33pg1o	16

因为机组在运行时表 2 中①~⑤代表的事件非“真”即“假”,当对应事件为“真”时 PG1 累加代表该事件的定值,故潜在共有 $2^5 = 32$ 种不同的排列组合情况,并根据故障程度分别对这 32 种潜在的运行工况定义为不同的故障类型参与逻辑判断。其中 9FA 机组的 VA13-2 清吹阀为气动调阀,设计时并没有显示 VA13-2 开反馈已到位的限位开关,而是需要通过逻辑综合判定,逻辑判定的实现方式将会在本文的 3.3 章节单独说明。

PM4 清吹阀组清吹状态的计算公式与 D5 类似,定义 PG3 为计算累加结果并输出,具体策略如表 3 所示。

当 PM4 清吹指令发出时,压气机出口的排气压力 >413 Pa,等效于 PM4 清吹阀间压力高,任一条件为真都会使 PG3 = PG3 +4 累加。

表 3　PM4 清吹阀组运行状态判定方法

序号	事件说明	信号名	赋值
①	VA13-6 清吹阀关反馈到位	l33pg6c	1
②	VA13-6 清吹阀开反馈到位	l33pg6o	2
③	清吹阀间压力高(三取二) PM4 开始清吹(指令)& 压气机出口压力 >413 kPa	L63PG1H L20PG3ON& L3CPD_GFP(取非)	4
④	VA13-5 清吹阀关反馈到位	l33pg5c	8
⑤	VA13-5 清吹阀开反馈到位	l33pg5o	16

3.1　清吹阀组关故障类型库

根据已建立的累加公式可总结归纳出如图 2 所示的清吹阀组关故障类型库。其中横坐标(0 ~ 31)代表清吹期间不同运行状态的组合,纵坐标代表清吹阀组(D5 和 PM4)在关闭过程中运行正常与否的定义。

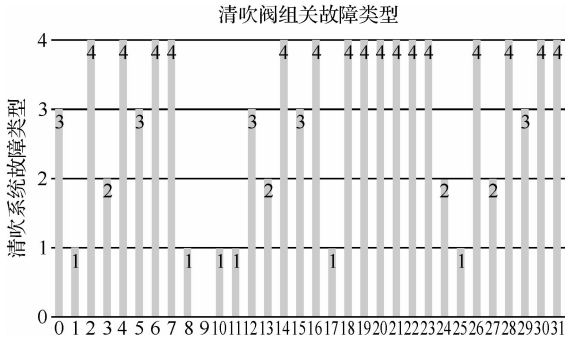

图 2　清吹阀组关故障类型库

图中纵坐标为 0 代表清吹阀组关过程无故障,1、2、3、4 分别代表清吹阀组在关闭过程中发生了#1 类、#2 类、#3 类、#4 类故障。

以纵坐标为 0 时为例,对应横坐标为 9,即 D5 清吹阀组中 VA13-1、VA13-2 的关反馈到位(PM4 清吹阀组中 VA13-5、VA13-6 的关反馈到位),清吹阀间清吹压力不高。

3.2　清吹阀组开故障类型库

同理根据累加公式可总结出如图 3 所示的清吹系统开故障类型库。其中横坐标(0 ~ 31)代表清吹期间不同运行状态的组合,纵坐标代表清吹阀组(D5 和 PM4)在打开过程中运行正常与否的定义。

图中纵坐标为 0 代表清吹阀组开过程无故障,1、2 分别代表清吹阀组在打开过程中发生了#1 类、#2 类故障。

以纵坐标为 0 时为例,对应横坐标为 22,即 D5 清吹阀组中 VA13-1、VA13-2 的开反馈到位(PM4 清吹阀组中 VA13-5、VA13-6 的开反馈到位),清吹阀

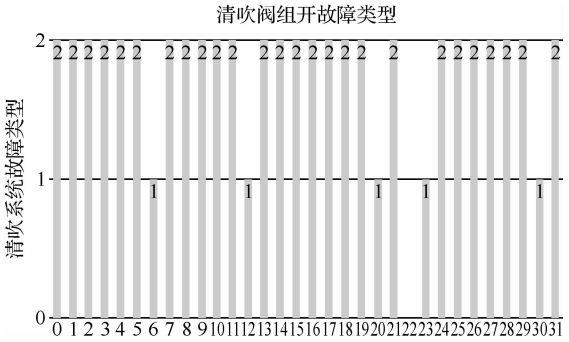

图 3 清吹阀组开故障类型库

间清吹压力高。

3.3 综合判定清吹阀 VA13-2 开到位的逻辑分析

为了准确反馈清吹阀 VA13-2 能否满足清吹的动作要求,共设计了三个限位开关结合不同运行工况综合判定的。其中 l33pg2c = 1 表示 VA13-2 清吹阀已关到位,l33pg2o = 1 表示 VA13-2 清吹阀 17% 已开到位,l33pg2_3 表示 VA13-2 清吹阀 55% 已开到位,判断逻辑流程图如图 4 所示。VA13-2 清吹电磁阀动作时间在 0 ~ 90 s 时,且满足一定的工况条件,都可综合判断 VA13-2 清吹阀已开到位,不影响清吹系统正常工作,概括如下:

(1) VA13-2 清吹电磁阀动作时间小于 40 s,VA13-2 清吹阀关反馈消失。

(2) VA13-2 清吹电磁阀动作时间在 40 ~60 s 之间,VA13-2 清吹阀 55% 开反馈到位。

(3) VA13-2 清吹电磁阀动作时间在 60 ~90 s 之间,D5 清吹指令为真(L20PG1ON = 1),且以下条件任一为“真”:①VA13-2 清吹阀 17% 开反馈到位;② 燃气吹扫温度 >240 ℉。

4 清吹系统控制策略

4.1 燃烧模式闭锁

4.1.1 PPM 模式闭锁

机组在正常升/降负荷进行模式切换的过程中,PM4 清吹阀组清吹故障导致 PPM 闭锁的逻辑流程图如图 5 所示。

(1) 升负荷:当机组运行在 SPPM 模式下,PM4 停止清吹且延时达到 8 s,PM4 清吹阀存在“关”故障(包括#1 类、#2 类、#3 类、#4 类),触发 PPM 模式闭锁,负荷限制。

(2) 降负荷:PM4 开始清吹且延时达到 50 s,PM4 清吹阀存在“开”故障(包括#1 类、#2 类),触发 PPM 模式闭锁,负荷限制。

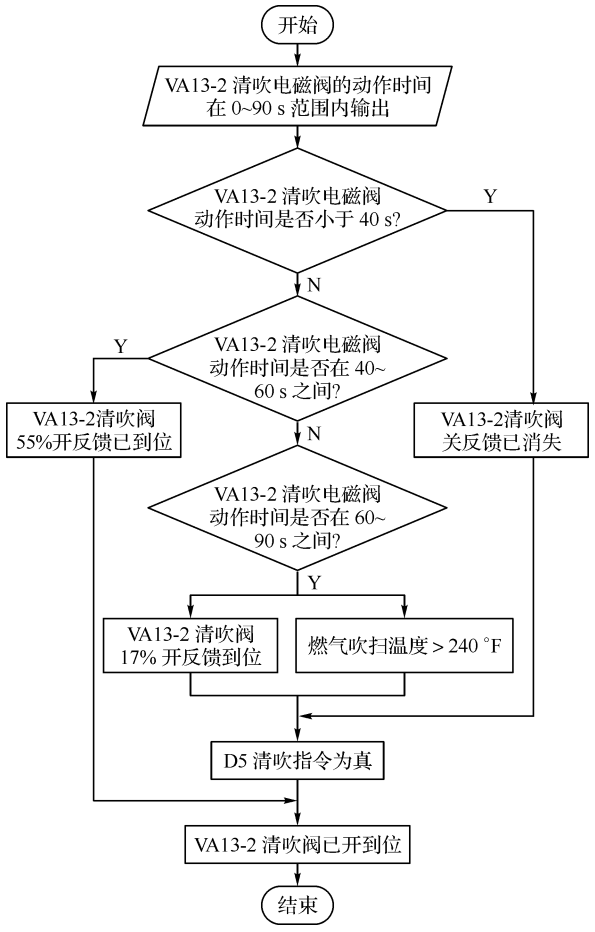

图 4 清吹阀 VA13-2 开到位判别逻辑

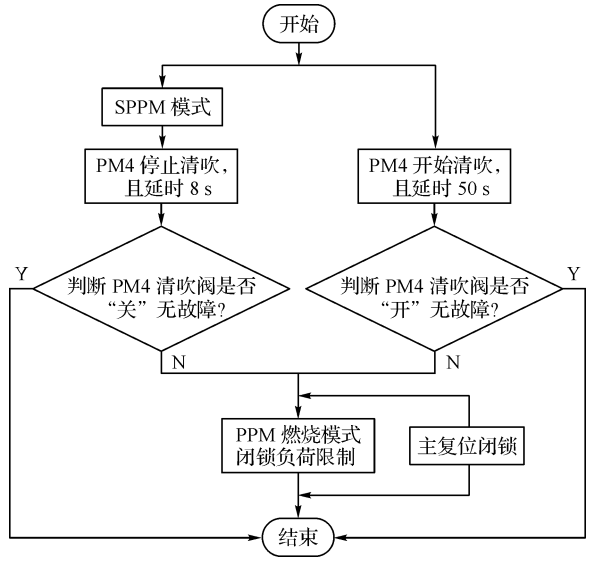

图 5 PPM 模式闭锁

最后当故障消除后可由主控复位按钮(L83MR1 = 1)来解除闭锁继续升降负荷进行模式切换。

4.1.2　PM 模式闭锁

当机组运行在 PPM 模式向 PM 模式切换的过程中,D5 燃料阀关闭,D5 清吹阀组对 D5 环管进行清吹,当出现以下故障工况时会触发 PM 模式闭锁导致模切失败,逻辑流程图如图 6 所示。

(1) 清吹压力低:当 D5 清吹指令发出,VA13-2 清吹电磁阀动作时间在 45 ~ 60 s 之间,D5 清吹压比仍小于 94% 。

(2) 燃气吹扫温度低:当机组已运行在 PM 模式下,D5 清吹指令发出,VA13-2 电磁阀动作时间大于 60 s,D5 清吹阀组的燃气吹扫温度 < 240 ℉,延时 15 min 触发。

(3) VA13-2 清吹阀位置异常,当机组已运行在 PM 模式下,D5 清吹指令发出,VA13-2 清吹电磁阀动作时间大于 90 s,且以下任一为“真”,触发 PM 模式闭锁,负荷限制:①VA13-2 清吹阀 17% 开反馈到位;②VA13-2 清吹阀关反馈到位。

(4) VA13-2 清吹阀状态故障:清吹指令开始且延时 50 s,D5 清吹阀存在“开”#2 类故障。

(5) 运行人员已事先选择 PPM 基本负荷模式。故障消除后可由主控复位按钮(L83MR1 = 1)来解除闭锁继续升降负荷进行燃烧模式切换。

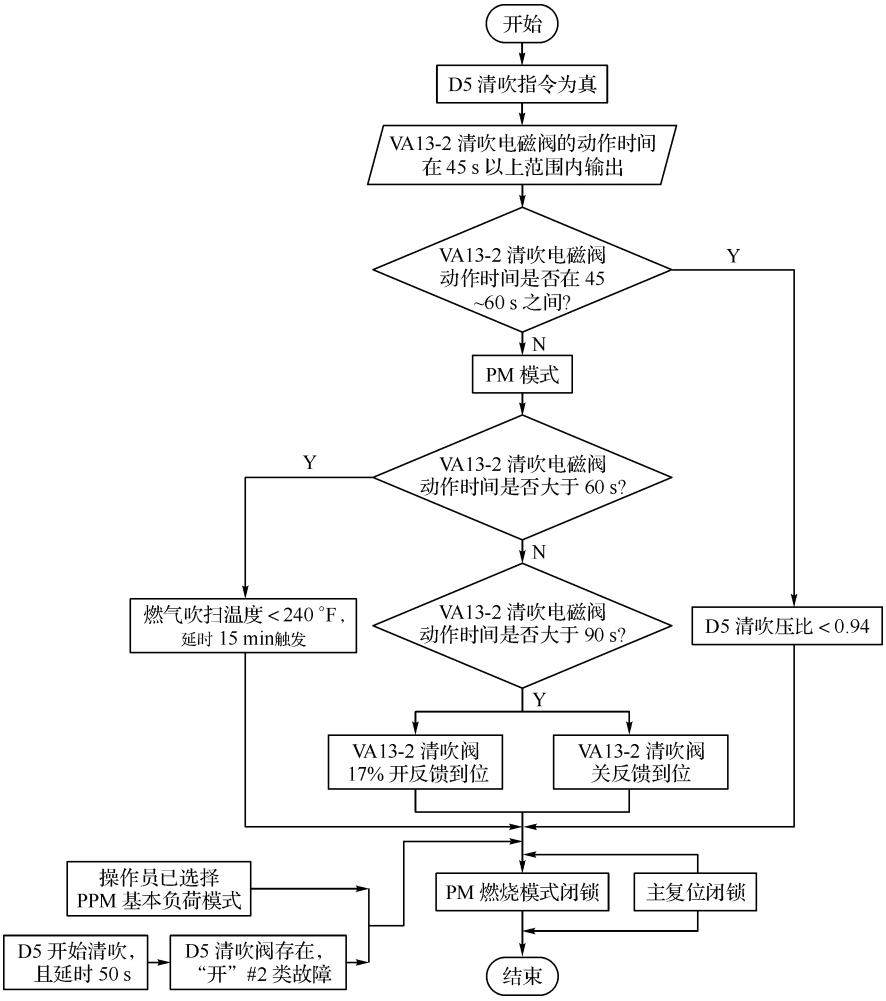

图 6　PM 燃烧模式闭锁

其中 D5 清吹压比的计算公式为:

$$\frac{C}{C+f_p} < K \tag{1}$$

式中:C 为压气机出口压力绝对值,Pa,由式(2)计算得到;f_p 为燃料气体歧管差压,Pa;K 为常数 0.94% 。

$$C = a_f + c_k + c_d \tag{2}$$

式中:a_f 为大气压力,Pa;c_k 为默认大气压力基准,Pa;c_d 为压气机排气压力,Pa。

4.2　自动停机

当机组运行在扩散燃烧模式下,以下条件任一满足,触发清吹系统故障导致机组自动停机,联锁逻辑流程图如图 7 示。

(1) D5 清吹指令消失且延时 8 s,D5 清吹阀存

在“关”#1 类故障,触发清吹系统故障(L93GPF = 1)为真,机组自动停机。

(2) PM4 清吹指令发出且延时 50 s,PM4 清吹阀存在“开”#1、#2 类故障,触发清吹系统故障(L93GPF = 1)为真,机组自动停机。

清吹系统故障自动停机后会自动闭锁,待故障消除后可由主控复位按钮(L83MR1 = 1)来解除闭锁。

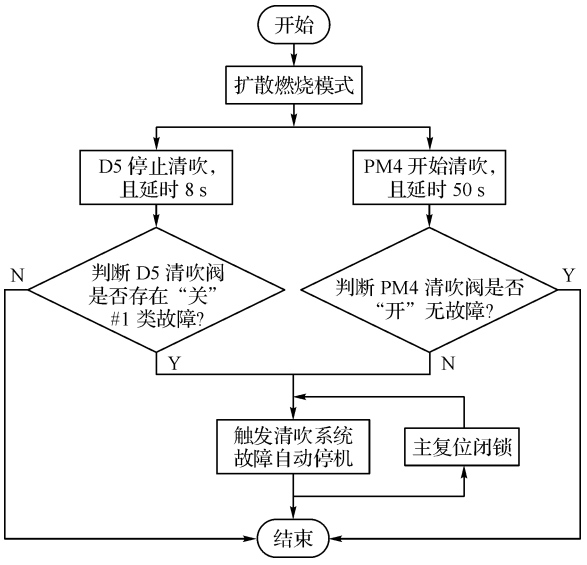

图 7 清吹系统自动停机联锁逻辑

4.3 保护跳机

4.3.1 点火前清吹系统故障保护

点火前清吹系统故障的保护联锁逻辑如表 4 所示,当机组转速达到清吹转速(TNH ≥ 14%),点火器未点火状态下,PM4 清吹指令发出,清吹计时开始后 50 s,PM4 清吹阀组“开”状态仍存在故障(LG3PFO_0 = 0),则点火前清吹系统故障(L4GPF_PI = 1)为“真”,触发保护动作跳机。

表 4 点火前清吹系统保护联锁

内容	信号名	触发条件	逻辑关系
点火前清吹系统保护			
① PM4 清吹阀组“开”存在故障	LG3PFO_0	0	与
② PM4 清吹指令发出,延时 50 s	L20PG3ONZ1	1	
③ 机组达到清吹转速(TNH ≥ 14%)	L14HM	1	
④ 无火	L28FD	0	

4.3.2 主保护

清吹系统故障的主保护联锁逻辑如图 8 所示。

(1) 对 D5 清吹阀组而言,当机组运行在任一燃烧模式下(扩散燃烧模式、SPPM 模式、PPM 模式、PM 模式),D5 停止清吹且延时达到 8 s,D5 清吹阀存在“关”#2、#3、#4 类故障,触发清吹系统故障(L4GPFT = 1)为真,主保护动作跳机。

(2) 对 PM4 清吹阀组而言,当机组运行在 PPM 模式或 PM 燃烧模式下,PM4 停止清吹且延时达到 8 s,PM4 清吹阀存在“关”#2、#3、#4 类故障,触发清吹系统故障(L4GPFT = 1)为真,主保护动作跳机。

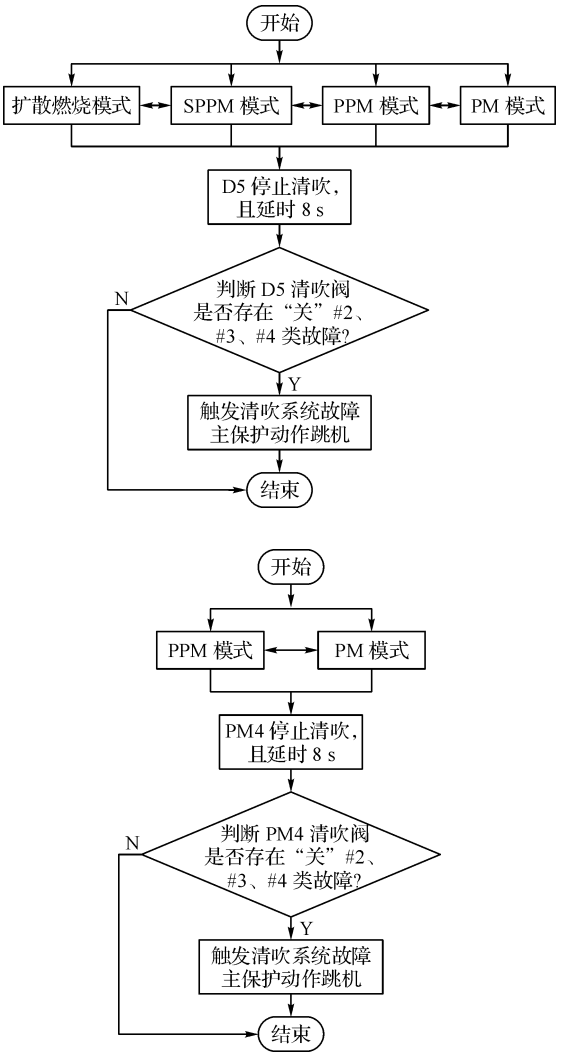

图8 清吹系统主保护联锁逻辑

5 结论

燃气轮机清吹系统的稳定运行是燃气轮机在带负荷过程中燃烧模式能够正常切换的前提,也是燃气轮机安全高效运行的保障。本文介绍了 9FA 燃气轮机清吹系统的组成及吹扫过程,对清吹系统的控制策略进行深入解析,定义清吹系统不同的故障类型,分别对燃烧模式闭锁、自动停机、保护跳闸等

控制逻辑进行了详细的阐述分析,对燃气轮机控制系统的全面国产化具有较为重要的实际参考价值和指导意义。

参考文献:

[1] 章素华,吴革新,章真,等. 燃气轮机发电机组控制系统[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
[2] 黄素华,荆迪,庄劼,等. 重型燃气轮机 DLN2.0 + 系统燃烧调整实践[J]. 中国电力,2018,51(04):96-100.
[3] 陈子静,王勇,朱能飞,等. 9E 燃气轮机燃料控制算法解析及应用研究[J]. 燃气轮机技术,2022,35(02):29-34.
[4] 林建业. 9FA 燃机清吹阀典型故障分析与处理[J]. 福建建材,2015(08):105-106.
[5] 马汇东. 燃气轮机空气清吹系统优化改造[J]. 宁夏工程技术,2021,20(02):183-188.
[6] 吉杰. 某电厂 9E 型燃气轮机燃料清吹系统故障处理[J]. 燃气轮机技术,2014,27(01):58-60.
[7] 赖仁满. 9E 燃气轮机回火原因分析及改进[J]. 燃气轮机技术,2018,31(03):63-67.

Analysis of 9FA Gas Turbine Purge System

Wu Xuechong[1], Gong Wenming[2], Zhou Shengyang[1]
(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Hangzhou 310030, China;
2. Jiangsu Huadian Qishuyan Power Generation Co., Jiangsu Changzhou 213011, China)

Abstract: Taking 9FA gas turbine as the research object, on the premise of fully mastering the composition and working mechanism of gas turbine purge system, the control logic was deeply analyzed. According to the limit switch of purge valve and the pressure switch between valves, 32 potential operating conditions of purge system can be arranged and combined, and their fault degrees were defined respectively, and the relevant fault type library was established. Further formulate corresponding preventive strategies according to the differences of combustion mode and fault degree in the actual operation of the unit. Through the effective analysis of the purge system control logic, mastering the logic realization mechanism of combustion mode locking, automatic shutdown, protection tripping, etc., it is helpful to find out the problems in the operation of the purge system as soon as possible, further improve the reliability of the operation of the gas turbine purge system, and escort the safe and stable operation of the unit.

Keywords: gas turbine; purge system; combustion mode transition; main protection