

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2021) 08-070-07 中图分类号: TP273

百万机组DEH系统首次伺服卡在线更换实践

On Line Replacement Practice of First Servo Card in DEH System of One Million Units

★陈华桩, 刘福东 (国能神福 (石狮) 发电有限公司, 福建 泉州 362700)

摘要: 本文针对国内大型燃煤火电机组、国产DCS与DEH一体化控制系统在额定工况下首次完成在线伺服卡更换的实践, 揭开了特殊方式下DEH快速控制系统软硬件相互紧密耦合的特性, 克服了伺服卡隐性故障排查和在线操作的高风险挑战, 总结出了一套安全有效的实施方案, 为解决高精端自动控制系统的维护难题提供范例。

关键词: 国产一体化; 伺服卡; 在线更换; 手动整定; 风险控制

Abstract: In this paper, for the domestic large-scale coal-fired thermal power units, domestic DCS and DEH integrated control system, it is the first time to complete the practice of online servo card replacement under rated working conditions. It reveals the characteristics of software and hardware coupling of DEH fast control system under special mode, overcomes the high-risk challenges of hidden fault diagnosis and online operation of servo card, and summarizes a set of safe and effective implementation scheme, which can provide reference for the future. This paper provides an example to solve the maintenance problem of high precision automatic control system.

Key words: Domestic integration; Servo card; Online replacement; Manual setting; Risk control

1 引言

国能神福 (石狮) 发电有限公司2×1050MW超超临界火力发电机组, DCS、DEH均采用和利时MACS V6.5.2版本的控制系统, 系国内首次在1000MW及以上超超临界机组上采用了同一个网络、同一个系统, 相同的系统架构及通信技术, 真正实现了国产DCS系统与DEH系统的一体化控制。控制系统设备层配套PROFIBUS-DP现场总线网络, 总线设备覆盖率达到60%以上, 是国内首个大规模使用国产现场总线设备的百万火电机组。

2 MSV2控制异常初步分析处理

2.1 DEH关联热力系统介绍

大型燃煤火电机组汽轮机发电机热力过程主要设备有凝汽器、给水泵、过热器、高压主汽阀、高压调节阀、汽轮机高压缸、再热器、再热主汽阀、再热调节阀、汽轮机中压缸、汽轮机低压缸等, 如图1所示。DEH通过以下阀门控制汽轮机的进汽量:

(1) 4个高压主汽阀: MSV1、MSV4为两位控制, MSV2、MSV3为连续控制 (用于启机时高压缸预暖进汽控制)。

(2) 4个高压调节阀: CV1~CV4为连续控制 (用于控制高压缸进汽量, 实现机组启动控转速、正常运行控负荷)。

(3) 2个中压主汽阀: RSV1、RSV2为两位控制。

(4) 2个中压调节阀: ICV1、ICV2为连续控制 (用于控制中压缸进汽量, 平时全开不节流, 仅在超速限制、保护动作时才起节流作用)。

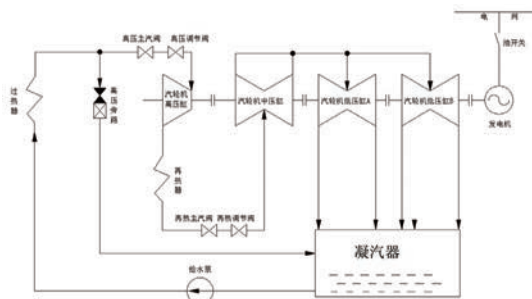


图1 汽轮机热力系统示意图

东汽N1050-26.25/600/600型汽轮机原设计采用高压缸启动、混合阀配汽方式。汽轮机刚启动时高压主汽阀、中压主汽门全开, 中压调节阀随阀位总指令逐渐开

启,再热器内此时无蒸汽,汽轮机未冲转,待高压调节阀开启后,汽轮机开始冲转。在升速及低负荷阶段,4个高压调节阀开度基本一致,汽轮机为全周进汽形式,对汽缸进行均匀加热。在高负荷阶段,高压调节阀CV4逐渐关小后,再重新开大,以提高机组的经济性,此种配汽方式就是混合阀配汽方式,如图2所示。

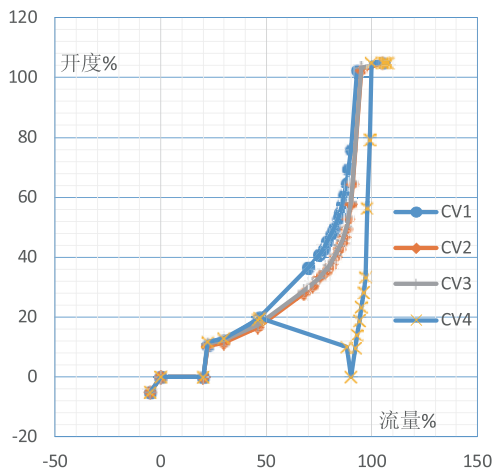


图2 混合阀配汽方式

国能神福（石狮）发电有限公司在国内率先实现百万级汽轮机由混合阀改顺序阀，如图3所示。在低负荷阶段，2个高压调节阀开度一致保持较大，或接近100%，另外两个高调门处于关闭状态，随着负荷进一步升高，阀位指令增大时，第三和第四个阀门陆续开启，全过程基本只有单一调门进行调节，极大减小了阀门的节流损失，实现中低负荷降低供电煤耗1.5~2.5克/千瓦时。

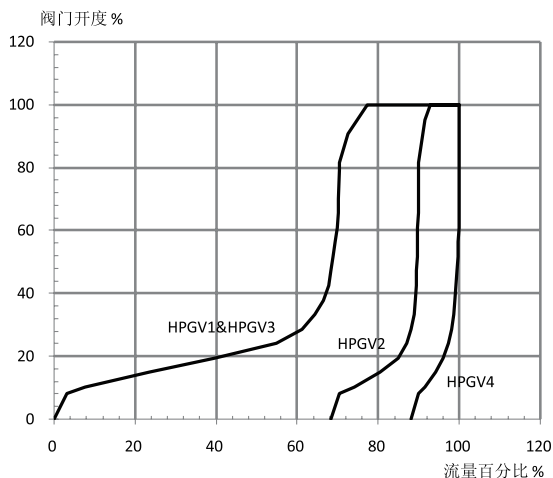


图3 顺序阀配汽方式

2.2 MSV2控制异常及初步分析

2020年12月22日, 09:58, 指令100%反馈

99.28%; 16:53:48指令100%, 开度由99.39%开始下降, 17:09:50下降至95.14%, 结合现象, 初步分析如下:

(1) 安全因素分析: 正常运行时, 主汽门阀芯全开顶死限位槽, 蒸汽无节流油动机无附带振动影响。当开度降至98.5%左右, 阀芯脱离全开限位槽, 蒸汽节流逐渐加大致使阀芯振动明显增大, 传递到油动机及其连接的EH压力油管路接头, 长期运行随时可能出现接头等薄弱部位喷油的情况, 直接造成机组停机事故。

(2) 伺服阀因素分析: 电液伺服阀由一个力矩马达、两级液压放大和机械反馈系统等组成, 如图4所示。第一级放大是由1个双喷嘴(喷油口)和1个单挡板(弹簧片)组成, 由挡板和喷嘴控制的油压通往第二级滑阀两端的端面上。第二级滑阀是四通滑阀结构(压力油进口、油出口、通油动机活塞下部、通油动机活塞上部), 当两侧产生压差时, 滑阀输出的流量与其油口的开度成正比。当力矩马达接收异常信号或线圈磁铁故障, 一级液压放大油路油质变差堵塞、动件卡涩, 二级液压放大油路滑阀及其通孔工作异常, 均可能造成油动机进油不足, 间歇性动作或不动, 控制指令改变, 反馈跟不上的现象。

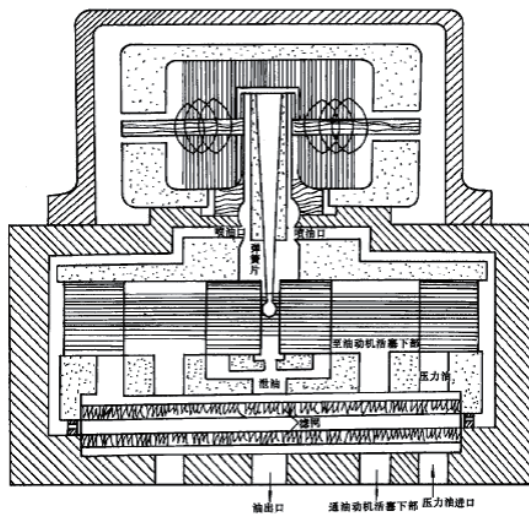


图4 电液伺服阀的工作原理

(3) 油动机因素分析: 检查发现油动机油缸有轻微渗油, 当油动机内预启阀密封面问题造成漏油量过大, 也可能出现保不住阀位的问题, 但无论是存在外漏还是内漏一般都是不可逆, 用手摸或红外测温仪检查2号高主门MSV2的EH回油管路与3号高主门MSV3回油管路油温无明显差别, 判断油动机因素可能性较小。

(4) 阀体卡涩因素分析：2020年12月24日，22:52:58指令100%，开度下降至93.32%。2020年12月25日，01:05:57将2号高压主汽门打检修位，人为给定由100%降为90%，开度对应由93.02%下降为84.22%。人为给定由90%再次上升为100%，开度由84.22%上升至93.17%，判断为非阀体机械卡涩引起。

(5) LVDT及回路因素分析：每一个LVDT需单独用一根屏蔽双绞6芯电缆，不可与其它信号或其它LVDT混用，将两个LVDT次级线圈串联，同名端相连，使两次级线圈感应电压相减，如图5所示。LVDT芯杆的正确安装位置，应使油动机在全关、全开的全行程均在LVDT的线性范围内。现场检查两个LVDT外观紧固无松动、铁芯无磨损无晃动，开度反馈与油动机机械行程一致，且开关操作反馈变化正确，因此LVDT回路故障为非要因。

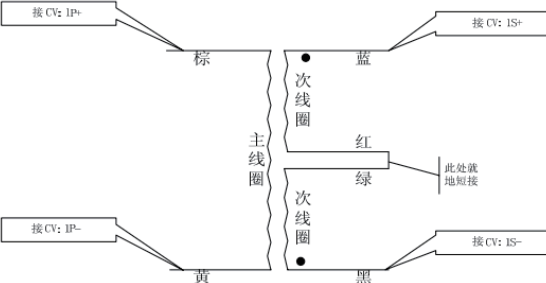


图5 LVDT接线原理示意

综合初步分析，结合设备特性及常见故障处理经验，可行性较大的是优先排查更换伺服阀。

2.3 MSV2控制异常初步处理

2020年12月25日，01:09:34将2号高压主汽门MSV2打“检修”位，以-10%的变化量缓慢给定至0%，开度至-1.67%，开始更换伺服阀。要保证检修作业安全高效地实施，需要事先进行全程风险点辨识，并制定完善的组织、安全、技术措施，保证负荷稳定、参数稳定，控制操作速率，进行有效隔离，具体措施要点如下：

- (1) 在CCS控制方式下减负荷至700MW以下。
- (2) 机组控制方式切至TF方式，稳定10分钟，记录推力轴承温度（尤其非工作面金属温度）及轴承回油温度、轴向位移、中、低压胀差、各轴瓦振动、轴承温度。
- (3) 将2号高压主汽阀MSV2油动机打维修开关，由运行人员下操作指令，热控人员执行将2号高压主汽阀以≤10%动作幅度，关闭至全关位置。
- (4) 运行人员加强EH油母管压力及油泵电流的

监视，事故预想高压主汽阀突关造成EH油压偏离额定值较大或EH油泵电流超限时处理措施。

(5) 机务人员就地严密监视油动机振动情况，并确认2号高压主汽阀MSV2全关到位后，运行人员关闭油动机进油滤网前、后手动门和旁路手动门运行许可工作票。

(6) 机务人员现场确认2号高压主汽阀MSV2全关到位以及油动机进油滤网前、后手动门隔离到位后，通知运行“发票”并立即执行3号高压主汽阀油动机伺服阀更换工作。

(7) 2号高压主汽阀MSV2油动机更换伺服阀工作完毕后，机务人员通知运行恢复措施，逐渐开启MSV3高压主汽阀供油滤网前、后手门，就地检查无漏油点。

(8) 机务人员“押回工作票”，交付运行人员通知热控人员操作以每次5%~10%的幅度开启MSV3高压主汽阀，开启过程中严密监视主机各瓦振动及轴承温度等参数变化情况，保持负荷稳定。

2020年12月25日，02:14:15伺服阀更换完毕，以+10%的变化量缓慢给定至100%，开度由-1.67%升至93.32%，反馈无明显上升，且与就地机械开度一致，将指令给定由100%升至110%，开度由93.32%上升至99.24，现场2号主汽门已不振动（开度降至98.7%左右能引起油动机震动），判断开度下降非伺服阀故障引起。02:49:36为保持2号高压主汽门的自动控制方式，将主汽门再次关闭后修改阀门配汽曲线，03:36:13配汽曲线修改完成，以+10%变化量打开后，使指令给定维持在105%，反馈维持在97.88%，现场振动仍较大，严重威胁EH压力油管路和油动机的安全运行。04:46:07指令强制由105%上升至110%，反馈由97.88%上升至98.94%，2号高压主汽门接近全开油动机不振动，观察运行，期间反馈在99.09%~98.50%之间波动，如图6所示。

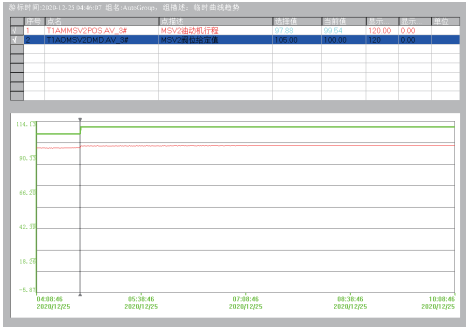


图6 MSV2指令强制给定110%

2020年12月26日，11:13:27，开度再次缓慢下降至98.03%，油动机振动明显威胁安全，将指令给定强制上升至115%，反馈随之上升至99.09%，如图7所示，2号高主门接近全开油动机不振动，观察运行。

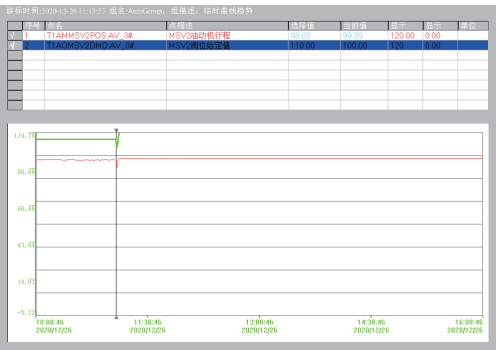


图7 MSV2指令强制给定115%

3 MSV2控制异常再分析

3.1 伺服卡SM461-SM3461简介

SM461是DEH伺服模块，仅与SM3461 DEH伺服I/O端子模块配套使用，如图8所示，构成完整的汽轮机DEH伺服单元。与就地的液压部套（伺服阀、油动机滑阀、油动机活塞、油动机行程反馈LVDT等）配合，组成给定电压与油动机行程的伺服随动系统，实现对油动机的控制。

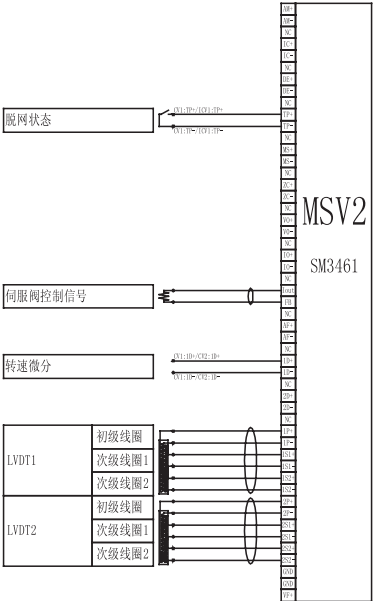


图8 SM3461伺服端子模块外部接线图

SM3461伺服端子模块内部设有9个调试电位器和6个调试测试孔，如图9所示。当需要对其进行设置时，须先将模块的盖板用力拨开，调试完毕后，再将盖板盖好扣紧。

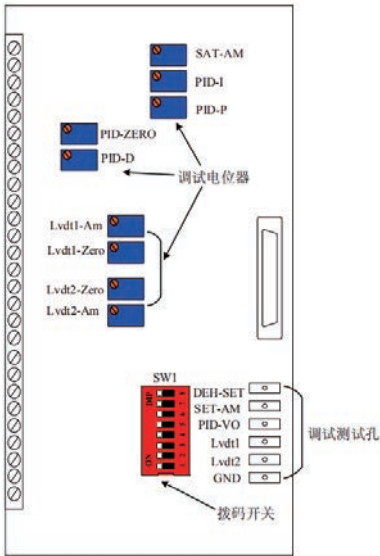


图9 SM3461模块器件分布图

3.2 伺服子卡SM3461跟踪监测

2020年12月27日，08:13:51，3号机2号高压主汽门MSV2伺服子卡SM3461在指令115%不变的情况下，反馈再次在99.24%~98.94%之间波动，伺服子卡SM3461的输出OUT与FB端子之间电压在0.992~0.839~0.137VDC之间波动，呈现缓慢下降变化，具体情况如表1所示。4.69VDC再往上到5.00VDC已经没有什么强制裕量，同时输出电压持续由0.992VDC下降到0.137VDC，呈相反方向变化，该强制增量不足以抵消该下降趋势。

表1 12月27日MSV2伺服子卡控制参数记录表

序号	测试时间	8:13	12:15	22:18
1	SET-AM,GND端子	4.69	4.69	4.69
2	LVDT1, GND端子	4.17	4.17	4.17
3	LVDT2, GND端子	4.30	4.30	4.30
4	OUT, FB端子 (VDC)	0.992	0.839	0.137
5	阀位给定 (%)	115	115	115
6	阀位反馈 (%)	99.24	99.10	98.94

比较同时时段3号机3号高压主汽门MSV3伺服子卡SM3461在指令100%不变的情况下，反馈几乎稳定在99.18%，输出OUT与FB端子之间电压稳定在

0.235VDC，如表2所示。因此可以确定问题来自伺服器卡SM3461或DEH控制系统上层。再结合图8、表1得知，3号机2号高压主汽门MSV2伺服器卡SM3461在指令不变的情况下，阀位给定电压DEH-SET及输出调幅后的阀位设定值SET-AM均准确稳定，亦可排除DEH控制系统上层的问题。

表2 12月27日MSV3伺服器卡控制参数记录表

序号	测试时间	8:13	12:15	22:18
1	SET-AM,GND端子	4.21	4.21	4.21
2	LVDT1,GND端子	4.11	4.11	4.11
3	LVDT2,GND端子	3.98	3.98	3.98
4	OUT, FB端子 (VDC)	0.233	0.239	0.235
5	阀位给定 (%)	100	100	100
6	阀位反馈 (%)	99.15	99.21	99.18

4 MSV2控制异常处理

2020年12月27日，23:17:52利用低负荷机会，将2号高压主汽门MSV2打“检修”位，按-5%的变化量缓慢给定至0%，开度至-1.97%，开始更换伺服板SM3461，更换全过程控制变化如图10所示。



图10 SM3461模块更换全过程控制效果变化

要保证检修作业安全高效地实施，需要事先进行全程风险点辨识，并制定完善的组织、安全、技术措施，保证负荷稳定、参数稳定，控制操作速率，进行有效隔离，具体措施要点如下：

- (1) 在CCS控制方式下减负荷至700MW以下。
- (2) 将2号高压主汽阀MSV2油动机打维修开关，由运行人员下操作指令，热控人员执行将2号高压主汽阀以≤5%动作幅度，关闭至全关位置，关闭过程中严密监视主机各瓦振动及轴承温度等参数变化情况，保持负荷稳定。

(3) 运行人员加强EH油母管压力及油泵电流的监视，事故预想高压主汽阀突关造成EH油压偏离额定值较大或EH油泵电流超限时处理措施。

(4) 机务人员就地严密监视油动机振动情况，并确认2号高压主汽阀MSV2全关到位后，运行人员关闭油动机进油滤网前、后手动门和旁路手动门运行许可工作票，热控人员进行2号高压主汽阀伺服卡检查更换工作。

(5) 伺服卡检查更换完毕后，运行检查各测点参数正常，恢复措施油动机进油，机务人员就地检查各部件渗油情况。

(6) 热控人员与机务人员对2号高压主汽阀MSV2进行阀位行程整定（动作幅度≤5%，手动整定），待2号高压主汽阀MSV2阀位行程整定合格后，将2号高压主汽阀以≤5%动作幅度开启至全开位保持，开启过程中严密监视主机各瓦振动及轴承温度等参数变化情况，保持负荷稳定。

4.1 SM3461更换风险分析

(1) 抗干扰、容错因素分析：DEH伺服模块SM461仅与伺服端子模块SM3461配套使用，构成完整的汽轮机DEH伺服单元，与普通AI、AO、DI、DO卡件相比，SM3461端子模块抗干扰能力弱，不支持带电插拔航空插头，需在SM461卡件从机笼中拔出失电后更换，且SM3461端子模块内设有28个跳线器、8个拨码开关、9个调试电位器、6个调试测试孔及49个外接端子，更换调试无容错能力，实施难度较大。

(2) 阀门整定因素分析：阀门自动整定逻辑如图11所示，只有在挂闸状态与转速小于100rpm且不在运行状态才能进行阀门自动整定，机组运行中更换完伺服端子模块后只能进行手动整定（进入阀门整定窗口，按亮“调零幅允许”，手动缓慢全开全关一次测出油动机零幅值后，先直接输入设定值，按亮相应“手动整定”按钮设定值输入系统），通过强制“运行”等信号进行阀门自动整定的，可直接触发“阀门整定转速超限停机”。



图11 阀门自动整定逻辑

(3) 联锁保护因素分析：油开关跳闸联关调门逻辑如图12所示。并网信号消失3取2后，分别送入单元机组调节型油动机伺服端子模块SM3461油开关跳闸TP+、TP-端子，在油开关跳闸信号刚闭合时，会使各油动机阀位自动给定0%并持续2秒。反之，在更换3号机2号高压主汽门MSV2伺服端子模块SM3461拆接线时，不小心将油开关跳闸TP+、TP-端子或引线短接在一起，将会使机组解列非停，因此拆接线螺丝刀、万用表笔、引线线头均必须用绝缘胶带包扎到接近头部，且拆接线逐根进行。

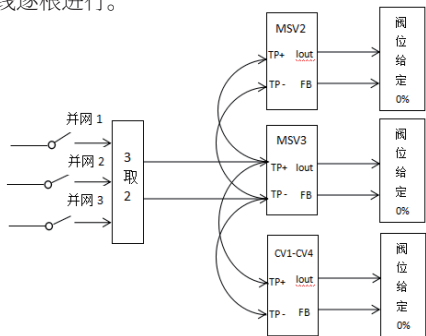


图12 油开关跳闸联关调门逻辑

4.2 SM3461更换拆接线步骤

根据SM3461更换风险分析结果，单独制定风险可控的SM3461更换拆接线具体步骤：

(1) 工具准备：拆线前将所用工具螺丝刀、万用表表笔等用绝缘胶带包扎到接近头部。

(2) 备件准备：拆线前准备两个出厂检验合格的伺服端子模块SM3461，并分别将模块内28个跳线器、8个拨码开关比照被替换的卡件进行设置，并检查设定正确，装于防静电里。准备一个出厂检验合格的伺服模块SM461，装于防静电里，以备不时之需。

(3) 带上防静电手环，从DEH控制柜机笼上取下3号机2号高压主汽门MSV2伺服端子模块SM461，取下与其对应的伺服端子模块SM3461航空插头。

(4) 相机拍下原接线方式后，用螺丝刀逐个拆下并包扎3号机2号高压主汽门MSV2的SM3461伺服端子模块外部接线，并采取防止任一线头对地和任二线头短路的措施。

(5) 从卡槽上拆下3号机2号高压主汽门MSV2的伺服端子模块SM3461，并采取防止同一卡槽相邻模块滑落的措施。

(6) 取出准备好的SM3461端子模块，打开盖子

再次核对模块内28个跳线器、8个拨码开关比照被替换的卡件进行设置正确后，将新模块装到原卡槽位置上，除油开关跳闸TP+、TP-端子外，逐一拆开线头上的绝缘胶带并接线，插上模块航空插头，带上防静电环，将3号机2号高压主汽门MSV2伺服端子模块SM461插入机笼对应位置。

(7) 对3号机2号高压主汽门MSV2油动机进行手动阀门整定，根据需要调整9个调试电位器，使动作速率及在6个调试测试孔上测量参数正常，并打维修开关手动缓慢全开关闭阀门，验证整定参数合适。

(8) 在3号机2号高压主汽门MSV2的伺服端子模块SM3461的油开关跳闸TP+、TP-端子上测量无输出闭合信号后，逐一拆开线头上的绝缘胶带并分别接线，盖上盖子并用螺丝固定好。

4.3 SM3461模块更换后控制效果

2020年12月28日，00:32:12伺服卡更换完毕后按在线手动整定步骤完成整定（调整SM3461放大倍数即伺服子卡上的PID-P电位器，使输出OUT与FB端子之间电压0.238VDC大约等于SET-AM与GND的电压4.21VDC减去LVDT1或LVDT2与GND的电压4.18VDC的差再乘以10倍），手动整定完成后进行一次开关操作，控制跟随良好，指令100%，反馈稳定在99.39%。2020年12月28日，01:02:00，2号高主门已全开，油动机不振动，机组安全稳定运行。如图13所示。

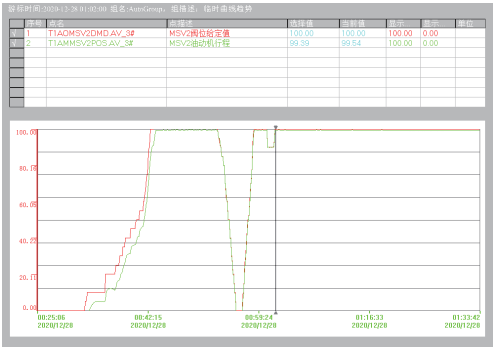


图13 SM3461模块更换后控制效果

5 SM3461伺服子卡检修

5.1 SM3461返厂检测

为准确判断故障原因，为设备检修维护提供准确依据，2020年12月28日，把更换下来的3号机2号高调

门MSV2故障伺服端子模块返厂检测。检查发现故障模块的钽电容C123器件炸裂,器件由容值22 μ F下降到7nF左右,本体已爆开,如图14所示。

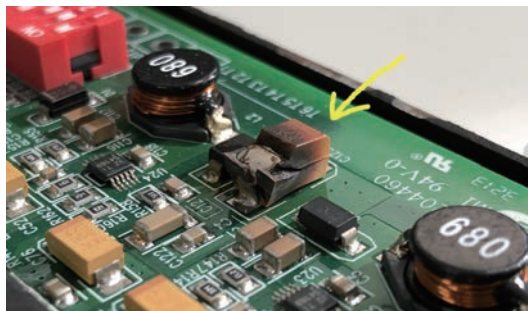


图14 SM3461模块故障部位

该电容的作用是在电源转换电路中作为储能电容,工作电压为15V,器件额定电压为35V降额50%以上,电源主要是给板上的13个运放、差动信号调节器、模拟开关供电,输出负载较轻,电容工作过程中没有大电流,不会是电流过大击穿。厂家统计近三年故障模块返修情况,除一个因腐蚀导致烧坏的,其它没有出现烧电容器件故障的,这说明应该不是器件批次质量问题或设计问题,是偶发器件单体随机故障导致。

5.2 日常维护管理

针对偶发性器件单体随机故障导致热控设备控制失效,应持续积累设备维护管理经验。对于DEH、TSI、ETS、DCS、给煤机控制器等重要电子板卡,出现一处故障按全部检查测试进行管控,出现两处故障按成批更换进行管控;对于电缆引线故障的缺陷,按相同环境、相同走向的电缆进行逐一排查,以此类推。将设备故障消灭在萌芽状态,实现安全长效机制管理,同时通过不断创新来改善现场环境,确保设备系统安全经济长周期运行。

5.3 产品研发思考

由3号机2号高压主汽门MSV2伺服子卡SM3461在线更换全过程可知,如果伺服子卡SM3461设置可将外置直流电压直接加至伺服阀的并联回路端子,对于正常运行保持全开就可以的主汽门就无需在线更换SM3461模块,如果不设置油开关跳闸触发持续2秒关所有调门的功能(汽轮机已有OPC保护、DEH超速、ETS超速、机械超速等),在线更换SM3461模块的风险大大降低,风险管控措施也能够得到简化,该思考可为模块产品研发提供改进方案。

6 结语

综上所述,百万机组DEH系统首次伺服卡在线更换实践,排查消除故障的高风险主要体现在:步骤多、操作不熟练与零失误要求之间的矛盾;设备抗干扰性能差与带电操作大概率出现偶发性问题的矛盾;系统复杂、功能强大与方式选择细节多、易出错之间的矛盾。百万机组DEH系统首次伺服卡在线更换的成功实践,在排除险情、规避机组非停的同时,为行业类似问题进行专业处理积累宝贵经验。 **AP**

作者简介:

陈华桩 (1977-),男,福建大田人,工程师,现就职于国能神福(石狮)发电有限公司,从事总线系统、DCS系统、功能安全等电厂自动化控制系统技术与应用相关工作。

刘福东 (1982-),男,福建泉州人,工程师,学士,现就职于国能神福(石狮)发电有限公司,从事火电厂汽轮机及相关电力技术应用等工作。

参考文献:

- [1] 白志刚. 自动调节系统解析与PID整定[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 王建国, 孙灵芳, 张利辉. 电厂热力过程自动控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 上海新华控制技术(集团)有限公司. 电站汽轮机数字式电液控制系统-DEH[Z]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [4] 张雨飞. 超超临界火电机组热工控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [5] NB/T 25093-2018, 核电厂汽轮机数字电液控制系统调试导则[S].
- [6] 肖增弘, 徐丰. 汽轮机数字式电液调节系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [7] 降爱琴, 郝秀芳. 数字电液调节与旁路控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [8] 王爽心, 葛晓霞. 汽轮机数字电液控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.