灭磁模块损坏引发同步电机启动失败案例分析

齐 斌 王 峰
安钢股份有限公司 河南 安阳 455004

摘 要：本文针对同步电机一启启动失败案例展开研究。该电机为GE公司12000KW无刷励磁同步电动机，采用自耦变压器降压启动方式，其励磁系统对电机同步运行至关重要。该电机三次启动均因励磁柜“滑差保护”动作失败。通过分析同步电机滑差保护、灭磁电路及GE公司同步电机励磁电路工作原理，结合启动时无功功率未由负转正的现象，判断故障源于励磁系统灭磁电路。经检测发现MR-3模块损坏，导致灭磁电阻未及时短接，励磁电流大多消耗在灭磁电阻上，励磁绕组能量不足。更换MR-3模块后，电机启动正常。此次故障处理为设备维护积累了经验，有助于提升设备运行可靠性。

关键词：同步电机；启动失败；滑差保护；灭磁电路；MR-3模块

前言

该制氧机组空透电机采用GE公司生产的12000KW无刷励磁同步电动机，为透平空气压缩机提供动力驱动。启动方式为自耦变压器降压启动，由励磁柜、励磁发电机、整流盘等部件组成的励磁系统给同步电机提供励磁电流，达到同步运行的目的。空透电机驱动空压机将空气加压至工艺所需压力和气量，为后续的气体分离流程奠定基础；作为空分系统的起始环节和动力基础，它无法正常运行将导致整个空分系统瘫痪。

1 故障经过及现象

该制氧机组空透电机运行中突然停车，高压柜综保显示“励磁柜故障”，随即查看励磁柜上报警信息，发现励磁柜失电，励磁柜恢复送电后，第一次启动空压机，断路器投切正常，励磁电流投入正常，励磁柜显示“滑差保护”动作，启动失败；现场初步分析，怀疑是电网侧电压偏低，造成电机启动转矩不足，滑差偏大导致保护动作。30分钟后联系动调将该段系统电压调至10.5KV以上，第二次启动空压机，励磁柜显示“滑差保护”动作，启动失败；检查励磁柜各项参数正常后，1个小时后再次启动空压机，结果还是失败，原因与前两次相同。

三次启动过程高压一次设备动作正常，没有过流、过压保护动作记录；励磁电源可以输出励磁电流，电流数值有上升过程，但机组始终无法进入同步状态。通过拍摄的视频，读取励磁柜PLC内部过程数据，捕捉到一个核心异常特征：电机异步启动阶段无功功率为负值，符合异步启动吸收电网无功的特征，转速上升至投励转速1470 r/min、励磁电流投入之后，无功功率一直维持负值区间，始终无法由负转正。该现象是后续锁定故障方向的重要线索[1]。

2 同步电机相关工作原理分析

2.1 同步电机滑差保护原理

同步电机的滑差是电机转子实际转速与同步转速之间的转速差值，是大型同步电动机一项重要专属保护功能，保护装置实时采集转子转速信号，将实际转速与同步转速做运算得到滑差数值，和保护内部预设动作阈值持续对比。电机启动过程中，允许存在一定范围滑差，在投励之后，电机应当快速把滑差降低到保护允许范围以内[2]；如果投入励磁之后，转子不能够被快速牵入同步，滑差持续大于设定保护阈值，保护装置判定电机处于失步异常工况，输出跳闸指令，断开电机电源，实现设备保护。

如果电机长期处于较大滑差下异步运行，转子笼型启动绕组、转子铁芯会承受交变磁场反复作用，会产生很大涡流，造成转子部件快速过热烧损，严重情况下会损坏励磁绕组绝缘，引发转子接地、短路重大事故。滑差保护就是为规避这类损伤设置，当滑差长时间超标，直接切断电机电源，保护电机本体。

2.2 灭磁电路的工作原理

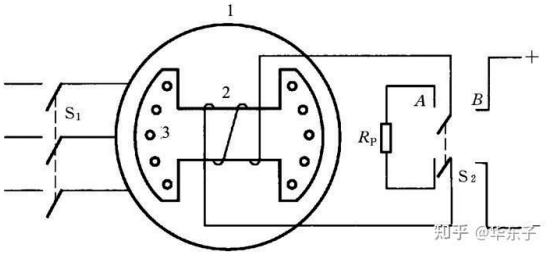


图1 同步电动机异步启动控制电路

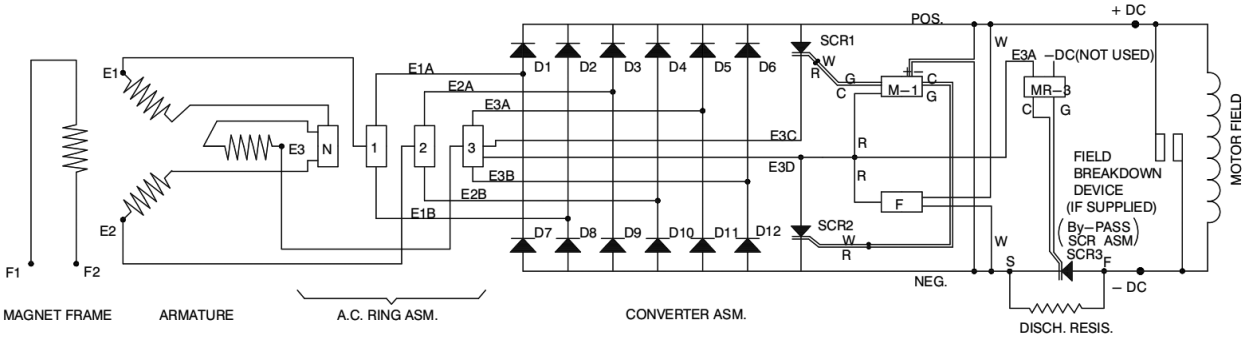
1—同步电动机；2—励磁绕组；3—笼形启动绕组；RP—灭磁电阻

同步电动机异步启动工况下，转子励磁绕组不能直接开路，也不允许直接短路，否则都会对转子励磁绕造成损伤[3]。为解决上述矛盾，同步电机异步启动阶段，需要让励磁绕组串联灭磁电阻，构成闭合回路。通过对灭磁电阻阻值设计选型，既可以把励磁绕组感应电压限制在安全区间，又可以限制回路感应电流幅值，保护转子励磁绕组安全。

如图1同步电动机异步启动控制电路所示：电机启动时刻，开关S2切换到A位置，灭磁电阻Rp串入转子励磁绕组回路形成闭合回路；闭合定子电源开关S1，定子通入三相交流电建立旋转磁场，依靠转子笼型启动绕组作用，电机以异步模式升速。随着转子转速不断接近同步转速，转子和定子磁场相对速度减小，励磁绕组感应电压逐步降低。当转子转速上升到亚同步转速，完成投励条件触发，开关S2快速切换至B位置，将灭磁电阻切除断开，向转子励磁绕组通入直流励磁电流。依靠定、转子磁场电磁吸引力产生同步转矩，将转子牵入同步转速，电机进入正常同步运行状态。

灭磁电阻仅仅是异步启动过程的保护元件，电机进入同步运行之后，灭磁电阻必须可靠退出回路。若完成投励之后灭磁电阻依旧留在励磁回路当中，励磁电源输出能量就会在灭磁电阻和励磁绕组之间分配，因为灭磁电阻阻值远大于励磁绕组电阻，绝大部分功率会消耗在灭磁电阻上，励磁绕组获得励磁功率严重不足，磁场建立不足，电机无法建立足够同步转矩，就不能完成牵入同步。这是本次故障重要理论基础。

2.3 GE公司同步电机励磁电路工作原理



该制氧机组空透电机配套GE原厂无刷励磁系统，励磁发电机和主电机转子同轴布置，励磁发电机输出交流电源，经过旋转整流盘整流变换为直流，供给主电机转子励磁绕组。整套灭磁控制回路包含M1触发模块、晶闸管SCR1、SCR2、旁路晶闸管SCR3、MR3模块、灭磁电阻DISCH RESIS等元器件，完整工作流程分为异步启动阶段、投励切换阶段两个过程。

（1）异步启动阶段 电机定子送电开始异步启动，此时励磁主回路直流励磁电流尚未投入。定子旋转磁场切割转子励磁绕组，励磁绕组两端产生交变感应电压。感应电压传递至M1触发模块，模块内部配置对应电压等级压敏电阻；当感应电压达到压敏电阻导通阈值，压敏电阻动作导通，触发晶闸管SCR1、SCR2导通。转子励磁绕组、导通的SCR1/SCR2、灭磁电阻DISCH RESIS形成闭合放电回路，将励磁绕组感应能量释放，限制感应过电压，实现启动过程转子保护。随着转子转速不断抬升，转差率持续下降，励磁绕组感应电压幅值逐步降低。

（2）投励切换阶段 当励磁柜转速检测单元采集转子转速达到设定投励转速1470 r/min，系统发出投励指令，励磁发电机E1、E2、E3侧输出交流励磁电源。励磁电源施加在SCR1、SCR2两端，在交流电源一个周期之内，晶闸管承受反向电压，SCR1、SCR2被强制关断。与此同时MR3模块采集励磁发电机E3电压信号，MR3模块内部逻辑触发旁路晶闸管SCR3导通，SCR3导通之后直接并联在灭磁电阻两端，灭磁电阻被SCR3旁路短接，完成灭磁电阻切除。励磁发电机输出交流电，通过旋转整流盘整流成直流，全部输送到转子励磁绕组，建立转子主磁场，依靠电磁转矩把电机牵入同步转速，电机完成整个启动流程。

从工作逻辑可以看出：MR3模块承担检测励磁电源电压、输出触发信号驱动SCR3旁路晶闸管导通的任务，是实现灭磁电阻短接切除的关键控制单元。MR3模块一旦失效，SCR3无法收到触发信号，就不能导通，灭磁电阻就无法被旁路，投励完成之后灭磁电阻依旧串联在励磁回路之中，直接造成励磁能量损耗。

3 故障分析与现场排查

同步电机启动过程无功功率变化具备明确规律。异步启动阶段，电机本质相当于一台异步电动机，需要从

电网吸收大量感性无功，用来建立定子旋转磁场，此时电机无功功率显示为负值。随着转子转速不断上升，转差率减小，电机需要吸收无功数值逐步下降。当励磁系统投入励磁电流，转子建立励磁磁场，如果励磁能量充足，电机成功牵入同步，同步电机将会向电网输出感性无功，无功功率数据会由负值转变为正值，这是同步电机成功进入同步运行的标志性现象。

读取故障启动过程PLC实时记录：电机启动之后，无功功率由负最大值逐步回落；转速到达1470 r/min投励点，励磁系统输出励磁电流，励磁电流数值快速上升，但是无功功率始终保持负值，不能向正值切换。励磁电流有输出，但是无法实现无功功率换向，说明转子磁场建立效果严重不足。

结合电路原理推导：如果励磁主回路输出正常，但灭磁电阻没有被及时短接切除，励磁回路同时存在灭磁电阻和励磁绕组两个负载。设备原始参数灭磁电阻阻值是励磁绕组直流电阻510倍，按照串联电路功率分配规律，电源输出绝大部分电能消耗在灭磁电阻发热上，分配给励磁绕组励磁功率大幅衰减，转子无法建立足够强度磁场，同步转矩不足，转子转速无法拉入同步区间，滑差持续超限，励磁柜滑差保护动作跳闸。综合以上现象，初步判定故障点位于励磁灭磁切换回路。

确定故障大致范围在灭磁回路之后，外观检查灭磁回路全部器件，检查M1模块、MR3模块、SCR1、SCR2、SCR3晶闸管，灭磁电阻本体，检查有无烧黑、鼓包、元器件炸裂、接线端子过热变色松动，外观检查没有发现明显损坏痕迹；

检测MR3模块电气特性：测量MR3模块E3A端子到SCR1(G)门极之间电阻参数。设备手册给出MR3模块正常电气特征：E3A接负极时，E3ASCR1(G)之间电阻应为无穷大；E3A接正极时，回路电阻约5000Ω。现场实测E3A到SCR1(G)正反两个方向电阻全部为无穷大。该测量结果说明MR3模块内部电路已经开路损坏，无法完成电压检测，也不能输出触发信号驱动旁路晶闸管SCR3导通。MR3模块损坏，是本次故障根本原因。

确认MR3模块损坏之后，拆卸故障MR3模块，核对新模块型号版本，确认与原备件型号完全一致，完成新模块安装接线，并用热熔胶固化接线，防止整流盘高速旋转过程中接线脱落。完成模块更换工作检查无误，空压机正常启动。

4 结束语

本次该制氧机组空透电机启动失败故障，根因是励磁灭磁回路MR3模块内部损坏，导致投励之后灭磁电阻不能被旁路切除，励磁能量大量消耗在灭磁电阻，转子励磁绕组励磁功率不足，无法建立足够同步转矩，电机不能牵入同步，滑差保护动作跳闸。通过准确分析同步电机灭磁电路工作机理，抓住“励磁投入无功功率无法由负转正”这一核心现象，准确定位故障元器件，完成模块更换，设备恢复正常运行。

参考文献

[1]李金原. 高压同步电动机连续软起动失败故障的分析 [J].电世界,2013,54(07):32-33.

[2]汤蕴璆. 电机学 [M].5 版.北京.机械工业出版社,2014.

[3]李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用 [M].北京.中国电力出版社,2017.