

[励磁系统]

一起同步电动机旋转励磁系统故障处理与分析

文/张银东 孙洪旭 崔健 高超 杜建明
中国石油锦州石化公司

首先概述静态励磁柜及旋转励磁单元的工作原理，说明无刷励磁系统两单元配合方式。然后，根据介绍一起无刷励磁同步电动机失励故障，根据故障现象逐点排查，并处理故障，恢复同步机运行。

在石油化工企业，临氢装置压缩机多由同步电动机拖动。同步电动机异常运行、波动或跳闸均可能使得装置严重波动，甚至引起装置非计划停工。同步机励磁系统作为同步电动机核心控制单元，可分为静态励磁系统及旋转励磁系统（也称动态励磁系统）。在石化企业，受防爆环境所限，旋转励磁单元多采用无刷励磁方式。无刷励磁系统与有刷励磁相比较，在旋转励磁系统增加发电机及整流单元，省略电刷，使得励磁单元供电方式更加复杂，故障率也随之增加。

无刷同步电动机工作原理

1. 静态励磁系统

WLK-03SC型静态励磁装置原理如图1所示。其电源取自400 V低压回路，单电源供给总空气开关，经ZLB变压器降压（变压器一次电压等级为380 V，二次电压等级依据主电动机转子电压而定），经由主控板控制通断的接触器LC，通过熔断器为三相半控整流桥供电，三相半控桥输出电压加在旋转励磁机定子线圈上，由于此整流桥负载为阻感性负载，当电压过零点后电感续流作用，输出电压为连续波形，直到下一次触发为止。输出直流电压计算公式为

$$U_d = 2.34U_m \cos \alpha \quad (1)$$

式中， U_m 为变压器二次侧相电压有效值； α 为触发角。

电流传感器用于检测输出电流中谐波分量，判断旋转整流器的工作状态，并对旋转整流器内故障进行初步判断。WLK-03SC型静态励磁机主电源为单电源供电，控制回路采用双电源供电方式。其中，一路电源取自400 V主电源，作为控制回路主电源；另一路由直流电源供电，作为控制回路备用电源。一旦主电源故障，可以平滑切换至备用电源，并及时发出报警信息。且备用电源停电后，CPU只发出报警信息，无跳闸命令，对控制回路的供电更加可靠。

2. 旋转励磁系统

旋转整流器原理图如图2所示。交流励磁机工作期间，发出稳定三相交流电源，交流电源经三相半控整流桥整流加在主电动机转子两端。WLK-03B型旋转整流器部分采用三相半控整流桥，在实际工作期间，三相晶闸管全部触发，工作在全角导通状态，任一时刻有且仅有一支晶闸管和一支二极管导通，输出波形示意图如图3所示。在起动阶段，同步电动机异步起动，在起动及停机期间励磁线圈内感应电荷，通过灭磁电阻RF消耗掉。灭磁电阻采用6个单元模块，每个模块电阻阻值为0.4 Ω ，合计2.4 Ω 。

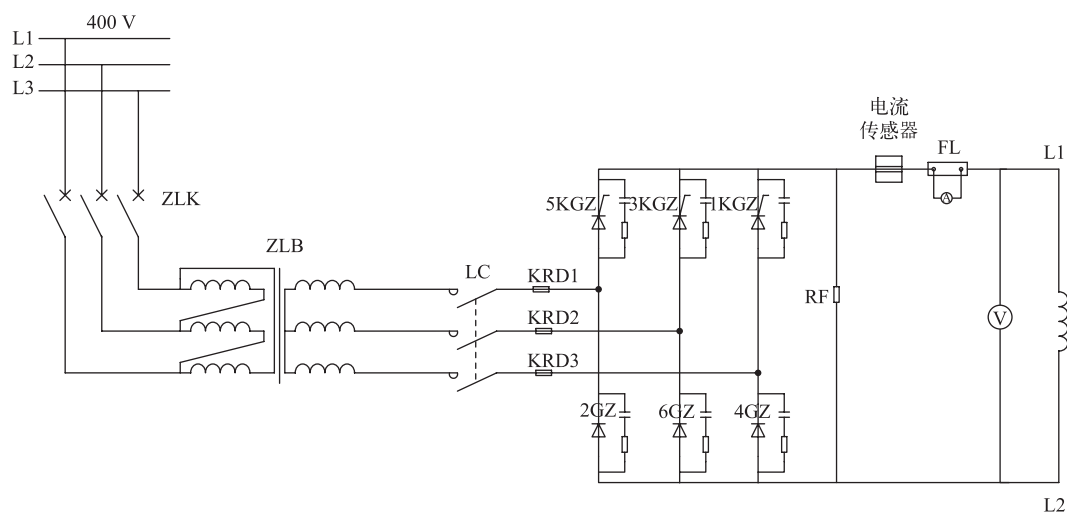


图1 静态励磁机主回路原理图

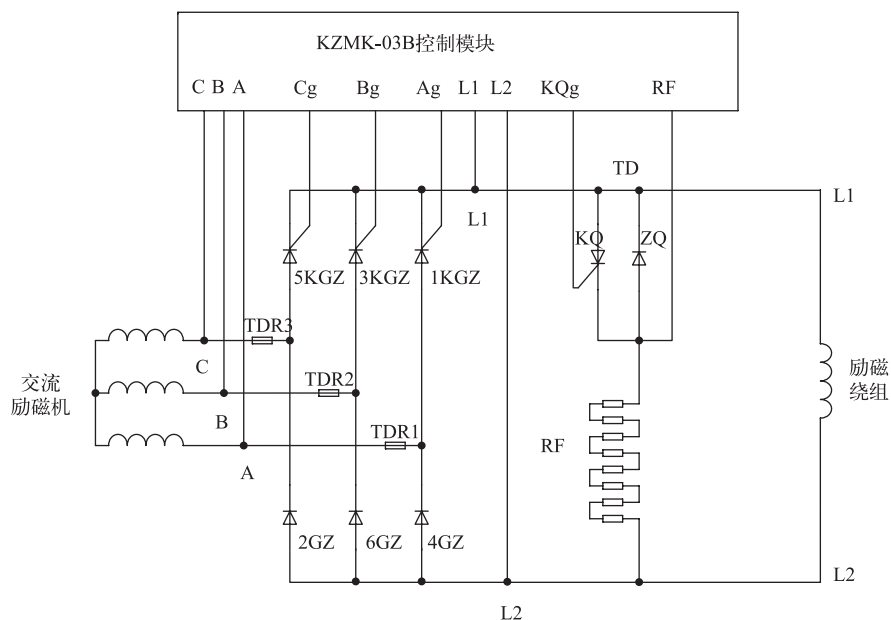


图2 旋转整流器主回路原理图

同步电动机起动期间，在励磁线圈内感应出交流励磁电压。电动机起动时，电动机滑差为100%，励磁线圈内感应较大交流电压，随着转子转速逐渐升高，滑差逐渐降低，绕组内产生的交流电压周期逐渐增大，幅值逐渐减小。交流电压波形示意图如图3所示。

当励磁电流方向自线圈L1流向L2时，即正向电压时，三相半控整流桥未触发，电流经RF自二极管ZQ构成闭合回路；当励磁电流方向自线圈L2流向L1时，晶闸管阳极和阴极所加电压正向，此时控制模块给晶闸管门极和阴极一正向触发脉冲，晶闸管

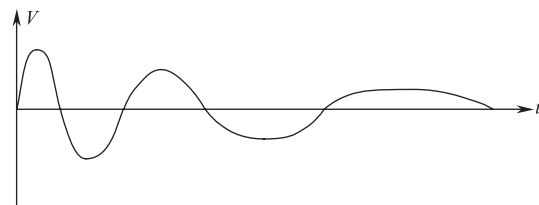


图3 电动机起动期间励磁绕组内电压波形示意图

导通，电流经KQ流向RF构成闭合回路。控制模块施加在KQ的触发脉冲如图4所示（取L1至L2感应电动势方向为正向）。

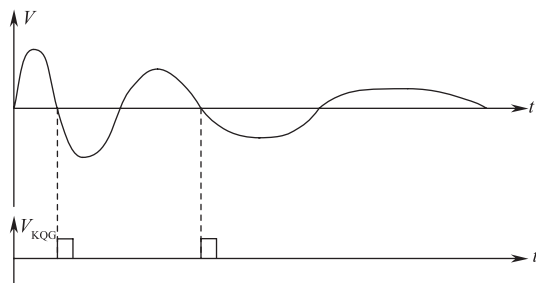


图4 起机期间晶闸管脉冲波形

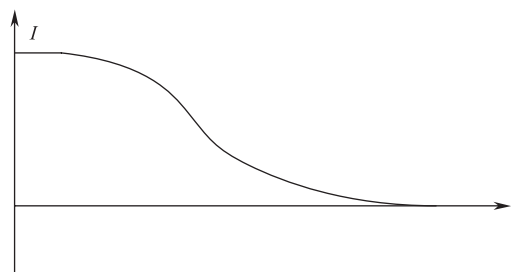


图5 停机后励磁绕组内电流波形示意图

在同步机正常运行期间，励磁绕组中通入直流电流恒定。停机之后，由于励磁线圈自感作用，半控整流桥回路关闭，电流经灭磁电阻RF、灭磁模块ZQ续流，励磁绕组内感性能被灭磁电阻消耗。励磁绕组电流如图5所示。

3. 同步电动机励磁系统

如图6所示为同步机励磁系统总图，由静态励磁系统、发电机单元、旋转整流器、励磁绕组和定子绕组组成。

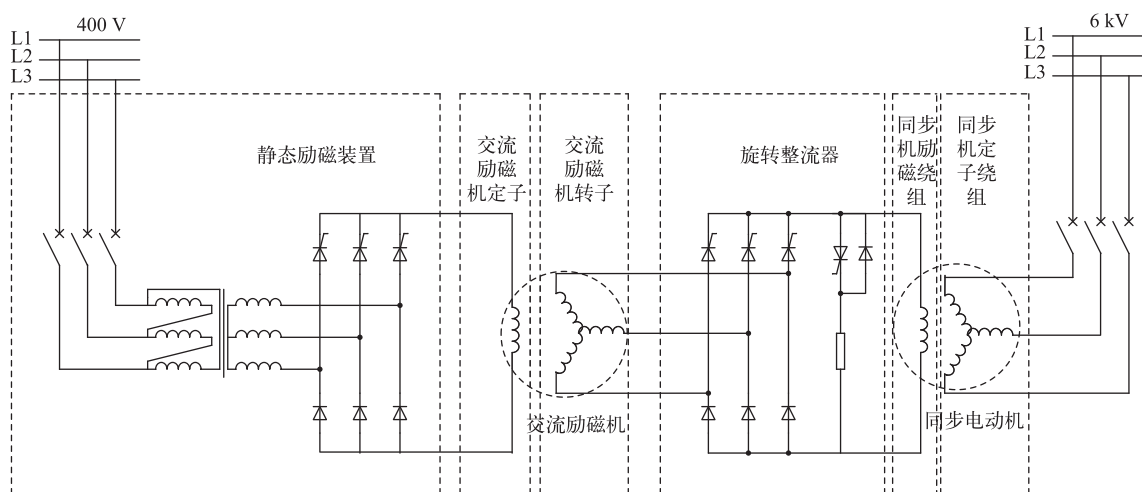


图6 无刷同步电动机励磁系统构造图

设备概况

加氢改质C1002C新氢压缩机基本参数：电动机型号TAW3100-18/2 600 W，额定功率3 100 kW，额定电流347.1 A，由佳木斯电机厂2014年生产。

同步电动机静态励磁柜采用恒励磁电流控制，旋转励磁单元选用WLK-03B型，具有滑差投励及即时投励功能。控制原理图见图7。灭磁电阻安装在电动机腔体内，固定在转子上。旋转励磁机到腔体由3根电缆连接，分别是连接到正汇流排的励磁绕组电缆①、连接到负汇流排的励磁绕组电缆②（在电动机腔体内与灭磁电阻一端短接）、连接到启动模块的灭磁电阻另一端电缆③。三根电缆经旋转励磁机经电动机空心轴连接到励磁绕组或灭磁模

块上。

故障描述

2021年12月30日21:15，加氢改质运行人员在加氢改质压缩机厂房巡检时，发现C1002C主电动机操作柱电流表指针波动，严重过负荷，达到600 A（额定电流347.1 A），同时电力调度发现该机过负荷报警。电气值班接到生产电话赶到配电间检查，发现C1002C高压柜综合保护失步报警灯亮，励磁柜定子电流表指针波动，但无报警信息，励磁电流及励磁电压均正常，定子电流最大值为600 A，功率因数严重滞后。22:22，C1002B起机，C1002C停机。

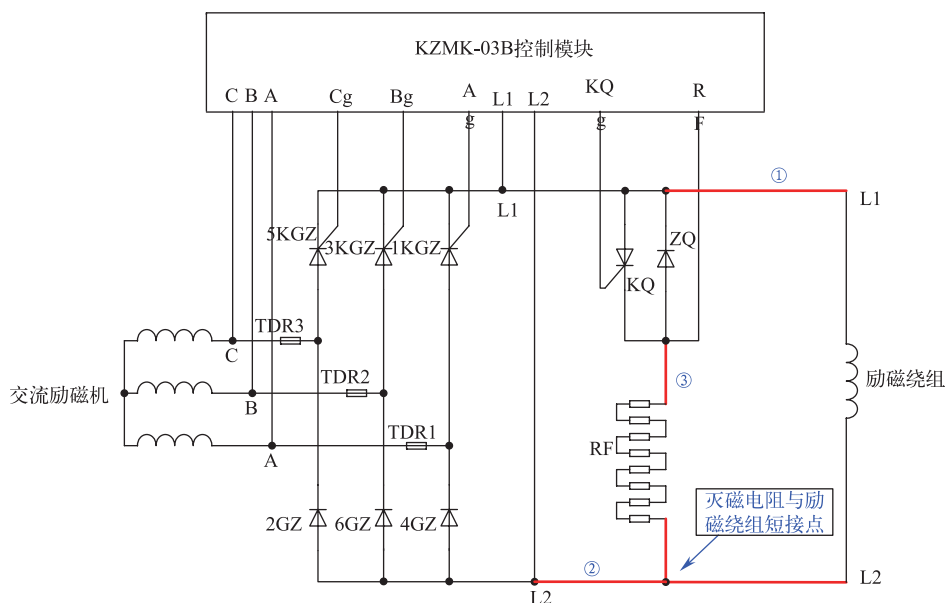


图7 旋转励磁单元

处理过程

考虑静态励磁柜无报警，励磁电流及励磁电压均输出正常，可初步判断旋转励磁单元异常。电气人员打开旋转励磁机端盖，检查旋转整流盘，三相半控桥内晶闸管及二极管均正常，但检测到启动单元的晶闸管KQ导通，可判断故障期间灭磁电阻投用。

测试旋转整流盘至励磁绕组段电缆对地绝缘电阻，阻值为50 MΩ。万用表测试励磁绕组两端阻值为0 Ω，双臂电桥测试励磁绕组阻值变化较大，无法精确测量。测试旋转整流盘内灭磁电阻阻值，阻值变化较大，从0~2 Ω连续波动。怀疑电动机腔体内部有故障。打开电动机旋转励磁侧端盖，灭磁电阻外观正常。在电动机腔体内，拆解空心轴引出三根电缆，在电动机腔体内测试励磁绕组直流电阻为0.305 Ω，灭磁电阻阻值为2.4 Ω。摇测电动机空心轴段连接线缆，对地绝缘电阻40 MΩ，励磁绕组两根电缆之间绝缘电阻为0，可初步判断空心轴段电缆绝缘受损。将电缆从空心轴内抽出，发现①电缆及②电缆绝缘层击穿黏连。空心轴内有大量积碳，同时连接到灭磁电阻的电缆（图7中③电缆）绝缘层也受到不同程度损伤。

更换转子绕组至旋转励磁负盘引线电缆（1 000 V、95 mm²），将三根电缆塑封，两端压接铜接线端子，同时对轴腔内壁进行打磨、新风吹扫，并将电缆与轴腔内壁间用蜡布绝缘隔离。重新对旋

转整流盘模块做模拟投励及灭磁试验，均正常。

举一反三

电动机空心轴长度约1.6 m，随着同步机转动，三根电缆在轴内部摩擦、碰撞、高温环境造成绝缘老化。解决方案有三点：①可通过增加三根电缆绝缘层厚度，降低老化速度，延长使用时间；②在电缆外部增加一层护套，彻底消除三根电缆间的摩擦碰撞，使得使用寿命进一步延长；③在空心轴内填充绝缘物，防止电缆与轴内壁摩擦碰撞，造成对地绝缘层击穿放电。

励磁绕组电缆短接，故障点较隐蔽，在不拆解连接线缆时，无法通过绝缘电阻进行检测。因此通过测试晶闸管二极管伏安特性、绝缘电阻测试方法无法发现排查本故障。在后续检修期间，应通过三相调压器模拟同步机投励及灭磁过程，示波器观察波形，实现启动、投励和灭磁全过程跟踪。

结束语

无刷同步电动机在石化行业压缩机应用非常广泛，励磁系统可靠稳定运行装置可靠稳定运行的重中之重。同步机旋转励磁系统绝缘电阻测试、晶闸管伏安特性测试应每年检修一次，投励模式试验具备条件应每个检修周期测试一次。EA

（收稿日期：2024-10-19）