

[燃机机组]

燃机SFC系统调试研究与方法讨论

文/中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东电力试验研究院 张俊雄

静止变频器（SFC）系统是燃机联合循环机组快速起动的核心模块，不同厂家SFC系统的设计方式和结构存在差异。本文介绍SFC系统的结构和调试中的部分关键环节，并比较不同类型SFC系统调试方法的不同和调试侧重点的差异，为今后燃机机组SFC系统调试提供参考。

近年来，随着大型燃气轮机及燃气—蒸汽联合循环发电技术的日益普及，用于拖动燃机机组的静止变频器（Static Frequency Converter, SFC）系统得到普遍应用。SFC系统的主要功能是提供电磁转矩用于拖动燃气轮机转子加速，是实现燃机快速起动的核心模块。SFC系统有三个作用，分别对应于燃机的三种起动模式。

1) 直起模式（Direct Mode）。在低盘转速基础上，SFC系统拖动发电机转子加速至点火转速；燃机点火后，SFC系统继续提供电磁转矩，配合天然气燃烧产生的机械力矩，拖动转子加速至可自保持转速。

2) 水洗模式（Wash Mode）。SFC系统将燃机拖动至水洗转速，对压机叶片进行离线水洗，以清理燃机运行一段时间后叶片积累的灰垢，提高压机效率。

3) 吹扫模式（Purge Mode）。SFC系统将燃

机拖动至吹扫转速，并周期性的升降转速，对燃机排气管道和余热锅炉的通流部分进行吹扫，以防止再次点火时残存气体引起天然气爆燃。

目前国内应用较为普遍的SFC系统有南瑞继保PCS-9575型、南瑞科技NES-5900型、GE LS2100型、ABB MEGADRIVE型和西门子SIMOVERT S型等。不同厂家的SFC系统在冷却方式、通信协议和拓扑结构等方面配置不同，因此调试工作的侧重点也不同。结合几次SFC系统的调试经验，本文总结了不同SFC系统调试的部分关键环节，指出存在的困难及注意事项，以助于SFC系统调试。

SFC系统结构和组成

典型的SFC系统构成如图1所示。以静止变频器为核心，配套输入断路器、隔离变压器、滤波器（可选）和输出切换开关等设备，构成SFC系统。

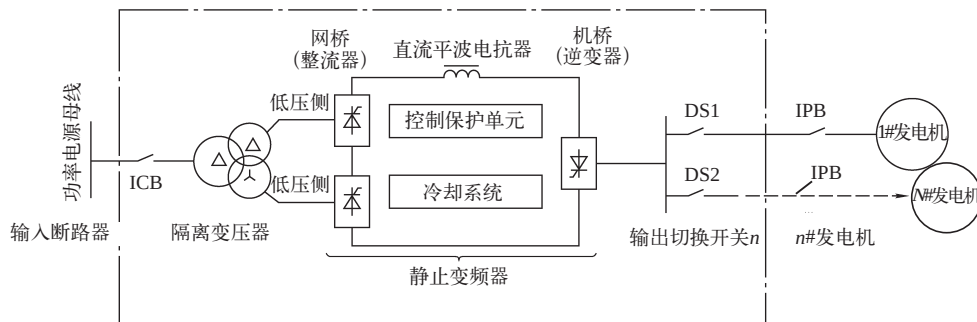


图1 典型的12-6脉动SFC系统拓扑结构

SFC系统包括以下部分:

1) 输入断路器(ICB)。具备开断正常电流和短路电流的能力,用于控制隔离变压器投退。在机组启动结束或拖动过程发生故障时,应首先断开ICB以切断SFC功率电源。

2) 输出切换刀开关(DS)。不具备分合电流的能力,只用于在拖动多个发电机时进行电流通路选择。为保证安全,每种工况下相应的DS刀开关之间应具备一定的闭锁逻辑。

3) 隔离变压器。用于给静止变频器提供交流电源。根据不同厂家SFC的特性,隔离变的参数有时会有较大差异。隔离变高压侧电压一般取自高压厂用电源,当采用12脉动双整流桥时,低压侧有两个绕组,连接组别为Dd0y11,通过低压侧连接组别的不同来降低谐波对厂用电的影响。

4) 静止变频器。由网桥(整流)、机桥(逆变)和直流平波电抗器组成的交-直-交变频器,是SFC系统的核心功率部件。控制单元检测电机转子位置或机端电压信息,控制变频器以逐渐升高的频率交替向发电机定子绕组某两相通入电流,以产生超前于转子磁场的定子旋转磁场。通过定子磁场与转子磁场的相互作用,生成加速力矩拖动发电机转子加速到指定转速。该部分也包括功率模块的冷却系统及控制保护单元等。

SFC系统调试关键环节

1. 冷却系统调试

冷却系统分为空冷和水冷两种类型。空冷系统在功率柜内形成密闭风道,利用功率柜底部或顶部风机的旋转实现散热。水冷系统在功率器件外部装设水循环管道形成固定的循环水路径,利用水泵带动闭式冷却水流经冷却器实现散热。

空冷系统调试相对简单。风机上电后,检查以下内容:

- 1) 风机起停逻辑和转向正确。
- 2) 风机切换或电源切换逻辑符合设计。
- 3) 风道内无异物,风道无积灰,风道通畅。
- 4) 风道挡板开度到位且对应的行程继电器输出满足要求。

水冷系统调试相对复杂,一般按照以下步骤开展:

- 1) 现场设备组装后,查看是否存在管路变形、焊接部位是否焊接完备。
- 2) 给水泵电动机上电,分别观察主、备用水

泵转向是否正确,如反转需调整电源相序。

3) 检查水管路是否有漏点。向补水箱内加入除盐剂并充满整个冷却管路,开泵循环,以去除管路中的气泡。储水完成后记录储水桶的液位,静置一段时间(如24 h)后观察液位是否降低,如液位不降低说明无漏点。

4) 排除漏点后,持续开泵循环冲刷管路,间隔一段时间更换新制除盐剂,直到肉眼观察排水阀排出的水无污质或颗粒物,且水质透明无杂色为止。

5) 装入活性炭滤芯,继续定期换水循环冲刷管路。此时,更换的除盐剂需为去离子后制成的高纯水。每循环24 h,查看电阻率测试仪上显示的循环水电阻率。直至电阻率升至 $1\text{ M}\Omega/\text{cm}$ 以上时,即可装入厂家配备的去离子器。

6) 不再换水,继续开泵循环,直至电阻率升至 $1.5\text{ M}\Omega/\text{cm}$ 。

7) 检测功率柜内各晶闸管的对地绝缘电阻,阻值须 $>200\text{ k}\Omega$ 。

水冷系统调试中需要注意以下几点:

1) 确保管路安装符合设计,管路无变形、无漏点。

2) 确保管道内的杂质和锈迹已被冲刷得足够干净,能保证长期水循环不会产生更多杂质。

3) 确保最终状态下循环水的电阻率满足设计要求,以保证晶闸管组件的绝缘性能满足要求。

2. 通信规约及信号逻辑梳理

SFC系统调试涉及SFC系统与励磁系统、汽轮机控制系统(Turbine Control System, TCS)之间的配合,系统间的通信规约及信号逻辑需合理匹配,否则SFC无法正常启动。

对于成套配置的燃机机组,如LS2100型SFC、EX2100型励磁系统及MARK-VI型TCS,三者均由GE公司生产,其相互间通过光纤通信,且通信规约已非常成熟,通信和信号的梳理主要由GE厂家完成。且由于GE公司技术封锁,调试单位通常也很难介入到核心模块中。

而某些燃机机组的SFC、励磁和TCS分别由不同厂家供货,且几家供货商为首次合作。此时,为降低通信的技术门槛,通常会采用硬接线通信;且燃机厂家为保障机组启动时的安全性,燃机启动时的顺控逻辑会做得相对复杂。此时,不同系统对于各种交互信号的定义是否一致、相互之间能否协调配合就会至关重要,成为发电机电

否顺利拖动的决定因素。一般而言，在设备联络会上各厂商的设计人员会确认每个指令和反馈所代表的含义和信号类型（长信号/脉冲信号/等待态信号）等，并达成一致。若在设计阶段此项工作未开展到位，就会把问题遗留至调试阶段。

例如：某2×400 MW燃机联合循环机组，采用意大利安萨尔多（Ansaldo）AE94.3A型燃机，TCS采用ABB SYMPHONY。此项目为安萨尔多

（Ansaldo）燃机与南瑞继保PCS-9575 SFC、南瑞电控NES6100励磁在国内的首次配合，三者间的通信由硬接线实现。由于设计阶段三方沟通不充分，遗留下多处问题，给后续调试工作带来一定困难。

该项目中，TCS、SFC及励磁系统间的交互信号列表见下表（仅列举与SFC拖动相关的交互信号和指令）。

表 TCS与SFC系统间的交互信号

FROM	TO	Signal type	Signal name	Explanation
SFC	TCS1/2	DO	SFC is OFF	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC is Ready	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC is ON	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC Common Trip	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	Direct Mode is selected	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	Purge Mode is selected	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	Wash Mode is selected	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	2100 rpm reached	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC operation is ON	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC operation is OFF	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC is Ready for Operation	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC is selected by TCS1	1 = Active
SFC	TCS1/2	DO	SFC is selected by TCS2	1 = Active
TCS1/2	SFC	DI	SFC ON/OFF CMD	1 = ON / 0 = OFF
TCS1/2	SFC	DI	Select Direct Mode	1 = Direct, 1s pulse
TCS1/2	SFC	DI	Select Purge Mode	1 = Purge, 1s pulse
TCS1/2	SFC	DI	Select Wash Mode	1 = Wash, 1s pulse
TCS1/2	SFC	DI	Select SFC CMD	1 = Reset, 1s pulse
TCS1/2	SFC	DI	SFC Operation ON/OFF CMD	1 = ON / 0 = OFF
EXC	TCS	DO	EXC is ready	1 = Active
EXC	TCS	DO	EXC is ON	1 = Active
EXC	TCS	DO	EXC selected by SFC	1 = Active
EXC	TCS	DO	Fault field flashing	1 = Active
EXC	TCS	DO	Fied circuit breaker is ON	1 = Active
EXC	TCS	DO	Fied circuit breaker is OFF	1 = Active
TCS	EXC	DI	Exc. ON CMD	1 = Active / 1s pulse
TCS	EXC	DI	Exc. OFF CMD	1 = Active / 1s pulse

由上表可见，三个系统间的交互逻辑设计得较为复杂，存在多达几十个指令/反馈信号，每个信号的含义、类型均需要仔细商讨确认。此外，由于TCS使用英文名称，SFC和励磁系统中使用中文名称，不同厂家理解存在差别，导致机组多次起动失败。举例如下。

（1）励磁系统送入TCS的“EXC is ON”信号

励磁系统将之设计成等待态，定义为：当励磁系统上电、灭磁开关和起动变压器低压侧开关合闸、励磁系统无报警时该信号置1；一旦励磁系统开始整流时，该信号置0，同时“Exc. is in operation”信号置1。在励磁系统设计中，“EXC is ON”信号表示装置已上电，具备正常触发脉冲的条件，但是并未发脉冲；“Exc. is in operation”才表示正在发脉冲进行整流励磁。然

而，在ABB TCS顺控逻辑中，“EXC is ON”为SFC运行的必要条件，在励磁系统上电后及机组拖动过程中需要一直存在，需设计为长保持信号。一旦此信号置0则TCS开出至SFC的“SFC ON/OFF CMD”立刻置0，导致起动失败。经协商，最终由励磁厂家更改逻辑解决问题，更改后该信号相当于更改前“EXC is ON”和“Exc. is in operation”的“与”。

（2）机组拖动过程中发电机接地刀开关位置问题

ABB TCS逻辑中原本设计为，开出“SFC ON CMD”（启动SFC）命令的条件之一是发电机中性点接地刀开关必须在合闸位。发电机正常运行时，一般定子中性点会经高阻抗变压器接地。SFC的整流器出线侧和逆变器进线侧之间是直流回路。发电机在起动过程中，如果发电机中性点接

地刀开关在合位，一旦SFC直流回路或发电机定子回路发生接地故障，会有非常大的故障电流流过接地变压器，由于接地变压器容量较小，很可能在极短时间内被烧毁。后删除该条件，并增加逻辑“转速达到47.5 Hz时自动合中性点地刀”。转速达到47.5 Hz时，发电机已达到自持转速，此时SFC已退出且机组未并网，是合中性点地刀的最佳时间。增加自动合中性点地刀逻辑，减少了运行人员的工作量，也保障了机组的安全。

从以上分析可见，对于SFC、励磁和TCS由不同厂家供货且为第一次配套的情况下，调试中对于交互信号的梳理显得尤为关键。遇到启动失败时，需要仔细分析各装置的报文、录波文件，理顺各交互信号的时序关系，找出问题信号。通过专业分析会，组织各设备厂家的设计人员对问题信号的理解与设计思路开展交流，最终确定逻辑修改方案。通过多次的试拖动，找出TCS拖动顺控中每一个步骤存在的问题，最终完成所有信号的梳理确认。

此外，对于“2拖2”型SFC系统，在交叉拖动前还须确认TCS逻辑中分合输出切换刀开关的每个开出指令是否正确，防止错合刀开关引起的误送电。

3. 输出切换刀开关连锁逻辑确认

对于存在交叉拖动的SFC系统，机桥的输出三相交流电要准确通入目标发电机定子绕组，是通过输出切换刀开关的不同分合状态组合完成的，这些刀闸之间存在闭锁逻辑。逻辑的实现一般有两种方式：一是通过TCS软件判断，用正确的刀开关位置作为启动SFC的条件之一；二是通过在刀开关的硬件操作回路中，串入相应闭锁刀开关的辅助接点实现。

一种切换刀开关形式如图2所示，刀开关的闭锁逻辑用TCS软件判断实现。当1# SFC拖动1#发电机时，将“MBM01合位&MBM03分位&MBM04分位&MBM1合位”作为SFC启动条件之一；当1 #SFC拖动2#发电机时，将“MBM01分位&MBM03合位&MBM02分位&MBM2合位”作为SFC启动条件之一。

另一种切换刀开关的隔离开关和接地刀开关之间的相互闭锁逻辑，通过在隔离开关的控制回路中串入相应刀开关的辅助接点实现相互闭锁。此时，需要对每一个闭锁接点进行实际传动验证，如传动结果与设计不一致，需检查内部配线是否正确。

4. 功率桥触发试验

SFC装置的网桥和机桥均通过触发脉冲导通晶

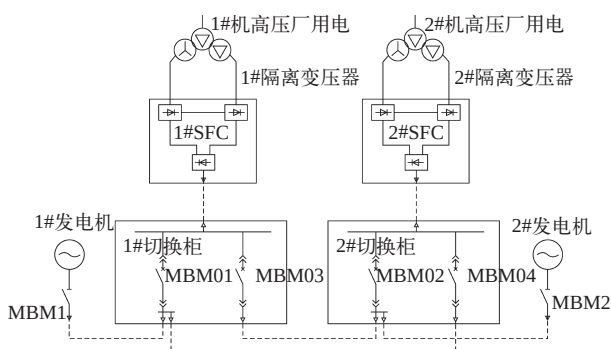


图2 一种“2拖2”切换刀开关实现形式

管元件实现整流和逆变功能，功率桥触发试验的目的是验证触发脉冲正常、晶闸管元件导通正常。

对于具备小电流试验功能的SFC系统，可直接开展小电流试验。厂用50 Hz，AC 380 V接入功率桥交流侧，直流侧接入大功率线性电阻作为负载，投入控制器装置“开环试验”功能，用示波器观察直流侧输出电压波形。

有些SFC（如GE LS2100）的整流桥不具备小电流试验功能，要求开展晶闸管门触发测试（SCR Gate Test）。此时需要配备与示波器匹配的电流测试探头，用探头测试触发电路产生的触发电压和通过晶闸管门级的电流，以判断晶闸管特性是否正常。GE LS2100型LCI晶闸管门触发测试波形如图3所示。

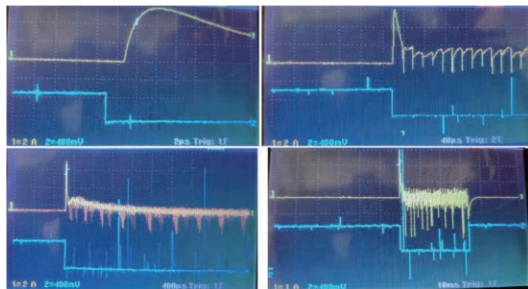


图3 LS2100e型LCI门触发测试实际波形

结束语

本文介绍了SFC的组成，总结了SFC系统调试中的若干关键环节，并比较了不同类型和配置的SFC系统调试方法的不同和调试侧重点的差异。随着国内燃气发电机组的普及，SFC系统调试工作也日益增多，有必要对SFC系统及其调试技术进行深入研究，通过不断总结，提升燃机SFC系统的调试水平。EA

（收稿日期：2020.08.17）

（编辑：朱金凤）