

文章编号 : 0258-0926(2016)05-0105-06; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0105

TMSR-SF1 保护系统 T3 定期试验方案设计与探讨

刘珍宝^{1,2}, 后 接¹, 刘桂民¹

1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要 :基于钍基熔盐固态试验堆(TMSR-SF1)保护系统的特点,结合法规要求、试验需求,分析 TMSR-SF1 保护系统定期试验的原理和范围。概括介绍 TMSR-SF1 保护系统 T3 定期试验平台,重点介绍 T3 定期试验的方案,进而根据相关法规要求,详细论证保护系统 T3 定期试验方案的可行性和正确性。

关键词 :保护系统;定期试验;T3 试验

中图分类号 :TL362 **文献标志码** :A

Design and Implementation of T3 Periodic Test for Reactor Protection System of TMSR-SF1

Liu Zhenbao^{1,2}, Hou Jie¹, Liu Guimin¹

1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: This paper introduces the scope and principle for periodic tests of TMSR-SF1 RPS based on the characteristics of RPS and the regulatory requirements and test demands, and describes the T3 platform of TMSR-SF1 RPS and highlights the design of T3 Periodic Test. Furthermore, the correctness of RPS T3 test is demonstrated according to the relevant legal requirements.

Key words: Reactor protection system, Periodic test, T3 test

0 引言

中国科学院战略先导项目——钍基熔盐固态试验堆(TMSR-SF1)保护系统分为紧急停堆系统(RTS)和专设安全设施驱动系统(ESFAS)。TMSR-SF1 保护系统采用 3 重冗余设计以满足单一故障准则,提高系统可靠性。现场信号通过传感器分别传至保护系统 A、B、C 序列机柜;信号经采集、调理运算后与整定值进行比较,产生的开关量信号进入不同序列的逻辑处理单元进行 3 取 2(部分 2 取 1)符合逻辑处理;表决产生的紧急停电信号分别输出到对应的停堆断路器,专设安全设施的驱动信号通过优选表决后输出到对应的

专设驱动装置。

相对于传统的模拟系统,TMSR-SF1 保护系统采用基于现场可编程门阵列(FPGA)的纯硬件数字化处理技术,不存在定值漂移和功能退化等问题,同时具有强大的自诊断能力。但根据法规要求,自诊断功能不能完全代替定期试验。如果存在自检功能识别范围之外的其他故障模式,必须证明这些故障不会影响设备的安全功能,否则必须按照标准设计该部分的定期试验,探测设备的运行状态是否处在规定的限制之内,以确保系统的可用性^[1-2]。

反应堆保护系统定期试验一般分为 3 大类:

收稿日期:2015-11-30;修回日期:2016-03-20

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010300)

作者简介:刘珍宝(1986—),男,现从事反应堆保护系统研制与测试研究

T1 试验、T2 试验、T3 试验。T1 试验是保护系统测量仪表通道试验，范围是从传感器到信号采集及处理单元。T2 试验是为了对执行安全功能的主控模块进行逻辑测试，以确认可能的所有输入与预期输出结果相符；范围是从信号采集到表决逻辑处理之后，主要实现保护逻辑功能试验。T3 试验是输出信号及相关驱动器的试验；范围从表决逻辑之后到执行机构驱动部件；主要实现专设驱动器成组试验、优选模块输出闭锁试验、输出至外部系统的信号连接试验、停堆断路器试验、停堆换料期间手动按钮触发反应堆紧急停堆的试验、停堆换料期间多样性反应堆紧急停堆的试验、响应时间的定期试验等^[3-9]。目前，对于 T3 试验的方案设计进行详细描述较少，有必要对保护系统 T3 试验方案进行探讨^[5-6]。本文结合 TMSR-SF1 保护系统的特点和应用情况，从法规要求、试验需求、系统特点等角度研究设计了 T3 试验的平台，进而重点介绍 T3 试验的方案设计并论述了方案的可行性和正确性。

1 T3 试验平台设计

根据国际电工委员会 (IEC) 标准 IEC 60671-2007 4.2.6 节的要求，测试装置定义为比被测系统低一个级别。因此，设计的 T3 试验平台 (TD) 属于非安全级，但采用与保护系统不同的硬件与软件，避免对保护系统安全级设备产生影响，平台本身也不受保护系统自身故障的影响。TD 主要由 NI 公司的 PXI 平台及其上位机编程软件 LabVIEW 以及光电隔离接口模块组成^[7] (图 1)。试验时通过通讯线缆 (CC) 将 PXI 平台与 TMSR-SF1 保护系统连接为一个网络。该网络首

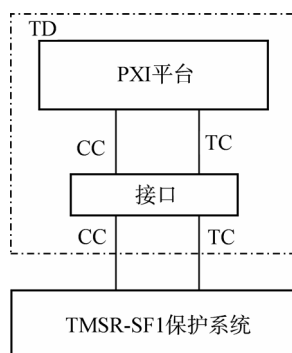


图 1 T3 试验平台及保护系统连接示意图

Fig. 1 Sketch of Connections between T3 Test Platform and Reactor Protection System

要任务是使 TD 可以访问保护系统的 FPGA 模块以向其发送和读取试验数据；其次是通过 LabVIEW 人-机界面控制 T3 试验程序的开始、暂停、结束、恢复等操作，并判定试验结果。试验时通过测试电缆 (TC) 将 TD 模拟的试验数据注入给被试验的保护通道^[8]。

2 T3 试验方案设计

2.1 停堆断路器试验

停堆断路器试验是 TMSR-SF1 停堆断路器的功能性试验，此外，它还包括对保护系统输出接口和保护系统与停堆断路器之间硬接线连接和硬件逻辑的功能性验证。试验中，在主控制室设计了相应的报警及状态反馈指示，给操作员提供足够的信息知悉停堆断路器的试验状态；设计了闭锁停堆断路器的手段，试验后使停堆断路器恢复到初始状态，防止试验的误动作给整个停堆断路器组带来的影响。设计了闭锁开关，保证一次试验只能试验一个保护通道 (RTS) 对应的一组停堆断路器。在完成一个保护通道控制的停堆断路器试验后，再对其他保护通道控制的停堆断路器依次进行试验 (图 2)。

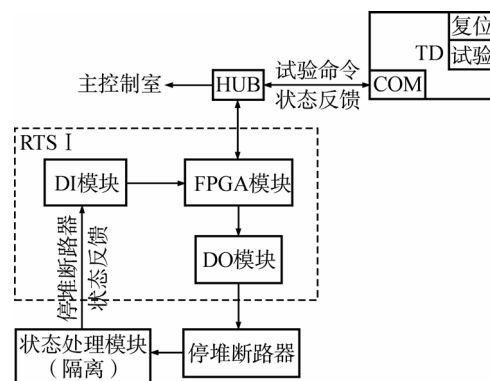


图 2 停堆断路器定期试验原理图

Fig. 2 Periodic Test Scheme of Reactor Trip Breaker

首先，在停堆断路器试验启动之前，将被试验的停堆断路器对应的保护通道旁通，防止对应的保护通道产生停堆误动作信号。随后，操作 TD 通过 COM 口发出测试命令，停堆断路器对应的保护通道接收命令后执行停堆动作，停堆断路器通过状态处理模块将反馈动作结果返回至保护通道。最终保护通道通过串口服务器 (HUB) 将反馈信息传递给 TD 及主控制室显示，TD 通过输出状态信息和反馈信息的一致性判断停堆断路器是

否正常动作。试验完成后，通过 TD 恢复按键，使保护通道恢复正常输出，并且执行恢复动作使停堆断路器恢复正常。

2.2 停堆换料期间手动按钮触发 TMSR-SF1 紧急停堆的试验

停堆换料期间手动按钮触发 TMSR-SF1 紧急停堆的试验是在每个停堆换料期间，直接通过手动控制操作台盘 (ECP) 上的紧急停堆按钮触发。首先，通过 TD 发出试验命令，操作 ECP 进行停堆控制动作。随后，停堆断路器通过状态处理模块将反馈动作结果返回至保护通道，保护通道将反馈信息传递给 TD 及主控制室。试验完成后，通过 TD 恢复按键，使保护通道恢复正常输出，并且执行恢复动作使停堆断路器恢复正常。

2.3 停堆换料期间多样性 TMSR-SF1 紧急停堆试验

停堆换料期间多样性 TMSR-SF1 紧急停堆的试验在每个停堆换料期间，通过操作位于 TD 上的落棒试验开关使控制棒真正地下落。这一试验通过将停堆命令送到棒控棒位系统切断控制棒驱动机构电源从而引起控制棒下落来检查多样性的停堆功能 (图 3)。

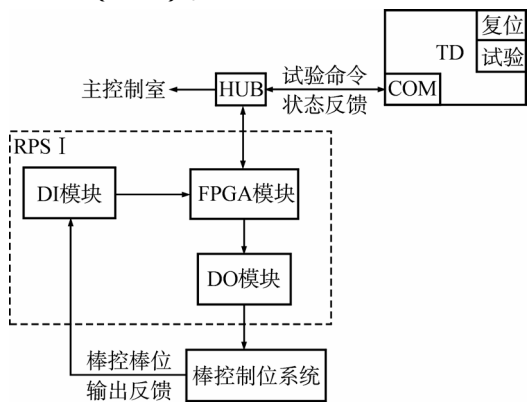


图 3 停堆换料期间多样性紧急停堆的定期试验原理图
Fig. 3 Periodic Test Scheme of Diversity Reactor Trip in Refueling Outage

首先，操作 TD 发出测试命令，保护通道接收命令后通过停堆断路器动作传递信号至棒控棒位控制系统。随后，棒控棒位控制系统进行停堆操作，其状态结果反馈给 TD。试验完成后，通过 TD 恢复按键，使保护通道恢复正常输出，并且执行恢复动作使停堆断路器恢复正常。

2.4 专设驱动器成组试验

专设驱动器成组试验主要检查优选模块、驱

动器及相应开关柜的功能。通过操作 TD 上的专设驱动器不闭锁成组试验开关，触发驱动器真实动作，并监测驱动器的反馈状态以及检测驱动器动作行程时间是否满足要求。该试验进行时也执行安全功能，当真实命令到来时，试验被中断，执行安全功能。设计了闭锁开关，保证一次试验只能对一组驱动器进行设置，对其他驱动器进行闭锁 (图 4)。

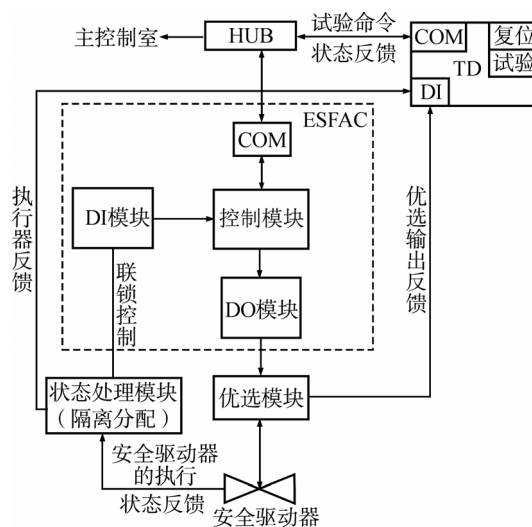


图 4 专设驱动器成组定期试验原理图
Fig. 4 Periodic Test Scheme of ESFAS Drive Group

首先通过 TD 下传试验命令，将被试验的 ESFAC 对应的专设子系统进行旁通，此时在主控制室显示试验报警。ESFAC 接收到命令后执行输出动作，驱动执行器，执行器将动作信号反馈至 HUB，HUB 再将动作状态传送到 TD 及主控报警。试验后按下试验恢复按键，ESFAC 试验命令撤销，恢复正常工作。执行器的动作行程时间通过优选模块状态输出改变到执行器状态反馈改变的时间差获得。若执行器没有执行状态反馈，则需要现场工作人员查看进行确认。

2.5 优选模块输出闭锁试验

优选模块输出闭锁试验检查控制模块、DO 模块、优选模块之间连接及控制信号的传输，试验时不会触发驱动器真实动作。输出闭锁试验命令，命令输出至优选模块，优选模块执行操作，但输出闭锁，输出状态反馈至 TD。该试验进行时也执行安全功能，当真实命令到来时，试验被中断，执行安全功能。设计了闭锁开关，保证一次试验只能对一组优选模块进行试验且优选模块的

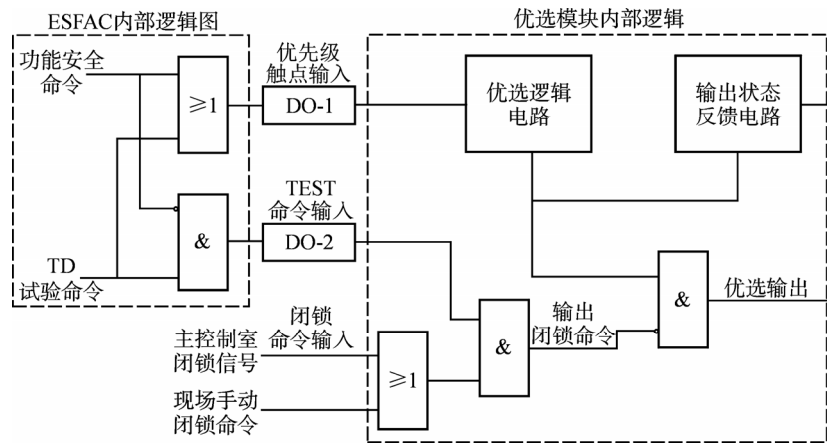


图6 优选模块试验逻辑图

Fig. 6 Periodic Test Logic Diagram of Classified Priority Module

输出进行闭锁。利用 TD 装置进行优选模块输出闭锁试验的原理及逻辑见图 5、图 6。

首先通过主控室闭锁命令硬开关（每个逻辑系列含 1 个硬开关），发出触发信号。信号经继电器组直接送至优选模块的闭锁命令输入口，然后通过 TD 发送试验命令。优选模块发出闭锁状态信号反馈至 TD ;TD 收到反馈后执行试验动作。ESFAC 接收命令执行动作，优选模块接收命令闭锁输出，执行逻辑动作，反馈动作结果至 TD 或主控室其他装置显示反馈信息。在主控制室和 TD 撤销试验命令后，即可进入正常状态输出。

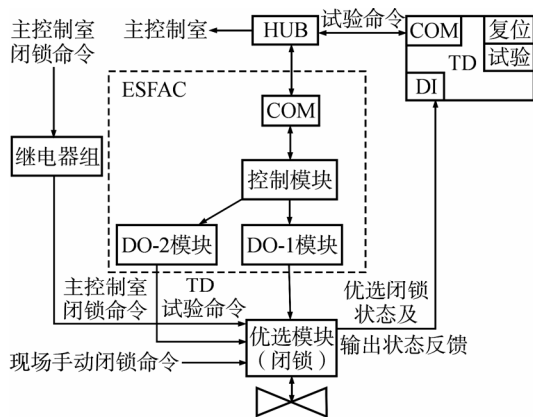


图5 优选模块试验原理图

Fig. 5 Periodic Test Scheme of Classified Priority Module

2.6 输出至外部系统的信号连接试验

输出至外部系统的信号连接试验检测保护系统输出接口以及与其他外部系统之间的硬接线信号连接。操作 TD 发出的试验命令经处理器模块发送给 DO 模块，并输出至外部系统，试验时不

触发外部系统动作。状态反馈后至 TD 或者主控制室其他部分显示。该试验进行时也执行安全功能，当真实命令到来时，试验被中断，执行安全功能。首先通过 TD 发出试验命令，控制模块接收命令并执行试验动作，系统将动作结果通过状态处理模块反馈至 TD 及主控制室；试验完成后通过 TD 恢复按键，使主控制室恢复正常输出。必须保证试验时不触发驱动器目标系统和设备真实地动作。试验原理及逻辑见图 7、图 8。

只有 2 路信号同时存在时，输出到其他系统的信号才有效，所以此试验每次只试验其中的一路，不会引起目标系统真实的动作。

2.7 响应时间试验

响应时间试验是对从模拟信号监测通道经逻辑通道直到产生驱动动作的执行装置输出端的响应时间测试，所测量的响应时间不应超过 TMSR-SF1 启动调试期间所测量的并且已被安全分析所验证的响应时间限值^[9]。

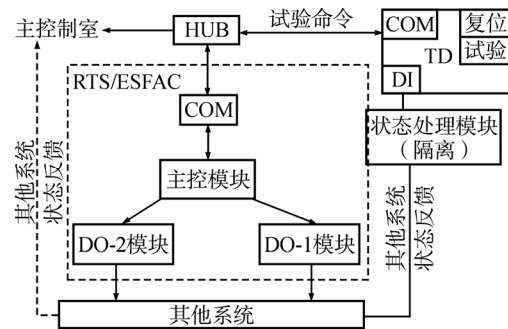


图7 输出至外部系统的信号连接试验原理图

Fig. 7 Periodic Test Scheme Principle of Signal Connection to External System

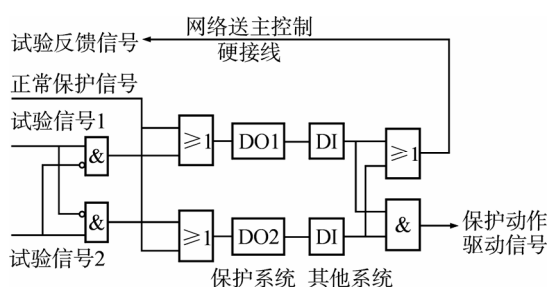


图 8 输出至外部系统的信号连接试验逻辑图

Fig. 8 Periodic Test Scheme Logic of Signal Connection to External System

响应时间试验分为 RTS 响应时间试验和 ESFAS 响应时间试验,因两者具有类似的试验原理和方法,在此以 RTS 响应时间为例介绍。首先旁通 RTS,防止被测试的 RTS 产生误动作信号。随后,操作 TD 注入测试信号,并记下此时时刻 T_1 ,RTS 接收命令后执行动作产生停堆信号传递给停堆断路器。停堆断路器的状态信息通过状态处理模块反馈给 TD,TD 记录此时时刻 T_2 , $T_2 - T_1$ 即为 RTS 的响应时间。试验完成后,通过 TD 恢复按键,使 RTS 恢复正常输出,并且执行恢复动作使停堆断路器恢复正常(图 9)。

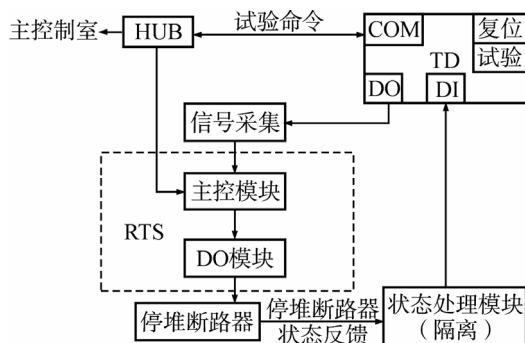


图 9 RTS 响应时间定期试验原理图

Fig. 9 Periodic Test Scheme of Response Time of RTS

3 可行性和正确性分析

结合 IEC 60671-2007《核反应堆保护系统的定期试验和监视》及国标 GB/T 5204-2008《核电厂安全系统定期试验与监测》对安全系统的定期试验要求,以下主要从试验的可用性、交迭性、完整性、可恢复性及安全性等方面阐述 TMSR-SF1 保护系统 T3 试验的可行性及正确性。

3.1 可用性分析

在进行停堆断路器试验时,首先旁通停堆断路器对应的保护通道,其保护通道输出的停堆信

号被闭锁,因此测试的停堆断路器对应通道的输出信号不会影响其他通道的相关功能;并且一次只能试验一组停堆断路器,因停堆断路器组为 3 取 2 冗余模式,不会影响整体停堆断路器组的功能。专设驱动器成组试验和优选模块输出闭锁试验中设计联锁开关,同样,一次只能试验一组专设驱动器或优选模块,并且当真实信号来临时,中断试验执行安全功能,保证了 TMSR-SF1 运行安全。在进行输出至外部信号连接试验中设计了 2 路信号,但每次只对其中一路信号进行试验,保证了试验不会引起目标系统真实的动作。

3.2 交迭性分析

T3 试验中的停堆断路器试验通过保护通道输出停堆信号给停堆断路器,包含了 T2 定期试验中的 RTS 保护逻辑输出部分。专设驱动成组试验中通过 ESFAC 传递命令给优选模块,包含了 T2 定期试验中的 ESFAC 逻辑试验输出部分,所以 T3 定期试验满足法规要求的交迭性的要求。

3.3 完整性分析

T3 试验包括了从表决逻辑之后的信号输出到相关驱动器的试验,不仅可以验证相关驱动器的功能和性能,还间接验证了保护系统与停堆断路器的硬接线连接和硬件逻辑、多样性紧急停堆逻辑、控制模块与 DO 模块、优选模块间的信号传输等。此外,还设计了保护系统输出至其他系统的硬接线连接验证,满足了法规完整性覆盖要求。

3.4 可恢复性分析

T3 试验分初始条件检查、各功能区真值表检查,复位恢复到初始条件,确保被试验器件在保试验前后状态的一致性。为避免在 T3 试验完成后误动作,在试验完成后恢复到正常工作状态时,需要通过 TD 检查测试前后回路逻辑状态,并将在操作员的监督下恢复到初始状态。

3.5 安全性分析

TD 试验装置采用不同于保护系统的硬件和软件,消除了共因故障的影响。信号反馈模块全部采用光电隔离,不受保护系统本身故障影响,同时 TD 装置的故障也不会影响保护系统的功能。

在执行 T3 试验与保护系统正常运行状态相互切换的过程中,为了避免系统软硬件由于模式切换而产生的干扰,注入信号与实际运行信号相互匹配。

人-机接口试验画面与系统实际组成架构相

似度较高,界面层次清晰,便于试验人员对系统试验的理解,避免产生错误操作。

4 结束语

TMSR-SF1 保护系统 T3 试验是在满足国内外法规设计标准的前提下,根据 TMSR-SF1 保护系统的特点结合仪表控制系统的控制需求而设计,并利用自动化的测试平台完成的。此测试平台经过专门的硬件和软件配置后也应用到了 TMSR-SF1 保护系统 T2 试验中。在 TMSR-SF1 保护系统原型样机上的试验经验反馈表明,T3 试验达到了相关标准要求,对后期 TMSR-SF1 保护系统的研制具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] IEC 60671. Nuclear power plants-Instrumentation and control systems important to Safety-Surveillance testing[S]. 2007.
- [2] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 338, Standard Criteria for the Periodic Surveillance Testing of Nuclear Power Generating Station Safety

System[S]. 2006.

- [3] 张龙强,江辉,田亚杰. CPR1000新项目安全级仪控系统定期试验方案[J]. 核科学与工程, 2010, 38(增刊): 103-109.
- [4] 刘跃辛,钟一鸣. 非安全级优选控制技术在CPR1000核电工程中的应用[J]. 原子能科学技术, 2014, 11(增刊): 868-872.
- [5] 王武士,张建平. 秦二厂3号、4号机组反应堆保护系统T3试验改进[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(4): 331-334.
- [6] 钟斌,刘肇阳,何大宇,等. CPR1000核电厂SEC系统改进项的T3试验方案分析与应用[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(增刊): 873-876.
- [7] 刘君华. 基于Labview的虚拟仪器设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [8] 吴官寅,刘伟,张学刚. 核电厂安全级执行机构定期试验数字化人机接口设计研究[J]. 核科学与工程, 2011, 31(增刊): 89-92.
- [9] 汪绩宁,周爱平,郗永学,等. 核电厂反应堆保护系统紧急停堆响应时间分析及测试[J]. 核动力工程, 2012, 33(2): 5-10.

(责任编辑:孙凯)