

高肇直流冗余交流站控系统异常停机的原因分析

为了准确分析高肇直流工程安顺换流站扩建500 kV站用变压器后暴露的冗余交流站控系统异常停机以及SER事件无法上传的具体原因,通过对交流站控硬件平台S5的架构与SER事件处理流程的介绍,详细分析了应用程序的实现方法和冗余通信包的处理机制,得出了冗余交流站控系统异常停机和SER事件无法上传的原因分别在于应用程序策略中的设计缺陷和通信协议握手处理机制的不足。针对暴露的缺陷提出了有效的解决措施,并已经在现场实施,解决了高肇直流的安全运行隐患,证明了解决措施是有效的,可在其他直流工程中加以借鉴运用,同时给运维人员分析类似问题提供了有效的方法。

孙巍峰¹ 涂仁川¹ 邱志远² 岳笑歌¹ 刘旭辉¹/1.许继电气股份有限公司
2.中国南方电网超高压贵阳局

0 引言

±500 kV贵广I回直流输电工程(以下简称“高肇直流”)送端安顺换流站的三路10 kV站用电母线均由站外来的220 kV或110 kV线路经过高压站用变压器后供电,在恶劣的雷雨天气下,站用电线路易受雷击导致多路或三路站用电全部丢失,造成全站失电,这会给直流系统的安全运行带来潜在的风险^[1]。为提高直流系统的可靠性,贵阳供电局提出在站内500 kV母线上增加一个不完整串,其出线接一台新增加的500 kV高压站用变压器,其二次直接接到原来的一条10 kV母线上(替代原来的220 kV变压器),这样站用电形成二外一内的配置,避免全站失电的情况再次出现。

国家高新技术研究发展计划保障项目“直流配网可靠性的多端柔性直流控制保护构建技术”(2015AA050101)。



孙巍峰/工程师

关键词/Keywords

高压直流输电·
交流站控·
PLC控制器·
停机·
SER事件·
冗余通信·

2013年6月,安顺换流站扩建了一回500 kV站用电间隔,交流站控与工作站软件更新升级后投入运行,但在工作站上操作一接地开关500217时两次出现冗余交流站控系统均停机的异常工况以及交流站控所有软硬件SER无法上送的问题。

本文通过对高肇直流交流站控系统的配置进行研究,对冗余交流站控系统异常停机的原因和SER事件无法上传的问题进行了详细的分析和探讨,提出了有针对性的改进方案。

1 平台简介

高肇直流交/直流站控系统采用西门子公司S5-155H系列工业PLC控制器平台^[2-3],用户软件采用基于DOS的STEP5编程工具编写,编程语言可以在语句表STL(Statement List)、控制系统流程图CSF(Control System Flowchart)和梯形图LAD(Ladder Diagram)之间切换。S5系统通过冗余连接板卡IM304/IM324及专用电缆连接构成冗余系统,确保了任何时候的系统可靠性。站控系统通过冗余的Profibus DP现场总线与就地测控单元通信,获取开关状态信息及SER事件^[4],再通过冗余的站LAN网与运行人员工作站及远动系统通信,上传开关状态及SER信号等。LAN通信由标准S5软件的RED软件包管理,实时监测两个LAN通信通道的运行状态,控制LAN报文的发送和接收^[5-6]。

高肇直流站控系统的典型架构如图1所示。

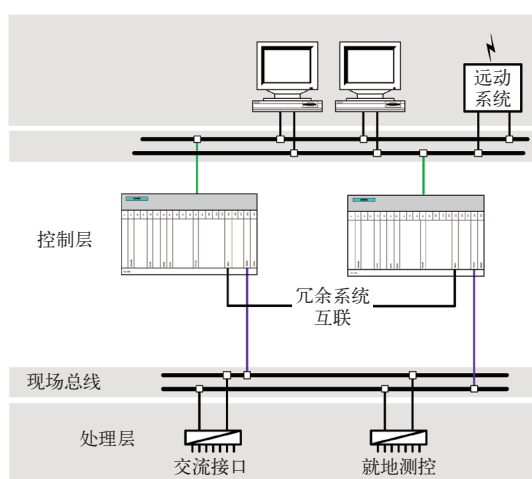


图1 高肇直流站控系统架构示意图

2 异常停机问题描述

2013年11月22日，运行人员在工作站上对500227进行合闸操作时，操作成功，之后操作500217接地开关合闸，无合闸命令事件产生，操作命令发出25 s内冗余的交流站控系统停机，工作stations上所有相关设备均显示为无效状态。事件如表1所示。

表1 交流站控系统异常停机的SER

时间	事件号	组事件号	事件类型	信号来源	信号描述
07:30:45:890	120774	000000	CMD	500227	接地合
07:30:46:367	119927	000000	STAT	500227	接地分
07:30:47:898	119928	000000	STAT	500227	接地合
07:30:48:000左右发出500217合闸命令，无命令事件					
07:31:12:122	113328	112037	MNOR	交流站控系统1	内部故障
07:31:12:122	113329	112037	MNOR	交流站控系统2	内部故障

现场检查两套冗余的交流站控系统S5-155U主机的CPU上的运行指示灯RUN熄灭，软件停机指示灯STOP红灯点亮，所有现场总线与LAN网接口卡上的红色告警灯点亮，冗余交流站控系统均故障，退出运行状态。为迅速恢复交流站控系统的正常运行，现场维护人员对两套冗余的S5系统重启后故障消失，系统恢复冗余运行状态。

由于之前在操作500217接地开关时也发生过

同样的现象（500217为交流操作机构，与就地测控单元的直流出口回路无法接口，500217无法在工作站正常分合，工作stations上操作500217时正常只会报操作失败信号，不会引起系统停机），需要对冗余交流站控系统停机的原因进行详细的分析。

3 事件处理介绍

交流站控系统的SER事件包括就地测控单元经由现场总线送来的硬件SER信号、站控软件产生的SER信号，均经由站LAN网送运行人员工作站。

事件分为如下不同的等级。

紧急（EMCY）：保护跳闸；告警（WRN）：保护功能或设备告警；轻微告警（MROR）：设备次要告警；诊断（DIAG）：软件内部诊断；状态（STAT）：开关状态、处理状态；命令（CMD）：操作员下发的命令事件。

SER事件在数据功能块中配置，每条事件由事件号、组事件号以及告警类型/目的共三个字组成^[5]。对于交流站控系统而言，共有80个组事件，组事件号范围为17001~17080，之后的范围为硬件事件与软件事件预留。按控制的对象和间隔划分，每个对象有跳闸和告警两个组事件，指定到每个组的事件处理逻辑为或逻辑。配置的组事件仅用于送到远动通信系统，便于调度中心迅速定位换流站故障对象与故障类型。事件类型与目的配置在一个字节中，高字节为事件类型，低字节为事件目的。

S5中，程序的处理是采用功能块（FB或FX）的调用方式完成的，所有测控单元的SER事件数据从现场总线的接收端/发送端开始到送往工作站的过程都是保存在不同的数据块（DB或DX）中的。

4 站控系统停机原因分析

经分析，冗余交流站控系统两次停机均是在扩建站用电后操作500217接地开关时发生。对比扩建站用电修改前的程序与修改后的程序，功能修改均正确无误。在工作stations上操作500217时无合闸命令事件，之后冗余交流站控系统停机，怀疑是数据块中未正确配置合闸的命令事件，导致软件寻

址到错误的内存地址，从而引起冗余系统停机。

检查500217接地开关的分合闸命令事件（20775与20776）的数据块配置参数，如图2所示。

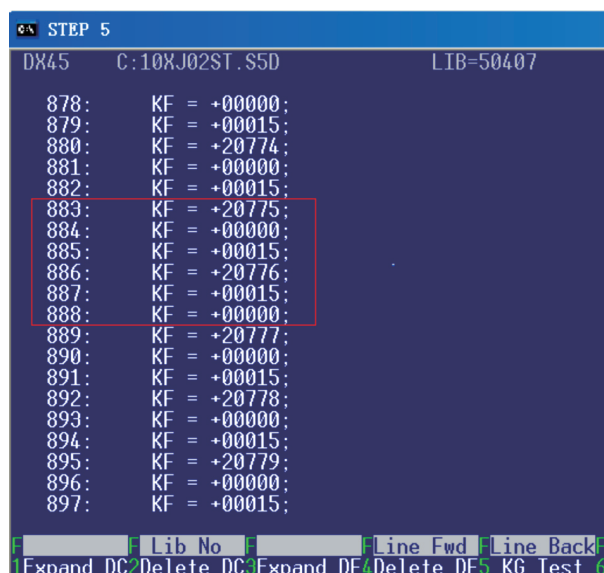


图2 500217的命令事件软件配置逻辑图

从图2中可以看出，500217的分闸命令事件配置正确，但是其合闸命令事件配置有误。

DW887为合闸命令事件20776所属的组事件号，范围应该是17001~17080，配置为0表示不属于任何一个组，实际配置为15，不在范围内，DW888对应该事件的类型以及送往不同的目的地，应该配置为15，配置为0时该事件不能送到工作站显示，所以操作500217无合闸命令事件。

根据以上的分析，500217的合闸命令事件的配置错误，是否因其配置错误引起的系统停机需要进一步地分析。

在主程序中调用功能块FX20处理软件事件，FX20中又调用功能块FX22处理软件事件对应的组事件。组事件的软件处理逻辑如图3所示。

具体分析功能块FX22的源程序，处理组事件时，需要从事件配置数据块中读到的组事件信息来计算组事件号的写指针地址，据此来读写组事件号与计数器。由于配置的组事件号为15，不在17001~17080范围内，功能块FX22中又未做合理

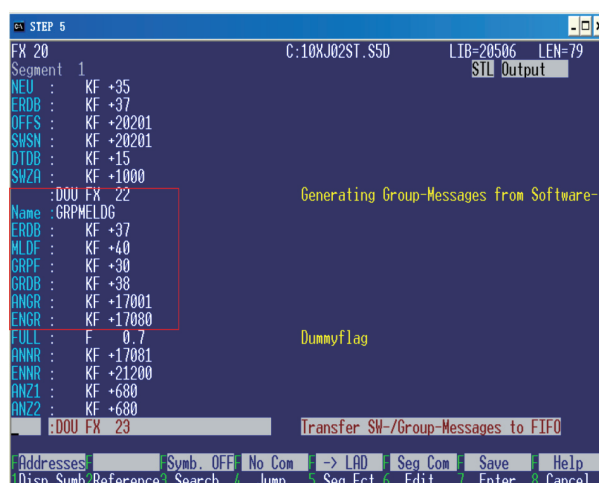


图3 组事件的软件处理逻辑示意图

的有效性检查，即在组事件配置错误时，调用的FX22仍将继续执行，将会导致计算出错误的写指针地址，从而引起S5软件的内部冲突，引起停机。

对比主程序中对硬件事件的处理，同样需要对组事件做判断计算，这是在功能块FX35中调用FX36来实现的，如图4所示。

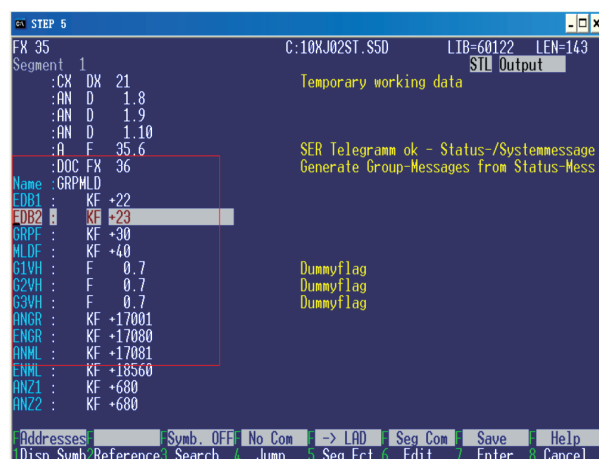


图4 硬件事件的软件处理逻辑示意图

其入口参数与FX22类似，但是FX36中对组事件的处理考虑了数据的有效性检查，即如果数据块中设置的组事件号不在17001~17080范围内，退出该功能块的执行，从而不会导致错误的地址寻址，因而也不会引起S5的停机。

FX36中对组事件号做有效性检查的源程序如图5所示。

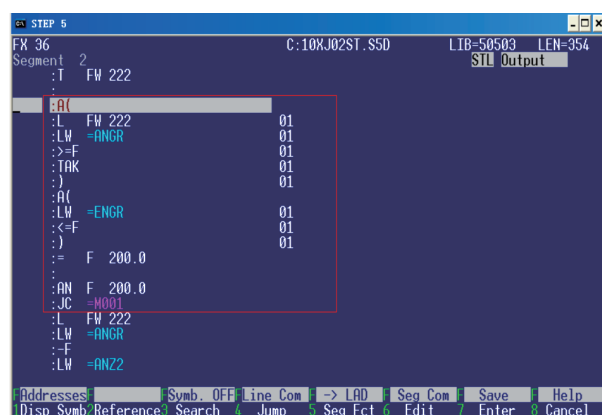


图5 功能块FX36的组事件有效性检查逻辑示意图

有效性检查的软件逻辑框图如图6所示。

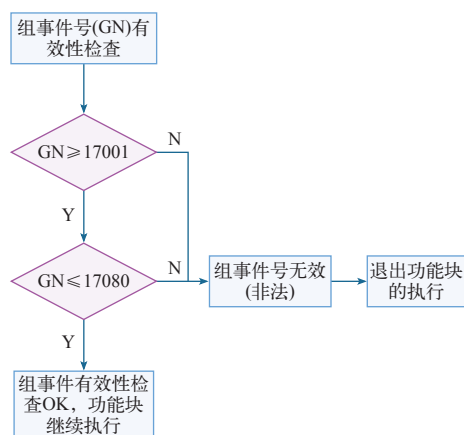


图6 组事件号有效性检查的逻辑示意图

根据以上的分析，导致冗余交流站控系统停机的原因在于源程序设计考虑不周，具体是处理软件事件对应组事件的功能块FX22未考虑入口参数有效性检查的处理。而在工程现场，后期的扩建是不可避免的，均会涉及到大量的软件事件或硬件事件的增加或事件类型的修改，该修改只能通过对手工修改事件配置数据块的原有配置参数进行手工修改，如果稍有疏忽，配置的组事件号不在允许的范围内，加上软件设计的缺陷，将会由于错误的寻址，导致S5系统停机。双套交流站控系统停机只会影响交流场间隔的监盘，不会对直流系统的安全运行造成影响，但是对于采用同一平台的直流站控系统而言，其软件事件对应的组事件处理的功能块FX22与交流站控而言是完全一致的，因此存在同样的软件缺陷。如果因为组事件配置错误将会同样导致双套直流站控系统停机，则会

引起直流系统紧急停运，中断直流功率的正常传输^[7-9]，其后果是很严重的。该软件缺陷已经在后续的兴安直流工程中得以解决，增加了组事件范围的有效性检查，避免了事件配置错误导致冗余系统不可用的情况发生。

5 SER事件无法上送原因分析

在扩建站用电后更新了站控与工作站程序，需要重启交流站控系统和工作站，重启后交流站控所有的软硬件事件均无法上送工作站显示，但是开关操作与状态上送无问题，软件监视交流站控可以实时地把SER信号送到工作站的FIFO缓冲区。经过检查，修改后的站控与工作站的软件配置正确无误，恢复到修改前的程序，问题依旧，排除问题与软件修改有关的可能。

交流站控与工作站的LAN通信由标准S5 RED软件包管理，RED包控制LAN报文的发送和接收。执行的功能包括：发送处理数据、监视应答仲裁和处理数据接收等。

不同的通信对象间有不同的用户数据报文类型被发送，当站控传送带SER事件的处理报文到工作站时，其事件类型为00FFH^[5]，报文格式如表2所示。

表2 处理事件报文结构示意图

报文字	字含义
DW0—DW9	RED报文头，共十个字
DW10—DW649	处理报文，包括状态与模拟量数据
DW650	事件类型，为00FFH
DW651	报文号
DW652	事件总数目
DW653—DW654	备用
DW655—...	带时标的SER事件存储区，长度由事件总数目决定

发送带SER事件的处理报文需要接收对象应答确认仲裁后，才能保证该报文被接收对象正确接收，这通过接收对象反送一帧仅带应答报文号的空命令报文到发送对象来实现双方的握手应答。命令报文格式如表3所示。

仅当处理事件报文中的报文号与命令报文中的被应答的报文号相等时，表明工作站已对该帧

表3 命令报文结构示意图

报文字	字含义
DW0—DW2	RED报文头，共三个字
DW3—DW5	用户报文头，备用
DW6	被应答的报文号
DW7—DW9	备用
DW10—...	二进制命令和设定值命令

报文进行了应答，报文中的SER事件才能上送工作站显示，之后发送报文中的报文号自动加1。据此分析，SER不能正常上送怀疑是报文应答有问题。

发送报文与命令报文分别保存在数据块DB52与DB51中，因此需要在线监视相应报文中的报文号，监视结果如图7所示。

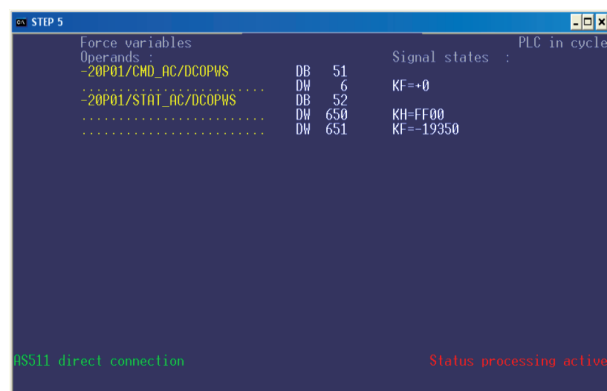


图7 应答报文号的监视示意图

图7中，接收报文中的应答报文号为零，表明HMI未应答交流站控上送的任何报文，所以站控上送的SER无法送到工作站显示。在线强制修改应答报文号为发送报文中的报文号的值-19350后，交流站控的软硬件事件均能够正确地在工作站上显示。取消强制后，再重启站控和HMI，事件上送仍然正常，说明问题已经得到解决。该问题出现的原因在于高肇直流所用的RED通信包在事件报文的应答处理机制上有缺陷，由于RED通信包采用相对封闭的通信规约，并非标准的TCP协议，底层代码无法修改，一旦出现这种异常，只能手动干预，让两个通信对象间建立握手连接后就恢复正常。

6 结束语

对高肇直流冗余交流站控系统异常停机和SER事件无法上传的原因进行了详细的分析，提出了有针对性的解决措施。同时梳理了直流站控存在同样的隐患，针对该问题，后续的兴安直流工程已经做了相应的逻辑优化，避免事件配置错误导致双套系统不可用的严重情况，有助于换流站运行与维护人员加深S5控制系统和SER事件处理流程的了解，更好地保障直流系统运行的安全。

参考文献

- [1] 陈立. 直流10 kV站用电备自投系统备投策略[J]. 电工技术, 2009(10): 31-32.
- [2] 涂仁川, 吴彦维. S7-400H在高压直流输电工程中的应用[J]. 电气应用, 2009, 28(17): 56-60.
- [3] 杜松轩, 刘东, 董言乐. 贵广I、II回直流系统500 kV交流母线分裂运行比较分析及改进措施研究[C]. 中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会论文集, 2012.
- [4] 孙巍峰, 张清枝, 冯广涛, 等. 特高压直流换流站就地控制功能设计[J]. 继电器, 2008, 36(20): 62-65.
- [5] 王徕. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-57.
- [6] 刘丽芳. 高压直流输电系统的通信[J]. 电力系统通信, 2002, 23(12): 1-3.
- [7] 张爱玲, 姚致清, 涂仁川, 等. 云广特高压直流输电工程站控系统的设计缺陷及改进分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 117-123.
- [8] 余义传, 涂仁川, 关红兵, 等. 高压直流输电工程站控系统实现的跳闸功能研究[J]. 电网技术, 2011, 35(增刊1): 208-214.
- [9] 戴国安, 周君文, 王亚非. 特高压直流无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 48-51.

(收稿日期: 2015-12-14) **EA**