

[直流输电]

±800 kV 直流工程跳闸时调度收到远动数据异常分析

文/国家电网许继集团有限公司 李凤龙 申艳红 庞科伟 张玲

介绍了±800 kV 某特高压直流工程在一起四阀组 ESOF 过程中, 远动系统转发南网总调的部分遥信出现状态不明确及其分合位延迟上送南网总调等问题。针对上述问题提出了整改措施, 经过某特高压直流输电工程仿真平台试验验证后, 换流站进行了现场实施, 极大地提高了自动化系统的稳定性和可靠性。

±800 kV 某特高压直流输电工程线路全长 1 413 km, 输送容量 500 万 kW, 对确保送端汛期水电送出、优化东西部资源配置将发挥重要作用, 同时也是加快我国现代电网体系建设、增强电网优化配置和供电可靠性的有效途径。远动通信系统 RCI (Remote Control Interface) 作为换流站特高压直流输电控制保护系统的重要组成部分, 更需要可靠稳定的运行状态支撑特高压直流输电的发展和电网安全稳定运行。本文在充分研究 IEC 60870-5-104/101 远动传输规约及特高压直流输电工程控制保护系统的基础上, 针对±800 kV 某特高压直流输电工程一起阀冷系统 TRIP 引起的四阀组 ESOF 后, 远动系统转发南网总调部分断路器、Blocked 和 Deblocked 出现状态不明确及其分合位延迟上送调度主站, Blocked 对应 SOE 未转发调度主站等现象进行了深入分析。同时查阅资料对主站前置程序数据校验和应用模型进行了研究, 提出了整改优化方案, 借鉴直流工程控制保护和自动化测试用例设计, 在厂内搭建仿真试验平台进行初次测试验证。随后委托第

三方进行测试验证, 测试内容、测试方法及测试结果经第三方技术评审, 满足测试依据的要求, 具备现场实施条件。该方案已在年内完成了现场实施, 很大程度提高了自动化系统稳定性和可靠性。

跳闸时 RCI 转发调度主站信号概述

2020 年 4 月 4 日 11 点 23 分, 某换流站四阀组 TRIP 时远动转发调度自动化主站的数据出现以下现象: 远动向南网总调自动化主站正常转发交流滤波器场断路器分闸状态以及对应 SOE; 远动向南网总调自动化主站转发的 500 kV 交流场断路器 5021、5022、5043、5051、5062 和 5063 状态均出现了 14 min 的延迟时间, 并且在延迟期间转发给总调的上述遥信信号为状态不明确; 另外, 500 kV 交流场断路器 5042、5052 在直流系统 TRIP 后正常转发总调分位状态, 2 s 后又变为状态不明确, 在 14 min 后正常转发分位, 而 8 个断路器分位 SOE 均正常时间转发至总调。

四阀组 Blocked 和 Deblocked 遥信状态转发总调

过程中出现不同时间的延迟，并且在延迟期间转发给总调的遥信信号为状态不明确，其中四阀组 Blocked 对应 SOE 未转发总调，四阀组 Deblocked 对应 SOE 均正常时间转发。

远动数据转发南网总调过程分析

针对远动转发南网总调的断路器对应 SOE 均正常，而 500 kV 交流场断路器状态出现短时间状态不明确现象，在换流站运行人员下发总应答命令后，远动转发给总调的 500 kV 交流场断路器状态恢复正常。针对以上现象经过分析研究确认：当前 XX 直流 RCI 解析断路器、隔离开关以及地开关的类型同换流站运行人员监控系统（HMI）解析开关的类型基本保持了一致；当断路器出现 Fault 状态时，RCI 解析为 3 值，表示刀开关分合状态不明确，从而南网总调主站显示断路器状态不确定，而站内 HMI 监控为断路器跳闸状态，并附带闪烁提示功能。因此可以判断出转发总调的数据状态与现场数据状态保持了一致。

控制保护主机 TDC 装置转发的数据状态按照 32bit 位传输，一个断路器的状态占用其中 8 个 bit 位，一个阀组的 Blocked 和 Deblocked 状态占用其中 10 个 bit 位。具体的解析方法：以交流场断路器 5021（= 10B02. A-Q0）为例进行分析。断路器 5021（= 10B02. A-Q0）的 8 个 bit 位，见表 1。

表 1 5021 断路器 bit 位说明

bit	名称	描述
0	= 10B02. A-Q0/INVALID	Invalid Bit
1	= 10B02. A-Q0/OFF	Valve Hall Earthing Switch Open
2	= 10B02. A-Q0/ON	Valve Hall Earthing Switch Closed
3	= 10B02. A-Q0/FLT	Valve Hall Earthing Switch Fault
4	= 10B02. A-Q0/RUN	Valve Hall Conv Hv Grws Running
5	= 10B02. A-Q0/LOC_CTRL	Valve Hall Earthing Switch Local Control
6	= 10B02. A-Q0/OFF_PS	Valve Hall Conv Hv Grsw Open Possible
7	= 10B02. A-Q0/ON_PS	Valve Hall Conv Hv Grsw Close Possible

断路器 5021 状态的解析占用其中 5 个 bit 位。数据类型为 DISCTRL_05，解析规则见表 2。

表 2 断路器 5021 状态解析规则

bit	值	描述
0 0 0 0 1	1	Disconnect Switch Opened
0 0 0 1 0	2	Disconnect Switch Closed
0 x 1 x x	3	Disconnect Switch Faulty
0 1 0 x x	0	Disconnect Switch Running
1 0 0 0 1	1	Disconnect Switch Opened, local control
1 0 0 1 0	2	Disconnect Switch Closed, local control
1 x 1 x x	3	Disconnect Switch Faulty, local control
1 1 0 x x	0	Disconnect Switch Running, local control

通过表 2 可知 Opened 和 Opened Local 表示为 1，Closed 和 Closed Local 表示为 2，Runing 和 Runing Local 表示为 0，Faulty 和 Faulty Local 表示为 3 值。当 Invalid bit 为 1 时，断路器状态为 0。

现场出现阀组 TRIP 后，交流站控转发 HMI 和 RCI 断路器 5021（Disconnect Switch Faulty）为跳闸状态，即断路器 5021 故障状态位为 1 值，HMI 断路器显示为红色，并附带闪烁以便提醒运行人员；RCI 按配置数据库解析断路器状态为 3 值，并转发南网总调 3 值，解析结果表示状态不明确。11：37：44，运行人员下发总应答命令，HMI 和 RCI 立即收到上述断路器的分位状态。运行人员下发总应答命令见表 3。

针对断路器 5042、5052 在直流系统 TRIP 后正常转发总调分位状态，2 s 后又变为状态不明确，在 14 min 后又正常转发调度分位现象进行分析。在现场发生跳闸后 5042 和 5052 首先是正常跳开，总调主站报文见表 4。

在跳闸 2 s 后，5042 和 5052 又变为状态不明确，总调主站报文见表 5。

断路器的分合状态采用硬接线方式送往交流站控，而断路器 TRIP 是交流站控软件通过判断 TRIP 位来确定的。由于交流站控软件相应功能块有固定软件扫描周期，因此硬接线的传送方式快于软件判断时间，首先收到硬接线信号，断路器 5042、5052 由合位变位分位，并将分位送往 HMI 和 RCI，随后

表 3 HMI 上报运行人员下发总应答命令相关 SER

Date & Time	Number	Device	Event description	Level
2020-04-04,11 : 37 : 46 : 853	163852	= 10XJ01	Station Acknowledge Command	Order
2020-04-04,11 : 37 : 47 : 179	102615	= 11V00	General Acknowledge Command	Order
2020-04-04,11 : 37 : 47 : 531	132615	= 12V00	General Acknowledge Command	Order
2020-04-04,11 : 37 : 47 : 831	112629	= 11VG11	General Acknowledge Command	Order
2020-04-04,11 : 37 : 48 : 291	122629	= 11VG21	General Acknowledge Command	Order
2020-04-04,11 : 37 : 48 : 475	142629	= 12VG11	General Acknowledge Command	Order

表 4 主站接收断路器 5042 和 5052 分位报文

[Thur Apr 4 11 : 23 : 30 2020] 接收(遥信):Z268328AD47046
03 0A 03000100 F2000001<241:分> 03010001<258:分>

表 5 主站接收断路器 5042 和 5052 状态不明报文

[Thur Apr 4 11 : 23 : 32 2020] 接收(遥信):Z268129CD47046
03 02 03000100 F2000003<241:错> 03010003<258:错>

在第二次扫描周期期间判断出断路器 5042、5052 TRIP,并将 TRIP 送往 HMI 和 RCI,因此出现短时间断路器 5042、5052 由分位变为状态不明现象。在运行人员下发总应答命令后,HMI 和 RCI 均收到

所有跳闸断路器的分位状态。

针对转发总调四阀组遥信 Blocked 和 Deblocked 状态出现不同时间的延迟,并且在延迟期间为状态不明确现象进行以下分析。

控制保护主机 TDC 装置转发的数据状态按照 32bit 位传输,Blocked 和 Deblocked 状态占用其中 10 个 bit 位。

以极 1 高端阀组(11VG11_CONV)为例进行分析。极 1 高端阀组的 Blocked 和 Deblocked 状态占有 10 个 BIT 位,见表 6。

表 6 阀组 BLOCKED 和 DEBLOCKED 状态 BIT 位说明

BIT	名 称	描 述
0	= 11VG11/STAT_INVALID	Invalid bit
1	= 11VG11/EARTHED	Status of Operation Earthed
2	= 11VG11/STOPPED	Status of Operation Stopped
3	= 11VG11/STANDBY	Status of Operation Standby
4	= 11VG11/BLOCKED	Status of Operation Blocked
5	= 11VG11/DEBLOCKED	Status of Operation Deblocked
6	= 11VG11/OPEN_LINE_TEST	Status of Operation Open Line Test
7	= 11VG11/STAT_UNDEFINED	Status of Operation Undefined
8	= 11VG11/PULSES_DISABLED	Firing Pulses Disabled
9	= 11VG11/PULSES_ENABLED	Firing Pulses Enabled

该工程中,Blocked 和 Deblocked 信号采用单独解析方式转发到总调。

11VG11_CONV_d:数据解析类型为 OPSTAT_08 (93),当 Blocked 位为 1 时解析值为 2 值,表示 Blocked 状态,其他状态为 3 值。

11VG11_CONV_DBLK_d:数据类型为 OPSTAT-DBLK_08 (97),当 Blocked 位为 1 时解析值为 1 值,表示 Deblocked 状态,其他状态为 3 值。

本次 XX 站发生直流系统 ESOF 是因阀冷系统 TRIP 所致,见表 7。

表 7 HMI 上报相关 SER

Date & Time	Number	Device	Event description	Level
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 325	111270	= 11C11. B	Valve Cooling System Total Trip(SYS-B)	Emergency/fault
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 337	111150	= 11C11. A	Valve Cooling System Total Trip(SYS-A)	Emergency/fault
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 348	170378	= 12V00+U1	Esof by Pole Conrtol	Emergency/fault
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 350	170384	= 12V00+U2	Esof by Pole Conrtol	Emergency/fault
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 360	170218	= 11V00+U1	Esof by Pole Conrtol	Emergency/fault
2020-04-04,11 : 23 : 29 : 361	170224	= 11V00+U2	Esof by pole Conrtol	Emergency/fault

从 HMI 上报的 SER 可知，首先极 1 高端阀冷系统 Trip，双极联跳功能导致双极四阀组 Esof。每个阀组 Trip 后都需从 Deblocked 状态运行到 Standby 状态，从 Deblocked 到 Standby 状态整个过程需要相当一段时间，当 HMI 收到 Standby 时，表明此时对应的阀组已正式转为 Standby，同时 RCI 的 Deblocked 状态变为分位转发南网总调，而 Blocked 状态转为合位转发调度。如极 1 低端阀组和极 2 双阀组在 11:26 分已运行到 Standby，因此 RCI 将 Blocked 和 Deblocked 正常状态转发至调度，在 12:58 分极 1 高端阀组运行到 Standby，此时 RCI 将极 1 高端阀组 Blocked 和 Deblocked 状态正确转发至南网总调。

换流站 Deblocked and blocked 方式说明：Deblocked 情况就一种，运行人员操作阀组 Deblocked。Blocked 分为运行人员 Blocked 和保护功能 Blocked（如 Pole Control Blocked、Protection Trip 等）。

针对本次直流系统 ESOF 时，远动未将 Blocked 对应 SOE 转发总调现象分析如下。该工程 RCI 选择 Blocked 对应 SOE 为正常情况直流系统 Blocked 时产生的 SER，而此次引起阀组 ESOF 的原因是外部阀冷 Trip，为保护功能 Blocked 范围，故 RCI 未转发总调 SOE。

远动数据转发调度整改优化方案

断路器状态解析方式不再综合考虑 Fault、Trip 和 Local Control 等状态，只对 Opened、Closed 两个 bit 位组合解析。数据类型采用 CBCTRL_02，解析规则见表 8。

表 8 断路器状态解析规则

BIT	值	描述
0 1	1	Disconnect Switch Opened
1 0	2	Disconnect Switch Closed
0 0	0	Disconnect Switch Valid
1 1	3	Disconnect Switch not Clear

断路器 Fault 单独解析转发调度主站。只对 Fault 位进行解析。数据类型采用 BINARY_01，解析规则见表 9。

表 9 断路器故障位解析规则

BIT	值	描述
0	1	Disconnect Switch normal
1	2	Disconnect Switch Fault

关于双极四阀组从 Deblocked 到 Standby 期间解闭锁状态不明现象，将四阀组的 Deblocked 和 Blocked 采用阀控脉冲信号 Firing Pulses Enable 和 Firing Pulses Disable。

针对系统 Trip 后未转发调度 SOE 现象，将四阀组 Deblocked 对应 SOE 采用阀控 Firing Pulses Enabled；将四阀组 Blocked 对应的 SOE 采用阀控 Firing Pulses Disabled。

为了提高南网总调对换流站的全面监控，该工程设计并部署告警直传系统。调度主站可根据子站传输的告警信息内容对告警信息进行分类检索、置牌屏蔽、按类组合和统计分析等。另外，告警直传功能对于调度主站开展数据校核，对于主站调控一体化目标提供重要支撑。

由于调度中心接入换流站较多，无法同时将各换流站运行状态展现于主屏幕，该工程在换流站交流站控系统合成全站事故总信号转发 RCI，再将该信号转发调度主站，使其在换流站发生系统 ESOF 时能够通过该信号推显某特高压直流输电工程主接线图，以便第一时间了解现场各阀组运行情况及其相关问题分析。

试验平台构建及仿真验证

某换流站远动系统通过站内 LAN 网接入控制保护系统采集站内信息。构建试验平台模拟某换流站现场远动系统结构，远动主机采用与某站远动主机型号一致的 GWS-1，采用 ASE2000 作为 104 模拟主站用于模拟南网总调主站系统，控保主机采用与某站主机型号一致的 TDC，试验采用保护功能 Blocked 模拟现场非正常性 Blocked，首先模拟极 1 高端阀组 ESOF，通过对 TDC 置数来实现现场极 1 高端阀组保护跳闸。主站正常接收到 500 kV 交流场 5062、5063 断路器分开。主站接收到 RCI 转发报文见表 10。

（下转第 78 页）

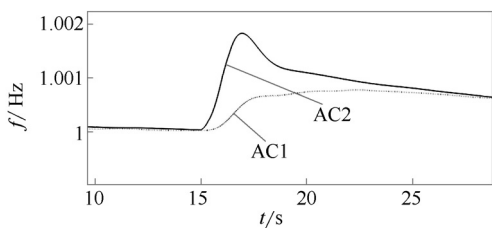


图 12 工况 2 时附加频率控制时各 AC 区域频率

响应 AC2 扰动的能力。在频率一致性控制下，最终 AC1、AC2 频率达到一致。

工况 2 时，不同控制策略下 MT-HVDC 系统直流电压波形如图 13 所示，自适应电压下垂控制在系统发生扰动后具有抑制直流电压波动的作用，电压偏差相对固定电压下垂系数控制较小。

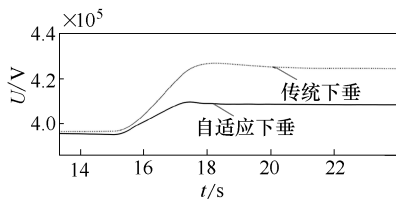


图 13 工况 2 时直流母线电压

结束语

针对具有风电并网的 VSC-MTDC 系统，本文提出了基于自适应电压下垂控制的频率附加控制策略，在传统电压下垂系数中增加与电压限值有关的影响因子，使得在系统发生扰动后，MT-HVDC 直流电压波动较小、偏差较小，防止电压越限。同时，本文分别在 AC 侧 VSC 中增加基于一致性算法的附加频率控制策略，在 WPP 侧 VSC 中增加基于 AC 频率偏差的 PI 控制，各区域通过共享功率裕度实现对 AC 频率支持，同时使各 AC 区域频率最终达到一致。在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建 4 端 HVDC 输电系统，验证了 AC2 区域负载突增和负载突减两个工况下控制策略的有效性。EA

(收稿日期：2021.02.03)

(上接 72 页)

表 10 主站接收断路器 5062 和 5063 分位报文

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 03 双点遥信 (遥信) 68 13 12 00 04 00 03 02 03 00 01 00 01 13 00 01 18 00 00 01

极 1 高端阀组收到保护跳闸 ESOF 信号，该阀组 Blocked 状态显示合位，Deblocked 状态显示分位，事故总随之产生。主站接收到 RCI 转发报文见表 11。

表 11 主站接收阀组 Deblocked 和 Blocked 状态报文及其事故总 SOE

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 01 单点遥信 (遥信) 68 18 0a 00 00 02 01 03 03 00 01 00 01 00 01 02 00 00 06 00 00 01

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 30 带时标单点遥信 (SOE) 68 15 8a 02 02 00 1e 01 03 00 01 00 01 00 00 01 60 26 2b 0a 1d 06 14

结束语

本文结合±800 kV 某特高压直流输电工程一起阀冷系统 Trip 引起的换流站四阀组 ESOF 后，RCI 转发南网总调部分数据异常，对调度中心监盘产生了极大影响，对南方电网整个电网架构稳定运行形成一定挑战，针对上述现象进行了详细分析，并提出了整改优化方案，通过在某特高压直流输电工程仿真平台的多次试验后，将整改优化方案在换流站进行了现场实施，经过现场半年以来的运行现状观察，本次技术处理更大程度提高了自动化系统的稳定性和可靠性，对进一步提高电网安全运行水平具有重要意义，对特高压直流输电工程远动通信系统的设计和研究具有一定指导意义。EA

(收稿日期：2021.03.08)