

智能变电站 IEE1588 以太网交换机故障案例复现测试及分析

高吉普¹, 徐长宝¹, 戴宇¹, 吴杰², 张道农³

(1. 贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 南京悠阔电气有限公司, 江苏 南京 211100;
3. 华北电力设计院, 北京 100000)

摘要: 为解决和预防智能变电站 IEE1588 交换机在特定网络环境下运行可能会带来的潜在风险, 针对智能变电站 IEE1588 交换机运行的网络拓扑结构, 给出了一种逐级隔离的故障分析方法。通过某智能变电站 IEE1588 交换机的具体应用故障案例, 对故障现象进行离线的复现与分析, 总结出了故障产生原因并给出了整改建议。案例分析表明, 通过逐级隔离的分析方法, 可以快速地进行故障分析和定位, 通过对故障现象的复现, 可有效地进行故障原因分析, 从而得出相应的解决方案。
关键词: IEE1588; 智能变电站; 交换机; TC; 修正域

Fault case analysis of IEE1588 switch application in smart substation

GAO Ji-pu¹, XU Chang-bao¹, DAI Yu¹, WU Jie², ZHANG Dao-nong³

(1. Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002, China; 2. Nanjing Youkuo Electric Co., Ltd, Nanjing 211100, China; 3. Huabei Electric Designation Institute, Beijing 100000, China)

Abstract: According to the network structure of IEE1588 switch operation, a kind of fault analysis method of isolated by level is provided to resolve and prevent the potential risks of IEE1588 switch operated under special network environment. Via a specific fault case of IEE1588 switch application in smart substation somewhere, rebuilding and analyzing the fault phenomenon off line, the fault reason is concluded and amendment advices are recommended. This fault case analysis indicates that we can locate and analyze fault rapidly via the method of isolated by level, after rebuilding the fault phenomenon, we can analyze the fault reason effectively and then get the corresponding solution.

Key words: IEE1588; smart substation; switch; TC; correction field

中图分类号: TM762 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0146-05

0 引言

智能变电站网络体系结构一般按“三层三网”构建, 三层即站控层、间隔层、过程层^[1-2], 三网即 GOOSE 网、SV 网、MMS 网^[1-2]。过程层的 SV 网和 GOOSE 网可共网或单独组网; 如果站内采用 IEE1588^[3]时钟同步时, 则 SMV 网、GOOSE 网和 IEE1588 对时网经常采用三网合一的网络结构, 此时过程层网络中还包括 IEE1588 报文^[4]。一般在 220 kV 及以上智能变电站, “三层三网”相互独立并相互隔离, 实现分层、分布、开放式网络系统。而在 110 kV 网络中, 采用三网合一的模式较为普遍。

随着网络技术的发展, 支持 IEE1588 精确时间同步协议的交换机得到了发展和应用。但由于新技术应用之初的欠经验, 新设备无完整的检测手段,

并且智能变电站网络架构较为复杂, IEE1588 在应用之初产生的故障较多。本文给出了一种逐级隔离的故障分析方法, 通过对某智能变电站应用 IEE1588 交换机所产生的故障进行案例分析, 对故障现象进行离线分析和定位, 并给出了解决方案。

1 故障案例

某智能变电站, 按典型的网络结构进行设备组网, 如图 1 所示^[4]。全站采用北斗和 GPS 双重化配置的时间同步系统, 在站控层采用 SNTP 对时方式, 间隔层和过程层的设备通过 IEE1588 以太网交换机 (TC 模式) 对时, B 码作为备用对时方式。在 110 kV 的过程层网络, 采用了采样值、GOOSE 和 IEE 1588 三网合一的结构, 也是通过同款的 IEE1588 交换机 (TC 模式) 进行对时。

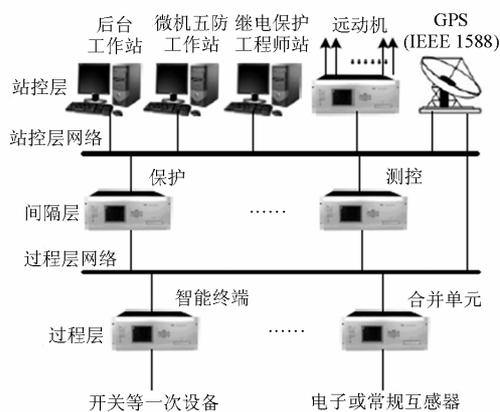


图1 智能变电站典型网络结构图

Fig. 1 Typical network structure of smart substation

该智能变电站在投运之后, 现场运行的母差保护会无规律地发生异常, 从其日志中看到的原因是电压跌落为 0, 结合业主 Solaris 监控终端上的记录显示, 交换机厂家将问题定位在 PTMU 的时间同步上。

由于无法使用抓包来分析, 交换机厂家的现场工程师安装了一台 EC, 并用中心交换机换新的 ROM 来记录下 PTP 计算时有异常的数据。将 Syslog 做好后, 第一次的数据采集过程中, 现场工程师发现中心交换机与 GPS 主钟间的 PDelay (路径时延) 比较大, 甚至达到了毫秒级, 因此联系了 GPS 厂家予以协助, 通过与主钟厂家邮件沟通以及技术人员的内部分析后, 排除了由主钟产生问题的可能性。

在此后的数据采集, 没有再收到 PTP1588 的错误日志, 但母差保护跳掉的问题仍然存在, PTMU 也出现多次的时间同步错误。交换机厂家的工程人员对母联保护交换机进行了升级。升级完成后, 与中心交换机的版本相同, 不会对现有功能和业务有任何影响, 但是可以详细采集在中心交换机上的数据包。交换机升级后问题并没有解决, 仍存在保护动作的问题。现场运行的环境拓扑结构如图 2 所示。

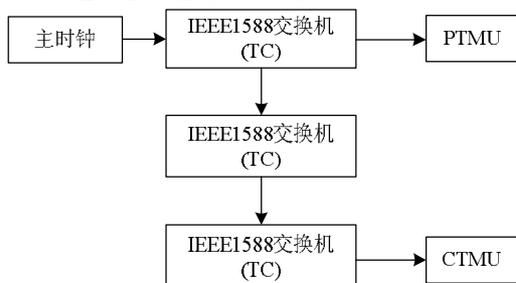


图2 现场运行环境拓扑结构图

Fig. 2 Topology of operation network in field

2 故障分析及定位

2.1 现场环境模拟

根据现场实际网络拓扑, 按图 3 搭建了简化的测试环境进行离线的故障分析及定位。试验所采用的主时钟、交换机、合并单元型号及软件版本均与现场设备一致。

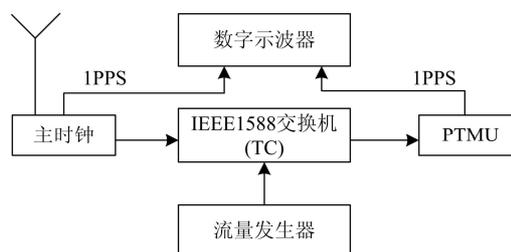


图3 现场网络环境模拟

Fig. 3 Simulation network of the field

IEEE1588 交换机工作于 TC 透传时钟的模式, 报文格式为 IEEE802.3 二层结构。透明时钟能够计算 PTP 同步报文在网络交换设备中的延时时间 (即驻留时间), 并且把此延时时间累加在 PTP 同步报文的修正域 (CF) 中, 从钟计算偏差时把修正域考虑在内, 这样就可以补偿掉同步报文在透明时钟上的延时, 有效避免了延时和延时抖动, 提高了网络交换设备级联时的同步精度^[5]。

主时钟通过 IEEE1588 交换机给合并单元进行授时, 主时钟与合并单元的输出秒脉冲接入数字示波器, 观察主、从装置对时的时间准确度及抖动情况, 对时的时间准确度应小于 $1 \mu\text{s}$ ^[6]。流量发生器接入交换机, 模拟运行现场的采样值、GOOSE 及其他类型的协议报文, 分别观察网络流量及网络报文干扰对主时钟、交换机和合并单元带来的影响。

2.2 故障分析及排查

IEEE1588 时间同步的特点是根据协议报文的交互进行时间计算, 网络中的每个设备都参与时间报文的传递与处理, 根据现场发现的有关时间同步的问题, 从现象上无法排除具体是主时钟、交换机还是合并单元的问题, 因此需要分别进行排查。由于该智能变电站的 110 kV 网络采用的是采样值、IEEE1588 和 GOSSE 三网合一的结构, 网络流量较大, 因此分别对三个设备进行了流量压力的试验。

由于网络中所用的 IEEE1588 交换机不支持对端口的组播抑制功能, 在测试主时钟和 MU 的流量压力时, 将图 3 中的交换机替换为支持端口组播限速的交换机, 然后分别对主时钟和合并单元进行流

量压力的试验，测试时交换机在相应端口开启流量限速功能，保证网络流量只影响被测的主时钟或合并单元。实际测试结果为：主时钟可抵御 18 Mbps 左右的流量的广播、组播以及未知单播风暴；MU 的对时不受端口上输入的广播、组播以及未知单播流量的影响。因此根据测试结果可排除合并单元的问题。

在实际网络拓扑中，主时钟在 VLAN1 中，其他 IED 设备划分在特定的 VLAN 中，主时钟与其他的采样值及 GOOSE 报文隔离，因此网内的采样值、GOOSE 等组播流量对主时钟不会产生影响。

测试 IEEE1588 交换机在网络流量压力下的性能时，将主时钟划入单独的 VLAN，在流量不影响主时钟和 MU 的情况下，在交换机的端口分别注入一定流量的广播、组播和未知单播报文，实际测试结果为：100 Mbps 的组播流量不影响交换机正确转发时间同步报文；在开启未知单播过滤的情况下，100 Mbps 的未知也单播流量不影响交换机正确转发时间同步报文。正常情况下交换机转发主时钟 Follow Up 报文时修正域内的值如图 4 所示，基本稳定，波动幅度不大。

Protocol	Length	correction	Info
PTPv2	60	3552634	Follow_Up Message
PTPv2	60	3546271	Follow_Up Message
PTPv2	60	3581137	Follow_Up Message
PTPv2	60	3609428	Follow_Up Message
PTPv2	60	3554410	Follow_Up Message
PTPv2	60	3652288	Follow_Up Message
PTPv2	60	3528829	Follow_Up Message
PTPv2	60	3581481	Follow_Up Message
PTPv2	60	3582662	Follow_Up Message
PTPv2	60	3556234	Follow_Up Message
PTPv2	60	3518236	Follow_Up Message
PTPv2	60	3755596	Follow_Up Message
PTPv2	60	3589330	Follow_Up Message
PTPv2	60	3592423	Follow_Up Message
PTPv2	60	3501389	Follow_Up Message
PTPv2	60	3558276	Follow_Up Message

图 4 正常情况下交换机的 Follow Up 报文修正域内的值
Fig. 4 Correction filed value of the switch under normal situation

但是当交换机在超过 60 帧/s 的广播报文影响下，交换机转发的 Follow Up 报文中修正域内的 (CF) 值出现了异常，修正域内的数值产生了振荡的情况，如图 5、图 6 所示。在广播报文流量为 60 fps 时，交换机大约 2 min 后开始出现 CF 值的振荡，当流量撤消后可恢复，当流量较大时，CF 值则一直处于振荡状态，流量撤消后也无法恢复，必须重启交换机后 CF 值才恢复正常。

Protocol	Length	correction	Info
PTPv2	60	806985642	Follow_Up Messa
PTPv2	60	794954913	Follow_Up Messa
PTPv2	60	765042323	Follow_Up Messa
PTPv2	60	880252566	Follow_Up Messa
PTPv2	60	18446744073551065472	Follow_Up Messa
PTPv2	60	885223739	Follow_Up Messa
PTPv2	60	789016437	Follow_Up Messa
PTPv2	60	616397579	Follow_Up Messa
PTPv2	60	730877419	Follow_Up Messa
PTPv2	60	961739452	Follow_Up Messa
PTPv2	60	730324833	Follow_Up Messa
PTPv2	60	314493027	Follow_Up Messa
PTPv2	60	320061444	Follow_Up Messa
PTPv2	60	118531549	Follow_Up Messa
PTPv2	60	18446744073656473829	Follow_Up Messa
PTPv2	60	975940292	Follow_Up Messa
PTPv2	60	975940292	Follow_Up Messa
PTPv2	60	492281788	Follow_Up Messa
PTPv2	60	726407666	Follow_Up Messa
PTPv2	60	926518612	Follow_Up Messa

图 5 交换机引入 60 fps 广播流量时 Follow Up 报文修正域内的值产生振荡

Fig. 5 Correction filed oscillated under 60 fps broadcast traffic in switch

Protocol	Length	correction	Info
PTPv2	60	18446744073439400369	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073452214190	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073547484874	Follow_Up Message
PTPv2	60	52842090	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073294532089	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073400158465	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073640219500	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073468418899	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073511292627	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073593210941	Follow_Up Message
PTPv2	60	62614436	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073328550349	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073347369790	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073707623346	Follow_Up Message
PTPv2	60	79303813	Follow_Up Message
PTPv2	60	26561124	Follow_Up Message
PTPv2	60	82130544	Follow_Up Message
PTPv2	60	104070279	Follow_Up Message
PTPv2	60	1688488	Follow_Up Message
PTPv2	60	131709888	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073398647597	Follow_Up Message
PTPv2	60	146523690	Follow_Up Message
PTPv2	60	18446744073322881382	Follow_Up Message

图 6 交换机引入大于 60 fps 流量的广播时 Follow Up 报文修正域内的值持续产生振荡

Fig. 6 Correction filed oscillated continuously under more than 60 fps broadcast traffic in switch

2.3 故障现象复现

通过分别对主时钟、交换机和合并单元的排查，试验时将重点放在了交换机和主时钟上。通过流量发生器在交换机的 3-3 端口对所有 VLAN 分别打入 5 Mbps 的组播流量，经过一段时间后，数字示波器上显示的两个设备间的 PPS 秒脉冲抖动的最小、最大值偏差超过了 2 μs，合并单元面板 PPS 指示灯点亮为红灯，同时通过面板可查询到 PPS 秒脉冲错误信息，通过抓包工具查看交换机转发的时钟的 Follow Up 报文中修正域的值逐渐变大且有振荡现

象, 如图 7 所示。当流量撤除后, 交换机转发的主时钟的 Follow Up 报文中修正域的值恢复正常, 合并单元的秒脉冲也恢复正常, 告警消失。故障现象的整个过程与现场故障现象一致。

通过流量发生器向交换机发送广播报文时(500 fps、64 bytes), 产生了同样的故障现象, 当广播报文流量撤消时, 合并单元无法恢复 PPS 秒脉冲错误, 一直处于告警状态, 通过抓包软件分析交换机的转发报文时, 发现交换机转发的 Follow Up 报文中的 CF 值出现异常且伴有帧丢失的情况, 如图 8 所示。当流量撤除后, 交换机转发的主时钟的 Follow Up 报文中修正域的值无法恢复正常, 合并单元的秒脉冲也无法恢复正常, 告警现场无法消除, 必须重新启动交换机方可消除故障, 运行现场也发生过类似必须复位交换机方可消除故障的现象。

Protocol	Length	correction	Info
PTPV2	60		272492469 Follow_Up Message
PTPV2	60	18446744073642034224	Follow_Up Message
PTPV2	60	18800082	Follow_Up Message
PTPV2	60	606368581	Follow_up Message
PTPV2	60	598362640	Follow_up Message
PTPV2	60	230189940	Follow_Up Message
PTPV2	60	190077655	Follow_Up Message
PTPV2	60	18446744073708186793	Follow_up Message
PTPV2	60	474927092	Follow_Up Message
PTPV2	60	152756742	Follow_Up Message
PTPV2	60	72955902	Follow_Up Message
PTPV2	60	115554108	Follow_up Message
PTPV2	60	18446744073707882450	Follow_up Message
PTPV2	60	50306608	Follow_Up Message
PTPV2	60	18446744073698509444	Follow_Up Message
PTPV2	60	282049128	Follow_up Message
PTPV2	60	128081800	Follow_Up Message
PTPV2	60	562640610	Follow_Up Message
PTPV2	60	532707491	Follow_Up Message
PTPV2	60	331054572	Follow_up Message
PTPV2	60	113153844	Follow_up Message
PTPV2	60	18446744073616322945	Follow_Up Message
PTPV2	60	604883282	Follow_Up Message

图 7 每个 VLAN 加入 5 Mbps 组播流量时修正域内的值

Fig. 7 Correction filed value under 5 Mbps multicast traffic in every VLAN

Protocol	Length	correction	sequenceId	Info
PTPV2	60	147893717	21298	Follow_Up Message
PTPV2	60	675180579	21299	Follow_Up Message
PTPV2	60	677561250	21313	Follow_Up Message
PTPV2	60	340840358	21328	Follow_Up Message
PTPV2	60	855404949	21343	Follow_Up Message
PTPV2	60	544560770	21357	Follow_Up Message
PTPV2	60	683781708	21358	Follow_Up Message
PTPV2	60	457993971	21372	Follow_Up Message

图 8 加入广播报文后修正域内的异常值及丢帧情况

Fig. 8 Abnormal correction filed value and frame dropped situation after broadcast traffic injected

通过分析故障现象及时间报文内的信息, 对于

合并单元, 需提取 Follow Up 修正域内的值来进行时间的计算, 当修正域内的值超出其有效的范围内时, 合并单元即判断为不可用数据, 不用于计算, 若长时间接收到不可用数据时, 合并单元即进入守时状态, 当精度超出一定范围后便产生告警, 因此这两种情况所产生的故障现象均与现场故障现象一致。

3 故障案例总结

通过对现场故障现象的复现及其产生的原因进行分析, 可以明确以下几个问题:

a) 合并单元作为从时钟装置, 不受流量压力的影响; 作为从时钟, 合并单元的对时精度及稳定性取决于上级主时钟及交换机对报文处理的正确性。

b) 现场所用主时钟具备一定的抵御网络风暴的能力, 但当网络流量超出其处理范围内时, 会导致其输出的时间报文产生误差, 影响到下游时钟装置的对时, 从而可能产生全网的对时故障。

c) 该型号 IEEE1588 交换机工作于 TC 模式时, 其处理广播报文的方式存在缺陷, 会导致其转发的 Follow Up 报文中修正域值异常变化, 且出现丢帧情况, 严重情况下无法恢复对 CF 值的处理, 从而导致交换机处于时间报文转发不可用状态, 从而可能导致全网无法恢复的对时故障, 必须进行硬件复位方可消除。

4 结语

根据以上对故障案例的总结, 对该型号的 IEEE1588 交换机给出如下整改建议: 交换机修正 TC 模式下对广播报文的处理方式, 以及驻留时间的计算, 防止驻留时间出现振荡而导致数值不可用; 交换机的时间同步的处理部分增加自查机制, 在计算出的驻留时间持续异常时给出告警并复位, 防止设备处于持续不可用状态。交换机在通过以上修改升级后, 解决了现场出现的问题, 未再出现同样的故障, 整个网络运行稳定。

案例表明, 通过逐级隔离的分析方法, 可以快速地进行故障分析和定位, 通过对故障现象的复现, 可有效地分析故障原因, 从而得出相应的解决方案。

参考文献

[1] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.

LI Rui-sheng, LI Yan-bin, ZHOU Feng-quan. The

- functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.
- [2] 刘明慧, 赵晓东, 司梦, 等. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 87-92.
- LIU Ming-hui, ZHAO Xiao-dong, SI Meng, et al. Research and application of process level network flow management in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 87-92.
- [3] 崔全胜, 魏勇, 何永吉, 等. PTP1588 协议的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 148-154.
- CUI Quan-sheng, WEI Yong, HE Yong-ji, et al. Analysis of PTP1588 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 148-154.
- [4] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
- ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- [5] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE Std 1588™-2008 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. New York: 2008.
- [6] 中华人民共和国国家能源局 DL/T 1100.1-2009 电力系统的时间同步系统第 1 部分: 技术规范, time synchronism systems of power system part 1: technical specifications[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2013-09-30; 修回日期: 2013-12-13

作者简介:

高吉普 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能变电站和智能电网相关研究; E-mail: jipugao@sina.com

徐长宝 (1977-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事数字化变电站技术研究;

戴宇 (1958-), 男, 本科, 高级工程师, 从事变电站二次和智能变电站相关研究。