

# 智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三网合一 通信过载隔离抑制策略

张宪军, 刘颖, 余华武, 陈新之

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 在新条件下充分利用现有设备, 尽力降低成本基础上, 提出了针对智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三网合一通信过载致命性故障的隔离抑制策略。采用简化拓扑, 二层动态协议(IEC62439、私有环网、环路检测、STP/RSTP/MSTP、GMRP、IGMP Snooping), 静态配置(VLAN、组播、三层路由、策略路由、ACL), 过载监测, 过载处理结合应用提高网络可靠性, 分析了组合 VLAN、三层交换、策略路由的隔离拓扑, 策略路由支持核心交换机的负载分担, 简化了保护测控装置的通信设计和配置。发明了通信设备创新性过载监测阻断解决方法, 改变了传统抑制单一手段。分析了动态协议和静态配置在三合一网络中不足和优点, 根据智能变电站等级和可靠性要求选用不同隔离策略。通信设备监测到过载时, 先自恢复处理, 通过硬接线告警, 本地记日志, 同时 MMS 发送网络告警信息到监控主机。若不能自恢复则进行过载隔离, 切割降低过载影响范围, 管理员及时干预处理。

**关键词:** 智能变电站; 三合一网络; 通信网络; 网络过载; 过载隔离; 过载抑制

## Overload isolation and control strategy of smart substation MMS, GOOSE, and SV three-in-one communication network

ZHANG Xianjun, LIU Ying, YU Huawu, CHEN Xinzhi

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Making full use of existing equipment under the new conditions, and trying to reduce the cost, this paper proposes the isolation and control strategy for smart substation MMS, GOOSE, SV three-in-one communication network overload fatal fault. Combined with the use of the simplified topology, dynamic layer two protocol (IEC62439, PrivateLoop, LoopDetection, STP/RSTP/MSTP, GMRP, IGMPsnooping), static configuration (VLAN, multicast, layer three routing, policy routing, ACL), overload monitoring and overload control, the reliability of network is improved. The combined VLAN, layer three switching, policy routing isolated topology, policy routing support core switch load balance is analyzed, the communication design and configuration of measuring and protective device are simplified. The communication equipment innovation overload monitoring and blocking solution is developed, which changes the traditional single means of suppression. The problems and advantages of dynamic and static configuration in three in one network are analyzed, and according to the levels and reliability requirements of smart substation, the different isolation strategies are selected. If the overload is monitored by communication equipment, first overload self recovery treatment is made, and by using hard wiring alarm and local log, the alarm information is sent to the monitoring host via MMS network simultaneously. If self recovery is failed, overload isolation is adopted to try to reduce the influence range of overload, waiting for the timely treatment of administrator.

**Key words:** smart substation; three-in-one network; communication network; network overload; overload isolation; overload control

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)22-0120-07

## 0 引言

在传统智能变电站 IEC61850 网络架构中, 站控层、间隔层、过程层采用三层两网架构, 光缆用

于组网及点对点使用数量较大, 全站系统结构复杂, 设备光口及光纤数量大, 单配置保护装置通信没有冗余, 全站信息共享度低。针对这种现状当前各智能变电站设备厂商纷纷研制和开发三合一组网装

置, MMS、GOOSE、SV 三种数据流接入同一套物理网络, 交换机及光口数量大幅减少, 网络架构清晰, 全站信息高度共享。对数据流量和过载的隔离抑制策略显得更加重要, 从实时性、可靠性、经济性、灵活性角度, 针对智能变电站网络及通信设备中使用的过载隔离抑制技术进行解析, 根据不同电压等级选用最佳策略。装置同步方式通常采用 B 码对时/1 pps, 具备条件可采用 IEC61588。

按工作原理, 通信设备分为二层交换机、三层交换机、路由器、通信管理机等。在智能变电站通信设备中, 数据流按目的 MAC 地址类型分为单播 (MAC 地址已学习或静态配置)、组播 (组播 MAC 地址已学习或静态配置)、广播、未知单播、未知组播五种类型, 当数据流量超过一定阈值时, 本文称之为网络过载, 简称过载, 含上述所有数据类型及其组合, 不仅指广播过载。为节约篇幅, 本文中所述网络均指智能变电站三合一通信网络; 业务或业务流均指 MMS、GOOSE、SV、IEC61588 数据流及其组合。

动态协议存在如下问题:

(1) 过载发生时难以自动恢复, 一旦过载发生, 动态协议报文因过载而拥塞, 失去协议原有功能, 致网络瘫痪不可用;

(2) 带宽需求, 协议信息交互消耗一定带宽, 实时性较高的协议, 发送协议数据单元频率较高, 以毫秒为周期发包的协议对通信设备 CPU 性能是很大考验;

(3) 协议异常容错处理要求高, 网络因网线接触不良或个别质量问题少量丢包, 错误配置、通信协议模块或系统异常均可导致网络可靠性降低。通信设备重启时, 动态协议往往需要业务短时中断才能恢复;

(4) 操作维护 (OAM) 需要较多通信背景知识, 排错难度增加。

静态配置存在如下问题:

(1) 需要做较多精准配置才能完成复杂过载隔离需求;

(2) 灵活性低, 保护测控装置位置或 MAC、IP 发生变更, 需更改静态配置才能正常通信;

(3) 网络规模不大场合适用。

好处是可靠性较高, 所有业务流量都是可预知和可明确计量的, 可控性增强。

过载发生在网络中是致命性故障, 研究其隔离抑制策略有着十分重要的现实意义。

## 1 过载产生原因

智能变电站系统中, 有数据流的成员有网络、

通信设备、二次设备装置、监控主机/服务器。网络实体有光缆、双绞线, 单根网线不产生过载, 网络连接成环路就可能会产生过载。通信设备自身故障会导致网络中断或过载发生。通信设备对数据流进行隔离和控制, 若隔离得当即使网络接线有环路也形不成过载。

二次设备装置类型较多, 以 110 kV 智能变电站为例有: 公用测控装置、35 kV/10 kV 线路保护测控装置、35 kV/10 kV 分段保护测控装置、10 kV 电容器保护测控装置、故障录波装置、合并单元、智能终端、主变本体智能终端、母线合并单元、110 kV PT 智能终端、合并单元智能终端集成装置(110 kV 线路及母联间隔)。这些装置本身损坏会导致过载产生, 有些装置本身支持多块板卡, 板卡之间会有内部通信, 数据通信设计不合理或发生错误装置本身未损坏对网络也会产生过载。双星型拓扑结构中, 部分装置跨双网, 易形成环路生成过载。监控主机/服务器包括整个站监控系统、时间同步系统、综合应用服务器等, 网口硬件损坏、程序异常会引起过载。

综上所述, 过载产生原因非常多, 对网络设计提出了更高要求。

## 2 过载隔离策略

### 2.1 设计简化拓扑

良好网络拓扑能够降低和减少过载的发生, 智能变电站中常见的网络拓扑有星型、双星型、链形、树形、(全局/局部)双网独立/互备/互补。网架首选不易产生过载的拓扑, 级联越少越好, 环网较罕见, 易生过载, 案例见文献[1]。物理隔离是从根本上解决过载问题的方法, 文献[2-3]对网架结构分析, 图 1 为三合一单网拓扑图。装置均为单网口, 主备双网时支持双网口。

### 2.2 使用动态协议

在通信设备中能够隔离过载的二层协议有: IEC62439、以太网多环保护技术 (ERPS)、以太网自动保护切换 (EAPS)、私有环网、环路检测 (Loopback Detection)、STP/RSTP/MSTP、通用组播注册协议 (GMRP)。

IEC62439 标准详述了六种冗余方法, 包括基于环网的媒介冗余协议 (MRP)、交叉冗余协议 (CRP)、信号冗余协议 (BRP)、分布式冗余协议 (DRP)、并行冗余协议 (PRP) 和高可用无缝环网协议 (HSR), 其中 PRP 与装置相关, 对应双网络拓扑, 总成本较高, 通信设备不改变。参见文献[4-7]。



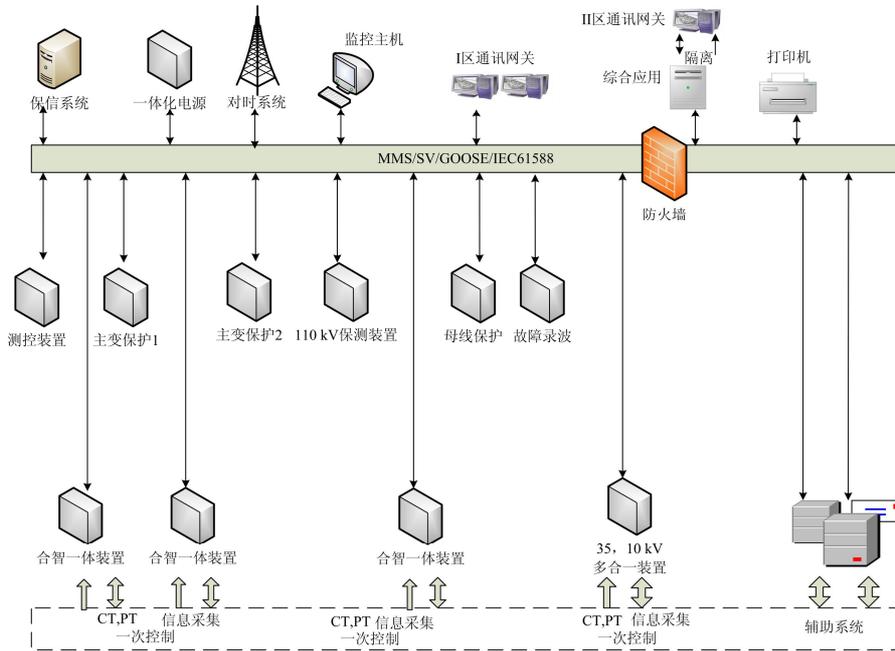


图 1 智能变电站三合一单网拓扑图

Fig. 1 Smart substation three-in-one single network topology

私有环网协议内容丰富，支持拓扑结构有单环、相切环、相交环、主备链路备份，用在可靠性较高，实时性较高要求场合。收敛速度快，4 台设备组成的单环拓扑中收敛时间一般小于 5 ms。按交换机选择方式，可分为静态环网和动态环网。私有环网协议不同厂商之间不互联。

环路检测(Loopback Detection)是通过周期性的向配置端口组播/广播发送包含自身 ID(如发送端口 MAC 地址和物理端口号)信息的报文，若是从本端口接收到由自身发送出去的协议数据单元(Protocol Data Unit, PDU)，则认为网络存在环路，此时阻塞这个端口或者按照配置时间阻塞，超时后再转发数据通信。

GMRP 通过实体与其他 GMRP 实体通信，提供组播属性声明、注册和注销功能。依赖于通用属性注册协议(GARP)。装置需支持 GMRP，组播源不必支持。文献[8-12]介绍了 VLAN、组播、GMRP 在变电站中应用。

二层动态协议结合本文提出的过载监测和处理方法，在带宽余量充裕，协议实现强健情形下可以使用，适应各种类型网络拓扑，灵活性和可靠性均获大幅提升。

### 2.3 使用静态配置

常见静态隔离技术包括 VLAN、组播、三层路由、策略路由、ACL 等。

VLAN 常见基于 MAC、协议、子网、端口类

型，基于端口 VLAN 可以有效隔离过载。

三合一网络采用 VLAN 进行大的信息区分，一般通过 2 个大的 VLAN 划分站控层和过程层网络，MMS 通过基于标记的 VLAN 和过程层 SV、GOOSE 隔离。在 MMS 数据流所在 VLAN 中要求所有装置和监控主机通信，相邻装置不能互相通信(否则装置之间 ARP 广播报文会相互收到)，监控主机要和所有装置通信，这在同一个 VLAN 显然难以满足。

图 2 给出一种参考解决方案，上下行数据分开走不同 VLAN 通道。监控主机 MMS 报文通过 VLAN100 下行发送，所有装置都可以收到，装置通过使用不同子 VLAN2、VLAN3、VLAN4...，向上行发送 MMS 报文，装置之间 MMS 报文互不通信。本文中上行是指向监控主机/服务器站控层方向，下行是指向保护测控等装置方向。

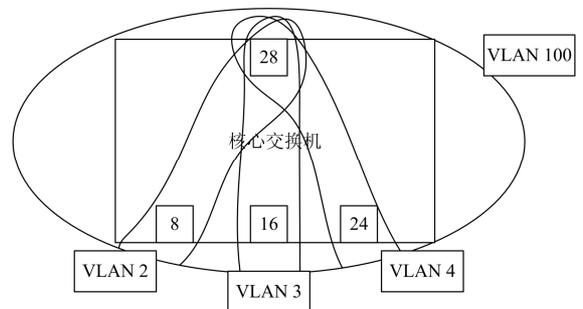


图 2 MMS 隔离组合 VLAN 划分

Fig. 2 MMS isolation combined VLAN partition

过程层 SV、GOOSE 的 VLAN 划分原则: 智能终端、合并单元、保护和测控的逻辑关系; 线路间隔之间的逻辑关系(联锁、失灵启动); 线路间隔与母线和主变的逻辑关系。文献[13]分析了过程层业务流, 使用 VLAN 可减少报文传输时延, 提高实时性。

传统二层交换芯片中 VLAN 不能隔离所有的二层数据报文, 有能够跨越所有 VLAN 的 MAC 地址, 如所有 VLAN 桥管理组地址 01-80-C2-00-00-10, MAC 地址范围 01-80-C2-00-00-10~01-80-C2-00-00-2F 都能够跨越所有 VLAN 转发。

过程层网路通过静态组播划分实现数据流的精确控制, 防止不同组播地址信号的相互影响, 对未定义组播采用丢弃策略。组播的局限在于只能在同一个 VLAN 中起作用, 通过组播可对 VLAN 内的数据流进行进一步隔离。

三层交换的优势在于能够彻底消除二层过载流量, 隔离效果非常好。智能变电站单台过程层二层交换机百兆口的延时约为 2~3  $\mu\text{s}$ , 千兆口延时约为 1  $\mu\text{s}$ , 单台过程层三层交换机百兆口的延时约为 8~9  $\mu\text{s}$ , 千兆口延时约为 2~3  $\mu\text{s}$ , 光口延时比电口要小一些。三层交换硬件缓存要远远大于二层的, 对可靠性要求高场合可使用全千兆三层交换机作为核心交换机。

三层交换跨 VLAN 转发, 转发依据不是目的 MAC 地址, 而是目的 IP 地址。三层交换芯片基于目的 IP 地址查找, 若主机路由表中没找到, 则在子网路由表中查找, 进行最长最佳子网匹配查找算法, 若在子网路由表中没有找到, 送给 CPU 软件处理, 若在主机路由表或子网路由表中找到了, 就会得到下一跳索引。转发时, 用下一跳 MAC 地址替换报文的 MAC 地址, 用接口表中的 MAC 地址和 VLAN 替换报文的源 MAC 地址和 VLAN。

通过细致规划和精确静态配置主机路由和子网路由, 可以禁掉动态地址解析协议(ARP)工作过程, 使可靠性得到极大保障, 减少网络中通信协议流量。电力装置若使用静态配置 ARP, 则网络中无广播报文, 彻底根除广播过载源。文献[14]因广播过载造成网络堵塞, 本文将加强交换机、装置、监控方面隔离抑制功能设计。拓扑图 3 用三层单播交换转发 MMS, GOOSE、SV、IEC61588 适用组播地址二层通信, 对时延非常敏感, 三层组播转发时延较大不推荐使用, 可在本拓扑中综合应用其他二层技术隔离。

策略路由依据用户制定策略进行路由选择, 与依照报文目的 IP 地址查找路由表进行转发不同, 可应用于业务安全、负载分担等目的。策略路由由支持

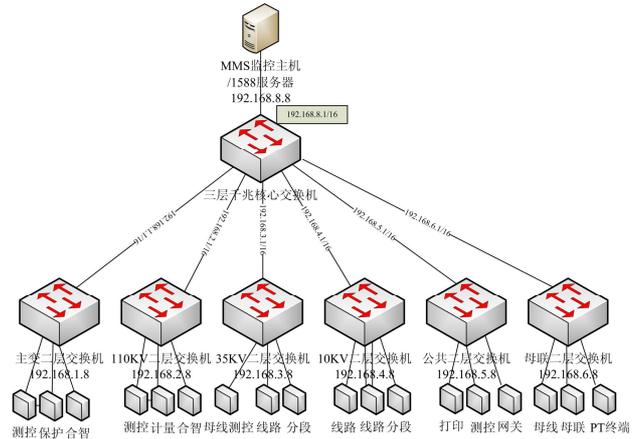


图 3 MMS 三层交换机数据隔离拓扑

Fig. 3 MMS three-layer switch data isolation topology

根据报文源 IP、目的 IP、协议、端口号、优先级、TOS、时间段、地址长度等各类信息将报文分类, 然后按配置路由转发。单播策略路由可同时配置两个下一跳或设置两个出接口, 报文转发将采用负载分担方式进行。组播策略路由只支持转发报文, 不对交换机本机产生报文进行策略路由。

单台核心交换机网络可靠性压力过大, 电压等级较高时不适用。策略路由可以极大改变三合一网络拓扑架构, 使业务流区分更明晰, 负载分担, 管理简洁, 隔离过载作用明显。据变电站等级和安全可靠性要求可分 2 路或 4 路负载分担。图 4、图 5 中下面一组交换机是百千兆类型, 数量可以根据实际情况增减。图 4、图 5 上行基于二层协议类型策略路由, MMS 是 0x0800, IEC61588 是 0x88F7, GOOSE 是 0x88B8, SV 是 0x88BA, 下行数据使用通用的 VLAN 和组播隔离。装置从同一个端口发出来的报文(MMS/GOOSE/SV/IEC61588)可以不用做任何 VLAN 标记, 简化了装置通信系统设计和配置, 使保护测控装置通用性大为提高。

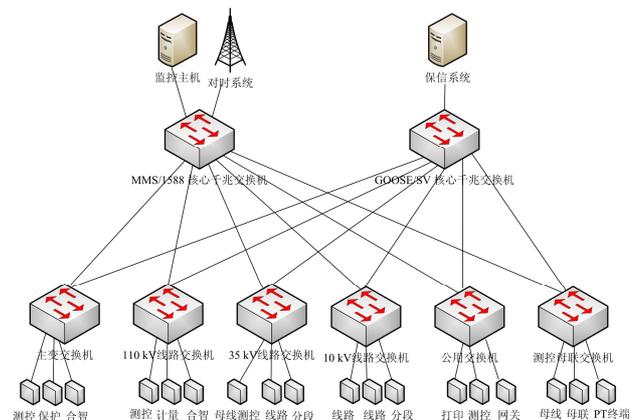


图 4 策略路由核心千兆交换机 2 路负载分担

Fig. 4 Policy routing core Gigabit switch 2 load balance

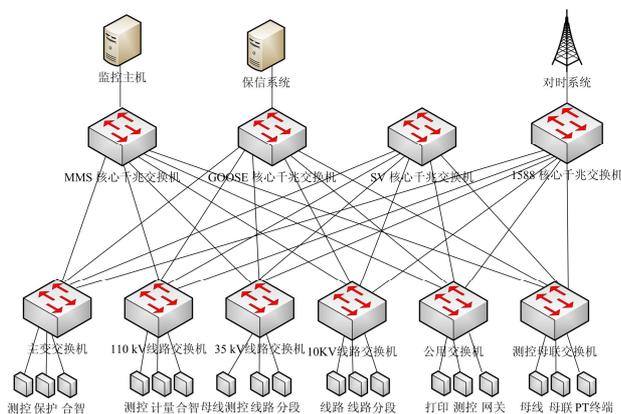


图5 策略路由核心千兆交换机4路负载均衡

Fig. 5 Policy routing core Gigabit switch 4 load balance

访问控制列表(Access Control List, ACL)是用来实现流识别功能的。网络设备为了过滤报文,需要配置一系列匹配条件对报文分类,这些条件可以是报文源地址、目的地址、协议、端口等。当设备接收报文,根据端口上应用之ACL规则对报文字段进行分析,在识别特定报文之后,根据预先设定策略允许或拒绝该报文通过。

在三合一网络中,可以使用ACL规则使各类监控主机只接受自己需要的报文,如监控主机只接受MMS报文,IEC61588授时服务器只接受IEC61588报文,丢弃其他类型报文,减少过载的影响。可使能单向通信,如控制流数据只能朝一个方向发送,这对备用网络数据较有意义。ACL条目不建议配置太多,因对所有流经报文进行识别、分类、匹配过滤、控制,条目越多网络延时影响越大。

### 3 过载监测

智能变电站建设评价新技术至少要考虑四个维度实时性、可靠性、经济性、灵活性,文献[15]中方法在网络处理器CPU软件上实现,时延与交换机不在同一个数量级,处理器功耗较高,基于过载报文具有重复性假设,在变电站中替换交换机并不经济,软件类设备接收发送业务流自身可靠性尚需保障成熟度不高。

通信设备数据流量有五个方向,交换芯片接收、转发、发送,管理CPU接收、发送,保护测控装置有接收、发送两个方向。交换芯片接收数据流时可基于不同数据流做过载抑制。转发可基于MAC、IP、策略,因市面上普通交换芯片的固化,对这部分数据流进行监测缺乏现成的函数接口,逻辑关系较为复杂,基于FPGA方案通信设备理论上可以实现但延时较大、成本较高、发热量大、工业

级成熟产品较少见。对交换芯片发送数据流,当前只是统计没有进行过载处理。过载发生时Qos能够基于优先级发送较高优先级数据,但对过载处理仍无能为力。管理CPU入口方向必须要做流量限速或称过载抑制,在CPU接收网络流量大(过载发生)时动弹不了是无法进行自诊断、自恢复和告警的。管理CPU发送最好做流量限速,实际上CPU发送管理数据流量很小,一般都没有做这个限制,当CPU有进程异常或是故障发生时,发送大量数据包到网络就成了灾难根源。过载发生时,保护测控装置十分注重对接收数据流做抑制,往往忽略自身发送数据报文抑制,先隔离控制好自身才能解决好整个过载问题。

针对过载监测,交换机端口接收、发送流量是有统计的。RMON MIB中statistics组,alarm组、event组功能,按照预定周期,查询预定相关变量。若发现超过预定阈值,则按照预定策略做过载处理,发送MMS告警信息给监控主机,文献[16]映射MIB建立了通信网络状态检测信息模型。有两种监测方式:一种是直接变量,根据alarm组中指定OID值直接定位、取值、分析,可选择偏移比较方法;另一种是非直接变量,根据alarm组中指定OID值不能够直接获得相应变量值,可选择绝对比较方法。Statistics组有足够信息变量对物理端口进行硬件统计,软件监测,包括接收和发送分类数据流,对VLAN和业务流监测需借助于交换芯片流分类引擎计量功能。

交换机对双电源之一失电,链路断开,系统致命异常是有告警的,且通过硬接线告警。因过载对网络来说是致命性故障,此时数据流量可能无法通过正常通道发出去,交换机做过载自恢复处理,通过硬接线告警,本地记日志,同时发送MMS告警信息到监控主机。若不能自恢复则进行过载隔离,切割降低过载影响范围,管理员及时处理。

### 4 过载处理

通过流量监测发现过载发生,可基于端口、VLAN、业务流做如下处理:

- (A) 隔断,永久性隔断并发送远程告警;
- (B) 阻断,根据指定隔断时长阻断,超时再重新开启通信;
- (C) 抑制,限定通过流量速率,达到丢弃多余数据包的目的;
- (D) 组合使用,阻断、开启若干次之后发现过载仍然存在,将永久隔断并发送远程告警。

在交换机上增加上述功能, 能对过载在一定条件下恢复网络通信。针对装置过载(文献[17]装置网卡损坏产生过载), 采用 A 方法隔离装置; 针对环网或协议故障, 采用 B 方法, 可短期消除过载数据流量, 二层动态协议功能正常时恢复通信, 如何与二层动态协议配合需进一步深入具体研究。若 B 方法监测到相近时间内发生过载多次(时间间隔、次数可配), 则可以使用方法 D, 阻断数据流量通信。交换机本身故障可通过相邻交换机和装置过载隔离阻断机制处理。接收方向过载抑制方法 C 功能通常是开启的, 可根据分类业务流量大小调整抑制阈值。

基于端口阻断可用 RSTP 控制底层函数设置 Blocking 状态; 基于 VLAN 阻断可用 MSTP 实例端口控制底层函数设置 Blocking 状态, 因交换芯片实例个数支持有限, 基于 VLAN 集合映射实例方法支持更多 VLAN 个数; 业务流方式阻断使用 ACL 拒绝(deny)方法。过载抑制通常是基于物理端口的, 通过流分类引擎, 可支持基于 VLAN、业务流做过载抑制。基于端口阻断还可用 disable 或 shutdown 设置端口, 此操作和拔掉网线无异。交换机上连端口或千兆骨干网络因流量较大, 仔细设计流量余量, 建议谨慎关闭主干路端口。时间超过一定时限, 近期阻断次数累计应清零。图 6 的方法不仅适应交换机端口, 还可应用于装置端口、监控主机发送过载处理, 文献[18-19]描述装置过载识别控制策略, 建议装置、交换机 CPU 每秒至多发送/接收 5 个 ARP 广播报文。

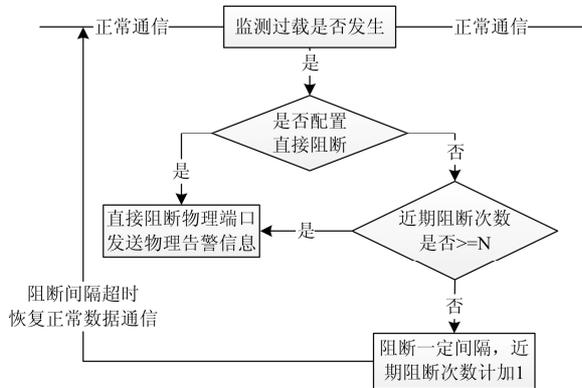


图 6 交换机过载处理

Fig. 6 Switch overload processes

## 5 结语

智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三合一网络属于新事物, 各项技术应用和网架结构处于初期和规范阶段, 通信设备和保护测控装置会随着测试工作开展而发生设计变化以适应新的需求。本文从过载

产生原因入手, 简明分析了网络拓扑、动态协议、静态配置隔离策略, 对过载进行监测, 在通信设备上发明了新的过载处理方法, 结合动态协议能够灵活隔离抑制过载。智能变电站无人值守, 在通信侧一直没有好办法从过载中自动恢复网络通信, 本文方法在一定程度上填补了智能变电站通信设备过载自恢复空白。利用现有交换机设备进行改进可靠性, 将不增加新建和改造智能变电站投资成本。抛砖引玉, 期望各设备厂商能够进一步完善创新。希望对智能变电站三合一通信设备和保护测控装置研制, 网络架构, 智能变电站实时性、可靠性、经济性、灵活性建设起规划参考作用。

## 参考文献

- [1] 欧阳帆, 刘海峰, 赵永生, 等. 智能变电站通信网络阻塞故障及其防范措施分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 7-11.  
OUYANG Fan, LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, et al. Analysis on communication network congestion occurred in smart substation and preventive measures[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 7-11.
- [2] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71.  
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [3] 苏麟, 孙纯军, 褚农. 智能变电站过程层网络构建方案研究[J]. 电力系统通信, 2010, 31(213): 10-13.  
SU Lin, SUN Chunjun, CHU Nong. Network construction scheme for process level in smart substations[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(213): 10-13.
- [4] IEC-62439 high availability automation networks[S]. 2010.
- [5] 李俊刚, 宋小会, 狄军峰, 等. 基于 IEC 62439-3 的智能变电站通信网络冗余设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 70-73.  
LI Jungang, SONG Xiaohui, DI Junfeng, et al. Communication network redundancy design of intelligent substation based on IEC 62439-3[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.
- [6] 李俊刚, 张爱民, 宋小会, 等. 并行冗余协议在智能变电站网络的应用[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 92-96.  
LI Jungang, ZHANG Aimin, SONG Xiaohui, et al. The application of parallel redundancy protocol in smart

- substation network[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 92-96.
- [7] 许铁峰, 徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.  
XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.
- [8] 丁代勇, 王利平, 王晓茹. 多播技术在低压变电站通信中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 26-29.  
DING Daiyong, WANG Liping, WANG Xiaoru. Research on application of multicast in low voltage substation communication[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 26-29.
- [9] 李晶, 段斌, 周江龙, 等. 基于 GMRP 的变电站发布 / 订阅通信模型设计[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 16-21.  
LI Jing, DUAN Bin, ZHOU Jianglong, et al. Design of a publish/subscribe communication model based on GMRP for substation communication[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 16-21.
- [10] 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 Minghui, ZHAO Xiaodong, 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.
- [11] 李广华. 数字化变电站组网技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 142-146.  
LI Guanghua. Digital substation networking technologies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 142-146.
- [12] 丁腾波, 林亚男, 赵萌. 智能变电站虚拟局域网逻辑结构划分方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 115-119.  
DING Tengbo, LIN Yanan, ZHAO Meng. Research of the virtual local area network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 115-119.
- [13] 徐春霞, 张艳霞, 葛跃田. 智能变电站过程层网络数据流的分析与研究[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 153-159.  
XU Chunxia, ZHANG Yanxia, GE Yuetian. Analysis and study on intelligent substation process level network data stream[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 153-159.
- [14] 许婷. 220 kV 变电站全站通讯中断事故的分析及预防[J]. 电力安全技术, 2012, 14(2): 31-33.  
XU Ting. 220 kV substation total station communication outage accident analysis and prevention[J]. Power Safety Technology, 2012, 14(2): 31-33.
- [15] 黄曙, 马文霜, 陈炯聪, 等. 智能变电站网络风暴的监测和过滤算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 68-72.  
HUANG Shu, MA Wenshuang, CHEN Jiongcong, et al. Research on the network storm monitoring and filtering algorithm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 68-72.
- [16] 朱林, 王鹏远, 石东源. 智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 87-92.  
ZHU Lin, WANG Pengyuan, SHI Dongyuan. Status monitoring information model and configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 87-92.
- [17] 曾瑞江, 梁晓兵, 高新华. 变电站自动化系统网络故障分析[J]. 广东电力, 2008, 21(1): 42-46.  
ZENG Ruijiang, LIANG Xiaobing, GAO Xinhua. Analysis of network malfunction of substation automation system[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(1): 42-46.
- [18] 朱来强, 陈新之, 高志勇. 数字化变电站中广播风暴的防治[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 98-101.  
ZHU Laiqiang, CHEN Xinzhi, GAO Zhiyong. Prevention of digital substation broadcast storm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 98-101.
- [19] 浮明军, 刘秋菊, 左群业. 智能变电站网络风暴测试研究[J]. 现代电力, 2013, 30(3): 85-89.  
FU Mingjun, LIU Qiuju, ZUO Qunye. Research on the network storm testing of smart substation[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(3): 85-89.

收稿日期: 2015-04-13; 修回日期: 2015-06-05

作者简介:

张宪军(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统通信技术、自动化; E-mail: xianjun-zhang@sac-china.com

刘颖(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、通信技术;

余华武(1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、通信技术。

(编辑 姜新丽)