

DOI: 10.7500/AEPS20130903005

交换机流量限制技术及其在智能变电站的应用

周旭峰¹, 杨 贵¹, 袁志彬², 王文龙¹, 刘明慧¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102;

2. 国网吉林省电力有限公司松原供电公司, 吉林省松原市 138000)

摘要: 交换机具备的流量限制和风暴抑制功能,在智能变电站网络中具有重要的应用价值。在分析智能变电站网络结构、报文类型和流量特征基础上,论述了过程层网络化带来的问题和解决思路。介绍了现有交换机风暴抑制功能及其不足,提出了智能变电站网络流量限制应具备的功能。基于交换机数据处理流程,详细分析了基于内容感知处理器(CAP)的流量限制技术及其特点。通过搭建智能变电站三网合一网络仿真测试环境,验证了基于 CAP 的流量限制方案,并展望其在智能变电站的应用前景。

关键词: 智能变电站; 交换机; 流量限制; 网络风暴; 内容感知处理器(CAP)

0 引言

智能变电站以全站信息数字化,通信平台网络化,信息共享标准化为基本要求,分为站控层、间隔层和过程层,各层采用基于 IEC 61850 标准的以太网方式进行通信^[1-3]。

通信网络在智能变电站系统中发挥着至关重要的作用,然而,以太网技术本身的一些问题也影响着站内系统的安全与性能,如网络风暴、网络拥塞、流量管理和控制等。为避免系统性风险,必须做好变电站网络的规划设计,应使用具备风暴抑制和流量管理功能的专用交换机^[4],并采用合适的网络架构和流量管控措施^[5-8]。但现有方式无法完全解决信息共网传输带来的流量控制问题。本文将分析智能变电站的流量控制需求,介绍交换机流量限制技术,提出其在智能变电站的实施方法,并展望应用前景。

1 智能变电站网络特点分析

1.1 智能变电站网络的逻辑结构

根据协议的差别,可将智能变电站通信网络从逻辑上分为 4 张网:制造报文规范(MMS)网,在间隔层和站控层设备间传输监控信息;通用面向对象变电站事件(GOOSE)网,在过程层设备和间隔层设备间传输变位、控制以及其他信息;采样值(SV)网,在过程层设备和间隔层设备间传输采样值信息;对时网络,在各层装置以及交换机之间传输 IEEE 1588 等对时报文。GOOSE 网和 SV 网统称为过

程层网络。

1.2 智能变电站网络的物理结构

智能变电站的物理网络是其逻辑网络的物理映射,实现逻辑网络的具体功能。例如:“三层两网”是智能变电站网络采用的典型物理结构,如图 1 所示。

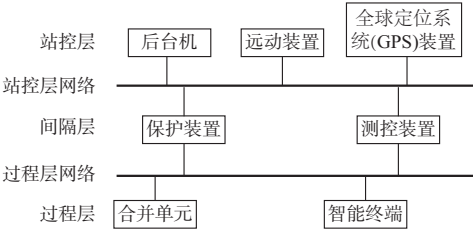


图 1 智能变电站网络物理结构
Fig.1 Physical network structure of smart substation

逻辑上的 MMS 网映射到站控层网络,GOOSE 和 SV 网共同映射到过程层网络,对时网络则同时映射到站控层和过程层 2 个物理网络上。也可采用其他的网络物理结构,“多网合一”形式的网络结构正在研究和应用,如“三网合一”方式就是通过一张物理网络实现 MMS,GOOSE 和 SV 共网传输。

1.3 网络报文类型和流量特征

基于 TCP/IP 协议的 MMS 报文,采用单播方式传输,流量不大但会有波动。过程层的 GOOSE 和 SV 报文都采用二层组播方式传输,GOOSE 流量通常很小,在发生故障时会突然增大,SV 流量非常大但很稳定,除非装置异常,不会突变。IEEE 1588 对时协议同样采用组播方式传输,流量小且不会发生突变。上述报文类型和流量特征如表 1 所示。

表 1 智能变电站报文类型和流量特征
Table 1 Types and flow characteristics of message
in smart substation

比较项目	流量特征			
	MMS	GOOSE	SV	IEEE 1588
传输模式	单播	组播	组播	组播
协议层次	三层	二层	二层	二层
流量大小	一般	较小	很大	很小
流量波动	一般	很大	无	很小

1.4 网络相关问题及解决思路

网络带宽的竞争问题:在最大带宽一定,且裕度有限的条件下,当某些数据流量波动较大时,必然侵占其他数据的带宽,并可能导致通信异常。

网络风暴问题:采用星形网络能可靠避免环形网络在极端(环网协议失效)情况下带来的网络风暴问题,却无法避免由于网络设备本身异常或网络攻击导致的风暴(流量突增)。

当前通常采取如下防范措施。

1)针对不同报文对带宽的竞争问题,可采取网络规划措施,如使用虚拟局域网(VLAN)、静态组播等形式在交换机上进行流量区分和管理,力求各类报文各行其道,互不影响。

2)针对网络风暴问题,利用交换机的风暴抑制功能,如开启广播、组播和未知单播的风暴抑制功能,防止异常流量对网络的冲击。

2 交换机网络风暴抑制功能

网络风暴抑制功能可以在一定程度上抑制网络风暴的发生。

2.1 交换机网络风暴抑制功能及其应用

当前主流工业以太网交换机都支持广播、组播和未知单播的风暴抑制。交换机可配置是否启用该功能,并可以针对每种报文类型设定流量阈值。当某种(如广播)报文的流量超过设定值,交换机会部分丢弃这类报文,确保该类报文流量不超过阈值。

例如在 MMS 网上,为避免装置或后台发出的广播报文(如地址解析协议(ARP)报文)流量过大,引起网络异常,在考虑正常流量并留有余量的情况下,开启交换机广播风暴抑制,就能有效控制广播报文的总量。

2.2 风暴抑制功能的不足

风暴抑制功能只能根据目的 MAC 地址类型(广播、组播和单播)区分报文,不能精确匹配报文字段(如 MAC 地址、报文类型等),导致拥有相同地址类型但具体地址和协议都不同的报文之间无法区分、相互干扰,无法实现对流量的精确控制。

在三网合一条件下,控制目标是分别控制

GOOSE,SV 和 MMS 的流量:当 GOOSE 报文流量发生突变时,希望控制其流量,以保障 SV 和 MMS 的正常传输;更好的控制方法是直接限制流量发生突变的那一条 GOOSE 报文流,以保证其他正常流量的 GOOSE 报文的传输。该原则同样适合于 SV 和 MMS 的流量控制。

然而,GOOSE,SV 同属组播报文,MMS 则是单播报文,利用现有交换机的风暴抑制功能无法实现上述控制目标。

2.3 流量限制功能深化

采用 VLAN 等手段进行流量区分和管理,虽然可以实现逻辑网段间的隔离,但流量汇聚口,如交换机级联口、录波器采集口,无法有效隔离以消除不同数据流的相互干扰。

综上所述,风暴抑制和流量限制功能,至少应包含如下 2 个方面。

1)传统意义上的广播、组播和未知单播的风暴抑制功能。

2)针对报文特定字段的识别,并进行流量限制的功能,例如:针对目的 MAC 地址(可区分 GOOSE,SV)、以太网类型(可区分 MMS)进行识别并限制流量。

3 基于内容感知处理器的流量限制技术

3.1 交换芯片的数据处理过程

交换芯片的报文处理流程可分为报文接收、内部调度和报文发送 3 个处理过程,如图 2 所示。

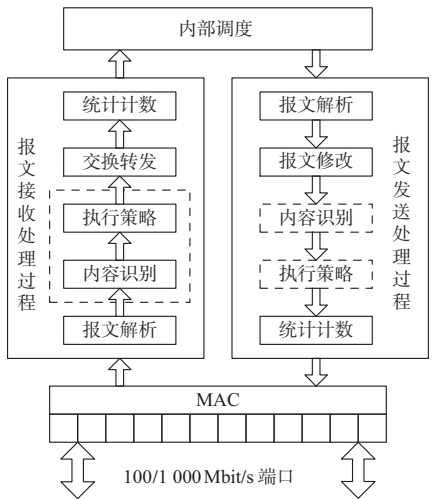


图 2 交换芯片数据处理过程
Fig.2 Data processing flow of switch

3 个处理过程及其子过程具有下述功能。

报文解析,解析和保存报文的各个字段信息,如目的、源 MAC 地址,报文类型、目的、源 IP 地址等。

内容识别,对报文内容进行识别和过滤,完成如访问控制列表(ACL)、服务质量(QoS)等典型功能,并可与计数器配合,实现流量统计和限速功能。

执行策略,根据内容识别的结果,按照预先设定的策略对报文进行相应的操作,如丢弃报文、修改优先级、重定向等。

交换转发,学习源 MAC 地址,处理 VLAN/优先级标签,根据 VLAN、目的 MAC 地址等信息进行报文的转发。

统计计数,统计接收、发送的报文数、字节数等信息。

内部调度,根据交换转发的结果,将接收队列里的报文拷贝(或指向)到相应的发送队列中。

报文修改,根据前面各过程对报文的处理结果,修改报文内容,如 VLAN 标签、优先级等。

图 2 所示报文发送处理过程中,“内容识别”和“执行策略”用虚线标识,原因是只有部分功能较强的交换芯片可能在报文发送处理过程中包含这 2 个功能。

3.2 基于内容感知处理器的流量限制技术分析

利用图 2 所示报文接收处理过程虚线框内的“内容识别”和“执行策略”2 个过程可以辨识报文的各种特征,并进行流量统计,当超过设定流量后,执行丢弃策略,实现流量限制。

上述过程在交换芯片中的处理模块称为内容感知处理器(CAP),其主要为实现 ACL、QoS 等功能而设计。利用 CAP 的组件对报文进行过滤、计量以及执行相应动作可实现灵活而强大的流量限制功能。

以一款某公司的主流交换芯片的 CAP 功能为例,介绍 CAP 组件和处理流程,如图 3 所示,其中,CA 为 content aware 的缩写。

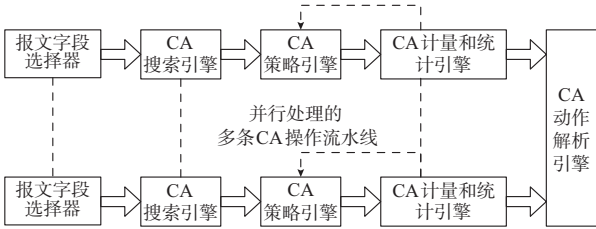


图 3 CAP 的组件和处理流程
Fig.3 Components and processing flow of CAP

当前常用的以太网数据帧包括以太网 II 帧和 IEEE 802.3 帧,结构如图 4 所示。

2 种帧格式都包含了目的和源 MAC 地址;以太网 II 帧的 12,13 字节为报文类型,IEEE 802.3 帧的则为报文长度;从 14 字节往后是数据段;最后是

循环冗余校验码(CRC)。此外,如果带 VLAN 标签,其格式和位置已在图中给出。

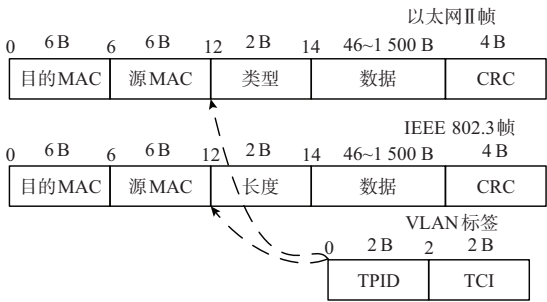


图 4 以太网 II 帧和 IEEE 802.3 帧结构
Fig.4 Structure of Ethernet II and IEEE 802.3 frame

以太网数据帧明确位置的字段都可以被交换芯片识别,如目的和源 MAC 地址,报文类型,它们可作为报文字段选择器(PFS)的目标。三层报文(如 IP 报文)的目的和源 IP 地址等内容也可以被交换机解析,同样可以作为 PFS 的目标。PFS 将选定的目标作为匹配条件保存到交换机的内容可寻址存储器(CAM)中。

报文进入交换机后,经过解析,关键字段被识别和保存。CA 搜索引擎(CALE)利用这些字段在 CAM 中进行条件匹配,返回第 1 个命中的条目。

基于 CALE 以及 CA 计量和统计引擎(CAME)的返回结果,CA 策略引擎(CAPE)为每个命中条目指定动作策略(可以指定多个动作策略),例如:修改报文优先级、重定向或者丢弃等操作。

CAME 使用“漏桶”原理对接收报文的流量进行计量和统计,并将结果反馈给 CAPE,确定下一步对报文执行的操作。

“漏桶”原理是流量计量采用的基本测速机制,有多种实现方式,如单令牌桶、单速三色标记^[9-10]、双速三色标记^[11]等。本文以图 5 所示单令牌桶为例介绍“漏桶”的基本原理。图中,CIR 表示指定信息速率,CBS 表示指定突发大小。

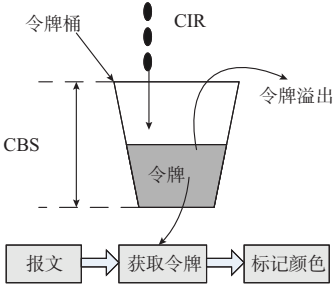


图 5 令牌桶的限速原理
Fig.5 Rate limiting principle of token bucket

初始状态下,令牌桶填满。令牌以固定速率

CIR 填入大小为 CBS 的令牌桶中。当令牌数量小于 CBS 时,令牌数累加,当令牌数量超过 CBS,令牌溢出,数量不再增长。

对报文进行测速计量时,CAME 以字节(或包)为单位申请相应数量的令牌。如果令牌桶中有足够多的令牌,则申请成功,报文标记为绿色,同时令牌桶中减去相应数量的令牌;如令牌数量不够,则申请失败,报文标记为红色。报文颜色作为流量计量的结果反馈到 CAPE。

CA 动作解析引擎(CARE)从 CAPE 获取对报文的动作策略并执行这些操作。当命中条目对应多个操作时,CARE 根据规则执行部分或全部操作。

通过上述 CAP 功能,可以灵活地处理各种报文,达到预期的控制效果。

基于 CAP 功能实现流量限制需要对交换芯片进行如下配置。

- 1)设置流量控制的目标报文字段,如目的 MAC 地址、报文类型等。
- 2)设置流量计量中“漏桶”的 CIR 和 CBS 值。从应用角度理解,CIR 为“平均流量”,CBS 为“突发流量”。
- 3)设置控制策略,当报文通过计量后标记为红色,则丢弃,否则转发。

3.3 基于 CAP 的流量限制技术的特点

CAP 的处理过程由交换芯片的硬件完成,且具有多条并行流水线,经过实际产品测试,端口速率仍然可达线速,吞吐量达到 100%。

当瞬时流量超过设定平均流量时,由于“漏桶”中缓存有令牌,流量继续增大。当“漏桶”中的令牌(数量为突发流量)消耗完毕,流量将下降到设定平均流量的水平。限速对报文流的整形效果如图 6 所示。

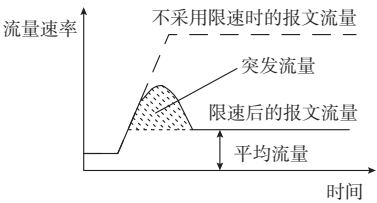


图 6 限速对报文流的整形效果

Fig.6 Shaping effect of rate limiting performed on packets stream

通过配置不同目标报文字段,可以区分各种类型的报文,实现足够精确的流量控制。

交换芯片的 CAM 容量至少能达到 1 000 条,完全可以满足应用需求。

3.4 流量限制的工程化实施

流量限制的原则是精确控制突发报文的流量,

避免其影响正常通信。工程化实施必须遵循该原则,同时易于操作。

为精确控制 GOOSE/SV 的流量,应选择目的 MAC 地址作为目标字段进行流量限制。

按目的 MAC 地址统计站内 GOOSE/SV 的数量,大型变电站中可能超过 100 个,流量限制的工程配置工作量很大。结合智能变电站网络流量管理方式考虑^[5],可采用静态组播形式进行流量管理,配置一条静态组播信息的同时设置相应的流量限制阈值。相对采用 VLAN 方式进行数据流管理,然后单独配置流量限制阈值的方式,有效减少了工作量。

GOOSE 的平均流量很小,但有较大的波动,因此配置流量限制阈值时,平均流量值可设置较小,突发流量值稍大。

SV 为均匀数据流,流量限制的平均流量值应略高于实际带宽,突发流量值很小。

MMS 基于 TCP/IP 协议,具有一定的容错和恢复能力,允许其在遭遇 MMS 网内部网络风暴时通信中断,风暴停止后,恢复即可。

MMS 流量限制的工程实施方式为限制协议类型为 0x0800(IP 协议)报文的流量,平均流量满足实际需求,突发流量取较小值。

4 仿真测试和应用探讨

4.1 仿真测试

针对智能变电站 GOOSE,SV,MMS 三网合一的应用需求,搭建网络模拟测试环境,如图 7 所示。

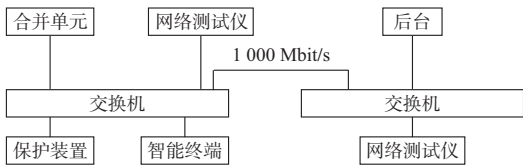


图 7 三网合一网络模拟测试环境

Fig.7 Simulation test environment for integration of three networks

测试环境中,保护装置支持三网合一功能,GOOSE,SV 和 MMS 采用共口传输方式。合并单元发送 SV,目的 MAC 地址为 01:0c:cd:01:04:01,长度 200 B,按 4 000 点/s 发送,实际速率为 6.4 Mbit/s。智能终端发送 GOOSE,目的 MAC 地址为 01:0c:cd:01:00:01,一般情况下只发送 GOOSE 心跳,平均流量很小(不超过 10 kbit/s)。后台与保护装置采用 MMS 协议通信,报文类型为 0x0800(IP 报文),平均流量较小(不超过 100 kbit/s)。

两台网络测试仪分别接入两台交换机,模拟产

生 GOOSE,SV 和 MMS 突发流量。模拟 GOOSE 的目的 MAC 为 01:0c:cd:01:00:02,模拟 SV 的目的 MAC 为 01:0c:cd:01:04:02。

两台交换机使用 1 000 Mbit/s 光口连接,采用统一的流量限制配置:MMS 报文,按协议类型进行流量限制,平均流量设置为 1 000 kbit/s,突发流量 100 kbit/s;GOOSE 和 SV 报文都按目的 MAC 地址进行流量限制,地址 01:0c:cd:01:00:01 和 01:0c:cd:01:00:02 的 GOOSE 报文,平均流量设置为 100 kbit/s,突发流量 200 kbit/s,地址 01:0c:cd:01:04:01 和 01:0c:cd:01:04:02 的 SV 报文,平均流量设置为 8 000 kbit/s,突发流量 50 kbit/s。

测试中,利用网络测试仪模拟以下网络异常情况:MMS 风暴,流量 50 Mbit/s,持续时间 10 s;GOOSE 雪崩,流量 10 Mbit/s,持续时间 10 s;SV 风暴,流量 50 Mbit/s,持续时间 10 s。

在网络风暴条件下,保护装置的保护功能正常运行,无“采样异常”或“GOOSE 断链”告警。保护与后台间的 MMS 通信受到 MMS 风暴的影响而中断,风暴结束后恢复。

4.2 应用探讨

在智能变电站 GOOSE,SV 和 MMS 三网合一的条件下,流量控制的目标是分类控制报文流量,使它们“各行其道,互不干扰”。通过仿真测试可以证明,采用基于 CAP 的交换机流量限制技术能区分不同类型报文,并分别限制其流量,满足三网合一的流量控制要求。

2013 年初开始,中国电力科学研究院组织多个厂家开展了新一代智能变电站组网方案相关的测试。具备流量控制功能的交换机进行了试验,取得了预期的效果。

关于 GOOSE、SV、MMS 三网合一,以及包括 IEEE 1588 的四网合一的技术探讨和应用实践正在逐步开展。基于 CAP 的流量限制技术为“多网合一”提供了有力的技术支撑,其应用价值和前景值得期待。

5 结语

将 CAP 流量限制技术与广播、组播和未知单播的风暴抑制技术相结合,可以很好地满足智能变电站网络的流量限制需求,其在智能变电站网络中的应用实践将逐步展开。

参考文献

- [1] Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则[S].北京:国家电网公司,2009.
- [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] 吴在军,胡敏强.基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究[J].电网技术,2003,27(10):61-65.
WU Zaijun, HU Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65.
- [4] 王文龙,杨贵,刘明慧.智能变电站过程层交换机的研制[J].电力系统自动化,2011,35(18):72-76.
WANG Wenlong, YANG Gui, LIU Minghui. Development of the switch used in process level of smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 72-76.
- [5] 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.
- [6] 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(7):10-13.
SU Lin, SUN Chunjun, CHU Nong. Network construction scheme for process level in smart substation [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(7): 10-13.
- [7] 刘昊昱,左群业,张保善.智能变电站过程层网络性能测试与分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):112-116.
LIU Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Process level network performance testing and analysis in smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.
- [8] 王文龙,刘明慧.智能变电站中 SMV 网和 GOOSE 网共网可能性探讨[J].中国电机工程学报,2011,31(增刊 1):55-59.
WANG Wenlong, LIU Minghui. Research on the shared-network of SMV and GOOSE in smart substation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(Supplement 1): 55-59.
- [9] 魏小曼,董喜明.一种改进的单速三色令牌桶算法及其实现[J].光通信研究,2012(1):25-27.
WEI Xiaoman, DONG Ximing. An improved arithmetic for single-rate three-color marker and its implementation[J]. Study on Optical Communications, 2012(1): 25-27.
- [10] HEINANEN J, GUERIN R. RFC 2697: a single rate three color marker[R]. 1999.
- [11] HEINANEN J, GUERIN R. RFC 2698: a two rate three color marker[R]. 1999.

周旭峰(1983—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:网络通信、变电站自动化系统。E-mail:zhouxf@nari-relays.com

杨贵(1976—),男,硕士,工程师,主要研究方向:网络通信、变电站自动化系统。

袁志彬(1972—),男,高级工程师,主要研究方向:电网调度运行及其自动化。

(编辑 代长振)

Rate Limiting Technology of Switch and Its Application in Smart Substation

ZHOU Xufeng¹, YANG Gui¹, YUAN Zhibin², WANG Wenlong¹, LIU Minghui¹

(1. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Songyuan Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: Switch supports rate and storm limiting functions, which have significant application value in the smart substation network. Based on an analysis of network structure, message types and the flow characteristics of the smart substation, problems brought about by the networked process layer and their solutions are discussed. The storm limiting function and its inadequacy are described, and the functional requirements for rate limiting of smart substation network are proposed. In accordance with the data processing flow chart of the switch, the rate limiting technology based on the content aware processor (CAP) and its features are analyzed in detail. The rate limiting solution based on CAP is verified through tests in the simulation environment of three-in-one net for smart substation. The prospects for application of the rate limiting solution in smart substation are discussed.

Key words: smart substation; switch; rate limiting; network storm; content aware processor (CAP)