

基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真

张志丹, 黄小庆, 曹一家, 何杰, 杨漾
(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Comprehensive Data Flow Analysis and Communication Network Simulation for Virtual Local Area Network-Based Substation

ZHANG Zhidan, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, HE Jie, YANG Yang
(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Based on IEC61850 standard, various typical data flows of digital substation are analyzed and generalized; by use of unambiguous mathematical model the data flows are described in detail; finally the data packet generation diagram of various messages is obtained. Taking typical substation D2-1 specified by IEC 61850-5 for example, the detailed description of various data flows in it and their flow volumes are given; using OPNET software and applying priority based tag technology, the simulation analysis of integrated communication network for integrated substation based on virtual local area network (VLAN) is performed to further research the configuration method and the principle of VLAN in substation communication network, and the comparative study on star network with and without VLAN is carried out. Research results show that the network resource competition in substation and some security problems can be well solved by VLAN.

KEY WORDS: digital substation; IEC 61850; data flow analysis; OPNET simulation; virtual local area network (VLAN)

摘要: 根据 IEC61850 标准, 归纳分析了数字化变电站内的各种典型数据流, 运用明确的数学模型对其进行了详细描述, 最终得出各类报文的数据包生成图。以 IEC 61850-5 规定的 D2-1 典型变电站为例, 对其中存在的各种数据流及其流量大小进行了详细说明; 利用 OPNET 仿真软件, 应用优先级标签技术, 对基于虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)的集成型变电站综合通信网络进行了仿真分析, 进一步研究了变电站通信网络中 VLAN 的配置方法和原则, 对有无 VLAN 的星型网络进行了对比研究。结果表明, VLAN 技术可以较好地解决变电站中的网络资源竞争以及部分安全性问题。

关键词: 数字化变电站; IEC 61850; 数据流分析; OPNET 仿真; 虚拟局域网

0 引言

基于 IEC 61850 的数字化变电站以二次设备的数字化和网络化作为其主要特征之一^[1], 这意味着通信网络将贯穿整个变电站自动化系统。因此, 在任何故障和非故障情况下, 其通信网络的可靠性和实时性都必须得到保证。

利用 OPNET 软件, 国内外学者针对变电站通信网络的可靠性和实时性开展了不少研究^[1-7]。文献[8]提出了基于优先级标签的变电站信息传输方案, 指出通过对报文设置优先级可以减小重要报文的传输时延。文献[9]研究了基于弹性分组的变电站通信系统实时性, 得出了弹性分组环中传输时延上界的计算方法。文献[10]的研究结果表明 100 Mbit/s 的交换式以太网可以满足变电站内绝大多数自动化功能的需要。文献[11]遵循 IEC 61850-9-2, 研究了采样值发送和接收应用程序的开发过程和实现方法。但已有研究仍存在一定不足: 1) 大部分研究对数字化变电站内各种典型数据流缺乏严格的理论分析, 使得已有仿真结果跟变电站的实际情况相比还存在一定误差; 2) 没有文献定量分析 VLAN 技术对变电站典型数据流的影响, 对 VLAN 的配置方法和原则也缺乏深入研究。因此, 有必要对数字化变电站中各种数据流建立明确的数学模型, 并基于这些模型进行流量计算和仿真研究。而对 VLAN 作用机理的深入研究将为其在变电站中的实际应用提供参考。

本文运用明确的数学模型针对数字化变电站中的各种数据流进行描述, 得出了周期性、随机性和突发性 3 类数据的包生成图。同时, 以 D2-1 型变电站为例, 分析了 VLAN 的配置方法和原则, 对

有无 VLAN 的星型网络进行了对比仿真研究, 讨论了 VLAN 对变电站中报文传输的影响。

1 数字化变电站中数据流的分析与建模

1.1 周期性数据流

根据数字化变电站的实际运行情况, 周期性数据流包括 2 类, 如表 1 所示。

表 1 周期性数据流分类

Tab. 1 Cyclic data flow classification

周期性数据	数据流向	数据特点
采样值报文	合并单元至间隔层 保护与控制设备	相对稳定, 量大, 时间要求严格
开关状态与 设备状态信息	间隔层至站控层	相对稳定, 属中速报文

周期性数据属于典型的时间驱动型数据, 即报文按预定时间定时触发, 报文大小和分组长度也可事先确定, 一般为定长。因此, 可用到达间隔时间具有一定周期性、长度为定长的周期性报文来模拟。

设 L 为周期性数据流报文的长度, P_l 为数据流产生的周期或到达间隔时间, T_l 为报文端到端时延, D_l 为报文从产生至到达目的节点所允许的最大时延。由此可得出周期性数据流 M_l 的数学模型:

$$M_l = (L, P_l, T_l, D_l) \quad (1)$$

根据 IEC 61850-5 的规定, 对于过程层的采样数据, 报文的端到端时延上限为 $D_l = 4 \text{ ms}$, 如果报文不能在规定的时限内传送至目的地, 轻则影响系统性能, 重则造成灾难性后果。因此, 周期性数据流还具有如下的时间约束:

$$T_l \leq D_l \quad (2)$$

周期性数据流的包生成图如图 1 所示。

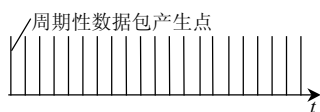


图 1 周期性数据流的包生成图

Fig. 1 Cyclic data flow packet generation diagram

1.2 随机性数据流

随机性数据流主要包括 2 类, 见表 2。随机性数据属于典型的外部事件驱动数据, 由外部事件触发(如发生故障)。数据到达从时序上观察具有如下特征: 在任意一段时间内, 数据以概率 P 出现一个报文分组, 长度可固定也可随时间变化, 数据前后到

表 2 随机性数据流分类

Tab. 2 Stochastic data flow classification

随机性数据	数据特点
开关操作命令、跳闸命令, 保护功能联锁、电容器投切, 变压器分接头调整、时间同步等	数据长度短, 持续时间短, 快速报文
保护定值修改, 事件记录查看, 录波数据传输, 文件传输等	长度较长, 量大, 实时性要求较低

达情况无任何相关性, 即在 2 个互斥(不重叠)的时间段内到达报文的数目相互独立。由随机过程的相关知识可知, 可以用 Poisson 过程来近似。

考虑时间段 $[s, s+t]$, 设 λ 为报文的平均到达率, 即单位时间内到达的平均报文个数, $N(t)$ 为报文到达的总个数, 则在间隔 t 内有 k 个报文到达的概率服从参数为 λ 的 Poisson 分布, 即对任意 $s, t \geq 0$, 有^[6]

$$P\{N(t+s) - N(s) = k\} = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad (3)$$

而对于报文到达概率服从参数为 λ 的 Poisson 分布, 其报文到达时间间隔将服从参数为 $1/\lambda$ 的负指数分布, 其分布密度函数为

$$g(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4)$$

随机性数据流的包生成图如图 2 所示。

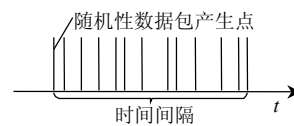


图 2 随机性数据流的包生成图

Fig. 2 Stochastic data flow packet generation diagram

1.3 突发性数据流

突发性数据流主要是故障情况下间隔层设备上上传的保护动作信息、开关变位信息, 即面向通用对象的变电站事件 (generic object oriented substation event, GOOSE) 信息, 以及事件顺序记录(sequence of event, SOE) 信号, 传输时间需满足快速(中速)报文要求。这类数据报文一般长度较短, 数据量较小, 但要求传输的时间集中, 具有典型的突发性特点^[6]。

从时序上观察, 这类数据在任一时段内不是简单地以概率值 λ 出现, 还受以前数据到达情况的影响, 如只有在故障下保护设备和开关动作以后才会产生上述 GOOSE 信息流。这类突发数据表现出一个共同点——自相似性。

研究表明, 重尾分布和 ON/OFF 模型能比较好地解释自发性数据流产生的原因^[12]。假定单个数据源的 ON 状态持续时间为 $\tau(i)$, 其分布函数为

$$P(\tau > t) = t^{-\alpha}, \quad t \rightarrow \infty, 1 < \alpha < 2 \quad (5)$$

即 $\tau(i)$ 服从最简单的重尾分布——Pareto 分布。OFF 状态的持续时间为 $\theta(i)$, 其分布函数为服从 Poisson 过程的负指数分布:

$$P(\tau > t) = e^{-\lambda t}, \quad t \rightarrow \infty \quad (6)$$

可以证明^[13], 只要 ON 或 OFF 状态持续时间长度分布函数有一个为重尾分布, 无限多个该类 ON 或 OFF 数据源叠加以后, 即形成具有自相似特性的突发性数据流。突发性数据流的包生成图见图 3。

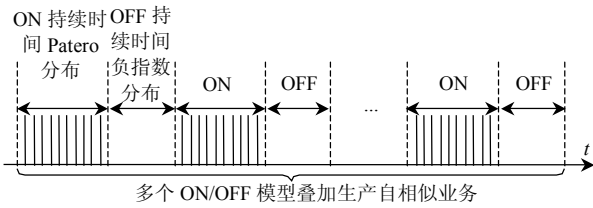


图 3 突发性数据流的包生成图

Fig. 3 Unplanned data flow packet generation diagram

2 基于 VLAN 的变电站数据流分析

2.1 典型变电站系统结构

通常可将变电站内的智能电子设备(intelligent electronic device, IED)分为 3 类^[2], 分别是断路器 IED、合并单元(merging unit, MU) IED、P&C(保护与控制)IED。MU IED 负责处理来自电子式互感器的电压、电流采样值, 并将其传送至过程总线; 断路器 IED 负责控制断路器的开闭, 并监测断路器的状态, 在故障情况下, 它接收来自 P&C IED 的跳闸命令, 同时通过过程总线, 发送状态变化信息至相应的 P&C IED; P&C IED 位于每个间隔单元中, 负责接收采样值(sampled analog value, SAV)报文同时发送跳闸命令。

以 220 kV 的 D2-1 类型变电站作为仿真研究对象, 其单线图如图 4 所示。该变电站包括 2 个变压器间隔(T1 和 T2)、1 个母线间隔(S)和 6 个馈线间隔(F1—F6)。其中, 每个变压器间隔包括 1 个 MU IED、

2 个断路器 IED 和 2 个 P&C IED, 母线间隔包括 1 个 MU IED、1 个断路器 IED 和 1 个 P&C IED, 每个馈线间隔包括 1 个 MU IED、1 个断路器 IED 和 2 个 P&C IED。各间隔内部 IED 设备通过交换机互联, 各间隔交换机连接中央交换机, 实现与站控中心的通信。

2.2 典型变电站综合仿真的数据流分析

数据流分析是仿真的前提与基础, 而理论上的流量计算也能为仿真提供参考。本论文的通信网络仿真将基于以下数据流分析和理论上的流量计算而展开。特别地, 图 5 为配置了 VLAN 以后的 D2-1 型变电站数据流图。如果没有设置 VLAN, 由于采样值报文采用广播方式发送, 因此每一个 P&C IED 将收到所有 MU IED 发送的 SAV 报文, 对应图 5 中每个 MU IED 都将有指向所有 P&C IED 的箭头。

1) MU IED 到 P&C IED 的数据流。

设每一个间隔内的 MU IED 按一定的频率向本间隔内的 P&C IED 发送周期数据(SAV 报文), 数据采用广播方式发送。IEC 61850-9-1 中规定的针对原始采样数据的以太网通信帧格式如图 6 所示。

假设变压器间隔的 MU IED 发送的报文中, 每个应用协议数据单元(application protocol data unit, APDU)包括 2 个应用服务数据单元(application service data unit, ASDU), 即包含有 2 个电压和电流

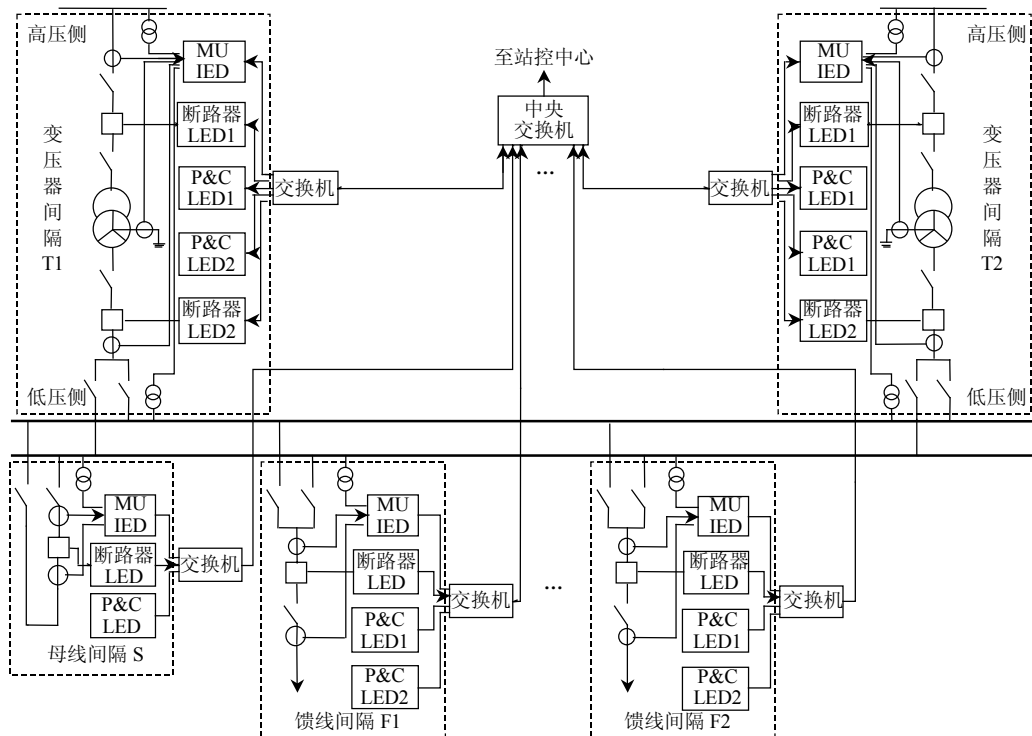


图 4 典型 220 kV 变电站单线图

Fig. 4 Typical 220 kV substation single line diagram

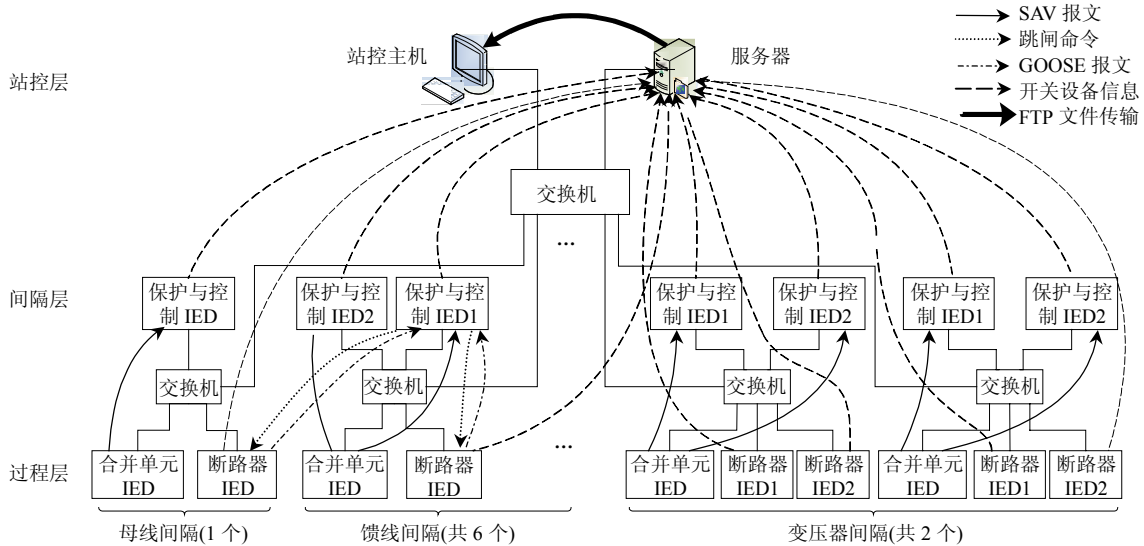


图 5 基于 VLAN 的 D2-1 型变电站数据流图

Fig. 5 VLAN based D2-1 type substation data flow diagram

8	6	6	4	2	2	2	2	2	2	2	4
以太网报头	目的地址	源地址	优先级标记	以太网类	APP ID	长度	保留 1	保留 2	APDU	必要的填充字节	FCS 帧校验序列
MAC 报头				以太网类型 PDU							
↓											
2	2	46	46	46	23						
ASN.1 标记和长度	ASDU 数目	ASDU1	ASDU2	ASDU _n	状态量数据量						
APDU											

图 6 SAV 报文以太网帧格式

Fig. 6 Ethernet frame format for SAV

值采样数据集，由此可推算出 MU IED 发送的最大报文长度为 159(即 8+6+6+4+ 2+8+2+2+46×2+23+6) 字节，再加上 12 字节帧间隔，一共是 171 字节，1 368 bit，采样率设为 80 点/周期^[14]，从而数据流量为 80×50×1 368 = 5.472 Mbit/s。

母线间隔和馈线间隔内的 MU IED 发送的报文中，每个 APDU 包含 1 个 ASDU，由此可推算出这 2 个间隔内的 MU IED 发送的最大报文长度为 113 字节，再加上 12 字节帧间隔，一共是 125 字节，1 000 bit，从而数据流量为 80×50×1 000=4 Mbit/s。

2) 断路器 IED、P&C IED 到服务器的数据流。

所有间隔内的断路器 IED 和 P&C IED 向站控层服务器传送设备状态信息，以 20 ms 的固定周期定时发送，数据大小为 256 字节，数据流量为 50×256×8 = 102.4 kbit/s。

3) P&C IED 到断路器 IED 的数据流。

一个馈线间隔内的 P&C IED 向本间隔内断路器 IED 发送跳闸命令，同时还向母线间隔内的断路器 IED 发送跳闸命令，表示跨间隔的保护和控制命令传送，以模拟实际故障情况下不同间隔内开关的联动。跳闸报文大小为 16 字节，报文到达服从 λ=500 的 Poisson 分布，因此报文到达的平均间隔

时间为 1/λ=2 ms，而根据 IEC61850-2 的规定，该类报文第一次发送后，应继续以 2、4、8 ms... 的间隔顺序重发，因此仿真设置的平均重发时间 2 ms 考虑的是极限情况，留有一定余量。

4) 断路器 IED 到 P&C IED 的数据流。

断路器 IED 接收到跳闸命令后，立即返回一个 GOOSE 报文至 P&C IED，这是典型的突发性数据。设定在突发性数据的 ON 期间，数据大小服从 64 字节的常数分布，到达间隔服从 0.1 ms 的常数分布，而 ON 状态的出现服从 k=512 μs，α=1.1 的 Pareto 分布，OFF 状态的出现服从 λ=50 的 Poisson 分布^[6]。

5) 服务器到站控主机的数据流。

文件传输协议(file transfer protocol, FTP)服务器向站控主机传送 1 M 字节的大容量文件。

3 基于 VLAN 的典型变电站对比仿真

3.1 仿真场景

设置仿真带宽为 100 Mbit/s，仿真基于以下场景：馈线间隔 F1 发生故障，发送跳闸命令至本间隔断路器 IED 和母线间隔断路器 IED；故障发生时网络中正进行 FTP 文件传输，以研究最坏情况下的网络性能。设 SAV 报文从 0 s 开始传送，一直持续到仿真结束；设备状态信息 5 s 开始传送，跳闸信息在 10 s 时刻传送，GOOSE 报文传输和 FTP 业务均在 10~11 s 内随机选择一个时间点进行。

3.2 仿真模型的搭建与 VLAN 配置

SAV 报文是原始的采样数据，属于快速报文类别，将其直接映射到以太网的数据链路层，以减少高层协议的开销。直接取用 OPNET 自带的 3 层结

构的 ethernet_station 节点模型，以模拟 MU IED。

跳闸类报文、GOOSE 报文及设备状态信息属于快速或中速报文，选择 OPNET 中的 ethernet_workstation 节点模型。配置 video conference 应用来模拟报文的传输，设置采用不可靠的 UDP/IP 传输协议，以减少报文的端到端时延。

文件传输类报文数据量大，但时间要求相对宽松，可利用 FTP 应用来模拟，并采用可靠的 TCP 传输协议，以保证报文的传输质量。

星形网络仿真模型见图 7。

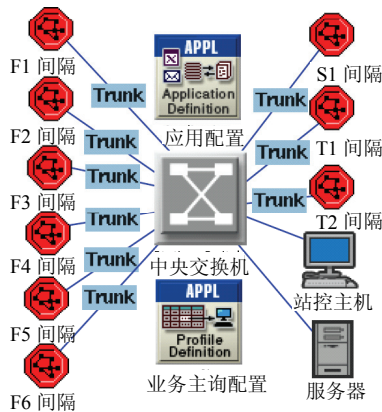


图 7 星形网络仿真模型
Fig. 7 Star network simulation model

首先分别对各间隔设备设置不同 VLAN，具体配置方法和原则如下：1) 共设置 10 个虚拟局域网，VLAN ID 分别为 1, 10—90。2) VLAN 1 包含的是整个变电站内除 MU IED 外的所有 IED 设备，VLAN 10—90 分别包括 F1—F6、S1、T1—T2 各间隔内的 MU IED 和 P&C IED，例如：VLAN 90 包含的是 T2 间隔内的 1 个 MU IED 和 2 个 P&C IED。3) 各间隔内的交换机与中央交换机连接的端口类型设置为“Trunk”，其余端口均设置为“Not Configured”。以 F1 间隔内交换机为例，其 VLAN 主要参数配置结果如表 3 所示。

然后，对各个类型的报文设置不同优先级。跳闸命令和 GOOSE 报文设置为最高的优先级 7；开

表 3 F1 间隔交换机 VLAN 配置结果

Tab. 3 VLAN configuration results of F1 Switch

端口号	VLAN 参数	VLAN 机制
P0	PVID10、Send Untagged Support VLAN 10	Port-Based VLAN
P1	PVID 1、Send Untagged Support VLAN 1 and 10	Port-Based VLAN
P10	PVID 1、Send Untagged Support VLAN 1 and 10	Port-Based VLAN
P11	PVID 1、Send Untagged Support VLAN 1	Port-Based VLAN
	Trunk、PVID 1	
P12	Support VLAN 1 Send Tagged	Port-Based VLAN

关设备状态信息设置为 6；FTP 数据优先级设为最低；SAV 报文仅在本间隔内传输，优先级设为默认。

设定了 3 个应用(Application)和 3 个业务主询(Profile)，分别对应设备状态信息、跳闸信息和 GOOSE 信息。另外还设置了 1 个 FTP 应用，以模拟大容量数据传输。以跳闸信息和 FTP 应用为例，其主要配置参数如下：

1) Video Conference_trip.

Incoming Stream Interarrival Time(seconds) : poisson(500)

Outcoming Stream Interarrival Time(seconds): None

Incoming Stream Frame Size(bytes): constant(16)

Outcoming Stream Frame Size(bytes): constant(16)

Symbolic Destination Name: Video Destination_trip

Type of Service: Reserved(7)

2) Ftp.

Command Mix(Get/Total): 75%

Inter-Request Time(seconds): constant(300)

File Size(bytes): constant(1000000)

Symbolic Server Name: FTP Server

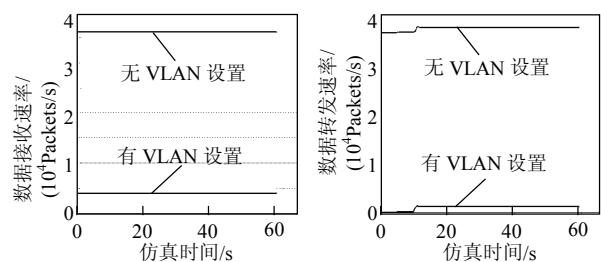
Type of Service: Best Effort(0)

3.3 仿真结果分析

对设置了 VLAN 与没有设置 VLAN 的星形网络进行了对比仿真。固定交换机的包处理速率为 5×10^5 Packets/s，比较 2 种情况下网络的数据流量、以太网时延情况。图 8 给出了有无 VLAN 情况下 F2 间隔内的一个 P&C IED 节点的数据接收速率对比情况和中央交换机数据转发速率对比情况。

从图 8(a)可以看出，在设置了 VLAN 的网络中，P&C IED 的数据接收速率为 4 000 Packets/s，而没有设置 VLAN 时该值达到了 36 000 Packets/s。说明在没有设置 VLAN 的网络中，P&C IED 收到了所有间隔内(共 9 个)的 MU IED 的 SAV 报文。

由图 8(b)可看出，在有 VLAN 设置的网络中，0~5 s 时间段内没有任何数据经过中央交换机，说



(a) F2 间隔内 P&C IED 数据接收速率对比

(b) 中央交换机数据转发速率对比

图 8 F2 间隔内 P&C IED 与中央交换机的数据传输率

Fig. 8 Data transmission rate in F2_P&C IED and central switch

明 SAV 报文被很好地限制在各个间隔内部；而在没有 VLAN 设置的网络中，0~5 s 内的数据转发速率达到 36 000 Packets/s，为 9 个间隔内的 MU IED 发送 SAV 报文速率之和。

综合上述分析可以得出结论：通过 VLAN 技术，可以限制 MU IED 发送 SAV 报文的广播范围，从而显著减少网络的数据传输流量。

图 9 为有无 VLAN 情况下的以太网时延对比情况。可以看出，通过 VLAN 的设置，报文的以太网时延大幅减小。因此，VLAN 技术的应用可以显著减小报文的以太网时延。

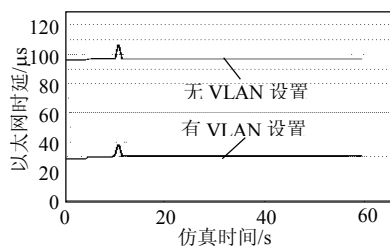


图 9 有无 VLAN 的星型网络以太网时延对比
Fig. 9 Comparison of ethernet delay of star network with and without VLAN

此外通过对含 VLAN 的环形网络进行仿真研究，也可得出与上述分析类似的结论，不详细讨论。

4 结论

在数字化变电站中，通过合理设置虚拟局域网，可以将 SAV 报文限制在间隔内部，显著减少了网络中的数据流量和对网络资源的竞争，从而大幅降低报文的以太网时延。对于控制数据和非控制性数据、实时数据和非实时数据共存的网络，VLAN 技术可以有效地对它们进行逻辑隔离，保障实时控制业务的高可靠性和高安全性。

特别地，由于 VLAN 设置是通过交换机实现的，交换机的可靠性将影响到整个变电站中报文传输的可靠性和实时性。同时，VLAN 交换机比普通交换机价格要昂贵，在实际变电站应用 VLAN 还须考虑成本因素。因此，如何兼顾变电站建设经济性和网络的可靠性与实时性，是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 于军, 熊小伏, 张媛. 数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 28-33.
Yu Jun, Xiong Xiaofu, Zhang Yuan. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. Power System Technology, 2009, 33(23): 28-33(in Chinese).
- [2] Sidu T S, Yin Yujie. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1482-1489.
- [3] Ali I, Mini S. Thomas. Substation communication networks architecture[C]/Power System Technology and IEEE Power India conference. 2008: 1-8.
- [4] 孙鸣, 谢芝东. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统无缝通信体系结构[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 70-73.
Sun Ming, Xie Zhidong. Architecture of seamless communication for substation automation system based on embedded Ethernet[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 70-73(in Chinese).
- [5] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 67-71.
Han Xiaotao, Nie Yixiong, Yin Xianggen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator [J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 67-71(in Chinese).
- [6] 吴在军, 胡敏强, 杜炎森. 变电站通信网络实时性能仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 45-49.
Wu Zaijun, Hu Minqiang, Du Yansen. Analysis of realtime performance of communication network in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 45-49(in Chinese).
- [7] 辛建波, 上官帖. 基于漏桶和服务分类机制的数字化变电站信息传输方法[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 85-90.
Xin Jianbo, Shanguan Tie. A digital substation information transmission method based on leaky bucket model and class of service mechanism[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 85-90(in Chinese).
- [8] 辛建波, 段献忠. 基于优先级标签的变电站过程层交换以太网的信息传输方案[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 26-30.
Xin Jianbo, Duan Xianzhong. A transfer scheme based on priority-tag in switched ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 26-30(in Chinese).
- [9] 朱国防, 陆于平. 基于 RPR 的变电站通信系统传输时延上界计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 77-84.
Zhu Guofang, Lu Yuping. Delay supremum calculus for digital substation process bus based on RPR[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 77-84(in Chinese).
- [10] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 99-104.
Dou Xiaobo, Hu Minqiang, Wu Zaijun, et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substations [J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 99-104(in Chinese).
- [11] 万博, 苏瑞. 遵循 IEC 61850-9-2 实现变电站采样值传输[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 199-203.
Wan Bo, Su Rui. Implementation of sampled value transmission complying with IEC 61850-9-2[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 199-203(in Chinese).
- [12] Willinger W, Taqqu M S, et al. Self-similarity through high-variability: statistical analysis of ethernet lan traffic at the source level[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(1): 71-86.
- [13] 胡言, 张光昭. 重尾 ON/OFF 源模型生产自相似业务流研究[J]. 电路与系统学报, 2001, 6(3): 72-77.
Hu Yan, Zhang Guangzhao. Study of the self-similar traffic stream generated by heavy-tailed ON/OFF source model[J]. Journal of Circuits and Systems, 2001, 6(3): 72-77(in Chinese).
- [14] IEC60044. Instrument transformers, part 8[S]. 2007.



张志丹

收稿日期: 2010-12-04.

作者简介:

张志丹(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统信息化、智能变电站, E-mail: zhangzhidankobe@163.com;

黄小庆(1981), 女, 博士, 主要研究方向为智能变电站、电力信息集成;

曹一家(1969), 男, 副校长, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、信息技术在电力系统中的应用。

(责任编辑 李兰欣)