

智能变电站过程层网络报文传输时间计算及抖动抑制方法

佟为明,高吉星,金显吉,李中伟

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:过程层网络是智能变电站的重要组成部分,其实时性对智能变电站的安全可靠运行具有重要意义,而报文传输时间是实时性的主要指标。在介绍过程层网络结构及通信业务的基础上,提出了一种报文传输时间计算方法,分析了报文长度、数据率等因素对过程层网络中报文传输时间的影响并进行了仿真验证。针对因竞争而造成的采样值(SV)报文传输时间抖动问题,提出了一种通过控制报文发送时序与转发条件来抑制SV报文传输时间抖动的方法,给出了该方法的实现思路,仿真表明该方法可以在确保报文实时性的同时,有效地抑制SV报文传输时间的抖动。

关键词:智能变电站;过程层网络;报文;实时性;报文传输时间

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.06.019

0 引言

发展智能电网可以解决电力系统中存在的诸多问题,而智能变电站是建设智能电网的重要基础和支撑^[1-2]。智能变电站使用网络技术代替传统的二次接线来传递开关量和采样值信号,采用IEC61850标准作为整个变电站的通信及建模依据,自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能,并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级应用^[3-4]。

智能变电站的通信系统包括变电站层设备、间隔层设备和过程层设备。过程层网络主要用于在间隔层设备与过程层设备之间传递面向对象变电站事件GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event)报文和采样值SV(Sampling Value)报文,实现变电站一次设备的数据传输和实时控制,如数据采集和保护跳闸等^[5]。目前很多智能变电站在过程层网络都采用“直采直跳”的方案进行数据传输^[6-7]。虽然这种方案保证了数据传输的可靠性和实时性,但是也存在着装置网口较多、配置复杂等问题。目前,研究人员主要研究的过程层组网方案是采用同一网络传输SV报文和GOOSE报文(这种方案也被称为共网方案),这种方案在提高过程层网络效率、简化装置结构的同时也会降低网络的实时性^[8-9]。传输时间是评价过程层网络实时性的主要指标,IEC61850对SV报文和GOOSE报文的传输时间都有明确的规

定^[10]。目前,研究人员主要通过利用OPNET软件建立网络仿真模型的方法对传输时间进行分析,这种方法虽然可以找出影响传输时间的主要因素,但是无法明确影响因素产生作用的原理^[11-13]。

本文在分析智能变电站过程层网络传输时间组成的基础上,提出一种传输时间计算方法,分析影响报文传输时间的因素;针对共网方案中因竞争造成的SV报文传输时间抖动问题提出解决方法,给出实现思路;通过OPNET平台对该方法进行仿真验证,并且根据现有技术条件分析该方法的可行性。

1 过程层网络结构与通信业务

以某220 kV智能变电站(D2-1型)为例,该站包含9个间隔(变压器间隔 T_1 、 T_2 ,馈线间隔 F_1 — F_6 ,母线间隔S),每个间隔内部都有相应的智能电子设备IED(Intelligent Electronic Device),IED种类包括合并单元MU(Merging Unit)、智能终端IT(Intelligent Terminal)、测量与控制IED(M&C IED)以及保护IED(包括主变保护IED、母线保护IED和馈线保护IED)。其中,合并单元和智能终端为过程层设备,M&C IED、保护IED为间隔层设备。每个变压器间隔内部各有2个合并单元、2个智能终端、2个M&C IED(高压侧和低压侧各有1个)以及1个主变保护IED;每个馈线间隔内部各有1个合并单元、1个智能终端、1个M&C IED和1个馈线保护IED;母线间隔内部有1个合并单元、1个智能终端、1个M&C IED和1个母线保护IED。过程层网络通过间隔交换机将各间隔内的IED互联,通过中央交换机连接各间隔交换机实现跨间隔的数据通信,网络结构如图1所示。

在IEC61850中,GOOSE报文属于类型1——快速报文,SV报文属于类型4——原始数据报文^[14-15]。SV报文和GOOSE报文的特性如表1所示。

收稿日期:2018-01-30;修回日期:2018-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50907014,510777-015);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.NSRIF.2015017)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50907014,510777015) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(HIT.NSRIF.2015017)

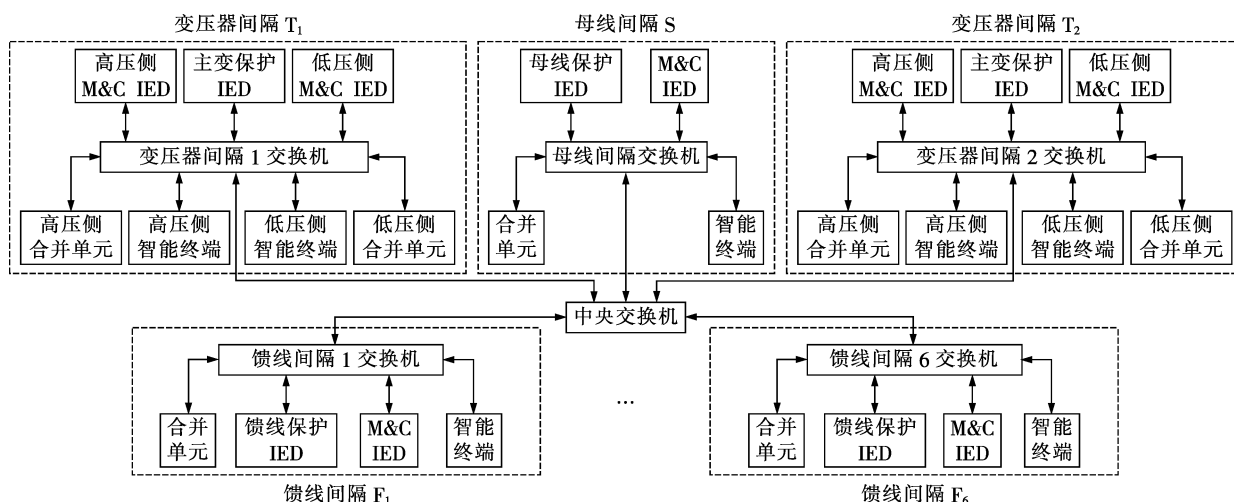


图 1 星形过程层网络结构

Fig.1 Structure of star-type process level network

表 1 SV 报文和 GOOSE 报文的特性

Table 1 Characteristics of SV and GOOSE messages

报文类型	通信方向	报文长度/Byte	报文性质	最大传输时间要求/ms
GOOSE	智能终端↔保护 IED	163~237	突发性	性能类 P1:10 性能类 P2/3:3
	智能终端↔M&C IED			
	合并单元→保护 IED	190~339		
SV	合并单元→M&C IED		周期性	性能类 P1:10 性能类 P2/3:3
	合并单元→M&C IED			

在过程层网络中,GOOSE 报文用于传输控制数据和状态数据;SV 报文用于将合并单元的采样数据传输给 M&C IED 和保护 IED。在过程层网络中,报文主要在间隔内部传输,但母线保护 IED 还要与其他间隔的合并单元和智能终端进行通信。

SV 报文和 GOOSE 报文通过 ASN.1 语法规则定义了应用层协议数据单元 APDU (Application Protocol Data Unit) (包括 SV-PDU 和 GOOSE-PDU)。为了采用 ISO/IEC8802-3 标准的以太网数据帧(以下有时简称“数据帧”)传输 SV-PDU 和 GOOSE-PDU, IEC61850 规定将 APDU 放置于数据帧的应用数据字段中。媒体访问控制 MAC (Media Access Control) 帧头长度为 26 Byte, 帧校验序列长度为 4 Byte; GOOSE-PDU 的长度为 133~207 Byte, 所以 GOOSE 报文的长度为 163~237 Byte; SV-PDU 的长度为 160~309 Byte, 所以 SV 报文的长度为 190~339 Byte。

2 传输时间的组成及计算方法

IEC61850-5 中将报文传输时间定义为:从发送方(源节点)将数据放到传输栈顶开始,直至接收方(目的节点)从传输栈取出数据为止所经历的时间。报文传输时间由净发送时间 T_{frame} 、传播时间 T_{prop} 、发送等待时间 T_{wait} (以下简称等待时间)、接收通信处

理时间 $T_{\text{processor}_r}$ 和转发处理时间 $T_{\text{processor}_f}$ 组成。

净发送时间由数据长度和数据率决定,传播时间由传播介质和传播距离决定,接收通信处理时间和转发处理时间由节点性能决定,发送等待时间由网络状态决定。设定报文从源节点发送到目的节点需要经过 X 个节点(其中,第 1 个节点为源节点,第 2、3、...、 $X-1$ 个节点为转发节点,第 X 个节点为目的节点),所有节点数据率相同,传输时间 T_{trans} 为:

$$T_{\text{trans}} = (X-1) \frac{8L}{R} + \frac{D}{V} + T_{\text{processor}_r} + \sum_{x=2}^{X-1} (T_{\text{wait}}^x + T_{\text{processor}_f}^x) \quad (1)$$

其中, L 为报文长度(单位为 Byte); R 为数据率(单位为 bit/s); D 为传播距离(单位为 m); V 为传播速率(单位为 m/s); $T_{\text{processor}_r}$ 为目的节点上的接收通信处理时间(单位为 s, 下文公式中时间量的单位均为 s); $T_{\text{processor}_f}^x$ 为第 x 个节点上的转发处理时间; T_{wait}^x 为第 x 个节点上的发送等待时间。发送等待时间的产生方式如图 2 所示。

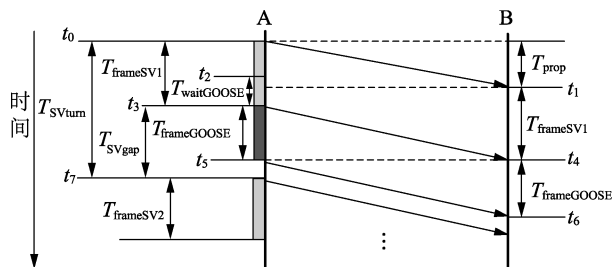


图 2 发送等待时间模型

Fig.2 Model of send waiting time

图 2 以馈线间隔为例,在馈线间隔交换机与保护 IED 和 M&C IED 相连接的端口上,SV 报文和 GOOSE 报文存在相互竞争的情况。如果在交换机(A)发送一个 SV 报文时(时间段 T_{frameSV1})的某一时刻

刻 t_2 , 有新的 GOOSE 报文需要从这个端口发送, 则这个 GOOSE 报文将会在等待队列中等待发送。当 SV 报文的最后 1 位被发送到总线上时 (t_3 时刻), 交换机开始发送 GOOSE 报文 (前提是等待队列内没有排在这个 GOOSE 报文前面的报文)。SV 报文属于周期性报文, GOOSE 报文属于突发性报文, 如果 GOOSE 报文在上一帧 SV 报文发送完毕后到达端口, 且在下一帧 SV 报文到来之前发送完毕, 则 2 种报文的传输都不会存在等待的情况; 如果在下一帧 SV 报文到来前 GOOSE 报文尚未被发送完毕, 那么这帧 SV 报文也需要等待。SV 报文间隙 T_{SVgap} 是从上一个 SV 报文发送完毕开始 (t_3), 到下一个 SV 报文开始发送为止 (t_7) 所经历的时间。SV 报文净发送时间的增加和发送周期 T_{SVturn} 的减小都会使得 T_{SVgap} 减小。因为 GOOSE 报文到达的时刻是随机的, 所以 T_{SVgap} 越小, 2 种报文在交换机端口上竞争的概率越大, 产生发送等待时间的概率越大, GOOSE 报文的净发送时间越短, 在交换机端口上产生发送等待时间的概率越小。

3 影响传输时间的因素

本文以数据率为 100 Mbit/s, SV 报文发送频率为 4 000 Hz、传播距离为 300 m、报文长度为 200 Byte 作为默认条件。根据图 1 建立仿真模型见图 3。

对只存在 SV 报文 (无等待产生) 的情况进行仿真, 仿真过程中各类型时间无明显变化, 净发送时间与报文长度成正比、与数据率成反比, 传播时间与传播距离成正比, 接收通信处理时间约为 0.000 3 ms, 报文在每个交换机上的转发处理时间为 0.002 ms。

本文设定 GOOSE 报文的产生服从 $\lambda = 500$ 的泊松分布, 长度默认为 200 Byte, SV 报文发送频率为 4 000 Hz 和 12 000 Hz 时, 仿真得到的 GOOSE 和 SV 报文传输时间分别见图 4(a)、(b)。SV 报文长度为 300 Byte 时, GOOSE 报文的传输时间如图 5 所示。

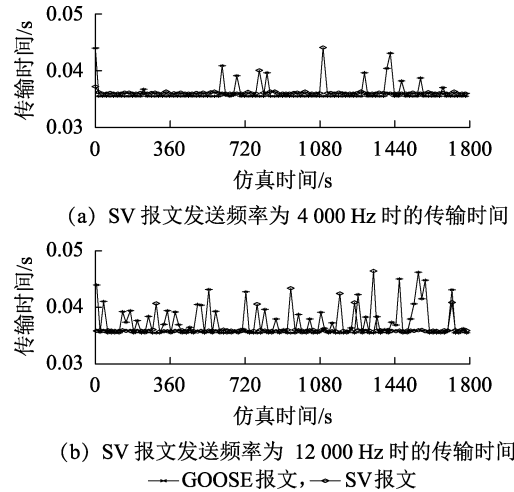


图 4 SV 报文的发送频率在 4 000 Hz 和 12 000 Hz 时 SV 和 GOOSE 报文的传输时间

Fig.4 Transmission time of SV and GOOSE messages when frequency of SV message is 4 000 Hz and 12 000 Hz

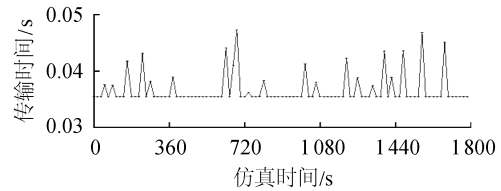


图 5 SV 报文长度为 300 Byte 时 GOOSE 报文的传输时间

Fig.5 Transmission time of GOOSE message when length of SV message is 300 Byte

数据率为 1 000 Mbit/s 时, GOOSE 报文在馈线间隔和母线间隔内的传输时间如图 6 所示。

从图 4 中可以看出, 发送频率越高, 产生等待时间的概率越高; 从图 4(a) 和图 5 中可以看出, 报文长度越长, 产生等待时间的概率越高; 从图 4(a) 和图 6 中可以看出, 数据率越高则产生等待时间的概率越小。由于母线保护 IED 还要与其他间隔的合并单元进行通信, 所以在母线间隔交换机上要经过来

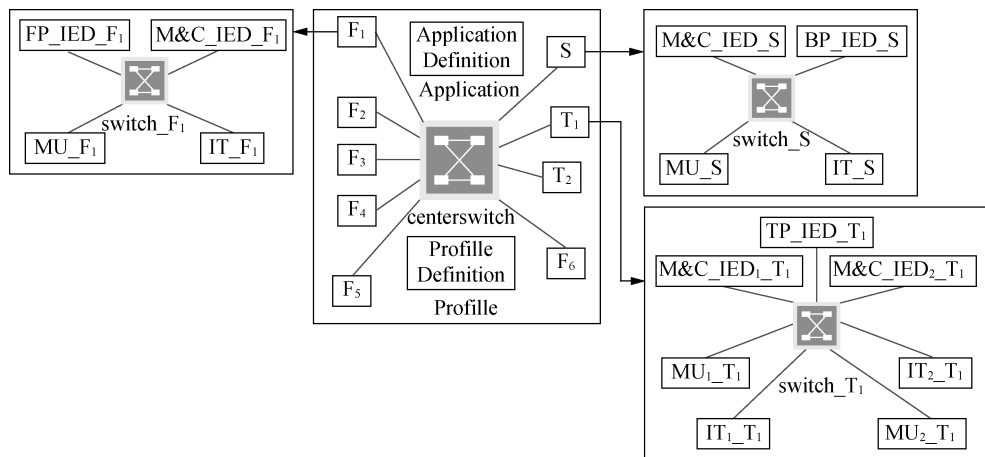


图 3 过程层网络仿真模型

Fig.3 Simulation model of process level network

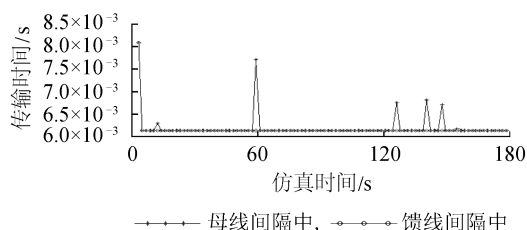


图 6 数据率为 1 000 Mbit/s 时 GOOSE 报文的传输时间

Fig.6 Transmission time of GOOSE message in data rate of 1 000 Mbit/s

自 11 个合并单元的 SV 报文,这使得报文间相互竞争的概率加大,所以从图 6 中可以看出报文在母线间隔内部传输过程中产生等待时间的概率更高。

4 报文传输时间抖动的抑制方法

通过前文的分析可以看出,在传输过程中,报文在交换机上因竞争产生的等待时间具有不确定性,这种不确定性会使得传输时间存在抖动。SV 报文在交换机上因竞争造成的传输时间抖动会影响智能变电站保护功能的正常运行^[3]。对这一问题的处理是“网采”模式能否真正走向实用化及智能变电站过程层网络结构能否得到大幅度简化的关键。

本文根据等待时间的产生方式,在全站通信数据率为 1 000 Mbit/s 的基础上,提出一种抑制 SV 报文传输时间抖动的方法,并根据交换机的基本结构与功能提出抑制传输时间抖动的交换机实现思路。

4.1 抖动抑制方法的原理

该方法通过设定 SV 报文以外的报文在交换机发送端口上的发送条件和控制各合并单元发送 SV 报文时序的方式在交换机转发上行(由过程层设备发往间隔层设备)报文过程中为 SV 报文提供专用的周期性时间段避免 SV 报文在发送端口上的竞争。

交换机在接收到报文后通过判断报文的以太网类型值确定报文的类型并将无效的报文抛弃,在计算其净发送时间后,对报文进行相应的处理;SV 报文放入 SV 缓存并优先发送,GOOSE 和其他类型的报文会被放入通用先入先出(FIFO)队列,该队列的队首报文会在同时满足式(2)、(3)时被发送。

$$T_{SV} < \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T + T_{frameFirst} < T_{SVturn} \quad (3)$$

其中, T_{SV} 为交换机为 SV 报文提供专用发送时间段长度; ΔT 为从上一个 SV 报文专用时间段开始的时刻起到当前时刻为止所经历的时间 ($\Delta T < T_{SVturn}$); $T_{frameFirst}$ 为通用 FIFO 队列队首报文的净发送时间。SV 报文的发送频率为 4 000 Hz, 发送周期 T_{SVturn} 为 0.25 ms。交换机上转发流程如图 7 所示。

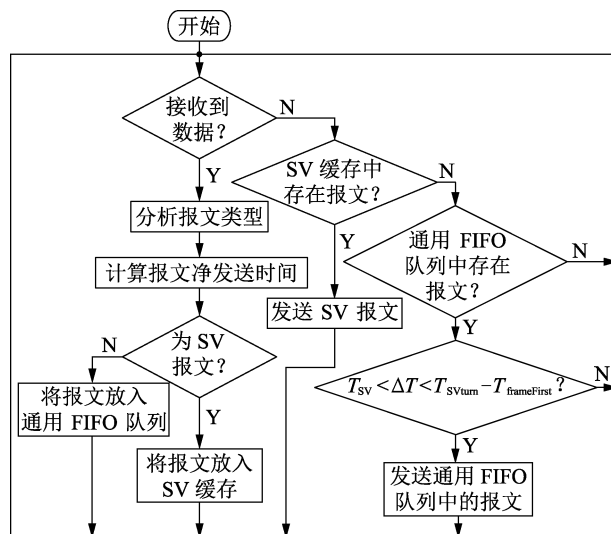


图 7 交换机上转发流程

Fig.7 Forward process of switches

满足式(2)表示通用 FIFO 队列队首报文的发送条件为上一个 SV 报文发送时间段已结束(条件 1);满足式(3)表示的条件为如果报文从当前时刻开始发送,可以在下一个 SV 报文发送时间段到来前发送完毕(条件 2)。若式(2)、(3)同时成立,则有:

$$T_{frameFirst} < T_{SVturn} - T_{SV} \quad (4)$$

式(4)表示的条件为:在为 SV 报文分配完专用的发送时间段后,每周周期剩余足够时间来发送至少 1 帧其他类型的报文。1 000 Mbit/s 的数据率下,GOOSE 和 SV 报文的净发送时间为 0.001 6~0.002 4 ms,而 T_{SVturn} 为 0.25 ms,式(4)较为容易满足。

采用上述方法后,馈线间隔交换机上的转发时序如图 8 所示。根据图 8 举例分析 3 种情况:设 SV 和 GOOSE 报文长度都为 200 Byte,报文净发送时间为 0.001 6 ms, T_{SV} 为 0.002 6 ms, T_{SVturn} 为 0.25 ms, GOOSE 报文 1、2、3 分别于第 1 帧 SV 报文开始发送后的 0.001 5 ms、0.249 3 ms、0.35 ms 到达交换机发送端口处通用 FIFO 队列首端。

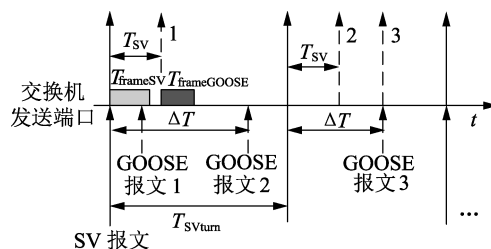


图 8 馈线间隔交换机上的转发时序

Fig.8 Forward sequence of feeder bay switches

因为 SV 报文净发送时间小于 SV 报文的到达周期(等于发送周期 0.25 ms),SV 报文在进入 SV 缓存后会被立刻发送;而 GOOSE 报文在到达发送端口后会遇到下列情况。

a. 情况 1: GOOSE 报文 1 到达发送端口队列首端, $T_{\text{frameFirst}}$ 与 GOOSE 报文净发送时间 $T_{\text{frameGOOSE}}$ 相等, 此时距离第 1 帧 SV 报文开始发送的时刻经过了 0.0015 ms ($\Delta T = 0.0015 \text{ ms}$), $T_{\text{SV}} > \Delta T$, 不满足式(2), 所以 GOOSE 报文 1 无法被立刻发送。

b. 情况 2: GOOSE 报文 2 到达时刻的 ΔT 为 0.2493 ms , $\Delta T + T_{\text{frameGOOSE}} = 0.2509 \text{ ms} > T_{\text{SVturn}}$, 不满足式(3), 所以 GOOSE 报文 2 无法立刻被发送。

c. 情况 3: GOOSE 报文 3 到达时刻的 ΔT 为 0.1 ms , 式(2)、(3)满足, 可以被立刻发送。

在 3 个 GOOSE 报文所代表的情况中, GOOSE 报文 1 和 GOOSE 报文 2 的情况都需要进行等待, GOOSE 报文 1 经历的等待时间为 $T_{\text{SV}} - \Delta T$; GOOSE 报文 2 经历的等待时间为 $T_{\text{SVturn}} - \Delta T + T_{\text{SV}}$; 因为 $\Delta T < T_{\text{SVturn}}$, GOOSE 报文 2 的等待时间要多于 GOOSE 报文 1, 当 $\Delta T = T_{\text{SVturn}} - T_{\text{frameGOOSE}}$ 时(在满足式(2)的前提下无法满足式(3)), GOOSE 报文 2 的等待时间为 $T_{\text{frameGOOSE}} + T_{\text{SV}}$, 是 GOOSE 报文在队首最多需要经历的等待时间。

根据过程层网络的结构和 SV 报文的传输方向, 馈线间隔交换机每周期(SV 报文发送周期)在 1 个端口上需要转发 1 帧 SV 报文(来自本间隔合并单元, 变压器间隔交换机每周期需要转发 2 帧 SV 报文(来自本间隔高压和低压两侧的合并单元), 母线间隔交换机每周期需要转发 11 帧 SV 报文(来自本间隔的 1 个合并单元和 10 个其他间隔的合并单元), 中央交换机需要转发 10 帧 SV 报文(来自除母线间隔合并单元以外的 10 个合并单元)。

为进一步确保 SV 报文传输时间的可控, 避免各间隔 SV 报文因在交换机上竞争而产生等待时间, 对除母线间隔合并单元外的 10 个合并单元发送 SV 报文的时序进行设置, 如图 9 所示。图中, MU_1 — MU_{10} 指代的是除母线间隔合并单元以外的 10 个合并单元, 其中主变间隔的 2 个合并单元的发送顺序相邻, MU_1 与母线间隔合并单元在同一时刻发送 SV 报文。

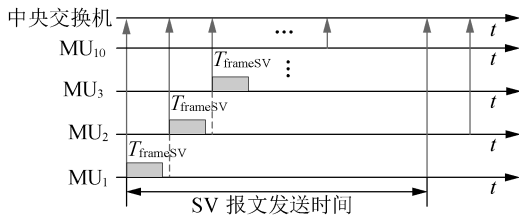


图 9 各合并单元发送 SV 报文的时序

Fig.9 SV message sending sequence of MUs

设定每个 SV 报文的净发送时间都为 T_{frameSV} , MU_2 — MU_{10} 依次与上一个合并单元间隔 $T_{\text{frameSV}} + 0.001 \text{ ms}$ (加 0.001 ms 是为了保证裕度)后发送 SV 报文。在这样的设置下母线间隔交换机上 SV 报文的到达时序如图 10 所示。

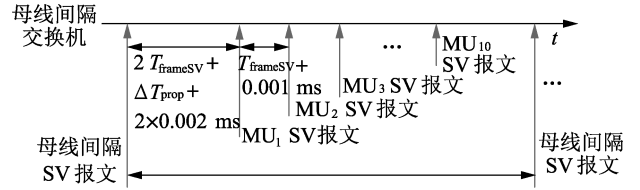


图 10 母线间隔交换机上 SV 报文的到达时序

Fig.10 Arriving sequence of SV message on bus bay switch

跨间隔的 SV 报文需要经过 2 个交换机和 3 次发送才能到达母线间隔交换机, 交换机上的转发处理时间约为 0.002 ms , 考虑传播距离和经过交换机数量的差异, 根据式(1), 第 1 个到达母线间隔交换机的跨间隔 SV 报文与母线间隔内部的 SV 报文的到达时刻相差 $2T_{\text{frameSV}} + \Delta T_{\text{prop}} + 2 \times 0.002 \text{ ms}$, 而其他跨间隔 SV 报文以 $T_{\text{frameSV}} + 0.001 \text{ ms}$ 为间隔依次到达。

通过上述方式, 每个 SV 报文到达交换机发送端口时都处于自身的专用时间段之中, 在这个时间段内只有该 SV 报文会被发送端口发送, 避免了竞争与等待时间的产生。

同时上述控制方法会使得 GOOSE 报文产生等待时间的概率和幅度增加。为减少 GOOSE 报文的等待时间, T_{SV} 的设置需要考虑交换机每周期需要转发的 SV 报文数 n 、报文到达时间间隔和裕度。 T_{SV} 设置为每周期发送全部 n 个 SV 报文预计需要经过的时间加上 $0.001n \text{ ms}$ 的裕度。

根据各合并单元发送 SV 报文的时序, 馈线间隔交换机上, T_{SV} 为 $T_{\text{frameSV}} + 0.001 \text{ ms}$; 变压器间隔交换机每周期将全部的 SV 报文发送完毕需要 $2T_{\text{frameSV}} + 0.001 \text{ ms}$, T_{SV} 为 $2T_{\text{frameSV}} + 0.001 + 2 \times 0.001 \text{ ms}$; 在母线间隔交换机上的转发情况如图 10 所示, 对于一般规模的智能变电站, 传播距离一般小于 1 km , 设定 ΔT_{prop} 为 0.005 ms , 每周期发送全部 11 个 SV 报文需要约 $12T_{\text{frameSV}} + 9 \times 0.001 + 0.005 + 2 \times 0.002 \text{ ms}$, T_{SV} 为 $12T_{\text{frameSV}} + 20 \times 0.001 + 0.005 + 2 \times 0.002 \text{ ms}$ 。SV 报文和 GOOSE 的最大净发送时间约为 0.0024 ms , 最大的 T_{SV} 为 0.0578 ms (母线间隔内), 式(4)成立。而 GOOSE 报文在母线间隔交换机发送端口队首处的最大等待时间为 0.0602 ms 。

4.2 抖动抑制方法的实现思路

交换机已具备用于实现传输时间抖动抑制方法的基本功能(如报文解析、流量监控、地址映射和队列控制)与硬件结构(如缓存和交换单元等)。在此基础上, 用于抖动抑制的交换机实现思路见图 11。

管理人员在各交换机上设置 T_{SV} 的同时使其保存 SV 报文的发送周期, 交换机根据 SV 报文到达的时刻和自身保存的发送周期与 T_{SV} 建立 SV 报文专用时间段的时刻表。在接收模块中, 添加报文净发送时间计算模块, 通过解析 MAC 帧头中以太网类型

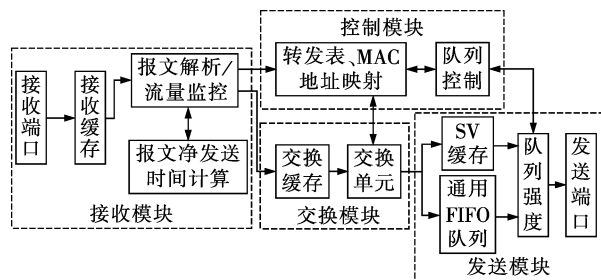


图 11 用于抖动抑制的交换机实现方案

Fig.11 Implementation scheme of jitter restrain switch

字段判断报文的类,通过提取 MAC 帧头中长度字段对报文的净发送时间进行计算,所得信息将作为调度用控制数据传输给控制模块。在发送模块中,为 SV 报文设置单独的发送缓存,由于 SV 报文无需进行等待,SV 报文发送缓存中只存有 1 帧 SV 报文。

在发送模块中,报文的发送状态机如图 12 所示。报文的发送状态机由空闲状态、发送 SV 报文、发送其他报文、判断报文类型、判断发送条件组成。当有报文出现在 SV 报文缓存或通用 FIFO 队列首部时,状态机进入报文类型判断状态;首先判断是否为 SV 报文,如果是则直接进入 SV 报文发送状态;如果是其他类型的报文则进入判断发送条件状态,根据专用时间段的时刻表和报文自身长度进行判断,只有在满足式(2)、(3)所示的约束条件时,才会进入发送其他报文的状态。

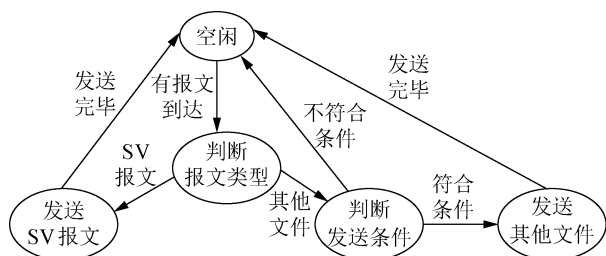


图 12 报文发送状态机

Fig.12 Packet sending state machine

为实现高精度的时序控制,采用 IEEE 1588(精确时钟同步协议)对网络上各 IED 的时钟进行同步。IEEE 1588 的过程层组网方式如图 13 所示。

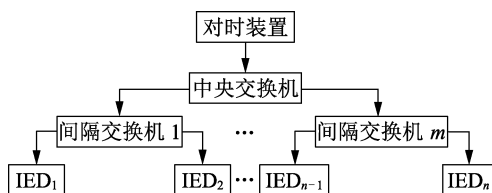


图 13 IEEE 1588 过程层组网方式

Fig.13 Networking mode of IEEE 1588 process level

在中央交换机上接入对时装置作为时钟源,通过过程层网络向各 IED 发送对时报文,以此完成对时功能。相对于 GOOSE 和 SV 报文,对时报文长度较短(约为 50 Byte)、发送周期较长(一般为 1 s),对

其他报文传输影响小。转发处理方式与 GOOSE 报文相同,放入通用 FIFO 队列。通过指定各合并单元开始发送 SV 报文的时刻,实现时序的控制。

4.3 仿真及可行性分析

本文通过在 OPNET 中修改交换机节点模型的方式对本文提出的抖动抑制方法进行模拟,使用抑制方法后,在报文长度都为 200 Byte 的情况下,仿真得到的跨间隔 SV 报文传输时间的变化如图 14 所示。其他报文最大传输时间的变化如表 2 所示。

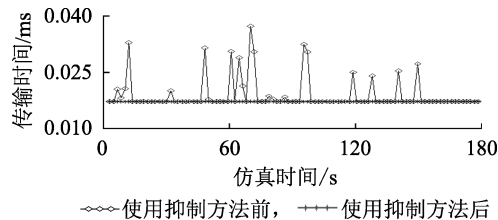


图 14 使用抑制方法前后,跨间隔 SV 报文的传输时间

Fig.14 Transmission time of SV message with and without restrain method

表 2 使用抑制方法后报文最大传输时间的变化

Table 2 Variation of maximum transmission time after using restrain method

报文方向	最大传输时间变化
F ₁ _合并单元→母线保护 IED SV	0.037 ms→0.017 2 ms
F ₁ _智能终端→母线保护 IED GOOSE	0.038 5 ms→0.043 6 ms
F ₂ _智能终端→F ₂ _馈线保护 IED GOOSE	0.008 3 ms→0.008 5 ms
F ₂ _合并单元→F ₂ _馈线保护 IED SV	0.008 2 ms→0.007 ms
T ₁ _智能终端→T ₁ _主变保护 IED GOOSE	0.008 1 ms→0.009 2 ms

从表 2 中可以看出,SV 报文在传输过程中没有产生等待时间,传输时间的抖动被有效地抑制了。GOOSE 报文产生等待时间的幅度虽有所增长,但仍可以满足要求,同时馈线和变压器间隔交换机上针对性的 T_{SV} 设置使得在 2 种间隔内传递的 GOOSE 报文等待时间的增幅较小。

本文从报文传输时间抖动的产生方式出发,基于交换机的调度技术和精确时钟同步技术提出传输时间抖动的抑制方法,交换机的调度技术用于实现控制交换机发送端口处 SV 报文与其他报文的发送;精确时钟同步技术用于实现控制过程层网络中各合并单元的发送 SV 报文的时序。

目前交换机中嵌入式技术的广泛运用使得交换机调度功能的制定更具灵活性,为在交换机上实现 SV 报文与其他报文的发送控制提供了技术条件。同时,IEEE 1588 在智能变电站中的广泛应用为实现各合并单元发送 SV 报文的时序控制提供了基础。

5 结论

本文通过对智能变电站过程层网络中报文传输时间的组成进行分析,建立了报文传输模型,得

到了报文传输时间的计算公式,确定了影响传输时间的主要因素,并以某 220 kV 全站网络互联的智能变电站(D2-1型)为例进行仿真验证,研究了数据率、报文长度和报文发送频率等因素对传输时间的影响。针对因竞争造成的SV报文传输时间抖动问题,根据等待时间的产生方式,提出了一种通过控制SV报文发送时序与交换机上报文的转发条件来抑制传输时间抖动的方法,仿真结果表明该方法可以有效地抑制因竞争产生的SV报文传输时间抖动。

参考文献:

- [1] ALI N H, BORHANUDDIN M, BASIR O. Protection of smart substation based on WLAN complies with IEC61850 using traveling wave analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 20-26.
- [2] SONG Chunhuan. The design of wireless communication function of traction substation electrical signal monitoring device[J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2016, 9(4): 199-206.
- [3] 周华良,郑玉平,姚吉文,等. 面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 96-100.
ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YAO Jiwen, et al. Network packet control technology for secondary equipments in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96-100.
- [4] WANG Zhiming, SUN Xianli, LIU Li. Research on the network topology and reliability of the communication system in smart substations[J]. Advanced Materials Research, 2013(765): 1757-1760.
- [5] 王松, 裴瑜涛, 侯伟宏, 等. 智能变电站继电保护GOOSE网络跳闸探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 140-144.
WANG Song, QIU Yutao, HOU Weihong, et al. Discussion of GOOSE network trip mode for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 140-144.
- [6] 王海柱, 蔡泽祥, 张延旭. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 156-162.
WANG Haizhu, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 156-162.
- [7] RANSOM D L, CHRISTOPHER C. Using GOOSE messages in a main-tie-main scheme[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 17-24.
- [8] MUHAMMAD T A R, SALMAN Y. Trust system architecture for securing GOOSE communication in IEC61850 substation network[J]. International Journal of Security and Its Applications, 2016, 10(4): 289-302.
- [9] ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Analytical modeling of traffic flow in the substation communication network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2119-2127.
- [10] NGO H, YANG H. Latency and traffic reduction for process-level network in smart substation based on high-availability seamless redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2181-2189.
- [11] ZHU Lin, SHI Dongyuan, WANG Pengyuan. IEC61850-based information model and configuration description of communication network in substation automation[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2014, 29(1): 97-107.
- [12] ZHANG Zhidan, HUANG Xiaoqing, KRUNE B. Modeling and simulation of data flow for VLAN-based communication in substations[J]. IEEE Systems Journal, 2015, PP(6): 1-12.
- [13] KIM S K, AN Y H, JANG B T. A study on simulation analysis for the transmission delay on the process bus network in IEC61850 digital substation[J]. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2015, 29(8): 18-22.
- [14] WANG Wenlong, LIU Minghui, ZHAO Xicai. Shared-network scheme of SMV and GOOSE in smart substation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 438-443.
- [15] WU Wencui, MA Yonghong. Filtering methods of GOOSE messages on process level in smart substations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(668-669): 691-694.

作者简介:



佟为明

佟为明(1964—),男,黑龙江牡丹江人,教授,博士,主要研究方向为电气智能化与工业通信技术(E-mail: 1622403307@qq.com);

高吉星(1988—),男,黑龙江绥化人,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统信息、通信技术(E-mail: gaojixing1988@163.com)。

Calculation and jitter suppression of process level network message transmission time for smart substation

TONG Weiming, GAO Jixing, JIN Xianji, LI Zhongwei

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The process level network is a key part of smart substation, its real-time performance is important for the safe and reliable operation of smart substation and the message transmission time is the major index of the real-time performance. Based on the introduction of structure and communication service of process level network, a calculation method of message transmission time is proposed. The influences of packet length, data rate and other factors on the message transmission time in process level network are analyzed and verified by simulation. Aiming at the jitter of SV (Sampling Value) message transmission time caused by competition, it is proposed to suppress the jitter of SV message transmission time by controlling sending timing and forward condition of message, and the corresponding implementation method is given. The simulation shows that the proposed jitter suppression method can ensure real-time performance of message and effectively suppress the jitter of SV message transmission time.

Key words: smart substation; process level network; message; real-time performance; message transmission time