

DOI: 10.7667/PSPC151594

# 配电网分布式控制实时数据快速传输技术

陈晓杰<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>1,2</sup>, 陈羽<sup>1</sup>, 范开俊<sup>3</sup>, 张新慧<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东科汇电力自动化有限公司, 山东 淄博 255087;  
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 为实现分布式控制关联站点智能终端(Smart Terminal Unit, STU)间的实时对等通信以及互操作, 可采用面向通用对象的变电站事件(Generic Object—Oriented Substation Event, GOOSE)传输 STU 间的实时数据和控制命令。在对比分析现有 GOOSE 映射方式的基础上, 提出了基于 TCP 协议的 GOOSE 报文传输方案(GOOSE over TCP), 给出了实现方法以及改善 GOOSE over TCP 传输实时性的措施。分析了影响报文传输延时的主要因素。通过试验测得在通信网络含有大量突发报文的恶劣环境中优化后的 GOOSE over TCP 最大传输延时约为 2.4 ms, 平均传输延时约为 1.3 ms, 可以满足配电网分布式控制应用的需求。

**关键词:** 配电自动化; 分布式控制; GOOSE; GOOSE over TCP

## Real-time data fast transmission technology for distributed control of distribution network

CHEN Xiaojie<sup>1</sup>, XU Bingyin<sup>1,2</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, FAN Kaijun<sup>3</sup>, ZHANG Xinhui<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China; 3. School of Electrical Engineering,  
Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** For realizing the real-time peer-to-peer communication and interoperability between the distributed control application related sites Smart Terminal Units (STUs), the GOOSE (Generic Object—Oriented Substation Event) could be used to transfer real-time data and commands among STUs. Based on the analysis of the existing mapping mode of GOOSE, a GOOSE mapped to TCP transmission mechanism (GOOSE over TCP) is proposed. The implementation method and the improvement measures to increasing the real-time of GOOSE over TCP are given. The main factors that affecting transmission delay are analyzed. In the harsh environment which is full of the burst network message, after taking the improvement measures, the maximum transmission delay of GOOSE over TCP communication is about 2.4 ms, the average delay is about 1.3 ms, which could satisfy the needs of distributed control applications in distribution network.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2015AA050202).

**Key words:** distribution automation; distributed control; GOOSE; GOOSE over TCP

## 0 引言

分布式控制是一种基于智能终端(Smart Terminal Unit, STU)之间对等交换测控信息的控制技术, 可以利用多个站点的测量信息提高保护控制性能, 又能避免主站集中控制响应速度慢的问题, 是配电网保护与控制技术的发展方向。为保证分布式控制的响应速度, 要求 STU 间能够在 10 ms 内完

成实时控制数据的传输<sup>[1-2]</sup>。在基于 IEC61850 标准的数字化变电站中, 开关状态、闭锁信号和跳闸命令等实时快速报文信息采用面向通用对象的变电站事件(Generic Object-Oriented Substation Event, GOOSE)传输机制。一般使用专用的光纤局部网, 不经过网络层与传输层, 将 GOOSE 报文直接映射到媒体访问控制子层(MAC)层进行传输, 实际传输延时小于 4 ms<sup>[3-6]</sup>。这种传输方式的优点是速度快, 传输延时小于 4 ms, 但是其配置基于 MAC 地址, 实施过程较复杂, 且报文仅能在局域网中传输, 不能跨过路由器。在配电网自动化系统或广域测控系

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050202); 国家电网公司科技项目(PDB17201500073)

统里,为减少投资、提高通信系统的利用率,实时控制数据和其他运行监控数据(如“三遥”数据)一起在通信介质中混合传输,而且还可能需要跨路由器在不同的局部网间传输<sup>[7]</sup>,因此,不能照搬数字化变电站的传输技术。

本文分析了分布式控制对报文传输实时性的要求,以及报文传输过程中延时的组成。分析了现有的几种 GOOSE 传输机制的特点,在此基础上提出了基于 TCP 协议的 GOOSE 报文传输方法(GOOSE over TCP),给出了实现方案以及加快报文传输实时性的优化措施。搭建试验平台测试了 GOOSE over TCP 的传输性能,分析了影响报文传输延时的因素,验证了改善报文传输实时性措施的可行性。

### 1 报文传输延时分析

配电网分布式控制应用中的 GOOSE 报文属于快速报文,其主要用于传输 STU 间的实时数据以及控制命令。为使分布式保护控制操作在 100 ms 内完成,要求其实时数据传输延时不超过 10 ms<sup>[8-9]</sup>。

本文中的传输延时是指报文在智能终端之间的传输时间,包括通信双方协议栈对报文的处理延时以及报文在网络上传输的延时。

处理延时是指报文通过终端各层协议栈所耗费的时间。如果终端处理数据的速度较慢或处理任务较重,实时报文将与其他数据一起排队等候处理。此外通信报文选用不同的传输协议会对应着不同的传输过程,进而影响协议栈处理时间。综上,该部分延时主要取决于终端的处理性能以及通信报文所使用的网络传输协议。

网络传输延时主要包括线路传输延时、帧转发延时、交换延时以及缓冲排队延时<sup>[10]</sup>。

线路传输延时,指信号在信道中的传输时间。其值等于信道长度与信号在信道上的传输速率之比。数据在光纤通道中的传输速度约为 2/3 倍光速<sup>[11-12]</sup>,以长为 10 km 信道为例,报文的线路传输延时约为 50 μs。

帧转发延时,指交换机转发数据帧所需要的时间,大小取决于通信报文的长度以及交换机的带宽。以最大的以太网帧(1518 字节)为例,其在百兆以太网交换机中的转发延时约为 115.8 μs。

交换延时,又称为交换机的固有延时,指交换机在转发前后两个数据帧之间所间隔的时间,其大小与交换机的性能有关,通常由交换机制造商提供。对于一般的工业以太网交换机而言,其交换延时不超过 10 μs<sup>[13]</sup>,如 SICOM3000 交换机的交换延时 < 5 μs。

缓冲排队延时,指通信报文进入交换机及其在交换机的输入/输出缓冲队列中等待处理的时间,其

长短取决于当时的网络通信量以及交换机所采取的输入/输出调度策略(如优先级、轮询以及加权轮询等)。这部分延时的存在使得报文的传输延时具有不确定性。

为使分布式控制命令能够快速传输执行,关键报文应具有确定、有限的传输延时。在进行端到端通信时,通信双方需要对数据进行封装和解封,因此通信协议的性能对报文传输实时性也有较大影响。在使系统具有一定开放性的同时,为满足配电网分布式控制应用对实时性的要求,需慎重选择网络传输协议。

## 2 现有的 GOOSE 映射方式

### 2.1 GOOSE over MAC

智能变电站中为减少智能电子设备(Intelligent Electronic Devices, IED)对 GOOSE 报文的处理延时,对 GOOSE 的通信协议栈进行了裁剪,应用层生成的 GOOSE 协议数据单元 (Protocol Data Unit, PDU)经表示层编码后不经过传输层和网络层,直接映射到数据链路层(MAC层)进行传输(如图 1 所示,图中灰色背景层表示报文传输过程中不经过该层协议栈)。这种传输方式被称为 GOOSE over MAC。

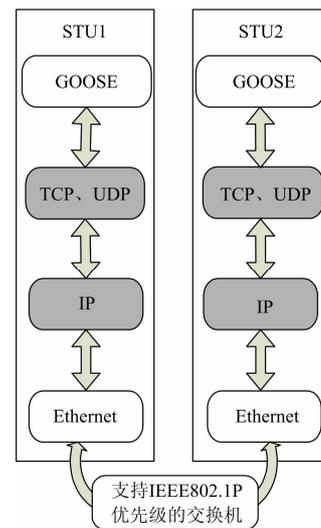


图 1 GOOSE over MAC 传输协议栈

Fig. 1 Transmission stack of GOOSE over MAC

采用该映射方式的 GOOSE 可以在 4 ms 内完成智能变电站内 IED 间的实时数据快速传输,但需要对通信协议栈进行裁剪,实现过程较复杂,且报文无法跨路由器传输。

### 2.2 GOOSE over UDP

UDP 协议是传输层中重要传输协议之一。GOOSE over UDP 的传输方式,是将 GOOSE 报文

映射到 UDP 协议上, 在 IP 网络中传输。由于通信双方无需事先建立连接, 因此 UDP 协议能保证数据传输的实时性。图 2 给出了 GOOSE over UDP 的传输机制, 其中 ToS (Type of Service)是指 IP 层的服务类型字段, 用于设置 IP 报文优先级等参数; QoS(Quality of Service)是指用于标记报文传输性能要求的服务质量指标。

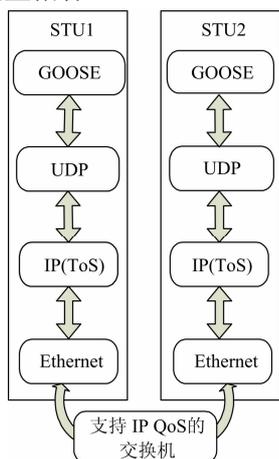


图 2 GOOSE over UDP 传输机制

Fig. 2 Transmission stack of GOOSE over UDP

采用 GOOSE over UDP 的传输方式, 可以实现 GOOSE 报文在 IP 网络中的快速传输, 但由于 UDP 协议是基于无连接的传输协议且其不具有差错校验、流量控制等功能, 协议自身不能保证报文传输的可靠性。当网络负载较重时, 会出现丢包现象。此外发布方在发送报文前无法及时地获知此时的网络以及订阅方的运行状态, 也无法得知订阅方是否正确接收到报文, 其只能通过快速重传机制来确保报文传输的可靠性。如果此时网络状况较差, 报文的快速重传会加剧网络状况恶化, 严重时将导致大量关键报文丢失甚至网络崩溃。

### 3 GOOSE over TCP 传输方式

针对现有 GOOSE 传输方式的不足, 本文研究基于 TCP 协议的 GOOSE 报文传输方案。该方案可实现 GOOSE 报文的跨网交互, 实现简单、方便, 且能够保证 GOOSE 报文传输的可靠性。

GOOSE over TCP 的实现方法如图 3 所示, 在应用层生成的 GOOSE PDU 经表示层 ASN.1 基本编码规则编码后映射至传输层的 TCP 协议, 在 IP 网络中进行传输。利用 IP 层和 MAC 层的优先级设置, 可使 GOOSE 报文优先通过。

将 GOOSE 映射到 TCP 协议可以充分利用 TCP 自身的传输机制(如超时重传、流量控制及差错校验

等)来确保报文的正确、可靠传输。当配电网通信环境较差时, 其无需快速重传机制即可保证 GOOSE 报文的传输可靠性, 避免在网络繁忙时加剧网络状况恶化。此外, 应用 TCP 协议传输 GOOSE 报文实现简单, 可以实现数据报文的跨网段传输, 便于 GOOSE 在配电自动化中的推广应用。

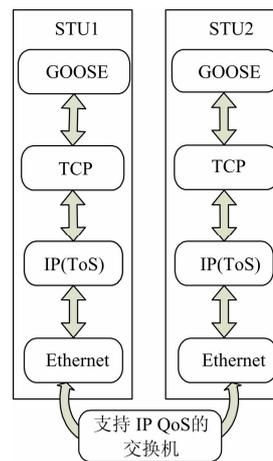


图 3 GOOSE over TCP 传输协议栈

Fig. 3 Transmission stack of GOOSE over TCP

### 4 改善 GOOSE over TCP 传输实时性的措施

由于 TCP 协议是基于连接的, 通信双方建立连接的过程需耗费时间, 将影响 GOOSE 报文的传输实时性。为了提高 GOOSE over TCP 的传输性能, 本文给出了 3 种优化措施, 使其既能保证报文传输的可靠性又能够确保报文传输的实时性。

#### 4.1 优先处理措施

采用 TCP 协议传输 GOOSE 报文时, 存在智能终端处理报文的延时以及在交换机内部排队缓冲的延时。通过提高 GOOSE 报文的优先级, 使其优先得到处理, 则可以减少这两种延时<sup>[14-16]</sup>。

目前生产的 STU 一般都采用实时多任务操作系统, 支持优先级高的任务优先处理的任务调度策略。在编写程序时, 将 GOOSE 的发送、接收以及打包、解包处理报文设置为高优先级任务, 则可以在终端繁忙时使这些任务优先得到处理, 从而减少了 GOOSE 报文在 STU 内部等待处理的时间, 加快 GOOSE 报文处理速度。

现代工业以太网交换机大多采用存储转发、排队输出的调度策略来减少数据帧在交换机内的冲突。选择支持报文优先处理的交换机, 将传输 GOOSE 报文的 TCP 协议数据包设置为高优先级, 则可以使其在交换机繁忙时优先得到转发处理, 减少报文在交换机内部缓冲排队的延时。

### 4.2 关闭 TCP 协议的 Nagle 算法

为了充分利用网络带宽，TCP 协议总是希望能够发送足够大的数据。在默认情况下 TCP 发送数据时采用 Nagle 算法。该算法将一些小报文存至缓冲区，待缓冲区填满后一起发送，从而减少了发送次数，提高了网络带宽利用率。分布式控制应用中 GOOSE 报文主要用于传输控制命令以及实时数据等较小的数据报文，采用 Nagle 算法将增加其等待发送的时间，降低传输实时性。通过设置 `setsockopt()` 函数中的 `TCP_NODELAY` 选项可以关闭 Nagle 算法<sup>[17]</sup>。此时，应用程序向内核递交的每个报文都会立即发送出去，减少了 GOOSE 报文在 STU 内等待发送的时间，提高了其传输实时性。

关闭 TCP 协议 Nagle 算法降低了网络带宽的利用率，但由于该设置仅针对于 GOOSE over TCP，且配网通信网络中 GOOSE 报文数量占总通信量的比重不大，因此其对网络带宽利用率的影响较小。

### 4.3 保持 TCP 连接

终端之间使用 TCP 协议通信时，每次传输数据之前都需要先建立连接。该过程需要进行“三次握手”，而每次“握手”都要进行一次短报文的发送，因此建立连接过程耗费时间较多。如每次数据传输后都关闭连接，则固有的连接建立时间将会对报文传输实时性产生较大影响。由于 GOOSE 在无事件发生时仍需发送心跳报文且时间间隔很短，如果通信双方在完成一次通信后不关闭连接，以后的数据报文传输延时将缩短为原来的 1/2 左右。保持 TCP 连接需要占用一部分 STU 内部资源，在默认情况下单台服务器最多可同时建立并保持 2000 个 TCP 连接，而对于某一特定馈线上的分布式保护控制来讲其所涉及的关联站点数较少(一般为几个到几十个)，因此保持 TCP 连接所占用的 STU 内部资源很少。

## 5 试验验证

### 5.1 试验测试平台搭建

测试平台是由光纤工业以太网交换机、路由器、STU(山东科汇 PZK-360H 智能配电终端)、PC 机、单模光纤、屏蔽双绞线以及相关应用软件组成的百兆光纤工业以太环网，其总体系统结构如图 4。为防止网络风暴，将交换机 1 与交换机 2 以及交换机 7 与交换机 8 的直连光纤链路端口设置为阻塞态，即正常运行状态下子网 1 中交换机 1 与交换机 2 直连光纤链路中无数据传输，子网 2 中的交换机 7 与交换机 8 的直连光纤链路中亦无数据传输。当处于正常运行状态的通信链路发生故障时，处于阻塞状

态的端口自动转换为连通状态，相应的光纤链路投入运行，从而起到了通信链路“自愈”的功能。

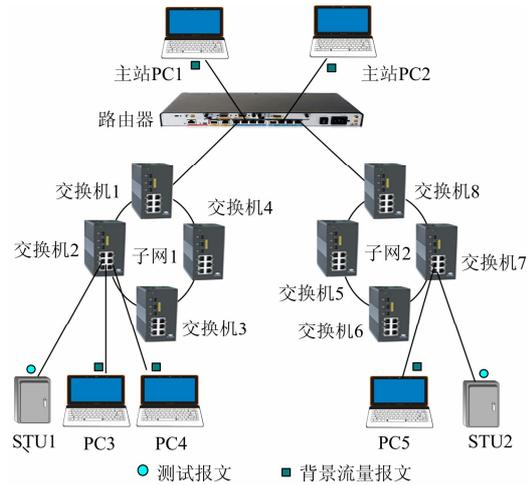


图 4 试验测试系统结构

Fig. 4 Structure of test system

图 4 中 STU1 与 STU2 用于收发 GOOSE 报文的测试。为模拟配电网通信网络的不同运行状态，利用 PC3 和 PC5、PC4 分别以不同速率给主站 PC1、主站 PC2 发送数据报文，产生不同的网络带宽利用率(以下称网络负载率)。此外，可利用交换机的端口镜像功能以及 Wireshark 软件动态查看 PC3、PC4 和 PC5 在网络中产生的总通信流量的变化状况。

### 5.2 影响报文传输延时的因素的测试分析

基于图 4 所示的测试平台，对报文大小、经过的节点数与网络负载率这三种因素对传输延时的影响进行了测试分析。

#### 5.2.1 报文大小的影响

将 STU1 和 STU2 接于同一个交换机上，在网络中无其他通信流量时 STU1 与 STU2 之间应用 TCP 协议每隔 2 ms 发送一包 GOOSE 数据，不同大小的报文各发送 10000 包，传输延时统计如图 5。

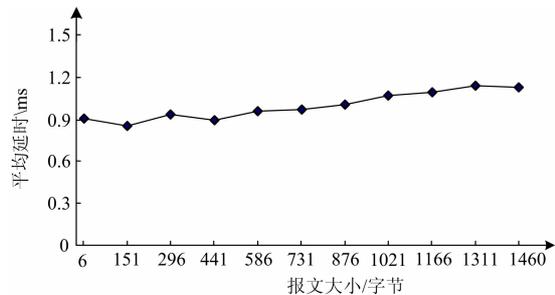


图 5 报文大小对传输延时的影响

Fig. 5 Influence of packet size to transmission delay

由图 5 可知，当发送报文小于 800 字节时，通信报文大小对 GOOSE over TCP 的传输实时性影响

不大;当报文大于 800 字节时,随着报文长度的增加,其传输延时逐渐增大。

配电网中,保护报文较小,一般不超过 300 字节,而实际工程中的 GOOSE 报文最大长度也不超过 6106 bits(即 752 字节)<sup>[18-20]</sup>。为使测试结果具有代表性,以下测试中均采用 752 字节大小的 GOOSE 报文且发送间隔均取 2 ms。

### 5.2.2 经过节点数的影响

分别将 STU2 连接到交换机 2、3、4、1,并在网络中无其他通信流量时 STU1 与 STU2 之间应用 TCP 协议在每个交换机节点下各发送 10000 包 GOOSE 报文。延时数据统计如表 1。

表 1 经过不同节点数时的传输延时

Table 1 Delay under the different node numbers

节点数/个	延时/ms			
	最大值	最小值	平均值	方差
1	1.138	0.921	1.053	0.002
2	1.290	0.967	1.148	0.003
3	1.337	1.117	1.256	0.004
4	1.447	1.250	1.354	0.004

从表 1 可知,应用 TCP 协议传输 GOOSE 报文时每多经过一个交换机节点其传输延时约增加 0.1 ms。一次分布式智能控制操作所涉及的节点数有限,因此该部分延时对报文传输实时性的影响较小。

### 5.2.3 网络负载率的影响

仍然基于图 4 所示的测试平台,通过 PC3、PC5 和主站 PC1、PC4 和主站 PC2 之间以不同速率发送数据报文来模拟配电网通信网络的不同运行环境,测试不同网络负载率对报文传输实时性的影响。

#### (1) 恒定网络负载的情况

配电网中无突发事件时,其通信网络中的数据流量基本恒定。利用 PC3 和 PC5 以不同速率向主站 PC1 发送报文,产生不同的恒定网络负载率。同时,STU1 向 STU2 应用 TCP 协议发送 10000 包 GOOSE 报文,测得不同场景下报文传输延时如图 6 所示。

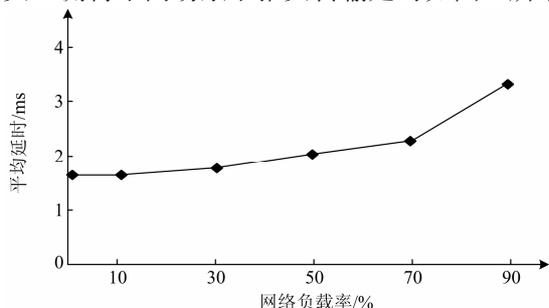


图 6 网络负载率对传输延时的影响

Fig. 6 Influence of network load rate to transmission delay

由图 6 可知,当网络负载率小于 50%时,报文的平均传输延时 $\leq 2$  ms,且受影响较小。当网络负载率超过 50%时,随着其逐渐增加报文传输实时性受到的影响越来越大。当网络负载率达到 90%时,报文传输延时已受到严重影响。当网络负载率达到 95%左右时,GOOSE 报文传输延时统计结果:最大值为 13.210 ms,最小值为 1.521 ms,平均值为 5.823 ms,其中传输延时超过 10 ms 的数据包占总数据量的 0.05%。在该网络环境中已经出现了传输延时超过 10 ms 的数据包,但其所占比重较少,并且配电网通信网络中的负载率一般不会长时间维持在 95%左右,因此该传输方式能够满足配电网分布式控制应用对关键报文传输延时不超过 10 ms 的要求。

#### (2) 突发型网络负载的情况

当配电网中有突发事件(如短路故障)发生时,其通信网络中将有大量的突发报文传输,如果终端间的大量突发报文同时到达交换机或路由器,有可能超过它们的处理转发能力,严重时会发生丢包。

为模拟正常情况下通信子网 2 的网络运行状况,利用 PC5 以恒定速率(30 Mbits/s)给主站 PC1 发送背景流量报文,PC3 和 PC4 按图 7 中的突发型网络负载模型同时分别给主站 PC1 和主站 PC2 发送报文,以模拟通信子网 1 相应区段有突发事件发生时大量突发报文同时到达交换机或路由器的场景。

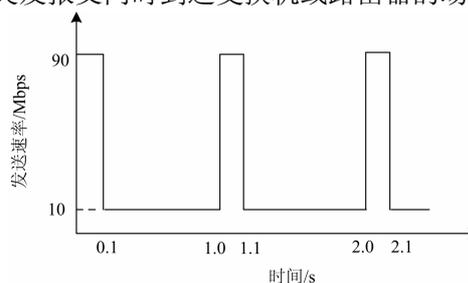


图 7 突发型网络负载模型

Fig. 7 Burst network traffic model

在上述网络环境条件下利用 STU1 向 STU2 应用 TCP 协议发送 10000 包 GOOSE 数据。测得的报文传输延时统计结果为:最大值为 3.845 ms,最小值为 1.365 ms,平均值为 1.712 ms,方差为 0.274,其延时概率分布如图 8。

图中曲线之所以出现两个峰值,主要是因为突发流量对通信网络的正常运行带来了一定的冲击,对测试报文的传输实时性产生了较大的影响。

### 5.3 改善报文传输实时性措施的测试验证

以突发型网络负载的情况为例,测试本文中提出的改善报文传输实时性措施的效果,试验场景与突发型网络负载测试环境保持一致。

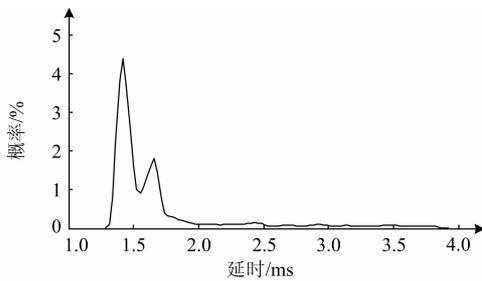


图 8 突发型网络负载下传输延时概率分布  
Fig. 8 Probability distribution of transmission delay under the burst traffic model

### 5.3.1 为报文添加优先级

利用 STU1 向 STU2 应用 TCP 协议同时发送加优先级和未加优先级的 GOOSE 报文,各发送 10000 包。传输延时对比如表 2。

表 2 添加优先级前后延时对比  
Table 2 Comparison of delay after adding the priority

对比项目	延时/ms			
	最大值	最小值	平均值	方差
优化前	6.023	1.351	2.249	1.075
优化后	5.051	1.368	2.098	0.753

从表 2 中可以看出,添加优先级标记后报文的平均传输延时虽未明显减小,但其最大值比没加优先级时的 6.023 减小了约 1 ms,且延时分布方差也得到了相应地改善。

### 5.3.2 关闭 TCP 协议 Nagal 算法

STU1 向 STU2 应用 TCP 协议同时发送两种类型(关闭 Nagal 算法和未关闭 Nagal 算法)的 GOOSE 报文,各发送 10000 包。延时对比分析如表 3。

表 3 关闭 Nagal 算法前后传输延时对比

Table 3 Comparison of delay after closing the Nagal algorithm

对比项目	延时/ms			
	最大值	最小值	平均值	方差
优化前	5.648	1.373	2.525	1.112
优化后	4.892	1.421	2.476	0.765

由表 3 可知,关闭 Nagal 算法后报文传输延时最大值较未采取优化措施时减小了约 0.7 ms,平均值减小至 1.4 ms,其延时分布方差也有所改善,使延时分布更加集中。

### 5.3.3 保持 TCP 连接

保持 STU1 与 STU2 之间应用 TCP 协议发送 GOOSE 数据前建立的连接不被关闭。STU1 向 STU6 发送 10000 包 GOOSE 报文,统计传输延时,结果如表 4。

表 4 保持 TCP 连接前后延时对比  
Table 4 Comparison of delay before and after keeping connection

对比项目	延时/ms			
	最大值	最小值	平均值	方差
优化前	6.002	1.361	2.075	0.814
优化后	3.982	0.995	1.420	0.295

由表 4 可知,若不采取措施,报文最大传输延时已超过 6 ms,通过保持双方之间的 TCP 连接,可将最大延时减小 2.02 ms,平均值降至 1.420 ms,并减小了延时分布的方差,改善了报文传输延时抖动。

### 5.3.4 综合优化

利用 STU1 向 STU2 应用 TCP 协议同时发送采取优化措施和未采取优化措施的 GOOSE 报文,各发送 10000 包。延时对比分析如表 5。

表 5 综合优化前后传输延时对比  
Table 5 Comparison of delay after taking the measures

对比项目	延时/ms			
	最大值	最小值	平均值	方差
优化前	6.321	1.380	2.107	0.994
优化后	2.388	0.957	1.257	0.115

由表 5 可知,通过采取本文提出的优化措施后,可以将报文最大延时减小 3.933 ms,平均值降低了 0.85 ms,且延时分布的方差由 0.994 减小至 0.115,使延时分布更加集中,较好地改善了报文传输性能。优化前后延时概率分布曲线对比如图 9。

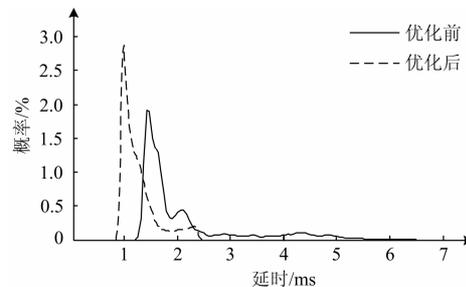


图 9 综合优化前后延时概率分布对比  
Fig. 9 Comparison of delay after taking the measures

## 6 结语

为实现配电网分布式控制相邻 STU 间快速、可靠地交换实时数据以及控制命令,本文在分析现有 GOOSE 映射方式的基础上,提出了 GOOSE over TCP 的传输方案。分析了报文传输延时影响因素,给出了改善报文传输实时性处理措施。试验测得,在通信网络含有大量突发报文的恶劣环境中优化后的 GOOSE over TCP 方案的最大传输延时约为 2.4 ms,

平均传输延时约为 1.3 ms, 可以满足配电网分布式控制应用对关键报文传输性能的要求。为实现配电网分布式控制相邻 STU 间实时数据以及控制命令的快速对等交换提供了一种新的思路。

### 参考文献

- [1] 李天友, 金文龙, 徐丙垠. 配电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.
- [3] 张宪军, 刘颖, 余华武, 等. 智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三网合一通信过载隔离抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 120-126.  
ZHANG Xianjun, LIU Ying, YU Huawu, et al. Overload isolation and control strategy of smart substation MMS, GOOSE, and SV three-in-one communication network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 120-126.
- [4] 陈德辉, 王丰, 杨志宏. 智能变电站二次系统通用测试平台方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 139-143.  
CHEN Dehui, WANG Feng, YANG Zhihong. Unified test platform for smart substation secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 139-143.
- [5] 杨贵, 吕航, 袁志斌, 等. 智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 70-74.  
YANG Gui, LÜ Hang, YUAN Zhibin, et al. Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 70-74.
- [6] 王鑫, 许力, 李晓, 等. 基于 FPGA 的 GOOSE 报文解析模块设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 101-107.  
WANG Xin, XU Li, LI Xiao, et al. Design and realization of GOOSE decoding module based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 101-107.
- [7] DE OLIVEIRA C H R, Bowen A P. IEC61850 GOOSE Message over WAN[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010.
- [8] FAN Kaijun, XU Bingyin, ZHU Guofang, et al. Fast peer-to-peer real-time data transmission for distributed control of distribution network[C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2014), Shenzhen, 23-26 Sep, 2014.
- [9] 韩国政, 徐丙垠. IP 网络在配电自动化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 57-60.  
HAN Guozheng, XU Bingyin. Application of IP network in distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 57-60.
- [10] 赵家庆, 钱科军, 霍雪松, 等. 智能变电站多级数据交换及数据共网延迟分析[J]. 华东电力, 2014, 42(3): 491-495.  
ZHAO Jiaqing, QIAN Kejun, HUO Xuesong et al. Delay analysis of multi-link data exchange and data sharing network in intelligent substations[J]. East China Electric Power, 2014, 42(3): 491-495.
- [11] 魏勇, 罗思需, 施迪, 等. 基于 IEC61850-9-2 及 GOOSE 共网传输的数字化变电站技术应用于分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 146-152.  
WEI Yong, LUO Siruo, SHI Di, et al. Research and application on digital substation based on IEC61850-9-2 and GOOSE communication in one network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 146-152.
- [12] 辛建波, 蔡子亮. 数字化变电站通信网络的传输时延不确定性分析[J]. 继电器, 2007, 35(5): 45-49.  
XIN Jianbo, CAI Ziliang. Study on the delay-non-determinism of communication network of digital substation[J]. Relay, 2007, 35(5): 45-49.
- [13] 郑新才, 周鑫, 王素华, 等. 数字化变电站的 GOOSE 网络测试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 85-89.  
ZHENG Xincan, ZHOU Xin, WANG Suhua, et al. Research on test technology of GOOSE network in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 85-89.
- [14] 李小斌, 韩明峰. GOOSE 实时通信的分析实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 59-62.  
LI Xiaobin, HAN Mingfeng. Analysis and realization of GOOSE real-time communication[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 59-62.

- [15] 段吉泉, 段斌. 变电站 GOOSE 报文在 IED 中的实时处理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 65-69.  
DUAN Jiquan, DUAN Bin. Real-time processing of GOOSE message in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 65-69.
- [16] 吴鹏, 吴军民, 黄在朝. 一种用于工业以太网交换机的 GOOSE 报文优先转发方法[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(10): 150-152.  
WU Peng, WU Junmin, HUANG Zaichao. A method of GOOSE message expedited forwarding for industrial Ethernet switches[J]. Computer & Digital Engineering, 2012, 40(10): 150-152.
- [17] STEVENS W R. TCP/IP 详解卷 1: 协议[M]. 范建华, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 98-104.  
DOU Xiaobo, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substation[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 98-104.
- [19] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.  
HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.
- [20] 周莉. 网络结构及交换机配置优化方案在智能变电站的应用[C] // 重庆市电机工程学会 2010 年学术会议论文, 2010.  
ZHOU Li. The application of the network structure and configuration of the switch in smart substation[C] // 2010 the Academic Conference of Chongqing Society of Electrical Engineering, Chongqing, 2010.

收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2016-03-04

作者简介:

陈晓杰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配  
电自动化; E-mail: chenxiaojie.1900@163.com

徐丙垠(1961-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生  
导师, 主要研究方向为智能配电网、配电自动化、电力系统  
故障监测; E-mail: xuby@vip.163.com

陈羽(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为  
配电自动化及电力系统故障定位。

(编辑 姜新丽)