

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201609

# 基于时间敏感网络的流量调度机制在智能变电站中的 研究与实现

周飞飞<sup>1</sup>, 何迎利<sup>2</sup>, 赵华<sup>2</sup>, 葛红舞<sup>2</sup>, 卢岸<sup>2</sup>

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

2. 南京南瑞信息通信科技有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 为解决智能变电站中数据流量增长与控制信息实时性的矛盾, 提出了一种基于时间敏感网络的二层以太网新技术来对流量进行调度。该技术通过在传输时间上采用时隙窗口独占和共享的思想, 在传输通道中采用帧抢占的机制, 在前端根据流量特性进行分类, 在后端通过算法进行参数的最优化配置。该技术可以改进智能变电站中过程层对传统交换机的流量调度机制, 提升对时间敏感流量进行确定性时延调度的效果, 为智能变电站的以太网网络提供具有低时延抖动的传输服务, 为电力系统的服务质量(QoS)的提升提出了一个新思路。

**关键词:** 时间敏感网络; 流量调度; 时隙窗口; 帧抢占; 低时延抖动; 智能变电站

## Research and realization of a traffic scheduling mechanism based on a time-sensitive network in a smart substation

ZHOU Feifei<sup>1</sup>, HE Yingli<sup>2</sup>, ZHAO Hua<sup>2</sup>, GE Hongwu<sup>2</sup>, LU An<sup>2</sup>

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

2. Nanjing NARI Information and Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** There is a contradiction between the rapid growth of data flow and the real-time control of information in a smart substation. Therefore a new 2 layer Ethernet technology based on a time-sensitive network is proposed to schedule the traffic. This technology adopts 'slot windows monopoly' and 'sharing thoughts' in transmission time, a frame preemption mechanism in the transmission channel, and classification according to the flow characteristic at the front end. It also optimizes the configuration of parameters through an algorithm at the back end. Thus this technology can improve the flow scheduling mechanism of the process layer to the traditional switch in the smart substation, and can promote the effect of deterministic delay scheduling for time-sensitive traffic. It thus provides the transmission service with low delay jitter for the ethernet network of a smart substation, and puts forward a new idea for improving Quality of Service (QoS) of a power system.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research on Key Technologies of FlexE Flexible Ethernet Technology Applied in Energy Internet" (No. SGZJDK00DYJS2000030).

**Key words:** time sensitive network; flow scheduling; time slot window; low time delay and low time jitter; intelligent substation

## 0 引言

近年来, 随着现代通信网络的营运水平不断提

高, 向着人工智能化、大数据分析、5G 通信的方向不断演进<sup>[1]</sup>。电力通信网络也由以往传统的固定电话通信逐步发展成为集音频、视频和实时数据于一体的多媒体、大数据、多元化的综合通信<sup>[2]</sup>。这就导致了其数据流量呈指数增长与对业务控制信息的实时性的矛盾产生, 此时, 传统的以太网网络已不能完全满足智能电网领域<sup>[3-5]</sup>的技术要求, 因此亟待

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目资助“FlexE 柔性以太网技术在能源互联网中应用的关键技术研究”(SGZJDK00DYJS2000030)

引入新的技术来解决。

当前国内外能够改善网络中流量与实时性这一矛盾的技术方案主要有<sup>[6-7]</sup>FlexE、DetNet、5G、AVB/TSN等，它们主要是对网络确定性传输时延和路径方面的研究。其中，AVB是基于数据链路层的VLAN和Bridge技术扩展了传统以太网链路层的标准和协议，来保证数据传输具有确定的低时延和抖动，以满足数据传输的QoS要求，可以广泛应用于实时音视频，工业自动化与控制系统(IACS)、自动驾驶、智能电网等应用场景。

TSN(Time-Sensitive Networking)是一组IEEE协议标准<sup>[8]</sup>，它是由AVB(audio video bridging)任务组与2012年更名而来，对AVB已有的协议进行了补充。主要包括的协议有IEEE 802.1AS-Rev<sup>[9]</sup>(Timing and Synchronization)、IEEE 802.1 Qbv<sup>[10]</sup>(Enhancements for Scheduled Traffic)、IEEE 802.1 Qbu<sup>[11]</sup>(Frame Preemption)等多个协议，工作在OSI七层网络模型中的第二层——数据链路层。相对于传统的以太网网络，时间敏感网络是一种新型的确定性网络传输技术，主要提供了以下能力：时间同步、流预留、流量调度和整形、网络配置等<sup>[12]</sup>。使得“时间敏感数据流”的QoS得到保障。

目前，在智能变电站网络中，其主要特点是采用IEC 61850标准设计，提供通信平台网络化、数字化和共享化。此时，必然会加大网络数据流量的增大，可能会导致网络拥塞、网络风暴、时延抖动加剧等问题出现。而变电站很多业务对控制信令和

采集数据的传输有迫切的低时延抖动、低丢包率的需求<sup>[13-15]</sup>。现在变电站常用的做法是限制带宽利用率在30%以下，对资源造成较大的浪费。

本文基于智能变电站的网络架构以及业务特点，提出了一种在智能变电站中引入具有TSN特性的交换机，对传输路径上的流量调度进行优化<sup>[16]</sup>。虽然TSN的技术包含许多，但是大多仍处于研制和推广阶段，结合变电站的业务特点和前期TSN技术的调研，认为可以优先在变电站中引入Qbv和Qbu技术。在实现上，首先对网络中的流量进行时间敏感和非时间敏感的划分，然后通过Qbv技术对不同的流分配匹配的时隙窗口调度，再通过Qbu技术在MAC层进行帧抢占。该技术为时间敏感流提供低时延低抖动的服务，从而为智能电网IMS系统的QoS提升给出了一个新思路。

## 1 智能变电站流量调度分析

在智能变电站中，借助于以太网通信网络的配合，以实现各种信息共享、交互及实时传输。各种业务流量交织在一起，所以需要不断对流量调度进行优化<sup>[17]</sup>。

### 1.1 智能变电站时延分析

目前智能变电站在IEC61850-90标准<sup>[18]</sup>中，依据对时间的要求将报文划分为七类，如表1所示，对传输时延都作出了确定的要求。表1说明不同的流对时延都有确定的要求，时延的保障对电网保护和监控也是非常重要的。

表1 智能变电站通信时延要求

Table 1 Communication delay requirements of intelligent substation

IEC61850 类别	报文类型	时延/ms	优先级	带宽	周期	应用举例
1A. TRIP	Goose	< 3	高	低	周期	保护
2. 中速报文	MMS	< 100	中低	低	周期	监控
3. 低速报文	MMS	< 500	中低	低	周期	监控
4. 原始数据	SV	< 3	高	高	周期	过程总线
5. 文件传输	MMS	>1 000	低	中	连续	管理
6. 时间同步	Sync	< 3	中高	低	周期	802.1AS
7. 控制命令	MMS	< 3	中低	低	随机	控制

在智能变电站中，变电站的网络架构在引入TSN技术后可以设计为图1所示，其中传统交换机改造为带有TSN技术的新设备，通过TSN交换机组建过程层和站控层TSN子网络。

从图1中可以得知：端到端的传输时延包括一个发送端、N个传输节点-TSN交换机、一个接收端的传输时间，可以划分为如图2所示的示意图，发送设备端的发送时延 $D_{tx}$ ，网络中固定线路传输时

延 $D_{fix}$ ，网络中交换机变化传输时延路传输 $D_{var}$ ，接收设备端的接收时延 $D_{rx}$ 。

所以，端到端总时延可以表示为

$$D_{sum} = D_{tx} + \sum_{i=1}^{n+1} D_{fix} + \sum_{i=1}^n D_{var} + D_{rx} \quad (1)$$

$$D_{fix} = D_{path} + \frac{P_{size}}{R_{port}} \quad (2)$$

式中： $D_{path}$ 为线路传输时延， $D_{path}$ =距离/光速； $P_{size}$

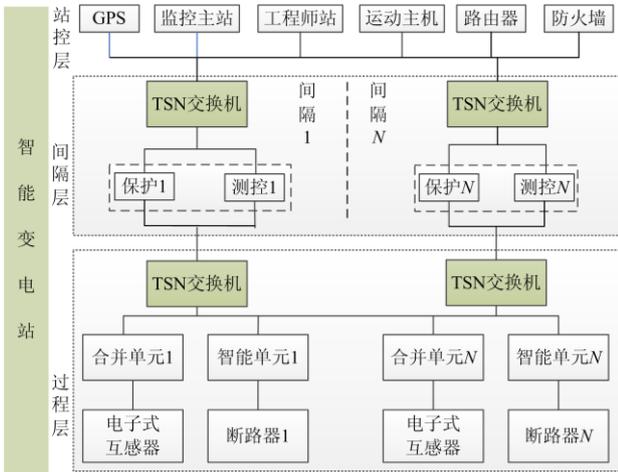


图1 TSN交换机智能变电站组网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent substation networking of TSN switch

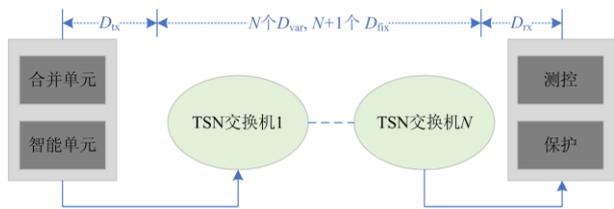


图2 智能变电站传输时延示意图

Fig. 2 Transmission delay diagram of intelligent substation

为数据包长;  $R_{port}$  为交换机端口速率, 千兆口传输 1 bit 为 1 ns。

式(1)中的  $D_{var}$  可以改写为

$$D_{var} = D_{forward} + D_{queue} \pm D_{jittery} \quad (3)$$

式中:  $D_{forward}$  为交换机的存储转发时延;  $D_{queue}$  为交换机内部流排队调度时延;  $D_{jittery}$  为交换机内部由于芯片处理等因素造成的额外抖动时延。

所以式(1)又可以改写为式(4)。

$$D_{sum} = D_{tx} + D_{rx} + \sum_{i=1}^{n+1} D_{path_i} + \sum_{i=1}^n \frac{P_{size_i}}{R_{port_i}} + \sum_{i=1}^n D_{forward} + \sum_{i=1}^n D_{queue} \pm \sum_{i=1}^n D_{jittery} \quad (4)$$

根据式(4)可以得知,  $D_{tx}$ 、 $D_{fix}$ 、 $D_{rx}$ 优化空间很小, 认为其优化空间可以忽略, 而 $D_{var}$ 可以在每个交换机上通过引入新的技术得到优化, 尤其是 $D_{queue}$ , 排队调度时延的变化范围可以从0至数百毫秒<sup>[19]</sup>, 随着网络节点的增加优化空间占比也会随之增大, 所以, 在智能变电站中研究降低流量调度时排队的时间有重大意义。

## 1.2 智能变电站流量调度分析

在流量传输路径上, 流量调度的产生是因为交换机把不同入接口的不同优先级的报文映射到对应的队列 Q0 至 Q7 上, 再从一个出接口出去。队列先存储在缓存中, 然后按照调度算法出队<sup>[20]</sup>, 如图 3 所示。常用的调度算法有先进先出(FIFO), 优先级队列(PQ), 轮训(RR), 差分加权轮训(DWRR), 加权公平队列(WFQ)等, 无论采用何种调度算法, 都做不到既能保证调度的公平又能保证调度的实时, 结合智能变电站通信网络的架构和业务特点, 可以发现传统的调度算法都不是解决变电站低时延问题的最佳答案。若是结合时间敏感网络的特性和变电站业务特点, 提出一种新的调度策略, 能够针对时间敏感流量降低排队调度时延  $D_{queue}$ , 从而就会给整个网络中端到端的时延和抖动得到优化。

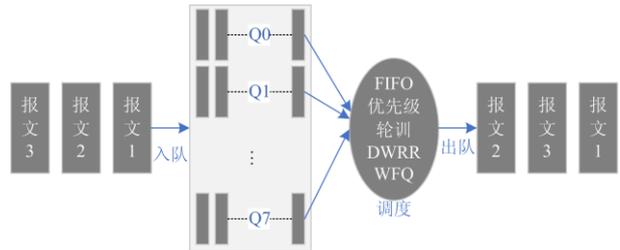


图3 传统交换机流量调度图

Fig. 3 Traditional switch traffic scheduling diagram

## 2 基于 TSN 的流量调度优化方案

TSN 技术的最新发展给了电力行业解决确定性时延问题的新方法, 论文选取了 Qbv 和 Qbu 技术来提供新的流量调度优化方案。

### 2.1 基于 VLAN 的时间敏感网络技术

TSN 是基于 IEEE 802.1Q<sup>[21]</sup>标准的 VLAN 技术而演化来的, 并且正在不断进行演进, VLAN 格式如图 4 所示, 其中与 Qbv 和 Qbu 密切相关的字段在下面也详细说明。

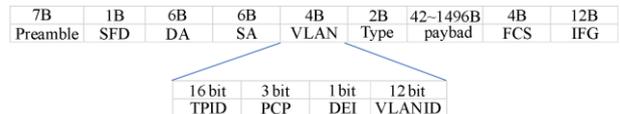


图4 VLAN 帧格式

Fig. 4 VLAN frame format

1) TPID: 标签协议标识(Tag Protocol Identifier), 固定为 0x8100, 表示 IEEE 802.1Q 的以太网帧。

2) PCP: 优先级代码(Priority Code Point), 表示优先级, 取值范围为 0~7, 值越大则优先级越高, 用于 Qbv 队列调度。

3) VLAN ID: VLAN 网络的标识号, 取值范围 0~4 095。

4) Preamble: 前导码, 7 个字节, 值为 0xbb, 它用于试 PLS 电路和收到的帧定时达到稳态同步。

5) SFD: 帧起始定界符, 1 个字节, 值为 0xbc, 紧接在前导码后面, 表示新的以太帧的开始, 用于 Qbu 帧抢占。

### 2.2 基于TSN特性的流量调度实现

在变电站中, 基于 TSN 特性的流量调度实现主要通过 TSN 的 Qbv 和 Qbu 特性对传统的调度方式进行改进, 在 MAC 层实现了按照门控列表控制队列 Gate 的开与关的调度, 以及在 MAC 合并子层实现了高速帧与低速帧的分离与合并的操作, 具体实现如图 5 所示。VLAN 的 8 个优先级分别对应 Q0 至 Q7, 队列的 Gate 是一个 8 bit 的控制开关数据, 对应位置的 0/1 代表对应的队列的门控关/开, 使得时间敏感流在经过门控时是可以被调度的。通过 Qbv 的传输选择后, Qbu 把以太网帧分为高速帧和低速帧, 允许高速帧抢占低速帧, 最后在 MAC 合并子层控制模块再把被抢占的碎帧利用 SFD(Start of the Frame Delimiters)进行合并重组恢复成完整的数据帧出去。

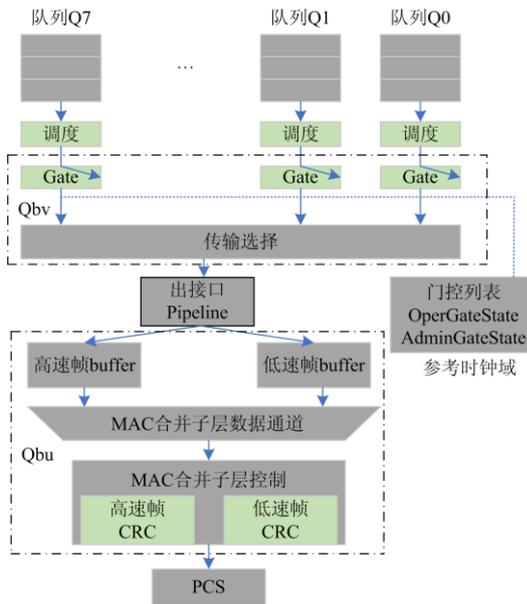


图 5 TSN 交换机流量调度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of TSN switch traffic scheduling

### 2.3 智能变电站流分类与计算模型

为了让 Qbv 和 Qbu 技术能够生效, 首先需要对流按照时间敏感进行分类, 根据表 1 描述的变电站业务的类别和对时延的要求, 通过 802.1Q 的优先级可以划分出若干个时间敏感流和非时间敏感流。通

常变电站中传输的报文所需带宽按照式(5)计算。

$$S = (L_{\text{preamble}} + L_{\text{SFD}} + L_{\text{data}} + L_{\text{IFG}}) \cdot F_{\text{sample}} \cdot f \cdot N \quad (5)$$

式中:  $L_{\text{preamble}}$ 、 $L_{\text{SFD}}$ 、 $L_{\text{data}}$ 、 $L_{\text{IFG}}$  分别表示以太帧前导码、帧起始符、数据长度、帧间隔的长度;  $F_{\text{sample}}$  表示采样点, 包括测量电流和电压等原始数据;  $f$  表示交流电频率, 一般固定值为 50;  $N$  表示终端数量。按照 IEC61850 9-2 规约标准, 对于 SV 报文, 按照 80 点/周期采样, 单路采样数据量为  $80 \times 50 \times 984$  bit, 带宽约为 3.936 Mbps, 按照 200 点/周期采样, 带宽约 9.84 Mbps; 对于 Goose 报文, 按照 5 s 的周期发送, 最大  $L_{\text{data}}$  长度为 500 字节, 单路数据量为  $(56+8+500/5 \times 8+96)$  bit, 带宽约为 960 bps。可见 Goose 报文所需带宽远远小于 SV 报文的<sup>[22]</sup>。可见将 Goose 报文流适合作为时间敏感流, 在一定条件下 SV 报文流也可以选为时间敏感流来处理。

#### 1) 配置模型

把流量经过传输节点-TSN 交换机相关的参数记为  $P_i$ , 它与每条流的数据长度  $L$ , 优先级  $Q$ , 敏感流在交换机在网络上的传输时隙间隔  $D$ ,  $Qbv$  时隙周期  $T$ ,  $Qbu$  抢占标记  $R$ 。可以用式(6)的五元组表示。其中  $i$  表示第  $i$  个交换机,  $j$  表示交换机上的第  $j$  条流。

$$P_i = (L_i^j, Q_i^j, D_i^j, T_i, R_i) \quad (6)$$

#### 2) 计算过程

输入: 在每台 TSN 交换机配置文件中, 输入  $L$ 、 $Q$ 、 $D$ 、 $T$ 、 $R$  参数。

输出:  $Qbv$  门控列表、 $Qbu$  队列可抢占标记的芯片配置数据。

计算的详细流程如图 6 所示。

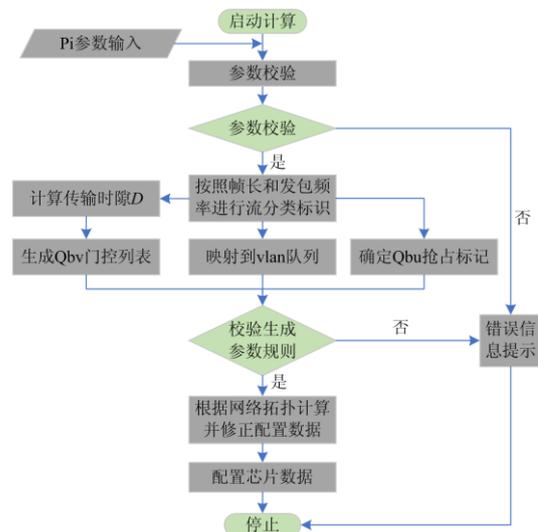


图 6 时间敏感流分类计算图

Fig. 6 Time-sensitive flow classification calculation diagram

### 2.4 智能变电站与TSN融合应用

针对智能变电站的业务特点和时间敏感网络 Qbv 和 Qbu 的使用方法, 给出了一种变电站与 TSN

融合应用的设计参考<sup>[23-24]</sup>, 首先把变电站的业务流量划分为如表 2 所示的一种分类。

表 2 一种智能变电站 TSN 流的分类

Table 2 A classification of TSN flow in a smart substation

名称	时间敏感	数据包长	报文类型	时延/ms	时隙/ $\mu$ s	队列	可被抢占	周期
流 1	是	<500 字节	Goose	<3	100	7	否	周期
流 2	是	<125 字节	SV	<3	100	6	否	周期
流 3	否	<1 250 字节	MMS	<3	800	5	是	周期
流 4	否	无要求	其他	>3	800	1	否	连续

根据表 2 相关流参数, 可以计算得出时隙窗口, 通常在变电站中交换机的上行出口为千兆接口, 1 250 字节的帧长可以在 10  $\mu$ s 传输完毕。考虑到时间敏感流时延要求小于 3 ms, 建议将 1 ms 划分为一个循环 cycletime, 时隙窗口的计算如式(7)所示,  $N$  表示变电站在一个 cycletime 内发送 SV/Goose 报文的智能设备数量,  $T_{trans}$  表示交换机端口传输 SV/Goose 报文所需的时间,  $M$  表示变电站数据传输所经过交换机的最大个数,  $T_{dealy}$  表示流量经过每个交换机的存储转发时延。

$$t = N \cdot T_{trans} + M \cdot T_{dealy} \quad (7)$$

假设  $N=20$ 、 $T_{trans}=4 \mu$ s、 $M=10$ 、 $T_{dealy}=2 \mu$ s 的情况下, 建议时间敏感流的时隙窗口为流 1 独占窗口时隙 100  $\mu$ s, 流 2 独占窗口时隙 100  $\mu$ s, 其他非敏感流共享 800  $\mu$ s, 其中非时间敏感流的时隙窗口内的帧传输可以被抢占。计算出如图 7 所示时隙窗口分配图, 可以得知时间敏感流在传输通道上没有竞争不用排队, 传输时延和抖动得以确定, 突发性时间敏感流或者偶尔没有落入时间敏感的时隙窗口的数据帧, 此时可以通过在共享时隙窗口发生帧抢占, 因此, Qbv 和 Qbu 的机制可以大大降低传输时延。

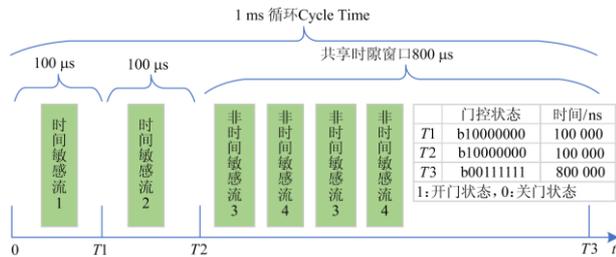


图 7 基于固定时间窗口技术流量调度传输示意图

Fig. 7 Traffic scheduling transmission diagram based on fixed time window technology

## 3 流量调度优化方案的实现与验证

### 3.1 TSN交换机的软件实现

为验证本文提出的基于时间敏感网络的 Qbv 和

Qbu 对流量调度的功能, 将在支持 TSN 技术的交换芯片上和开源的 Linux 系统上实现配置和调度的 TSN 交换机。其软件架构如图 8 所示, 在用户态实现命令行、参数配置、时隙窗口分配计算等功能。在内核态借助于 Netlink 实现用户态和内核以及硬件之间的交互, 同时在 TSN 交换芯片驱动模块里实现 Qbv、Qbu 的驱动接口。在硬件和芯片固件中实现数据转发和 TSN 特性功能。

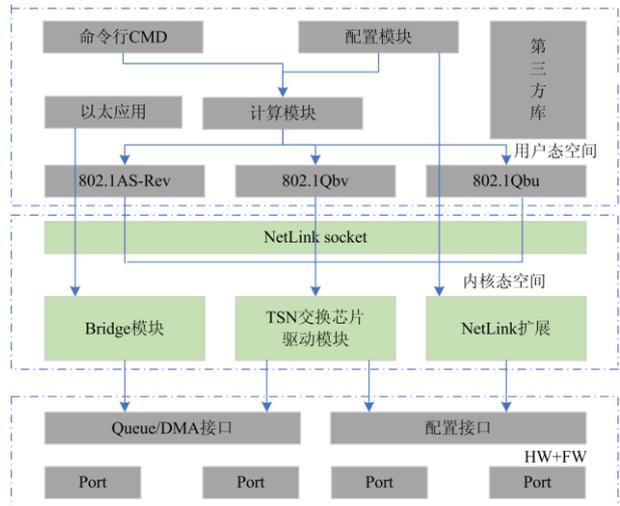


图 8 TSN 交换机软件框架图

Fig. 8 TSN switch software frame diagram

### 3.2 TSN交换机的测试环境

按照国家电网交换机测试标准<sup>[25]</sup>得到 TSN 交换机的基本时延与抖动数据来作为参照, 测试方法为采用单条流按照不同帧长, 测试时间为 60 s, 加载 10% 和 95% 的线速测试存储转发时延, 加载 100% 的线速测试时延抖动。得到交换机的存储转发时延最大值约为 2.18  $\mu$ s, 时延抖动最大值约为 0.16  $\mu$ s。

为了测试 Qbv、Qbu 功能和优化的时延指标, 基于自研 TSN 交换机, 搭建如图 9 所示的测试组网示意图。

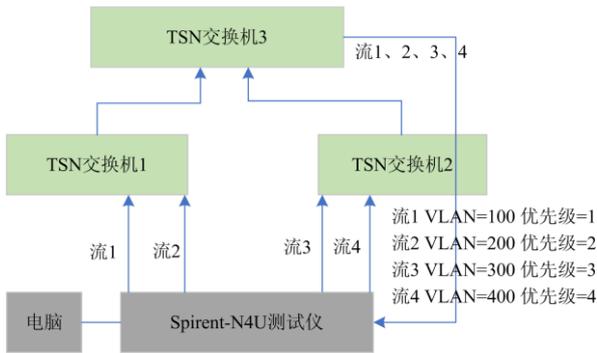


图9 TSN 流量调度测试示意图

Fig. 9 Test schematic diagram of TSN traffic scheduling

### 3.3 实验数据与分析

#### 1) 实验 1 验证 Qbv 门控功能

选择流 1, 测试仪设置帧长为 1 024 字节, 100% 线速, 测试时间为 60 s, TSN 交换机 Qbv 时隙窗口配置每 1 ms 内 100  $\mu$ s 允许优先级 1 的门控打开, 测试结果表明 10% 的包能通过门控, 如表 3 所示。

#### 2) 实验 2 验证 Qbu 帧抢占功能

选择流 1 和流 2, 测试仪设置帧长为 1 024 字节, 流 1 为 10% 线速, 流 2 为 90% 线速, 测试时间为 60 s, TSN 交换机配置优先级 1 可抢占优先级 2 队列, 在 TSN 交换机 1 进行镜像抓包, 发现未识别的以太网碎帧, 并且芯片计数器可以查看抢占次数。测试结果表明流 1 发生多次抢占流 2 的传输, 并且在 TSN 交换机 2 进行了碎帧重组。所以, 流 1 的时延与抖动都明显得到改善, 而流 2 的时延和抖动被迫有所变大, 如表 4 所示。

表 3 Qbv功能实验对比数据

Table 3 Qbv functional experimental data

测试项	名称	速率/Mbps	发包数量	收包数量	最大时延/ $\mu$ s	最大抖动/ $\mu$ s
非 Qbv	流 1	1 000	7 183 860	7 183 860	4.28	0.16
Qbv	流 1	1 000	7 183 860	718 386	4.28	0.17

表 4 Qbu功能实验对比数据

Table 4 Qbu functional experimental data

测试项	名称	速率/Mbps	发包数量	收包数量	最大时延/ $\mu$ s	最大抖动/ $\mu$ s	抢占次数
非 Qbu	流 1	100	718 386	718 386	10.52	8.52	0
	流 2	900	6 465 474	6 465 474	9.67	7.61	0
Qbu	流 1	100	718 386	718 386	5.34	1.01	0
	流 2	900	6 465 474	6 465 474	14.02	8.13	2 982

#### 3) 实验 3 TSN 功能验证

选择 4 条流, 流 1、2 帧长为 128 字节, 速率各为 10%。流 3、4 帧长为 1 024 字节, 速率各为 40%。打流时间为 60 s。3 台 TSN 交换机通过 IEEE 802.1AS-Rev 与测试仪进行时间同步, Qbv 配置循环周期为 1 ms, 优先级 1 的门控打开时间为 100  $\mu$ s, 优先级 2 的门控打开时间为 100  $\mu$ s, 其他优先级的门

控打开时间为 800  $\mu$ s。Qbu 配置优先级 3 和 4 可被抢占。通过在测试仪侧设置 burst size 数量和帧间隙控制流 1、2 顺序在 1 ms 的前 200  $\mu$ s 内依次发包, 流 3、4 持续发包。做 TSN 功能开关两次对比测试, 时延和抖动的试验结果如表 5 所示。时间敏感流 1 和流 2 的时延和抖动得到最大程度的优化, 几乎等效于交换机本身固有的转发存储的时延和抖动。

表 5 TSN 特性时延和抖动指标

Table 5 TSN characteristic delay and jitter indicators

测试项	流名称	平均时延/ $\mu$ s	最大时延/ $\mu$ s	平均抖动/ $\mu$ s	最大抖动/ $\mu$ s
非 TSN	流 1	38.669	80.63	16.07	25.08
	流 2	17.58	27.91	8.746	13.94
	流 3	10.473	13.87	3.728	11.16
	流 4	10.487	13.91	3.733	11.15
TSN	流 1	2.059	2.17	0.039	0.16
	流 2	2.159	2.14	0.029	0.15
	流 3	11.125	14.56	4.256	12.566
	流 4	11.421	14.59	4.255	12.584

综合以上 3 个实验数据, 不仅验证了 Qbv 和 Qbu 功能的正确性, 同时也验证了其在多条业务流的环境下对降低时间敏感流的时延达到明显效果。

#### 4 结论

针对智能变电站流量调度存在流量增加, 导致传输时延也随之加大的问题, 提出了一种基于 Qbv、Qbu 技术的流量调度方法, 该方法不仅可以使得数据包在链路上传输发生拥塞和碰撞的机会大大降低, 还能够保证时间敏感的流量为电网提供稳定、可靠、低时延的服务。同时, 本文结合现有的智能变电站组网提出了带有 TSN 技术特性的网络改造思路, 并为后续的实际 TSN 技术试点和设备部署提供了参考方案。

目前 TSN 相关标准有些已经发布, 有些还正在起草中, TSN 技术在以太网网络中的应用还处于一个起步阶段, 行业的应用也只处于推广阶段。大部分芯片厂家对 TSN 特性的支持情况也不尽相同, 但是得益于当前芯片技术的不断发展, TSN 特性也会随之不断完善<sup>[26-27]</sup>。目前电力行业关于 TSN 技术的行业规范也正在起草, 下一步将会在智能变电站中进行小规模批量试点。随着后续 TSN 技术的不断演进和电力行业的深入推广, 也会有越来越多的 TSN 关键技术应用于智能电网。

当然, 本文的软件架构和测试思路已经为后续 TSN 技术的扩展做了对应的考虑, 其同样适用于后续新增技术的迭代升级。

#### 参考文献

- [1] 袁通, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 高精度时间同步及在电网中的应用模式研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 47-53.  
YUAN Tong, GAO Houlei, XU Bin, et al. Research on 5G high-precision time synchronization and its application mode in power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(8): 47-53.
- [2] 何天玲. 电力数据通信网安全防护方案的分析和研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 74-79.  
HE Tianling. Analysis and research on network security protection scheme in power data communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 74-79.
- [3] 朱瑾瑜, 段世惠, 张恒升, 等. 时间敏感网络技术在工业互联网领域应用必要性分析[J]. 电信科学, 2020, 36(5): 116-121.  
ZHU Jinyu, DUAN Shihui, ZHANG Hengsheng, et al. Analysis on the application necessity of time-sensitive network technology in the field of industrial interconnection[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(5): 116-121.
- [4] 中华人民共和国电力行业标准. 变电站通信网络和系统: DL/T 860[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
Power Industry Standard of the People's Republic of China. Communication networks and systems in substation: DL/T 860[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [5] 胡国, 梅德冬. 智能变电站采样值报文安全分析与实现[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2215-2221.  
HU Guo, MEI Dedong. Security analysis and implementation of sampling value message in intelligent substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2215-2221.
- [6] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-162.  
HUANG Tao, WANG Shuo, HUANG Yudong, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-162.
- [7] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [8] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 22-28.
- [9] IEEE standard for local and metropolitan area networks: timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks: IEEE Std 802.1AS™ - 2-11[S]. New York, USA: IEEE, 2011.
- [10] IEEE standard for local and metropolitan area networks - bridges and bridged networks-amendment 25: enhancements for scheduled traffic: IEEE Qbv—2015[S]. New York, USA: IEEE, 2016.
- [11] IEEE standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks amendment 26: frame preemption: IEEE Qbu—2016[S]. New York, USA: IEEE, 2016.
- [12] 丛培壮, 田野, 龚向阳, 等. 时间敏感网络的关键协议及应用场景综述[J]. 电信科学, 2019, 35(10): 31-42.  
CONG Peizhuang, TIAN Ye, GONG Xiangyang, et al. A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(10): 31-42.
- [13] 倪益民, 杨松, 樊陈, 等. 智能变电站合并单元智能终端集成技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 95-99, 130.  
NI Yimin, YANG Song, FAN Chen, et al. Discussion on

- integration technology of merging unit and intelligent terminal in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 95-99, 130.
- [14] 任罡, 李世倩, 季宁, 等. 智能电网层次化广域保护系统的关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 93-98.  
REN Gang, LI Shiqian, JI Ning, et al. Key technologies of hierarchical wide-area protection system for smart grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 93-98.
- [15] 朱小红, 王利平, 杨琪, 等. 基于 Markov 的智能变电站二次系统间隔层和过程层可靠性评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 73-80.  
ZHU Xiaohong, WANG Liping, YANG Qi, et al. The reliability evaluation of bay level and process level in smart substation secondary system based on Markov[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 73-80.
- [16] 赵明君, 吕航, 杨贵, 等. 基于流量控制的智能变电站网络传输可靠性提升方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 141-144.  
ZHAO Mingjun, LÜ Hang, YANG Gui, et al. Data transmission reliability promotion scheme in smart substation based on flow control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 141-144.
- [17] 黎其浩, 岳杨, 蒋京辰, 等. 基于贪心流量调度的智能变电站过程层网络拓扑高可用无缝冗余配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 48(3): 107-111.  
LI Qihao, YUE Yang, JIANG Jingchen, et al. High-availability seamless redundancy topology configuration method with for process-level network in intelligent substations combined with greedy flow scheduling algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 48(3): 107-111.
- [18] IEC. Communication networks and systems for power utility automation-part 90-1: use of IEC 61850 for the communication between substations[S]. New York, USA: IEC, 2010.
- [19] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao. Distributed sensing and cooperative estimation / detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [20] 龚石林, 王晨, 冯彦钊, 等. 基于改进加权公平队列的变电站局域网通信队列调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 76-80.  
GONG Shilin, WANG Chen, FENG Yanzhao, et al. A smart substation LAN communication queue scheduling strategy based on improved WFQ algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 76-80.
- [21] IEEE Std. Virtual bridged local area networks: IEEE 802.1Q—2005[S]. New York, USA: IEEE, 2005.
- [22] 李辉, 刘海峰, 赵永生, 等. 智能变电站过程层组网改进方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 218-222.  
LI Hui, LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, et al. Improved process-level networking scheme of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 218-222.
- [23] 彭志强, 刘翌, 罗俊, 等. 智能变电站监控信息自动验收体系架构及关键技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 174-181.  
PENG Zhiqiang, LIU Yi, LUO Jun, et al. Architecture and key technologies of automatic acceptance system for monitoring information of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 174-181.
- [24] 彭志强, 徐春雷, 张琦兵, 等. 电力系统通用服务协议一致性测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 84-91.  
PENG Zhiqiang, XU Chunlei, ZHANG Qibing, et al. Conformance testing technology of power system general service agreement[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 84-91.
- [25] 智能变电站网络交换机技术规范: Q/GDW 10429—2017[S]. 北京: 国家电网有限公司, 2017.  
The technical specifications for ethernet switch in smart substation: Q/GDW 10429—2017[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2017.
- [26] IEEE standard for local and metropolitan area networks - bridges and bridged networks-amendment 28: per-stream filtering and policing: IEEE Std 802.1Qci™—2017[S]. New York, USA: IEEE, 2017.
- [27] IEEE standard for ethernet-amendment 5: specification and management parameters for interspersing express traffic: IEEE 802.3 br—2016[S]. New York, USA: IEEE, 2016.

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-02-26

作者简介:

周飞飞(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为新型电力通信系统与时间敏感网络; E-mail: 18626461646@163.com

何迎利(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力通信网络与系统、硬件方案的设计等。

(编辑 周金梅)