

DOI: 10.7667/PSPC160972

# 抗时延抖动的线路纵差保护分组传输通道配置参数影响分析

方子希, 高会生

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 分组传送网承载电力通信时分复用业务存在随机时延抖动, 严重的随机时延抖动会影响线路纵差保护数据的实时性, 进而威胁电网安全。在全面分析分组传送网调度机制和时延抖动原理的基础上, 建立了分组传送端到端随机时延抖动的数学模型。数值仿真研究了分组封装尺寸、背景流量、网络节点数和节点吞吐量对随机时延抖动的影响。结果表明, 合理设置这几个参数可以有效降低随机时延抖动, 提升网络性能。研究成果对线路纵差保护数据分组传输通道的配置具有工程参考价值。

**关键词:** 分组传送网; 随机时延; 抖动; 时分复用; 电力通信网

## An impact analysis of the configuration parameters against delay jitter of line comparison pilot protection in packet transport channel

FANG Zixi, GAO Huisheng

(Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The random delay jitter of the time division multiplexing has an influence on the real-time of line comparison pilot protection data in packet transport network, such jitter even makes a threat to the security of power grid. By analyzing the scheduling mechanism and the jitter principle, a random delay jitter mathematical model for end to end service is established. The influence of network parameters, such as package size, background traffic, service path node number and the node throughput are researched by numerical simulation. Simulative results show that, the random delay jitter can be reduced and the network performance can be improved effectively by setting these parameters reasonably. The research results have value for the configuration of the line comparison pilot protection data in packet transport channel.

**Key words:** packet transport network; random delay; jitter; time division multiplexing; electric power communication network

## 0 引言

线路纵联电流差动保护是电力通信中一类十分重要的保护方式, 该类保护方式通常采用时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)技术来构建业务传输通道<sup>[1-2]</sup>。TDM业务对传输时延有着严格的要求, 其中时延抖动是重要指标之一<sup>[3]</sup>。分组传送网(Packet Transport Network, PTN)利用分组交换技术实现综合业务的统一传送, 具有面向连接和统计复用的优势, 正逐渐成为承载TDM业务的全新技术

手段<sup>[4]</sup>。特别是随着电力通信网分组化进程的不断加快, PTN技术在电力系统中得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。针对PTN技术在电力通信网应用的研究包括: PTN电力骨干网站间对等通信方案<sup>[7]</sup>, PTN传输继电保护业务的可行性分析<sup>[8]</sup>, PTN网络时延模型研究<sup>[9-10]</sup>, PTN业务随机时延对差动保护同步性能的影响分析<sup>[11]</sup>。

从前期的研究成果可以看出, 大部分研究工作没有关注电力PTN网络的时延抖动问题。文献[12]通过对PTN设备节点入口侧缓冲区进行建模, 探讨了不同TDM业务模型下的抖动缓存长度对业务时延的影响, 但是对电力通信网缺乏针对性。文献[13]给出了时延抖动的定义式, 应用该式分析了不同节点数量下IP业务的时延抖动。文献[14]在文献[13]的基础上, 进一步研究了间歇泊松输入流对IP网络

**基金项目:** 中国电力科学研究院信息通信研究所重点资金资助项目“PTN承载电网业务和测试数据分析研究”(1200215031001)

时延抖动的影响, 但是对 PTN 网络缺乏适用性。

本文给出了 PTN 承载 TDM 业务时, 网络节点和端到端随机时延抖动的计算方法; 结合电力通信专网高实时性、高可靠性的要求, 研究了随机时延抖动的影响因素。数值仿真结果表明, 依据背景流量的大小, 合理配置 TDM 业务数据帧的封装尺寸, 优化网络节点数和节点吞吐量, 能够有效降低业务路径中的随机时延抖动。本文的研究成果对于电力通信 TDM 业务采用 PTN 技术具有工程参考价值。

## 1 TDM 业务的随机时延抖动

### 1.1 TDM 业务在 PTN 中的承载方式

电力通信 PTN 网络普遍采用非结构化 (Structure Agnostic TDM over Packet, SAToP) 方式承载 TDM 电路仿真业务。在 SAToP 方式下, 网络源边缘路由器 (Label Edge Router, LER) 不考虑 TDM 业务的帧结构, 直接将多个 TDM 业务帧封装成给定长度的数据分组, 加上特殊的电路仿真头部后发送到伪线 (Pseudo-Wire, PW) 上进行传输。TDM 分组穿越相应路径的核心路由器 (Label Switching Router, LSR) 后, 在宿 LER 进行解封装、重建 TDM 业务数据的过程<sup>[15]</sup>。这种类型的电路仿真不识别 TDM 帧内部结构, 从而简化了繁复的信令识别过程, 但是却带来了网络优化配置的问题。

PTN 节点局部模型如图 1 所示。LER 节点模型还要在图 1 的基础上增加 TDM 数据帧封装/解封装模块。PTN 节点对数据包的调度分为 5 个步骤: 1) 分组按照 FCFS 机制在入口缓冲区排队, 依次等待接受处理; 2) 分组被拆分为报头和数据净荷两部分。UNI-NNI 逻辑摘取报头并交付标签处理逻辑, 数据净荷交付存储器; 3) 标签处理逻辑执行路径标签和 PW 标签的交换; 4) 队列调度逻辑按照用户需求赋予报头各自相应的队列优先级; 5) 报头重新与存储器的数据净荷组合, 并根据不同的优先级依次发送到链路中。

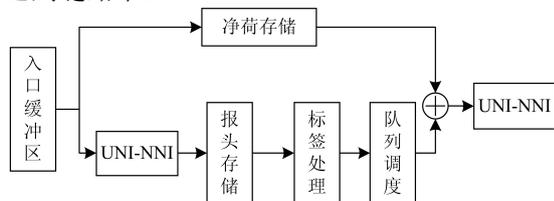


图 1 节点模型

Fig. 1 Node model

可以看到, PTN 的队列调度机制针对的是数据分组报头, 并未涉及数据净荷。相对于报头处理和标签交换的固有时延, 入口缓冲队列的随机时延占

主要地位。

### 1.2 时延抖动

通常情况, 时延抖动指相邻的两个同类型数据包在连续时刻时延的变化量。这种变化量对时延敏感业务的影响较为突出。在不考虑保护倒换和路径恢复的情况下, PTN 承载的 TDM 电路仿真业务端到端时延抖动可以由时延定义, 其表达式如式(1)。

$$J = E \left[ \left| D_{i+1} - D_i \right| \right] \quad (1)$$

式中:  $D_i$  和  $D_{i+1}$  分别为两个连续的 TDM 业务流在时刻  $i$  和  $i+1$  的时延;  $J$  是以  $D_i$  为变量的统计平均值。由定义式可以看出, 时延抖动应与业务传输路径上所有节点的时延有关, 而时延主要来自 LSR 入口缓冲区队列时延。此类时延与分组到达速率、分组尺寸、节点数量、设备吞吐量有关。另外, 影响业务时延抖动的因素还包括路由选择、网络带宽等。

### 1.3 TDM 业务时延抖动的随机性

PTN 采用效率更高的统计复用技术来实现 TDM 业务的电路仿真, 这与传统采用确定复用技术完全不同。这种复用技术上的区别, 使得 TDM 业务传输的确定时延变成了随机时延。在这种情况下, 即使采用标签交换的二层半分组交换技术, 也无法在路径确定的条件下保证收发端业务的同步。进一步分析, 造成时延抖动随机性的因素主要有两个: 1) 同类型业务经不同中间节点穿越 PTN 网络, 到达 LSR 缓冲区的时刻  $i$  不确定, 造成业务到达分布呈现出随机性; 2) LER 对标记 TDM 分组和背景业务 (如: 其他 TDM 分组) 的封装尺寸不同, 使得 LSR 缓冲区中等待处理的数据队列长度未知, 造成标记 TDM 分组的等待时间不确定, 进而使时延抖动呈现随机特性。

在电力系统中, 光纤通道传输继电保护信息主要采用线路纵联电流差动保护, 简称线路纵差保护。该保护方式通过计算通信通道被保护线路各侧的电流差值来判别区内外故障。当传输通道存在较大不确定时延抖动时, 会严重影响线路两侧电气量信息采集的实时性, 降低继电保护系统的速动性、灵敏性, 进而威胁电网安全。因此, 携带纵联差动保护信号的 TDM 业务在传输过程中所产生的随机时延抖动是不可忽视的。文献[16]规定电力系统 2 M 信号的数字接口抖动不得超过 0.2UI(高频)、1.5UI(低频), 其中, 1UI=488 ns。

## 2 随机时延抖动数学模型

### 2.1 单节点的随机时延抖动

定义:  $\lambda$  为节点入口处总流量,  $\mu$  为节点服务能

力。由于分组到达的随机特性,假设标记 TDM 业务分组符合参数为  $\lambda_k$  的泊松分布,那么同一 TDM 业务流的连续分组到达时间间隔服从负指数分布。不同 TDM 分组的封装尺寸不同,其转发时间也不尽相同。因此,服务时间也服从负指数分布。根据负指数分布的特点和文献[13],可以得到  $J^{(1)}$  的表达式为

$$J^{(1)} = \frac{1}{\mu - \lambda} \left\{ 1 - e^{-\frac{-(\mu-\lambda)}{\lambda_k}} \left[ \frac{\mu - \lambda}{\lambda_k} + e^{-\frac{-(\mu-\lambda)}{\lambda_k}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_0$  为背景流量,即其他的 TDM 分组,  $\lambda = \lambda_k + \lambda_0$ 。为了直观地分析 TDM 业务时延抖动的影响因素,需要引入分组尺寸  $L$ 。输入速率  $\lambda_k = C \cdot L$ , 其中  $C$  是与分组到达速率相关的常数;  $L$  表示以字节为单位的 TDM 分组尺寸。TDM 帧按照以太网封装格式进行分组打包,其分组头部信息包含 3 个部分: 1) 前导码、目的地址、源地址、尾部校验等共 26 个字节的以太网头; 2) 伪线封装内外层标签和控制字共 12 个字节; 3) VLAN 和 RTP 共 8 个可选字节,总计 46 个字节。因此,  $L = 46 + 32N_{E1}$ ,  $N_{E1}$  表示一个分组封装 TDM 数据帧的个数。

式(2)可以用来计算 TDM 业务流穿越单个 PTN 节点的随机时延抖动,并且可以用来分析分组尺寸和背景流量对 TDM 业务随机时延抖动的影响程度。

## 2.2 串联路径端到端时延抖动

单纯分析一个独立节点无法与工程实际相吻合,业务端到端随机时延抖动必然与传输路径中所有串联节点有关。由于 PTN 采用的是非抢占优先级的调度策略,即使 TDM 业务流处于较高优先级,也必然要等待当前占用服务器的业务流处理完成之后,标记 TDM 业务才会被转发,所以这种等待时间的随机性将会导致不同节点具有不同的时延抖动值。为了表示这种不确定的时延抖动值,引入 TDM 流的自相关函数。

设第  $m$  个节点的 TDM 流前后连续两个时刻的缓冲区占有率分别为  $x_i$  和  $x_{i+1}$ ,那么 TDM 流的自相关函数表达式为

$$E[x_i x_{i+1}]^{(m)} = \frac{1}{s^2 + v^2} \left[ s^2 + \frac{\lambda_k v^2}{\lambda_k + \frac{\mu}{v^2}} \right] \quad (3)$$

式中:  $s = \lambda / (\mu - \lambda)$ 、 $v^2 = \lambda \mu / (\mu - \lambda)^2$  分别表示第  $m$  个节点缓冲区内队列长度的数学期望和方差。

设串联路径上所有 PTN 设备的性能均相同,则 TDM 业务流穿越 PTN 网络的串联路径端到端随机时延抖动数学模型如式(4)。

$$J^{(m)} = J^{(1)} + (m-1) \left( 1 - E[x_i x_{i+1}]^{(m)} \right) J^{(1)} \quad (4)$$

式(4)可以用来计算 TDM 业务流串联路径端到端随机时延抖动,并可以用来分析节点数量和节点吞吐量对 TDM 业务随机时延抖动的影响程度。

## 3 研究方法描述

TDM 业务随机时延抖动的分析方法由如下 4 个步骤组成。

### 1) 参数设置

仿真过程所需的 TDM 业务参数包括帧封装数量  $N_{E1}$  和标记 TDM 分组输入速率  $\lambda_k$ ; 需要的 PTN 链路参数有背景流量  $\lambda_0$ 、路由器处理能力  $\mu$ 、路由器节点数  $m$  和节点吞吐量; 路由器入口侧总输入速率  $\lambda$ , 以及系统实时性衡量指标  $J^{(1)}$  和  $J^{(m)}$ 。

### 2) 产生 $\lambda_0$

突发性的背景流量是产生链路时延的首要影响因素。因此,在路由器处理能力极限的基础上,假设一定范围的背景流量随机数。结合继电保护信号传输特性,并为了使仿真结果易于观察,该随机数的产生以 1 Mbps 为步进间隔。

### 3) $J^{(1)}$ 的仿真结果及影响因素分析

首先,选取不同的封装数量,由式(2)确定单节点随机时延抖动  $J^{(1)}$  随背景流量的变化曲线;其次,选取特定的背景流量,观察时延抖动随封装数量  $N_{E1}$  的变化情况。

### 4) $J^{(m)}$ 的仿真结果及影响因素分析

首先,固定封装数量,由式(4)确定串联路径端到端随机时延抖动  $J^{(m)}$  随背景流量的变化曲线;其次,控制节点数量,综合考虑节点数量和背景流量,比较二者对随机时延抖动的影响程度。最后,控制关键节点的设备吞吐量,对比不同拓扑场景的随机时延抖动,进而优化链路部署方案。

## 4 数值仿真与结果分析

### 4.1 仿真参数设置

仿真所需参数及相关说明如表 1 所示。TDM 业务流以 2 Mbps 的恒定速率进入 LER,其抽样频率为 8000 帧/s。若按照典型值  $N_{E1} = 8$  进行打包,则链路中最大标记 TDM 分组数为 1000 个/s。因此,为了使仿真包含极限情况,设定  $C = 1000$ 。此时,  $\lambda_{kmin} \approx 2.5$  Mbps。以太网数据帧极限净荷为 1500 字节,即最大封装数量  $N_{E1max} = 46$ 。

通常情况,电力通信网 TDM 业务的比例在 3% 左右,光纤接入网带宽为 1 Gbps。因此可得,  $\lambda = 30$  Mbps,  $\lambda_0$  取值范围为 0~27.5 Mbps。华为公司 PTN

950 设备对 TDM 业务的单板处理能力为 1 Gbps, 可以同时处理 32 路 E1 业务, 则  $\mu=31.25$  Mbps。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	参数值	说明
TDM 帧封装数量 $N_{E1}$	8~46 个	每个分组承载的 TDM 数据帧个数
TDM 分组尺寸 $L$	$(46+32N_{E1})$ 字节	一个 TDM 分组的尺寸
输入速率 $\lambda_k$	$L \times 8 \times 1000$ bps	TDM 业务流的输入速率
背景流量 $\lambda_0$	0~27.5 Mbps	其它 TDM 业务的输入速率
路由器处理能力 $\mu$	31.25 Mbps	节点的吞吐量
路径节点数量 $m$	3~30 个	串联路径上节点总数

## 4.2 单节点随机时延抖动仿真与分析

### 4.2.1 TDM 分组尺寸的影响

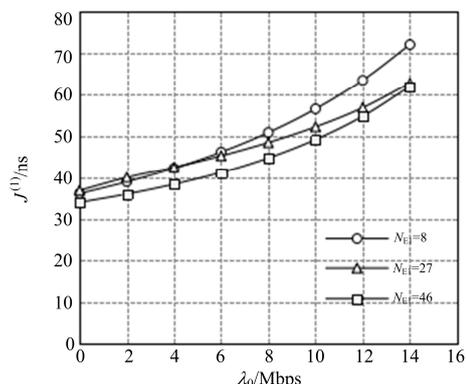
设  $N_{E1}=8, 27, 46$ 。TDM 流随机时延抖动随封装数量  $N_{E1}$  的变化情况如图 2 所示。由图 2 可以看出, 随机时延抖动随 TDM 分组尺寸的增大而减小。

弱背景流量下 TDM 流时延抖动变化如图 2(a) 所示。当背景流量处于 0~14 Mbps 的区间时, TDM 业务流穿越单个节点的时延抖动与背景流量呈正相关。TDM 帧封装数量  $N_{E1}$  越小, 相应 TDM 业务的随机时延抖动越明显。强背景流量下 TDM 流时延抖动变化如图 2(b) 所示。当背景流量处于 14~26 Mbps 的区间时, TDM 业务流的时延抖动与背景流量依然呈正相关趋势, 但是时延抖动增幅接近 200 ns, 远大于图 2(a) 区间内 30 ns 的增幅。同时, 具有较大帧封装数量 ( $N_{E1}=46$ ) 的 TDM 业务流, 其时延抖动的增大异常明显。在  $\lambda_0=18$  Mbps 处, 其时延抖动甚至超过了具有较小帧封装数量 ( $N_{E1}=27$ ) 的 TDM 业务流, 在  $\lambda_0=22$  Mbps 处, 与  $N_{E1}=27$  曲线持平。

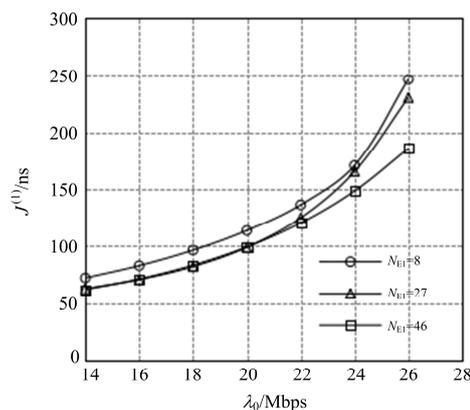
从原理分析, 当背景业务流较小时, TDM 业务流排队等待时间较少; 当背景业务流逐步增加, TDM 业务流等待处理的时间增长, 随机时延增大, 进而时延抖动持续增加, 因此出现小部分尺寸较大分组的时延抖动逼近尺寸较小分组的情况。但是在绝大多数情况下, 尺寸较大分组拥有更优的抗时延抖动能力。这源于尺寸较大分组的传输时延相对固定, 随机时延抖动程度小; 而尺寸较小的 TDM 分组, 其到达过程随机性更强, 进而时延抖动更剧烈。考虑到封装时延并借鉴文献[10]相关结论, 建议 TDM 分组封装数量  $N_{E1}$  选取 16~32 区间的整数。

### 4.2.2 背景流量的影响

TDM 流随机时延抖动随背景流量的变化情况如图 3 所示。设  $\lambda_0$  分别为 3 Mbps、15 Mbps、25 Mbps 和 27 Mbps。由图 3 可以看出, 随着背景流量的增加, 随机时延抖动逐渐增强。弱背景流量下, TDM 流随机时延抖动随  $N_{E1}$  的变化不明显; 强背景流量下, TDM 流随机时延抖动随  $N_{E1}$  的增大而减小。



(a) 弱背景流量下 TDM 流时延抖动变化



(b) 强背景流量下 TDM 流时延抖动变化

图 2 时延抖动随  $N_{E1}$  的变化

Fig. 2 Delay jitter changes with  $N_{E1}$

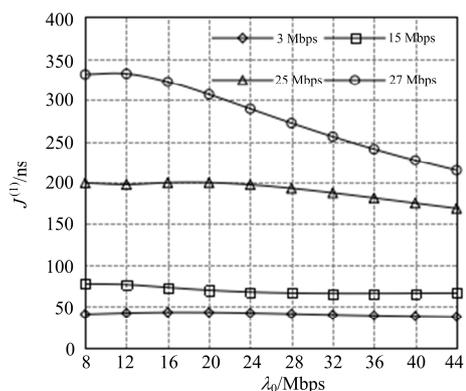


图 3 时延抖动随  $\lambda_0$  的变化

Fig. 3 Delay jitter changes with  $\lambda_0$

从原理而言,背景流量的增多,使得服务器“忙”时概率增大,造成缓冲区队列拥塞,进而增大随机时延抖动。尺寸较大的 TDM 分组与背景流量的相关性更强,随着时间推移,能够更好适应背景流量增多的情况,因此出现随机时延抖动下降的趋势。

由以上仿真结果与分析可知,背景流量对随机时延抖动具有显著的影响,为了在工程中达到设备利用最优化,应视实际背景流量的大小来选择匹配的 TDM 分组封装尺寸。

### 4.3 端到端随机时延抖动仿真与分析

#### 4.3.1 串联路径节点数量的影响

串联节点随机时延抖动随  $m$  的变化情况如图 4 所示。设  $m=3, 10, 20, N_{E1}=20$ 。由图 4 可以看出:当  $m=3$  时,串节点随机时延抖动随  $\lambda_0$  的增加而增强,且增幅较小;当  $m=10$  时,时延抖动随  $\lambda_0$  的增加而减小,在  $\lambda_0$  大于 14 Mbps 以后,时延抖动随  $\lambda_0$  的增加而急剧减弱;当  $m=20$  时,时延抖动随  $\lambda_0$  增加而减弱的趋势更为明显。

由此可知,路径节点数量会直接影响 TDM 业务的实时性。从原理而言,当背景流量增大到一定程度时,其他 TDM 业务必然挤占带宽,此时每一个节点缓冲区队列长度相对固定,其时延随机性降低,从而出现时延抖动减小的情况。仿真计算表明,当  $m=24$  时,  $J^{(m)}=755$  ns,将超过 1.5UI 的标准规定上限。需要注意,这里并不建议通过增加节点数量来减小随机时延抖动。因为,每增加一个网络节点,势必会增大相应的传输时延。

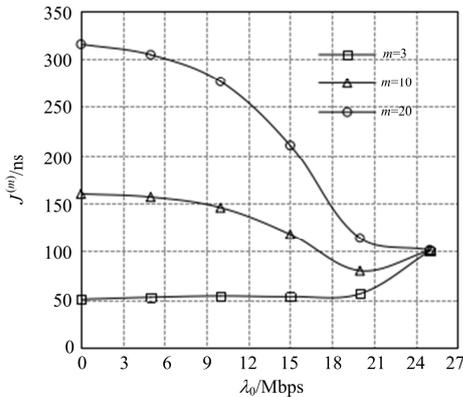


图 4 串联节点时延抖动随  $m$  的变化

Fig. 4 Tandem node delay jitter changes with  $m$

#### 4.3.2 节点吞吐量的影响

在实际 PTN 网络中,路由设备的交换容量存在差异。设  $m=15, \lambda_0=14$  Mbps。场景 1: 15 个节点的吞吐量均为 1 Gbps; 场景 2: 4 个节点的吞吐量为 10 Gbps, 11 个节点的吞吐量为 1 Gbps; 场景 3: 15

个节点的吞吐量均为 10 Gbps。不同节点吞吐量对随机时延抖动的影响如图 5 所示。可以看出:节点吞吐量越大,端到端随机时延抖动  $J^{(15)}$  越小。

分析可知,节点吞吐量由 1 Gbps 扩大为 10 Gbps,相当于随机时延抖动降低至原来的 1/10,但仿真结果显示 10 Gbps 的抖动稳定在 50 ns,并没有出现持续下降的情况。从原理来说,出现这种情况源于大容量路由器与负载业务匹配程度不均,路由器使用效率无法达到最优化。因此,在实际工程应用中,PTN 组网需要符合业务多则容量大的原则,合理配置各种容量路由器在网络中的位置。

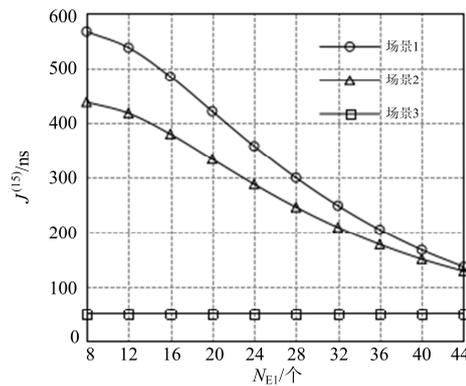


图 5 节点吞吐量对时延抖动的影响

Fig. 5 Delay jitter is influenced by node throughput

## 5 结论

PTN 承载电力通信 TDM 业务存在随机时延抖动,这种时延抖动会降低线路纵联差动保护信号的实时性,进而威胁电网安全。为了预测网络风险、提升网络性能,本文建立了单节点和串联路径端到端随机时延抖动的数学模型,定量分析了影响随机时延抖动的因素。仿真研究了 TDM 分组尺寸、背景流量、节点数量和节点吞吐量对随机时延抖动的影响程度。本文研究得出如下结论:

- 1) PTN 承载电力通信 TDM 业务存在随机时延抖动,通过优化分组尺寸、背景流量和网络节点数量等参数,能够有效减少这种时延抖动,可满足电力保护数据传输性能的需求。
- 2) 采用 SAToP 方式封装的 TDM 业务,其分组尺寸的选择与背景流量有关。弱背景流量时,封装数量越大越好;强背景流量时,封装数量越小越好。
- 3) 通道端到端随机时延抖动随节点数量的增多而增大。网络节点部署应兼顾网络成本和最优时延特性,建议在网络接入层边缘或者汇聚层与骨干层的环路切点处,优先布置具有 10 Gbps 单板接入

能力的 PTN 路由器,且路径节点数量不超过 24 个。

下一步的研究工作是细化节点背景流量,综合考虑丢包率、拓扑结构等,实现更精确的数值仿真。

### 参考文献

- [1] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 14pp.
- [2] 李建明, 刘媛, 沈晗阳, 等. 基于 2M 业务的电网保护恢复机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 106-111.
- LI Jianming, LIU Yuan, SHEN Hanyang, et al. Research on the protection mechanism of electric power grid based on 2M business[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 106-111.
- [3] IEEE guide for power system protective relay applications over digital communication channels: IEEE. StdC37. 236—2013[S]. New York, USA: IEEE, 2013.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 分组传送网(PTN)总体技术要求: YD/T 2374—2011[S].
- [5] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 广域后备保护通信模式及其性能评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 186-196.
- CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Wide area backup protection communication mode and its performance evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 186-196.
- [6] 汪强, 朱延章, 葛光胜, 等. 分组传送技术在智能配用电通信网的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 139-146.
- WANG Qiang, ZHU Yanzhang, GE Guangsheng, et al. Application discussion of packet transfer technology for smart power distribution and utilization networks[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 139-146.
- [7] 杨贵, 孙磊, 李力, 等. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 101-107.
- YANG Gui, SUN Lei, LI Li, et al. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 101-107.
- [8] 高强, 尹永飞. PTN 技术传输继电保护业务若干问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 57-62.
- GAO Qiang, YIN Yongfei. Study on some problems of PTN transmission in relay protection services[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 57-62.
- [9] 许俊现, 高会生, 汪洋. 用于线路纵差保护的 PTN 时分复用业务时延分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 56-62.
- XU Junxian, GAO Huisheng, WANG Yang. A delay time analysis of time division multiplexing services over PTN applied to line longitudinal differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 56-62.
- [10] 高会生, 方子希. PTN 时分复用业务的最佳封装尺寸研究[J]. 光通信技术, 2016, 40(5): 55-58.
- GAO Huisheng, FANG Zixi. Research on the best encapsulations size of TDM service for PTN[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(5): 55-58.
- [11] 高会生, 汪洋. PTN 业务随机时延对差动保护同步性能的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 165-171.
- GAO Huisheng, WANG Yang. Effect of PTN service random delay on synchronization performance of current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 165-171.
- [12] MADHU B S, MANIVASAKAN R. On the rate-jitter performance of jitter-buffer in TDMoPSN: study using queueing models with a state-dependent service[J]. Journal of Photonic Network Communications, 2015, 30(1): 108-130.
- [13] DAHMOUNI H, GIRARD A, SANSO B. An analytical model for jitter in IP networks[J]. Journal of Annals of Telecommunications, 2012, 67(1-2): 81-90.
- [14] HUREMOVIC A, HADZIALIC M. Novel approach to analytical jitter modeling[J]. Journal of Communications and Networks, 2015, 17(5): 534-540.
- [15] VAINSHTEIN A, STEIN Y J. RFC4553 structure agnostic time division multiplexing (TDM) over packet (SAToP)[S]. Washington DC, USA: Internet Society, 2006.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力系统同步数字系列(SDH)光缆通信工程设计技术规定: DL/T 5404—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-12-19

作者简介:

方子希(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网新技术; E-mail: fzxxzf2211@sina.com

高会生(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力通信网监测系统、网络管理和可靠性评估。

(编辑 姜新丽)