

PTN 业务随机时延对差动保护同步性能的影响分析

高会生¹, 汪 洋²

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003;

2. 中国电力科学研究院 信息与通信研究所, 北京 100192)

摘要: 分组传送网的时分复用业务存在随机时延, 这种随机时延会影响差动保护的同步性能。为了定量分析随机时延对同步性能的影响程度, 给出了一种端到端的业务随机时延模型, 并分析了收发双向不对称时延的分布特征。根据线路纵差保护的时间同步原理, 利用时延违背概率描述随机时延对同步性能的影响程度。仿真研究了业务路径节点数量、网络吞吐量和网络带宽等参数对时延违背概率的影响, 结果表明, 优化这些参数可以降低时延违背概率, 提高同步性能; 当网络带宽达到 10 Gbit/s, 或继电保护最大允许不对称时延为 100 μ s 时, 随机时延对继电保护同步的影响可以忽略。

关键词: 分组传送网; 业务时延; 时延不对称性; 差动保护; 同步; 通信

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.026

0 引言

分组传送网 PTN(Packet Transport Network)利用分组交换技术实现对传统传送网业务的承载, 具有资源利用率高、业务配置灵活、管理功能强的特点^[1]。随着电力通信业务分组化进程的不断加快, PTN 技术在电力通信网中的应用范围越来越广泛^[2]。特别是 PTN 在承载以太网类型的电力系统数据业务方面具有明显优势^[3]。然而, PTN 采用统计复用技术, 其服务质量能否保证继电保护业务的通信信息需求, 还需要进一步研究^[4]。因此, 电力通信网的继电保护和安全稳定等实时通信业务通常采用专用光纤或时分复用 TDM(Time Division Multiplexing)技术来传输数据信号。继电保护业务不仅要求通信时延足够小, 还要求信道的发送和接收时延具有良好的对称性^[5]。为了保证可靠性, 继电保护通道需要主备用配置, 而且要对继电保护通道切换装置进行动模试验, 进一步确认主备用通道时延的对称性^[6]。文献[7]结合智能变电站各类业务信息流的特点, 提出了定质交换(custom switching)的概念, 以满足通信业务的实时性和可靠性要求。

随着 PTN 技术在电力通信网中的普遍应用, PTN 对继电保护等关键通信业务的支撑能力已经成为人们研究的热点。文献[8]通过组网测试, 分析了 PTN 承载电力通信业务在时延、保护和时间同步等方面的特性; 文献[9]测试了 PTN 中以太网和 TDM 业务的时延特性, 结果表明业务时延和时延不对称性彼此之间具有相互独立性。以太网业务虽然具有较小的时延, 但其时延变化引起的不对称性却较大; 相反, TDM 业务虽然具有较大时延, 但时延抖动却较小, 时延对称性较好。文献[10]研究了 PTN 业务对

IEEE C37.94 和 IEC61850 这 2 种典型保护通信标准的适应性。文献[11]通过实验研究了不同厂家 PTN 设备对线路纵联差动保护的支持性能。文献[12]总结了 PTN 以 TDM 方式应用于继电保护和安全稳定通信中的测试结果, 并从原理上进行了分析。

现有研究成果表明, PTN 承载的 TDM(TDM over PTN)业务可以用于继电保护等时延敏感型的应用。以太网业务具有较短的时延, 但存在较强的时延不确定性。前期研究在实际系统测试方面进行了诸多有益探索, 但较少涉及电力 PTN 业务时延特性的随机性建模问题, 对 TDM over PTN 业务的时延不对称性缺乏深入研究。文献[13]提供的时延计算方法没有考虑中间节点时延的随机性, 不能用来分析时延不对称性。文献[14]提出的时延模型主要用来研究电信业务, 对电力通信业务缺乏针对性。

本文根据 TDM over PTN 端到端时延产生原理, 给出了考虑随机性的时延不对称模型, 并确定了节点随机时延的数值仿真方法; 结合线路纵联差动保护的通道同步原理, 研究了 TDM over PTN 随机时延对同步性能的影响, 并应用时延违背概率来表征影响程度的大小; 通过算例分析, 验证了所提模型和研究方法的可行性。本文的研究成果对继电保护和安全稳定数据传输通道的配置具有参考价值。

1 PTN 业务的随机时延

1.1 TDM over PTN 的承载方式

电路仿真业务是 TDM 在 PTN 中的主要承载方式, 分为结构化仿真业务和非结构化仿真业务 SAToP (Structure-Agnostic TDM over Packet) 2 种实现方式。其中 SAToP 不考虑 TDM 的帧结构, 将 TDM 业务视为一个整体来处理, 实现业务的透传。电力系统

PTN 普遍采用 SAToP 方式。

SAToP 分组化封装 TDM 数据遵循的原则是净荷数据与直连电路传输的数据保持相同字节顺序,且每个字节中的比特由高到低排列^[15]。SAToP 支持 E1 业务的典型净荷长度为 256 字节。发送端边缘路由器完成 TDM 帧的拆分、分组、封装和传送等操作过程;中间节点路由器完成分组转发;接收端边缘路由器完成分组的收集,并将分组进行去抖动缓存。当顺序接收的分组数量与预先配置的抖动缓存阈值(通常是抖动缓存的一半)相等时,边缘路由器按要求的同步时钟频率将抖动缓存中的内容发送到直连电路上,而且处于边接收、边发送的状态。SAToP 提供的 TDM 业务时延与纯粹的 TDM 网络存在差异,它包括 SAToP 分组化时延、基本 PTN 网络的边缘到边缘时延和抖动缓冲时延。为了能够较好地配置各种参数,网管系统在建立 SAToP 之前需要对时延和时延变化进行估计。

1.2 端到端时延

传统 TDM 业务采用确定复用技术,在业务路径确定的条件下,端到端时延具有一定程度的不确定性^[16]。然而,这种不确定性可以通过通道的优化配置加以避免,并能较好地满足线路纵联差动保护的需求。TDM over PTN 采用统计复用的分组交换技术,即使在路径确定的条件下,业务端到端时延仍然存在随机性。

在不考虑保护倒换和路径恢复问题的前提下,TDM over PTN 的端到端时延主要由源边缘路由器分组封装、网络中间节点交换、宿边缘路由器抖动缓存、线路光缆传播和用户侧转换设备 5 个方面的时延组成,表示为:

$$D_{E2E} = D_S + D_M + D_T + D_P + 2D_C \quad (1)$$

其中, D_{E2E} 为 TDM 业务单向端到端时延; D_S 为源边缘路由器时延; D_M 为中间节点总时延; D_T 为宿边缘路由器时延; D_P 为线路光缆传播时延; D_C 为用户侧转换设备时延。

SAToP 电路仿真方式下,第 i 个 TDM 数据帧在源边缘路由器中的等待封装时间 $D_S(i) = (N_{E1} - i + 1)T_R$,其中, N_{E1} 为 1 个 PTN 分组封装 TDM 数据帧的个数; T_R 为 1 个 TDM 数据帧在直连电路上的传输时间。

M 个中间节点的总时延等于各个节点随机时延之和,即:

$$D_M = 2M \frac{8L_{TF}}{R_P} + \sum_{j=1}^M T_M(j) \quad (2)$$

其中, $T_M(j)$ 为分组在第 j 个中间节点上的随机时延; L_{TF} 为以字节为单位的 TDM 分组长度,若分组头部信息为 46 字节,则 $L_{TF} = 46 + 32N_{E1}$; R_P 为核心网的链路速率。

宿边缘路由器的时延包括 TDM 数据帧低速率发送时延和抖动缓存时延。第 i 个 E1 数据帧在宿边缘路由器中的时延 $D_T(i) = (i - 1)T_R + 0.5 T_B$,其中, T_B 为抖动缓存深度。

光信号在每 km 光纤中的传输时延约为 $5 \mu s$ 。当路径的光缆总长度为 L 时, $D_P = 5L$ 。

综合考虑上述各种因素,TDM 业务的单向端到端时延为:

$$D_{E2E} = N_{E1} T_R + 0.5 T_B + 2M \frac{8L_{TF}}{R_P} + 5L + 2D_C + \sum_{j=1}^M T_M(j) \quad (3)$$

式(3)可以作为计算 TDM 业务单向端到端时延的数学模型。同理,业务的双向时延也可以通过式(3)获得。

1.3 不对称时延的随机性

如果以 D_{DET} 表示确定时延分量,以 D_{RAD} 表示随机时延分量,那么单向端到端时延表达式可以写为 $D_{E2E} = D_{DET} + D_{RAD}$ 。在业务路径保持不变的情况下,发送和接收 2 个不同方向上所产生的确定时延 D_{DET} 保持不变。但是,由于网络流量分布的不确定性,同样路径下发送和接收的随机时延 D_{RAD} 并不相同。确定时延分量 D_{DET} 可表示为:

$$D_{DET} = N_{E1} T_R + 0.5 T_B + 2M \frac{8L_{TF}}{R_P} + 5L + 2D_C$$

随机时延分量 D_{RAD} 表示为:

$$D_{RAD} = \sum_{j=1}^M T_M(j)$$

可以看出,随机时延分量是影响双向时延不对称性的主要因素,也是影响继电保护同步精度的重要因素之一。

在业务收发路径保持不变的条件下,双向不对称时延等于发送时延与接收时延之差。这样,双向不对称时延将消去确定时延分量 D_{DET} ,而保留随机时延分量 D_{RAD} ,表达式为:

$$\Delta D_{E2E} = \sum_{j=1}^M (T'_M(j) - T''_M(j)) \quad (4)$$

其中, ΔD_{E2E} 表示通道时延的不对称性,它是不同时刻、不同条件下的 D_{RAD} 之差; $T'_M(j)$ 和 $T''_M(j)$ 分别为第 j 个中间节点产生的发送和接收时延,二者为独立同分布的随机变量。

2 继电保护的同步性能

2.1 通道同步技术

由于线路纵联电流差动保护对通道时延和时延不对称性要求最为严格,所以本文重点研究此类继电保护的同步性能。线路纵联电流差动保护简称“线路纵差保护”,它利用保护通道传输被保护线路各侧的电气量。各侧保护装置根据电流差值,判别区内外故障。为了保证两侧的电流量值保持准确同步,线路

纵差保护要求通道的单向时延应小于 10 ms,双向时延必须对称^[17]。线路纵差保护设备与电力通信网之间的关系如图 1 所示。图中, R_A 、 R_B 表示纵差保护设备,二者之间通过 PTN 网络提供的通信通道传输继电保护数据; R_A 在 t_{A1} 时刻发出同步消息, R_B 在 t_{B1} 时刻收到同步消息; R_B 在 t_{B2} 时刻发出响应同步消息, R_A 在 t_{A2} 时刻收到响应同步消息。PE 为 PTN 网络的边缘路由器; P_1 、 P_2 、 P_3 为中间节点。

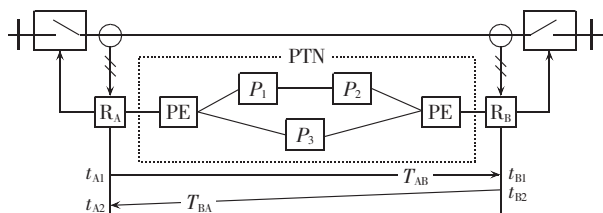


图 1 继电保护设备的通道同步

Fig.1 Channel synchronization of relay protection device

线路纵差保护通常采用全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 和通道往返时间测量 2 种同步方式来降低通道时延的影响,前者称为外同步,后者称为内同步。GPS 同步方式增加了系统功能的实现环节,容易导致系统可靠性的降低。通道同步方式不依赖于 GPS 等其他外部时间参考设备,仅靠通道本身的传输时延测量即可实现两端的同步,具有较高的系统可靠性。

通道同步技术采用双向交换带时间戳的消息来测量发送时延 T_{AB} 和接收时延 T_{BA} ,进一步计算出需要同步的时间差 $T_p = (T_{AB} + T_{BA})/2$,利用该时间差调整电流值的时间偏移量 $\Delta T_c = (T_{AB} - T_{BA})/2$ 。然而,保证通道同步技术正确实施的前提条件是收发 2 个方向上的时延必须相等,即时延对称性要非常好,否则同步准确度会极大降低^[12]。

2.2 不对称时延的违背概率

线路纵差保护通常利用最大允许不对称 MPA (Maximum Permissible Asymmetry) 时延 D_{MPA} 作为通道特性的重要衡量指标^[5]。若通道不对称时延 ΔD_{E2E} 满足条件 $|\Delta D_{E2E}| < D_{MPA}$,则通道的不对称性满足继电保护同步要求,通道同步性能可以得到保障;否则,同步性能不能得到保障。将不能满足这一约束条件的通道不对称时延概率定义为时延违背概率 DVP (Delay Violation Probability)^[18],表示为:

$$P_V[|\Delta D_{E2E}| \geq D_{MPA}] = 1 - \int_{-D_{MPA}}^{D_{MPA}} p(x) dx \quad (5)$$

其中, $p(x)$ 为 ΔD_{E2E} 的概率密度函数,如图 2 所示。

已知 $p(x)$ 和 D_{MPA} 即可求得 P_V 。利用 P_V 可以进一步定量分析 ΔD_{E2E} 对线路纵差保护同步特性的影响程度。例如,设 $p(x)$ 服从数学期望为 0、标准差为 15 μs 的正态分布;若 D_{MPA} 为 20 μs ,则 P_V 为 0.1824;

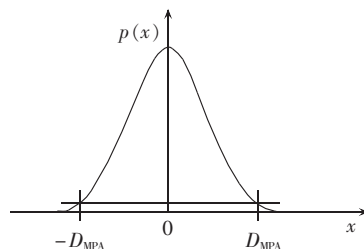


图 2 $p(x)$ 曲线

Fig.2 Curve of $p(x)$

若 D_{MPA} 为 30 μs ,则 P_V 为 0.0456。由此可见,给定 $p(x)$ 的情况下, D_{MPA} 越大, P_V 越小, ΔD_{E2E} 对同步特性的影响越小。同理可知,给定 D_{MPA} 的情况下, $p(x)$ 的参数变化直接影响 P_V 的大小,间接描述 ΔD_{E2E} 对同步特性的影响。

2.3 不对称时延分布

TDM 业务数据被封装成以太网数据帧,并在 PTN 核心网上进行传送。TDM 数据帧具有最高优先级,在核心网节点上产生的时延包括数据帧接收、数据帧处理、队列调度和数据帧发送 4 个部分。除队列调度属于随机时延以外,其他时延都属于确定时延。因此,影响收发不对称时延的主要因素是队列调度所产生的时延。

因为 TDM 数据帧具有最高优先级,所以绝大多数情况下不会出现队列调度等待时延。但是, TDM 数据帧必须等待当前正在发送的低级别数据帧发送结束后,方可进入发送状态。这种等待时间不仅与调度时刻有关,还与低级别数据帧的长度以及链路速率、带宽占用率等因素有关。

设标准以太网数据帧的最小长度 $L_{MIN} = 64$ 字节,最大长度 $L_{MAX} = 1518$ 字节。利用服从正态分布的随机变量 X 表示以太网帧长, X 的数学期望近似表示为 $\mu = (L_{MIN} + L_{MAX})/2$,标准差 σ 按下式计算:

$$\sigma = \frac{L_{MIN} - \mu}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(2\delta - 1)} \quad (6)$$

其中, $\operatorname{erf}^{-1}(\cdot)$ 为反误差函数; δ 为设定的最小概率值。例如, $F(x)$ 为 X 的累积概率分布函数,令 $F(L_{MIN}) = F(L_{MAX}) = \delta$,给定 δ ,根据式(6)可求出 σ 。若 δ 为 10^{-4} ,则 $\mu = 791$ 字节、 $\sigma = 195$ 字节。以太网帧长分布表示为: $X \sim N(791, 195^2)$ 。

设链路速率为 R_p ,则以太网帧的传输时间 $T_1 = 8X/R_p$,其中 X 为随机的以太网帧长。当链路低优先级业务的带宽占用率为 α (一般设为 10%~90%) 时,链路空闲时间 $T_2 = (1/\alpha - 1)T_1$ 。

将链路状态分为“空闲”和“忙”2 种情况,分别考虑 TDM 分组在节点中的队列调度时延。若在调度时刻输出链路处于“空闲”状态,则分组不会出现队列调度时延;若在调度时刻输出链路处于“忙”状态,

则分组需要等待以太网数据帧发送完毕后才能进行调度,等待时间表示为 T_{Delay} 。第 j 个中间节点产生的随机时延赋值表达式为:

$$T_M(j) = \begin{cases} 0 & \text{空闲} \\ T_{\text{Delay}} & \text{忙} \end{cases}$$

队列调度时延产生原理如图 3 所示。

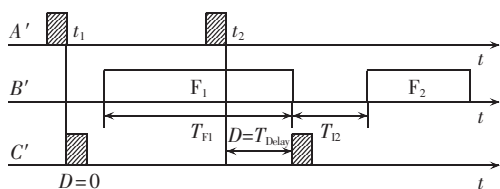


图 3 队列调度时延的产生原理

Fig.3 Schematic diagram of queue scheduling delay generation

在图 3 中, A' 表示 TDM 分组到达节点, B' 表示低优先级以太网分组从节点输出, C' 表示 TDM 分组从节点输出; F_1 、 F_2 分别为不同长度的以太网数据帧; T_{F1} 和 T_{I2} 分别为链路的占用时间和空闲时间, 带宽占用率 α 是 T_{F1} 和 T_{I2} 长时间统计的结果。TDM 分组在 t_1 时刻到达节点, 链路处于“空闲”状态。此时, 节点立即转发 TDM 分组, 队列调度时延为 0; TDM 分组在 t_2 时刻到达节点, 节点正在发送以太网分组, 链路处于“忙”状态。此时, TDM 分组需要等待以太网数据帧发送完毕后方可被调度, 队列调度时延为 T_{Delay} 。

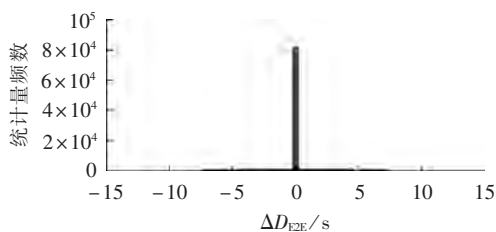
假设 PTN 网络中每个中间节点的以太网帧长相互独立且服从相同分布。在链路带宽占用率相等的条件下, ΔD_{E2E} 的分布特性可以利用数值仿真方法进行研究。在不同中间节点数 M 和带宽占用率 α 条件下, ΔD_{E2E} 的统计直方图如图 4 所示。统计直方图的形状描述了 ΔD_{E2E} 的分布特性。当 M 和 α 都较小时, ΔD_{E2E} 的随机性较弱, 如图 4(a) 所示; 当 M 较大但 α 较小时, ΔD_{E2E} 呈近似标准正态分布特性, 如图 4(b) 所示; 当 M 和 α 都较大时, ΔD_{E2E} 呈数学期望为 0 的正态分布特性, 如图 4(c) 所示。为了保证 ΔD_{E2E} 具有较低的不确定性, 进一步降低时延的不对称性, 业务路径的中间节点数 M 应尽量小, 带宽占用率 α 应尽量低。

3 分析方法描述

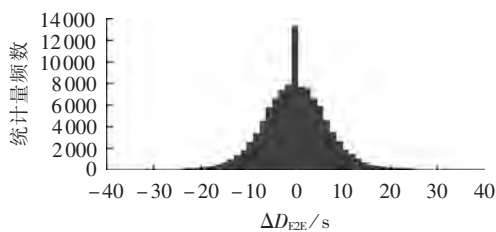
双向不对称时延 ΔD_{E2E} 和时延违背概率 P_V 的分析过程由 5 个步骤组成。

a. 参数设置。

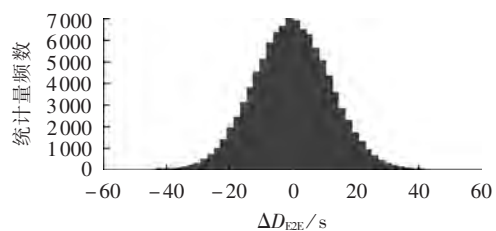
数值仿真过程需要设置的 SAToP 参数包括分组封装 E1 数据帧的个数 N_{E1} 和抖动缓存深度 T_B 等, 需要设置的 PTN 参数包括链路速率 R_P 、带宽占用率 α 、以太网帧长分布的最小概率 δ 和中间节点数 M 等, 其他需要设置的参数还包括仿真次数和各类随机数



(a) $M=1, \alpha=10\%$



(b) $M=14, \alpha=10\%$



(c) $M=14, \alpha=90\%$

图 4 中间节点数 M 和带宽占用率 α 对不对称时延分布的影响

Fig.4 Influence of M and α on asymmetric delay distribution

的数量。

b. 链路随机状态产生。

首先根据以太网帧长的最大和最小值, 由式(6)确定以太网帧长的正态分布参数 μ 和 σ , 然后产生给定数量的随机帧长随机数, 并计算数据帧发送的随机持续时间向量 T_1 (T_1 的元素为不同的 T_{F1} 取值), 用来表示链路为“忙”状态。根据带宽占用率 α 计算随机空闲时间向量 T_2 (T_2 的元素为不同的 T_{I2} 取值), 用来表示链路为“空闲”状态。最后, 将向量 T_1 和 T_2 交叉排列成时间序列, 用来表示链路的随机状态。

c. TDM 分组随机时延产生。

根据图 3 给出的队列调度时延产生原理, TDM 分组时延由链路状态时间序列和 TDM 分组到达时刻之间的随机对应关系确定, 从而产生相应数量的 TDM 分组时延。

d. ΔD_{E2E} 的统计分析。

在 TDM 分组时延样本中随机抽取与中间节点数 M 相等数量的样本值, 对其进行求和, 得到发送时延的随机分量。重复上述过程, 得到接收时延的随机分量。2 个分量之差即为 ΔD_{E2E} 。利用统计直方图, 可以对 ΔD_{E2E} 的分布特性进行统计分析。

e. 时延违背概率的计算。

利用步骤 d 得到的仿真数据, 可以绘制 ΔD_{E2E} 的累积分布曲线。在累积分布曲线上作出继电保护通

道所要求的 D_{MPA} ,进一步计算出违背概率 P_V 的数值。

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

仿真参数设置及其相关说明见表 1。表中的链路速率、带宽占用率和中间节点数等参数,根据仿真的不同会有适当调整。文献[5]给出的同步精度典型值小于 $100\ \mu\text{s}$,高精度同步时要求小于 $10\ \mu\text{s}$ 。本文设定的最大允许不对称时延 D_{MPA} 为 $10\ \mu\text{s}$ 。本算例重点研究在给定 D_{MPA} 条件下,通道不对称时延 ΔD_{E2E} 的分布特性对继电保护同步精度的影响。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	参数值	说明
E1 数据帧数 N_{E1}	8 帧	每个分组封装 TDM 帧的个数
抖动缓存深度 T_b	$1000\ \mu\text{s}$	宿边缘路由器的去抖动缓存时间
链路速率 R_p	$1000\ \text{Mbit/s}$	PTN 的带宽,通常为 1 GE 或 10 GE
带宽占用率 α	50%	低优先级分组的带宽占用情况,反映网络吞吐量
帧长最小概率 δ	0.0001	用于计算帧长分布的标准差
中间节点数 M	0~15	路径中的中间节点数量
最大允许不对称时延 D_{MPA}	$10\ \mu\text{s}$	继电保护设备的不对称时延要求
时间序列样本数 N	100 万次	仿真的链路状态数

4.2 结果分析

4.2.1 时延不对称性仿真

将表 1 中的参数 M 设为 3,通过仿真得到双向不对称时延 ΔD_{E2E} 的分布特性如图 5 所示。图 5(a)为 ΔD_{E2E} 的统计直方图,表示概率密度函数的形状信息;图 5(b)为 ΔD_{E2E} 的累积分布函数曲线,表示概率分布信息。在给定继电保护通道不对称时延需求 D_{MPA} 的条件下,利用这些概率分布函数信息可以计算违背概率 P_V 。

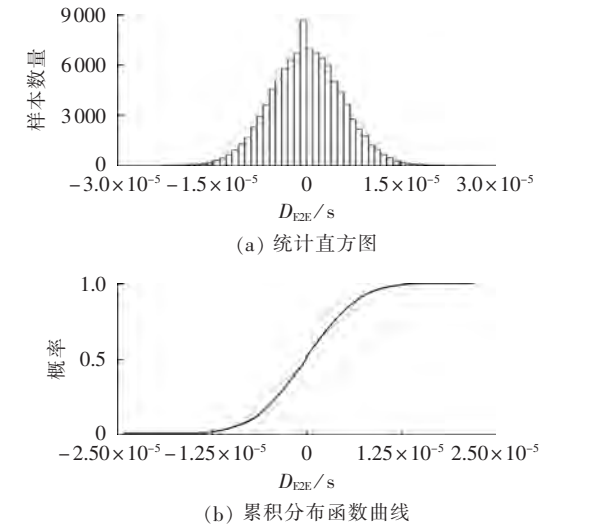


图 5 双向不对称时延的分布特性 ($M=3, \alpha=50\%$)
Fig.5 Characteristics of two-way asymmetric delay distribution when $M=3, \alpha=50\%$

4.2.2 业务路径节点数量的影响

设 α 为 50%,业务路径中间节点数量 M 对双向不对称时延 ΔD_{E2E} 分布特性的影响见图 6(a)。当 $M=0$ 时,路径中间没有中间节点,发送和接收端的边缘路由器直接相连,端到端时延不存在随机性, ΔD_{E2E} 为 0,其累积分布是一条垂线;当 $M=1$ 时,路径中存在 1 个中间节点,端到端时延具有较小的随机性, ΔD_{E2E} 取值的一部分为 0,另一部分随机分布在 0 点两侧;随着 M 的增大,时延随机性逐步增强,标准差逐渐增加,累积分布曲线逐渐呈正态分布特性。

4.2.3 网络吞吐量的影响

链路带宽占用率 α 表示网络吞吐量的大小。设 $M=8, \alpha$ 在 10%~90% 范围内变化, ΔD_{E2E} 的分布特性如图 6(b)所示。随着 α 的增加, TDM 分组在网络节点中等待调度的时延 ΔD_{E2E} 增加,且随机性增强,累积分布曲线呈正态分布。然而,当 α 大于 50% 时,曲线趋于重合。

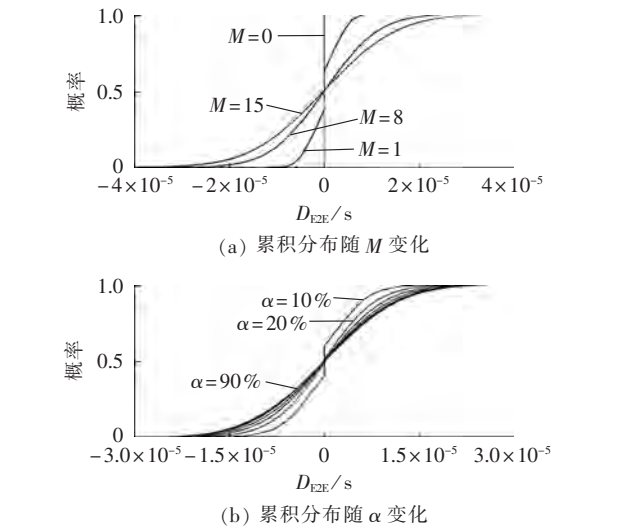


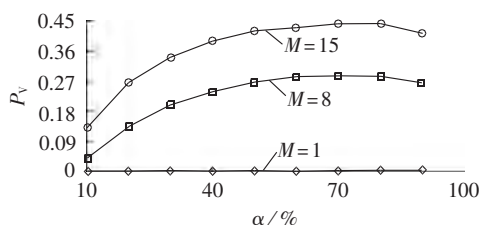
图 6 不对称时延分布特性的变化
Fig.6 Change of asymmetric delay distribution characteristics

4.2.4 网络带宽的影响

在光网络上实现的 PTN 具有 1 Gbit/s 或 10 Gbit/s 的网络带宽。图 5 和图 6 的时延分布特性都是基于 1 Gbit/s 网络带宽计算出的结果。网络带宽由 1 Gbit/s 增加到 10 Gbit/s,相当于传输时延降低至原来的 1/10,而且时延特性的形状保持不变。这一结论可以通过仿真的方法加以验证。

4.2.5 时延违背概率

设网络带宽为 1 Gbit/s,且继电保护要求高精度同步,最大允许不对称时延 D_{MPA} 为 $10\ \mu\text{s}$ 。路径的中间节点数 M 选择 1、8 和 15 这 3 个不同取值,链路带宽占用率 α 取值范围为 10%~90%。违背概率 P_V 的分析结果如图 7 所示。 $M=1$ 时,路径时延的随机

图 7 时延违背概率 P_v 的变化Fig.7 Change of delay violation probability P_v

性很低,不对称时延接近于 0,时延违背概率 P_v 的最大值为 0.003,接近于 0;当 $M=8$ 时,时延的随机性增强,时延违背概率 P_v 随 α 的增加而增加,但是当 α 大于 80% 以后,违背概率 P_v 随 α 的增加而减小;当 $M=15$ 时,时延的随机性进一步增强,时延违背概率 P_v 随 α 的增加而增加,但是当 α 大于 80% 以后,违背概率 P_v 也出现了随 α 的增加而减小的现象。

由此可知,路径中间节点 M 的增加导致了不对称时延分布的方差增大。在给定 D_{MPA} 条件下,通道不对称时延的方差越大,时延违背概率越大,随机时延对继电保护同步性能的影响越大;反之,随机时延对继电保护同步性能的影响越小。在大多数情况下, α 的增加会导致时延违背概率的增加。但是,当 α 接近 90% 时,不对称时延的随机性反而减小,从而导致了时延违背概率的降低。从原理而言,当 α 较大时,TDM 分组在网络节点中产生调度时延的概率增加,节点时延相对固定,时延不对称程度降低。需要注意,在此并不建议在实际工程中通过增加链路占用率来减小时延违背概率。

若网络带宽设为 10 Gbit/s,则在任何条件下 P_v 均非常小,近似为 0。这说明,在 PTN 链路带宽为 10 Gbit/s 时,业务随机时延对继电保护的同步特性几乎没有影响。若最大允许不对称时延 D_{MPA} 设为 100 μs ,则 P_v 在 $M=15$ 时的最大值仅为 8.66×10^{-15} 。这说明,在 PTN 链路带宽为 1 Gbit/s 时,继电保护最大允许不对称时延的增加,可以减少 PTN 业务随机时延对继电保护同步特性的影响。

5 结论

TDM over PTN 业务存在随机时延,而这种随机时延导致了通道双向时延的不对称性。为了能够定量分析随机时延对继电保护同步性能的影响,本文分析了 PTN 业务随机时延的形成机理,建立了 TDM 业务的不对称时延模型,仿真研究了不同条件下 TDM 业务对线路纵差保护通道的时延违背概率。时延违背概率的大小反映随机时延对继电保护同步性能的影响程度。本文得出如下结论:

a. TDM over PTN 业务可以支撑线路纵联差动保护的数据传输,但存在不对称时延降低同步精度

的风险;

b. 不对称时延的分布特性与中间节点个数、链路带宽占用率和核心网链路速率等参数有关,通过优化这些参数可以降低 PTN 业务随机时延对保护通道的时延违背概率,提高同步性能;

c. 当 PTN 网络带宽达到 10 Gbit/s,或继电保护最大允许不对称时延大于 100 μs 时,PTN 业务随机时延对继电保护同步特性的影响可以忽略。

下一步的研究工作是综合考虑误码率、路径保护倒换过程以及帧长分布特征等因素,建立更加完善的不确定时延模型,实现更准确的数值仿真。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. YD/T 2374—2011 分组传送网(PTN)总体技术要求[S]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [2] 陈红艳,袁辉,张向东. OTN 与 PTN、SDH 技术在电力通信网的应用[J]. 光通信研究,2013,30(4):24-27.
CHEN Hongyan,YUAN Hui,ZHANG Xiangdong. Applications of OTN with PTN and SDH technologies in electric power communication networks[J]. Study on Optical Communications,2013,30(4):24-27.
- [3] 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.
- [4] IEEE. StdC37.236-2013 IEEE guide for power system protective relay applications over digital communication channels[S]. New York,USA:IEEE,2013.
- [5] IEC. IEC/TR 61850-90-1 Ed 1-2009 Communication networks and systems for power utility automation-part 90-1:use of IEC61850 for the communication between substations[S]. Grenoble,France: IEC,2009.
- [6] 詹荣荣,周春霞,金乃正,等. 继电保护通道切换装置动模试验[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):168-172.
ZHAN Rongrong,ZHOU Chunxia,JIN Naizheng,et al. Dynamic simulation for channel switching device of relay protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):168-172.
- [7] 王海柱,蔡泽祥,张延旭,等. 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):156-162,168.
WANG Haizhu,CAI Zexiang,ZHANG Yanxu,et al. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):156-162,168.
- [8] 袁训明,资浩. 分组传送网对于电力通信业务的传送性能研究[J]. 电力系统通信,2012,33(236):58-62.
YUAN Xunming,ZI Hao. Research of packet transport network transmission performance for electric power communication services[J]. Telecommunications for Electric Power System,2012,33(236):58-62.
- [9] BEAUMONT P,KAWANO F,KAWARADA A,et al. Performance evaluation of current differential relay over a wide area network [C]//Proceedings of the 11th International Conference on De-

- velopments in Power Systems Protection. Birmingham,UK;IEEE, 2012:1-6.
- [10] BLAIR S M,COFFELE F,BOOTH C D,et al. Demonstration and analysis of IP/MPLS communications for delivering power system protection solutions using IEEE C37.94,IEC61850 sampled values,and IEC61850 GOOSE protocols[C]//Proceedings of the International Council on Large Electric Systems(CIGRE). Paris,France;CIGRE,2014:1-8.
- [11] JESUS J,DIAGO C,LOBO R,et al. MPLS networks for inter substation communication for current differential protection applications in digital substations[C]//Proceedings of the Fifth World Conference for Protection,Automation and Control(PAC 2014). Zagreb,Croatia;PAC World,2014:1-8.
- [12] ROESLER S,LOBO R. Proving viability of line current differential over packet switched networks [C]//Proceedings of the 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers. College Station,TX,USA;IEEE,2014:542-551.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. YD5199—2011 分组传送网(PTN)工程设计暂行规定[S]. 北京;出版者不详,2011.
- [14] CAO Chang,ZHANG Yongjun,ZHANG Jie,et al. Packet-level optimization for transmission performance improvement of internet-bound traffic in a MPLS-TP network[J]. IEEE/ISA Journal of Optical Communications and Networking,2010,2(3):991-999.
- [15] VAINSHTEIN A,STEIN Y J. IETF RFC 4553 Structure-agnostic Time Division Multiplexing(TDM) over Packet(SAToP)[S]. Washington DC,USA:Internet Society,2006.
- [16] 高会生,马博洋. 一种基于概率分布的纵联差动保护通道时延模型[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):61-65.
- GAO Huisheng,MA Boyang. A longitudinal differential protection channel delay model based on the probability distribution [J]. Power System Protection and Control,2014,42(17):61-65.
- [17] 国家能源局. DL/T364—2010 光纤通道传输保护信息通用技术条件[S]. 北京;中国电力出版社,2010.
- [18] RAAAYATPANAH M A,SALEHIFATHABADI H,KHALAJ B H, et al. Bounds on end-to-end statistical delay and jitter in multiple multicast coded packet networks[J]. Journal of Network and Computer Applications,2014,41(1):217-227.

作者简介:



高会生

高会生(1963—),男,河北安新人,教授,博士,从事电力通信网监测系统、网络管理和可靠性评估等方面的研究(E-mail: gaohs007@sina.com);

汪洋(1981—),男,河南偃师人,高级工程师,博士,从事电力系统通信技术应用方面的研究。

Effect of PTN service random delay on synchronization performance of current differential protection

GAO Huisheng¹,WANG Yang²

(1. North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: The random time delay of the time division multiplexing of packet transport network influences the synchronization performance of differential protection. A random delay model for the end to end service is given to quantitatively analyze it and the characteristics of two-way asymmetric delay distribution are analyzed. According to the time synchronization principle of line longitudinal differential protection,the DVP(Delay Violation Probability) is adopted to describe the influence of random delay on the synchronization performance. The influence of network parameters,such as service path node number,the network throughput and network bandwidth,on the DVP is researched by simulation and the simulative results show that,the DVP can be reduced by optimizing these parameters to improve the synchronization performance; when the network bandwidth reaches 10 Gbit/s or the maximum allowable asymmetric delay is 100 μ s,its influence can be ignored.

Key words: packet transport network; service delay; delay asymmetry; current differential protection; synchronization; communication