

DOI: 10.7667/PSPC150920

故障行波特性和对光纤差动保护时延的影响分析

黄景光¹, 梅李鹏¹, 林湘宁², 翁汉俐¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电力系统差动保护对保护两侧电气量数据传输的实时性提出了更高的要求, 过大的时延将会影响数据的同步精度而造成差动保护误动或拒动。在实际运用中, 必须充分考虑保护通道时延问题。而在特高压远距离输电系统中电气量的时延效应不容忽视, 传统的时延分析方法没有考虑到电气量的行波效应。综合考虑了自故障发生到保护完成故障判断的过程中, 电气量行波和光纤信号在各个环节的时延效应。由于故障发生的位置不同和光纤通信设备之间的差异性导致了总时延的不确定性, 并通过三种随机型分布的概率时延模型来反映总时延的差异, 并对结果进行了比较和分析。结果表明正态分布模型更适合时延分布规律, 总时延可以作为保护装置的选型优化和两侧数据同步提供依据。最后运用正态分布模型对广域保护通信结构时延与网络节点的关系进行了分析。

关键词: 光纤通信; 差动保护; 时延; 行波; 随机分布

Influence on the optical fiber differential protection delay based on characteristic of fault traveling wave

HUANG Jingguang¹, MEI Lipeng¹, LIN Xiangning², WENG Hanli¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The differential protection of power system puts forward higher requirements on the real-time data transmission for double terminals' information. Larger transmission delay is likely to influence the synchronization precision and cause the refusing act and incorrect operation of relay protection. So the channel delay problem must be given full consideration to protect in practical application. But the delay effect caused by electrical measurement cannot be ignored in UHV long-distance transmission system, the traditional method of delay analysis without considering the effect of electric parameters as traveling wave. This paper considers the process from the failure happening to the protection completing fault diagnosis, and the delay of electric parameters traveling wave and the optical signals in each link. Different fault location and communication equipment lead to uncertainty of channel delay, then through three kinds of random distribution of delay model are used to reflect the differences in total delay and the results are compared and analyzed. The result shows that normal distribution is more suitable for delay distribution, research conclusion can be applied in optimal selection of protective devices and data synchronization on both sides. Finally, the relationship between the delay of communication and the network nodes is analyzed by using the normal distribution.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090).

Key words: optical fiber communications; differential protection; delay; traveling wave; random distribution

0 引言

随着光纤技术的发展以及成本的大幅下降, 促进了差动保护的应用, 使其俨然成为超特高压输电线路的主保护^[1]。输电线路差动保护是根据线路两

侧电气量进行计算、判别的全线速动保护。保护借助于通信通道双向传输电气量数据, 根据本侧和对侧电流计算出差动与制动电流, 并据此来判别区内、外故障。因此, 必须保证两侧采集的数据必须是同时刻的。但目前组成通道的各个装置由不同厂家生产的装置因硬件特性的不同, 可能出现固有延时不一致的情况, 而且对通道时延还没有相关标准。因

此, 需要充分考虑通道造成的时延问题, 为了准确测量通道的时延, 文献[2]对线路差动保护 PTN 时分复用业务进行时延分析, 文献[3]提出了智能变电站过程层交换机延时测量方案, 文献[4]提出了光纤通道时延的计算方法, 文献[5-7]针对 SDH 自愈环网光纤通道传输继电保护信号的可靠性和时延进行了分析。以上相关文献研究中, 整个数据传输过程只考虑了二次电流在通信通道的数据传输问题, 没有考虑一次电流电气量在电力系统中作为行波在输电线路的传输造成的时延, 对光纤差动保护通道时延分析不全面。而随着特高压远距离输电网建立, 在实际中故障发生后一次侧故障电气量达到两侧检测装置时间并不相同, 故障发生后电气量以行波的方式向两侧传播, 两侧最大检测时延为行波在整条线路传输的时间, 这个时间差对于光纤保护通道总时延的影响必须加以考虑。文献[8]提出了电气量行波特性对高频保护通道时延的影响, 但还没有相关文献论述电气量行波特性对于光纤保护通道时延的影响。本文综合考虑了自故障发生时刻到保护完成判断全过程, 电气量行波和随后发出的光纤信号在各个环节传输所导致的时延不确定性, 建立了三种总时延随机概率模型, 更能反映实际传输时延情况, 结果对依据通道的数据同步方法有一定参考性。

1 光纤差动保护

1.1 光纤差动保护通道

光纤通道使用光纤作为传输介质, 本身就是有抗干扰能力强、是绝缘体、传输损耗低、传输容量大、不受电网运行方式的影响等优点, 为电流差动保护的推广也提供了强大的技术支持。由于光纤通道在工程应用中较低的故障率, 对于设备日常运维及继电保护的可靠性要求都是具有很大的优势, 所以, 光纤通道将会作为保护通道的主流被广泛应用。其通道的配置主要有两种方式: 专用光纤方式和复用光纤方式。

(1) 专用光纤通道

专用光纤通道方式采用两端的保护装置直接通过光纤连接, 不经过任何复接设备的通信方式。该保护通道误码率低, 在现场差动保护的情况下得到了较广泛应用。但这种通道一旦断缆, 将影响继电保护信号的传输, 无替代路由传输^[9-10], 同时对纤芯资源的需求量大, 而继电保护的信息量较小, 直接采用独立的纤芯, 使纤芯资源浪费, 无法满足保护通道长远发展的要求。

(2) 复用光纤通道

光纤复用主要应用于 SDH 环网中, 其中复用光

纤通道根据继电保护接口速率的不同又可分为 2 Mbps 数字通道和 64 kbps 数字通道。通常利用 64 kbps 接口经由 PCM 设备接入 SDH 网络或直接利用 2 Mbps 接口直接接入 SDH 网络。为了保证电力系统通信的稳定性, 必须保证在有直连通道故障的情况下有代替路由, 因此大多数采用复用光纤通道的形式。

以云南电网 220 kV 线路保护通道配置为例, 2 Mbps 复用光纤通道占到 35.79%, 64 kbps 复用光纤通道仅占 0.68%, 专用光纤通道占到 21.23%, 光纤通道的比重 57.71%, 比整个保护通道配置的一半还多, 其中 4 条线路暂未开通保护通道占 0.68%。500 kV 线路保护通道配置中, 只选用 2 Mbps 复用光纤通道, 未选用 64 kbps 复用光纤通道, 其中 2 Mbps 复用光纤通道占 77.39%, 专用光纤通道占 2.03%, 光纤通道的比重 79.42%, 接近整个保护通道配置的 80%^[11]。

1.2 输电线路故障电气量的行波分析

无论是区内故障还是区外故障, 电气量的突变都会使故障点成为一个波源, 故障暂态量以行波的方式以接近于光速向两侧传播。导线上产生波过程是因为它具有分布的电感和电容, 使得电压或电流既与坐标 x 有关, 也与时间 t 有关, 它们始终是 x 和 t 的函数。在输电线路中的 x 点, 某时刻 t 下电压、电流瞬时值应满足下列方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} [u_{abc}] = [L] \frac{\partial}{\partial t} [i_{abc}] \\ \frac{\partial}{\partial x} [i_{abc}] = [C] \frac{\partial}{\partial t} [u_{abc}] \end{cases} \quad (1)$$

应用拉普拉斯变换可得无损单导线线路波动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [u_{abc}] = [L][C] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [u_{abc}] \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} [i_{abc}] = [C][L] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [i_{abc}] \end{cases} \quad (2)$$

对此方程进行相模变换^[12], 把相互耦合的三相电压、电流转换为相互独立的模量, 即 α 模量、 β 模量和 0 模量, 通常采用 Karen-Bauer 变换, 式(2)变换为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta 0} \\ i_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} = [LC] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta 0} \\ i_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[LC] = \text{diag} [L_\alpha C_\alpha \quad L_\beta C_\beta \quad L_0 C_0 \quad L_\alpha C_\alpha \quad L_\beta C_\beta \quad L_0 C_0] \quad (4)$$

求解式(3)后得到线路中 α 模量、 β 模量和 0 模

量行波电压和行波电流的前行波和反行波方程:

$$\begin{cases} i_q(t - \frac{x}{v}) = \frac{1}{z} u_q(t - \frac{x}{v}) \\ i_f(t + \frac{x}{v}) = -\frac{1}{z} u_f(t + \frac{x}{v}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: v 、 z 为对应 α 模量、 β 模量和 0 模量的电磁波速和波阻抗; u_q 、 i_q 、 u_f 和 i_f 分别为前行波和反行波电压、电流。

电力系统某点发生故障时, 该点电气量会发生突然变化, 故障点此时成为一个波源, 暂态故障量以行波的形式向两端传播。由于系统中各点到故障点的距离不同, 行波到达的时间就各不相同。输电线路两侧保护检测到故障发生的时间也就不相同, 在分析光纤电流差动保护时延特性时, 这点应该加以考虑。

一条长为 L 的输电线路, 行波从一端传播到另一端的时间为:

$$t_L = \frac{L}{v} \quad (6)$$

式中, v 为行波的传播速度, 对架空线线路取 3×10^5 (km/s)。

当线路外部发生故障时, 如图 1 所示的 k_1 点, 该故障点处电气量发生改变, 故障行波 s_w 先到达近故障侧 N, 经过时间 t_L 后, 故障电流产生的行波到达远故障侧 M。在近故障侧 N 保护检测到故障后, 将故障电气信息由电信号转换为光信号 s_n , 通过光纤通道传到远故障侧, 在经过时间 t_{M0} 后, 光信号达到 M 侧。而 M 侧在收到故障电气量后, 将故障电气量信息量由电信号转换为光信号 s_m , 通过光纤通道传到近故障侧, 在经过时间 t_{N0} 后, 光信号达到 N 侧。对于假设通道双向传输时延一致时, 则有 $t_{M0} = t_{N0}$, 对于 M 侧保护, 通信端口收到的信号就应该考虑行波在整条线路传输的延时。

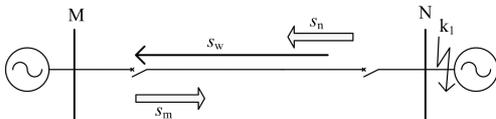


图 1 外部故障时的通道时延效应

Fig. 1 Channel delay effect on an external fault

线路内部发生故障时, 如图 2 所示 k_2 点, 该故障点处电气量发生改变, 故障行波 s_w 分别向线路两端 M、N 侧, 分别经过 t_{L1} 和 t_{L2} 后到达 M、N 侧。两侧保护在检测到故障后, 将故障电气信息由电信号转换为光信号 s_m 、 s_n , 在分别经过时间 t_{N0} 、 t_{M0} 后光信号 s_m 、 s_n 到达 N、M 侧。因此, M 侧的输电线路延时为 $t_M = t_{L1} + t_{M0}$, 当故障靠近 M 侧时, 延时效应最大为 $t_M = t_L + t_{M0}$ 。同理, 当故障靠近 N 侧时, 延时效应最大也为 $t_N = t_L + t_{N0}$ 。假设通道双向传输时延一致时, 则有 $t_{M0} = t_{N0}$ 。对于内部故障, 两侧通信端口收到的信号时延差为 $|t_{L1} - t_{L2}|$ 。

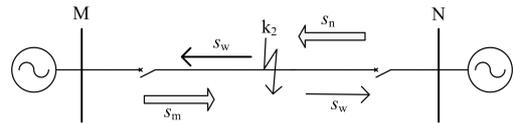


图 2 内部故障时的通道时延效应

Fig. 2 Channel delay effect on an internal fault

1.3 通道传输总时延

时延是继保信号传输性能的重要指标, 若保护设备在规定时间内没有接收到命令信号, 将引起保护设备的误操作。因此一些发达国家制订了关于差动保护时延的规定, 对于 220 kV 及其以上系统, 南瑞系列高压线路保护装置单向通信通道最大允许传输时间不得大于 15 ms。国内许多生产厂家都有自己的时延标准, 单向通信通道传输一般处于 20 ms 以内。光纤通信领域不断出现新技术, 每种新技术的引入可能会减少时延, 也可能会增加时延, 具体取决于其保护配置。

造成时延的主要因素有:

- (1) 故障发生后电气量以行波方式在线路上传播造成的时延。
- (2) 传输设备 SDH、PCM、网络节点造成的时延。
- (3) 光纤传输介质造成的时延。

故障点位置不同导致行波时延的不确定性, 而不同的传输设备因组合方式不同造成的时延也不相同, 对于主要行波、SDH 设备、PCM 设备、网络节点设备(中继复用器)、光纤通道等部分时延典型值^[13]如表 1 所示。

表 1 传输时延构成

Table 1 Structure of the transmission delay

通道 \ 类型		行波/ μ s	SDH/ μ s	PCM/ μ s	每个网络节点/ μ s	光纤/ μ s
专用通道		3.4	/	/	/	4.93
复用通道	64 kbps	3.4	10~60	300	20~125	4.93
	2 Mbps	3.4	10~60	/	20~125	4.93

2 通道时延计算模型

2.1 单向通道总时延计算公式

总时延为数字信号或光信号通过某些介质所经历的时间总和, 对于差动保护而言, 其总时延 T 可以表示为

$$T = T_L \cdot L_0 + T_{SDH} + T_{PCM} + N \cdot T_0 + T_H \cdot L \quad (7)$$

式中: T_L 为行波每公里传输时延; L_0 为故障点到某侧的距离, 因此故障点发生位置不同而导致 $T_L \cdot L_0$ 是不固定的; T_{SDH} 为两端 SDH 设备复用、解复用时延; T_{PCM} 为两端 PCM 设备复用、解复用时延, 对于 2 Mbps 接口 T_{PCM} 时延为零; N 为中间节点设备个数; T_0 为节点设备时延; T_H 为光纤通道传播时延; n 为光在纤芯中的折射率, 一般取值 1.48; L 为传输距离。则光纤通道延时为:

$$t_0 = \frac{n}{v} \times L = 4.93 \cdot L (\mu\text{s}) \quad (8)$$

2.2 单向通道总时延计算模型

对于式(7)而言, 显然若知道通道每个环节的确定时延则能得出 T 的固定值, 这虽然有利于减少保护误动的概率, 但这与实际情况并不相符, 在实际中这些设备的时延存在很大的随机性, 设备性能的稳定值得考虑, 因此需要根据大量现场经验来判断, 为了更好地阐述总时延的变化规律, 根据数学概率论方法建立三种连续随机分布模型: (1) 均匀分布模型; (2) 指数分布模型; (3) 正态分布模型。

和定值计算相比, 随机计算模型更能够反映总

时延的变化趋势, 计算结果更具有普遍性, 也可以根据计算结果来对中间设备进行优化配置以及不同设备对总时延的影响程度。根据相关时延典型值以及文献中所测得的相关现场数据^[14]可以发现, 光纤差动保护总时延具有以下特点:

1) 单个设备时延大多数情况集中在某一范围内波动, 不会发生太大变化;

2) 不同中间设备对总时延的影响程度不同;

3) 行波对于传输时延有一定影响;

4) 光信号传输时延对行波传输时延相对稳定。

超高压通信方式一般采用复式通道形式, 由 64 kbps 接口和 2 Mbps 接口计算总时延公式有差别, 需要分别计算。

64 kbps 接口总时延计算公式为:

$$T_{64\text{kbps}} = T_L \cdot L_0 + 2T_{SDH} + 2T_{PCM} + N \cdot T_0 + T_H \cdot L \quad (9)$$

2 Mbps 接口总时延计算公式为:

$$T_{2\text{Mbps}} = T_L \cdot L_0 + 2T_{SDH} + N \cdot T_0 + T_H \cdot L \quad (10)$$

令式(7)中 T_{SDH} 、 T_{PCM} 、 T_0 、 L_0 为随机变量, 并分别服从均匀分布、二项分布、正态分布。我们假设:

1) 对于正态分布各种设备标准差因性能区别而不一样, 其反映了时延值偏离典型值的程度, 为了简化计算假定所有正态分布(除了 L_0)中标准差取 5, 这也比较符合现场测试时延值的波动情况。

2) 对于 L_0 而言, L_0 可能取 $0 \sim L$ 中间各个值, 但也服从正态分布, 标准差取 10 较合理。根据表 1 相关数据, 其总时延概率模型如表 2。

表 2 概率时延模型

Table 2 Probability model of delay

模型 接口	均匀分布模型	二项分布模型	正态分布模型
64 kbps	$L_0 \sim U(0, L)$	$L_0 \sim B(L, 0.5)$	$L_0 \sim N(2/L, 100)$
	$T_{PCM} \sim U(100, 600)$	$T_{PCM} \sim B(650, 0.5)$	$T_{PCM} \sim N(300, 25)$
	$T_{SDH} \sim U(10, 60)$	$T_{SDH} \sim B(70, 0.5)$	$T_{SDH} \sim N(35, 25)$
	$T_0 \sim U(20, 125)$	$T_0 \sim B(130, 0.5)$	$T_0 \sim N(60, 25)$
2 Mbps	$L_0 \sim U(0, L)$	$L_0 \sim B(L, 0.5)$	$L_0 \sim N(2/L, 100)$
	$T_{SDH} \sim U(10, 60)$	$T_{SDH} \sim B(70, 0.5)$	$T_{SDH} \sim N(35, 25)$
	$T_0 \sim U(20, 125)$	$T_0 \sim B(130, 0.5)$	$T_0 \sim N(60, 25)$

注: 表 2 中只有输电线路长度 L 为未知量, 这在后续计算中将赋予具体值进行计算。

3 通道时延计算分析

为了更直观地研究总时延的概率分布特性和数据的严谨性, 在确定了传输线的长度后, 依据表 2 中三个随机分布模型, 利用 Matlab 产生 10^8 个分别服从均匀分布、二项分布、正态分布的随机数组成总体, 再采取系统抽样的方法从总体中抽取 10^5 个

数据组成样本空间, 最后通过查找 Matlab 公式求取三个分布模型的概率分布函数, 按照式(9)和式(10)分别计算 64 kbps 接口和 2 Mbps 接口的累计概率分布函数。

3.1 不考虑行波时延时, 计算总时延

考虑到超高压(500 kV 及其以上)输电线路比一般电压等级线路长, 令 $L=300$ km, 网络节点 $N=18$,

针对三种分布模型编辑程序计算总时延。其运行结果如图 3 所示。

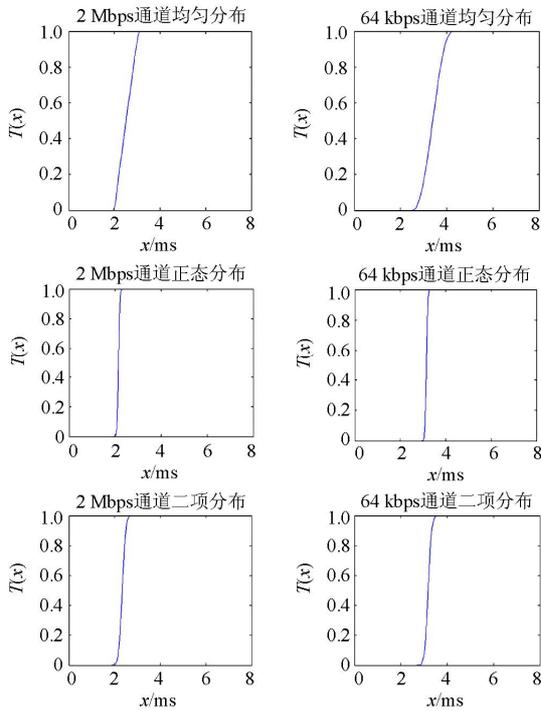


图 3 不考虑行波的时延概率分布

Fig. 3 Delay probability distribution without considering the traveling wave

图 3 中从左到右分别为 2 Mbps 接口和 64 kbps 接口不考虑行波时延特性时服从均匀分布、正态分布、二项分布概率累积积分函数图。由图可知对于两种接口其均匀分布模型平均时延略大于正态分布模型时延和二项分布模型时延。对于 2 Mbps 接口通道其总时延处于 2 ms 左右，而 64 kbps 接口通道其总时延处于 2.6 ms 左右，均小于单向通信通道的最大允许传输时间。

3.2 考虑行波时延时，计算总时延

考虑到电气量的行波特性时，同样 $L=300$ km，网络节点 $N=18$ ，针对三种分布模型编辑程序计算总时延。其运行结果如图 4 所示。

图 4 中从左到右分别为 2 Mbps 接口和 64 kbps 接口考虑行波时延特性时服从均匀分布、正态分布、二项分布概率累积积分函数图。结论与图 3 一致，对于 2 Mbps 接口通道其总时延处于 2.7 ms 左右，而 64 kbps 接口通道其总时延处于 3.4 ms 左右，也均小于单向通信通道的最大允许传输时间。

3.3 分析结论

对比分析图 3 和图 4 结果，可以得到以下几个结论：

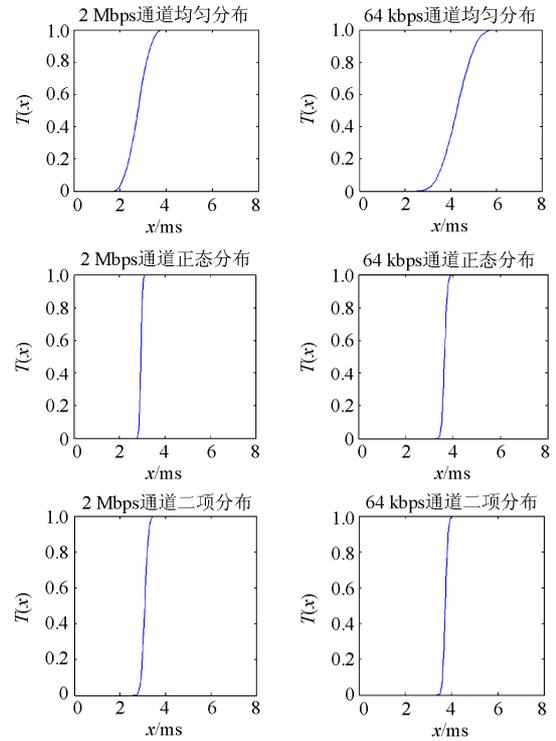


图 4 考虑行波的时延概率分布

Fig. 4 Delay probability distribution considering the traveling wave

1) 在不考虑行波效应和考虑行波效应时，无论是 2 Mbps 接口还是 64 kbps 接口，都是服从正态分布和二项分布时分布曲线较平均分布陡峭，说明服从正态分布和二项分布时，时延更集中，表示正常情况下设备时延参数大多数处于稳定值，波动范围较小。正态分布相对于二项分布而言更适合描述设备时延随机分布特征。

2) 无论是 2 Mbps 接口还是 64 kbps 接口服从何种分布时，其单相传输时延均满足小于 15 ms 要求。在实际中输电线路距离、网络节点数可能小于假设数据也可能大于假设数据，10 ms 冗余足够。

3) 不论随机时延服从何种分布，64 kbps 接口总时延明显均大于 2 Mbps 接口总时延，说明 PCM 设备的时延对总时延有一定的影响。应尽量优化配置，使用 2 Mbps 接口通道减少中间环节。

4) 对于 $L=300$ km 的线路而言，考虑行波时延效应时，两种通道接口总时延都增加了大约 0.75 ms，而当故障发生在输电线路保护两侧时，总延时将增加约 1.5 ms，换算成角度差为 18° ，这种角度差对于光纤差动两侧电气量数据同步将会产生影响，相位滞后或者超前都会导致差动计算灵敏度降低，在实际中还会有许多不利因素：输电线路长

度更长, 设备老化等造成更长的时延, 若区内故障两侧达到极限相角差为 90° , 保护将拒动作。因此通道的延时或相位的滞后再对差动保护有不可忽略的影响, 在计算通道时延时或基于通道数据同步时, 应充分考虑行波在输电线路产生的时延。

4 广域保护通信结构时延

当电力系统通信普遍使用的光缆网络受损严重时, 会造成通信中断, 导致继电保护装置退出或者误动作, 因此当电力通信通道发生堵塞、故障或中断时, 利用现有健全通信通道, 采用迂回的方式搭建新的传输通道, 然而新的信道时延可能不满足保护对于时延要求, 时延过长将不能用于保护动作, 而只能作为事后效验计算。

图 5 为广域保护通信网络^[15]拓扑结构示意图, 假设每条线路长度都一样, 当 B5 和 B4 之间直连链路发生故障时, 两侧虽然可以接收到电气故障量信息, 却不能将双方采集到的故障信息在最短时间内进行交换, 需要利用迂回通道进行交换, 例如 C5-C1-C2-C4、C5-C2-C3-C4、C5-C7-C6-C4 等都可以作为备用通道, 这样通道不仅增加了传输距离, 网络节点数量也相应的增加, 相比于传输距离而言, 其对传输总时延的影响更大, 因此在通道重构时必须考虑节点数量。在考虑行波时延情况下对于两种接口选取正态分布模型来考虑节点数与总时延关系, 图 6 为两种通道网络节点数与总时延概率分布图。

从图 6 可以看出迂回通道总时延与节点数呈线性关系, 64 kbps 通道节点数为 45 时的时延值低于 10 ms, 说明在随机通道路径情况下总时延均能满足

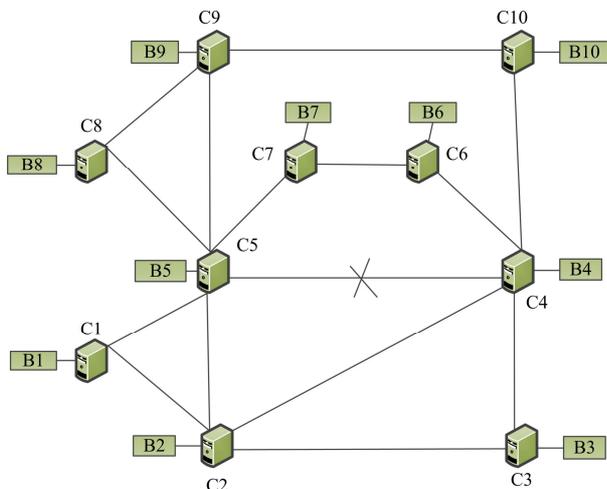


图 5 广域保护通信拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of communication network in wide area protection

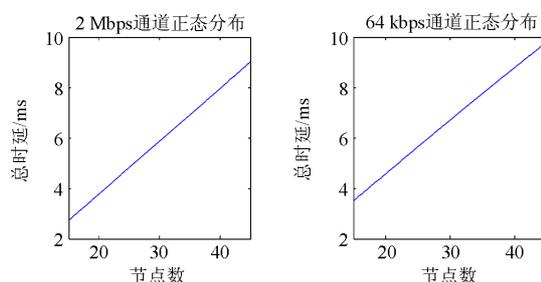


图 6 网络节点数与时延概率分布

Fig. 6 Network nodes and delay probability distribution

小于 15 ms 要求, 但不一定满足区内区外故障正确动作的要求。在实际广域保护组网中, 为了使时延尽可能小, 网络节点数通常小于假设值, 而且经过优化算法所选路径也是最优值。也可通过此方法进一步分析计算出满足一定可靠性前提下广域网传输通道中所包含最大网络节点的数量。

5 总结

光纤差动保护作为超高压线路的主保护, 对超高压电网的稳定运行具有重要作用, 准确传递和同步两侧电气量是关键的一环, 而传递过程中必然会产生时延, 传统通道时延分析方法只考虑了 PCM、SDH、网络节点等设备产生时延, 忽略了电气量作为行波产生的时延效应。介于时延的随机性, 以行波和通信设备的延迟时间概率密度函数为基础建立了三种随机时延分布模型, 得到的数据更符合时间传输时延情况, 结果表明: 正态分布模型更适合随机时延分布情况: 考虑行波之后的总时延大约增加了 0.75 ms 左右, 可以对提高差动数据同步精度提供依据。最后对广域保护组网通信时延进行了定量分析, 给出了占主要时延比重的网络节点数与总时延的关系。本文不足之处在于只对故障行波的影响进行了定性的研究, 没有进行定量具体的研究, 怎么避免行波时延的影响这是今后研究的重点。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 128-167.
 - [2] 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.

[3] 刘井密, 李彦, 杨贵. 智能变电站过程层交换机延时测量方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 111-115.
LIU Jingmi, LI Yan, YANG Gui. Design of delay measurement switch in intelligent substation process level[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 111-115.

[4] 刘宏君, 张兆云, 李辉. 光纤通道路径不一致对线路差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 52-55.
LIU Hongjun, ZHANG Zhaoyun, LI Hui. Influence of the fiber route with difference on line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 52-55.

[5] 付聪, 安灵旭, 方华亮, 等. 继电保护系统对一次设备可靠性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 38-44.
FU Cong, AN Lingxu, FANG Hualiang, et al. Study on the influence of protection system on reliability of primary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 38-44.

[6] 王艳. 继电保护信号在 SDH 光纤自愈网中的传输[J]. 电力系统通信, 2009, 30(206): 53-69.
WANG Yan. Relay protection signal transmission in SDH optical self-healing network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(206): 53-69.

[7] 李芷筠, 戴志辉, 焦彦军, 等. 继电保护可靠性管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 115-119.
LI Zhijun, DAI Zhihui, JIAO Yanjun, et al. Design and accomplishment of protection reliability management system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 115-119.

[8] 黄景光, 胡汉梅, 蒋秀洁. 输电线路高频保护通道延时的行波特性分析[J]. 继电器, 2007, 35(2): 15-19.
HUANG Jingguang, HU Hanmei, JIANG Xiujie. Analysis of traveling wave's channel delay effect of the transmission line HF protection[J]. Relay, 2007, 35(2): 15-19.

[9] 陈建, 李乐生, 李长兴, 等. 光纤通道继电保护的实现及应用中的若干问题的探讨[J]. 电力设备, 2006, 7(12): 58-62.
CHEN Jian, LI Lesheng, LI Changxing, et al. Discussion on some problems in realization and application of optical fiber channel protection[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12): 58-62.

[10] 林川, 赵海, 刘晓, 等. 能源互联网路由策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 37-44.
LIN Chuan, ZHAO Hai, LIU Xiao, et al. Research on routing strategy for intergrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 37-44.

[11] 丁慧霞. 光纤通道传输继电保护信号的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
DING Huixia. Study on the relay protection signal over optical fiber channel[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.

[12] 刘琦, 邵能灵, 范春菊, 等. 同塔四回不对称参数线路的相模变换[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 171-180.
LIU Qi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Phase-mode transformation of asymmetry-parameter four-parallel lines on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 171-180.

[13] 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.

[14] 秦文萍, 郝永晶, 刘毅敏. 通信通道时延对微机保护装置的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 58-62, 75.
QIN Wenping, HAO Yongjing, LIU Yimin. Influence of communication channel time delay on microcomputer based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 58-62, 75.

[15] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-12-20

作者简介:

黄景光(1968-), 男, 副教授, 研究方向为信号分析和电力系统继电保护研究;

梅李鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 894363779@qq.com

林湘宁(1970-), 男, 教授, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 周金梅)