

# 一种基于概率分布的纵联差动保护通道时延模型

高会生, 马博洋

(华北电力大学电气与工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 电流差动保护对数据传输实时性提出了很高要求, 过大的传输延迟有可能造成继电保护设备的拒动或误动, 保护通道的组织结构和通信设备的差异导致了通道延时具有明显的不确定性。分析了保护信道延迟的影响因素, 以通信设备的延迟时间概率密度分布函数为基础, 研究了基于概率分布的纵联差动保护信道随机延时模型。该模型能够反映实际通道延时的不确定性。进一步给出了继电保护设备误动和拒动的概率确定方法。研究结果可以作为电力系统继电保护通道优化配置的参考。

**关键词:** 差动保护; 时延; 概率分布; 不确定性

## A longitudinal differential protection channel delay model based on the probability distribution

GAO Hui-sheng, MA Bo-yang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Current differential protection puts forward high requirements on real-time data transmission, large transmission delay is likely to cause the refusing action of relay protection equipment or misoperation. Differences in organizational structure and communication equipment lead to obvious uncertainty of channel delay. This paper analyzes the influence factors of delay protection channel. On the basis of the time delay probability density distribution function of communication equipment, a longitudinal differential protection channel random time delay model based on the probability distribution is studied. The model can reflect the channel delay uncertainty. Further the probability determination method of relay protection equipments misoperation and refusing action is given. The results can be used as a reference for electric power system relay protection channel optimization configuration.

**Key words:** differential protection; delay; probability distribution; uncertainty

中图分类号: TM73      文献标识码: A      文章编号: 1674-3415(2014)17-0061-05

## 0 引言

电流差动保护需要比较线路两侧的电气量, 同时必须要保证线路两侧的电气量信息同步采集。如果纵联保护通道受损, 关键信息缺失, 将会导致主保护性能降低甚至被迫退出运行<sup>[1]</sup>。同时, 过大的传输延迟或不对称延迟有可能造成继电保护设备的拒动或误动。因此对传输实时性提出很高要求。通过光纤通道传输保护信号, 充分保证了数据传送的实时性和可靠性。但是, 光纤差动保护在实际应用中依然会产生一定的时延, 目前针对差动保护时延还未有统一标准。因此, 差动保护传输时延问题以及不对称时延问题长期以来都是电力继电保护研究领域的热点问题。例如, 文献[2]针对 2 Mbps 信号

时延产生原因、影响因素等做了深入分析。文献[3-7]针对SDH光纤通道传输继电保护信号的可靠性和时间延迟进行了分析和计算。文献[8]围绕传输时延问题给出了相应的计算模型。文献[9]针对差动保护两侧采样率不一致的问题, 提出了频域变换重采样方法。以上文献的研究, 基本都是基于大量的实测数据或经验值进行分析计算, 没有考虑时延的分散性, 即时延存在随机性。因而无法定量确定继电保护设备的误动和拒动概率。同时, 确定性时延模型虽然可以进行定量计算, 但与实际存在的随机性不相符合, 所得结论缺乏实用价值。本文从基本定义出发, 分析了保护信道延迟的影响因素, 以通信设备的延迟时间概率密度分布函数为基础, 研究了基于概率分布的纵联差动保护信道随机延时模型, 进一步给出了继电保护设备误动和拒动的概率确定方法。研究结果可以作为电力系统继电保护通道优化配置的参考。

**基金项目:** 河北省高等学校科学技术研究指导项目 (Z2010291)

### 1 纵联差动保护

#### 1.1 传输通道分类

根据传输通道的不同,纵联保护通常分为四种:导引线纵联保护、电力线载波纵联保护、微波纵联保护、光纤纵联保护。随着数字通信技术的发展,采用 SDH 光纤通道进行保护信号传输已经成为电网企业进行保护信号传输的首选方式<sup>[10]</sup>。目前,采用光纤接口与光纤通道配合来传输保护信号的方式,其光纤通道的配置有两种方式,即专用光纤通道和复用光纤通道。

##### 1) 专用光纤通道

专用光纤通道主要采用的是专用光缆或专用纤芯。其优点是不受线路变化的影响,不受雷电、腐蚀等自然因素的影响,稳定性较强。其缺点是,由于光纤的带宽很大,而继电保护信号的数据量很小,带宽资源利用率不高。另外,专用光纤其可靠性依赖于站点间直通光缆的性能,当光缆断开时,保护远传信号全部中断,无替代传输路由<sup>[11]</sup>。

##### 2) 复用光纤通道

目前,光纤复用主要通过 SDH 技术实现。在电力通信网中,通常利用 64 kb/s 接口经由 PCM 设备

接入 SDH 网络,或者直接利用 2 M 接口接入 SDH 网络。以河北南网为例,220 kV 输电线路保护按照“双重化”的配置原则,采用以下两种方式:一种为“专用光纤直连”和“2 Mbit/s 通道复用”相结合的方式;另一种为 2 条相互独立的 2 Mbit/s 通道复用保护方式<sup>[12]</sup>。

#### 1.2 帧结构

通过光纤通道传输信息的纵联保护,通常采用 HDLC (High Level Data Link Control, 高级数据链路控制) 同步通信方式。HDLC 的帧结构如表 1 所示。

表 1 HDLC 帧结构

开始标志	地址	控制	信息	帧校验序列	结束标志
01111110 (8 bit)	8 bit	8 bit	N bit	16 bit	01111110 (8 bit)

对于差动保护,线路两侧每隔 3.3 ms (60°) 向对侧发送一帧数据,每帧共 19 个字节 (152 bit),其中包括 12 个字节的三相电流相量值的实部、虚部分量,以及用于同步调整、控制等信息<sup>[13]</sup>。其帧结构如表 2 所示。

表 2 差动保护帧结构

Table 2 Frame structure of differential protection

同步字	本侧序号	三相电流	控制字 KZX1	远动控制字 KZX11	对侧序号	$\Delta_t$	校验码
1 bit	1 bit	12 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit	1 bit

综上所述,差动保护传输帧长应为 200 bit。

#### 1.3 传输时延

##### (1) 时延标准

一些电力类国家标准(如 DLT 364-2010, GBT15149.1-2002 等),针对差动保护时延值作了相应规定:用于继电保护的通信通道单向时延应不大于 10 ms。此外,相关电力企业、设备制造商也制订了相应的厂家标准。例如:南京南瑞 RCS-901 系列保护装置,要求单向传输时延小于 15 ms,同时要求必须保证保护装置的收发路由时延一致。

##### (2) 影响时延的主要因素

造成时延的原因是多方面的,本文所讨论的通道时延主要来自以下两个方面:

1) 传输设备时延。传输设备包括 PCM 设备、SDH 设备等。

2) 线路时延。包括传输介质时延(电力线载波、微波、光纤等)和数据帧传播时延两部分。

不同的传输方式造成的时延因素不同,具体来

说,主要由 PCM 设备、终端 SDH 设备、网络节点设备、数据帧、光纤通道等部分组成。具体时延典型值如表 3 所示。

表 3 传输时延构成

Table 3 Structure of the transmission delay

	PCM/ μs	终端 SDH/ μs	网络 节点/ μs	数据帧/ μs	光纤/ μs	
专用通道	无	无	无	97.66	4.93	
复用 通道	64 k	300	10~60	20~125	3 125	4.93
	2 M	无	10~60	20~125	97.66	4.93

## 2 信道时延模型

### 2.1 时延计算公式

时延,即数字信号以群速通过一个数字连接所经历的时间。针对差动保护光纤传输方式,其时延  $t$  可由式(1)表示。

$$t = t_{\text{PCM}} + t_{\text{SDH}} + \sum_{i=1}^N t_i + t_O + t_F \quad (1)$$

式中:  $t_{\text{PCM}}$  为 PCM 复用设备复用、解复用时延, 对于 2 048 kbit/s 接口,  $t_{\text{PCM}}$  为零;  $t_{\text{SDH}}$  为 SDH 设备复用、解复用时延; 其中,  $t_{\text{PCM}}$ 、 $t_{\text{SDH}}$  为两端设备的总时延。

$N$  为中间节点设备总数;  $t_i$  为中间节点设备时延; 通常也为 SDH 设备, 但作为中间节点, 其内部结构与终端 SDH 设备不同, 因此产生的时延也不同。

$t_O$  为光纤通道时延。  $t_O = \frac{n}{c} \cdot L$ ,  $n$  为光在纤

芯中的折射率, 一般取典型值 1.48;  $c$  为光在真空中的传播速度 ( $3 \times 10^8$  m/s);  $L$  为传输距离, 单位为 km。将以上值代入可得每公里传输时延  $\tau_0 = 4.93 \mu\text{s}$ , 即

$$t_O = \tau_0 \cdot L = 4.93 \cdot L \quad (\mu\text{s})$$

$t_F$  为数据帧传输时间, 不同的传输速率下, 传输一帧的时间也不同。

## 2.2 随机时延模型

式 (1) 所列计算模型, 其时延值基于确定量计算所得。这种计算方法较为简单, 能够根据大量数据得到符合实际情况的典型值, 但并没有考虑时延的随机性, 无法描述时延值产生的概率。

通常, 在实际信号传输中, 传输设备时延并非定值, 而是在某一范围内存在随机性。因此, 为了更加准确描述时延的变化, 需要将上述公式中的部分参数设为随机变量, 建立概率模型。

与确定性计算相比, 采用随机时延模型具备以下优势:

- 1) 能够更为准确地描述时延的变化趋势。
- 2) 随机时延模型计算出的时延值更具有普遍性, 与实际情况更为相符。
- 3) 通过建立随机时延模型能够大致估算出导致继电保护设备拒动或误动的概率, 或反之根据国家时延标准得出网络中可允许的最大节点数量。

根据设备时延的典型值以及一些文献中所测得的实际数据发现, 继电保护传输时延具有以下特点:

- 1) 设备时延值集中在某一时间区间内。
- 2) 线路时延相对固定, 而设备时延大部分接近典型值, 呈正态分布形态。

- 3) 传输通道中各部分设备时延对总时延的影响大小不同。

基于以上原因, 令式 (1) 中  $t_{\text{PCM}}$ 、 $t_{\text{SDH}}$  和  $t_i$  为随机变量, 分别用  $T_{\text{PCM}}$ 、 $T_{\text{SDH}}$  和  $T_i$  表示。并令以上随机变量分别服从均匀分布和正态分布, 并设置分布参数如表 4 所示。

表 4 概率模型

Table 4 Probability model

	时延计算公式	均匀分布模型	正态分布模型
64 k	$T_{64k} = 2T_{\text{PCM}} + 2T_{\text{SDH}} + T_i \cdot N + \tau_0 \cdot L$	$T_{\text{PCM}} \sim U(100, 700)$ $T_{\text{SDH}} \sim U(10, 100)$ $T_i \sim U(20, 150)$	$T_{\text{PCM}} \sim N(300, \sigma_{\text{PCM}}^2)$ $T_{\text{SDH}} \sim N(30, \sigma_{\text{SDH}}^2)$ $T_i \sim N(65, \sigma_i^2)$
2 M	$T_{2M} = 2T_{\text{SDH}} + T_i \cdot N + \tau_0 \cdot L$	$T_{\text{SDH}} \sim U(10, 100)$ $T_i \sim U(20, 150)$	$T_{\text{SDH}} \sim N(30, \sigma_{\text{SDH}}^2)$ $T_i \sim N(65, \sigma_i^2)$

表 4 中各个概率模型的均值参考设备时延典型值 (表 3) 所得, 其方差作为变量在后续计算中分别代入不同值进行对比计算。

## 3 随机时延分析

由于随机变量个数较多, 通过数学建模的方法难以得出其概率分布表达式。因此, 为了更为直观地研究总时延的随机分布特性, 选用 Matlab 仿真的方法。

根据表 4 所列分布模型, 利用 Matlab 分别产生 10 000 000 个服从均匀分布或正态分布的随机数, 并从中抽取 1 000 000 个作为随机时延样本。按照时延计算公式利用产生的随机时延计算出总时延, 由此可以得到 1 000 000 个总时延值组成的样本空间。

通过 Matlab 的 `ecdfhist` 函数, 可以得到总时延的概率密度函数。通过 `ecdf` 可以得到累积概率分布函数。

### 3.1 标准差对总时延概率分布的影响

标准差能反映一个数据集的离散程度。平均数相同的, 标准差未必相同。当随机变量服从正态分布时, 标准差  $\sigma$  的大小反映了时延值偏离均值的程度。通过设定不同的标准差值, 可以得到不同的概率分布曲线, 如图 1 所示。

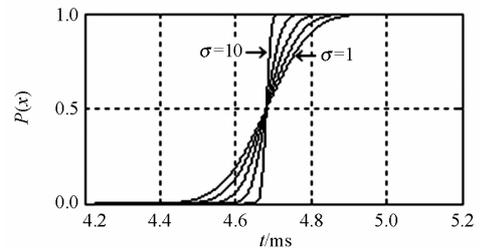


图 1 正态分布时标准差对分布的影响

Fig. 1 Influence of the standard deviation of normal distribution

从图 1 中可以看出, 当随机时延满足正态分布时, 时延的变化范围越大, 即标准差越大, 累积概率分布曲线越陡峭, 即总时延的变化范围越小。为了便于研究, 在后续仿真时延中标准差  $\sigma$  取 5。

### 3.2 传输距离对时延的影响

令  $L$  分别等于 40、60、80、100、120 km, 同时令网络节点数量  $N=10$ 。运行程序结果如图 2 所示。

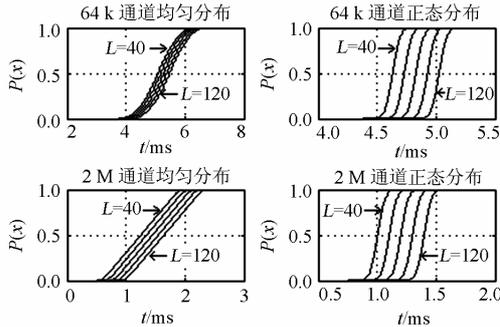


图 2  $L$  变化对时延概率分布的影响

Fig. 2 Impact on the delay probability distribution when  $L$  changed

图 2 中, 五条曲线从左至右分别为  $L=40、60、80、100、120$  时的概率累积分布函数。从图中可以看出, 随着传输距离的增加, 传输延迟逐渐增大。当传输距离为 120 km 时, 最大时延不超过 7 ms, 远小于标准规定的 15 ms。对比两类传输通道分别服从均匀分布和正态分布时, 可以看出, 当随机时延服从正态分布时, 最大时延略小于其服从均匀分布, 且随着传输距离的增大, 总时延的变化程度更大。

### 3.3 网络节点数量对时延的影响

令网络节点数量  $N$  分别等于 10、15、20、25、30, 令  $L=100$  km。运行程序结果如图 3 所示。

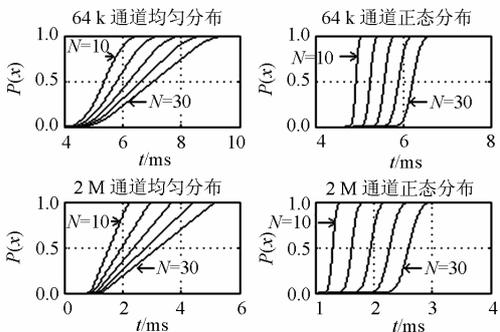


图 3  $N$  变化对时延概率分布的影响

Fig. 3 Impact on the delay probability distribution when  $N$  changed

图 3 中, 五条曲线从左至右分别为  $N=10、15、20、25、30$  时的概率累积分布函数。从图中可以看出, 随着网络节点数量的增加, 传输延迟逐渐增大。当网络节点为 30 时, 最大时延不超过 10 ms, 远小于标准规定的 15 ms。同时, 与  $L$  变化时情况类似, 随机时延服从正态分布时, 最大时延略小于其服从均匀分布。

### 3.4 结果分析

综合图 1~图 3, 可以得出以下结论:

1) 当随机时延满足正态分布时, 标准差对总时延的分布有一定影响, 因此各个设备时延的变化范围对总时延的影响不能忽略。

2) 从累积分布曲线可以看出, 在服从正态分布的情况下, 曲线更为陡峭。说明在正态分布下时延取值更为集中。同时可以看出, 时延服从正态分布时, 其值整体小于均匀分布下的时延值, 最大时延更小。

3) 不论随机时延服从何种分布, 总时延最大值在设定参数下均满足小于 15 ms 的要求。在实际传输中, 传输距离和网络节点数量通常小于以上参数设置, 因此满足传输时延要求。

4) 相比于传输距离而言, 网络节点数量的增减对传输总时延的影响更大。因此, 在实际组网时, 应当充分考虑网络节点数量, 以避免由于网络节点过多而造成的时延过大。

5) 不论随机时延服从何种分布, 64 k 接口总时延均大于 2 M 接口总时延。这是由于 64 k 接口中特有的 PCM 设备产生的时延在整个通道时延中所占比重较大, 因此, 应尽量避免中间环节经 64 kbps 速率转接, 从而减少通道总时延。

## 4 总结

不同设备厂家会根据其设备的性能给出相应的时延典型值, 但是在实际数据传输过程中, 时延的产生存在着很大的随机性。导致其随机性的因素包括设备元件性能、网络拥塞状况、设备温度等。本文从基本定义出发, 分析了保护信道延迟的影响因素, 以通信设备的延迟时间概率密度分布函数为基础, 研究了基于概率分布的纵联差动保护信道随机延时模型, 并建立了纵联差动保护在复用传输通道下的传输时延概率分布模型。

相比于确定性模型分析, 建立随机模型具有更大优势。主要表现在以下方面: 1) 能反映出单个设备时延变化范围对总传输时延的影响; 2) 随机模型更符合实际传输情况, 同时能反映出在不同的分布模型下各个设备对总时延的影响程度; 3) 在以后的

研究中, 通过进一步分析, 还能够计算出在满足一定可靠性的前提下传输通道中所能容纳的最大节点数量等参数。

### 参考文献

- [1] 汪旻, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.  
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [2] 廖敏. 2M 电路传输时延对光纤电流差动保护的影响[J]. 电力系统通信, 2009, 30(199): 62-64.  
LIAO Min. 2M circuit transmission delay effects on optical fiber current differential protection[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(199): 62-64.
- [3] 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 Ling-xu, FANG Huang-liang, 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.
- [4] 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.
- [5] 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 Zhi-jun, DAI Zhi-hui, JIAO Yan-jun, et al. Design and accomplishment of protection reliability management system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 115-119.
- [6] 赵厚滨. 光纤自愈环网传输线路纵联保护的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
ZHAO Hou-bin. Research on the transmission of pilot protection by using optic cable self-healing rings[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [7] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于 GPS 对时的分散采样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 149-153.  
BU Qiang-sheng, SONG Liang-liang, ZHANG Dao-nong, et al. Research on the test method of distributed sampling differential protection synchronization based on GPS time[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 149-153.
- [8] 金华锋, 余荣云, 吴奕, 等. 继电保护数字复用通道的时延[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 42-45.  
JIN Hua-feng, YU Rong-yun, WU Yi, et al. Relay protection digital multiplexing channel delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 42-45.
- [9] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.  
WANG Ye, LU Yu-ping, XU Yi-chao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.
- [10] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 257-263.  
XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 257-263.
- [11] 陈建, 李乐生, 李长兴, 等. 光纤通道继电保护的实现及应用中若干问题的探讨[J]. 电力设备, 2006, 7(12): 58-62.  
CHEN Jian, LI Le-sheng, LI Chang-xing, et al. The realization of the fiber channel relay protection and some problems in the application of the discussion[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12): 58-62.
- [12] 张合明, 许俊现. 2 Mbit/s 差动保护通道技术分析 & 运行可靠性提高策略[J]. 电力系统通信, 2009, 30(197): 52-57.  
ZHANG He-ming, XU Jun-xian. 2 Mbit/s differential protection channel technology improve reliability analysis and strategy[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(197): 52-57.
- [13] 李保恩, 马拥军, 李海峰, 等. 光纤差动保护的应用研究及现场试验[J]. 继电器, 2003, 31(7): 73-76.  
LI Bao-en, MA Yong-jun, LI Hai-feng, et al. Application study and field test of optical differential protection[J]. Relay, 2003, 31(7): 73-76.

收稿日期: 2013-11-26

作者简介:

高会生(1963-), 男, 工学博士, 教授, 主要从事通信网络管理和信息系统与信息安全等方面的研究工作;

马博洋(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信及信息处理。E-mail: boyang\_ma@foxmail.com