

纵联电流差动保护数据同步技术 及通道切换时数据交换的研究

李钢¹, 冯辰虎², 孙集伟³, 王宁³, 刘平²

(1. 华北电网有限公司安监部, 北京 100053; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;
3. 华北电力调度通信中心, 北京 100053)

摘要: 介绍了纵联电流差动保护利用数字通道进行采样时刻同步、采样序号同步及通道延时计算的原理, 比较了采用不同同步方法时保护性能的区别, 深入研究了双纵联通道不同切换方式下切换过程带来的通道延时变化对差动保护的影响。通过研究, 明确了在通道切换过程中及切换完成后的一段时间内, 纵联电流差动保护的同步是不正确的, 保护必须有相应的对策, 否则可能会不正确动作。

关键词: 纵联电流差动保护; 数字通道; 通道切换; 采样同步

Research on data synchronization technology and data exchanging while channel switching of current differential protection

LI Gang¹, FENG Chen-hu², SUN Ji-wei³, WANG Ning³, LIU Ping²

(1. Safety Supervising Department, North China Grid Co., Ltd, Beijing 100053, China;
2. North China Electrical Power Research Institute Co., Ltd, Beijing 100045, China;
3. Dispatching Center, North China Grid Co., Ltd, Beijing 100053, China)

Abstract: This paper introduces the basic principle of the synchronization of sample time, the synchronization of sample number and the channel time delay computation used in pilot current differential protection using the digital channel, compares the difference of protection performance of adopting different synchronization methods, and deeply researches the influence of channel time delay change on differential protection brought by the switch process of double longitudinal channel in different switching modes. Through the study, this paper makes it clear that the synchronization of pilot current differential protection is incorrect in a period after the channel switching or in the switching process, and the countermeasure of protections must be considered, otherwise, false tripping would occur.

Key words: pilot current differential protection; digital channel; channel switching; sampling synchronization

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)22-0141-05

0 引言

随着同步数字系列(SDH)通信网成为电力系统通信的主干网络, 输电线路纵联电流差动保护的使用越来越普遍, 相比其他使用数字通道的继电保护和安全自动装置, 纵联电流差动保护对数字通道的要求最高、传输的信息量最多, 因此其受通道异常的影响也最大。随着纵联电流差动保护大量使用, 数字通道异常造成保护装置告警及不正确动作的现象越来越多。保护装置告警退出运行, 对电网安全运行带来隐患, 保护装置不正确动作则直接对电网

安全运行造成危害, 严重时会造成电网重大安全事故, 因此, 研究数字通道异常对纵联电流差动保护的影响变得非常必要。本文首先介绍纵联电流差动保护数据同步技术的基本原理, 然后对双纵联通道不同切换方式下切换时保护数据交换过程、采样同步过程、采样序号同步及通道延时计算进行深入的分析, 为研究数字通道异常对纵联电流差动保护的影响奠定理论基础。

1 纵联电流差动保护的数据同步方法

为确保纵联电流差动保护可靠运行, 两侧保护

数据需进行采样时刻同步或相量调整同步。数据同步是为了保证差动计算的精度,按 1 000 Hz 采样频率,采样不同步最大误差为半个采样间隔 0.5 ms,若不进行采样同步,两侧电流角度误差最大为 9°,误差较大。

数据同步的方法按依靠的外部条件来分类,可归纳为以下几种^[1-3]: 1) 基于纵联通道本身性能参数同步; 2) 借助全球定位系统(GPS)同步; 3) 参考电力系统相量同步等。目前,国内电网使用的纵联电流差动保护基本上都使用第 1)种方法,第 1)种方法中,又以采样时刻同步法应用最为广泛,下面主要以这种方法为例介绍数据同步方法的基本原理^[2]。

1.1 采样时刻同步法的实施过程

采样时刻同步法数据同步过程要求两侧保护装置一侧设定为参考端,一侧设定为同步端。图 1 为采样同步的示意图,上下两条时间轴分别代表线路两侧(N侧、L侧)保护装置采样序列,同步过程主要由同步侧(L侧)保护装置执行,参考侧(N侧)保护装置配合,同步过程中同步端调整自身采样时刻与参考端同步。

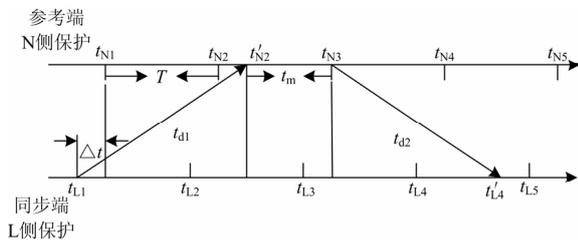


图 1 纵联电流差动保护采样同步原理图

Fig.1 Principle of current differential protections' sampling synchronization

图中, t_{N1} 、 t_{N2} 、 \dots 为 N 侧保护采样时刻,下标 $N1$ 、 $N2$ 、 \dots 为 N 侧保护采样序号, L 侧保护采样时刻及其下标含义与 N 侧类同, Δt 为两侧保护采样不同步时间, t_{d1} 为 L 侧至 N 侧保护的通道延时, t_{d2} 为 N 侧至 L 侧保护的通道延时。

设同步端于 t_{L1} 时刻发送一帧报文给参考端;参考端于 t'_{N2} 时刻收到报文;随后在最近的采样时刻 t_{N3} 回送一帧报文至 L 侧,回送延时时间 t_d 在报文中一起传送;同步端 t'_{L4} 时刻收回报文,在通道双向传输延时相同即 $t_d=t_{d1}=t_{d2}$ 的前提下,按式 (1) 计算通道延时:

$$t_d=(t_{d1}+t_{d2})/2=(t'_{L4}-t_{L1}-t_m)/2 \quad (1)$$

通道双向传输延时相同,是所有基于纵联通道本身性能参数的数据同步方法的要求,这在工程中

是可以保证也必须保证的。

通道延时 t_d 计算出以后,同步端再根据式 (2) 计算采样不同步时间 Δt :

$$\Delta t=t_d+t_m-nT \quad (2)$$

式中: T 为保护装置采样间隔时间; n 为一个“合适”的正整数或零,所谓“合适”,是指 n 的取值可使得按该式计算出的 $\Delta t < T/2$ 。

随后同步端根据 Δt 逐步缓慢调整自身采样时刻,直至按上述过程计算出的 $\Delta t=0$,即两侧保护装置采样时刻同步。这个过程一般经过十几帧数据的传送过程约几十毫秒时间即可完成。

采样同步调整完成,同步端 t'_{L4} 时刻收到对侧 t_{N3} 的数据,往前推 t_d 时间,应该刚好对应本侧 t_{L3} 时刻的采样数据,将本侧采样标号 $L3$ 的值改为与 $N3$ 相同,其余序号依此递增,这样保护采样序号也实现了同步,差动计算时只要将采样序号相同的采样值一一对应起来即可。这最后一个步骤为下文叙述方便,称为采样序号同步。采样序号同步步骤不是必须的,在两侧保护装置采样时刻调整为同步后,也有其他的处理方法保证参加差动计算的量是同一时刻的。

1.2 采样序号是否同步对保护性能的影响

采样时刻同步后,保护还要保证参加差动计算用的两侧数据是同一时刻的,目前通用的方法有两种:

1) 通道延时 t_d 计算出来,保护装置收到对侧数据后,取本侧 t_d 时间前的数据与收到的数据进行差动计算,这样能保证计算用两侧数据是同一时刻的。这种方法,两侧保护收到每一帧数据都要计算通道延时,同步端保护还不断进行采样同步,不同类型保护进行采样同步的时间间隔不同。这种方法在通道延时发生变化的暂态过程中,保护装置应有相应的对策,否则可能引起保护的不正确动作。

该方法采样同步由同步端完成,通道延时两侧都要计算,每一帧数据都要计算,一侧通道有问题,两侧保护均受影响,考虑到重新同步的时间,当通道误码、中断、告警、延时变化、自环等异常情况发生及恢复正常时,保护动作时间会加长。

2) 保护进行采样同步的同时还进行采样序号同步,这种方法不需要每帧数据都计算通道延时,隔一段时间由同步端进行采样时刻同步和采样序号同步,两侧保护将序号相同的数据进行差动计算,不同类型保护进行采样同步和采样序号同步的时间间隔不同。这种方法在保护通道延时发生变化时受到影响较小,只是在同步时有所处理即可,如,保护在同步时发现延时发生变化,可先不进行同步,

等过几十毫秒后通道延时已经稳定了, 再进行同步。通道延时变化通常都是由通道切换引起的, 按通信设备标准, 切换时间是毫秒级的, 加上通道延时的时间, 保护等待几十毫秒应足以避免通道切换对其的影响。这种方法由于数据序号出现错误也会引起保护不正确动作, 但概率极低。

该方法采样时刻同步、采样序号同步由同步端进行, 同步完成后, 一侧通道收有问题, 另一侧保护短时不受影响, 当通道误码、中断、告警、延时变化、自环等异常情况发生或恢复时, 由于采样序号不受影响, 保护动作时间基本不受影响。

2 纵联通道切换对同步过程中数据交换的影响

线路各侧保护装置之间纵联通道经常会有冗余配置, 这样在主备通道之间就存在通道切换策略问题。本文主要研究双发选收与单发单收两种方式的切换过程, 以及切换时两侧数据同步的过渡过程。对于纵联电流差动保护, 通道切换造成的通道延时变化及通道收发路由的不同是最糟糕的情况, 最容易导致保护的不正确动作。下面对这两种通道切换的过渡过程分别进行分析和研究。

2.1 双发选收方式

双发选收的通道切换方式如图 2 所示。图中, TX1、RX1 为主通道, TX2、RX2 为备用通道, 正常运行时, TX1、TX2 均发 TX 上的业务, 收端只从 RX1 上取数据, 一旦 RX1 收告警, 立刻通知对侧, 然后两侧 RX 同时切换到 RX2 通道, 根据通信设备的性能标准, 两侧不同时切换的时间非常短, 应该在 1 ms 之内, 因此这种模式通道切换不会导致路由不同给保护带来麻烦, 除非通信设备出问题, 一侧切换、另一侧未切换, 这样, 保护可能会出现不正确动作的行为。当主通道恢复后, 可以经一定时间自动从备用通道切回主通道。

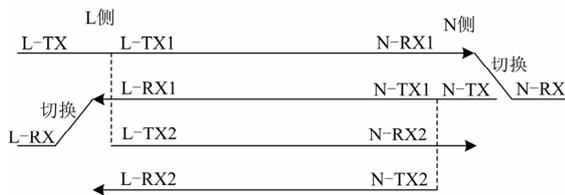


图 2 双发选收通道切换方式

Fig.2 Channel switching mode of “both channel transfer and receiving side select”

双发选收通道切换时数据同步的过渡过程因两

个通道的延时时间不同以及两侧切换先后顺序不同而有所不同, 可能的组合情况如表 1 所示, 下面分别叙述。

表 1 双发选收方式的通道切换的几种可能情况

Tab.1 Possible situation of the “both channel transfer and receiving side select” channel switching mode

短延时通道切换到长延时通道	两端接收通道同时切换
	同步端接收通道先切换
	参考端接收通道先切换
长延时通道切换到短延时通道	两端接收通道同时切换
	同步端接收通道先切换
	参考端接收通道先切换

2.1.1 短延时通道切换到长延时通道

双发选收通道切换时数据传输过程如图 3, 实线为通道 1 的 RX1 路由数据, 虚线为通道 2 的 RX2 路由数据, t_{p1} 为通道 1 的延时, t_{p2} 为通道 2 的延时。在 t'_{L5} 时刻, 两侧通道均由 RX1 切换至 RX2, 由于两个路由正常均有数据, 切换后保护装置立刻就能收到对侧数据而不需要等待通道 RX2 的延时 t_{p2} 时间, 由图可见, 以 L 侧为例, t'_{L5} 时间前, 已经收到 N 侧 t_{N1} 、 t_{N2} 、 t_{N3} 、 t_{N4} 的数据, 切换到 RX2 后, 会重新收到 t_{N1} 、 t_{N2} 、 t_{N3} 、 t_{N4} 的数据, 因此双发选收方式由短延时切换至长延时通道时, 保护会重复收到数据。对此, 保护应有相应的处理对策。

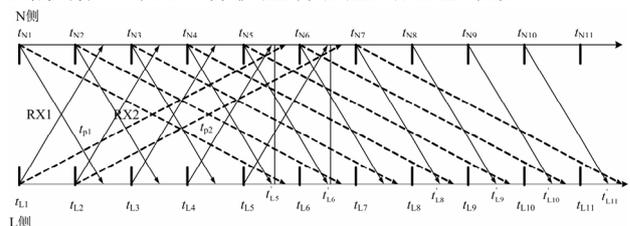


图 3 双发选收通道切换时数据传输过程

Fig.3 Data transmit process of the “both channel transfer and receiving side select” channel switching mode

通道切换时要计算通道延时和采样同步, 按图 1 的原理必须利用发送和接收两个过程。由图 3, 以 L 侧为例, t'_{L5} 时刻后一直到 t_{L10} , L 侧收到的是 N 侧经 RX2 发的长延时数据, 而 N 侧对应发出时间 t_{N1} 、 t_{N2} 、 t_{N3} 、 t_{N4} 、 t_{N5} 收到还是 L 侧经 RX1 发的短延时数据, 因此, 这段时间计算通道延时和采样同步使用的数据不是一个路由的, 计算的通道延时有误差, 采样同步也不正确, 保护如果不进行特别处理, 会引起不正确动作行为。直到 t'_{L10} , L 侧收到 N 侧 t_{N6} 的数据为长延时数据, 而 N 侧 t_{N6} 前收到 L 侧 t_{L1} 的数据也为长延时数据, 在这之后计算通道延时及采样同步都是正确的。

由图 3 可知，两侧通道同时切换时，保护通道切换后约 RX2 通道延时 t_{p2} 时间内，通道延时及采样同步是不正确的，对此，保护应有相应的处理对策。

两侧通道不同时切换，同步端 L 侧先切，L 侧在 t'_{L5} 切换至于 RX2、N 侧在 t'_{L6} 切换至 RX2，两侧不同时切换的时间差 $t_c = t'_{L6} - t'_{L5}$ ，这样，直到 t'_{L11} ，L 侧收到 N 侧 t_{N7} 的数据为长延时数据，而 N 侧 t_{N7} 前收到 L 侧 t_{L2} 的数据也为长延时数据，在这之后计算通道延时及采样同步是正确的。由图 3 可知，两侧通道不同时切换，同步端先切时，保护通道切换后约 RX2 通道延时 t_{p2} 时间加上通道不同时切换的时间差 t_c 时间内，通道延时及采样同步是不正确的，保护应有所处理。

参考端 N 侧先切，L 侧在 t'_{L6} 切换至 RX2、N 侧在 t'_{L5} 切换至 RX2，两侧不同时切换的时间差 $t_c = t'_{L6} - t'_{L5}$ ，这样，直到 t'_{L10} ，L 侧收到 N 侧 t_{N6} 的数据为长延时数据，而 N 侧 t_{N6} 前收到 L 侧 t_{L1} 的数据也为长延时数据，在这之后计算通道延时及采样同步是正确的。由图 3 可知，两侧通道不同时切换，参考端先切时，保护通道切换后约 RX2 通道延时 t_{p2} 时间内，通道延时及采样同步是不正确的，保护应有所处理。

一般考虑，通道不同时切换的时间差在 1 ms 以内，通道延时不应超过 20 ms（已经很大了），再加上切换过程本身的时间，也就是 20 多毫秒，因此，保护计算通道延时发生变化或判断有误码帧、丢帧、中断、重复收到数据时，通过抬高定值或暂时闭锁差动保护 50 ms 或延时 50 ms 再进行采样同步和计算通道延时应该可以应对这种情况，当然，有的保护抬高定值或暂时闭锁差动保护更长一些时间如 500 ms，也无可厚非。

2.1.2 长延时通道切换到短延时通道

仍以图 3 表示，实线为 RX1 路由数据，虚线为 RX2 路由数据，在 t'_{L5} 通道由 RX2 切换至 RX1，由图可见，以 L 侧为例， t'_{L5} 前最后收到 N 侧 t_{N1} 之前发的数据，切换到 RX1 后，收到数据从 t_{N5} 开始， t_{N1} 、 t_{N2} 、 t_{N3} 、 t_{N4} 的数据丢失，因此双发选收方式由长延时切换至短延时通道时，保护会丢掉部分数据。对此，保护应有相应的对策。

由图 3，以 L 侧为例，两侧保护同时切换， t'_{L5} 后一直到 t_{L8} ，L 侧收到的都是 RX1 短延时数据，而 N 侧对应发出时间 t_{N5} 、收到还是 L 侧 RX2 长延时的数据， t_{N6} 则未收到 L 侧发来的数据。

参考端先于同步端切换， t_{L7} 后一直到 t_{L8} ，L 侧

收到的是 RX1 短延时数据，而 N 侧对应发出时间 t_{N6} 则未收到 L 侧发来的数据；

参考端后于同步端切换， t'_{L5} 后一直到 t_{L9} ，L 侧收到的都是 RX1 短延时数据，而 N 侧对应发出时间 t_{N5} 、 t_{N6} 收到还是 L 侧 RX2 长延时的数据， t_{N7} 则未收到 L 侧发来的数据，这段时间计算通道延时和采样同步使用的数据不是一个路由的，计算的通道延时有误差，采样同步也不正确，保护如果不进行处理，会引起不正确动作行为。

直到 t'_{L9} ，L 侧收到 N 侧 t_{N8} 的数据为短延时，而 N 侧 t_{N8} 前收到 L 侧 t_{L6} 的数据也为短延时，在这之后计算通道延时及采样同步都是正确的。保护通道切换后约 RX1 路由延时 t_{p1} 时间加上通道不同时切换时间 t_c （如果同时切换，则 $t_c=0$ ），通道延时及采样同步是不正确的。对此，保护应有相应的对策。

2.2 单发单收方式

单发单收的通道切换方式如图 4 所示。

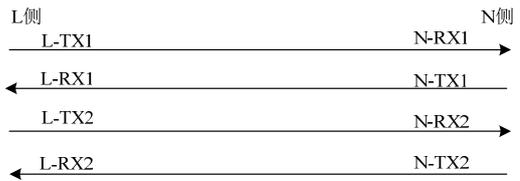


图 4 单发单收通道方式

Fig.4 Channel switching mode of “two separating channel sends and receives”

图中，TX1、RX1 为主通道，TX2、RX2 为备用通道，正常运行时，TX1 发送业务，TX2 不发送业务，收端从 RX1 上取数据，一旦收告警，立刻通知对侧，然后两侧 TX1、RX1 同时切换到 TX2、RX2 通道，由于存在时间上的误差，可能存在一侧还未切换，另一侧已切换，即一侧发 TX1，对侧收 RX2，收不到数据，对侧发 TX2，本侧收 RX1，也收不到数据，这样会造成通道中断，时间长度为 t_c 。根据通信设备的性能标准，这个时间非常短，通道中断不会造成保护误动，只会使保护延时动作或不动，这是保护的权力。

单发单收方式通道延时由短变长和由长变短数据传输情况是一致的，参考端与同步端接收通道切换先后顺序不同对数据同步过程的影响是不一致的。以下分别叙述。

如图 5，实线为 TX1、RX1 路由数据，虚线为 TX2、RX2 路由数据， t_{p1} 为通道 1 的延时， t_{p2} 为通道 2 的延时。在 t'_{L2} 时刻，两侧通道均由 TX1、RX1 切换至 TX2、RX2。以 L 侧为例，通道切换后，保

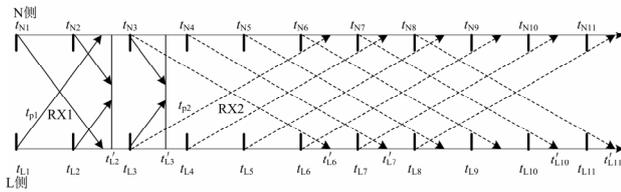


图5 单发单收通道切换时数据传输过程

Fig.5 Data transmit process of the "two separating channel sends and receives" channel switching mode

护丢失了 t_{N2} 数据, 如果 t_{p1} 时间更长, 丢失数据会更多, 另外, 保护在 t'_{L6} 才收到对侧 t_{N3} 数据, 由此, 通道同时切换时, 保护丢失了约 t_{p1} 时间的数据, 通道中断了约 t_{p2} 时间, 如果两侧不同时切换, N 侧在 t'_{L3} 才切换, 通道不同时切换的时间差 $t_c = t'_{L3} - t'_{L2}$, 保护丢失了 t_{N2} 、 t_{N3} 的数据, L 侧保护在 t'_{L7} 时刻才收到 N 侧 t_{N4} 数据, 由此, 通道不同时切换时, 保护丢失了约 $t_{p1} + t_c$ 时间的数据, 通道中断了约 $t_{p2} + t_c$ 时间。

单发单收通道切换时会造成数据的丢失和通道暂时中断, 时间长度为 $t_{p1} + t_{p2} + t_c$ 。

如图 5, 两侧通道同时切换时, 以 L 侧为例, 在 t'_{L6} 到 t'_{L10} 前, L 侧保护收到 N 侧 t_{N3} 到 t_{N6} 的数据, 而这些时刻 N 侧并未收到 L 侧的数据, N 侧可能仍以切换前收到的 L 侧 t_{L1} 时刻发出最后一帧数据进行计算, 这样也会造成收发延时不同, 保护如果不进行处理, 会引起不正确动作行为。直到 t'_{L10} 时刻, L 侧收到 N 侧 t_{N7} 的数据为长延时, 而 N 侧 t_{N7} 前收到 L 侧 t_{L3} 的数据也为长延时, 在这之后计算通道延时及采样同步都是正确的。

由图 5 可知, 通道同时切换, 保护在通道切换后, 在丢失数据及通道中断 $t_{p1} + t_{p2}$ 时间后, 在 t'_{L6} 收到第一帧数据后约 RX2 通道延时 t_{p2} 时间内, 通道延时及采样同步是不正确的, 保护应有所处理, 时间长度为 t_{p2} 。

如果两侧通道不同时切换, 参考端 N 侧先切, 即 L 侧在 t'_{L3} 、N 侧在 t'_{L2} 切换, 直到 t'_{L11} , L 侧收到 N 侧 t_{N8} 的数据为长延时, 而 N 侧 t_{N8} 前收到 L 侧 t_{L4} 的数据也为长延时, 在这之后计算通道延时及采样同步都是正确的。

由图可知, 通道不同时切换, 参考端先切, 保护在通道切换后, 在丢失数据及通道中断 $t_{p1} + t_{p2}$ 时间后, 在 t'_{L6} 时刻收到第一帧数据之后约 RX2 通道延时 $t_{p2} +$ 通道不同时切换时间差 t_c 的时间内, 通道延时及采样同步是不正确的, 保护应有所处理, 时间长度为 $t_{p2} + t_c$ 。

同步端 L 侧先切, 即 L 侧在 t'_{L2} 、N 侧在 t'_{L3} 切

换, 直到 t'_{L10} , L 侧收到 N 侧 t_{N7} 的数据为长延时, 而 N 侧 t_{N7} 前收到 L 侧 t_{L3} 的数据也为长延时, 在这之后计算通道延时及采样同步都是正确的。由图可知, 通道不同时切换, 同步端先切, 保护在通道切换后, 在丢失数据及通道中断 $t_{p1} + t_{p2} + t_c$ 时间后, 在 t'_{L7} 时刻收到第一帧数据之后约 RX2 通道延时 t_{p2} 时间内, 通道延时及采样同步是不正确的, 保护应有所处理, 时间长度为 $t_c + t_{p2}$ 。

丢失数据的时间窗和通道中断的时间窗不计入影响采样同步的时间内。

3 结语

本文介绍了纵联电流差动保护利用数字通道进行采样时刻同步、采样序号同步及通道延时计算的原理, 比较了采用不同的同步方法的保护性能的区别, 深入研究了通道不同切换方式下切换过程带来的通道延时变化对差动保护的影响。通过本文的研究, 明确了在通道切换过程中及切换完成后的一段时间内, 纵联电流差动保护的同步是不正确的, 保护必须有相应的对策, 否则可能会不正确动作。关于具体的对策与处理方法, 不少文献都有介绍^[4-6], 本文未再深入讨论。

参考文献

- [1] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中的几种采样同步方法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (9): 46-49, 53.
GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang, HE Jia-li. Sampling synchronization methods in digital current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (9): 46-49, 53.
- [2] 许建德, 等. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式[J]. 电力系统自动化, 1993, 27(4): 23-26.
XU Jian-de, et al. A new scheme of sampling synchronization & communication for digital current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 27 (4): 23-26.
- [3] 曹团结, 尹项根, 张哲, 等. 通过插值实现光纤差动保护数据同步的研究[J]. 继电器, 2006, 34 (18): 4-8.
CAO Tuan-jie, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A method of data synchronization in optical fiber differential protection based on inserting data[J]. Relay, 2006, 34 (18): 4-8.
- [4] 金华锋, 余荣云, 朱晓彤, 等. 线路纵联保护中双向复用段倒换环动态时延特性[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (3): 65-70.

(下转第150页 continued on page 150)

- physico-digital real-time simulation of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29 (12): 77-80.
- [5] 柳勇军, 梁旭, 闵勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37 (4): 39-42.
LIU Yong-jun, LIANG Xu, MIN Yong. Power system real-time digital simulation technologies[J]. Electric Power, 2004, 37 (4): 39-42.
- [6] 张雨飞, 王明春. 变电站仿真培训系统[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (12): 23-25.
ZHANG Yu-fei, WANG Ming-chun. Substation training simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21 (12): 23-25.
- [7] 李健, 陈涵, 李大路. 电力系统动态等值研究方法综述[J]. 广东电力, 2007, 20 (2): 1-4, 9.
LI Jian, CHEN Han, LI Da-lu. Review on methods of dynamic equivalents in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20 (2): 1-4, 9.
- [8] 郑亚民, 董晓舟. 可编程逻辑器件开发软件 Quartus II [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 王本有, 汪德如, 苏守宝. 基于FPGA的DDS信号发生器系统的设计[J]. 电子技术, 2008 (4): 40-42.
WANG Ben-you, WANG De-ru, SU Shou-bao. On the design of DDS signal generator system based on FPGA[J]. Electric Technology, 2008 (4): 40-42.
- [10] 曾云, 韩顺锋. 基于FPGA的DDS信号源设计及误差分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29 (2): 72-74, 143.
ZENG Yun, HAN Shun-feng. Design and error analysis of DDS signal generator based on FPGA[J]. Ship Electric Engineering, 2009, 29 (2): 72-74, 143.
- [11] 朱凯, 张坚. 基于解析信号处理的下变频系统 FPGA实现与天文应用[J]. 天文研究与技术, 2009, 6 (1): 51-56.
ZHU Kai, ZHANG Jian. The FPGA realization of a DDC system based on analytical-signal processing and its application in astronomy[J]. Astronomical Research and Technology, 2009, 6 (1): 51-56.
- [12] 刘纯武, 黄芝平. 一种多通道信号处理复用结构及其FPGA实现方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22 (1): 72-75.
LIU Chun-wu, HUANG Zhi-ping. Multiplexing-architecture and its FPGA realization for multi-channel signal processing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22 (1): 72-75.
- [13] 王旭智, 丁晓青, 何平. 基于FPGA的模拟信号波形的实现方法[J]. 微计算机信息, 2005, 29 (3-2): 205-206, 220.
WANG Xu-zhi, DING Xiao-qing, HE Ping. Realization method of the analogous wave-form based on FPGA [J]. Microcomputer Information, 2005, 29(3-2): 205-206, 220.
- [14] 付莉, 潘明. 基于FPGA数字移相信号发生器设计[J]. 微计算机信息, 2009, 25 (5-2): 175-176, 107.
FU Li, PAN Ming. Design of digital phase shift signal generator based on FPGA[J]. Microcomputer Information, 2009, 25 (5-2): 175-176, 107.
- [15] Romero Troncoso R D J, Espinosa Flores verdad G. Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications[J]. Electronics Letters, 1999, 35 (10): 770-772.

收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2010-01-14

作者简介:

刘东 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统仿真与控制; E-mail: liudongtju@tju.edu.cn

张炳达 (1959-), 男, 通讯作者, 教授, 研究方向为变电站培训仿真. E-mail:bdzhang@tju.edu.cn

(上接第 145 页 continued from page 145)

- JIN Hua-feng, YU Rong-yun, ZHU Xiao-tong, et al. Research on dynamic transmission delay of bi-directional multiplex section switching ring used for line pilot relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (3): 65-70.
- [5] 金华锋, 叶红兵, 凌昉, 等. 复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (21): 63-67.
JIN Hua-feng, YE Hong-bing, LING Fang, et al. Effect of bit error and transmission delay of multiplex channel on line current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (21): 63-67.
- [6] 曹团结, 梁艳, 陈建玉, 等. 一种线路纵差保护通道监测的新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (21): 65-67.
CAO Tuan-jie, LIANG Yan, CHEN Jian-yu, et al. A new method of channel monitoring for fiber optic line differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (21): 65-67.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2009-12-10

作者简介:

李钢 (1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作; E-mail: li.gang.b@ncgc.com.cn

冯辰虎 (1977-), 男, 高级工程师, 大学本科, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作; E-mail: fengchenhu@ncepri.cn

孙集伟 (1956-), 男, 高级工程师, 大学本科, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作。