

光数字继电保护测试仪时间特性的分析及检验

IEC 61850标准对于智能变电站的发展具有不可替代的作用，光数字继电保护测试仪是满足IEC 61850标准的智能变电站二次设备测试平台。如何准确控制光数字报文发送时刻及准确测量光数字报文的接收时刻，是衡量光数字继电保护测试仪性能的关键因素。以光数字继电保护测试仪的典型结构为例，剖析了光数字报文的收发原理，阐述了报文发送控制和报文接收时刻测量的各种实现方法，分析了各种方法的优缺点，提出了针对时间特性性能测试的检验方法和检验要求。该方法有助于及时发现不合格产品，提高了光数字继电保护测试仪行业的整体技术水平。

周 勤 熊华强 熊 茹/江西省电力科学研究院
陆 伟 张 鹏/武汉中元华电科技股份有限公司

智能变电站^[1]二次系统在结构上与传统变电站二次系统相比，主要的差异是引入了IEC 61850标准^[2-3]。IEC 61850标准是关于变电站自动化系统的完整通信标准体系，该标准的引入使常规变电站大量通过二次电缆连接的模式不复存在，代之以光缆传输SV、GOOSE和MMS信息。为了满足现代数字化继电保护装置及其他智能电子设备（IED）测试的需求，光数字继电保护测试仪应运而生。

光数字继电保护测试仪采用光缆传输的以太网数字报文（光数字报文）来传输模拟量和开关量，不存在由功率放大器特性引起的幅值误差、相位误差、零漂、THD、响应时间和变化时间（包括上升时间和下降时间）等一系列问题。取而代之的是光数字报文的时间特性（即报文发送时刻的准确控制和报文接收时刻的准确测量）起到了决定性的作用。

由于IEC 61850技术应用本身较为复杂、新产品开发周期较短、实际工程应用经验较少以及统一的技术标准与规范缺乏等原因，对光数字继电保护测试仪的现场实际应用产生了较大影响。本文从光数字继电保护测试仪的典型结构和数字报文收发的原理出发，分析了影响其时间特性的关键因素，提出了相应的检验方法。

数字报文收发流程

数字报文是指SV、GOOSE报文，分别包含了模拟量和开关量信息，并以光纤以太网帧的形式传输。以太网帧的链路层格式^[12]如图1所示，其中，数字报文是需要传输的部分，前导/起始符、MAC首部和CRC的作用是为了保证数字报文能够正确、可靠地传输。

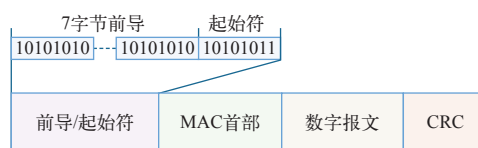


图1 以太网帧的链路层格式

光数字继电保护测试仪的典型结构如图2所示，该典型结构仅用于说明数字

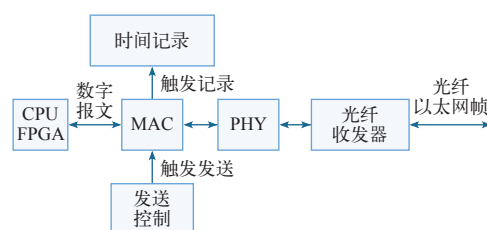


图2 光数字继电保护测试仪的典型结构

关键词/Keywords

IEC 61850 •
光数字报文 •
时间特性 •
检验方法 •

报文收发的流程,具体结构根据不同的制造厂商有所不同。

对于数字报文的发送,其数据流程如下:CPU和FPGA预先完成仿真数据的计算,经编码之后生成数字报文,并与MAC首部一起写入MAC;在特定时刻,发送控制模块触发MAC,MAC会自动插入前导/起始符和CRC码,生成以太网帧;PHY完成并行数据到串行数据以及信号电平的转换;光纤发送器完成电信号到光信号的转换。

对于数字报文的接收,其数据流程如下:光纤接收器将以光信号传输的GOOSE报文转换成电信号;PHY完成串行数据到并行数据以及信号电平的转换;MAC根据以太网帧的前导/起始符识别出数据的起始位,并提取数字报文,同时还能根据目的MAC地址和CRC码等信息进行过滤和校验,当数字报文满足要求时,MAC会触发中断,通知CPU对其进行处理,并触发时间记录模块记录当前时间;CPU和FPGA对数字报文解码,从中提取开入量信息,并根据之前记录的时间推算开入量的接收时刻。

时间特性分析

光数字继电保护测试仪的时间特性^[13]包括时间系统准确度、报文发送控制准确度和报文接收时刻测量准确度,具体体现的性能指标有SV发送间隔准确度及抖动、SV延时准确度、时间测量准确度和时间控制准确度。本节以光数字继电保护测试仪的典型结构为例(见图2),结合数字报文的收发流程,分析光数字继电保护测试仪的时间特性对其具体性能指标和现场应用的影响。

1. 报文发送控制原理

在智能变电站中,由合并单元(MU)完成模拟量到数字报文的转换和发送。模拟量接入合并单元之后,需要经过模数转换、数据处理以及传输等环节。因此,数字报文的发送时刻与其包含的采样值的采样时刻之间存在一个时间差,该时间差定义为SV延时,一般可达毫秒级。

MU在传输数字报文时,会将自身的SV延时写入数字报文中,该延时在出厂时已设置好,因此

称为SV额定延时。

由于要模拟多个MU,而且各SV报文的额定延时不同,因此光数字继电保护测试仪不能同步触发SV报文的输出,而是需要对各SV报文的发送时间分别进行控制。报文发送控制原理可以分为三类,即定时器原理、比较器原理和绝对时标原理。

(1) 定时器原理

定时器原理是通过固定周期产生中断的方式实现报文发送控制,一般来说中断周期取为采样周期。在每次周期中断产生时刻触发报文发送,同时在中断程序中准备下一次周期中断需要发送的报文。

定时器原理的优点是与现有的常规继电保护测试仪的原理保持一致,只需要在硬件、软件上进行很小的改动即可实现。

由于是固定周期发送报文,定时器原理能够模拟的SV延时为该固定周期的整数倍,且无法做到连续可调,因此限制了其应用范围。当SV额定延时不是该固定周期的整数倍时,需要在计算采样值数据时对相位进行调整,以补偿点对点模式下实际SV延时与SV额定延时不一致而带来的相位误差。

(2) 比较器原理

比较器原理是在定时器原理的基础上,生成一个用计数器实现的锯齿波,锯齿波的周期一般也取为采样频率。CPU生成SV报文,同时设置一个比较值,当锯齿波的当前值超过该比较值时,触发SV报文发送。因此,通过为各SV报文设置不同的比较值,即可实现随机异步发送,其原理如图3所示。

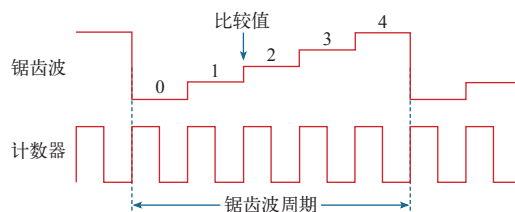


图3 比较器原理

从图3可以看出,比较器原理可以做到SV延时连续可调,调整步长为计数器周期,可以弥补定时器原理的缺点。

(3) 绝对时标原理

绝对时标原理概括如下：

- 1) 在本地生成一个用计数器实现的包含年、月、日、时、分、秒和纳秒信息的时间系统。
- 2) CPU在生成SV报文时，设置一个同样包含年、月、日、时、分、秒和纳秒信息的绝对时标。
- 3) 定期比较上述绝对时标与本地时间系统的当前时间，当绝对时标小于当前时间时，触发SV报文发送。

由此可以看出，绝对时标原理相当于锯齿波周期为无穷大的比较器原理，因此具备比较器原理SV延时连续可调的优点，调整步长为定期比较的周期。另外，绝对时标原理使软件开发工作变得相当简单，CPU无须判断SV报文是否应在当前锯齿波周期内发送，亦无须计算比较值，每次计算发送时刻时只须在当前绝对时标上叠加1个采样周期（做1次加法）即可。

2. SV报文触发原理

前面介绍的各种报文发送控制原理均需要触发MAC才能发送SV报文，对商用MAC芯片而言，需要向其特定寄存器写入特定数字序列。该操作既可由软件实现，也可由硬件实现。

软件实现的方法是：在触发MAC时产生中断，在中断程序中完成写MAC操作。该方法的优点是系统硬件结构简单，易于实现。但是，由于中断响应的时间不确定，会造成SV发送间隔的抖动。另外，如果采用比较器原理，当SV控制块数量较多时，会频繁产生中断，消耗系统资源，严重情况下可能导致系统阻塞。

因此，高性能的光数字继电保护测试仪通常采用硬件触发MAC的方式。该方法使用专用的直接存储器存取（DMA）控制器，在需要触发MAC时，产生一个启动DMA的脉冲，由DMA完成写MAC操作。该方法完全用硬件实现，无须产生中断，也无须CPU干预。

3. 报文接收时刻测量原理

光数字继电保护测试仪接收的开入量信息由GOOSE报文携带，无法直接测量其跳变时刻，而是通过测量报文接收时刻的方法间接获取。

在光数字继电保护测试仪入口处，GOOSE报文表现为以光信号传输的二进制串行数据流，报文接收时刻定义为前导/起始符（见图1）第1位的起始时刻。

GOOSE报文从光口输入到交付给CPU之间需要经过光纤收发器、PHY、MAC组帧和MAC处理四个环节，每个环节均会造成延时，如图4所示。根据报文接收时刻测量点的选择不同，需要在所记录的时间上对延时进行补偿，从而获取真实的报文接收时刻。

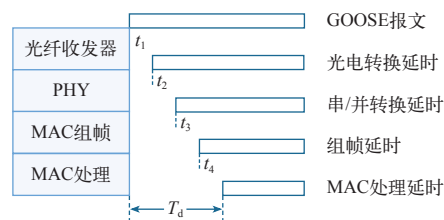


图4 GOOSE报文接收时序分析

报文接收时刻测量点可以在以下三个位置中选取：

1) 光纤接收器出口。当光纤链路空闲时，发送端传输空闲信号，即连续的“1”；在传输GOOSE报文之前，发送端会传输10位宽的流起始符“1100010001”，用来通知接收端做好接收数据的准备。因此，光纤接收器出口处在长时间的空闲信号之后监视到流起始符时，记录流起始符最后1位结束的时刻。光纤接收器引入的延时仅为光纤接收器进行光电转换的延时（见图4中 t_1 ）。由于光纤接收的输出信号为ECL电平的模拟信号，因此需要电平转换芯片将其转换成数字信号。

2) PHY出口处。PHY在接收到流起始符之后，会输出1个使能信号通知MAC接收数据，然后完成ECL电平的模拟信号到数字信号的转换，以及串行到并行的转换。因此，在PHY出口处监视到使能信号以及完整的前导/起始符时，记录前导/起始符最后1位结束的时刻。PHY引入的延时（见图4中 t_2 ）为前导/起始符在数据流上传输所需要的时间，对百兆以太网来说， t_2 计算方法如下： $t_2 = 8 \text{ B} \times 8 \text{ bit} \times 0.01 \mu\text{s} = 0.64 \mu\text{s}$ 。计算依据为：8 B的前导/起始符为64位数据，而百兆以太网传输每1位需

0.01 μs 。

3) MAC出口处。MAC接收完前导/起始符之后,完成以太网帧其他部分的接收和组装。组帧引入的延时(见图4中 t_3)与帧的长度有关,具体计算方法可参考 $t_2 = 8 \text{ B} \times 8 \text{ bit} \times 0.01 \mu\text{s} = 0.64 \mu\text{s}$ 。MAC处理包括帧过滤和帧校验,这部分引入的延时(见图4中 t_4)与MAC的结构、帧的长度等多种因素有关,是整个GOOSE报文接收时序中最不稳定的部分。MAC完成组帧和处理之后,会产生脉冲信号通知CPU,记录脉冲边沿时刻。

在以上三个测量点测量值的基础上,对相应的延时进行补偿,即可实现报文接收时刻测量。其中, t_1 、 t_2 的时间是固定的,且非常小,只需补偿1个固定的延时即可; t_3 、 t_4 与帧的长度有关,因此需根据实际情况计算补偿值。

4. SV延时准确度的影响

点对点模式下,IED在本地通过数字报文的接收时刻,再减去SV额定延时,从而估算真实的采样时刻^[14-15]。因此,如果SV额定延时与实际的SV延时不一致,则带来相位误差,以图5为例进行说明。

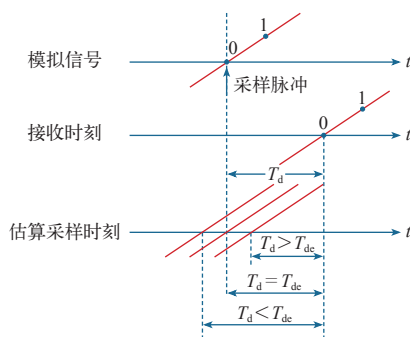


图5 点对点模式IED估算采样时刻原理

图5中,MU在采样脉冲到来的时刻对一次输入进行采样,然后转换为序号0的SV报文。在距离上述采样脉冲 T_d 时刻,IED接收到0序号SV报文,并根据SV报文中的SV额定延时 T_{dc} ,估算0序号SV报文的采样时刻。如果 $T_d = T_{dc}$,那么估算的采样时刻等于真实采样时刻,这是最理想的情况;如果 $T_d > T_{dc}$,那么估算的采样时刻晚于真实采样时刻,相当于相位滞后;如果 $T_d < T_{dc}$,那么估算的采样时刻早于真实采样时刻,相当于相位超前。

5. SV发送间隔抖动的影响

跨间隔保护装置需要对收到的来自各SV报文的采样值在本地进行等间隔重采样,采用插值原理重新计算新的采样值。理想情况下,光数字继电保护测试发送的SV报文应该是等间隔的,但是无论采用哪种发送控制原理,都不可避免地引入发送间隔抖动,这会给IED带来波形畸变,以图6为例进行说明。

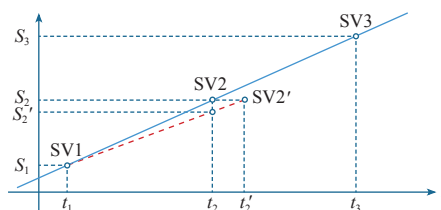


图6 SV发送间隔抖动对重采样的影响

图6中,等间隔发送的三个采样点SV1~SV3的实际采样值为 S_1 、 S_2 和 S_3 。如果SV2的发送存在抖动,且滞后了一定时间,记为SV2',那么IED会在 t_2 处采用线性插值的方法计算采样值,即认为 t_2 时的采样值为 S_2' 。因此可以看出,SV发送间隔抖动会带来新的误差,对正弦采样值来说,即增大了THD。

时间特性检验

1. 检验系统

对光数字继电保护测试仪时间特性的检验是通过对前文提到的四个性能指标的检验来完成的。检验系统必须具备以下条件:①多对光纤以太网接口;②GPS对时功能,并能输出光B码对时信号;③报文接收时刻准确测量的功能;④在接收到SV、GOOSE报文之后经延时输出GOOSE报文的功能。检验系统接线如图7所示。

2. 检验方法

(1) SV发送间隔准确度及抖动

操作光数字继电保护测试仪输出SV报文,检验系统记录每一帧SV报文的接收时刻,并计算相邻两帧的时间间隔,连续记录10 min。在所记录的时间间隔中,读取最大值、最小值及其差值,三者均不应超过标准要求。

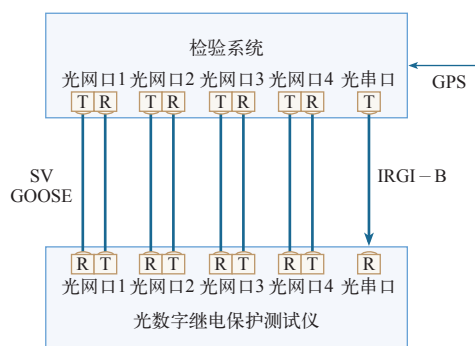


图7 检验系统接线

(2) SV延时准确度

为光数字继电保护测试仪配置四个SV控制块，分别用不同的光口输出。第一个SV控制块的额定延时设置为0 μs ，其余三个额定延时分别设置为 t_1 、 t_2 和 t_3 （在额定延时范围内选取）。在所记录的SV报文中，以第一个控制块第一个0序号SV报文时标为基准时标，计算后续三个控制块第一个0序号报文时标与基准时标的时间差作为额定延时的测试值，不应超过标准规定范围。

该项检验也可对多个光数字继电保护测试仪的同步特性进行检验，只要求SV报文从不同的光数字继电保护测试仪输出即可。

(3) 时间测量准确度

时间测量准确度的检验应在SV起表和GOOSE起表的情况下分别检验。

对于SV起表方式，操作光数字继电保护测试仪输出9-2报文，检验系统在接收到第一个SV报文后经设定延时输出GOOSE变位。记录检验系统接收到的第一个SV报文接收时刻和GOOSE变位时刻之差，并与测试仪反馈的时间比较，其误差不应超过标准要求。

对于GOOSE起表方式，操作光数字继电保护测试仪输出GOOSE1变位，检验系统在接收到GOOSE1变位后经设定延时输出GOOSE2变位。记录检测系统接收到的GOOSE1变位时刻和GOOSE2变位时刻之差，并与测试仪反馈的时间比较，其误差不应超过标准要求。

(4) 时间控制准确度

操作光数字继电保护测试仪输出状态序列，

当输出第一个状态时，SV通道输出值设为0，GOOSE通道输出值也设为0，持续时间为1 s。之后每个状态，SV通道输出值在非零和零之间交替变化，GOOSE通道输出值在1和0之间交替变化，并设置状态时间。将检验系统记录SV、GOOSE通道两次变化的时间差作为状态持续时间的测量值，并与设定值比较，检验其准确度是否满足标准的要求。

结束语

光数字继电保护测试仪的性能优劣主要取决于时间特性，与其结构和原理密切相关。许多光数字继电保护测试仪都是在常规继电保护测试仪的基础上升级而来，其设计思路以及对IEC 61850标准的理解存在一定的局限性。因此，目前市场上光数字继电保护测试仪的功能和性能之间存在较大差异。为保证应用过程中的工程质量，有必要制定相应的标准，同时对光数字继电保护测试仪的时间特性进行约束和规范。

本文从光数字继电保护测试仪的结构和原理出发，阐述了报文发送控制和报文接收时刻测量的各种实现方法，使读者对光数字继电保护测试仪的各种时间特性的产生和误差来源有了更深刻的认识。同时，针对具体时间特性指标的检验，提出了相应的检验系统要求和检验方法，为质量监督部门提供了有益的参考，有助于提高光数字继电保护测试仪行业的整体技术水平。

参考文献

- [1] 李孟超，王允平，李献伟，等．智能变电站及技术特点分析[J]．电力系统保护与控制，2010，38(18): 59-62，79．
- [2] IEC 61850 Communication networks and system in substation[S]．
- [3] IEC 61850-6 Edition 2.0 Communication networks and systems for power utility automation; part 6 configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]．2009．

(收稿日期：2014-06-08) EA