

IEC61850 继电保护试验装置关键指标及其检验方法的研究

高 磊¹, 卜强生¹, 陆 伟², 向 前³, 宋亮亮¹, 袁宇波¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100; 2.武汉中元华电科技股份有限公司, 湖北 武汉 430223; 3.北京博电新力电气股份有限公司, 北京 100098)

摘 要: IEC61850继电保护试验装置大量应用于智能变电站的继电保护测试, 本文梳理了影响试验装置性能三类关键指标: 数值计算能力、输出同步性、时间测量和控制准确度, 由此制定了试验装置的技术指标, 对每个指标确定了典型的检验方法。组织了国内主流试验装置开展集中测试, 结果证明了关键指标的合理性及检验方法的适用性, 为智能变电站继电保护试验装置技术标准的制定打下了理论和实践基础。

关键词: IEC61850; 继电保护试验装置; 采样值; 检验方法; 智能变电站

0 引言

IEC61850 系列标准在我国变电站自动化领域的成功应用加快了基于 IEC61850 的继电保护试验装置的研究和开发^[1-4]。但由于新产品的开发周期较短、工程应用经验较少以及缺乏统一的技术标准与规范等诸多问题, 试验装置的功能与性能差异较大, 影响了实际工程中变电站继电保护与安全自动装置的调试工作^[5]。

常规微型继电保护试验装置的研制^[6-8]和检验技术^[9-10]非常成熟, 影响试验装置性能的主要是功率放大器和调理电路, 其技术指标主要体现在输出准确度、暂态响应速度和带负载能力等方面^[11-12]。而 IEC61850 继电保护试验装置(下称试验装置)主要由大规模 FPGA 逻辑电子器件组成, 输入输出的是纯数字量, 对数字信号的控制能力成为了最重要的技术指标。

本文梳理了影响试验装置性能三类关键指标, 并对每个指标制定了典型的检验方法, 力图为智能变电站继电保护试验装置技术标准的制定提供理论基础和实践依据。文中所提到的技术指标不作为试验装置制造的依据, 特此声明。

1 关键指标及检验方法的选定原则

1.1 关键指标的选定原则

对试验装置的指标选定首先要考虑被测设备的技术条件和应用模式。IEC61850 继电保护与安全自动装置采用了数字化采样值(下称 SV), 模拟信

号离散化是最大的特点, 存在点对点传输和网络传输两种应用模式。智能变电站继电保护技术规范^[13]对 SV 报文的发生和传输有着严格的指标要求, 这也对试验装置离散信号的计算和处理速度以及数据输出的时序控制提出了要求, 是指导试验装置硬件设计的最基本依据。继电保护直接采样的应用模式^[14]要求试验装置多光口、多数据源之间必须保证严格的同步性, 并能够及时响应外部的突发事件。因此, 试验装置首先需要满足数值计算、报文接收和发送以及编码和解码的实时性要求。

其次要考虑试验装置的误差来源。比如 SV 准确度一项, 与常规试验装置不同的是, 数字量的准确度完全由装置计算准确度决定, 不存在数模转换和功率放大器的输出误差, 因此, 选定的指标可适当高于常规试验装置。同时还必须考虑到检验设备的准确级以及使用需求, 如时间的指标选定在微秒级, 那检验设备就至少要达到亚微秒级的准确度。

笔者梳理了影响试验装置性能三类关键指标: a) 计算能力和 SV 准确度, 考核测试装置的数值计算能力和准确度; b) 输出同步性, 考核测试装置多光口输出的同步性; c) 时间测量和控制, 考核试验装置硬件打时标的准确度, 以及内部由时间来精确控制状态切换的能力。

1.2 检验方法的选定原则

检验方法的选定首先要考虑技术指标的考核目的。比如试验装置计算能力的要求是考核装置同时计算多路数据的能力, 因此要采用在最大计算能力要求的条件下检验 SV 准确度。同理, SV 输出的均

匀性、同步性的检验也要在试验装置大吞吐量情况下检验。

其次要明确试验装置的误差来源。比如 SV 相位准确度一项,产生相位误差可能是由计算误差和不同步误差共同造成的,仅从外部电气特性考虑把两类误差混为一谈,不仅增加了检验方法的实施难度,也不利于区分误差产生的原因。因此,在检验 SV 相位准确度时采用了计算同一包序号 SV 绝对相位的方法,而用数据包的到达时间来标定其同步性。

检验方法的可溯源性也是必须考虑的问题,在选择检验方法上最终归结为周期性离散数值的计算和时间测量这两个能够溯源的指标。

2 计算能力和 SV 准确度指标及检验方法

2.1 计算能力指标

试验装置至少应具备按 4kHz 的频率计算输出 72 路正弦模拟量的能力,每路通道的幅值、相位可独立调节。

这里所述的模拟量通道是指在 DL/T 860.92 规约 SV 报文中的一个 4 字节整型数,通道数量指标是按照满足变压器四侧电流和电压合并单元的 SV 通道数量来确定的。目前试验装置大多采用 SV 通道与虚拟电气量通道关联的配置模式,可能存在电气量通道数量不够的情况,限制了用户的使用。

2.2 SV 准确度指标

交流电压采用 DL/T 860.92、频率 50Hz 时,其有效值应满足:

- a) 输出范围: 0~1000kV (一次值);
- b) 准确度: 0~1kV 时误差应不大于±0.5V, 1kV~1000kV 时误差应不大于±0.05%;
- c) 最小变化步长: 应不大于 1V。

交流电流采用 DL/T 860.92、频率 50Hz 时,其有效值应满足:

- a) 输出范围: 0~100kA (一次值);
- b) 准确度: 0~100A 时误差应不大于±50mA, 100A~100kA 时误差应不大于±0.05%;
- c) 最小变化步长: 应不大于 0.1A。

交流采样值的相位应满足:

- a) 输出范围: 0°~360°;
- b) 准确度: 应不大于±0.1°;
- c) 最小变化步长: 应不大于 0.1°。

试验装置内部以浮点数进行计算和存储,仅在

输出时才转换成整型,准确度主要与算法有关。当采用三角函数计算时,准确度一般可以满足;当采用查表或者插值法时,准确度与表的密度有关。另外,当输出的有效值较小时,整型输出带来的截断误差的影响会显著增大,因此,准确度的定义需要按范围分别选定。考虑到一般测控装置的工频交流模拟量测量准确度为 0.2 级^[15],试验装置按高出两个准确级选定其准确度指标。

2.3 检验方法

试验装置配置四个 SV 控制块,从任一光口输出,共 72 路通道,每路通道设定不同的幅值和相位,涵盖全部输出范围,SV 报文的额定延时设置为相同值。接入报文分析仪,记录 10s 数据:

- a) 任取一周期波形计算基波有效值;
- b) 计算每个控制块的零序号 SV 报文的绝对相位,以设置 0°相位通道的绝对相位为基准,计算其他通道的相对相位值作为测量值。

下面给出周期离散采样值的基波和谐波有效值和相位角的计算公式:

$$k_{\cos n} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \quad (1)$$

$$k_{\sin n} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \quad (2)$$

$$|H_n| = \sqrt{\frac{k_{\cos n}^2 + k_{\sin n}^2}{2}} \quad (3)$$

$$\angle H_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad (4)$$

式中:

$x[k]$ ——周期离散采样值序列;

N ——周期采样频率;

n ——谐波次数, $n=1$ 为基波, $n=2,3,\dots,N/2-1$ 为各次谐波。

3 输出同步性指标及检验方法

3.1 输出同步性指标

试验装置应能按配置的额定延时参数实现延时输出,误差应不大于±1μs。

SV 报文输出间隔的离散值应不大于 1μs。

试验装置的同步性应满足：

a) 同一试验装置的不同光纤接口输出的报文之间不同步时间应不大于 $2\mu\text{s}$ ；

b) 已同步条件下，多台试验装置输出的报文之间不同步时间应不大于 $4\mu\text{s}$ 。

技术规范^[13]要求合并单元 SV 报文输出间隔的离散值不大于 $10\mu\text{s}$ ，目前合并单元的技术水平能够保证离散值在 $1\mu\text{s}$ 以内。影响试验装置额定延时准确度和发送离散度的硬件因素是相同的，因此指标都选定为 $1\mu\text{s}$ 。同步性指标则考虑了额定延时指标的正负误差，此指标限定了频率 50Hz 情况下，SV 报文输出性能造成的相位误差不超过 $\pm 0.04^\circ$ 。

3.2 检验方法

如图 1 所示，单台试验装置不同步条件下，配置四个 SV 控制块，分别从四个光口输出，第一个 SV 控制块的额定延时设置为 $0\mu\text{s}$ ，其余 3 个额定延时分别设置为 t_1 、 t_2 、 t_3 ，可在额定延时范围内选取。接入报文分析仪，记录 10s 数据：

a) 以第一个控制块第一个零序号 SV 报文时标为基准时标，计算后续三个控制块第一个零序号报文时标与基准时标的时间差作为额定延时的测量值，计算额定延时测量值与约定真值 (t_1 、 t_2 、 t_3) 之间的误差；

b) 统计 SV 报文输出间隔的离散值。

两台试验装置对时同步条件下，各配置两个 SV 控制块，分别从各自装置的两个光口输出，额定延时均设置为 $0\mu\text{s}$ 。接入报文分析仪，记录 10s 数据：

a) 计算四个控制块零序号 SV 报文时标距整秒的时间差作为额定延时的测量值，计算四个额定延时测量值之间的偏差作为不同步时间的测量值；

b) 统计 SV 报文输出间隔的离散值。

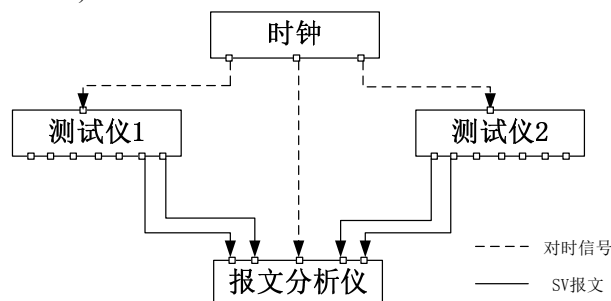


图 1 双机输出同步性检验示意图

Fig.1 Test of SV output synchronization on double units

4 时间测量和控制指标及检验方法

4.1 时间测量指标

GOOSE 报文时间测量应满足：

a) 测量时间范围： $1\text{ms} \sim 10000\text{s}$ ；

b) 测量时间的准确度：测量时间范围为 $1\text{ms} \leq t \leq 1\text{s}$ 时，误差不超过 $\pm 0.1\text{ms}$ ；测量时间范围为 $1\text{s} < t \leq 10000\text{s}$ 时，误差不超过 $\pm 0.01\%$ ；

c) 测量时间的分辨率：不大于 0.1ms 。

4.2 时间控制指标

时间控制应满足：

a) 时间控制范围： $1\text{ms} \sim 100\text{s}$ ；

b) 时间控制的准确度：时间控制范围为 $1\text{ms} \leq t \leq 1\text{s}$ 时，误差不超过 $\pm 0.5\text{ms}$ ；时间控制范围为 $1\text{s} < t \leq 100\text{s}$ 时，误差不超过 $\pm 0.05\%$ ；

c) 时间控制的最小变化步长：不大于 1ms 。

时间控制限定了试验装置按时间精确触发事件的准确度。

4.3 检验方法

检验时间测量精确度采用的是比对法。试验装置配置两个光口发送 GOOSE 报文，一个接入报文分析仪，一个自环至第三个光口接收。由试验装置手动发送任意 GOOSE 变位，将试验装置的变位时间差与报文分析仪的变位时间差对比。多光口之间不同步的时间在 $1\mu\text{s}$ 以内，高于时间测量精确度指标一个准确级，这种比对法检验方法的准确度是可以保证的。

检验时间控制采用状态序列功能模块，至少设置两组 GOOSE 和一组 SV，用时间触发状态切换，从报文分析仪中计算模拟量和开关量的突变时刻，检验状态时间准确度以及 GOOSE 和 SV 的突变同步性。

5 几点建议

依据选定的指标，在实验室开展了对国内主流试验装置的测试，测试结果满足指标要求，表明国内主流试验装置的硬件水平已经达到了工程实用化的要求。对在测试中发现的不足，提出笔者的几点建议：

(1) 要认真理解合并单元额定延时 dt 的概念：合并单元将 t 时刻采集到的电气量经 dt 延时后发送，而包序号应是 t 时刻的。部分试验装置采用了相位前移的方法，但包序号没有前移，虽然适用于直采模式，但在网络采样模式下将产生相位差。

(2) 试验装置应有数据链路保持功能, 进入功能模块后发零值和心跳报文, 建议此功能作为用户选择项, 不作为固有功能。

(3) 建议试验装置开放按 FCDA 独立设置通道采样值的功能模块。

参考文献:

- [1] 冯硕, 黄梅, 李晓朋. 基于 IEC61850 的光数字继电保护测试仪的研制[J]. 继电器, 2008, 36 (8): 23-25,45. FENG Shuo, HUANG Mei, LI Xiao-peng. Development of fiber digital relay protection tester based on IEC61850[J]. Relay, 2008, 36(8): 23-25,45.
- [2] 湛争鸣, 陈辉, 陈卫, 等. 全数字化继电保护测试系统设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (5): 109-112. CHEN Zhengming, CHEN Hui, CHEN Wei, et al. Test system for complete digital protective relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 109-112.
- [3] 莫文科. 基于IEC61850 标准的继保测试仪关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] 刘奔. 基于IEC61850 数字继电保护测试仪的研制[D]. 西南交通大学, 2011.
- [5] 杨涛, 梁海东, 张钟平. IEC61850 数字式继电保护测试仪的检测及技术分析[J]. 浙江电力, 2012 (1): 10-13. YANG Tao, LIANG Hai-dong, ZHANG Zhong-ping. Test and Technical Analysis on IEC61850 Digital Relay Protection Testers[J]. ZheJiang Electric Power, 2012(1): 10-13.
- [6] 陈皓. 新一代微机继电保护测试仪及其基本性能[J]. 电力自动化设备, 2002, 5 (5): 61-63. CHEN Hao. Test device of protective relay and its property[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 5(5): 61-63.
- [7] 黄晓明, 邹托武, 赵炳, 等. 微机继电保护测试仪中高性能数字信号发生器的研究与实现[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (6): 79-81. HUANG Xiao-ming, ZOU Tuo-wu, ZHAO Bing, et al. Research and realization of high performance digital signal generator in microcomputer protection tester[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 79-81.
- [8] 彭春燕, 曹志辉, 周有庆, 等. 基于双 DSP 与 CPLD 的继电保护测试仪设计[J]. 电测与仪表, 2009, 46 (11): 40-45. PENG Chun-yan, CAO Zhi-hui, ZHOU You-qing, et al. Design on relay protection test device based on Dual DSP and CPLD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(11): 40-45.
- [9] 袁瑞铭, 赵景京, 丁恒春, 等. 微机型继电保护测试仪检测技术研究[J]. 华北电力技术, 2007 (6): 30-33. YUAN Rui-ming, ZHAO Jing-jing, DING Heng-chun, et al. Testing Technology of Test Instrument with Micro-computer for Realy Protection[J]. North China Electric Power, 2007(6): 30-33.
- [10] 杨德英. 继电保护测试系统暂态及时间特性的检定[D]. 南昌:南昌航空大学, 2012.
- [11] 徐志恒, 刘继武, 向前. 微机保护测试仪需考虑到若干关键问题[J]. 继电器, 2004, 32 (17): 64-66. XU Zhi-heng, LIU Ji-wu, XIANG Qian. Some key problems about microcomputer based relay protection tester[J]. Relay, 2004, 32 (17): 64-66.
- [12] DL/T 624-2010 继电保护微机型试验装置技术条件[S].
- [13] 国家电网公司. Q/GDW441-2010 智能变电站继电保护技术规范[Z].
- [14] 徐广辉, 李友军, 王文龙, 等. 数字化变电站 IED 采样数据同步插值的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (4): 49-52. XU Guanghui, LI Youjun, WANG Wenlong, et al. Design of a Synchronization and Interpolation Algorithm of Sampled Values for Digital Substation IED[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (4): 49-52.
- [15] DL/T 1075-2007, 数字式保护测控装置通用技术条件 [S].

作者简介:

- 高 磊 (1982), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护研究工作, E-mail: gaolei.seu@gmail.com;
- 卜强生 (1983), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护研究工作;
- 陆 伟 (1983), 男, 工程师, 从事电力应用软件开发和系统分析工作;
- 向 前 (1964), 男, 高级工程师, 从事微机继电保护测试仪的开发研究。

Research on Key Indexes and Testing Method of IEC61850 Test Equipment for Relay Protection

GAO Lei¹, BU Qiangsheng¹, LU Wei², XIANG Qian³, Song LiangLiang¹, Yuan Yubo¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211100, China; 2. Wuhan Zhongyuan Huadian Science and Technology Co Ltd, Wuhan 430223, China; 3. Ponovo Power Co Ltd, Beijing 100098, China)

Abstract- IEC61850 test equipment for relay protection is widely used in the intelligent substation. Three key indexes of the tester are proposed, the numerical computation ability, the data outputs synchronization, the precision of time for measurement and control. Several technology indexes and testing method of the tester are set. The mainstream testers are tested and the results indicate the rationality of key indexes and the applicability of testing method, that lays the theoretical and practical foundations for the technology standard of relay protection tester of intelligent substation.

Keywords- IEC61850, test equipment for relay protection, sampled value, testing method, intelligent substation