

智能变电站数字化采样延时特性及影响研究分析

卜强生¹, 袁宇波¹, 高磊¹, 张道农², 陈久林¹, 宋亮亮¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211113;2.华北电力设计院工程有限公司,北京 100120)

摘 要: 本文从数字化采样环节的构成出发,介绍了额定延时的产生及组成,阐述了基于外部同步信号的同步采样实现,分析了数字化采样对继电保护系统的影响,详细说明了数字化采样的额定延时与相位误差的异同,从实际工程应用出发提出了额定延时的间接法和直接法两种检测方法,并比较了二者的优缺点,同时给出了采样报文等间隔性测试方法,最后给出了数字化采样在智能变电站应用中的注意事项及建议。

关键词: 数字化采样; 额定延时; 相位误差; 直接法; 间接法; 报文间隔

0 引言

智能变电站中应用电子式互感器或模拟量就地数字化方式进行采样,有效避免外界环境干扰、电流二次开路、电压二次短路、传输损耗、电流多点接地影响等问题,而且可以实现信号采集的共享化,具有一定的优越性。但数字化采样同时也带来了较多新问题需要解决,如采样额定延时、跨间隔间数据同步性等新问题^[1]。

本文从数字化采样环节出发,解释额定延时的基本概念,提出额定延时的测试方法,分析数字化采样对保护功能带来的影响,最终提出数字化采样工程应用建议。

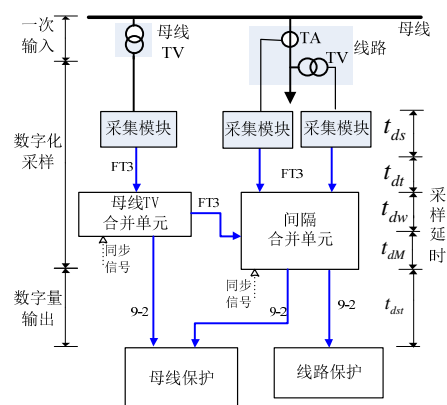
1 数字化采样环节

1.1 采样环节构成

常规变电站中电流、电压模拟量通过电缆方式接入保护、测控、计量等二次装置,由各二次装置实现模拟量的采集。由于模拟量电信号在电缆中的传播速度接近光速,因此可认为在电流、电压传输是没有延时的^[2]。

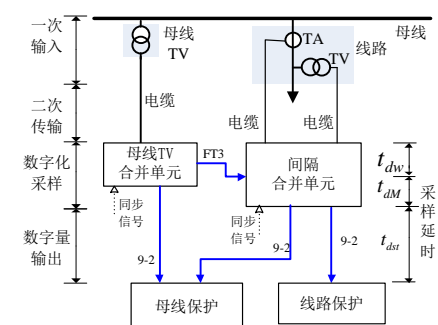
智能变电站中保护、监控、计量系统的采样通过电子式互感器或常规互感器+合并单元的方式实现。采样环节由原来的保护、测控、计量等装置前移并分散到各电子式互感器或就地采样的合并单元完成,如图1所示。电子式电流、电压互感器通过采集模块将一次电流、电压量转换为二次数字量信号,再由合并单元进行同步、合并等处理,然后输出标准格式的采样值(Sampled Value, SV),以点对点方式传输给保护装置,以网络方式传输给监控、

计量、PMU装置。实际工程应用中间隔的保护、测控装置一般还需要母线电压,间隔合并单元与母线TV合并单元之间需级联。



a) 电子式互感器采样环节

a) Sampling process of electronic instrument transformer



b) 常规互感器就地数字化采样环节

b) Sampling process of traditional transformer digital conversion in field

图1 智能变电站数字化采样环节

Fig.1 Digital sampling process in smart substation

若采用常规互感器就地数字化的采样模式,则没有独立的采样模块,如图1b所示,常规互感器二次输出直接接入合并单元,模拟量采集功能在合并

单元实现, 其它环节与电子式互感器采样相同。

1.2 额定延时组成

电子式互感器采集模块或合并单元的采样都需经过 A/D 转换、数据处理以及传输等环节, 这些环节都需要一定的时间。因此, 智能变电站的数字化采样, 从一次电流、电压输入至保护装置最终接收到采样值需要一定的延时, 如图 2 所示。数字化采样延时 t_d 典型值由图 1 所示的各部分组成: 电子式互感器采集模块的采样环节延时 t_{ds} ; 电子式互感器采集模块数据发送及传输延时 t_{dt} ; 合并单元级联所需等待时间 t_{dw} ; 合并单元的数据处理时间 t_{dM} ; 合并单元发送采样值及传输所需时间 t_{dst} 。对于常规互感器就地数字化模式, 不存在独立的采集模块, 减少了 t_{dt} , 采样环节延时 t_{ds} 包含在合并单元数据处理时间 t_{dM} 中。这些延时环节中, 采集环节 t_{ds} 、合并单元数据处理环节 t_{dM} 以及等待环节 t_{dw} 所需的时间是整个采样延时的主要部分, 一般达到毫秒级。而数据发送和传输延时 t_{dt} 、 t_{dst} 相对非常小, 一般只有微妙级。

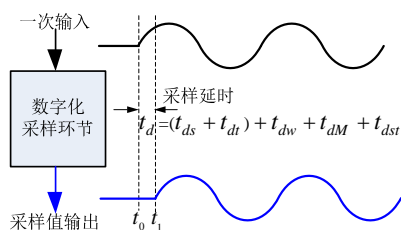


图2 数字化采样延时示意图

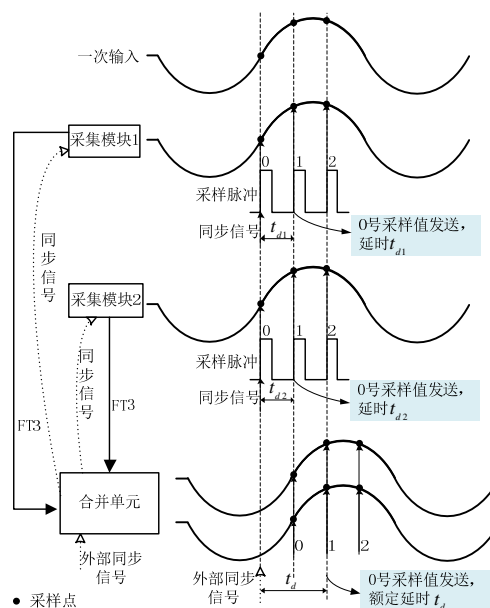
Fig.2 The schematic diagram of digital sampling delay

电子式互感器采集模块和合并单元的采样、等待、数据处理及相关环节等待环节都是基于定时的中断来完成的, 定时中断一般都是采样周期的整数倍, 因此这些环节的所需的时间是固定可知的。合并单元等待环节一般设计为在可控范围内可根据实际情况进行调整, 调整间隔为采样周期。而采集模块或合并单元的数据发送和传输延时具有一定不确定性, 但这部分延时非常小, 对整个采样环节的总延时影响较小^[3]。因此, 电子式互感器或合并单元的采样延时是设计可知的, 只在设计值的一个小范围内波动, 称之为“额定延时”, 其作为一个特定的参数提供给使用者。目前, 单个电子式互感器或合并单元的采样额定延时在 1ms 左右, 对于两个合并单元级联的情况, 采样延时达到 1.5ms~2ms。

1.3 采样同步实现

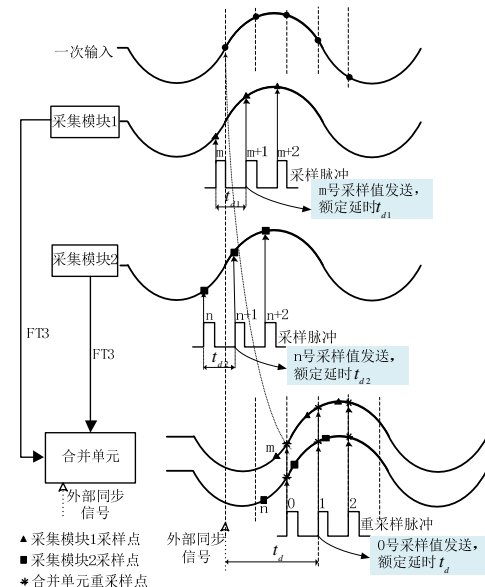
智能变电站中, 继电保护系统为保证可靠性采

用点对点直接采样方式, 不依赖于外部同步信号, 采样同步由保护的插值重采样实现。而监控、计量、PMU等系统一般直接依据采样序号处理数据, 对采样值有同步性的要求, 需要电子式互感器或合并单元输出同步的数据。电子式互感器或合并单元采样同步实现方式也有依赖外部同步信号和插值重采样两种方式, 前者与监控等系统实现数据同步类似, 后者与继电保护系统实现数据同步类似。下面以电子式互感器为例介绍两种方式具体实现。



a) 采样模块同步采样

a) Synchronous sampling in data acquisition module



b) 异步采集数据同步重采样

b) Synchronous signal resampling using asynchronous sampling data

图3 同步采样模式示意图

Fig.3 The schematic diagram of synchronous sampling

图 3a 所示的采样模式,合并单元将外部同步信号传输给每个采集模块,不同采集模块都基于同步信号对一次输入量进行采集,采样数据是同步的,且具有相同的采样序号,0 序号采样值都对应为外部同步信号给出时刻的一次输入量。采集模块经过一定的延时后将采样数据通过 FT3 发送给合并单元,延时 t_{d1} 、 t_{d2} 一般都为采样周期的整数倍,但不一定相等。合并单元只需对同步的采样数据进行简单的等待、组包等处理即可实现同步采样,不改变原有的采样序号,并根据实际等待、处理时间形成总的额定延时 t_d 。合并单元和采集模块都是依赖外部同步信号进行采样处理的,易于实现跨间隔的同步采样,但不同间隔的额定延时 t_d 可能不同。

图 3b 所示的采样模式,合并单元接收外部同步信号,但合并单元与采集模块之间没有同步信号的联系,采集模块依据自身的时钟对一次输入量进行采样,不同模块之间的采样数据是异步的,对应不同时刻的输入量。采集模块经过一定延时后将异步的数据通过 FT3 发送给合并单元。合并单元通过延时补偿将多组异步的采样数据还原到同一时间平面,然后根据外部同步信号对异步数据进行插值重采样,形成新的同步采样序列,其采样序号依据同步信号而定,使 0 序号采样值都对应为外部同步信号给出时刻的一次输入量,与原有采样模块的采样序号无关。合并单元最终输出的是插值后的同步采样值,不同合并单元之间都依据外部同步信号进行重采样,可实现跨间隔的同步采样,不同合并单元的额定延时 t_d 可能不同。

由图 3 可知,同步采样的数据同一采样序号对应同一时刻的一次输入量,但不同间隔的额定延时可能不同。对于继电保护应用而言需要进行类似图 3b 的延时补偿和插值重采样处理来实现跨间隔数据同步。对于监控、计量、PMU 等系统而言可直接根据采样序号实现跨间隔数据同步。

1.4 对保护影响

电子式互感器或合并单元的数字化采样取代了保护原有的 A/D 采样模块,采样模式由传统的模拟量采集转变为数字量采集。为确保采样的可靠性,继电保护系统采用点对点直接采样方式,不依赖于外部同步信号。为保证多路 SV 间的同步性,保护必须对 SV 进行重采样,并且对额定延时进行补偿,与图 3b 所示同步重采样类似。

为保证同步处理的准确性及可靠性,保护重采

样必须基于精确的额定延时。为此,电子式互感器或合并单元必须通过 SV 报文将额定延时告知保护,这一延时即为产品设计时的固有额定延时。但实际采样过程中,数据处理、发送、传输等环节所需时间都具有一定的不确定性。由此,采样值到达保护的时间并非完全相等,即 SV 报文的间隔具有一定的离散性。从而 SV 采样值实际额定延时并非完全等于报文中给定的额定延时,而是在一定范围内波动,这将给保护装置的重采样带来一定的误差。因此,数字化采样应尽量使实际的额定延时与其给定的数值相等,并保证 SV 报文的等间隔性,满足《智能变电站继电保护技术规范》中离散度小于 10us 的要求。工程应用中,针对保护应用必须对数字化采样的额定延时和报文等间隔性两项指标进行考核。

2 额定延时与相位误差异同

相位误差是互感器准确度的一个重要指标。对于数字化采样而言,相位误差是指:同一时刻,输入量与消除额定延时影响的输出数字量之间的相位之差。数字化采样相位误差主要由一次传感元件或小 TA、小 TV 的相位传变特性决定,同时受滤波、采集等电子电路器件参数的离散性及变化影响。相位误差是一个非确定量,会随着输入量变化、外界环境影响以及传感元件老化而改变。相位误差测量应该基于同步采样进行,比较某一时刻的输入量与相应采样序号采样值之间的相位差^[4]。

数字化采样的额定延时和相位误差都具有一定的不确定性,且最终都体现在输入量与输出量之间存在一定的相移。但额定延时和相位误差是两个不同的概念。额定延时指:从一次输入到相应采样值输出之间的时间,对于同步采样,即为同步信号时刻与 0 号采样值发送时刻之间的时间 t_d ,如图 4 所示。相位误差指:基于外部同步信号的采样,0 包接收时刻 SV 采样值的相位与同步信号时刻输入量的相位之差,即 $\varphi_r = \varphi_o - \varphi_i$ 。

额定延时是数字化采样所必须的处理时间,不可避免,设计时就可相对确定,不同电子式互感器或合并单元会根据采样需求的不同而设计为不同的值,其大小不会随输入量的变化而改变。同一类产品,其额定延时是基本固定的,只有微小的差别。

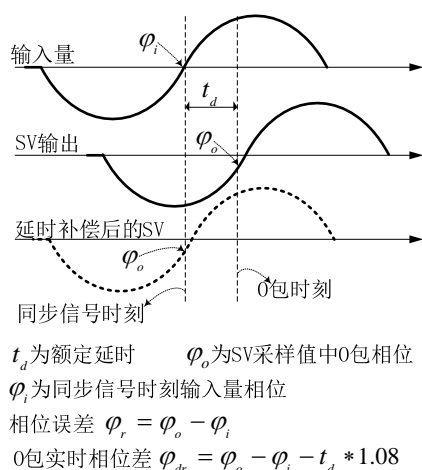


图4 额定延时与相位误差区别

Fig.4 The differences between rated delay and phase error

相位误差是信号传变时的固有特性，设计时尽量减小，但无法消除，一般设计为额定输入量时其值最小，它会随输入量的变化而改变，是个非确定量。每个电子式互感器或合并单元的相位误差是不同的，差异性也较大，只能在实际工程中测量而得。

相位误差引起的采样值相移比较小，是一个允许偏差，只要符合规定要求，实际应用过程中不需处理这个偏差。额定延时一般都在毫秒级，甚至达2ms，其引起的相位差达 $10^\circ \sim 36^\circ$ ，基于额定延时的采样应用必须对其进行补偿。

3 额定延时测量

额定延时是数字化采样对于保护“直采”应用的一个重要指标。工程应用中必须对电子式互感器或合并单元的额定延时进行校核，以确保继电保护系统应用的安全性和准确性。额定延时校核时需要实际测量采样值的延时，并与SV报文中给定值进行比较，实测值与给定值应在合理范围之内。额定延时的测量有间接法和直接法两种。

3.1 间接法

间接法是在工频下比较图4所示SV接收时刻的采样值相位与此时刻输入量相位之间的差 φ_r ，再将相位差转换为时间并取反而间接得到数字化采样的延时，即：

$$t_{dr} = -\varphi_r * 20000 / (360 * 60) = -\varphi_r / 1.08 \quad (1)$$

式中， t_{dr} 单位为us， φ_r 单位为分。

此方法也是目前工程应用中比较普遍的一种测试方法。但是此方法测得的延时并非真实的数字化

采样额定延时，而是还包含了相位误差带来的时间差，如图4所示。此方法测得延时实际为：

$$t_{dr} = t_d - \varphi_r / 1.08 \quad (2)$$

图4所示的 φ_r 为小于0的值，因此式(2)为两值相减，若 φ_r 为大于0的值，式(2)仍然成立。工程应用中，由于 φ_r 比较小，在额定输入时一般只有几分或十几分，因此一般忽略其影响，将间接法测得的延时即认为是数字化采样的额定延时。由于 φ_r 随输入量的变化而不同，一般在额定输入时其值最小，因此采用间接法测量额定延时应在额定输入时进行。

图5给出了间接法测量额定延时的结果曲线。此电子式互感器给定额定延时为1761us，而实际测得额定延时平均值为1769.9us，最大值为1771.3us，最小值为1768.2us，实测平均值比给定值大8.9us。在同步采样情况下，实际测得此电子式互感器在额定输入时相位误差平均值为 $-8.5'$ 。若考虑相位误差的影响，则此电子式互感器的额定延时应比1769.9us小，更接近于给定值。

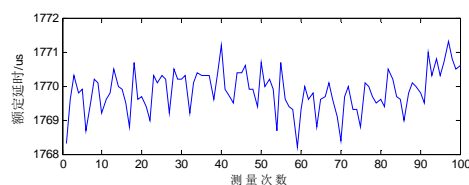


图5 间接法额定延时测量结果

Fig.5 The result of rated delay by indirect method

3.2 直接法

间接法测量额定延时可以在测量准确度时同时进行，但其测量的结果具有一定的偏差，相位误差的变化对其结果有影响。因此，可以根据额定延时的含义直接对其进行测量。测试时，将被测电子式互感器或合并单元对时同步，同时测试仪也对时同步，测试仪接收SV报文时给其标注精确的接收时间标识，然后测试仪解析采样序号为0的SV报文的接收时间标识，其时间值即为数字化采样的额定延时。此方法需要测试仪的对时精度及报文时间标注精度非常高，因此对其硬件要求比较高。实际工程应用中，测试仪可采用报文记录分析仪，其时间标注及对时精度一般均可优于1us，而电子式互感器或合并单元的对时精度也在1us以内，因此，直接法测得的额定延时误差可控制在2us以内。

图6给出了直接法测量额定延时的结果曲线。此电子式互感器给定额定延时为1761us，而实际测

得额定延时平均值为1764.2us, 最大值为1767us, 最小值为1762us, 实测值比给定值大3us, 而且测得额定延时的波动范围比较小, 符合报文发送、传输的不确定因素。

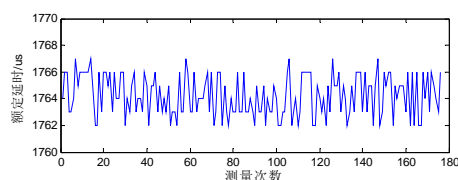


图6 直接法额定延时测量结果

Fig.6 The result of rated delay by direct method

由图6和图5可以看出, 直接法测量的额定延时比间接法更准确, 更接近SV报文中的给定值。

4 报文间隔测试

SV报文的等间隔性也是数字化采样对保护应用的一个重要指标。工程应用中, 若采用报文记录分析仪直接测量额定延时, 可同时测试SV报文的等间隔性。报文记录分析仪对接收到相邻报文的到达时刻进行比较从而分析报文的等间隔性, 这要求报文记录分析仪的对时精度及时间标注精度都达到1us以内。图7给出了某电子式互感器点对点输出SV的报文间隔曲线, 其采样频率为4000Hz, 间隔平均值为250us。由图可以看出, 其SV的间隔在250us附近波动, 波动范围为[245us, 255us]。

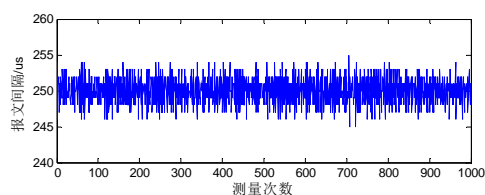


图7 报文间隔时间曲线图

Fig.7 The curve of interval time between two packets

表1给出了SV报文在各间隔时间的分布情况。由表可以看出, SV报文间隔平均为250us, 大部分集中在[247us, 253us]之间, 报文的间隔比较均匀, 满足离散度小于10us的要求。

表1 SV报文间隔时间分布

Tab.1 The interval time distribution of SV packets

间隔/us	245	246	247	248	249	250
数量/包	179	2171	5360	7954	11261	11170
比例/%	0.27	3.31	8.18%	12.14	17.18	17.05
间隔/us	251	252	253	254	255	总数
数量/包	11621	8427	5367	1882	144	65536
比例	17.73	12.86	8.19	2.87	0.22	100

5 工程应用建议

数字化采样在智能变电站得到广泛应用, 其对变电站继电保护、监控、计量、PMU等系统带来了影响, 而且其可靠性和准确性直接关系到后端应用的正确性。数字化采样在工程应用中应注意:

1) 数字化采样的额定延时和相位误差是两个概念, 在应用中既要测量采样的相位误差, 也要测量额定延时, 而且二者的测量方法也不相同。前者主要影响监控和计量系统的指标, 后者主要影响继电保护系统的性能。随着智能变电站的推广, 应在相关标准规范中完善并区分二者的技术指标和测量方法。

2) 数字化采样的额定延时直接影响保护装置差动功能的正确性, 因此工程应用中调试阶段必须保证其正确性, 同时还应保证纵差保护两侧同步性能的准确。额定延时在运行过程中应保持不变。

3) 合并单元之间采样值级联大大增加额定延时, 甚至使额定延时加倍, 而且采样环节增多也影响采样的可靠性。因此, 工程应用中应尽量减少合并单元之间的级联。

4) SV采样报文的间隔并非完全相等, 而是在采样周期 T_s 附近波动。为保证SV报文间隔的离散性不影响保护功能的正确性, 工程应用中一定要保证其等间隔性满足规定要求。

5) 采用DL/T 860.92格式的SV报文的数据通道可以根据实际工程应用而配置, 包括通道的含义及通道数目。数据通道的多少对采样值的处理及传输具有一定影响。因此, 工程应用中应尽量配置各SV报文的通道数目接近, 以保证各SV报文所需的传输、处理时间相同。

参考文献:

- [1] 蒋雷海, 陈建玉, 俞拙非, 等. 数字化保护采样数据处理方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 42-44.
Jiang Leihai, Chen Jiangyu, Yuzhufei, et al. Sampling Data Processing Methods of Digital Protection[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(17): 42-44.
- [2] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
Huang Can, Xiao Chifu, Fang Yi, et al. A Method Deal With Packet Transfer Delay of Sampled Value in Smart Substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.

- [3] 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 System, 2009, 33(4): 49-52.
- [4] 胡浩亮, 李前, 卢树峰, 等. 电子式互感器误差的两种校验方法对比[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3022-3027.
Hu Haoliang, Li Qian, Lu Shufeng, et al. Comparison of Two Electronic Transformer Error Measuring Methods [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3022-2027.
- [5] 王立辉, 许扬, 陆于平, 等. 数字化变电站过程层采样值时间同步性分析及应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 37-40.
Wang Lihui, Xu Yang, Lu Yuping, et al. Synchronized sampling of process layer in digital substation [J]. Electric

Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 37-40.

作者简介:

卜强生 (1983-), 男, 硕士, 江苏江阴人, 主要从事智能变电站、继电保护方面的研究工作, E-mail: tc16002315@163.com;

袁宇波 (1975-), 男, 博士, 江苏丹阳人, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护的研究工作;

高 磊 (1982-), 男, 硕士, 山东青岛人, 主要从事继电保护、智能变电站方面的研究工作;

张道农 (1961-), 男, 教授级高级工程师, 项目经理, 全国电力系统管理及其信息交换标准化委员会委员、WAMS 及时间同步工作组组长, 主要从事继电保护及安全自动装置的设计与研究以及大型工程项目的项目管理工作, E-mail: zhangdn@ncpe.com.cn.

Analysis on the Characteristic and Impact of Digital Sampling Delay in Smart Substation

Bu Qiangsheng¹, Yuan Yubo¹, Gao Lei¹, Zhang Daonong², Chenjiulin¹, Song Liangliang¹

(Electric Power Company Research Institute, Jiangsu Nanjing 211113, China, 2. North China Power Engineering Co., LTD, Beijing 100120, China)

Abstract: First the process of digital sampling is presented. Then the production and the structure of rated delay are introduced. The implementation of synchronous sampling is described, which is based on external synchronous signals. Based on the above discussion, the effect of digital sampling on relay protection is analyzed. The differences and similarities between rated delay and phase error of digital sampling are specified in detail. The indirect and direct methods of rated delay testing are proposed combined with practical engineering. The advantages and disadvantages between two methods are compared. Also the test method of interval time between two contiguous sampled value packets is put forward. At last, the attention and suggestions are given when digital sampling applied for smart substations.

Key words: Digital Sampling; Rated Delay; Phase Error; Direct Method; Indirect Method; Interval between two packets