模拟量输入合并单元工程测试方案分析

与数字量输入合并单元的测试相比，模拟量输入合并单元的测试涉及到模拟量和数字量的同步接入及分析，对测试装置和系统的要求更高。目前，国内已经出版的相关行业标准和企业标准并没有涉及具体的测试方法，只是概括性地叙述了测试流程，可操作性太弱。从智能变电站的技术特点和模拟量输入合并单元的原理出发，对其工程测试的内容、方法以及对测试系统的要求进行分析，为模拟量输入合并单元的工程测试提供依据。

唐志军　邓超平　翟博龙/国网福建省电力有限公司电力科学研究院

唐志军/高级工程师

关键词/Keywords

智能变电站·
模拟量输入合并单元·
工程测试·

与常规变电站相比，智能变电站的通信结构[1-4]发生了巨大的变化，传统变电站通过电缆传输给继电保护、测控和安全自动装置的电压、电流和开关量被就地转换成数字量，并以SV、GOOSE报文的形式通过光纤网络传输。通信结构的变化虽然使数据得到了充分的共享，但是合并单元的引入却给智能变电站的工程测试带来了新的问题。

在智能变电站中，合并单元的主要作用是对电压、电流和开关位置进行采集并发送给间隔层设备。其中，电压、电流既可能来自常规互感器的模拟量输出，又可能来自电子式互感器[5-7]的数字量输出。由于电子式互感器在近几年的应用过程中出现了比较多的故障和缺陷，因此，常规互感器配合模拟量输入合并单元的方式在今后一段时期内依然会是主流技术方案。

与数字量输入合并单元的测试相比，模拟量输入合并单元的测试涉及到模拟量和数字量的同步接入及分析，因此，对测试装置或者系统的要求更高。

为了规范模拟量输入合并单元的生产、验收和运行，国内已经出版了相关行业标准和企业标准[8-9]，对其技术要求进行了规范。但是，这些标准中并没有涉及具体的测试方法，只是概括性地叙述了测试流程，可操作性太弱。

另一方面，一些原理性的技术要求，如SV发布、GOOSE订阅/发布、网络压力、力学性能、安规和EMC等，仅在产品的型式试验阶段检验，无须在工程测试阶段（现场验收、运行维护等）进行测试。

从智能变电站的技术特点和模拟量输入合并单元的原理出发，对其工程测试的内容、方法以及对测试系统的要求进行分析，为模拟量输入合并单元的工程测试提供依据。

基本特性测试方案分析

模拟量输入合并单元（MU）的基本特性测试项目如表1所示。

表1　基本特性测试项目

序号	测试项目	测试内容
1	光功率测试	光网口输出功率
2	SV输出测试	配置和完整性
3	SV输入测试	正确识别级联SV输入
4	GOOSE输出测试	配置、复位态和完整性
5	GOOSE输入测试	正确识别GOOSE输入
6	检修测试	检修压板及检修机制

基本特性测试需要使用的仪器及装置包括：数字化继电保护测试仪[10]、网络报文记录分析装置[11]和光功率计[12]，其测试接线图如图1所示。

具体测试方法及流程如下。

1）测试前准备。退检修压板，不接

中国知网　https://www.cnki.net

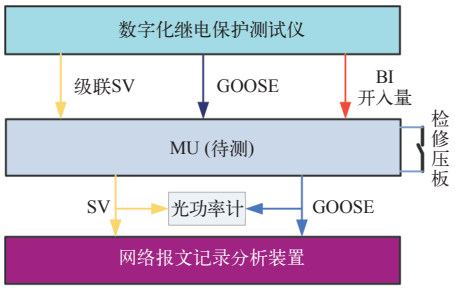

图1　基本特性测试接线图

入对时信号，根据SCD文件或者MU的CID文件对数字化继电保护测试仪、网络报文记录分析装置进行配置，按照图1所示接线图连接MU和各试验装置，按照表2要求设置光功率计的判据限值。

表2　光网口发送功率技术要求

序号	波长/nm	功率范围/dBm
1	850	−19～−10
2	1 310	−20～−14

2）光功率测试。MU上电，用光功率计依次检验各光网口的输出功率是否满足表2要求。

3）GOOSE输出复位态测试。复位MU（掉电或者软件复位），网络报文记录分析装置应给出“GOOSE复位”告警，抓取相关报文，检查MU复位之后发出的第1帧GOOSE报文的stNum、sqNum是否都为1。

4）SV、GOOSE配置测试。测试过程中，网络报文记录分析装置不应给出“报文配置不匹配”告警。

5）SV输出完整性测试。测试过程中，网络报文记录分析装置不应给出SV的“丢帧”、“错序”、“跳变”和“重复”告警。

6）GOOSE输出完整性测试。触发BI变化或内部事件，网络报文记录分析装置不应出现“sqNum丢失”、“sqNum错序”、“sqNum重复”、“stNum丢失”、“stNum错序”、“虚变”、“存活时间无效”和“T0偏差大”告警。

7）SV输入测试。在无级联SV输入的情况下，相应SV输出通道的有效位应置“1”，通过继电保护测试仪向MU发送级联SV，MU相应的SV输出通道的有效位应置“0”。

8）GOOSE输入测试。通过继电保护测试仪向MU发送测试位置“0”的GOOSE，并改变GOOSE通道的值，MU应能正确识别。

9）检修压板测试。检查所有SV通道的有效位应置“0”，GOOSE的测试位应置“0”，投检修压板，所有SV通道的有效位、GOOSE的测试位应置“1”。

10）检修机制测试。分别设置MU输入GOOSE的测试位和检修压板，并改变GOOSE通道的值，当两者不一致时，MU应不响应GOOSE通道的变化。

交流模拟量采集性能测试方案分析

1. 组网模式测试方案分析

文献[8]中，MU交流模拟量采集性能测试的方案如图2所示。其中，交流采样基准应比待测MU高两个准确度等级。

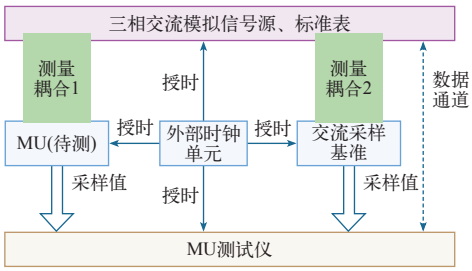

图2　MU模拟量采集准确度测试方案

在对时情况下，两者对同一个信号源进行采集和转换，转换结果按照采样序号对齐，以交流采样基准为基准，计算待测MU的幅值和相位误差。该过程无须记录SV报文的时间，因此，图2中的MU测试仪亦可用网络报文记录分析装置替代。

图2中，对交流采样基准的要求是：具有和待测MU相同的采样值配置，测量耦合通道没有模拟量调理产生的相移，或相移可以忽略不计。以上要求中并没有提到对其时间同步准确度的要求。本节通过对模拟量输入合并单元的模拟量调理通道和采样原理的分析，为交流采样基准相位准确度的要求及其设计要点提供了参考依据。

2. 组网模式相位误差分析

在组网模式下，MU的采样时刻信息包含在SV

中国知网　https://www.cnki.net

报文的采样序号中，即0号SV报文携带的采样值的原始采样时刻是整秒时刻。因此，组网模式下，MU的相位误差主要受两个方面的因素影响：模拟量调理通道的相移和对时准确度，其中，模拟量调理通道包括互感器和抗混叠滤波器[13]，二者均会造成相移，如图3所示。

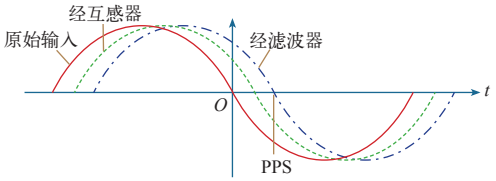

图3 MU采样通道相移原理图

（1）互感器

按照测试系统应比待测装置高两个准确度等级的要求，以0.2级的MU为例，测试系统的准确度等级至少应为0.05。由于影响测试系统准确度的因素包括互感器、抗混叠滤波器和时间同步准确度3个方面，因此，交流采样基准选取的互感器至少应再提高1个准确度等级，才能满足相位准确度测试的要求。

（2）抗混叠滤波器

抗混叠滤波器是采样系统中的重要环节，但是抗混叠滤波器的引入也会给模拟量调理通道带来相移。抗混叠滤波器对相移的影响主要取决于截止频率和阶数，对某个固定的频率分量而言，截止频率越高或者阶数越低，所产生的相移越小。为了减小该相移，交流采样基准中所使用的抗混叠滤波器应采用较高的截止频率，相应地，其采样频率也应同时提高，以免由于频率混叠造成模拟量幅值、角度的计算误差。

（3）对时准确度

对时准确度影响本地ADC的采样时刻，以0号SV报文为例进行说明。理论上来讲，0号SV报文应在整秒时刻采样。假设输入为50 Hz，相角为0°，则整秒采样的0号SV报文，其相位也应为0°。如果对时不准确，0号SV报文的采样时刻相对整秒有偏移，此处假设为正偏，那么每偏离1 μs，则0号SV报文的相位增加0.018°（1.08′），对外表现为相位超前；反之，0号SV报文的采样时刻负偏造成相位减少，对外表现为相位滞后。

因此可见，在组网模式下，对时不准确有可能补偿模拟量调理通道的延时，从而带来有益效果。但是，考虑到误差的累积，要求交流采样基准的对时准确度足够高，至少应在1 μs之内，使由于对时误差造成的相位测量误差小于1.08′。

3. 点对点模式测试方案分析

点对点模式下，测试系统通过SV的接收时刻以及SV的额定延时反推该点的采样时刻[14]，因此接收时刻和额定延时的准确度对相位准确度均有影响，概括如下。

1）测试系统接受时刻的时间戳[15-16]是打在帧起始的最后一位结束、目的MAC地址的第一位开始的时刻，而额定延时在定义时没有指定时间戳的位置，因此两者的理解不一致会带来误差，该误差是额定延时误差的一部分。

2）光数字报文的时间戳是在电的部分打的（MAC与PHY的连接处，包括合并单元处和测试系统处），因此接收时刻包含了合并单元处的电光转换、光纤传输延时和测试系统处的光电转换3部分（传输路径）带来的延时影响。

另外，SV的发送是存在抖动的，该抖动既可能由采样抖动引起，也可能由延时抖动引起。虽然目前从技术上来说抖动已经很小，但是标准对抖动的定义是10 μs，因此理论上会对相位准确度的测试造成影响。该抖动的影响是造成反推之后的采样时刻不是均匀分布，给相位的计算带来困难。

因此，此处介绍一种间接方法进行点对点模式下相位准确度的测量。

在组网模式下，采用序号对齐实现同步，不用考虑SV的时间特性的影响，其相位准确度测量容易实现。不管MU的对时是否准确，对测试系统来说，0号SV报文的采样时刻就是整秒，对时准确度的影响已经折算到相位准确度中。在点对点模式下，如果0号SV报文的接收时刻相对于整秒正好是额定延时，那么反推采样时刻也正好是整秒，那么相位差为0；如果0号SV报文的接收时刻相对于整秒的时间大于额定延时，那么反推采样时刻位于整秒右侧，相当于相位滞后；反之，如果0号

中国知网 https://www.cnki.net

SV报文的接收时刻相对于整秒的时间小于额定延时，那么反推采样时刻位于整秒左侧，相当于相位超前，如图4所示。

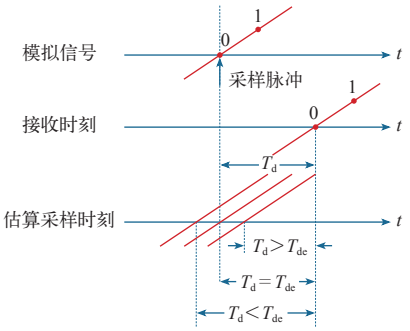

图4　点对点模式反推采样时刻原理图

因此，通过计算0号SV报文相对于整秒的时间与额定延时的误差，即可估算SV延时对点对点模式相位准确度测量的影响。

为解决抖动的影响，可通过多次测量求取平均值的方法计算0号SV报文相对于整秒的时间与额定延时的误差；当然，也可计算1号包相对于整秒再减去1个采样周期的时间与额定延时的误差，依此类推。

时间特性检验

1. SV延时准确度测试

SV延时测量原理是：测量SV报文的实际发送时刻与其理论上的发送时刻之差。例如，在MU已对时的情况下，那么，0号SV报文理论上的发送时刻与整秒时刻之差应为额定延时；因此，所测量的0号SV报文的实际发送时刻与理论上的发送时刻之差即为额定延时的误差。对采样序号为其他值的SV报文，其理论上的发送时刻应为：采样序号×采样周期＋额定延时。

当然，测试系统是无法直接测量SV报文的发送时刻的，而是只能测量接收时刻。由此可见，SV由MU发送到测试系统接收之间的传输路径延时也构成了误差的一部分。

另外，对MU来说，SV报文的延时是相对于其采样时刻而言的。前面所述的情况是在假设MU对时很准确的情况下进行分析的，即假设0号SV报文是在整秒采样的。当MU的对时不完全准确或其采样系统部完全准确时，0号SV报文的采样时刻是偏离整秒时刻的。因此，在进行额定延时准确度测试的过程中，测试系统的误差的另一来源是：MU对时准确度和MU采样系统的准确度。不过，从现有技术角度来说，这一误差一般不会超过1 μs。

2. 守时特性检验

现有标准里要求MU应具备1个PPS输出测试接口，用以测试MU的时间及守时准确度，但实际上在工程测试中很难实施。这种测量方式一般是在实验室里用示波器完成的，因为MU时间特性的准确度要求为微秒级。而现场使用的仪器出于安全性和可靠性的考虑，会对开关量输入进行隔离和防抖处理，同时要求输出源具有一定的带载能力，因此无法达到如此高的准确度。

所提出的时间特性测试方案从对SV报文的接收时刻测量的角度进行，可有效解决时间特性工程测试的问题，具体测试方案介绍如下。

在待测MU已对时的情况下，撤销对时信号，并开始计时，至网络报文记录分析装置发出SV失步告警时停止计时，该时间即为守时时间。在这段时间内，依然以每个SV报文的理论发送时刻为基准，计算该SV报文的输出时间误差，那么误差的最大值和最小值之差即为守时准确度。

3. 失步再同步特性检验

当MU失去时间同步信号之后，由于其自身的晶振频率的误差，其采样脉冲序列也会发生整体偏移。当重新接入对时信号之后，为了保证整秒采样，MU需要逐步调整其采样脉冲序列，使之与整秒PPS对齐。但是在调整过程中，为了保证采样间隔的均匀性，相关标准要求采样脉冲的调整步长不应大于1 μs，否则继电保护装置会判SV异常而闭锁。

为了在较大失步的前提下进行检验，所采用的方案如下：调整标准时钟源的B码输出延时，并接入待测MU，待测MU同步后，撤销对时信号。此时，待测MU的0号SV报文的采样时刻距PPS一定时延，相当于已经失步了一段时间。

在待测MU失步的情况下，将B码输出延时置“0”，重新接入对时信号，并开始计时，并按照

中国知网　https://www.cnki.net

以下要求进行检验。

1）待MU测试仪发出SV复归告警时停止计时，该时间即为失步再同步时间。

2）检查同步标志置“1”的采样点的采样序号是否为0，否则不合格。

3）记录该点及之后每个SV报文的发送时刻相对于其理论发送时刻的偏差应小于1 μs。

4）检验失步再同步时间内相邻SV报文的时间差，应在采样周期±1 μs的范围内。

结束语

由于电子式互感器存在的各种异常和故障，常规电压、电流互感器配合模拟量输入合并单元是当前一段时期内智能变电站的主流技术方案。虽然目前国内已经出版了相应的行业标准和企业标准，对模拟量输入合并单元的技术要求、性能指标、检验检测进行了规范，但是仅提供了指导性方案，对测试装置或系统、测试流程的定义不够详细，缺乏现场可操作性。从模拟量输入合并单元的结构原理和工程测试的角度出发，分析了其基本特性、模拟量采集性能、时间特性的测试内容和测试流程，为相应的测试装置或系统的技术要求和设计方案提供了指导意见，可有效提高模拟量输入合并单元工程测试的实用性和效率。

参考文献

[1] 任雁铭，秦立军，杨奇逊．IEC 61850通信协议体系介绍和分析[J]．电力系统自动化，2000，24(8)：62-64．

[2] 王刚．智能变电站的网络通信与信息处理技术的研究[D]．天津：天津大学，2012．

[3] 刘玮，王海柱，张延旭．智能变电站过程层网络报文特性分析与通信配置研究[J]．电力系统保护与控制，2014，46(6)：110-115．

[4] 朱林，王鹏远，石东源．智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]．电力系统自动化，2013，37(11)：87-92．

[5] 张冬清．电子式互感器的应用研究[D]．北京：华北电力大学，2012．

[6] 李九虎，郑玉平，古世东，等．电子式互感器在数字化变电站的应用[J]．电力系统自动化，2007，31(7)：94-98．

[7] 陈建国，徐长宝，高吉普，等．数字化变压器保护电子式互感器的应用与研究[J]．南方电网技术，2012，6(5)：105-109．

[8] DL/T 281—2012 合并单元测试规范[S]．北京：中国电力出版社，2010．

[9] DL/T 282—2012 合并单元技术条件[S]．北京：中国电力出版社，2010．

[10] 谌争鸣，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)：109-113．

[11] 付国新，戴超金．智能变电站网络分析与故障录波一体化设计与实现[J]．电力自动化设备，2013，33(5)：163-167．

[12] 彭辉丽．便携式通用光功率计的研究与设计[D]．杭州：浙江工业大学，2013．

[13] 崔旭晶．电量测量抗混叠滤波器设计与研究[J]．沈阳理工大学学报，2010，29(5)：25-29，54．

[14] 王旖旎，瞿璋俊．数字化变电站继电保护校验的研究[J]．华东电力，2010，38(12)：1993-1994．

[15] 杨传顺，吕文发，袁建．以太网准确时钟协议的研究与实现[J]．计算机测量与控制，2011，19(12)：3047-3049，3053．

[16] 关世友，李智，胡聪．IEEE 1588协议硬件时间戳标记电路设计[J]．计算机测量与控制，2011，19(10)：2532-2535．

（收稿日期：2015－06－15）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net