

# 智能变电站通信网络时间性能的探讨

高吉普<sup>1</sup>, 徐长宝<sup>1</sup>, 张道农<sup>2</sup>, 黄兵<sup>3</sup>, 赵旭阳<sup>3</sup>, 王小勇<sup>3</sup>

(1. 贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120;  
3. 上海远景数字信息技术有限公司, 上海 201206)

**摘要:** 阐述智能变电站通信网络和系统的时间性能概念及其重要性, 为智能变电站通信网络和系统的运行维护提供可测量、可分析的方法和手段。依据智能变电站通信网络和系统标准定义的一致性测试方法和范围, 研究讨论其测试方法的重要性, 通过测试手段和方法的分析和描述为智能变电站通信网络和系统定义基本的时间性能要求。同时阐述评估智能变电站通信网络和系统的时间性能指标, 为更好地掌握智能变电站通信网络和系统的时间性能提供全面的分析方法和检测依据。

**关键词:** 智能变电站; 时间性能; GOOSE; SMV9-2; PTP

## Time performance discussion for smart substation communication network

GAO Ji-pu<sup>1</sup>, XU Chang-bao<sup>1</sup>, ZHANG Dao-nong<sup>2</sup>, HUANG Bing<sup>3</sup>, ZHAO Xu-yang<sup>3</sup>, WANG Xiao-yong<sup>3</sup>

(1. Guizhou Electric Power Test Research Institute, Guiyang 550002, China;  
2. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China;  
3. Shanghai Digigrid Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** This paper describes concept and importance of time performance of communication network and system in substation and provides measurable and analysable method for management and maintenance of communication network and system in substation. According to conformance testing of communication network and system in substation, it defines test method and test range for time performance, and discusses the importance of test method. Through the analysis of test method, it defines the basic of requirement of time performance and meanwhile describes evaluation parameters for substation, which provide a comprehensive method and measure reference for the management of substation time performance.

**Key words:** smart substation; time performance; GOOSE; SMV9-2; PTP

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0144-05

## 0 引言

智能变电站首先采用了国内标准DL/T860作为其数据信息传输的标准<sup>[1]</sup>, 而国际上采用的标准为IEC61850<sup>[2]</sup>, 两者没有大的区别, 国内标准是对国际标准的补充, 主要是为了适合中国电力系统的特殊性, 增加了更多的逻辑设备类型, 方便标准在国内的实施, 标准中为变电站各种应用对象定义了相关的模型数据信息, 通过模型的管理和配置为整个变电站的管理提供了快速方便和信息共享的途径, 同时为数据对象的互操作带来了方便, 简化了数据访问的复杂性<sup>[3]</sup>。

精确时间是电力系统进行数据采集、故障处理、网络监管、信息同步及事故追忆和分析的基础, 是电力系统安全运行的重要组成部分。为了保证电网使用的北斗/GPS时钟精确、稳定、可靠以及电网/变电站内的交换机、合并单元、保护、测控、RTU、功角测量、故障录波器、保护管理信息系统、网络记录仪、计费表计的同步时间精度, 智能变电站必须建立一套完善的时间同步机制, 以保证电网的安全稳定运行<sup>[4]</sup>。

## 1 概述

智能变电站的典型结构如图1所示。智能变电

站的整体结构一般划分为三层结构, 即站控层、间隔层及过程层。时间同步系统也是智能变电站实施的关键环节, 目前站控层大都使用 NTP 方式进行同步, 而间隔层和过程层根据不同的设计组网方式较为普遍采用全 IRIG-B 方式或者全 PTP 方式<sup>[5]</sup>或者 IRIG-B 和 PTP 混合模式, 不同的设计模式充分利用对时信息传输特点进行有效的布局和管理。间隔层和过程层的智能设备包括合并单元、智能终端、保护装置、测控装置、计量表计等, 设备接收时间同步信息成为了智能变电站稳定运行的基石, 而信息通信组网的组网模式对通信数据信息带来的时间性能变化成为了智能变电站稳定运行的关键考核参数<sup>[6]</sup>。

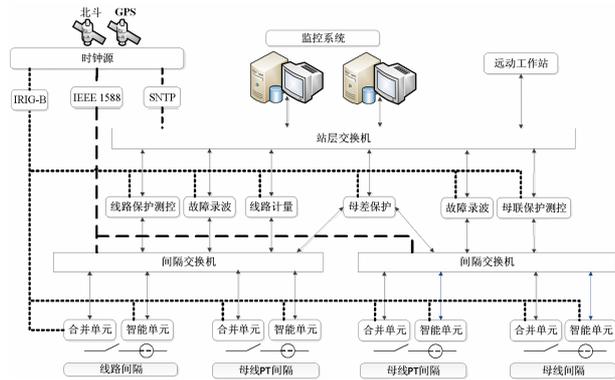


图 1 智能变电站典型结构

Fig. 1 Typical structure of smart substation

智能变电站实施标准的一致性测试(DL/T 860.10)中定义了时间性能的概念, 即包括时间准确度也包括时间的传输延迟。而现实中我们很多人员在理解上都只停留在时间准确度上, 即大家现在一般听到的关于时间信号的测试精度、守时特性等, 而且相应的测试仪也只简单对各种物理接口的时间信号进行测试。但这些都是智能变电站的基本, 而由智能设备连接构造的整个通信网络的时间传输特性却是整个变电站稳定运行的工作通道, 这个通道的可测量、可研究性才是电力系统需要重点抓的问题环节之一。

智能变电站实施改造的部分恰恰是传统变电站不需要关心和处理的关键数据, 而电力用户必须重新审视智能变电站中数据信息传输的稳定性和时间延迟特性。任何一个传输环节的不确定性都可以对时间特性造成不同程度的破坏, 如交换机、智能设备等, 而这种时间特性的破坏力对于智能变电站来说是一个灾难, 比如 GOOSE 网络信息的延迟带来故障的慢速隔离, SMV9-2 采样数据不均匀及延迟传输带来的保护失效等关键问题都会引起变电站的重大事故<sup>[7]</sup>。

智能变电站的时间不仅仅体现在同步时间的精确性, 同样也包括应用数据的时间特性及网络化带来的时间延迟特性。国际标准 IEC61850 及国内标准 DL/T860 都在通信功能要求中定义了总的传输时间, 并在一致性测试中提出了测试通信延迟和时间准确度的测试范围和方法。测试范围和方法中详细定义了 GOOSE 和 SMV9-2 信息的输入输出延迟的测试范围及方法, 通过有效的手段可以检测 GOOSE 及 SMV9-2 采样信息的报文时间延迟。由于国际标准 IEC61850 及国内标准 DL/T860 在实施过程中需要完备的一致性来进行检验, 因此对于任何一个涉及标准体系的产品都必须经过有效的一致性测试才能在电力系统使用。目前在一致性测试方面没有真正建立起实现通信延迟和时间准确度的有效方法和量化标准, 通过研究和分析提供有力的数据依据进而量化这些指标, 增强智能变电站实施的成功性。

智能变电站试运行到现在这个阶段, 国内外也有很多专家对其进行了研究分析, 时间性能带来的诸多问题对智能变电站的影响有很严重的威胁。比如 GOOSE 的输出延迟带来的跳闸延迟问题, 不同合并单元延迟差导致保护闭锁, 合并单元采样同步偏差导致保护差流、SMV9-2 报文时间间隔不均匀导致保护误动等问题。

针对这些问题如何能够及时发现和消缺, 必须建立起完备的检测机制和设备标准化定义, 而完成这些工作的前提条件是必须给出如何检测和测试智能设备的时间性能, 保证智能设备实验室验证及 FAT 和 SAT 能够顺利完成, 从而确保智能变电站的投运能够产生最小化的问题域。

## 2 时间性能要求

不同的时间信号有着不同的传输介质, 时间信号的准确度也决定着智能变电站的时间性能, 目前一般要求的时间信号准确度如表 1 所示。

DL/T860 标准根据通信信息片通信要求的不同, 在整个智能变电站需要多种联络传输报文协调

表 1 时间信号准确度

Table 1 Accuracy of time signal

时间信号	光纤	双绞线	RS485	空接点	TTL	AC
1PPS/1PPM	1 $\mu$ s	-	1 $\mu$ s	3 $\mu$ s	1 $\mu$ s	-
IRIG-B-DC	1 $\mu$ s	-	1 $\mu$ s	-	1 $\mu$ s	-
IRIG-B-AC	-	-	-	-	-	20 $\mu$ s
NTP	10 ms	10 ms	-	-	-	-
PTP	1 $\mu$ s	1 $\mu$ s	-	-	-	-

通信信息片的属性，不同的报文类型规定不同的性能要求。DL/T860 标准定义了 7 种报文类型，其属性范围由性能类建立，每种报文对应不同性能类具有不同的时间性能要求。

对于控制和保护性能类定义为 P1/P2/P3，P1 一般用于配电线间隔或者其他要求较低的间隔，P2 一般用于输电线间隔或用户未另外规定的地方，P3 一般用于输电线间隔，具备满足同步和断路器分合时间差的最好性能。

对于计量和电能质量性能类定义为 M1/M2/M3，M1 用于具有 0.5 级和 0.2 级精度计费计量，最高 5 次谐波，M2 用于具有 0.2 级和 0.1 级精度计费计量，最高 13 次谐波，M3 用于电能质量计量，最高 40 次谐波。

智能变电站应用数据的时间性能要求在 DL/T860 标准中也有所体现，主要参数如表 2 所示。

表 2 智能变电站应用数据的时间性能要求

Table 2 Time performance requirements of smart substation application data

报文类型	性能类	传输时间指标
快速报文（跳闸）	P1	<10 ms
	P2/P3	<3 ms
快速报文（其他）	P1	<100 ms
	P2/P3	<20 ms
中速报文	P1/P2/P3	<100 ms
低速报文	P1/P2/P3	<500 ms
原始数据报文 （保护和控制）	P1	<10 ms
	P2/P3	<3 ms

时间性能包括时间准确度和传输时间两个方面，既然定义了不同的参数指标，对设备是否符合规范的时间性能定义，只有通过测试才能明确检测和分析。因此目前时间测试不能只停留在时间准确度的测试上，必须要深入到传输时间的测试内。时间的准确度只能说明设备的时间是可靠的，但智能变电站是一个设备与设备协调工作的整体，设备和设备之间传输时间的变化将直接影响到智能变电站的稳定性，毕竟变电站的安全稳定运行才是电力系统的重点，因此时间准确度是基石，而传输时间是系统工作的保障。

### 3 时间性能测试

通过对智能变电站数据报文传输延迟测试技术的研究和分析，目的在于如何在智能变电站的测试和日常维护中为智能变电站的稳定运行提供有力的测试设备和依据，解决电力用户对智能变电站数

字化信息的准确把握。

电力系统分为发电、输电、变电、配电、用电等五大环节。变电站是变电环节的重要部分，它实质是一个转换电压的枢纽，实现不同电压等级的电力转换。所有变电站的一次设备的工作状况都是通过二次设备之间的通信网络来完成。二次设备利用自身设备的功能实现测控、保护、计量等工作，然后通过通信网络将变电站的数据信息送到本地或远程监控系统实现电力系统的数据采集和监控。通信是一个基于信号的交流渠道，为了增加变电站通信交互双方对信号的识别能力，变电站内的各个设备都必须工作在同一时刻，也就是说需要在变电站内设置时间同步系统来完成设备的时间同步，确保设备时标一致，信息识别度能清晰，应用处理能简约化，其中对传输延迟的测试是必不可少的部分。

电力系统的快速发展，对时间同步的要求也越来越高。任何一个变电站都需要准确、安全、可靠的时钟源，为电力系统各类运行设备提供精确的时间基准。高性能的时钟源可以为电力系统变电站提供统一的时间基准，满足变电站各种系统（监控系统、能量管理系统、调度自动化系统）和设备（继电保护装置、智能电子设备、时间顺序记录 SOE、厂站自动化故障测距、安全稳定控制装置、故障录波器）对时间系统的要求<sup>[8]</sup>，确保实时数据采集时间一致性，提高系统运行的准确性，从而提高电网运行效率和可靠性。

国内智能变电站完全遵循 DL/T860 标准的设计规范。DL/T860 标准覆盖变电站通信网络与系统，其中智能设备中各个逻辑节点之间的通信由数千个独立的通信信息片进行描述，而通信信息片主要完成逻辑节点之间对于给定通信属性的信息交换，包括对它们的性能要求。如何保证基本功能的正常运行以及支撑通信系统的性能要求的关键是数据交换的最大允许时间，即传输时间<sup>[9]</sup>。

传输时间是智能变电站的系统要求，其定义如图 2 所示。一个报文的完成传输过程包括收发端必要的处理。传输时间计时从发送方把数据内容置于其传输栈顶时刻开始，直到接收方从其传输栈中取走数据时刻结束<sup>[10]</sup>。图中定义了完整传输链的时间要求。在物理装置 PD1 中，功能 f1 把数据发送到位于物理装置 PD2 中功能 f2。传输时间将包括各自通信处理器时间加上网络时间，其中有等待时间、路由器与其他网络设备所耗费的时间。由于物理装置和网络设备可能来自不同的厂商，故对总传输时间的任何测试和验证都必须在现场验收测试时进行。

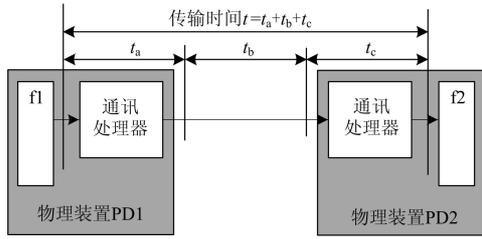


图 2 传输时间定义

Fig. 2 Definition of transmission time

智能变电站报文数据传输延迟属于性能测试的应用范畴。传输时间的定义的间隔中,  $t_b$  时间间隔取决于网络底层结构, 不属于智能电子设备的范畴, 从智能电子设备的角度出发, 只有输出和输入延迟可以被测量。标准中规定时间性能测试方法<sup>[11]</sup>如图 3 所示。对于传输时间的输入输出延迟测量值应不大于 DL/T860 标准中所规定的相应报文类型的总的传输时间的 40%。

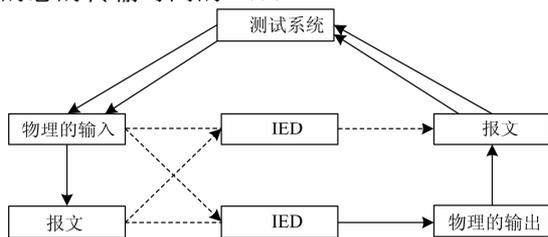


图 3 性能测试方法

Fig. 3 Method of performance testing

图 3 方法中定义了回环测试环境, 被测设备的输入信息与输出信息都与测试系统建立连接, 当测试系统产生被测设备需要的物理输入信号或者报文信号后, 测试系统通过接收被测设备产生的报文或者物理的输出信号来检验输入输出时间性能。

有了以上测试方法之后便可以对实际的设备进行测试。以下是对某变电站中一台时钟源的测试, 该时钟源的 PTP 同步报文经过一层交换机如图 4 所示, 交换机为 TC 模式, 测试仪器对经过交换机以后的 PTP 报文进行测试。

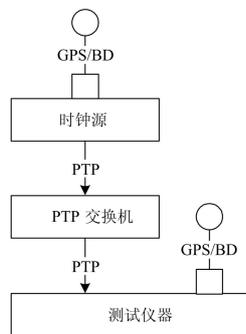


图 4 时钟源测试

Fig. 4 Clock source test

有效数据共测试 60 次, 时钟源的准确度和路径传输延迟测试结果如表 3 所示。

表 3 测试结果

Table 3 Test results

时钟源准确度	
平均偏差	-12 ns
最大偏差	47 ns
最小偏差	-77 ns
截图	<pre>Total 60 frames, 60 measurements Statistics for Offset1 Average(μ)= -12ns standard deviation(σ)= 23ns Minimum= -77ns Maximum= 47ns Lower quartile= -28ns Median (second quartile)= -14ns Upper quartile= 6ns Hit Ratio= 53.33%</pre>
路径传输延迟	
平均延迟	354 ns
最大延迟	361 ns
最小延迟	347 ns
截图	<pre>Total 60 frames, 60 measurements Statistics for Delay1 Average(μ)= 354ns standard deviation(σ)= 2ns Minimum= 347ns Maximum= 361ns Lower quartile= 352ns Median (second quartile)= 355ns Upper quartile= 357ns Hit Ratio= 71.67%</pre>

使用上述的测试方法可以测试时钟源同步信号经过两层或者两层以上交换机时的准确度和路径传输延迟, 同时也适用于 GOOSE、SV9-2 报文传输延迟的测试。

#### 4 结语

目前电力系统从国网、南网到每个省的电科院都设置了关于时间的工作组, 相关的测试标准也已经具备, 但是国内专业的测试机构只对规约报文的一致性进行分析和测试, 不针对时间性能做检测, 没有制定详细可操作的方法或者手段。

综上所述, 智能变电站时间性能的分析研究和检测对于智能变电站的实施和投运后的安全运行将有很大帮助, 因此我们每一个从事电力事业的工作人员都需要清楚地认识时间性能的概念, 它全面覆盖整个智能变电站时间的准确度和智能变电站应用信息的传输时间定义。希望在电力行业所有工作人员共同努力下, 尽快成立针对时间性能检测的专业的机构, 并制定详细的可操作方法和手段。推动智能变电站健康稳定的发展, 为我们的国家和社会做出更大的贡献。

参考文献

[1] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48.  
HUANG Yi-zhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48.

[2] DL/T860.10:2006/IEC61850-10: 2005 变电站通信网络和系统, 第 10 部分: 一致性测试[S].  
DL/T860.10:2006/IEC61850-10: 2005. communication networks and systems in substations, part 10: conformance testing[S].

[3] 罗建, 朱伯通, 蔡明, 等. 基于 CIM XML 的 CIM 和 SCL 模型互操作研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 134-138.  
LUO Jian, ZHU Bo-tong, CAI Ming, et al. Interoperability of CIM and SCL model based on CIM XML[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 134-138.

[4] DL/T.1100.1-2009 电力系统的时间同步系统, 第 1 部分: 技术规范[S].  
DL/T.1100.1-2009 time synchronism systems of power system, part 1: technical specification[S].

[5] IEEE Std 1588-2008 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S].

[6] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.  
HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.

[7] 吴烨, 房鑫炎. 基于模糊 DEA 模型的电网黑启动方案评估优化算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 101-106.  
WU Ye, FANG Xin-yan. Data envelopment analysis based optimal fuzzy algorithm for assessing power gridblack-start plans[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 101-106.

[8] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.  
CAO Nan, LI Gang, WANG Dong-qing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.

[9] 张信权, 梁德胜, 赵希才. 时钟同步技术及其在变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(9): 69-72, 86.  
ZHANG Xin-quan, LIANG De-sheng, ZHAO Xi-cai. Time synchronization and its application in substation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(9): 69-72, 86.

[10] 周文瑜, 温刚, 王钊, 等. SCL 在变电站自动化系统的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(15): 42-44, 61.  
ZHOU Wen-yu, WEN Gang, WANG Yi, et al. Application of SCL in substation automation system[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(15): 42-44, 61.

[11] 刘辉, 李啸骢, 韦化. 大型汽轮发电机组目标全息反馈线性综合控制设计[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 25-31.  
LIU Hui, LI Xiao-cong, WEI Hua. Nonlinear coordinated control with objective holographic feedbacks for largeturbo-generator set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 25-31.

收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2014-03-18

作者简介:

高吉普(1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事智能化变电站和智能电网相关研究; E-mail: jipugao@sina.com

徐长宝(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事数字化变电站技术研究;

张道农(1961-), 男, 教授级高级工程师, 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管理工作。