

# 广域测量系统分段时延测量及分析

张 蕾<sup>1</sup>, 占震滨<sup>2</sup>, 魏路平<sup>2</sup>, 时伯年<sup>1</sup>, 谢晓冬<sup>1</sup>

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 100085; 2. 浙江电力调度控制中心, 浙江省杭州市 310007)

**摘要:** 广域测量系统(WAMS)的测量数据和管理数据均通过电力调度数据网传输,数据传输过程中在各个阶段引入的时延具有不确定性和随机性,对广域电力系统阻尼控制造成非常不利的影响。为此,提出一种对 WAMS 分段时延的测量方法,该方法可以有效地测量 WAMS 数据传输过程中各环节的时延,为保证 WAMS 数据的实时性和正确性提供了分析依据。在浙江省现场安装并搭建了该方法的应用平台,测量了实际现场中 WAMS 的分段时延并针对分段时延的特性与影响因素进行了分析。结果表明,所提出的 WAMS 分段时延测量方法能有效测量 WAMS 分段时延,通过对现场分段时延的测量和分析,为 WAMS 总体时延的改善提供明确的方向。

**关键词:** 广域测量系统; 相量测量单元; 分段时延; 时延测量; 在线测量; 协议解析

## 0 引言

近年来,基于相量测量单元(PMU)的广域测量系统(WAMS)在中国电力系统中已得到广泛应用,为电力系统的实时动态监测提供同步采样的测量数据。WAMS 数据的可靠性与及时性是影响广域电网实时闭环控制系统性能的主要因素之一<sup>[1-3]</sup>,WAMS 时延具有不确定性和随机性<sup>[3]</sup>,对广域电力系统阻尼控制造成非常不利的影响<sup>[4-8]</sup>,时延会在广域控制回路中引发高频振荡现象<sup>[6]</sup>,并且会导致主导振荡频率产生一个滞后的相位偏差,从而恶化控制器的阻尼效果。当时延较大时,如果控制器设计时忽略了时延的影响,控制效果将会急剧下降,甚至起反作用<sup>[7]</sup>。

因此,研究 WAMS 的时延特性有着重要的意义,然而由于现有的时延测量手段无法对 WAMS 时延进行针对性和完整性的测量,研究过程中缺乏更精确、更真实的时延数据。

WAMS 时延引入的环节包括 PMU 信息采集、处理、上传、分析与控制、下传、执行控制命令等过程。文献[2]建立了 WAMS 通信时延的计算模型,主要是对 PMU 信息同步处理和上传过程中引入的传输时延进行了研究,无法针对 WAMS 各环节的分段时延进行精确测量。文献[3]对 PMU 信息采集、处理、上传的时延进行评估分析,通过延迟测试

程序模拟 PMU 信息数据封装与上传的过程,测量对应的时延数据并分析,但延迟测试程序与实际运行的 WAMS 环境有一定的差别,测量数据只具备一定的参考价值。而文献[9]提出一种 WAMS 时延的数字仿真方法用来仿真 WAMS 时延特性以替代现场试验,但由于缺少 WAMS 分段时延测量方法和数据支持,无法针对 WAMS 各环节的时延进行分段仿真,只能针对整体的数据上行时延和控制下行时延进行仿真。

本文提出一种 WAMS 分段时延测量的方法,该方法可以在基本不影响现有数据传输的基础上精确的测量 WAMS 各个环节的时延,为 WAMS 时延模型的建立和时延特性的研究提供数据支持,同时本文对该方法应用与实际 WAMS 中测量的分段时延数据进行了分析与研究,通过各个环节的时延特性和时延影响因素的分析,为 WAMS 总体时延的改善提供明确的方向。

## 1 WAMS 的分段时延组成

WAMS 通过相量测量装置实现了对电力系统实时动态的监测,子站端 PMU 采集的同步向量以电力调度数据网为通信通道向调度中心主站端传输,一个主站可以同时接收多个子站的数据,一个子站也可以同时向多个主站传送数据。

通过电力调度数据网,子站与主站之间建立数据流管道与管理管道,其数据传输的框架及信息流如图 1 所示。数据流管道用于传输 PMU 测量的实时同步数据,数据传输方向为子站到主站单向传输,

主站通过数据流管道获取子站的测量数据;管理管道用于传输管理命令、记录数据、配置信息等管理数据,数据传输方向为双向传输,子站与主站通过管理管道交互需要的信息。



图1 WAMS的数据传输框架及信息流  
Fig.1 Data transfer framework and information flow of WAMS

WAMS的数据传输从最初的测量数据采集到最后通过管理管道传输管理数据并执行控制指令间的分段时延依次由  $T_{pmu}$ ,  $T_{up}$ ,  $T_{syn}$ ,  $T_{tsc}$ ,  $T_{dn}$ ,  $T_{cotl}$ ,  $T_{up}'$  组成,其中: $T_{pmu}$  为 PMU 子站内部测量数据采集、计算并发送测量数据的时延,是 PMU 测量固有时延; $T_{up}$  为 PMU 子站端到 WAMS 主站端的测量数据网络传输时延; $T_{syn}$  为测量数据送入实时数据库,经过对齐操作后可供控制软件读取的时延; $T_{tsc}$  为控制软件运算,处理并管理数据所需时延; $T_{dn}$  为下行管理数据网络传输时延; $T_{cotl}$  为 PMU 子站内部处理管理数据的时延; $T_{up}'$  为上行管理数据网络传输时延。

## 2 数据传输分段时延的测量

根据 WAMS 的分段时延组成,分析数据传输过程,根据时延可测和精度要求,得到分段时延的关键时间点,如图 2 所示,包括  $T_0 \sim T_6$ ,其中: $T_0$  为传输测量数据的 PMU 数据帧内部时标; $T_1$  为数据帧到达 PMU 子站端交换机的时刻; $T_2$  为数据帧到达 WAMS 主站端交换机的时刻; $T_3$  为 WAMS 主站端下行管理数据到达 WAMS 主站端交换机的时刻; $T_4$  为下行管理数据到达 PMU 子站端交换机的时刻; $T_5$  为上行管理数据到达 PMU 子站端交换机的时刻; $T_6$  为上行管理数据到达 WAMS 主站端交换机的时刻。由于目前暂未利用 WAMS 量测数据进行广域控制,因此控制命令的下行时延暂时无法测量,但通过对数据管理通道中传输的心跳信号的测量可基本反映管理数据下行和上行的时延特征。

### 2.1 WAMS 分段时延的测量方法

根据 PMU 通信规约,数据帧的内部时标包括 4 个字节的世纪秒(SOC)、4 个字节的秒等分数(FRACSEC),心跳信号的内部时标只包括 4 个字节的 SOC,以内部时标为标识,测量同一数据帧或心跳信号分别到达 PMU 子站端交换机和到达

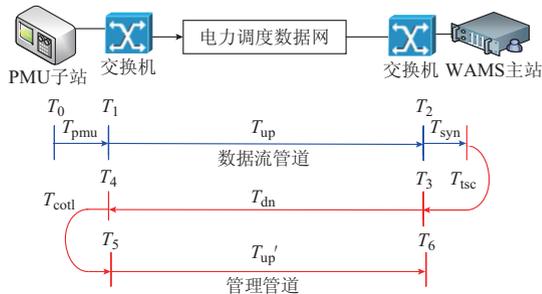


图2 WAMS的分段时延与关键时间点  
Fig.2 Piecewise delay and key points in WAMS

WAMS 主站端交换机的时刻,从而实现分段时延的测量。

在 PMU 子站端和 WAMS 主站端搭建网络记录仪,通过既有或新增交换机的端口镜像,网络记录仪采集经过交换机的 PMU 原始通信数据,并基于 GPS 时间标记原始通信数据到达的时刻。

该方法是在真实业务环境下采集 PMU 原始通信数据,测量获得的时延能反映实际环境下的 PMU 数据时延情况,属于在线测量,实际数据采集方法如图 3 所示。

目前 WAMS 数据传输采用传输控制协议(TCP),基于广域控制的发展趋势,用户数据报协议(UDP)在网络传输时较 TCP 协议更便捷,可以更好地保证信息传递的及时性,新增模拟前置软件支持与 PMU 基于 UDP 协议进行数据传输,用于测量基于 UDP 协议的分段时延。

同时为了保证分段时延的测量,模拟前置系统在不影响原有数据通信的前提下,与 PMU 子站进行数据通信,调整心跳信号的发送时机为接收到秒等分数为 0 的数据帧时,则  $T_2$  为秒等分数为 0 的数据帧到达 WAMS 主站端的时刻, $T_3$  为与数据帧世纪秒数相同的下行心跳包到达 WAMS 主站端的时刻。

数据帧内部时标  $T_0$  的时间精度主要基于 GPS 时钟精度及秒等分数,通常可以达到百微秒级;数据帧或心跳信号到达交换机的时刻  $T_1 \sim T_6$ 。由网络记录仪标记接收到对应原始通信数据的时刻,时间精度主要基于 GPS 时钟精度,可以达到微秒级。通过  $T_0 \sim T_6$  计算得到的分段时延精度,除 PMU 测量固有时延为百微秒级,其他分段时延均可达到微秒级。

这里采用的网络记录仪与时延分析系统是基于 CSRA-2000/CR 网络报文记录分析装置研制的 PMU 网络记录仪与 PMU 时延分析仪,总体逻辑结构主要包括:PMU 网络通信的监视、记录、存储,PMU 时延分析等模块,如图 4 所示。

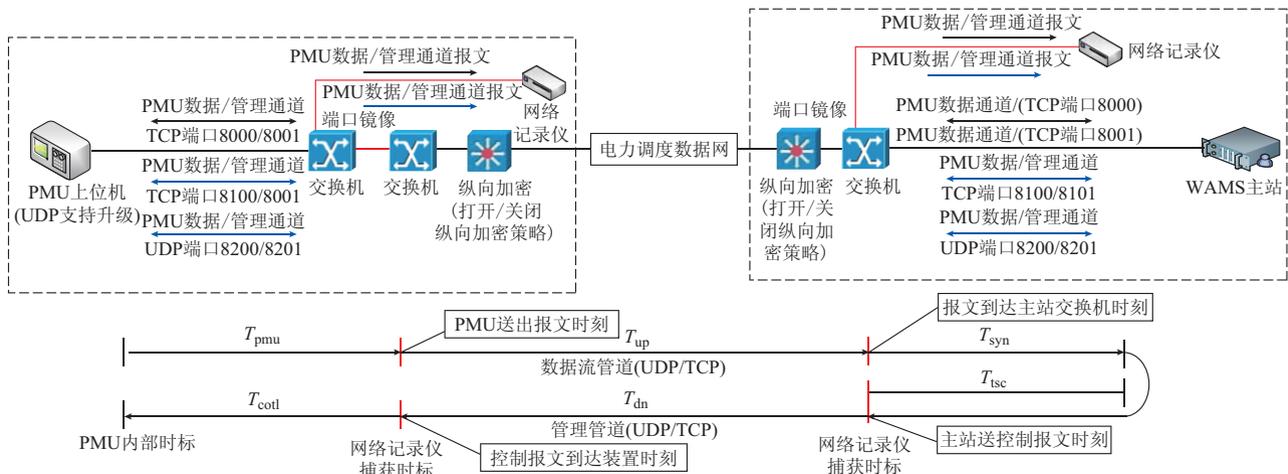


图3 WAMS分段时延数据采集示意图  
Fig.3 Schematic diagram of acquisition for WAMS piecewise delay

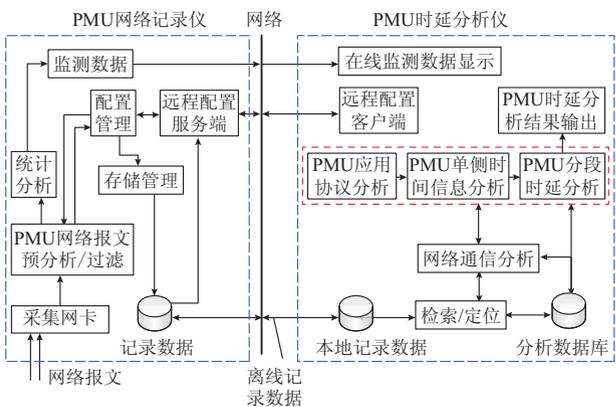


图4 PMU网络记录仪与PMU时延分析仪总体逻辑结构  
Fig.4 Logical structure of PMU network recorder and delay analysis

PMU网络记录仪接入网络数据并经过打时标、汇聚后,进入PMU网络报文的预分析,如通过IP和端口号过滤需要的PMU数据等,然后分别进入统计分析和存储管理两个独立的模块;统计分析得到的监测数据实时上送给分析仪,便于监视;存储管理模块负责对原始通信报文等需要存储的数据按照配置策略进行存储管理,如存储周期管理等。

PMU时延分析仪主要实现WAMS分段时延的离线分析功能,由于PMU网络记录仪采集的是网络通信的原始报文,因此需要对通信协议进行解析,包括IP分片重组、TCP重组、PMU应用协议分析,同时包括PMU单侧时间信息分析和PMU分段时延分析,分析过程中重要的数据存入分析数据库,便于快速检索以及时延分析计算、分析结果输出等;同时配合PMU网络记录仪,PMU时延分析仪提供远程配置和实时监测等功能。

## 2.2 WAMS分段时延的分析流程

WAMS分段时延分析流程如图5所示,首先分别分析PMU子站端和WAMS主站端的原始通信数据。从PMU原始通信数据中提取内部时标,其中数据帧的内部时标为 $T_0$ ,分析WAMS主站端网络记录仪采集到对应原始通信数据得到 $T_2, T_3, T_6$ ,分析PMU子站端网络记录仪采集到对应原始通信数据得到 $T_1, T_4, T_5$ 的时刻,并将分析得到的时间信息存入PMU时间信息数据库中。最后,通过 $T_0$ 同步PMU子站端和WAMS主站端的时间信息,得到匹配的 $T_0 \sim T_6$ ,计算得到WAMS分段时延。

## 3 分段时延测量结果分析

选取了浙江省电力调度中心与3个电厂,分别进行了WAMS分段时延测量,平均每个电厂对应的数据采集时间超过24h,其中长兴电厂与新泓口电厂的PMU型号相同。

PMU内部时延即为图2所示的 $T_{pmu}$ ,PMU子站内部测量数据采集、计算并发送测量数据的时延。

PMU内部处理时延占数据流管道整体时延的85%~86%,其时延影响因素如下。

### 1) 相量算法时延

按照PMU技术标准要求,由PMU采样数据窗长度和相量的时标对应于采样数据窗的时刻决定相量算法时延。PMU一般使用一个完整周波的原始采样值计算相量数据,窗口长度为20ms。时标为采样窗口起始位置时刻时,相量算法有固定的20ms时延,时标为采样窗口中点位置时刻时,相量算法有固定的10ms时延。

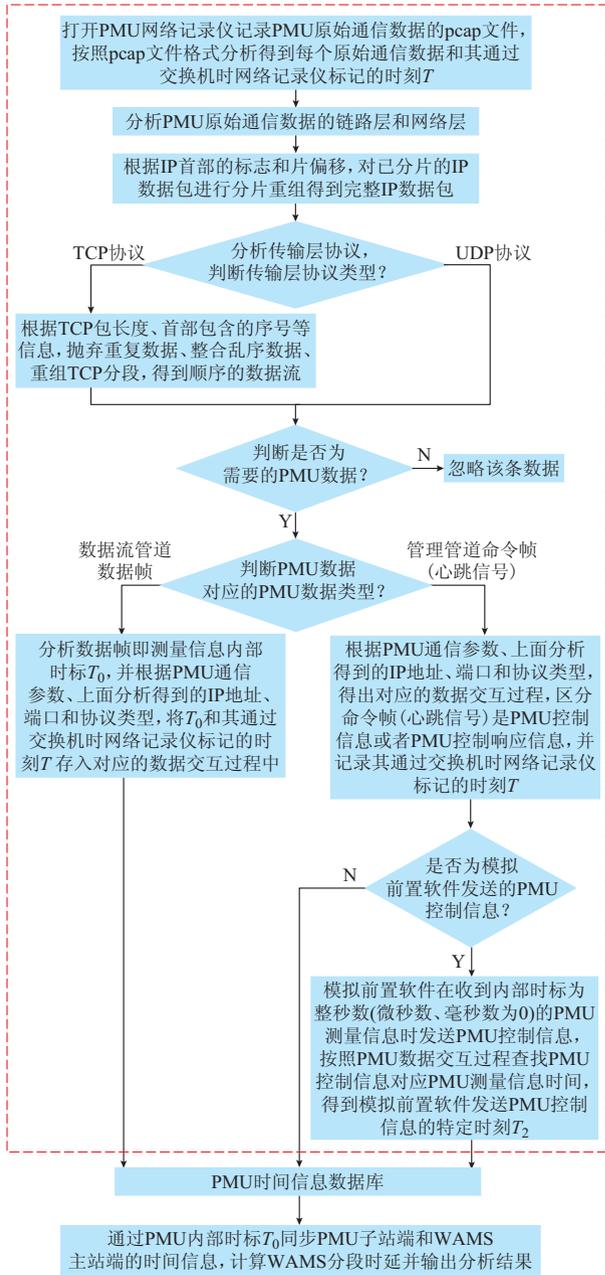


图5 WAMS分段时延分析流程

Fig.5 Analysis process of WAMS piecewise delay

2) PMU 的分布式采集架构

由位于多个间隔小室的数据采集单元和位于主控室的数据集中单元组成, 分散采集与集中处理模式, 数据集中单元需要对接收到的来自不同采集单元的数据包进行时标对齐和通信组包的处理, 引入一定的时延。如图6所示, 数据集中单元最终组包完成的数据帧越长, PMU 内部处理时延  $T_{pmu}$  越大。

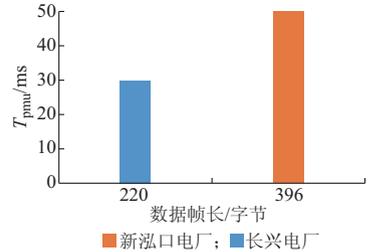


图6 数据帧长度与内部处理时延  
Fig.6 Length of data frame and delay of internal processing

网络通信时延包括  $T_{up}$ ,  $T_{dn}$ ,  $T_{up}'$  这3种。

网络传输时延主要是网络中的链路和节点之间进行的数据传输的分组时延。WAMS 链路时延定义为一个数据分组从子站交换机发送经过通信链路到达主站交换机所需的时间; 数据途径的路由器称为一个节点; 相邻节点及其之间的链路定义为一个中继段。在每一个中继段内, 分组时延包括传输时延、传播时延和交换时延。

传输时延是指在输出速率一定的情况下, 同步一个分组所需的时间。传输时延的大小主要跟数据分组的大小和链路的带宽, 具体跟数据分组大小成正比, 跟链路带宽成反比。根据表1可以看出同一PMU 通信环境中传输测量数据的网络时延  $T_{up}$  大于传输管理数据心跳包的  $T_{dn}$  和  $T_{up}'$ 。一帧完整的测量数据与心跳包的数据段大小的比较如图7所示, 可以看出, 测量数据大于心跳包的数据段, 证实了传输时延与数据分组大小成正比。

表1 WAMS分段时延的量测结果

Table 1 Measurement results of WAMS piecewise delay

PMU 信息通信环境		PMU 闭环时延/ms					
PMU 子站	通信环境	$T_{pmu}$	$T_{up}$	$T_{syn} + T_{isc}$	$T_{dn}$	$T_{cotl}$	$T_{up}'$
长兴电厂	PMU 与 WAMS 通信	29.902	5.143		2.970	0.304	3.680
	PMU 与模拟前置 TCP 通信	29.656	4.949	0.086	3.276	0.427	3.699
	PMU 与模拟前置 UDP 通信	29.468	4.511	0.141	2.943	0.458	3.583
新泓口电厂	PMU 与 WAMS 通信	50.390	7.984		6.793	0.322	6.471
	PMU 与 WAMS 通信	44.322	7.245		5.488	1.217	5.413
六横电厂	PMU 与模拟前置 TCP 通信	44.431	7.245	0.205	5.684	0.907	5.350
	PMU 与模拟前置 UDP 通信	44.607	7.807	0.113	5.224	1.691	5.823

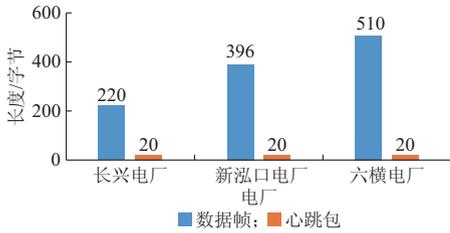


图7 一帧完整 PMU 信息的长度

Fig.7 Length for a frame of complete PMU information

测量数据网络传输时延的分布性如表 2 所示,时延总体较小,但基于 TCP 协议的通信过程中网络通信时延会出现异常突增的情况,而基于 UDP 协议的通信过程中网络通信时延相对比较稳定。

表 2 测量数据网络传输时延的分布性  
Table 2 Communication delay performance of measurement data

传输协议	均值/ms	方差/ $\text{ms}^2$	最大值/ms	最小值/ms
TCP	4.949	1.579	638.536	4.488
UDP	4.511	0.007	26.049	4.351

这主要是因为 TCP 流量控制机制要求 TCP 报文必须按顺序缓冲发送,当通道出现偶发故障,出现 TCP 报文乱序或丢帧而要求 TCP 报文重传时,会引起 TCP 重组、TCP 发送缓冲区满等异常情况,导致报文时延增大;而 UDP 传输不考虑顺序交付的问题,尽可能地保证交付的及时性,不会出现因乱序或丢帧导致的时延异常突增,其缺点是数据可能出现乱序或少量丢失,需由数据接收端进行处理。

另外,对比六横电厂采用 TCP 协议通信的 2 组测量结果,如图 8 所示,PMU 与 WAMS 通信每 40 ms 发送一次数据帧,PMU 与模拟前置 TCP 通信每 10 ms 发送一次数据帧,这两组通信对应的时延差异较小。可以看出,PMU 数据上送周期与 PMU 内部处理时延和网络时延没有明显的关联性。

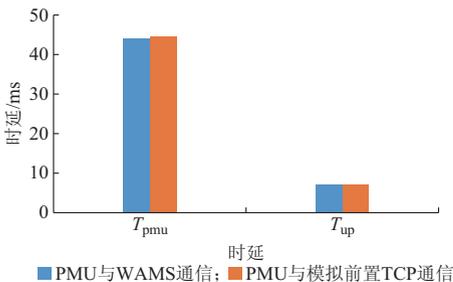


图8 数据帧发送时延

Fig.8 Send delay data frame

除了 PMU 内部处理时延和网络通信时延,表 1 中还包括: $T_{syn} + T_{isc}$ ,模拟前置处理时延,该时延仅

包括最基本的数据判断和心跳包的发送过程的处理时延,影响该处理时延的因素主要包括 WAMS 主站交换机将数据传输到模拟前置软件的时间、模拟前置软件的接收数据处理时间和发送心跳包的处理时间,可以看出模拟前置处理时延非常小; $T_{cotl}$ ,最基础的 PMU 管理数据处理时延,即 PMU 接收到下行心跳包后发送上行心跳包的处理时延,影响该处理时延的因素主要包括 PMU 子站交换机将数据传输到 PMU 的时间、PMU 接收心跳包处理时间和发送心跳包的处理时间,可以看出 PMU 管理数据处理时延也非常小。这里测量的模拟前置处理时延和 PMU 管理数据处理时延是利用特定的测量数据发送心跳信号以模拟广域控制的过程,用来推断 WAMS 利用测量数据进行广域控制的最小时延和 PMU 处理控制命令的最小时延。实际 WAMS 控制处理,需要经过更为复杂的数据运算和控制处理等过程,需要针对性的测量。

通过以上 WAMS 分段时延特性分析,为后续进一步的聚类分析、时延分布模型、时延补偿算法提供了数据基础。

## 4 结语

本文提供了完善的广域电网 WAMS 分段时延精确测量方法,与以往测量时延的方法相比较,这种方法针对 WAMS 的特点,将传统的网络时延的测量方法与 WAMS 专有的通信协议的解析处理相结合,并且能够在保持既有运行环境基本不受影响的同时,对 WAMS 各环节的时延进行高精度的在线测量,解决了无法精准全面地测量 WAMS 时延、无法测量 WAMS 分段时延的问题,为 WAMS 时延模型的建立和时延特性的研究提供数据支持。

同时,本文结合现场实际测量的时延数据,分析并总结了 WAMS 的时延特性和时延影响因素,为 WAMS 总体时延的改善提供明确的方向,对 PMU 时延补偿和广域电力系统阻尼控制有重大意义,有利于广域电网实时闭环控制系统的性能改进。

通过对实际 WAMS 分段时延的测量与分析,可以看出 WAMS 分段时延主要分布在 PMU 内部时延,平均在 30~50 ms 左右,主要影响因素是相量算法时延与分布式采集架构;其次是网络传输时延,平均在 10 ms 以下。但基于 TCP 协议的传输过程中可能出现 TCP 乱序或丢帧的情况,导致时延突增,而 UDP 协议相对稳定,广域控制系统中为保证控制信息的及时性,可以采用 UDP 协议进行通信;而其他时延相对较小,对 WAMS 时延造成的影响较小。

因此,整体 WAMS 时延有必要从 PMU 内部时

延着手改善,而为了避免通信过程中出现的时延突增,可考虑采用 UDP 网络协议对及时性要求较高的信息进行传输。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜,徐伟,DONG Zhaoyang,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-5.  
XUE Yusheng, XU Wei, DONG Zhaoyang, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-5.
- [2] 刘文霞,罗红,陈锦山.考虑网络保护的广域测量系统通信时延分析[J].电力系统自动化,2011,35(21):68-73.  
LIU Wenxia, LUO Hong, CHEN Jinshan. Communication delay analysis of WAMS considering network protection mechanisms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 68-73.
- [3] 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等.广域测量系统的延迟分析及其测试[J].电力系统自动化,2004,28(15):39-43.  
HU Zhixiang, XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, et al. Analysis and test on delays in the wide area measuring system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 39-43.
- [4] MICHELS W, NICULESCU S. Stability and stabilization of time-delay systems[M]. Philadelphia: SIAM, 2007.
- [5] SNYDER A F. A robust damping controller for power system using linear matrix inequalities[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA: 5p.
- [6] 刘志雄,孙元章,黎雄,等.广域电力系统稳定器阻尼控制系统综述及工程应用展望[J].电力系统自动化,2014,38(9):152-159. DOI:10.7500/AEPS20130720001.  
LIU Zhixiong, SUN Yuanzhang, LI Xiong, et al. Review of

- wide area PSS control system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 152-159. DOI: 10.7500/AEPS20130720001.
- [7] 李鹏,贺静波,石景海,等.交直流并联大电网广域阻尼控制技术理论与实践[J].南方电网技术,2008,2(4):13-36.  
LI Peng, HE Jingbo, SHI Jinghai, et al. The theory and practice of wide-area damping control for bulk HVAC/HVDC hybrid power systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 13-36.
- [8] 杨博,魏路平,占震滨,等.基于概率分布的广域测量系统时延特性分析[J].电力系统自动化,2015,39(12):38-43. DOI:10.7500/AEPS20140831006.  
YANG Bo, WEI Luping, ZHAN Zhenbin, et al. Analysis on characteristics of communication delay in wide area measurement system based on probability distribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 38-43. DOI: 10.7500/AEPS20140831006.
- [9] 张放,程林,黎雄,等.广域测量系统时延的数字仿真方法及实时数字仿真器实现[J].电力系统自动化,2013,37(17):99-105.  
ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Simulation of WAMS communication time delay and RTDS realization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 99-105.

张 蕾(1986—),女,通信作者,双学士,主要研究方向:网络报文记录分析与数字式动态记录的研究与工程应用。  
E-mail: zhanglei\_yf@sf-auto.com

占震滨(1978—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力调度自动化。

魏路平(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力调度自动化。

(编辑 郑颖)

## Test and Analysis of Piecewise Delay in Wide Area Measurement System

ZHANG Lei<sup>1</sup>, ZHAN Zhenbin<sup>2</sup>, WEI Luping<sup>2</sup>, SHI Bonian<sup>1</sup>, XIE Xiaodong<sup>1</sup>

(1. Beijing Sifang Automation Co. Ltd., Beijing 100085, China;

2. Zhejiang Electric Power Dispatching and Control Center, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** In wide area measurement system, the to-be-measured and to-be-managed data are both transmitted through the electric power dispatching data network. The delay produced at each stage in the process of data transmission is uncertain and random, which brings about a very unfavorable impact on damping control of the wide area power system. Therefore, a measuring method of piecewise delay in the wide area measurement system is proposed, which is capable of efficiently measuring the delay of each link in the data transmission process of the wide area measurement system, providing a basis of analysis in ensuring real-time and accurate data in the wide area measurement system. In Zhejiang Province, a field application platform is set up for three substations to measure the piecewise delay and analyze the characteristics and influencing factors of piecewise delay. The results show that the measurement method of piecewise delay in the wide area measurement system is expected to provide improvement in WAMS overall time delay with definite orientation.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5211011400B8).

**Key words:** wide area measurement system; phasor measurement unit (PMU); piecewise delay; delay measurement; online measurement; protocol analysis