

智能变电站网络采样同步新技术

张言苍

(国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210032)

摘要: 对智能变电站数字采样技术发展过程中的各种技术路线和方案进行了探讨,阐述了数字采样同步的原理及运用方法,并分析了现有各种网络采样方法存在的问题。提出了基于锁相环原理的采样值到达时刻预测技术,当原有组网采样模式丢失同步时钟后导致采样无法同步时,可以继续保持采样同步;还可以过滤交换机延时出现异常的突变,避免造成闭锁继电保护等不利影响。所提技术提高了网络传输采样值的可靠性,为网络采样在智能变电站推广应用提供了理论依据和解决方案。

关键词: 智能变电站; 网络采样; 同步; 插值; 预测; 通信; 锁相环

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.022

0 引言

目前,国内的智能变电站已经进入大规模建设阶段。全站信息数字化是智能变电站的特征,采样数字化是变电站全站信息数字化的基础,而采样数据的同步是数字采样技术应用的关键环节。跨间隔继电保护的各间隔中,可能同时存在数字采样和传统采样,输电线路本端保护和对端保护可能分别采用数字采样和传统采样,新的应用对采样数据同步提出了新的要求。采样同步是继电保护正确反应故障的基础,是保障系统安全可靠运行的变电站二次设备关键技术。然而,因为硬件回路设计问题、采样同步的原理和算法问题、软件的设计缺陷问题等,合并单元(MU)数据同步在变电站运行过程中多次出现问题,已引起多起继电保护装置的误动。因此现阶段很有必要进一步研究精度更高、更可靠的变电站采样同步技术^[1-2]。

根据智能变电站不同的采样数据传输方式,采样同步的方法也不尽相同。目前智能变电站主要采用网络传输和点对点传输 2 种方式,其中点对点传输方式应用较为广泛,技术较为成熟。网络传输方式目前处于新一轮研究和试点应用阶段。本文将着重介绍网络采样场合下的采样同步方法,分析目前常用采样同步方法各自存在的问题,并提出一种新型网络采样同步技术。

1 变电站采样及同步方法

1.1 变电站采样方法

传统变电站交流信号由电力系统互感器二次线圈通过电缆输送到继电保护控制室,继电保护装置内的小互感器进行再次传变,经过滤波和 A/D 芯片采集,形成数字量,保护再对数字采样值进行算法和

逻辑的处理。每块 A/D 芯片的转换启动命令由微控制器同时驱动,多路 A/D 芯片几乎在同一时间执行转换,继电保护装置采集到的电流、电压等信号形成的数字量天然同步。

智能变电站中保护装置的 A/D 采样环节前移到模拟输入式合并单元或者电子式互感器上,开关场到保护室采用数字报文传输采样信号。数字采样需要进行同步,同步方式与数据的传输方式密切相关。网络传输方式的数据同步方式主要采用计数器同步,点对点传输方式的数据同步方式主要采用插值同步^[3-4]。

文中均以模拟式互感器输入的合并单元为数据源为例展开讨论,电子式互感器输入合并单元的同步方法与之相同,不再赘述。

1.2 目前变电站网络采样同步方法

1.2.1 采样同步基本原理

点对点采样方式主要采用插值同步方案。继电保护装置接收每台合并单元发送的离散采样点,记录其采样点到达的时间,根据每台合并单元延时分别进行补偿。补偿后的采样点一般不是在同一时间点由合并单元产生的,此时需要继电保护装置进行插值方式的重采样,将多台合并单元的采样点同步到同一时刻^[5-6]。

网络采样方式主要采用计数器同步,或称外同步方式。由多台合并单元完成同步,继电保护设备仅需要依据相同序号归并多台合并单元数据。

1.2.2 不测量精确延时的网络采样同步方法

单端电气量保护仅需要合并单元数据同步,可以不测量精确延时。其中采用网络方式接收合并单元采样时,多台合并单元接入同步信号,所有合并单元的采样时刻全部与同步时钟秒脉冲时刻对齐。经过交换机传输,保护控制装置接收到各台合并单元报文,但是不记录报文到达的时刻,而是根据报文的

采样序号,将多台合并单元序号相同的报文同步在一起。

1.2.3 测量精确延时的网络采样同步方法

多端电气量保护不仅将多台合并单元的采样同步到同一时刻,还需要精确测量数据的延时。多端电气量保护典型的装置如输电线路光纤差动保护。其中采用组网方式接收合并单元采样,与上述不测量延时的方法类似。不同点在于继电保护装置必须接入相同的同步源,获得所有合并单元的采样时刻,从而计算精确的采样延时^[7-9]。

1.3 目前网络采样同步方法存在的问题

目前变电站采样方法存在可靠传输和信息共享之间的矛盾。网络传输采样值有利于信息共享,减少设备端口和光纤数量,但过度依赖交换机和同步时钟源,可靠性得不到保障。

引起以上矛盾的主要原因是报文在交换机中延时不确定。针对此问题,交换机厂家已逐渐展开智能变电站专用交换机的研究,主要采用了交换延时可测和固定延时交换 2 种新技术方案。

使用以上 2 种专用交换机的网络采样,等同于点对点传输方式,并能摆脱点对点光纤直连的束缚。但是上述 2 种交换机还处于研究和试验阶段,同时也存在一定的问题,如用于计算交换机存储转发延时的软硬件模块存在不稳定的问题,一旦延时测不准,则会引起总体延时错误,影响继电保护正确动作。为了提高网络采样的可靠性,目前急需研究一种可以保证经过交换机传输的采样延时总体趋于稳定的新技术,避免交换延时频繁大幅度抖动导致采样数据错误。

2 变电站网络采样同步新技术

2.1 网络采样到达时刻预测及同步技术

合并单元均具有守时功能,但是保护控制装置一般不具备守时功能,网络采样时如果同步丢失将导致无法精确测量和补偿整体延时,从而导致保护功能闭锁。本文提出一种新的算法,其通过优化继电保护装置同步算法来提高采样同步的容错处理能力。

继电保护装置引入基于锁相环(PLL)的报文到达时刻预测算法,同步时钟异常时,网络传输采样值可以使用类似于点对点采样的插值同步方法。下文简称该方法为 PLL 算法。正常运行时采样的同步和整体延时测量依赖于计数器同步方式,继电保护设备同时记录每台合并单元的每个报文到达时刻,利用报文预测到达继电保护设备的时刻与报文从合并单元发出的时刻相比较,得到交换机传输延时,并计算交换机平均传输延时。这里采用预测到达时刻而

不是实际到达时刻,原因在于预测到达时刻相对于实际经过交换机的到达时刻更稳定,波动更小。同时系统还要计算下一帧报文的预测到达时刻并不断修正预测时刻。最后利用交换机平均延时与合并单元延时之和作为插值同步的依据。该方法的总体流程如图 1 所示。

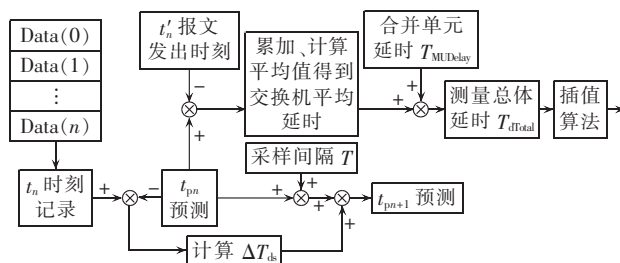


图 1 报文预测同步系统结构图

Fig.1 Structure of message prediction and synchronization system

图 1 中描述的同步系统主要分为 3 个计算环节,其中涉及到合并单元的采样率,都以目前最为常见的采样率 4000 Hz 为例进行计算。

a. 预测下一帧报文到达时刻环节。

该环节在系统运行期间持续计算,其算法见式(1)、(2)。

$$t_{pn+1} = t_{pn} + T + \Delta T_{ds} \quad (1)$$

$$\Delta T_{ds} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [k(t_n - t_{pn})]}{nq} \quad (2)$$

其中, n 为不断递增的采样点数; t_{pn+1} 为保护装置预测下一帧报文的到达时刻; t_n 为保护装置记录当前报文的到达时刻; $T=250 \mu s$; ΔT_{ds} 为平均预测修正量; k 取常数 1; t_{pn} 为预测当前帧到达时刻; q 为修正比例系数,用于控制预测修正的幅度。

b. 交换机平均延时计算环节。

该环节在系统接入的同步信号正常时持续计算,同步信号丢失后停止计算。交换机平均延时计算方法如式(3)、(4)所示。

$$T_d = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (t_{pn} - t'_n)}{n} \quad (3)$$

$$t'_n = T_{pps} + T_{MUDelay} \quad (4)$$

其中, T_d 为交换机平均延时; t_{pn} 为预测当前帧到达时刻; t'_n 为报文从合并单元发出的时刻; T_{pps} 为同步时钟的 1 s 等分 4000 份后每个点的绝对时刻; $T_{MUDelay}$ 为合并单元延时。

c. 测量总体延时并插值计算环节。

该环节在系统丢失同步信号后启动。总体延时计算公式见式(5)。

$$T_{dTotal} = T_d + T_{MUDelay} \quad (5)$$

其中, T_{dTotal} 为采样数据总体延时,等于交换机平均延

时和合并单元延时之和。依据该总体延时时对合并单元采样值进行插值处理。

上述方法与数字电路中的硬件锁相回路原理类似。方法所得到的报文到达时刻预测和修正效果见图 2。可见, t_{pn+1} 的预测报文到达时刻根据 t_{pn} 报文的预测到达和实际到达时刻进行了修正。

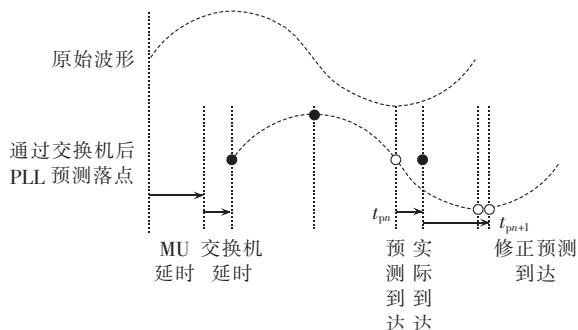


图 2 基于锁相环报文落点预测和修正

Fig.2 Message arrival time prediction and correction based on PLL

2.2 影响方法同步精度的因素分析

a. 频率偏差。

由式(1)可知,影响合并单元报文预测和修正到达时刻的因素是 T 和 ΔT_{ds} 。

其中 T 理论值为 $250 \mu s$,但在失去同步信号情况下,晶振的误差会导致频率偏差,最终影响 T 的数值大小。在同步信号接入时,保护装置可以测得本装置与标准时钟的频率偏差,从而在失去同步信号后对预测下一帧报文到达时刻进行进一步修正。最终经过式(1)修正形成式(6)。其中 T' 是未接入对时情况下,保护装置频率偏差对于每次采样节拍的影响数值。

$$t_{pn+1} = t_{pn} + T + T' + \Delta T_{ds} \quad (6)$$

目前国内各厂家合并单元均具备良好的频率偏差特性以满足守时需求,可以达到 2.5×10^{-5} 以内,即每百万单位偏差 25 个单位。

当合并单元与保护装置丢失同步信号,每一个采样节拍因频率偏差特性可能导致的最大误差如式(7)所示。

$$\Delta t = 2\Delta \frac{1}{F} \quad (7)$$

其中, Δt 为每个采样节拍最大误差; Δ 为每秒晶振最大频率偏差; F 为常数 4000。根据式(7),以晶振典型频率偏差取 1×10^{-5} 为例计算, Δt 为 $0.005 \mu s$ 。

b. 交换机延时不确定导致误差。

ΔT_{ds} 为另一项影响预测和修正效果的主要因素。从式(2)可以看出, ΔT_{ds} 的数值稳定程度取决于交换机传输延时的稳定程度。

若采用传统的同步方法,在网络传输采样值时遇

到同步时钟丢失,若直接采用网络传输的采样值进行点对点插值同步计算,交换机延时抖动会对采样值造成误差,以交换机延时 $20 \mu s$ 为例,其导致的有效值比差为 $\pm 0.024\%$,相位误差为 $\pm 21.6'$,若交换机延时出现异常突变,可能的浮动范围达到 $(500 \pm 200) \mu s$,这会导致报文错序,数据无效闭锁保护^[10-12]。若采用 PLL 算法,对每一个序号报文都进行到达时刻预测和修正,则在装置的数据缓冲范围内,异常突变的交换机延时不会影响报文到达时刻预测和修正结果。

3 试验验证

3.1 新技术在交换机正常延时下的同步误差实际测量

a. PSW-618F 交换机延时数据。

采用 PSW-618F 工业以太网交换机作为交换设备,同时接入 4 台合并单元,运行 1 h,通过在保护装置上运行的延时测量功能测得以下数据,如图 3 所示。

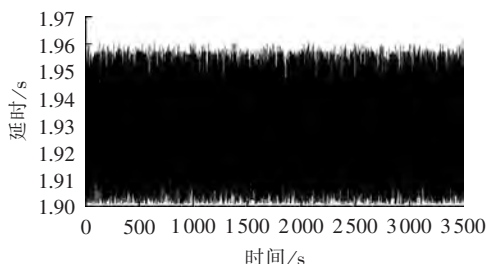


图 3 PSW-618F 交换机延时实测数据

Fig.3 Measured data of switch delay of PSW-618F

保护装置获取到的 PSW-618F 交换机延时统计最大值、最小值和平均值分别为 1.99 、 1.91 、 $1.93 \mu s$ 。

b. RSG2100 交换机延时数据。

采用 RSG2100 工业以太网交换机作为交换设备,同时接入 4 台合并单元,运行 1 h,在保护装置上测得延时数据如图 4 所示。

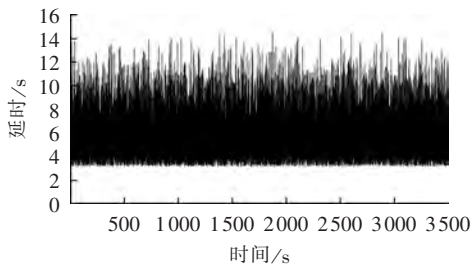


图 4 RSG2100 交换机延时实测数据

Fig.4 Measured data of switch delay of RSG2100

保护装置获取到的 RSG2100 交换机延时统计最大值、最小值和平均值分别为 14.91 、 3.45 、 $5.85 \mu s$ 。

c. PSW-618F 交换机上的幅值误差和相位误差。

采用 PLL 算法后,PSW-618F 交换机实测的幅值误差曲线如图 5 所示,相位误差曲线如图 6 所示。

表 1 所示为采用 PLL 算法和采用现有方法直接点对点插值分别产生的实际幅值和相位误差比较。

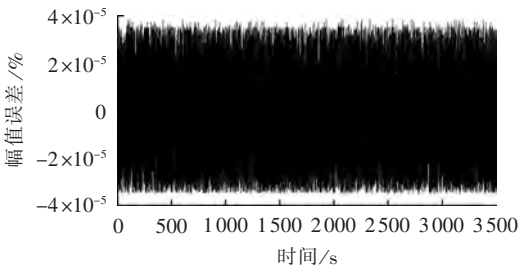


图 5 PLL 算法在 PSW-618F 上实际幅值误差
Fig.5 Amplitude error of PSW-618F measured by PLL algorithm

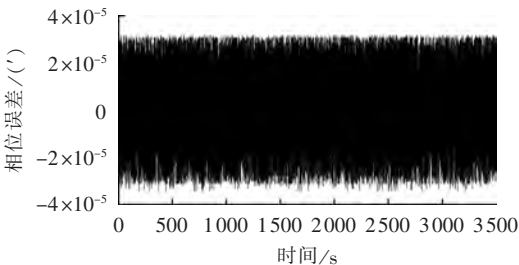


图 6 PLL 算法在 PSW-618F 上实际相位误差
Fig.6 Phase error of PSW-618F measured by PLL algorithm

表 1 PSW-618F 实际误差比较

Table 1 Comparison of PSW-618F errors

方法	最大幅值误差/%	最大相位误差/(°)
PLL 算法	3.82×10^{-5}	3.4389×10^{-5}
现有方法	7.31×10^{-5}	6.4872×10^{-5}

d. RSG2100 交换机上的幅值误差和相位误差。

采用 PLL 算法后,RSG2100 交换机实测的幅值误差曲线如图 7 所示,相位误差曲线如图 8 所示。采用 PLL 算法和采用现有方法直接点对点插值分别产生的实际幅值和相位误差比较结果见表 2。

由图 7、8 和表 2 可以看出,采用 PLL 算法实际产生的幅值误差和相位误差相对于现有方法的数据有明显的改进。

因测试的交换机正常工作时延时较小,分别在 $2\mu\text{s}$ 和 $10\mu\text{s}$ 附近,测试时的幅值误差计算采用有效值幅值误差,因而计算得到的幅值误差普遍较小。在

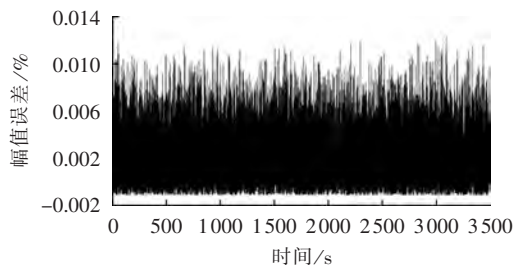


图 7 PLL 算法在 RSG2100 上实际幅值误差
Fig.7 Amplitude error of RSG2100 measured by PLL algorithm

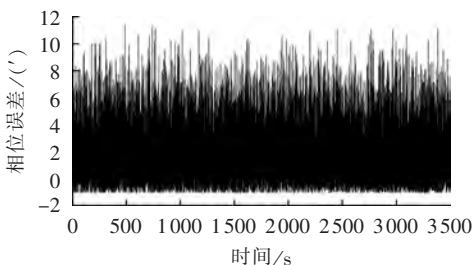


图 8 算法在 RSG2100 上实际相位误差
Fig.8 Phase error of RSG2100 measured by PLL algorithm

表 2 RSG2100 实际误差比较

Table 2 Comparison of RSG2100 errors

方法	最大幅值误差/%	最大相位误差/(°)
PLL 算法	0.01240	11.3665
现有方法	0.01984	15.1229

交换机延时出现异常情况下,采用现有方法产生的误差会急剧增加,而采用 PLL 算法产生的误差维持在正常水平,下文给出交换机异常延时情况下的误差对比。

3.2 新技术对交换机异常延时的处理能力

在正常交换延时数据中增加异常延时数据测试。以 PSW-618F 交换机为例进行试验,给报文施加异常的延时,使其从交换机转发出的时间延迟,并分别进行 3 组试验。试验均采用单帧突发异常报文。多帧突发异常延时和多帧缓慢变化异常延时情况均可以由单帧突发异常得到。

a. 因交换机异常导致单采样点异常延时达到 $100\mu\text{s}$;异常延时数据如图 9 所示。2 种算法下的误差见表 3。

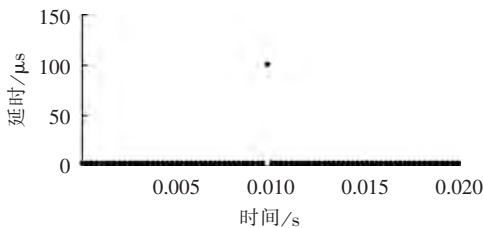


图 9 交换机单点异常延时 $100\mu\text{s}$
Fig.9 Abnormal switch single-point with $100\mu\text{s}$ delay

表 3 $100\mu\text{s}$ 延时 PSW-618F 实际误差比较

Table 3 Comparison of PSW-618F errors for $100\mu\text{s}$ delay

方法	最大幅值误差/%	最大相位误差/(°)
PLL 算法	0.0157	10.9171
现有方法	0.0735	106.0000

b. 因交换机异常导致单点异常延时达 $200\mu\text{s}$;异常延时数据如图 10 所示。2 种算法下的误差见表 4。

c. 因交换机异常导致单采样点异常延时达到 $500\mu\text{s}$ 。异常延时数据如图 11 所示。2 种算法下的误差见表 5。

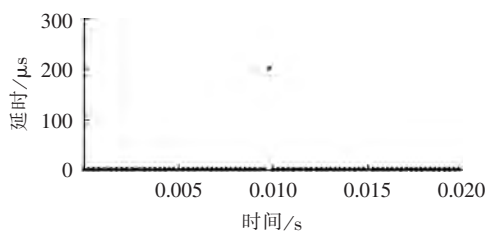


图 10 交换机单点异常延时 200 μs
Fig.10 Abnormal switch single-point with 200 μs delay

表 4 200 μs 延时 PSW-618F 实际误差比较
Table 4 Comparison of PSW-618F errors
for 200 μs delay

方法	最大幅值误差/%	最大相位误差/(°)
PLL 算法	0.0156	10.925 2
现有方法	0.0507	214.0000

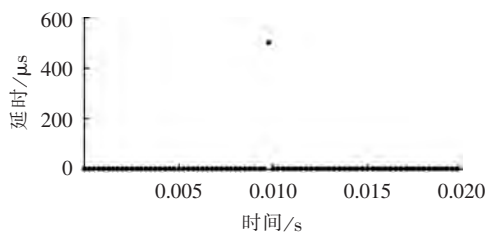


图 11 交换机单点异常延时 500 μs
Fig.11 Abnormal switch single-point with 500 μs delay

表 5 500 μs 延时 PSW-618F 实际误差比较
Table 5 Comparison of PSW-618F errors
for 500 μs delay

方法	最大幅值误差	最大相位误差
PLL 算法	0.015 5 %	10.944 0°
现有方法	错序导致数据无效	错序导致数据无效

由上述数据可知,在单帧 100 μs 和 200 μs 延时异常时,采用 PLL 算法的同步技术产生的误差均远小于采用现有方法的同步误差。当异常延时大于 250 μs 产生报文错序时,采用现有方法会导致数据无效,采用 PLL 算法则可以预测到达时刻,从而正常进行点对点插值同步。

4 结论

本文提出了基于 PLL 原理的采样值到达时刻预测技术,使得原有网络采样模式下丢失同步时钟后采样数据无法同步的现状转变为可以继续采样数据同步;当交换机延时出现异常的突变,可以将其过滤,避免造成继电保护闭锁等不利影响,彻底改变网络传输采样值可靠性低的技术现状。经过理论计算和试验证明,各方面误差指标都优于现有的同步方法,完全可以满足电力系统继电保护对于采样值精度的要求。网络采样模式下同步技术的进步将为全站数据实时共享打下坚实的基础,将推动智能变电站继电保护配置方案朝着新的方向发展。

参考文献:

[1] 赵家庆,钱科军,俞瑜,等. 智能变电站采样值组网分布式同步技术及应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):154-158.
ZHAO Jiaqing,QIAN Kejun,YU Yu,et al. Distributed synchronization technology of smart substation SV network and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):154-158.

[2] 陈宏辉,蔡泽祥,王海柱. 基于 IEEE1588 的变电站过程层采样值同步技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(12):141-145.
CHEN Honghui,CAI Zexiang,WANG Haizhu. Analysis of sample value synchronization in process level based on IEEE 1588[J]. Power System Protection and Control,2012,40(12):141-145.

[3] 史先好,高厚磊,向珉江,等. IEEE1588 时钟同步协议在数字化变电站中的应用探讨[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):132-135.
SHI Xianhao,GAO Houlei,XIANG Minjiang,et al. Application of IEEE1588 time synchronization protocol in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):132-135.

[4] 罗彦,段雄英,邹积岩,等. 电子式互感器中数字同步和数字通信技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):77-81,91.
LUO Yan,DUAN Xiongying,ZOU Jiyan,et al. Digital synchronization and communication technology for electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):77-81,91.

[5] 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.

[6] 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):37-40,44.
WANG Lihui,XU Yang,LU Yuping,et al. Synchronized sampling of process layer in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):37-40,44.

[7] 郭乐,潘济猛,卢家力,等. 插值算法在智能变电站中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):103-105,109.
GUO Le,PAN Jimeng,LU Jiali,et al. Application of interpolation algorithms in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):103-105,109.

[8] 晏玲,李伟,曹津平. 采用 FPGA 实现合并单元同步采样的方案[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):126-128.
YAN Ling,LI Wei,CAO Jinping. Synchronized sampling of merging unit with FPGA[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):126-128.

[9] 周志宇,李裕能,郭松梅,等. 基于 DSP 的同步交流采样技术[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):57-60.
ZHOU Zhiyu,LI Yuneng,GUO Songmei,et al. Synchronous AC sampling technologies based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(5):57-60.

[10] 张志鹏,胡君慧,刘国平,等. 基于点对点技术的数字化变电站工程实践[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):139-142.
ZHANG Zhipeng,HU Junhui,LIU Guoping,et al. Engineering practice of digital substation based on peer-to-peer technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):139-142.

(下转第 155 页 continued on page 155)

Research of enterprise-class quasi-real-time grid resource center
based on CIM & ESB and its application

LI Jiyuan¹,ZHONG Yijun²,WANG Dongju¹,WANG Shengyang¹,ZHOU Hao¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Communication and Information Sub-Company of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation,
Hangzhou 310007, China)

Abstract: The modelling,data storage,data publication and data interface of the resources,assets and measurements of power system are unified based on CIM(Common Information Model) and ESB(Enterprise Service Bus) to promote the retrofitting and upgrading of related production system,marketing system and acquisition system. The existing IEC61970 measurement model is extended to correlate the measurement or measurement group with equipment for the realization of its operability. The lightweight caching technology is proposed to reduce the server-side accessing pressure of grid resource center and improve the efficiency and operability of system. The abundant discrete spatial data are processed by buffering,merging,B-spline curve embellishing,OGC serving and GIS publishing to visualize the grid resources. The enterprise-class quasi-real-time grid resource center is established with more shared measurement resources for the future development of smart grid.

Key words: electric power systems; grid resource; data processing; common information model; enterprise service bus; models; communication

(上接第 147 页 continued from page 147)

[11] 唐治国,汪思满,康丰,等. 多级级联分布式母线保护方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):136-141.

TANG Zhiguo,WANG Siman,KANG Feng,et al. Multi-level cascading solution for distributed busbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):136-141.

[12] 蔡超,陆于平. 一种提高智能变电站 PMU 相量测量精度的改进采样值调整算法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):149-154.

CAI Chao,LU Yuping. Improved sampled value adjustment algorithm increasing measurement precision of smart substation PMU[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):

149-154.

作者简介:



张言苍(1970—),男,安徽巢湖人,高级工程师,博士,长期从事电力系统继电保护及变电站自动化的研发、管理和产业化工作(E-mail:yancang-zhang@sac-china.com)。

Network sampling synchronization method for smart substation

ZHANG Yancang

(Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210032,China)

Abstract: The technical routes and methods of digital sampling technology during its development for smart substation are discussed. The principle and application of digital sampling synchronization are described and the problems of existing network sampling methods are analyzed. A technology of sample arrival time prediction based on PLL(Phase Locked Loop) is proposed,which,when the synch clock is lost,can continue the sampling synchronization to avoid the synch failure occurred in normal network sampling methods;and it can also filter the abnormality caused by the switch delay to avoid the unfavourable influences,such as the relay protection blocking. The proposed technology can improve the sample reliability of network transmission and provide the theoretic basis and solution for the popularization and application of network sampling in smart substation.

Key words: smart substation; network sampling; synchronization; interpolation; prediction; communication; phase locked loop