适用于智能变电站混合数据源接入的保护同步采样方法

刘益青1,高伟聪2,高厚磊3,王林先4

(1. 济南大学 自动化与电气工程学院,山东 济南 250022;2. 山东外事翻译职业学院 经管学院,山东 济南 250100;
 3. 山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061;4. 积成电子股份有限公司 厂站部,山东 济南 250100)

摘要:现阶段变压器差动保护、备自投、母线保护等装置都需要适应电磁式互感器、电子式互感器(含合并单元)同时接入的情况,为此设计了一种适用于混合数据源接入保护装置的数据同步采样方法。以保护装置内部的采样脉冲时刻为同步基准,对多路采样值(SV)输入进行插值同步,并同时启动模拟量输入的 AD 转换;通 过实时测频和实时调整采样间隔对不同类型数据源输入信号的频率进行跟踪,以实现同步采样。该方法提高 了智能变电站二次设备的适应性,在保护装置和模拟量输入的级联合并单元中均可采用。采用现场可编程门 阵列(FPGA)实现了设计方案,在智能化保护装置中的应用和测试结果验证了该方案的有效性。

关键词:智能变电站;保护;混合数据源;插值;同步;采样;合并单元;电磁式互感器

中图分类号: TM 71 文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.024

0 引言

智能变电站采用电子式互感器时,采样值 SV (Sampled Value)以点对点直连方式传输,以避免外 部全局时钟影响继电保护的可靠性。单纯采用电磁 式互感器时,其二次输出直接接入模拟量采集合并 单元 MU(Merging Unit)实现就地数字化采样。合并 单元采用点对点方式传输时,数据处理、传输和等待 的延时固定^[1-2],可以与电子式互感器直接 SV 接入 时采用相同的插值方法完成采样数据同步和采样率 变换^[34]。

但在智能变电站建设实践中,往往会遇到保护 装置需要同时接入 SV 和电磁式互感器等多种类型 数据源的情况,通常的解决方案是增加模拟量输入 合并单元,将全部输入量统一为 SV,但该方案存在 增加设备和投资的缺点。在智能化保护装置中实现 多路 SV 的点对点插值同步方法已经比较成熟^[5],基 于此方法,本文设计了一种适应同时接入不同类型 数据信号的保护同步采样方法,该方法借鉴传统微机 保护实现模拟量采集的技术,对全数字保护现有的插 值同步模块稍加改造即可实现,既适用于智能变电 站的保护设备,还可应用于级联合并单元的设计。

1 智能变电站保护数据采集与传输

1.1 智能变电站数字化保护的数据源类型

智能变电站中采用了电子式互感器,相比传统的 电磁式互感器,具有绝缘简单、动态范围宽、无磁饱

收稿日期:2014-12-21;修回日期:2015-08-26

和等优点,在高电压等级电网中具有很好的技术经 济性。而在中低电压电网中,由于绝缘问题不突出, 电子式互感器的经济性优势不明显,运行可靠性也 亟待提高。同时,常规的电磁式互感器具有相当成熟 的运行经验,并且保护装置对其磁饱和特性有了有 效的应对措施。因此,在中低电压电网中,仍倾向于 保留电磁式互感器的方案,采用模拟量采集的合并单 元实现数字化采集,然后通过光纤实现数字化传输。 这种方案有较好的兼容性,既利用了光纤传输的抗 干扰性和可靠性,又可减少互感器二次接线数量,节 约投资。

从实际应用看,目前智能变电站中的继电保护设备数据源存在以下3种类型,如图1所示。

a. 电子式互感器就地数字化后,通过合并单元以 IEC61850-9-2 帧格式⁶⁰接入保护装置。

b. 电磁式互感器通过合并单元进行 AD 转换后,通过光纤接入保护装置。

c. 电磁式互感器以电缆直接接入保护装置。



图 1 智能变电站继电保护数据源分类 Fig.1 Three data source types of smart substation protections

1.2 智能变电站混合数据源接入的应用场合 正是由于智能变电站的继电保护系统存在上述

第35卷第11期

2015年11月

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEM039); 济南大学博士科研启动基金资助项目(XBS1408)

Project supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2014EEM039) and Doctoral Scientific Research Foundation of University of Jinan(XBS1408)

不同的数据源接入形式,就必然要适应同时接入电 磁式互感器模拟量和 SV 数字量的情况。下面列举 几个可能的实际应用场合。

a. 变压器各侧不同电压等级使用不同类型的电流互感器^[7],例如高压侧采用电子式互感器、中低压侧采用电磁式互感器,如图 2(a)所示。

b. 变压器低压侧的备用电源自投装置^[8],主变 低压侧电流从合并单元接入,需要同时完成分段保 护,并且分段电流为电磁式互感器模拟量接入的情 况,如图 2(b)所示。

c.智能变电站 10 kV 低压馈线间隔通常采用电磁式互感器,在母线电压合并单元采集时,馈线保护需要同时接入电磁式电流互感器和电压合并单元的电压 SV 输出。

d. 常规变电站在进行智能化改造过程中,母线 保护改造完成间隔为电子式互感器、合并单元接入, 未改造间隔仍为电磁式互感器接入^[940]。



2 混合数据源的保护同步采样方法

2.1 插值同步的实用算法

通过数据插值的方法实现多间隔保护数据的同 步是目前智能变电站主保护的基本技术方案。实现 插值同步的根本前提是从采集设备对一次电流、电 压进行数字化采样的时刻到保护装置接收到采样值 的时刻之间的延时固定不变。通过保护装置与采集 设备(主要是合并单元)之间采用点对点的直连光纤 链路可以保证上述延时不变。这样,保护装置可依 据 SV 的接收时刻推知一次原始数据的采集时刻, 进而在不同 SV 输入之间实现一次原始数据侧的同 步采样^[11]。

实用化的插值同步方案在具体实现时还要解决 以下关键技术问题。

a. 插值时刻基准的选择。

采用插值算法实现多路数据的同步采样,需要

确定统一的插值时刻,即确定将各路数据同步到哪 个时刻上。插值时刻的选取方法有固定通道法、第 一时间到达法和指定插值时刻法 3 种^[12]。本文采用 指定插值时刻法,并通过实时测频调整插值时刻实 现同步采样。

b. 帧接收时刻的精确标定。

采用数据插值的方法实现数据同步需要 3 个条件:合并单元的发送间隔抖动足够小;数据传输链路 延时固定;数据帧接收时刻精确标定。第 1 个条件由 合并单元设计保证,采用现场可编程门阵列(FPGA) 实现时通常可以做到时间抖动小于 4 μs^[13];第 2 个 条件在采用点对点直连时可以满足;第 3 个条件需 要由 SV 的接收者保证,通常由 FPGA 实现,在介质 访问控制(MAC)层数据解帧时进行硬件时间戳精确 定标。

c. 插值数值算法的选择。

常用的插值数值算法主要包括线性插值、二次 插值和三次样条插值^[14]等,在实际应用中选择何种 插值算法主要从计算量和插值精度2个方面权衡。 线性插值可满足大多数继电保护的应用要求,只是 在高次谐波含量较高的场合,三次样条插值的计算 精度有一定优势^[15]。然而无论采用哪种插值算法, 均不影响本文的保护数据同步采样方法的原理,因 此不作进一步的详细讨论。

2.2 保护设备只接入 SV 的同步采样方法

智能变电站的保护装置如果只接入 SV 数字量, 且采用点对点的光纤直连方式时,可直接采用数据 插值的方法实现同步采样。具体的同步插值时序如 图 3 所示。



图 3 只输入 SV 的同步采样时序图

Fig.3 Synchronous sampling sequence for SV input only

2路 SV 的额定延时分别为 T_{d1}和 T_{d2},依据该额 定延时和 SV 帧接收时刻,可推知 SV 对应的一次输 入采样时刻。保护装置再根据采样间隔 T_s,确定插值 脉冲的时刻,并将插值脉冲对应的时刻,分别对2路 SV推算到一次侧时刻。该时刻往往不会恰好有SV, 此时可通过数据插值运算获得所需SV。通过上述处 理,对于保护装置而言,多路SV数据在保护采样脉 冲时刻实现了同步采样。

如果保护装置仅接入 SV 数字量,采样脉冲的时 刻可以按照前述 3 种选择方式任意选择,因为此时 同步的目的仅仅是将多路 SV 数据还原到一次侧的 同一时刻即可。不同的采样脉冲基准不影响插值结 果的同步性,只是会造成后续保护逻辑处理的延时 不同。

2.3 电磁式互感器与 SV 同时接入的同步采样方法

当保护装置同时有电磁式互感器的模拟量输入 和 SV 数字量输入时,仍然可以用数据插值的方法实 现同步采样,但是采样脉冲基准的选择必须遵循:SV 数字量反映的一次输入与电磁式互感器反映的一次 输入严格同时。以此为根本要求,设计了完全基于采 样脉冲实现的多类型数据源接入时的同步采样方 案,处理时序如图 4 所示。





图 4 中第一行的采样序列对应电子式互感器一次输入的采样时刻,SV 可以由电子式互感器的前端采集模块就地数字化得到,也可以由模拟量输入的合并单元获得。以相邻 2 次采样的 a 帧、b 帧 SV 数据为例,经过额定延时 T_d(包括采集器延时、合并单元处理延时和链路传输延时)后,保护装置接收到这 2 帧 SV 数据帧并存入数据缓存区,为区别不同时标,标记为 a'帧和 b'帧。

每间隔 T_s 时间(插值结果选为 1.2 kHz 时, $T_s \approx$ 833 μ s),由定时器产生一个采样脉冲,该时刻记为 t_{ko} 采样脉冲有以下 2 个作用。

a. 在 tk 时刻启动保护装置内部的 AD 转换器

(ADC),进行 AD 转换,并读取 AD 转换结果,实现模 拟量接入通道的定时采样,如图 4 中步骤 ① 所示。

b. 确定 SV 插值同步时刻的基准,如图 4 中步 骤 ② 所示。t_k 对应的一次输入时刻在 a、b 2 帧之间, 因此只要获得 t_k 对应的 SV,即可实现 SV 数据与保 护装置直接采集的模拟量之间的同步采样。

由于在 t_k 时刻保护装置尚未接收到a、b这2帧数据,因此还无法得到与模拟量同步的SV。在延时 T_d 之后(等效于将采样脉冲延迟 T_d 时间到 t'_k),保护装置接收到a'和b'这2帧SV数据,即可作为插值计算数据源,得到 t'_k 时刻的插值结果,也就得到了一次输入 t_k 时刻的SV,显然该值与直接输入保护装置的模拟量采集为同一时刻的SV。

步骤②完成之后,SV 通道、模拟量通道各自对 应一次输入 t_k 时刻的同步采样值就已经全部得到。 处理时序中的步骤③将步骤①和步骤②中各自获 得的 SV 进行数据组帧并写入数字信号处理器 (DSP)的 HPI(Host Port Interface)缓存,然后触发 HPI 中断(步骤④),通知 DSP 读取已经同步好的保 护数据,DSP 按预定节奏进行保护计算和逻辑判断。

从图 4 的同步采样时序可以看出,保护装置要得 到 t_k 时刻的同步采样值,最长需要等待 T_d+T 的延时, 其中 T 为插值算法导致的最大延时,即 4 kHz 下的采 样间隔(参见图 3)。同时,触发 DSP 的 HPI 中断也会 存在最大 T 时间的抖动。这种时序处理略显复杂, 但可以最大限度地缩短保护数据处理延时,提高保 护的速动性。并且对常规微机保护中定时响应采样 中断的处理时序改变也不大,有利于提高软件继承性 和可靠性。这一点也是与图 3 所示的全部为 SV 输 入时的处理时序不同的地方,图 3 所示处理方式,HPI 中断的时间间隔是均匀的,因此也可用于合并单元的 插值同步。

合并单元要求的是输出抖动足够小,保护装置则要求速动性,因此本方案在应用于保护装置或合并单元时,由于考虑的主要因素不同,处理时需要区别对待。合并单元为了保证发送数据抖动尽量小,通过插入等待时间,始终保持同步 SV 的发送延时固定为 $kT_s(k=1,2,\cdots),k$ 依据 T_d+T 的大小取值,例如当 $T_s < T_d + T < 2T_s$ 时取k=2,通常合并单元的 T_s 仍保持4kHz。

更一般的情况是,保护装置需要同时接入多路 SV数据,下面以同时接入模拟量和2路SV的情况 为例说明,处理时序如图5所示。

2路 SV 的额定延时分别为 T_{dl} 和 T_{d2}。图 5中, 步骤①完成模拟量 AD 转换;步骤②和③分别获取 2路 SV 的同步 SV,对应时刻分别为 2路 SV 同步插 值运算完成后的数据可用时刻,其抖动不影响采样

160





脉冲决定的插值时刻的准确性;步骤④完成步骤准备,汇总步骤①、②、③中数据;步骤⑤触发 HPI 中断完成数据传输。与只接入1路 SV 数据相比不同之处在于保护装置得到同一时刻 SV 的最长等待延时为 max { T_{d1}, T_{d2} } + T,其中 T 仍为插值算法导致的最大延时。同理可推知 n 路 SV 接入时,最长延时为 max { $T_{d1}, T_{d2}, \dots, T_{dn}$ } + T。

3 实现方案及验证

3.1 FPGA 实现方案

采用 Xilinx 公司的 Spartan-6 系列 FPGA 芯片和 TI 公司的浮点 DSP 主处理器为核心器件,实现本 文所述的保护同步采样方案,如图 6 所示。



图 6 采用 FPGA 实现同步采样方案的框图 Fig.6 Block diagram of FPGA-based synchronous sampling scheme

由于 FPGA 具有并行处理能力,可以保证延时 固定,适用于高速数据处理应用,因此采用 FPGA 作为 数据处理模块,采用 DSP 完成保护计算和逻辑处 理。二者之间通过 DSP 芯片的 HPI 进行数据交换。

不同数据源的保护同步采样功能主要由 FPGA 模块完成,按完成的功能可以划分为数据处理部分 和信号控制部分。

数据处理部分主要完成以下工作:对接收的 IEC 61850-9-2 格式的 SV 数据帧按照 ASN.1 编码规则 进行解帧处理;读取 ADC 的模数转换结果,并存入 数据缓存区;进行插值运算,获取与模拟量 AD 转换 时刻同步的多路 SV 数据 SV;对已同步的不同来源数 据进行汇总、成帧并写入 HPI 缓冲区。

信号控制部分主要完成以下工作:在 MAC 层对 接收的 SV 数据帧标定硬件时间戳;实时计算输入信 号频率,包括硬件测频和软件测频(3.2 节详述);根据 实时频率调整采样间隔 T_s;通过采样脉冲控制 ADC, 启动 AD 转换;根据采样脉冲时刻、额定延时和 SV 数据接收时标,生成同步插值脉冲,控制插值时刻, 启动数据插值运算;数据准备完毕后通知 DSP,触发 HPI 中断。

3.2 信号频率跟踪与采样间隔调整

传统微机保护,为了减少频谱泄漏,通常采用频 率跟踪技术,通过实时调整采样间隔以保证采样频 率为被采集信号频率的整数倍,即实现同步采样。智 能变电站中的合并单元按照固定采样率进行数字化 采样,通常不会跟踪信号频率和调整采样间隔,为此 保护装置需要对数据进行专门预处理或者对傅里叶 变换计算结果进行修正^[16]。

为实现保护插值数据的严格同步采样,以继承常 规微机保护的成熟保护算法,本文设计方案需要对 输入信号进行频率采集。根据实时频率,调整采样间 隔(即图4中T_s)。采样间隔确定后,一方面通过FPGA 中 ADC 控制逻辑调整采样脉冲时刻,发给 AD 芯片 的启动转换信号;另一方面通过额定延时和 SV 帧接 收时刻确定保护数据插值时刻。

频率跟踪的对象可以选择是电磁式互感器的模 拟量输入或 SV 输入。对模拟量输入进行测频采用 硬件调理电路实现,利用施密特触发器将正弦波整 形为方波,通过检测方波周期实现频率测量。对于 SV 输入通道,即要求实现对等时间间隔的 4 kHz 采样 数据进行软件测频,本文采用过零检测算法配合低通 滤波器实现。

3.3 SV 品质因数的处理

IEC61850标准对采用数字化传输 SV 定义了品 质因数 q,用于反映 SV 的数据是否有效、是否同步等 属性,以便数据使用者正确处理各种异常情况。在 本文设计的保护同步采样方案中,对品质因数中的 "有效位"、"检修位"进行了相应处理,而且可以反映 SV 数据的"双路 AD 差异过大"品质属性。处理原则 如下。

a. 对于模拟量接入通道。根据 AD 采集回路的 自检结果置数据"有效位";根据保护装置的检修状 态置"检修位",由于采集回路在保护装置内部,因此 不会出现检修不一致的状态;当模拟量采集通道数 量冗余时,采用双 AD 并行转换模式,比较双 AD 的 转换结果,相应地置"双路 AD 差异过大"标志。

b. 对于 SV 接入通道。由于要从 4 kHz 的原始采 样数据降频插值成 1.2 kHz 的同步采样数据,所以插 值运算可能只用到插值时刻前后的数帧 SV 数据(例 如线性插值只用前后 2 帧)。因此插值结果的"有效 位",根据插值所使用的 SV 数据"有效位"生成,只要 使用到的原始 SV 数据帧中有 1 帧为"无效"数据,则 插值结果为"无效"。未使用的 SV 数据出现"无效", 不影响插值结果数据的"有效位",只给出告警信息。 同理,插值结果的"检修位"根据插值所使用的 SV 数 据"检修位"生成。如果出现插值所使用的前后 2 帧 SV 数据"检修位"不同的情况,则维持上次插值结果 状态,并置本次插值结果数据"无效"。对于订阅的双 AD 数据,对插值之后的结果进行双 AD 差异过大判 断,并置相应标志。

除了对品质因数进行实时处理外,还须对 SV 数据异常情况进行检测和处理。若仅 1 帧丢失则进行 纠错,不影响数据同步结果;若发生多帧连续丢失, 则直接补空帧,置数据品质为无效。

在 FPGA 数据处理模块中,不管是模拟量接入还 是 SV 接入,均记录每一个采样点的品质状态,并通 过 HPI 与 SV 数据一起传送给保护模块,由保护模 块根据具体情况进行告警或保护闭锁,以提高数字 化保护的可靠性和适应性。

3.4 实现方案的有效性验证

对采用本方案的某型号变压器保护装置分别进行静态实验和 RTDS 动模实验进行验证。静态实验 中高压侧电流为合并单元输出的 SV 接入,低压侧电 流为模拟量直接接入。实验设备采用博电 PW366 保 护测试仪及积成电子研制的 SAU 型合并单元,表 1 为比率差动保护动作精度测试结果。

for proportional differential protection				
序号	制动 电流/A	差动电流 理论值/A	差动电流 实测值/A	相对 误差/%
1	3.200	1.600	1.579	-1.31
2	5.400	2.700	2.689	-0.41
3	7.600	3.800	3.773	-0.71
4	9.800	4.900	4.873	-0.55
5	12.000	6.600	6.561	-0.59
6	14.200	8.360	8.313	-0.56
7	16.400	10.120	10.061	-0.58
8	18.600	11.880	11.784	-0.81
9	20.800	12.500	12.469	-0.25
10	23.000	12.500	12.444	-0.45

表 1 比率差动保护动作精度测试结果 Table 1 Results of operational accuracy test for proportional differential protection

在开普实验室的三绕组变压器模型上进行

RTDS 实验,高、中压侧电流通过合并单元接入保护装置,低压侧电流由功放直接接入保护装置。图7为区内 AB 相金属性故障时录波图,TripGO 接点为智



162

163

能终端的硬接点开出信号。

通过上述测试数据和录波图可以看出,采用本方 案的变压器保护装置,在同时接入多种数据源时动 作误差远小于 ±2.5% 国标要求;区内金属性故障时 比率差动保护的 GOOSE 出口时间在 25 ms 左右。主 要指标等均超过国标、行标的要求,表明本文设计方 案在混合数据源接入情况下具有较高的采集精度 和较小的时延。

为验证在 SV 采样异常情况下本文方案的适应 性,利用博电 PNF800 数字式测试仪的 SV 异常模拟 模块进行测试。在丢帧、抖动、飞点及数据无效等异 常情况下,保护均能可靠闭锁,表明本方案有较强的 适应性。

4 总结及展望

为了适应智能变电站同时存在多种类型的保护 数据源接入等实际情况,研究了保护装置实现 SV 数 字量和电磁式互感器模拟量同时接入方式下的同步 采样方法。采用高性能的 FPGA 和浮点 DSP 为主处 理器件,实现了设计方案,成功应用于变压器差动保 护和备用电源自投等智能变电站保护控制设备,并 已投入现场运行。该设计方案除了可以应用于保护 设备外,对于有类似需求的级联合并单元、模拟量采 集合并单元的设计都有一定的借鉴意义。

进一步地展望,该方法在保护设备中应用后,可 以使数据应用者不必关心是电磁式互感器还是合并 单元接入,并可实现装置内部点对点的高速数据传 输,有利于提升智能变电站二次设备的软硬件平台 的通用化和模块化。

致 谢

积成电子股份有限公司厂站部工程师林伟、王 秀广、李波在方案研究及实验验证过程中给予了大 力支持和帮助,开普实验室提供了故障录波图,在此 致以诚挚感谢!

参考文献:

- YAMADA T,KON S,HASHIMOTO N,et al. ECT evaluation by an error measurement system according to IEC60044-8 and 61850-9-2[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (3):1377-1384.
- [2] PAN Wulue, ZHU Bingquan, QIU Yutao, et al. The research and application on interfacing technology between electronic current transformer and relay protection [C] // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011. Beijing, China; IEEE Computer Society, 2011;422-426.
- [3] 蔡超,陆于平,黄涛,等. 基于插值和时标变换的智能变电站保护数据重采样算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):80-85.
 CAI Chao,LU Yuping,HUANG Tao,et al. Re-sampling algorithm

for smart substation protection data based on interpolation and time scale transformation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19):80-85.

- [4] WANG Yan,ZHANG Yanxia,TANG Junci. Study of multi-samplerate signal conversion in digital substation and wide area measurement of power system[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply,2009. Nanjing, China: IEEE Computer Society,2009:1-4.
- [5] 冯亚东,李彦,王松,等. IEC61850-9-2 点对点采样值传输在继 电保护中的实现与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):82-85. FENG Yadong,LI Yan,WANG Song,et al. Realization and application of peer-to-peer IEC61850-9-2 sampled value transmission in digital substation protections[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):82-85.
- [6] IEC. IEC61850-9-2 Communication networks and systems in substations-part 9-2:Specific Communication Service Mapping(SCSM)sampled values over ISO/IEC8802-3. 2004[S]. Geneva,Switzerland: IEC,2004.
- [7] 殷伯云,罗志娟,杨丽,等. 主变差动保护采用不同原理 CT 的仿 真研究[J]. 电网技术,2013,37(1):281-286.
 YIN Boyun,LUO Zhijuan,YANG Li, et al. Simulation analysis of power transformer differential protection adopting current transformers based on different principles[J]. Power System Technology,2013,37(1):281-286.
- [8] 秦贵锋,王明,张进.智能变电站自适应备自投应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):111-115. QIN Guifeng,WANG Ming,ZHANG Jin. Application of adaptive automatic switchover devices in smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):111-115.
- [9] 吕航,刘国河,鲍凯鹏,等.常规站智能化改造中的母线保护方案 研究[J]. 江苏电机工程,2012,31(4):48-51.
 LÜ Hang,LIU Guohe,BAO Kaipeng,et al. Research on busbar protection in smart reconstruction of general station[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2012,31(4):48-51.
- [10] 梁国坚. 基于母线差动保护的电子式与电磁式互感器同步应用
 [J]. 电力系统自动化,2011,35(3):97-99.
 LIANG Guojian. Synchronous application of electronic and electromagnetic transformers for bus differential protection [J].
 Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):97-99.
- [11] 袁字波,卜强生,高磊,等.智能变电站数字采样延时特性分析 与试验[J].电力系统自动化,2013,37(24):76-80,88.
 YUAN Yubo,BU Qiangsheng,GAO Lei,et al. Characteristic analysis and test of digital sampling delay in smart substations
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37 (24):76-80,88.
- [12] 向珉江,高厚磊,安艳秋,等. 一种提高数据同步精度的自适应 插值算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):77-81,91.
 XIANG Minjiang,GAO Houlei,AN Yanqiu,et al. An adaptive interpolation algorithm to improve data synchronization precision [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):77-81,91.
- [13] 李英明,郑拓夫,周水斌,等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(11):93-98.
 LI Yingming,ZHENG Tuofu,ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(11):93-98.
- [14] 董义华,孙同景,徐丙垠. 基于三次样条插值理论的电子式互感

器数据同步[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):102-107.

DONG Yihua, SUN Tongjing, XU Bingyin. Data synchronization based on cubic spline interpolation for electronic instrument transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32 (5):102-107.

- [15] 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.
- [16] 刘益青,高厚磊,高伟聪.适用于数字化变电站的继电保护数据处理新方法[J].电力系统自动化,2011,35(15):68-72.
 LIU Yiqing,GAO Houlei,GAO Weicong. A novel data processing approach to relay protection in digital substation IED[J].

Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15):68-72.

作者简介:



刘益青(1977—),男,山东潍坊人,副教授,高级工程师,博士,研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:cse_liuyq@ujn.edu.cn);

高伟聪(1977—),女,河北石家庄人,副 教授,硕士,研究方向为计算机应用、嵌入式 技术在电力系统中的应用;

授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力

高厚磊(1963-),男,山东滕州人,教

刘益青

系统继电保护:

王林先(1976—),男,山东蓬莱人,高级工程师,硕士,研 究方向为继电保护、智能变电站。

Synchronous data acquisition from hybrid sources for smart substation protections

LIU Yiqing¹, GAO Weicong², GAO Houlei³, WANG Linxian⁴

(1. University of Jinan, Ji'nan 250022, China; 2. Shandong Vocational College of Foreign

Affairs Translation, Ji'nan 250100, China; 3. Shandong University, Ji'nan 250061, China;

4. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Ji'nan 250100, China)

Abstract: As the protective devices, including transformer differential protection, automatic backup-power switchover, bus protection and so on, should now adapt to the connection of electromagnetic transformer and electronic transformer (including merging unit) at the same time, a scheme of synchronous data acquisition from multiple data source types is designed for smart substation protections, which takes the sampling pulse inside the protective devices as the benchmark to synchronize the multi-channel SV(Sampled Value) inputs by the interpolation and to simultaneously start the AD conversion of analog inputs, as well as tracks the input signal frequencies of different data sources by the real-time frequency detection and sampling interval adjustment to realize the synchronous sampling. It can be applied to the smart secondary devices, such as relay protections and cascaded merging units of analog inputs, to improve their adaptability. It is implemented based on FPGA and its effectiveness is verified by its application in the smart protections and the test results.

Key words: smart substation; electric power system protection; hybrid sources; interpolation; synchronization; sampling; merging unit; electromagnetic transformer

164