

DOI: 10.7500/AEPS201302033

基于分布式同步方法的智能变电站采样值组网技术

赵家庆¹, 徐春雷², 高宗和³, 钱科军¹, 李 澄⁴, 丁宏恩¹

(1. 国网苏州供电公司, 江苏省苏州市 215004; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024;

3. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 4. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏省南京市 211102)

摘要:通过对国内外智能变电站过程层采样值传输组网方式的研究,重点对点对点传输方式和交换机组网传输方式加以分析,总结分析了常见组网方式的特点,并针对其不足,提出了智能变电站分布式同步采样值组网技术方案。与原组网方案相比,新方案的主要长处在于不依赖全局同步系统,从而进一步提高了过程层网络的可靠性。该方案的研究成果已应用于苏州 110 kV 沈巷变电站智能化改造。

关键词:智能电网;智能变电站;过程层;以太网;组网技术;IEEE 1588

0 引言

智能变电站的建设是实现智能电网的重要环节,其整体建设水平将直接影响智能电网的总体高度^[1-2]。根据国家电网公司的统一部署,为了满足“大运行”和“大检修”的需求,也为各电压等级变电站无人值守提供技术支撑,一大批新设备、新技术和新系统在智能变电站中得到了应用^[3-5]。新一代智能变电站有望继交直流特高压输电之后成为电网技术发展的另一个里程碑。

在智能变电站建设中,数字化采样的变电站保护/测控装置需要对接入的电压、电流实现同步采样^[6]。目前影响同步采样实现方法的主要因素是采样值的传输方式和时间同步技术。当采样值以组网方式传输时,在网络技术的支持下,可以高效优化变电站过程层网络,并为实现对运行数据的全面监测和记录提供技术手段。然而,由于网络交换机数据包交换的延迟非对称性、数据包端口排队等不确定因素的影响,传输延迟^[7]的抖动可能较大,如不使用外同步,接收设备无法精确恢复数据同步,不同合并单元间也由于延迟的不确定性而不能使用点对点的算法实现采样同步。因此,目前采样值组网的系统中,通常必须配备一个全局的同步系统,以实现全系统的采样同步^[8]。然而,当同步系统故障时,所有采样组网相关设备都可能因缺少统一的同步参照而发生异常。常规依赖使用全局同步系统的组网方

式有可能发生智能变电站全部二次设备异常运行的可靠性隐患。因此,在以往的智能变电站建设中,采用采样值组网的方式始终成为一个重要的问题焦点,制约了高效优化变电站过程层通信网络技术方案的应用效果;即便同步系统采用设备冗余备份技术以提升可靠性,也难以避免在同步设备切换时仍有可能因同步抖动而影响组网设备的稳定运行。

本文通过对国内外智能变电站过程层采样值传输组网方式的研究,重点对点对点传输方式和交换机组网传输方式加以分析,总结归纳了常见组网方式的特点,并针对其不足,提出了智能变电站分布式同步采样值组网的技术方案。

1 智能变电站过程层采样值组网技术现状

智能变电站过程层采样值组网方案目前主要采用点对点以太网连接和以太网交换机组网方式:点对点方式可以不需要全局同步,以太网交换机组网方式一般还需要全局同步,从工程的实用化考虑,两种方式各有长处和不足。

1.1 采样值点对点连接

1.1.1 点对点连接

图 1 所示为过程层采样值点对点方案^[9]。点对点连接时,合并单元的输出与保护装置通过光纤直接连接,通过采样值网与测控装置连接。ECVT 表示电子式电流电压互感器。

点对点连接时,合并单元与保护测控装置之间不需要同步,保护和测控装置端能根据各输入延迟进行补偿而实现各输入间的采样值同步^[10]。

收稿日期: 2013-02-05; 修回日期: 2013-11-13。

国家电网公司重点科技项目“智能变电站无同步采样值组网技术研究”;已申请国家发明专利(申请号: 201310170543.3)。

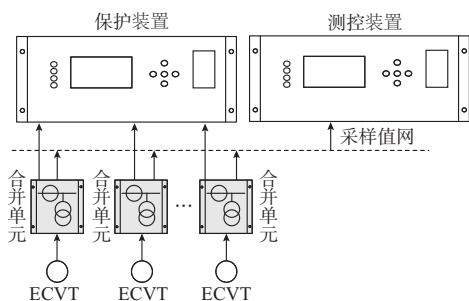


图 1 过程层采样值点对点方案

Fig.1 Point-to-point scheme for sampled values in the process layer

1.1.2 点对点以太网采样值的接收与插值

图 2 为基于点对点的以太网接口,其中 DSP 表示数字信号处理器。由于合并单元的晶振与保护处理器的晶振不同,并且采样的时间点与合并单元的数据点时刻并不相等,因此需要通过保护数据采集来对数据进行整形与插值,供保护与测量使用。



图 2 基于采样值点对点方案的以太网接口

Fig.2 Ethernet interface based on point-to-point scheme for sampled values

点对点以太网采样值方式具有如下特点。

- 1) 合并单元间不需要同步,可实现多接口同步采样,使用简单。
- 2) 采样值额定延迟的精确度对采样精确度有较大影响,对延迟抖动的要求较高。
- 3) 对每个需要采样值数据的设备,合并单元都需要准备数据口。
- 4) 保护装置需要的接口多,装置较复杂,现场因需要增加输入量而改动硬件。

1.2 采样值组网

采样值组网单纯从技术角度上看是比较理想化的方案,技术先进,系统整体结构简单,扩展方便,但实际工程使用上,还存在较多问题,为此目前应用相对较少。图 3 为过程层采样值组网方案,与点对点方案的差别为合并单元、保护装置等均与交换机连接,合并单元的输出经过交换机按多播交换后,转发到各保护测控装置中。采样值组网时,按照目前的技术,合并单元、保护装置、测控装置间都需要严格同步,由全局统一的同步系统同步每个装置;同步的方法主要有光纤秒脉冲同步、IEEE 1588 协议同步等。使用光纤秒脉冲同步需要建独立的光纤网络,工程实施较复杂;而 IEEE 1588 协议同步通过交换机实现,不需要建独立的物理网络,但要求交换机、

保护测控装置的采样接口等都支持 IEEE 1588 协议。

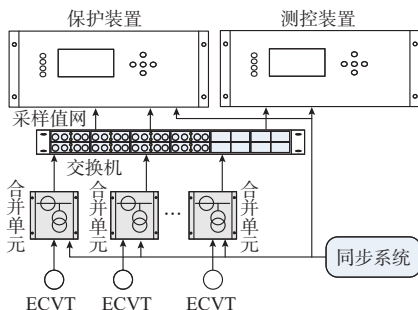


图 3 过程层采样值组网方案

Fig.3 Networking scheme for sampled values in the process layer

图 4 所示为基于采样值组网的接口,可以看出,与点对点方案相比,采样值组网接口多了同步脉冲输入。



图 4 基于采样值组网的接口

Fig.4 Interface based on networking scheme for sampled values

2 现有采样值组网方案的不足

由上可见,采样值组网方式具有如下特点。

- 1) 目前合并单元、保护测控装置等设备之间必需同步,同步系统故障将影响整站的运行,是影响可靠性的关键。
- 2) 采用全局同步,所有合并单元总在同时刻发送数据,交换机的瞬时流量巨大,对交换机工作的稳定性可能有影响。
- 3) 保护测控装置基于全局统一的同步系统,易于确定等分同步点。
- 4) 系统整体结构相对简单,可扩展性好,扩建新设备的接入可不涉及老设备改造或升级。

然而,由于采样值同步方案使用全局同步系统,存在以下不足。

- 1) 系统复杂,设备较多,要求设备双同步脉冲输入,并能够自主切换。
- 2) 当采样值组网传输时,由于交换机数据交换的延迟、端口排队等不确定因素的影响,数据传输的延迟抖动较大,如不使用外同步,接收设备无法精确地实现不同间隔合并单元间数据的同步,影响装置正常运行。
- 3) 当前时钟源故障,切换到另一个时钟源时,时钟脉冲存在切换问题,可能造成测量不正确,也可能

造成保护误动。

因此,设计出一种既具备采样值组网传输方式的结构简单、资源共享、扩展性好等优点,又不依赖于外部全局同步系统的采样值组网传输解决方案,发挥出采样值组网传输的技术经济优势,在智能变电站的建设中具有十分重要的意义。

3 基于分布式同步方法的采样值组网方案

3.1 基于 IEEE 1588 协议的同步机制

IEEE 1588 精密时间协议规定了分散在测量和控制系统内的各节点上独立运行的时钟同步的机制及方法,以达到较高的精度和准确度。这些时钟在一个通信网络中互相通信,按树形方式组织和管理,按主从方式校准和跟踪。IEEE 1588 协议定义了 4 种同步报文(同步(Sync)、跟随(Follow_up)、网络延迟时间请求(Delay_Request)、网络延迟时间响应(Delay_Response))和一组管理报文。一个主时钟(简称主钟)与一个从时钟(简称从钟)的同步过程如下。

1) 主节点定时向从节点发送一个“同步”报文。这个报文是由主节点打上预计的发送时间标记的报文。由于预计的发送时间和实际的发送报文发送本身可能的延迟,实际时间标记不能随“同步”报文一起发送。这个“同步”报文在接收端被从节点打上接收时间标记。

2) 主节点向从节点发送一个“跟随”报文,这个报文包含先前的“同步”报文准确的发送时间的标记。从节点利用这两个时间标记可以得到它与主节点的延迟,据此可调整它的时钟频率。

3) 从节点向主节点发送“网络延迟时间请求”报文。这个报文是由从节点标记其发送时间戳,由主节点标记其接收时间戳。

4) 主节点向从节点返回一个“网络延迟时间响应”报文,这个报文带着先前的“网络延迟时间请求”报文准确的接收戳,从节点利用这个时间和由它所记录的准确的发送时间,可计算出主节点和从节点之间的网络的传输延迟并调整它的时钟偏差。

为了能够实现高精度时钟同步系统,本研究中为 IEEE 1588 协议的实现提供了两个关键技术:①由硬件实现的高精度时间戳,由高度精确的实时时钟驱动,硬件直接监测特定报文,标记准确的时间戳;②高稳定度的本地时钟和本地时钟频率的自动调节。

3.2 方案设计

传统的采样值组网方案中,同步系统故障将影响整站的运行,是影响可靠性的关键,为此消除对全

局同步系统的需求成为解决问题的关键。本文提出了分布式同步采样值组网方案,如图 5 所示。

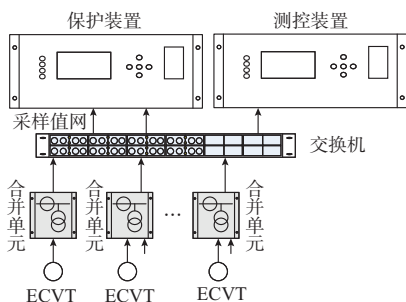


图 5 分布式同步采样值组网方案

Fig.5 Distributed synchronous networking scheme for sampled values

本文提出的方案与原组网方案相比,差别在于不依赖全局同步系统。分布式同步采样值组网技术的工作方式如下。

1) 交换机采用支持 IEEE 1588 协议的交换机,设计 IEEE 1588 协议工作在 E2E 模式下^[11]。

2) 每个合并单元内有一个 IEEE 1588 协议主钟,该主钟按自身晶振(误差小于 5×10^{-6})自由运行,不与外部 IEEE 1588 协议时钟或秒脉冲同步;合并单元按照这个主钟的节拍发送采样值报文,采样计数器值也按照此主钟的秒节拍发送。对此 IEEE 1588 协议主钟的确切时间没有要求,只要能够稳定运行即可。

3) 采样值输出设备根据配置内容(报文类型/通道定义)按主钟的秒等分周期间隔输出采样值报文。

4) 过程层网络交换机支持透明时钟协议,并支持虚拟局域网、注册组播协议功能。

5) 保护/测控装置根据合并单元的个数实现多个 IEEE 1588 协议从钟,自动扩展实现相对应的多个从钟,每个 IEEE 1588 协议从钟对应于一个合并单元,跟踪对应合并单元的 IEEE 1588 协议主钟。从钟在跟踪主钟时,根据钟差判断时钟锁定(误差小于 200 ns),只有当跟踪锁定时才认为计算的采样值有效。

目前,IEEE 1588 协议虽然已在很多方面实现,但现有解决方案中没有能够在单个以太网接口上实现多个 IEEE 1588 协议从钟的方案,一个以太网端口只能实现一个从钟^[12-13]。另外,由于需要的从钟数量是不确定的,为此需要找到一个通用的硬件方案解决不同时钟的时标问题,才能够使分布式同步真正实现。本研究在已有运行稳定、功能齐全的以太网介质访问控制(MAC)IPCORE 上自行开发实现多个从钟,方案如图 6 所示。

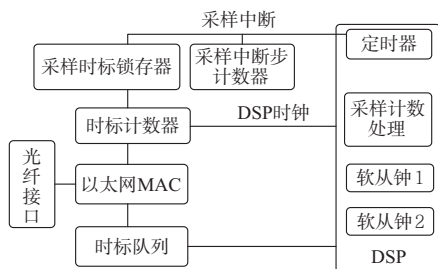


图6 多从钟实现框图

Fig.6 Realization of multiple slavery clocks

实现多个从钟的方法及要点如下。

- 1)在现场可编程门阵列(FPGA)内设置一个自由时标计数器,它计数直到32位计数值满时归零。
- 2)利用DSP内定时器产生采样中断,中断脉冲送至FPGA内,更新采样中断步计数器,同时锁存自由时标计数器值。
- 3)发送/接收以太网包,在首字节第一位发送和接收时刻记录自由计数器值和采样值当前步值。
- 4)DSP根据配置维护多个软从钟,这些从钟总在采样中断处理时得到更新,更新时记录当前的采样时标锁存器值,如图7所示。

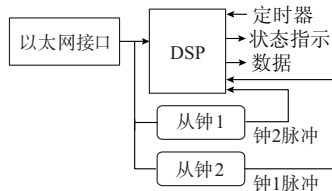


图7 基于分布式采样值组网的接口

Fig.7 Interface based on distributed networking scheme for sampled values

- 5)得到以太网包时标,根据来源MAC确定所属合并单元和对应从钟,根据时戳值,与当前从钟的时戳值,确定以太网包时标从钟时间,从而可进行IEEE 1588协议从钟跟踪计算。

上述方法中每个从钟用同一个自由计数器值更新,避免每个从钟都用硬件实现的需要,从而可以根据需要维护多个时钟。以太网打时标的方法:对每个接收包全部打时标,需要时使用,而对发送包仅指定需要打时标才产生时标存入到时标队列。

- 6)保护/测控装置内部仍然设有全局的独立采样脉冲,对于每个从钟,采样脉冲到来时刻可精确得到此采样脉冲对应于从钟的时间,进而得到从钟等分同步脉冲位置。由于主钟和从钟对时间已知,所以采样脉冲与采样数据点间的时间关系是明确的。

- 7)在保护/测控装置内部设有一个全局的内部采样脉冲,利用各从钟之间的相对时差及通道固定

延迟,折算出对应的等分同步脉冲序号,采用逐点可移动动态数据窗,利用回溯差值算法,实现多个未经外同步的采样值输出设备的采样数据在一个采样值接收设备内的同步。综上所述,基于分布式同步方法的智能变电站采样值组网原理图如图8所示。

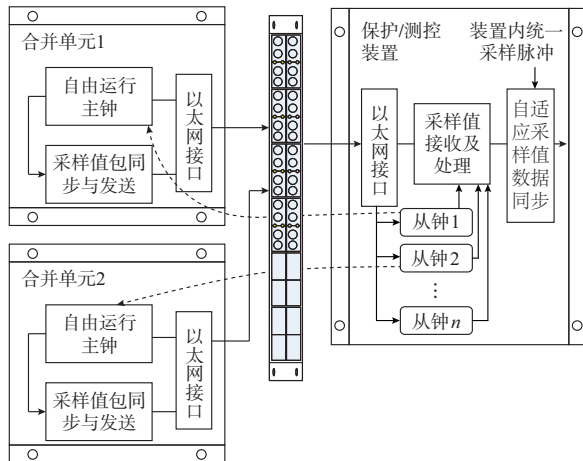


图8 基于分布式同步方法的智能变电站采样值组网原理

Fig.8 Networking principle for sampled values in smart substations based on distributed synchronization

3.3 分布式同步采样值组网方案的优点

3.3.1 避免了独立同步系统的需要,可靠性高

分布式同步采样值组网解决了以下几个问题。

- 1)不再依赖全局同步系统,减少了设备与投资。
- 2)时钟分布在合并单元中,没有切换问题。单个合并单元故障不会影响无数据关联关系的设备。
- 3)采样值包的发送由主钟运行时驱动,如主钟异常,发包周期也将异常,从钟较易检测出异常。

- 4)自由运行的IEEE 1588协议主钟易于实现,消耗装置资源少。

3.3.2 均衡交换机负载,提高交换机工作稳定性

全局同步方式采样值组网,所有合并单元总在等分同步脉冲时刻同时发送数据,交换机流量不均衡,每次交换机进行数据包交换时都会发生冲突,瞬时流量巨大,交换机需要缓存较多的数据包,对交换机性能要求很高,在极端情况下可能会偶发丢包问题。

分布式的同步系统,各合并单元等分同步脉冲相互间是随机的,随着时钟间相互漂移会短时间有冲突,但发生多个合并单元数据在交换机上冲突的概率很小,交换机总在负载均衡条件下工作,运行稳定性相对较高。

此外,分布式同步技术采用的是IEEE 1588 V2透明时钟协议,交换机仅需支持此协议,并不校正时间,对保护无影响。跨间隔保护中,各合并单元的主

钟与保护/测控装置内的多个从钟一一对应锁定,并无选择关系,在保护装置内统一实现多侧数据的同步。

3.3.3 与现有点对点方案和组网方案兼容

分布式采样值组网同步系统需要的合并单元功能仅在现有合并单元增加 IEEE 1588 协议功能,不影响原有的功能;不论原系统是组网还是点对点方式,新合并单元仍可当做传统合并单元使用,不存在兼容问题。

符合分布式同步组网要求的测控/保护装置,在开发时仍保留外同步功能,由于分布式同步与全局同步方式算法上除等分同步脉冲来源和产生方式不同外,其余算法中,分布式同步是涵盖全局同步方式算法的一个特例),为此符合分布式同步组网要求的测控/保护装置可以用做传统组网方式的保护/测控装置使用,仅在装置设置的某些控制字上有些不同。

4 结语

本文的技术方案作为国家电网公司重点科技项目的研究成果已经成功应用于苏州 110 kV 沈巷变电站的智能化改造,并已投入实际运行。所提出的分布式同步组网技术的应用大大提高了过程层网络的可靠性,消除了全站采样值对站内统一时钟系统的依赖性,进一步推动了智能变电站的建设水平。

与传统采样值组网方案相比,本文方案的长处在于不依赖全局同步系统,从而克服了传统组网技术中使用全局同步系统存在的可靠性隐患,消除了全站采样值对站内统一时钟系统的依赖性,也在一定程度上降低了对站内时间同步系统的配置要求,从而有利于降低建设成本、改进运行水平。该技术对变电站保护装置具有一定的要求,实际应用中需要对保护装置进行相应的升级,因此更适用于新建或改建的智能变电站。此外,该技术对合并单元的晶振也具有一定的精度要求。

附录 讨论

审稿人意见:

1)点对点采样同步技术、采样值组网同步技术都很成熟。采样值组网同步技术由于依靠外部时钟源,造成不能严格遵守保护的 $N-1$ 原则。目前主流模式是点对点采样同步技术。由于 IEEE 1588 协议对时技术存在稳定性问题,目前主要采用 B 码校时技术。保护装置采用慢跟进校时技术校正误差,避免校时产生较大的扰动,造成保护误动。文中所提的方案对于母差保护来说过于复杂,而且没有

考虑交换机的校时对保护的扰动问题。

2)作者所提出的分布式同步的理念充分利用了 IEEE 1588 协议对时的原理,且通过组网的方式来实现对时同步。但 IEEE 1588 协议对时原理中的最佳主钟算法要求一个网络只有一个主钟,作者所述方案中一个网络中出现多个主钟,从作者所述的 IEEE 1588 协议对时原理来看,并未涉及同一网络多主钟共存的改进方法。

3)对于跨间隔的保护,需要实现多个间隔数据之间的同步,作者将不同间隔数据的同步工作交由保护装置来处理,这对作者分布式同步的观点来说是一个较好的处理方式,有效回避了分布式同步涉及跨间隔数据同步问题。这种方式在一定程度上确实可行,但从可靠性来讲却存在问题。现行集中式同步模式下,跨间隔数据在网络传输模式下自身是同步的,虽然网络延迟或丢包等原因导致报文异常,但保护装置却可根据采样点号进行跨间隔数据同步,从一定程度上看,现行集中对时模式下,数据的发送方实现同步是关键,而保护自身的重采样或再同步是有效的补充;而作者所述方式下,将跨间隔数据的同步工作全部交由保护装置(即数据的接收方),这无疑加大了现有保护的升级改进工作,且过于依赖保护,可靠性相对较低。

4)对于作者所提及的保护内部实现跨间隔数据的同步方法还存在一定的技术问题。同步保护装置内部自身的采样脉冲与多个从钟之间的时差进行对比,并根据时间差进行自动调节的确可以解决数据同步问题,但这存在严重的技术缺陷,即这要求两者之间的时间差必须小于一个采样脉冲。但实际上,由于合并单元、保护装置各自的时钟晶振各自运行且得不到校正,若其中一个合并单元的晶振相对较慢,当其滞后或超前一个采样间隔后,此时光靠比对脉冲已经很难准确保障时间窗口了。另外,由于保护装置自身的时间晶振也无法接收对时,晶振有误差,若合并单元和保护装置保证同幅度的时间偏移,作者所述的方式倒是具有可行性,但由于实际上是装置各自独立运行,就可能存在合并单元、保护装置的时钟有的变快、有的变慢,其结果就是经过较长一段时间后,保护装置最终的数据窗调整会存在错误。例如,在无外部对时情况下,80 点/周期的采样率会出现 3 999 点/s 的采样数据或者 4 001 点/s 的采样数据,此时若仅通过调整采样点数或者采样脉冲数未必就能实现同步,原因就在于在长时间无对时校正的情况下,晶振的误差会逐渐累积并放大。这也是当前集中式同步模式下,采样数据一定要在秒脉

冲到来时清零的原因所在。因此,作者此处所述方法的关键问题是合并单元、保护装置均无法作为参照时标,导致作者所给出的同步机制存在问题。相反,若能够将保护装置的时钟进行实时校正(或保护装置的内部脉冲在误差范围内是精准的),那么作者图 8 的论述或许是可行的。

5)作者所提出的分布式同步方法对间隔层设备的改动较大,增加了保护、测控装置的复杂程度,而对于单线路间隔的保护、测控设备,这些改动是完全不必要的;而对于母线保护、变压器差动保护等,其改动就异常复杂,工程推广较为困难。

作者答复:

1)由于交换机不存在校时,仅作为透明时钟,传递其自身存储转发报文所产生的延时时间,故本文不考虑交换机校时对保护的扰动问题。

2)该方法并不使用最佳主钟算法,每个从钟固定跟踪所配置的主钟即可。本文所提方案中采样值接收设备(如保护/测控装置)根据采样数据来源合并单元的个数自动扩展实现多个从钟,每个从钟对应于一个合并单元,跟踪相对应合并单元的主钟。

3)本方法仅需在合并单元上增加简单 IEEE 1588 协议主钟,在合并单元中实现多个从钟,仅为软件功能的增加,简便易行,因此不存在可靠性降低的问题。

4)本文方案在保护测控装置内部设有一个全局的内部采样脉冲,利用各从钟之间的相对时差及通道固定延迟,折算出对应的等分同步脉冲序号,采用逐点可移动动态数据窗,利用回溯插值算法,实现多个未经外同步的采样值输出设备的采样数据在一个采样值接收设备内的同步。由于晶振的频率远远高于数字采样频率,其稳定度小于 5×10^{-6} 即可。保护测控装置对每个合并单元的晶振跟踪测频,采用卷绕计数法,避免了误差累计问题。

5)该方法主要针对单装置接收多个采样值的跨间隔保护,应用于如主变差动、母差、多侧后备合一等保护中,发挥采样值组网传输的优势,使资源共享方便。

参考文献

- [1] Q/GDW 383—2009 智能变电站技术导则[S].2009.
- [2] Q/GDW 679—2011 智能变电站一体化监控系统建设技术规范[S].2011.
- [3] 辛耀中,王永福,任雁铭,等.中国 IEC 61850 研发及互操作试验情况综述[J].电力系统自动化,2007,31(12):1-6.
XIN Yaozhong, WANG Yongfu, REN Yanming, et al. Survey on research, development and interoperability test of IEC 61850

- in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 1-6.
- [4] 肖世杰.构建中国智能电网技术思考[J].电力系统自动化,2009, 33(9):1-4.
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [5] 姚建国,杨胜春,王珂,等.智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化,2012,36(21):1-7.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “Source-Grid-Load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-7.
- [6] 邱智勇,陈健民,朱炳铨.基于 IEC 61850 标准的 500 kV 三层结构数字化变电站建设[J].电力系统自动化,2009,33(12): 103-107.
QIU Zhiyong, CHEN Jianmin, ZHU Bingquan. Practice of building 500 kV three-level digital substation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 103-107.
- [7] 樊陈,倪益民,沈健,等.IEEE 1588 在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中的应用[J].电力系统自动化,2011,35(6):55-59.
FAN Chen, NI Yimin, SHEN Jian, et al. Research on the application of IEEE 1588 in the merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 55-59.
- [8] 冯亚东,李彦,王松,等.IEC 61850 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 IEC 61850-9-2 sampled value transmission in digital substation protections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 82-85.
- [9] Q/GDW 441—2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 2010.
- [10] 刘益青,高厚磊,魏欣,等.智能变电站中过程层和间隔层功能一体化 IED 的设计[J].电力系统自动化,2011,35(21):58-62.
LIU Yiqing, GAO Houlei, WEI Xin, et al. Design of IED with integrated functions of process level and bay level in intelligent substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 58-62.
- [11] IEEE 1588 Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. 2002.
- [12] 樊陈,倪益民,窦仁辉,等.智能变电站过程层组网方案分析[J].电力系统自动化,2011,35(18):67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [13] 刘慧源,郝后堂,李延新,等.数字化变电站同步方案分析[J].电力系统自动化,2009,33(3):55-58.
LIU Huiyuan, HAO Houtang, LI Yanxin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 55-58.

赵家庆(1963—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化的研发、建设运行和技术管理。

徐春雷(1976—),男,高级工程师,主要研究方向:调度自动化系统运行管理。

高宗和(1962—),男,高级工程师,主要研究方向:电力

系统分析与控制。

钱科军(1981—),男,通信作者,博士,主要研究方向:电力系统自动化系统研发和管理、可再生能源发电并网、智能电网与电动汽车。E-mail: kejunqian@163.com

(编辑 蔡静雯)

A Networking Technology for Sampled Values in Smart Substations Based on Distributed Synchronization Method

ZHAO Jiaqing¹, XU Chunlei², GAO Zonghe³, QIAN Kejun¹, LI Cheng⁴, DING Hongen¹

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

4. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Based on a thorough study on the networking schemes for sampled values transmission in the process layers in smart substations, the point-to-point scheme and the interchanger networking scheme are analyzed in detail. Then the major characteristics of existing networking schemes are summarized and analyzed. In light of the shortcomings of existing networking schemes, a new networking scheme for sampled values in smart substations based on distributed synchronization is proposed. Compared with conventional networking schemes, the technology proposed does not depend on the global synchronizing system, thus significantly improving the reliability of the process layer networking. This scheme has been successfully applied in the 110 kV Shenxiang substation in Suzhou, China.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: smart grid; smart substation; process layer; Ethernet; networking technology; IEEE 1588