

基于电压锁相网络化采样的母线保护研究

韩冰¹, 汤汉松², 刘斌¹, 周东顶², 郑发林¹

(1. 广西电网电力调度控制中心, 广西 南宁 530022; 2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要: 设计一种既具备结构简单、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的母线保护, 在数字化变电站的建设中具有十分重要的意义。介绍了数字化变电站母线保护的采样值传输系统, 描述了基于绝对延时的点对点母线保护技术, 提出了一种基于电压锁相的网络化母线保护方案。利用母线电压天然的同步性能特征, 通过数字锁相环及采样重插值技术, 消除网络化采样对同步信号的依赖性。测试表明, 基于电压锁相的网络化母线保护采样同步性好, 动作快速可靠, 是数字化变电站母线保护的一种新思路。

关键词: 数字化变电站; 绝对延时时间; 数字式锁相环; 网络化采样; 母线保护

Networking sampling busbar protection based on voltage phase lock

HAN Bing¹, TANG Hansong², LIU Bin¹, ZHOU Dongding², ZHENG Falin¹

(1. Guangxi Electric Power Dispatching Control Center, Nanning 530022, China; 2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: A sampling value network transmission bus protection independent of outside global synchronization system is designed. The protection has the advantages of simple structure, resource sharing and good expansibility, so it has very important significance in the construction of digital substation. This paper introduces the sampling transmission system of bus protection in digital substation, describes a point-to-point bus protection technology based on absolute delay, and proposes a network bus protection using voltage phase lock. The synchronization performance of bus voltage, digital phase locked loop and resampling interpolation are used to eliminate the synchronization dependence in network sampling system. Experiments show that the bus protection based on voltage phase lock is well synchronous, fast and reliable. This method is a new solution for the bus protection of digital substation.

Key words: digital substation; absolute delay time; DPLL; network sampling; busbar protection

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0109-06

0 引言

母线保护需采集多个间隔的电量, 所有这些量的采集都要严格同步。不仅要求各电子式互感器与相应的MU同步, 而且要求母线保护能对接入的各MU输出量进行同步^[1-2]。数字化变电站建设初期, 母线保护采样值传输采用传输延时固定的FT3点对点方式, 该方案虽然较好的解决了母线保护同步问题, 但点对点方式不仅造成布线复杂, 而且对数据分析造成不便。进入智能变电站初期, 随着DL/T860-9-2应用及过程层网络架构优化, 母线保护一般采用组网采样技术^[3]。组网采样的母线保护, 根据采样计数器实现各MU采样同步, 其安全性及可靠性与同步信号息息相关, 一旦同步信号出现异常就有可能导致母线保护的不正确动作行为, 这给数

字化变电站的安全运行带来了巨大的隐患^[4-5]。为实现母线保护采样同步而不依赖于同步信号源, 且可以借用通用工具进行数据分析, 现阶段母线保护折衷采用基于DL/T860-9-2协议的点对点直采方式^[6-7]。

数字化传输的本质是一种基于时域的离散数字量传输, 其区别于模拟量传输之处在于数字化传输是值域固定而时域离散的传输, 模拟量传输是一种时域连续值域存在误差的传输^[8]。

目前电子式互感器以及合并单元按照点对点传输技术的实施, 已经可以很好地控制其输出报文的时间特性, 绝对延时、时间离散度均可以满足现有保护的同步采样的技术要求^[9-10]。采样值网络化传输方案中, 目前仅剩网络设备交换机在报文传输过程中的时间特性具有固定延时及离散性。所以如果母线保护采用锁相技术消除由于交换机传输所带来

的报文传递离散性，再利用其电压天然的同步性能对其传输过程中产生的固有延时进行修正就可以在不改变现有网络架构下实现母线保护基于绝对延时的同步。本文针对现有的数字化变电站母线保护采样值点对点传输技术和基于同步信号的网络化传输技术进行分析，提出电压锁相网络化采样的母线保护的实现方法，并对应用该技术的母线保护进行动模试验，以论证这种技术实现的可能性。

1 数字化变电站母线保护采样值传输

1.1 数字化变电站采样值点对点传输系统

采样值点对点传输系统如图1所示，合并单元的输出通过光纤直接与保护测控、计量及自动安全装置相连。

点对点连接时，合并单元与保护测控装置均不需要接入同步信号，合并单元按照规定的采样频率定时采样，并经 $\Delta t_n = \sum_{k=1}^6 \Delta t_{n(k)}$ 固定延时后发送该采样时刻的采样值报文，同时在采样值报文中附上这个延时值。现阶段合并单元硬件普遍采用 FPGA 来实现以太网的发送，由 FPGA 完成以太网的 MAC 子层、MAC 子层与以太网控制器的接口设计，实现了优良的以太网数据发送时间特性，绝对延时时间控制在 2 ms 以内，报文发送离散度不超过 2 μ s。

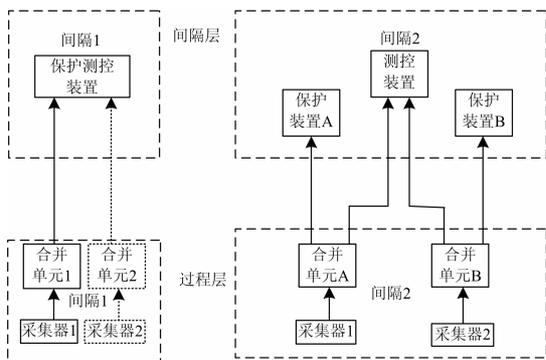


图1 采样值点对点传输系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling value PTP transmission system

虽然采样值点对点传输系统能较好地满足跨间隔设备继电保护需求，如母线保护、变压器保护等，但是点对点传输方式对接收侧设备接收端口及功耗要求较高，并且不利于系统的扩容，更不利于对运行数据的全面监测和记录。

1.2 数字化变电站基于同步信号的采样值网络化传输系统

基于同步信号的采样值网络传输系统如图2所示。相比采样值点对点传输系统，采样值网络化传

输系统结构简单、资源共享、扩展性好。

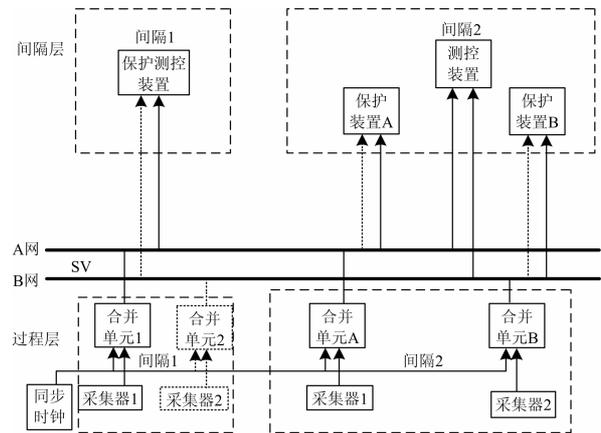


图2 采样值网络化传输系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling value network transmission system

采样值经交换机传输，一方面受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，传输延迟的抖动值较大；另一方面从交换机延时计算公式不难看出，受跨交换节点个数、帧长度、传输距离影响，采样值传输延迟时间会额外增加。因此基于绝对延时点对点技术的母线保护已不适用于组网方案。像母线、变压器等保护需要接收多个MU采样值的跨间隔保护，利用采样值报文中的采样计数器来实现同步。当同步信号故障时，该类设备都可能因缺少统一的时间参照而发生异常。

2 基于绝对延时的母线保护

2006 年底投运的杜尔伯特数字化变电站采用的基于绝对延时的 SGB750 数字化母线保护稳定运行经验表明：不依赖于同步信号、采样值点对点传输的基于绝对延时的母线保护可以较好地满足数字化变电站母线保护需求。其基本工作原理即母线保护依据自身时钟晶振频率，首先记录下各个间隔的采样值报文到达时刻，再对采样值报文中自带的各合并单元的额定延时进行补偿，最后采用插值法进行采样值同步进而完成母线保护功能^[11-12]。

基于绝对延时的点对点母线保护同步误差主要来源有二。一是采样值报文中自带的合并单元额定延时值；二是合并单元报文离散度引起的母线保护记录报文到达时刻误差。合并单元额定延时值可由合并单元厂家理论精确计算得出，额定延时值固定的情况下也可以由合并单元测试仪测量。

为了消除合并单元发送以太网数据包的时延抖

动问题, 基于绝对延时的母线保护作了相应的适应性调整, 主要包括如下几点:

1) 采用数字式锁相环实现节拍跟随, 消除合并单元发送以太网数据包的时延抖动^[13-14]。

2) 延长保护数据窗及调整差动动作门槛。随着动态范围宽、精度高、无磁饱和和特点的电子式互感器的应用, 可以不考虑CT严重饱和的因素, 在母线保护中取消过于复杂的抗CT饱和算法, 仅保留比例制动式的采样值差动保护。区外穿越性故障两路等效电流的相位差变化范围为 $120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$, 考虑最严重的情况相位差等于 120° , 按采样值差动的制动效果优于向量差动原则进行 R 、 S 值的选取, 保证差动保护的选择性和可靠性。

3) 调整CT断线判据和闭锁门槛。传统母线保护只采用差流加延时来判别CT断线, 判据差流选取原则以躲过母线各种电压情况下可能出现的最大不平衡电流, 一般取 $0.06I_n \sim 0.1I_n$ ^[15]。判别CT断线后, 会闭锁差动保护。考虑基于绝对延时的母线保护, 最大同步误差为一个以太网包采样间隔 $250 \mu\text{s}$, 由此引起的最大不平衡电流约为母线穿越电流的0.087倍, 为进一步增加冗余, CT断线差流定值调整为母线穿越电流的10%和 $0.1I_n$ 两者中的大值。随着电子式互感器的应用, CT断线判据可引入电子式互感器工作状态标志判别。

3 基于电压锁相的网络化采样母线保护

如果母线保护能消除由于交换机传输所带来的报文传递离散性, 并能对其传输过程中产生的固有延时进行修正, 那么可以在不改变现有网络架构下实现基于绝对延时的母线保护同步。受此思路启发, 本文提出基于电压锁相网络化采样的母线保护。

如图3所示, 母线保护基于电压锁相网络化采样, 包括PT合并单元、若干间隔合并单元、交换机和母线保护装置, 其中电压互感器为非组合式电流电压互感器时, 间隔合并单元的电压采样由PT合并单元提供。

核心技术及流程如图4所示。实时记录来自过程层网络的每帧采样值报文到达时刻 $\theta_1(t)$, 根据接收到的采样值报文目的地址个数认定母线保护接入的间隔数量 n , 并且根据该数量设置相同数量的数字式锁相环, 用以消除采样值经过交换机带来的随机抖动, 从而得到每帧采样值报文理想到达时刻 $\theta_2(t)$, 根据采样数据的到达时刻 $\theta_2(t)$ 以及采样值进交换机前的固定的传输延时 Δt_n , 计算电子式互感器的采集时刻(含交换机传输延时) θ_3 , 对各个间隔的电压实时采样数据序列进行傅立叶变换, 提取

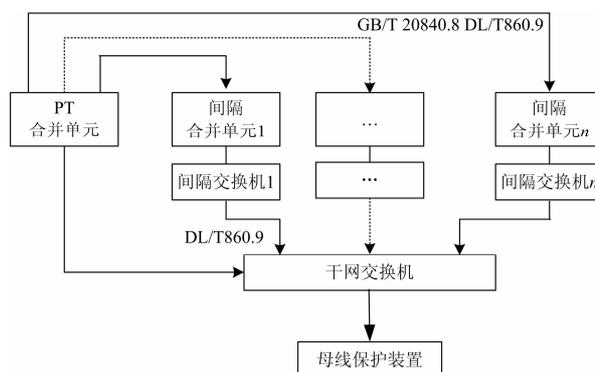


图3 母线保护基于电压锁相网络化采样连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the sampling voltage busbar protection connected network based on PLL

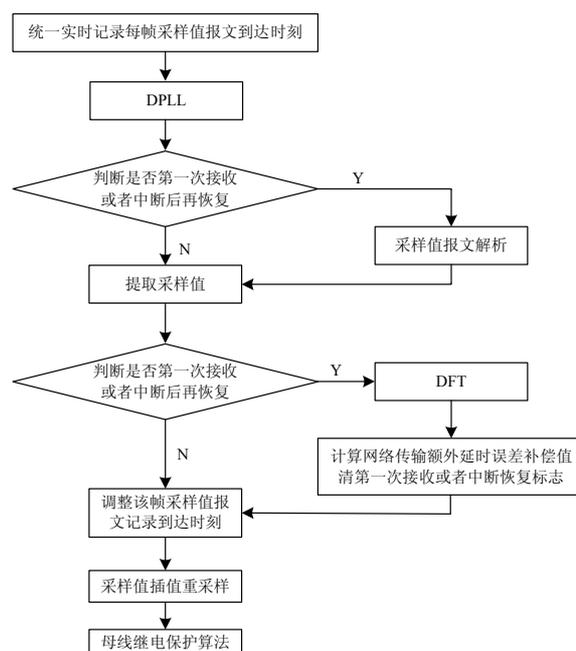


图4 母线保护基于电压锁相网络化处理流程

Fig. 4 Busbar protection process sampling voltage network based on PLL

出电压采样值基波信号的相位和频率。利用同一母线上所联接间隔的电压相位差和基波频率, 计算消除各个间隔合并单元经交换机产生的绝对延时误差 Δt_n 。修正电子式互感器的采集时刻 $\theta_4(t)$, 最后对数据源序列进行整理和插值同步, 完成保护用数据源采样。

3.1 网络化传递离散度的消除

母线保护要接收母线上所有间隔的合并单元采样值数据, 必须考虑所有间隔的采样值数据同时到达的极端情况。现代交换机发生帧冲突时均采用排队方式顺序传送, 使得合并单元采样值输出数据帧

经过交换机到达保护装置时,存在一定的随机时间抖动,即采样值报文的到达时刻 $\theta_1(t)$ 是带有随机抖动的。为了解决上述问题,一方面控制母线保护同一个接收端口的SV数量不超过5个,另一方面采用数字式锁相环(DPLL)的原理对时标 $\theta_1(t)$ 进行消抖,得到最终时标 $\theta_2(t)$ 。数字式锁相环原理示意图如图5所示。

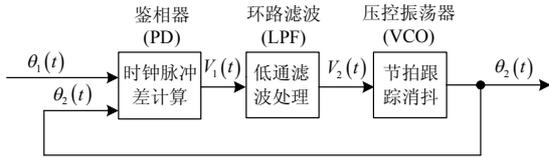


图5 DPLL 进行时延的消抖
Fig. 5 DPLL shake eliminating delay

原始采样值报文的到达节拍构成 DPLL 的初始输入量 $\theta_1(t)$,在 DPLL 启动初始时, $\theta_2(t) = \theta_1(t)$ 。不论是累计误差或是时延抖动造成的 $\theta_1(t)$ 与 $\theta_2(t)$ 的失步,均由鉴相器完成两者时间差值计算。该差值作为环路滤波器的输入量 $V_1(t)$,设计一个 IIR 型低通滤波器来保证良好的跟踪速度和稳定性,滤波输出为 $V_2(t)$ 。作为压控振荡器的输入量,按其幅值的大小来确定跟踪调节步长,在不超过 1 s 的时间内完成 $V_2(t)$ 的整个跟踪过程,以上环节在 DPLL 的运行中连续循环进行。

3.2 交换机绝对延时修正

合并单元初次接入或者中断恢复时,根据采样数据的到达时刻 $\theta_{2x}(t)$ 以及采样值固定的传输延时 Δt_{mx} ,计算采样数据的采集时刻 $\theta_{3x}(t)$,即采样数据的采集时刻为式(1)。

$$\theta_{3x}(t) = \theta_{2x}(t) - \Delta t_{mx} \quad (1)$$

式中, x 表示合并单元序号,取值范围是:1,2,...,n。

利用对经消抖和延时补偿处理的采样数据序列进行快速傅里叶变换,计算各接入的间隔合并单元的电压相位 ϕ_x 和频率 f ,取 PT 合并单元的 A 相电压相位 ϕ_a 为基准相位 ϕ_{min} (如 A 相失压,则 B、C 相依次选取),计算各接入的间隔合并单元的偏移相位差 $\Delta\phi_x$ 为式(2)。

$$\Delta\phi_x = \phi_x - \phi_{min} \quad (2)$$

根据偏移相位差 $\Delta\phi_x$ 与频率 f ,计算各间隔合并单元经交换机产生的额外延时 Δt_{ax} 。

$$\Delta t_{ax} = \Delta\phi_x / f \quad (3)$$

经交换机产生的额外延时 Δt_{ax} 的测算,只在合并单元初次接入或者中断恢复时进行,其他时间直接使用该值修正接入的各合并单元的采样时刻

$\theta_{4x}(t)$,即

$$\theta_{4x}(t) = \theta_{3x}(t) - \Delta t_{ax} \quad (4)$$

通过上述方法虽然不能准确测量经交换机传输带来的网络绝对延迟时间,但是能够准确测量经交换机造成的不同间隔间相对延迟时间,从而实现消除经交换机传输带来的同步误差。为尽可能地减小经交换机带来的固有延时造成母线保护动作延迟,建议将网络化采样的母线保护采样系统控制在两级星形拓扑结构规模以内。

3.3 重采样插值冗余处理

为了能够在网络化传输带来离散度偏大或者发生单点丢包时也能正确重采样,必须每点回溯一个固定的时间常数TB, TB的时间长度宜选择N个以太网包的时间间隔(考虑一定的边界裕度),这样可保证当合并单元发送以太网包丢包个数小于N时也能正确插值采样^[12]。目前数字化变电站的合并单元采样输出频率普遍为4 000 Hz,每周波80点,以约250 μs的时间间隔连续发送采样值报文,综合考虑母线保护的容错机制及保护整体动作延时,N取2。

3.4 基于电压锁相网络化采样的母线保护实现

如图6所示,母线保护装置配置报文处理和保护逻辑双处理板,报文处理板采用 POWERPC 和 FPGA 双 CPU 架构,利用 FPGA 对每个采样值进行精确时间标定,FPGA 良好的时序控制能力能将接收环节的时间抖动控制在纳秒级别,FPGA 将接收到的以太网采样值报文数据通过双口 RAM 交互给报文处理器,报文处理器执行如图4所示处理流程,通过内部数据总线,定时把同步好的各间隔合并单元数据传输给保护处理器,保护处理器进行母线继电保护突变量启动、比例制动、CT 断线判别算法运算,实现母线保护逻辑功能、出口控制。

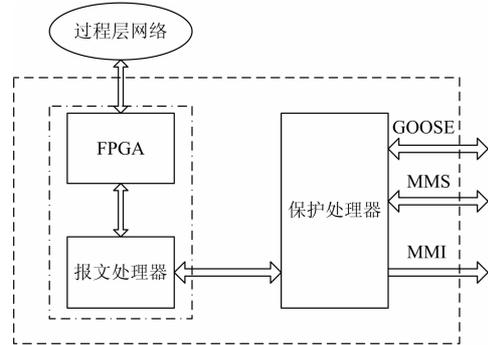


图6 网络化采样母线保护系统架构示意图
Fig. 6 Networked busbar protection system architecture diagram

4 测试结果

4.1 基于网络化采样传输的绝对延时测试

将以上方法应用于合并单元的网络化采样的延时测试系统, 如图7所示。模拟信号源采用 SP33G 继电保护测试仪, 合并单元选用目前国内三个主要厂家的 MU。思博伦 smartbit600 网络性能分析仪模拟 4 个合并单元的输出, 仿真交换机因为流量导致帧排队的运行环境, 网络负载率 40%, 交换机选用两台 MOXA PT7728。

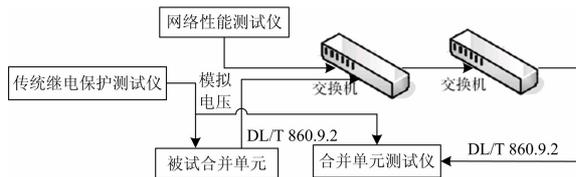


图7 合并单元组网延时测试接线图

Fig. 7 Wiring diagram of delay test for the networked merging unit

继电保护测试仪输出 57.7 V 模拟电压同时接入 MU 和测试系统的模拟量输入通道, 采用绝对延时法依次对三个厂家的 MU 展开连续两小时不间断测试, 测试结果见表 1。从中可以看出, 经跨两个交换节点后, 三个厂家的 MU 群延时额外增加了 157.3~158.1 μs(报文长度有差异), 该时间与交换机固有延时理论计算值 $T_{TOTAL} = 9.0 \times 2 + 0.4 \times 121.76 \times 2 + 20.48 \times 2 + 0.5 \div 0.2 = 158.868 \mu s$ 基本吻合, 验证了所提出方法的有效性与实用性。

表 1 网络化传输测试结果数据

Table 1 Result data of network transmission test

时间指标/μs	厂家 1	厂家 2	厂家 3(PT)
交换机抖动	-49~48	-48.5~48.5	-48.7~48.7
群延时均值	1 660.7	1 502.3	909.4
交换机延时	158.1	157.3	157.7

4.2 母线差动保护数字动模测试

对图8所示接线形式的220 kV母线进行数字动模测试, 由SSTIII-700变电站仿真试验系统模拟5路MU输出对母线保护进行验证。故障前差流稳定在 $0.03I_n$ 。

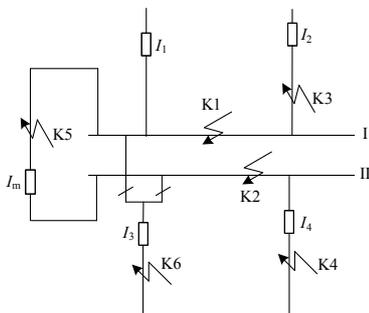


图8 220 kV母线接线图

Fig. 8 220 kV bus wiring diagram

在K1、K2、K3、K4点模拟金属性故障, 在K1、K2点模拟经接地电阻、弧光电阻短路故障, 在K6与K1、K6与K2、K1不同相之间模拟转换性故障, 在K5点模拟死区故障。测试结果证明保护动作逻辑正确, 保护动作时间小于18 ms。

5 结语

基于电压锁相网络化采样的母线保护, 在基于绝对延时的母线保护已经利用数字式锁相环消除了合并单元网络传输时延抖动的基础上, 增加利用电压天然的同步性能对其传输过程中产生的固有延时进行修正, 从而实现不依赖于同步信号、网络化采样的母线保护。

通过将该技术应用于合并单元网络化采样的绝对延时测试和对利用该技术的母线保护进行动模试验可以看出, 基于电压锁相的网络化采样的母线保护技术是可行的、实用的。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王攀峰, 张克元, 文明浩, 等. 应用于数字化变电站的分布式母线保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 68-71.
WANG Panfeng, ZHANG Keyuan, WEN Minghao, et al. Research on distributed busbar protection applied to digital transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 68-71.
- [3] 梁国坚, 段新辉, 高新华. 数字化变电站过程层组网方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 39(2): 94-98.
LIANG Guojian, DUAN Xinhui, GAO Xinhua. Networking schemes for process level of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 39(2): 94-98.
- [4] 赵家庆, 徐春雷, 高宗和, 等. 基于分布式同步方法的智能变电站采样值组网技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 60-65.
ZHAO Jiaqing, XU Chunlei, GAO Zonghe, et al. A networking technology for sampled values in smart substations based on distributed synchronization method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 60-65.

[5] 李澄, 袁宇波, 陆玉军, 等. 智能变电站分布式同步采样组网技术[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 49-54.
LI Cheng, YUAN Yubo, LU Yujun, et al. A networking transferring scheme of distributed synchronized sampled data for smart substation[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 49-54.

[6] 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.

[7] 王晓晨, 黄继东. 基于直采直跳模式的智能变电站的母线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 150-154.
WANG Xiaochen, HUANG Jidong. Practical research on point-to-point model of bus protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 150-154.

[8] 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.

[9] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.

[10] 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.
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.

[11] 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.

[12] 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.
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.

[13] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.
LI Cheng, YUAN Yubo, LUO Qiang. Research on interfacing technology for digital protection based on ECT/EVT[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 84-87.

[14] 郭乐. 基于锁相环技术的数字化变电站采样系统同步方案[J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 81-84.
GUO Le. A synchronization scheme of the sampling system in digital substation based on software phase-locked-loop technology[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(3): 81-84.

[15] 汪思满, 周小波, 唐治国, 等. 智能变电站中自适应同步的母线保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 61-65.
WANG Siman, ZHOU Xiaobo, TANG Zhiguo, et al. Adaptive synchronization busbar protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 61-65.

收稿日期: 2014-09-03; 修回日期: 2015-03-24

作者简介:

韩冰(1972-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护现场运行技术管理工作; E-mail: han_b.dd@gx.csg.cn

汤汉松(1974-), 男, 本科, 工程师, 从事智能电网技术研究和电子式互感器相关技术研究; E-mail: xsunson@163.com

刘斌(1986-), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护现场运行技术管理工作; E-mail: liu_b.dd@gx.csg.cn

(编辑 魏小丽)