

# 一种基于 EPON 的时钟同步协议在配网多端 差动保护中的应用

许永军<sup>1</sup>, 金乃正<sup>2</sup>, 叶志锋<sup>1</sup>, 朱玛<sup>2</sup>, 张志成<sup>1</sup>

(1. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 配网线路分支线路多、拓扑复杂, 将传统差动保护用于配网线路时存在投资成本大、管理复杂的缺点。在基于EPON的配网自动化系统中, 如借用EPON通道实现配网线路的多端纵联差动保护, 可解决上述问题, 但其采样值同步是一个难点。针对EPON通信的固有特点, 设计了一种类似于IEEE 1588的时钟同步协议, 该协议简化了IEEE 1588主从时钟的交互机制, 可使网络内各设备的时钟与主设备同步, 精度能满足配网线路多端差动保护的要求。经试验验证, 该方法可解决EPON通信条件下的设备时钟同步问题。

**关键词:** 智能配电网; IEEE 1588; 时钟同步; EPON; 多端纵联差动保护

## Research and application of EPON based clock synchronization protocol in the multi-terminal differential protection of distribution line

XU Yong-jun<sup>1</sup>, JIN Nai-zheng<sup>2</sup>, YE Zhi-feng<sup>1</sup>, ZHU Ma<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-cheng<sup>1</sup>

(1. CYG SUNRUI Co., Ltd, Shenzhen 518057, China; 2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** The distribution line possesses many branch lines and complex topological structure, so applying the traditional differential protection to distribution line will cause big investment cost and complex management. The distribution automation system based on EPON will overcome these shortcomings by using EPON channel to realize the multi-terminal differential protection, but the sampling value synchronization is a difficult point. Aiming at communication features of EPON, this paper introduces a clock synchronization protocol similar to IEEE 1588. It simplifies the interaction mechanism of IEEE 1588 master-slave clock, and realizes the clock synchronization between the main device and slaves. The accuracy can meet the demand of distribution line multi-terminal differential protection. Tests show the proposed method can solve the problem of clock synchronization under the EPON communication.

**Key words:** smart distribution grid; IEEE 1588; clock synchronization; EPON; multi-terminal longitudinal differential protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0039-06

## 0 引言

EPON (Ethernet Passive Optical Network, 以太网无源光网络) 技术属于 PON 系列技术中应用最广泛的一种, 由 IEEE802.3 提出, 它将以太网技术与 PON 技术结合起来, 物理层采用 PON 技术, 链路层采用以太网协议, 利用 PON 的拓扑结构实现了以太网的接入, 具有维护简单、管理方便的优点。EPON 系统主要由 OLT (Optical Line Terminal, 光线路终端)、ONU (Optical Network Unit, 光网络单元)、ODN (Optical Distribution Network, 光分配网络) 三部分组成, 采用数据复用的通信方式, 利用

WDM (Wavelength Division Multiplexing, 波分复用) 技术实现单纤双向传输, 上行数据流采用 TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址) 技术, 下行数据流采用广播技术<sup>[1]</sup>。

传统配电网自动化系统中, 由于线路拓扑复杂, 一般只在变电站出线端配置过流保护<sup>[2]</sup>。配电线路出现故障时, 过流保护动作切除整条线路的供电, 另外再通过配网终端和配网主站配合的 FA (Feeder Automation, 馈线自动化) 功能来实现故障的定位、隔离和恢复, 这种解决方案存在动作区域扩大, 故障自愈速度慢的缺点。在基于 EPON 的配电自动化系统中, 依托 EPON 通信网络, 通过在

配网终端中集成多端差动保护功能, 将复杂的线路拓扑细分为多个多端线路差动保护区, 如图 1 所

示, 能实现故障的精确定位与隔离, 极大的提高配电网线路的供电可靠性<sup>[3]</sup>。

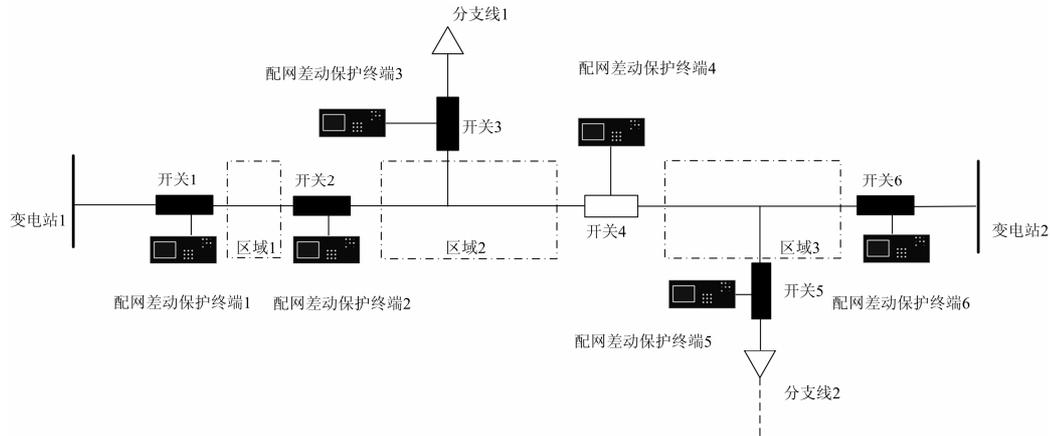


图 1 配网线路拓扑、配网保护终端配置与差动保护区划分示意图

Fig. 1 Zoning diagram of distribution network topology, distribution protection terminal configuration and differential protection

EPON 网络由于其自身特性, 存在传输延时不稳定的缺点, 连续两帧离散度偏差在  $\pm 5 \mu\text{s}$  之内的 SV 报文, 经 EPON 通信系统 (ONU、分光器、OLT) 后, 到达接收端的最大间隔为  $1424 \mu\text{s}$ , 最小间隔为  $28 \mu\text{s}$ <sup>[2]</sup>, 随机性很高。由于 EPON 网络这个特性, 造成配网保护终端间交互的采样值报文间隔具有很大的离散性, 因此目前已有的 IEEE 1588 时钟同步协议也无法直接使用。针对这些问题, 本文研究了一种基于 EPON 网络的时间同步方案, 该方案采用类 IEEE 1588 时钟同步协议的技术, 能够解决传输延时不稳定对时钟同步的影响, 使配网差动保护终端接收到的各侧采样值达到同步。

## 1 时钟同步方案设计

### 1.1 标准 IEEE 1588 协议

IEEE1588 协议是专门针对网络测控系统等工业以太网提出的精确时钟同步协议 (PTP, Precision time protocol), 通过软、硬件的辅助可以达到亚微秒级的同步精度, 很好的满足了电力控制系统以太网的应用要求。

IEEE 1588 协议定义的 4 种同步所必须报文类型分别是 Sync 报文、Delay\_Req 报文、Follow\_up 报文、Delay\_Resp 报文<sup>[2]</sup>。PTP 系统中的从时钟通过与主时钟交换上述 4 种报文, 从中获取时间戳, 计算出与主时钟的时间偏差, 根据偏差来调整自己的时钟, 从而达到与主时钟的时钟同步<sup>[3]</sup>。在 PTP 系统中, 影响各时钟同步的因素有两个: 一是各时钟的性能所引起的时间偏差, 二是由于各种报文在网络中传输所引起的网络延迟不一致。整个同步原

理如图 2 所示。

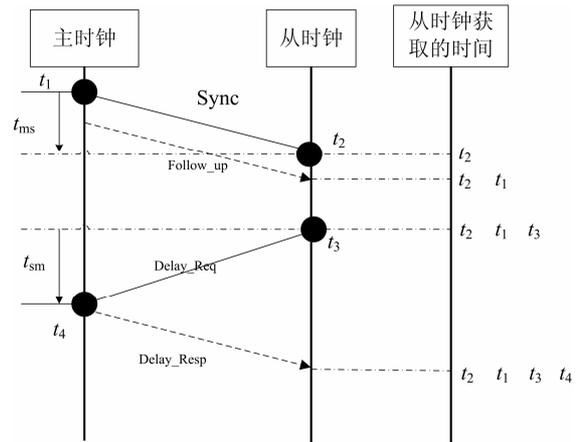


图 2 IEEE1588 时钟同步机理

Fig. 2 IEEE1588 clock synchronization theory

主时钟周期发送包含时钟质量的 Sync 消息, 紧接着发送 Follow\_Up 消息通告上个消息的实际发送时间  $t_1$ ; 从时钟记录 Sync 消息的到达时间  $t_2$ , 紧接着在  $t_3$  时刻发送 Delay\_Req 消息; 主时钟记录消息到达时间  $t_4$ , 并发送消息 Delay\_Resp 把  $t_4$  告知从时钟。从时钟根据 4 个时间信息可以计算出两个时钟的偏差 Offset 和传输延迟 Delay。设主时钟到从时钟的线路延时为 Delay1, 从时钟到主时钟的线路延时为 Delay2, 计算过程如下:

$$\begin{aligned} T_1 + \text{Delay1} + \text{Offset} &= T_2 \\ T_3 + \text{Delay2} + \text{Offset} &= T_4 \end{aligned} \quad (1)$$

假设主从之间的消息往返延迟是对称的, 即有  $\text{Delay1}=\text{Delay2}$ , 进而有:

$$Delay = \frac{[(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)]}{2} \quad (2)$$

$$Offset = \frac{[(t_2 - t_1) + (t_3 - t_4)]}{2}$$

从时钟根据计算得到的 Offset 值便可以调整本地 PTP 时钟, 实现与主时钟的同步。

### 1.2 基于 EPON 的类 IEEE 1588 同步校时协议

由于 EPON 网络传输延时的不稳定, 公式 1 中的 Delay1、Delay2 不固定且不相等, 因此上述标准 IEEE 1588 校时协议并不能适用于 EPON 网络。

EPON 网络采用时分复用的方法实现上行、下行数据在同一条光纤中传输, 使得任意两个节点的交互报文会被所有节点同时接收到。根据该特点, 类 IEEE 1588 校时协议同步机理如图 3 所示。

由图 3 可知, 配置为主时钟的保护装置通过

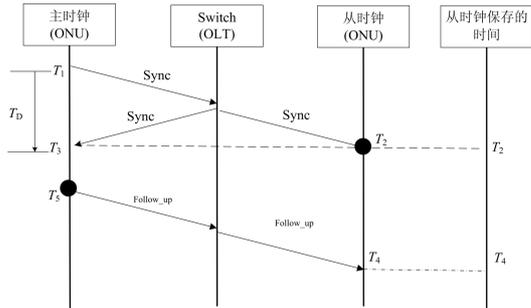


图 3 类 IEEE1588 时钟同步机理

Fig. 3 IEEE1588 type clock synchronization theory

ONU(Optical Network Unit)节点直接与 OLT(Optical Line Terminal)交换中心相连, 实现与其它所有节点(包括本节点)的报文交互。首先, 主时钟在  $T_1$  时刻发送 Sync 同步报文, 对侧从时钟在  $T_2$  时刻(从时钟当时时刻)接收到该报文并记下此时时刻  $T_2$ 。主时钟侧在  $T_3$  时刻(主时钟当时时刻)也接收到自己的发送出去的 Sync 报文时( $T_2$  和  $T_3$  在绝对时间上一致), 随后发送一个保存着  $T_D$  数据的 Follow\_up 报文给对方, 从时钟接收到该报文就可以进行以下计算<sup>[4-5]</sup>。

$$T_D = T_3 - T_1 \quad (3)$$

$$T_{SET} = T_1 + T_D + (T_4 - T_2)$$

$T_{set}$  即为从时钟需要调整的绝对时间。该方案直接舍弃了延迟请求报文与延迟请求报文响应的交互, 整个同步过程只需要两次报文交互、2 个时间戳记录就可以实现与主时钟的同步。

## 2 同步系统设计

### 2.1 系统同步结构

基于 EPON 的系统时间同步结构图如图 4 所示, 线路各侧的配网差动保护终端通过网口与 ONU 相连, 进而通过 EPON 网络中的 OLT 进行报文数据的转发。终端内的 CPU 对 1588 同步报文的收发进行控制, 从而实现类 1588 同步校时功能, 再配合高精度晶振完成对采样数据报文收发和 A/D 采样脉冲的控制<sup>[6]</sup>。

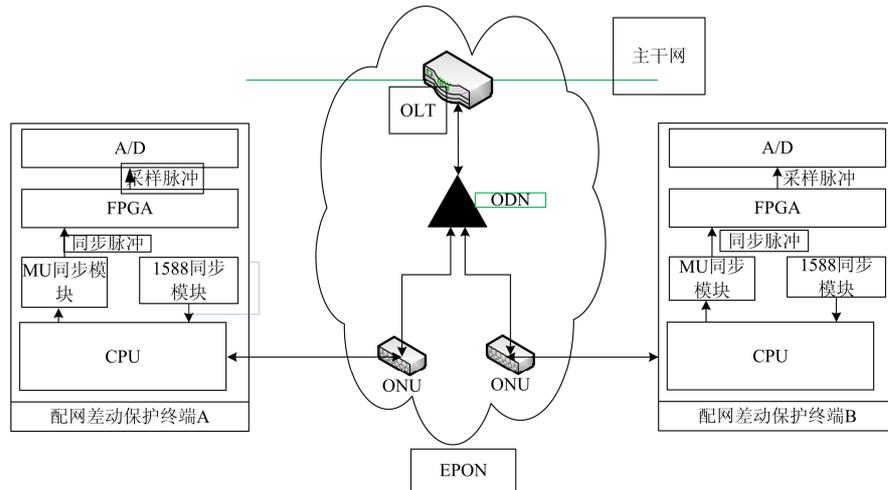


图 4 系统同步结构示意图

Fig. 4 System synchronization structure diagram

### 2.2 类 1588 同步校时流程

本文提出的类 IEEE1588 时钟同步协议提供了一种简单、精确的可应用于多端配网差动保护终端数据同步的方法, 该方案时间同步流程如图 5 所示,

包括以下步骤:

步骤 1: 与光纤通道相连的多侧配网差动保护终端分别运行类 IEEE1588 协议, 发送、接收 PTP 消息报文; 其中一侧配置为 PTP 主时钟, 其它侧为

PTP 从时钟;

步骤 2: PTP 从时钟侧根据类 IEEE1588 时钟同步协议计算本侧 PTP 时钟相对于 PTP 主时钟的偏差, 并根据计算结果微调本侧 PTP 时钟;

步骤 3: 当 PTP 从时钟同步于 PTP 主时钟时, 主从时钟通过捕捉翻转秒脉冲标志(等效于 GPS 的秒脉冲信号), 触发 A/D 采样功能启动;

步骤 4: 当各侧 PTP 时刻同步时, 每相邻的两个脉冲翻转间隔时间为 1 s。按照保护要求数据采样每周波为 80 点, 采样速率为 4000 Hz, 则采样周期为 250 μs, 各侧从捕捉到本侧当前翻转秒脉冲开始, 按照采样周期去触发 A/D 采样, 即可保证差动各侧数值是同步的。

若某侧配网差动保护终端重启或者光纤通道断开后恢复重连, 该侧终端的采样不一定与 PTP 主时钟装置保持同步, 此时进行二次采样将使得交流量存在误差, 因而需要对差动保护进行闭锁或者特殊处理。同时, 该侧终端重复步骤 1-2 过程, 在时钟同步完毕后方可开放保护。

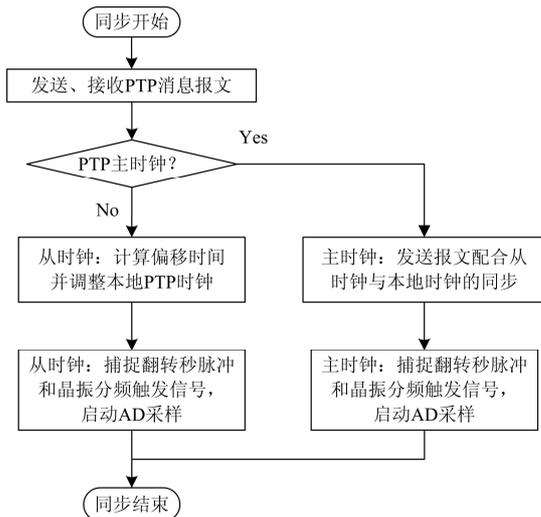


图 5 类 IEEE1588 时钟同步协议同步流程图

Fig. 5 IEEE1588 type clock synchronization protocol flow diagram

### 2.3 采样数据同步流程

配网差动保护终端装置要求采样值信息在不同配网终端间共享, 而实现共享的前提是采样数据保持时间同步。

各装置为了保证采样数据同步, 采用如下的方法: 各装置在上述类 IEEE1588 时钟同步校时成功后开始进行采样。装置内设置有采样帧计数器, 用以给每个采样数据进行编号。在秒翻转时刻采集数据的采样帧计数器固定为 0, 此后每个采样点的采

样采样帧计数器递增 1, 在下次秒脉冲来之前最后一刻, 采样帧计数器为 3999 (每秒装置共采集 4000 点采样点), 在秒脉冲的触发下采样帧计数器清零并开始下一周期的采样任务。同时数据通讯模块将采集到的采样点数据及其采样帧计数器值发送给其它装置。装置在接收到其它装置发送的采样点数据后, 将所有具有相同采样帧计数器值的采样点数据进行合并, 装置再对合并完成的数据进行继电保护逻辑运算处理。

### 3 同步误差分析

时钟同步系统的误差主要来自于时钟同步对时误差和各装置时钟晶振特性不一致两个环节。

#### (1) 类 IEEE 1588 时钟同步对时误差

本文提出的类 IEEE 1588 的同步协议相较于标准 IEEE 1588 协议, 虽然简化了实现步骤, 但也存在新的误差来源。标准 IEEE 1588 协议精确同步的前提是传输时间路径对称, 即假设同步报文收到的延迟与延迟请求报文发送的延迟相同, 主、从节点之间的双向传输时间延迟恒定且对称。本文提出的类 IEEE 1588 协议精确同步的前提是任意两个节点的交互报文会被所有节点同时接收到。而实际应用中, 由于网络风暴、光纤传输延迟等因素的影响, 各节点实际收到报文的时间会有所不同<sup>[7-8]</sup>。具体分析如下:

网络风暴会带来大量的干扰报文, 造成校时报文延迟接收或丢失。本文提出的方案必须考虑对网络风暴的处理, 而目前的 EPON 设备大多带有组播地址屏蔽、广播报文流量控制、QoS、VLAN 等功能, 能完全屏蔽网络风暴的影响, 保证校时报文的同步接收, 不会对整个系统的同步造成影响。

另外, 线路长度对时钟同步也是有影响的。一般配网线路的长度在 10 km 以内, 光的传输速度为 300000 km/s, 因此理论上 10 km 的传输延迟为 33 μs, 而实际上由于光纤中光是折射传输的, 因此延迟会略大一点。但即使是 100 μs 的延迟也只对应 1.8° 的电流相位偏差, 这个偏差对差动保护的影响是微乎其微的, 不会造成差动保护的拒动或误动。

#### (2) 晶振误差

同步系统的另一个误差来源就是晶振, 晶振受温度、电磁干扰等环境因素的影响, 输出的频率与实际的标称值会有差别, 而这些差别会影响到以晶振时钟信号触发源为基准进行的分频、触发、锁相等时序处理<sup>[9]</sup>。解决的办法有两个, 一是可以从硬件的选型上确保稳定的时钟源, 二是通过软件设计专门的频率补偿时钟模块, 以主钟晶振为基准进行

晶振频率误差实时跟踪和补偿, 利用数字电路硬件代替了模拟电路, 实现了晶振纠偏功能, 克服晶振漂移。

## 4 性能验证

依据以上同步方案, 在实验室搭建了样机系统, 样机系统包含一套 EPON 通信设备和 6 台配网差动保护终端, 如图 6 所示, 具体配置为

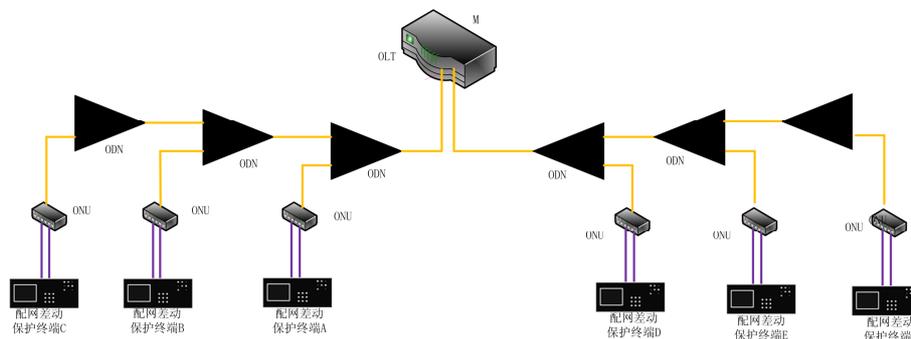


图 6 配网差动保护通信连接图

Fig. 6 Distribution differential protection communication connection diagram

EPON OLT 设备为华为技术有限公司的 MA5680T;

EPON ONU 设备为华为技术有限公司的 MA5621,

差动保护终端为长园深瑞继保自动化有限公司的 PRS-3342。

测试验证包括两部分:

### 1) 同步精度验证

PRS-3342 设备带秒脉冲输出功能, 实际测试时, 通过录波器观察校时主钟装置与从钟设备之间的秒脉冲时间差。

测试结果为: 将所有 ONU 挂到 OLT 的同一个 PON 口下时, 时间差为 2~5  $\mu\text{s}$ ; 将 ONU 挂到 OLT 的不同 PON 口下, 时间差也基本相同。

### 2) 差流计算精度测试

取两台差动保护终端, 并配置为两端差动保护模式。差动保护终端的工作原理是采集线路电流互感器的电信号, 并通过 61850 9-2 通信协议将采样值发送到对侧进行差流计算。测试方法为将两台终端的电流输入端串联, 用一台继电保护测试仪同时给两台终端加模拟量, 并观察终端的差流计算结果。

测试结果: 当模拟区外故障时, 两台装置计算出的差流值几乎都为 0, 且非常稳定; 当模拟区内故障时, 两台装置计算出的差流值为所加电流量的两倍, 也非常稳定。

通过上述两部分的验证表明, 该同步系统的同步精度完全能够满足线路差动保护的要求。

## 5 结语

本文提出了一种适用于配网线路差动保护的同步方案, 该方案适用于目前配网自动化系统中广泛采用的 EPON 通信网络。在此方案的基础上, 通过进行实际样机开发, 测试结果表明, 该同步方案完全能满足配网差动保护的要求, 并且具有实现简单, 配置方便, 不额外增加硬件投入的优点。

## 参考文献

- [1] 魏勇, 宋小会, 许伟国, 等. 智能变电站过程层网络采用 EPON 技术实用性研究[J]. 电气技术, 2011(10): 15-19.  
WEI Yong, SONG Xiao-hui, XU Wei-guo, et al. Practical research on EPON technology applied in process level network of smart substation[J]. Electrical Technology, 2011(10): 15-19.
- [2] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.  
DING Wei, HE Ben-teng, WANG Hui-fang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
- [3] 陈金熠, 范春菊, 刘玲. 不同电压等级的四回线的纵联差动保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 72-79.  
CHEN Jin-yi, FAN Chun-ju, LIU Ling. New longitudinal differential protection scheme for four-circuit transmission line with different voltage grades[J]. Power

- System Protection and Control, 2011, 39(18): 72-79.
- [4] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.
- ZHU Lin, DUAN Xian-zhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [5] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.
- LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [6] 庄玉飞, 黄琦, 井实, 等. 基于 GPS 和 IEEE 1588 协议的时钟同步装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 111-115.
- ZHUANG Yu-fei, HUANG Qi, JING Shi, et al. Development of a clock synchronization device based on GPS and IEEE 1588 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 111-115.
- [7] 胡华波, 武建文, 张路明, 等. 电信号有效值测量综合误差分析与模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 172-177.
- HU Hua-bo, WU Jian-wen, ZHANG Lu-ming, et al. Composite measurement error analysis and model research of electrical signals RMS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 172-177.
- [8] 徐焜耀, 范昭勇, 赵蔚娟, 等. IEC 61850 标准下采样值传输的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 107-111.
- XU Kun-yao, FAN Zhao-yong, ZHAO Wei-juan, et al. Application of sampled value transmission based on IEC 61850[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(6): 107-111.
- [9] Technical Committee on Sensor Technology. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. 2008.

收稿日期: 2013-02-21; 修回日期: 2013-08-29

作者简介:

许永军 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 从事智能变电站系统方案设计及相关产品研发工作;

金乃正 (1961-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护设备的运行与管理工工作;

叶志锋 (1983-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事配网自动化系统方案设计及相关产品研发工作。E-mail: yezf@sznari.com