

IEEE1588 时钟同步技术在数字化变电站中的应用

汪祺航^{1,2}, 吴在军^{1,2}, 赵上林^{1,2}, 黄伟³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 伺服控制技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210096;
3. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 介绍了国内现阶段数字化变电站时钟同步技术的应用, 比较了现阶段变电站时钟同步技术的技术特点。针对基于 IEC61850 标准的新型数字化变电站高精度时钟同步指标要求, 引入能达到亚微秒级对时精度的 IEEE1588 时钟同步对时技术, 阐述了 IEEE1588 时钟同步技术原理。重点讨论基于 IEEE1588 时钟同步技术的两种变电站配置方案——基于边界时钟的对时网络和基于透明时钟的对时网络, 论述了基于透明时钟的对时网络的优越性。提出了对时装置的设计方案, 并分析了影响 IEEE1588 对时性能的重要因素和补偿手段。

关键词: 时钟同步; IEEE1588; 数字化变电站

Application of IEEE1588 time synchronization in digital substation

WANG Qi-hang^{1,2}, WU Zai-jun^{1,2}, ZHAO Shang-lin^{1,2}, HUANG Wei³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Motion Control Engineering Research Center of MOE, Nanjing 210096, China;

3. Jiangsu Electric Power Experiment and Research Institute Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper introduces the application of time synchronization schemes in digital substation and compares the technical characteristics of these schemes. Then for the high accuracy synchronization requirement of IEC61850 based digital substation, a time synchronization system based on IEEE1588 which can support sub-microsecond level of accuracy is put forward and the theory of IEEE1588 is expatiated. Based on IEEE1588, two application schemes on time synchronization network in substation are expounded. One is based on boundary clock and the other is based on transparent clock. The advantage of the scheme based on transparent clock is discussed. At last this paper presents a design scheme of the time synchronization device, and analyzes the important factors which impact the IEEE1588 time synchronization function, as well as the compensation methods.

Key words: time synchronization; IEEE1588; digital substation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0137-05

0 引言

现阶段, 随着基于 IEC61850 标准建设的数字化变电站的陆续投运, 电子式电压电流互感器和智能电子设备 IED (Intelligent Electronic Device) 广泛应用于变电站中。作为全数字化的变电站, 数字信号的采集和传输必须基于统一的时序和时钟标准, 才能保证数据的准确性、可靠性和有效性。时钟同步技术在数字化变电站中发挥着重要的作用。

1) 基于 IEC61850 标准的数字化变电站大多数的二次设备都需要采集多个信号量 (如 IEC61850 的 9-1 报文需要传送 12 个通道的信号量)。这就要求对应同一个合并单元的电子互感器采样同步, 不

同间隔之间的合并单元采样同步, 甚至不同变电站间的采样都需要采用时钟同步技术保持同步^[1]。特别是像母差保护和变压器纵差保护这类需要远端数据配合的保护设备, 更需要精确的时钟同步, 以防止误动作。

2) 时钟同步为电力系统中事件顺序 (SOE) 记录、故障录波, 以及事后数据分析等方面提供精确的实时数据, 不仅能够实现相量测量、故障快速定位, 更能给变电站控制中心提供准确的操作判据。为电力系统安全、稳定、经济的运行提供坚实的保障^[2]。

目前在我国电力系统中广泛应用的时钟同步技术是采用全球定位系统 (GPS) 作为同步时钟源。

在目前可利用的时钟基准源中，GPS 有其独特的优越性，是最佳的候选同步时钟源。其输出的秒脉冲统计误差为 1 μs，且没有累积误差，能够满足许多应用领域对同步时钟的要求^[3]。变电站接收 GPS 发出的标准时秒脉冲信号（Pulse per Second, PPS），在每个秒脉冲信号到来后，通过专门的电缆向全站所有 IED 发送同步脉冲。各个 IED 在接收到同步脉冲后，通过软件解码出系统的同步计时点，并通过该值校正装置自身的计时时钟。这种方案能实现同时与多个 IED 对时，并且简单易行。但是，变电站数字化的发展趋势使得站内二次硬接线被串行通信线所取代^[4]。GPS 脉冲直接对时系统已表现出了一定的局限性。

针对变电站这种一体化的通信网络和更高的同步精度要求，IEC61850 引入了简单网络时间协议（Simple Network Time Protocol, SNTP）。SNTP 是网络时间协议 (Network Time Protocol, NTP) 的简化，应用于简单网络中。作为使用最为普遍的国际互联网时间传输协议，SNTP 的应用已较为成熟，在一定的网络结构下，SNTP 的对时精度可在大多数情况下保持在 1 ms 以内。但是实现 25 μs 的对时精度还是很困难。而 IEC61850 标准对 IED 最高等级的同步精度要求达到 ±1 μs^[1-2,4]。

1 IEEE1588 时钟同步机理

IEEE1588 是应用于工业控制和测量领域的具有亚微秒级同步功能的精确时钟同步协议（Precise Time Protocol, PTP）。一个 IEEE1588 精确时钟系统包括普通时钟（仅有一个 PTP 端口）、透明时钟和边界时钟（具有多个 PTP 端口），系统的每个节点均被认为是一个时钟，通过以太网将整个系统的时钟相连。系统中的时钟工作在主时钟（Master Clock）、从时钟（Slave Clock）和无源时钟（Passive Clock）三种状态。系统中的源时钟称为超主时钟（Grandmaster Clock）。具体的时钟状态则是由最佳主时钟（Best Master Clock, BMC）算法所确定^[5-8]。

IEEE1588 的时钟同步过程通过两个步骤实现：偏移量测量和延迟量测量。

首先进行偏移量测量：主时钟先发送 Sync 报文，它是周期性的发出（一般每两秒钟发送一次）。这时主时钟记录下 Sync 报文的发出时标（TimeStamp） T_1 ，如图 1 所示。从时钟接收到 Sync 报文时，记录下收到报文时标 T_2 。然后主时钟发出 Follow_up 报文，该报文包含了 Sync 报文发送的精确时标 T_1 。假定网络延时为 T_{Delay} 。则可计算出偏移时差 T_{offset} ：

$$T_{offset} = T_2 - T_1 - T_{Delay} \quad (1)$$

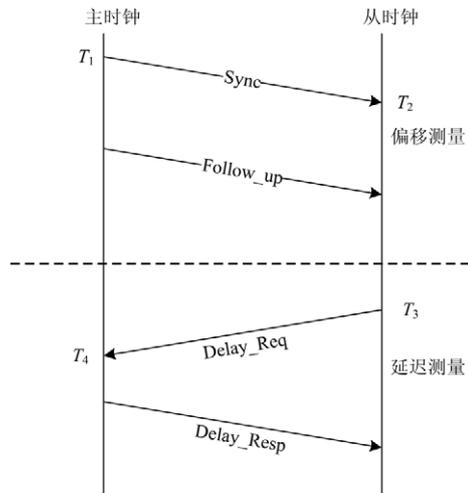


图 1 IEEE1588 协议对时过程

Fig.1 Principle of IEEE1588

延迟量测量：在组网结构固定，网络负载变化不大的变电站系统中，网络延迟 T_{Delay} 基本上变化不大，延迟测量不需要频繁的进行，一般为随机发送。如图 1 所示，从时钟向主时钟发出 Delay_Req 报文，从时钟记录下报文的发送时标 T_3 。主时钟在收到 Delay_Req 报文后，记录下接收时刻的时标 T_4 。然后，主时钟向从时钟发送 Delay_Resp 报文。Delay_Resp 报文包含了时标 T_4 。则可计算出网络延迟 T_{Delay} ：

$$T_{Delay} = T_4 - T_3 + T_{offset} \quad (2)$$

综合式 (1)、(2) 可以计算出：

$$T_{offset} = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (3)$$

$$T_{Delay} = \frac{(T_4 - T_3) + (T_2 - T_1)}{2} \quad (4)$$

基于式 (3)、(4) 所得到的 T_{offset} 、 T_{Delay} 数据，从时钟就能够修正到与主时钟一致的时间标准。这种同步方法将时标的测量和报文的传送分离，使得报文时标的确定更加精确。在专门的硬件配合下，时标的标定能够精确到报文从 PHY 层芯片发出时刻，完全排除报文在装置内部的接收、解码和传输的时延影响，从而使系统能够达到亚微秒级的精度。

2 变电站 IEEE1588 对时方案

将 IEEE1588 标准引入数字化变电站，在进行系统设计时，应充分考虑时间同步系统的可靠性、稳定性、可扩展性和易维护性，并需要考虑到备用基准时钟源及抗干扰措施。IEC61850 标准将变

电站分为变电站层、间隔层和过程层, 各层之间通过站级总线和过程总线相连。对数据同步精度的要求, 各层设备也不同。间隔层设备需要达到毫秒精度; 而过程层设备, 由于主要传输采样值信息和跳闸信息, 需要达到微秒级的同步精度。根据以上要求我们可以将变电站系统按如图 2 所示方式配置。

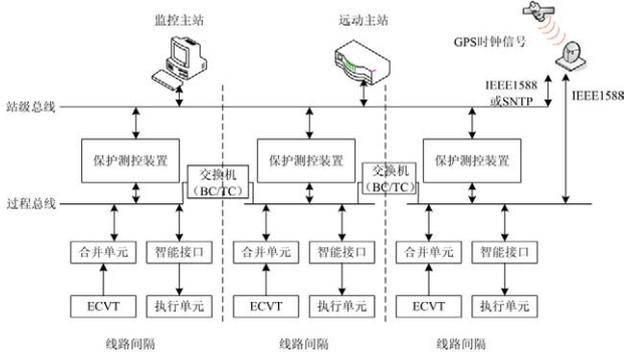


图 2 数字化变电站 IEEE1588 对时系统

Fig.2 Time synchronization system of digital substation on IEEE1588

如图 2 所示, 首先, 通过 GPS 系统向变电站提供标准世界时信号。然后将该时间作为 PTP 时钟源信号提供给 IEEE1588 精确时钟模块, 并将该模块时钟端口配置为超主时钟 (Grandmaster Clock) 状态。通过站控层网络 (由于对时精度要求相对较低, 站级总线可采用 IEC61850 推荐的 SNTP 对时) 和过程层网络, 可以将站级总线和过程总线上 IED 的时钟同步到超主时钟下。由于过程层总线面向间隔配置, 则需在网络间隔之间加装网络交换机, 并且在网络交换机上配置边界时钟 (BC) 或者透明时钟 (TC) 来解决使用网络交换机所带来的网络时延。根据网络交换机所选配置不同, 整个 PTP 网络可配置为图 3 和图 4 两种方案。具体分述如下。

如图 3 所示, 在配置为边界时钟的 PTP 网络结构图中, 网络交换机采用边界时钟, 其内部包含多个主时钟、从时钟端口和一个 PTP 时钟 (所有端口共享)。对于相应的 IEEE1588 主时钟设备来说, 网络交换机相当于从时钟; 对于 IEEE1588 从时钟设备来说, 网络交换机又作为主时钟。接在网络交换机主时钟端口的各个 IED 的时钟作为从时钟同步于相应的网络交换机 PTP 时钟。而该网络交换机 PTP 时钟又与上一级的网络交换机 PTP 时钟对时。通过这样一级一级的分级对时, 最终实现过程层设备的时钟同步于超主时钟的世界标准时, 从而达到全站同步的目的。这种方案采用了分级同步的方式, 结构简单, 原理清晰, 组网层次结构分明, 便于设备的定位和检修。

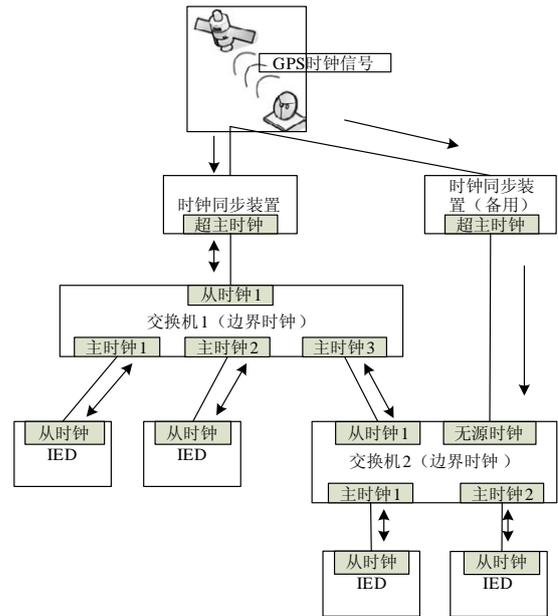


图 3 边界时钟网络结构图

Fig.3 Network structure of boundary clock

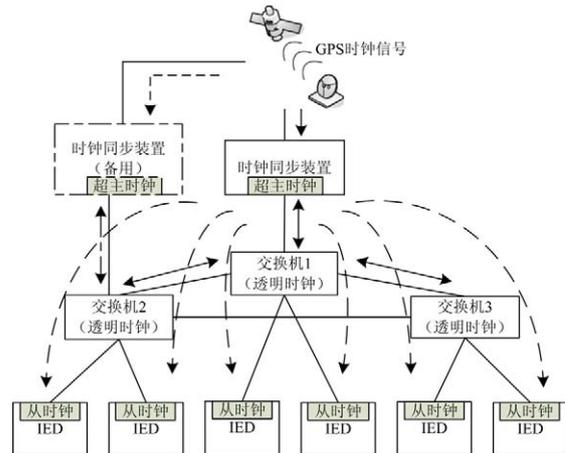


图 4 透明时钟网络结构图

Fig.4 Network structure of transparent clock

图 3 所示网络在正常情况下, 交换机 2 设置为无源时钟的端口与备用主时钟源装置相连。备用主时钟源的时钟信号并不作为参考源参与校时。当主装置精度下降或失效后, 通过最佳主时钟算法计算, 备用时钟源信号确立为新的参考时钟源。与备用主时钟源装置相连的端口工作状态转变为从时钟状态。对时网络拓扑通过算法自动做出相应改变。这种自适应的网络对时系统, 一方面保证了变电站系统对时系统的精度。另一方面确保了变电站网络的稳定性和可靠性 (图 4 所示备用对时装置原理与上述原理相同。交换机 2 与备用时钟同步装置相连的端口正常运行时设置为无源端口; 作为冗余备用, 图 4 中交换机 2 与交换机 3 相连的端口必有一个设

置为无源时钟)。

IEEE1588 协议将透明时钟分为两种端到端透明时钟 (End-to-end Transparent Clock) 和点对点透明时钟 (Peer-to-Peer Transparent Clock)。两种时钟的组网拓扑基本一致。如图 4 所示, 在透明时钟网络结构图中, 网络交换机包含 PTP 时钟和透明时钟端口。透明时钟在网络中不是用做主或从设备, 而是转发 PTP 的事件信息并提供 PTP 事件信息通过网络交换机的驻留时间的校正值, 通过校正值来修正报文在网络中的精确传输时间。各个 IED 的从时钟端口通过与透明时钟的连接, 直接同步于超主时钟。

IEEE 继保委员会 PSRC 在新的电力行业 PTP 时钟规范里建议采用透明时钟 (TC), 将透明时钟作为变电站组网的一种推荐方法。相比采用边界时钟, 采用透明时钟具有三个优势:

1) 网络信息延迟较少。边界时钟的组网方式, 各个设备分级同步, 每级之间都需要进行如同超主时钟与 GPS 时钟源之间进行的时间偏差修正。为了与最高一级的时钟源信号保持同步, 需要分层一级一级的校正相应主时钟直至最底层设备。当某一较高等级时钟信号出现较大抖动时, 参考该信号的下级装置将都会受到影响, 重新恢复全站同步也需要较长时间。而应用透明时钟的变电站, 由于全站设备直接同步于超主时钟, 单个装置的时间抖动对其他装置不会产生直接影响。主时钟发出的 PTP 事件信息也可以很快的转发到各个设备, 从而实现及时、迅速的同步校正。

2) 累积偏差较小。图 3 中各个设备分层同步于相应的主时钟。各个主时钟与超主时钟的时间偏差由于各层之间相互累积的因素会产生很大的累积误差。如果网络系统比较庞大, 分层较多, 在最底端的设备与超主时钟的时钟偏差会达到很大的值。能否保证远端设备的对时精度将是很大的问题。而图 4 中各设备直接同步于超主时钟。消除了这种累积误差因素。

3) 组网方式更加安全可靠。由于 IEEE1588 是排斥环网的出现。所以, 理论上组网模式都应该是树状结构的。但是, 将包含透明时钟的网络交换机的某些端口设置为无源时钟 Passive Clock 状态。例如如图 4 中, 将网络交换机 2 和网络交换机 3 相连的端口设置为 Passive Clock。若超主时钟发生故障, 则切换到备用时钟同步装置。利用最佳主时钟算法对全网时钟端口的状态重新配置。网络交换机 1 和网络交换机 3 之间的连接端口将配置为 Passive Clock。图 4 中主要组网结构和设备时钟端口不会有大的变化。而如果采用图 3 方案。当采用备用时钟

同步装置时, 网络交换机 2 的从时钟 1 端口将配置为主时钟端口。相应的网络交换机 1 的主时钟 3 端口将被配置为从时钟端口。整个组网的结构和端口状态将有很大的改变。组网结构发生这样大的变化对变电站的网络运行和装置的维护会产生比较大的影响, 不利于故障检修和装置维护。

3 IEEE1588 时钟同步模块设计

实现 IEEE1588 最高精度的对时系统需要采用软硬件相结合的方式。对于纯软件的对时方法, 时标一般生成于应用层或驱动层。时标如生成在应用层, 由于受操作系统机理等多种因素影响, 精度大概在 1~500 ms 之间。时标如生成在设备驱动层, 通常则受到中断响应方式、中断优先级等因素影响, 精度大约在 1~500 μs 之间。如采用支持 IEEE188 的硬件生成时标, 则可以高达亚微妙级精度。

以配置为普通时钟端口的 IED 为例说明。如图 5 所示, 装置 CPU 选用 ATMEL 公司生产的 AT91RM9200 芯片。装置提供多种交互接口包括 RJ45、光纤、RS485 和 USB 口以满足不同应用场合的需要。装置通过 RJ45 或光纤端口将设备连接到过程层, 并在连接端口的物理层模块选用支持 IEEE1588 协议的芯片。



图 5 时钟同步装置

Fig.5 Time synchronization device

该时钟同步模块其核心部件采用了美国国家半导体公司生产的 DP83640 芯片。该芯片支持 IEEE1588 协议。时标生成在物理层内, 在所有的工作模式下均能及时、平等的确定报文收发的精确时间, 将理论对时精度提高到了 8 ns。该芯片提供一定数量的 GPIO 接口, 可将 PTP 同步时钟信号调制后按用户指定方式输出。例如可以给时间域内合并单元提供精确的同步采样秒脉冲信号 (PPS), 或者在指定的时间点向监控主站汇报系统关键节点的电

压向量数据, 或者通过向外围设备提供精确时钟信号来控制传感器或执行器的运行。

在装置工作过程中, 一旦端口有 PTP 报文, 即为 DP83640 所读取, 通过交互和解析事件报文, 将 DP83640 内置的 PTP 时钟校正到与超主时钟信号相同步。同时, 装置可通过 GPIO 接口或 MII 接口将同步时钟信号按用户所需的形式发送给外围设备或主芯片。将采样信号、触发信号和主芯片时钟校正到与超主时钟频率一致, 从而达到全网同步的目的。

4 性能分析

影响 PTP 时钟系统精度的主要因素集中在三个方面: 振荡器的稳定性、网络时延和组网方式。具体分析如下:

1) 振荡器稳定性。振荡器多为石英晶振, 一般作为 PTP 时钟的时钟信号发生源。在每次 PTP 校正完成后, 本地 PTP 时钟均按晶振提供的信号计时。若晶振频率由于机械损耗、老化和温度变化的影响发生漂移。在下次 PTP 校正到来之前, 该端口将会产生很大的计时误差。又特别是对于透明时钟和边界时钟, 作为 IEEE1588 对时的枢纽节点, 其 PTP 时钟的精确度, 直接影响了与之相连的所有设备的对时精度。为保证全网全时段的同步精度, 需选用高稳定性振荡器或是采取补偿技术。

2) 网络时延。主要产生在线路传输和网络交换机转发过程中。在变电站网络中, 线路传输的延迟可忽略不计。对于网络交换机产生的时延, 由于其不确定性, IEEE1588 对时引入了透明时钟和边界时钟。但由于延迟测量的随机性和较低频率, 若网络负载短期内发生较为剧烈的变化, 则网络延时的值相对实际情况就会产生较大的偏差。对于透明时钟, 由于 PTP 报文在网络交换机中的驻留时间是由本地时钟计算所得, 不可避免地也会产生一定的偏差。这时, 就需要对网络延时的计算采取必要的调整和补偿手段。

3) 组网方式。主要考虑网络报文的优先级设置。为保证变电站保护动作和设备投切的及时性, 对于变电站网络, GOOSE 跳闸报文应设置为优先级最高, 其余报文优先级依次降低: 时钟同步报文, 同步采样报文, 其他 GOOSE 报文, 其他报文。跳闸报文的最高等级保证了变电站运行的安全。将时钟同步报文置于较高优先级同时也保证了采样报文和其他同步报文的准确度。

5 结束语

IEEE1588 对时方法能有效提高全站同步精度。

目前, 将该对时方法引入变电站内, 给变电站时钟同步问题提供了一种比较理想的解决方案。随着 IEC61850 标准在全国电力系统的推广, IEEE1588 作为一种能提供亚微秒级精度的对时协议, 若能进一步解决好广域网的应用方案和与 IEC61850 推荐的 SNTP 对时方法的配合问题。一定能在电力系统中得到更广泛的应用, 为保障电网稳定、可靠、安全运行发挥出更大的作用。

参考文献

- [1] 张信权, 梁德胜, 赵希才. 时钟同步技术及其在变电站中的应用[J]. 继电器, 2008, 36 (9): 69-72.
ZHANG Xin-quan, LIANG De-sheng, ZHAO Xi-cai. Time synchronization and its application in substation[J]. Relay, 2008, 36 (9): 69-72.
- [2] 张春鹏. 互感器合并电子式单元同步时钟模块的设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
ZHANG Chun-peng. The design for implementing synchronization of merging unit in electronic transducers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [3] 黄云水, 冯玉光. IEEE1588 精密时钟同步分析[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24 (9): 9-12.
HUANG Yun-shui, FENG Yu-guang. Analysis of the precise time synchronization of IEEE1588[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2005, 24 (9): 9-12.
- [4] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波, 等. 基于 IEEE1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32 (21): 97-102.
ZHAO Shang-lin, HU Min-qiang, DOU Xiao-bo, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32 (21): 97-102.
- [5] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEEE1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (13): 60-63.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. A new IEEE1588 based technology for realizing the sampled values synchronization on the substation process bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (13): 60-63.
- [6] 张妍, 孙鹤旭, 林涛, 等. IEEE1588 在实时工业以太网中的应用[J]. 微计算机信息, 2005, 21 (9): 19-21.
ZHANG Yan, SUN He-xu, LIN Tao, et al. Application of IEEE1588 in real-time industrial ethernet[J]. Microcomputer Information, 2005, 21 (9): 19-21.
- [7] 曹津平, 李伟, 秦应力, 等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12): 60-63.

(下转第 169 页 continued on page 169)

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Electric power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (22): 21-26.
LI Yan-song, GUO Zhi-zhong, YANG Yi-han, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (22): 21-26.
- [3] 刘青, 王增平, 徐岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29 (1): 11-14.
LIU Qing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system[J]. Power System Technology, 2005, 29 (1): 11-14.
- [4] 王政平, 刘晓瑜. 线性双折射对不同类型光学玻璃电流互感器输出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (14): 77-81.
WANG Zheng-ping, LIU Xiao-yu. Effects of linear birefringence upon performances of different designs of optical glass current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (14): 77-81.
- [5] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 100-105.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (11): 100-105.
- [6] 赵本刚, 徐静, 高翔, 等. 基于微电子机械系统的光学电流传感器原理与设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (3): 89-94.
ZHAO Ben-gang, XU Jing, GAO Xiang, et al. Theory and design of optical current sensor based on MEMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (3): 89-94.
- [7] Stephan Mohr, Thomas Bosselman. A high dynamic range magneto-optic current transformer with advanced signal processing[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3 (6): 744-751.
- [8] Madden W L, Michie W C, Cruden A. Temperature compensation for optical current sensors[J]. Optical Engineering, 1999, 38 (10): 1699-1707.
- [9] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
LI Yan-song. Research on high-accuracy adaptive optical current transducer and its operating stability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [10] Michie W C, Cruden A, Niewczas P. Harmonic analysis of current waveforms using optical current sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51 (5): 1023-1026.

收稿日期: 2010-03-24

作者简介:

季遥遥 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: jisen Yao@126.com

李岩松 (1970-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: liyansong811@126.com

刘君 (1970-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制。E-mail: liujunlishu@126.com

(上接第 141 页 continued from page 141)

- CAO Jin-ping, LI Wei, QIN Ying-li, et al. Research on Digital substation process level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12): 60-63.
- [8] 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 Hui-yuan, HAO Hou-tang, LI Yan-xin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems,

2009, 33 (3): 55-58.

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

汪祺航 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为变电站自动化; E-mail: blueman1985@126.com

吴在军 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为变电站自动化、分布式发电等;

赵上林 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电和变电站自动化。