220 kV GIS 用电子式电流电压互感器在午山数字化变电站中的应用

李文升

（青岛供电公司，山东 青岛 266002）

摘要：通过 220 kV GIS 用电子式电流电压互感器在午山数字化变电站中的应用，介绍了其配置方案、引用标准、工作原理及结构、有源电子式互感器的关键技术、应用电子式互感器需要面对的几个问题，着重分析了电子式互感器同步问题、同步方法以及同步问题对线路差动保护的影响。指出电子式互感器的采用，将给国内变电站的自动化运行和管理带来深远的影响和变革，在技术上提高设备的安全性和可靠性以及实现互操作性，在经济上减少投资以及变电站寿命周期内的总体成本。

关键词：电子式互感器；数字化变电站；应用

Application of 220 kV GIS electronic transformers in Wushan digital substation

LI Wen-sheng

（Qingdao Power Supply Company，Qingdao 266002，China）

Abstract：Through the application of 220 kV GIS electronic current and voltage transformers in Wushan digital substation, this paper introduces its configuration, reference standard, principle and structure, key technologies of the active electronic transformer, and several issues of applying electronic transformers. This paper focuses on electronic transformer synchronization issues and synchronization methods, and the impact of synchronization on the line differential protection. Finally, it is pointed out that the use of electronic transformer will bring far-reaching changes and impact on domestic substation automation and management. It will improve the security and reliability of the device and achieve interoperability in technology and will reduce the investment and the overall cost of substations life cycle in economy.

Key words：electronic transformer；digital substation；application

中图分类号： TM561　　文献标识码：B　　文章编号： 1674-3415(2010)16-0157-06

0 引言

2008 年 5 月 31 日青岛 220 kV 午山数字化变电站顺利投入运行。该站数字化设备由青岛供电公司和南京南瑞继保电气有限公司共同研究开发，全站采用了电子式互感器、新型的智能化 GIS 汇控柜、以及 IEC 61850 规约等全新数字化技术，在国内 220 kV 数字化变电站实践中具备重要的应用研究和示范价值。本文主要针对 220 kV GIS 用电子式电流电压互感器的应用进行分析。

数字化变电站的主要标志是采用数字化电气量测系统（如电子式互感器）采集电流、电压等电气量，实现了一、二次系统在电气上的有效隔离，增大了电气量的动态测量范围，并提高了测量精度，从而为实现常规变电站装置冗余向信息冗余的转变，以及信息集成化应用提供了基础[1]。

电子式互感器与传统互感器相比，具有绝缘简单、体积小、重量轻、电流互感器动态范围宽、无磁饱和、电压互感器无谐振现象、电流互感器二次输出可以开路等优点，受到普遍关注，并逐步在工程中应用。电子式互感器需要解决的是绝缘、电流互感器动态范围、饱和、占地面积等问题，所以在低电压等级实施没有经济价值，但随着电压等级的提高，其性价比将相应提高。

220 kV GIS用电子式电流电压互感器是与气体绝缘开关（GIS）配套使用的电流电压组合为一体的有源电子式互感器。电流互感器采用空芯线圈传感保护电流，采用低功率铁芯线圈（LPCT）传感测量电流，这样可使电流互感器具有较高的测量准确度、较大的动态范围及较好的暂态特性；电压互感

器采用电容分压器传感被测电压；充分利用了GIS气体绝缘结构的特性，具有绝缘结构简单可靠、体积较小、重量较轻、线性度好等特点，能够有效地减小GIS的体积。电子式互感器的远端电子模块及合并单元均采用双重化冗余配置，保证了互感器的可靠性；电子式互感器利用光纤传送信号，抗干扰能力强，减少了变电站二次电缆，适应了数字化变电站技术发展的要求。

1　午山站 220 kV GIS 电子式互感器配置方案

配置原则是保证一套系统出了问题不会导致保护误动，也不会导致保护拒动。电子式互感器的远端模块和合并单元需要冗余，远端模块中采集模块需要冗余、合并单元需要冗余配置，合并单元可以安装在开关附近汇控柜中或保护小室。

午山变电站两台主变分为220 kV及35 kV两个电压等级，220 kV主接线为双母线接线，35 kV侧单母分段接线。220 kV系统配置的是南京南瑞继保公司生产的PCS-9250系列GIS有源式电子式电流电压组合式互感器（ECVT），ECVT配置在开关的外侧，内含有双重化的电流、电压互感器及远端采集模块，与之对应配置双重化的合并单元。图1中MUA、MUB分别为220 kV Ⅰ、Ⅱ母线电压互感器的合并单元，MU1A、MU1B为双重化的合并单元，分别为双重化的220 kV线路保护及母线保护提供数字信号，从而提高了可靠性。

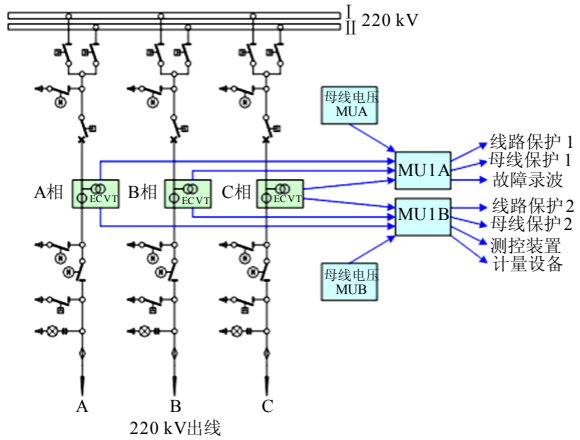

图1　午山站220 kV ECVT和MU的配置方案

Fig.1 Configuration of ECVT and MU

2　引用标准

电子式互感器在标准规范下进行设计、制造、试验和运行，各项技术指标符合IEC1999年制订的电子式电压互感器的标准IEC60044-7《Electronic Voltage Transformer》，IEC2002年制订的电子式电流互感器的标准IEC60044-8《Electronic Current Transformer》（第一版）、GB16847-1997《保护用电流互感器暂态特性技术要求》等相关标准的要求。

和常规互感器标准GB1207、GB1208相比，电子式互感器标准的大部分内容相同，增加了数字量的定义、原理、数学描述、试验规定等，则是较为明显的不同。

3　电子式互感器的原理和结构

国际上将有别于传统的电磁型电流/电压互感器的新型互感器统称为非常规互感器（Non conventional Instrument Transformer，NCIT），其中基于电光效应的互感器称为光学电流/电压互感器（current/voltage transformer with optical sensor，OCT/OVT）或无源式互感器；其余泛称为电子式电流/电压互感器（Electronic Current/Voltage Transformer，ECT/EVT）或有源式互感器[1]。

根据标准描述，电子式互感器是具有模拟量电压或数字量输出，供频率15～100 Hz的电气测量仪器和继电保护装置使用的电流电压互感器。可见其功能、应用范围和常规互感器完全一致，区别在于输出量是可供二次设备直接使用的模拟电压信号或数字量，如电子式电流互感器模拟量输出标准值为22.5，150，200，225 mV（测量用）和4 V（保护用），数字量输出标准值2D41H（测量用）和01CFH（保护用），而常规电流互感器输出为电流信号，这直接导致了包括设备铭牌参数在内的一系列不同，如电子式互感器可根据需要通过软件设定变比，而不再使用常规形式如600/300/5来定义[2]。

电子式互感器的精度等级与常规的差别不大。以电流互感器为例，测量用的标准精度为0.1，0.2，0.5，1，3，5级，供特殊用途的为0.2S和0.5S级；保护用的标准精度为5P，10P，和5TPE，其中5TPE的特性考虑短路电流中有非周期分量的暂态情况，其稳态、暂态误差限值分别与5P级、TPY级常规电流互感器相同。电子式互感器的原理和常规的有很大不同，电子式互感器的不同原理分类，见图2。电子式互感器根据构成原理的不同，可分为有源式和无源式。有源电子式互感器是指高压平台的传感头部分需要供电电源的电子式互感器，无源电子式互感器是指高压平台的传感头部分不需要供电电源的电子式互感器。

有源电子式互感器利用电磁感应等原理感应被测信号，对于电流互感器采用Rogowski线圈，对于电压互感器采用电阻、电容或电感分压等方式。有

源电子式互感器的高压平台传感头部分具有需电源供电的电子电路，在一次平台上完成模拟量的数值采样（即远端模块），利用光纤传输将数字信号传送到二次的保护、测控和计量系统。

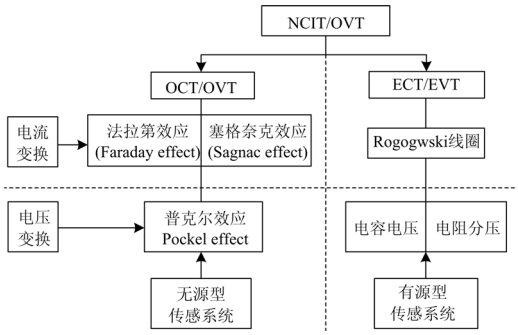

图2 非常规互感器分类

Fig.2 A taxonomy for the NCIT

有源电子式互感器又可分为封闭式气体绝缘组合电器（GIS）式和独立式，GIS 式电子式互感器一般为电流、电压组合式，其采集模块安装在GIS的接地外壳上，由于绝缘由GIS 解决，远端采集模块在地电位上，可直接采用变电站220 / 110 V 直流电源供电。电子式电流电压互感器主要由两部分组成，如图3所示。

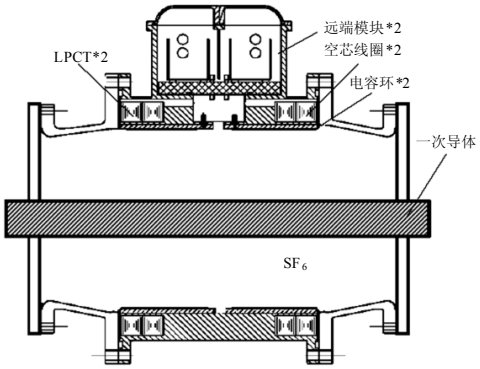

图 3 ETIG1-252 电子式电流电压互感器结构图

Fig.3 Block diagram of ETIG1-252 ECVT

（1）一次传感器。包括两套完全相同的传感元件，每套传感元件包括一个低功率 CT、一个空芯线圈、一个电容分压器。低功率 CT 用于传感测量级电流信号，空芯线圈用于传感保护级电流信号，电容分压器用于传感电压信号。

（2）远端模块也称一次转换器。互感器有两个完全相同远端模块，两个远端模块互为备用，保证电子式电流互感器具有较高的可靠性。远端模块接收并处理低功率 CT、空芯线圈及电容分压器的输出信号，远端模块的输出为串行数字光信号。远端模块的工作电源由 GIS 汇控柜内的 DC220 V（或 DC110 V）提供。

（3）合并单元。合并单元置于汇控柜内或控制室，接收并处理三相电流电压互感器远端模块下发的数据，对三相电流电压信号进行同步，并将测量数据按规定的协议（IEC60044-8 或 IEC61850-9-1/2）输出供二次设备使用。合并单元的输出信号采用 62.5/125 μm 多模光纤传送，接头为 ST 型。

电流传感器（空芯线圈及 LPCT）嵌在接地外壳内，感应流过一次导杆中的被测电流，一次导杆、中间电极和接地外壳构成电压传感器（电容分压器），感应一次导杆上的被测电压，高低压间以 SF6 气体绝缘。

（4）电流传感器，利用空芯线圈及低功率 CT 传感被测一次电流。低功率 CT（LPCT）的工作原理与常规 CT 的原理相同，只是 LPCT 的输出功率要求很小，因此其铁芯截面就较小。空芯线圈是一种密绕于非磁性骨架上的螺线管，如图 4 所示。空芯线圈不含铁芯，具有很好的线性度。

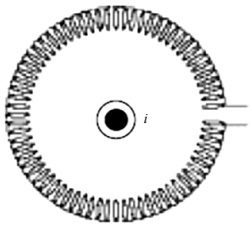

图 4 Rogowski 线圈示意图

Fig.4 Diagram of Rogowski coil

空芯线圈的输出信号 e 与被测电流 i 有如下关系：

$$e(t) = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\mu_0 ns\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：μ_0 为真空磁导率；n 为线圈匝数密度；s 为线圈截面积。据式（1），利用电子电路对线圈的输出信号进行积分变换便可求得被测电流 i。

空芯线圈无铁芯，其性能易受温度及外磁场等干扰因素的影响。采取恰当的绕制技术可减小干扰的影响。

（5）电压互感器利用电容分压器测量电压。如图 5 所示。

为提高电压测量的精度，改善电压测量的暂态特性，在电容分压器的输出端并一精密小电阻。电容分压器的输出信号 $u_o(t)$与被测电压 $u_i(t)$有如式（2）所示的关系：

$$u_o(t) = RC_1 \frac{du_i}{dt} \qquad R << \frac{1}{\omega C_2} \qquad (2)$$

式中：C_1为高压电容；C_2为低压电容。据式（2），利用电子电路对电压传感器的输出信号进行积分变换便可求得被测电压。

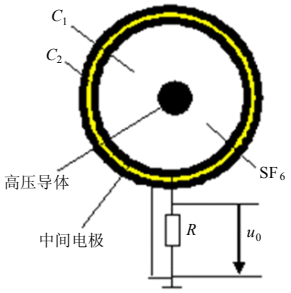

图 5 电压传感器原理图

Fig.5 Principle of voltage transducer

4 有源电子式互感器的关键技术

4.1 远端传感模块的稳定性和可靠性

有源电子式互感器的关键技术在于电源供电技术、远端电子模块的可靠性及采集单元的可维护性。GIS式电子式互感器直接接入变电站直流电源，不需要额外供电，采集单元安装在与大地紧密相连的接地壳上。这种方式抗干扰能力强，更换维护方便，采集单元异常处理不需要一次系统停电[3]。

空芯线圈和电压传感器的输出信号均是被测量的微分。远端模块的主要作用是同时采集电流传感器和电压传感器的输出信号，转换成数字信号，对空芯线圈和电压传感器的输出信号进行积分变换还原被测电流和被测电压信号，并按约定格式以串行数字光信号的形式输出。

远端模块接有一根屏蔽电缆，用于供电。供电电压 DC220 V 或者 DC110 V。远端模块接有一根光缆，用于传送采集处理后的电流、电压信号。远端模块的设计及器件选用充分考虑了各种运行的恶劣环境，具有较高的可靠性及稳定性。同时远端模块有故障告警功能，发生故障可以进行带电更换。

4.2 绕制在陶瓷骨架上的空芯线圈结构的稳定性对测量精度的影响

和传统互感器的绕制方法不同，为了获得高测量准确度，空芯线圈须按以下原则绕制：线圈密度恒定；骨架截面积恒定；线圈横截面与中心线垂直，否则将引入较大的测量误差。实际半手工绕制时常不能完全满足上述要求，批量生产时性能分散性大，所以一般空芯线圈的设计精度最高可达0.1 %，实际应用时常仅1%～3 %。IEC标准中对传感单元额定电流时的二次输出有明确数值要求，所有输出偏离值均计入测量误差，为了解决空芯电流互感器生产时的分散性，IEC60044-8中特别允许采用一标记Ra的电阻来调整二次输出值。生产工艺成为阻碍空芯电流互感器产业化的一个关键问题[1,4-8]。

4.3 电子式互感器的同步问题及同步方法

电子式互感器的同步问题包含多个层面。

(1) 同一间隔内的各电压电流量的同步。本间隔的有功功率、无功功率、功率因数、电流电压相位、各序分量、线路电压与母线电压的同期等问题都依赖于对同步数据的测量计算。IEC60044 标准规定，每间隔最多可有 12 路的测量量经同一合并单元处理后送出，这送出的 12 路测量量首先必须是同步的。

(2) 关联多间隔之间的同步。变电站内存在某些二次设备需要多个间隔的电压电流量，典型的如集中式母线保护、集中式小电流接地选线装置、主设备纵联差动保护装置、平行双回线横联差动保护装置、AVQC（自动电压无功调节）装置等，相关间隔的合并单元送出的测量数据应该是同步的。

(3) 关联变电站间的同步。输电线路保护采用数字式纵联电流差动保护如光纤纵差保护时，差动保护需要线路各侧的同步数据，这有可能将数据同步问题扩展到多个变电站之间。

(4) 广域同步。大电网广域监测系统（WAMS）需要全系统范围内的同步相角测量，在未来大规模使用电子式互感器的情况下，可能导致出现全系统范围内采样数据同步。

IEC60044-8 标准中规定了电子式互感器数据同步的两种方法：脉冲同步法与插值法。标准规定每个合并单元必须具备 1 个 1PPS 秒脉冲时钟接口， 以接收全站统一的采样同步信号。靠此同步信号来实现变电站级的数据同步，这是所谓的脉冲同步法。同一合并单元内，可以参照 1PPS 脉冲信号，将其作 K 倍倍频后产生同步采样启动信号，K 即为每秒采样点数（采样率）。对于在低压侧作 A/D 变换的无源式 ECT/EPT，实施起来相对简单；对于在高压侧作 A/D 变换的有源式 ECT/EPT，同步脉冲信号需变换成光信号经光纤传送到高压端[9]。

若想避免低压端向高压端传送信号的复杂过程，可以采用插值法。各路测量环节 A/D 变换部分只管进行非同步采样，而在合并单元中用插值法计算出各路电流电压量在同一时刻的采样值。各间隔的合并单元中如果没有进行过站级同步，其数据也可以用插值法同步。脉冲同步法可以解决同间隔内各路测量量之同步采样问题、各关联合并单元之间

的数据同步，对关联变电站之间的同步乃至广域的同步也都可以适应，当然这时它需要更大范围内的统一基准同步信号，如 GPS、北斗 1 号或伽利略卫星对时等。如上文所述，这种方法用在合并单元内部时，需要将同步采样启动信号反送到高压端，给实际工程实现增加了困难。GPS 秒脉冲信号完整时，可达到很高的同步精度，误差在 ns 级；插值法同步精度略低，误差在 μs 级，仍可满足保护和计量的精度要求。脉冲同步方法简单、但秒脉冲丢失时存在危险、二次设备通过再采样技术（插值算法）实现同步、采样率要求高、硬件软件要求高，实现难度较大，午山站不依赖于 GPS 和秒脉冲传输系统。

另外，采用光纤纵差保护的输电线路两端，传统的靠调整采样时刻来保持数据同步的方法将不再适用（站内已经统一同步采样而站间未同步时）或没有必要（站间已同步时）。对专用一对差动ECT的情况，由于IEC60044-8标准对二次设备到合并单元方向的报文不提倡，也会遇到困难。这在未来的应用中需要引起关注。再一个问题，保护装置依赖于GPS时的可靠性也需要研究和探讨。应用插值法时，合并单元仅单方向接收测量部分发送的采样值，而利用数值插值计算得到同时刻测量值。数值法同步机制简单，但必然引来方法误差。不同的插值方法有不同的精度、计算量、可靠性与应用范围。为获得最佳的插值效果，有必要对各种方法作定量的数学分析。考察适用的插值法，主要包括: Lagrange 插值、Newton等距节点插值、分段样条插值、最小二乘法等。

午山站采用了分段线性插值。合并单元收到每路测量量的每个采样值时，记下相应的时刻，在进入循环的第一个起始参考时刻点上，每一路的测量量在其前后都会有一个采样值，根据前后点与此时刻的时间差的比，利用线性插值法可以得到一个“近似值”，所有路的测量量“近似值”都是此参考时刻的。参考时刻按固定间隔时间后移，计算不断循环，于是输出端得到连续的“同步采样值”。

4.4 电子式互感器对线路纵差保护的影响

线路一侧是常规互感器，另一侧是电子式互感器。常规互感器和电子式互感器两个采样回路路由的延时是不一致的。（1）常规互感器：电流电压经 CT、PT 转换为二次模拟值，再经保护交流插件、AD 采样回路进入保护装置；（2）电子式互感器：电流电压经电子式互感器、远端模块、合并单元进入保护装置。如果不进行任何处理，相当于两侧采样时刻不一致，必然产生角差，正常运行时有差动电流。

解决方案：

通过调整采样时刻，对两侧的采样路由延时差别进行补偿，保证计算差动电流的两侧电流是同一时刻值。为此增加两个内部定值：“本侧 ECVT 路由延时”、“对侧 ECVT 路由延时”定值。

对于电子式互感器，该定值为电流从电子式互感器经合并单元传送到保护装置经数字低通滤波的延时。对于常规互感器，该延时为电流从互感器经电缆通过交流插件、低通插件的延时。

当两侧都使用常规互感器、或两侧都使用同一型号的电子式互感器时，该定值可以整定为“0”。当一侧为常规电磁型互感器，另一侧为电子式互感器；或两侧电子式互感器型号不一致时，必须根据实际延时整定。

5　结语

午山站投运至今，220 kV黄午线经历了两次真实区外故障（黄海线A相故障、黄空线B相故障）的考验，午山站电子式电流电压互感器及相关保护均未出现异常，运行良好。

国内已有数十个应用了电子式互感器的数字化变电站成功运行，这将给国内乃至国际变电站的自动化运行和管理带来深远影响和变革，具有非常重大的技术和经济意义。在技术上，提高设备的安全性和可靠性；避免信号传输和处理带来的附加误差，提高保护、测量和计量系统的精度；减少自动化设备数量，简化二次接线，提高系统的可靠性；设备具有互操作性，可以实现信息在运行系统和其他支持系统之间的共享。在经济上，不再敷设大量电缆，二次光纤接线，缩短工程周期；减少通道重复建设和投资，方便变电站的扩建及自动化系统的扩充；减少投运时间及设备的退出次数和退出时间，提高设备的使用效率，方便设备的维护和更新，减少变电站寿命周期内的总体成本。

参考文献

[1] GB/ T 16927. 1-1997 高电压试验技术第一部分一般试验要求[S].
GB/ T 16927. 1-1997 high-voltage test techniques，part 1：general test requirements[S].

[2] 徐大可，赵建宁，张爱祥，等. 电子式互感器在数字化变电站中的应用[J]. 高电压技术，2007，33（1）：78-82.
XU Da-ke，ZHAO Jian-ning，ZHANG Ai-xiang，et al. Application of electronic transformers in digital substation[J]. High Voltage Engineering，2007，33（1）：78-82.

[3] 李九虎，郑玉平，古世东，等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化，2007，31（7）：94-98.
LI Jiu-hu，ZHENG Yu-ping，GU Shi-dong，et al. Application of electronic transformers in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31（7）：94-98.
[4] IEC 60044-7 互感器（第 7 部分）：电子电压互感器[S].
IEC 60044-7 instrument transformers（part 7）：electronic voltage transformers[S].
[5] IEC 60044-8 互感器（第 8 部分）：电子电流互感器[S].
IEC 60044-8 instrument transformers（part 8）：electronic current transformers[S].
[6] GB 1207 电压互感器[S].
GB 1207 voltage transformers[S].
[7] GB 1208 电流互感器[S].
GB 1208 current transformers[S].
[8] IEC 61850-2003 变电站的通讯网络和系统[S].
IEC 61850-2003 communication networks and systems in substations[S].
[9] 曹团结，尹项根，张哲，等. 电子式互感器数据同步的研究[J]. 电力系统及其自动化学报，2007，19（2）：108-113.
CAO Tuan-jie，YIN Xiang-gen，ZHANG Zhe，et al. Discussion on data synchronization of electronic instrument transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2007，19（2）：108-113.
[10] 张沛超，高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术，2006，30（24）：73-77.
ZHANG Pei-chao，GAO Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology，2006，30（24）：73-77.
[11] 高翔，张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术，2006，30（23）：67-71.
GAO Xiang，ZHANG Pei-chao. The main characteristics and key technology of digitized substation[J]. Power System Technology，2006，30（23）：67-71.
[12] 王大鹏，栗俊凯，晁军征. 浅谈数字化变电站的发展及应用[J]. 山东电力技术，2007，153（1）：14-18.
WANG Da-peng，LI Jun-kai，CHAO Jun-zheng. Brief introduciton of development and application of digital transformer substation[J]. Shandong Power System Technology，2007，153（1）：14-18.
[13] 孙一民，李延新，黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化，2007，31（5）：90-93.
SUN Yi-min，LI Yan-xin，LI Qiang. A grading solution for building digital station[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31（5）：90-93.

收稿日期：2009-08-27
作者简介：
李文升（1978-），男，本科，工程师，从事继电保护生产技术工作。E-mail：lwsofqd@yahoo.com.cn

（上接第 146 页 continued from page 146）

参考文献

[1] Dolezilek D J. Power system automation[M]. Schweitzer Engineering Laboratories，Inc.
[2] Skeie T，Johannedden S，Brunner C. Ethernet in substation automation[J]. IEEE Control System Magazine，2002，22（3）：43-51.
[3] 辛建波. 基于以太网的变电站自动化系统时延不确定性研究(博士学位论文)[D]. 武汉：华中科技大学，2005.
XIN Jian-bo. Research on ethernet-based substation automation system communication delay uncertainty[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology，2005.
[4] TCP/IP 协议详解[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
TCP/IP protocol in detail[M]. Beijing: Tsinghua University Press，2004.
[5] IEC 61850 communication networks and systems in substations[S].
[6] 廖泽友. IEC 60870-5-103和IEC 60870-5-104协议应用经验[J]. 电力系统自动化，2003, 27(4): 69-71.
LIAO Ze-you. Experience of using IEC 60870-5-103 and IEC 60870-5-104 transmission protocols[J].Automation of Electric Power Systems，2003, 27(4): 69-71.
[7] 胡明. 变电站自动化系统采用IEC 60870-5-103、104协议的优势[J]. 继电器，2003, 31(5): 65-67.
HU Ming. The experience of using IEC 60870-5-103 and IEC 60870-5-104 transmission protocols in substation automation[J]. Relay，2003, 31(5): 65-67.
[8] IEC60870-5-104 变电站远动通信规约[S].
IEC60870-5-104 substation RTU communication protocol[S].
[9] IEEE 1588 精确网络对时协议-V2[S].
IEEE 1588 standard for a precision clock syncronization protocol for networked measurement and control systems[S].

收稿日期：2009-12-25； 修回日期：2010-01-13
作者简介：
魏 勇（1973-），男，硕士，研究方向为数字化变电站系统方案及相关产品研发；E-mail：yongw@xjgc.com
郭 赟（1966-），女，副教授，从事工业自动化方面的教学及科研工作；
马 力（1976-），男，本科，研究方向为调度管理及继电保护整定。