

# 数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统研究

孟恒信<sup>1</sup>, 梁旭<sup>2</sup>, 刘愈倬<sup>1</sup>, 张悦<sup>1</sup>

(1. 山西电力科学研究院, 山西省 太原市 030001;

2. 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

## Research on Closed Loop Real Time Simulation System of Relay Protection for Digital Substation

MENG Hengxin<sup>1</sup>, LIANG Xu<sup>2</sup>, LIU Yuzhuo<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>

(1. Shanxi Electric Power System Research Institute, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** To satisfy the demand of automation devices testing for digital substation based on IEC 61850 standard, based on Digital Dynamic Real-Time Simulator (DDRTS) a kind of real-time closed loop simulation system for protective relaying in digital substation is developed. The technical scheme of this simulation system, is presented, by which a series of key technical problems, such as dynamic real-time performance of simulation system, concurrent signals of multiple merging units, mixed-use of analog quantity and digital quantity, simultaneous simulation of signals belonging to IEC 61850-9-1 and IEC 61850-9-2 communication protocols, establishing simulation model for electronic voltage transformer (EVT) and electronic current transformer (ECT), are solved. Utilizing the upgraded DDRTS and connecting transformer protection with fault recorder, a lot of tests are performed by the simulation of normal loads and faults occurred inside and outside protection zone to verify the accuracy, synchronization and practicality of the proposed simulation system, and test results show that the performances of the proposed simulation system are satisfied.

**KEY WORDS:** digital substation; real-time simulation of electromagnetic transient; IEC 61850; GOOSE message; signal synchronization

**摘要:**为适应基于 IEC 61850 通信标准的数字化变电站设备试验需求,研究了基于 DDRTS 实时仿真平台的数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统,介绍了该系统的技术方案。该方案解决了仿真系统的动态实时性、多路合并单元信号并发、模拟量与数字量混合使用、IEC 61850-9-1 及-9-2 这 2 种通信规约信号同时仿真、电子式电压电流互感器仿真模型建立等一系列关键技术问题。利用升级后的 DDRTS 系统连接变压器保护及故障录波器,通过模拟正常负荷及区内区外故障情况进行了大量试验,验证了仿真系统的准确性、同步

性及实用性,为全数字式保护及二次装置的试验研究提供了重要的技术手段。

**关键词:** 数字化变电站; 电磁暂态实时仿真; IEC 61850; 面向通用对象的变电站事件报文; 信号同步

## 0 引言

电力数字动态实时仿真系统是分析电力系统特征、测试继电保护及二次设备的重要技术手段,在电力系统分析和研究领域得到了广泛应用。随着计算机及光纤网络技术的快速发展,电子式互感器、合并单元及智能一次设备在数字化变电站中广泛使用<sup>[1]</sup>,传统的模拟量动态实时仿真系统已不能满足对数字化变电站二次设备的仿真试验要求。

目前国内应用较为广泛的动态实时仿真系统主要有 2 种,一种为加拿大生产的 RTDS<sup>[2]</sup>仿真系统,一种为国产的 DDRTS 仿真系统。已有文献对数字化变电站二次设备的仿真试验方法进行探索,如文献[3]介绍了基于 IEC 61850 标准的新型 RTDS 系统的构成及实现方法,文献[4]介绍了基于 IEC 61850-9-2 接口的保护所作的动模试验探索。本文主要介绍利用国产 DDRTS 电力系统实时数字仿真平台开发的基于 IEC 61850 通信标准的数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统,及其所作的研究和探讨。

DDRTS<sup>[5]</sup>是国内自主开发的基于微机开放式体系的全中文图形化大型电力系统仿真软件,可以准确模拟电力系统的电磁暂态和机电暂态过程,并且秉承了“数字动模”的理念,集系统仿真和实时测试功能于一体。DDRTS 通过电流、电压功率放

大器将仿真结果输出给保护等被检测设备,被检测设备的开关量输出通过系统的 I/O 端口返回测试系统,实现闭环测试,其输入输出的传输及控制都是模拟量电信号。而数字化变电站<sup>[6-9]</sup>要求传输及控制的信号均是满足 IEC 61850 规约的光纤数字信号,该系统已经不能满足对数字化变电站二次设备进行仿真闭环试验的要求。为此我们利用该系统的原有仿真软件平台,研究了构成 IEC 61850 数字信号接口的硬件、软件、信号同步及电子式互感器仿真等技术,开发了一套应用于全数字化变电站的继电保护闭环实时仿真系统,以满足对数字化变电站二次设备技术性能试验的需求。

## 1 数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统的研究思路

传统变电站与全数字化变电站动态实时仿真的主要差异是传输介质及控制方式发生了变化,传统的由功率放大器输出的互感器电信号被遵循 IEC 61850 通信规约的采样值(SV)光纤数字信号所取代,传统的断路器控制电信号被面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)报文所取代,而电网的各种电气特征及暂态特性并没有改变。所以新系统仍采用了原系统仿真软件平台,原功率放大器模拟电气量输出保持不变,通过扩充硬件设备使系统可以仿真合并单元<sup>[10-11]</sup>输出。

由于目前数字化变电站建设还处于初期阶段,数字化变电站网络的站控层、过程层及间隔层的组网方案、网络结构多样。电子式电压、电流互感器采样值(SV)数字信号可能采用 IEC 61850-9-2 或-9-1 这 2 种通信协议传输,采样值传输网与 GOOSE 网可能独立组网和也可能混合组网。

为适应不同传输协议以及不同组网方式的数字化变电站设备现状,新建系统不仅要能满足完成对数字化变电站各种数字保护设备的闭环测试要求,还需要在仿真输出数字化变电站信号的同时输出常规变电站模拟量信号,以解决在数字化变电站建设初期可能出现的一端为数字站另一端为模拟站的测试要求。为此制定了图 1 所示的系统构成方案。

系统在保持了 DDRTS 原仿真硬件及仿真功能不变的情况下,增加了 PCI 总线扩展器、IEC 61850 高速通信卡、信号扩展器、光纤以太网故障录波器及网络交换机等设备。其中 PCI 总线扩展器负责完

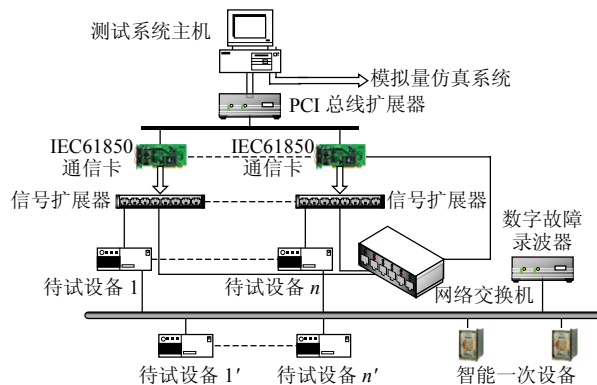


图 1 数字化变电站继电保护动态实时仿真系统结构  
Fig. 1 Illustration of DDRTS main structure

成与系统主机的高速并行通信; IEC 61850 高速通信卡由相同的 3 块硬件组成,其中 2 块每块可以负责 3 个合并单元(merging unit, MU)的电子互感器 SV 数字信号编码打包、传输任务,2 块卡可以传输 6 个 MU 的 SV 信号,另一块负责 GOOSE 报文的打包、解包及传输任务;信号扩展器负责将一个 MU 的 SV 信号扩展成 8 路输出,可同时供 8 台设备连接;光纤以太网故障录波器负责记录仿真系统及保护设备的输入输出信息;网络交换机负责按不同测试要求组成不同的网络试验方案。

根据测试要求,当被测系统或设备采用点对点组网方案时,保护及故障录波器直接接信号扩展器,网络交换机只负责 GOOSE 信号传输工作,如图 1 所示的待测设备 1—n 接线方式。当被测系统或设备采用网络组网方案时,信号扩展器输出信号通过网络交换机汇总后接入保护及故障录波器,网络交换机负责 SV 和 GOOSE 信号的传输工作,如图 1 所示的待测设备 1'—n' 接线方式,可通过设置交换机虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)参数实现与仿真系统的信息交换。

如果被测试系统或设备为输电线路光纤电流差动保护,一端为数字化变电站,另一端为常规变电站,仿真系统可以模拟在线路一端输出数字信号,在另一端输出常规模拟量电信号,系统可以保证在传输 2 种不同性质采样信号时有较好的同步性和一致性。

## 2 关键技术及难点

### 2.1 仿真系统的动态实时性

整个仿真过程包含电网动态电磁暂态仿真计算、采样值数据的打包和发送、GOOSE 报文发送及解析等环节,如果各项工作均由系统主机处理,则仿真计算、数据的打包解包和通信传输等工作完

全串行进行，这将影响系统主机 CPU 的处理速度，无法保证整个测试系统的实时性。为此开发了由数字信号处理(digital signal processing, DSP)芯片构成的 IEC 61850 高速通信卡，实现了测试主机加高速通信卡的多处理器结构。工作时，通信卡主要负责 IEC 61850 规约 SV 信号及 GOOSE 报文的打包及解析工作。系统主机只需在每个仿真步长时间内将采样值等数据写到通信卡，并把 GOOSE 报文数据从通信卡中取回来，IEC 61850 规约新增的通信任务几乎没多占用系统主机 CPU 的资源，从而极大地提高了仿真系统实时性，满足了闭环仿真测试的实时性要求。

## 2.2 多路 MU 信号并发技术

时间同步是数字化变电站的关键技术<sup>[12]</sup>之一，我们研究了多路信号并发技术，实现了多路 MU 信号的同步输出。多路 MU 信号的同步通过通信卡的外部同步时钟实现，在 3 块通信卡中配置了 1 块为主同步卡，如图 2 所示。

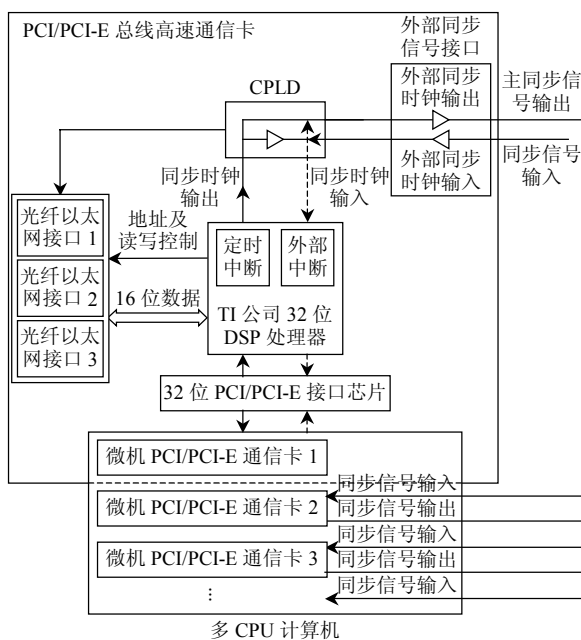


图 2 IEC 61850 高速通信卡时钟信号同步示意图

Fig. 2 Illustration of synchronization between IEC 61850 communication cards

主同步卡利用 DSP 芯片中的定时中断作为同步时钟信号源，输出给复杂可编程逻辑器件 (complex programmable logic device, CPLD) 芯片，该时钟信号不仅作为本通信卡的同步时钟信号源，同时输出到外部同步信号接口，经驱动后作为其他卡的外部同步时钟信号源，用短导线连接到下一块卡的外部同步时钟输入。其他卡只接收外部同步时钟源信号，DSP 芯片中的定时中断同步信号源不起

作用，即该系统所有通信卡的同步时钟信号源都是主同步卡时钟，因此可以较好地保证多路 MU 信号的同步。如果有需要，仿真系统的主同步卡还可以改为只接收外部 GPS 送来的同步时钟信号，实现全站参试设备统一时钟。

## 2.3 模拟量仿真与数字量仿真同步技术

模拟量与数字化变电站数字量混合输出的关键仍然是它们之间的同步问题，数字信号需要经过通信卡的编码打包经光纤以太网端口输出，模拟量需要经过 D/A 转换变成模拟量小信号后通过功率放大器输出，2 者的输出方式和路径不一样，传输延时亦有差异，即 2 者之间也存在信号同步问题。本系统采用了与上述多路 MU 信号并发技术相近似的同步技术，将模拟量通信卡也纳入了 IEC 61850 通信卡的时钟同步范畴，并通过对 2 种信号传输时延的调整实现了对 2 种信号的完全同步传输，从而实现了模拟量与数字化变电站数字量的混合仿真，为今后的试验研究工作带来了极大的方便。

## 2.4 IEC 61850-9-1、-9-2 通信规约信号同时输出技术

IEC 61850-9-1 点对点通信规约格式相对固定<sup>[13]</sup>，但通道配置不灵活；IEC 61850-9-2 通信规约通道配置灵活，方便组网。最近制定的智能电网数字化变电站技术条件都要求采用 IEC 61850-9-2。但是就目前国内二次设备的生产现状来看，使用这 2 种规约的设备将有一个并存的阶段，为此该系统利用了不同 MU 通道之间可以独立设置通道数据格式及参数的特点，实现了对 2 种不同规约信号设备的独立和混合输出试验，使系统的实用性进一步加强。

## 2.5 电子式电流、电压互感器仿真模型研究

电子式电流、电压互感器根据传感元件的传变原理可以分为 2 类。一种为有源电子式互感器，它利用电磁感应原理感应被测信号，电流互感器采用 Rogowski 线圈<sup>[14-15]</sup>，电压互感器采用电阻、电容或电感分压等方式。另一种无源电子式互感器又称为光学互感器，无源电子式电流互感器利用法拉第 (Faraday) 磁光效应感应被测信号，传感头部分分为块状玻璃和全光纤 2 种方式。但不论是哪种形式的互感器，其输出特性必须遵循 IEC 标准<sup>[16-17]</sup>。根据 IEC 定义，电子式互感器 (ECT、EVT) 在正常适用条件下，其二次转换器的输出实质上正比于一次电流或电压，且相位差在联结方向正确时，接近已知相位角。根据这一定义，本系统在搭建电子式互感器

仿真模型时,对电子式电流互感器调整了原有模型参数,取消了原模型饱和特性,输出了完全与一次电流成比例的 SV 信号。对于电子式电压互感器采用电磁电压互感器模型,不考虑饱和特性,输出了完全与一次电压成比例 SV 信号。

### 2.6 基于 IEC 61850 通信规约的数字故障录波器

为了对全数字化变电站仿真系统的采样值及 GOOSE 报文信息进行记录,及时分析和判断仿真系统输出信息及被试设备的工作性能,与中国电科院合作,共同研究开发了全数字式故障录波器。录波器设置了 4 个光纤接收输入端口和 4 个网络输入端口,可以同时接收、记录、分析仿真系统和被测试设备的 SV 及 GOOSE 报文信息。

## 3 仿真系统动态准确性及同步性验证

### 3.1 测试模型

为了检验新建设的仿真系统的动态实时性及准确性,搭建了一个如图 3 所示的 3 绕组变压器保护闭环测试模型。变压器模型参数采用 220 kV 常规典型参数,等值电源 1 和等值电源 2 分别为 220 kV 和 110 kV 系统等值电源,容量可调,220 kV 侧还通过 1 条 220 kV 线路 L 接入了 1 台发电机。

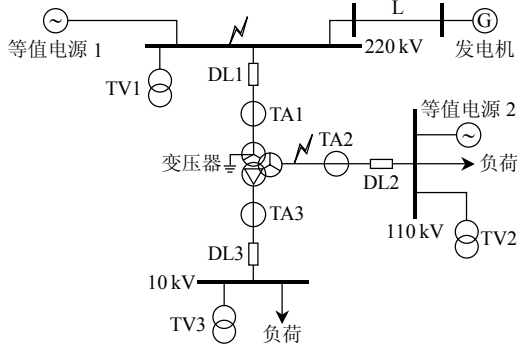


图 3 3 绕组变压器保护闭环测试模型

Fig. 3 Model of testing system for three winding transformer protection

其中 TV1、TV2、TV3 为变压器高、中、低三侧母线电子式电压互感器,TA1、TA2、TA3 为变压器高、中、低三侧电子式电流互感器,三侧仿真输出通过信号扩展器连接网络交换机,保护装置及故障录波器从网络交换机获取电子互感器采样数据、保护的跳闸指令及仿真断路器 DL1、DL2、DL3 的位置信号,从而组成 GOOSE 网络,通过网络交换机实现了与系统的交互通信和控制,形成闭环测试。

### 3.2 电子互感器交流采样精度验证

按照上述模型设置好模型参数后运行仿真程

序。首先仿真变压器带正常负荷运行,以系统的仿真输出页输出波形数据为基准,通过对基准波形与故障录波器记录的采样值波形数据进行比较,检验仿真系统输出波形参数与基准波形参数的一致性和同步性。

系统仿真运行期间启动故障录波器,记录变压器三侧电流电压波形,同时刷新仿真输出页,得到仿真输出波形数据,然后再对 2 波形数据进行分析比较,得出测试结论。图 4 为仿真输出的波形及测试结果,图 5 为故障录波器记录波形及测试结果,将 2 套波形数据整理后汇总于表 1,为了便于比较,仅列出了各侧的 A 相波形图及分析结果。

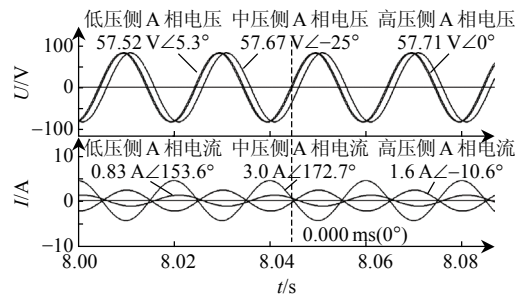


图 4 仿真系统的输出波形

Fig. 4 Output waveforms of DDRTS simulation system

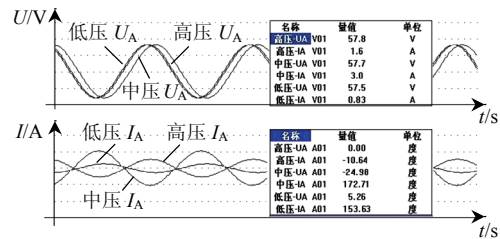


图 5 故障录波器记录波形及测试结果

Fig. 5 Recorded waveforms and testing results of fault recorder

表 1 变压器各侧 A 相电流电压测试结果

Tab. 1 Testing result of A phase voltage and current of transformer

项目	仿真输出页	故障录波器
高压电压/V	57.71 ∠ 0°	57.8 ∠ 0°
高压电流/A	1.6 ∠ -10.6°	1.6 ∠ -10.64°
中压电压/V	57.67 ∠ -25.0°	57.7 ∠ -24.98°
中压电流/A	3.0 ∠ 172.70°	3.0 ∠ 172.71°
低压电压/V	57.52 ∠ 5.3°	57.5 ∠ 5.26°
低压电流/A	0.83 ∠ 153.6°	0.83 ∠ 153.63°

从上述波形图及表 1 的测试数据可以看出,仿真系统输出波形数据(录波器)与仿真输出页的电流电压幅值和相位误差很小,可以验证该系统采样值准确可靠,仿真同步性较好,没有产生传输相位和幅值误差。

### 3.3 GOOSE 跳闸指令及位置信号传输同步性验证

从理论上讲,交流采样及 GOOSE 报文的传输

及解析过程都需要时间,各个交流采样通道的传输延时必须一致,否则各相之间就会出现相位差。通过上述交流采样相位精度检验,可以验证各个通道的传输延时一致,没有相位误差。GOOSE 报文的传输延时主要影响保护或断路器信号的传输时间,所以我们只关心它们之间的相对误差,即各 GOOSE 报文信号之间和 GOOSE 报文与交流采样之间时间之差。为此我们利用上述三绕组变压器保护闭环测试模型,连接了北京四方的 CSC-326 数字变压器保护和故障录波器,通过故障录波器记录的变压器中压侧内部故障时的交流采样与保护动作信号、开关位置 GOOSE 报文波形,如图 6 所示。

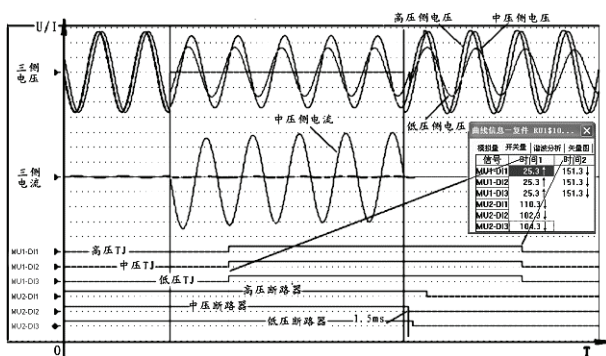


图 6 变压器内部故障保护动作行为测试

Fig. 6 Testing result of transformer protection under condition of internal fault

可以看出:变压器内部故障时,保护动作输出的高压 TJ(MU1-DI1)、中压 TJ(MU1-DI2)及低压 TJ(MU1-DI3)25.3 ms 动作,151.3 ms 返回,动作一致性较好;系统的模拟断路器位置信号高压断路器(MU2-DI1)、中压断路器(MU2-DI2)及低压断路器(MU2-DI3)位置动作时间较离散,这是仿真系统非过零点切除故障所致。从图 6 三侧电压波形可以看出,中压侧切除故障最早,随后是低压侧,最后是高压侧,从故障切除(波形突变)到故障录波器收到报文大约有 1.5 ms 的延时,这一时间是 GOOSE 报文相对于采样值数据的打包、解包时间之差,1.5 ms 延时较为合理。

为了进一步检验系统实用性,该系统已与 2 个厂家 4 种型号的保护设备实现了对接和闭环测试,其中有北京四方 CSC-326 数字变压器保护和新疆光电的 X7210 数字变压器保护、X7110 数字线路保护、X7700 数字母差保护。同时还进行了数字化变电站数字量与常规变电站模拟量的混合仿真试验,验证了新研发的数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统仿真数据准确可靠,软硬件配合得当,界

面设计合理,可以满足对智能电网数字化变电站继电保护等相关智能二次设备的闭环检测需求。

## 4 结语

为适应基于 IEC 61850 通信标准数字化变电站设备试验需求,在原有 DDRTS 数字动态实时仿真系统上开发出全数字化变电站继电保护闭环实时仿真系统,该系统可以提供满足 IEC 61850 通信标准的数字化变电站输入、输出信号,实现了数字化变电站保护等二次设备的闭环测试。该系统通过实际建模仿真,检验了新建仿真系统的准确性和可用性。新建的闭环实时仿真系统为下一步即将开展的数字化变电站建设提供了一种试验研究手段,对提高电网全数字式保护及二次设备技术性能和健康水平具有实用价值。

## 参考文献

- [1] 于军,熊小伏,张媛. 数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 28-33.  
Yu Jun, Xiong Xiaofu, Zhang Yuan. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 28-33(in Chinese).
- [2] 冯小玲,郭袅,谭建成. 实时数字仿真系统(RTDS)在继电保护上的应用研究[J]. 国际电力, 2005, 9(4): 43-47.  
Feng Xiaoling, Guo Niao, Tan Jiancheng. Researches and applications of real-time digital simulation system to relay protection[J]. International Electric Power for China, 2005, 9(4): 43-47(in Chinese).
- [3] 高广玲,潘贞存,高厚磊. 基于 IEC 61850 标准的实时数字仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 103-107.  
Gao Guangling, Pan Zhencun, Gao Houlei. Electrical real-time digital simulation system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 103-107(in Chinese).
- [4] 王红青,杨立,任文军. 基于 IEC 61850-9-2 接口的保护动模试验[J]. 华东电力, 2008, 36(6): 47-49.  
Wang Hongqing, Yang Li, Ren Wenjun. Dynamic simulation tests for protections based on IEC 61850-9-2 interfaces[J]. East China Electric Power, 2008, 36(6): 47-49(in Chinese).
- [5] 柳勇军,梁旭,闵勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 39-42.  
Liu Yongjun, Liang Xu, Min Yong. Power system real time digital simulation technology[J]. Electric Power, 2004, 37(4): 39-42(in Chinese).
- [6] 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 Peichao, Gao Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77(in Chinese).
- [7] 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 Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71(in Chinese).

- [8] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-15.  
Tan Wenshu. An introduction to substation communication network and system: IEC 61850[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 8-15(in Chinese).
- [9] 徐立子. 变电站自动化系统的可靠性分析[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 68-72.  
Xu Lizi. Reliability analysis of substation automation system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 68-72(in Chinese).
- [10] 王勇, 曹保定, 姜涛. 电子式互感器合并单元的快速数据处理[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 87-91.  
Wang Yong, Cao Baoding, Jiang Tao. Fast data processing for merging unit of electronic transformer[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 87-91(in Chinese).
- [11] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强. IEC 61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 80-86.  
Dou Xiaobo, Wu Zaijun, Hu Minqiang. Information model and mapping implementation of merging unit based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 80-86(in Chinese).
- [12] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 77-82.  
Zhang Peichao, Gao Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77-82(in Chinese).
- [13] 郑新才, 施鲁宁, 杨光. IEC 61850 标准下采样值传输规范 9-1、9-2 的对比和分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 47-50.  
Zheng Xincan, Shi Luning, Yang Guang. Comparison and analysis of sampled value transmission specification 9-1 and 9-2 in IEC 61850 standard[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 47-50(in Chinese).
- [14] 翁韶芳, 孙丹婷. 电子式电压互感器传感元件的分析及实验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 55-58.  
Weng Shaofang, Sun Danting. Analysis and experiment of the sensor in new electronic voltage transformers[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(5): 55-58(in Chinese).
- [15] 宁伟红, 于文斌, 张国庆. 以 LabVIEW 为开发平台的电子式互感器校验仪设计[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 85-89.  
Ning Weihong, Yu Wenbin, Zhang Guoqing. Design of a calibrator for electronic current transformer based on LabVIEW[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 85-89(in Chinese).
- [16] DL/T 860.91(IEC 61850-9-1) 变电站通信网络和系统第 9-1 部分[S].
- [17] DL/T 860.92(IEC 61850-9-2) 变电站通信网络和系统第 9-2 部分[S].



孟恒信

收稿日期: 2010-08-31。

作者简介:

孟恒信(1953), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及电网仿真技术, E-mail: mhx4739@163.com;

梁旭(1968), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统仿真技术;

刘愈倬(1962), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与计算;

张悦(1963), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护试验与研究。

(责任编辑 李兰欣)