

# 智能变电站的合并单元仿真系统研究

张祥文<sup>1</sup>, 缪文贵<sup>2</sup>, 杨洪涛<sup>1</sup>

(1. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

**摘 要:** 研究智能变电站的合并单元(MU)仿真系统的需求, 提出一个完全基于软件、通过配置和仿真系统能够在 PC 机上模拟出多路 MU, 可以模拟出多路电气量的幅值、相角和故障时间点, 发出的快速采样值报文完全满足延时要求, 为装置的调试提供了方便。仿真系统还可以读取故障录波的 COMMTRADE 文件进行回放, 为智能变电站的事故分析提供了支撑。

**关键词:** 智能变电站; 合并单元; 仿真系统

**中图分类号:** TM762

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2012)01-0046-03

近年来, 随着 IEC 61850 标准的研究和推广以及智能变电站的建设, 人们对智能变电站的认识渐渐统一到三层架构上: 智能化的一次设备、网络化的二次设备和自动化的运行管理系统。采样 IEC 61850 标准的智能变电站在逻辑上分为三层, 即过程层、间隔层和站控层, 目前过程层的实现依赖于电子式互感器和合并单元(MU)。为此, 国际电工委员会制定了相关的国际标准 IEC 60044/7/8 和 IEC 61850-9-1, 定义和描述了电子式互感器与 MU。MU 的主要功能<sup>[1]</sup>是对同步采集的三相电流、三相电压输出信息汇总, 并按照一定的格式输出给二次设备。MU 是智能变电站的重要组成部分<sup>[2]</sup>, 二次设备的研制和调试也需要大量的 MU 信号, 尤其是高压主变保护需要 3 或 4 路 MU 信号。采用 MU 仿真系统可以极大降低开发成本、减少物理装置的接线和缩短开发周期。采用仿真系统可以灵活模拟各种数据, 发出快速采样值报文到二次设备, 检测二次设备能否正确响应, 为相关装置的开发和调试提供了便利。

## 1 MU 相关标准

MU 用于连接电子式互感器与保护测控等二次设备, 同步采集 7 路电流信号和 5 路电压信号, 为二次设备提供时间一致的电流和电压数据, 它接入的信号包括电子式互感器输出的数字化采样值信号、智能化开关设备的开关信号和传统互感器的模拟信号。IEC 61850-9-1<sup>[3]</sup>引用了 IEC 60044-7/8<sup>[4]</sup>, 通过特定通信服务映射将 MU 的单向多路点对点串行通信链路映射到以太网的数据链路层。

### 1.1 物理层

MU 与二次设备的连接可采用光纤传输系统。考虑并解决电磁兼容性的问题, 也可选择基于铜质

材料的传输系统。

### 1.2 链路层

地址域由全部为“1”组成的以太网广播地址作为目标地址的缺省值, 然而作为一个可选性能, 目标地址应当是可配置的, 例如, 通过改变多播传送地址可以借助交换机将 MU 与间隔层设备连接。为了区分与保护应用相关的强实时高优先级的总线负载和低优先级的总线负载, 采用了符合 IEEE 802.1Q 的优先级标记。优先级标记头的结构如图 1 所示。

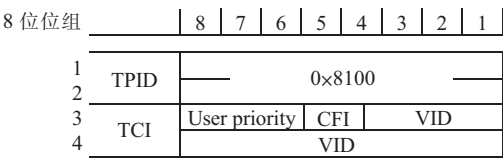


图 1 优先级标记头的结构

基于 ISO/IEC 8802-3 MAC 子层的以太网类型由 IEEE 注册。以太网类型值为 88-BA(16 进制)。

### 1.3 表示层

采用了 ASN.1 对采样值进行 BER 编码, 编码格式为 TLV。

### 1.4 应用层

应用协议数据单元(APDU)被递交到传输缓冲区以前将若干个应用服务数据单元(ASDU)连接成 1 个 APDU, APDU 结构如图 2 所示。被连接为 1 个 APDU 的 ASDU 的数目可通过配置参数进行定义并且与采样速率有关。

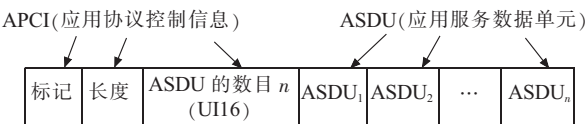


图 2 APDU 结构

根据 ISO/IEC 8825-1 的要求在帧前增加了 1 个 ASN.1 标记和长度作为应用协议控制信息(APCI)的一部分。根据 ASN.1 基本编码规则, 这个标记描述了 1 个 8 位位组串并且被定义为 0x80。为了保证

与所述的另外的采样值信息组合时数据的一致性,用于模拟量采样值信息的 ASN.1 语法定义如下:

```
IEC 61850 DEFINITIONS
IecSavPdu::=CHOICE{ 9-1-Pdu  [0]
IMPLICIT OCTET STRING,    --9-1
APDU 采用
savPdu  [1] IMPLICIT SavPdu,
-- 为 9-2 的 APDU 保留
-- 其他值待定义      }
```

2 MU 数字仿真设计

目前在调试智能二次设备时需要接 CT 和 PT 到 MU,然后再接到二次设备,尤其需要同时接入多路 MU 数据时非常麻烦,给开发调试带来不便,为此设计了纯软件的 MU 仿真系统,仿真系统结构如图 3 所示。

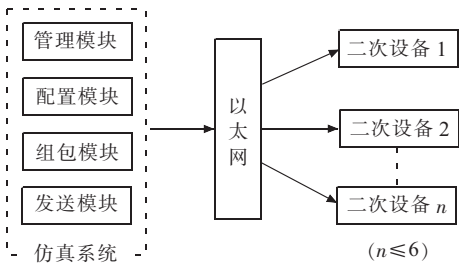


图 3 仿真系统结构

仿真系统设计为能支持模拟同时发送 6 个 MU 数据,以采样速率  $S_R=5\,000$  点(100 点×50 Hz),每个 APDU 包含 4 个 ASDU 而不含状态量数据集为例:最大的报文长度  $T_L=26$  字节以太网报头+4 字节优先级标记+8 字节以太网型 PDU + 2 字节 ASN.1 标记 / 长度 + 2 字节块数目 +46 字节通用数据集×4+96 位帧间隔= 1 904 位。

保留 10% 的裕度,模拟 6 个 MU 所需带宽为:  $(5\,000 \div 4) \times 1\,904 \times 1.1 \times 6 = 15.708\text{ Mbps} < 100\text{ Mbps}$ ,理论上,100 Mbps 以太网接口满足带宽要求。

仿真系统包含 4 个重要模块:管理模块、配置模块、组包模块和发送模块。

2.1 管理模块

管理模块的功能主要包括:参数文件的新建、打开、保存,自适应 COMMTRADE 文件和自定义文件 2 种格式。用例的新建、用例的修改、用例的删除、用例的导入导出、用例的生成以及用例的运行,每 1 个用例都对应 1 个完整的仿真需求。当 1 个用例运行时先初始化必要的参数,然后读取 COMMTRADE 文件或配置模块生成的数据文件,最后调用组包模块和发送模块发送报文。

2.2 配置模块

配置模块的主要功能是对仿真的数据源进行参数配置,对应每个配置文件可配的参数有 MU 的数目,时间段数,每个时间段的时间,目的端的 MAC 地址和 LDname,每个 APDU 包含的 ASDU 的数目,以及每个 MU 每个时间段的额定相电流、额定相电压、额定中线电流、额定延时、保护用相电流(幅值和相角)、测量用相电流(幅值和相角)、中线电流(幅值和相角)、相电压(幅值和相角)、中线电压(幅值和相角)和母线电压(幅值和相角)、采样频率、状态字 1 和状态字 2。这些参数都配置好后给组包模块提供数据源,也可以生成文件本地保存方便以后重复使用。

2.3 组包模块

组包模块的主要功能是读取数据源文件,按照参数配置生成周期性的交流量数据,每个目的 MAC 地址对应 1 个模拟 MU,读取相应的参数和流量数据组成 ASDU,给每个 ASDU 打上编号后组成 APDU 帧,然后给每个待发送包打上时间标记,最后依次从每个模拟 MU 中取出对应的包组成 1 个待发送的包序列。

2.4 发送模块

发送模块主要功能是完成包序列的发送,因为要发送的数据量很大,且实时性要求高,一般的 PC 机系统无法直接实现,所以开发了基于 WpdPack 开发包的驱动去控制系统的 CPU 内核,使时间的分辨率达到微秒级,驱动网卡按照待发送包序列中每包对应的时间标记直接发送包序列。控制包体系结构是由 1 个核心的包过滤驱动程序、1 个底层的动态连接库 Packet.dll 和 1 个高层的独立于系统的函数库 Libpcap 组成。底层的包捕获驱动程序为 1 个协议网络驱动程序、通过对 NDIS 中函数的调用为 windows 提供类似于 UNIX 系统下 Berkeley Packet Filter 的捕获和发送原始数据包的能力。Packet.dll 是对这个 BPF 驱动程序进行访问的 API 接口,同时有 1 套符合 Libpcap 接口的函数库。控制包通过对内核的排他性占用,使多任务的操作系统只执行发包的单任务来保证实时性。时间本应同步的多个模拟 MU 产生的微秒级的时间延时在二次设备的许可之内,一起发到网络上的数据包都有各自的目的 MAC 地址,因此这些数据包可以顺利到达对应的二次设备。

3 应用示例

下面用仿真系统模拟带桥变压器主保护所需要的 4 个 MU。

以常见的每个周期采 100 点,每个 APDU 包含

4 个 ASDU 为例,那么每个数据包的间隔为  $4 \times 20 \text{ ms}/100=0.8 \text{ ms}$ ,3 个时间段分别对应正常状态、故障状态和故障恢复,设置 4 侧的 MAC 地址依次为 01-0c-cd-04-01-01(MU1)、01-0c-cd-04-01-02(MU2)、01-0c-cd-04-01-03(MU3)、01-0c-cd-04-01-04(MU4)。

通过第三方的协议分析软件抓包分析,按照发送顺序抓包所得发送报文间隔如图 4 所示,时间为相对上一包的时间差(s),根据目的 MAC 可见,对于编号相同的数据包 MU4 与 MU1 之间最大的时间延时为  $0.000021 \text{ s}+0.000029 \text{ s}+0.00003 \text{ s}=80 \mu\text{s}$ 。

图 4 发送报文间隔

MU1 一侧数据包队列的发送间隔降序排列如图 5 所示,其最大间隔  $0.809 \text{ ms}$ ,MU1 一侧数据包队列的发送间隔升序排列如图 6 所示,其最小间隔  $0.790 \text{ ms}$ ,这两个时间间隔和标准的  $0.8 \text{ ms}$  的误差仅为  $10 \mu\text{s}$ 。

图 5 发送间隔降序排列

MU2,MU3,MU4 的数据包队列中时间间隔最大误差分别为  $10 \mu\text{s}$ ,  $9 \mu\text{s}$ ,  $5 \mu\text{s}$ 。实验表明时间延时和网络带宽和 CPU 的处理能力有关系。

可见,MU 仿真系统所模拟的多路报文在性能上非常出色,在实验室二次设备的开发和调试过程

图 6 发送间隔升序排列

中完全可以替代实际的 MU 装置。

## 4 结束语

MU 仿真系统能够准确的按照 IEC61850 标准模拟出多路 MU 发出的采样值报文,而且在延时许可范围内完全可以达到 MU 装置的性能。MU 仿真系统是用纯软件的方式实现了 MU 的功能,可以减少 MU 装置和交流源需求,节约了成本,在装置调试过程中减少接线,方便灵活的参数配置大大缩短了开发周期,为二次设备和智能变电站提供了灵活方便的调试手段。

### 参考文献:

- [1] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J].电力系统自动化,2004,28(11):57-61.
- [2] 梁晓兵,周捷,杨永标,等.基于 IEC 61850 的新型合并单元的研制[J].电力系统自动化,2007,31(7):85-89.
- [3] IEC 61850-9-1,Communication Networks and Systems in Substations: Part 9-1:Specific Communication Service Mapping—Sampled Values over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].2003.
- [4] IEC 60044-8,Instrument transformers: Part 8 electronic current transducers[S].2002.

### 作者简介:

张祥文(1980),男,安徽天长人,工程师,从事电力系统自动化方面的工作;

缪文贵(1975),男,江苏海安人,高级工程师,从事电力系统自动化方面的工作;

杨洪涛(1981),男,湖北襄阳人,工程师,从事电力系统自动化方面的工作。

## Research of Merging Unit (MU) Emulation System Based on Intelligent Substation

ZHANG Xiang-wen<sup>1</sup>, MIAO Wen-gui<sup>2</sup>, YANG Hong-tao<sup>1</sup>

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003,China;

2.NARI Technology Development Co.Ltd., Nanjing 210061,China)

**Abstract:** The requirements of merging unit (MU) emulation system of intelligent substation are studied in this paper. Based on software and configuration, MU emulation system can simulate multiple MUs simultaneously on personal computer, and simulate electrical vectors' amplitude, phase angle and fault time. The sampled values of packets satisfy requirements of rated delay time, which greatly facilitates the debugging of devices. In addition, MU emulation system can read COMMTRADE files to send packets, which provides the support for the failure analysis in intelligent substation.

**Key words:** intelligent substation;merging unit;emulation system