基于 OPNET 的智能变电站继电保护建模与仿真

黄明辉[1],邵向潮[2],张 弛[1],王海柱[2],李一泉[1],蔡泽祥[2]
(1. 广东省电力调度中心,广东 广州 510600;2. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:智能变电站过程层网络的引入,使得继电保护的数据源与传输方式发生了很大变化,其动作性能与可靠性越来越依赖于通信网络。分析了智能变电站继电保护的数据流及各报文的通信机制,基于 IEC61850 标准在 OPNET 仿真软件上进行了过程层网络和继电保护 IED 设备的建模,实现了智能变电站继电保护的 MU 数据采集、SV 报文、GOOSE 报文、保护算法和保护出口的全过程仿真。结合电流保护实例,说明了建模仿真的原理和实现机制,验证了其可行性和有效性,为智能变电站继电保护的定量分析提供了新的有效研究工具。

关键词:变电站;继电保护;数据采集;数据流分析;通信;机制;仿真;建模;OPNET
中图分类号:TM 77 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.025

0 引言

随着智能变电站建设与应用的推广,通信网络将贯穿整个变电站自动化系统,继电保护等应用越来越依赖于通信网络[1-4]。由于智能变电站过程层网络的引入,智能变电站继电保护系统的数据采集、传输、处理及输出过程与传统微机保护有很大差异,其动作性能与可靠性备受关注,由此给继电保护的安全可靠运行带来了挑战[5-6]。

由于专业的局限性,变电站运行人员对智能变电站技术的认识和把握尚不够深入、准确。而由于缺乏有效的分析工具,几乎没有针对智能变电站继电保护等应用系统的性能分析与研究评估。故通过仿真软件实现智能变电站通信网络、IED 算法及其逻辑和数据交换过程的定量仿真变得十分必要和迫切。

OPNET Modeler 作为国际上一种主流而权威的仿真软件被广泛应用于通信网络、设备、协议和应用的设计开发与研究领域中[7]。近年来,国内外相关研究将 OPNET 引入到变电站自动化系统的通信网络分析中[5-14],展现了良好的发展前景。然而,已有的研究主要停留在定性层面,主要体现在:缺少 IEC 61850 标准的详细建模,不能真实描述智能变电站中的实际数据处理过程,难以进行定量分析;利用 OPNET 自带模型来模拟 IED,缺少 IED 算法与逻辑的详细建模,难以描述 IED 的实际性能。

针对以上问题,基于 IEC61850 标准在 OPNET 仿真软件上进行了过程层网络和继电保护 IED 的建模,本文提出了智能变电站继电保护从合并单元(MU)数据采集、采样值(SV)报文、GOOSE 报文、保护算法和保护出口的全过程建模方法,并以电流保护为例,说明了继电保护算法逻辑的建模深度和实现机制。本文为开展智能变电站继电保护动作性能分析评估提供了一种新的有效工具,也为智能变电站其他应用系统的仿真提供了成功的借鉴。

收稿日期:2012-05-22;修回日期:2013-03-25
基金项目:广东省科技计划资助项目(2010B010900028)
Project supported by the Science and Technology Program of Guangdong Province(2010B010900028)

1 智能变电站继电保护构成方式与特点

IEC61850 将智能变电站分成了“三层两网”结构,并规定采用以太网实现站级网络和过程层网络。传统变电站综合自动化的站级通信已基本实现网络化,而过程层网络仍然使用电缆硬接线来传输保护跳闸等信号,并未实现数据共享和网络化。过程层网络化是 IEC61850 新引入的,它彻底改变了变电站自动化系统的数据传输方式,其性能直接影响智能变电站中继电保护等应用系统的性能和可靠性。

1.1 智能变电站继电保护基本通信连接

在智能变电站通信网络中,逻辑节点为通信的基本单元,图 1 是 IEC61850 给出的保护功能逻辑节点的通信结构[15],图中包括了保护输入、输出信号。输入信号有来自站控层的控制信息、同一层上其他功能信号、来自过程层 MU 的电压/电流 SV 和智能操作箱的开关状态量,输出信号包括开关跳闸信号、保护闭锁信号等。大部分的智能变电站继电保护都是基于此通信结构设计的,其主要的 IED 包括:过程层

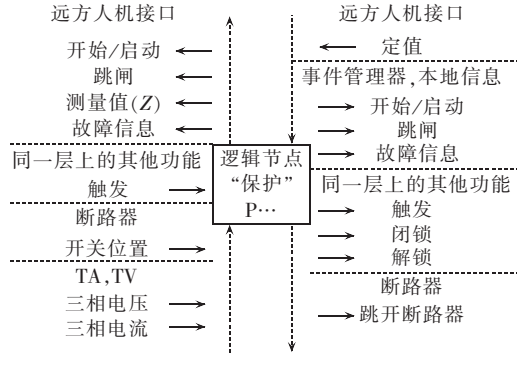

图 1 保护功能逻辑节点的通信结构

Fig.1 Communication structure of logical function nodes of protection

的互感器、MU、智能操作箱、间隔层的继电保护装置、站控层的后台主机等。

1.2　智能变电站继电保护过程层的基本数据流

MU 按照设定的采样率,对互感器中的电压、电流量进行采样,将其打包成数据帧格式,即 SV 报文,通过交换式以太网传送给继电保护装置;继电保护装置根据发布者/订阅者协议,接收处理相应的数据,基于保护判据形成出口命令发送 GOOSE 报文(包括开关分合、设备投退、档位切换等)给智能操作箱,智能操作箱实施操作后将开关状态量以 GOOSE 报文的形式反馈给保护装置。

1.3　智能变电站 3 层通信协议

常规工业以太网一般采用 TCP/IP 7 层协议封装解析报文来保证其可靠性。但是在智能变电站过程层网络中,由于继电保护等应用的高实时性要求,IEC61850 支持直接映射到数据链路层。变电站中的周期性报文(如 SV 报文)、快速报文(如 GOOSE 报文)采用 3 层结构(如图 2 所示),这样有效地缩短了报文封装与解析延时。

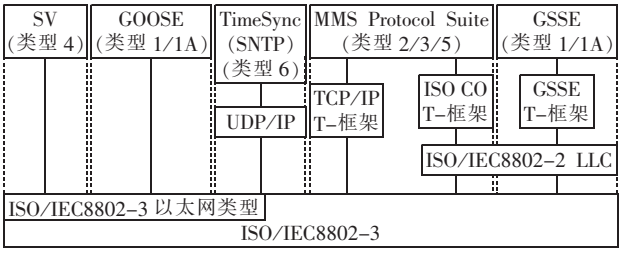

图 2 功能与框架

Fig.2 Functions and framework

1.4　智能变电站继电保护仿真要求

智能变电站过程层网络的引入,使得继电保护中数据采集、传输、处理及输出过程发生了很大的变化,同时结合现有软件建模的现状,本文将从如下几个方面对智能变电站继电保护进行建模。

a. 数据源与 MU。数据的产生可以根据电气量解析表达式通过函数发生器或通过导入故障录波(或数值仿真)数据的方式实现;MU 将获得的原始采样数据根据 IEC61850-9-1/2 装包传送。

b. SV 与 GOOSE 报文。2 种报文具体字段应根据 IEC61850 进行定义,而且发送机制不同:SV 报文周期性发送,GOOSE 服从心跳报文的重发机制。

c. 过程层网络及其通信协议。包括过程层网络物理链路、交换机等设备建模以及 IEC61850 相关协议建模。

d. 过程层网络优化机制。过程层网络中由于数据流量较大,为保证关键报文传送的实时性和可靠性,经常采用优先级设置、虚拟局域网(VLAN)划分等优化机制。

e. 继电保护算法与逻辑。继电保护装置 IED 建模主要体现保护原理、算法、判据、逻辑。

2　面向继电保护分析的过程层网络建模

2.1　OPNET 仿真软件

OPNET 是一种主流的网络建模和仿真工具,采用面向对象的建模方法和图形化的编辑器,其层次建模方式灵活,支持计算机网络与通信领域的通信、设备和协议的研究。

a. 网络域:利用网络设备模型、编辑网络拓扑结构和设置设备属性,来映射现实网络。

b. 节点域:实现不同功能模块的组合,用于描述协议的层次结构,用包流线来连接各功能模块,实现设备具体功能。

c. 进程域:用有限状态机、C 语言或 C++ 语言以及 OPNET 自带的核心函数来定义节点域中各功能模块以及模块中事件之间的控制流。

2.2　数据源与 MU 的建模

仿真数据源的产生,可以有如下 2 种方法。

a. 通过采样点电气量的解析表达式获得。

以某一恒电势电源电路发生三相短路故障为例,故障前保护安装处的 A 相电压、电流为:

$$\begin{cases} u=E_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\alpha) \\ i=I_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\alpha-\varphi) \end{cases} \tag{1}$$

其中,φ 为故障前功率因数角。

故障后保护安装处的 A 相电流为:

$$i_1=I_{\mathrm{ml}}\left[\sin(\omega t+\alpha-\varphi_1)-\mathrm{e}^{-R_1(t-t_0)/L_1}\sin(\omega t_0+\alpha-\varphi_1)\right] \tag{2}$$

其中,$I_{\mathrm{ml}}=E_{\mathrm{m}}/\left|Z_1\right|$,$Z_1$ 为故障后的阻抗;φ_1 为阻抗角。

当对任意确定结构的电力系统根据上述方法建立其全部的故障模型后,就可以采用 OPNET 函数发生器产生故障数据。

b. 故障录波或仿真数据导入。为了实现更复杂电网和实际故障的分析要求,可以通过实际故障录波或电力系统仿真软件(如 PSCAD/EMTDC)得到相关故障点的精确采样数据序列文件,通过编程导入到与一次系统相对应节点的 MU 模型中,在 OPNET 中实现系统的故障仿真。以下为部分源程序:

```
fp=fopen("F://current.emt//mmmm_01.out","r");
if(fp==NULL)
    {puts("Can not open file!");
    return;
    }
else
    {do
        {fscanf(fp,"%s",A[i]);
         fscanf(fp,"%s",B[i]);
         fscanf(fp,"%s",C[i]);
         i++;
        }while(!feof(fp));
     size=i;
    }fclose(fp);
```

在OPNET节点编辑域中建立MU节点模型，如图3所示。最上层为应用层，经过接口直接到达数据链路层(MAC节点模块)，最后通过物理层发送给外设备。

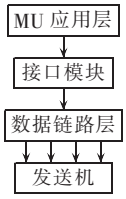

图3 MU节点模型

Fig.3 Model of MU node

图3中MU节点模块的主要功能是对数据SV进行装包，同步后发送给IED。MU应用层负责收集互感器传送的数据。在OPNET进程域中创建数据包，将得到的数据按字段分别写入包中，然后发送给数据链路层进行处理。以下为部分源程序：

```
pkptr=op_pk_create(pksize);
pkptr_APDU=op_pk_create_fmt("APDU");
op_pk_nfd_set(pkptr_APDU,"ASDUBAOTOU",baotou1);
op_pk_nfd_set(pkptr_APDU,"LNName",name1);
op_pk_nfd_set(pkptr_APDU,"DataSetName",name2);
op_pk_nfd_set(pkptr_APDU,"LDName",name3);
op_pk_nfd_set(pkptr_APDU,"EDINGXIANGDIANLIU",EDXDL);
…
op_pk_send(pkptr,0);
```

接口模块的主要作用是为应用层和数据链路层提供一个公用接口，同时给数据包加上源地址和目的地址。

数据链路层中，LLC子层请求发送数据时，MAC接收到LLC子层中数据，并加上相应的字段后放入缓冲区，等待发送；当进行载波侦听发现网络稳定时，发送报文帧，边发送边进行CRC校验；在发送过程中需进行碰撞检测数据包的发送是否成功。

物理层中有支持10 Mbit/s、100 Mbit/s和1 000 Mbit/s光纤以太网接口的收发机。

2.3 继电保护中2种报文的通信机制

原始数据SV[16]按照IEC61850-9-1/2数据帧格式封装成SV报文，其中IEC61850-9-1格式如图4所示(不包含以太网帧间隔)。

Header(64 bit)
Destination Address(48 bit)
Source Addresses(48 bit)
TPID/TCI(32 bit)
Ethernet type(16 bit)
APPID(16 bit)
Length/Type(16 bit)
Reserved1(16 bit)
Reserved2(16 bit)
ASN.1(16 bit)
ASDU Number(16 bit)
ASDU(368 bit+184 bit)
(Pad bytes)
Frame Check Sequence(32 bit)

图4 OPNET中SV的报文帧格式

Fig.4 Frame format of SV message in OPNET

在SV报文中，每个应用数据协议单元(APDU)包括1个或多个应用服务数据单元(ASDU)，考虑到数据的实时性，一般只包含1个电压/电流采样数据集。报文长度为984 bit(26 Byte以太网报头+4 Byte优先权标记+8 Byte以太网类型PDU+2 Byte ASN.1标记/长度+2 Byte块的数目+46 Byte数据值+23 Byte状态量+96 bit以太网帧间隔)[15]。封装的报文采用发布者/订阅者方式进行发送，具体有2种模式：基于VID的多播模式和基于MAC多播地址过滤的多播模式。SV报文是典型的周期性报文，其数据量相对稳定，但是报文数量大，时间要求严格。

GOOSE仍然以组播形式发送，它以一种心跳报文的方式进行发包，如图5所示。当数据发生变位时，装置通过重发机制来保证数据的可靠性。当没有GOOSE事件发生(如保护控制信息没有发生改变)时，GOOSE报文将以固定周期重发，IEC61850给出的建议值为1 s；一旦有事件发生，发送周期变为最小(一般为2 ms)，然后发送周期逐渐变长，直到事件状态稳定，发送周期重新回到设定的最大时长。

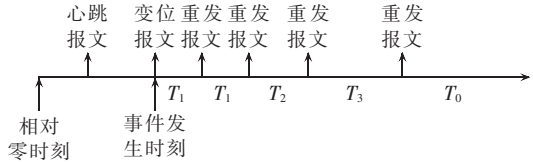

图5 GOOSE报文的重发机制

Fig.5 Re-sending mechanism of GOOSE message

2.4 过程层网络通信链路和交换机

通信链路的任务是输送变电站中各种业务数据流，不同的数据需要不同带宽的链路来满足其对实时性的要求。智能变电站继电保护对报文传输实时性的要求较高，文献[12]表明带宽为100 Mbit/s的交换式以太网能够满足其通信要求。OPNET模型库中提供了丰富的链路模型，为此选择100 Mbit/s的光纤以太网链路，其丢包率和延时等性能能够很好地模拟工程实际中的链路。

过程层网络中，交换机主要承担着数据存储转发的任务。在仿真过程中，选择OPNET模型库中3层以太网交换机，它能够有效地支持优先级的设置和VLAN的划分等。

3 继电保护IED建模

3.1 继电保护节点模型

继电保护IED采用3层节点模型，分别为应用层、数据链路层和物理层，如图6所示。针对继电保护IED节点，建模的主要内容包括：SV/GOOSE报文的接收及协议解析、保护算法与逻辑、动作报文形成与发送等。

a. SV/GOOSE报文的接收及协议解析。接收机

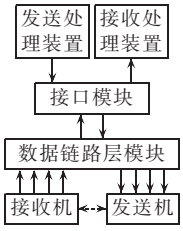

图 6 3 层节点模型

Fig.6 Three-layer node model

接收 MU 传送的 SV,此时的 SV 以编帧的位流形式存在,其在数据链路层模块被转换成数据帧格式,并通过接口模块形成应用层可解析的数据,传送到接收处理装置。接收机同时也接收来自智能操作箱的 GOOSE 报文,经过与 SV 报文相同的协议解析后,传送给接收处理装置。

b. 保护算法与逻辑。接收处理装置通过 SV 报文,得到相应 MU 的电压、电流 SV,同时结合智能操作箱实时上传的 GOOSE 报文,根据保护算法与逻辑得到处理结果。不同类型的保护,其算法与逻辑不同,只需根据相应的保护算法与逻辑,在接收处理装置中进行编程。

c. 动作报文形成与发送。发送处理装置在收到来自接收处理装置的处理结果后,形成 GOOSE 动作报文,封装后发送给智能操作箱。当有变位信息时,以变周期形式重发报文。

3.2　智能操作箱及断路器节点模型

智能操作箱同样采用图 6 的 3 层节点模型,其建模内容主要包括:动作报文接收及协议解析、断路器跳合闸和开关状态报文形成与发送等。

a. 动作报文接收及协议解析。接收机接收来自继电保护装置的 GOOSE 报文,在数据链路层中,经过与保护装置相同的协议解析后,传送给接收处理装置。

b. 断路器跳合闸。接收处理装置在解析 GOOSE 报文后控制断路器跳合闸,在跳合闸之前可加入一定的延时,来模拟断路器的机械动作时间。

c. 开关状态报文形成与发送。发送处理装置在收到来自接收处理装置的处理结果后,形成 GOOSE 状态报文,封装后发送给保护装置。

3.3　电流保护实例

本次仿真以电流保护为实例,说明建模仿真的原理和实现机制,根据电流保护算法在接收处理装置进行编程,以下为部分源程序:

```
op_pk_fd_get(pkptr,6,&pkptr_APDU);
op_pk_nfd_get(pkptr_APDU,"GYAXDL",&Ia);
if(Ia>Iset)
    GYA_tiao=0;
else
    GYA_tiao=1;
```

上述语句表示在 SV 报文中读取 A 相电流,通过与电流保护整定值进行比较,如果超过整定值就置 GYA_tiao 字段为 0(开关跳闸),否则置为 1(开关合闸)。

3.3.1　电流有效值算法

电流保护的电流有效值由半波积分算法得到。

$$S=\int_0^{T/2}\sqrt{2}\,I|\sin(\omega t+\alpha)|\,\mathrm{d}t=2\sqrt{2}\,IT/\pi \quad (3)$$

其中,S 为瞬时电流绝对值的半波积分。

$$S\approx\sum_{K=1}^{N/2}|i_K|\,T_S \quad (4)$$

其中,N 为 1 个周期的采样点数,保护对 MU 采样频率为每周期 80 点,则 $N=80$;T_S 为采样周期。则电流有效值为:

$$I=\sqrt{2}\,\pi S/(2T) \quad (5)$$

3.3.2　仿真参数

图 7 所示仿真实例中,电源阻抗为 $X_s=15.5\,\Omega$;线路电抗为 $x_1=0.4\,\Omega/\mathrm{km}$,可靠系数 $K_{rel}=1.3$。

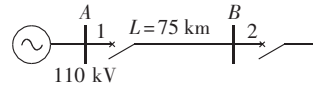

图 7 仿真实例

Fig.7 Simulation example

主要仿真参数见表 1,通信使用 100 Mbit/s 光纤以太网将 IED 连接到一个以太网交换机上。SV 报文发送给保护的速率为每周期 80 个采样点,报文长度按实际配置为 984 bit;GOOSE 报文采用的是变周期重发机制。根据不同类型报文的实时性要求,需为报文设定优先等级,如果涉及跨间隔保护还需设定 VLAN。仿真通过两相短路故障来测试保护机制的可行性。

表 1 过程层网络仿真主要参数

Tab.1 Main parameters of process-level network simulation

报文类型	长度/bit	优先级	采样周期
SV	984	5	每周期 80 个采样点
GOOSE(保护跳闸)	728	6	服从重传机制
GOOSE(开关状态)	728	4	服从重传机制

3.4　仿真结果分析

在过程层网络中,报文传输及处理会产生一定的延时,表 2 为本次仿真中报文的各项延时。

表 2 报文的传输及处理时延

Tab.2 Transmission and processing delay of messages

ms

发送端设备	接收端设备		
	保护	交换机	智能单元
MU	—	0.01890	—
保护	0.0350	0.00672	—
交换机	0.0189	0.00200	0.010
智能单元	—	0.01890	0.016

a. $t=0$ s,线路 A 侧 20 km 处发生 BC 两相短路故障,电流速断保护的整定值为 $I_{set}=2.03$ kA;在采样点数为 31 时,即 $t=7.75$ ms 时,BC 两相电流有效值为 2.073 kA,MU 形成 SV 报文发送给保护,经 0.074 8 ms(MU 到交换机的链路时延 0.018 9 ms + 交换机时延 0.002 ms + 交换机到保护的链路时延 0.018 9 ms + 保护时延 0.035 ms),保护接收到 SV 报文,处理后发出 GOOSE 跳闸报文,在 $t=7.894\,25$ ms 时,保护动作。SV和开关状态量信息如下:

```
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相电流:0 A;B 相电流:2 006 A;C 相电流:2 006 A;采样数:30
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相刀闸位置:1;B 相刀闸位置:1;C 相刀闸位置:1.
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相电流:0 A;B 相电流:2 073 A;C 相电流:2 073 A;采样数:31
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相刀闸位置:1;B 相刀闸位置:0;C 相刀闸位置:0.
----
```

b. $t=0$ s,线路 A 侧 10 km 处发生 BC 两相短路故障,在采样点数为 26 时,即 $t=6.5$ ms 时,BC 两相电流有效值为 2.052 kA,由表 2 可知,$t=6.644\,52$ ms 时,保护动作。SV 和开关状态量信息如下:

```
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相电流:0 A;B 相电流:1 974 A;C 相电流:1 974 A;采样数:25
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相刀闸位置:1;B 相刀闸位置:1;C 相刀闸位置:1.
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相电流:0 A;B 相电流:2 052 A;C 相电流:2 052 A;采样数:26
----
Module(18),(top.Campus Network.保护.Protection Receive)
From procedure:Protection Receive[DISCARD exit execs]
A 相刀闸位置:1;B 相刀闸位置:0;C 相刀闸位置:0.
----
```

可以看出,故障点距离电源点越近,故障电流越大,保护动作时间越短。因此,以上电流保护仿真模型不仅完整描述了智能变电站继电保护的数据传输与处理过程和动作逻辑,而且还定量地描述了保护响应时间等动作性能。在此基础上,可进一步研究继电保护数据传输阻塞、丢包等实时性可靠性问题及应对策略,以及适应智能变电站新技术环境的继电保护新原理与体系架构等问题。而通过导入实际故障录波数据,还可实现故障过程及保护动作的回放,为事故分析和继电保护评估提供了定量分析手段。

4 结论

a. 基于 OPNET 软件建立 IEC61850 通信及 IED 模型,可以完整地描述智能变电站过程层网络通信环境,可以实现继电保护等应用系统实际数据处理过程的定量仿真;

b. 提出的智能变电站继电保护全过程的建模方法,不仅完整描述了智能变电站继电保护的数据传输与处理过程和动作逻辑,而且还定量地描述了保护响应时间等动作性能;

c. 本文工作为智能变电站建模与仿真提供了新的思路和手段,为智能变电站过程层网络及继电保护等实时应用的定量分析提供了良好的研究平台。

参考文献:

[1] 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.

[2] 韩小涛,聂一雄,尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术,2005,29(6):67-71.
HAN Xiaotao,NIE Yixiong,YIN Xianggen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator [J]. Power System Technology,2005,29(6):67-71.

[3] 曹海欧,严国平,徐宁,等. 数字化变电站 GOOSE 组网方案[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):143-150.
CAO Haiou,YAN Gouping,XU Ning,et al. GOOSE network scheme for digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):143-150.

[4] 窦晓波,胡敏强,吴在军,等. 数字化变电站通信网络的组建与冗余方案[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):38-42.
DOU Xiaobo,HU Minqiang,WU Zaijun,et al. Redundancy scheme and construction of communication network in digital substation [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):38-42.

[5] 张志丹,黄小庆,曹一家,等. 基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真[J]. 电网技术,2011,35(5):204-209.
ZHANG Zhidan,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Comprehensive data flow analysis and communication network simulation for virtual local area network-based substation[J]. Power System Technology,2011,35(5):204-209.

[6] 方晓洁,季夏秩,卢志刚. 基于 OPNET 的数字化变电站继电保护通信网络仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):137-140.
FANG Xiaojie,JI Xiayi,LU Zhigang. Study on relaying protection communication network in digital substation using OPNET simulation[J]. Power System Protection and Control,2010,38(23):137-140.

[7] 毕研秋,赵建国. 基于 OPNET 的电力系统广域信息网络研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):103-107.

BI Yanqiu,ZHAO Jianguo. Wide-area information network of power system based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):103-107.

[8] 钱美,韩江桂,吴正国,等. 电力系统过程层网络 CAN 总线实时性仿真与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):103-107.
QIAN Mei,HAN Jianggui,WU Zhengguo,et al. Simulation and analysis of CAN's real-time performance in power system process network[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):103-107.

[9] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2004:15-31.

[10] 童晓阳,廖晨淞,周立龙,等. 基于 IEC61850-9-2 的变电站通信网络仿真[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):69-74.
TONG Xiaoyang,LIAO Chensong,ZHOU Lilong,et al. The simulation of substation communication network based on IEC61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):69-74.

[11] 朱林,段献忠. 基于过程总线的母线保护通信体系结构[J]. 电力系统自动化,2008,32(21):8-13.
ZHU Lin,DUAN Xianzhong. Communication architecture of process bus based on busbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(21):8-13.

[12] 窦晓波,胡敏强,吴在军,等. 数字化变电站通信性能仿真分析[J]. 电网技术,2008,32(17):99-104.
DOU Xiaobo,HU Minqiang,WU Zaijun,et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substations[J]. Power System Technology,2008,32(17):99-104.

[13] 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.

[14] 胡春潮,蔡泽祥,竹之涵. 提高数字化变电站关键报文传输可靠性方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(9):91-96.
HU Chunchao,CAI Zexiang,ZHU Zhihan. Frame based transmission reliability analysis of the digital substation key messages[J]. Power System Protection and Control,2011,39(9):91-96.

[15] IEC. IEC61850 Communication networks and systems in substations[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2003.

[16] 董楠,朱林,段献忠. 基于 OPNET 的变电站过程层网络的仿真研究[J]. 继电器,2006,34(21):40-45.
DONG Nan,ZHU Lin,DUAN Xianzhong. Study on process-level network in substation using OPENT simulation[J]. Relay,2006,34(21):40-45.

作者简介:

黄明辉(1965-),男,浙江余姚人,高级工程师,硕士,从事电力系统管理工作;

邵向潮(1988-),男,浙江建德人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:sxc20@126.com);

张　弛(1978-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,从事电力系统继电保护运行与控制工作;

王海柱(1985-),男,广东茂名人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

李一泉(1979-),男,江苏泰兴人,高级工程师,博士,从事继电保护运行管理工作;

蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护教学与科研工作。

Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET

HUANG Minghui[1],SHAO Xiangchao[2],ZHANG Chi[1],WANG Haizhu[2],LI Yiquan[1],CAI Zexiang[2]

(1. Guangdong Power Dispatch Center,Guangzhou 510600,China;
2. School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: The introduction of intelligent substation process-level network results in the great changes in the data source and transmission mode of relay protection. Its operation performance and reliability depend increasingly on the communication network. The data flow of relay protection and the communication mechanism of its messages are analyzed and the process-level network and IED devices are modeled based on IEC61850 by OPNET. The whole process simulation of relay protection in intelligent substation is implemented,including MU data acquisition,SV messages,GOOSE messages,protection algorithm and protection output. With the current protection as an example,the principle and implementation of modeling and simulation are introduced and its feasibility and validity are verified,which provides an effective tool for quantitative analysis of relay protection in intelligent substation.

Key words: electric substations; relay protection; data acquisition; data flow analysis; communication; mechanisms; computer simulation; model buildings; OPNET