

图模库一体化的智能变电站过程层设备仿真系统研究

提出了图模库一体化的智能变电站过程层设备仿真系统,该系统实现了全站过程层设备仿真功能,提供了五防逻辑验证和站控层网络报文监视功能,实现了对间隔层设备的闭环测试,缩短了集成测试的周期。同时,该系统可作为从事智能变电站技术人员的培训系统,提高被培训人员的专业知识和测试技能,为智能变电站发展提供良好的环境。

陈 磊 杨 明 张小易/国网江苏省电力公司电力科学研究院

0 引言

智能变电站采用先进、可靠、集成、低碳和环保的智能设备,以全站信息数字化、通信平台网络化以及信息共享标准化为基本要求,自动完成信息的采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能,可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策和协同互动等高级功能。

智能变电站采用IEC 61850标准,在逻辑上分为过程层、间隔层和站控层三层结构。过程层位于最底层,主要完成对运行设备实时电气量、操作控制命令等的采集,实现状态量和模拟量的数字化转换。与传统变电站相比,智能变电站的过程层有效地解决了设备易受干扰、高低压不能有效隔离以及信息无法共享等问题^[1]。同时,过程层设备通过新增设备采用大量复杂技术,对继电保护、测控等设备的性能产生重大影响。智能变电站过程层在建设、调试和运行阶段存在应用不够规范、互操作困难以及网络性能无法评估等困难,为了解决这些问题,亟需搭建智能变电站过程层

设备仿真测试系统,实现灵活模拟各种数据。文献[2]介绍了将快速采样值报文发出到二次设备,并检测二次设备能否正确响应,实现对全站过程层设备的动态仿真,以及对测控、保护等间隔层设备的闭环测试,为相关装置的开发和调试提供了便利。文献[3]提出了基于PSCAD/EMTDC和OPNET的跨平台仿真系统,该系统对二次系统仿真侧重网络。本文提出的系统对二次系统仿真侧重装置功能,增加了五防逻辑验证和站控层网络报文监视,实现了对间隔层设备的闭环测试。

本文结合《IEC 61850工程继电保护应用模型》^[4]等相关导则、规范,提出了图模库一体化的智能变电站过程层设备仿真系统,并分析研究了其关键技术。

1 系统整体框架

图模库一体化的智能变电站过程层设备仿真测试系统主要完成智能变电站过程层设备和通信部分的仿真,为变电站调试人员提供一套实用的过程层仿真测试软件^[5]。系统架构如图1所示,本仿真测试系统分为前端应用和后台通信两个模块。

前端应用模块主要负责提供用户界面,模拟智能变电站及外围电力系统的电气设备暂态特性。前端应用模块分为图形编辑、SCD文件解析、仿真序列编辑与测试以及五防逻辑验证等四个子模块。图形编辑子模块提供厂站接线图编辑界面,并实现模型的自动保存;SCD



陈 磊/工程师

关键词/Keywords

智能变电站·
图模库一体化·
过程层·
仿真系统·
闭环测试·

文件解析子模块提供导入/导出和解析校验功能；仿真序列编辑与测试子模块模拟变电站（包括故障在内）的各种运行工况，完成相关保护控制功能的电气特性仿真；五防逻辑验证子模块实现系统内部计算闭锁信号与站控层接收闭锁信号之间的验证。

后台通信模块主要负责将前端应用的模拟数据发送到过程层网络，实时捕获过程层、站控层网络的相关数据，实现与间隔层设备的互联互通。后台通信模块分为功能GOOSE抓包及发送、SMV组包

及发送和MMS报文接收等三个子模块。GOOSE抓包及发送子模块负责接收前端应用发出的GOOSE任务，解析后形成对应的GOOSE报文序列并发送到GOOSE网络，实时监控GOOSE网络的数据，对满足2 μs、4 μs和8 μs间隔的GOOSE控制报文进行采集，并回传给前端应用；SMV组包及发送子模块负责接收前端应用发出的SMV任务，解析后组包成对应的SMV报文序列并发送到SMV网络；MMS报文接收子模块实现与站控层的网络通信，采集仿真设备相关的MMS报文，并回传给前端应用。

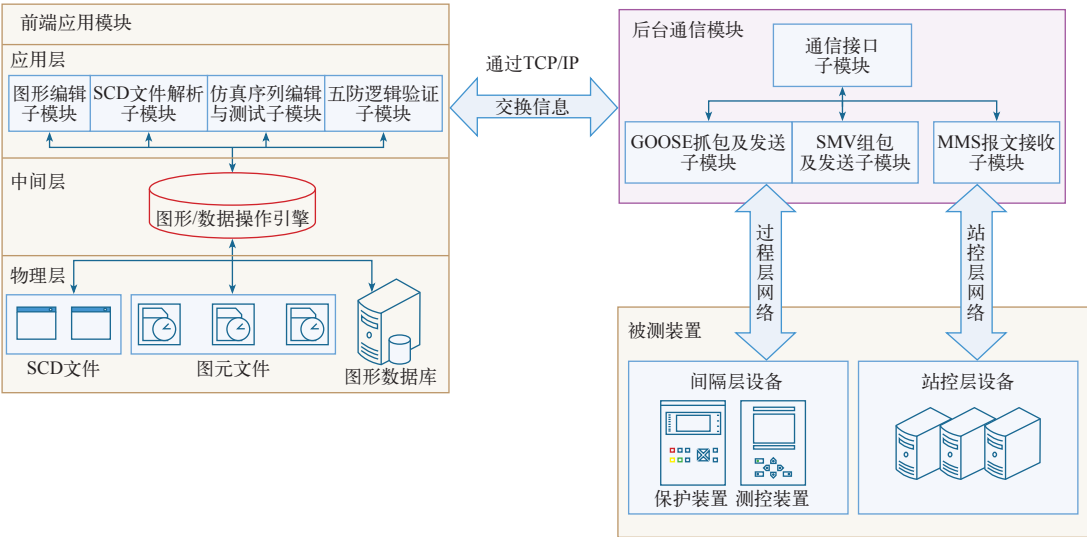


图1 系统架构图

2 系统功能

本仿真测试系统可实现多台数字化过程层设备的模拟仿真。首先通过绘图模块新建或导入一次接线图；然后导入厂站的SCD文件，系统会根据名称完成模糊匹配，对没有匹配成功的部分给予提示，可以人工完成匹配工作；最后通过单击开始仿真，与后台通信系统建立连接，向后台系统发送遥信、遥测数据，后台系统再向测控装置发出遥控等操作指令，同时后台系统监测GOOSE网，并对装置就地操作指令进行捕获，完成过程层的闭环测试。

2.1 前端应用功能

前端应用由图形编辑、SCD文件解析、仿真序列编辑与测试和五防逻辑验证等模块组成，共享

数据库资源，如图2所示。

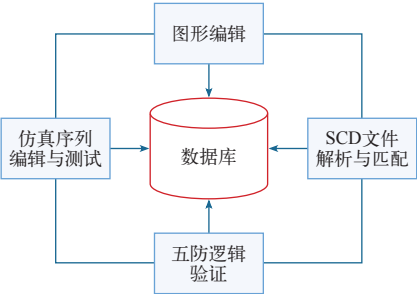


图2 前端应用模块关系

2.1.1 图形编辑模块

图形编辑模块使用面向对象技术，对每类设备建模并以此为对象，该对象将数据结构和行为集成。本项目使用QT实现，QT具有界面库丰富友好、跨平台和运行效率高的优点。

将电力系统电气主接线图的特点和各个元件的共性抽象成一个基类^[6]，该基类不代表具体的元件，而是具体元件共同的父类。此类包括每个图元共有的属性，如大小、位置、颜色、背景、方向、态类型（运行态、编辑态等）和内存地址关联列表（运行态下图形显示所依据的数据来源）等；同时包括每个图元共有的功能函数，如绘制、移动、放大、缩小、设置方向、设置与其他图元的关联以及定时器回调等功能。这些基本操作被设计成基类的成员函数，在派生类中根据具体情况实现不同的功能，设备图形类的继承关系如图3所示。通过图形编辑界面对元件设备的一些参数进行设定，系统会将修改后的信息保存到.pu的图形配置文件以及数据库中，避免重新绘制，提高系统的通用性。

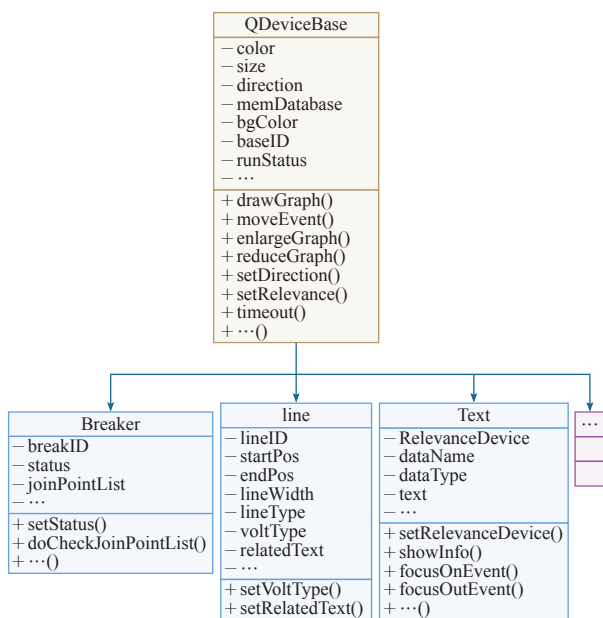


图3 设备图形类的继承关系

2.1.2 SCD文件解析模块

变电站配置文件（System Configuration Description, SCD）是XML语言的一种应用，描述了变电站内所有智能电子设备的实例配置、通信参数、IED订阅和发布数据的信息以及变电站一次系统结构等信息^[7]。

SCD文件较大，用传统的串行读取方式，耗时较长。文献[8]提出了利用并行树的方式解析

XML，有效地利用多核环境提高了时间性能，本文使用该方法构建SCD文件。并行子树方式构建SCD文件分为数据分片、并行子树构建和子树合并3个过程。

（1）数据分片

数据分片按照一定规则将连续的SCD文件划分成相互独立的若干片段，以便后续数据并行处理。本文根据给定的分片数等长划分数据，采用文档位置进行逻辑定位，而非对文档进行物理划分。数据划分会出现标签内部信息被分割现象，需要对边界进行调整，将标签内容完整地划分到同一分片。图4为对SCD文件的划分，实线部分为初始划分，该划分将LN标签一分为二，前半部分划分到分片M中，inst和desc属性被划分到分片M+1中，经过调整将LN标签完整地划分到分片M，虚线表示调整后的划分。

```

</DAI>+
<DAI name="swRev">+
  <Val>V1.00</Val>+
</DAI>+
<DAI name="dU">+
  <Val>铭牌</Val>+
</DAI>+
<DAI name="configRev">+
  <Val>V2.00</Val>+
</DAI>+
</DOI>+
</LN0>+
<LN lnClass="LPHD" lnType="GMR GDRR V1 LPHD NS3560" inst="1" desc="装置物理信息">+
  <DOI name="Prgram" desc="物理铭牌">+
    <DAI name="vendor" desc="厂商">+
      <Val>naritech</Val>+
    </DAI>+
    <DAI name="hwRev" desc="硬件版本">+
      <Val>V1.02</Val>+
    </DAI>+
    <DAI name="swRev" desc="软件版本">+
      <Val>V1.02</Val>+
    </DAI>+
    <DAI name="serialNum" desc="序列号">+
      <Val>06a96a01</Val>+
    </DAI>+
    <DAI name="model" desc="型号">+
      <Val>NS3560</Val>+
    </DAI>+
  </DOI>+
</LN>+
  
```

图4 SCD文件数据划分

（2）并行子树构建

该阶段将各个已划分的逻辑数据分片并行构建成子树集合，每个片段构建一个标签栈，用于失配标签的识别和子树根节点的识别等处理。失配标签是指被分割到不同片段的标签，例如：片段M+1以一个</LN0>开始，与其对应的<LN0>在片段M中。构建子树时获得的信息不完全，因此需在合并阶段进行调整。

（3）子树合并

子树合并时需根据各片解析获得的各个子树信息计算存储空间大小，再将节点内容和节点失

配标签合并成一个完整内容。

(4) SCD文件并行解析

SCD文件并行解析, 先将SCD文件切分成等大小的分片, 然后创建多线程分别对其进行解析, 最后将子树合并成结构完整的树, 解析流程如图5所示。

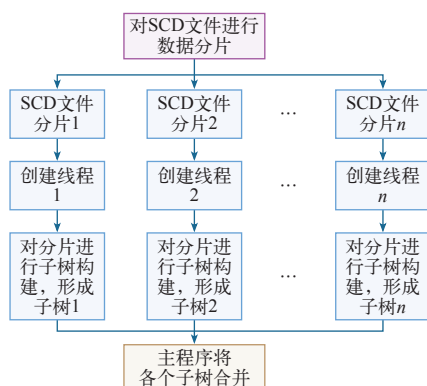


图5 并行子树解析流程

2.1.3 仿真序列编辑与测试模块

序列编辑与测试模块分别对智能终端、合并单元设计输出状态序列, 每个状态序列具备可自定义持续时间。当选定某个智能终端或合并单元时, 系统自动加载配置文件中的数据。系统支持修改不同时刻的数据值, 如ABC相电流等。

当输出序列编辑完成后, 单击“开发仿真”按钮启动, 前台界面软件驱动后台软件, 将测试序列发送到过程层网络。同时, 后台程序实时监控GOOSE、MMS网络报文, 对测控、保护等装置发送的状态信息进行捕获并反馈给前台界面, 界面程序再显示变化数据, 实现了对过程层仿真序列的闭环测试。

2.1.4 五防逻辑验证模块

变电站早期常用的防误闭锁方式有机械闭锁、电气闭锁、程序闭锁和微机五防系统等^[9], 之后采用间隔层测控装置实现五防闭锁功能。间隔层联锁通过间隔层测控装置相互通信, 获得相关装置信息, 实时计算本装置定义的联锁条件, 当联锁条件完全满足时, 允许本装置遥控出口动作。

每个一次设备的功能分别采用三个LN描述,

即CILO、CSWI和XSWI\XCBR^[10]。以5011间隔为例, 设备功能与逻辑节点对应关系如图6所示。CILO为联锁逻辑节点, 如果联锁条件满足, 此逻辑节点用于许可分合操作; CSWI为遥控逻辑节点, 使用该逻辑节点控制过程层的所有分合条件; XSWI为隔离开关逻辑节点, 该逻辑节点为不具备切断短路电流能力的开关建模, 如隔离开关、接地开关等。

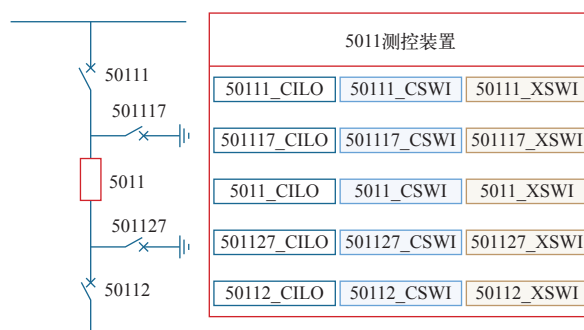


图6 设备功能与逻辑节点对应关系

本文提出的仿真系统模拟智能终端通过GOOSE网发布XCBR/XSWI信息, 同时, 该系统根据预设的五防逻辑(该五防逻辑与对应的测控装置逻辑一致)实时计算联锁条件, 并在站控层MMS网络获取测控发布的闭锁信号, 比较两者之前的差异, 形成五防逻辑的验证报告, 实现了间隔层测控装置的五防逻辑闭环验证。

2.2 后台通信功能

后台通信首先启动端口监听, 接受前台的TCP连接, 并接收前台传来的XML格式数据, 将解析出来的合并单元及智能终端数据保存至内存容器, 为后续与装置交换提供数据。后台根据前台的任务分别启动GOOSE发包/抓包线程或SV组包/发包线程, 同时后台程序自动启动MMS抓包线程。后台通信功能流程如图7所示。

2.2.1 GOOSE抓包及发送子模块

GOOSE抓包子线程首先利用Winpcap在GOOSE网中抓包, 根据618507-2^[11]中的各类模型对捕获到的GOOSE数据包进行解析, 将解析出来的状态量存入链表, 当链表中有数据时, 将数据发送给前台。

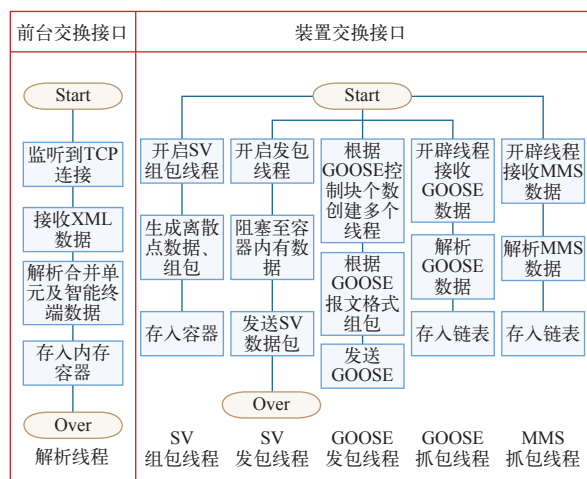


图7 后台通信功能流程

GOOSE发送线程，首先启动定时器每隔5 s发送GOOSE心跳数据。GOOSE报文按照GOOSE帧格式进行组包，调用Winpcap发送接口进行发送。当接收到前台发来的开关变位信息后立刻发送5帧GOOSE报文，时间间隔分别为2 ms、2 ms、4 ms和8 ms，然后每隔5 s发送GOOSE心跳数据。

2.2.2 SV组包及发送子模块

SV组包线程采用多个合并单元并行组包，每个合并单元中包含多个状态，每个状态根据时间生成大量的离散点。每个离散点根据61850-9-2 SV报文格式^[12]组成一帧数据，存入到Winpcap提供的接口内存，帧数量达到1 600时组为一包数据存入内存容器，供发包线程使用。

SV发送线程启动时读取内存容器，以每秒4 000采样点将其发送到SV网，发送采用Winpcap提供的队列发送接口，保证时间准确度。每发送完一包数据就将其占用的内存销毁，从而保证内存的开销。当某个MU的状态发送完毕时，将结果反馈给前端应用模块。

2.2.3 MMS报文接收子模块

MMS抓包线程利用Winpcap进行报文的捕获^[13]。当捕获到一个数据包时，启动一个报文过滤机制，先选择过滤条件为Enter Type = 0x0800的IP报文，再根据MMS报文里前两个标志位(0xA0和0xA5)来判断是否为MMS报文，根据BER的编码原则和MMS服务的定义层解析直到

BER的Value层，最后调用数据集解析函数进行解析。MMS报文正确解析后，将解析后的数据传递给前端应用模块。

3 仿真系统测试

本文以典型变电站SCD文件为对象，建立相应的过程层仿真模型。仿真变电站IED设备包括11个保护设备、11个合并单元设备、8个智能终端设备以及9个测控装置，共39个IED设备。

在80点采样率条件下，对典型变电站模型进行仿真序列编辑，经过前台仿真模块编码成IEC 61850格式，由后台通信模块向间隔层设备发送SV、GOOSE报文。仿真的结果再由通信模块反馈到前端应用模块。系统仿真从系统健壮性和GOOSE和SV发包延时两个方面进行评测。

(1) 系统健壮性

稳定运行超过72 h，系统发生故障(如网络中断)能自动恢复；提供日志功能，记录系统运行及用户操作的信息。

对仿真系统中的一次设备状态量、电气量等进行修改，被测设备能正确反映变化；同时，被测设备的就地遥控信息能在仿真系统中正确显示。

(2) GOOSE发包延时

模拟两条GOOSE报文以5 s时间间隔周期发送，多播发送地址分别为01: 0D: 5E: 02: 00: 01和01: 0D: 5E: 02: 00: 02，用网络抓包软件抓得的网络中的报文发送情况如图8所示。

```

1190 76.431078 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1191 76.431154 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1192 81.431097 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1193 81.431163 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1194 86.442234 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1195 86.442314 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1196 91.442347 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1197 91.442429 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1198 96.453175 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1199 96.453253 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1200 101.453562 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1201 101.453708 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE
1202 106.464147 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECGOOSE GOOSE
1203 106.464231 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:02 IECGOOSE GOOSE

```

图8 GOOSE报文以太网数据流

(3) SV发包延时

设置采样频率为4 kHz，多播发送地址为01: 0D: 5E: 02: 00: 01，模拟9-2采样值报文的发送，用

网络抓包软件抓取网络中报文的发送情况如图9所示。

```
101 0.021235 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
102 0.021485 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
103 0.021735 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
104 0.021984 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
105 0.022234 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
106 0.022484 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
107 0.022734 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
108 0.022984 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
109 0.023235 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
110 0.023485 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
111 0.023735 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
112 0.023985 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
113 0.024235 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
114 0.024485 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
115 0.024735 00:23:87:5D:47:56 01:0D:5E:02:00:01 IECSMV SMV 9-2
```

图9 SV报文以太网数据流

仿真测试结果符合采样标准的要求,验证了该仿真平台支持流程的正确性和数据的准确性,该仿真系统的仿真结果具有参考价值。

4 结束语

本文提出了图模库一体化的智能变电站过程层仿真系统,该系统实现了前端绘制仿真功能和后台通信功能,建立了较为全面的过程层网络模型,通过实例验证了仿真系统的正确性。

图模库一体化的智能变电站过程层仿真系统实现了厂站级过程层设备的闭环测试,节约了测试环节使用的设备数量,且满足智能变电站大规模建设的要求。转变测试模式,提出集成测试的重点内容优化测试方案,缩短了集成测试周期。同时该系统可作为从事智能变电站技术人员的培训系统,提高被培训人员的专业知识和测试技能,为智能变电站发展提供良好的环境。

参考文献

- [1] 易永辉,王雷涛,陶永健.智能变电站过程层应用技术研究[J].电力系统保护与控制,2010(21):1-5.
- [2] 张祥文,缪文贵,杨洪涛.智能变电站的合并单元仿真系统研究[J].江苏电机工程,2012(1):

46-48.

- [3] 梁彦杰.智能变电站过程层跨平台仿真系统研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [4] 国家电网公司.Q/GDW 1396—2012 IEC 61850工程继电保护应用模型[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [5] 陈晓罗,李富平,刘志峰,等.电力系统绘图工具软件的设计及实现[J].微计算机信息,2006(22):235-237.
- [6] 郭健生,吴文宣,王云茂,等.基于TinyXML的智能变电站SCD文件的解析[J].电力与电工,2011(3):7-10.
- [7] 陈荣鑫,廖湖声,陈维斌.基于并行子树构建的XML解析方法[J].计算机科学,2011(3):191-194,235.
- [8] 笃峻,祁忠.基于IEC 61850标准的变电站防误闭锁系统的实现[J].电力系统保护与控制,2009(24):118-122.
- [9] IEC 61850-7-2 Communication networks and systems in substations part 7-2: basic communication structure for substation and feeder equipment abstract communication service interface (ACSI) [S]. 2003.
- [10] IEC 61850-9-2 Communication networks and systems in substations part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)—sampled values over ISO/IEC 8802-3 [S]. 2004.
- [11] 袁安富,于海,缪文贵,等.智能变电站MMS报文捕获分析的研究与实现[J].电测与仪表,2013(9):74-78.
- [12] 叶翔,刘辉,周永忠.智能变电站图模一体化设计软件实现方案[J].江苏电机工程,2014(3):41-44.
- [13] 徐勇,王成波,梅德冬,等.基于G语言的智能变电站五防规则生成方法[J].江苏电机工程,2013(3):60-62,65.

(收稿日期:2015-07-25) EA