

DOI: 10.7667/PSPC171770

智能变电站仿真三维可视化组件装配技术研究

王益¹, 陈珉¹, 王涛², 王先兵³

(1. 武汉大学国际软件学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司技术培训中心, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对以往变电站三维仿真系统创建成本高、耗时长、不易扩展等问题, 提出一种智能变电站仿真三维可视化组件装配技术。可视化组件包括智能变电站内设备的三维模型, 以及该设备逻辑功能与 IEC61850 通信模块的仿真实现。不仅可以通过装配可视化组件快速完成一个智能变电站的三维设计, 而且可以通过连接与配置可视化组件的底层模块实现整个变电站的调试与仿真。经过实验表明, 该技术能提高新一代智能变电站三维仿真系统的开发效率, 还可以为运维人员提供新一代智能变电站底层 IEC61850 信息流的可视化仿真培训。

关键词: 智能变电站; 三维仿真; 可视化组件; IEC61850 标准

Research on 3D visual component assembly technology of smart substation simulation

WANG Yi¹, CHEN Min¹, WANG Tao², WANG Xianbing³

(1. International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company Technical Training Center, Wuhan 430070, China; 3. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To solve the costly, time-consuming and unscalable problem of previous substation 3D simulation system, a new 3D visual component assembly technology of smart substation simulation is put forward. The visual component includes the 3D model of the smart substation's equipment, and the realization of the equipment's logic function and IEC61850 communication module's simulation. With the assembly of visual component, the 3D design of a smart substation can be accelerated. In addition, the whole substation's debugging and simulation can be completed by connecting and configuring visual component's underlying modules. Experiment reveals that this technology can not only accelerate the development of the new generation of smart substation 3D simulation system, but also provide the visual simulation training of the substation's underlying IEC61850 information flow for the operations staff.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377122).

Key words: smart substation; 3D simulation; visual component; IEC61850 standard

0 引言

2013 年国家电网公司分别在北京、上海、天津、重庆与武汉同期进行六个新一代智能变电站的试点建设工程^[1]。随着试点工程的竣工运行, 国家电网公司大面积推广建设新一代智能变电站。新一代智能变电站应用一体化设备, 设备高度集成; 全站信息高度共享, 全面支持调度技术支持系统; 采用模块化设计、组合化拼装, 建设灵活高效; 采用新型环保气体电气设备, 减少全站设备带油体量, 减少

变电站裸露带电部分, 方便运行维护。

智能变电站基于 IEC 61850 标准进行信息交互模型的建立, 规范了智能变电站 IED(智能电子设备)设备的交互语言和信息交互方式^[2]。同时伴随着智能变电站建设的实践过程不断深入, 二次设备与一次设备、二次设备之间的接口模式也进一步标准化。随着智能变电站的形式多样化及规模扩大化, 传统变电站仿真培训系统无论在设计思路, 还是培训内容上均远远不能满足新一代智能变电站调试、运行和检修人员的培训需求。因此, 非常有必要研究出能展现新一代智能变电站技术特点并能适应新一代智能变电站大规模推广趋势的仿真方法。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51377122)

目前已有学者和研究机构提出了一些变电站的仿真方法: 文献[3-5]采用混合式仿真方法, 采用真实变电站设备与软件技术结合进行仿真, 这种仿真方法成本较高且不易扩展; 文献[6]采用基于虚拟现实技术的纯软件仿真方法, 但该文的开发方法不利于仿真系统的扩展及维护, 一旦变电站结构改变, 所有相关设计都要修改, 系统的维护和更新也很困难; 文献[7]采用了基于可扩展对象库的仿真方法, 但该仿真方法仅针对变电站设备的动作及异常进行仿真, 没有仿真变电站内信息交互, 不能展现智能变电站的技术特点; 文献[8-9]的仿真方法侧重于智能变电站内二次回路, 不利于培训人员整体掌握智能变电站的运行情况; 文献[10-11]提出沉浸式变电站仿真培训系统, 该方法能较好地使学员掌握变电站的内部操作, 但因为需要使用虚拟现实设备, 培训成本较高, 且学员无法掌握新一代智能变电站的内部通信原理。

针对上述智能变电站仿真方法的不足, 本文引入可视化组件的概念, 提出一种智能变电站仿真三维可视化组件装配技术。在遵循“高内聚、低耦合”原则的前提下, 设计变电站内设备的可视化组件。仿真系统装配过程中根据变电站的一次接线图、SCD 文件(全站系统配置文件)、现场设备位置等信息, 复用可视化组件, 可快速地装配出能展现新一代智能变电站技术特点的三维仿真系统。

1 可视化组件装配技术

智能变电站仿真三维可视化组件装配技术的体系结构如图 1 所示。运用三维点云扫描、三维模型渲染及动画封装技术生成设备可视化组件的三维模块; 通过图模一体化技术完成一次设备可视化组件各模块之间的连接; 运用 ICD、SCD 文件解析技术生成二次设备的通信模型与拓扑结构图, 结合底层 libIEC61850 库完成可视化组件的通信模块。根据变电站的实际情况, 运用可视化组件装配技术, 连接与配置可视化组件的各个模块, 即可快速搭建新一代智能变电站三维仿真系统。

1.1 可视化组件定义

智能变电站可视化组件是指能展现智能变电站内设备三维特征、电气特征和信息交互特征的独立的、可复用的组件。

智能变电站内设备主要分为一次设备与二次设备两大类: 一次设备是指用来接受和分配电能以及改变电能电压的相关设备, 如主变压器、断路器、母线、输配电线路、隔离刀闸等等; 二次设备是指

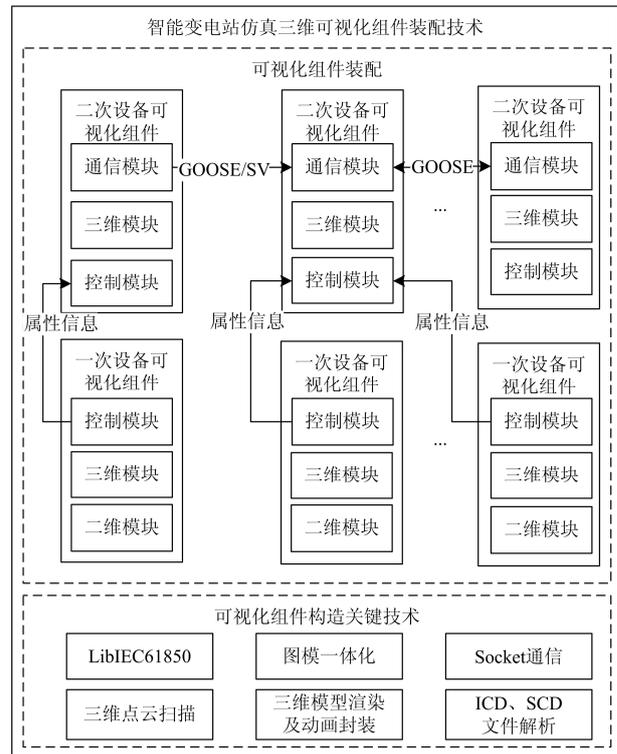


图 1 智能变电站仿真三维可视化组件装配技术体系结构图

Fig. 1 Architecture of smart substation's 3D visual component assembly technology

对一次设备的工作进行保护、控制、检查和测量的设备, 如保护测控装置、智能终端、合并单元等 IED 设备^[12]。针对智能变电站一、二次设备功能的不同, 其可视化组件的构成也有所区别。

(1) 一次设备可视化组件主要包括三维模块、二维模块和控制模块: ① 三维模块用于设备的三维可视化展示, 包括设备的三维模型、模型动画以及模型控制脚本; ② 二维模块用于构造综合自动化控制界面上的一次接线图, 包括设备的二维图元、图元的相关动画及控制脚本; ③ 控制模块提供可视化组件属性访问和控制接口, 同时控制模块能根据设备的相关属性对组件的二维模块及三维模块进行控制, 更改设备在二维层面和三维层面上的表现。

(2) 二次设备可视化组件主要包括三维模块、通信模块、控制模块: ① 三维模块的功能同前文一次设备可视化组件三维模块功能相同; ② 通信模块用于和其他二次设备可视化组件通信, 实现智能变电站仿真系统的 IEC61850 标准; ③ 控制模块根据设备的功能, 监听相关一次设备的属性, 并根据属性修改自身通信模块数据, 同时控制模块能根据该数据对组件的三维模块进行控制, 更改设备在三维层面上的表现。

1.2 关键技术

1.2.1 三维模型渲染及动画封装

运用三维模型渲染及动画封装技术实现可视化组件三维模块的封装。

(1) 根据变电站现场三维点云扫描、查看设备图纸等方式获取的设备尺寸信息^[13]，使用 3D Max 创建设备的基本三维模型。

(2) 采用 Unity3D 引擎对三维模型进行二次编辑。将 3DMax(Maya、Cheetah 3D 等软件生成的模型也可用 Unity3D 编辑^[14])生成的设备基本三维模型导入到 Unity3D 中，为设备模型添加材质和贴图，并根据设备的实际操作为设备模型添加基本的操作动画，如断路器的开合、接地刀闸的开合等。经过上述过程，设备的仿真效果更加逼真，能够提高人机交互的能力。一次设备三维模型，以某断路器为例，其渲染前后的三维模型如图 2 所示。二次设备三维模型，以某母线保护柜为例，其渲染前后的三维模型如图 3 所示。

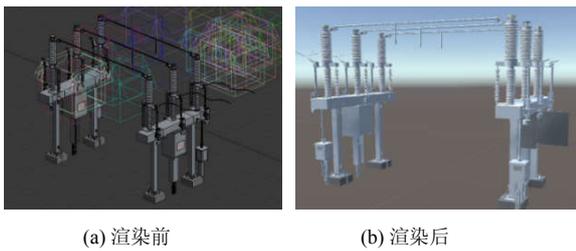


图 2 断路器三维模型

Fig. 2 3D model of breaker

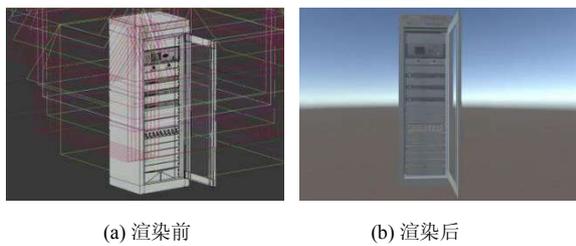


图 3 母线保护柜三维模型

Fig. 3 3D model of bus protection cabinet

(3) 封装设备模型的动画以便提供接口与其他模块交互。一次设备的动画相对简单，可直接对单个设备动作动画进行封装。相较于一次设备，二次设备的功能更复杂，其功能以及动作更加多样。如果对设备的每一个动画都设计接口，会由于粒度过于细化而大大增加工作量，并且与控制模块的耦合度增大。为控制接口粒度大小，并减少与控制模块的耦合，本文选择设备的运行状态作为最小的设备动画接口封装单元。以线路保护装置为例，其柜面

指示灯数量较多。如果对每一个指示灯都设计对应的控制接口，工作量较大，接口调用也不方便。因此，选择线路保护装置常见的运行状态作为封装单元。每个运行状态封装了线路保护装置上各个指示灯在对应运行状态下的表现。图 4 和图 5 展示了线路保护装置三维模型上的正常运行状态和跳位状态时的指示灯的表现，通过控制设备的运行状态，即可控制设备上不同的指示灯的状态。



图 4 线路保护模型正常运行

Fig. 4 Normal operation of line protection model



图 5 线路保护模型跳位

Fig. 5 Tripping position of line protection model

(4) 为了精准控制设备模型，本文单独设计一个 Node 脚本作为三维模型的对接基本单元。在 Unity3D 中，每个三维模型都是一个 GameObject(游戏物体)，例如一个保护装置是一个 GameObject，保护装置上的按钮、指示灯等设备同样是一个 GameObject，由于 GameObject 比较灵活，并非所有的 GameObject 都是需要控制的三维模型对象，如三维场景中的灯光、相机等等。如果直接使用 GameObject 作为对接基本单元，容易造成混乱。因此，为每个设备模型添加上一个 Node 脚本，同时每个设备模型只能具有一个 Node 脚本。在实际使用过程中，通过绑定控制模块与可视化组件三维模块上的 Node 脚本，即可控制设备三维模型的展示。

(5) 将控制脚本与设备模型进行绑定，通过 Unity3D 引擎的预制体功能生成一、二次设备三维模块的预制体文件，预制体文件中保存了设备的三维模型以及相应的脚本。生成的预制体文件可通过拖拽等方式在三维场景中实例化，在 Unity3D 中快速进行复用。

通过以上步骤增加图像、过程动画、模型控制脚本等内容来使设备的功能更接近真实的设备，使

仿真过程及结果可视化, 让用户能够更加简单地掌握仿真过程。

1.2.2 图模一体化

在实际变电站中, 通常会通过站控机对变电站内各设备进行监视与控制。因此, 为了使创建的仿真系统更符合运维人员的操作习惯, 通过图模一体化技术, 搭建变电站仿真系统的综合自动化系统来模拟站控机的功能。如果在装配过程中再考虑如何对接变电站三维模型与综合自动化系统, 此时需要考虑的问题规模较大, 配置与调试的难度也会增加。为了使装配过程尽量简单, 本文采用图模一体化技术, 在一次设备可视化组件构造的过程中, 使设备的二维模块与三维模块状态保持一致。

图模一体化技术的核心思想是利用二维图元来描述一次设备及其拓扑结构, 使一次设备可视化组件的设备参数、二维图元、三维模型保持统一^[15]。

(1) 使用 Visio 绘制一次设备的二维图元^[16], 图元由基本的点、线组成, 如图 6 所示, 列举了变电站中部分一次设备的二维图元。另外, 也可使用变电站设计过程中的 CAD 图形另存为 .dwg 或 .dxf 格式文件, 即可在 Visio 中进行编辑, 可节省大量的绘图工作。

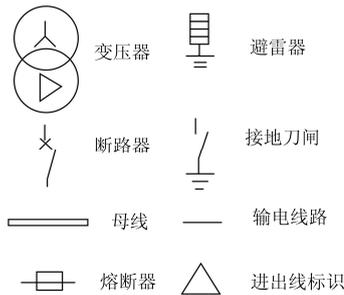


图 6 部分一次设备二维图元

Fig. 6 2D entity of partial primary equipment

(2) 通过更改点、线的位置和角度, 完成二维图元的动画编辑。通过给图元绑定 JavaScript 脚本控制图元的动画。

(3) 在 Unity3D 中, 根据一次设备的功能生成对应的设备功能类脚本, 该脚本包括对应设备的基本属性、设备参数的输入输出函数以及设备的运算函数。Unity3D 本身提供了一个按帧运行的函数: Update(), 在 Update 中调用对应的运算函数, 即可进行实时计算。在实际变电站综合自动化系统构造过程中, 根据设备的基本属性, 通过潮流计算仿真算法, 计算各个设备的输入输出参数。

(4) 在可视化组件构造时, 采用观察者设计模式, 三维模型、二维图元监听设备的状态信息。当

设备的运行参数发生改变时, 调用其二维图元及三维模型的动画控制接口, 更改设备二维及三维层面的表现。

1.2.3 ICD 文件解析

在实际智能变电站中, 每一个 IED 都有相应的 ICD 文件, 且同一型号 IED 具有相同的 ICD 文件。ICD 文件描述了具体 IED 的功能和工程能力, 包含模型的自描述信息, 但不包括 IED 实例名称和通信参数。为了更真实地仿真实际变电站的信息交互情况, 本文通过 ICD 文件解析技术解析实际变电站的二次设备的 ICD 文件, 获取二次设备的通信模型, 在此基础上生成可视化组件的通信模块。

ICD 文件是基于 XML 语言的 IED 能力描述文件, 按层次分为: ① IED(智能电子设备), 变电站自动化系统装置, 通过逻辑节点执行变电站自动化功能; ② Server(服务器), 智能电子设备的一个通信实体; ③ LD(逻辑设备), 在智能电子设备服务器中的逻辑设备; ④ LN(逻辑节点), 包含在智能电子设备的逻辑设备中, 是信息传输的最小载体; ⑤ DO(数据), 包含在逻辑节点中的数据^[17]。其结构如图 7 所示。

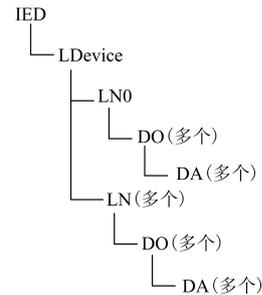


图 7 ICD 文件结构图

Fig. 7 ICD file's structure

通过广度优先遍历算法遍历 IED 设备的 ICD 文件。在遍历过程中, 使用队列(数据先进先出)获取 LD、LN、DO 和 DA 等节点信息。根据节点信息生成该设备的树状数据结构类文件, 该类即为二次设备的通信模型。IED 中 LN 是信息传输的最小载体。以 LN 为可视化组件通信模块的最小功能抽象单位, 设计通信模型控制接口, 即可准确地控制对应二次设备的功能。

运用 libIEC61850 库运行解析后的 IED 通信模型。通过 IED Explorer 来抓取运行中的 IED 数据模型, 将抓取的 IED 数据模型跟原始的数据模型对比。以 PCS-943GM-DM 型号的 IED 为例(在此展示 PIGO01 节点下的树状结构), 使用 SCL 编辑工具打开原始 ICD 文件, 其 PIGO01 逻辑设备的节点树状

图如图 8(a)所示, 通过 IED Explorer 抓取的运行中的 IED 信息模型树状结构如图 8(b)所示。通过对比: 二者在 PIGO01 节点下, LN 类型及数量一致(图 8(a)在各个节点中加上了中文描述); 对于 DO 节点, 解析后数据加上了 LN 都具有的 NamPlt、Beh、Health 三个 DO 节点, 其余各 DO 节点数量及类型一致。因此本文的解析程序运行结果正确。

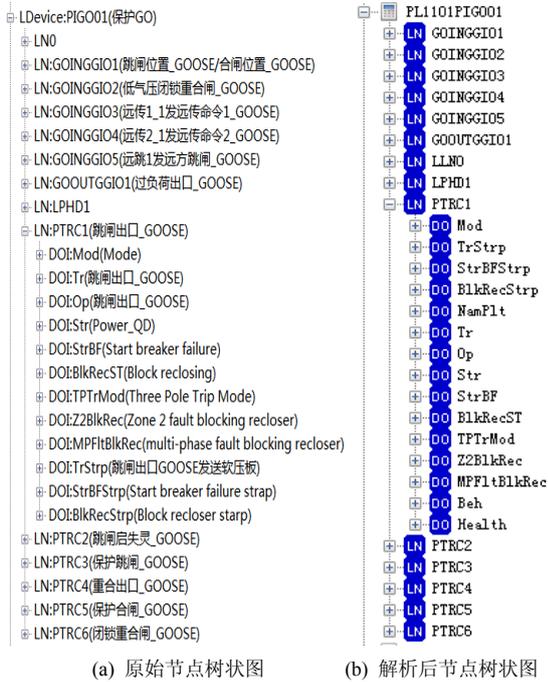


图 8 解析前后数据模型对比

Fig. 8 Comparison of data model before and after parsing

1.2.4 SCD 文件解析

新一代智能变电站仿真系统的关键在于仿真智能变电站内部 IED 之间的符合 IEC61850 标准的信息共享与互操作。

根据 IEC61850 标准, 将变电站在逻辑结构上划分为过程层、间隔层和站控层。IED 承担着监视、控制、保护和辅助一次设备运行的功能, 广泛分布于整个变电站的过程层、间隔层和站控层^[18]。IEC61850 定义了两种通信服务机制^[19]: 第一种是客户端/服务器通信机制; 第二种是发布者/订阅者通信机制。在 IEC61850 标准模型中, 站控层设备与间隔层设备之间采用“客户端/服务器”通信机制; 采用 MMS(制造报文规范)报文传递信息。间隔层和过程层的设备之间采用“发布者/订阅者”通信机制: 在同级间隔层之间、间隔层与过程层之间, 采用 GOOSE(通用变电站事件)报文传递信息; 在过程层单向向间隔层上传中, 用 SV(采样值)报文传递信息, 用于交换关于采样值的数据^[20]。

基于文献[17]介绍的方法, 解析 SCD 文件, 获取变电站内各 IED 之间的通信关系。实际的智能变电站都有配套的 SCD 文件, SCD 是基于 XML 语言的用于描述全站系统配置信息的文件, 包括 IED 模型信息、子网分配信息以及虚回路信息。SCD 文件结构如图 9 所示, 文件包含 5 个主要元素: Header(信息头)、Substation(变电站描述)、IED(智能电子设备描述)、Communication(通信系统描述)和 DataTypeTemplates(数据类型模板)^[17]。通过解析不同 IED 节点下 LN0 内的 inputs、SV 控制块节点、GOOSE 控制块节点内的信息, 即可获取该 IED 设备关于 GOOSE/SV 的虚回路信息。

在此基础上, 结合 libIEC61850 库将每个二次设备通信模型实例化成一个服务线程, 在智能变电站仿真系统装配过程中, 为每一个服务线程分配对应的端口号。根据获取的 GOOSE/SV 的虚回路, 调用 libIEC61850 内相应的接口, 实现“发布者/订阅者”通信机制; 另实例化出一个客户端模拟站控机, 客户端可通过二次设备实例的名称及端口号与二次设备通信模型进行通信, 实现“客户端/服务器”通信机制。

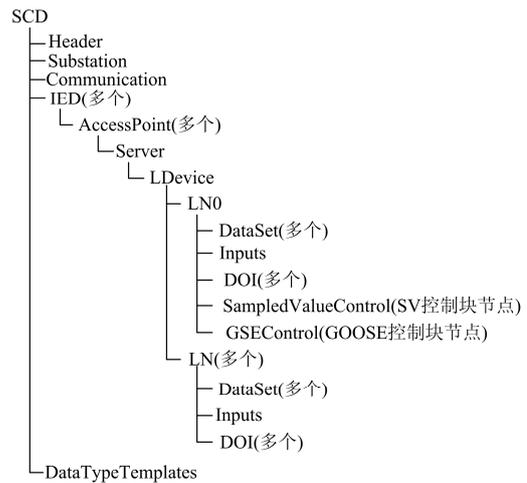


图 9 SCD 文件结构图

Fig. 9 SCD file's structure

1.3 可视化组件装配

可视化组件的装配过程为: (1) 根据实际变电站的一次接线图, 运用一次设备可视化组件的二维模块搭建新一代智能变电站仿真系统的综合自动化控制模块; (2) 解析变电站的 SCD 文件, 根据解析出的二次设备之间的通信结构, 运用二次设备可视化组件的通信模块搭建新一代智能变电站的二次回路通信模块; (3) 根据变电站实际场景, 在 Unity3D 引擎中, 运用一次设备与二次设备可视化组件的三维模块, 搭建新一代智能变电站的三维场景。

测控装置(PL1101)之间互相传递 GOOSE 报文; ② 合并单元(ML1101)通过 GOOSE 报文向保护测控装置传递异常信息; ③ 合并单元采集间隔中的数据信息, 采样值信息通过 SV 报文传递到保护测控装置; 另外间隔外的设备也通过 GOOSE、SV 报文与间隔内设备进行信息交互。每一条 GOOSE 或 SV 报文包含多条数据信息, 以合并单元向保测装置传递的 SV 报文为例, 如图 15 所示, 包含了合并单元采集的各相电流、电压等信息。

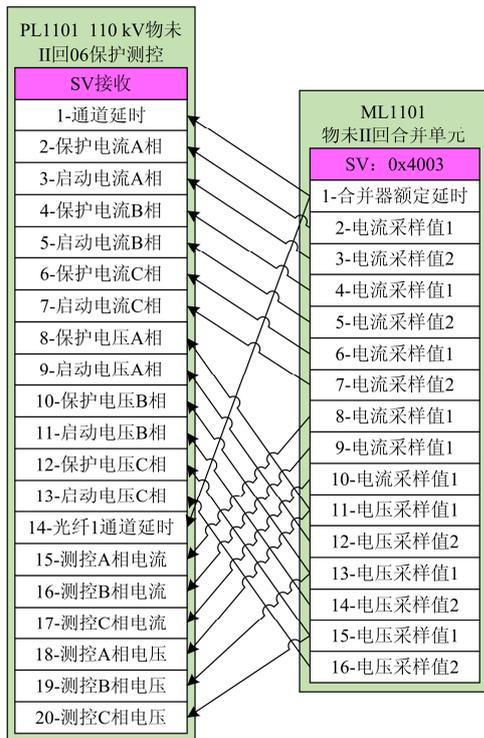


图 15 ML1101 与 PL1101 之间详细 SV 信息

Fig. 15 Detailed SV message between ML1101 and PL1101

马未 II 回间隔设备装配过程中的通信连接如图 16 所示。在仿真系统装配过程中, 建立设备之间的信息交互关系, 即可完成信息交互模块的创建。仿真系统中一、二次可视化组件内部各模块之间的接口控制在可视化组件制作过程中已经完成, 可视化组件之间通过各自的通信模块在通信进程中进行信息交互。

基于前文方法, 即可快速装配出新一代智能变电站仿真系统。武汉未来城 110 kV 新一代智能变电站仿真系统操作界面如图 17 所示。可通过一次接线图远程控制变电站仿真系统, 还可根据界面上右侧设备树快速定位设备在三维场景中的位置。仿真系统三维界面如图 18 所示, 可通过点击界面中按钮快速查看集装箱中各个设备的运行状态, 还可通过鼠

标控制来巡视变电站。

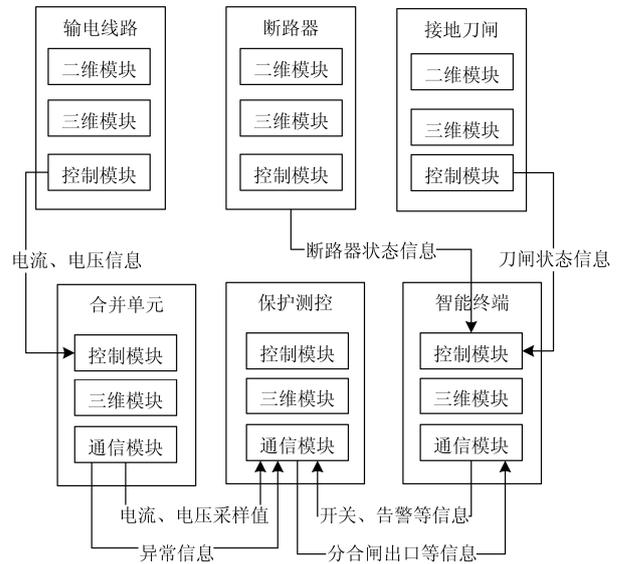


图 16 马未 II 回设备通信连接图

Fig. 16 Communication connection of equipment in Ma-Wei II bay

变电站仿真系统运行过程中, 产生的报文可双击网络拓扑结构图中对应的设备图标查看, 点击详细内容, 即可查看对应报文的详细信息, 如图 19 所示。

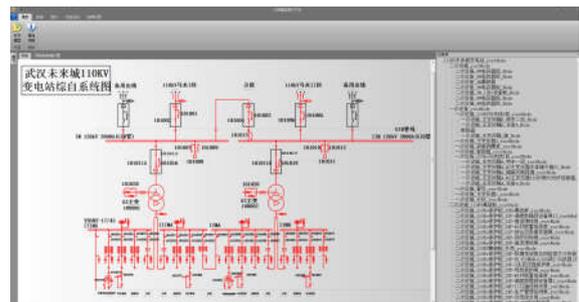


图 17 仿真系统操作界面

Fig. 17 Operation interface of simulation system



图 18 仿真系统三维界面

Fig. 18 Simulation system's 3D interface

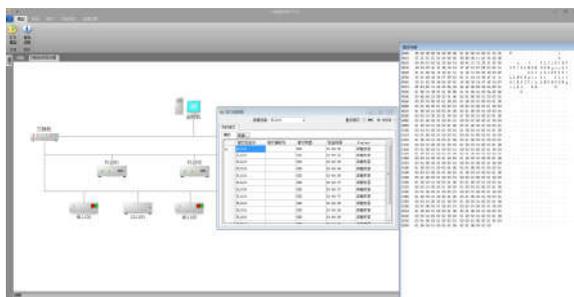


图 19 仿真系统报文查看界面

Fig. 19 Message check interface of simulation system

使用该方法建立的变电站三维仿真系统具有良好的可扩展性。因为采用面向对象的方法建立, 当变电站的结构更改时, 不需要修改整个仿真系统的结构, 只需要修改特定的设备。同时因为可视化组件是针对具体型号的设备建立的, 当另一个新的变电站同样具有该设备时, 在建立其三维仿真系统时, 无需创建新的可视化组件, 直接复用已有的即可。

3 结论

本文介绍了一种新颖的智能变电站仿真三维可视化组件装配技术。首先, 分析了已有的变电站仿真系统技术的不足及其对新一代智能变电站的不适用性。然后针对这些不足, 提出了智能变电站仿真三维可视化组件装配技术。通过构造变电站设备的可视化组件, 来快速开发新一代智能变电站仿真系统。开发出的变电站仿真系统不仅能展现新一代智能变电站的特性, 还具有良好的可扩展性。此外, 由于可视化组件是针对设备型号进行构建, 因此在构建其他智能变电站仿真系统时, 可以复用已有型号设备的可视化组件。通过该技术, 不仅能提高当前变电站仿真系统的开发效率, 还能为将来开发其他新一代智能变电站仿真系统打下基础, 进一步减少开发成本。

参考文献

- [1] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenlin, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [2] 郑光绪. 基于 IEC61850 的 IED 信息建模与通信研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHENG Guangxu. Research on IED information modeling and communication based on IEC61850[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [3] 刘婷, 康彤芯. 基于 IEC61850 的智能变电站激励式仿真[J]. 电工技术, 2012, 32(5): 3-4.
- LIU Ting, KANG Tongxin. The excitation simulation of smart substation based on IEC61850[J]. Electric Engineering, 2012, 32(5): 3-4.
- [4] 周保荣, 房大中, SNIDER L A, 等. 全数字实时仿真器 -HYPERMIM[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 79-82.
ZHOU Baorong, FANG Dazhong, SNIDER L A, et al. The fully digital real-time simulator — HYPERMIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 79-82.
- [5] 张炳达, 王岚禹. 基于 FPGA 的变电站实时仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 55-61.
ZHANG Bingda, WANG Lanyu. Real-time simulation training system for substation based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 55-61.
- [6] 龚庆武, 姜芳芳, 陈义飞. 基于虚拟现实技术的变电站仿真培训系统[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 74-77.
GONG Qingwu, JIANG Fangfang, CHEN Yifei. Virtual reality technique based substation training simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 74-77.
- [7] 谢成, 胡炎, 邵能灵, 等. 基于可扩展对象库的变电站三维仿真平台[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 90-94.
XIE Cheng, HU Yan, TAI Nengling, et al. A tridimensional substation simulation platform based on extensible object collection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 90-94.
- [8] 何志鹏, 郑永康, 李迅波, 等. 智能变电站二次设备仿真培训系统可视化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 111-116.
HE Zhipeng, ZHENG Yongkang, LI Xunbo, et al. Visualization research on secondary equipment simulation training system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 111-116.
- [9] 孙毅, 李世豪, 李彬, 等. 基于 IEC61850 的智能配电网通信网络仿真平台设计[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 118-124.
SUN Yi, LI Shihao, LI Bin, et al. Communication network simulation platform design of intelligent power distribution based on IEC61850[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 118-124.
- [10] 陈永波, 林昌年, 李军锋, 等. 沉浸式变电站仿真培训系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2034-2039.
CHEN Yongbo, LIN Changnian, LI Junfeng, et al. Research and development of immersive simulation training system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2034-2039.

- [11] 吴冰, 黄陈, 朱喜荣. 沉浸式变电站故障仿真系统开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 102-108.
WU Bing, HUANG Chen, ZHU Xirong. Development of immersive substation accidents simulation system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 102-108.
- [12] 徐振. 智能变电站标准化配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
XU Zhen. Standardized configuration of smart substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [13] 李玲侠. 基于三维点云的变电站设备分类识别研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
LI Lingxia. Electrical equipment classification based on 3D point cloud[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [14] 李春燕. 浅析几种三维模型格式导入 Unity3D 的途径[J]. 中国新技术新产品, 2016(5): 23-24.
LI Chunyan. Brief analysis of several ways to import 3D model formats into Unity3D[J]. China New Technologies and New Products, 2016(5): 23-24.
- [15] 陈哲星. 基于 Web 新技术的变电站仿真仿真软件图模库一体化[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
CHEN Zhexing. The research of integrative graphic model library basing on new web technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [16] 韩江虹, 林昌年, 李峰云, 等. 基于 Visio 的变电站二次回路仿真培训系统[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 265-270.
HAN Jianghong, LIN Changnian, LI Fengyun, et al. A Visio-based simulation training system for substation secondary circuits[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 265-270.
- [17] 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, 36(3): 7-10.
GUO Jiansheng, WU Wenxuan, WANG Yunmao, et al. Parse for SCD file of smart substations based on TinyXML[J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2011, 36(3): 7-10.
- [18] Communication networks and systems in substations-part 3: general requirements: IEC.61850-3 Ed.1.0[S]. IEC, 2002.
- [19] 赵妍. 基于 IEC61850 保护测控装置的建模与通信[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
ZHAO Yan. The research of communication and modeling between protection and monitoring device based on IEC61850[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [20] 陈超. 智能变电站信息流的分析与研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
CHEN Chao. Analysis and research on the information flow of smart substation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-02-28

作者简介:

王 益(1993—), 男, 硕士, 研究方向为智能变电站仿真及虚拟现实技术。E-mail: wangyi_iss@whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)