

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211543

智能变电站二次设备即插即用理论模型与应用研究

吴建宇¹, 唐志军², 晁武杰², 郭健生², 梁懿³

(1. 福建智达力胜电力科技有限公司, 福建 福州 350019; 2. 福建省智能电网保护与运行控制重点实验室, 福建 福州 350007; 3. 福建亿榕信息技术有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 为解决智能变电站新建及改造过程中二次设备配置繁琐和文件生成复杂的问题, 提出了智能变电站二次设备即插即用理论模型。为实现即插即用的功能, 首先设计了二次设备即插即用框架, 针对设计的框架, 从硬件层面和软件层面实现需求功能。硬件方面采用双核异构处理器外加 FPGA 构成的三核硬件平台, 软件方面实现分层化设计, 由支持层、功能层、应用层系统组成, 实现了层与层的解耦, 便于后期维护和软件组件的重用。在二次设备模型基础上, 增加即插即用特有的数据及功能描述, 从设备、数据和功能三方面进行了说明。为测试功能应用, 进行保护和测控两方面验证仿真。同时设计了二次设备顺序控制、防误闭锁、五防闭锁和虚端子校验等方面控制逻辑。最后, 通过功能测试证明了所设计模型可正确自动进行设备配置的读取、下装和相关参数配置修改。
关键词: 智能变电站; 即插即用; 二次设备; 顺序控制

A plug and play theory model and application of secondary equipment in a smart substation

WU Jianyu¹, TANG Zhijun², CHAO Wujie², GUO Jiansheng², LIANG Yi³

(1. Fujian Starlisten Electric Power Technology Co., Ltd., Fuzhou 350019, China;

2. Fujian Key Laboratory of Protection and Operation Control for Smart Grid, Fuzhou 350007, China;

3. Fujian Yirong Information Technology Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to solve the problem of cumbersome secondary equipment configuration and complex file generation in the process of new construction and transformation of smart substations, this paper proposes a plug-and-play theoretical model of secondary equipment. In order to realize the plug-and-play function, a framework for secondary devices is first designed, and for the designed framework, the required functions are realized at the hardware and software levels. In terms of hardware, a triple-core hardware platform composed of dual-core heterogeneous processors and FPGA is adopted. In terms of software, a hierarchical design is realized. It is composed of a support layer, a functional layer, and an application layer system. These accomplish the decoupling of layers and facilitate subsequent maintenance and reuse of software components. For the secondary equipment model, it adds plug-and-play unique data and a function description, and elucidates the three aspects of equipment, data and function. To test the application of functions, simulation of protection and measurement and control is carried out. Also the control and verification logic of secondary equipment sequence control, anti-error locking, five-proof locking and virtual terminal verification are designed. Finally, the functional test proves that the design model can correctly and automatically read the equipment configuration, and download and modify the configuration of related parameters.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52130416001U).

Key words: smart substation; plug and play; secondary equipment; sequence control

0 引言

目前, 智能变电站得到了快速的发展^[1-4]。截至

2021 年, 110 kV 及以上智能变电站预计达到总体变电站的 73%, 在十三五期间, 新建了 7 700 座智能变电站并有大量常规站改造。在智能站新建及改造过程中, 由于智能变电站 SCD 文件的生成复杂, 智能二次设备的配置繁琐, 后台监控系统的配置量大,

导致消耗大量的时间^[5-7]；同时这些过程均需人工配置，由于人为因素引起的错误也屡见不鲜。因此亟需一种更为智能、系统控制的一体化解决方案。

针对智能变电站，已有相关研究。文献[8]为了实现智能变电站即插即用就地化保护装置与其他设备的通信问题，设计了一种双模高密度电缆；文献[9]通过获取变电站 SCD 数据模型，利用全局化算法生成变电站主接线图，实现智能变电站图形文件即插即用；文献[10]设计了单间隔保护和跨间隔保护方案，实现基于即插即用的就地保护装置；文献[11]为解决继电保护装置配置复杂更换困难的问题，提出 PNP 文件目录库的建立方法、数据无损校验等，并进行了验证。

针对上述问题，本文提出了智能变电站二次设备即插即用总体框架。系统采用双核异构处理器外加 FPGA 构成的三核硬件平台，分层化设计合理，实现了层与层的解耦，后期便于维护。在智能变电站的二次设备模型基础上，增加即插即用特有的数据及功能描述，从而适应变电站即插即用的应用要求。保护装置仿真功能模拟电力系统中元件发生短路或异常情况时的电气量，测控装置功能仿真主要实现信号采集、测量、控制等功能。系统设计了顺序操作、防误闭锁的控制校核逻辑。最后，对设计系统进行了验证。

1 智能变电站二次设备即插即用总体框架

1.1 总体框架

二次设备的即插即用功能离不开设备生产环节、二次设备应用授权管理中心以及变电站二次设备即插即用现场管控等多个环节的支持，具体如图 1 所示。

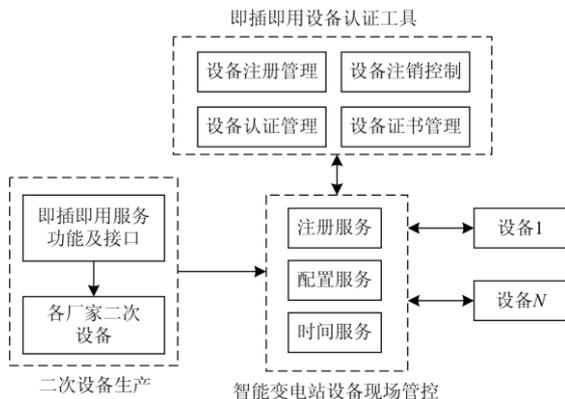


图 1 智能变电站二次设备即插即用框架
Fig. 1 Plug-and-play framework for secondary equipment in smart substation

在二次设备生成阶段，通过建立统一的即插即用接口，将即插即用服务功能及接口导入对应二次设备，确保生产出的二次设备具备或支持变电站二次即插即用能力。

二次设备应用授权管理中心完成即将入网应用的二次设备注册认证以及授权，生成并发布相关的证书。

在智能变电站设备现场管控阶段，通过建立统一注册管理中心，对管辖范围内的二次设备提供注册、认证、发现、配置、事件等服务功能。

1.2 硬件方案设计

采用双核异构处理器外加 FPGA 构成的三核硬件平台，如图 2 所示。测试需要实现 IEC61850-9-1/2/2LE 采样值报文传输协议，由于采样值报文的传输数据量大，且对报文实时性、完整性和离散度都有严格要求，并需具备高度可靠性，所以本功能模块通过 FPGA 硬件实现，满足上述要求。同时，SV 和 GOOSE^[12-15]的收发需要时间同步信号，FPGA 时间同步机制具有较高可靠性和精度，故时间同步可由 FPGA 底层硬件实现。另外，使用 FPGA 提高合并单元的开关量精度。

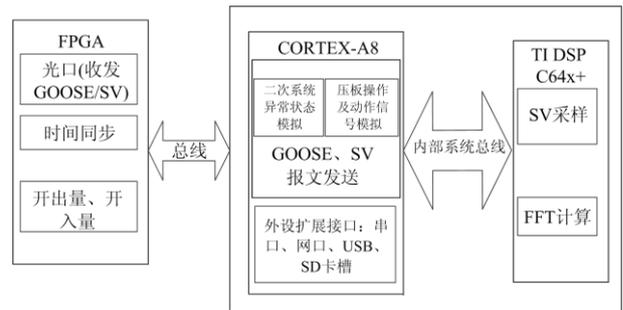


图 2 智能变电站二次设备即插即用硬件设计
Fig. 2 Plug-and-play hardware design of secondary equipment in smart substation

GOOSE 报文的发送和接收^[16-17]对实时性和可靠性的要求很高，但和 SV 相比，GOOSE 内容变化复杂得多，但数据发送频率要低很多，故 GOOSE 协议的实现采用上层进行内容填充，FPGA 进行发送控制的机制，满足 GOOSE 报文协议的要求。

CORTEX-A8 内核的 ARM 端，主频高达 1 GHz，运行开源的 linux 操作系统，开放性好，系统稳定，适合处理复杂的大规模应用，主要用于继保仿真、测控仿真、计量仿真、时间同步和电参量准确度检测模块等需要与工程实验测试平台或用户进行交换的上层应用模块。

另外，ARM 核的外设还预留常用的接口，如

串口、USB、SD 卡槽等,方便应用上的扩展。C64x+ 定点 6000 系列的 DSP,具有强大的数学运算能力,同时和 ARM 端集成在一个芯片上,通过内部总线通信,主要应用于 SV 采样值生成、SV 幅值频率计算、SV 谐波分析、故障波模拟生成、三相电能计算等数字计算,为 ARM 端的应用提供数据计算结果。

1.3 软件方案设计

通用硬件仿真装置由支持层、功能层、应用层系统组成。其中应用层实现变电站 SCD 文件^[18-19]智能解析,利用 SCD 文件,实现二次设备配置文件的自动下装,实现应用层的保护、合并单元、智能终端设备等硬件仿真。系统采用分层化设计,设计合理,实现了层与层的解耦,后期便于维护和软件程序重复利用,而应用层功能的扩展用于解决用户需求的变化。智能变电站二次设备即插即用软件设计如图 3 所示。

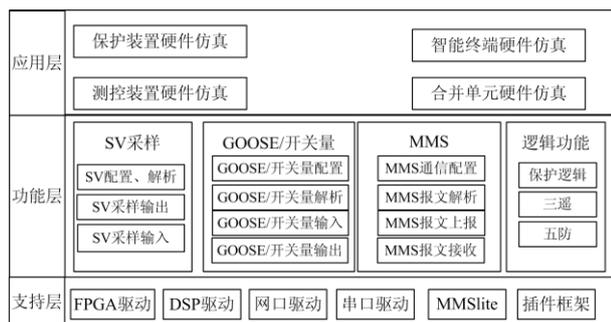


图 3 智能变电站二次设备即插即用软件设计

Fig. 3 Design of plug-and-play software for secondary equipment in smart substation

1) 支持层设计

物理层为系统软件提供驱动、通信协议和框架,主要由 FPGA 驱动、DSP 驱动、网口驱动、串口驱动、MMSlite、插件框架组成。驱动程序为硬件装置提供 FPGA、DSP、网口、串口支持,使得硬件装置正常工作。MMSlite 为用户提供了基本的 MMS 协议处理框架和 API 接口以及 IEC61850 建模,包含完整的 MMS 报文协议运行环境。插件框架采用插件化开发,为插件开发提供基础调用接口及运行环境,以方便软件的升级维护。

2) 功能层设计

功能层为系统软件提供最基本的功能调用接口。功能层可以归类为:SV 采样、GOOSE/开关量、MMS、逻辑功能等。

SV 采样:为应用层提供 SV 采样,包括 SV 配置、解析,SV 采样输出,SV 采样输入。采用的机制为发布/订阅,能实现模型对象到 ISO/IEC8802-3

帧的相互映射关系。

GOOSE/开关量:为应用层提供 GOOSE/开关量,包括 GOOSE/开关量配置、GOOSE/开关量解析、GOOSE/开关量输出、GOOSE/开关量输入,将智能变电站中各间隔智能设备联系起来,在不同的智能设备中进行数据的传输。

MMS:为应用层提供 MMS 通信,包括 MMS 通信配置、MMS 报文解析、MMS 报文上报、MMS 报文接收,使不同制造商生产的设备相互通信,更有利于系统的集成。

逻辑功能:为应用层提供逻辑功能,包括保护逻辑、三遥、五防。

3) 应用层

应用层主要面向用户提供各种装置硬件仿真接口。主要有保护装置硬件仿真、测控装置硬件仿真、智能终端硬件仿真、合并单元硬件仿真、电子式互感器硬件仿真。

保护装置硬件仿真:为用户验证保护装置硬件和保护出口、软压板投退、SV 接收、GOOSE 接收发送、MMS 上报等功能配置的正确性及合理性。

测控装置仿真模块:为用户提供测控装置硬件仿真,以仿真校验遥控、遥信、遥测、五防、SV 接收、GOOSE 接收发送、MMS 上报等功能配置的正确性及合理性。

合并单元仿真模块:为用户提供合并单元仿真模块,以仿真校验 SV 发送、GOOSE 接收发送、MMS 上报等功能配置的正确性及合理性。

智能终端仿真模块:为用户提供智能终端仿真模块,以仿真校验 GOOSE 接收发送、开入开出等功能配置的正确性及合理性。

电子式互感器远端仿真模块:为用户提供电子式互感器远端仿真模块,仿真校验电子式互感器私有协议发送等功能配置的正确性及合理性。

2 智能变电站二次设备即插即用理论模型

2.1 智能变电站即插即用二次设备模型

智能变电站即插即用二次设备模型是基于智能变电站的二次设备模型,增加即插即用特有的数据及功能描述,从而适应变电站即插即用的应用要求^[20-23]。具体地,对于即插即用二次设备的模型描述如图 4 所示,包括设备描述、数据描述及功能描述。

1) 设备描述。包括二次设备的外部连接关系及内部连接关系。由于 IEC61850 系列标准已经很好

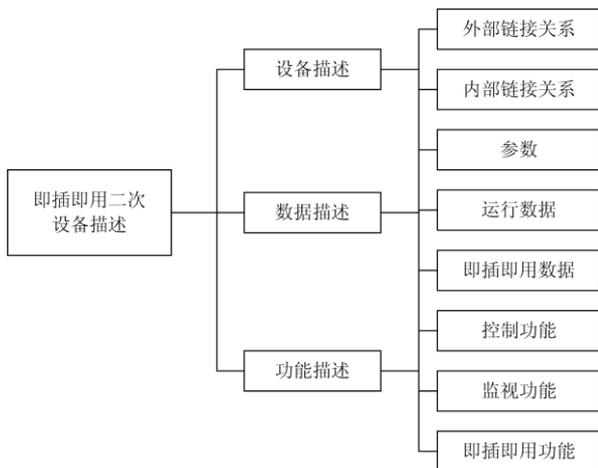


图 4 二次设备即插即用模型要素

Fig. 4 Elements of plug-and-play model of secondary equipment

的定义了相应的规定，对于设备描述部分本项目直接采用该标准。

2) 数据描述。数据描述包括参数及运行数据，除了采用 IEC61850 系列标准外，还根据本项目中的认证服务、发现服务增加了数字证书信息、设备 MAC 地址信息等，以实现设备的即插即用。

3) 功能描述。功能描述包括 IEC61850 系列标准提到的控制功能及监视功能，根据本项目中的认证服务等功能特点，即插即用设备模型还定义了认证功能等。

4) 设备模型中数据描述。设备除了兼容 IEC61850 系列标准的数据描述外，增加了包括物理 MAC 地址、默认通信 IP 地址、软件版本号、硬件版本号、检定日期、证书有效期、厂商联系人、厂商联系电话、资产编号等信息。(1) 物理 MAC 地址格式定义为：以“-”连接的物理地址，如：XX-XX-XX-XX-XX-XX；(2) 默认通信 IP 地址格式定义为：以“.”连接的 IP 地址，XXX.XXX.XXX.XXX；(3) 软件版本号格式定义为：主版本号、次版本号、修改次数；(4) 硬件版本号格式定义为：主版本号、次版本号、修改次数；(5) 检定日期格式定义为：年月日，格式为 yyyyMMdd；(6) 证书有效期格式定义为：年月日，格式为 yyyyMMdd；(7) 厂商联系人格式定义为：联系人完整姓名；(8) 厂商联系电话格式定义为：联系人完整电话；(9) 资产编号格式定义为：设备的完整资产编号。

2.2 IEC61850 标准变电站模型

二次设备即插即用模型来源于智能变电站模型，兼容 IEC61850 标准。在 IEC61850 标准中，变电站的模型主要是对全站的一次设备、二次装置、

网络进行全面的描述。对于二次设备即插即用模型来说，其基本的建模单位是设备。SCD 文件作为全站统一的信息源，应描述变电站内所有 IED 的功能、通信等实例化配置、IED 之间的信息联系，以及 SSD 文件的内容，并最终由系统集成厂商完成、提交全站统一、唯一版本的 SCD 文件。对于一个完整的 IEC61850 标准变电站模型(SCD 文件中描述)，其主体包括 Substation/Communication/IED 三个部分，而 Datatype Template 用于定义 IED 部分中用到的数据类型。

1) Communication 部分

Communication 部分包含了网络模型中的子网以及连接点的配置信息。对于该部分的建模包括设备模型以及关联模型两部分。

对于间隔内设备，所有的 IED 的 AP 信息均需要保留，其中详细配置的 IP 地址等网络信息、GOOSE 的多播、广播等信息都需要进行完整建模。对于关联信息，则不需要对其 AP 进行描述，仅仅包含所涉及的子网即可。

2) IED 部分

IED 部分的建模包含间隔内模型以及关联模型两部分。

对于间隔内信息，所有间隔内的 IED 信息都必须完整保留，其中故障录波装置等全站设备，则统一归属到虚拟的全站公共间隔内进行描述。对于关联信息，与间隔内装置有信号关联的 IED 装置都需要保留到间隔模型中，但为保证符合 SCD 模型的规范性，关联 IED 内的 Inputs 段需要全部裁剪。

3) Datatype Template 部分

数据模板部分的模型完全是为 IED 信息进行服务的。其建模的原则为所有 IED 部分用到的 LNodeType、DOType、DAType 和 EnumType 均需要完整描述。而上级数据类型所引用到的数据类型(例如 LNodeType 定义中用到的 DOType)也需要完整描述。

2.3 智能变电站二次设备即插即用间隔模型及全站模型

基于即插即用二次设备模型的定义，智能变电站即插即用间隔模型及全站模型如图 5、图 6 所示。智能变电站能够实现站内出线保护、测量和监视功能，包括对变电站采集数据的处理。二次设备即插即用间隔模型基于 IEC61850 协议进行定义，并设计了即插即用功能，同时对每个间隔的即插即用功能进行描述。智能变电站内不同的间隔共同构成了全站模型。

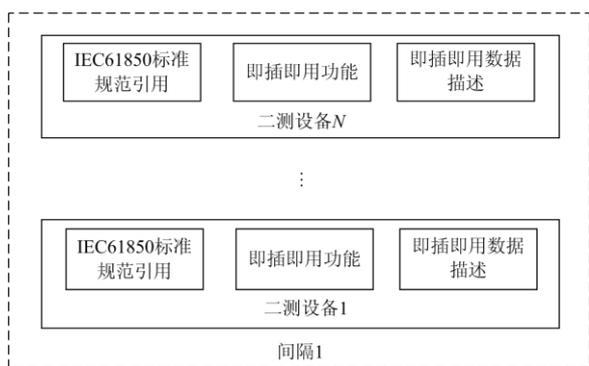


图 5 二次设备即插即用间隔模型

Fig. 5 Plug and play interval model for secondary equipment

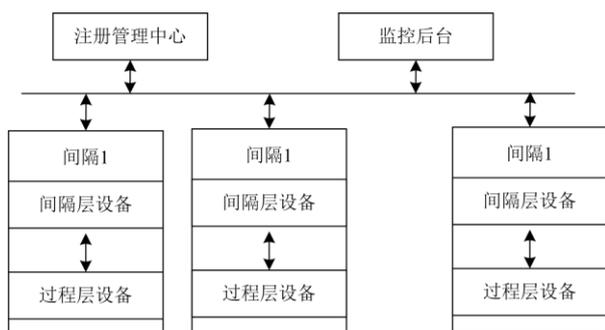


图 6 变电站即插即用全站模型

Fig. 6 Plug-and-play full station model for substation

3 智能变电站二次设备即插即用功能仿真

3.1 保护装置功能仿真

保护装置仿真功能模拟电力系统元件发生短路等异常情况时的电流值、电压值、功率值、频率值等的变化构成继电保护动作，仿真装置模块及对应接口如图 7 所示。

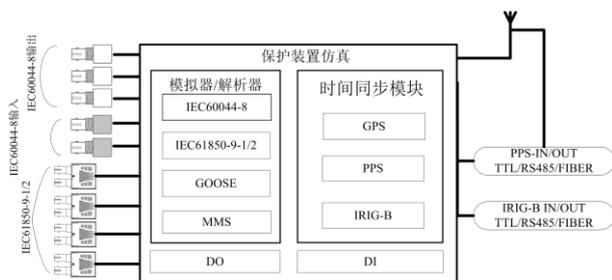


图 7 保护装置仿真硬件系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of protection device simulation hardware system

仿真保护装置通过导入 SCD 文件获取保护装置信息，从而具备仿真保护装置的功能；继电保护装置仿真通过模拟各种保护装置的功能元件及其组成系统，实现 SV 录波功能，并依据不同的故障波

形，判定故障类型、故障测距等；保护装置通过建立相应的保护原理来模拟保护动作情况，同时，装置可仿真实现软压板的投退和定值的修改，完成常规保护逻辑算法。由图 7 可以看出，保护仿真包含了模拟器/解析器以及时间同步模块，通过对输入量的处理，实现即插即用功能。

3.2 测控装置功能仿真

测控装置功能仿真主要实现信号采集、测量、控制等功能。

1) 遥测仿真功能

遥测功能仿真在于装置接收 DL/T860 采样值报文，通过装置计算电压等各类遥测参数有效值；装置将遥测量的数据以 MMS 报文格式传输，测试仪通过发送 SV 采样值报文给测控装置，并和接收测控装置上送的 MMS 报文数据进行比较而得出误差。遥测分为模拟量遥测和数字量遥测。模拟量输入时的遥测测试，采用模拟源平台，该平台产生可调节的遥测信息转给测控装置，传递现场信号，进而获取、分析并评定测试数据。

2) 遥信仿真功能

仿真内容包括遥信正确性仿真(遥信雪崩)、防抖测试、遥信风暴、遥信响应时间和 SOE 分辨率测试。将 GOOSE 报文输出到仿真装置，仿真装置以 MMS 报文形式输出，校验 N 路的遥信能否准确对应，并将输出传送给测控，测控装置中的 MMS 模块以报文的形式传输至测试仪测试。

3) 遥控测试功能

研究遥控 MMS 报文输入及继电器触点输出控制或 GOOSE 报文传输的控制命令信息测试。模拟现场设备，接收测控装置的开关量信号或者 GOOSE 报文，且显示遥控时标，以测试测控装置的遥控信号是否正确发出。同时研究遥控保持时间测试。测试仪模拟主站，遥控信号 MMS 报文输入给测控装置，测控装置开关量接点输出信号给测试仪，测试仪获取控制信号的上升沿及下降沿的时间，两者之差即为实际遥控保持时间，与测控装置设置的控制脉冲宽度比较，获得遥控保持时间误差。测试仪模拟主站，遥控信号 MMS 报文输出变电站顺序控制实现方案示意图给测控装置(记录该时刻)，测控装置 GOOSE 报文输出给测试仪，测试仪解析获取控制信号时间，即为遥控响应时间。

4 二次设备即插即用控制校核逻辑设计

4.1 顺序控制和防误闭锁

顺序控制作为变电站中的智能操作处理，能够

大大降低变电站人员的操作量,提高操作的准确性,减轻变电值班人员的压力。防误校核服务,主要是针对调控主站远方遥控变电站一次设备情况,通过调用变电站微机防误系统的防误判别功能而设定的,原则上调控主站仅需判别变电站无法实现的站间逻辑^[24-25]。变电站顺序控制和防误闭锁实现方案示意图如图 8 所示,其主要功能是调控主站通过采集变电站防误系统的信息,进行实时站间防误判别,同时调用变电站微机防误系统的站内防误判别结果,实现全网防误校核功能。在智能变电站即插即用过程中,在监控系统获取顺序控制操作命令时,进行顺序控制的同时需要进行防误闭锁的逻辑确认,防止控制动作出现失误,从而防止误动事故发生。

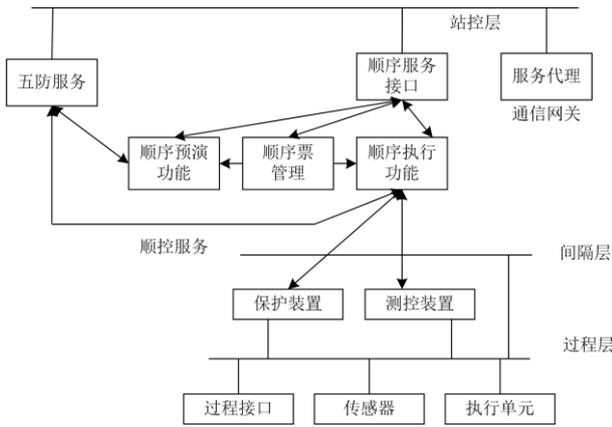


图 8 变电站顺序控制和防误闭锁实现方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of substation sequence control and anti-misoperation locking realization scheme

在变电站端实现程序化操作和五防校核功能的服务化封装,调控主站不存储程序化操作票、五防校核逻辑和信息,调控主站仅实现系统防误校核,存储操作日志记录、显示操作内容,总体方案如图 8 所示。通过 SOA 信息交互机制,调度(调控)主站的程序化控制功能作为服务客户在服务代理的支撑下与变电站的程序化控制服务直接进行信息交互。主站发往子站的控制命令采用 SOA 请求/响应机制实现程序化操作票调阅、控制对象选择,控制预演、执行、终止等程序化操作控制业务,控制期间通过 IMS 机制实现(推送模式),控制过程和执行情况的信息反馈。

4.2 顺控和五防校核

注册管理中心发送顺控操作命令到监控系统,监控系统调用顺序控制服务接口,经过顺控预演、顺控票管理,开始顺控执行功能,间隔层的保护装置和测控装置做出响应,注册管理中心监听到执行结果,与操作命令进行比对,校核该顺控命令。注

册管理中心发送五防操作命令到测控装置,测控装置根据内部五防逻辑做出响应,注册管理中心监听到执行结果,与操作命令进行比对,校核该五防命令。变电站顺序控制和五防校核如图 9、图 10 所示。

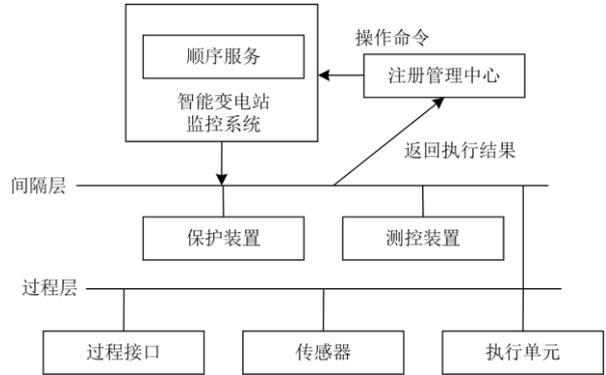


图 9 变电站顺序控制校核

Fig. 9 Substation sequence control check

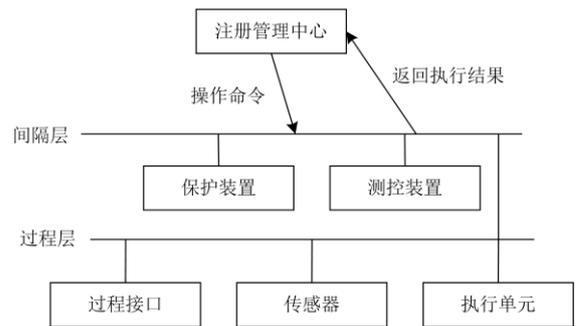


图 10 变电站五防校核

Fig. 10 Five-proof check of substation

4.3 虚端子校核

虚端子的流程校验如图 11 所示,首先对智能变

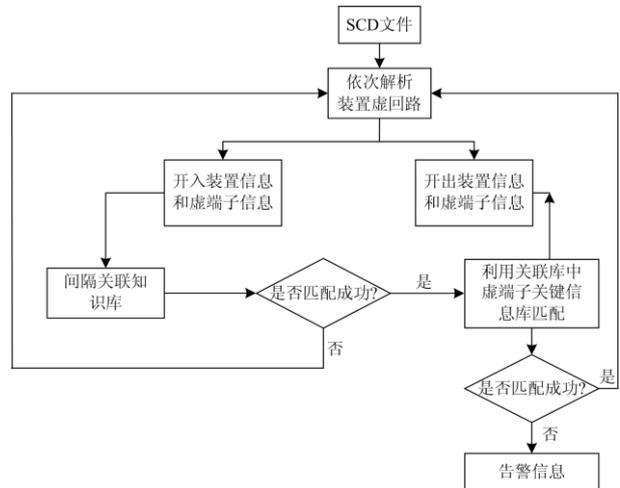


图 11 静态校核流程

Fig. 11 Static verification process

电站的 SCD 文件进行解析, 并解析文件进行虚回路的解析, 开入装置信息和虚端子的信息, 与关联库中的信息相匹配, 从而判定是否符合, 并对不符合的发出告警信息。

5 智能变电站二次设备即插即用应用

5.1 功能测试

系统可实现变电站二次设备信息收集和分类, 能够实现待测设备测试内容和能力的自动分类和分析, 进行测试库筛选, 并显示合适的测试库列表, 用户可选择合适的模板生成测试解决方案; 生成后的解决方案支持人工配置。可根据不同厂家的配置及 SCD 文件, 对测试参数进行配置。具体功能实现界面如图 12 所示。

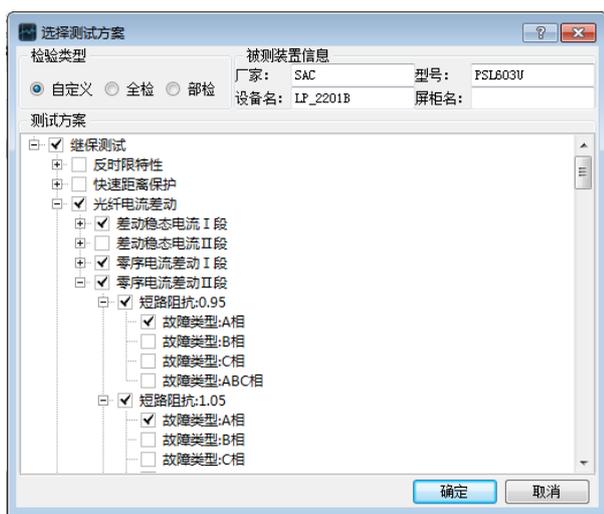


图 12 选择测试方案

Fig. 12 Choose a test plan

5.2 测试结果展示

系统可实现配置测试方案后, 自动执行测试方案, 自动完成数据分析, 根据顺序自动进行测试并生成测试报告; 自动进行定值单的读取、下装, 可进行参数配置修改, 可以调阅、查询专家测试库; 能够对测试过程进行管理, 能够提供测试方法接线图等相关辅助信息, 能够获得测试过程状态信息; 能够进行测试过程中人工干预等。在测试过程中, 实时显示测试状态信息, 包括测试数据显示、测试仪器连接状态显示、测试进度显示、测试时间显示。测试过程中, 测试仪器与上位机通信中断, 上位机会自动跟测试仪器重新连接, 测试结束后, 根据测试内容, 平台可自动生成 PDF 或 WORD 格式的报告, 具体实现界面如图 13、图 14 所示。

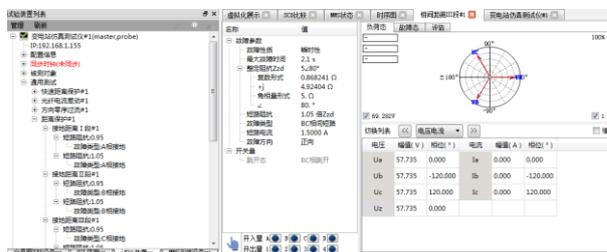


图 13 自动测试运行界面

Fig. 13 Automatic test operation interface



图 14 测试报告自动生成

Fig. 14 Automatic test report generation

6 结论

文中提出了智能变电站二次设备即插即用理论模型, 提高了变电站二次设备配置的效率。主要得到了如下结论:

- 1) 设计了智能变电站二次设备即插即用总体框架, 并对功能实现的软硬件进行了配置。
- 2) 基于 IEC61850 对智能变电站的二次设备模型基础, 增加即插即用特有的数据及功能描述, 从而适应变电站即插即用的应用要求。
- 3) 对智能变电站二次设备测控装置和保护装置即插即用功能仿真, 对顺序控制和防误闭锁的即插即用进行逻辑设计, 并针对虚端子进行校验, 最后, 通过实践证明了所提系统的可行性。

参考文献

[1] 叶远波, 刘宏君, 张兆云, 等. 基于广域信息的继电保护实时评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 150-157.
YE Yuanbo, LIU Hongjun, ZHANG Zhaoyun, et al. Research on real-time evaluation of relay protection based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 150-157.

[2] 陈光华, 王朋飞, 赵应兵, 等. 智能变电站智能终端自动测试仪设计[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17):

- 162-169.
CHEN Guanghua, WANG Pengfei, ZHAO Yingbing, et al. Design of automatic tester for intelligent terminal of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 162-169.
- [3] 叶远波, 黄太贵, 谢民, 等. 基于多模型融合集成学习的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 148-157.
YE Yuanbo, HUANG Taigui, XIE Min, et al. State assessment of secondary equipment in smart substation based on multi-model fusion integrated learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 148-157.
- [4] 张海庭, 张思远, 刘登鑫, 等. 变电站防误闭锁逻辑可视化校验系统设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 181-187.
ZHANG Haiting, ZHANG Siyuan, LIU Dengxin, et al. Design and application of visual verification system for anti-misoperation lockout logic in substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 181-187.
- [5] 张志超, 刘守瑞, 周永强, 等. 基于 VR 技术的变电站二次回路在线监测方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(3): 52-56.
ZHANG Zhichao, LIU Shourui, ZHOU Yongqiang, et al. Research on online monitoring method of secondary circuit in substation based on VR technology[J]. Computer Technology and Automation, 2021, 40(3): 52-56.
- [6] 刘见, 赵震宇, 裴茂林, 等. 智能变电站过程层网络异常流量检测[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(3): 184-188.
LIU Jian, ZHAO Zhenyu, PEI Maolin, et al. Detection of abnormal flow in process layer network of smart substation[J]. Computer Technology and Automation, 2021, 40(3): 184-188.
- [7] 张亚飞, 李明治, 李春兰, 等. 基于 BP 神经网络的汇控小室温度控制策略[J]. 现代电子技术, 2021, 44(19): 90-94.
ZHANG Yafei, LI Mingzhi, LI Chunlan, et al. Temperature control strategy of the control room based on BP neural network[J]. Modern Electronic Technology, 2021, 44(19): 90-94.
- [8] 贞泽, 万淑娟, 邱新娟, 等. 适应智能变电站就地化线路保护的双模高密度预制光缆研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 123-128.
ZHEN Ze, WAN Shujuan, QIU Xinjuan, et al. Research on dual-mode high-density prefabricated optical cables suitable for in-situ line protection of smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 123-128.
- [9] 张令涛, 赵林, 张亮, 等. 智能电网调控中心变电站图形数据即插即用技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 74-80.
ZHANG Lingtao, ZHAO Lin, ZHANG Liang, et al. Smart grid control center substation graphics data plug and play technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 74-80.
- [10] 王德林, 裘愉涛, 凌光, 等. 变电站即插即用就地化保护的应用方案和经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 12-19.
WANG Delin, QIU Yutao, LING Guang, et al. Application schemes and economic comparison of plug-and-play in-situ protection in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 12-19.
- [11] 张莹, 李颖毅, 盛海华, 等. 一种数字化继电保护装置即插即用系统的构建与实现[J]. 电测与仪表, 2017, 54(1): 118-122, 128.
ZHANG Ying, LI Yingyi, SHENG Haihua, et al. Construction and implementation of a plug-and-play system for digital relay protection devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(1): 118-122, 128.
- [12] 董博, 安勃, 张卫东. 变电站内局部放电脉冲噪声对 LoRa 通信的影响研究[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-8[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20210913.1928.002.html>.
DONG Bo, AN Bo, ZHANG Weidong. Study on the influence of partial discharge impulse noise in substation on LoRa communication[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-8[2021-10-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20210913.1928.002.html>.
- [13] 周元刚, 刘绚, 张波. 基于多阶段传输的智能变电站安全通信策略[J/OL]. 电力系统自动化: 1-12[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210803.0848.002.html>.
ZHOU Yuangang, LIU Xuan, ZHANG Bo. Security communication strategy of smart substation based on multi-stage transmission[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-12[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210803.0848.002.html>.
- [14] 王沛, 张卫东, 李谦, 等. 变电站内空间电磁场对无线通信单元耦合机理分析[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-9[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20210625.1746.002.html>.
WANG Pei, ZHANG Weidong, LI Qian, et al. Analysis of the coupling mechanism of the electromagnetic field in the substation to the wireless communication unit[J/OL].

- Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-9[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20210625.1746.002.html>.
- [15] 刘刚, 许艾, 徐延明, 等. 调度与变电站通信安全防护技术[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 64-71.
LIU Gang, XU Ai, XU Yanming, et al. Dispatching and substation communication security protection technology[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 64-71.
- [16] 王杰, 侯炜, 陈俊, 等. 基于 GOOSE 通信的弧光保护方案[J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 66-72.
WANG Jie, HOU Wei, CHEN Jun, et al. Arc protection scheme based on GOOSE communication[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 66-72.
- [17] 郑翔, 殷建军, 杜奇伟, 等. 变电站自动化设备运维管控系统及其应用[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 42-50.
ZHENG Xiang, YIN Jianjun, DU Qiwei, et al. Substation automation equipment operation and maintenance management and control system and its application[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 42-50.
- [18] 钟文, 吕飞鹏, 廖小君, 等. 基于聚类的智能变电站SCD文件内部比对[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200803.1829.040.html>.
ZHONG Wen, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Cluster-based internal comparison of SCD files in smart substations[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8[2021-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200803.1829.040.html>.
- [19] 王星宇, 吕飞鹏, 钟文, 等. 基于 SCD 文件的智能变电站主接线自动生成方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 119-125.
WANG Xingyu, LÜ Feipeng, ZHONG Wen, et al. Automatic generation method of smart substation main wiring based on SCD file[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 119-125.
- [20] 周晓春, 梁军, 陈龙, 等. 智能网联车即插即用组网模型及决策融合算法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(16): 1983-1993.
ZHOU Xiaochun, LIANG Jun, CHEN Long, et al. Plug-and-play networking model and decision fusion algorithm for intelligent networked vehicles[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16): 1983-1993.
- [21] 吴海, 滕贤亮, 周成, 等. 基于 IEC 61850 的台区设备即插即用实现方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 72-78.
WU Hai, TENG Xianliang, ZHOU Cheng, et al. Implementation method of plug and play of station equipment based on IEC 61850[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 72-78.
- [22] 钟加勇, 熊小伏, 何迎春, 等. 面向台区智能终端的即插即用和拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 166-173.
ZHONG Jiayong, XIONG Xiaofu, HE Yingchun, et al. Plug-and-play and topology identification method for intelligent terminals in station area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 166-173.
- [23] 郑爽, 贾东梨, 耿光飞, 等. 分布式电源即插即用临界条件在配电线路中的分布规律及快速估算[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2109-2119.
ZHENG Shuang, JIA Dongli, GENG Guangfei, et al. Distribution law and rapid estimation of critical conditions for plug-and-play distributed power generation in distribution lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2109-2119.
- [24] 赖声钢. 基于 GPRS 和 ZigBee 网络的地铁变电站防误闭锁系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 135-138.
LAI Shenggang. Design of anti-misoperation locking system for subway substation based on GPRS and ZigBee network[J]. Urban Rail Transit Research, 2018, 21(4): 135-138.
- [25] 方家麟. 基于拓扑结构的变电站网络型防误闭锁系统研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(9): 156-159.
FANG Jialin. Research on Network type anti-misoperation lockout system of substation based on topology structure[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 39(9): 156-159.

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-01-18

作者简介:

吴建宇(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、控制工程、人工智能、电力物联网; E-mail: nofarzed1@163.com

唐志军(1973—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为继电保护、电力系统自动化;

晁武杰(1983—), 男, 博士, 高工, 研究方向为继电保护、电力系统自动化。

(编辑 张爱琴)