

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231022

基于专家知识库的一键顺控系统镜像调试技术研究与应用

盛海华¹, 计荣荣¹, 李海², 张淦锋¹, 韩茂林³

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 武汉凯默电气有限公司, 湖北 武汉 430223;
3. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对智能变电站一键顺控系统现场调试工作量大、耗时长、效率低的问题, 提出一种基于专家知识库的一键顺控系统镜像调试方法。基于“五防”规则建立基本单元模型, 生成各类典型间隔设备的操作规则函数, 实现专家知识库的构建。通过解析智能变电站的系统规格描述(system specification description, SSD)文件构建一次设备拓扑连接表, 基于设备状态的推理算法结合设备操作规则函数, 实现操作票专家知识库的自动生成。搭建基于专家知识库的一键顺控系统镜像调试平台, 通过智能电子设备(intelligent electronic device, IED)镜像仿真和一次设备潮流仿真测试方法, 对一键顺控系统进行全面测试。将现场作业工序迁移至镜像调试平台中完成, 实现一键顺控系统镜像调试成果在变电站的“即插即用”。测试结果表明, 平台的应用可以大幅提高现场一键顺控系统的调试效率、质量和安全性。

关键词: 智能变电站; 一键顺控; 专家知识库; 镜像调试

Research and application of mirror debugging technology for one key sequential control system based on an expert knowledge base

SHENG Haihua¹, JI Rongrong¹, LI Hai², ZHANG Ganfeng¹, HAN Maolin³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China; 2. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430223, China; 3. CYG SUNRI Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: There are problems of heavy workload, long time-consumption and low efficiency in field debugging of an intelligent substation monitoring system. Thus a mirror debugging method for one key sequential control system based on an expert knowledge base is proposed. A basic unit model is established based on the “Five Prevention” rules. Operational rule functions for various typical interval devices are generated, thus building a system knowledge base. A device topology connection table is constructed by parsing the system specification description (SSD) of the intelligent substation. Based on a device state-based reasoning algorithm and combined with device operational rule functions, an automatic generation of an expert knowledge base of operation tickets is implemented. A mirror debugging platform for one key sequential control system based on the expert knowledge base is built. Through intelligent electronic device (IED) mirroring simulation and the primary equipment power flow simulation and test method, a comprehensive test of the one click sequential control system is conducted. The on-site operation process is migrated to and completed in a mirror debugging platform, and a “plug and play” of image debugging results of one click sequential control system in substations is implemented. The test results indicate that the application of the platform greatly improves debugging efficiency, quality, and safety of the on-site one click sequential control system.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211JX230002).

Key words: intelligent substation; one click sequential control; expert knowledge base; image debugging

0 引言

为建设新型电力系统, 国网公司加快在各电压

等级变电站统一部署一键顺控功能。一键顺控是一种操作项目软件预制、操作任务模块式搭建、设备状态自动判别、防误联锁智能校核、操作步骤一键启动、操作过程自动顺序执行的操作模式^[1-3]。变电站端监控系统一键顺控操作由监控主机(或一键顺

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5211JX230002)

控主机)、智能防误主机、间隔层设备等协同完成。操作人员应用一键顺控功能,选择当前设备态及目标设备态,调用监控主机内提前预制的操作票,经智能防误主机和监控主机防误双校核后,由监控主机将操作指令通过间隔层设备下发至现场一、二次设备完成各项操作任务,实现变电站端一键顺控操作。对开关、刀闸位置接点、压板状态采用双确认机制,确保顺控执行过程中设备动作真实准确^[4-5]。

然而,在变电站一键顺控工程实施中,尚缺乏有效的现场测试与验收手段,严重依赖现场人工停电作业。同时,频繁的一次设备操作对设备的使用寿命也产生较大影响,而且劳动强度大、工作效率低、适用面狭窄。受限于一次设备状态及实际信号难以灵活模拟,对于不符合操作条件的情况,难以逐项设定不符合的条件进行顺控操作逻辑的测试。从而易导致测试不全面,存在着较大的漏测风险,在后续应用中存在较大的安全隐患^[6-7]。

针对以上问题,提出基于专家知识库的一键顺控系统测试方法,通过模拟仿真技术实现顺控逻辑

的自动和手动一键式测试,实现高效、快捷地对顺控逻辑的全面测试,显著提升效率和安全性,并解决停电范围对现场验证严重制约的问题。

1 一键顺控系统测试原理

一键顺控系统测试的目标为测试设备双确认信号的正确性,验收五防规则的完整性,验证一键顺控流程的连续性,验证一键顺控倒闸操作任务的合理性,验证一键顺控倒闸操作票的正确性^[8]。为实现测试目的,搭建变电站离线镜像调试平台。

1.1 一键顺控功能测试系统架构

一键顺控功能测试系统架构如图1所示。镜像调试平台通过以太网与离线监控主机(或一键顺控主机)、智能防误主机独立组网,形成离线测试环境。平台具备间隔层智能电子设备(intelligent electronic device, IED)镜像仿真、一次设备潮流仿真、调试管理等功能,从而构建一键顺控模块运行环境^[9-10]。同时构建一键顺控操作离线镜像验证环境,实现对一键顺控票的逐项、逐条验证。

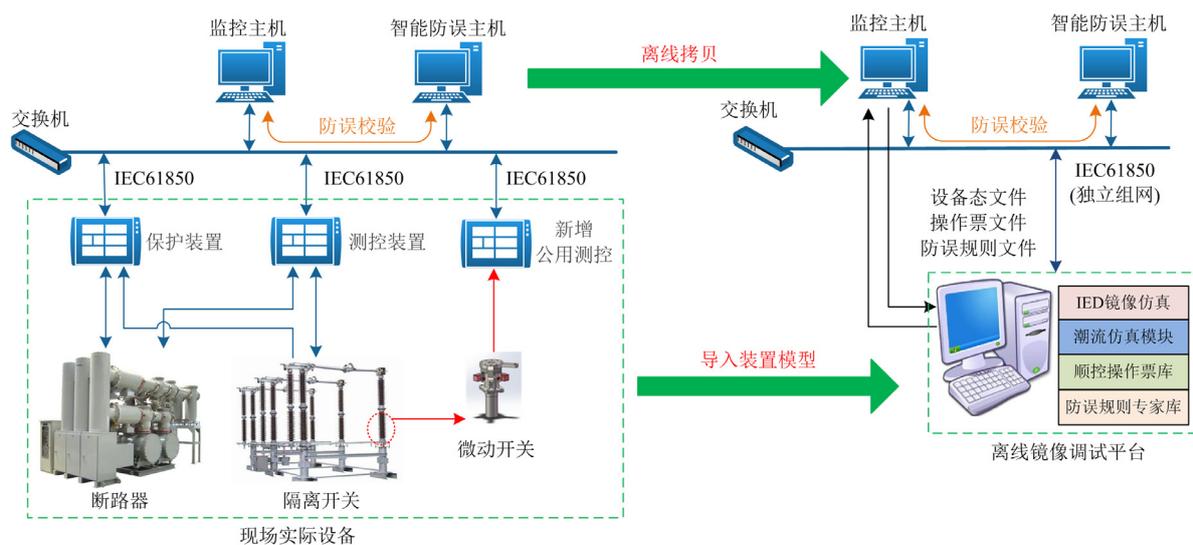


图1 一键顺控功能测试系统架构

Fig. 1 Architecture of one click sequential control function testing system

镜像调试平台通过电力潮流仿真、二次设备仿真技术将遥信、遥测的实时数据上送到监控主机,并可接收监控主机下发的遥控指令,控制改变电力潮流仿真系统中对应的开关、刀闸以及地刀的位置状态。拓扑结构改变后,系统自动重新计算潮流数据,对应一次设备的电流、电压信息也同步改变,真实模拟变电站一次、二次设备的运行特性。同时IED仿真功能支持远方遥控压板的投退,通过四遥信号的联动,构成一个全面、动态的一键顺控离线

镜像验证测试系统。

1.2 一键顺控功能测试系统调试原理

搭建镜像仿真的一键顺控测试系统,完成与监控主机相对应的设备态、操作票、闭锁逻辑配置。基于该系统开展制造信息规范(manufacturing message specification, MMS)信号仿真,支持接收遥控指令并进行动作信号反馈,通过模拟目标条件满足或不满足情况,检查一键顺控对应的预期状态和执行控制流程是否正常进行,实现一键顺控系统的设备态、

操作流程、闭锁条件的全逻辑测试。技术原理如图 2 所示。

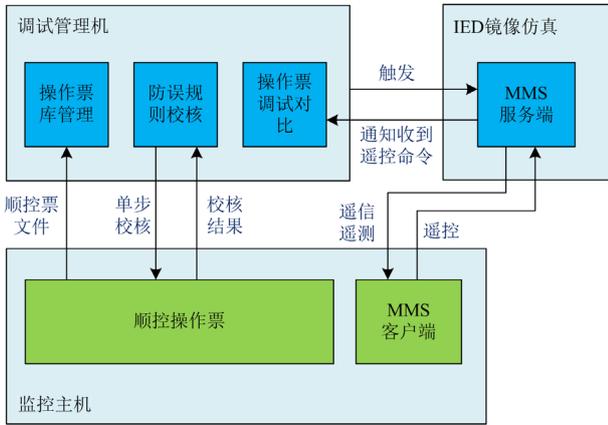


图 2 一键顺控镜像调试

Fig. 2 One click sequential image debugging

镜像调试平台导入顺控票文件，构建顺控操作票测试票库。在进行操作票调试时，选择操作票进入调试状态，自动通知 IED 镜像仿真间隔层设备触发信号，使信号状态满足待测试操作票的源态。人工启动监控主机上的待验证顺控操作票，启动顺控操作。单步经过仿真防误主机校核后，向 IED 镜像仿真间隔层设备下发单步执行指令，仿真间隔层设备收到遥控指令并反馈第一判据和第二判据动作结果信号。调试管理机获取顺控票单步执行指令，并与测试操作票中正在调试的操作票项进行核对，操作对象和确认条件一致，则认为单步调试成功，待所有操作步骤都成功验证后，判断整票测试通过。

2 关键技术

2.1 变电站设备一二次设备拓扑关系建模

系统规格描述(system specification description, SSD)文件包括变电站一次系统拓扑结构、一次设备模型信息、一次设备和二次设备关联信息、变电站各应用系统功能配置等内容。IEC61850 中按照变电站、电压等级、间隔、导电设备的层级结构对变电站一次系统进行建模，并创建端子和连接点的模型来描述一次设备拓扑连接，同时在一次设备对象下创建逻辑节点(logical node, LNode)来关联一次设备与二次设备及其信号，这些模型信息构成了 SSD 文件的基本内容^[10-12]，如图 3 所示。

基于图模配置的系统测试配置技术，镜像调试平台采用 SSD 标准间隔模板来组建变电站 SSD 模型文件，并在 SSD 中基于 LNode 对象描述一、二次设备的关联关系，建立一次对象与二次设备逻辑

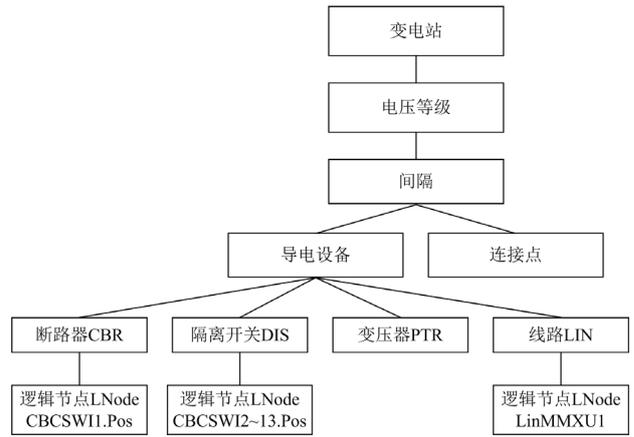


图 3 变电站 SSD 结构

Fig. 3 Substation SSD structure

节点的关联。其中 LNode 的属性 iedName、IdInst、prefix、InClass、InInst 组成了 IED 设备逻辑节点的参引。

SSD 中需要进行一二次关联的信号较多，若仅采用手动关联，则工作量巨大且易出错，故有必要在 SSD 模型配置功能中自动把二次信号关联到一次设备^[13-15]。平台配置中将对应间隔的二次设备 IED 与间隔图形进行整体关联，通过模型解析出相关一次设备的信息模型，然后自动与图形文件中的图元进行自动关联。

基本思路为：先把保护装置 IED、测控装置 IED 的逻辑节点物理设备(logical node physical device, LPHD)手动关联到间隔的主设备下，SSD 工具自动分析这些 IED 的二次信号(包括开关位置、保护跳闸和电压电流等)的逻辑节点名、DO 名以及 DO 描述，把这些信号分别关联到此间隔对应的一次设备下，形成完整的包含变电站一次设备和二次设备关联信息的模型。

2.2 逻辑规则自动生成

变电站监控主机、智能防误主机内置的防误逻辑规则应满足变电站不同运行方式下倒闸操作的“五防”要求。平台基于主接线图拓扑连接关系生成联锁逻辑规则，图 4 以 220 kV 线路间隔为例，解析 SSD 图模文件中开关、刀闸和地刀之间的相邻信息，按照“开关不作为隔离设备”、“开关无联锁条件”、“相邻刀闸与地刀之间须存在互相闭锁的条件”、“不允许母线双跨”等基本原则形成逻辑闭锁关系^[16-18]，典型防误逻辑规则如表 1 所示。平台基于主接线拓扑连接关系自动测试一键顺控操作对象的顺序和逻辑是否正确。

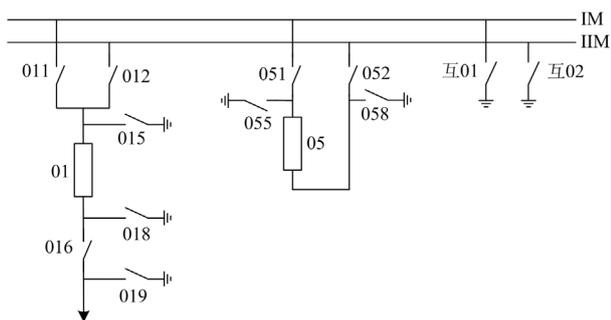


图 4 双母线接线示意图

Fig. 4 Dual busbar wiring diagram

表 1 双母线接线线路间隔典型防误逻辑规则

Table 1 Typical error prevention logic rules for dual busbar connection line spacing

设备操作	防误逻辑
01 分	无
01 合	无
011 分	停电: 01 分、012 分 倒母: 012 合、05 合、051 合、052 合
011 合	送电: 01 分、012 分、015 分、018 分 倒母: 012 合、05 合、051 合、052 合
012 分	停电: 01 分、011 分 倒母: 011 合、05 合、051 合、052 合
012 合	送电: 01 分、011 分、015 分、018 分 倒母: 011 合、05 合、051 合、052 合
016 分	01 分
016 合	01 分、011 分、015 分、018 分
015 分	无
015 合	011 分、012 分、016 分
018 分	无
018 合	011 分、012 分、016 分
019 分	无
019 合	016 分

2.3 典型顺控票自动生成

平台中一键顺控操作票库按电压等级、间隔分类编写, 包含单间隔操作票、组合票, 组合票由各间隔操作票按防误要求组合而成。预先编辑典型间隔状态库, 将各种可能的典型间隔状态予以定义, 每个间隔内包含电压等级、接线方式、一次和二次设备信号^[19-21]。表 2 以 220 kV 线路间隔顺控操作票为例, 描述一键顺控典型操作票的表达式。

220 kV 线路一由“#1 母运行”转“#1 热备用”操作票表达式: 220-XL01-YX01-RBY01, 表达式说明见表 3。

按照变电站不同电压等级划分不同间隔类型, 包括线路间隔(XL)、母线间隔(MX)、主变间隔(ZB)

表 2 一键顺控典型操作票表达式

Table 2 One click sequential control typical operation ticket expression

序号	顺控操作票	操作票表达式
1	220 kV 线路一“#1 母运行” 转“#1 母热备用”	220-XL01-YX01-RBY01
2	220 kV 线路一“#1 母热备用” 转“#1 母冷备用”	220-XL01-RBY01-LBY01
3	220 kV 线路一“#1 母运行”转 “#1 母冷备用”	220-XL01-YX01-LBY01
4	220 kV 线路一“#1 母冷备用” 转“#1 母热备用”	220-XL01-LBY01-RBY01
5	220 kV 线路一“#1 母热备用” 转“#1 母运行”	220-XL01-RBY01-YX01
6	220 kV 线路一“#1 母冷备用” 转“#1 母运行”	220-XL01-LBY01-YX01
7	220 kV 线路一“#2 母运行” 转“#2 母热备用”	220-XL01-YX02-RBY02
8	220 kV 线路一“#2 母热备用” 转“#2 母冷备用”	220-XL01-RBY02-LBY02
9	220 kV 线路一“#2 母运行” 转“#2 母冷备用”	220-XL01-YX02-LBY02
10	220 kV 线路一“#2 母冷备用” 转“#2 母热备用”	220-XL01-LBY02-RBY02
11	220 kV 线路一“#2 母热备用” 转“#2 母运行”	220-XL01-RBY02-YX02
12	220 kV 线路一“#2 母冷备用” 转“#2 母运行”	220-XL01-LBY02-YX02

表 3 操作票表达式说明

Table 3 Explanation of operation ticket expression

序号	缩写	含义	备注
①	220	电压等级: 220 kV	电压等级
②	XL	间隔类型: 线路	间隔信息
③	01	间隔编号: 01	
④	YX	设备态: 运行	源态
⑤	01	母线选择: #1 母	
⑥	RBY	设备态: 热备用	目标态
⑦	01	母线选择: #1 母	

等。间隔设备态划分为运行态(YX)、热备用态(RBY)、冷备用态(LBY)和检修态(JX), 设备态母线选择属性具体包括: 单母线(00)、双母线#1 母(01)、双母线#2 母(02)等。顺控操作票包括各设备态两两之间自动生成相互切换的操作步骤, 以电压等级、间隔信息、源态和目标态信息组合按照操作规程建立的操作票知识库。

解析监控主机的顺控设备态、操作票文件以及 SCD 文件, 与操作票知识库中模型进行匹配, 形成

操作票专家测试库模板，将模板中操作票的各对象信息，包括动作对象、执行条件、确认条件等，根据 SCD 文件进行实例化，生成顺控操作票测试库。

2.4 IED 镜像仿真

SCD 为变电站全站系统配置文件。SCD 文件采用 XML 语言编写，目前对于 XML 文件的解析有两种方案^[22-25]：一种是 DOM 方案；另一种是 SAX 方案。前者的优点是访问方便，缺点是占用内存较大；后者的优点是内存占用小，缺点是访问不方便。考虑到 SCD 文件本身不会特别大，所以本方案采用 DOM 方案进行解析。

MMS 是国际标准化组织制定的应用层的通信标准，适用于多个工业领域。最新国际标准 IEC61850 作为未来电力系统无缝通信体系的基础，其底层映射到 MMS，其中 IEC61850 只应用了 MMS 基础规范的一部分，因此采用基于 MMS 协议的多 IED 镜像仿真技术。

2.5 一次设备潮流仿真

电力系统潮流计算属于稳态分析范畴，不涉及系统元件的动态特性和过渡过程，因此其数学模型不包含微分方程，采用高阶非线性方程^[26]。

“位置双确认”要求平台能模拟出倒闸操作后的潮流数据。基于此，平台对电力二次设备建模，包括电流互感器、电压互感器、开关算法、信号转换器等，基于一体化图模实现稳态实时潮流计算仿真。其中，二次算法模型负责通过潮流计算获取一次数据，转换为监控主机需要的潮流数据。潮流计算模块负责调整拓扑结构，计算潮流数据，将数据上送至算法模型，最终通过 MMS 协议上送至监控主机。

3 一键顺控系统测试技术实现

3.1 监控主机防误逻辑测试

智能防误逻辑测试包括一次接线图、防误规则、一键顺控预演闭锁信号判断、一键顺控执行闭锁信号判断和一键顺控主机防误模拟操作验收。

监控主机(或一键顺控主机)防误逻辑验收需要解除与智能防误主机的防误校验，按一次设备防误逻辑验收原则在监控主机上进行模拟操作，验证监控主机内置防误逻辑的正确性、完整性。测试内容如下所述。

1) 监控主机一次设备接线图测试：按现场一次设备接线方式核对监控主机一次设备接线图以及设备命名是否正确。

2) 监控主机内置防误逻辑测试：在监控主机上按照防误联锁验收原则进行防误逻辑检查，应满足

防误逻辑规则要求。

3) 模拟预演阶段监控主机内置防误逻辑测试：运行一键顺控程序生成任务，监控主机配置防误规则，在镜像调试平台中模拟防误闭锁校验不满足的情况，监控主机下发操作票预演命令后，检查预演过程是否会被闭锁。

4) 指令执行阶段监控主机内置防误逻辑测试：运行一键顺控程序生成任务，监控主机配置防误规则，在镜像调试平台中模拟防误闭锁校验不满足的情况下，监控主机下发操作票执行命令后，观察执行过程是否闭锁。

3.2 智能防误主机防误功能测试

智能防误逻辑测试包括一次接线图、防误规则、一键顺控预演闭锁信号判断、一键顺控执行闭锁信号判断和监控主机防误模拟操作测试。

1) 核对智能防误主机一次设备接线图及设备双重名称是否正确。

2) 导出智能防误主机中防误规则表，与通过审核的防误规则进行全面比对。

3) 解除监控主机防误闭锁，并使操作步骤不满足智能防误主机防误规则，监控主机预演一键顺控任务，预演应该被终止，并提示防误规则校验失败。

4) 解除监控主机防误闭锁，并使操作步骤不满足智能防误主机防误规则，监控主机执行一键顺控任务，执行应该被终止，并提示防误规则校验失败。

5) 按一次设备防误规则在智能防误主机上通过模拟开票测试防误规则的正确性、完整性。

3.3 双确认信号测试

1) 断路器双确认

断路器的位置确认应采用“遥信+遥测”判据。遥信量应采用分/合双位置辅助接点(分相断路器遥信量采用分相位置辅助接点)，遥测量可采用断路器三相电流、母线三相电压和间隔三相电压，不具备三相电压时应增加带电显示装置信号作为辅助判据，断路器位置双确认流程如图 5 所示。

(1) 当断路器位置遥信由合位变分位，且满足“三相电流由有流变无流、母线/间隔三相电压由有压变无压、母线/间隔带电显示装置信号由有压变无压”任一条件时，则确认断路器已分开；

(2) 当断路器位置遥信由分位变合位，且满足“三相电流由无流变有流、母线/间隔三相电压由无压变有压、母线/间隔带电显示装置信号由无压变有压”任一条件时，则确认断路器已合上。

因而断路器的双确认信号可以通过 IED 镜像仿真触发相应遥信、遥测信号，进行断路器双确认信号测试。

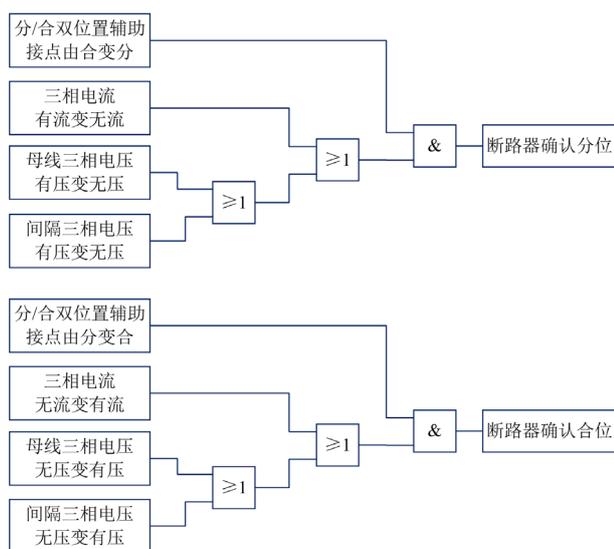


图 5 断路器双确认流程

Fig. 5 Circuit breaker double confirmation process

2) 隔离开关双确认

隔离开关位置确认采用“位置遥信+非同源遥信”判据。遥信量采用分/合双位置辅助接点(分相隔离开关遥信量采用分相位置辅助接点),非同源遥信可采用“阻抗监视”、“压力传感”、“力矩监测”等判别技术,提供第二位置判据。第二位置判据信号可接入公用测控遥信。通过 IED 镜像仿真触发相应遥信信号,进行隔离开关双确认信号第一、第二判据信号匹配性测试。

3.4 监控主机顺控票逻辑测试

运行一键顺控程序生成顺控操作任务,检查操作任务、操作项目、操作条件、目标状态、一键顺控分图信息是否完整,命名是否规范。测试顺控操作过程中的操作步骤是否正确,检查设备模拟预演和顺控执行过程中操作前条件、目标状态是否正确。

以变电站监控系统与变电站实际设备信号联调完成为基准,通过镜像调试平台与变电站监控系统信号一一对应,实现遥信、遥测信号的实时上送以及设备的闭环控制,以满足现场运行监控系统技术形态一致性要求,保证一键顺控操作票的测试验证结果与站内现场实际操作结果一致。

1) 监控主机与镜像调试平台通过 IEC61850 协议连接,监控主机执行一键顺控操作,并下发开关刀闸分合、软压板投退等遥控指令。

2) 镜像调试平台接收监控主机下发的遥控指令,并进行逻辑判断,改变潮流拓扑结构,上送遥测数据至监控主机。

3) 镜像调试平台根据一键顺控票操作指令自

动返回对应遥信、软压板等状态变化数据,并上送至监控主机。

4) 监控主机解析执行后数据,并进行一键顺控操作逻辑验证。

5) 监控主机按步骤进行下一次遥控操作,依次往复,直至顺控执行完毕。

6) 镜像调试平台可根据监控主机生成的一键顺控操作票文件进行数据校核。

7) 镜像调试平台根据全部测试情况出具完整测试报告。

4 工程应用

镜像调试平台先后成功应用于多个 1000 kV 及 500 kV 变电站一键顺控改造工程中。其中,在 1000 kV 安吉站监控系统一键顺控改造工程中,共测试一键顺控操作票 190 张,包括安吉站 1000 kV、500 kV、110 kV 电压等级下所有典型操作票,发现操作步骤错误、双确认信号配置错误等 6 项问题。

以 500 kV 母线间隔顺控票验证为例,由“#1 母运行”转“#2 母运行”共包含 30 项操作,包括检查项、提示项和操作项三部分。镜像调试平台对一键顺控设备态、执行条件、确认条件、操作项目、操作步骤等配置进行全面测试,单张顺控操作票全流程验证耗时约为 5 min。与变电站现场一张操作票验证需要 2~3 h 相比,工作效率显著提升。同时解决了变电站现场因停电范围不足而无法进行顺控票验证的难题。

5 结论

针对一键顺控系统调试过于依赖现场实际设备和环境、调试周期长的弊端,通过搭建智能变电站一键顺控系统镜像调试平台,研究 IED 镜像仿真、防误逻辑规则自动生成、操作票自动生成和一次设备潮流计算分析技术,实现一键顺控系统操作票组态配置、一键顺控票全流程、网络信息交互的自动快速验证。

基于专家知识库的一键顺控系统镜像调试平台的成功应用,大幅提高了智能变电站现场一键顺控系统调试效率、质量、安全性,降低现场作业风险,通过高效的测试系统实现变电站一键顺控系统全逻辑测试,显著提升效率,并最大化减少变电站现场调试工作量,将现场作业工序迁移至离线镜像调试平台中完成,实现监控系统镜像调试成果在变电站的“即插即用”。解决了多年来变电站一键顺控

系统现场调试通用的问题,为监控自动化调试验收工作提供崭新的思路,具有较高的实际应用价值。

参考文献

- [1] AHSAN F, DANA N H, SARKER S K, et al. Data-driven next-generation smart grid towards sustainable energy evolution: techniques and technology review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 696-737.
- [2] 宋璇坤, 韩柳, 鞠黄培, 等. 中国智能电网技术发展实践综述[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A review on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.
- [3] 房方, 梁栋炀, 刘亚娟, 等. 海上风电智能控制与运维关键技术[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 175-185.
FANG Fang, LIANG Dongyang, LIU Yajuan, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 175-185.
- [4] 国家能源局. 智能变电站系统配置描述(SCD)文件技术规范: DL/T 1873—2018[S]. 2018.
National Energy Administration. Technical specification of system configuration description files for smart substation: DL/T 1873—2018[S]. 2018.
- [5] 国家电网公司. 智能变电站继电保护工程文件技术规范: Q/GDW11471—2015[S]. 2016.
State Grid Corporation of China. The standard on configuration files of relay protection in smart substation: Q/GDW11471—2015[S]. 2016.
- [6] 国家电网公司. 智能变电站自动化系统现场调试导则: Q/GDW 431—2023[S]. 2023.
State Grid Corporation of China. Guideline for the site commissioning of automation systems in smart substation: Q/GDW 431—2023[S]. 2023.
- [7] 董磊超, 刘昊昱, 浮明军, 等. 智能变电站间隔层设备自动测试系统研制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 147-151.
DONG Leichao, LI Haoyu, FU Mingjun, et al. Development of automatic test system for bay level equipment of smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 147-151.
- [8] 杜兴伟, 祝琳, 余俊杰, 等. 智能变电站一体化管控平台研究与应用[J]. 供用电, 2018, 35(6): 66-71.
DU Xingwei, ZHU Lin, YU Junjie, et al. Research and application of integrated management and control platform for smart substation[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 66-71.
- [9] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛, 等. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.
CHEN Feijian, LÜ Yuanshuang, FAN Guosheng, et al. Automatic test system of relay protection device for smart substation based on information fusion technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- [10] 李鹏, 卫星, 郭利军, 等. 智能变电站继电保护运维防误技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 123-129.
LI Peng, WEI Xing, GUO Lijun, et al. Study and application of relay protection maintenance anti-misoperation technology in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 123-129.
- [11] 郑维明, 张沛超, 王锡生. 数字化变电站中闭锁逻辑自动生成专家系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 125-129.
ZHENG Weiming, ZHANG Peichao, WANG Xisheng. An expert system of automatic interlocking schemes generation for digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 125-129.
- [12] 王健, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 117-122.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [13] 国家电网公司. 变电站二次系统通用技术规范 第9部分: 自动对点技术规范[S]. 2021.
State Grid Corporation of China. The technical specifications of secondary equipment system for autonomous and controllable new generation substation commissioning acceptance series specification 9: automatic signal check[S]. 2021.
- [14] 茹东武, 李永照, 陈喜凤, 等. 一种智能变电站智能告警专家系统推理机制的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(5): 44-49.
RU Dongwu, LI Yongzhao, CHEN Xifeng, et al. Research on a smart substation intelligent alarm expert system inference mechanism[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(5): 44-49.
- [15] 刘清泉, 郝晓光, 何磊. 智能变电站二次系统信息标准化平台关键环节与技术[J]. 中国电力, 2017, 50(4): 176-180.
LIU Qingquan, HAO Xiaoguang, HE Lei. Key link and technology of secondary information standardization platform of smart[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 176-180.

- [16] 国家能源局. 变电站监控系统防止电气误操作技术规范: DL/T 1404—2015[S]. 2015.
National Energy Administration. Technical specification for preventing electric mal-operation in substation monitoring and control system: DL/T 1404—2015[S]. 2015.
- [17] 叶远波, 李端超, 谢民, 等. 基于知识图谱的二次设备测试自动配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 162-171.
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. Automatic configuration method of secondary equipment test based on a knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 162-171.
- [18] 陈旭, 张弛, 刘千宽, 等. 基于深度语义学习的智能录波器自配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 179-187.
CHEN Xu, ZHANG Chi, LIU Qiankuan, et al. Automatic configuration method of intelligent recorder based on deep semantic learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 179-187.
- [19] 国家电网公司. 变电站数据通信网关机技术规范: Q_GDW 11627—2016[S]. 2016.
State Grid Corporation of China. The technical specifications for data communication gateway of substation: Q_GDW 11627—2016[S]. 2016.
- [20] 申泉, 赵谦. 智能变电站全生命周期内 IED 即插即用技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 162-167, 172.
SHEN Quan, ZHAO Qian. PNP technology of IEDs for whole life cycle of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 162-167, 172.
- [21] 谢镜池, 付旌铭. 智能变电站模型自动化检测手段设计与实现[J]. 电工技术, 2020(5): 138-140.
XIE Jingchi, FU Jingming. Design and implementation of automated detection methods for intelligent substation models[J]. Electric Engineering, 2020(5): 138-140.
- [22] 刘海涛, 牛健, 陈涛, 等. 用于变电站就地化保护闭环测试和设备管理的智能化平台[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 127-133.
LIU Haitao, NIU Jian, CHEN Tao, et al. Design and implementation of automatic smart substation model detection[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 127-133.
- [23] 彭桂喜, 袁思遥, 孙昊, 等. 继电保护装置检验测试智能体的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 174-179.
PENG Guixi, YUAN Siyao, SUN Hao, et al. Study and implementation of a test agent for relay protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 174-179.
- [24] 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]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 83-89.
ZHONG Wen, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Internal comparison of intelligent substation SCD files based on clustering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 83-89.
- [25] 叶远波, 李端超, 谢民, 等. 面向新型电力系统的智能变电站虚回路自动校验技术研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 91-99.
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. Research on automatic calibration technology of virtual circuit in smart substation for novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 91-99.
- [26] 王超, 公维帅, 施浩波. 基于改进模拟退火算法的电网脆弱线路短路潮流计算方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 24-30.
WANG Chao, GONG Weishuai, SHI Haobo. The short-circuit power flow calculation method of power grid based on improved simulated annealing algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 24-30.

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-10-17

作者简介:

盛海华(1966—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事变电站继电保护与自动化运行管理;

李海(1990—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 从事智能变电站二次设备测试相关工作。E-mail: lihai@kemov.com

(编辑 许威)