

变电站一键顺控功能仿真验证平台构建及应用

丁禹¹, 韩忠晖², 吴晋波¹, 洪权¹, 刘志豪¹, 肖遥遥¹

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410208;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004)

摘要:针对变电站一键顺控存在验收难度大、改造停电难等问题,提出基于数字孪生技术的一键顺控功能仿真验证方法,在仿真环境构建变电站一键顺控功能仿真验证平台。基于仿真验证平台,模拟站内一、二次设备状态变化,在设备不停电情况下,开展一键顺控功能验证测试,对变电站一键顺控系统配置文件进行全面校验。通过工程实际应用,所提方法与传统人工验收方式相比,验证逻辑更细、更全,基于仿真验证方法,可模拟顺控各种校验条件,提升顺控配置文件逻辑校验的全面性;验收效率更高,验证测试工作可在新建、改造工程开始前开展,提前发现顺控配置文件中存在的问题,确保现场工作顺利实施,从而缩短工程建设周期,提升变电站一键顺控验收质效。

关键词:数字孪生; 一键顺控; 仿真验证; 虚实交互; 自动测试

中图分类号: TM 63 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2024)05-0106-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240516

Construction and Application of Simulation Verification Platform for One-key Sequence Control Function of Substation

DING Yu¹, HAN Zhonghui², WU Jinbo¹, HONG Quan¹, LIU Zhihao¹, XIAO Yaoyao¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410208, Hunan, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problems of one-key sequence control in substation, such as difficult acceptance and difficult transformation of power outage, a simulation verification method of one-key sequence control function based on digital twin technology is proposed, and a simulation verification platform for one-key sequence control function in substation is constructed in simulation environment. Based on the simulation verification platform, the state changes of primary and secondary equipment in substation are simulated, and the one-key sequence control function verification test is carried out without power outage of the equipment, and the configuration file of one-key sequence control system in substation is comprehensively verified. Through practical engineering applications, the proposed method is compared with the traditional manual acceptance method. Firstly, the verification logic is more detailed and comprehensive. Based on the simulation verification method, it can simulate various verification conditions of sequence control and improve the comprehensiveness of logic verification of sequence control configuration files. Secondly, the acceptance efficiency is higher. The verification testing work can be carried out before the start of new construction and renovation projects. Problems in the sequence control configuration files can be discovered in advance to ensure the smooth implementation of site work, thereby shortening the construction cycle of the project and improving the acceptance quality and efficiency of one-key sequence control in substation.

Key words: digital twin; one-key sequence control; simulation verification; virtual-real interaction; automatic testing

0 引言

一键顺控是一种变电站倒闸操作新模式,具备防误智能校核、操作步骤自动顺序执行等功能^[1],

预置顺控票是存储在顺控主机中用于顺控操作的操作序列^[2]。在监控系统或集控系统上调用对应的预置顺控票,即可实现主变压器、母线、断路器、隔离开关、具备电动手车的开关柜等一次设备操作一键自动执行,设备状态自动转换。一键顺控无需人员

直接操作设备,提高了倒闸操作安全性和效率,为变电站倒闸操作提供了便利^[3]。

一键顺控的应用离不开对顺控逻辑的详细测试和验证,但受限于现场设备运行条件和操作本身要求的判据条件,使一键顺控测试工作不能高效率、充分完整地进行全逻辑测试和验证^[4]。大多数变电站的电压等级高、规模大,且一键顺控操作票数量多,导致测试效率较低、测试成本较高。一键顺控操作票的测试过程中,需要变电站长时间停电且一、二次设备需要反复操作,增加了电网的不稳定性并降低了设备的使用寿命,也会增加测试成本^[5]。如何高效、便利、全面地开展顺控逻辑验证,减轻现场工作压力,是本领域需要解决的技术难题。

在一键顺控改造过程中,因一次设备停电难,多采用分间隔轮流停电的方式开展一键顺控改造、调试、验收,进而完成预置顺控票的测试^[6]。但存在以下缺点:1)已投运变电站一般不具备全部停电条件,为验证全站的顺控操作票,必须制定复杂的轮番停电计划,只有具备停电条件的间隔的顺控操作票才有可能被验证;2)需要较长时间才能校验完全站的顺控操作票,校核周期长,工作效率低,实际停电时间短,工作难以安排导致无法顺利开展顺控功能调试和验收的情况时有发生,严重影响电网系统稳定性和设备运行操作效率和安全性^[2]。因此,能否缩短变电站一键顺控改造现场停电时间,提前完成逻辑、功能、通信调试,成为目前亟待解决的技术问题之一。

目前变电站一键顺控仍然完全依赖现场试验校验,一旦顺控操作票的遥控点配置错误,检查修改再重新试验耗费的时间精力较多,将导致现场工作更加紧张;现场试验受制约的条件较多,特别是已投运变电站一键顺控改造和改、扩建变电站一键顺控功能变动,现场停电困难,试验开展难度大。分间隔轮流停电的方式开展一键顺控验收受制于电网的停电计划,同时增加设备倒闸操作安全风险。与一键顺控改造进度相比,顺控验收较为滞后,严重阻碍了一键顺控操作替代常规倒闸操作实用化应用。下面基于数字孪生技术,提出了一种不依赖于停电计划的变电站一键顺控功能验证方法,即构建变电站一键顺控功能仿真验证平台,对顺控配置文件进行全面校验,提前发现其防误逻辑、操作条件、闭锁条件、操作项目、单步执行前后条件、设备态存在的问题,解

决一键顺控验收难度大、逻辑验证不全面、改造停电难等问题。这是在传统一键顺控验收方式上的一种新技术创新。

1 总体架构

变电站一键顺控功能仿真验证平台模拟站内一、二次设备状态变化,为变电站一键顺控功能仿真验证提供仿真测试环境,校核预置顺控票、顺控点位、双确认结果、防误逻辑等关键环节。仿真验证平台基于SCD文件,获取全站间隔层设备模型,保证遥信和遥测数据的对应和关联。仿真验证平台由仿真测试系统和实物设备组成,其中,仿真测试系统包括数字孪生变电站和位置双确认系统,实物设备包括顺控主机和防误主机。总体架构如图1所示。

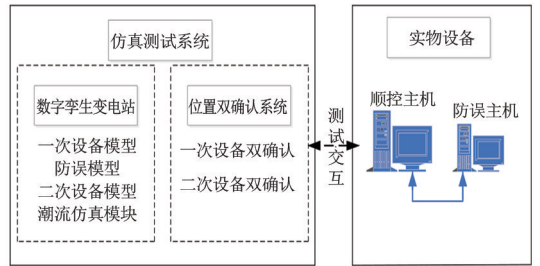


图1 变电站一键顺控功能仿真验证平台

仿真测试系统与顺控主机通过标准协议连接,实现对预置顺控票的逐项、逐条、正向、反向验证,在一次设备不停电的情况下,仿真验证一键顺控功能的正确性。数字孪生变电站包括一次设备模型、二次设备模型、防误模型和电力系统潮流仿真模块。数字孪生变电站和物理实体一样,具有相同的规律和运行机理,是物理实体精细化的数字描述。一次设备模型具备一次设备运行特性和逻辑关系,二次设备模型具备二次设备运行特性以及与一次设备的关联关系,基于智能防误技术和防误推理方法生成防误模型的逻辑规则。

潮流仿真模块依据一次设备网络结构进行潮流计算,提供潮流数据,当收到遥控指令后,能够联动控制改变对应断路器、隔离开关的位置状态,同时网络结构会随之改变,潮流仿真模块会自动重新计算潮流,并更新数据。一次设备在收到分合闸指令后,一次设备的遥测、遥信变化情况将反馈至一键顺控系统。

在一键顺控仿真测试过程中,仿真测试系统模拟一、二次设备状态变化,位置双确认系统产生一、二次设备相关的遥信和遥测数据,并反馈至实物设

备顺控主机,由顺控主机完成设备操作到位的判断。断路器双确认为“位置遥信”和“遥测”^[7-8],隔离开关双确认为辅助开关接点位置以及选择磁感应传感器、微动开关、视频系统^[9]其中之一判断隔离开关位置^[10-11]。对于具备远方操作的保护装置软压板,采用软压板状态及对应的“XX 功能投入/退出”状态作为操作到位的判据^[12-13]。

2 一键顺控功能仿真验证关键技术

数字孪生变电站基于数字模型的仿真实验可真实地反映物理实体的特征和行为,并具备虚实交互能力。高质量的数字孪生变电站是开展一键顺控功能测试验证的基础,仿真验证过程应用数字化建模与仿真技术、协同交互与可视化技术、潮流仿真计算技术、自动测试技术、防误校核技术、一键顺控智能决策技术,其中数字孪生技术是实现实物设备与仿真验证环境之间数据交互关键技术。

2.1 数字化建模与仿真技术

数字化建模是指利用数字化技术对变电站一次设备、二次设备进行数字化建模,作为数字孪生变电站的基础^[14]。数字化模型可以直观地获取设备状态、位置、故障等信息,为分析顺控失败提供信息支撑。同时,能够对一次设备、二次设备等物理实体实现完全复制和高保真模拟,加深人员对物理实体属性和特征的理解,通过语义建模实现模型自动关联^[15]。

仿真是验证数字孪生变电站的重要手段,数字化建模实现物理实体的数字化和模型化,在建模准确、数据完备的前提下,利用具有确定性规律、机制完备的模型,通过软件对物理实体进行仿真,能够反映物理实体在一定时间段内的状态,完成模型的准确性和有效性验证^[16]。

2.2 协同交互与可视化技术

数字孪生作为一种更为复杂的仿真方法,与传统电力系统仿真相比,与真实系统的数据交互更为频繁。协同交互是指利用交互技术,实现仿真测试系统与实物设备、仿真测试系统内部之间的交互与协同。可视化技术运用可视化展示组件,将变电站一键顺控验证过程可视化展现在人员面前,通过对数字孪生变电站的操作与控制,实现对仿真模型的操作与控制,联动测试画面对仿真测试过程进行展示,扩展测试人员的视觉体验。

2.3 稳态实时潮流计算

变电站一键顺控功能在测试过程中,数字孪生变电站收到一键顺控系统的控制指令,能够联动控制改变对应断路器、隔离开关的位置状态,同时网络结构会随之改变,潮流计算模块自适应调整网络结构,重新计算潮流,为顺控主机反馈遥测数据,使得一键顺控功能仿真测试更符合现场实际情况。

2.4 自动测试技术

目前,一键顺控功能验收依赖于人工现场测试,存在测试效率不高、闭锁条件校验不全等问题,还未有技术手段排查预置顺控票隐含的功能隐患。自动测试技术是指利用计算机、测试设备对一键顺控系统中的预置顺控票进行自动化测试的技术,依托系统或仪器设备实现功能。

自动测试技术实现初始状态与目标状态之间的识别与转换,保证一键顺控功能有效的测试闭环,测试流程标准化,测试过程可视化、透明化,测试判据标准化、精细化。这种自动测试技术的优点是可以对大量预置顺控票分场景进行批量测试,从而提高测试效率。

2.5 防误校核技术

防误校核主要是针对断路器、隔离开关和软压板的远方操作^[17],基于防误闭锁规则分析设备运行状态,实现对操作对象的防误判断^[18]。二次设备防误校核^[19]根据防误规则对操作内容进行防误判断,反馈校核结果,从而完成二次设备操作防误判断^[20]。一键顺控功能验证防误校核技术是一种顺控操作的自适应防误验证技术,基于联合防误逻辑,实现一键顺控功能仿真验证的防误判断,提高测试结果的可靠性。在仿真测试前对操作步骤关联设备状态及防误进行校验,反馈校验结果,当状态不一致或者防误校核不满足时,停止测试并给出提示。在每一步顺控操作执行完成后对操作步骤关联设备的目标状态进行校验,反馈校验结果,当状态不一致时,停止测试并给出提示^[21]。

2.6 一键顺控智能决策技术

一键顺控智能决策技术实现顺控仿真测试过程可视化监控、异常分析定位等功能。顺控仿真测试过程可视化监控是指测试全程可视化,实现测试界面设备状态、操作步骤实时展示,通过联动测试画面对操作过程进行展示。异常分析定位支持对顺控测试过程中各类异常情况进行智能判断和快速定位,

当发生测试异常,应立即检测顺控测试各个环节,定位故障异常所在位置,辅助测试人员决策。

3 一键顺控功能验证测试

一键顺控功能验证的目的在于测试预置顺控票的正确性、防误逻辑的完善性、一键顺控操作的连续性、信号闭锁逻辑的全面性。变电站一键顺控功能仿真验证平台不依赖于变电站的停电计划,在测试过程中能够保证设备、人身、网络的安全。

常规变电站通信规约为综自厂家私有协议或者 IEC 61850 与私有协议混合通信,如何兼容综自厂家私有协议实现常规变电站仿真建模以及一键顺控功能验证测试是工作中遇到的技术难点。因此,创新地提出了虚拟 SCD 文件功能,将综自厂家私有配置文件自动构建虚拟 SCD 文件,从而实现常规变电站一键顺控功能建模仿真及验证测试。

3.1 变电站一键顺控功能仿真验证测试

变电站一键顺控功能仿真验证测试由仿真测试系统、网关机、顺控主机、防误主机离线协同完成。顺控主机与仿真测试系统通过标准协议连接,测试人员使用仿真测试系统调用预置顺控操作票,经防误双校核后,由顺控主机发起顺控执行操作,发送顺控指令至仿真测试系统;仿真测试系统接收顺控指令,进行逻辑判断,模拟一、二次设备状态变化,反馈位置信息;状态变位后,仿真测试系统改变潮流结构,自动计算潮流,反馈遥测数据;顺控主机接收遥信和遥测数据,进行顺控逻辑验证,判断此次顺控操作设备位置是否到位;顺控主机发起下一个顺控执行操作,直至预置顺控票中所有顺控操作验证完毕,从而完成一张预置顺控票的验证。一键顺控功能仿真验证测试过程中,仿真测试系统可以发出事故总、SF₆ 气压低、控制回路断线等闭锁信号,校验顺控系统是否能够终止顺控操作。一键顺控功能仿真验证测试原理和流程如图 2、图 3 所示。

3.2 远方一键顺控功能仿真验证测试

远方一键顺控功能仿真验证测试由集控主站、网关机、顺控主机、防误主机、仿真测试系统形成封闭测试环境。集控主站发起顺控操作调用、预演和执行指令,经过网关机、顺控主机传输指令到仿真测试系统,模拟执行顺控操作,并反馈隔离开关位置信号以及一、二次设备双确认信号、遥测数据至集控主

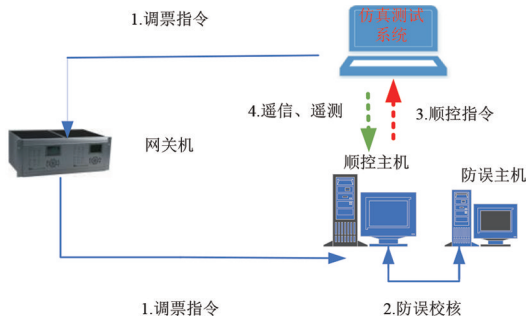


图 2 一键顺控功能仿真验证测试原理

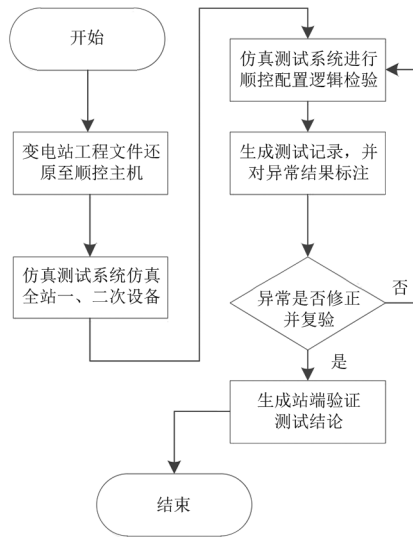


图 3 一键顺控功能仿真验证测试流程

站,直至所有指令执行完毕,从而完成远方一键顺控功能仿真验证测试。远方一键顺控功能仿真验证测试原理和流程如图 4、图 5 所示。

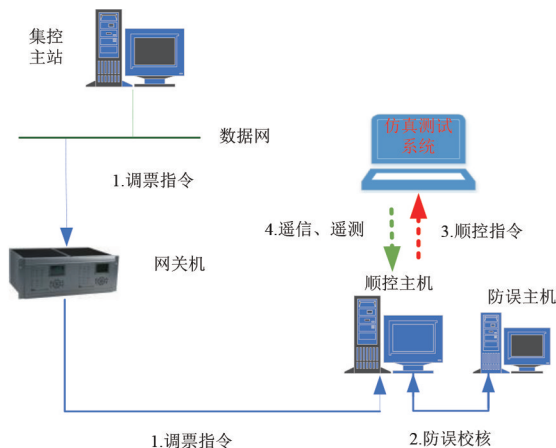


图 4 远方一键顺控功能仿真验证测试原理

4 结论

上面提出了基于数字孪生技术的一键顺控功能仿真验证方法,基于数字化建模与仿真技术、协同交互与可视化技术、潮流仿真计算技术、自动测试技术、

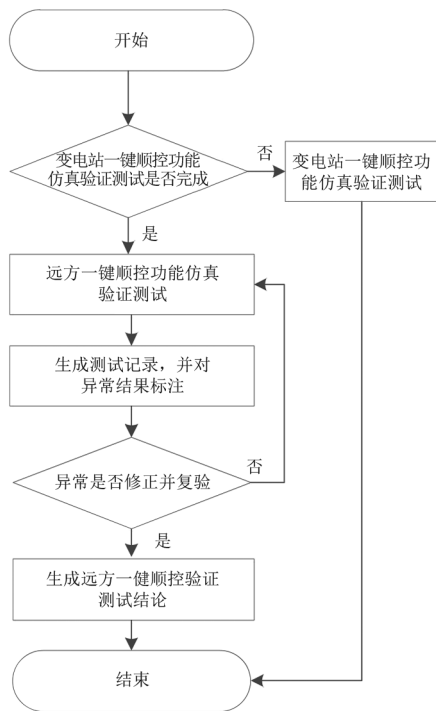


图 5 远方一键顺控功能仿真验证测试流程

防误校核技术、一键顺控智能决策技术等关键技术,在仿真环境构建变电站一键顺控功能仿真验证平台。解决顺控验收难度大、顺控改造停电难等问题,在不依赖于一次设备停电的情况下,基于仿真环境对顺控配置文件进行全面校验,形成了“仿真验证+现场传动”的一键顺控验收新模式,为新、改、扩建变电站高效完成一键顺控功能验收提供新的技术思路。

参考文献

- [1] 李广渊, 顾颖, 郭小江. 虚实结合的 500 kV 智能变电站一键顺控联合验收平台研究与应用[J]. 农村电气化, 2022(2):45-49.
- [2] 滕井玉, 顾全, 王言国, 等. 一种顺控操作票不停电校核方法及系统: 112186739B[P]. 2022-05-17.
- [3] 张炜, 李劲松, 刘筱萍, 等. 一种智能变电站一键顺控系统的检测方法及其系统: 110989547A[P]. 2020-04-10.
- [4] 张骥, 张红梅, 郑紫尧, 等. 一键顺控测试方法、装置及终端设备: 202111391559.8[P]. 2022-02-22.
- [5] 蒲鑫, 郭飞, 李世群, 等. 一种变电站的一键顺控操作票测试方法及装置: 113485214A[P]. 2021-10-08.
- [6] 徐天天, 余栋, 张锦龙, 等. 基于实验室的变电站一键顺控调试验收平台及装置: 115065163A[P]. 2022-09-16.
- [7] 范堃, 房萍, 王申强. 一键顺控智能化拟票技术研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2019,35(10):43-49.
- [8] XIONG Z B, GAN X, GAO Y, et al. Study on application

of one key sequence control in 750 kV substation[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, April 8 - 11, 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021:269-274.

- [9] LIU H Y, CAI F D, LV C F, et al. A fish eye recognition algorithm for switch on/off key in sequence control substation[C]//2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application, December 18 - 20, 2020, Guangzhou, China. IEEE, 2020:143-146.
- [10] 陈威, 王昊, 夏慧, 等. 基于调控主站一体化平台的“一键”顺控操作实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(20):171-177.
- [11] 毛文奇, 王舶仲, 蒋毅舟, 等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2019,47(8):112-119.
- [12] 钱海, 邱金辉, 贾松江, 等. 基于 D5000 平台的继电保护远方操作双确认技术研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2017,33(7):19-24.
- [13] 尹超勇, 李刚, 李辉, 等. 基于 5G 通信方式的变电站远方备自投原理及实现方法[J]. 湖南电力, 2023, 43(1):58-62.
- [14] 刘海峰, 池威威, 贾志辉, 等. 变电站数字孪生系统的设计与应用[J]. 河北电力技术, 2021,40(3):8-14.
- [15] 宋福海, 翟博龙, 黄翔宇, 等. 面向智能变电站模型应用的二次设备建模优化[J]. 电力自动化设备, 2022,42(11):218-224.
- [16] 王巍, 刘永生, 廖军, 等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. 邮电设计技术, 2021(8):10-14.
- [17] 李琳, 阳小丹, 黄际元, 等. 调度远方顺控关键问题探讨[J]. 湖南电力, 2018,38(6):70-73.
- [18] WANG Y, LI H X, E Shiping, et al. Research on intelligent anti-misoperation technology applied to substation one-button sequential control[C]//2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, March 26 - 28, 2021, Changsha, China. IEEE, 2021:258-261.
- [19] 朱磊, 曾鹏. 智能变电站二次防误关键点分析及措施[J]. 湖南电力, 2018,38(4):18-20.
- [20] 王永明. 智能电网调度控制系统的二次设备防误技术[J]. 电力系统自动化, 2020,44(14):94-100.
- [21] 蔡新雷, 齐颖. 基于人工智能的电网调度操作智能防误系统建设及实践[J]. 电力大数据, 2020,23(4):16-23.

作者简介:

丁 禹(1996),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统自动化。
(收稿日期:2023-11-21)