

9-23-2022

Research on mirror image control technology of project configuration in the intelligent substation

Xiaobo Li

China Southern Power Grid Digital Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510670 , China

Wei Xi

China Southern Power Grid Digital Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510670 , China

Ke Zhou

Electric Power Science Research Institute,Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023 , China

Xiaoming Wang

Electric Power Science Research Institute,Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

Li, Xiaobo; Xi, Wei; Zhou, Ke; and Wang, Xiaoming (2022) "Research on mirror image control technology of project configuration in the intelligent substation," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 37: Iss. 4, Article 24.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.024

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss4/24>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

智能变电站工程配置镜像管控技术研究

李肖博¹, 习 伟¹, 周 柯², 王晓明²

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510670; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘 要:针对智能变电站配置文件在多端应用中版本不统一、配置文件管控中归档的配置文件与变电站现场装置内运行的配置一致性无法保证、配置文件现场调试工作量大影响电网运行等问题,提出一种智能变电站工程配置的镜像管控技术。首先,设计适用于多端应用的智能变电站工程配置镜像管控系统,并建立智能变电站工程配置文件全过程管理流程;然后,基于循环神经网络算法与马尔科夫聚类算法进行智能变电站工程配置校验比对,基于搭建的系统进行智能变电站工程配置文件镜像调试;最后,以某变电站改扩建工程为例,采用所提方法时可减少改扩建现场传动,缩小停电周期和范围。

关 键 词:智能变电站;工程配置;文件管理;在线校验;镜像验证

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.024 中图分类号:TM932 文章编号:1673-9140(2022)04-0209-08

Research on mirror image control technology of project configuration in the intelligent substation

LI Xiaobo¹, XI Wei¹, ZHOU Ke², WANG Xiaoming²

(1. China Southern Power Grid Digital Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510670, China;

2. Electric Power Science Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: The project configuration file in the intelligent substation has multi versions in multi-terminal applications and it brings problems that the archive configuration file might be different with that running set in the on-site intelligent substation. It has negative impacts on the power system operation since a lot of time is necessary for the revision of file setting. On the background, a mirror image management and control technology for smart substation engineering configuration is proposed in this paper. Firstly, a mirror management and control system for smart substation project configuration is designed and it is suitable for multi-terminal applications. And then, a whole process management process of smart substation engineering configuration files is established. Secondly, the intelligent substation engineering configuration verification and comparison are carried out utilizing the cyclic neural network algorithm and the Markov clustering algorithm. Thirdly, the image debugging is run for the intelligent substation engineering configuration file. Finally, a substation reconstruction and expansion project is included to verify that the proposed method can reduce the on-site transmission of reconstruction and expansion, and reduce the period and scope of power outages.

Key words: intelligent substation; project configuration; file management; online check; mirror verification

收稿日期:2021-10-08;修回日期:2022-04-25

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GXKJXM20190610);国家重点研发计划(2020YFB0906000)

通信作者:李肖博(1985-),男,硕士,高级工程师,主要从事微机继电保护、变电站综合自动化以及电力系统继电保护方面的研究;

E-mail:jiangzhuoyan@kemov.com

智能变电站工程配置文件描述了智能变电站通信信息模型,是变电站内设备进行信息交换的基础^[1-2]。智能变电站工程配置文件为整个智能变电站的运行提供了全站统一的数据源,配置文件的正确性直接影响变电站稳定运行。工程配置文件从变电站建设开始,贯穿了调试、竣工、扩建、改建整个过程,在此过程中,其由于系统的变化而处于动态变化之中。对变电站工程配置文件进行有效管控,能有效解决智能变电站中配置文件在多端应用中版本不统一、来源不一致导致的某些安全隐患,进而提高智能变电站的运维安全性和效率^[3-5]。

为此,国内外研究人员开展了智能变电站配置文件管控技术研究。文献[6]通过智能电子设备(intelligent electronic device,IED)与智能变电站双层CRC校核智能变电站配置文件的一致性;文献[7]分析目前变电站配置描述文件(substation configuration description,SCD)管控存在的风险,基于二维码校验和虚回路可视化技术提出SCD管控策略;文献[8]通过对IED按照间隔和类型进行聚类比对,实现IED配置的差异及正确性分析;文献[9]提出一种改进的基于位置的文本文件比对算法,实现SCD的快速管控;文献[10]提出利用MMS、SV、GOOSE抓包通信技术在线校验SCD与保护装置中配置参数的一致性;并采用IED粒度进行新旧SCD比对,提高SCD管控效率;文献[11]提出一种

基于中间模型文件的虚回路自动校验技术;文献[12]设计了配置文件可视化工具,实现了SCD配置信息的解析及可视化展示。

目前,智能变电站配置文件管控仍存在变电站投运后配置文件个人保存、集成商管理,配置文件规范性、正确性及唯一性无法保证,归档的配置文件与变电站现场装置内运行的配置文件一致性无法保证、智能变电站改扩建现场配置验证工作量大以及影响电网运行等问题。本文提出一种智能变电站工程配置的镜像管控方法,介绍智能变电站工程配置镜像管控的关键技术,设计开发智能变电站工程配置镜像管控系统,并介绍系统的实际应用效果。

1 总体架构设计

现阶段对智能变电站工程配置文件管控主要包括标准化校验和版本管理。本文提出一种智能变电站工程配置镜像管控方法,并结合在线运行的厂站端智能录波器及远程智能运维主站,搭建智能变电站工程配置镜像管控系统,打通站端二次设备监测系统、运维主站、配置文件管控系统及镜像调试系统的联系,实现变电站工程配置在线校核管控与离线调试管理的无缝衔接。系统架构如图1所示,系统包含部署在调度数据网I区的智能录波器、II区的智能运维主站、III区的配置文件管控系统以及IV区的镜像调试系统。

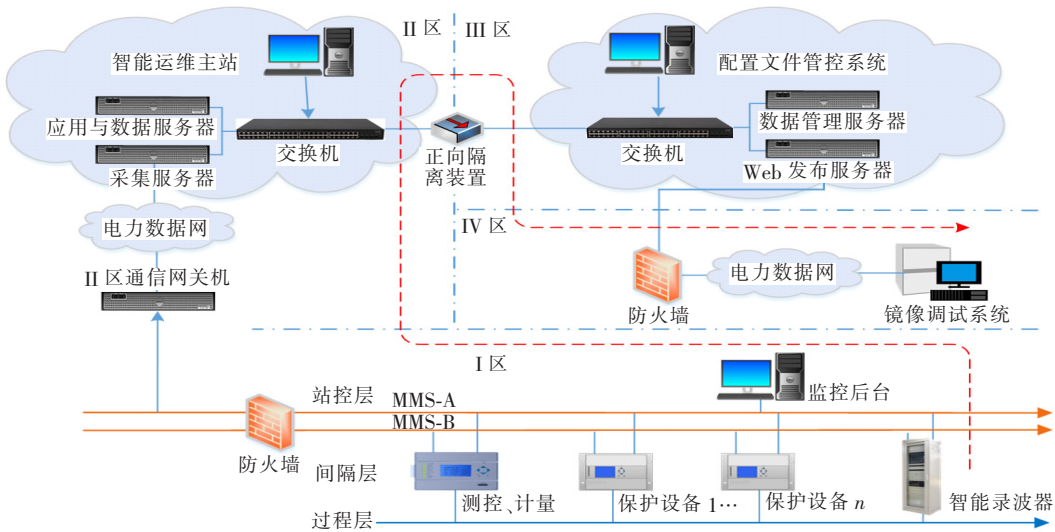


图1 智能变电站工程配置镜像管控系统架构

Figure 1 Architecture of the intelligent substation engineering configuration mirroring management and control system

智能录波器部署在各个变电站内,接入变电站站控层和过程层网络,读取变电站现场装置的报文和模型配置信息;通过报文解析、模型比对、CRC 码校验验证现场装置运行的配置信息与站内 SCD 文件的一致性,并将校验结果及变电站配置文件通过 MMS 通信上送到智能运维主站;智能运维主站部署在调度端,对辖区内所有变电站的配置文件进行校验管控,接收区内变电站配置变化事件,并将信息上送配置文件管控系统;站端智能录波器与调度端智能运维主站实现变电站工程配置在线校核管控,并通过配置文件管控系统将现场配置镜像至镜像调试系统。

配置文件管控对实现变电站从基建到运维检修所有的文件及资料进行统一管理。镜像调试系统部署在检修工区,从配置文件管控系统迁出与实际运行变电站一致的配置文件,基于与现场一致的调试环境,对智能变电站改扩建进行虚连接 IED 子 CRC 码一致性校验、镜像模拟传动等测试,完成智能变电站配置排雷、改扩建工程配置及二次回路实时镜像验证,并将通过验证的智能变电站改扩建配置文件上传配置文件管控系统。配置文件管控系统与镜像调试系统实现变电站配置离线调试管理。整个系统实现变电站配置离线、在线无缝管理验证。

2 智能变电站工程配置文件全过程管理

为解决智能变电站中配置文件在多端应用中版本不统一、来源不一致导致的一些安全隐患。建立配置文件全过程管理流程,对从基建到运维检修所有的文件及资料进行全过程统一管理。SCD 全过程管理流程如图 2 所示,根据现场需求提出 SCD 变更申请,执行审批流程后迁出 SCD,采用签出锁定、签入解锁的机制确保文件修改的唯一性。文件迁出后下载至移动工作站,现场修改 SCD 及配置,修改完成导入镜像调试系统进行镜像模拟传动、心跳报文比对、信号测试验证等必要的镜像调试。通过调试的配置描述文件上传至配置文件管控系统并执行迁入审批。在文件签入时,配置文件管控系统进行文件合法性及规则校验,给迁入审批工作提供参考,审批通过执行迁入变更结束。

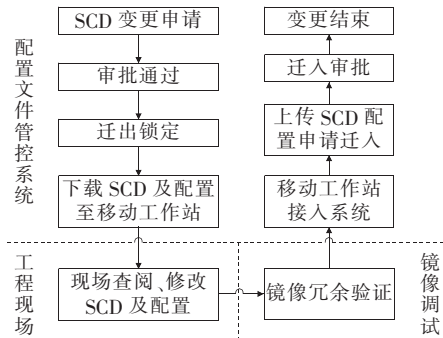


图 2 SCD 管控流程

Figure 2 SCD control process

以变电站二次设备台账列表为结构,对 CID、交换机配置文件等装置实例化类文件进行全生命周期管理。自动检测语法、语义的正确性,并根据统一的命名规范归档。

3 智能变电站工程配置校验比对

3.1 智能变电站 SCD 文件虚回路校验

SCD 中虚端子模型的不规范性导致无法直接实现虚回路的自动校核。本文利用 Word2Vector 进行虚端子描述文本的语义学习,利用循环神经网络(recurrent neural network,RNN)提取文本的深层语义特征,实现非标准到标准虚端子模型的自动映射,然后,基于标准的虚端子模型实现 SCD 文件虚回路的自动校验。使用 Word2Vector 中的连续词袋模型(continuous bag-of-word,CBOW)进行虚回路描述文本的向量化表示,模型如图 3 所示,模型的输入是某个词的上下文词向量,输出是中心词出现的概率,以中心词出现的概率最大化为目标训练模型,可获得各词语的词向量。

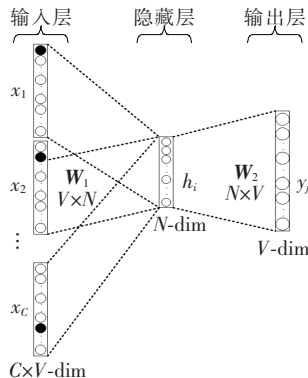


图 3 CBOW 模型

Figure 3 CBOW model

设词库的词汇量为 V , 模型隐藏层的维度为 N , $\mathbf{W}_1$ 为输入层矩阵, $\mathbf{W}_2$ 为输出层矩阵, C 个输入词汇用 one-hot 编码, 则隐藏层词向量为

$$\mathbf{h} = \frac{1}{C}(x_1 + x_2 + \cdots + x_C)\mathbf{W}_1 \quad (1)$$

输出层的输入向量为

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}\mathbf{W}_2 \quad (2)$$

设 u_i 为所求中心词的值, 模型的输出值 y_i 与中心词 u_i 之间的关系为

$$y_i = p(w | \text{Context}(w)) = \frac{\exp u_i}{\sum_{k=1}^V \exp u_k} \quad (3)$$

模型等效损失函数为

$$E = -\lg(p(w | \text{Context}(w))) = -\lg \sum_{k=1}^V \exp(\mathbf{h}\mathbf{W}_2(:, k)) - \mathbf{h}\mathbf{W}_2(:, i) \quad (4)$$

利用随机梯度求解目标函数, 获得各词汇的词向量。

采用 RNN 对向量化表征后的虚端子描述进行分类, 依据分类结果实现非标准到标准虚端子模型的自动映射。基于 RNN 的分类模型结构如图 4 所示, t 为时刻, x 为输入层, s 为隐藏层, o 为输出层, U 、 V 分别为输入、输出层权重矩阵, W 表示隐藏层上一次的值作为下一次输入的权重。输出层、隐藏层计算公式分别为

$$o_t = \text{softmax}(\mathbf{V}s_t) \quad (5)$$

$$s_t = \tanh(\mathbf{U}x_t + \mathbf{W}s_{t-1}) \quad (6)$$

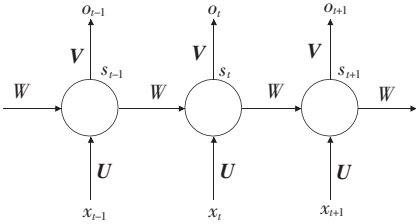


图 4 基于 RNN 的分类结构

Figure 4 Classification structure diagram based on RNN

利用交叉熵误差函数作为优化目标, 用 y 表示式(5)分类的结果, 模型的损失函数为

$$F_{\text{loss}} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \log o_i \quad (7)$$

使用梯度下降算法求损失函数的最小值, 获得分类结果。

基于分类结果实现 SCD 非标准到标准虚端子模型的映射。通过此映射方式可将待校验 SCD 的

虚端子模型标准化。根据变电站设计单位虚回路设计原则建立典型间隔的标准化虚回路校核模板, 校验时根据需求集成为 SCD 虚回路校核模板, 实现虚回路的自动校核。

3.2 基于模型及 CRC 码比对的工程配置一致性校验

智能录波器通过报文解析、模型比对、CRC 码校验, 验证现场 IED 的配置与 SCD 中配置的一致性。智能录波器接入变电站站控层和过程层网络, 如图 5 所示, 通过过程层网络读取装置报文, 解析报文获取通信参数及 IED 的 CRC 码, 与 SCD 比对校核现场 IED 过程层模型、虚回路配置与 SCD 的一致性。通过站控层网络读取现场保护、测控等装置的站控层模型, 并将 IED 的站控层模型与 SCD 进行一致性比对, 校核装置站控层模型与 SCD 的一致性, 校验结果上送智能运维主站。当智能运维主站接收到子站的配置变化事件时, 录入系统事件数据库, 并上送配置文件管控系统。

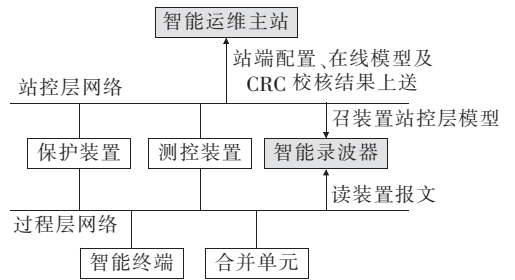


图 5 工程配置一致性校验

Figure 5 Consistency check for the project configuration

配置文件管控系统对智能运维主站上送的 SCD 与配置文件管控系统中 SCD 进行一致性比对, 进而实现现场装置内运行的配置与配置文件管控系统中归档的配置文件的一致性校验。智能变电站工程配置镜像管控系统通过在线报文解析、模型比对、CRC 码校验以及配置文件离线比对, 实现现场装置内运行的配置与归档配置文件的一致性校验。

3.3 智能变电站工程配置文件差异性比对

通过智能变电站工程配置文件差异性比对, 直观了解变电站改扩建配置文件的变化及潜在的配置错误。本文将变电站改扩建间隔涉及的多台设备设置为一个断面, 以断面为整体进行差异性比对。SCD 中具有同间隔的 IED 连接紧密、不同间隔的

IED 连接稀疏的特点,采用马尔科夫聚类算法(the markov cluster algorithm, MCL)对 IED 按间隔聚类^[8]。解析 SCD 中 IED 间的虚连接关系,建立 IED 间的连接矩阵:

$$\mathbf{L}=[l_1, l_2, \cdots, l_n]^T \quad (8)$$

其中, l_k 为一条带权重的连接,表示为

$$l_k=[i \quad j \quad w_{ij}] \quad (9)$$

式中 i, j 分别为源、目标节点; w_{ij} 为节点 i, j 连接的权重,对两节点属于同类间隔的连接赋高权重,不同类间隔的连接赋低权重,以防止母线保护等 IED 需要接收多间隔 IED,干扰聚类结果。

利用连接矩阵 $\mathbf{L}$ 计算邻接矩阵 $\mathbf{A}$,其中

$$a_{ij}=\begin{cases} 0, & i=j \text{ 或 } l_{ij} \notin \mathbf{L} \\ w_{ij}, & l_{ij} \in \mathbf{L} \end{cases} \quad (10)$$

对邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 进行 MCL 聚类得到转移概率矩阵,对转移概率矩阵进行 DBSCAN 密度聚类,采用欧式距离衡量节点间的相似性,并使用模块度 Q 评估聚类结果, Q 计算公式为

$$Q=\frac{1}{2n} \cdot \sum_{ij}\left[a_{ij}-\frac{k_i k_j}{2n}\right] \delta\left(C_i, C_j\right) \quad (11)$$

$$\delta\left(C_i, C_j\right)=\begin{cases} 1, & C_i=C_j \neq 0 \\ 0, & C_i \neq C_j \end{cases}$$

式中 n 为网络中的连接数; k_i, k_j 分别为节点 i, j 的度; C_i, C_j 分别为节点 i, j 的聚类类别。

基于 IED 的间隔聚类结果比对同类型间隔配置的差异性,发现潜在的配置错误,并可按照断面的方式,图形化地展示智能变电站改扩建前、后虚回路和实回路的变化以及 IED 设备相互间的连接关系,如图 6 所示。

基于 CRC 码的计算比对识别智能变电站改扩建测试边界,将 SCD 中改扩建直接关联 IED 与其

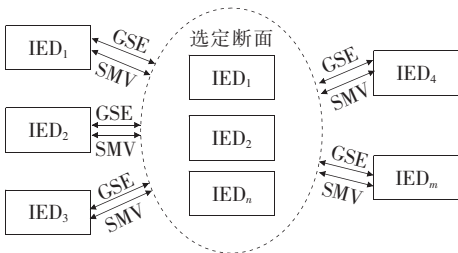


图 6 基于断面及间隔的多 IED 外特性比对

Figure 6 Comparison of external characteristics of multiple IEDs

每一个关联 IED 之间的 SV、GOOSE 发送和 SV、GOOSE 接收相关参数采用 CRC32 计算法则计算 IED 的子 CRC 码,如图 7 所示。

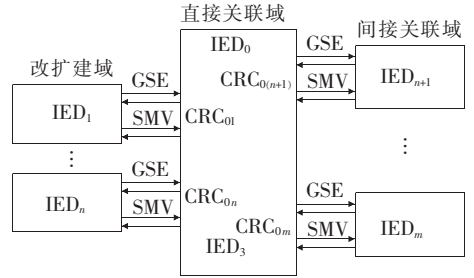


图 7 IED 子 CRC 组成

Figure 7 IED sub-CRC composition

当 IED 间的 SV、GOOSE 发送和 SV、GOOSE 接收相关参数发生变化时,IED 的子 CRC 码发生变化。通过比较改扩建前、后 2 个 SCD 中直接关联 IED 子 CRC 码,确定改扩建直接与间接关联 IED 之间的虚回路是否发生变化。若子 CRC 码一致,改扩建直接与间接关联 IED 间的虚回路没有发生变化,不需测试;若子 CRC 码不一致,表明改扩建前、后直接与间接关联 IED 间的虚回路发生了变化,需重新测试,改扩建前、后不一致的虚回路成为测试边界。

4 智能站工程配置文件镜像调试

由智能变电站工程配置镜像管控系统将变电站现场实际运行的配置描述文件镜像至镜像调试系统,基于与现场一致的调试环境进行智能变电站配置排雷、改扩建工程配置及二次回路实时镜像验证。

智能变电站建设早期相关规范不完善,智能变电站 SCD 不规范,虚回路配置存在漏接、错接等问题,SCD 中隐藏的错误成为了智能变电站运行的安全隐患。此外,当智能变电站检修、改扩建涉及配置变更或新增间隔时,需要对 SCD 进行反复论证校验,确定现场停电传动调试范围^[13-18]。

基于信号交互方式,镜像调试系统验证各设备之间虚回路及相关配置的正确性,如图 8 所示,虚拟测试设备依据模拟的设备下装相关配置,虚拟测试设备 1、2 依据模拟的设备间的虚回路进行报文交互,比对虚拟测试设备接收的报文与下装的配置相关参数是否一致,校核虚回路及相关配置的正确性。

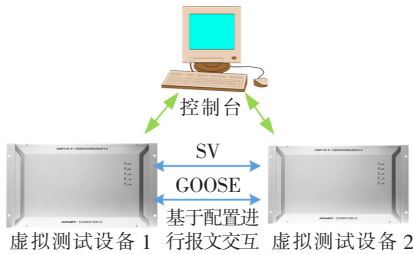


图 8 镜像模拟传动

Figure 8 Mirror simulation transmission

智能变电站 SCD 排雷虚回路模拟传动: 镜像调试系统依次选取 SCD 中的 IED 作为中心 IED 进行模拟传动, 虚拟测试设备 1、2 分别模拟中心 IED、与中心 IED 关联的 IED, 依据 SCD 中 IED 的 Communication/PhysConn 节点下的 port 元素设置对应模拟设备的光口号, 并与虚拟测试设备的物理光口号对应, 虚拟测试设备依据模拟的 IED 进行 SV、GOOSE 报文交互。

如图 9 所示, 解析比对虚拟测试设备 1、2 接收的报文的 APPID、MAC 地址、goID、svID、gocbRef、dataSet 和 test 标志位、数据类型、通道数量、光口等通讯参数与虚拟测试设备下装配置中相关参数是否一致, 比对报文中各通道的值与虚拟测试设备模拟的 IED 对应通道的值是否一致。若相关参数一致, 则对应的虚回路及相关配置正确; 若不一致或没有收到相关报文以及存在多发收等情况, 则说明对应

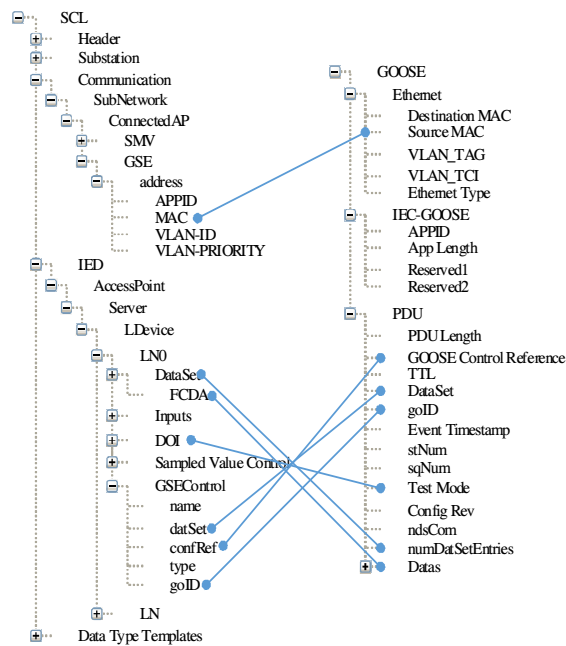


图 9 模型与报文比对

Figure 9 Model and message comparison

的虚回路异常。通过镜像模拟传动可以排查 SCD 中虚回路配置问题, 消除 SCD 虚回路问题引起的智能变电站运行的安全隐患。

智能变电站改扩建模拟传动: 镜像调试系统虚拟测试设备 1、2 分别虚拟直接、间接关联域设备, 虚拟测试设备 1、2 分别下装改扩建后、前的 SCD 中的相关配置, 通过镜像模拟传动, 验证智能变电站改扩建后原运行间隔二次回路是否变更和正确。

5 工程应用

在某 500 kV 智能变电站改扩建工程中, 500 kV 侧第 2 串新增边断路器和五寨 I 线线路, 第 3 串新增边断路器和五寨 II 线线路。利用本文设计的智能变电站工程配置镜像管控系统, 进行改扩建配置镜像调试。

从配置文件管控系统中迁出变电站改扩建前的 SCD, 比对改扩建前、后 2 个 SCD 中改扩建设备直接关联设备的子 CRC 码, PDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 保护 A 子 CRC 码变化情况如图 10 所示, 与此保护 A 关联的原运行间隔中 MT5001A. 1 主变高压侧合并单元 A 的子 CRC 码在改扩建前、后发生变化, 需要测试, 其余原运行间隔设备改扩建前、后子 CRC 码无变化, 不需要测试。

IED		固贤 500 kV 站.scd	固贤变电站 2016 五寨扩建.scd	备注
1	PDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 保护 A	cfb2658f	491553dd	
1.1	PDL5021A 500 kV 第 2 串 DL1 保护 A	96e7683a	96e7683a	一致
1.2	IDL5021A 500 kV 第 2 串 DL1 智能终端 A	ece2c662	ece2c662	一致
1.3	MDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 合并单元 A-NSR386A-LINE	9d1eaa28	9d1eaa28	一致
1.4	IDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 智能终端 A	4ce01730	4ce01730	一致
1.5	MT5001A 1# 主变高压侧合并单元 A-NSR386B-BUS	5bec2d51	d6514803	不一致
1.6	PT01A 1# 主变保护 A	e6b156c4	e6b156c4	一致
1.7	PXL5004A 500 kV 五寨 II 线保护 A		44673236	新增
1.8	MXL5004A 500 kV 五寨 II 线合并单元 A		7bba963e	新增
1.9	PDL5023A 500 kV 第 2 串 DL3 保护 A		d8800352	新增
1.10	IDL5023A 500 kV 第 2 串 DL3 智能终端 A		e8aee39c	新增

图 10 改扩建子 CRC 校验详情

Figure 10 Details of sub-CRC check before and after the reconstruction

改扩建前、后子 CRC 码发生变化的 IED 成为测试边界, 改扩建测试范围为新增、直接关联设备以及前、后子 CRC 码发生变化的间接关联设备。对需要测试的设备进行镜像模拟传动, 虚拟测试设备 1 模拟改扩建直接关联设备 PDL5022A 500 kV 第 2

串 DL2 保护 A,虚拟测试设备 2 模拟 MT5001A.1 # 主变高压侧合并单元 A;虚拟测试设备 1、2 分别下装改扩建后、前的 SCD 相关配置;虚拟测试设备 1 接收的虚拟测试设备 2 发送的 SV 报文的 AP-PID、MAC 地址、svID、dataSet 和 test 标志位、数据类型、通道数量、光口等通讯参数,与虚拟测试设备 1 下装的 PDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 保护 A 的配置参数一致,报文的通道值与 PDL5022A 500 kV 第 2 串 DL2 保护 A 对应通道值一致,虚回路正确且改扩建前、后配置一致。完成调试后配置文件上传配置文件管控系统归档。

传统调试模式下需要将所有改扩建直接关联设备陪停,在更新配置后,与所有改扩建间接关联的运行间隔进行现场传动试验,停电测试范围大。智能变电站工程配置镜像管控系统将现场配置镜像到检修工区,在检修工区,通过镜像调试系统完成变电站改扩建配置变更验证,简化现场调试工作,并通过改扩建前、后子 CRC 码的一致性比对自动识别改扩建的测试边界,减少改扩建现场传动,缩小停电周期和范围。

6 结语

本文针对目前智能变电站配置管控存在的问题,以及智能变电站现有配置文件防雷、改扩建配置验证的测试需求,提出了一种智能变电站工程配置镜像管控技术,并搭建了支持多应用场景的智能变电站工程配置镜像管控系统,实现变电站配置离线、在线无缝管理验证,消除智能变电站中配置文件在多端应用中版本不统一、来源不一致导致的某些安全隐患;实现二次回路镜像传动验证,排查 SCD 中虚回路配置问题,消除 SCD 中隐藏的错误;基于与现场镜像一致的调试环境,实现智能变电站改扩建配置校验,自动识别测试边界,减少改扩建现场传动,缩小停电周期和范围,对电网的安全稳定运行意义重大。

参考文献:

[1] 宋璇坤,韩柳,鞠黄培,等.中国智能电网技术发展实践述[J].电力建设,2016,37(7):1-11.
SONG Xuankun, HAN Liu, JU Huangpei, et al. A re-

view on development practice of smart grid technology in China[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 1-11.

- [2] Q/GDW 11471—2015.智能变电站继电保护工程文件技术规范[S].
- [3] 李宝潭,赵丹,李宝伟,等.智能变电站在线防误系统关键技术的研究[J].智慧电力,2020,48(6):73-78+111.
LI Baotan, ZHAO Dan, LI Baowei, et al. Key technologies of online error prevention system in smart substation[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 73-78+111.
- [4] 陈洋荣,李俊娥,许昂,等.智能变电站信息物理融合可靠性评估方法[J].电力系统自动化,2021,45(3):102-110.
CHEN Yangrong, LI Jun'e, XU Ang, et al. Reliability evaluation method for smart substation based on cyber-physical fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 102-110.
- [5] 万鹏,周峰,胡浩亮,等.面向智能变电站的数字化计量标准进展与分析[J].供用电,2021,38(7):34-39.
WAN Peng, ZHOU Feng, HU Haoliang, et al. Development and analysis of digital metrology standard for smart substation[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(7): 34-39.
- [6] 叶远波,陈晓东,项忠华,等.基于间隔 CRC 校验码的智能变电站改扩建配置文件定位研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):173-179.
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Research on configuration file location of smart substation reconstruction and extension based on bay CRC code[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 173-179.
- [7] 徐东伟,李富强,张贵中,等.基于 SCD 文件风险现状的管控策略体系研究与应用[J].浙江电力,2016,35(6):17-20.
XU Dongwei, LI Fuqiang, ZHANG Guizhong, et al. Research and application of control strategy system based on SCD file risk status[J]. ZheJiang Electric Power, 2016, 35(6): 17-20.
- [8] 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, LU Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Internal comparison of intelligent substation SCD files based on clustering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 83-89.
- [9] 李凯,廖小君,贾虎,等.智能变电站 SCD 与保护装置参

- 数在线一致性校验系统设计与实现[J]. 电工技术, 2018(13):53-55+58.
- LI Kai, LIAO Xiaojun, JIA Hu, et al. Design and implementation of online consistency verification system between SCD and protection device in intelligent substation[J]. Electric Engineering, 2018(13):53-55+58.
- [10] 张立静, 盛戈峰, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9):1-10.
- ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospects of ubiquitous power internet of things in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):1-10.
- [11] 郝晓光, 赵宇皓, 尹项根, 等. 基于中间模型文件的智能变电站虚回路校验研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5):132-137.
- HAO Xiaoguang, ZHAO Yuhao, YIN Xianggen, et al. Intelligent substation virtual circuit check based on the intermediate model file[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5):132-137.
- [12] 王师, 姜敏, 李江林, 等. 全维度智能变电站设备状态监测关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7):82-86.
- WANG Shuai, JIANG Min, LI Jianglin, et al. Research on key technologies of condition monitoring of full-dimensional intelligent substation equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7):82-86.
- [13] 晁武杰, 唐志军, 林国栋, 等. 智能变电站二次设备即插即用文件自动配置技术研究及平台研发[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9):163-172.
- CHAO Wujie, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. A multi-agent FTU based on deep-merging of primary and secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9):163-172.
- [14] 张海东, 黄树帮, 杨青, 等. 面向扩建场景的变电站配置描述模型间隔解耦技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10):129-134.
- ZHANG Haidong, HUANG Shubang, YANG Qing, et al. Discussion on technology of substation configuration description model bay decoupling for expansion project of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10):129-134.
- [15] 叶远波, 陈晓东, 项忠华, 等. 基于间隔 CRC 校验码的智能变电站改扩建配置文件定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6):173-179.
- YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Research on configuration file location of smart substation reconstruction and extension based on bay CRC code[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6):173-179.
- [16] 周柯, 王小明, 巫聪云, 等. 智能变电站改扩建镜像调试技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24):168-176.
- ZHOU Ke, WANG Xiaoming, WU Congyun, et al. Research and application of mirroring debugging technology in reconstruction and expansion of an intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24):168-176.
- [17] 张曼, 陈典丽. 智能变电站扩建二次实施方法的探讨[J]. 湖北电力, 2016, 40(2):43-47.
- ZHANG Man, CHEN Dianli. Research on methods of secondary circuit connections in intelligent substation expansion[J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(2):43-47.
- [18] 许磊, 郑超, 孟洋洋, 等. 智能变电站二次装置一键式隔离系统研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-8 [2021-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20210702.1744.011.html>.
- XU Lei, ZHENG Chao, WU Yangyang, et al. Research on one-key isolation system of secondary devices in intelligent substation[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1-8 [2021-07-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20210702.1744.011.html>.