

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230829

基于知识图谱与SCD文件的智能变电站二次检修 安全措施自动生成技术研究

俞伊丽¹, 张展耀¹, 接晓霞¹, 甄钊², 戴涛¹, 李康平³

(1. 国网浙江省舟山供电公司, 浙江 舟山 316000; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;
3. 上海交通大学智慧能源创新学院, 上海 200030)

摘要: 智能站采用光纤传递数字和模拟信号, 使常规站基于“短电流、断电压、拆跳闸”方式的二次安全措施理论不再适用于智能站。为解决传统人工拟票方式编制效率低、错误率高等问题, 提出基于知识图谱与智能变电站配置描述文件(substation configuration description, SCD)的二次检修安全措施自动生成技术。首先, 基于SCD文件和知识图谱构建配置数据库, 并按照设定规则实现虚回路与软压板的半自动关联。其次, 依据智能站规范中的二次安措编制准则, 构建安措规则库并引入安措执行优先级编码字段。最后, 由二次安措自动生成技术基于配置数据库与安措规则库完成检修设备二次信息的规则匹配, 用于自动生成二次安措票。仿真结果表明, 该技术能够根据现场检修任务自动正确生成二次安措票, 提高智能变电站技改、消缺和校验的工作效率, 降低人工编制错误率, 为实现智能化运检一体提供参考。

关键词: 智能站; 知识图谱; SCD文件; 配置数据库; 安措规则库; 二次安措票

Automatic generation technology of secondary safety measures in an intelligent substation based on a knowledge graph and SCD files

YU Yili¹, ZHANG Zhanyao¹, JIE Xiaoxia¹, ZHEN Zhao², DAI Tao¹, LI Kangping³

(1. State Grid Zhejiang Zhoushan Power Supply Company, Zhoushan 316000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Intelligent stations have adopted optical fibers to transmit digital and analog signals, making the theory of secondary safety measures based on the “short current, off voltage, and split trip” method no longer suitable for such stations. To solve the problems of low efficiency and high error rate in traditional manual ticket preparation methods, an automatic generation technology of secondary safety measures based on a knowledge graph and substation configuration description (SCD) files is proposed. First, the technology builds a configuration database based on SCD files and a knowledge graph, and realizes the semi-automatic association between the virtual loop and the soft pressure plate according to the set rules. Second, from the compilation criteria of secondary safety measures in the intelligent station specifications, a safety measure rule library is constructed and the safety measures execution priority coding field is introduced. Finally, the automatic generation technology of secondary safety measures completes the rule matching of maintenance equipment secondary information based on the configuration database and safety measure rule library. This is used to automatically generate secondary safety measure tickets. The simulation results show that this technology can automatically and correctly generate secondary safety measure tickets based on on-site maintenance tasks, improve the efficiency of technical transformation, defect elimination, and verification in intelligent substations, and reduce the error rate of manual compilation. It provides a reference for achieving intelligent operation and inspection integration.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007092).

Key words: intelligent station; knowledge graph; SCD files; configuration database; safety measure rule library; secondary safety measure tickets

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007092)

0 引言

智能变电站作为智能电网的重要组成部分，其关键技术革新在于使用大量光纤代替传统二次电缆进行数字和模拟信号的传递，使得原有互相解耦、具象的二次电缆被高度耦合、抽象的网络数据流代替。不同于传统常规变电站基于“短电流、断电压、拆跳闸”方式的二次安全措施，智能站采用投退“通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)”发送及接收软压板、投退“采样值(sampled value, SV)”接收软压板以及利用智能电子设备(intelligent electronic device, IED)之间的检修机制等方法，进行设备间的安全隔离^[1]。

在智能站二次设备大量定期校验、技改扩建以及临时消缺工作中，二次检修安全措施(简称二次安措)是隔离运行设备与检修设备的重要安全防线，可保障二次检修期间电网的安全稳定运行，因此大量学者对其开展了相关研究工作。针对智能变电站硬电缆回路被虚拟二次回路代替所造成的信息不透明问题，文献[2]利用一体化监控系统数据传输通道搭建虚拟二次回路可视化监视平台，用于帮助运维人员准确地掌握保护系统的运行状况。鉴于智能变电站二次回路模拟对象多且具有时序性特征与非时序性特征，文献[3]设计了一个基于电网信息模型(grid information model, GIM)的智能变电站二次回路三维可视化系统。文献[4]基于虚端子描述信息和历史虚连接数据计算语义相似度，建立二次设备间虚端子自动匹配的数学模型，并使用匹配正确率完成结果筛选，以解决人工连接智能变电站二次设备虚端子花费时间长且易出错的难题。为提高智能变电站二次回路故障定位的准确率与可移植性，文献[5]提出了一种基于图神经网络的智能变电站二次回路故障定位方法。由于现有智能站检修二次安措存在软逻辑隔离安全性低、运行保护易误闭锁等问题，部分学者致力于分析智能站二次设备新功能特征和安措基本方法利弊，制定一套可靠性高、优化精简、能与智能变电站新技术特点相适应的二次安措优化方案^[6-10]。

智能站在执行二次安措时，容易因为操作顺序不当或缺项漏项而导致运行设备继电保护误动或保护功能误闭锁等。考虑到目前智能站二次安措票所采用的传统人工拟票方式编制效率低且错误率高，文献[11-13]研究了智能站二次安措自动生成技术，但鲜有人员对虚回路配置数据库与二次安措规则库的构建及匹配原则进行细化设计。

针对此问题，本文提出基于知识图谱与 SCD 文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成技术。

首先，该技术通过 SCD 文件解析工具和知识图谱构建智能站虚回路配置数据库，并按照设定规则实现虚回路与软压板的“半自动关联”。其次，依据智能站规范中二次安措的编制原则与一次设备状态、二次设备类型、硬回路隔离等实际情况构建安措规则库，并引入安措执行优先级编码字段。最后，由二次安措自动生成技术基于配置数据库与安措规则库完成检修设备二次信息的匹配，自动生成二次安措并按照优先级逐条排序。该技术的广泛应用能够解决人工拟票工作量大、易出错等问题，确保二次安措的有效性和正确性，并提高二次运维检修工作效率，为智能站实现“智能化运检一体”提供参考。

1 智能站二次安措自动生成技术总方案

基于知识图谱与 SCD 文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成流程如图 1 所示。该技术主要包括：(1) 构建智能站配置数据库、二次安措规则库、二次检修安措票标准库；(2) 根据现场检修任务将配置数据库与二次安措规则库进行匹配，以自动生成二次安措票；(3) 基于二次检修安措票标准库进行生成二次安措票的正确性校核及部分信息补充工作。

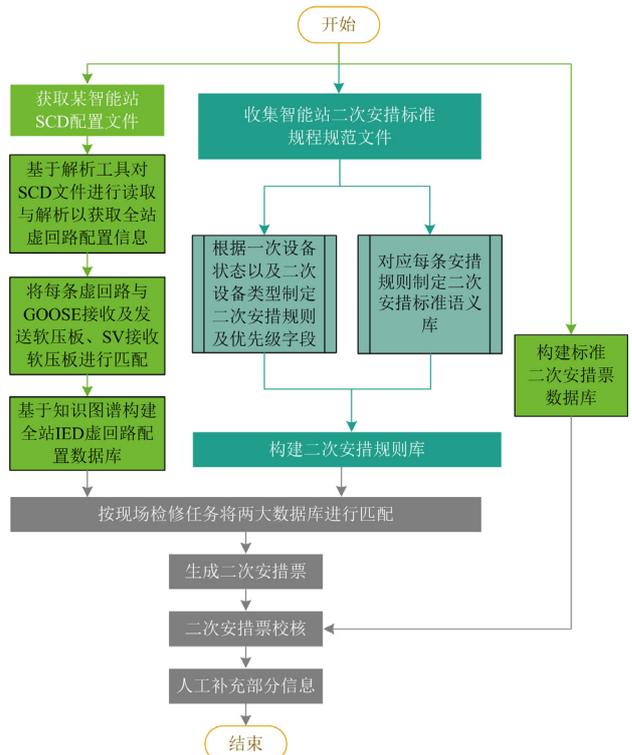


图 1 基于知识图谱与 SCD 文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic generation of secondary safety measures in the intelligent substation based on knowledge graph and SCD files

2 智能站配置数据库构建

2.1 SCD 文件读取和解析

智能站配置数据库的构建本质上是基于 SCD 文件对全站 IED 间的二次虚回路信息进行提取与补充。SCD 文件作为全站系统配置文件, 主要描述智能站所有 IED 的实例配置和通信参数、IED 之间的通信配置以及变电站一次系统结构^[14], 是智能站二次检修安措自动生成的关键数据基础。

根据 SCD 文件中接收虚端子的引用名来区分 SV 链路和 GOOSE 链路, SV 链路前缀为 SVIN, GOOSE 链路前缀为 GOIN。在 IED 的 SV 及 GOOSE 过程层的逻辑设备中, 遍历其 LN0 节点下的 Inputs 部分, 可获取该 IED 的全部接收链路信息。GOOSE 发送及接收软压板、SV 接收软压板只在保护装置中配置, 并存储在对应 IED 逻辑接点 PROT 下的 dsRelayRna 数据集中。

本文选用 Python 中的 Lxml 解析工具对 SCD 文件进行读取与解析, 其解析结果主要包括 IED 虚端子表和 IED 软压板清单, 如图 2 所示。

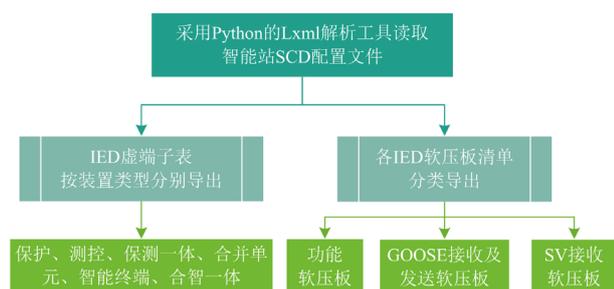


图 2 SCD 文件读取与解析流程图

Fig. 2 Flow chart of reading and parsing SCD files

后续通过虚回路和软压板映射可获取全站 IED 订阅的 GOOSE、SV 二次虚回路信息, 其中 GOOSE 虚回路包括 GOOSE 开出装置名称、GOOSE 开出虚端子数据引用路径、GOOSE 开出软压板、GOOSE 开入装置名称、GOOSE 开入虚端子数据引用路径、GOOSE 开入软压板等数据; SV 虚回路包括 SV 开出装置名称、SV 开出虚端子数据引用路径、SV 开入装置名称、SV 开入虚端子数据引用路径、SV 接收软压板等数据。

2.2 基于知识图谱的虚回路信息配置库

作为新型智能化知识表示方法, 知识图谱 (knowledge graph, KG) 主要通过节点和边构建巨型语义网, 其中节点表示物理世界中的概念或实体, 边表示节点之间的拓扑连接和语义关系^[15], 并以三元组形式对客观世界中存在的概念、实体及其关联关

系进行存储, 通过图谱进行信息的可视化展示^[16]。知识图谱具有知识存储高效性、复杂数据可视化性、信息搜索便捷性、动态更新实时性等优点, 由谷歌于 2012 年提出并被广泛应用于智能搜索、自动问答、决策支持、医学研究等专业领域^[17-21]。

为提高虚回路配置信息检索效率以及二次安措自动生成效率, 提出了基于知识图谱的虚回路信息配置库的构建方法, 以存储全站所有 IED 之间的虚回路信息。而传统的连通状态矩阵方法^[21]只能简单存储 IED 所处状态以及 IED 之间有无关联两大类信息, 后期还需要在系统配置数据库中重新搜寻相关信息。相较于连通状态矩阵方法, 新提出的基于知识图谱的数据库配置构建方法主要优点如下: (1) 自动快速搜索待检修设备与运行设备间的所有关联虚回路以确定安措隔离对象; (2) 对每条虚回路的发送设备名称、发送端引用路径、接收端引用路径、接收设备名称等信息进行有效存储, 并可通过图谱进行虚回路可视化展示; (3) 便于后期对虚回路所对应的发送及接收软压板信息进行更新扩充。

如图 3 所示, 知识图谱构建包括数据获取、信息抽取、知识融合和知识处理 4 个模块。首先, 以智能站 SCD 配置文件解析所得的虚端子表为数据源, 对数据进行结构化预处理; 其次, 采用基于规则的方式对 IED 命名、数据引用路径、虚回路连接等全站配置信息进行抽取; 最后, 基于 Neo4j 图数据库对智能站虚回路配置信息进行存储和可视化展示, 采用“自底向上”方式完成智能站配置数据库的构建。

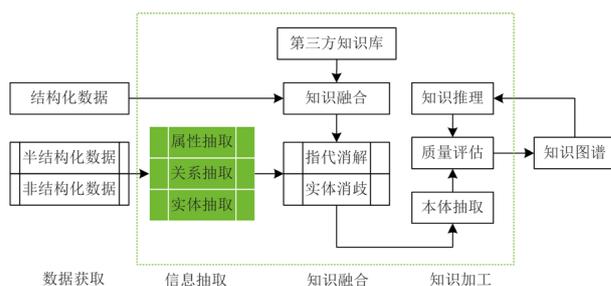


图 3 知识图谱构建通用流程图

Fig. 3 General flow chart of knowledge graph constructing

以“#1 主变第一套保护”与“220 kV 母线第一套保护”之间的三相启失灵 GOOSE 虚回路为例, 介绍其具体构建方式。表 1 详细列写了虚端子表中该 GOOSE 虚回路的全部信息, 采用节点连接可视化引入 6 个节点和 5 条边, 通过节点存储发送 IED 名称、发送数据引用路径、发送软压板、接收软压板、接收数据引用路径、接收 IED 名称, 且每个节

点的属性用于存储发送及接收 IED 中文描述名、虚回路具体功能、发送及接收软压板双重命名。通过边定义两个节点之间的关系为端口或虚回路，节点和边可以使用不同类型的视觉元素(如颜色、形状等)来增强表达特定的含义，最终表 1 中的 GOOSE 虚回路可视化构建结果如图 4 所示。

表 1 智能站“#1 主变第一套保护”与“220 kV 母线第一套保护”之间的 GOOSE 虚回路信息表

Table 1 GOOSE virtual loop information between the first set of protection for #1 transformer and the first set of protection for 220 kV busbar in the intelligent station

链路信息格式:
Output — Output_desc — Outlink — Outlink_desc — Sending soft pressing plate — Receiving soft pressing plate — Inlink — Inlink_desc — Input — Input_desc
链路信息内容:
PT2201A—#1 主变第一套保护—PIGO/PTRC1\$ST\$StrBF\$general—启动高压侧断路器失灵—#1 主变第一套保护失灵启动 220 kV 第一套母差 GOOSE 发送软压板 1LP11—220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83—PIGO/GOINGGIO13\$ST\$SPCSO1\$stVal—主变 1_三相启动失灵开入—PM2201A—220 kV 母线第一套保护

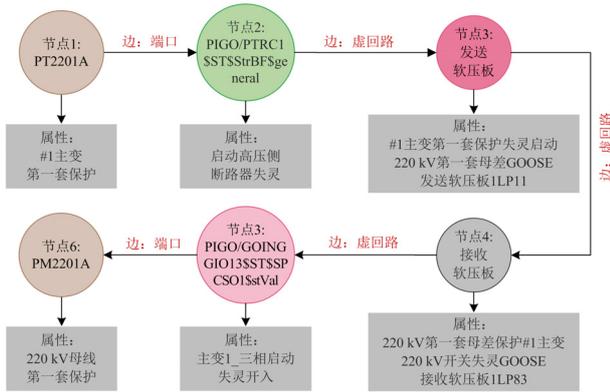


图 4 基于知识图谱的 GOOSE 虚回路信息图

Fig. 4 GOOSE virtual loop information based on knowledge graph

2.3 软压板与虚回路映射

国家电网公司企业标准《线路保护及辅助装置标准化设计规范》^[22]以及《变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范》^[23]定义了不同电压等级下各 IED 的 SV 输入虚端子表、GOOSE 输入虚端子表以及 GOOSE 输出虚端子表。基于上述虚端子表描述的规则，将 GOOSE 发送及接收软压板、SV 接收软压板与所属虚回路进行关联，完成 SCD 配置文件中 IED 软压板与虚回路的映射。

1) SV 接收软压板与 SV 虚回路映射

SV 虚回路仅设置 SV 接收软压板并一一对应，但由于 IED 的 SV 接收虚端子内部数据引用路径(通用格式为 PISV/SVINGGIO*\$MX\$\$SAVSO*)和 SV 接收软压板数据引用路径(通用格式为 PROT/GGIO*.SPCSO*)不存在显著的对应匹配规则，且存在多条 SV 虚回路经同一 SV 接收软压板控制的现象。

鉴于上述问题，基于规范附录中的 SV 输入虚端子表(如表 2 所示)进行人工手动映射，表中 MU 为合并单元(merging unit, MU)，通过 SV 虚端子外部数据描述，发送 IED 装置名称，在数据配置库软压板清单中找到对应接收 IED 装置的 SV 接收软压板。

表 2 线路保护 SV 虚端子表

Table 2 SV virtual terminal table of line protection

信号名称	软压板	引用路径
MU 额定延时		PISV/SVINGGIO1\$MX\$DelayTRtg1
保护 A 相电压 U_{a1}		PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn1
保护 A 相电压 U_{a2}		PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn2
保护 B 相电压 U_{b1}		PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn3
保护 B 相电压 U_{b2}	SV 接收压板	PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn4
保护 C 相电压 U_{c1}	(压板数据	PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn5
保护 C 相电压 U_{c2}	引用路径:	PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn6
同期电压 U_{x1}	PROT/*	PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn7
同期电压 U_{x2}	GGIO1.	PISV/SVINGGIO2\$MX\$\$SvIn8
保护 A 相电流 I_{a1}	SPCSO*)	PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn1
保护 A 相电流 I_{a2}		PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn2
保护 B 相电流 I_{b1}		PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn3
保护 B 相电流 I_{b2}		PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn4
保护 C 相电流 I_{c1}		PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn5
保护 C 相电流 I_{c2}		PISV/SVINGGIO1\$MX\$\$SvIn6

2) GOOSE 发送软压板与 GOOSE 虚回路映射

智能终端、合并单元以及合智一体化装置不设置 GOOSE 发送软压板，而线路、母线、主变等保护装置中的相关 GOOSE 虚回路按照标准规范中的虚端子表信息进行 GOOSE 发送软压板的设置。根据《继电保护 IEC 61850 工程应用模型》规范中设定的 GOOSE 出口软压板建模规则^[24]，跳闸、启动失灵、闭锁重合、合闸、远传等重要信号需在 PTRC、RREC、PSCH 中统一加 Strp 后缀以扩充出口软压板，从而在逻辑上隔离相应信号的输出。

因此，本文基于“*LN*/DO”匹配方式进行 GOOSE 发送软压板与 GOOSE 虚回路的自动映射。以表 3 中线路保护跳闸及重合闸出口为例，其执行过程如下：

(1) 将线路保护 GOOSE 输出信号的发送数据引用路径按照其逻辑节点后缀进行分类，例如，发送

数据引用路径中含有“*/LinPTRC*\$ST\$Tr\$*”表示“跳闸”类别、含有“*/RecRREC*\$ST\$Op\$*”表示“重合闸”类别;

(2) 在线路保护软压板清单中搜索发送软压板数据引用路径对应含“*/LinPTRC*.TrStrp”、“*/RecRREC*.OpStrp”等相同逻辑节点后缀的软压板, 以实现 GOOSE 发送软压板与 GOOSE 虚回路的自动映射。

表 3 线路保护 GOOSE 输出信号的发送数据引用路径与发送软压板数据引用路径之间的对应关系

Table 3 Correspondence between the data reference path of GOOSE transmission and the data reference path of the GOOSE sending soft pressure plate in line protection

发送数据描述	发送数据引用	发送软压板	发送软压板数据引用
跳开关	PIGO/LinPTRC1\$ST\$Tr\$phsA	GOOSE	PROT/
跳开关	PIGO/LinPTRC1\$ST\$Tr\$phsB	跳闸出口	LinPTRC1.
跳开关	PIGO/LinPTRC1\$ST\$Tr\$phsC	软压板	TrStrp
重合闸	PIGO/RecRREC1\$ST\$Op\$general	GOOSE 重合闸出口软压板	PROT/RecRREC1.OpStrp
永跳	PIGO/LinPTRC1\$ST\$BlkRecS\$TstVal	保护闭锁另一套重合闸 GOOSE 发送软压板	PROT/LinPTRC1.BlkRecStrp
启失灵	PIGO/LinPTRC1\$ST\$StrBF\$phsA	启动母差保护	PROT/
启失灵	PIGO/LinPTRC1\$ST\$StrBF\$phsB	GOOSE 发送	LinPTRC1.StrBFStrp
启失灵	PIGO/LinPTRC1\$ST\$StrBF\$phsC	软压板	

3) GOOSE 接收软压板与 GOOSE 虚回路映射根据《IEC 61850 工程继电保护应用模型》^[24], 应简化保护装置之间、保护装置和智能终端之间的 GOOSE 软压板, 除双母线和单母线接线方式下的母线保护设置启动失灵/失灵联跳接收软压板、变压器保护设置失灵联跳接收软压板外, 其余接收端不设相应 GOOSE 接收软压板。

不同于 GOOSE 发送软压板, GOOSE 接收软压板的数据引用路径(PROT/GGIO*.SPCSO*)与保护装置的接收数据引用路径(PIGO/GOINGGIO*\$ST\$PCSO*\$stVal)不存在明显的对应关系, 因此基于“*LN*/DO”的自动匹配方式失效。本文采用基于虚端子表发送装置名称、发送数据描述、接收装置名称、接收数据描述中的关键词进行自动匹配, 以

表 4 中的母差保护为例, 其具体过程映射过程如下。

表 4 母线保护 GOOSE 虚端子表

Table 4 GOOSE virtual terminal table of busbar protection

发送装置名称	发送数据描述	接收装置名称	接收数据描述	接收软压板
#1 主变第一套保护	启动高压侧断路器失灵	220 kV 母线第一套保护	主变 1 三相启动失灵开入	220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83
220 kV 洛集 43T5 线第一套保护	启动失灵	220 kV 母线第一套保护	支路 8_A 相启动失灵开入	
220 kV 洛集 43T5 线第一套保护	启动失灵	220 kV 母线第一套保护	支路 8_B 相启动失灵开入	220 kV 第一套母差保护洛集 43T5 线开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP87
220 kV 洛集 43T5 线第一套保护	启动失灵	220 kV 母线第一套保护	支路 8_C 相启动失灵开入	

(1) 针对#1 主变三相启失灵 GOOSE 虚回路: 首先根据虚端子表中的信息确定搜索关键词为“#1 主变、失灵”, 然后按照上述关键词在 220 kV 母线第一套保护的软压板清单中进行关键词匹配搜索, 找到描述中包含“#1 主变、失灵”字段的 GOOSE 接收软压板, 则该软压板即为 220 kV 母线第一套保护的#1 主变启失灵 GOOSE 输入信号的接收软压板。

(2) 针对洛集 43T5 线分相启失灵 GOOSE 虚回路: 注意 A、B、C 分相启动失灵开入(即表 4 中的支路 8_A 相启动失灵开入、支路 8_B 相启动失灵开入、支路 8_C 相启动失灵开入)经同一接收软压板控制, 首先根据虚端子表中的信息确定搜索关键词为“洛集 43T5 线、失灵”, 然后按照上述关键词在 220 kV 母线第一套保护的软压板清单中进行关键词匹配搜索, 找到描述中包含“洛集 43T5 线、失灵”字段的 GOOSE 接收软压板, 则将该接收软压板与所有包含“洛集 43T5 线、失灵”关键信息的 GOOSE 虚回路进行映射。

4) 虚回路与软压板的半自动关联

根据上面所述关联规则, 可实现虚回路与所属软压板的映射。“半自动关联”是指人工进行 SV 接收软压板与 SV 虚回路的映射, 同时辅之以词频逆文档频率(term frequency-inverse document frequency, TF-IDF)算法进行 GOOSE 发送及接收软压板与 GOOSE 虚回路的自动映射^[25]。

本文使用词袋模型中的 TF-IDF 算法并结合余弦相似度计算, 实现文本相似度匹配。首先, 使用

Python 中的 Jiaba 工具将待匹配文本进行分词；其次，使用词袋模型将每个文本向量化，向量中的每个维度即是文本集中的所有分词，其属性值可为该词在对应文本中是否出现、出现频率及加权值。

作为构建词袋模型最常用的方式之一，TF-IDF 是词频 (term frequency) 和逆文档频率 (inverse document frequency) 这两个度量指标的组合。计算某一个词 ω_i 的 $T_{f-idf}(\omega_i)$ 值，计算公式为

$$T_{f-idf}(\omega_i) = t_f(\omega_i) \times i_{df}(\omega_i) \quad (1)$$

$$t_f(\omega_i) = \frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{k,j}} \quad (2)$$

$$i_{df}(\omega_i) = \log \frac{|D|}{|\{j: \omega_i \in d_j\}| + 1} \quad (3)$$

式中： $t_f(\omega_i)$ 为 ω_i 的词频； $i_{df}(\omega_i)$ 为 ω_i 的逆文档频率； $n_{i,j}$ 为该词 ω_i 在文件 d_i 中的出现次数；分母 $\sum_k n_{k,j}$ 为文件 d_i 中所有字词出现次数的总和； $|D|$ 为语料库中的文件总数； $|\{j: \omega_i \in d_j\}|$ 为包含词语 ω_i 的文件数目。

基于待匹配文本中所有词频的 $T_{f-idf}(\omega_i)$ 值计算，可将待匹配文本向量化处理为向量 A 和 B 。对于上述给定的两个属性向量 A 和 B ，其余弦相似度 S_{im} 的计算公式为

$$S_{im} = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}} \quad (4)$$

式中： A_i 为向量 A 中的第 i 个元素； B_i 为向量 B 中的第 i 个元素； n 为向量中的元素总个数。

最后，根据式(4)完成两文本之间的相似度计算，并选取相似度最高值作为最佳匹配文本。

以图 4 为例，概述“主变至母差的三相启动失灵 GOOSE 虚回路”与“220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83”的自动关联过程。首先，提取虚回路文本信息为{#1 主变第一套保护启动高压侧断路器失灵}；其次，提取接收装置“220 kV 母线第一套保护”GOOSE 接收软压板描述含“失灵”二字的所有软压板，具体如表 5 所示。然后，基于 TF-IDF 算法结合并余弦相似度，获取该虚回路文本信息与每一块 GOOSE 接收软压板的相似度计算值，结果见表 5。最后，选取相似度值最大的“220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83”作为该 GOOSE 虚回路的最佳匹配 GOOSE 接收软压板。

表 5 虚回路文本信息、GOOSE 接收软压板文本信息及对应的相似度计算值

Table 5 Text information of virtual loop text information of GOOSE received soft plate, and corresponding similarity calculation values

虚回路 文本信息	GOOSE 接收软压板 文本信息	相似度 计算值
#1 主变 第一套 保护启动 高压侧 断路器 失灵	220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83	0.3787
	220 kV 第一套母差保护#2 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP92	0.3117
	220 kV 第一套母差保护洛集 43T5 线 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP87	0.3185
	220 kV 第一套母差保护洛聚 43T6 线 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP88	0.3112
	220 kV 第一套母差保护集都 2R49 线开关 失灵 GOOSE 接收软压板 1LP85	0.3044
	220 kV 第一套母差保护集渔 2R48 线开关 失灵 GOOSE 接收软压板 1LP86	0.2980
	220 kV 第一套母差保护朗集 2R43 线开关 失灵 GOOSE 接收软压板 1LP94	0.2981
	220 kV 第一套母差保护朗聚 2R44 线开关 失灵 GOOSE 接收软压板 1LP95	0.2971
	220 kV 第一套母差保护 220 kV#1 母联 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP80	0.3060
	220 kV 第一套母差保护 220 kV#2 母联 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP82	0.2564
	220 kV 第一套母差保护 220 kV 正母分段 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP81	0.2867

2.4 光纤物理回路与虚回路关联

根据国家电网公司所提出的《智能变电站继电保护和电网安全自动装置现场工作保安规定》^[27]，对于无法通过投或退软压板实现隔离的 SV、GOOSE 虚回路，可选择拔掉与虚回路对应的光纤以实现物理回路的隔离。

如图 5 所示，线路智能终端发送至线路保护的开关位置及闭锁重合闸等虚回路不经任何发送及接收软压板的控制，仅能通过拔除两者之间的光纤以隔断两者之间的信息交互。因此，需要基于 SCD 文

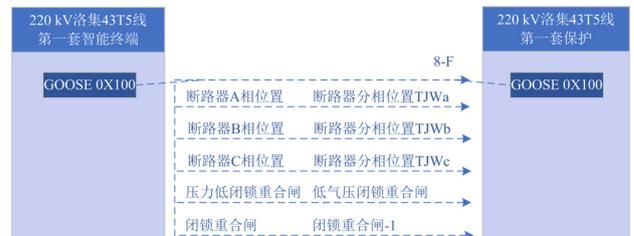


图 5 智能终端与线路保护之间的 GOOSE 虚回路信息图
Fig. 5 GOOSE virtual loop information between intelligent terminals and line protection

件中接收设备端所有虚回路的接收端口配置(如图中的 8-F 端口)以及全站光纤链路表(包含发送设备、发送端口、光纤编号及名称、接收端口、接收设备等信息),将光纤物理回路与虚回路进行关联以辅助二次安措自动生成。

3 智能站安措规则库构建

3.1 智能站安全隔离方式

常规站中的二次回路通常以具象的电路形式存在,间隔检修时通过“短接电流端子、断开电压连片、划开跳闸出口端子排中间小拨片、退出保护出口硬压板”等二次安全措施,形成物理回路上的明显电气开断点,以防止检修过程中运行设备误动作。

与常规站不同,智能站二次回路全部以看不见的虚回路形式呈现,并依托光纤实现数字化信号的网络通信,所以“明显电气开断点”的二次安措隔离方法不再适用。智能变电站虚回路的安全隔离应采取“双重安措”安全原则,一般优先采用“退出相关运行装置中接收软压板、退出检修装置发送软压板、投入检修装置的检修压板”等方法。

而对于未设置发送及接收软压板的虚回路,只能采取断开光纤的方式来实现检修装置与运行装置的可靠隔离。

3.2 智能站安措编制原则

根据国家电网公司所提出的《智能变电站继电保护和电网安全自动装置现场工作保安规定》^[27],智能站二次安全措施编制规则如下:

(1) 与检修设备相关的 GOOSE 软压板及出口硬压板已退出;

(2) 与检修设备相关的 SV 软压板已退出;

(3) 与检修设备相关的间隔隔离刀闸强制软压板已投入;

(4) 无法通过投退软压板隔离的 SV、GOOSE 的光纤回路已拔出;

(5) 检修范围内的所有智能设备(包括保护装置、智能终端、合并单元等)检修硬压板已投入;

(6) 合并单元模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片已断开。

3.3 智能站安措规则库制定

智能站一般以间隔为单位对其范围内的所有 IED 进行相关检修工作,检修过程中若二次安措执行存在漏项或者顺序颠倒,则运行设备可能会误动作。智能站二次安措票编制时,需要根据检修任务及一次设备状态,按智能站安措编制原则对检修装置执行二次安措隔离,保证检修期间不会对运行设备产生影响。

为实现检修设备与运行设备之间的有效二次隔离,设定“二次安措执行总原则”为:运行设备优先于检修设备、GOOSE 回路优先于 SV 回路、虚回路优先于硬回路。本文依据 3.2 节的编制原则,制定安措规则库具体如下。

规则 1: 退出运行设备中与检修设备相关的 GOOSE 接收及发送软压板。

规则 2: 若一次设备停运,退出运行设备中与检修设备相关的 SV 接收软压板;若一次设备实际运行,则将对运行设备设置为“信号”状态(即退出运行设备所有跳闸出口压板)。

例如:线路实际运行,仅合并单元进行检修,若退出母线保护对应间隔的 SV 软压板,则会形成差流导致母线保护误动作;若未退出母线保护对应间隔的 SV 接收软压板,则该间隔合并单元投入检修压板后将直接闭锁母线保护所有功能。综上考虑,在一次设备运行仅合并单元开展检修工作时,需将该运行间隔相关运行设备设置为“信号”状态。

若涉及到 220 kV 智能站 35 kV 常规配置部分,由于无法基于 SCD 虚端子-软压板配置数据库搜寻需要隔离的二次回路,需要手工进行添加补充。例如:主变三侧开关及本体停电检修,则低压侧相关二次回路部分(如电压电流采样回路、跳合闸出口回路)同常规站一样均为电缆硬回路。

规则 3: 若检修设备为智能终端,且与该检修设备相关的运行设备为 220 kV 母线保护,则应投入母线保护中对应检修间隔的隔离刀闸强制软压板(前提是一次设备处于运行状态)。

规则 4: 退出检修设备中所有与运行设备相关的 GOOSE 接收及发送软压板。

规则 5: 若检修设备为智能终端,则应退出其所有出口硬压板,同时断开对应出口回路的控制电源空气开关;若为 220 kV 线路间隔的智能终端,还应退出闭锁本间隔另一套智能终端重合闸功能的出口硬压板(如果有)。

规则 6: 拔出检修设备中无法通过投退软压板与运行设备隔离的 SV、GOOSE 光纤。

规则 7: 投入检修范围内的所有智能设备(包括保护装置、智能终端、合并单元等)检修硬压板。

规则 8: 若一次设备停运,断开合并单元模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片。

经配置数据库与安措规则库匹配自动生成的二次安措条目,应按照“二次安措执行总原则”标上安措执行优先级。其编写字段格式为:执行设备检修状态(运行或检修)、设备 IED 顺序编码(如 1、2、3、…)、虚端子链路类型(GOOSE、SV 或 None)、

隔离回路虚实类型(虚回路或硬回路)。

3.4 智能站安措规则匹配

根据待执行检修任务确定检修 IED 设备, 通过配置数据库遍历检修设备所有二次虚回路, 以搜索与该检修设备相关的相邻设备。若二次虚回路相关的两侧设备均为检修, 则无须进行二次安措隔离; 若二次虚回路相关的两侧设备, 一侧为检修设备, 另一侧为运行设备, 则该虚回路需要采取二次安措进行隔离, 由此确定二次检修隔离边界。

将检修 IED 编码排序后, 对每个检修 IED 依据规则库逐条在配置数据库中搜寻相关虚回路信息, 以进行智能站安措规则匹配。自动生成二次安措条文并标上执行优先级, 基于优先级排序后得到 word 版的二次安措票。智能站安措规则匹配流程如图 6 所示。



图 6 智能站安措规则匹配流程图

Fig. 6 Flow chart of safety measure rule matching in the intelligent substation

4 案例分析

4.1 间隔基本概况

本文以 220 kV 集聚变#1 主变本体及三侧开关改检修状态为例, 简述该检修任务下二次安措票的自动生成过程。#1 主变间隔的一次接线方式如图 7 所示, 红色代表带电部分, 黑色代表停电部分。

根据《变压器、高压并联电抗器和母线路保护及辅助装置标准化设计规范》^[23], 220 kV 及以上电压等级变压器应配置双套主、后备保护一体化电气量保护和一套非电量保护, 两套电气量保护相互独立且互不干扰。其中, #1 主变第一套电气量保护(即 220 kV 主变第一套保护)与其他装置(如 220 kV 母线第一套保护)之间的虚回路信息, 具体如图 8 所示。图中, 蓝色剪头表示 GOOSE 链路, 红色箭头表示 SV 链路, 标记*表示待隔离二次虚回路, 黄色表示检修 IED, 淡蓝色表示运行 IED。

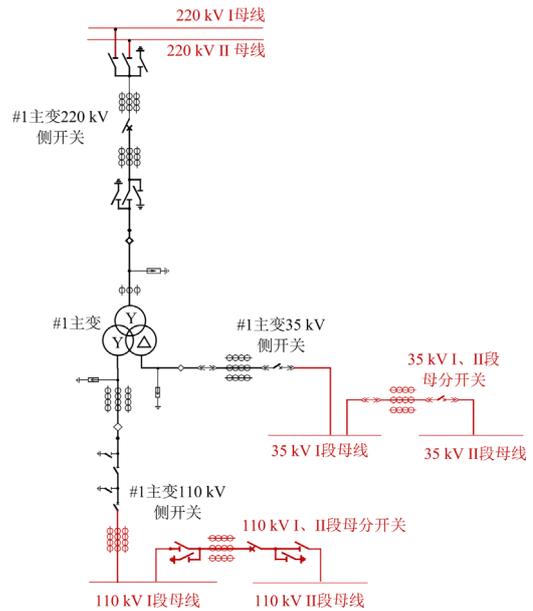


图 7 #1 主变间隔的一次接线图

Fig. 7 Primary wiring chart of #1 transformer interval

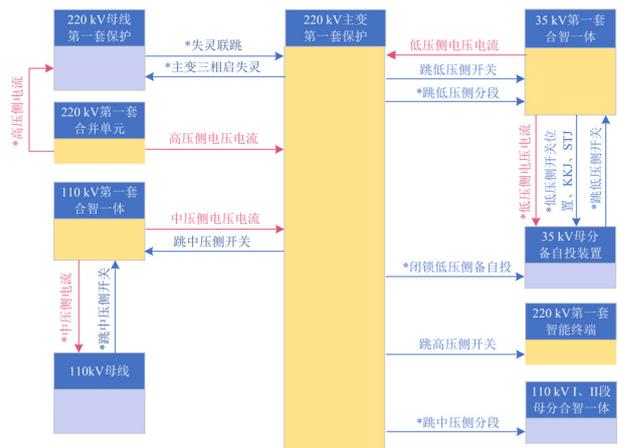


图 8 #1 主变间隔信息流图

Fig. 8 Information flow chart of #1 transformer interval

4.2 虚回路可视化展示

根据“#1 主变本体及三侧开关改检修”检修任

务, 确定待检修设备集合为{#1 主变第一套保护 PT2201A(编号为 J1)、#1 主变 220 kV 第一套智能终端 IT2201A(编号为 J2)、#1 主变 220 kV 第一套合并单元 MT2201A(编号为 J3)、#1 主变 110 kV 第一套合智一体 IT1101A(编号为 J4)、#1 主变 35 kV 第一套合智一体 IT3501A(编号为 J5)}。注意, 标号 J 表示检修设备, 数字越小执行优先级越高。

鉴于#1 主变本体智能终端集成非电量保护, 且采用就地经二次电缆直跳主变各侧开关, 而当前主变三侧开关已改检修, 无须做安措隔离, 因此#1 主变本体智能终端不列入检修设备范围。

基于知识图谱构建的智能站配置数据库, 输入上述检修设备的 IED 名称进行虚回路信息的自动搜索, 其搜索结果以图谱结构形式进行可视化展示。

图 9 展示了检修设备集合下所有相关 IED(包括检修设备之间、检修设备与运行设备之间)的 GOOSE 虚回路图, 图 10 对图 9 虚线框中回路进行放大(其回路的节点、边以及节点属性定义同图 4), 并可从其中获知 220 kV 第一套母线保护 PM2201A 与 220 kV 第一套主变保护 PT2201A 之间的“失灵联跳、主变三相启失灵”GOOSE 虚回路所涉及的 GOOSE 发送及接收软压板。

图 11 展示了检修设备集合下所有相关 IED(包括检修设备之间、检修设备与运行设备之间)的 SV 虚回路图, 图 12 对图 11 虚线框中回路进行放大(其回路的节点、边以及节点属性定义同图 4), 并可获知

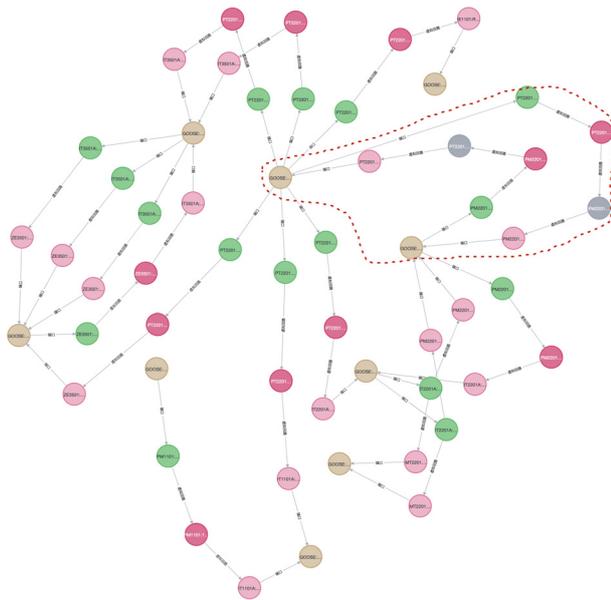


图 9 基于知识图谱的 GOOSE 虚回路可视化
Fig. 9 Visualization of GOOSE virtual loop based on knowledge graph

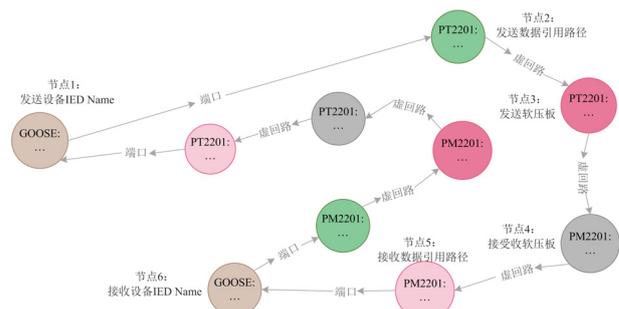


图 10 红色虚线框中(图 9)基于知识图谱的 GOOSE 虚回路可视化

Fig. 10 Visualization of GOOSE virtual loop based on knowledge graph in red dashed box (Fig. 9)

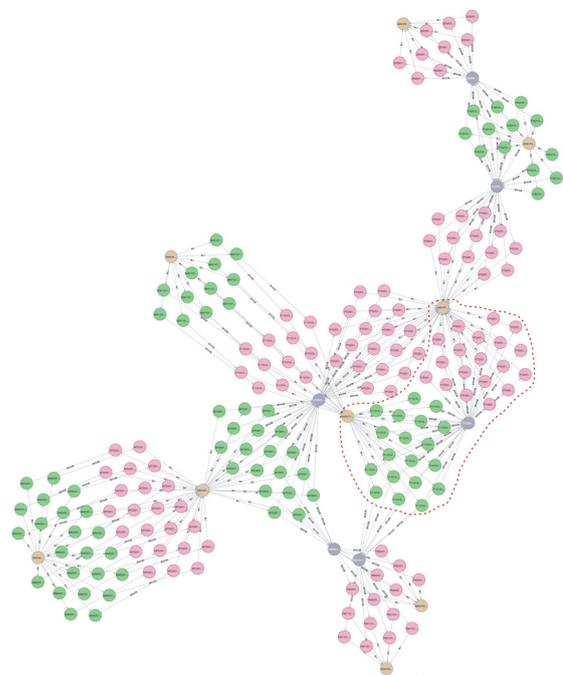


图 11 基于知识图谱的 SV 虚回路可视化
Fig. 11 Visualization of SV virtual loop based on knowledge graph

#1 主变 110 kV 第一套合智一体 IT1101A 至 220 kV 第一套主变保护 PT2201A 之间的“电压电流”SV 虚回路只经 SV 接收软压板控制。但 IT1101A 与 PT2201A 均为检修设备, 因此该 SV 虚回路无须进行二次隔离。

4.3 检修边界信息提取

根据 4.2 节中在配置数据库中自动搜索到的检修设备之间、检修设备与运行设备之间的全部 GOOSE、SV 虚回路, 进一步依据 3.4 节的“二次检修隔离边界”确定原则进行检修边界信息的提取, 即获取待隔离 GOOSE、SV 虚回路信息。

由附录 A 表 A1、表 A2 可知，与待检修设备集合相关的运行设备集合为{220 kV 母线第一套保护 PM2201A(编号为 Y1)、220 kV 母线第一套合并单元 MM2201(编号为 Y2)、110 kV 母线保护 PM1101(编号为 Y3)、110 kV 母线第一套合并单元 MM1101(编号为 Y4)、110 kV I、II段母分合智一体 IE110(编号为 Y5)、35 kV 母分备自投装置 ZE3501(编号为 Y6)。注意，标号 Y 表示运行设备，数字越小执行优先级越高。

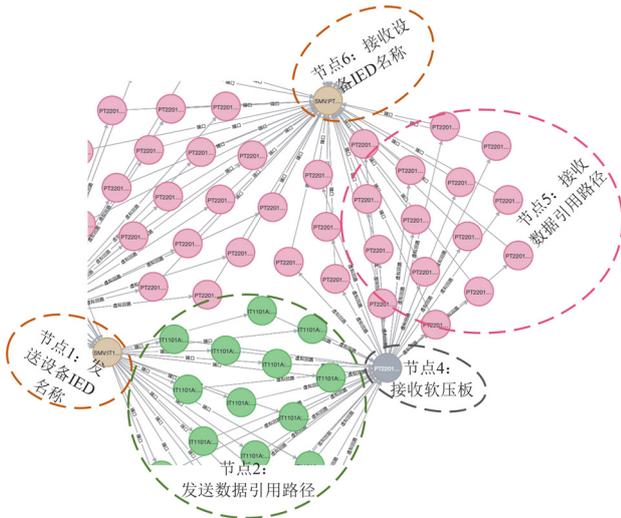


图 12 红色虚线框中(图 11)基于知识图谱的 SV 虚回路可视化

Fig. 12 Visualization of SV virtual loop based on knowledge graph in red dashed box (Fig. 11)

4.4 配置数据库与安措规则库的自动匹配

根据 3.3 节建立的规则库以及 4.3 节中的检修边界信息提取结果，本文采用“条件式决策产生规则 (if Conditions then-Result)”进行规则匹配，以便 Python 编程对规则进行处理。条件式决策产生规则过程为：当 if 条件部分满足时，then 之后的执行语句才会被激活；if 条件部分可由多个条件以“与 (and)”的关系共同构成。各规则具体执行过程定义如下。

规则 1(虚回路)：根据搜索的运行设备与检修设备之间的 GOOSE 虚回路信息，生成安措{“退出运行设备中的 GOOSE 接收及发送软压板”}。

规则 2(虚回路)：根据搜索的运行设备与检修设备之间的 SV 虚回路信息，判断 if{线路间隔停运、或主变间隔停运}，则生成安措{“退出与检修设备相关的 SV 接收软压板”}；判断 if{线路间隔运行、或主变间隔运行}，则生成安措{“将运行设备状态由运行改为信号”}。

规则 3(虚回路)：if{运行设备为 220 kV 母线保护}且{检修设备为智能终端}且{一次设备运行}，则生成安措{“投入 220 kV 母线保护中与检修间隔对应的刀闸强制软压板”}。

规则 4(虚回路)：根据搜索的运行设备与检修设备之间的 GOOSE 虚回路信息，生成安措{“退出检修设备中的 GOOSE 接收及发送软压板”}。

规则 5(硬回路)：if{检修设备为智能终端}，则生成安措{“退出该智能终端中所有出口硬压板并拉开对应控制电源空开”}；if{该智能终端属于 220 kV 线路间隔}，则生成安措{“退出闭锁另一套智能终端重合闸功能的出口硬压板”}。

规则 6(硬回路)：if{搜索到检修设备与运行设备之间的 GOOSE、SV 虚回路不存在任何接收及发送软压板}且{发送设备为检修设备}且{接收设备为运行设备}，则生成安措{“拔出检修设备至运行设备之间与该虚回路相对应的光纤”}。

规则 7(硬回路)：根据输入的检修设备名字(如保护装置、智能终端、合并单元)，生成安措{“投入保护装置、智能终端、合并单元检修硬压板”}。

规则 8(硬回路)：if{线路间隔停运、或者主变间隔停运}，则生成安措{“断开停运间隔对应合并单元模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片”}。

以规则 1 的匹配过程为例：在附录 A 表 A1 中搜索发送设备或接收设备为运行设备的 GOOSE 虚回路，根据搜索到的第 1 条 GOOSE 虚回路生成二次安措“退出 220 kV 第一套母差保护启动#1 主变失灵联跳 GOOSE 出口软压板 1LP76”，并标记执行优先级为“运行·Y1·GOOSE·虚回路”。待规则 1 涉及的所有运行设备 GOOSE 虚回路信息均匹配结束后，再执行下一条的规则匹配，直至全部匹配结束。

4.5 二次安措自动生成

对规则库中的所有规则在对应配置数据库中进行配置信息自动遍历搜索及匹配后，得到每条规则对应的二次安措条文以及对应执行优先级。优先级排序规则：按字段逐级排序、运行优先于检修、设备 IED 顺序编码数字小优先于数字大、GOOSE 优先于 SV(SV 优先于 None)、虚回路优先于硬回路。

将所有自动生成的二次安措条文按照执行优先级进行排序后，最终得到本次检修任务下的二次安措票主要内容，如附录 A 表 A3 所示。同时，对 35 kV 常规配置部分，通过二次标准安措票对相关二次安措信息予以补充，表中已用红色标记。

5 结论

考虑到智能站采用大量光纤代替二次电缆传递数字和模拟信号, 常规站“明显电气断点”的二次安全措施理论不再适用于智能站等现状, 本文提出基于知识图谱与 SCD 文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成技术。

该技术通过 SCD 文件和知识图谱构建智能站配置数据库, 细化安措规则库并引入执行优先级编码字段, 并基于规则匹配以自动生成二次安措条文。该技术的应用能够解决人工拟票工作量大、易出错等问题, 确保二次安措的有效性和正确性, 并提高二次运维检修工作效率, 为智能站实现“智能化运检一体”提供参考。

目前智能变电站二次系统主要有以下 3 种配置模式: (1) 电子式互感器 + 就地 MU + GOOSE 跳闸; (2) 常规互感器 + 就地 MU + GOOSE 跳闸; (3) 常规互感器 + 常规采样 + GOOSE 跳闸。而本文的研究仅限于采用第一、二种配置模式的智能变电站, 对于采用“常规互感器 + 常规采样 + GOOSE 跳闸”模式下的智能变电站, 所建立的安措规则库将无法对常规采样部分的二次安全隔离措施进行自动生成。因此, 建立第三种模式智能变电站的二次安措自动生成系统将增大对二次标准安措库的依赖程度, 这也是下一阶段需要重点研究的工作。

附录 A

表 A1 待隔离 GOOSE 虚回路信息

Table 1 GOOSE virtual loop information to be isolated

序号	GOOSE 虚回路信息
1	(Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套保护', name='GOOSE:PM2201A'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PM2201A:220 kV 第一套 母差保护启动#1 主变失灵联跳 GOOSE 出口软压板 1LP76'), Node('DSP', desc='接收软压板', name='PT2201A:#1 主变 第一套 保护 220 kV 第一套母差失灵联跳 GOOSE 接收 软压板 1LP35'), Node('IEDs', desc='#1 主变第一套保护', name='GOOSE: PT2201A'))
2	(Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套保护', name='GOOSE:PM2201A'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PM2201A:220 kV 第一套 母差保护跳#1 主变 220 kV 开关 GOOSE 出口软压板 1LP60'), 'None', Node('IEDs', desc='#1 主变 220 kV 第一套智能终端', name='GOOSE:IT2201A'))

续表 A1

序号	GOOSE 虚回路信息
3	(Node('IEDs', desc='#1 主变第一套保护', name='GOOSE:PT2201A'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PT2201A:#1 主变 第一套 保护失灵启动 220 kV 第一套母差 GOOSE 发送 软压板 1LP11'), Node('DSP', desc='接收软压板', name='PM2201A:220 kV 第一套 母差保护#1 主变 220 kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83'), Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套保护', name='GOOSE: PM2201A'))
4	(Node('IEDs', desc='#1 主变 35 kV 第一套合智一体', name='GOOSE:IT3501A'), 'None', 'None', Node('IEDs', desc='35 kV 母分备自投装置', name='GOOSE: ZE3501'))
5	(Node('IEDs', desc='#1 主变第一套保护', name='GOOSE:PT2201A'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PT2201A:#1 主变 第一套 保护闭锁 35 kV 母分备自投 GOOSE 发送软压板 1LP27'), 'None', Node('IEDs', desc='35 kV 母分备自投装置', name='GOOSE: ZE3501'))
6	(Node('IEDs', desc='#1 主变第一套保护', name='GOOSE:PT2201A'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PT2201A:#1 主变 第一套 保护跳 110 kV I、II 段母分开关 GOOSE 出口软压板 1LP22'), 'None', Node('IEDs', desc='110 kV I、II 段母分合智一体', name='GOOSE: IE1101'))
7	(Node('IEDs', desc='#1 主变 220 kV 第一套智能终端', name='GOOSE:IT2201A'), 'None', 'None', Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套保护', name='GOOSE: PM2201A'))
8	(Node('IEDs', desc='110 kV 母线保护', name='GOOSE:PM1101'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='PM1101:110 kV 母差保护 跳#1 主变 110 kV 开关 GOOSE 出口软压板 1LP12'), 'None', Node('IEDs', desc='#1 主变 110 kV 第一套合智一体', name='GOOSE:IT1101A'))
9	(Node('IEDs', desc='35 kV 母分备自投装置', name='GOOSE: ZE3501'), Node('SSP', desc='发送软压板', name='ZE3501:35 kV 母分备自投 跳#1 主变 35 kV 开关 GOOSE 出口软压板 1LP4'), 'None', Node('IEDs', desc='#1 主变 35 kV 第一套合智一体', name='GOOSE:IT3501A'))

表 A2 待隔离 SV 虚回路信息

Table 2 SV virtual loop information to be isolated

序号	SV 虚回路信息
1	(Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套合并单元', name='SMV:MM2201'), 'None', 'None', Node('IEDs', desc='#1 主变 220 kV 第一套合并单元', name='SMV:MT2201A'))
2	(Node('IEDs', desc='#1 主变 110 kV 第一套合智一体', name='SMV:IT1101A'), 'None', Node('DSP', desc='接收软压板', name='PM1101:110 kV 母差保护 #1 主变 110 kV 开关电流 SV 接收软压板 1MLP4'), Node('IEDs', desc='110 kV 母线保护', name='SMV:PM1101'))
3	(Node('IEDs', desc='110 kV 母线第一套合并单元', name='SMV:MM1101'), 'None', 'None', Node('IEDs', desc='#1 主变 110 kV 第一套合智一体', name='SMV:IT1101A'))
4	(Node('IEDs', desc='#1 主变 220 kV 第一套合并单元', name='SMV:MT2201A'), 'None', Node('DSP', desc='接收软压板', name='PM2201A:220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关电流 SV 接收软压板 1MLP5'), Node('IEDs', desc='220 kV 母线第一套保护', name='SMV:PM2201A'))
5	(Node('IEDs', desc='#1 主变 35 kV 第一套合智一体', name='SMV:IT3501A'), 'None', Node('DSP', desc='接收软压板', name='ZE3501:35 kV 母分备自投#1 主变 35 kV 开关电压电流 SV 接收软压板 1MLP1'), Node('IEDs', desc='35 kV 母分备自投装置', name='SMV:ZE3501'))]

表 A3 主变本体及三侧开关检修下的二次安措表

Table A3 Secondary safety measures table for maintenance of transformer body and three side switches

序号	二次安措条文	执行优先级
1	退出 220 kV 第一套母差保护启动 #1 主变失灵联跳 GOOSE 出口 软压板 1LP76	运行·Y1·GOOSE· 虚回路
2	退出 220 kV 第一套母差保护跳#1 主变 220 kV 开关 GOOSE 出口 软压板 1LP60	运行·Y1·GOOSE· 虚回路
3	退出 220 kV 第一套母差保护#1 主变 220kV 开关失灵 GOOSE 接收软压板 1LP83	运行·Y1·GOOSE· 虚回路
4	退出 110 kV 母差保护跳#1 主变 110 kV 开关 GOOSE 出口软 压板 1LP12	运行·Y3·GOOSE· 虚回路

续表 A3

序号	二次安措条文	执行优先级
5	取下 35 kV 母差保护跳#1 主变 35 kV 开关出口压板 1C4LP1	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
6	退出 220 kV 第一套母差保护#1 主变 220 kV 开关电流 SV 接收 软压板 1MLP5	运行·Y1·SV·虚回路
7	退出 110 kV 母差保护#1 主变 110 kV 开关电流 SV 接收软压板 1MLP4	运行·Y3·SV·虚回路
8	退出 35 kV 母分备自投#1 主变 35 kV 开关电压电流 SV 接收软压板 1MLP1	运行·Y6·SV·虚回路
9	放上#1 主变 35 kV 开关 35 kV 母差 CT 大电流切换端子 4SD 短接螺丝, 取下连接螺丝	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
10	退出#1 主变第一套保护 220 kV 第一套母差失灵联跳 GOOSE 接收软压板 1LP35	检修·J1·GOOSE· 虚回路
11	退出#1 主变第一套保护失灵启动 220 kV 第一套母差 GOOSE 发送 软压板 1LP11	检修·J1·GOOSE· 虚回路
12	退出#1 主变第一套保护闭锁 35 kV 母分备自投 GOOSE 发送 软压板 1LP27	检修·J1·GOOSE· 虚回路
13	退出#1 主变第一套保护跳 110 kV I、 II段母分开关 GOOSE 出口 软压板 1LP22	检修·J1·GOOSE· 虚回路
14	退出#1 主变第一套保护跳 35 kV 母分 开关 GOOSE 出口软压板 1LP26	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
15	取下#1 主变非电量保护#1 主变 220 kV 开关第一组跳闸出口 压板 5C1LP1	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
16	取下#1 主变非电量保护#1 主变 110 kV 开关第一组跳闸出口 压板 5C1LP2	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
17	取下#1 主变非电量保护#1 主变 35 kV 开关跳闸出口压板 5C1LP3	根据二次标准安措票 补充常规部分安措
18	退出#1 主变 220 kV 第一套智能 终端的出口硬压板并拉开对应 控制电源空开	检修·J2·None·硬回路
19	拔出#1 主变 220 kV 第一套智能终端 至 220 kV 母线第一套保护的光纤	检修·J2·GOOSE· 硬回路
20	退出#1 主变 110 kV 第一套合智 一体的出口硬压板并拉开对应 控制电源空开	检修·J4·None·硬回路
21	退出#1 主变 35 kV 第一套合智一体 的出口硬压板并拉开对应控制 电源空开	检修·J5·None·硬回路
22	拔出#1 主变 35 kV 第一套合智一体 至 35 kV 母分备自投装置的光纤	检修·J5·GOOSE·硬回 路
23	投入#1 主变第一套保护检修硬压板	检修·J1·None·硬回路
24	投入#1 主变 220 kV 第一套智能 终端检修硬压板	检修·J2·None·硬回路
25	投入#1 主变 220 kV 第一套合并 单元检修硬压板	检修·J3·None·硬回路

续表 A3

序号	二次安措条文	执行优先级
26	断开 220 kV 第一套合并单元模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片	检修·J3·None·硬回路
27	投入#1 主变 110 kV 第一套合智一体	检修·J4·None·硬回路
28	断开#1 主变 110 kV 第一套合智一体模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片	检修·J4·None·硬回路
29	投入#1 主变 35 kV 第一套合智一体	检修·J5·None·硬回路
30	断开#1 主变 35 kV 第一套合智一体模拟量输入侧的 CT、PT 二次回路连接片	检修·J5·None·硬回路

参考文献

- [1] 董兴奎, 朱维政, 徐林, 等. 智能变电站继电保护安全措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [2] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视设计方案及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [3] 章剑光, 陈晓宇, 朱松涛, 等. 基于 GIM 模型的智能变电站二次回路三维可视化系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 179-187.
ZHANG Jianguang, CHEN Xiaoyu, ZHU Songtao, et al. Design of a three-dimensional visualization system for the secondary circuit of an intelligent substation based on a GIM model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 179-187.
- [4] 范卫东, 冯晓伟, 董金星, 等. 基于历史数据语义相似度的智能变电站虚端子自动连接[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 179-191.
FAN Weidong, FENG Xiaowei, DONG Jinxing, et al. Automatic matching method of a virtual terminal in intelligent substation based on semantic similarity of historical data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 179-191.
- [5] 张宸滔, 郑永康, 卢继平, 等. 基于图神经网络的智能变电站二次回路故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 81-90.
ZHANG Chentao, ZHENG Yongkang, LU Jiping, et al. Fault location of secondary circuits in a smart substation based on a graph neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 81-90.
- [6] 滕安. 基于 IEC61850 技术的智能变电站二次回路安全隔离措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
TENG An. The secondary circuit intelligent substation based on IEC61850 security isolation measures[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [7] 侯伟宏, 裘愉涛, 吴振杰, 等. 智能变电站继电保护 GOOSE 回路安全措施研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 143-148.
HOU Weihong, QIU Yutao, WU Zhenjie, et al. Study on GOOSE isolation measures in smart substation relay protection[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 143-148.
- [8] 胡绍谦, 李力, 朱晓彤, 等. 基于检修态切换的智能变电站保护装置检修辅助安全措施[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 242-247.
HU Shaoqian, LI Li, ZHU Xiaotong, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 242-247.
- [9] 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(6): 83-89.
- [10] 李杰, 李英昊, 张印宝, 等. 基于人工智能的监控信息事件化系统建设研究[J]. 供用电, 2022, 39(12): 17-27.
LIE Jie, LI Yinghao, ZHANG Yinbao, et al. Research on the construction of monitoring information event system based on artificial intelligence[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 17-27.
- [11] 郭炎福, 黄文英, 宋福海, 等. 基于专家系统的智能变电站二次检修安措票自动生成技术[J]. 电气技术, 2019, 20(4): 95-100.
GUO Yanfu, HUANG Wenying, SONG Fuhai, et al. Expert system based automatic generation technology for secondary safety measures of smart substation[J]. Electrical Technology, 2019, 20(4): 95-100.
- [12] 崔运光, 张帆, 刘孝刚, 等. 500 kV 变电站二次安措移动管控平台的研究与实践[J]. 电气技术, 2020, 20(4): 99-105.
CUI Yunguang, ZHANG Fan, LIU Xiaogang, et al. Research and practice of mobile control platform for secondary safety measures in 500 kV substation[J]. Electrical Technology, 2020, 20(4): 99-105.
- [13] 刘孝刚, 施琳, 张帆, 等. 智能变电站二次安措策略自动生成和在线校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 82-89.
LIU Xiaogang, SHI Lin, ZHANG Fan, et al. Automatic generation and online checking technology for secondary safety measures of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 82-89.

[14] 陈安伟, 王德林, 裘愉涛, 等. 智能变电站继电保护技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.

[15] EHRLINGER L, WÖB W. Towards a definition of knowledge graphs[J]. SEMANTiCS (Posters, Demos, SuCCESS), 2016, 48(1-4): 2.

[16] WANG Q, MAO Z D, WANG B, et al. Knowledge graph embedding: a survey of approaches and applications[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2017, 29(12): 2724-2743.

[17] SINGHA L A. Introducing the knowledge graph: things, not strings[EB/OL]. (2022-05-16) [2022-05-02]. <https://www.blog.google/products/search/introduction-knowledge-graph-things-not/>.

[18] 蒋川宇, 韩翔宇, 杨文蕊, 等. 医学知识图谱研究与应用综述[J]. 计算机科学, 2023, 50(3): 83-93.
JIANG Chuanyu, HAN Xiangyu, YANG Wenrui, et al. Survey of medical knowledge graph research and application[J]. Computer Science, 2023, 50(3): 83-93.

[19] 李飞. 基于知识图谱的问答系统研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
LI Fei. Research and implementation of question answering system based on knowledge graph[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.

[20] 武霁阳, 李强, 陈潜, 等. 知识图谱框架下基于深度学习的HVDC系统故障辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 160-169.
WU Jiyang, LI Qiang, CHEN Qian, et al. Fault identification of an HVDC system based on deep learning in the framework of a knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 160-169.

[21] 高旭, 马迎新, 王可, 等. 基于连通状态矩阵的智能变电站安措校核方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 195-202.
GAO Xu, MA Yingxin, WANG Ke, et al. Verification for security measures of smart substation based on communication state matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 195-202.

[22] 国家电网公司. 智能变电站继电保护和电网安全自动装置现场工作保安规定: Q/GDW11357—2014[S]. 2014.
State Grid Corporation of China. The standard on on-site work security of intelligent substation relay protection and power grid safety automatic devices: Q/GDW11357—2014[S]. 2014.

[23] 国家电网公司. 线路保护及辅助装置标准化设计规范: Q/GDW1161[S]. 2014.
State Grid Corporation of China. Standardization design specification for transmission line protection and auxiliary equipments: Q/GDW1161[S]. 2014.

[24] 国家电网公司. 变压器, 高压并联电抗器和母线路保护及辅助装置标准化设计规范: Q/GDW1175[S]. 2013.
State Grid Corporation of China. Standardization design specification for power transformer, high voltage shunt reactor, bus bar protection and auxiliary equipments: Q/GDW1175[S]. 2013.

[25] 国家电网公司. 变压器, 继电保护 IEC 61850 工程应用模型: GB/T32890—2016[S]. 2013.
State Grid Corporation of China. IEC 61850 engineering application model of relay protection: GB/T32890—2016[S]. 2013.

[26] 王子慕. 一种利用 TF-IDF 方法结合词汇语义信息的文本相似度量方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WANG Zimu. A method for text similarity measurement with TF-IDF and word semantic information[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[27] 国家电网公司. 智能站继电保护和电网安全自动装置现场工作保安规定: Q/GDW11357—2014[S]. 2014.
State Grid Corporation of China. The standard on on-site work security of intelligent substation relay protection and power grid safety automatic devices: Q/GDW11357—2014[S]. 2014.

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-08-25

作者简介:

俞伊丽(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: yy115958071807@126.com

张展耀(1992—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统、大数据分析; E-mail: zzyaoo@sina.com

接晓霞(1979—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为继电保护。E-mail: 13575607359@163.com

(编辑 许威)