

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240319

智能变电站继电保护二次虚回路失效风险动态识别技术

许家焰, 武芳瑛, 李瑞, 胡波涛

(北京四方继保工程技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 继电保护二次虚回路出现失效风险, 会给保护功能造成隐患, 影响继电保护系统安全可靠运行。为了解决该问题, 提出虚回路失效风险动态识别技术, 系统性预警虚回路失效风险, 及时发现虚回路故障。首先, 通过分析虚回路对象, 梳理虚回路显性缺陷和隐性缺陷, 构建二次虚回路失效风险预警技术架构。关键技术包含二次回路链路故障识别和二次回路功能故障识别。对于二次回路链路故障识别, 通过装置断链告警处理、端口光功率分析、光纤损耗评估等技术监测端口, 并通过判据监测异常报文。对于二次回路功能故障识别, 监测保护功能有关的跳合闸回路、检修压板状态、虚回路软压板状态。最后, 通过智能录波器的技术应用, 验证该技术可行、方法正确。该技术为继电保护智能运维在虚回路失效风险方面提供助力, 具备很好的实用价值。

关键词: 智能变电站; 继电保护; 二次虚回路; 失效风险; 智能录波器

Dynamic identification technology for the failure risk of the secondary virtual circuit of relay protection in an intelligent substation

XU Jiayan, WU Fangying, LI Rui, HU Botao

(Beijing Sifang Engineering Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The failure risk of the secondary virtual circuit of relay protection can cause hidden dangers to the protection function, affecting the safe and reliable operation of a relay protection system. To solve this problem, a dynamic identification technology for the virtual circuit failure risk is proposed, one which systematically gives alert to the virtual circuit failure risk and detects virtual circuit faults in time. First, by analyzing the virtual circuit object, and sorting out the explicit and implicit defects of the virtual circuit, a warning technical architecture of the failure risk is constructed. The key methods include the identification of secondary circuit link as well as functional faults. For the identification of secondary circuit link faults, using such techniques as device breakage alarm processing, port optical power analysis, and fiber loss evaluation, the ports are monitored, and using criteria the abnormal messages are monitored. For the identification of secondary circuit functional faults, protection functions on the tripping and closing circuits, the status of the maintenance plates, and the status of virtual circuit soft plates are monitored. Finally, through the use of an intelligent recorder, the feasibility of the techniques and the correctness of the methods are verified. The technology provides assistance for the intelligent operation and maintenance of relay protection in the failure risk of a virtual circuit, and has good practical value.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

Key words: intelligent substation; relay protection; secondary virtual circuit; failure risk; intelligent recorder

0 引言

继电保护是电力系统“三道防线”^[1]的第一道防线。电力系统在正常运行方式受到单一故障扰动后, 保护、开关及重合闸正确动作, 保持电力系统

稳定运行和电网的正常供电^[2], 是电网安全稳定运行的重要保障。继电保护二次回路问题^[3]会导致保护功能失效, 引发保护误动或拒动事故。智能变电站的二次回路主要依靠光纤和网络, 二次系统基于变电站配置描述文件(substation configuration description, SCD), 传统的端子已被“虚端子”取代^[4]。智能变电站光纤回路替代了电缆回路, 继电保护二次回路

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2401000)

变成了二次虚回路, 形态上发生了本质变化, 二次回路失效风险类型随之改变。

文献[5]提出一种基于连接状态定位的智能变电站二次系统故障定位方法, 通过矩阵算法和模糊径向基神经网络实现故障搜索定位。文献[6]建立二次设备失效故障树模型, 分析二次设备失效的概率, 为二次系统失效风险预警、状态检修提供辅助决策。文献[7]通过构建继电保护系统失效树, 定性分析故障引起的不可达信息, 判别其风险类型, 提出基于信息可达性的继电保护系统风险评估方法。

智能变电站二次回路的相关研究主要集中在以下方面: 1) 二次虚回路设计技术研究^[8-10], 实现虚回路自动连接, 解决虚端子连接易错问题; 2) 二次回路可视化技术研究^[11-13], 解决二次虚回路不可见问题; 3) 二次回路监视及故障诊断技术研究^[14-16], 解决二次虚回路链路状态监视及断链故障定位的问题; 4) 二次回路辅助安措技术研究^[17-20], 解决智能变电站二次虚回路出现后安措难度大的问题。

目前, 系统性研究智能变电站继电保护二次虚回路失效风险的文献较少, 尤其二次虚回路隐性缺陷预警的研究鲜有报道。本文分析二次虚回路失效风险, 梳理二次虚回路关键对象、显性缺陷和隐性缺陷, 提出二次虚回路失效风险动态识别技术架构, 研究二次回路链路故障识别和二次回路功能故障识别两方面的关键技术, 为继电保护智能运维在二次虚回路失效风险方面提供助力。

1 二次虚回路失效风险分析

1.1 二次虚回路关键对象

二次虚回路的物理载体是光纤实回路, 装置间物理连接实回路如图 1 所示。

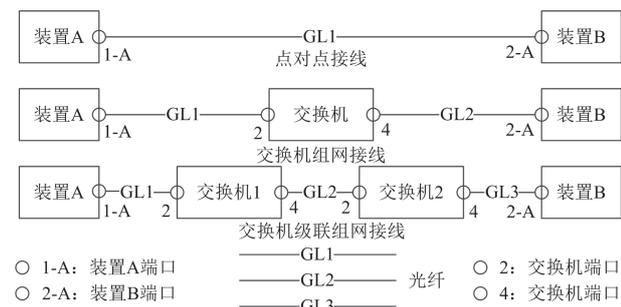


图 1 物理连接实回路

Fig. 1 Physical connection real circuit

图 1 中, 物理连接包括点对点接线、交换机组网接线、交换机级联组网接线, 装置间的通用面向对象变电站事件(generic object oriented substation

event, GOOSE)、采样值(sampled value, SV)通过光纤传输。二次虚回路关键对象包含光纤和光纤端口, 光纤端口由光模块硬件承载。光模块由光电子器件、光接口和功能电路等组成, 光电子器件包括发射和接收两部分^[21]。智能变电站采用的光模块通常为小型可插拔光模块(small form-factor pluggable, SFP)。

二次虚回路逻辑包含装置、虚端子及其连接线、控制虚端子有效性的虚回路软压板、检修压板。虚回路软压板类型包含 SV 接收软压板、GOOSE 接收软压板、GOOSE 发送软压板。因此, 二次虚回路关键对象还包含虚端子、虚回路软压板和检修压板。

二次虚回路关键对象出现缺陷或隐患, 会引起二次虚回路失效风险, 从而影响保护功能。根据缺陷的表现形式, 二次虚回路缺陷类型包括显性缺陷和隐性缺陷。

1.2 二次虚回路显性缺陷

当光缆或光模块出现故障, 装置间 GOOSE 和 SV 报文无法通信传输, 会导致保护功能失效。装置监测到报文通信链路异常, 装置本体会触发相应的链路中断告警信号, 显性通知二次虚回路存在缺陷。这种显性缺陷直接影响装置的正常运行, 缺陷等级属于严重缺陷, 需立即安排消缺工作, 排除二次虚回路失效风险。

二次虚回路显性缺陷如表 1 所示。

表 1 二次虚回路显性缺陷

Table 1 Dominant defect of secondary virtual circuit

对象名称	显性缺陷	缺陷等级
装置光纤端口	通信链路异常, 装置断链告警	严重缺陷

1.3 二次虚回路隐性缺陷

上述二次虚回路断链故障由装置直接显性给出告警信号, 二次虚回路还存在不少隐性缺陷不易发现, 即使有些隐性缺陷具有相关信号特征, 也无法显著定性二次虚回路存在问题, 给保护正常运行带来风险。分析二次虚回路关键对象, 梳理可能会引发二次虚回路失效风险的状态, 纳入二次虚回路隐性缺陷管理。

二次虚回路隐性缺陷如表 2 所示。

表 2 二次虚回路隐性缺陷

Table 2 Hidden defect of secondary virtual circuit

对象名称	隐性缺陷	缺陷等级
装置光纤端口	装置未断链告警, 但光模块或光纤异常	严重缺陷
虚端子	报文异常、跳合闸回路异常	严重缺陷
虚回路软压板	软压板运行方式不正确	异常缺陷
检修压板	检修压板运行方式不正确	异常缺陷

2 二次虚回路失效风险动态识别技术架构

二次虚回路失效风险动态识别, 基于可扩展的分层分对象架构, 将二次虚回路关键对象归类为二次回路链路对象和二次回路功能对象, 自下而上逐层对各对象数据进行分析处理, 通过二次回路链路故障识别和二次回路功能故障识别实现二次虚回路失效风险预警。技术架构如图 2 所示。

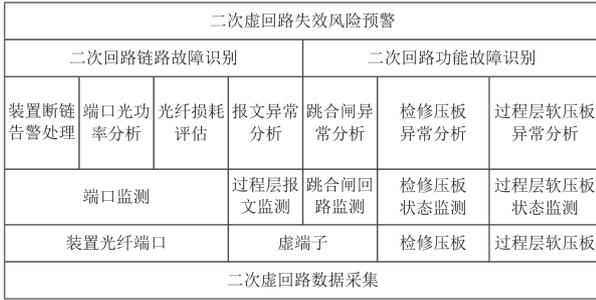


图 2 技术架构

Fig. 2 Technical architecture

3 二次虚回路失效风险动态识别关键技术

3.1 二次回路链路故障识别

1) 端口监测

SFP 数字诊断监控(digital diagnostic monitoring, DDM)技术让用户能够监控光模块的实时参数。这些参数包括工作温度 T_{emp} 、工作电压 V_{cc} 、偏置电流 I_{Tx_Bia} 、接收光功率 P_{Rx} 、发送光功率 P_{Tx} 等。

保护装置、测控装置、采集执行单元、智能终端、合并单元、交换机等二次设备光纤端口在线监测信号的主要配置情况如表 3 所示。

为了提高端口监测的全面性, 需要规范端口在线监测信号, 建议将表 3 选配信号改成必配信号, 增加端口偏置电流。

(1) 装置断链告警处理

装置断链告警信号由装置自诊断触发, 告警说明二次虚回路已发生失效故障, 但无法确认故障原因。装置断链告警主要用于二次虚、实回路可视化告警定位, 辅助二次回路故障快速排查。文献[22]基于广度优先搜索算法, 将二次物理链路与虚回路进行映射, 实现二次回路可视化展示, 通过 D-S 证据理论进行故障精确定位。但二次虚、实回路关联存在难度, 人工建模及配置工作量大。

从 SCD 文件自动获取二次实回路网络拓扑关系, 构建无固定根节点的二次实回路多叉树, 节点为二次设备, 类型包括装置和交换机, 节点连接线

为实回路。采用多叉树深度递归搜索算法, 使二次实回路快速关联虚回路, 流程如图 3 所示。

表 3 光纤端口在线监测信号

Table 3 Online monitoring signal of fiber optic port

编号	名称	类型	来源	配置说明
1	端口发送功率	遥测	DDM	必配, 二次设备都配置
2	端口接收功率	遥测	DDM	必配, 二次设备都配置
3	端口温度	遥测	DDM	选配, 交换机或个别装置配置
4	端口电压	遥测	DDM	选配, 仅交换机配置
5	端口偏置电流	遥测	DDM	无配置
6	端口输入速率	遥测	应用	选配, 仅交换机配置
7	端口输出速率	遥测	应用	选配, 仅交换机配置
8	SFP 模块故障	遥信	应用	选配, 仅交换机配置
9	断链告警	遥信	应用	必配, 二次设备都配置
10	端口状态	遥信	应用	选配, 仅交换机配置
11	端口发送功率越上限告警	遥信	应用	选配, 保护装置、测控装置等间隔层设备配置
12	端口发送功率越下限告警	遥信	应用	选配, 保护装置、测控装置等间隔层设备配置
13	端口接收功率越上限告警	遥信	应用	选配, 保护装置、测控装置等间隔层设备配置
14	端口接收功率越下限告警	遥信	应用	选配, 保护装置、测控装置等间隔层设备配置

(2) 端口光功率分析

监测端口发送和接收光功率, 能诊断光纤通信状况, 及时发现二次虚回路隐性缺陷。当光模块损坏、光纤折损或断裂、光纤插反、光纤插入不到位或未插入, 可快速判断光功率不在正常范围。在未触发装置断链告警时, 端口光功率限值判据是识别二次虚回路失效风险最简单实用的方法。

端口光功率限值判据如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_x > H \\ L \leq P_x \leq H, x=1,2,3 \\ P_x < L \end{cases} \quad (1)$$

式中: 越上限需判断 P_x 都大于上限值 H ; 越下限需判断 P_x 都小于下限值 L ; 正常仅需判断 P_x 其中一个在 $[L, H]$ 范围内。

进一步地, 采用端口光功率抖动判据和端口光功率趋势判据, 可对光纤通信状况进行缺陷预警, 提前发现二次虚回路失效风险, 尽早排查及处理光纤通信隐患。

端口光功率抖动判据如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{x-} = P_x - P_{x-1} \\ \Delta P_{x+} = P_{x+1} - P_x \end{cases} \quad (2)$$

式中: 抖动判据首先需计算绝对误差 ΔP_{x-} 、 ΔP_{x+} ;

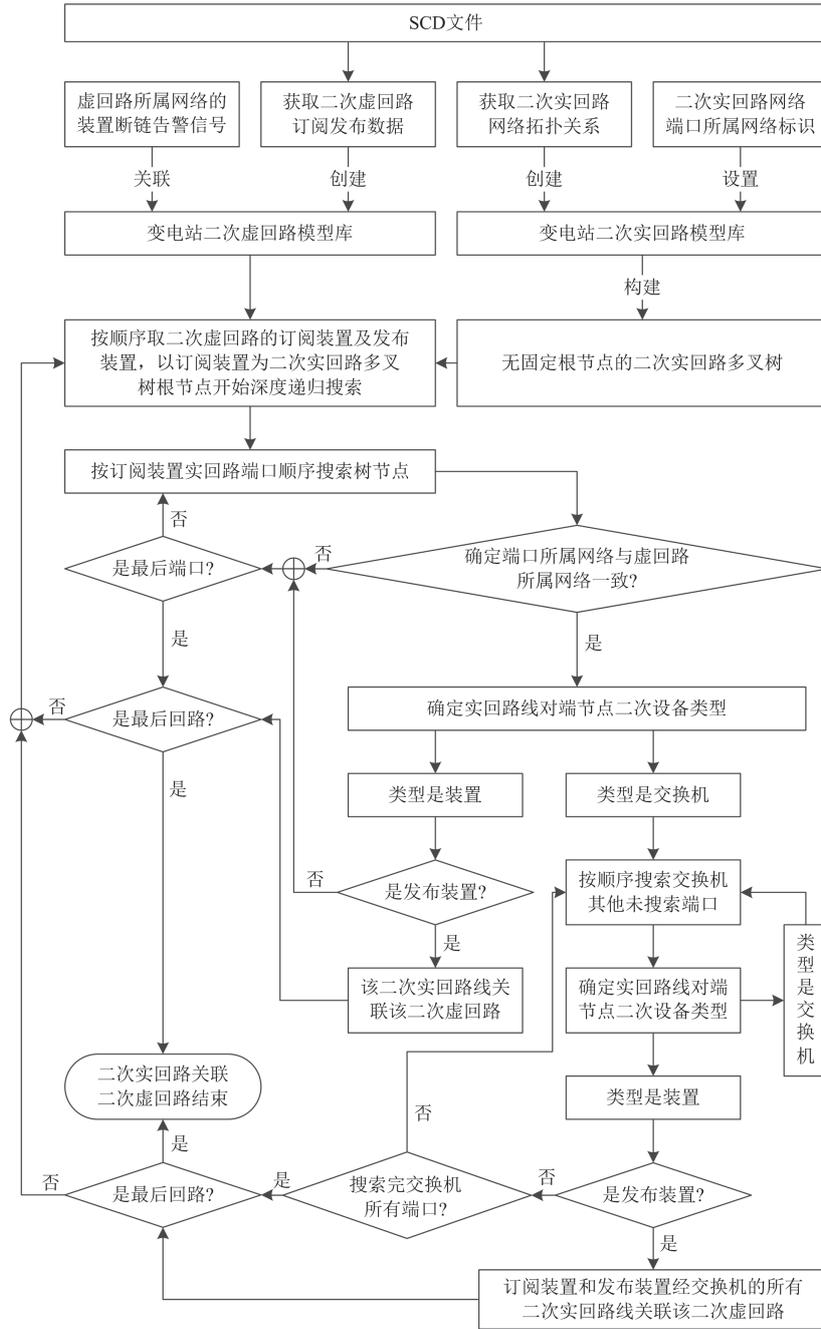


图3 二次实回路关联虚回路流程图

Fig. 3 Secondary real circuit associated virtual circuit flowchart

其次判断 ΔP_{x-} 与 ΔP_{x+} 异号作为光功率抖动条件;
 P_{x-1} 、 P_x 、 P_{x+1} 为 3 个连续等间隔采样点值。在满足抖动条件时, 计算抖动平均幅度 M_a 。

$$M_a = \frac{|\Delta P_{x-}| + |\Delta P_{x+}|}{2} > M_k \quad (3)$$

当 M_a 大于抖动幅度阈值 M_k 时, 表征端口光功率抖动异常, 需预警通知。

端口光功率趋势判据如式(4)所示。

$$k = \frac{\sum_{n=1}^m \frac{P_n(i)}{m} - \sum_{n=1}^m \frac{P_n(j)}{m}}{T_i - T_j}, i > j \quad (4)$$

趋势 k 通过第 i 天平均光功率 $\sum_{n=1}^m \frac{P_n(i)}{m}$ 和第 j 天平均光功率 $\sum_{n=1}^m \frac{P_n(j)}{m}$ 的差值, 以及时间 T_i 和 T_j 的差值计算获得, 其中 m 为一天的历史存储采样数。

当 $k > K_u$ ，判断向上趋势越限，向上趋势阈值 $K_u > 0$ ；当 $k < K_d$ ，判断向下趋势越限，向下趋势阈值 $K_d < 0$ ；否则趋势正常。向上趋势或向下趋势越限时，表征端口光功率趋势异常，需要预警通知。

同理，可采用上述判据对端口温度、端口电压、端口偏执电流等监测量进行分析，监测端口状态。

(3) 光纤损耗评估

在光模块正常情况下，通过光纤一端的端口发送功率 P_{Tx} 和另一端的端口接收功率 P_{Rx} ，计算光纤损耗率 P ，用于评估光纤损耗程度。

$$P = \frac{|P_{Rx} - P_{Tx}|}{|P_{Tx}|} > P_k \quad (5)$$

P 大于光纤损耗率阈值 P_k ，表征光纤损耗达到一定程度，将影响虚回路报文通信，需要预警通知。当出现光纤彻底断裂、光纤插反或未插入等情况， P_{Rx} 达到最小值时， P 则达到最大值。

进一步地，可用光纤功率损耗估算光纤可用时间。通过预估光纤的剩余使用时间，在光纤还未完全损坏时，可提前制定检修计划更换光纤。

定义初始时间 T_0 监测到的端口发送功率为 P_{Tx0} 、端口接收功率为 P_{Rx0} ，当前时间 T_1 监测到的端口发送功率为 P_{Tx1} 、端口接收功率为 P_{Rx1} ，计算初始功率损耗 ΔP_0 和当前功率损耗 ΔP_1 ，如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_0 = |P_{Rx0} - P_{Tx0}| \\ \Delta P_1 = |P_{Rx1} - P_{Tx1}| \end{cases} \quad (6)$$

计算单位时间内光纤损耗功率 ΔP_t ，如式(7)所示。

$$\Delta P_t = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_0}{T_1 - T_0} > 0 \quad (7)$$

假定功率损耗最大允许值为 ΔP_s ，可估算当前光纤可用时间 T_m 。

$$\begin{cases} T_m = \frac{\Delta P_s - \Delta P_1}{\Delta P_t}, & \Delta P_s \geq \Delta P_1 \\ T_m = 0, & \Delta P_s < \Delta P_1 \end{cases} \quad (8)$$

光纤实际使用总寿命为 T_k ，超过使用年限必须更换，光纤实际已使用时间为 T_r ，则可用时间 T_n 为

$$T_n = T_k - T_r \quad (9)$$

综合评估光纤可用时间 T 为 T_m 、 T_n 的最小值。

$$T = \min\{T_m, T_n\} \quad (10)$$

2) 报文监测

GOOSE 和 SV 报文传递装置二次虚回路信息，通过报文异常判据判断报文出现异常，预示二次虚回路存在失效风险，影响保护功能正常运行。

GOOSE 报文异常判据如表 4 所示。SV 报文异常判据如表 5 所示，其中，SVID 为 SV 控制块 ID。其他报文异常判据如表 6 所示。

表 4 GOOSE 报文异常判据

Table 4 Anomaly criterion of GOOSE message

名称	判据	条件	等级
格式错误	GOOSE 报文格式不符合规范	连续 3 min 满足判据或 10 天内累计 5 次满足判据	严重
断链	在 2 倍 GOOSE 报文存活时间内未收到相同 APPID 的 GOOSE 报文相同 APPID 的相邻 2 帧报文出现以下情况：	—	严重
丢帧	1) StNum 不变，SqNum 递增，但非加 1；2) StNum 变化且递增，但非加 1；3) StNum 加 1 且 SqNum 不为 0	60 min 内累计 3 次满足判据或 10 天内累计 5 次满足判据	严重
发送超时	相同 APPID 的相邻 2 帧序号连续且报文时间间隔超过 1 倍 GOOSE 报文存活时间	60 min 内累计 10 次满足判据	一般
错序	相同 APPID 的相邻 2 帧报文的 SqNum、StNum 非递增变化且非丢帧	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
重复	相同 APPID 的相邻 2 帧报文 SqNum、StNum 完全一致	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
重启	stNum 等于 1 且 sqNum 等于 1	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
配置不一致	报文的 dataSet、条目数、GoID、GoCRef、ConfRev、组播地址与 SCD 中相同 APPID 的模型配置不一致	—	严重
状态异常变化	相同 APPID 的相邻 2 帧报文 stNum 不变且 sqNum 递增，数据集包含的数据有变化	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
状态虚变	相同 APPID 的相邻 2 帧报文 stNum 递增且 sqNum 为 0，数据集包含的数据无变化	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
CCD 文件 CRC 码错误	装置发送的 CCD 文件 CRC 码与配置的 CRC 码不一致	—	严重

注：APPID 为应用标识符；StNum 为事件计数器；SqNum 为报文计数器；dataSet 为数据集名；GoID 为 GOOSE 控制块 ID；GoCRef 为 GOOSE 控制块引用；ConfRev 为配置版本。

表 5 SV 报文异常判据
Table 5 Anomaly criterion of SV message

名称	判据	条件	等级
格式错误	SV 报文格式不符合规范	连续 3 min 满足判据或 10 天内累计 5 次满足判据	严重
断链	超过 1 s 未收到相同 APPID 的 SV 报文	—	严重
丢帧	相同 APPID 的相邻 2 帧报文满足以下任意一种条件: 1) 采样计数器在 0~3999 内循环递增大于 1, 且接收时间间隔大于 1.5 倍的采样时间间隔; 2) 接收时间间隔大于 2 ms	60 min 内累计 3 次满足判据或 10 天内累计 5 次满足判据	严重
发送超时	相同 APPID 的相邻 2 帧报文同时满足以下 3 个条件: 1) 采样计数器在 0~3999 内循环递增 1; 2) 接收时间间隔超过 1.5 倍采样时间间隔; 3) 接收时间间隔小于 2 ms	60 min 内累计 10 次满足判据	一般
序号异常变化	相同 APPID 的相邻 2 帧报文出现采样计数器在 0~3999 内循环递增不为 1, 且接收时间间隔小于等于 1.5 倍采样时间间隔	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
重复	相同 APPID 的相邻 2 帧采样计数器一致	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
采样无效位变化	相同 APPID 的相邻 2 帧报文的采样无效位变化	—	一般
同步信号标志变化	相同 APPID 的相邻 2 帧报文的同步信号状态标志变化	—	一般
失步	合并单元组网方式下, 不同合并单元报文相同采样计数器的报文的接收时间相差 2 ms	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
抖动	合并单元点对点方式下, 合并单元报文发送间隔离散度超过 10 μs	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
双 AD 不一致	双 AD 采样数据的二次瞬时值之差大于 0.05I _n /0.05U _n	—	一般
配置不一致	报文的 dataSet(可选)、条目数、SVID、ConfRev、组播地址与 SCD 中相同 APPID 的模型配置不一致	—	严重
延时通道异常	延时通道值不在 1~2000 μs 范围内或发生变化	60 min 内累计 3 次满足判据	一般

表 6 其他报文异常判据

Table 6 Other message anomaly criterion

名称	判据	条件	等级
网络风暴	单个千兆监听端口报文接入流量超出 90 Mbps 或单个千兆监听端口报文接入流量超出 360 Mbps	—	严重
帧长异常	帧长小于 64 字节或帧长大于 1518 字节(包括 CRC)	60 min 内累计 3 次满足判据	一般
CRC 错误	报文的 CRC 值错误	60 min 内累计 3 次满足判据	一般

3.2 二次回路功能故障识别

1) 跳合闸回路监测

跳合闸回路信息由虚回路信息和保护信号组成, 文献[23]采用一种有效的预设跳合闸回路信号监测方法, 诊断跳合闸回路故障情况。但预设跳合闸回路信号属于配置过程, 其未说明具体的配置方法, 但通过人工配置工作量较大。为了进一步完善该方法, 开展跳合闸回路建模及监测研究。构建跳合闸回路模板, 根据模板从 SCD 文件创建跳合闸回

路模型, 预设跳合闸回路信号。以 220 kV 线路保护为例, A 相跳闸回路模板向量图如图 4 所示。

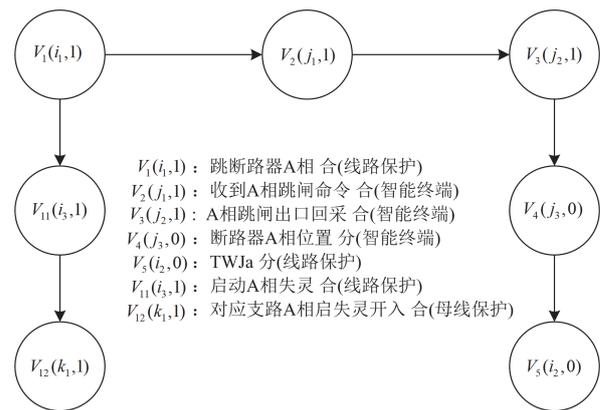


图 4 A 相跳闸回路模板向量图

Fig. 4 Vector diagram of A-phase trip circuit template

根据图 4 模板向量图, 采用描述字符快速匹配方法, 从 SCD 文件检索创建线路保护 I 的 A 相跳闸回路信号一维数组模型 $D_i(I)$ 和 A 相启动失灵回路信号一维数组模型 $D_j(I)$, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} D_i(I)=[V_1(i,1),V_2(j,1),V_3(j,1),V_4(j,0),V_5(i,0)] \\ D_i(I)=[V_1(i,1),V_{11}(i,1),V_{12}(k_1,1)] \end{cases} \quad (11)$$

$s(i,1)$ 表示装置*i*的信号*i_i*值为1时的状态,其他符号同理,仅装置、信号及值不同,具体含义见图4。当保护*I*发生A相跳闸时,监测保护跳闸信号,在规定时间窗口内检测*D_i(I)*和*D_i(I)*集合中节点数据完整性,分析保护跳闸回路和启失灵回路的正确性,验证二次虚回路是否有失效风险。

2) 检修压板状态监测

当一次设备运行时,必须要求保护投入,双重化配置可允许一套保护临时带电检修,但至少确保一套保护投入。具备二次虚回路关系的同一套保护和智能终端等装置的检修压板状态不一致时,将会给二次虚回路带来风险,影响保护功能正常运行。实时监测一次设备运行时检修压板状态,如有检修压板投入,需要预警二次虚回路失效风险。

220 kV 线路间隔状态定义如表 7 所示。

表 7 220 kV 线路间隔状态定义

Table 7 Definition of 220 kV line bay's state

状态名称	开关	相连刀闸	相连接地刀闸	电流
运行	合上	合上	拉开	有流
热备用	断开	合上	拉开	无流
冷备用	断开	拉开	拉开	无流
检修	断开	拉开	合上	无流

构建线路间隔*X*的一次设备运行状态信号模型*S_r(X)*,如式(12)所示。

$$\begin{cases} S_r(X)=W_r(X) \& \& K_r(X) \& \& G_r(X) \& \& H_r(X) \\ W_r(X)=s_1(x_1,1) \\ K_r(X)=(s_2(x_2,1) \parallel s_3(x_3,1)) \& \& s_4(x_4,1) \\ G_r(X)=s_5(x_5,0) \& \& s_6(x_6,0) \& \& s_7(x_7,0) \\ H_r(X)=(I_A(y_a) > Z) \& \& (I_B(y_b) > Z) \& \& (I_C(y_c) > Z) \end{cases} \quad (12)$$

式中:*S_r(X)*由开关合位*W_r(X)*、相连刀闸合位*K_r(X)*、相连接地刀闸*G_r(X)*分位、电流*H_r(X)*有流与逻辑组成。其中,*K_r(X)*为双母接线时,两个母线刀闸合位或逻辑,再和线路侧刀闸合位与逻辑;*G_r(X)*为3个接地刀闸分位与逻辑;*H_r(X)*表示三相电流*y_a*、*y_b*、*y_c*均有流;*Z*为判断有流的死区值。

构建线路间隔*X*的保护投入状态检修压板信号模型*R_r(X)*,如式(13)所示。

$$\begin{cases} R_r(X)=I_1(X) \parallel I_2(X) \\ I_1(X)=u_1(d_1,0) \& \& u_2(d_2,0) \\ I_2(X)=u_3(d_3,0) \& \& u_4(d_4,0) \end{cases} \quad (13)$$

式中:允许双重配置一套退出运行,*R_r(X)*由第一套装置检修压板退出*I₁(X)*、第二套装置检修压板退出*I₂(X)*或逻辑组成,*I₁(X)*为第一套保护和智能终端的检修压板退出与逻辑,*I₂(X)*为第二套保护和智能终端的检修压板退出与逻辑。

因此,*S_r(X)*为真时,*R_r(X)*为真表征装置检修压板状态与线路运行状态匹配,*R_r(X)*为假则需要预警二次虚回路失效风险。

3) 虚回路软压板状态监测

一、二次设备正常运行时,误退保护虚回路软压板会影响保护功能,造成二次虚回路失效风险。实时监测虚回路软压板状态,可构建间隔*X*的虚回路软压板运行状态信号模型*Y_r(X)*实现。

$$\begin{cases} Y_r(X)=(I_1(X) \& \& U_1(X)) \parallel (I_2(X) \& \& U_2(X)) \\ U_1(X)=s_{11}(x_{11},1) \& \& s_{12}(x_{12},1) \& \& s_{1i}(x_{1i},1) \\ U_2(X)=s_{21}(x_{21},1) \& \& s_{22}(x_{22},1) \& \& s_{2i}(x_{2i},1) \end{cases} \quad (14)$$

如有双重配置,*Y_r(X)*由第一套装置检修压板退出*I₁(X)*和第一套保护软压板投入*U₁(X)*与逻辑,与第二套装置检修压板退出*I₂(X)*和第二套保护软压板投入*U₂(X)*与逻辑再执行或逻辑组成。其中,*U₁(X)*由第一套保护的*i*个软压板投入*s_{1i}(x_{1i},1)*与逻辑组成,*U₂(X)*由第二套保护的*i*个软压板投入*s_{2i}(x_{2i},1)*与逻辑组成。

因此,*S_r(X)*为真时,*Y_r(X)*为真表征保护虚回路软压板运行状态正常,*Y_r(X)*为假则需要预警二次虚回路失效风险。

4 技术应用

4.1 二次虚实回路关联

建立二次实回路网络拓扑,如图5所示,以此网络拓扑连接关系作为示例,验证二次实回路快速关联二次虚回路方法。

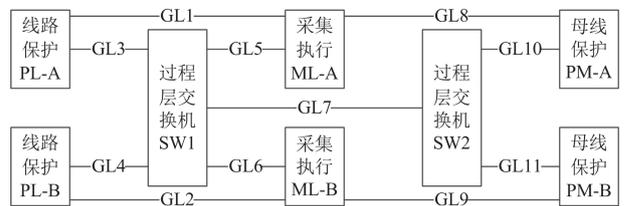


图 5 二次实回路网络拓扑

Fig. 5 Network topology of secondary real circuit

梳理图5所含装置订阅发布虚回路控制块的信息,如表8所示。列标题为订阅装置,行标题为发布装置,PL代表线路保护、ML代表采集执行单元、

PM 代表母线保护, A 代表 A 套, B 代表 B 套, 表格内容含有装置订阅发布的虚回路控制块名。

表 8 二次虚回路信息

Table 8 Secondary virtual circuit information

	PL-A	PL-B	ML-A	ML-B	PM-A	PM-B
PL-A		—	GO1	—	GO1	—
PL-B	—		—	GO2	—	GO2
ML-A	GO3/SV1	—	—	—	GO3/SV1	—
ML-B	—	GO4/SV2	—	—	—	GO4/SV2
PM-A	GO5	—	GO5	—	—	—
PM-B	—	GO6	—	GO6	—	—

根据图 5 构建无固定根节点的二次实回路多叉树, 采用二次实回路快速关联虚回路方法的关联效果如图 6 所示。

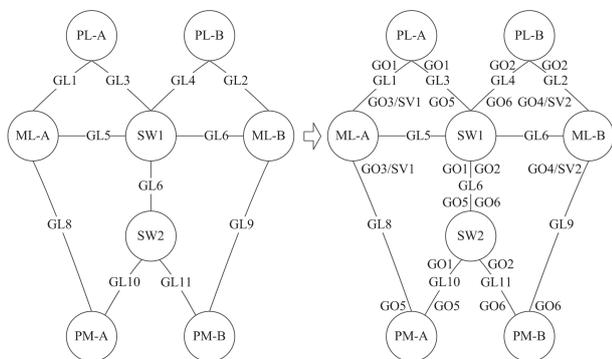


图 6 二次实回路多叉树关联虚回路
Fig. 6 Secondary real circuit multiple-tree associated virtual circuit

进一步地, 在实回路关联虚回路时, 虚回路同步反向关联实回路, 可扩展二次虚实回路可视化及故障诊断定位的应用。

4.2 端口光功率分析

应用端口光功率限值判据时, 光功率限值设置可参考表 9。

表 9 光功率限值

Table 9 Optical power limit

光模块	测点名称	类别	限值
百兆	光功率	发送 上限	-14 dBm
		接收 下限	-20 dBm
光口	光功率	发送 上限	-14 dBm
		接收 下限	-31 dBm
千兆	光功率	发送 上限	-3 dBm(1310 nm), -2.5 dBm(850 nm)
		接收 下限	-11.5 dBm(1310 nm), -9 dBm(850 nm)
光口	光功率	发送 上限	-3 dBm(1310 nm), -2.5 dBm(850 nm)
		接收 下限	-19 dBm(1310 nm), -18 dBm(850 nm)

为了保证端口光功率分析的实时性, 可采取间隔 1 min 采样进行光功率限值判断和抖动异常判

断。以装置常用的百兆光口为例, 限值设置如表 9 所示, 抖动幅度阈值取 0.2 dBm, 在仿真实验室环境模拟一个光纤端口的一次抖动异常和拔掉光纤后接收光功率越下限异常数据, 如表 10 所示。

表 10 实时光功率分析结果

Table 10 Real time optical power analysis results

时间	光功率	实时值/dBm	限值判据	抖动判据
10:30:00	发送光功率	-16.56	正常	—
	接收光功率	-17.42	正常	—
10:31:00	发送光功率	-16.58	正常	正常
	接收光功率	-17.63	正常	异常
10:32:00	发送光功率	-16.57	正常	正常
	接收光功率	-17.43	正常	正常
10:33:00	发送光功率	-16.57	正常	正常
	接收光功率	-40.00	正常	正常
10:34:00	发送光功率	-16.57	正常	正常
	接收光功率	-40.00	正常	正常
10:35:00	发送光功率	-16.57	正常	正常
	接收光功率	-40.00	越下限	正常

端口光功率趋势判据可设置间隔 15 min 存储一次历史数据, 一天存储 96 个采样值, 时间单位为天, 向上趋势阈值设置为 0.2 dBm/天, 向下趋势阈值设置为-0.2 dBm/天。在当天零点计算前一天光功率平均值, 为了更可靠、更精准地进行光功率趋势判断, 每天零点计算一次前两天的光功率趋势, 每周一零点计算一次前两个周一的光功率趋势, 每月 1 日零点计算一次前两月 1 日的光功率趋势, 每年 1 月 1 日零点计算一次前两年 1 月 1 日的光功率趋势。

4.3 光纤损耗评估

假定光纤损耗率阈值 P_k 为 0.2, 功率损耗最大允许值 ΔP_s 为 12 dBm, 实际使用总寿命 T_k 为 7300 天, 在仿真实验室环境模拟一根光纤数据, 每天评估一次光纤损耗, 损耗评估结果统计如表 11 所示。

表 11 光纤损耗评估结果

Table 11 Fiber loss assessment results

时间/天	功率类型	功率值/dBm	功率损耗/dBm	单位损耗/(dBm/天)	损耗率	剩余/天
0	发送	-16.3344	0.9609	—	0.0588	7300
	接收	-17.2953				
100	发送	-16.3525	1.1081	0.0015	0.0678	7200
	接收	-17.4606				
200	发送	-16.3617	1.2741	0.0016	0.0779	6849
	接收	-17.6358				
300	发送	-16.3621	1.4364	0.0016	0.0878	6664
	接收	-17.7985				
400	发送	-16.3735	3.5589	0.0065	0.2174	1299
	接收	-19.9324				
410	发送	-16.3735	23.6265	0.0553	1.4430	0
	接收	-40.00				

4.4 报文监测

根据报文异常判据分析报文, 诊断报文异常缺陷, 触发报文异常告警信号, 提示二次虚回路失效风险, 保存异常报文数据用于历史追溯。在二次虚回路可视化界面以黄色虚回路连接线表征虚回路报文异常, 通过虚回路连接线打开虚回路告警框提示报文异常告警信号, 如图 7 所示。

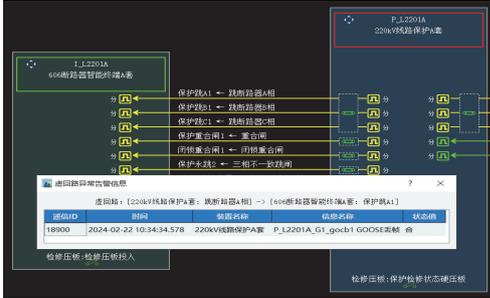


图 7 二次虚回路报文异常告警展示

Fig. 7 Display of abnormal alarms in secondary virtual circuit messages

4.5 跳合闸回路监测

通过跳合闸回路模板从 SCD 文件创建跳合闸回路模型, 自动配置 220 kV 线路保护预设跳合闸回路信号, 如表 12 所示。

表 12 220 kV 线路保护跳合闸回路信号

Table 12 220 kV line protection tripping and closing circuit signal

信号类型	跳合闸信号	返校信号	信号装置	值
A 相跳闸	跳断路器 A 相	收到保护跳 A 命令	智能终端	合
		A 相跳闸出口回采	智能终端	合
		断路器 A 相位置	智能终端	分
		分相跳闸位置 TWJa	线路保护	合
		启动 A 相失灵	线路保护	合
		支路 6 A 相启动失灵开入	母线保护	合
B 相跳闸	跳断路器 B 相	收到保护跳 B 命令	智能终端	合
		B 相跳闸出口回采	智能终端	合
		断路器 B 相位置	智能终端	分
		分相跳闸位置 TWJb	线路保护	合
		启动 B 相失灵	线路保护	合
		支路 6 B 相启动失灵开入	母线保护	合
C 相跳闸	跳断路器 C 相	收到保护跳 C 命令	智能终端	合
		C 相跳闸出口回采	智能终端	合
		断路器 C 相位置	智能终端	分
		分相跳闸位置 TWJb	线路保护	合
		启动 C 相失灵	线路保护	合
		支路 6 C 相启动失灵开入	母线保护	合
重合闸	重合闸	收到保护三合命令	智能终端	合
		A 相合闸出口回采	智能终端	合
		断路器 A 相位置	智能终端	合
		分相跳闸位置 TWJa	线路保护	分
		B 相合闸出口回采	智能终端	合
		断路器 B 相位置	智能终端	合
		分相跳闸位置 TWJb	线路保护	分
		C 相合闸出口回采	智能终端	合
		断路器 C 相位置	智能终端	合
分相跳闸位置 TWJc	线路保护	分		

4.6 检修压板状态监测

以 220 kV 线路间隔为例, 根据表 7 判断线路间隔处于运行态时, 二次设备的检修压板状态监测结果如表 13 所示。

表 13 检修压板状态监测结果

Table 13 Monitoring results of maintenance plate status

保护 A 压板	智能终端 A 压板	保护 B 压板	智能终端 B 压板	结果
退出	退出	退出	退出	正常
投入	投入	退出	退出	正常
退出	退出	投入	投入	正常
投入	投入	投入	投入	告警
退出	投入	退出	投入	告警
投入	退出	投入	退出	告警

4.7 虚回路软压板状态监测

以 220 kV 线路间隔为例, 根据表 7 判断线路间隔处于运行态时, 需要第一套或第二套装置检修压板全部退出, 第一套或第二套保护虚回路软压板全部投入。虚回路软压板状态监测结果如表 14 所示。

表 14 虚回路软压板状态监测结果

Table 14 Monitoring results of virtual circuit soft plate status

第一套 检修压板	第一套虚回路 软压板	第二套 检修压板	第二套虚回路 软压板	结果
退出	投入	退出	投入	正常
退出	投入	投入	退出	正常
投入	退出	退出	投入	正常
投入	退出	投入	退出	告警
投入	投入	投入	投入	告警
退出	退出	退出	退出	告警

5 结论

二次虚回路失效风险会造成继电保护系统保护功能失效, 严重影响继电保护系统安全可靠运行。二次虚回路失效风险动态识别技术能系统性识别二次虚回路失效风险, 及时发现二次虚回路失效故障。根据二次虚回路失效风险动态识别技术架构, 从二次回路链路故障识别和二次回路功能故障识别两方面, 实现装置断链告警处理、端口光功率分析、光纤损耗评估、报文监测、跳合闸回路监测、检修压板状态监测、虚回路软压板状态监测等, 动态识别二次虚回路显性缺陷和隐性缺陷。通过智能录波器技术应用实现, 验证了技术可行、方法正确, 为继电保护智能运维在虚回路失效风险方面提供助力, 具备很好的实用价值。

参考文献

[1] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.

- WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(6): 10-20.
- [2] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Technical Committee for Standardization for National Power Grid Operation and Control. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [3] 董睿. 继电保护二次回路问题连带故障处理与预防[J]. *光源与照明*, 2023(5): 198-200.
- [4] 车兵, 许家焰, 徐晓春, 等. 智能变电站二次检修安措防误技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 150-156.
CHE Bing, XU Jiayan, XU Xiaochun, et al. Research of secondary maintenance safety measures error proofing technology in smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 150-156.
- [5] 李远, 苏适, 杨家全, 等. 基于连接状态定位的智能变电站二次系统故障定位方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(2): 63-70.
LI Yuan, SU Shi, YANG Jiaquan, et al. Fault location method for intelligent substation secondary system based on connection state location[J]. *Smart Power*, 2024, 52(2): 63-70.
- [6] 杨庆, 朱道华. 智能变电站二次系统失效风险评估方法[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2): 179-185.
YANG Qing, ZHU Daohua. The equipment failure assessment on the secondary system in smart substation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2): 179-185.
- [7] 郭采珊, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 基于信息可达性的智能变电站继电保护系统风险评估方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 3041-3048.
GUO Caishan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Risk assessment for protection system in smart substation considering information reachability[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 3041-3048.
- [8] 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.
- [9] 李嘉, 饶丹, 李耕, 等. 基于典型间隔模板的智能变电站虚端子自动连接方法[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(4): 157-163.
LI Jia, RAO Dan, LI Geng, et al. Automatic connection method of virtual terminator in smart substation based on typical bay template[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(4): 157-163.
- [10] 戴志辉, 邱小强, 耿宏贤, 等. 基于相似度匹配的智能变电站虚端子连接准确性判断方法[J]. *华北电力大学学报*, 2021, 48(3): 32-38, 56.
DAI Zhihui, QIU Xiaoqiang, GENG Hongxian, et al. An approach to judge veracity of virtual terminal connection in smart substations based on similarity matching[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2021, 48(3): 32-38, 56.
- [11] 严鹏飞, 李俊娥, 周斌, 等. 基于电力图形描述规范的智能变电站网络通信可视化方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8): 91-97.
YAN Pengfei, LI Jun'e, ZHOU Bin, et al. Network communication visualization of smart substation based on graphic description specification for electric power system[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8): 91-97.
- [12] 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.
- [13] 徐岩, 单肄超. 基于 SCD 文件的智能变电站二次回路可视化[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(3): 69-76.
XU Yan, SHAN Yichao. Visualization of secondary circuit of smart substation based on SCD file[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2021, 48(3): 32-38, 56.
- [14] 董怀普, 王位杰, 刘文彪, 等. 基于深度搜索的二次虚实回路融合故障诊断技术[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 219-223.
DONG Huaipu, WANG Weijie, LIU Wenbiao, et al. Fault diagnosis technology of secondary virtual loop and physical fiber loop fusion based on depth first search[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 219-223.
- [15] 张宸滔, 郑永康, 卢继平, 等. 基于图神经网络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.

[16] 池招荣, 覃显南, 樊云鹏, 等. 智能变电站二次回路在线监测与故障诊断技术研究与应用[J]. 电工技术, 2022(14): 164-166.
CHI Zhaorong, QIN Xiannan, FAN Yunpeng, et al. Research and application of on-line monitoring and fault diagnosis technology of secondary circuit in intelligent substation[J]. Electric Engineering, 2022(14): 164-166.

[17] WU Jie, LIU Mingzhong, ZHENG Yongkang, et al. Research on automatic generation technology for secondary equipment of security measures of smart substation[C] // 2018 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), May 29-June 1, 2018, Kajang, Malaysia: 223-227.

[18] 胡绍谦, 李力, 朱晓彤, 等. 基于检修态切换的智能变电站保护设备检修辅助安全措施[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 242-247.
HU Shaoqian, LI Li, ZHU Xiaotong, et al. Auxiliary safety measures of protection relay in smart substation based on switching of maintenance states[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 242-247.

[19] 黄文英, 郭炎福, 宋福海. 图论在智能变电站二次安全措施中的应用探索[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 291-300.
HUANG Wenying, GUO Yanfu, SONG Fuhai. Application of graph theory in safety measures of secondary system in smart substation[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 291-300.

[20] 俞伊丽, 张展耀, 接晓霞, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 129-142.
YU Yili, ZHANG Zhanyao, JIE Xiaoxia, et al. Automatic generation technology of secondary safety measures in an intelligent substation based on a knowledge graph and SCD files[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 129-142.

[21] 王之浩. SFP 光通信模块的基础组件技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
WANG Zhihao. Research on basic component technology of small form-factor pluggable optical communication module[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

[22] 钟鸣, 陶军, 刘洵宇, 等. 智能变电站光纤虚实回路映射及故障诊断技术[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 171-178.
ZHONG Ming, TAO Jun, LIU Xunyu, et al. Smart substation optical fiber virtual and real loop mapping and fault diagnosis technology[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 171-178.

[23] 黄国平, 许家焰, 陈锦荣, 等. 继电保护远方不停电检验系统设计及工程化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 152-159.
HUANG Guoping, XU Jiayan, CHEN Jinrong, et al. Design and engineering application of a remote intelligent test system for relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 152-159.

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-06

作者简介:

许家焰(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、二次智能运维技术; E-mail: xujiayan@sf-auto.com

武芳瑛(1973—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、二次智能运维技术; E-mail: wufangying@sf-auto.com

李瑞(1985—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、二次智能运维技术。E-mail: lirui@sf-auto.com

(编辑 周金梅)