

# 基于深度搜索的二次虚实回路融合故障诊断技术

董怀普,王位杰,刘文彪,纪陵,骆兆军,芮国俊

(南京国电南自电网自动化有限公司,江苏 南京 211153)

**摘要:**为了解决在智能变电站运维和检修中,二次虚回路可视化展示、回路监测和诊断出现的问题,构建智能变电站二次虚回路综合监视技术体系。设计软压板与虚回路配置规则,将软压板对象状态监测作为虚回路监测的一部分。提出基于邻接表存储物理光纤回路,基于深度优先搜索算法实现过程层设备物理拓扑链接关系。同时基于深度搜索故障推理算法诊断和定位故障区域,满足智能变电站二次设备运维新的应用需求。

**关键词:**智能变电站;虚回路;物理光纤回路;邻接表;深度优先搜索;故障推理

**中图分类号:**TM 912

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.033

## 0 引言

智能变电站相关技术的日益完善为继电保护的运维提供了新的思路和技术手段。和常规变电站相比,智能变电站体现了信号二次回路数字化、设备信息模型化和信息传输网络化等特点<sup>[1]</sup>。传统二次回路是基于点对点电缆信息传输,智能变电站过程层的网络化极大地简化了常规变电站复杂的二次回路。系统配置描述文件 SCD(Substation Configuration Description)包含了整个变电站二次设备模型、工程回路配置信息,是变电站设备运行、日常运维、工程管理依赖的重要依据<sup>[2-5]</sup>,为智能变电站运维带来了便利。但同时,运维和检修人员在智能变电站网络的条件下,面对海量链路告警数据往往无所适从,二次虚回路与物理链路的拓扑关系相对也不明确,当回路发生故障时,如何快速定位故障点,是智能变电站运维急需解决的问题。

近年来,国内外针对智能变电站运维的相关技术进行了研究。文献[6]运用宏观图直观显示了各设备之间虚端子的关系,但是缺少发送软压板和接收软压板与虚回路之间的关系。文献[7]提出采用二次设备功耗数据进行二次设备状态监测及多数据信息源相关关联监测的方法,但未监测过程层二次设备链路状态。文献[8]提出一种应用 G 语言表达继电保护逻辑图的方法,并提出可视化分析继电保护故障方案,但未分析设备之间的链路状态故障。

目前,智能变电站二次设备运维技术相对发展滞后,特别是在智能变电站的二次虚回路的监测、诊断等方面还缺乏相对完善的技术体系。因此,有必要开展智能变电站二次虚回路运维管理技术体系和支撑技术的研究,分析状态信息之间的关联关系,实现对虚回路和物理光纤回路的状态监视和故障诊断定位,减少运维的工作量。本文从物理光纤回路和虚回路的设计配置、运行监视、故障诊断等环节开展研究,为智能变电站的运维和管控提供技术支持。

## 1 总体架构设计

本文提出的二次物理光纤回路和虚回路运维管理技术体系如附录中的图 A1 所示,其主要由数据采集单元和数据管理单元 2 个功能模块组成,具有二次回路的可视化展示、回路的监视和诊断功能。数据采集单元通过过程层网络获取过程层设备数据;数据管理单元部署在 I 区,从数据采集单元和站控层网络获取数据,进行数据的分析处理。信息采集范围涵盖合并单元、保护装置、智能终端、安全自动装置、过程层交换机及构成保护系统的二次联接回路。

过程层网络分为装置与装置直采/直跳方式和通过交换机进行组网方式,对于直采/直跳方式,需要将二次设备之间传输的数据也通过镜像端口将数据发送到交换机,数据采集单元直接从交换机上采集过程层数据。

## 2 自动生成虚回路可视化展示技术

### 2.1 虚回路发布订阅及发送接收软压板关系

智能变电站二次虚回路通过二次设备物理发送端口、接收端口、交换机、物理光纤等传送采样值 SV(Sampled Value)和面向通用对象的变电站事件 GOOSE(Generic Object Oriented Substation Events)报文,实现 SV 数据和开关量信号的传输<sup>[9]</sup>。二次设备通过 SV 控制块和 GOOSE 控制块发布内部数据,通过 Inputs/ExtRef 订阅所需要接入的外部数据<sup>[10]</sup>,形成二次设备内部订阅的数据和外部发布的数据之间的映射关系。根据接收虚端子的引用名区分 SV 链路和 GOOSE 链路,如果是 SNIN 前缀则为 SV 链路,如果是 GOIN 前缀链路则是 GOOSE 链路。

保护装置存在 GOOSE 软压板和 SV 软压板,GOOSE 软压板包括 GOOSE 接收软压板和 GOOSE 发送软压板,SV 软压板为交流采样接收软压板。只有当接收软压板投入时,所关联通道上送的数据才能被处理;只有当发送软压板投入时,所关联通道上

的数据才能发送出去,软压板与回路相关,将软压板作为虚回路监测的一部分。

## 2.2 软压板建模技术研究

### 2.2.1 发送软压板特征分析

智能变电站 GOOSE 出口软压板按跳闸、启动失灵、闭锁重合、合闸、远传等重要信号在 PTRC、RBRF、RREC、PSCH 等逻辑节点(LN)中统一添加 strap 后缀扩充出口软压板,从逻辑上隔离相应信号输出。当出口软压板设置为 1 时,保护动作信号相应数据位反映信号输出的实际状态;当出口软压板设置为 0 时,保护动作信号相应数据位始终为 0。

保护模型中对跳闸的每个断路器各使用 1 个 PTRC 实例,跳闸逻辑节点 PTRC 的动作信号 Op 是产生跳闸信号 Tr 的条件,Str 为保护启动信号,Op 为保护动作信号,Tr 为跳闸出口信号。针对保护装置的回路主要包括跳闸回路、合闸回路和失灵回路,虚回路与压板对应映射关系为:

a. 跳断路器跳闸(A、B、C 三相)Tr → 跳闸软压板 TrStrp;

b. 闭锁重合闸 BlkRecST → 闭锁重合闸软压板 BlkRecStrp;

c. 重合闸 OP → 重合闸软压板 OpStrp;

d. 启动断路器失灵(A、B、C 三相)StrBF → 启动失灵软压板 StrBFStrp。

在对应关系中,站控层和过程层存在相对应的逻辑节点模型,在 2 个访问点中模型和状态关联一致,具有相同的对象实例号,通过关联规则可获取虚回路和发送软压板对象对应关系。

### 2.2.2 接收软压板建模分析

为简化保护装置之间、保护装置和智能终端之间的 GOOSE 软压板,除母线设置启动失灵/失灵联跳接收软压板外,接收端不设相应的 GOOSE 接收软压板。GOOSE 输入信号由保护动作开关量输入信号和接收软压板数据对象共同决定。当接收软压板为投入状态时,接收装置处理接收的数据;当接收软压板为退出状态时,接收装置不再处理 GOOSE 报文的数据内容。

GOOSE、SV 接收软压板采用 GGIO.SPCSO 建模,由于从模型对象上无法确定开入回路和软压板对象的映射关系,本文提出将接收压板模型对象与开入信号进行建模绑定,通过在压板 DOI 对象下增加私有元素信息 Private,建立接收压板与虚回路映射关系,格式为:

```
<DOI desc="间隔接收软压板" name="SPCSO2">
  <DAI/> .....
  <Private type="InnerSignalRef">PIGO/GOINGGI O1.
  DPCS03.stVal</Private>
</DOI>
```

InnerSignalRef 表示接收软压板与开入信号关联

绑定,PIGO/GOINGGI01.DPCS03.stVal 为开入信号的地址,通过设置虚回路和接收软压板映射关系,建立对象关联绑定。

### 2.3 虚回路可视化展示

SCD 中存储二次虚回路信息,在二次装置模型过程层逻辑设备 LLN0 下采用 Inputs/ExtRef 建模,每个 ExtRef 元素对象代表一个虚端子信息,存储虚端子的内部地址和对侧外部信息。虚回路可视化展示示意图如附录中的图 A2 所示,获取虚回路可视化展示步骤如下。

a. 查询虚回路信息,根据智能电子设备 IED(Intelligent Electronic Device)名称,在 SCD 的该 IED 模型下通过查询 ExtRef 元素信息,获取该 IED 订阅的信息,通过遍历查询 SCD 所有 ExtRef 元素信息、对侧信息为该 IED 名称的虚端子,获取该 IED 发布信息被订阅的装置;

b. 查询虚回路发送软压板信息,根据发送软压板与虚回路信息名称对应规则和相同的实例号,查询站控层和过程层映射关系,获得虚回路与发送软压板关联关系;

c. 查询虚回路接收软压板信息,根据站控层软压板模型,获取在该模型下的 Private 元素中 type="InnerSignalRef"的对象,以及该元素属性值是否包含该虚回路信息;

d. 查询装置检修硬压板信息,基于模式识别技术识别检修压板对象。

根据以上步骤,以装置为中心,可视化展示该装置所有虚回路信息,以及虚回路相应的输入和输出软压板信息。

## 3 物理光纤回路技术研究

### 3.1 端口建模

智能变电站 SCD 对虚回路连接关系进行了关联描述,随着交换机模型规范的建立,IEC61850 通信也得到了支持,在 SCD 中对装置端口连接关系进行了建模描述。SCD 中通信参数在 Communication 元素下进行建模表述,每个 PhysConn 元素对象代表装置的 1 个端口信息。Port 元素用于表示端口名称,描述为“板卡号-端口号”,对于交换机端口采用描述为“端口号”;Cable 元素用于描述物理线缆标识符,即描述物理端口所连接的物理线缆。

对于 2 个不同的物理端口,通过具有相同物理线缆标识符的<P type="Cable">元素来描述其连接关系。物理端口“1-A”和“2-A”通过线缆“C1”连接的描述示例如下。

```
<PhysConn type="Connection/RedConn">
  <P type="Port">1-A</P>
  <P type="Cable">C1</P>
</PhysConn>
```

```

<PhysConn type="Connection/RedConn">
  <P type="Port">2-A</P>
  <P type="Cable">C1</P>
</PhysConn>

```

### 3.2 基于邻接表的数据存储

通过 SCD 中的物理线缆标识符,实现过程层设备网络链路的物理连接拓扑配置,形成整个过程层物理链路连接拓扑关系。首先通过解析 SCD 中的 Communication 通信配置参数,获取装置端口连接关系;然后根据 SCD 中二次设备物理链路连接关系,基于智能变电站二次物理链路的拓扑识别,自动生成智能变电站二次设备物理链路连接的拓扑关系,生成物理光纤连接线图,采用无向图进行表示,如图 1 所示。

为了存储物理光纤连接图,本文提出基于邻接表对光纤链路进行数据存储,针对物理光纤连接图中每个设备节点建立 1 个单链表,每个数据单元存储为图中的 1 个顶点节点,为表头结点,以顺序结构的形式进行存储,由 data 和 firstarc 这 2 个域组成。其中,data 为数据域,用于存储装置 IED 或者是交换机信息,表述装置类型;firstarc 为链表域,表示图中每个顶点信息。第  $i$  个单链表中的节点表示依附于顶点  $V_i$  的边,每个节点由 adjvex4、portH、portT、nextac 这 4 个域组成。其中,adjvex 为邻接点域,表示光纤回路图中顶点  $V_j$  在邻接表中的位置;portH 为起始端口号,表示为光纤连线起始点的位置;portT 为结尾端口号,表示为光纤连线结尾点的位置;nextac 为链域,表示该邻接点域下一条光纤连接线的结点在邻接表中的位置。

根据图 1 物理光纤连接图生成的邻接表如图 2 所示。

要判断任意 2 个顶点  $V_i$  和  $V_j$  之间是否有光纤链接线,则搜索第  $i$  个链表,查询是否包含第  $j$  个表节点,如果包含则表示顶点  $V_i$  和顶点  $V_j$  通过光纤链接。

### 3.3 基于深度优先搜索的物理光纤拓扑识别

本文提出一种基于深度优先搜索的物理光纤拓扑识别分析节点的连通性,搜索获得网络拓扑结构,具体步骤如下。

a. 首先创建 visited[0..n-1] 数组,其中  $n$  为光

纤链路图中所有交换机端口数量总和,表述该交换机端口是否被访问;创建 1 个空栈 Stack,用于存放访问的节点。

b. 查询该 IED 虚链路 Inputs/ExtRef 元素,在 <ExtRef> 元素内,属性 intAddr 表示接收端口号和装置内部虚链路地址,端口号与内部地址采用“:”分离,属性 iedName 表示对侧装置名称,由此获取虚回路接收装置名称  $D_i$ 、接收端口号  $X_a$  和发送装置名称  $D_j$ ,查询单链表获取  $D_i$  的位置为  $i$ ,获取第  $i$  个链表信息,然后将  $D_i$  添加到栈 Stack。

c. 在第  $i$  个链表信息中查询起始端口号为  $X_a$ ,然后确定对侧装置信息  $D_k$ ,判断装置类型,如果是 IED,则比较  $D_k$  与  $D_j$  是否一致,如果不一致,则退回到上级链表继续查询,否则将  $D_k$  添加到栈 Stack,结束查询;如果是交换机,则查询交换机链表信息,将  $D_k$  添加到栈 Stack 中,获取第  $k$  个链表信息,顺序查询每个端口  $X_m$  的信息,如果 visited[ $m$ ] 为 1 则跳过该端口,否则访问该端口  $X_m$ ,同时将 visited[ $m$ ] 设置为 1。

d. 递归调用步骤 c,直至查询到发送装置名称为  $D_j$  的装置,最后从栈 Stack 中输出各个数据节点,则为虚回路的物理光纤链路。

线路保护装置接收母差保护装置发送的跳闸信号物理光纤回路如图 3 所示。

## 4 物理光纤回路及虚回路故障诊断

### 4.1 物理光纤回路端口监视与诊断

实现虚回路流经的物理路径的状态监视,包括虚回路链路状态、装置端口光强状态评估、交换机端口状态,并能实现二次虚回路的物理路径的识别监视。虚回路链路状态包括链路数据异常、断链异常告警等信息。交换机信息的采集可以基于 2 种模式:一种是基于简单网络管理协议(SNMP)实现交换机端口状态的采集,对于支持 IEC61850 的智能交换机,基于 MMS 信息的智能交换端口状态采集。

设备端口运行状态与通信状态密切相关,如果端口光功率不正常,势必会造成数据的丢失或者异常<sup>[11]</sup>。对装置端口光功率进行统计分析,每个端口形成一个时间序列采集值,该序列值反映装置端口工作健康状态的变化趋势,采用回归分析法对装置

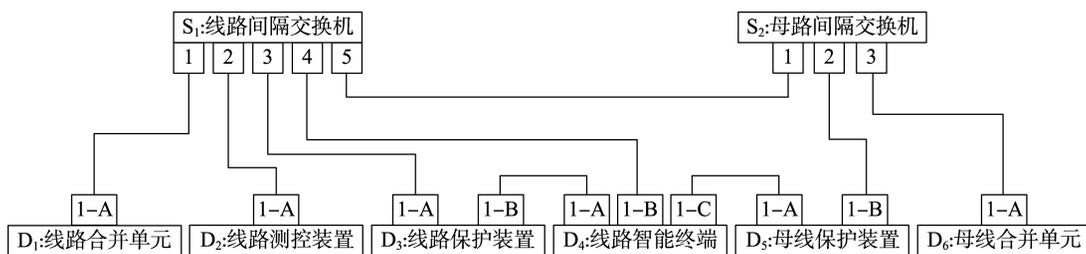


图 1 物理光纤回路图

Fig.1 Schematic diagram of physical fiber loop

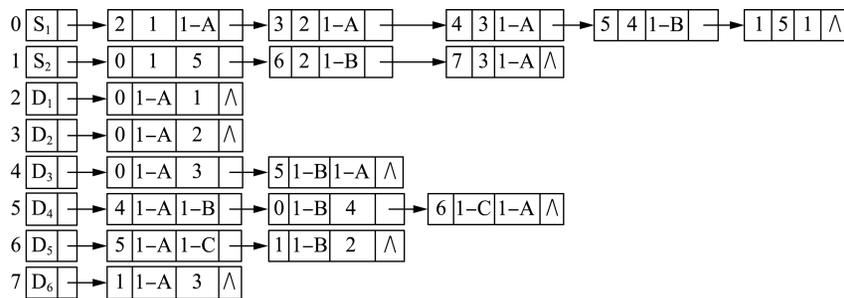


图 2 光纤回路邻接表

Fig.2 Adjacency list of fiber loop

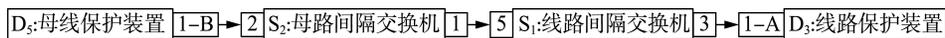


图 3 虚回路对应的物理光纤回路

Fig.3 Physical fiber loop corresponding to virtual loop

端口状态进行预警,对每个端口光功率瞬时值设定一个正常范围,同时监视端口光功率突变情况,实时监视端口工作状态,以便掌握设备端口的综合健康状况变化趋势。端口光功率突变检测和越线预警分别如附录中的图 A3、A4 所示。

#### 4.2 虚回路故障诊断推理

通过解析 SCD 建立信息发送端和接收端的网络链路对象与拓扑连接关系,以及虚拟二次回路对象与虚拟二次回路连接关系,实现虚实链路的关联映射,生成装置端口邻接表。当发生二次设备端口状态预警、交换机端口中断或者虚链路告警,驱动智能故障诊断定位,采用基于邻接表深度优先搜索故障推理算法,定位出故障点所在的故障区域。具体流程图如附录中的图 A5 所示。

基于邻接表深度搜索推理算法的虚链路故障定位方法推理过程如下:

**a.** 假设有虚回路  $VLink_i$  发生中断告警,根据邻接表查询该虚回路所对应的物理光纤回路,查询得到经过的物理端口序列为  $p_i = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$ ,然后获取端口序列的状态信息,告警端口信号序列为  $p_{id} = \{P_a, P_b, \dots, P_i\}$ ;

**b.** 查询虚回路  $VLink_k$  所经过的物理端口序列为  $p_k = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ ,对应告警端口信号序列为  $p_{mk} = \{P_m, P_n, \dots, P_k\}$ ,如果虚回路  $VLink_k$  状态正常,且  $VLink_i$  和  $VLink_k$  存在端口交集,则根据  $VLink_i$ 、 $VLink_k$  经过的物理光纤链路所对应的物理端口序列的差集可初步断定中断在  $p_{ik} = \{P_i, \dots, P_k\}$  之间,对应告警端口信号序列为  $p_{kd} = \{P_b, \dots, P_k\}$ ;

**c.** 在系统中查找另一虚链路  $VLink_j$  所经过的物理端口序列为  $\{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_j\}$ ,再结合虚链路  $VLink_j$  的状态来进一步定位故障位置,若虚链路  $VLink_j$  状态正常,则可进一步缩小故障点在  $\{P_j, \dots, P_k\}$  的范围内,若虚链路  $VLink_j$  状态中断,则可推断  $\{P_i, \dots, P_j\}$  之间有故障,可判断虚链路  $VLink_k$  中断是由  $\{P_i, \dots, P_j\}$  之间的故障点引起;

**d.** 继续在  $\{P_i, \dots, P_j\}$  之间重复步骤 **c**,逐步缩小故障范围故障点,直到搜索范围最小为止,得出  $P_{md} = \{P_m, P_k\}$ ,表示节点  $P_m$  与节点  $P_k$  之间发生了中断。

## 5 结论

随着智能变电站二次设备模型标准化程度的进一步提高,深入地开展了智能变电站二次虚回路运维管控体系架构研究,依托于 SCD 数据模型、过程层数据和间隔层数据信息处理,通过对软压板与虚回路关联关系进行建模,为虚回路的可视化展示提供数据基础。本文创新地提出了一种基于邻接表存储物理光纤回路和基于深度优先搜索算法,对虚实回路进行拓扑识别,为智能变电站的二次虚回路综合监视提供理论支撑;同时提出了一种基于邻接表深度搜索故障推理算法,实现了快速定位物理光纤链路的故障点,对二次虚回路综合监视系统提供运维保障。本文对提升智能变电站二次设备虚回路管控的能力,推动了智能变电站建设健康发展具有重要意义,满足智能变电站二次设备运维新的应用需求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 倪益民,杨宇,樊陈,等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):194-199.  
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary devices in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-199.
- [2] 熊华强,万勇,桂小智,等. 智能变电站 SCD 文件可视化管理和分析决策系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):166-171.  
XIONG Huaqiang, WAN Yong, GUI Xiaozhi, et al. Design and implementation of visual management and analytical decision system for smart substation SCD files[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 166-171.
- [3] 贾峻,张海宁,柏杨,等. 智能变电站设备状态监测系统通信关

- 键技术及实现[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):151-156.
- DU Jun,ZHANG Haining,BAI Yang,et al. Key technology of communication and its implementation for equipment status monitoring system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):151-156.
- [4] 刘琨,黄明辉,李一泉,等. 智能变电站故障信息模型与继电保护在线监测方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):210-216.
- LIU Kun,HUANG Minghui,LI Yiquan,et al. Fault information model and online monitoring method for relay protection system in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):210-216.
- [5] 黄树帮,倪益民,张海东,等. 智能变电站配置描述模型多维度信息断面解耦技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):15-21.
- HUANG Shubang,NI Yimin,ZHANG Haidong,et al. Multi-dimensional information section decoupling technology of substation configuration description model for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):15-21.
- [6] 刘明忠,童晓阳,郑永康,等. 智能变电站配置描述虚端子多视角图形化查看系统[J]. 电力系统自动化,2015,39(22):104-109,144.
- LIU Mingzhong,TONG Xiaoyang,ZHENG Yongkang,et al. Multi-view graphical viewing system for virtual terminals in smart substation configuration description[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(22):104-109,144.
- [7] 袁浩,屈刚,庄卫金,等. 电网二次设备状态监测内容探讨[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):100-106.
- YUAN Hao,QU Gang,ZHUANG Weijin,et al. Discussion on condition monitoring contents of secondary equipment in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(12):100-106.
- [8] 李宝伟,倪传坤,李宝潭,等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(5):73-77.
- LI Baowei,NI Chuankun,LI Baotan,et al. Analysis scheme for relay protection fault visualization in new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(5):73-77.
- [9] 郝少华,李勇,张铁峰,等. 新一代智能变电站通信网络及管理系统方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):148-154.
- HAO Shaohua,LI Yong,ZHANG Tiefeng,et al. Scheme of communication network and network management system for new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(17):148-154.
- [10] 国家电网公司. IEC61850 工程继电保护应用模型:Q/GDW 1396—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [11] 李跃军. 智能变电站二次设备状态评估模型及其应用的研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- LI Yuejun. Research on condition-based evaluation model and application of secondary equipment in intelligent substation[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.

#### 作者简介:



董怀普

董怀普(1988—),男,河南商丘人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护及自动化(**E-mail**:huaiyu-dong@sac-china.com);

王位杰(1984—),男,河南周口人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化(**E-mail**:weijie-wang@sac-china.com);

刘文彪(1975—),男,江西吉安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为 IEC61860 通信及变电站自动化(**E-mail**:wenbiao-liu@sac-china.com)。

## Fault diagnosis technology of secondary virtual loop and physical fiber loop fusion based on depth first search

DONG Huaipu, WANG Weijie, LIU Wenbiao, JI Ling, LUO Zhaojun, RUI Guojun  
(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of visual display, loop monitoring and diagnosis of secondary virtual circuit in operation and maintenance of intelligent substation, the virtual circuit comprehensive monitoring technology system of intelligent substation is constructed. The configuration rules of the soft plate and the virtual circuit are designed, and the state monitoring of the soft plate object is taken as part of the virtual circuit detection. It is proposed to store physical fiber loop based on adjacency list, and realize the physical link relationship of process layer equipment by adopting depth first search algorithm. Meanwhile, the fault area are diagnosed and located based on depth search and fault reasoning algorithms, which satisfies the new application demand of secondary equipment operation and maintenance in intelligent substation.

**Key words:** intelligent substation; virtual loop; physical fiber loop; adjacency list; depth first search; fault reasoning

# 附录

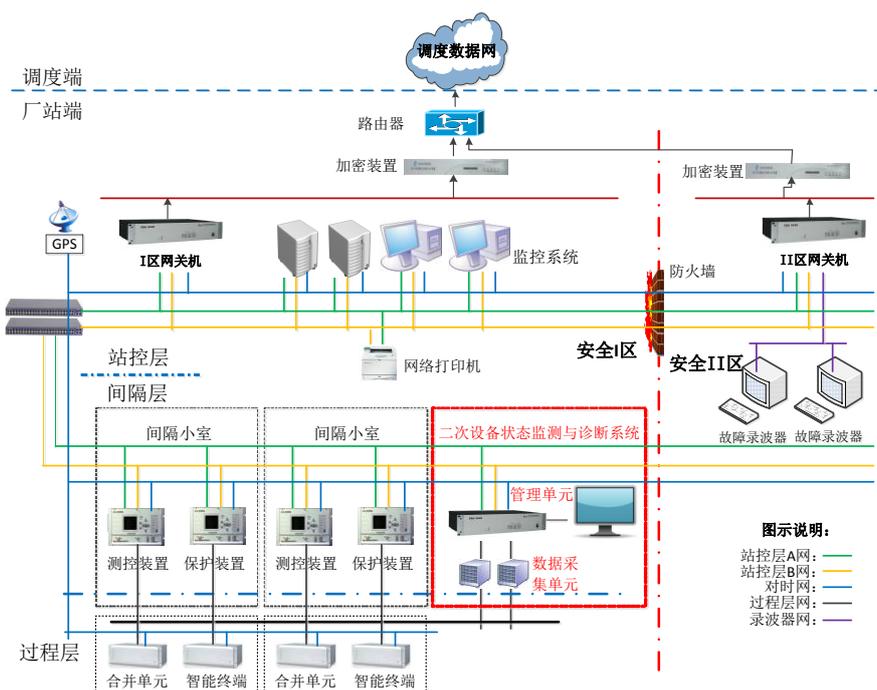


图 A1 二次物理光纤回路和虚回路逻辑结构图

Fig.A1 Logic diagram of secondary physical fiber loop and virtual loop

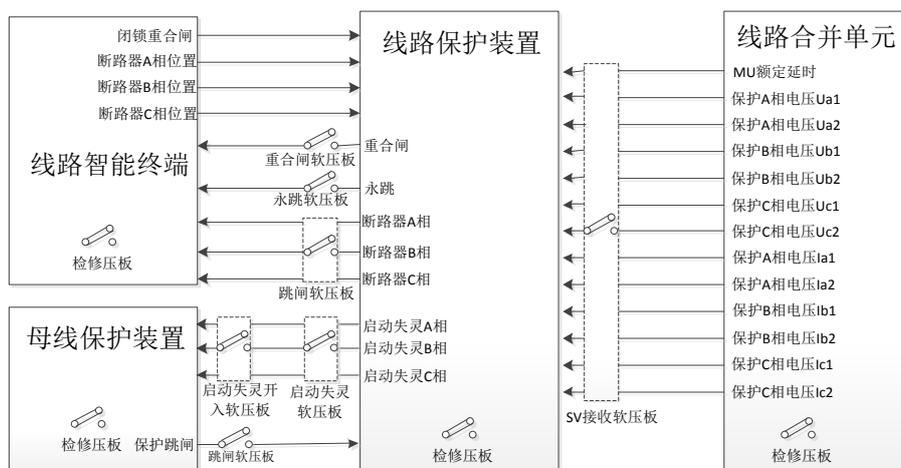


图 A2 虚回路可视化展示

Fig.A2 Visualization display of virtual loop

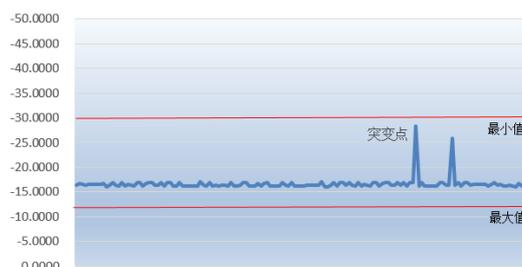


图 A3 端口光功率突变监测

Fig.A3 Monitoring of abrupt changes of port optical power

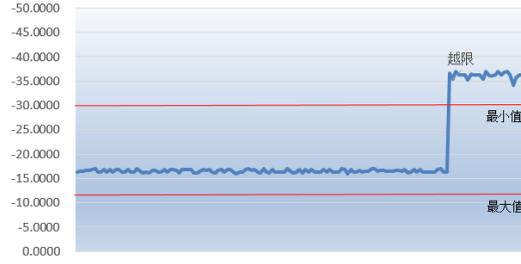


图 A4 端口光功率越限告警

Fig.A4 Threshold crossing alert of port optical power

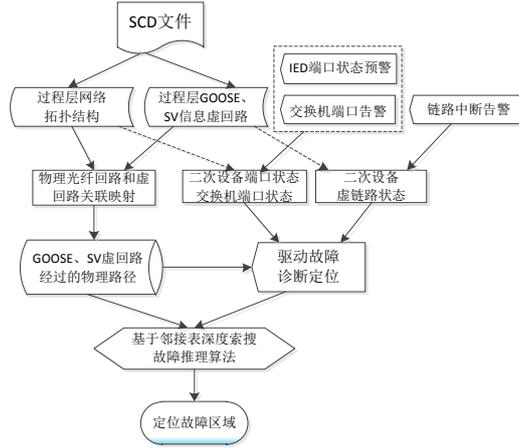


图 A5 虚回路故障诊断定位流程图

Fig.A5 Flowchart of fault diagnosis and locating of virtual loop