

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241413

## 面向智能变电站运维的连锁故障态势感知研究

朱峻永<sup>1</sup>, 杨东赞<sup>2</sup>, 王昕<sup>1</sup>, 童晓阳<sup>3</sup>, 崔馨文<sup>3</sup>, 王英琪<sup>3</sup>, 范臻<sup>1</sup>

(1. 国网重庆市电力公司超高压分公司, 重庆 400039; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400039;  
3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** 针对由智能变电站二次系统失效引发的电网连锁故障, 为提高预警的准确性, 研究了面向智能变电站运维的连锁故障态势感知方法。基于保护原理与配置, 分析二次系统失效引发连锁故障的各种模式, 构建连锁故障路径事件链模板。利用变电站主接线, 由模板分别构造各一次设备实例化连锁故障路径事件链集合。当某一次设备发生故障时, 在线收集对应保护、各相邻保护的告警信号, 感知保护拒动或误动。与该一次设备的连锁故障路径事件链中相关事件及其条件匹配, 加入到预警连锁故障路径集合, 对失电后果进行态势预警。提示连锁故障风险点, 为运维人员操作提供警示。通过实例验证了所提方法能够为变电站运行和操作提供预警, 预防可能的连锁故障发生。

**关键词:** 连锁故障; 智能变电站; 运维; 二次系统失效; 态势感知

### Research on cascading failure situation awareness for smart substation operation and maintenance

ZHU Junyong<sup>1</sup>, YANG Dongzan<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, TONG Xiaoyang<sup>3</sup>, CUI Xinwen<sup>3</sup>, WANG Yingqi<sup>3</sup>, FAN Zhen<sup>1</sup>

(1. State Grid Chongqing Ultra High Voltage Company, Chongqing 400039, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** To address cascading failure in power systems caused by secondary system failure in smart substations and to improve early warning accuracy, a cascading failure situation awareness method for smart substation operation and maintenance is studied. Based on protection principles and configurations, various modes of cascading failure caused by secondary system failure are analyzed, and the event chain templates of cascading failure path are constructed. Using the substation's main wiring, instance-specific cascading failure path event chain sets are created for each primary device based on the templates. When a primary device fails, the system collects online alarm signals from its corresponding protection and adjacent protections to detect protection malfunctions or misoperations. These are matched with relevant events and conditions in the associated cascading failure path templates for that device, forming a set of pre-warning cascading failure paths to assess and forecast power outage consequences. This enables the identification of cascading failure risk points and provides early warnings to support operation and maintenance personnel. Case studies verify that the proposed method can effectively provide cascading failure warning for substation operation and operation and help prevent potential cascading failure.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202327419A-3-2-ZN).

**Key words:** cascading failure; smart substation; operation and maintenance; secondary system failure; situation awareness

## 0 引言

近些年国内外多起连锁故障给电网带来严重后果,

国内外学者研究了隐藏故障、连锁故障机理、评估及预测模型与方法<sup>[1-8]</sup>。文献[1]较早研究由通信设备故障、相邻线路的保护定值配合不当等隐藏故障引发的连锁故障。文献[2]根据状态检修实时数据建立设备的故障可能性模型, 应用改进搜索方法实现  $N-k$  故障路径在线搜索, 但未考虑保护设备失效。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5100-202327419A-3-2-ZN)

文献[3]建立电力信息物理系统相互依存模型,采用老化因素、潮流、隐性故障、偶然因素构建电网风险元,提出同时考虑两网失负荷率的风险计算方法。文献[4]构建基于交互关系的加权拓扑模型,考虑保护隐性故障概率,分析交互关系下连锁故障演化机制及保护动作对参量分布的影响。文献[5]基于渗流理论,构建支路故障渗流概率模型和路径风险评估模型,预测连锁故障路径。文献[6]从电网容量、电网用户、电网稳定性建立连锁性故障的综合风险指标,采用蒙特卡洛抽样算法对连锁故障进行风险评估。文献[7]以一次设备故障后停运风险高的线路为搜索方向,基于深度技术获取故障概率较高的交直流连锁故障。文献[8]将连锁故障分为不同时间尺度过程,结合实际负荷对连锁故障预测。文献[9]建立继电保护拒动故障树模型,以改进状态空间分割法分析连锁故障风险,但仅考虑了保护拒动带来的连锁故障。

已有文献采用事件链技术分析连锁故障。文献[10]建立基于事故链的电网连锁故障模型,将故障选择限制在供电路径上,采用安全科学的相关方法实现连锁故障的监视和预控。文献[11]根据保护逻辑建立动态推理链,对误报漏报的报警信息纠正,形成改进的动态推理链。文献[12]考虑到负荷切除失败使执行站断路器无法正确动作,依据连锁故障链确定原则生成连锁故障链,根据初始故障的失败概率和造成的负荷损失,计算连锁故障风险,但主要考虑控制失败概率引发的连锁故障。

近些年来智能变电站得到大力发展,它的安全可靠对电力系统的稳定运行至关重要。智能变电站增加合并单元、智能终端、通信网络等设备,它们失效可能引发连锁故障。文献[13]研究基于知识图谱的智能变电站二次检修安全措施自动生成。文献[14]分析了合并单元、保护装置硬件故障、人员操作失误造成保护误动,但未涉及保护误动造成的连锁故障。文献[15]总结了继电保护及二次回路故障或误动的各种原因、现象及处理方法,但主要针对继电保护本身误动,没有涉及电网连锁故障分析。

现有电网连锁故障评估侧重于电网系统级连锁故障机理、各级连锁路径概率预测,较少考虑变电站运维人员投退硬/软压板等偶发性操作、二次回路故障引发保护拒动与误动导致连锁故障。不论二次设备概率性或偶发性失效,一旦它误动作,对连锁故障起推动作用,发生概率就不是关键。已有文献从系统级为调度人员提供连锁故障预测,智能变电站二次系统发生异常产生大量告警信号,运维人员很难从中预测可能的连锁故障。目前面向智能变

站运维的连锁故障态势感知预警国内外尚不多见。

针对以上问题,本文研究了一种面向智能变电站运维的连锁故障态势感知方法。对保护设备失效与操作不当引发的二级连锁故障路径及其事件链建模,在线利用保护设备运行状态,感知和搜索可能的连锁故障路径事件链,对运维人员操作可能引发的连锁故障进行指导和有效的警示。

## 1 计及保护失效的连锁故障机理及其事件链

从智能变电站运维角度出发,分析连锁故障路径,分析过程是针对一次设备发生故障后,综合考虑该一次设备所在保护、相邻一次设备所在保护是否正常动作、各保护设备硬件运行状况、保护定值、保护双重化配置等因素,按照不同模式,针对保护误动与拒动原因,分别获得一次设备初始故障后由保护误动或拒动引发的二级故障及连锁故障路径。

初始故障的一次设备所在保护、相邻一次设备所在保护发生误动与拒动包括初始故障一次设备所在保护拒动、相邻一次设备所在保护误动。保护拒动或闭锁的原因包括装置上电异常、硬件异常、软件异常、SV/GOOSE 虚回路故障、相关软压板误退出、保护与合并单元检修压板不一致等。

借鉴已有连锁故障研究成果<sup>[1,3,6]</sup>和电力工程实践<sup>[13-14]</sup>,分析得到多方面的保护误动原因,包括二次设备硬件故障、人为误操作、绝缘故障等。保护设备误动的故障树如图 1 所示。

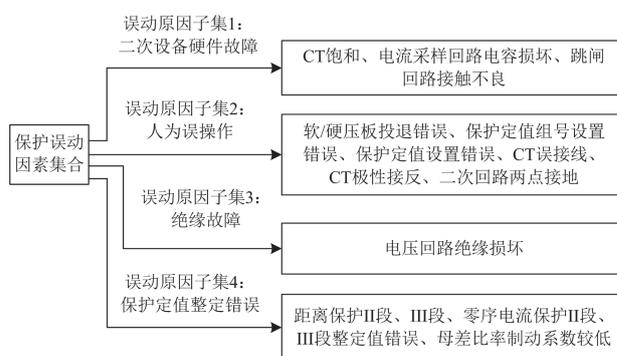


图 1 保护设备误动的故障树

Fig. 1 Fault tree of protection malfunction

二次设备硬件故障如 CT 饱和、电流采样回路电容损坏等会产生较大差流,使母线差动保护误动;人为误操作如软/硬压板投退错误、保护定值组号设置错误、保护定值与调度下发定值不一致、母联开关 CT 误接线、CT 极性接反、二次回路两点接地、电压回路绝缘损坏等会导致保护误动。线路故障后潮流转移使相邻线路的距离保护 II 段、III 段、零序

电流保护 II 段、III 段在整定值不合适时发生误动,母差比率制动系数较低会导致相邻母线保护误动。

连锁故障路径的分析过程为:当某一次设备故障时,分析该一次设备对应保护处于何种动作状态,如正常动作、拒动、误动(给出拒动或误动原因),分析与该初始一次设备相邻的一次设备对应保护(相邻保护)的动作状态,如正常动作或误动(给出误动原因);如果某相邻保护误动,分析它带来哪些一次设备跳开,相邻保护误动是否在潮流转移后带来次相邻保护动作及跳闸。本文主要考虑二次系统失效引发的第二级或第三级连锁故障跳闸。

针对保护的单套与双重化配置,可能的连锁故障路径主要有两种模式,模式 1 面向双重化配置保护、模式 2 面向单套配置保护,它们的一次设备故障后连锁故障路径模式分别如下。

模式 1:某一次设备(线路、母线)发生初始故障→该一次设备对应保护正常动作且跳闸→相邻保护误动→跳开对应的断路器,造成连锁故障。

模式 2:某一次设备(线路、母线)发生初始故障→该一次设备对应保护拒动→相邻保护误动→跳开对应的断路器,造成连锁故障。

各一次设备初始故障后相邻保护误动由电网拓扑结构、保护定值及保护之间配合、人为操作等引发。初始故障一次设备是线路,相邻保护是相邻线路保护或线路相邻的母线保护。两种模式下各相邻保护误动原因及其后果分析具体见第 2 节。

一次电网连锁故障事故是由电网一个元件故障、其他元件未正常工作引发新跳闸形成的多级故障。采用事件链描述连锁故障事故的发生过程。

一次设备  $k$  引发的某连锁故障路径事件链  $L_{ki}$  是连锁故障中依次发生的各事件形成的链表。

$$L_{ki} = \{E_{ki,1}, E_{ki,2}, \dots, E_{ki,j}, \dots, E_{ki,m}\} \quad (1)$$

式中:  $E_{ki,j}$  是事件链  $L_{ki}$  中的第  $j$  个事件;  $m$  是当前事件链  $L_{ki}$  中所有事件个数。

每个事件  $E$  表达为

$$E = \{N_a, C_{om}, A, D\} \quad (2)$$

式中:  $N_a$  表示事件名称,是该事件的命名或简要说明;  $C_{om}$  表示条件,指触发该事件发生的原因或因素,默认为空,对于保护拒动或误动事件,其条件不能为空,不同的保护拒动或误动原因出现时,对应不同事件;  $A$  表示动作,指在该事件被触发后所对应的保护动作行为,默认为空;  $D$  表示事件描述,是对该事件完整的描述,默认为空。

一个事件的数据结构如下:

```
struct Event {
```

```
    string EventDesc; % 事件描述
    string Condition; % 事件发生的条件或原因
    string Action; % 事件对应的保护动作
```

```
};
```

这些事件包括初始故障一次设备故障、保护正常动作、保护拒动、保护误动、断路器跳开等。后一个事件是在前一个事件发生的基础上、且当前事件的触发条件满足后发生的。

对于一个相邻保护误动,保护误动因素较多,因此将不同误动原因触发的保护误动事件当作不同事件看待,便于分析误动原因。

一条连锁故障路径事件链  $L_{ki}$  可表述为

事件链编号:  $E_{ki,1}$  事件 1 名称  $\rightarrow E_{ki,1}$  事件 2 名称(条件; 动作; 描述)  $\rightarrow \dots \rightarrow E_{ki,m}$  事件  $m$  名称

事件链  $L_{ki}$  发生过程包括初始故障一次设备对应保护正常动作跳闸,或保护拒动由后续保护跳闸相关断路器,形成事件链的断路器断开集合  $B_{ki}$  为

$$B_{ki} = \{B_{ki,1}, B_{ki,2}, \dots, B_{ki,p}\} \quad (3)$$

式中:  $B_{ki,1}$  是跳开的第 1 个断路器;  $p$  是当前事件链  $L_{ki}$  中所有断开断路器的个数。

该事件链  $L_{ki}$  的失电元件集合  $C_{ki}$  为

$$C_{ki} = \{C_{ki,1}, C_{ki,2}, \dots, C_{ki,q}\} \quad (4)$$

式中:  $C_{ki,1}$  是当前事件链  $L_{ki}$  第 1 个失电元件(线路或母线);  $q$  是  $L_{ki}$  中所有失电元件的个数。

一次设备  $k$  的所有连锁故障路径事件链  $L_{ki}$  构成设备  $k$  的连锁故障路径事件链集合  $L_k$ 。

$$L_k = \{L_{k1}, L_{k2}, \dots, L_{ki}, \dots, L_{kN}\} \quad (5)$$

式中:  $N$  是一次设备  $k$  的所有事件链的个数。

## 2 一次设备初始故障下连锁故障路径模板

以一个典型的 220 kV 变电站为例,分析一次设备发生故障的连锁故障模式及其路径事件链模板。

### 2.1 220 kV 线路故障下的连锁故障路径事件链模板

由于 220 kV 线路保护配置有两套保护,不考虑 220 kV 线路保护的拒动情况,主要考虑其正常动作后相邻保护误动引发的连锁故障。220 kV 线路故障的连锁故障路径事件链模板如图 2 所示。

当一条 220 kV 线路故障后配置保护正常动作并跳闸后,有两类相邻保护误动情况。

第一类相邻保护误动情况是,与该一次设备相邻线路保护的误动原因子集(1、3、4、5)中一个误动原因发生而产生相邻线路保护误动,并跳开相应的断路器,构成 4 类连锁故障路径事件链模板。

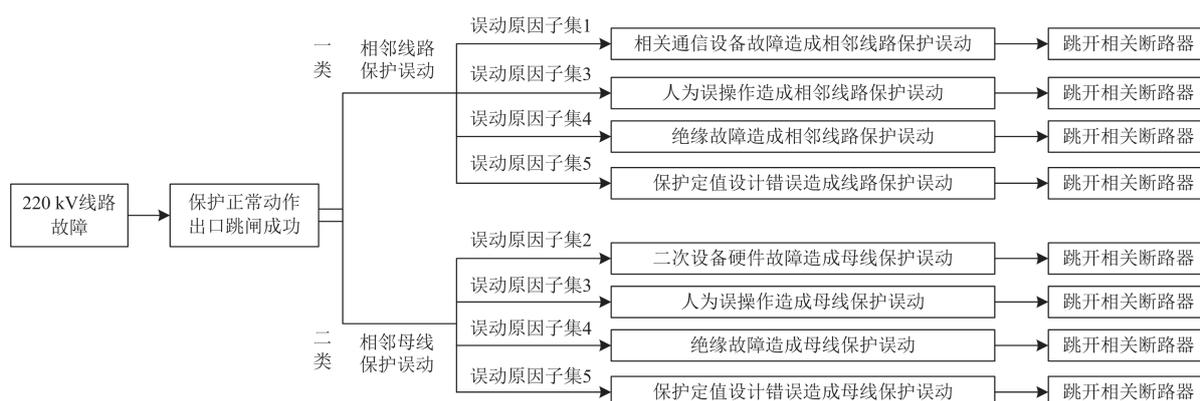


图 2 220 kV 线路故障的连锁故障路径事件链模板

Fig. 2 Event chain template of cascading failure path for 220 kV line fault

第二类相邻保护误动情况是, 与该一次设备相邻的母线保护的 4 类误动原因子集(2、3、4、5)某误动原因发生使得相邻母线保护误动, 跳开相应的断路器, 构成各自的连锁故障路径事件链模板。

由于 220 kV 线路故障连锁路径事件链只是一般性描述相邻线路保护误动, 没有指出具体的相邻保护及其断路器, 需要在实际运用时具体确定误动

原因, 因此本节构造的是连锁故障路径事件链模板。

## 2.2 220 kV 母线故障下的连锁故障路径事件链模板

由于 220 kV 母线保护配置有两套, 不考虑 220 kV 母线保护拒动情况, 主要考虑其正常动作后相邻保护误动引发的连锁故障。220 kV 母线故障的连锁故障路径事件链模板如图 3 所示。它有两类保护误动情况。

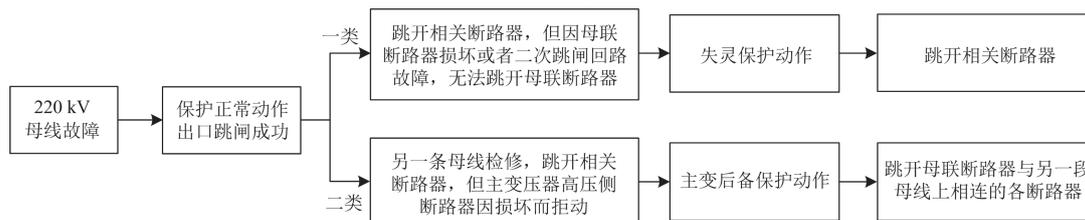


图 3 220 kV 母线故障的连锁故障路径事件链模板

Fig. 3 Event chain template of cascading failure path for 220 kV bus fault

第一类相邻保护误动情况是, 当 220 kV 母线故障, 对应保护正常动作, 跳开与该母线相连的所有断路器, 但由于母联断路器损坏或二次跳闸回路故障, 无法跳开母联断路器, 失灵保护动作跳开母联断路器另一侧非故障母线相连的各断路器。

第二类相邻保护误动情况是, 在一条 220 kV 母线检修的前提下, 另一条母线故障, 其母线差动保护正常动作, 并跳开与故障母线相连的所有断路器, 但是与故障母线相连的主变压器高压侧断路器因损坏而拒动, 造成该主变后备保护动作, 跳开相关断路器。

## 2.3 110 kV 线路故障下的连锁故障路径事件链模板

110 kV 线路保护一般只有一套, 它有拒动的可能性。110 kV 线路故障的连锁故障路径事件链模板如图 4 所示。它共有 3 类情况。

第一类是一条 110 kV 线路故障, 其配置的保护正常动作, 但由于检修压板未退出或控制回路断线

的二次系统问题, 造成相邻的 110 kV 母线差动保护动作, 并跳开母联断路器与相邻母线相连的所有断路器。

第二类是一条 110 kV 线路故障, 对应保护正常动作并跳闸, 与该故障线路相邻的另一条线路保护 4 种误动原因子集中 1 种误动原因发生, 则相邻线路的保护误动, 跳开相关断路器; 或者, 相邻母线保护 4 种误动原因子集中 1 种误动原因发生, 则相邻母线保护误动, 跳开相关断路器。

第三类是一条 110 kV 线路故障, 当其保护拒动, 与该线路相邻的母线配置的母差保护作为后备保护正常动作, 并跳开母联断路器与相邻母线相连的所有断路器。

## 2.4 110 kV 母线故障下的连锁故障路径事件链模板

110 kV 母线故障连锁故障路径的事件链模板如图 5 所示, 它有两类相邻保护误动情况。

第一类相邻保护误动情况是一条 110 kV 母线

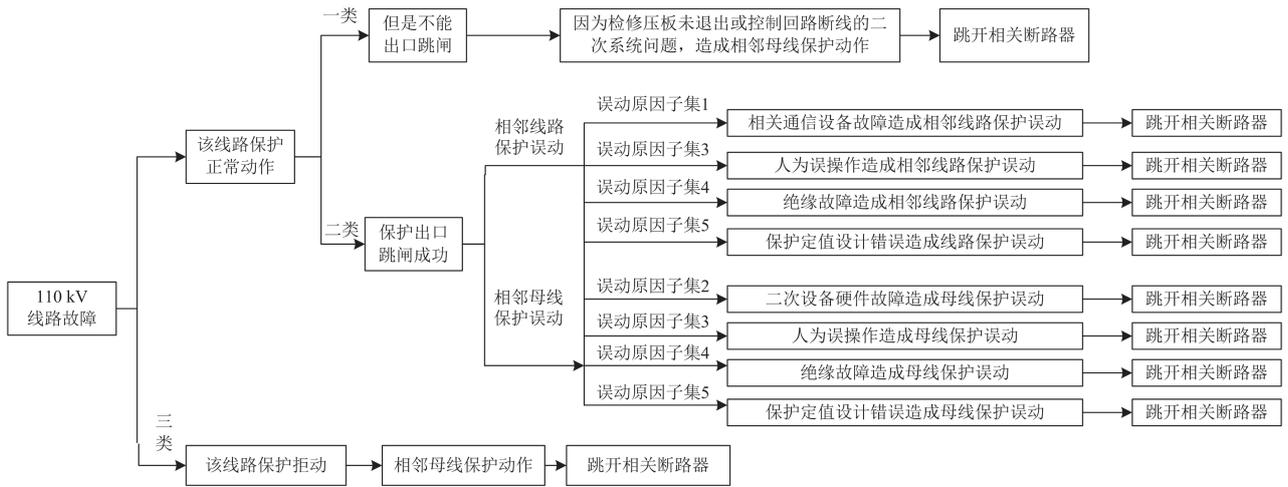


图 4 110 kV 线路故障的连锁故障路径事件链模板

Fig. 4 Event chain template of cascading failure path for 110 kV line fault

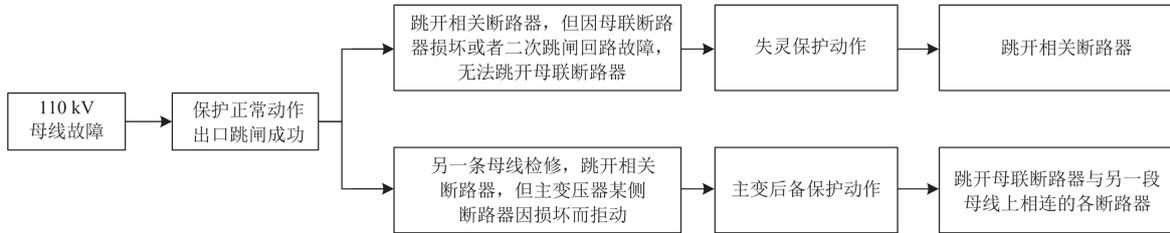


图 5 110 kV 母线故障的连锁故障路径事件链模板

Fig. 5 Event chain template of cascading failure path for 110 kV bus fault

故障，其配置的保护正常动作，跳开了与该故障母线相连的所有断路器，但是因为母联断路器损坏或二次跳闸回路故障问题，无法跳开母联断路器，从而失灵保护动作，额外跳开与非故障母线相连的所有断路器。

第二类相邻保护误动情况是在一条 110 kV 母线检修的前提下，另一条母线故障，母差保护正常动作并跳开与故障母线相连的所有断路器，但是与故障母线相连的主变压器某侧断路器因断路器损坏而拒动，造成该主变后备保护动作，并跳开相关断路器。

变压器发生初始故障后的连锁故障路径事件链模板见附录 A 图 A1。

### 3 二次系统引发连锁故障的态势感知方法

针对典型 220 kV 变电站、220 kV 线路、220 kV 母线、110 kV 线路、110 kV 母线分别发生故障，在对应保护动作或拒动情况下，根据各保护原理及配置、连锁故障机理，收集典型连锁故障案例，针对各一次设备各自发生故障，分别构造原发保护、相邻保护正常动作或误动原因引发的连锁故障路径事

件链模板集合，并将新出现的连锁故障加入其中。

#### 3.1 构造连锁故障事件链实例化集合

第 2 节采用事件链技术，分别刻画各一次设备发生初始故障后的连锁故障路径事件链模板。实际运用时需要根据实际电网拓扑结构和变电站主接线及一次与二次保护设备，确定各具体的保护和断路器对象，实例化生成具体的连锁路径事件链。

根据当前变电站主接线图，构造反映  $n$  个一次设备之间连接关系的邻接矩阵  $A$ 。一次设备包括母线、变压器、线路，作为节点，按照母线、变压器、线路的顺序，分别对它们分组从小到大进行编号。如果一个断路器闭合，则该断路器两侧的一次设备是连通的，否则，为不连通。邻接矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $a_{ij} = 1$  表示节点  $i$  对应一次设备与节点  $j$  对应一次设备是连接的， $a_{ij} = 0$  表示不连接；将节点  $i$  自身的连接关系定义为 0，即  $a_{ii} = 0$ 。

一次设备  $k$  发生初始故障时，利用邻接矩阵  $A$ ，

找到设备  $k$  所在行元素值为 1 的各元素, 再转到这些元素的列号对应的行, 在这些行中找到元素值为 1 的一次设备, 即找到与一次设备  $k$  相邻的各一次设备。具体查找方法见附录 B。

利用事先设置的一次设备与其保护设备的对应关系, 获得每个一次设备对应的保护设备集, 再获得其相邻一次设备对应的相邻保护设备集。

参照第 2 节中一次设备  $k$  拥有的各连锁故障路径事件链模板集合, 找到相邻一次设备集、相邻保护设备集, 代入保护拒动或保护误动原因, 分别对各连锁故障路径事件链模板进行实例化, 建立具体各连锁故障路径事件链。每个事件链中第 1 项事件是该一次设备故障, 加入各事件及其子项内容, 并记录各事件的保护拒动或误动原因, 从而形成该一次设备故障后实例化的连锁故障路径事件链集合。

### 3.2 面向二次设备运行状态的连锁故障态势感知

#### 3.2.1 态势感知原理及在二次设备风险评估的映射

态势感知理论最早由美国提出应用于太空、航空及网络安全等领域<sup>[16-20]</sup>, 它包括觉察、理解、预测及决策行动。本文将态势感知用于连锁故障分析, 态势感知映射为变电站二次设备运行状态的收集与感知。对各一次设备由保护失效引发的连锁故障各路径分别进行分析, 根据设备的压板信息与投退位置, 在线匹配库中事件链, 获得当前系统保护运行的态势、风险及其后果。

本节研究由智能变电站二次系统失效造成的连锁故障路径搜索方法。某一次设备发生故障时, 收集对应保护设备、相邻一次设备对应保护的動作和告警信号及压板位置, 感知一次设备故障、相关保护拒动或误动情况, 将它们与该一次设备的连锁故障路径事件链集合中各事件链中各事件及其条件进行匹配, 如果匹配上某个连锁故障事件链, 就加入到预警连锁故障路径集合, 给出其发生路径与失电后果, 向工作人员提示连锁故障的风险点。

#### 3.2.2 二次设备误操作引发连锁故障的态势感知

二次设备连锁故障态势感知的步骤如下。

步骤 1: 当一次设备  $k$  发生初始故障时, 收集它对应保护动作、断路器开断信息, 从中感知一次设备  $k$  故障、对应断路器开断情况, 如果该保护拒动, 则利用设备  $k$  的相邻保护动作判断其故障。

步骤 2: 由邻接矩阵获得一次设备  $k$  的相邻一次设备集、相邻保护设备集, 收集一次设备  $k$  对应的保护设备、相邻保护设备的告警信号及其硬/软压板投退状态, 感知一次设备  $k$  对应的保护设备拒动、相邻保护设备动作、误动及其异常原因。对于调度

中心下发保护定值的调整, 可采用文献[21]的做法识别其存在的错误和风险。

步骤 3: 针对一次设备  $k$  拥有的各连锁故障路径事件链, 将由步骤 1 感知的一次设备  $k$  故障、其保护动作及其断路器的开断、由步骤 2 感知的相邻保护动作(误动或拒动)及其断路器开断、由告警信号得到的保护误动原因等, 与一次设备  $k$  的每条连锁故障路径事件链中各事件及其条件进行匹配, 如果匹配上其中一条连锁故障路径事件链, 就将其加入当前变电站的预警连锁故障路径事件链集合, 然后完整地展示该事件链中各事件。同时, 如果相邻线路的距离保护 II 段或 III 段、零序电流保护 II 段或 III 段发生误动, 就分别计算线路的阻抗值、零序电流, 验证它们超过相应的保护整定值。

步骤 4: 如果没有匹配上一次设备  $k$  的连锁故障相关事件链, 且一次设备  $k$  仅发生故障而没有相应连锁故障发生, 就将一次设备  $k$  拥有的各连锁故障路径事件链, 作为当前变电站的预警连锁故障路径事件链集合, 对各连锁故障事件链进行预警, 展示这些事件链各保护事件的触发条件及其失电后果, 向工作人员提示可能的连锁故障风险点。

步骤 5: 如果没有匹配上一次设备  $k$  的连锁故障相关事件链, 但是一次设备  $k$  发生故障后其相邻一次设备被相应的保护额外跳开, 形成了一条新的连锁故障路径事件链, 即该相邻保护动作、或相邻保护触发条件不同于已有的连锁故障路径事件链, 就将它作为一条新的连锁故障路径事件链, 加以学习, 加入当前设备的连锁故障路径事件链集合, 并对该连锁故障事件链进行展示和预警。

连锁故障的态势感知与预警流程如图 6 所示, 相应的算法逻辑如附录 C 所示。

### 3.3 面向保护设备运维操作的连锁故障预警

当运维人员操作(如修改保护定值、投退硬/软压板、改变保护二次回路接线、网口)时, 向运维人员发出预警, 指出可能会因为误操作发生哪些连锁故障路径, 从而提醒运维人员谨慎操作。

当智能变电站运维人员操作一个保护设备时, 投退检修硬压板或软压板、改变保护定值组号、改变保护定值操作, 在所有一次设备故障的连锁故障路径事件链集合中, 搜索当前保护设备操作是否属于一个或多个一次设备故障的连锁故障路径中保护事件的条件, 如果是, 就将该一次设备故障的连锁故障路径事件加入当前变电站的操作警示连锁故障路径事件链集合。利用这些事件链向运维人员发出警示, 提示本次操作可能在这些一次设备发生故障后引发相应的连锁故障。

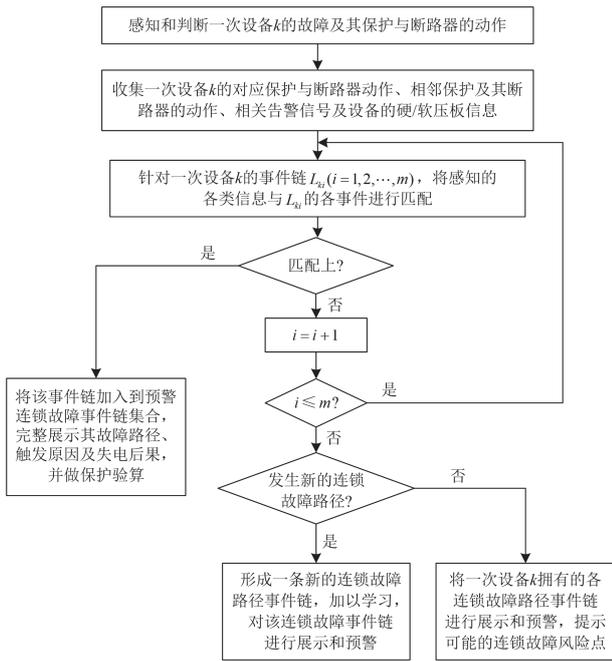


图 6 连锁故障的态势感知与预警流程

Fig. 6 Flowchart of situational awareness and warning for cascading failures

## 4 典型连锁故障路径的实例分析

### 4.1 220 kV 变电站典型连锁故障路径的分析

一个典型 220 kV 变电站主接线图如图 7 所示。

一次设备包括母线 B、线路 L、变压器 T 等，断路器 263、264 对侧的母线分别命名为 B1、B2，断路器 263、264、163、164、165、166、167、168、172、173 所在线路分别命名为 L1—L10，220 kV-II 母、220 kV-I 母、110 kV-II 母、110 kV-I 母分别命名为 B3、B4、B5、B6。

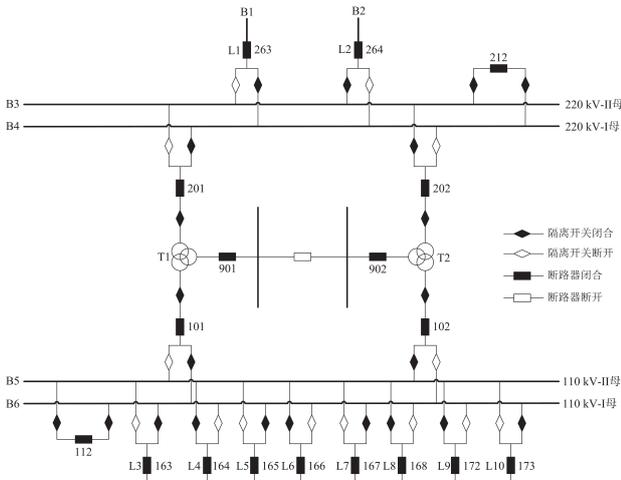


图 7 典型 220 kV 变电站主接线图

Fig. 7 Main wiring diagram of a typical 220 kV substation

根据图 7 得到反映各一次设备之间连接关系的一次设备邻接矩阵  $A$ ，如附录 B 所示。

针对一条 110 kV 线路 L3，查找其在同一个电压等级侧各相邻线路，由附录 B 的查找方法，可得到线路 L3 的相邻线路分别为线路 L4—L10。

针对 110 kV 线路 L3，给出其发生初始故障后的连锁故障路径事件链集合，分以下 3 类情况。

1) 线路 L3 的保护正确动作但是未能跳闸，实例化的连锁故障路径事件链如下。

L3-I-①：线路 L3 故障→L3 线路保护动作、不能跳闸(原因：检修压板未退出，它是本事件的条件，后面类似；动作：L3 线路保护出口)→相邻的 110 kV I 母 B6 母差保护动作→跳开母联开关、与 110 kV I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{112, 165, 167, 173\}$ ，失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-I-②：线路 L3 故障→L3 线路保护动作、不能跳闸(原因：保护到智能终端的通信链路故障；动作：L3 线路保护出口)→相邻的 110 kV 母差保护动作→跳开母联开关、与 110 kV I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{112, 165, 167, 173\}$ ，失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-I-③：线路 L3 故障→L3 线路保护动作、不能跳闸(原因：智能终端控制回路出现问题；动作：L3 线路保护出口)→相邻的 110 kV 母差保护动作→跳开母联与 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{112, 165, 167, 173\}$ ，失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

2) 线路 L3 保护动作并跳闸，其连锁故障路径事件链如下。

(1) 相邻线路保护误动下连锁故障分析

L3-III-①：线路 L3 故障→L3 线路保护动作并跳闸→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV L5 线路保护误动(误动原因：保护定值组号设置错误、或保护定值设置错误、或 CT 极性接反)→L5 线路两侧断路器断开。断路器断开集合  $B = \{163, 165\}$ ，失电元件集合  $C = \{L3, L5\}$ 。

L3-III-②：线路 L3 故障→L3 线路保护动作并跳闸→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻 110 kV L5 线路保护误动(误动原因：电压回路绝缘损坏)→L5 线路两侧断路器断开。断路器断开集合  $B = \{163, 165\}$ ，失电元件集合  $C = \{L3, L5\}$ 。

L3-III-③：线路 L3 故障→L3 线路保护动作与跳闸→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV L5 线路保护误动(误动原因：该线路过负荷下距离保护 III 段整定值错误)→L5 线路两侧断

路器断开。断路器断开集合  $B = \{163, 165\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5\}$ 。

以上仅给出 110 kV 线路 L3 故障时的连锁故障路径, 100 kV 侧其他线路 L4—L10 可做类似处理。

#### (2) 相邻 110 kV 母线保护误动下连锁故障分析

L3-II2-①: 线路 L3 故障→L3 线路保护出口动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV 母线 B6 保护误动(事件描述: 对 110 kV 侧合并单元更换后, 恢复 110 kV I、II 段母线 A 套差动保护过程中, 运行人员错误将母差保护“投检修”硬压板提前退出, 造成母线 B6 差动保护误动; 误动原因: 检修压板提前退出; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-II2-②: 线路 L3 故障→L3 线路保护出口动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV 母线 B6 保护误动(误动原因: CT 饱和; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-II2-③: 线路 L3 故障→L3 线路保护动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻 110 kV 母线 B6 保护误动(误动原因: CT 误接线; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开母联与 110 kV-I 母 B6 相连所有断路器。断路器断开集合  $B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-II2-④: 线路 L3 故障→L3 线路保护动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻 110 kV 母线 B6 保护误动(误动原因: 电压回路绝缘损坏; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开母联 110 kV-I 母 B6 相连所有断路器。断路器断开集合  $B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-II2-⑤: 线路 L3 故障→L3 线路保护动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV 母线 B6 保护误动(误动原因: 母差比率制动系数较低; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开母联与 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

L3-II2-⑥: 线路 L3 故障→L3 线路保护动作→L3 线路两侧断路器断开→L3 线路失电→相邻的 110 kV 母线 B6 保护误动(误动原因: 二次回路两点接地; 动作: 母线 B6 保护出口)→跳开母联与 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合

$B = \{163, 112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

3) 线路 L3 保护拒动, 对应的连锁故障路径事件链如下。

L3-III-①: 线路 L3 故障→L3 线路保护拒动(拒动原因: 原因见附录 A 图 A1 线路保护设备故障树的因素之一)→相邻的 110 kV 母线 B6 的保护动作→跳开母联与 110 kV-I 母 B6 相连的所有断路器。断路器断开集合  $B = \{112, 165, 167, 173\}$ , 失电元件集合  $C = \{L3, L5, L7, L10, B6\}$ 。

#### 4.2 220 kV 变电站连锁故障路径的在线感知分析

当某一次设备发生故障时, 针对该一次故障设备的各连锁故障路径事件链, 将感知的该一次设备故障、该一次设备的保护拒动原因、相邻保护动作、相邻保护误动及原因等信息, 与各连锁故障路径事件链中相关保护事件及其条件匹配, 如果匹配上, 就将它加入到预警连锁故障路径事件链集合。

当变电站监控后台感知到初始故障一次设备故障但没有保护误动原因、保护拒动原因存在时, 无法匹配到相关的事件链, 则将一次设备故障下拥有的各连锁故障路径事件链, 作为当前变电站的预警连锁故障路径集合, 进行预警提示。

以 110 kV L3 线路为例说明 110 kV 线路故障下连锁故障路径的匹配方法。当收集并感知 110 kV L3 线路发生故障、L3 主保护出口、未跳开对应的断路器、相邻 110 kV-I 母 B6 母差保护动作并跳开所连接的各断路器等信息后, 变电站监控后台同时发现 L3 保护设备的检修压板未退出。将这些事件的信息与设备 L3 的各事件链进行匹配, 与 L3 的事件链 L3-I-①匹配上, 属于 L3 的一类情况, 将它加入到当前变电站的预警连锁故障路径集合, 其后果是 L3 线路失电、110 kV-I 母 B6 失电。

同样当感知到以上 L3 线路故障相同的各事件, 变电站监控后台发现 L3 保护设备存在保护到智能终端的通信链路出现问题, 与 L3 的事件链 L3-I-②匹配上, 属于 L3 的一类情况, 将它加入到当前变电站的预警连锁故障路径集合中, 其后果是 L3 线路失电、110 kV-I 母 B6 失电。

同样当感知到以上 L3 线路故障相同的各事件, 变电站监控后台发现 L3 保护设备存在控制回路断线二次系统问题, 与 L3 的事件链 L3-I-③匹配上, 属于 L3 的一类情况, 将它加入到当前变电站的预警连锁故障路径集合中, 其后果是 L3 线路失电、110 kV-I 母 B6 失电。

当感知到 110 kV L3 线路故障、L3 主保护出口、不能跳闸、相邻 110 kV 母差主保护动作、并跳开所

连接的各断路器，但是没有感知到 L3 保护设备的检修压板未退出、智能终端的通信链路出现问题、控制回路断线二次系统问题，就将 L3-I-①、或 L3-I-②、或 L3-I-③都加入到当前变电站的预警连锁故障路径集合中，其后果是 L3 线路失电、110 kV-I 母 B6 失电。

对于 110 kV 线路 L3 的第二类情况，即 L3 的保护正确动作并跳闸，相邻线路保护误动或相邻母线保护误动两种子情况，类似采用以上方法进行检索和匹配，找到可能的连锁故障路径事件链，加入到当前变电站的预警连锁故障路径集合中。

对于 110 kV 线路 L3 的第三类情况，即 L3 的保护拒动，类似地采用以上方法进行检索和匹配，找到可能的连锁故障路径事件链。

#### 4.3 220 kV 变电站运维操作的连锁故障预警分析

当变电站运维人员将 220 kV 母差保护 B4 投检修硬压板退出时，搜索到线路 L1、L2 连锁故障路径事件链集合，发现对于线路 L1 与 L2 连锁故障路径事件链 L1-II-⑤、L2-II-⑤，母差保护 B4 投检修硬压板退出满足事件“相邻的 220 kV 母线 B4 保护误动”的条件，就将这些连锁故障路径事件链加入到当前变电站的“操作警示连锁故障路径事件链集合”。通过该集合能够提醒运维人员注意退出母差保护“投检修”硬压板时，可能在 L1 或 L2 发生初始故障后由母差保护误动形成连锁故障。

当变电站运维人员改变 110 kV L3 线路保护定值时，可搜索到 110 kV 线路 L4—L10 的连锁故障路径事件链 L4-III-③、L5-III-③、L6-III-③、L7-III-③、L8-III-③、L9-III-③、L10-III-③，发现该保护定值操作满足各事件链中相关事件的条件，就将这些连锁故障路径事件链加入到当前变电站的“操作警示连锁故障路径事件链集合”。该集合能够提醒运维人员注意谨慎修改 L3 线路保护定值，否则定值设置错误可能会造成该线路保护误动，从而带来 110 kV 线路 L4—L10 任意一条线路发生初始故障后由 L3 线路保护误动形成的连锁故障。

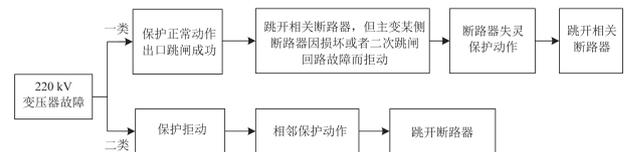
当变电站运维人员改变 110 kV 双母线间母联断路器的 CT 接线时，可搜索到 110 kV 线路 L3—L10 的连锁故障路径事件链 L3-II2-③、L4-II2-③、L5-II2-③、L6-II2-③、L7-II2-③、L8-II2-③、L9-II2-③、L20-II2-③，发现该 CT 接线操作满足其中相关事件的条件，就将这些连锁故障路径事件链加入到当前变电站的“操作警示连锁故障路径事件链集合”。该集合能够提醒运维人员注意确保母联断路器的 CT 接线正确，接线错误可能会造成 110 kV 母差保护误动，从而造成 110 kV 线路 L3—L10 中任

意一条线路发生故障后由 110 kV 母差保护误动形成的连锁故障。

## 5 结论

针对变电站二次系统异常引发的连锁故障，利用保护原理、变电站主接线及保护配置，分析二次系统失效引发连锁故障的多种模式，构建一次设备故障的连锁故障路径事件链模板，并将它们实例化。在线收集各保护及其相邻保护设备的告警信号，感知保护设备拒动或误动，与该一次设备的各连锁故障路径事件链中相关事件及条件匹配，对连锁故障进行预警，能够为运维人员的操作提供连锁故障的警示。下一步工作是完善和发现智能变电站中可能引发连锁故障的保护隐患与新风险点。

### 附录 A



图A1 220 kV变压器故障的连锁故障路径事件链模板

Fig. A1 Event chain template of cascading failure path for 220 kV transformer fault

### 附录 B

一个典型变电站的邻接矩阵  $A$  如下：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	T1	T2	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
B1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B4	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0
B6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
T1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

为一条 110 kV 线路 L3 查找其在同一个电压等级侧各相邻线路，具体的查找方法如下。

对于 110 kV 线路 L3，它位于一次设备邻接矩阵  $A$  的第 11 行，先找到该行中非 0 的元素，可看到第 6 列元素  $a_{11,6} = 1$ ，它是 110 kV-I 母 B6。

通过 B6 所在的第 6 行，找到该行中元素值为 1 的各元素，除去变压器 T1、母线 B5、与 B6 相连的各线路，由  $a_{6,11} = a_{6,13} = a_{6,15} = a_{6,18} = 1$ ，得到与 B6

相连的各线路分别是 110 kV 线路 L3、L5、L7、L10。故 110 kV 线路 L3 的相邻线路为 L5、L7、L10。

### 附录 C

连锁故障路径事件链态势感知算法逻辑如下。

**Step1:** 收集一个区域内保护与断路器动作值, 判断该区域内一次设备  $k$  故障。收集一次设备  $k$  所在保护的主保护、近后备与相邻远后备保护启动元件  $P_j$ , 构造一次设备  $k$  故障时的加权匹配度<sup>[22]</sup>。

当一次元件的加权匹配度  $M_k$  比周围一次元件的加权匹配度  $M_i$  都大, 且大于故障阈值  $M_{set}$ , 即满足判据式(C1)时, 则判断一次元件  $k$  故障。

$$\begin{cases} M_k > \forall M_i \ \&\& \ M_k - M_i > 0.15, k \neq i \\ M_k > M_{set} \end{cases} \quad (C1)$$

**Step2:** 当判断一次设备  $k$  发生故障时, 收集对应的保护及相邻保护与断路器的动作  $P$ 、告警信号 Alarms、保护设备中硬/软压板投退状态值 Plates。

**Step3:** 针对一次故障设备  $k$  的各事件链  $L_{ki}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  $L_{ki}$  的第 1 个事件是该一次设备故障, 从  $L_{ki}$  的第 2 个事件起, 将收集和感知的这些信息与各事件的描述、条件、动作等子项分别进行匹配。先进行字符串完全匹配, 如果没有完全匹配上, 再进行两个字符串的模糊匹配, 采用 RKR-GST 算法进行快速的字符串匹配<sup>[23]</sup>, 当该匹配度大于阈值 0.7 时, 则认为两个字符串模糊匹配上。

**Step4:** 如果当前的保护动作和告警信号与某个事件链匹配上, 则将该事件链加入到预警连锁故障路径事件链集合, 并完整展示它的故障路径及其触发原因及后果, 并进行保护验算, 然后退出; 否则,  $i = i + 1$ 。如果  $i \leq m$ , 转向 Step3; 否则转向 Step5。

**Step5:** 如果没有匹配上一次设备  $k$  的各连锁故障事件链, 且仅一次设备  $k$  发生故障而没有连锁故障, 就将一次设备  $k$  拥有的各连锁故障路径事件链进行展示, 向工作人员提示可能的连锁故障风险点。

**Step6:** 如果没有匹配一次设备  $k$  各连锁故障事件链, 但是有连锁故障发生, 则形成一条新连锁故障事件链, 存储到事件链库加以学习并进行预警。

### 参考文献

- [1] ELIZONDO D C. A methodology to assess and rank the effects of hidden failures in protection schemes based on regions of vulnerability and index of severity[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [2] 吴旭, 张建华. 基于状态检修的 N-k 故障在线辨识及路径搜索[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 81-86.  
WU Xu, ZHANG Jianhua. On-line identification and path search of N-k contingency on the basis of condition-based maintenance[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 81-86.
- [3] 张晶晶, 吴佳瑜, 齐先军, 等. 基于网络依存关系的 CPPS 连锁故障分析及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 164-171.  
ZHANG Jingjing, WU Jiayu, QI Xianjun, et al. Cascading failure analysis and risk assessment of CPPS based on network dependency[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 164-171.
- [4] 金波, 肖先勇, 李长松. 基于一、二次系统交互关系的电网连锁故障演化机制分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 169-175.  
JIN Bo, XIAO Xianyong, LI Changsong. Analysis of cascading failure evolution based on interaction between primary and secondary systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 169-175.
- [5] 张娟, 童晓阳, 姜建伟. 基于渗流和风险理论的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 46-52.  
ZHANG Juan, TONG Xiaoyang, JIANG Jianwei. Analysis on power system cascading failure based on percolation and risk theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 46-52.
- [6] 周虎兵, 张焕青, 杨增力, 等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.  
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.
- [7] 朱元振, 刘玉田. 基于深度学习直流闭锁判断的高风险连锁故障快速搜索[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 59-66.  
ZHU Yuanzhen, LIU Yutian. Fast search for high-risk cascading failures based on deep learning DC blocking judgment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 59-66.
- [8] 张晶晶, 陈博进, 尉静慧, 等. 一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 125-132.  
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.
- [9] 丁茂生, 钱胜, 王超, 等. 基于改进状态空间分割法的继电保护设备拒动风险评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 160-166.  
DING Maosheng, QIAN Sheng, WANG Chao, et al. Risk

- assessment of relay protection equipment rejection based on improved state space partitioning method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 160-166.
- [10] 罗毅, 王英英, 万卫, 等. 电网连锁故障的事故链模型[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(24): 1-5.  
LUO Yi, WANG Yingying, WAN Wei, et al. Fault chains model for cascading failure of grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(24): 1-5.
- [11] 韩迎春, 童晓阳. 基于动态推理链的电网故障诊断方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1315-1324.  
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. Power system fault diagnosis based on dynamic reasoning chain[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1315-1324.
- [12] 杨杰明, 罗晓军, 曲朝阳, 等. 变电站自动化系统连锁故障分析模型[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(23): 36-41.  
YANG Jieming, LUO Xiaojun, QU Zhaoyang, et al. Analysis model for cascading failures of substation automation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(23): 36-41.
- [13] 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.
- [14] 董尔佳. 几起智能变电站继电保护误动事故分析[J]. *黑龙江电力*, 2017, 39(3): 204-207, 228.  
DONG Erjia. Analysis on several maloperation accidents of relay protection in smart substations[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2017, 39(3): 204-207, 228.
- [15] 杨天宝. *电力工程技术*[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [16] 刘晟源, 林振智, 李金城, 等. 电力系统态势感知技术研究综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3): 229-239.  
LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, LI Jincheng, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3): 229-239.
- [17] 王洪彬, 周念成, 黄睿灵, 等. 基于深度学习的110 kV电网监控信号语义解析及态势感知模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 160-168.  
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, HUANG Ruiling, et al. 110 kV signal semantic analysis and situation awareness model based on deep learning theory for a power system monitoring system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 160-168.
- [18] TAN Weitao, LIU Shengyuan, YANG Li, et al. Curvature quantified Douglas-Peucker-based phasor measurement unit data compression method for power system situational awareness[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(2): 128-137.
- [19] AHMAD T, PAPADOPOULOS P N. Dynamic functional connectivity graph for assessing cascading events in power system[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 235.
- [20] MU Zeyu, XU Peidong, ZHANG Ke, et al. Cascading fault early warning and location method of transmission networks based on wide area time-series power system state[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2023, 7: 6-11.
- [21] 蒋航, 刘进, 熊俊, 等. 基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 97-103.  
JIANG Hang, LIU Jin, XIONG Jun, et al. Research on relay protection setting risk assessment based on real-time information of line secondary facility[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 97-103.
- [22] TONG Xiaoyang, LIAN Wenchao, WANG Hongbin. A novel multi-section weighed fault matching and online detecting algorithm based on wide-area[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, 12(6): 2118-2126.
- [23] 牛永洁. RKR-GST算法在.NET中的分析与实现[J]. *信息技术*, 2012, 36(3): 171-174.  
NIU Yongjie. Analysis and implementation of RKR-GST algorithm in .NET[J]. *Information Technology*, 2012, 36(3): 171-174.

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-02-25

作者简介:

朱峻永(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站、保护与控制;

杨东赞(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能变电站、保护与控制;

童晓阳(1970—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流线路保护、智能变电站运维、综合能源优化。E-mail: xyotong@swjtu.cn

(编辑 周金梅)