

基于连通状态矩阵的智能变电站安措校核方法

高旭¹, 马迎新¹, 王可², 汤翔鹰², 江知瀚¹, 高翔³, 胡炎²

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240;

3. 上海毅昊自动化有限公司, 上海 201204)

摘要:智能变电站采用网络通信模式,其二次安措具有操作对象复杂、隐含不直观的缺点,安措票的正确性难以保证。首先基于变电站配置描述(SCD)文件、IED能力描述(ICD)文件和光纤物理回路描述(SPCD)文件等模型文件,建立智能变电站二次设备的静态拓扑模型,然后读取二次设备的相应状态,进而提出基于二次设备连通状态矩阵的智能变电站安措校核方法。该方法读取安措操作的步骤集合,对安措操作的每一步进行操作校核,检验该操作是否会造成保护的误闭锁或误动作,在操作校核通过后,再进行安措隔离校核,检验检修设备和运行设备之间是否实现了有效隔离。通过某变电站事故和某220 kV智能变电站的算例,证明了所提安措校核方法的有效性。

关键词:智能变电站;静态拓扑模型;二次安措;连通状态矩阵;操作校核;隔离校核

中图分类号:TM 76

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.029

0 引言

自2004年IEC61850^[1]标准正式颁布以来,基于IEC61850标准的数字化及智能变电站工程应用获得了快速发展^[2]。迄今为止,国网系统已经有超过4 000座智能变电站投入运行,“十三五”末期预计新建智能变电站将达到8 000座,我国已成为智能变电站投运数量最多的国家^[3-4]。智能变电站的一大特点就是“三层两网”的网络通信替代二次系统的大量电缆^[5-6]。模拟量采样的交流回路采用采样值(SV)报文通信,保护跳闸、开入开出量等信息采用面向通用对象的变电站事件(GOOSE)报文通信。由于智能变电站独特的通信特点,智能变电站在改建、扩建和装置检修时,二次设备安措的操作往往由GOOSE/SV软压板、跳合闸出口硬压板、检修硬压板等多种形式的安措操作要求组合而成,存在压板数量多、隐含不直观、无“明显电气断开点”等特点。

当前智能变电站检修安措的难点在于需要针对不同的设备类型、不同的检修范围以及不同的一次设备状态,制定不同的二次安全隔离措施。由于运行检修方式多样,典型操作票仅能作为参考,运维人员仍需根据工作经验制定相应的二次安全隔离措施,从而导致二次安全措施存在灵活多样、因人而异的特点。当前智能变电站缺少有效的二次安措校核手段,难以保证检修的各项操作不会对电力系统造成不利影响。为了校核每一步安措操作的安全性,同时验证二次安措操作完成后在检修设备和运行设备之间是否有效隔离,必须提出一种有效的智能变电站安措校核方法。

受实际需要的驱使,当前已有大量电网工作人员提出了变电站二次安措的校核技术。文献[7]设

计了一套安措规则数据库的结构方案,适用于目前智能变电站的检修安措规则的有效便捷存储。文献[8]展望了智能变电站的高级应用场景,探索了从完整配置的变电站配置描述SCD(Substation Configuration Description)文件模型出发实现智能变电站的防误闭锁、智能安措票以及智能告警等高度智能化的应用。文献[9]从智能变电站二次安措防误的角度,提出了基于安措隔离原则的安措票自动校验技术,以期减少二次设备操作人员负担,减少失误。文献[10]从软压板在智能变电站中的应用出发,提出软压板防误操作的基本原则和具体策略,其以逻辑表达式形式对软压板防误逻辑进行形式化,并给出了其自动生成方法,以及在监控后台的实现方案。但是文献[9-10]均通过隐含的隔离原则或者逻辑防误表达式实现安措校核,当应用于全站建模时,其表达式复杂度以几何级数增加,难以应用于实际的智能变电站二次安措校核。

智能变电站的安措票校核主要包括2类问题。

(1)安措操作校核。安措票执行过程中,需要依次对安措票中的每一步安措操作进行校核,校核的目标是确保每一步安措操作的安全性,及时发现可能导致的保护误闭锁或误动作等。

(2)安措隔离校核。安措票执行完成后,需要校核是否实现了有效隔离。校核的目标是检修设备与运行设备之间的隔离是否完备,检修人员即将对检修设备进行的检修操作是否会对运行设备造成影响。

本文首先给出在预演环境中对安措票进行校核的主流程,详细阐述了其中的各个主要模块;然后根据智能变电站的各种配置文件,建立智能变电站全站二次设备的静态拓扑模型,接着通过引入连通状态矩阵描述整个智能变电站中二次设备之间的连通状态,并在此基础上提出了安措操作校核和安措隔

离校核的数学计算方法。

1 安措校核的主流程

对智能变电站中二次设备 2 类问题进行安全校核,是为了保证运行人员进行每一步安全操作时的安全性,以及检修人员在检修工作时检修设备与运行设备完全隔离性。由此可得安措校核的基本原理为:在按照安措票进行每一步操作时,都没有设备的闭锁或保护的误动;根据检修任务确定的检修设备集合中的检修设备,不能影响运行设备。

根据安措校核的基本原理,可以得出在预演环境中进行安措校验的数学推理方法,其步骤如下。

(1) 根据智能变电站 SCD 文件、IED 能力描述 (ICD) 文件结合装置说明书以及 DL/T1777—2017《智能变电站二次设备屏柜光纤回路技术规范》的光纤物理回路描述 (SPCD) 文件建立安措校核的静态拓扑模型,其中 SPCD 文件主要规定了智能变电站二次回路中光纤回路及站控层双绞线回路描述文件、回路编码及标识信息的技术要求。

(2) 读取二次设备的软压板、硬压板、硬连接以及断路器的当前状态,生成初始的连通状态矩阵 A 和检修硬压板状态行向量 y ,其中硬压板和硬连接无法在线获取状态信息,需采取人工置位的方式。

(3) 定义智能变电站中各二次设备的闭锁逻辑表达式集合以及误动逻辑表达式集合。

(4) 读取安措操作步骤集合。每读取到一步安措操作,修正连通状态矩阵 A 和检修硬压板状态行向量 y ,其修正方法如下。

a. 装置之间的连接开断操作,包括软压板投退、光纤插拔、电流互感器/电压互感器断开、智能终端跳合闸出口硬压板的投退等所有影响装置之间的数据传输通道的操作,对应改变 A 。

b. 装置的检修硬压板投入操作,对应改变检修硬压板状态行向量 y 。

c. 将修正后的连通状态矩阵 A 和检修硬压板状态行向量 y 代入各二次设备的闭锁逻辑表达式和误动逻辑表达式进行一步安措操作校核计算。若不通过,则安措操作校验失败;若通过,则读取下一步的安措票继续校核,直至完成所有安措操作步骤校核。

d. 所有步骤校核完成后,则说明安措操作校验通过,再进行对安措操作结果的隔离校核,若隔离校核失败,则校核不通过;若隔离校核成功,则整个预演的安措操作校核通过。

具体的安措校核计算流程如图 1 所示。

2 安措校核的静态拓扑建模

智能变电站中,二次设备之间的相互影响依赖

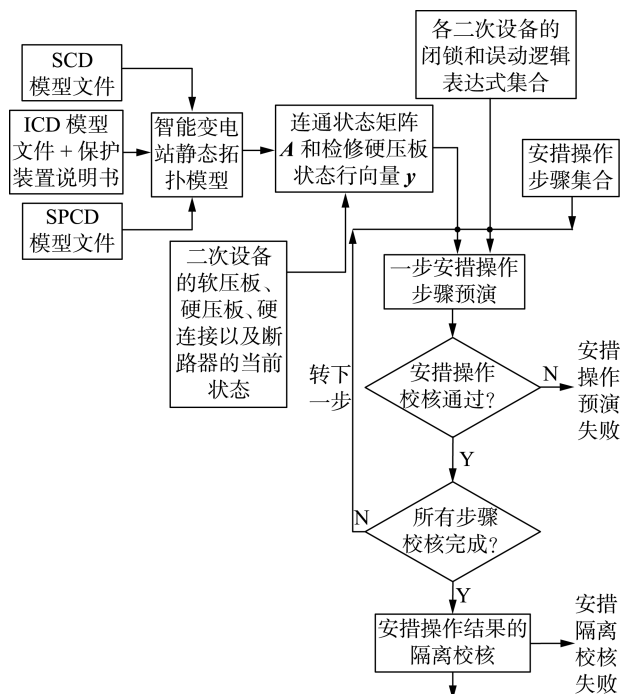


图 1 在预演环境中进行安措校核的流程图

Fig.1 Flowchart of verification for security measures in rehearsal situation

于二次设备之间的静态拓扑连接关系以及连通状态^[11],因此对智能变电站中二次设备之间的连通状态关系建模是安措校核数学推理方案的基础。二次设备间的数据连通关系可以由图 2 来表示。图中, a_{ij} 表示设备 i 输出到设备 j 的数据传送状态; a_{ji} 表示设备 j 输出到设备 i 的数据传送状态。

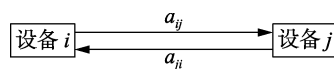


图 2 二次设备间的数据连通关系

Fig.2 Data connections between secondary equipments

上述 2 个通道所建立起的 2 个设备间的连通状态由以下 3 个关系决定。

(1) GOOSE/SV 接收订阅关系。

智能变电站中的通信均采用 GOOSE/SV 报文的形式,如果设备 j 不订阅来自设备 i 的 GOOSE/SV 报文,则认为 a_{ij} 一定为 0,上述 GOOSE/SV 订阅关系即为智能变电站的二次虚回路体系,其拓扑结构由 SCD 文件给出。

(2) 设备的输出和输入软压板开断关系。

在二次虚回路中设置有软压板,在 GOOSE/SV 报文通信的基础上,提供软件实现的通信通道开关。所以如果控制 a_{ij} 对应虚回路的软压板没有投入,仍认为 $a_{ij}=0$,设备的软压板设置与其二次虚回路的端口在 SCD 文件中均有描述信息^[12],但是其相互之间的对应关系无法从 SCD 文件中得到,可以通过装置的 ICD 文件结合厂家提供的装置说明书得到。

(3) 物理连接关系。

SCD 文件提供的二次虚回路配置是逻辑意义上的,在智能变电站中实现二次设备间的连通,必须以物理的光纤连接为基础,即二次虚回路的存续依赖于光纤连接通道的存续。所以如果不存在物理连接关系(或存在连接但发生故障),则 $a_{ij}=0$ 。

上述 3 种决定连通状态的关系分别对应 3 种智能变电站的静态描述文件,即 SCD 文件、ICD 文件和 SPCD 文件,利用这 3 种文件,即可对智能变电站中各二次设备间的连通状态进行静态拓扑建模^[13-15]。具体如下。

(1) 根据 SCD 文件中元素 IED 下的 ExtRef 标签下的 iedName、ldInst、lnClass 和 doName 等属性可以解析出输出虚端子的路径;再根据 ExtRef 标签下的 intAddr 属性解析出该 IED 的输入虚端子路径,则可以构建二次虚回路连接关系,由此,可以实现智能变电站中所有二次虚回路的拓扑结构建模。

(2) 由于 SCD 文件是 ICD 文件的实例化应用,因此,SCD 文件中指定 IED 的软压板配置路径和二次虚回路的对应关系与该型号 IED 的 ICD 文件相同。ICD 文件中的软压板配置路径和二次虚回路的对应关系由该型号 IED 的装置说明书中定义。由此,通过各个 ICD 文件与该型号 IED 的装置说明书,可以建立起各类型 IED 的软压板配置路径与二次虚回路的映射关系库。

(3) SCD 文件中 Communication 标签下描述了各 IED 的物理光纤链路配置情况,包括端口号以及光缆名称,通过在 SPCD 文件中索引上述端口号以及光缆名称,可以获取具体的智能变电站物理连接回路信息。由此,通过在 SCD 文件中检索逻辑虚回路,在 SPCD 文件中检索物理连接回路,可以获取逻辑回路与物理回路的映射关系,实现二次设备之间的硬连接建模,其建模过程如图 3 所示。通过 SCD 文件、SPCD 文件、ICD 文件以及装置说明书,可以获得装置之间的逻辑连接(即虚回路)和物理连接(即光缆)关系,以及影响这些连接关系通断状态所对应的软压板、硬压板等。装置之间的静态拓扑建模完成后,再根据软压板、硬压板、硬连接等的实时状态采集,即可不断更新连通状态矩阵,获得装置之间的

实时连通关系。

3 连通状态矩阵的计算

在第 2 节中任意两设备间连通关系数学建模的基础上,可以用数学的方法描述整个智能变电站中二次设备之间的连通状态,引入连通状态矩阵。由于在变电站中二次设备很多,根据各种变电站配置文件建立二次拓扑模型的难度较大,在配置文件不规范的情况下还需要大量工程化的工作。本文不对其获取过程进行详细介绍,而是重点分析在已经获得连通状态矩阵的情况下进行安措校核的数学计算方法。

连通状态矩阵的具体形式如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_{ij} = \text{sign}[\text{sum}(k_{ij} * m_{ij} * l_{ij})] \quad (2)$$

其中, a_{ij} 表示从设备 i 到设备 j 的当前有向直连状态, $a_{ij}=1$ 表示连通; n 为智能变电站中二次设备的数量; k_{ij} 为从设备 i 到设备 j 的直连回路 m 维行向量; m_{ij} 为从设备 i 到设备 j 的操作对象软压板的开断状态 m 维行向量; l_{ij} 为从设备 i 到设备 j 的操作对象硬连接的开断状态 m 维行向量; m 为从设备 i 到设备 j 的直连虚回路个数; $*$ 表示矩阵点乘,即矩阵对应位置的元素对应相乘; $\text{sum}(\cdot)$ 表示对向量中所有元素求和; $\text{sign}[x]$ 为符号函数,当 $x>0$ 时, $\text{sign}[x]=1$,当 $x=0$ 时, $\text{sign}[x]=0$ 。

3.1 软压板和硬连接操作

软压板操作对应 m_{ij} 的改变,硬连接操作对应 l_{ij} 的改变。安措操作中,遇到有设备 i 和设备 j 之间的软压板或者硬连接的操作,则对应改变 m_{ij} 和 l_{ij} 的值,进而影响 a_{ij} ,从而造成连通状态矩阵 A 的改变。

3.2 检修硬压板和跳合闸硬压板操作

若装置 i 的检修硬压板投入(或者跳合闸出口硬压板退出),则装置 i 的输出信号带检修标志(或者无法输出信号),不能对运行设备形成干扰,所以将 $a_{ij}(j=1,2,\dots,n)$ 全部置为 0,即连通状态矩阵 A 的第 i 行全部置 0。

4 安措校核的数学计算方法

4.1 安措操作校核的数学计算方法

安措操作校核的目的是为了在安措预演环境中,校核每一步安措操作是否会造成保护的误闭锁或误动。事实上,导致保护误闭锁或误动的逻辑会有多种情况,本文根据大量案例总结出 2 个典型的

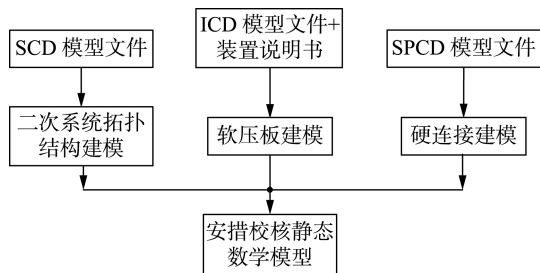


图 3 安措校核的静态拓扑建模

Fig.3 Static mathematical modeling for security measures verification

误闭锁逻辑和误动逻辑,在具体实现时可扩展。为了保证扩展时逻辑的完备性,需要根据大量实际案例或实际案例中没有出现的预想案例,不断丰富逻辑表达式。

(1) 一步安措操作的计算方法。

定义智能变电站全站设备的运行状态行向量 $\mathbf{u}$ 和检修硬压板状态行向量 $\mathbf{y}$:

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_n] \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n] \quad (4)$$

其中, u_i 为设备 i 的当前运行状态, $u_i = 1$ 表示非正常运行状态; y_i 为设备 i 的当前检修硬压板状态, $y_i = 1$ 表示投入。

对智能变电站中的任一设备 p , 定义其闭锁逻辑表达式集和误动逻辑表达式集合分别如式(5)、(6)所示。

$$C^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \{c_1^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}), c_2^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}), \dots, c_{r_p}^p(\mathbf{A}, \mathbf{y})\} \quad (5)$$

$$D^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \{d_1^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}), d_2^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}), \dots, d_{s_p}^p(\mathbf{A}, \mathbf{y})\} \quad (6)$$

其中, r_p 为设备 p 的闭锁逻辑表达式个数; s_p 为设备 p 的误动逻辑表达式个数; $c_i^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = 1 (i = 1, 2, \dots, r_p)$ 时表示设备闭锁; $d_j^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = 1 (j = 1, 2, \dots, s_p)$ 时表示设备误动。在进行安措票预演时, 每进行一步安措操作之后, 对智能变电站设备集合中的所有设备进行校核计算, 设备 p 的校核计算结果表达式为:

$$u_p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{r_p} c_i^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) + \sum_{j=1}^{s_p} d_j^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) \quad (7)$$

若 $u_p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = 1$, 则该设备处于非正常运行状态; 若 $u_p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = 0$, 则该设备处于正常运行状态。

对于整个智能变电站而言, 其二次安措操作安全性的校核结果为:

$$U(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n u_i(\mathbf{A}, \mathbf{y}) \quad (8)$$

即如果任一设备处于非正常运行状态, 则认为该二次安措操作步骤是不安全的, 校核不通过。

(2) 典型逻辑表达式。

1) 典型闭锁逻辑表达式。

图 4 为闭锁逻辑表达式中相关设备的二次接线图。对于图 4 所示的典型保护装置 p 的二次接线图, 定义其闭锁逻辑表达式集合 $C^p(\mathbf{A}, \mathbf{y})$ 中的一个闭锁逻辑表达式如下:

$$c_1^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \sum [(y_i \oplus y_p) a_{ip}] \quad (9)$$

其中, i 为智能变电站中所有输出到当前保护装置 p 的合并单元的序号, 可基于 SCD 模型文件得到; a_{ip} 为连通状态矩阵中的连通状态; $\oplus$ 表示对与保护装置相关的所有合并单元进行逻辑运算“异或”。

2) 典型误动逻辑表达式。

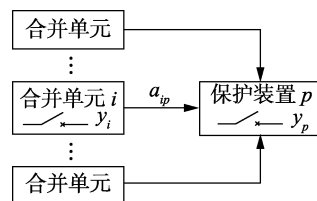


图 4 闭锁逻辑表达式中相关设备的二次接线图

Fig.4 Secondary connection diagram of equipments in locking logic formula

图 5 为误动逻辑表达式中相关设备的二次接线图。对于图 5 中的保护装置 p , 定义其误动逻辑表达式集合 $D^p(\mathbf{A}, \mathbf{y})$ 中的一个误动逻辑表达式如下:

$$d_1^p(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \bar{y}_p \left(\sum a_{pk} \right) \left[\left(\sum \bar{y}_j a_{jp} \right) \left(\sum \bar{y}_j \bar{a}_{jp} \right) \right] \quad (10)$$

其中, k 为智能变电站中当前保护装置 p 的所有跳闸回路对端智能终端的序号, 可基于 SCD 模型文件得到; j 为智能变电站中所有输出到当前保护装置 p 的合并单元的序号; a_{pk} 、 a_{jp} 为连通状态矩阵中的连通状态; “-”表示取否; $\bar{y}_p$ 表示保护装置的检修硬压板退出才能出口误动跳闸信号; $\sum a_{pk}$ 表示至少有 1 条跳闸回路是连通的才能出口误动跳闸信号; $\left(\sum \bar{y}_j a_{jp} \right) \left(\sum \bar{y}_j \bar{a}_{jp} \right)$ 表示与保护装置相连的合并单元中, 当同时满足以下 2 种情况时才会出现差流。

a. 有 1 个合并单元处于正常状态(不检修), 并且其与保护装置的连通状态为连通。

b. 有 1 个合并单元处于正常状态(不检修), 并且其与保护装置的连通状态为不连通。

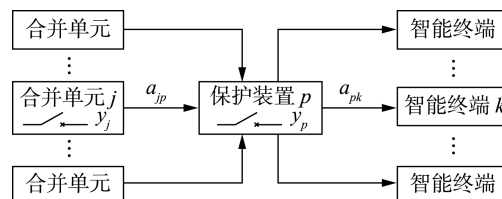


图 5 误动逻辑表达式中相关设备的二次接线图

Fig.5 Secondary connection diagram of equipments in malfunction logic formula

不考虑差流与保护整定值之间的大小关系, 则出现差流即会引起保护误动。

4.2 安措隔离校核的数学计算方法

运行人员安措票操作完成后, 二次设备间的隔离状态已经确定, 但是由于智能变电站中二次设备数量多、接线复杂隐含的特点, 难以直观确定检修设备与运行设备之间的隔离完备性, 需要一种能够自动推理计算出二次设备间隔离状态的方法。

4.2.1 一次连通推理的数学计算方法

当安措票预演完成, 则智能变电站中二次设备之间的连通状态确定, 结合由检修任务确定的检修

设备集,可以进行下一步的检修设备与运行设备隔离的计算推理。不经过任何其他设备的连接,仅通过本设备对其他设备的直连回路通道对其他设备产生影响,称为一次连通推理,其方法如下:

$$\text{sign}[\mathbf{x}_{1 \times n} \times \mathbf{A}] = \mathbf{b}_{1 \times n} \quad (11)$$

其矩阵的展开式形式如下:

$$\text{sign} \left[\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \right] = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \cdots & b_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$b_i = \text{sign}[x_1 a_{1i} + x_2 a_{2i} + \cdots + x_n a_{ni}] \quad (13)$$

其中, $\mathbf{x}_{1 \times n}$ 为变电站二次设备初始状态行向量,由检修设备集确定; $\mathbf{A}$ 为安措预演完成后的连通状态矩阵; $\mathbf{b}_{1 \times n}$ 为 $\mathbf{x}_{1 \times n}$ 经过一次连通推理之后,变电站二次设备的状态行向量; x_i 为设备 i 的初始状态, $x_i = 1$ 表示检修; b_i 为设备 i 的当前状态, $b_i = 1$ 表示受检修影响。

4.2.2 隔离校核的计算方法

式(12)为式(11)的具体矩阵展开形式,两式都表达了在给定变电站检修设备集以及设备间连通状态这2个信息的情况下,通过直连回路通道对其他设备进行影响的计算推理。

而在已知连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 以及检修设备集 $\mathbf{x}$ 的情况下,只需要不断进行一次连通推理,即可得到智能变电站二次设备最终的隔离状态,其具体计算方法如下。

步骤1:初始化,令 $i = 1$ 。

步骤2:按照式(11)计算得到 $\mathbf{b}^{(i)}$ 。比较 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{b}^{(i)}$,若 $\mathbf{x} \neq \mathbf{b}^{(i)}$,则转至步骤3;若 $\mathbf{x} = \mathbf{b}^{(i)}$,则转至步骤4。

步骤3:令 $\mathbf{x} = \mathbf{b}^{(i)}$, $i = i + 1$,转步骤2。

步骤4:若 $i = 1$,则隔离校核通过,检修设备不能对运行设备造成影响;若 $i \neq 1$,则隔离校核不通过, $\mathbf{b}^{(i)}$ 表达了最终受检修影响的设备信息。

5 算例分析

5.1 安措操作校核算例——某变电站事故

5.1.1 事故原因

2015年9月21日,国网某检修公司在进行220 kV某变电站220 kV开关合并单元更换,恢复220 kV母差保护的过程中,运行人员执行倒闸操作顺序错误,导致母差保护动作。其保护的误动原因为:在恢复220 kV I—II段母线A套差动保护过程中,运行人员错误地将母差保护“投检修”压板提前退出,并投入了I、II母各间隔“GOOSE发送软压板”,使母差保护具备了跳闸出口条件,在批量投入“间隔投

入软压板”的过程中,母差保护出现差流并达到动作条件,母差保护动作。

5.1.2 仿真分析

在本算例仿真分析中,以PM5001A表示该变电站I母的A套母差保护装置,以断路器5011、5021、5031表示连接到该变电站I母的3个间隔,仿真分析该变电站中恢复母差保护装置前的压板状态,即PM5001A的检修硬压板投入,对应断路器5011、5021以及5031的“间隔投入软压板”和“GOOSE发送软压板”全部退出,则所涉及到的二次设备之间的接线如图6所示。

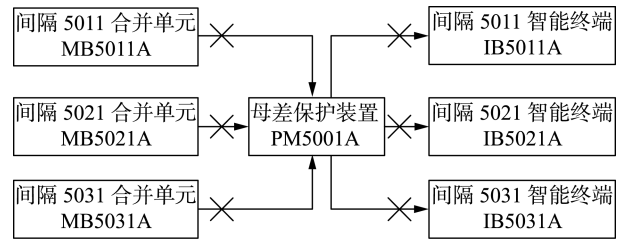


图6 某变电站事故算例二次设备接线图

Fig.6 Connection diagram of secondary equipments in a substation accident

对图6所示的该变电站事故算例其所涉及的二次设备作如下规定:序号1—7分别对应MB5011A、MB5021A、MB5031A、PM5001A、IB5011A、IB5021A、IB5031A。定义PM5001A的误动逻辑表达式集合 $D^4(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \{d_1^4(\mathbf{A}, \mathbf{y})\}$, 其中 $d_1^4(\mathbf{A}, \mathbf{y})$ 为:

$$d_1^4(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = \bar{y}_4 \left(\sum_{i=5}^7 a_{4i} \right) \left[\left(\sum_{j=1}^3 \bar{y}_j a_{j4} \right) \left(\sum_{j=1}^3 \bar{y}_j \bar{a}_{j4} \right) \right] = \bar{y}_4 (a_{45} + a_{46} + a_{47}) [(\bar{y}_1 a_{14} + \bar{y}_2 a_{24} + \bar{y}_3 a_{34}) \times (\bar{y}_1 \bar{a}_{14} + \bar{y}_2 \bar{a}_{24} + \bar{y}_3 \bar{a}_{34})] \quad (14)$$

则PM5001A的校核计算结果表达式为:

$$u_4(\mathbf{A}, \mathbf{y}) = d_1^4(\mathbf{A}, \mathbf{y}) \quad (15)$$

在此变电站事故中错误的恢复PM5001A母差保护的安措步骤为:

- (1)退出母差保护PM5001A的检修硬压板;
- (2)依次投入母差保护PM5001A对应各间隔的“GOOSE发送软压板”;
- (3)依次投入母差保护PM5001A对应各间隔的“间隔投入压板”。

按照上述步骤进行安措预演的结果如表1所示。

表1 安措操作校验预演结果

Table 1 Results of verification of security measures

预演步骤	预演结果
(1)	$d_1^4 = 0, u_4 = 0$
(2)	$d_1^4 = 0, u_4 = 0$
(3)	$d_1^4 = 1, u_4 = 1$

根据表1可以得到在第三步操作后校验不通过,母差保护PM5001A在该安措步骤操作之后误动。

安措操作校核算例的详细计算过程见附录。

5.2 安措检修校核算例——某 220 kV 智能站的 110 kV 间隔扩建案例分析

5.2.1 事故描述及原因分析

某 220 kV 智能站进行 110 kV 间隔扩建工作。由于工作需要,110 kV I 段母线及母线压变检修,1 号主变中压侧冷备用,高、低压侧运行;中压侧中性点接地刀闸合位,间隙短接。为配合新间隔接入母差保护,110 kV 母差保护信号状态。

在工作期间,为模拟 110 kV I 段母线电压,调试人员主观认为在 110 kV 第 1 套母线合并单元加入模拟量不会影响运行设备。在未申请增补相应安全技术措施的情况下,调试人员直接采用模拟测试仪在电压端子加量。最终导致 1 号主变间隙过压保护动作,跳开 1 号主变高、低压侧开关。

为阐述保护误动原因,将案例中涉及到的系统结构进行简化,如图 7 所示。

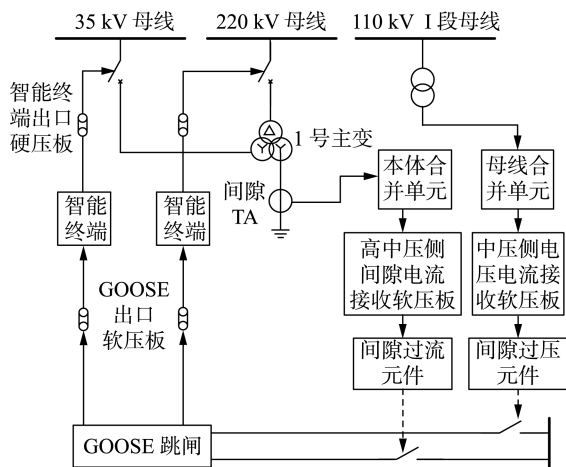


图 7 系统结构简化图

Fig.7 Simplified diagram of system structure

图 7 中,主变间隙电流由本体合并单元采集,直接接入主变保护;主变保护中压侧母线电压采集自 110 kV 母线合并单元;主变保护中压侧电压、电流采集共用 1 块软压板。

主变中压侧冷备用,仅退出 110 kV 母差保护相应 GOOSE 跳闸出口软压板,以及主变保护中压侧相关联跳软压板,主变保护仍能有效地接收 110 kV 母线合并单元的采集量,在不平衡电压达到整定值时,完成出口。

5.2.2 案例仿真分析

仿真范围包括 110 kV 母线合并单元、变压器本体合并单元、变压器间隙保护装置(包含间隙过流保护元件和间隙过压保护元件)、变压器 220 kV 侧智能终端、变压器 35 kV 侧智能终端之间的连接,连通状态矩阵中各个设备的排列序号也按照上述顺序,则其连通状态矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由于 110 kV 母线和母线压变检修,因此检修设备集为 110 kV 母线合并单元,由此确定的变电站设备初始状态行向量为:

$$x = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (17)$$

第 1 次计算结果为 $b^{(1)} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$, $b^{(1)} \neq x$,令 $x = b^{(1)}$,继续计算。

第 2 次计算结果为 $b^{(2)} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$, $b^{(2)} \neq x$,令 $x = b^{(2)}$,继续计算。

第 3 次计算结果为 $b^{(3)} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$, $b^{(3)} = x$,计算停止。

最终计算结果为 $b^{(3)} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]$,所以隔离校核不通过。最终计算结果说明变压器间隔保护装置、变压器 220 kV 侧智能终端、变压器 35 kV 侧智能终端等运行设备没有与检修设备(110 kV 母线合并单元)完全隔离。

6 结论

本文针对智能变电站二次安措中操作对象复杂、压板数量多、隐含不直观和无“明显电气断开点”等特点,为解决 2 类安措票校核问题,在安措票操作时,对每一步操作的正确性进行校核,在安措票操作完成后对智能变电站中的检修设备与运行设备之间的隔离状态进行校核,提出了基于连通状态矩阵的智能变电站二次安措校核方法,其主要有以下 3 个优点:

(1) 基于 SCD 文件、ICD 文件和 SPCD 文件实现智能变电站二次系统逻辑回路和物理回路的静态拓扑建模,保证了建模的准确性和完整性;

(2) 提出了智能变电站二次设备连通状态矩阵的数学概念,以高度抽象的矩阵形式刻画二次设备在安措操作前后的连通状态改变,为后续的安措校核推理提供基础;

(3) 从安措操作校核和安措隔离校核 2 个方面,提出了安措校核的数学推理方法,其计算机理简单可靠,计算复杂度低,可以应对各种规模的智能变电站二次安措的校核需要。

在未来的工程应用中,还需要在以下方面开展进一步的研究。

(1) 图形化的虚拟操作环境,能够在虚拟环境中对压板进行操作,读取当前状态;只有经过预演环境的充分校验并不断完善后,安措校核服务才建议在线配置。

(2) SCD 和 SPCD 等模型文件的正确性检查功

能,并提供界面方便补充模型信息,如压板与回路的关联等。

综上所述,本文提出的基于连通状态矩阵和数学推理的智能变电站二次安措校核方法,补足了智能变电站二次安措校核不足的问题,提供了在实际操作前的纠错手段,有利于降低智能变电站二次安措操作的风险。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] IEC. Communication networks and systems in substations: IEC61850-6 [S]. Geneva, Switzerland: IEC Publications, 2009.
- [2] 高翔. 智能变电站技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 51-76.
- [3] 张沛超, 高翔. 智能变电站 [J]. 电气技术, 2010(8): 4-10.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Intelligent substation [J]. Electrical Technology, 2010(8): 4-10.
- [4] 胡道徐, 沃建栋. 基于 IEC61850 的智能变电站虚回路体系 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 78-82.
HU Daoxu, WO Jiandong. Virtual circuit system of smart substations based on IEC61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 78-82.
- [5] 国家电网公司. 智能变电站技术导则: Q/GDW383—2009 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 孙一民, 刘宏君, 姜健宁, 等. 智能变电站 SCD 文件管控策略完备性分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 105-109.
SUN Yimin, LIU Hongjun, JIANG Jianning, et al. Analysis on completeness of substation configuration description file control strategy for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 105-109.
- [7] 徐晓春, 汤同峰, 赵雨田, 等. 智能变电站二次设备检修安措规则数据库设计与实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 111-116.
XU Xiaochun, TANG Tongfeng, ZHAO Yutian, et al. Design and implementation of maintenance protection rule database for secondary equipment of smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 111-116.
- [8] 叶刚进. IEC61850 标准在智能化变电站工程化应用研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
YE Gangjin. Research on IEC61850 standard applied to smart substation [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [9] 张旭升, 李江林, 赵国喜. 智能变电站二次安措防误系统研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 141-146.
ZHANG Xusheng, LI Jianglin, ZHAO Guoxi. Research and application of the anti-misoperation system for the intelligent station secondary equipment security measures [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 141-146.
- [10] 卜强生, 高磊, 闫志伟, 等. 智能变电站继电保护软压板防误操作策略及实现 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 156-168.
BU Qiangsheng, GAO Lei, YAN Zhiwei, et al. Strategy and implementation of soft-clamp misoperation prevention for smart substation protections [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 156-168.
- [11] 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.
- [12] 国家电网公司. IEC61850 工程继电保护应用模型: Q/GDW 1396—2012 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [13] 高磊, 宋亮亮, 杨毅, 等. 基于多参量模型的智能变电站二次设备状态评估方法及应用 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 210-215.
GAO Lei, SONG Liangliang, YANG Yi, et al. Secondary equipment condition evaluation based on multi-parameter model for smart substations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 210-215.
- [14] 笃峻, 叶翔, 葛立青, 等. 智能变电站继电保护在线运维系统关键技术的研究及实现 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 163-168, 175.
DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 163-168, 175.
- [15] 笃峻, 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.

作者简介:



高旭

高旭(1975—),男,河北沧州人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为继电保护(E-mail: gxu2000@163.com);

马迎新(1979—),男,河南洛阳人,高级工程师,研究方向为继电保护(E-mail: myx2299@163.com);

王可(1994—),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: liuny0331@sjtu.edu.cn);

汤翔鹰(1995—),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为智能变电站运维、智能电网规划与优化运行(E-mail: xiangyangtang@sjtu.edu.cn);

江知瀚(1988—),男,重庆人,工程师,硕士,研究方向为继电保护(E-mail: jiangzhihancq@qq.com);

高翔(1962—),男,上海人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为继电保护及变电站自动化系统(E-mail: xiang_gao@syhpower.com);

胡炎(1975—),男,安徽阜阳人,副研究员,博士,主要研究方向为继电保护及变电站自动化系统、电力系统规划(E-mail: yanhu@sjtu.edu.cn)。

Verification for security measures of smart substation based on communication state matrix

GAO Xu¹, MA Yingxin¹, WANG Ke², TANG Xiangying², JIANG Zhihan¹, GAO Xiang³, HU Yan²

(1. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Shanghai Yihao Automation Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: Due to the application of network communication for smart substation, the security measures of secondary equipment become implicit and complicated, which makes it difficult to verify correctness of the security measures. A strategy for the verification of security measures for smart substations is proposed. Firstly, based on SCD (Substation Configuration Description) file, ICD (IED Capability Description) file and SPCD (Substation Fiber Physical Circuit Description) file, the static topology model of the secondary equipment for smart substations is constructed, and then the corresponding state of the secondary equipment is read. Then the verification method for security measures of smart substations based on communication state matrix is proposed, which reads the step set of security measure operation, checks each step of the security measure operation and checks whether the operation will cause mis-locking or mis-action of the protection. On the basis of the security measure operation verification, the isolation verification is performed to verify whether the effective isolation between the inspection equipment and the operating equipment is implemented. Through the case study of a substation accident and a 220 kV smart substation, the effectiveness of the proposed verification method for security measures is verified.

Key words: smart substations; static topology model; security measures of secondary equipment; communication state matrix; operation verification; isolation verification

(上接第 194 页 continued from page 194)

Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics

WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, PANG Hui, KONG Ming

(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The potential factors causing subsynchronous oscillation in Fengjie plants are analyzed before and after the operation of back-to back flexible HVDC transmission project connecting Chongqing and Hubei Power Grid. The damping characteristics of system in each frequency band are analyzed by complex torque coefficient approach combined with time-domain simulation, and the risk of sub-synchronous oscillation of Fengjie plants before and after the project operation is analyzed in terms of mechanism. On this basis, a hybrid damping control strategy is designed using multi-dimensional controllable characteristic, flexible and fast control characteristic of flexible HVDC. The typical working conditions are simulated, and results show that the proposed control strategy can make the system recover to steady state more quickly than the traditional control strategy.

Key words: flexible HVDC; sub-synchronous oscillation; damping characteristics; hybrid damping control

附录：某变电站事故算例

（1）事故前运行情况。

某变电站 220 kV 系统采用双母线双分段接线，有运行出线 8 回、主变 2 台，拉墨 I 线、曲墨 I 线运行于 I 母，拉墨 II 线、曲墨 II 线、2 号主变运行于 II 母，虎墨 I 线、墨山 I 线、3 号主变运行于 III 母，墨山 II 线、虎墨 II 线运行于 IV 母。2015 年 9 月 21 日，国网某检修公司在站内开展 II-IV 母分段 224 开关合并单元及智能终端更换、调试工作，224 开关处于检修状态。

（2）事故原因。

2015 年 9 月 21 日，国网某检修公司在进行 220kV 某变电站 220kV 开关合并单元更换，恢复 220kV 母差保护的过程中，运行人员执行倒闸操作顺序错误，导致母差保护动作。其保护的误动原因为：在恢复 220kV I-II 段母线 A 套差动保护过程中，运行人员错误地将母差保护“投检修”压板提前退出，并投入了 I、II 母各间隔“GOOSE 发送软压板”，使母差保护具备了跳闸出口条件，在批量投入“间隔投入软压板”的过程中，母差保护出现差流并达到动作条件，母差保护动作。

（3）仿真分析。

在本算例仿真分析中，以 PM5001A 表示该变电站 I 母的 A 套母差保护装置，以断路器 5011、5021、5031 表示连接到该变电站 I 母的 3 个间隔，仿真分析该变电站中恢复母差保护装置前的压板状态，即 PM5001A 的检修硬压板投入，对应断路器 5011、5021 以及 5031 的“间隔投入软压板”和“GOOSE 发送软压板”全部退出，则所涉及到的二次设备之间的接线如图 A1 所示。

对图 A1 所示的该变电站事故算例其所涉及的二次设备作如下规定：序号 1—7 分别对应 MB5011A、MB5021A、MB5031A、PM5001A、IB5011A、IB5021A、IB5031A。定义 PM5001A 的误动逻辑表达式集合 $D^4(A, y) = \{d_1^4(A, y)\}$ ，其中 $d_1^4(A, y)$ 为：

$$d_1^4(A, y) = \overline{y_4} \left(\sum_{i=5}^7 a_{4i} \right) \left[\left(\sum_{j=1}^3 \overline{y_j} a_{j4} \right) \left(\sum_{p=1}^3 \overline{y_p} a_{jp} \right) \right] = \overline{y_4} (a_{45} + a_{46} + a_{47}) \times \left[(\overline{y_1} a_{14} + \overline{y_2} a_{24} + \overline{y_3} a_{34}) \times (\overline{y_1} a_{14} + \overline{y_2} a_{24} + \overline{y_3} a_{34}) \right] \quad (A1)$$

则 PM5001A 的校核计算结果表达式为：

$$u_4(A, y) = d_1^4(A, y) \quad (A2)$$

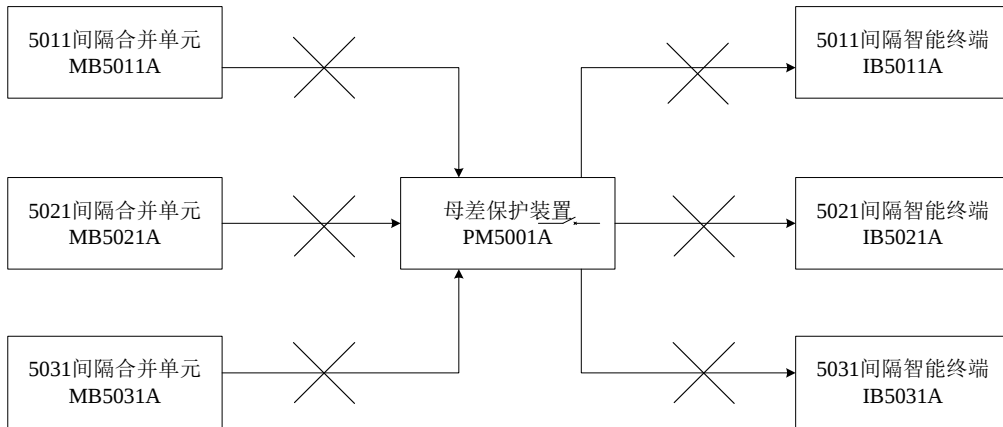


图 A1 某变电站事故算例二次设备接线图

Fig.A1 Connection diagram of secondary equipments in a substation accident

初始的连通状态矩阵 A 和检修硬压板状态行向量 y 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$\mathbf{y} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (\text{A4})$$

1) 正确的恢复 PM5001A 母差保护的安措步骤为:

- ①依次投入 PM5001A 对应各间隔合并单元的“间隔投入压板”;
- ②依次投入 PM5001A 对应各间隔智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”;
- ③退出 PM5001A 的检修硬压板。

按照上述步骤进行安措预演为:

- ①依次投入 PM2201A 对应各间隔合并单元的“间隔投入压板”。

以投入对应 MB5011A 的“间隔投入压板”为例, 则:

$$\mathbf{m}_{14} = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1] \quad (\text{A5})$$

更新连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 可以得到:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

进行校核计算:

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A7})$$

校核通过, 继续进行下一步的安措操作。后续的投入对应 MB5021A、MB5031A 的“间隔投入压板”的校核计算同上。PM5001A 的对应上述 3 个合并单元的“间隔投入压板”全部投入之后, 连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A8})$$

- ②依次投入 PM5001A 对应各间隔智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”。

以投入对应 IB5011A 的“GOOSE 跳闸发送软压板”为例，则：

$$\mathbf{m}_{45} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1] \quad (\text{A9})$$

更新连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A10})$$

进行校核计算：

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A11})$$

校核通过，继续进行下一步的安措操作。后续的投入对应 IB5021A、IB5031A 的“GOOSE 跳闸发送软压板”的校核计算同上。PM5001A 的对应上述 3 个智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”全部投入之后，连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A12})$$

③退出 PM5001A 的检修硬压板。

更新检修硬压板状态行向量 $\mathbf{y}$ 为：

$$\mathbf{y} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (\text{A13})$$

进行校核计算：

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A14})$$

则校核通过。按照上述步骤进行的恢复母差保护 PM5001A 的安措步骤不会引起母差保护装置误动。

2) 该变电站事故中的错误的恢复 PM5001A 母差保护的安措步骤为：

①退出 PM5001A 的检修硬压板；

②依次投入 PM5001A 对应各间隔智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”；

③依次投入 PM5001A 对应各间隔合并单元的“间隔投入压板”。

按照上述步骤进行安措预演为：

①退出 PM5001A 的检修硬压板；

则更新检修硬压板状态行向量 $\mathbf{y}$ 为：

$$\mathbf{y} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (\text{A15})$$

进行校核计算：

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A16})$$

校核通过，继续进行下一步的安措操作。

②依次投入 PM5001A 对应各间隔智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”；

以投入对应 IB5011A 的“GOOSE 跳闸发送软压板”为例，则：

$$\mathbf{m}_{45} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1] \quad (\text{A17})$$

更新连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A18})$$

进行校核计算：

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A19})$$

则校核通过，继续进行下一步的安措操作。后续投入对应 IB5021A、IB5031 的“GOOSE 跳闸发送软压板”的校核计算同上。PM5001A 的对应上述 3 个智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”全部投入之后，连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 为：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A20})$$

③依次投入 PM5001A 对应各间隔合并单元的“间隔投入压板”。

以投入对应 MB5011A 的“间隔投入压板”为例，则：

$$\mathbf{m}_{14} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1] \quad (\text{A21})$$

更新连通状态矩阵 $\mathbf{A}$ 可以得到：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A22})$$

进行校核计算：

$$\begin{cases} d_1^4 = 0 \\ \therefore u_4 = 0 \end{cases} \quad (\text{A23})$$

则校核不通过，母差保护 PM5001A 在该安措步骤操作之后误动。

(4) 该变电站安措操作排列组合计算与分析

该变电站中的 3 步安措操作步骤如下：

- 1) 依次投入 PM5001A 对应各间隔合并单元的“间隔投入压板”；
- 2) 依次投入 PM5001A 对应各间隔智能终端的“GOOSE 跳闸发送软压板”；
- 3) 退出 PM5001A 的检修硬压板。

将上述 3 步安措操作进行排列组合，可以得到 6 种安措票，对这 6 种安措票 4.2 节所述的基于逻辑计算的安措操作校核数学推理方法进行校核计算，并分析保护装置的状态结果如表 A1 所示。

表 A1 某变电站各种恢复母差保护的安措操作校核结果

步骤 1	仿真 1	计算 1	步骤 2	仿真 2	计算 2	步骤 3	仿真 3	计算 3
(1)	检修	检修	(2)	检修	检修	(3)	正常	正常
(1)	检修	检修	(3)	正常	正常	(2)	正常	正常
(2)	检修	检修	(1)	检修	检修	(3)	正常	正常
(2)	检修	检修	(3)	正常	正常	(1)	误动	误动
(3)	正常	正常	(1)	正常	正常	(2)	正常	正常
(3)	正常	正常	(2)	正常	正常	(1)	误动	误动

从表 A1 所列的结果可以看出，只要将安措操作 1) 放置在最后一步就会引起保护装置误动，原因是安措操作 2)、3) 会给保护装置创造跳闸出口的条件。而其他 4 种安措操作票虽然都不会引起保护装置误动，但是只有 1) → 2) → 3) 的操作顺序为符合规程的安措操作票，这是因为按照操作规程的要求，在恢复保护装置时，所有与保护装置相连的二次虚回路全部投入之前，保护装置的检修硬压板都必须投入使得保护装置处于检修状态，以防止保护装置误动出口跳闸信号，即安措操作 3) 退出检修硬压板必须最后进行。而对于安措操作 1) 的恢复 SV 虚回路和安措操作 2) 的恢复 GOOSE 跳闸开出量虚回路，虽然其先后顺序在保护装置检修态情况下是不会有影响的，但是按照规程，跳闸回路的恢复必须在 SV 回路恢复之后，因此安措操作 2) 必须在安措操作 1) 之后。由上述分析也可以看出，不会引起保护装置误动的安措操作票不是唯一的，而本文所提出的仿真校核和计算校核方法均来源于装置的状态转移原理，因此只会排除引起装置处于非正常状态的安措票。