

DOI: 10.7667/PSPC171596

## 基于和电流回路误动的新防误系列端子研制

陈晓彬<sup>1</sup>, 孙玉彤<sup>2</sup>, 孙旭<sup>1</sup>, 倪苗升<sup>1</sup>, 陈伟钦<sup>1</sup>, 吴永峰<sup>1</sup>, 徐皇清<sup>1</sup>

(1. 广东电网有限责任公司揭阳供电局, 广东 揭阳 522000; 2. 珠海电力设计院有限公司, 广东 珠海 519080)

**摘要:** 通过和电流回路误动的案例, 深挖误动根源, 发现所有的误碰都发生在端子上, 而传统端子没有任何防误措施。从而提出新型防误端子的概念并研发出新型和电流、母差、联跳等系列端子并应用。以和电流回路隐患为例, 提出通过改进现有和电流回路试验端子的结构, 实现端子操作顺序的唯一性。通过端子固有的机械结构实现闭锁, 彻底杜绝在和电流回路上工作出现误动事故。新防误端子杜绝跳项操作, 巧妙遮住能误碰的地方, 颠覆了传统端子的概念。改变了以前单纯靠二次措施技术手段作为单一技术管理手段导致事故屡次发生的现状, 有力地推动了继保二次技术的发展, 开创了利用新防误端子解决回路误动的新思路。同时新端子可以应用到计量、自动化等回路中, 应用范围广。

**关键词:** 电流回路; 误动; 防误端子; 新型; 继保

### Development of new anti misoperation terminals based on misoperation of sum current loop

CHEN Xiaobin<sup>1</sup>, SUN Yutong<sup>2</sup>, SUN Xu<sup>1</sup>, NI Miaosheng<sup>1</sup>, CHEN Weiqin<sup>1</sup>, WU Yongfeng<sup>1</sup>, XU Huangqing<sup>1</sup>

(1. Jieyang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Jieyang 522000, China;

2. Zhuhai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Zhuhai 519080, China)

**Abstract:** In this paper, through the case of the misoperation of the sum current circuit and digging out the cause of the misoperation, it is found that all the malfunctions occur on the terminals, and the traditional terminals have no anti error prevention measures, thus the concept of a new type of anti error terminal is proposed and a new type of terminal, such as current, bus differential protection and joint jump, is developed and applied. In this paper, taking the hidden trouble of sum current circuit as an example, the uniqueness of terminal operation sequence is realized by improving the structure of test terminals used for sum current loop. The lock is realized through the inherent mechanical structure of terminals, and the misoperation accidents in the current loop are completely eliminated. The new anti misoperation terminal prevents the jumping operation, skillfully conceals the places where may be touched by mistake, and subverts the concept of the traditional terminal. It changes the situation that the accident occurred repeatedly by the secondary measures as a single technical management means, which greatly promotes the development of the relay protection secondary technology. The new idea of using the new anti malfunction terminal to solve the malfunction of the loop is created. At the same time, the new terminal can be applied to the circuits of metering, automation, etc., and has wide application scope.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. GDKJQQ20161128).

**Key words:** current loop; misoperation; anti-misoperation terminals; new type; relay protection

## 0 引言

电力系统继电保护屏、端子箱或汇控箱等屏柜内部通常以接线端子来实现二次回路电缆线的转接和连接。二次设备的接线端子被误断开、误短接、误加入电气量等引起的误动事件频繁发生。现有常

规端子有家族性缺陷, 只是简单的分断, 没有任何防误措施。“连接”与“断开”不受回路接入与否限制, 可随意切换, 高风险, 所有防误措施依赖人员主观把控, 没有任何技术防误, 而二次工作人员工作的地点就是在端子上, 发生误动都是在端子上发生, 严重影响了供电可靠性<sup>[1]</sup>, 迫切需要研究新型防误端子来解决该重大隐患。

电流、电压、启动失灵、启动远方跳闸、联跳

基金项目: 中国南方电网公司科技项目资助 (GDKJQQ20161128)

出口等特殊回路如何防误? 由于缺乏技术防误, 传统做法是利用二次措施单等人为管理手段作为安全控制措施, 但是由于人员素质、技能和设计水平参差不齐, 导致误操作经常发生, 危及作业人员人身和电网安全, 迫切需要解决这一长期困扰电力系统工作人员的问题<sup>[2]</sup>, 但一直没有针对性的技术解决方案, 完全靠人的管理措施来避免相应的误操作, 致使危险时有发生。迫切需要开发出针对电流、电压、启动失灵、启动远方跳闸、联跳出口等不同接线回路的专用防误端子, 通过技术措施来减轻管理措施给工作人员带来的压力。

采用现有技术的试验端子, 对操作人员的专业能力要求很高, 在使用时, 必须完全按照管理措施规定的操作顺序操作, 不能颠倒步骤, 更不能出现误操作, 如果操作顺序错误, 则可能造成 CT 开路、开关跳闸, 对正在作业的工作人员及周边人员造成人身伤害, 威胁电网安全; 员工工作压力大, 为了把控现场作业风险, 往往不敢让青年员工动手, 造成员工无法正常成长。迫切需要开发新型防误端子, 减少操作压力, 将在端子上进行安措的操作步骤流程固化入机械连锁里, 杜绝继保误动的发生。

限于篇幅, 本文以研制的和电流端子为例展开介绍。

电力系统继电保护中 500 kV 线路一般采用“一个半断路器的接线”方式, 即两个线路间隔共用三个断路器(一个“中断断路器”和两个“边断路器”)作为“一串”。由于一次操作检修方便、调度运行灵活及供电可靠性高等特点, 在 500 kV 及以上交流系统中得到广泛采用, 但电流互感器配置比较多, 二次接线复杂, 计量、测量、安稳、故障录波及相关保护常常会采用和电流接线方式, 即采用两组电流互感器的二次侧直接按相并联后接入相应的二次设备。相应的保护采用其中一个边断路器侧 CT 及中断断路器侧 CT 两路电流进行合并采集, 即“和电流”计算。边断路器及中断断路器的 CT 各取 1 个二次绕组, 均经本间隔断路器汇控柜端子排分别接至差动保护屏侧形成“和电流”。

这种情况下, 当其中一组电流互感器需要单独进行检修、试验等维护工作时, 需要先断开和电流回路待维护电流互感器的二次接线, 然后再进行检修或试验等工作。由于维护人员的疏忽, 会出现未先断开和电流回路待维护电流互感器的二次接线直接进行短接或试验等工作, 致使接入二次设备的电流出线异常, 造成保护误动作, 严重威胁高压电网的安全<sup>[3]</sup>。本文通过对一起和电流回路引起保护误动案例进行分析, 发现了现有和电流回路试验端子

对检修带来的不利影响, 找到了有效的技术手段, 防止发生由于在和电流接线端子回路工作程序不规范而引起保护误动的事故, 为今后的和电流回路设计提供可借鉴的方案<sup>[4-5]</sup>。

## 1 一起和电流回路引起保护误动的原因分析

### 1.1 事故经过

2016 年 1 月 7 日 9 时 30 分, 某电厂开展第二串联开关 5722 断路器 CT 特性试验, 10 时 39 分, 检修人员在 5722 汇控柜将 5722 断路器 CT 二次侧短接, #2 主变第一套差动保护动作跳开主变三侧断路器。

### 1.2 事故原因分析

检修人员在开展第二串联开关 5722 断路器 CT 特性试验工作时, 运行中的 5721 断路器 CT 二次实际负荷电流为 0.066 A, 5722 断路器 CT 已停运二次负荷电流为零, 如图 1 所示。

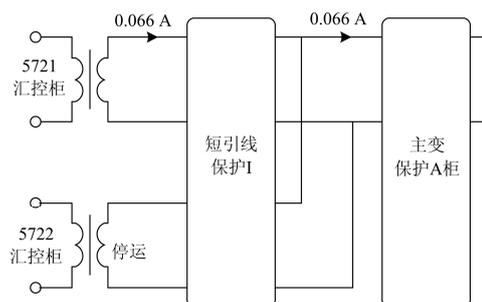


图 1 和电流接线示意图

Fig. 1 Sum current loop

试验开始前, 检修人员没有在 5722 汇控柜内将停运的 5722 断路器 CT 二次接线在端子排处断开, 就直接进行了短接, 降低了该支路的阻抗, 使 5721 断路器 CT 二次的电流被分流, 流入 #2 主变差动保护 A 柜的电流减少, 形成差流, 导致差动保护误动。事后模拟实测分流情况如图 2 所示。

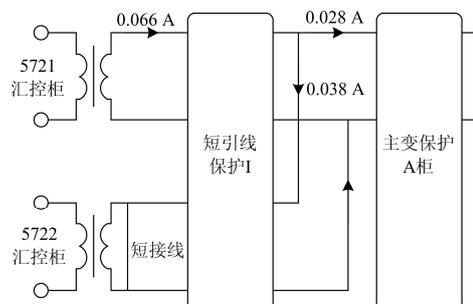


图 2 误短接后和电流接线分流示意图

Fig. 2 Current loop after shorting out the CT terminal of the breakers box

### 1.3 正确的操作顺序

正确的工作顺序是先将 5722 断路器 CT 二次接线在 5722 汇控柜端子排处断开，然后在端子排的 CT 侧进行短接，这样操作后 5721 断路器 CT 二次的电流不会被分流，流入#2 主变差动保护 A 柜的电流不会减少，也就不会因形成差流导致#2 主变差动保护误动，如图 3 所示。

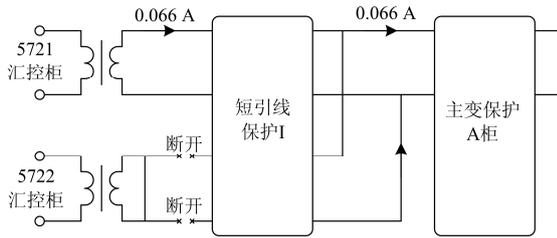


图 3 正常断开后和电流接线示意图

Fig. 3 Testing state of disconnection of sum current loop

### 1.4 暴露的问题

维护人员的安全防范意识不强，专业水平不高，危险点分析不到位，没有结合图纸认真分析该项工作应采取的安全及技术措施。

采用一个半断路器的接线方式变电站中，均有部分保护、计量、测量、安稳、故障录波及行波测距等设备需要接入和电流回路，涉及到的电流互感器不可避免地需要从和电流回路中断开，单独进行检修或试验，因此，电流端子上的短接及断开操作不可避免<sup>[6]</sup>。

现有的和电流回路端子排采用的是试验端子，该类端子是电力系统中广泛使用的通用型试验端子，它可以随时进行断开、连接操作，也可以随时进行短接操作，不受端子的断开或连接状态的限制，没有任何防误闭锁措施，端子两侧无任何区别，容易混淆<sup>[7]</sup>。

## 2 改进办法分析

加强对维护人员的安全防范意识培训工作，提高维护人员的专业技术水平；对和电流回路每一种检修及试验工作，结合图纸认真分析该项工作中的危险点，制定出严格的操作程序，写入现场作业指导书，并严格执行。和电流回路中某分支电流互感器试验的主要具体操作步骤如下：

- ① 对照图纸及现场实物找到对应的端子排；
- ② 将电流回路试验端子置于“断开”状态；
- ③ 将电流回路试验端子至保护装置侧用绝缘胶布覆盖，防止误将试验设备加到运行侧；

④ 短接电流回路试验端子的电流互感器侧，开始试验工作。

可以看出，这些操作步骤中其最关键的因素是人员，如果检修人员由于某种原因，忽略了其中某一项都有可能造成保护装置的误动作，因此，仅仅依靠管理措施，是无法从根本上避免前述事故的再次发生<sup>[8]</sup>。

在采用一个半断路器接线方式的变电站中，取消和电流接线方式，将两分支断路器 CT 二次电流直接接入对应的保护或其他智能装置，采用保护装置内部软件计算方式取得和电流效果。

目前保护厂家已开始研制直接接入两分支断路器 CT 二次电流的保护装置，但是计量、测量、安稳、故障录波及行波测距等厂家还没有开展这方面的研发工作，完成这些产品的研发工作需要较长的时间，同时也提高了装置的成本，因此，较长时间内和电流回路还将广泛使用，无法完全避免前述事故的再次发生<sup>[9]</sup>。

改进现有的和电流回路试验端子的结构，避免现有试验端子可以随时进行断开、连接、短接操作的缺点。设计专用和电流防误端子，使端子结构具有固有操作流程的限制功能，通过端子自身固有的结构杜绝类似事故的发生，实现由人防向技防转变。

通过以上分析可以看到，设计采用专用的和电流防误端子是直接针对维护人员误操作元件的专项改进<sup>[10]</sup>，针对性强、方法简单、容易实现，同时具有投资少见效快的特点，因此，最佳解决方案是进行和电流防误试验端子的设计与研究。

## 3 和电流回路试验端子的改进办法分析

### 3.1 和电流回路现有电流端子隐患分析

电力系统保护屏、测控屏、端子箱或汇控箱等屏柜内部通常通过接线端子来实现二次回路不同元件间的相互连接<sup>[11]</sup>。其中电流二次回路由于试验的需要，规定必须使用试验端子，该类端子设置有可拨动连接片和左右对称布置的试验线插孔兼短接孔。

可拨动连接片用于连接端子两端的金属导体<sup>[12]</sup>，上方附有旋紧螺丝，通过旋松螺丝可手动拨动连接片实现试验端子在“连接”与“断开”状态间自由切换；旋紧螺丝则将可拨动连接片锁定在当前状态。

这种带有连接片和试验插孔的端子<sup>[13]</sup>称为试验端子，目前应用广泛<sup>[14]</sup>，试验端子基本原理结构如图 4。

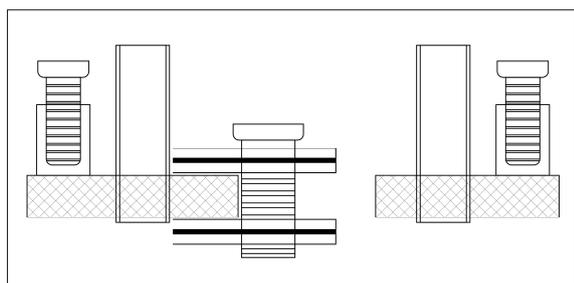


图4 常规试验端子“断开”状态示意图

Fig. 4 State of disconnection of conventional terminal

在断路器汇控柜端子排处将 A 相、B 相、C 相、A 相 N、B 相 N、C 相 N 电流端子中间可拨动连片压紧螺丝松开, 将可拨动压紧连片左移至电流互感器侧, 再将可拨动连片压紧螺丝紧固好, 此时端子左右可导电部分已断开连接, 即停运电流互感器与运行中间隔差动保护和电流回路已断开。

可以看出现有试验端子没有防误功能, 可以随时在端子的任一侧进行短接工作<sup>[15]</sup>, 也可以随时拨动连接片进行端子的“连接”与“断开”状态的切换, 将这种端子用于和电流接线回路具有如下隐患:

① 检修人员将试验端子的可拨动连片移至“断开”状态后, 直接将非电流互感器侧进行短接;

② 检修人员将试验端子的可拨动连片移至“断开”状态后, 直接在非电流互感器侧插入试验线进行电流互感器试验工作;

③ 检修人员未将试验端子<sup>[16]</sup>的可拨动连片移至“断开”状态, 直接在电流互感器侧或保护装置侧试验插孔插入试验线进行加电流试验;

④ 检修人员未将试验端子的可拨动连片移至“断开”状态, 直接将电流互感器侧或保护装置侧短接;

⑤ 试验结束后, 检修人员未拔出电流互感器侧试验线, 直接将可拨动连片移至“连接”状态, 使和电流回路带试验线接通运行设备;

⑥ 试验结束后, 检修人员未断开短接线直接将可拨动连片移至“连接”状态, 使和电流回路带短接线接通运行设备。

当出现第①项隐患误操作时, 由于和电流回路其中一个分支电流端子被短接, 另一运行分支的电流互感器的二次电流在间隔保护前被短接分流, 造成间隔保护装置仅采集到实际运行电流的一部分, 从而产生差流<sup>[17]</sup>, 如本文开头所述案例, 导致差动保护误动作, 跳开运行中的设备, 造成电网安全事故出现。

当出现第②项隐患误操作时, 相当于外部测试

仪在运行的和电流回路中直接加入一个电流分量, 与运行电流形成和电流<sup>[18]</sup>, 同样会导致间隔保护动作, 后果如第①项隐患;

当出现第③项隐患误操作时, 原因及后果如第②项隐患;

当出现第④项隐患误操作时, 原因及后果如第①项隐患;

当出现第⑤项隐患误操作时, 原因及后果如第②项隐患;

当出现第⑥项隐患误操作时, 原因及后果如第①项隐患;

以上误操作隐患均可能使 500 kV 设备保护动作跳开对应的断路器, 导致线路或主变非计划停运<sup>[19]</sup>。因 500 kV 设备在主网构架中的地位举足轻重, 每次误动作都是高级别安全事件, 甚至可能引发一系列致区域电网崩溃的事故<sup>[20]</sup>。

可以看出, 广泛应用于 500 kV “和电流”回路的常规试验端子<sup>[21]</sup>, 在结构上无法防止以上“六项误操作”的出现, 无法闭锁非法操作, 存在重大安全隐患, 无法满足安全生产要求, 需要研发新型结构的试验端子。

### 3.2 新型试验端子结构分析

为克服上述常规试验端子缺乏防误操作闭锁的缺陷带来的影响, 在和电流回路设计采用一种可单侧短接并具有防误操作闭锁功能的新型试验端子, 结构原理如图 5 所示。

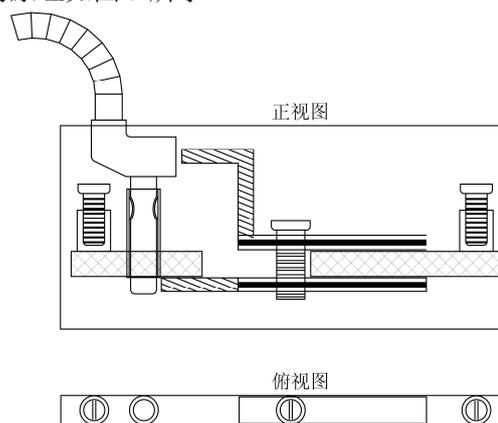


图5 可单侧短接具有防误操作闭锁功能的试验端子

Fig. 5 Structure of the testing terminal with anti-misoperation lock

由图 5 可以看出该端子仅在电流互感器侧设计有试验插孔兼短接孔, 有利于现场识别和电流端子位置, 并具有如下操作流程及防误闭锁功能:

1) 本试验端子在结构设计上仅在电流互感器侧设计有试验插孔, 可有效避免维护人员在试验端

子的非电流互感器侧进行短接或插入试验线。

2) 当和电流回路处于“连接”状态时, 本试验端子左右均接有电流回路导线, 回路处于带电运行状态, 可拨动连接片位于电流互感器侧即“连接”位置, 可拨动连片的上连片试验插孔绝缘挡板封闭了试验插孔, 端子试验插孔无法插入试验线(如图6), 防止维护人员在端子位于“连接”状态时插入试验线或短接线。

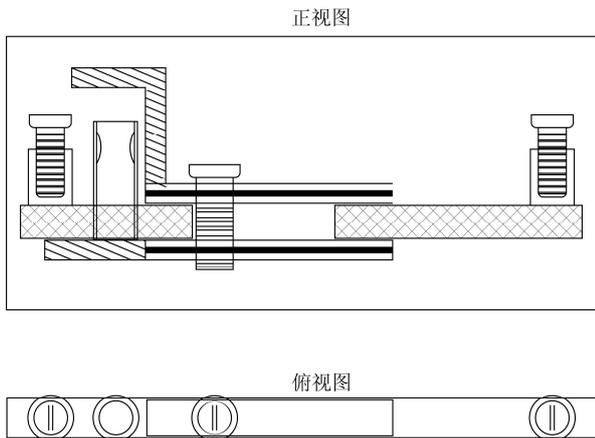


图6 可单侧短接具有防误操作闭锁功能的试验端子正常工作状态示意图

Fig. 6 Normal working state of the testing terminal with anti-misoperation lock

3) 只有当试验端子在“断开”位置时, 电流互感器侧试验套筒插口才开放, 才允许插入试验线或短接线插头, 因此本和电流回路专用试验端子具有先断开后试验的闭锁功能(如图7)。

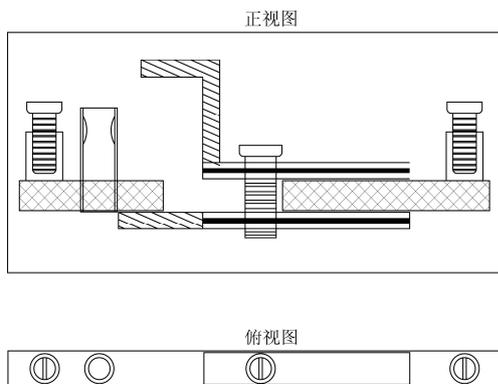


图7 可单侧短接具有防误操作闭锁功能的试验端子断开状态示意图

Fig. 7 Testing state after the testing terminal with anti-misoperation lock disconnect

4) 当在本试验端子电流互感器侧试验插孔插入试验线或短接线插头后, 可拨动连片的绝缘上、

下挡板向电流互感器侧的移动通道被阻挡, 试验端子无法恢复到“连接”状态, 防止维护人员在未取下试验线或短接线就直接将端子恢复到导通状态, 如图5所示。

5) 当取下本试验端子上的试验线或短接线后, 试验端子的可拨动连片向电流互感器侧的移动通道开放, 将试验端子恢复到“连接”状态, 试验插孔上、下通道重新被闭锁。

根据上述试验端子结构原理可以看出, 新型试验端子具有完善的“防误操作闭锁功能”。

### 3.3 新型试验端子防误功能说明

当本试验端子处于“连接”状态时, 电流互感器侧试验孔被遮挡, 无法进行短接, 非电流互感器侧没有试验插孔, 也无法进行短接, 可有效防止前述现有试验端子的第④种误操作隐患发生。

当本试验端子处于“连接”状态时, 电流互感器侧试验孔被遮挡, 无法插入试验线插头进行试验工作, 非电流互感器侧没有试验插孔, 也无法插入试验线进行电流互感器试验, 可有效防止前述现有试验端子的第③种误操作隐患发生。

当本试验端子处于“断开”状态时, 电流互感器侧试验孔开放, 非电流互感器侧没有试验插孔, 也无法进行短接或插入试验线, 可有效防止前述现有试验端子的第①种及第②种误操作隐患发生。

当试验结束后, 如果本试验端子电流互感器侧试验插孔插入的试验线或短接线插头未拔出, 由于可拨动连片的绝缘挡板被阻挡, 无法将试验端子恢复至“连接”状态, 可有效防止前述现有试验端子的第⑤种及第⑥种误操作隐患发生。

综上所述, 本试验端子具有全面的防止和电流回路误短接、误试验及误恢复功能。检修人员只有按照端子允许的顺序才能进行操作, 起到了防止由于误短接、误试验及误恢复引起和电流回路保护误动作的作用。

## 4 结语

和电流防误端子最关键一点是根据回路的技术要求设计的, 其功能和要求高度吻合, 可以看出新型和电流防误端子处处体现一个“防”字, 实现了由“人防”向“技防”的转变。和电流防误端子的面世是电网的需要, 更是调试检修人员的期待和心声。随着全网精益化管理推广和深入, 维护任务越来越繁重, 如果设备本身具有防误功能就可以大幅降低工作压力, 这也是研发的一种趋势。这一方法将具有广泛的应用价值, 彻底攻克和电流回路及其他接线回路防止误短接、误试验的难题, 为电网

的安全运行提供有力支持。

而且该新型试验端子具有广阔的推广前景, 只要有防误需求的二次回路都可应用, 适合在全网整个行业中广泛推广。

和电流端子沿用常规端子已经成熟并有多年运行经验的性能标准, 其简约的机械闭锁设计, 工作人员一经简单的结构原理培训, 便可正确无误地进行安措布置和恢复, 极易推广。

和电流端子系列采用原有材料, 即可实现全部结构和配件的成套生产, 推广成本低, 安全可靠。已经在广东电网揭阳供电局多站应用, 防误效果良好。

本成果通过专项研究已申请多项发明专利, 并获得广东电网公司科技创新奖励。不只是和电流回路, 其他电流回路、联跳回路, 均可按照本方法研制具有专项防误功能的接线端子, 现已进驻广东电网电力孵化中心孵化创业。

#### 参考文献

- [1] 杨雯, 刘元琦, 吴小忠, 等. 计及死区故障的 3/2 接线变电站的 Petri 网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 28-37.  
YANG Wen, LIU Yuanqi, WU Xiaozhong, et al. A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets with dead-zone fault taken into account[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 28-37.
- [2] 于晓军, 刘志远. 换流站交流场 3/2 接线中开关联锁跳闸逻辑设计与实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 144-148.  
YU Xiaojun, LIU Zhiyuan. Design and realization method for interlock tripping logic of converter station AC circuit breaker in middle with 3/2 connection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 144-148.
- [3] 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.
- [4] HAIDER S, LI Guojie, WANG Keyou. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [5] 赵晓明. 500 kV 线路距离保护零序补偿系数分析及在校验中的应用[J]. 浙江电力, 2005(5): 19-22.  
ZHAO Xiaoming. Analysis of earth fault compensation factor in digital distance relay and its application for testing[J]. Zhejiang Electric Power, 2005(5): 19-22.
- [6] 盛方正, 傅晓飞, 周清雅. 差动保护电流互感器“和电流”接法的问题研究[J]. 供用电, 2011, 28(6): 56-58.  
SHENG Fangzheng, FU Xiaofei, ZHOU Qingya. Research of the problem of accessing the secondary side of current transformer[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(6): 56-58.
- [7] 徐晓春, 刘革新, 戴光武, 等. 3/2 开关接线方式下基于能量制动的抗电流互感器饱和措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 189-194.  
XU Xiaochun, LIU Geming, DAI Guangwu, et al. Energy resistance based anti-saturation scheme with breaker-and-a-half configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 189-194.
- [8] 刘星, 郭维雅, 胡叶宾, 等. 3/2 接线方式同杆双回线路准三相运行相关保护的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 33(11): 32-35.  
LIU Xing, GUO Weiya, HU Yebin, et al. Realization of the interrelated protection on quasi-three-phase running of double circuit lines on the same tower for the 3/2 circuit breaker connection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 33(11): 32-35.
- [9] 刘革新, 曲广强, 徐晓春, 等. 3/2 接线方式自适应线路保护策略设计方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 104-107.  
LIU Geming, QU Guangqiang, XU Xiaochun, et al. Design of adaptive line protection strategy with 3/2 connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 104-107.
- [10] 董泰福, 宗秀红. 500 kV 鹏城变电站技改中 CT 回路危险点分析及防范[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 159-161.  
DONG Taifu, ZONG Xiuhong. The control in advance and danger analysis existed in CT circuit in technological transformation of the 500 kV Pengcheng transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 159-161.
- [11] 刘兵, 李勇, 奚江惠, 等. 3/2 接线变电站拉停断路器短路电流限制措施分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 131-135.  
LIU Bing, LI Yong, XI Jianghui, et al. Analysis of pulling switch to limit short-circuit current in 3/2 wiring substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 131-135.

[12] 李旭, 雷振锋, 樊占峰, 等. 500 kV 变电站 3/2 接线 T 区短引线保护方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 102-104.  
LI Xu, LEI Zhenfeng, FAN Zhanfeng, et al. Discussion on 3/2 connection T wiring short-lead zone protection scheme in 500 kV substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 102-104.

[13] 周建宏. 一个半断路器主接线的线路及母线保护[J]. 西北电力技术, 2005, 33(4): 45-47.  
ZHOU Jianhong. The circuit and busbar protection of the breaker-and-a-half configuration main wiring[J]. Northwest China Electric Power, 2005, 33(4): 45-47.

[14] 姚斌, 宋小欣. 500 kV 开关场中断路器跳闸未重合原因分析[J]. 江西电力, 2007, 31(6): 27-28.  
YAO Bin, SONG Xiaoxin. Analysis of the circuit breaker in the switchyard of 500 kV substation tripped while reclosure failed[J]. Jiangxi Electric Power, 2007, 31(6): 27-28.

[15] 陈雪. 对几起 500 kV 变电站异常情况和事故的分析及处理[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2010(3): 54-56.  
CHEN Xue. Analysis and processing of several anomalies and accidents of 500 kV substation[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2010(3): 54-56.

[16] 广东省电力调度中心. 广东省电力系统继电保护反事故措施及释义[M]. 2007 版. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[17] 丁恒春, 彭时雄, 杜新纲, 等. 一个半断路器接线方式下并联运行电流互感器二次和电流误差分析[J]. 电测与仪表, 2018, 45(12): 1-3.  
DING Hengchun, PENG Shixiong, DU Xingang, et al. Error analysis of resultant secondary current of two paralleled current transformers under breaker-and-a-half scheme[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 45(12): 1-3.

[18] 郭永基. 加强电力系统可靠性的研究和应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 27(19): 1-5.  
GUO Yongji. To focus on improving power system reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 27(19): 1-5.

[19] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[20] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[21] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

收稿日期: 2017-10-28; 修回日期: 2018-07-08

作者简介:

陈晓彬(1979—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事继保、自动化等技术管理工作; E-mail: 71006124@qq.com

孙玉彤(1965—), 男, 工学学士, 高级工程师, 从事智能电网设计研究工作;

孙旭(1992—), 男, 工学学士, 助理工程师, 从事继保、低压直流等技术维护工作。

(编辑 周金梅)