

DOI: 10.7667/PSPC160411

高压电网死区保护研究综述

吴雨¹, 柯联锦²

(1. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210000; 2. 常州供电公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 电力系统内部存在着各种形式的死区故障, 准确、快速地切除死区故障直接关系到电力系统的安全稳定运行。详细介绍了主要几种常见的死区故障及其产生的原因, 分析了典型死区保护逻辑的不足: 即保护动作时间长且扩大了事故范围。综述了各类死区故障研究的现状, 并对各种切除死区故障保护方案的优缺点作出评述。最后在现有研究的基础上, 提出了死区保护研究的几点建议与设想, 为后续开展研究提供借鉴与参考。

关键词: 高压电网; 死区故障; 死区研究; 死区保护; 元件保护

A survey of relay protection for high voltage dead-zone fault

WU Yu¹, KE Lianjin²

(1. Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 210000, China;

2. Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213000, China)

Abstract: There are various forms of dead-zone fault in power system, and how to remove the dead-zone fault quickly and correctly is related to the safe and stable operation of power system. This paper introduces several common dead-zone faults and causes of dead-zone faults. Then the deficiencies of typical dead-zone protection logic are analyzed thoroughly, including the operation time of relay protection and the scope of fault. It summarizes a variety of dead-zone researches status, and evaluates the advantages and disadvantages of various of relay protection schemes of dead-zone faults. Finally, based on the existing researches, some assumptions and suggestions are put forward for further research.

Key words: high voltage power; dead-zone fault; research of dead-zone; dead-zone protection; relay protection

0 引言

随着电网规模的逐步扩大, 电网架构愈加复杂, 联网程度不断提高, 因此电力系统的安全稳定运行变得越来越重要, 而由于电网继电保护装置自身工作原理的缺陷和系统接线等问题, 被保护元件在一定范围内发生故障后只能由延时后备保护切除, 这类故障统称为死区故障^[1-4]。目前典型高压电网死区故障主要分为三种: 出线断路器与出线 CT 之间的死区故障; 母联断路器与母联 CT 之间的死区故障; 主变断路器与主变 CT 之间的死区故障。

当电网发生死区故障后必须及时、准确根据故障现象判断出故障点, 有效地隔离故障, 使事故的影响面和损失降到最低程度, 同时恢复电网的稳定运行, 因此研究死区故障十分必要, 同时也是科技工作者的难点。本文主要对国内外研究高压电网死区故障的成果进行了梳理和总结, 提出了一些克服保护死区的建议, 以及在现场工作中应该注意的

几个问题, 为后继开展更为深入的研究提供借鉴与参考。

1 线路断路器死区故障

110 kV 及以下电压等级单侧电源电网由于保护采用远后备配置原则, 当发生死区故障时主保护感受不到故障电流而拒绝动作, 只能通过上一级线路保护动作切除故障, 因此 110 kV 及以下电压等级的电网一般不存在死区保护问题。

目前, 220 kV 变电站一般采用双母线或者双母带旁路的接线方式, 线路断路器与电流互感器之间发生死区故障后, 只能通过母差动作停信或者永跳继电器(TJR)动作开入到光纤保护远跳对侧使故障切除。当出线断路器旁带或者对侧为 3/2 接线时, 由于本侧保护检验使得 TJR 动作可能误跳对侧开关^[1], 因此有必要在远跳回路中增加“TJR 启动远跳”压板, 同时完善就地判据闭锁功能。为了克服单侧 CT 存在的若干缺点, 消除由于 CT 配置不足带来的影

响,文献[2]提出在出线断路器两侧各安装一组 CT,并在保护判据中增加断路器两侧低电压判别环节,使线路保护和母差保护分两个阶段跳闸,避免两者同时动作,该措施能有效地减小故障影响的范围。

对于罐式断路器其两侧都配置了一组 CT,文献[5]在分析了由于保护设计、CT 安装、线路接线等方面原因造成的死区故障后指出,即使在断路器两侧都配置 CT,但由于 CT 线圈二次分配不合理,或者运行方式改变仍然会造成死区故障发生,特别是在一个半断路器接线方式下,更加容易发生接线未交叉的错误。文献[6]从安装试验角度出发,阐述了如何确定电流互感器的极性以及通过正确的试验方法找出接线未交叉的电流互感器,确保不发生由于人为接线未交叉而产生的死区故障,规范电流互感器在安装、二次绕组分配、调试和验收方面的工作,以及合理安排保护的运行方式^[7-8]。

智能变电站是智能电网不可或缺的部分,继电保护的安全可靠运行对智能变电站的安全稳定运行具有更加重要的意义^[9],但现在典型智能变电站设计及保护用电流互感器配置方面存在缺陷^[10],文献[11]研究了智能变电站中各种电流互感器配置方案以及存在的问题,文中根据现行继电保护规程要求,提出了新的工程设计方案,同时指出对于无法改造的线路可以牺牲供电的灵活性和可靠性来达到消除死区故障发生的目的。

500 kV 线路发生线路死区故障时,一般是利用失灵保护快速切除故障^[12],但边开关侧发生死区故障启动失灵后,在中开关拒绝动作的情况下,就有可能造成全站失电,因为边开关失灵不启动中开关失灵,所以文献[13]摒弃了传统通过启动失灵保护切除 500 kV 线路死区保护方法,而是根据电磁感应原理设计了测量断路器内部电流相位的装置,将测得的内部电流相位与电流互感器电流相位相减后取绝对值,若该绝对值为锐角时则判断为死区故障,保护快速动作切除本侧和对侧断路器,同时闭锁母差保护,该方法的缺点是需要增加额外的测量设备,可靠性低。从更快的速度切除故障角度来考虑,文献[14]在详细分析了 500 kV 系统线路死区保护的动作时间和动作逻辑后,提出 500 kV 线路死区保护动作延时不需要考虑断路器动作时间的方案。文献[15]明确指出了巴西电网 500 kV 系统死区保护逻辑存在的不足—即简单以断路器位置、合闸信号和故障电流作为判断死区故障的条件。由于断路器位置辅助接点及合闸命令信号在传输的过程中可能会发生滞后或丢失,使得死区保护被误触发,带来的直接

后果是停电范围的扩大,因此在设计死区保护时应当厘清死区故障发生后各种信号的动作时序,更应当选取可靠信号来源做为判断故障是否发生的条件。

国家电网公司标准物资规定中明确要求 500 kV 边开关电流互感器为 7 个线圈,中开关为 8 个线圈,这导致线路和母线保护共用 TPY 级线圈只能安装在罐式断路器母线侧,其结果是当发生 500 kV 线路死区故障时,断路器失灵保护无法启动,只能依靠带延时的后备保护或远后备保护动作切除故障。若将母线保护用线圈置于线路侧和线路保护用线圈形成交叉,则在理论上可以消除断路器失灵死区故障,而我国微机母线保护规范要求保护装置能克服电流互感器暂态饱和影响,这从技术角度上说明如果母线保护装置能够利用数字处理技术达到抗饱和的目的^[10,16-18],那么母线保护则可使用非 TPY 级的线圈,因此可以通过软件升级,使得线路保护和母线保护用线圈分别布置在断路器两侧。

从继电保护基本目的出发,希望能够设计出一种既快速又简便的方法切除死区故障,文献[19]介绍了国外一种快速切除死区故障的保护方法,该方法主要利用母差保护动作接点和死区故障侧断路器跳位信号,强制故障侧 CT 电流为零,以差动保护的固有动作时间使对侧切除故障,该方法简便、快速,但如果对侧保护定值不合理保护可能会发生拒动行为,扩大故障影响范围,因此还需改进。文献[20]为了将 CT 与断路器之间的死区故障纳入到线路保护的范围内,将 CT 前置于断路器母线侧,当发生死区故障时首先由线路保护动作跳开两侧断路器,而后本侧母差保护依据断路器跳位接点封锁 CT 电流,最终由母差保护动作切除故障。该方案改变了 CT 传统的电气布局,但将 CT 置于断路器母线侧时,自然增加了其运行时间,且不利于绝缘,因此必将缩短 CT 运行寿命,亦不便日常对其维护和检修处理。

2 母联断路器死区故障

2.1 母线保护动作死区

对于双母线接线方式,当 CT 仅安装在母联断路器一侧,CT 与母联断路器之间发生故障时,依靠各种原理构成的母差保护均无法正确跳开故障侧,这就是母线保护动作死区。当发生母联死区故障时可能造成本站和下级变电站全站失电,导致严重电网事故^[21-23]。母线分列运行发生死区故障时,由于

母联CT电流不计入小差,因而母线保护可以正确迅速动作,而文献[24]认为,在母联断路器断开的情况下发生死区故障时,若单引入母联断路器的跳位辅助接点作为母线分列运行的判断条件时,可能会因为母联断路器跳位辅助接点粘连或者其他原因造成其不能正确反映母联断路器状态,导致母差保护误判,使得故障母线小差不能快速正确动作切除故障,因此提出应同时引入母联断路器的跳位和合位辅助接点作为母联断路器运行状态的判断条件。文献[25-26]建议在母联断路器两侧分别配置一组CT,并提出两种母联死区保护方法:一是把2组母联CT的电流做成1个母联小差保护,正常情况下母联小差为0;二是仍采用常规的2组CT交叉接法,当大差和两条母线的小差同时动作时,则判断为死区故障,但上述并不能彻底地解决选择性和速动性的问题^[27-28],且扩大了死区范围和保护装置的运算量与复杂程度。文献[29]提出了一种母联死区保护改进设计,当母线区内发生故障后第一延时跳开母联,之后母联CT退出小差计算,重新计算大差、小差和复合电压闭锁是否满足条件,而不是像现有母差动作逻辑那样第二延时跳开非故障母线。

对于双母双分段母线接线方式,分段断路器既具有母联断路器的特性,又具有出线断路器的特点,所以其故障时的处理方式与母联断路器不完全一样。双母双分段每套母差保护两面屏布置,以分段断路器位置定义左屏和右屏,由于左屏和右屏为两个不同的保护装置,因此保护之间没有直接通信,当发生分段死区故障时,无法像双母接线方式那样可以根据差动保护内逻辑去封母联CT,在该种接线方式下采取的方式是左屏的差动保护动作时输出一个启动分段死区的触点到右屏,右屏再根据分段断路器跳闸位置、分段电流等判断是否是死区故障^[21]。同样,若分段断路器采用双CT的接线方式,发生分段死区故障时,左屏和右屏母差都判断死区故障为区内故障,保护迅速动作切除两条母线。双CT接线的优点是消除了分段断路器的保护死区,不需要延时,但从根本上仍然扩大了故障跳闸范围,且不具备选择性。

2.2 母联断路器充电死区故障

母联充电死区故障是指对于有多段母线接线的变电站,在某段母线停运后重新投入运行或新设备启动时,需要运行母线通过母联断路器向另一条母线充电,若此过程中在母联断路器与母联CT(在停运母线侧)之间发生故障,母线差动保护将切除运行

母线,使得故障影响范围扩大。对于母联充电死区故障一般解决措施是在母差保护中配置充电保护功能,使母差保护能自动识别出充电状态,识别出该状态后闭锁母差保护300ms,若大差连续动作150ms则由差动后备保护切除母联元件和无位置元件^[21,30]。文献[31]认为对停运母线进行充电时闭锁母差保护是十分有必要的,是防止母差保护误切健全母线的有效措施,但有必要对现有的技术措施进行改进,通过对母联机械量和电气量的时序分析,得出利用手合继电器触点(SHJ)实现对母差的闭锁优于采用断路器位置接点对母差的闭锁。文献[32]依据母联充电死区故障的特征,提出了解决该故障的新思路,即实时监视母联的运行状态,并由此提出了三种切除充电死区故障的方法。

除了母差保护本身配置充电保护外,220kV及以上电压等级的母联及分段断路器应配置专用的、具备瞬时和延时跳闸功能的过电流保护装置^[33]。文献[34]通过大量试验证明,在充电保护的精度和快速性很难达到统一的情况下,可以取消微机母线保护中的充电保护,将充电操作所要求的可靠性和快速性分别放在差动保护和过流保护中,当发生充电死区故障后可以通过单独的充电过流保护切除故障,将故障影响的范围降到最低。但该方案也存在固有的缺点:一方面单独配置的母联充电保护不启动母联失灵回路,应当考虑到一旦母联开关拒绝所带来的后果;另一方面单独配置母联充电保护容易受运行方式和区外故障的影响,易发生误动作,因此有违单独配置母联充电保护的初衷。

3 变压器断路器死区故障

对于变压器断路器死区而言,一般一台变压器有多少种电压等级的接线端,就存在多少种死区故障。当主变断路器与CT之间发生故障时,保护动作逻辑与线路死区故障类似,母差保护正确切除死区故障侧断路器,但故障点仍然存在,在实际运行中只能依靠主变后备保护动作来切除故障,容易造成变压器损坏。文献[2]建议在主变断路器两侧分别配置一组CT,它们的保护范围相互交叉,同时引入主变侧和母线侧低压闭锁功能,当在主变侧发生死区故障后第一时段跳开主变高压侧断路器,此时母线上电压恢复正常,闭锁母线差动保护,第二阶段由主变差动保护继续跳低压断路器侧隔离故障,该保护方案较单CT死区故障时缩小了事故影响的范围。

文献[35]分析了220 kV变压器各侧死区故障的特征以及保护动作过程,借鉴母联死区故障后母差保护封母联CT电流的思想,提出了基于封故障侧CT电流、启动联跳、判断故障侧断路器位置的4种快速切除主变各侧死区故障的保护方案。文献[36]主要针对主变中压侧死区故障进行了研究,在现有主变后备保护的基础上提出了增设中压侧死区保护的设想,依据中压侧母差动作、中压侧断路器在跳位、中压侧CT有流三个条件判断中压侧是否发生死区故障,若条件满足则启动联跳主变各侧。

当500 kV主变中压侧断路器发生死区故障时,母差启动跳主变三侧时需判断该侧断路器位置,而母差保护却在上一时段已将该侧和本条母线上所有的断路器跳开,导致联跳无法启动^[1],主变220 kV侧电压消失后直接使得该侧方向阻抗保护及零序方向保护拒绝动作,而高压侧零序方向保护的指向为500 kV侧,最终只能由整定时间较长的阻抗保护动作切除故障,所以应当考虑去除母差保护联跳主变判据中判断主变断路器位置这一条件,同样,在设计220 kV系统时也应考虑上述情形。

当主变断路器检修需要旁路断路器代主变断路器运行时,需将主变断路器CT回路切至套管CT侧,这样直接造成主变差动保护范围的缩小,使得从旁路CT到主变套管CT之间无主保护,若该区域内发生故障可致全站发生停电事故。目前针对主变该种运行方式下的死区保护主要有两种^[23,37]:一是利用旁路断路器提供的后备II段保护,由后备II段切除旁路母线和主变引线之间的故障,相对而言该方法还是存在着较长延时,若后备II段整定出错,可能发生保护拒动;二是充分利用旁路断路器CT的备用二次线圈,将该线圈的二次回路切至主变差动电流回路中去,利用主保护切除旁路母线及引线范围内的故障,动作迅速、可靠,但是存在着二次回路复杂,在切换二次回路时易发生误操作的缺点,对于没有备用CT的旁路断路器需增加投资改造升级。

4 其他

高压电网中除了由于CT感受不到故障电流而产生的电流死区故障外,还存在着电压死区。当保护安装处的零序阻抗很小时,若线路末端发生高阻性接地故障,那么很有可能导致零序功率方向纵联保护拒动作。在主变近区发生三相短路故障时复压闭锁方向过流保护的方向元件也同样存在电压死

区^[5]。在110 kV系统中普遍存在着主变只有一侧配置后备保护的情况,某种特殊的运行方式下,主变复压闭锁功能会造成后备保护出现死区,因此应当分别配置高低侧后备的复压过流保护^[38-39]。另外,在变压器的 Y_0 侧接近中性点处或者 Δ 侧接近顶点处发生相间短路故障时,由于短路的匝数较少,也存在着一定范围内的死区^[40]。

5 电网死区保护研究的建议与设想

死区故障是一种特殊的故障,易导致全站停电事故,从目前国内外研究来看,还没有一种保护能够快速、准确地切除死区故障,因此电网运行及管理部门应给予足够重视,笔者认为可以从下列几个方面着手工作。

1) 在颁布变电站各种典型设计时,应对由于CT配置或者二次绕组分配原因带来的死区问题进行说明,尤其是智能变电站。在设计过程中应严格按照两套保护电压、电流回路相互独立,保护范围相互交叉,杜绝人为原因造成的死区故障。

2) 对于由运行方式改变而形成的死区故障,应制定相关运行方式下的反事故措施,可以考虑设计特殊运行方式下的主保护。

3) 从保护配置的角度出发,应当考虑发生包括死区故障在内的两重故障,因此有必要进一步研究死区保护与失灵保护及其他保护之间的配合问题。

4) 断路器两侧各配置一组CT时,应当规范CT的设计、精度配置以及安装调试工作,在新的电气结构下,可以考虑结合复合电压闭锁功能,在仔细分析死区故障时保护动作时序的基础上使用恰当的判据,实现死区故障时瞬时闭锁无故障侧母线的母差保护。

5) 根据断路器双CT配置,可以设计以电流差动为基础的快速保护作为死区故障的专用主保护,以达到快速切除死区故障的目的。

6 结语

虽然电网发生死区故障的概率极小,但其后果是极为严重的。本文对现有各类死区保护研究进行了综述,在总结现有死区保护研究现状与技术水准的基础上,指出了各种切除死区故障继电保护方案存在的优缺点及理论不完备等方面的问题,并提出了电力系统死区保护研究的建议和设想,为进一步研究提供借鉴。

参考文献

[1] 王建雄,罗志平,梁运华. 220 kV保护死区问题的探讨

- 及改进[J]. 继电器, 2006, 34(7): 83-86.
- WANG Jianxiong, LUO Zhiping, LIANG Yunhua. Discussion and improvement about the question of 220 kV protections dead-zone[J]. Relay, 2006, 34(7): 83-86.
- [2] 赵佰成, 徐炜彬, 曲绍杰. 220 kV 典型保护死区问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 130-132.
- ZHAO Baicheng, XU Weibin, QU Shaojie. Discussion about the problem of 220 kV typical Protection dead-zone[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 130-132.
- [3] KASZTENNY B, CARDENAS J. New phase-segregated digital busbar protection solutions[C] // IEEE 2004 conference for Protective Relay Engineers, TEXAS, April 1, 2004: 308-338.
- [4] IEEE guide for protective relay applications to power system buses[S]. New York: USA, IEEE, 2009.
- [5] 邵华. 高压电网死区故障解决方案[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 183-186.
- SHAO Hua. Solution for dead zone fault of high voltage power network[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 183-186.
- [6] 徐俊, 孙宗云, 冯田, 等. 防止 500 kV 电流互感器保护死区的方法[J]. 云南电力技术, 2011, 39(1): 73-74.
- XU Jun, SUN Zongyun, FENG Tian, et al. The protection strategy of 500 kV TA for dead-zone[J]. Yunnan Electric Power, 2011, 39(1): 73-74.
- [7] 赵曼勇, 舒双焰, 赵有铖. 高压电网防保护死区电流互感器保护绕组的配置及反措[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 132-134.
- ZHAO Manyong, SHU Shuangyan, ZHAO Youcheng. Configuration scheme of current transformer coils used by protections and measures against dead zone in high voltage power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 132-134.
- [8] 杨忠礼, 牛元泰, 吴征, 等. 500 kV 罐式断路器电流互感器二次回路接线错误的分析及对策[J]. 高压电气, 2012, 48(8): 94-98.
- YANG Zhongli, NIU Yuntai, WU Zheng, et al. Analysis on connection error in current transformer secondary circuit of 500 kV tank circuit breaker with countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 94-98.
- [9] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
- WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [10] 程强, 续建国, 樊丽琴. 一种智能变电站典型设计方案中的保护死区研究[J]. 山西电力, 2013(3): 1-3.
- CHENG Qiang, XU Jianguo, FAN Liqin. Research of protection dead zone in the typical design of a kind of smart substation[J]. Shanxi Electric Power, 2013(3): 1-3.
- [11] 张健康, 粟小华, 胡勇, 等. 智能变电站保护用电流互感器配置问题及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 140-145.
- ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, HU Yong, et al. Problems and solutions of configuration scheme of current transformer used by protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 140-145.
- [12] 郑建梓, 陈东海. 3/2 断路器接线的保护死区分析[J]. 浙江电力, 2007, 29(3): 54-56.
- ZHENG Jianzi, CHEN Donghai. Discussion on protection's dead zone for 3/2 breaker connection[J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 29(3): 54-56.
- [13] 刘志学. 高压电力系统死区保护的一种实现方法[J]. 电工技术, 2010, 31(12): 52-54.
- LIU Zhixue. The implementation strategy of high voltage system protection's dead-zone[J]. Electric Technology, 2010, 31(12): 52-54.
- [14] 余江, 周红阳, 陈朝晖, 等. 计及系统稳定需求的 500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 142-146.
- YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 142-146.
- [15] CHEN Dehui, XIA Yi, LIU Wei. Analysis and discussion of a dead-zone protection mal operation case in Brazil[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 87-91.
- [16] 中国电力企业联合会. DL/T866—2004 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- China Electricity Council. DL/T866—2004 the guide for selection and calculation of current transformers and voltage transformers[S]. Beijing: China Electric Power

- Press, 2004.
- [17] 姜自强, 刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.
JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.
- [18] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [19] 俞胜, 马继政, 钱美芳, 等. 一种线路死区的保护方式[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 113-115.
YU Sheng, MA Jizheng, QIAN Meifang, et al. A new method for the blind zone protection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 113-115.
- [20] KASZTENNY B, CONRAD S, BEAUMONT P, et al. Exploring the IEEE C37.234 guide for protective relay application to power system buses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 936-943.
- [21] 李新, 熊炬, 董泉, 等. 基于母联断路器为跳闸对象的保护方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 242-246.
LI Xin, XIONG Ju, DONG Quan, et al. Summary of relay scheme which trips bus-tie[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 242-246.
- [22] 周玉兰, 王俊永, 王玉玲, 等. 2001年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2002, 26(9): 58-63.
ZHOU Yulan, WANG Junyong, WANG Yuling, et al. Operational situation and analysis of domestic protective relaying and secure automation devices in 2001[J]. Power System Technology, 2002, 26(9): 58-63.
- [23] 刘宇, 孙惠. 典型的保护死区问题探讨[J]. 湖南电力, 2008, 28(2): 46-48.
LIU Yu, SUN Hui. Discussion on several typical protection dead-zone[J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(2): 46-48.
- [24] SU Haitao, HOU Qunbao, DONG Xiaoping. Impact of abnormality of bus coupler TWJ on dead-zone protection of bus coupler[C] // IEEE The 2th China International Conference on Electricity Distribution, Nanjing, Sept 13-16, 2010: 1-3.
- [25] 唐治国, 毛乃虎, 张发金. 基于2组母联电流互感器的死区保护[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 95-96.
TANG Zhiguo, MAO Naihu, ZHANG Fajin. Dead-zone protection with dual bus-bar tie current transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 95-96.
- [26] 刘伟平. 母线保护死区问题的探讨[J]. 继电器, 2004, 32(15): 59-61.
LIU Weiping. Discussion on the dead zone in busbar protection[J]. Relay, 2004, 32(15): 59-61.
- [27] 任立辉, 樊文东, 程天保. 母线保护中母联死区故障保护逻辑的研究[J]. 继电器, 2006, 34(10): 12-14.
REN Lihui, FAN Wendong, CHENG Tianbao. Research of bus-bar protection's logic on dead-zone fault of coupler[J]. Relay, 2006, 34(10): 12-14.
- [28] 邹瑜, 陈宏元, 李凡红, 等. 220 kV 母线保护系统中母联、分段开关典型死区保护分析[J]. 四川电力技术, 2013, 36(4): 59-61.
ZOU Yu, CHEN Hongyuan, LI Fanhong, et al. The analysis of typical dead-zone fault of bus coupler and section switch in 220 kV bus protection system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2013, 36(4): 59-61.
- [29] 刘枫, 李晓方, 秦莉敏, 等. 针对辐射型电网母联死区故障的保护改进设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 122-124.
LIU Feng, LI Xiaofeng, QIN Limin, et al. Protection improvement design for bus coupler dead-zone fault of radiation grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 122-124.
- [30] 白瑞, 马振国, 张悦. 母联开关死区故障的母线保护动作行为分析[J]. 山西电力, 2014(6): 27-29.
BAI Rui, MA Zhenguo, ZHANG Yue. Bus protection action analysis of bus coupler breakers dead-zone fault[J]. Shanxi Electric Power, 2014(6): 27-29.
- [31] 冯爱元. 母线保护中关于母联单元保护问题的思考[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 213-216.
FENG Aiyuan. Issues on the bus coupler protection of bus protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 213-216.
- [32] 占捷文, 谭凌, 祖连兴. 充电至母联死区保护的研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 168-172.
ZHAN Jiewen, TAN Ling, ZU Lianxing. Research and application of "bus-coupler energizing dead-zone"

- protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 168-172.
- [33] 张太升, 张继武, 刘海洋. 母联充电保护应用分析[J]. 继电器, 2007, 35(3): 69-72.
ZHANG Taisheng, ZHANG Jiwu, LIU Haiyang. Applied analysis of charge protection used by busbar connecting breaker[J]. Relay, 2007, 35(3): 69-72.
- [34] 余锐, 智全中, 宋小舟. 母线充电保护研究及其应用[J]. 继电器, 2006, 34(9): 9-12.
YU Rui, ZHI Quanzhong, SONG Xiaozhou. Research and application of bus bar charge protection[J]. Relay, 2006, 34(9): 9-12.
- [35] 汤大海, 陈永明, 曹斌, 等. 快速切除 220 kV 变压器死区故障的继电保护方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 115-122.
TANG Dahai, CHEN Yongming, CAO Bin, et al. Relay protection scheme of rapid removal of 220 kV transformer fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 115-122.
- [36] 刘枫, 荆秋锋, 邝石, 等. 主变压器中压侧后备保护改进设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 118-120.
LIU Feng, JING Qiufeng, KUANG Shi, et al. Improvement design for main transformer middle-voltage side backup protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 118-120.
- [37] 周立梅. 旁路代 220 kV 主变开关消除保护死区的方法探讨[J]. 继电器, 2002, 30(7): 66-67.
ZHOU Limei. Discussion on eliminating the protection's dead-zone when by-pass circuit breaker replaces the CB of 220 kV main transformer[J]. Relay, 2002, 30(7): 66-67.
- [38] 陈霄, 徐荆州. 电网典型“死区”故障保护动作分析[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(4): 55-57.
CHEN Xiao, XU Jingzhou. Analysis of protection action for typical dead-zone fault[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(4): 55-57.
- [39] 刘沪平, 陈恒祥, 田辉, 等. 复压闭锁引起的变压器后备保护死区分析[J]. 江苏电机工程, 2011, 29(6): 47-50.
LIU Huping, CHEN Hengxiang, TIAN Hui, et al. Analysis of transformer backup protection dead-zone caused by compound voltage locking[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 29(6): 47-50.
- [40] 贺家李, 贺继红, 薛士敏. 变压器纵差动保护死区的分析[J]. 智能电网, 2015, 3(9): 783-787.
HE Jiali, HE Jihong, XUE Shimin. Analysis on longitudinal differential protection dead-zone of transformers[J]. Smart Grid, 2015, 3(9): 783-787.

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-06-30

作者简介:

吴雨(1987-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: hhuwrain@163.com

柯联锦(1988-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: kelianjin1988@126.com

(编辑 张爱琴)