

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191547

放电间隙异常对准稳态情况下 500 kV 母差保护的影响分析

刘怀宇¹, 邓迎君², 陈昊¹, 王建锋¹, 徐晶冉³

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 国网江苏省电力有限公司南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 分析了一起因电流互感器二次接线盒内放电间隙金属片短接引起的保护电流回路缺陷。基于保护电流回路图, 搭建等效电路模型。同时对在准稳态情况下因放电间隙金属片短接所引起的流入 500 kV 母差保护电流分流情况进行基础理论分析。在此基础上结合简化等效电路模型搭建 Pspice 电路仿真模型, 进一步阐释此异常对 500 kV 母差保护装置采样电流的影响。最后结合 500 kV 母差保护逻辑, 在准稳态情况下分析放电间隙异常对 500 kV 母差保护功能的影响。

关键词: 放电间隙; 电流回路; Pspice 仿真; 缺陷; 500 kV 母差保护

Analysis of the influence of 500 kV bus-bar differential protection in a quasi-steady state caused by a discharge gap anomaly

LIU Huaiyu¹, DENG Yingjun², CHEN Hao¹, WANG Jianfeng¹, XU Jingran³

(1. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China;
2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: A protection current circuit defect, which is caused by the short connection of a discharge gap metal sheet in the secondary junction box of a current transformer, is analyzed in this paper. Based on the protection current circuit diagram, the equivalent circuit model is presented. At the same time, the current shunt of 500 kV bus-bar differential protection in a quasi-steady state, caused by the short connection of a discharge gap metal sheet, is analyzed theoretically. On this basis, combined with the simplified equivalent circuit model, a circuit simulation model is built by the Pspice. Then, the influence of this anomaly on the sampling current of a 500 kV bus-bar differential protection device is further highlighted. Finally, combined with the protection logic of 500 kV bus-bar differential protection, the influence of a discharge gap anomaly on 500 kV bus-bar differential protection function is analyzed in a quasi-steady state.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807028).

Key words: discharge gap; current circuit; Pspice simulation; defect; 500 kV bus-bar differential protection

0 引言

随着经济社会的发展,电能的需求量逐年递增,新型设备不断接入电网,对电网系统及其附属设备的可靠性要求越来越高^[1-12]。在 500 kV 电网中普遍使用的电流互感器(CT)承担着一二次电流传变的任务,其性能直接关系到继电保护装置动作的正确性,长期以来是变电检修专业关注的重点^[13-22]。文献^[13-15]研究了电流互感器的二次回路;文献^[16-20]

研究了电流互感器饱和问题;文献^[19-22]研究了保护用电流互感器传变特性。

电流互感器二次绕组通过常规电缆直接接入保护装置存在着高电压侵入保护装置的风险^[23-24],其二次侧输出通过并接放电间隙球这种简单的过压保护来预防该类风险。作为预设绝缘薄弱点的放电间隙能够在正常情况下对地绝缘,当 CT 一二次绝缘击穿等故障情况下,放电间隙首先被击穿,将故障电流泄入大地,从而保证保护装置的安全性。

显而易见,如果放电间隙存在问题,在正常情况下亦出现短接,将导致保护装置电流采样与一次

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807028)

系统电流不一致,在不利情况下,有可能对继电保护装置动作的正确性产生影响。

本文计及放电间隙异常的影响,研究保护电流回路,搭建回路等效电路模型,并进行理论及仿真分析,结合现场实际案例分析了准稳态情况下其对500 kV 母差保护的影响。

1 缺陷概况

检修人员在江苏地区某 500 kV 变电站执行500 kV I 母母差保护更换二次安措过程中发现电流回路 A 相直流电阻值异常,直流电阻现场测量值如表 1 所示。其中直流电阻测量试验是指将 CT 二次电缆从端子排接线处断开,并测量 CT 方向三相二次绕组的直流电阻值。

表 1 缺陷处理前电流回路直流电阻值

相别	A	B	C
直流电阻值/ Ω	1.7	8.9	8.8

经排查,发现 A 相电流回路直流电阻值下降是由于流变 A 相二次绕组放电间隙金属片短接所致。将放电间隙金属片调整为正常的 2 mm 间距,并将其螺丝紧固,再次测量电流回路直流电阻,发现 A 相直流电阻值恢复正常,现场测量值如表 2 所示。

表 2 缺陷处理后电流回路直流电阻值

相别	A	B	C
直流电阻值/ Ω	8.8	8.9	8.8

2 模型搭建及理论分析

第 1 节所述缺陷将引起母差保护保护装置二次 A 相采样电流与一次实际电流不符,为进一步分析其影响程度,可得如图 1 所示的电流回路等效电路模型。图 1 中忽略了电缆电感及分布电容的影响,同时考虑到只讨论其准稳态情况下的影响可将电流互感器等效为电流源。其次每一段电缆等效为电缆电阻与接触电阻串联模型,其中 $R_{eq1}(x=A、B、C)$ 表示断路器保护采样等效电阻值, $R_{eq2}(x=A、B、C)$ 表示母差保护采样等效电阻值, R_{con} 表示放电间隙等效电阻值。由于 B、C 相放电间隙无缺陷,则对应 B、C 相放电间隙等效电阻值可认为是无穷大。

为了便于理论分析,将图 1 电路模型进一步简化为图 2。根据图 2 可以分析得出 I_{con} 与三相电流之间的大小关系,如式(1)所示。

$$I_{con} = \frac{R_{A2} + R_{eqA} + R_N}{R_{con} + R_{A2} + R_{eqA} + R_N} I_A + \frac{R_N}{R_{con} + R_{A2} + R_{eqA} + R_N} (I_B + I_C) \quad (1)$$

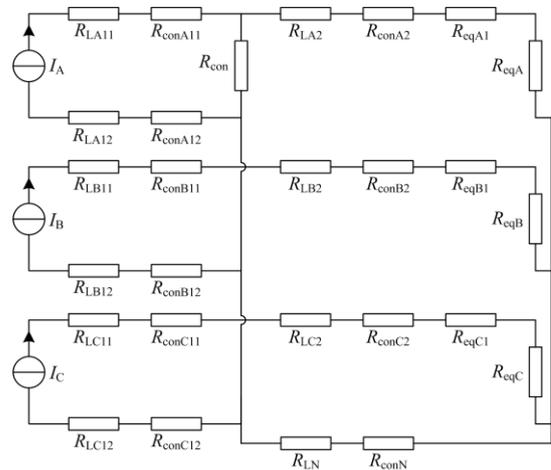


图 1 电流回路等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of current circuit

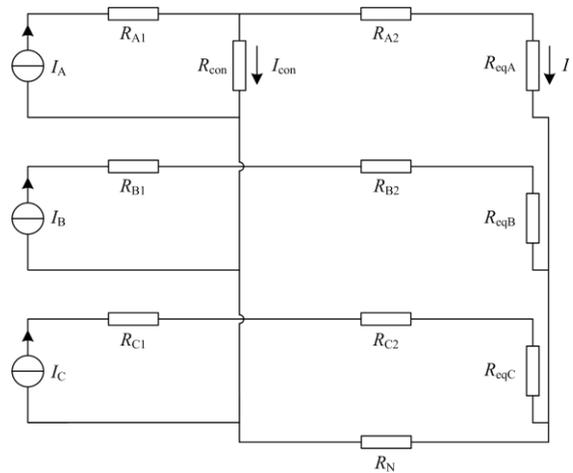


图 2 电流回路简化等效电路模型

Fig. 2 Simplified Equivalent circuit model of current circuit

2.1 正序电流分析

假设三相电流为幅值相同的正序电流,则式(1)可进一步简化为式(2)。此时, I_{con} 仅与 A 相电流大小有关,其中 k 为放电间隙短接之后的分流比。

$$I_{con} = \frac{R_{A2} + R_{eqA}}{R_{con} + R_{A2} + R_{eqA} + R_N} I_A = k g I_A \quad (2)$$

500 kV 变电站电流回路通常采用 4 芯电缆,则可认为 $R_{A2} = R_N$,而保护装置的等效电阻 R_{eqA} 电阻值相比 R_{A2} 可忽略不计,则分流比 k 可表示为式(3)所示的形式,其中 $n = R_{con} / R_{A2} (n \in [0, +\infty))$ 。由此可见,在三相电流为幅值相同的正序电流时分流比 k 最大为 0.5,此时接触电阻 $R_{con} = 0$ 。

考虑到现场实际较难满足这样的条件, n 的一个典型值为 0.1,此时分流比 k 约为 0.476。此时流入保护的电流约为 $0.524I_A$ 。

$$k = \frac{1}{n+2} \quad (3)$$

2.2 零序电流分析

假设 I_A 、 I_B 、 I_C 均流过幅值相同的零序电流时, 则式(1)可进一步化简为式(4)。此时, I_{con} 仅与 I_A 的大小有关。将保护装置的等效电阻 R_{eqA} 电阻值忽略不计, 同时认为 $R_{A2}=R_N$, 则此时分流比 k 可表示为如式(5)所示的形式。由此可见, 在三相电流为幅值相同的零序电流时分流比 k 最大为 2, 此时接触电阻 $R_{con}=0$ 。

$$I_{con} = \frac{R_{A2} + R_{eqA} + 3R_N}{R_{con} + R_{A2} + R_{eqA} + R_N} I_A = k g I_A \quad (4)$$

$$k = \frac{4}{n+2} \quad (5)$$

考虑到现场实际较难满足这样的条件, n 的一个典型值为 0.1, 此时分流比 k 约为 1.905。此时流入保护的电流约为 $0.905I_A$, 其方向与正常的电流 I_A 方向相反。特别地, 当 n 为 2 时, 流入保护的电流为零。

综上所述, 对电流回路进行一定程度上的等效, 对理想电流情况下进行分析可知: 对于正序电流, 放电间隙短接可导致流入保护的 A 相电流幅值减小至约原来的一半, 但电流流向不变; 对于零序电流, 放电间隙短接可导致流入保护的 A 相电流幅值减小至约原来的 0.9 倍, 并且电流流向与原来相反。

3 仿真分析

上述理论分析根据实际情况进行了工程误差范围内的简化, 并且仅讨论了理想情况下, 放电间隙支路对 500 kV 母差保护的分流情况。为了进一步分析其他情况下对母差保护分流情况的影响, 参考图 2 所示的简化等效电路模型, 并基于 Pspice 软件搭建仿真分析模型如图 3 所示。

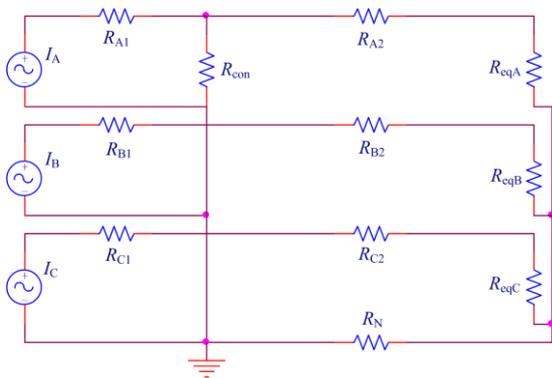


图 3 电流回路 Pspice 仿真模型

Fig. 3 Pspice simulation model of current circuit

根据表 3 所列的参数进行仿真设置, 其中 $R_{con}=0.5$ 、 $R_N=0.8$, 可得出如图 4 所示的仿真波形。由图 4 可知, 当三相电流为对称性正序电流时, 流过保护的电流有效值约为 0.526 A, 这与 2.2 小节的理论分析结果基本吻合。

表 3 Pspice 仿真参数设置表

Table 3 Pspice simulation parameters setting			
相别 x	A	B	C
I_x/A	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$
R_{x1}/Ω	7.2	7.2	7.2
R_{x2}/Ω	0.8	0.8	0.8
R_{eqx}/Ω	0.01	0.01	0.01

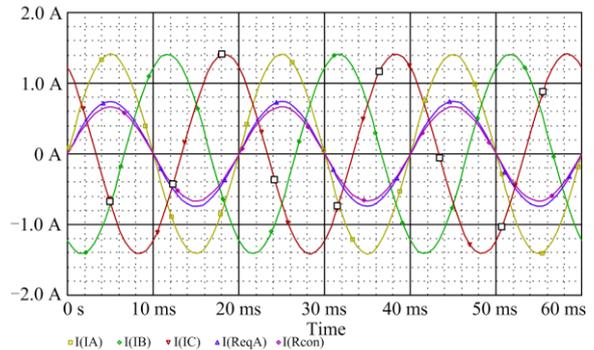


图 4 Pspice 仿真输出波形

Fig. 4 Pspice simulation output waveform

3.1 放电间隙接触电阻对分流比的影响

图 5 所示为分流比随接触电阻值变化曲线。由图可知, 随着接触电阻的不断增大, 分流比不断变小, 当其变得足够大的时候便可等效成放电间隙间距为正常情况, 此时, 分流比可认为为零。同时从图中可以看到, 当接触电阻接近为零的时候, 分流比近似为 0.5。这说明分流比不会因为接触电阻变得很小而使得分流比接近 1, 即二次电流不可能完全都从有缺陷的放电间隙回路流通, 而导致保护装置的采样电流为零。

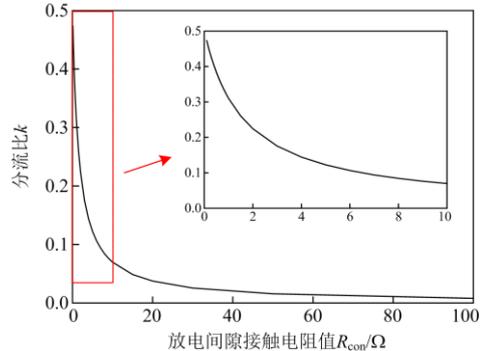


图 5 分流比随接触电阻值变化曲线

Fig. 5 Curve of current shunt ratio with contact resistance

3.2 电缆电阻对分流比的影响

图 6 所示为分流比随电缆电阻值变化曲线。由图可知,随着电缆电阻的不断增大,在放电间隙接触电阻一定的情况下,分流比不断增大,但不能持续增大至 1,只能无限趋近于 0.5。由此可见对于长电缆电流回路,其放电间隙短路对其电流分流情况影响相比短电缆电流回路相对更为严重。

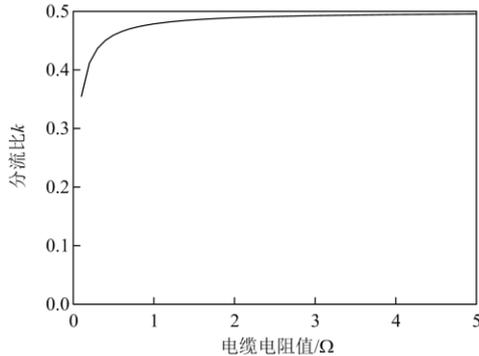


图 6 分流比随电缆电阻值变化曲线

Fig. 6 Curve of current shunt ratio with cable resistance

4 放电间隙异常对 500 kV 母差保护功能影响实例分析

由于放电间隙金属片短接导致一次侧电流无法正确反应至二次侧保护装置,则必然会对保护功能产生影响。这里结合江苏地区某 500 kV 变电站的现场实际,以 500 kV 母差保护为例,讨论放电间隙金属片短接对 500 kV 母差保护的影响。其中 500 kV I 母第一套母差保护实际定值如表 4 所示。类似的分析过程也适用于线路保护、主变保护等其他类型的保护。同时由于在仿真模型搭建过程中,将电流互感器等效为恒流源,未能考虑故障情况下的电流互感器暂态特性,因此这里讨论的只是准稳态情况下放电间隙异常对 500 kV 母差保护的影响。

表 4 母差保护相关定值表

Table 4 Bus-bar differential protection correlation fixed value

定值名称	定值数值
间隔变比	4000/1
差动启动值/A	0.6
比率制动曲线斜率 k	0.5
CT 断线闭锁值/A	0.08
CT 断线告警值/A	0.05

在系统处于正常状态下,由于放电间隙金属片短接,必然导致母差保护装置该间隔电流采样值变小。同样以 A 相缺陷为例,可知在不考虑三相不对称的情况下,只要一次负荷电流达到 422 A(CT 一

次额定值的 10.55%)时,则满足母差保护 CT 告警定值,延时发 CT 断线异常报警信号。当一次负荷电流达到 676 A(CT 一次额定值的 16.90%)时,则母差保护延时发出 CT 断线报警信号,同时闭锁差动保护。在此负荷情况下若发生母差保护区内故障,则差动保护将无法动作跳闸,即该变电站 500 kV I 母将失去主保护,只能依靠各间隔的断路器保护装置的失灵保护作为后备保护隔离母线上的故障。这将导致在该母差保护范围内的所有间隔跳闸,极大地扩大了故障范围,严重影响系统稳定。

对于系统正常状态下负荷较小的间隔,即一次负荷电流小于 676 A,则放电间隙金属片短接所引起的差流不会导致母差保护 CT 断线闭锁。

若此时 I 母发生区外故障^[25-26],该支路流过的电流将会增大,不妨令该支路故障电流为 I_{EF} ,则差动制动电流必然不小于 $2I_{EF}$,而差动电流为 $0.474I_{EF}$ 。则对于表 4 中的比率制动曲线斜率为 0.5 的母线保护,区外故障不会引起母线差动保护动作。若斜率低于 0.237,且 I_{EF} 大于 5 064 A,则在 CT 断线闭锁差动延时之内必然引起区外故障母差保护误动作。考虑极限情况下,即忽略放电间隙接触电阻大小,则可知母差比率制动曲线斜率不低于 0.25 时,在放电间隙金属片短接情况下 500 kV 母差保护不会误动。

若此时 I 母发生区内故障^[23,27-29],则会导致流入母差保护电流回路的差动电流减小。不妨令该支路故障电流为 I_{IF} ,其他支路故障电流的相量和为 ΔI ,则此时的母差差动电流 I_d 为 $0.526I_{IF} + \Delta I$,制动电流 I_r 不小于 $I_{IF} + \Delta I$ 。对于母线区内故障,其所连间隔支路存在故障电流流出母线的可能性,但除任意一故障电流流入母线的支路外,其他所有支路的电流相量和仍然是流出母线方向或者数值为零的可能性甚小,因而可知, ΔI 与 I_{IF} 同相,则可知 I_d/I_r 不小于 0.526。则对于表 4 中的比率制动曲线斜率为 0.5 的母线保护,区内故障差动保护能够正确动作。考虑到极限情况下,即忽略放电间隙接触电阻大小,则母差比率制动曲线斜率不大于 0.5 时,在放电间隙金属片短接情况下区外故障母差保护不会拒动。

5 结论

基于对放电间隙引起的保护电流回路缺陷的理论分析及仿真,研究该缺陷对准稳态情况下 500 kV 母差保护的影响,得出结论如下:

1) 理论分析结果表明,在理想电流情况下,单相放电间隙短接将导致流入保护的故障相正负序电流幅值减小至约原来的一半且流向不变;流入保护的故障相零序电流幅值减小至约原来的 0.9 倍,流

向与原来相反。

2) 仿真分析结果表明, 接触电阻增大分流比减小; 电缆电阻增大分流比增大, 但不能无限增大至 1, 只能无限趋近于 0.5。因而对于长电缆电流回路, 放电间隙距离整定建议在保证过压击穿可靠性的前提下应尽量增大。

3) 准稳态情况下, 对于重负荷线路, 放电间隙缺陷将导致 500 kV 母差保护 CT 断线闭锁差动, 此时若发生母差保护区内故障, 将导致差动保护无法动作跳闸。

4) 准稳态情况下, 对于轻负荷线路, 放电间隙缺陷所引起的分流不足以导致 500 kV 母差保护 CT 断线闭锁差动。忽略放电间隙接触电阻大小, 区外故障时, 母差比率制动曲线斜率不低于 0.25 可使在此缺陷情况下母差保护不误动; 区内故障时, 母差比率制动曲线斜率不大于 0.5 可使在此缺陷情况下母差保护不拒动。

参考文献

- [1] HE Jiahong, GORUR R S. Flashover of insulators in a wet environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1038-1044.
- [2] 陈昊, 邓广静, 王玉荣, 等. 电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 122-126.
CHEN Hao, DENG Guangjing, WANG Yurong, et al. Research on the secondary side problem caused by breaker rear-wiring pattern in reactor interval[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 122-126.
- [3] DING Tao, LI Cheng, YAN Chao, et al. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3803-3813.
- [4] 张友强, 王洪彬, 刁兴华, 等. 计及保护失效的智能变电站二次系统综合风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 155-163.
ZHANG Youqiang, WANG Hongbin, DIAO Xinghua, et al. Integrated risk assessment of intelligent substation secondary system considering the protection failure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 155-163.
- [5] 戴锋, 孙勇军, 田涛, 等. 基于NESSUS的SF6断路器拐臂可靠性分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(1): 215-219.
DAI Feng, SUN Yongjun, TIAN Tao, et al. Reliability analysis of SF6 circuit breaker crank arm based on NESSUS[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(1): 215-219.
- [6] DAS S, ANANTHAN N S, SANTOSO S. Relay performance verification using fault event records[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.
- [7] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [8] 陈昊, 万秋兰, 王玉荣. 基于厚尾均值广义自回归条件异方差族模型的短期风电功率预测[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 91-98.
CHEN Hao, WAN Qiulan, WANG Yurong. Short-term wind power forecast based on fat-tailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 91-98.
- [9] 段军, 谢晔源, 姜田贵, 等. 模块化多电平换流阀可靠性研究与设计优化[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 38-43.
DUAN Jun, XIE Yeyuan, JIANG Tianguai, et al. Reliability research and design optimization of modular multilevel converter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 38-43.
- [10] 杨文丽. 计及可靠性评估的中压配电网规划方案比选[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 13-19, 43.
YANG Wenli. Comparison and selection of MV distribution network planning schemes considering reliability assessment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 13-19, 43.
- [11] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- [12] 李桓宇, 尹峰, 罗志浩, 等. 电力新常态下火电调频优化方法综述[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 1-7, 12.
LI Huanyu, YIN Feng, LUO Zhihao, et al. Optimization methods for frequency modulation of thermal power units under the new normal state: a review[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1): 1-7, 12.
- [13] DRAXLER K, STYBLIKOVA R, RADA V, et al. Using a current loop and homogeneous primary winding for calibrating a current transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(6): 1658-1663.
- [14] RIPKA P, DRAXLER K, STYBLIKOVA R. Measurement of DC currents in the power grid by current transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(1): 73-76.
- [15] 郭自刚, 税少洪, 徐婷婷, 等. 电流互感器二次回路短路导致差动保护动作机理分析[J]. 电力系统自动化,

- 2013, 37(2): 130-133.
- GUO Zigang, SHUI Shaohong, XU Tingting, et al. Mechanism analysis on differential protection action caused by short-circuit fault of current transformer secondary circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 130-133.
- [16] 邢家维, 金能, 林湘宁, 等. 基于小波包变换的电流互感器饱和识别及有效数据运用策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1170-1179.
- XING Jiawei, JIN Neng, LIN Xiangning, et al. A novel strategy of current transformer saturation identification and valid data application based on wavelet packet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1170-1179.
- [17] 翁汉琮, 王胜, 林湘宁, 等. 基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器相位差动保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 132-146.
- WENG Hanli, WANG Sheng, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity based transformer phase differential protection against current transformer saturation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 132-146.
- [18] 段建东, 雷阳, 金转婷, 等. 电流互感器暂态饱和特性的实证分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 207-213.
- DUAN Jiandong, LEI Yang, JIN Zhuanting, et al. Empirical analysis on transient saturation characteristic of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 207-213.
- [19] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSÆIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [20] 李春来, 汤晓宇, 罗坤明, 等. 直流偏磁条件下高精度微型电流互感器的传变特性[J]. 仪表技术与传感器, 2019(5): 124-126.
- LI Chunlai, TANG Xiaoyu, LUO Kunming, et al. Transfer characteristics of high precision micro current transformer under DC bias[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(5): 124-126.
- [21] 申狄秋, 朱明东, 王旭峰, 等. 罗氏线圈电流互感器谐波计量特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 170-176.
- SHEN Diqiu, ZHU Mingdong, WANG Xufeng, et al. Harmonic measurement characteristics of electronic current transformer with rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 170-176.
- [22] 杨忠州, 冯建华, 谢婷婷, 等. 不同原理的保护用电流互感器暂态特性对比分析[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 234-240, 245.
- YANG Zhongzhou, FENG Jianhua, XIE Tingting, et al. Comparative analysis on transient characteristics of protective current transformers with different principles[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 234-240, 245.
- [23] 国家电力调通中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [24] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [25] 戚宣威, 李露, 黄晓明, 等. 区外故障导致变压器电流互感器饱和及差动保护误动问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 44-51.
- QI Xuanwei, LI Lu, HUANG Xiaoming, et al. Study on the CT saturation and mal-operation of the transformer current differential protection during external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 44-51.
- [26] 赵永彬, 景展. 区外故障变压器差动保护误动原因分析与防治[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 95-98.
- ZHAO Yongbin, JING Zhan. Analysis and prevention of transformer differential protection misoperation at out-area fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 95-98.
- [27] 陈昊, 李颖, 张钊, 等. 单相接地故障零序电流增益分析[J]. 现代电力, 2013, 30(5): 46-49.
- CHEN Hao, LI Ying, ZHANG Zhao, et al. Analysis on zero-sequence current gain due to single phase grounding fault[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 46-49.
- [28] 王风光, 杜兴伟, 吕航, 等. 就地化母线保护在电力系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 155-161.
- WANG Fengguang, DU Xingwei, LÜ Hang, et al. Application of local busbar protection in power system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 155-161.
- [29] 黄继东, 倪传坤, 郭文利, 等. 母线差动保护区外转区内故障再动作判据[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 120-124.
- HUANG Jidong, NI Chuankun, GUO Wenli, et al. Re-tripping discrimination of bus differential protection when external fault transforms to internal fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 120-124.

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-02-08

作者简介:

刘怀宇(1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为继电保护及自动装置原理及二次回路; E-mail: liuhuaiyu6@163.com

邓迎君(1975—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站通信技术和保护产品的研发测试; E-mail: zsb_dengyingjun@163.com

陈昊(1980—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: Pingfengma@126.com

(编辑 魏小丽)