

多类型电流互感器混联运行动模测试平台建设及对差动保护的影响

廖文彪, 周泽昕, 詹荣荣, 李岩军, 陈争光, 董明会, 詹智华

(中国电力科学研究院继电保护研究所, 北京 100192)

摘要: 分析线路两侧的多类型电流互感器混联运行特性, 理论推导混联运行的差流表达式, 并分析其影响因素。在此基础上, 研究多类型电流互感器混联运行动模测试方法, 设计6种测试方案, 制作与实际电流互感器等效的P级电流互感器、TPY级电流互感器及电子式电流互感器模型, 并搭建混联运行动模测试平台。基于以上测试平台, 对多类型电流互感器的传递性能差异对比测试, 通过连续两次区外故障时混联运行的比率制动特性及动作轨迹, 分析混联运行对差动保护的影响, 提出相应的改进措施。

关键词: 多类型电流互感器混联运行; 动模测试方法; 测试方案; 动模测试平台

Construction of the dynamic model test platform for hybrid operation of multi type current transformer and its influence on differential protection

LIAO Wenbiao, ZHOU Zexin, ZHAN Rongrong, LI Yanjun, CHEN Zhengguang, DONG Minghui, ZHAN Zhihua
(Relay Protection Research Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper analyzes hybrid operation characteristics of multi type current transformer for both sides of the line, deriving the differential current expression of hybrid operation by theory, and analyzing its influence factors. On this basis, it studies dynamic simulation testing method of hybrid operation of multi type current transformer, designs 6 kinds of testing schemes, makes the equivalent model based on the field of the P-level current transformer, the TPY-level current transformer and the electronic current transformer respectively, and builds the dynamic simulation testing platform of hybrid operation. Based on testing platform above, comparing the transmitting performance difference of multi type current transformer, through the action track and action state of hybrid operation in two successive out of the area fault, it analyzes the influence of hybrid operation on the differential protection and puts forward the corresponding improvement measures.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. DW1600017).

Key words: hybrid operation of multi type current transformer; dynamic simulation testing method; testing schemes; dynamic simulation testing platform

0 引言

为减少互感器不平衡电流对差动保护的影响, 提高差动保护动作的可靠性、灵敏性, 不仅应考虑单个电流互感器是否符合要求, 也要考虑各侧电流互感器的特性相互配合情况, 《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》规定线路两侧或主设备差动保护各侧的电流互感器的相关特性宜一致, 避免在遇到较大短路电流时因各侧电流互感器的暂态特性

不一致导致保护不正确动作。但是在常规变电站智能化改造过程中, 为减少工程量、降低成本, 线路一侧为常规变电站时, 用电磁式电流互感器, 对侧为智能变电站时, 用电子式电流互感器, 会出现不同类型电流互感器混联运行的情况。

目前主要采用数字仿真方法及理论研究电流互感器混联运行对差动保护的影响, 文献[1-2]研究了用于变压器差动保护的ECT与电磁式电流互感器混合运行的特性, 提出检测饱和和措施的方法, EMTDC/PSCAD仿真验证该方法的有效性; 文献[3]研究了电子式互感器及电磁式互感器混用对线路差

动保护的影响,提出了采用差分虚拟制动 CT 饱和和开放的办法,RTDS 仿真验证电子式互感器及电磁式互感器混用对线路差动保护的影响并验证了该方法的有效性;文献[4-7]提出了谐波比、小波变换原理、数学形态学、多项式拟合、人工神经网络(ANN)及波形畸变等各种方法检测饱和并理论分析。但对于多类型电流互感器混联运行的现场适应性问题,尚缺乏动模仿真验证。从以上分析可以看出,目前对于电流互感器混联运行对保护影响的研究主要停留在理论与仿真分析上,虽然稳态下的仿真模型可以获得较高的准确度,但是由于铁芯非线性磁化特性的存在,对铁芯暂态特性的建模往往不能够准确反映电流互感器的传变特性,建立多类型电流互感器混联运行动模测试平台测试其对差动保护的影响显得很有必要。

本文在分析多类型电流互感器混联运行特性的基础上,研究多类型电流互感器混联运行动模测试方法,制作与实际电流互感器等效的电磁式电流互感器(包括 P 级与 TPY 级)和电子式电流互感器模型,并以线路保护为例,搭建多类型电流互感器混联运行(包括电磁式电流互感器混联运行方式及电磁式电流互感器与电子式电流互感器混联运行方式)测试平台,该平台可用于研究多类型电流互感器混联运行对线路差动保护动作特性的影响。

1 多类型电流互感器混联运行特性分析

1.1 电磁式电流互感器混联运行特性分析

多类型电流互感器混联运行系统简化图如图 1 所示。

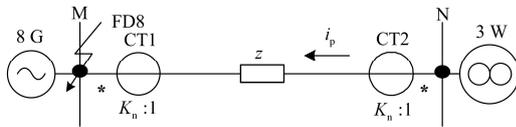


图 1 系统简化图

Fig. 1 System simplified diagram

图中: 8G 为等效发电机; 3W 为无穷大; K_n 为电流互感器额定变比; i_p 为系统一次电流; CT1 电流互感器与 CT2 电流互感器为电磁式电流互感器时,励磁电流分别为 i_{e1} 、 i_{e2} ; 当电子式电流互感器时励磁电流为 0。

电磁式电流互感器存在铁心磁阻,在传变电流的过程中,互感器传变误差是由铁心所消耗的励磁电流引起的,励磁电流公式为^[8]

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \times \left[\frac{T_p}{T_p - T_s} (e^{\frac{t}{T_p}} - e^{\frac{t}{T_s}}) \cos \theta + \frac{\sin \theta e^{\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (1)$$

在短路起始角度 θ 很小时,式(1)右边第一项强制非周期分量绝对值很大,可能出现很大非周期分量。图 1 中,在线路 M 侧 FD8 区外故障时,电磁式电流互感器未饱和,未考虑铁芯损耗,基于线性励磁传变特性,混联差流有

$$i_{op} = \left(\frac{i_p}{K_n} - i_{e2} \right) + \left(-\frac{i_p}{K_n} + i_{e1} \right) \quad (2)$$

根据式(2)简化得混联差流表达式为

$$i_{op} = i_{e1} - i_{e2} \quad (3)$$

根据式(3),电流互感器没有饱和时,差流等于两个电流互感器的励磁电流之差,因此差流很小。当线路 M 侧 CT1 为 P 级电流互感器严重饱和时,式(2)

右边第二项接近 0,且 $\frac{i_p}{K_n} \gg i_{e2}$,混联差流有

$$i_{op} \approx \frac{i_p}{K_n} \quad (4)$$

根据式(4),当线路 M 侧 CT1 为 P 级电流互感器, N 侧 CT2 为 TPY 级电流互感器, CT1 电流互感器严重饱和时,差流很大。

1.2 电磁式电流互感器与电子式电流互感器混联运行特性分析

罗氏线圈电流互感器没有铁芯,不会发生磁饱和,也没有磁滞现象,线性度良好,对暂态电流有优良的线性传递特性^[9-14]。图 1 中,线路 M 侧 CT1 为电磁式电流互感器、N 侧 CT2 为电子式电流互感器,在线路 M 侧 FD8 区外故障时,电磁式电流互感器未饱和,未考虑铁芯损耗,基于线性励磁传变特性,混联差流有

$$i_{op} = \left(\frac{i_p}{K_n} - 0 \right) + \left(-\frac{i_p}{K_n} + i_{e1} \right) \quad (5)$$

根据式(5)简化得混联差流表达式为

$$i_{op} = i_{e1} \quad (6)$$

根据式(6),电磁式电流互感器没有饱和时,差流等于电磁式电流互感器的励磁电流,因此差流很小且大于电磁式电流互感器混联的差流。当线路 M 侧 CT1 为 P 级电流互感器严重饱和时,式(5)右边第二项接近 0,混联差流有

$$i_{op} \approx \frac{i_p}{K_n} \quad (7)$$

根据式(7), 当线路 M 侧 CT1 为 P 级电流互感器, N 侧 CT2 为电子式电流互感器, CT1 电流互感器严重饱和时, 差流很大。

2 多类型电流互感器混联运行测试方法及平台搭建

2.1 测试方法

研究线路电流互感器的混联运行对线路保护影响时, 多类型电流互感器包括 P 级电流互感器模型、TPY 级电流互感器模型及电子式电流互感器模型。其中 P 级电流互感器准确值等级为 5P, 准确限值系数 20, 静态饱和倍数为 5, 一次电流在其额定电流 20 倍以下且满足误差小于 5% 的要求; TPY 级电流互感器的额定对称短路电流倍数 20, 铁芯带小气隙, 在额定准确级范围内满足瞬时最大误差不超过额定二次对称短路电流峰值 7.5% 的要求, 工作循环 100 ms—500 ms—100 ms; 都可模拟现场常见的电流互感器电流比, 如 630/5, 1250/1, 2000/1, 3000/1。电子式电流互感器为 5TPE 级, 在额定一次电流时的采样幅值误差小于 1% 及采样角度误差小于 60 分, 额定准确限值一次电流下的复合误差 5%。

为了模拟工程现场用于线路差动保护不同类型电流互感器混联运行方式及研究不同类型电流互感器混联运行用于对线路差动保护的影响, 本文设计了两类混联运行方式: 1) 电磁式电流互感器混联运行方式; 2) 电磁式电流互感器与电子式电流互感器混联运行方式, 及包括以下 6 种测试方案: A、B、C、D、E 及 F, 其中 A、B、C 分别表示线路两侧都为 P 级电流互感器、TPY 级电流互感器、电子式电流互感器; D、E、F 分别表示 CT1 为 TPY 级电流互感器与 CT2 为电子式电流互感器混联、CT1 为 P 级电流互感器与 CT2 为 TPY 级电流互感器混联、CT1 为 P 级电流互感器与 CT2 为电子式电流互感器混联。其中动模测试方法步骤: 首先, 对录波器配置相应的采样率、电流变比以及录波存储路径, 并给所选择的电流互感器配置相应的模拟量通道; 其次, 对模拟测试平台进行设置故障位置、故障类型以及故障时间; 最后, 对应以上测试方案, 模拟相应的区内外故障, 记录波形并计算差流、比率制动特性及动作轨迹; 测试结果见下文详述。

2.2 测试系统

作为电力系统研究领域成熟和重要的技术手段, 物理动模试验具有实证性强、技术成熟、仿真结果准确、可靠等技术特点^[15-18]。动模测试系统接线见图 2 所示, 动模测试系统的特征在于: 等值发电机组物理模拟单元、无穷大系统物理模拟单元、

变压器物理模拟单元、输电线路物理模拟单元以及多类型电流互感器模拟单元。所述等值发电机组物理模拟单元、无穷大系统物理模拟单元、变压器物理模拟单元及多类型电流互感器模拟单元通过输电线路物理模拟单元连接形成物理动模测试系统示意图如图 3 所示。M 站经 500 kV 双回输电线路与 N 站系统相连。M 站装有 8 G、14 G 共两台发电机组, 总装机容量为 2100 MW; N 站接入一地区等值系统; 输电线路的正序参数: $x_1=0.28 \Omega/\text{km}$, $c_1=0.0135 \mu\text{F}/\text{km}$, $\varphi_1=86^\circ$; 零序参数: $x_0=0.85 \Omega/\text{km}$, $c_0=0.0093 \mu\text{F}/\text{km}$, $\varphi_0=76^\circ$; 每条输电线路的两端均装有容量为 150 Mvar 的并联电抗器。

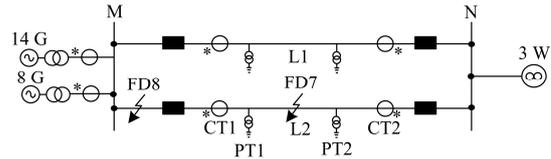


图 2 多类型电流互感器混联运行动模测试系统

Fig. 2 Dynamic test system for hybrid operation of multi type current transformer

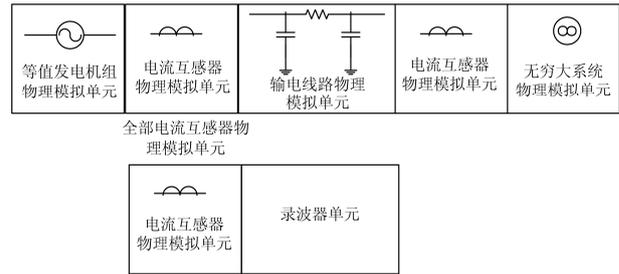


图 3 动模测试系统示意图

Fig. 3 Sketch map of dynamic test system

3 测试结果分析

本文基于动模测试系统, 以线路差动保护为例, 研究多类型电流互感器混联运行对差动保护的差动电流、比率制动特性及动作轨迹的影响。线路差动保护采用二折线比率制动特性, 动作方程为

$$I_{\text{op}} = \begin{cases} 0.24, & I_{\text{res}} < 0.3 \\ 0.6I_{\text{res}}, & I_{\text{res}} \geq 0.3 \end{cases} \quad (8)$$

式中: 差动电流 $I_{\text{op}} = |i_m + i_n|$; 制动电流 $I_{\text{res}} = |i_m - i_n|$; i_m 、 i_n 为线路两侧 CT 二次侧的电流, 规定一次侧电流由母线流入输电线路作为电流的正方向。目前差动保护识别电流互感器饱和的逻辑判据主要有时差法、谐波比法、电流相位及波形畸变等, 对于饱和的识别基于电流互感器饱和的严重程度, 按照规程要求, 在区外故障饱和和时间只要在 5 ms 以上, 现有差动保护装置逻辑判据能正确判断并闭

锁差动保护。当区外故障饱和时间小于 5 ms，差动保护存在误动风险。

3.1 多类型电流互感器传变性能对比测试

如图 2 所示：CT1 为 M 侧配置的电流互感器，CT2 为 N 侧配置的电流互感器；在 FD8 发生区外 AN 金属性故障，故障时间为 100 ms，连续两次区外故障的实际波形如图 4 所示，其中 i_{ma1k} 、 i_{ma2k} 、 i_{ma3k} 分别表示 P 级电流互感器、TPY 级电流互感器及电子式电流互感器的二次侧电流实际波形；电流互感器严重饱和时差动电流及制动电流波形如图 5 所示，其中 I_{op1k} 、 I_{res1k} 分别为差动电流与制动电流；线路两侧电流互感器区外连续两次故障后正常传变时间及最大非周期分量如表 1 所示。如图 4 可知，在 P 级电流互感器未饱和情况下，3 种电流互感器传变性能差异不大；如图 5 可知，区外故障 P 级电流互感器严重饱和时，饱和时间小于 5 ms，且保护可能误动的时间在 10 ms 内。

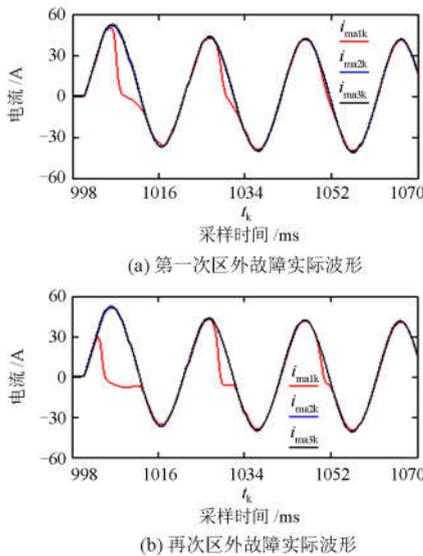


图 4 第一次区外故障、再次区外故障多类型电流互感器二次侧电流实际波形

Fig. 4 Secondary current actual waveform of first external fault and external fault again of multi type current transformer

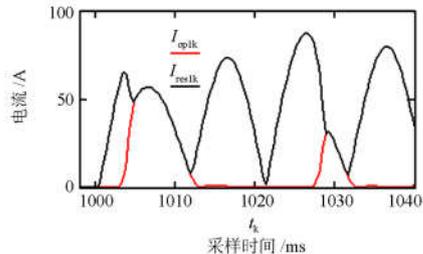


图 5 电流互感器严重饱和时差动电流及制动电流波形

Fig. 5 Waveform of difference current and braking current for current transformer serious saturation

表 1 分析结果

Table 1 Analysis results

电流互感器	故障后正常传变时间/ms		故障后经互感器传变的最大非周期分量/A	
	第一次	再次	第一次	再次
CT1(P 级)	5.6	2.8	16.22	10.60
CT1(TPY 级)	正常传变	正常传变	25.89	26.14
CT1(电子式)	正常传变	正常传变	26.76	27.05
CT2(P 级)	5.6	2.7	-16.20	-10.60
CT2(TPY 级)	正常传变	正常传变	-25.86	-26.12
CT2(电子式)	正常传变	正常传变	-26.76	-27.05

3.2 多类型电流互感器混联运行测试结果分析

对线路两侧采用不同类型电流互感器，当区内故障时，比率制动特性及动作轨迹如图 6 所示。

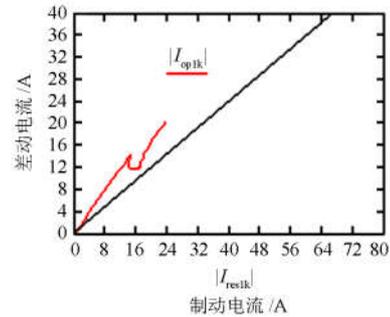


图 6 区内故障线路差动保护比率制动特性及动作轨迹 (一侧为 P 级电流互感器，另一侧为 TPY 级电流互感器或电子式电流互感器)

Fig. 6 Internal fault track and action state for the line differential protection (one side with the P current transformer, and the other side with TPY current transformer or electronic current transformer)

对于非 P 级的混联运行，区内故障时，差动保护能够正确动作；对于有 P 级的混联情况，如果 P 级饱和，区内故障时，差电流与制动电流同时出现且差流较大，仍能够正确动作，如图 6 所示。

在连续两次区外故障后出现差流时间及差流分析，如表 2 所示。表 2 中“无差流”表示差流太小，不存在饱和时间。

表 2 测试结果

Table 2 Simulation results

测试方案	故障后出现差流时间/ms		最大差流/A	
	第一次	再次	第一次	再次
A	无差流	无差流	0.13	0.15
B	无差流	无差流	0.12	0.13
C	无差流	无差流	0.11	0.12
D	无差流	无差流	0.30	0.32
E	8.33	2.6	15.11	20.09
F	8.42	2.5	15.24	20.22

通过表 2 可知: 线路两侧在 A、B、C、D 测试方案下, 连续两次区外故障的差流变化不大且很小, D 测试方案的差流稍大于 A、B、C 测试方案下的差流。线路两侧在 E、F 测试方案下时, 连续两次区外故障的饱和时间及差动电流变较明显, 且差流都较大, 比率制动特性及动作轨迹如图 7 与图 8 所示。因为线路第一次区外故障 P 级电流互感器没有剩磁, 故障后, 励磁磁通逐渐增大, 经过约 8.2 ms, 受非周期分量影响使得励磁磁通大于饱和磁通, 电流进入非线性传递, 因此出现饱和。差流大, 差流出现的时间大于 5 ms, 比率制动特性及动作轨迹如图 7(a)及图 8(a)所示。再次故障, P 级电流互感器存在剩磁, 闭合铁心的 P 级电流互感器剩磁很大, 在剩磁磁通与非周期分量磁通同向, P 级电流互感器出现严重饱和, 电流快速进入非线性传递, 差流较大, 差流出现的时间小于 5 ms, 比率制动特性及动作轨迹如图 7(b)及图 8(b)所示。

由以上测试结果分析可知: 从不同类型电流互感器传变特性可知, 当区内故障时, 能够正确动作; 而在 E、F 测试方案下, 线路第一次区外故障时, P

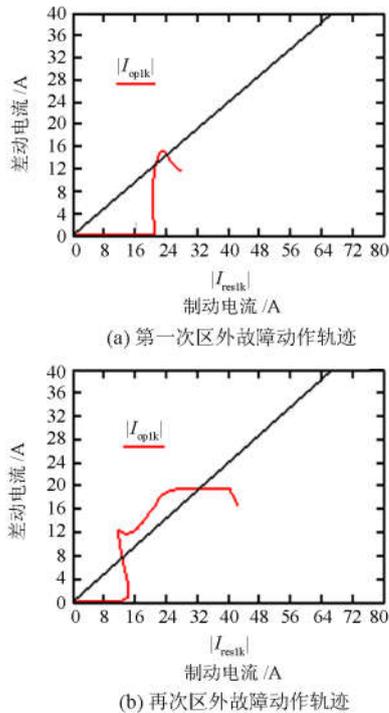


图 7 第一次区外故障、再次区外故障线路差动保护比率制动特性及动作轨迹(一侧为 P 级电流互感器, 另一侧为 TPY 级电流互感器)

Fig. 7 Action track and action state of first external fault and external fault again for the line differential protection (one side with the P current transformer, and the other side with TPY current transformer)

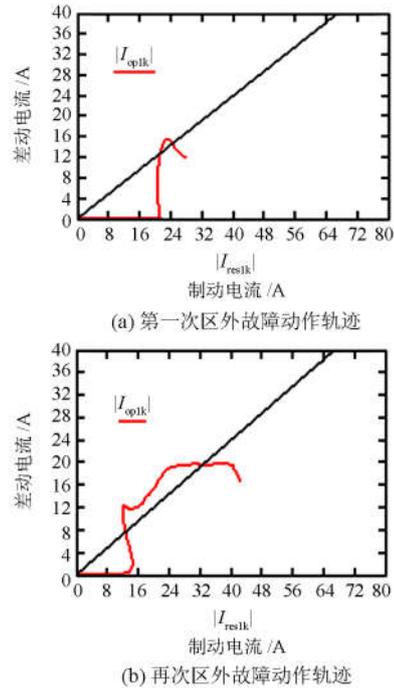


图 8 第一次区外故障、再次区外故障线路差动保护比率制动特性及动作轨迹(线路一侧为 P 级电流互感器, 另一侧为电子式电流互感器)

Fig. 8 Action track and action state of first external fault and external fault again for the line differential protection (one side with the P current transformer, and the other side with electronic current transformer)

级电流互感器在 8.3 ms 后才进入饱和状态, 电流互感器的正常传变时间大于 5 ms, 现有保护装置中基于时差法的饱和判据能够正确区分区内外故障, 差动保护不误动。再次故障时, 电磁式电流互感器在区外故障发生约 2.5 ms 后快速进入饱和状态, 电流互感器的正常传变时间小于 5 ms, 基于时差法的饱和判据可能会失效。从图 5 可以看出, 在最严重饱和的情况下, 保护可能会误动的时间窗接近 10 ms。同时, 通过表 1 可知, 电磁式电流互感器饱和越严重, 其二次电流中的非周期分量将显著降低。因此在电流互感器混联运行情况下, 线路区外故障导致 P 级电流互感器正常传变时间小于 5 ms 而不能判出 CT 饱和时, 若检测到非周期分量变化量大于一定值, 则保护出口固定延时 10 ms 可躲过电流互感器严重饱和的影响。同时, 在变电站改扩建过程中, 为了提高多类型电流互感器混联运行时差动保护动作的可靠性, 在不能避免电流互感器混联运行的情况下, 应尽量采用 TPY 级电流互感器与电子式电流互感器混联的方式, 并尽可能避免出现 P 级电流互

感器与 TPY 级电流互感器或电子式电流互感器混联的情况。

4 结论

本文基于动模实验平台深入研究了电流互感器混联运行对差动保护的影响,通过分析电流互感器混联运行方式下区内外故障差动保护的動作特性,得到如下结论:

1) 当区内故障时,非 P 级的混联运行及 P 级混联运行饱和时,差流与制动电流同时出现且较大,差动保护能够正确动作。

2) 线路两侧同型 P 级电流互感器时,饱和程度基本一致,区外连续两次故障差流变化不大,差流都很小;线路两侧为同型 TPY 级电流互感器或电子式电流互感器时差流很小;TPY 级电流互感器与电子式电流互感器混联运行时差流稍偏大且很小,对差动保护没有影响。

3) P 级电流互感器与 TPY 级电流互感器混联运行或电子式电流互感器混联运行时,第一次区外故障,轻微饱和,差流大,差流出现时间大于 5 ms;再次发生区外故障,P 级电流互感器受到较大短路电流及剩磁与非周期分量共同影响,严重饱和,差流较大,差流出现时间小于 5 ms,差动保护存在误动的风险。

参考文献

- [1] 余祥坤,吕艳萍,杨丽,等.与 ECT 混合用于差动保护的电磁型 CT 的校验方法[J].电网技术,2012,36(10):275-280.
YU Xiangkun, LÜ Yanping, YANG Li, et al. A verification method for electromagnetic current transformers mixedly applied in differential protection with electronic current transformers[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 275-280.
- [2] 殷伯云,罗志娟,杨丽,等.主变差动保护采用不同原理 CT 的仿真研究[J].电网技术,2013,37(1):281-286.
YIN Boyun, LUO Zhijuan, YANG Li, et al. Simulation analysis of power transformer differential protection adopting current transformers based on different principles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 281-286.
- [3] 李旭,黄继东,倪传坤,等.不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):141-145.
LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-145.
- [4] 王志鸿,郑玉平,贺家李.通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J].电力系统及其自动化学报,2000,12(5):19-24.
WANG Zhihong, ZHENG Yuping, HE Jiali. An algorithm to distinguish current transformer's saturation by calculating the harmonics ratio of branch current[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2000, 12(5): 19-24.
- [5] 李贵存,刘万顺,贾清泉,等.利用小波原理检测电流互感器饱和的新方法[J].电力系统自动化,2001,25(5):36-39.
LI Guicun, LIU Wanshun, JIA Qingquan, et al. A new method for detecting saturation of current transformer based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 36-39.
- [6] 郑涛,刘万顺,刘建飞,等.采用数学形态学防止变压器差动保护误动的新方法[J].中国电机工程学报,2005,25(20):6-11.
ZHENG Tao, LIU Wanshun, LIU Jianfei, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for avoiding mal-operation of transformer differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 6-11.
- [7] 张新刚,王泽忠.电流互感器铁心饱和引起二次电流畸变的补偿研究[J].中国电机工程学报,2006,26(3):36-42.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong. Research on compensation of the distortion in secondary current caused by TA saturation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 36-42.
- [8] 电流互感器和电压互感器选择及计算导则:DL/T866—2004[S].
- [9] 王洪彬,唐昆明,徐瑞林,等.数字化变电站电子式互感器渐变故障诊断方法研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):53-58.
WANG Hongbin, TANG Kunming, XU Ruilin, et al. Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 53-58.
- [10] 王涛,张宁,刘琳,等.有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(18):75-80.
WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 75-80.

- 75-80.
- [11] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-65.
JI Hongquan, ZHANG Jian, YANG Yihan, et al. Comment on performance of differential protection taking into account electronic current transducers[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 61-65.
- [12] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.
LUO Sunan, TIAN Zhaobo, ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113.
- [13] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.
- [14] 郭志忠. 电子式电流互感器研究评述[J]. 继电器, 2005, 33(14): 11-14, 22.
GUO Zhizhong. Comment on the research of electronic current transformers[J]. Relay, 2005, 33(14): 11-14, 22.
- [15] 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): 70-78.
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): 70-78.
- [16] 周泽昕, 周春霞, 董明会, 等. 国家电网仿真中心动模试验室建设及继电保护试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 51-55.
ZHOU Zexin, ZHOU Chunxia, DONG Minghui, et al. Construction of dynamic simulation lab in SGCC simulation center and research of protective relay test[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 51-55.
- [17] 周泽昕, 周春霞, 张晓莉, 等. 1000 kV 交流系统动态模拟及继电保护试验研究系列报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [18] 刘焕强. 输电线路参数测量方法的对比分析及现场应用[J]. 电工技术, 2006(9): 15-17.
LIU Huanqiang. Contrast analysis and on-the-spot application of method of measuring electric transmission line parameter[J]. Electric Engineering, 2006(9): 15-17.

收稿日期: 2016-09-14; 修回日期: 2016-12-19

作者简介:

廖文彪(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大电网继电保护技术; E-mail: 1048593969@qq.com

周泽昕(1969—), 女, 博士生导师, 教授级高级工程师, 主要从事继电保护及动态模拟的研究工作;

詹荣荣(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置的研究工作。

(编辑 姜新丽)